

## 国际肥料通讯 第 29 期 2011 年 12 月

*e-ifc* No. 29, December 2011

国际肥料通讯电子杂志 (e-ifc), 季刊, 国际钾肥研究所主办

Electronic International Fertilizer Correspondent (*e-ifc*). Quarterly correspondent from IPI.

## 编者按

亲爱的读者:

我们高兴地看到,在这一期国际肥料通讯电子杂志中我们收录了第五届国际氮素大会 (International Nitrogen Conference) 中国际钾肥研究所主办的“植物营养中的氮钾交互作用”专场的几篇论文。国际氮素大会是由印度氮素联盟 (ING-SCON) 和国际氮协 (INI) 于 2010 年 12 月 3~7 日在印度新德里举办的。

非豆科作物吸收氮素基本上都是  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  两种离子形态。吸收这些氮素使作物生长中干物质氮浓度在 0.5%~6% 之间, 稍低于干物质中钾的浓度 (0.8%~8%)。这些氮素来自于矿质肥料、土壤有机质的矿化、包括硝化作用在内的土壤微生物过程。另外, 环境中活性氮素的增加, 土壤氮素还来自于大气沉降和灌溉水中带来的氮素。

豆科作物固定大气氮素为土壤提供了大量的氮营养, 不仅对当季作物有用, 而且为后续的作物提供了很

好的氮素营养。这些多方面的因素使氮素利用率的计算变得异常复杂。施肥过程管理无疑对提高氮肥利用效率非常重要, 除非有一天通过生物技术育出可以直接利用大气中氮素的“超级非豆科作物”。从这个角度讲, 钾素因为其在促进氮素吸收和转运, 以及在植物蛋白质合成过程中的特殊作用而值得给予特殊的关注。

这一期中来自国家钾肥研究所主持的专场论坛的多篇文章都是与氮钾交互作用提升氮素利用效率有关。Brar 等通过一种引入注目的农学方法讨论了谷物作物中氮钾交互作用这一主题, Cai 等检测了水稻缺乏氮磷钾和镁引起的植物生理和分子反应, Bar Tal 讨论了土壤中的氮钾交互作用。

最后, 我们这期中有一篇文章关注了钾肥生产过程中能耗 (折成等量的温室气体或  $\text{CO}_2$  气体排放量) 的问题。研究表明, 与其他植物养分的生产相比, 钾肥生产引起的温室气体排行是相对较低的。在能耗和温室气体排行成为大家关注焦点的今天, 这种研究为养分高效管理提供了另外一种有价值的工具。

我们相信这期电子杂志能为您提供丰富有趣的内容, 也祝您阅读愉快!

Hillel Magen,  
国际钾肥研究所所长

## 目录

[编者按](#)

## 研究报告

[土壤-植物系统中氮钾交互作用: IPI-INI-ING 在国际氮素大会 \(N2010\) 上共同主办的专场报告会简介](#)

Raghuram, N.

[营养元素钾对谷类作物氮肥利用率的影响](#)

Brar, M.S., Bijay-Singh, S.K. Bansal, Ch. Srinivasarao

[氮、磷、钾和镁缺乏条件下水稻营养分配的改变和相关转运基因的表达](#)

Jin Cai, Lu Chen, Juan Lian, Yibing Hu, Guohua Xu

[营养元素钾对谷类作物氮肥利用率的影响](#)

Brar, M.S., Bijay-Singh, S.K. Bansal, Ch. Srinivasarao

[以色列死海工业公司钾肥生产中的碳足迹计算](#)

Weidberg, R

[学术活动](#)[最新出版物](#)[钾素文献](#)

钾肥生产的能耗是怎么回事? 请参见本期第 29 页有关文章 (Weidberg, R.)。照片拍摄: IPI。

## 研究报告

### 土壤-植物系统中氮钾交互作用： IPI-INI-ING 在国际氮素大会 (N2010) 上共同主办的专场报告会 简介

Raghuram, N.<sup>1</sup>

平衡施钾和植物营养，特别是氮钾的交互作用，是这次第五届国际氮素大会 (N2010) 上 IPI-INI-ING 专场报告会的关注焦点。第五届国际氮素大会 (N2010) 是 2010 年 12 月 3~7 日在印度新德里举办的一次盛会。这次大会主题是“可持续发展的积极的氮素管理—科学、技术和政策”。参加这次会议的有来自全球 36 个国家的 400 多名代表。这次会议的总协调是来自印度自然保护协会的印度氮素联盟 (the Indian Nitrogen Group of the Society for Conservation of Nature) 的 M.S. Sachdev。这个联盟的主席是 Y.P. Abrol，N. Raghuram 任秘书。

氮素循环是对人类改变最大的营养元素循环，它对食品安全、能源、工业、健康、生物多样性、环保和气候变化等都有负面影响。应对这些问题，这次会议有 5 项子主题，即食品安全、生态服务功能与生物多样性、人类健康、能源安全与工业发展、气候变化。另外，还有一个包括所有子议题在内的独立报告单元。

氮和钾、磷等其他营养元素的交互作用是养分综合管理的核心。在食品安全主题下，IPI-INI-ING 组织的“土壤和植物系统中的氮钾交互作用”专题报告会有 3 个口头报告和许

<sup>1</sup>印度自然保护协会秘书和印度氮肥联盟 (ING) 协调员；GGS Indraprastha 大学生物技术学院副教授。Sector 16C, Dwarka, New Delhi 110075, India. 邮箱：[raghuram98@hotmail.com](mailto:raghuram98@hotmail.com)；网址：[www.ipu.ac.in/usbt/btraghuh.htm](http://www.ipu.ac.in/usbt/btraghuh.htm)。



徐国华教授(中国南京农业大学)在印度新德里举办的国际氮素大会(N2010)上 IPI-INI-ING 组织的专场报告会上做报告。徐教授报告的题目是：生物方法提高氮磷利用效率的不同策略。印度政府旱区规划委员会首席执行官 J.S. Samra 教授和国际钾肥研究所主席 H. Magen 先生共同主持了专场报告会。摄影：E. Sokolowski。

多墙报。一个“USD 500”奖授予给这个单元中的最佳墙报作者。

大会正式通过了基于现有知识库、为制定政策和研究方向推荐方案的“德里行动宣言”。这个宣言号召“联合国相关机构，如联合国环境署 (UNEP)、联合国粮农组织 (FAO)、联合国人居署 (UN-Habitat)、世界卫生组织 (WHO)、联合国发展计划署 (UNDP)、联合国气候变化框架公约 (UNFCCC)、生物多样性公约 (CBD)、长期跨国界大气污染公约 (CLRTAP) 及其他地区组织、国家政府、科学团体，包括国际农业磋商小组 (CGIAR)、工业企业、决策者、国际氮协 (INI) 和民间团体，都应该关注养分缺乏，推动提高氮素循环管理每个环节的效率，以减少负面影响。措施应该包括激励机制的建立、全面应用循环技术和确保排放物得到无害化处理...鉴定、交流，以及最优方法的推广应用需要许多方面的通力合作，包括全球层面、区域层面和国家层面的政府部门、科学家、

从业者和决策者等。在联合国环境署的支持下，成立了‘全球养分管理伙伴计划’，受到了各方面的欢迎。”

这篇文章“土壤-植物系统中氮钾交互作用：IPI-INI-ING 在国际氮素大会 (N2010) 上共同主办的专场报告会简介”在 IPI 网站“[区域活动/印度](#)”和“[氮钾交互作用中心](#)”可以找到。

## 不同氮素形态对氮钾交互作用的影响

Bar Tal, A.<sup>(1)</sup>

### 摘要

氮和钾都是作物所需的大量元素。单价阳离子  $K^+$  是钾在土壤中的离子形态，也是作物所能吸收的形态。氮在土壤中有不同的离子形态和非离子形态，但非豆科作物在吸收氮素时容易受到以下两种单价离子的限制：阳离子  $NH_4^+$  和阴离子  $NO_3^-$ 。土壤中可供植物吸收利用的氮源和氮素之间的转换，影响着钾素转化，作物根系对钾的吸收，钾离子在植株体内运输距离的长短以及植物对钾离子的需求。 $NH_4^+$  和  $K^+$  是同价阳离子，具有相似的离子特性，竞争吸附相同的交换性和非交换性土壤颗粒电位。无论是从短期还是从长期来看，氮素形态都会影响着钾素的有效性。从短期来看，土壤溶液中钾离子的浓度会随着  $NH_4^+$  的增加而增加。但有研究表明，从长期来看  $NH_4^+$  会消耗土壤中交换性和非交换性钾。氮的有效性影响着根系表面和细胞膜对钾的吸收。细胞膜吸收钾离子，不仅受到  $NH_4^+$  和  $NO_3^-$  的影响，而且也受到  $K^+$  和  $NH_4^+$  竞争转运体的直接影响，还受到随  $NH_4^+$  同化所产生电位平衡的间接影响。植株根系吸收  $K^+$  随着根际  $NH_4^+$

$NO_3^-$  比率的增加而减少；植株能否吸收远距离  $NO_3^-$  与植株反复利用  $K^+$  有关。 $K^+$  在果实质量方面的影响已被证实取决于氮源。因此，研究  $K^+$  与不同氮素形态之间的相互作用对作物施肥而言具有重要的现实意义。

### 前言

氮和钾都是作物所需要的大量元素和肥料的重要组成部分。最近，Romheld 和 Kirkby (2010) 综述了钾离子在农业中的作用，包括土壤中钾离子的有效性，植株对其的吸收利用，钾素生理学和植株体内钾离子所起到的作用等等。有关作物施肥中氮和钾的交互作用已经有 Milford 和 Johnston (2007) 进行了报道。该项研究主要是为了引起人们关于作物需要充足钾肥的注意，只有充足的钾肥与氮肥配合使用才能获得作物的最佳产量。由于钾在作物中的生理作用，土壤中的钾在作物吸收和对氮的反应中起着积极重要的作用。近来有关在不同氮素供应条件下，作物中钾素的养分含量已有 Zhang *et al.* (2010) 报道。综述了农业生产中作物吸收氮对钾的影响。文章重点讨论了在整个土壤—植株系统中， $NH_4^+$  和  $NO_3^-$  与  $K^+$  之间的交互作用。包括了以下几个方面：氮源的影响；土壤中氮素转化对钾素反应的影响；植株根系对钾素的吸收；钾素在植株体内

运输距离的长短；植株对钾素的反应以及对钾素的需求。

### 土壤中铵与钾的交互作用

钾和氮在土壤中的化学反应，植株吸收利用以及在植株体内所起到的生理作用等方面的主要差别详见表 1。表 1 也对土壤中钾的单价阳离子形态与氮的离子形态和非离子形态进行了对比。表明植株吸收钾的形态是  $K^+$ ，吸收氮的形态是阳离子  $NH_4^+$  和阴离子  $NO_3^-$ 。氮是植株有机分子的重要组成部分，包括氨基酸、蛋白质和核酸。钾作为重要的无机离子，在植株组织中起着重要的生理作用—调节渗透。作物中氮钾形态的差异引起两种元素之间的交互作用或竞争。 $NH_4^+$  和  $K^+$  都是单价阳离子，有着相同的离子半径 ( $2.8A^0$ )。因此，两者竞争吸附交换性和非交换性土壤颗粒电位。所以无论是从短期还是从长期来看，不同的氮素形态都会影响着钾的有效性。

土壤中钾的有效性受到四种形态钾相互转化的影响：矿物钾、非交换性钾、交换性钾和水溶性钾 (Romheld 和 Kirkby, 2010)。水溶性钾和交换性钾在所有土壤中都存在，后者是指吸附在带负电荷粘土矿物和有机质表面的钾离子。固定态钾或非交换性钾仅存在于云母类粘土矿物中 (2:1 型粘土矿物如伊利石、蛭石等) (Romheld 和 Kirkby, 2010; Zhang *et al.*, 2010)。土壤中不同形态的钾均处于动态平衡，它们之间的关系见图 1。土壤溶液钾量非常少，大约占到农作物总需求量的 5% (Mclean and Watson, 1985) 和土壤总钾量的 0.1%~0.2%。尽管如此，土壤溶液钾在钾素循环中起着非常重要的作用 (见图 1)。土壤溶液钾是作物所能吸收的唯一的钾，与交换性钾 (占土壤总钾的 1%~2%)

表 1 比较氮和钾在土壤和植株中的不同性质

性质	氮	钾
土壤—组成	有机物的组成部分，有阴离子和阳离子形态，固体、可溶和气体形态	无机阳离子，土壤矿物的组成部分
土壤—反应	复杂的化学反应，有微生物参与反应	简单的化学反应
植株—吸收机制	吸收两种离子形态： $NH_4^+$ 和 $NO_3^-$	只吸收 $K^+$
植株—生理学作用	蛋白质、核酸和无数有机化合物的重要组成成分	渗透调节剂

<sup>(1)</sup>以色列火山研究中心农业研究所 (ARO)。 [abartal@volcani.agri.gov.il](mailto:abartal@volcani.agri.gov.il)

和非交换性钾（占土壤总钾的1%~10%）处于动态平衡。由于交换性水溶性离子与交换性离子的转化非常快，不到一秒就可完成，所以这些形态是供钾的主要形态(Eick *et al.* 1990; Bar-Tal *et al.* 1995; Sparks 2003)。当土壤溶液中的  $K^+$  被植物吸收或被淋洗，交换性钾便立即转入土壤溶液中，缓效钾则缓慢地释放补充速效钾。土壤中钾的主要形态是矿物钾（90%~98%），如云母和长石，但经风化向土壤溶液释放钾的贡献是微不足道的。土壤微生物提供了钾的另一个来源，每 1g 土壤中含有 2.1~25.4  $\mu g$  钾或占  $NH_4^+NO_3^-$  提取钾的 0.1% (Khan *et al.* 2009)。微生物钾在钾素循环中所起作用并不重要，正如其在氮素循环中一样，这是因为植物组织中最主要的钾形态还是由土壤溶液提供的。

土壤中钾的形态影响着根系对钾的吸收。土壤中钾的多少取决于土壤类型，生产水平，残茬还田量或带走量，钾肥施用或灌溉水的投入。肥料的不平衡施用十分普遍，尤其是偏施氮肥不施钾肥。由于作物收获不断带走钾，改变了土壤中钾素的数量和形态，最终导致钾素亏缺 (Romheld Kirkby, 2010)。土壤中钾的释放和固定取决于土壤中钾的平衡，这些可逆平衡被认为与植株吸收和肥料投入有关 (Bar-Tal *et al.* 1997; Simonsson *et al.* 2007)。在温室试验中，采用盆栽 (3kg 土壤/盆) 种植玉米一个季度，结果显示，对照处理 (无钾肥投入) 的黄土和砂壤分别释放出 2.6mmol/kg 和 1.1mmol/kg 钾 (Bar-Tal *et al.* 1991)。同一试验中，每盆中施入 30mmol 钾，黄土和砂壤土则分别固定了 1.33 mmol/kg 和 1.20 mmol/kg 钾。非交换性钾与初始黄土钾量 7.6 mmol/kg 和砂壤土钾量 1.9 mmol/kg 相比有了很大的变化。

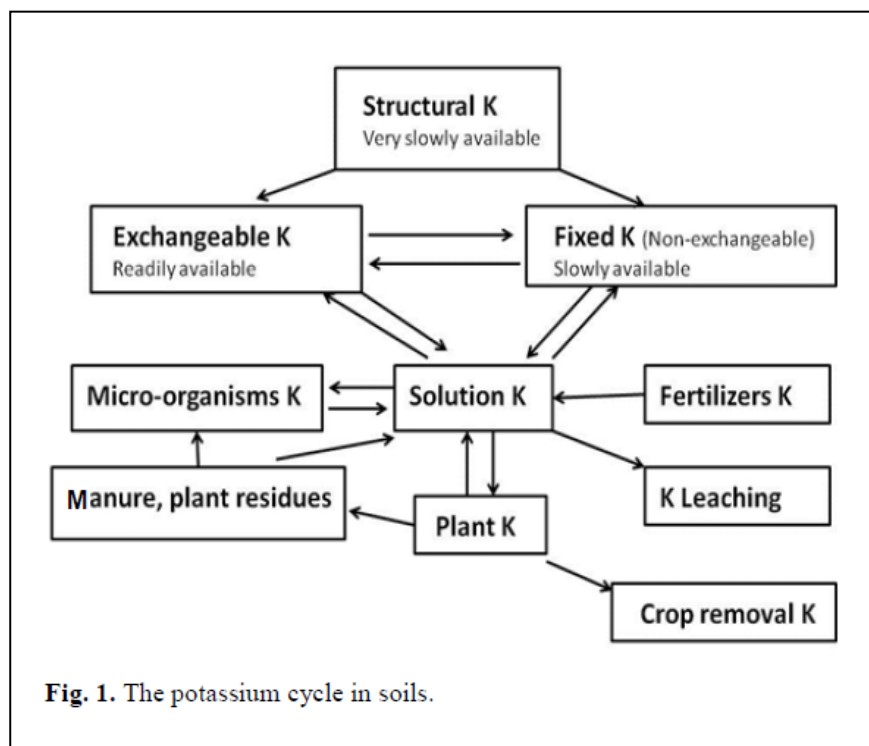


Fig. 1. The potassium cycle in soils.

这可能是因为采用小体积盆可以促进土壤中钾的转化。然而，在大田试验中钾的转换却非常缓慢；甚至需要几年的时间才得以完成转化。由于大田中氮磷钾的不平衡施肥，作物在缺钾情况下所吸收的钾主要来自于非

交换性钾的释放 (Romheld Kirkby, 2010; Lal *et al.* 2007)。而长期盆栽试验由于投入了高量钾肥 (Benbi and Biswas, 1999) 而使得土壤中的固定态钾大幅度提高 (Bar-Tal *et al.*, 1991)。

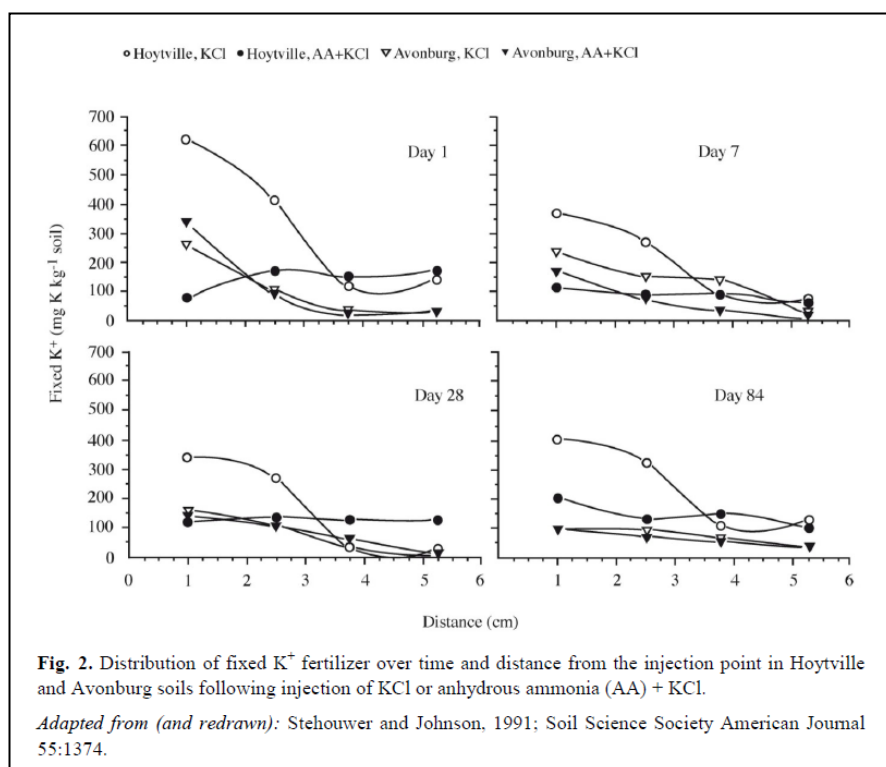


Fig. 2. Distribution of fixed  $K^+$  fertilizer over time and distance from the injection point in Hoytville and Avonburg soils following injection of KCl or anhydrous ammonia (AA) + KCl.

Adapted from (and redrawn): Stehouwer and Johnson, 1991; Soil Science Society American Journal 55:1374.

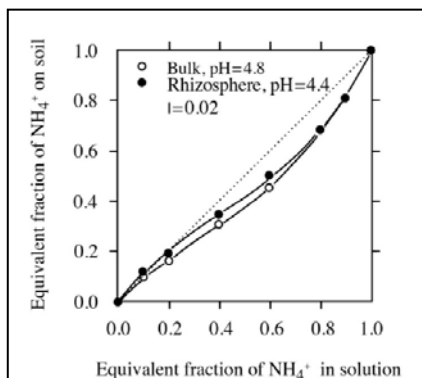


Fig. 3. Exchange isotherm for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-K exchange in bulk soil of peach seedling at solution ionic strength of 0.02. The dotted line is non-preference line.

Adapted from (and redrawn): Chung and Zasoski, 1994; Soil Science Society American Journal 58:1368-1375.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>离子同样也存在于土壤溶液中，易交换也易固定。土壤中不同形态的钾与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>之间同样存在着动态平衡。K<sup>+</sup>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>主要的化学性质差别是，后者在微生物的作用下能被氧化成硝酸盐和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。只有被固定的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>才能相对地不受氧化作用影响，长时间地保持在粘土层间。K<sup>+</sup>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>相似的特性使得它们之间产生了强烈的交互作用。两种离子同样容易被非交换性颗粒和 2:1 型粘土矿物层间边缘所吸附。因此，当施肥增加两种中任意一种离子时，竞争作用就会使该离子替代另一种离子，导致土壤溶液中该离子浓度增加。然而，实际上过程更为复杂，施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>或 K<sup>+</sup>会导致土壤交换性离子库中一种离子的减少和另一种离子的增加。一些例子和相应的解释如下。

向粉砂粘壤土注入液氨和 KCl 溶液可减少 K<sup>+</sup>的固定，增加交换性和可溶性 K<sup>+</sup>的浓度 (Stehouwer Johnson 1991)。K<sup>+</sup>的固定减少是因为土壤优先固定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>而阻断了 K<sup>+</sup>的固定，交换性 K<sup>+</sup>的增加则是因为 K<sup>+</sup>固定减少 (见图 2)，pH 促进了 (主要是有机组分中) 阳离子交换量的增加 (Stehouwer Johnson 1991)。Liu et

al. (1997) 报道在大田试验中，土壤对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>的固定量显著减少是持续多次施用钾肥的原因，而非施用氮肥。Kenan et al. (19996) 也发现，在 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>施用前，施入钾肥减少了 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的固定，而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>减少的这部分与之前固定的钾数量成正比。Chen he MacKenzie (1992) 和 Du et al. (2007) 都认为，K<sup>+</sup>的固定随着钾肥施用次数的增加而提高，而随着 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>施用次数的增加而减少。施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>的先后顺序可能会影响钾的固定。Chen et al. (2007) 通过水稻试验发现，与先施钾肥后施 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的处理相比，先施 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>后施钾肥的处理水稻生长缓慢，植株吸收利用的钾量较少。但是，如果土壤中的氮源是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>，那么氮肥和钾肥施用的先后顺序则对植株生长没有影响。先施氮肥后施钾肥降低钾肥有效性的原因是，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>阻断了非交换钾离子的转化，植株连续消耗交换性钾大大减少了土壤钾量。Evangelous 和 Lumbanraja (2002) 发现粘土蛭石表面的低钾组分会表现出较高的特异性，最终导致粘土层瓦解，晶层间大部分 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>将会被固定。有效的交换性离子与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>结合力较弱。因此，数据显示在蛭石土壤上施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的有效性取决于 K<sup>+</sup>的存在或缺乏。

粘土矿物蒙脱石结构独特，晶层间交换性电荷量大。晶层间距受到交换性水合阳离子大小的影响。交换性阳离子组分的改变影响着晶层间距或粘土膨胀。因此粘土交换电位与 K<sup>+</sup>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的强结合力，使得从蒙脱石到伊利石对两种离子的固定作用逐渐增强。从蒙脱石转化到伊利石需要上千年的成土作用或地质作用才能完成。从地质学角度出发，温度在转化过程中的作用十分关键，需要 50°C 到 60°C。在过去的几十年间新研究发现，在土壤日常耕作和常温环境条件下，短时间内也可发生蒙脱石到伊利石的转化。实验室干湿交替试验证实了快速转化的可能性 (Eaberl et al. 1986 和 1993)。Sandler 和 Harlavan (2006) 认为，即使没有干湿交替，高浓度钾也会导致两者之间的快速转化。在干湿交替的条件下开展 K<sup>+</sup>和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>固定试验，发现两种离子从最初的蒙脱石到伊利石化的过程十分相似 (Miklos Cicel 1993)。大田试验施用无机钾肥和粪肥，研究从蒙脱石到伊利石的转化已有 Pernes Debuyser et al. (2003) 报道。实验室试验表明，一个生长季的转化量是可测量的 (Barre et al. 2007a, 2007b, 2008)。由于农事活动造成晶层间钾快速释放和伊利石粘土分解的研究已有报道。最典型的

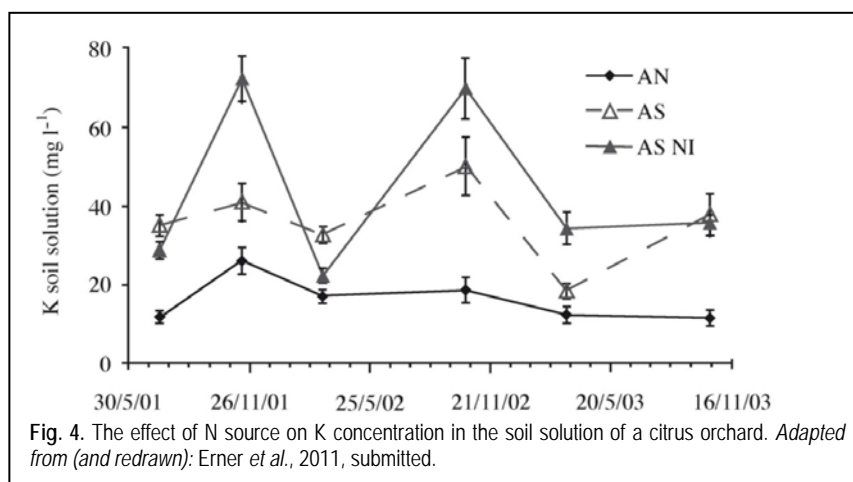
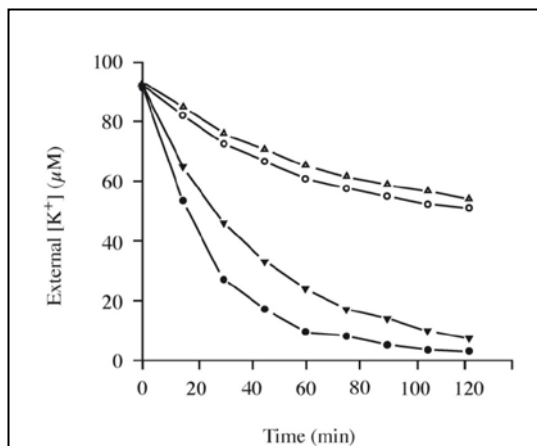


Fig. 4. The effect of N source on K concentration in the soil solution of a citrus orchard. Adapted from (and redrawn): Erner et al., 2011, submitted.



**Fig. 5.** Effects of  $\text{NH}_4^+$  on high affinity  $\text{K}^+$  uptake in plants grown with or without  $\text{NH}_4^+$  in the absence or in the presence of NaCl.

Adapted from (and redrawn): Nieves-Cordones *et al.*, 2007; Plant Science 172:273-280.

After  $\text{K}^+$  starvation for seven days,  $\text{K}^+$  depletion experiments were performed in the absence of  $\text{NH}_4^+$  (closed symbols) or in the presence of 1 mM  $\text{NH}_4^+$  (open symbols). One group of plants received the NaCl treatment (50 mM final NaCl concentration) (triangles) and the other remained in the NaCl free solution (circles).

是水稻田，因干湿交替频繁使得钾素极易被淋失，导致土壤钾量在 30 年间产生非常大的变化 (Li *et al.* 2003)。连茬种植玉米几十年会导致土壤中伊利石的分解，但在同样施肥处理的条件下，玉米—燕麦—干草轮作中却未发现这一变化。

有关  $\text{K}^+$  和  $\text{NH}_4^+$  会被相同交换性电位所吸附已有许多报道。从图 3 (Chung Zasoski 1994) 实验室交换等温线可以看出， $\text{K}^+$  略高于  $\text{NH}_4^+$ 。同样说明，在缓冲溶液和根际  $\text{K}^+$  和  $\text{NH}_4^+$  的交换等温线趋势相同，不受土壤溶液 pH 和离子强度的影响。因此，土壤溶液  $\text{NH}_4^+$  的浓度对  $\text{K}^+$  在土壤溶液、复杂交换中的分布，有着直接的、强烈的影响，反之亦然。当土壤中含有其他离子时，情况就会变得更为复杂。Evangelou 和 Lumbanraja (2002) 探究  $\text{K}^+$ - $\text{NH}_4^+$ - $\text{Ca}^{2+}$  在蛭石和水化蛭石上的交换。在蛭石试验中，仅靠两种离子的交换数据不能预测

第三种离子的交换数据。但在水化蛭石试验中却发现，只要第三种离子在交换体系和溶液等温线中保持稳定，就可以用两种离子的交换数据预测第三种离子的交换数据。Liu *et al.* (1997) 发现施用  $\text{K}^+$  促进了  $\text{NH}_4^+$  的固定，但减少了粘土矿物表面交换性  $\text{NH}_4^+$  的数量。Wang *et al.* (2010) 采用培养试验，研究在中国不同类型土壤上施用硫酸铵后土壤中钾的变化，发现施用硫酸铵极大地改变了土壤中原有钾和添加钾的分布。除含有大量 2:1 型粘土矿物的水稻土外，在绝大多数土壤中，施用硫酸铵显著地增加了水溶性  $\text{K}^+$ ，减少了交换性  $\text{K}^+$ 。土壤中添加了  $\text{K}^+$  时，施用硫酸铵

可减少土壤中固定态  $\text{K}^+$  的形成；在没有添加  $\text{K}^+$  的三种土壤中，施用硫酸铵则抑制了固定态  $\text{K}^+$  的释放。

氮源可显著地影响根际土壤 pH 值 (Nye, 1981; Marschner, 1995; Marschner Römheld 1996; Bar-Yosef, 1999; bloom *et al.* 2003)。常见的氮肥有尿素、铵态氮肥和硝态氮肥。尿素是最便宜的氮肥，也是氮浓度最高的氮肥 (46%)。由于尿素具有高溶解性，易随灌溉水移动，因此广泛地应用于农业生产。尿素水解产生  $\text{NH}_4^+$ ，所以尿素也是植株所需  $\text{NH}_4^+$  的来源。由于土壤快速吸附和硝化作用消耗了土壤、基质和根际中的  $\text{NH}_4^+$ ，所以，即使采用高比例的铵态氮/硝态氮水进行灌溉，土壤中的  $\text{NH}_4^+$  浓度也常常很低。

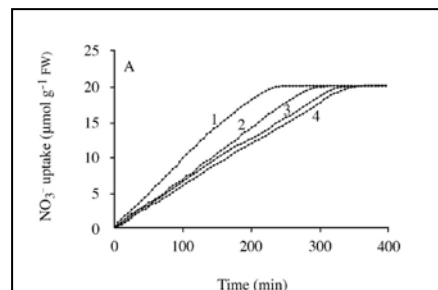
大田中  $\text{NH}_4^+$  转化成为  $\text{NO}_3^-$  的过程非常快，在几天到几周的时间就可以完成，转化速度取决于温度、土壤湿度和 pH。因此，在大多数的施肥

方式中，氮的形态可能对交换性钾和土壤溶液钾的分布并不会产生很大的影响。但当持续灌溉施肥，湿土中的氮源就会影响土壤溶液中钾的浓度，这一结论已被一些研究所证实。比如，灌溉期间，柑橘果园中土壤溶液中  $\text{K}^+$  的浓度随着施用硫酸铵而增加，而随着施用硝酸铵而下降 (图 4 Erner, 2011, 未发表)。施用硫酸铵时，使用硝化抑制剂会扩大对  $\text{K}^+$  浓度的影响，表明肥料是通过  $\text{NH}_4^+$ - $\text{K}^+$  交换过程对钾浓度产生影响的。

另一个关于氮源影响钾有效性和淋失的机制，是专门适用于干旱和半干旱地区的石灰性土壤。在含碳酸盐的土壤中施用铵态肥所产生的酸，会导致土壤溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度的升高，而  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  交换就形成了高  $\text{K}^+$  土壤溶液 (Kolahchi Jalali 2007 未发表)。

#### 植株体内钾与氮的交互作用

氮是独一无二的营养元素，植株吸收的氮素形态，既可以是  $\text{NH}_4^+$  也可以是  $\text{NO}_3^-$  (Marschner 1995)。而这一性质，通常会影响着植株体内养分和其他以离子态被作物吸收利用并参与生理过程的元素吸收 (Marschner, 1995; Forde, Clarkson, 1999; Mengle, Kriby,



**Fig. 6.** The time course of  $\text{NO}_3^-$  uptake by maize seedlings from solutions, containing  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{K}^+$  (1);  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$  (2);  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Na}^+$  (3);  $\text{Ca}^{2+}$  (4) as accompanying cations.

Adapted from (and redrawn): Ivashikina & Feyziev, 1998; Plant Science 131:25-34.

2001; Epstein, Bloom, 2005)。植株组织中的阳离子—阴离子平衡靠扩散的和非扩散的有机无机离子所维持,有研究表明氮源显著地影响着这一平衡(Marschner, 1995; Mengle, Kriby, 2001; Epstein, Bloom, 2005)。植株体内  $\text{NH}_4^+$  离子和  $\text{NO}_3^-$  离子对阴阳离子的影响,已有广泛报道。 $\text{NH}_4^+$  离子抑制植株对其他阳离子的吸收,尤其是植株叶片和叶柄部位,而  $\text{NO}_3^-$  离子则减少了植株对其他阴离子的吸收(Kirkby, Mengel, 1967)。

氮素通过以下三种机制来强烈地影响土壤根际环境和根际 pH 值(Marschner, 1995; Marschner, Romheld, 1996; Bar-Yosef, 1999):

(1) 替换土壤固体所吸附的  $\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$ ; (2) 硝化作用/反硝化作用; (3) 吸收  $\text{NH}_4^+$  或  $\text{NO}_3^-$  时,根部分别释放或吸收  $\text{H}^+$ 。机制 1 和机制 2 的发生与植株生理活动无关,却对灌溉施肥的基质整体都有影响。但植株吸收养分的过程却直接影响着机制 3, 机制 3 对土壤 pH 值影响较大,是因为该机制只能影响根际附近有限的范围(Moorby, 1984; Gahoonia, Nielsen, 1992; Gahoonia, 1992; Maeschner, Romeld, 1996; Taylo, Bloom, 1998; Bloom et al. 2003)。上述三种机制所能影响 pH 的程度,受到土壤性质、植株生理活动和所有影响硝化速率环境因素的影响。

### 钾素吸收的膜运输和在植物体内的长距离运输

细胞膜中养分元素的选择性运输主要受到转运体的调控(Hirsh, 1998)。植株吸收钾的两种主要膜运输系统是:高亲和  $\text{K}^+$  吸收转运系统 HATS 和低亲和  $\text{K}^+$  吸收转运系统 LATS (Maathuis, 2007; Maathuis, Sanders, 1997;

Nieves-Cordones, 2007)。当外部  $\text{K}^+$  浓度较低时 ( $<1\text{mM}$ ), 高亲和  $\text{K}^+$  吸收转运系统起主导作用;然而当外部  $\text{K}^+$  浓度较高时 ( $>1\text{mM}$ ), 低亲和  $\text{K}^+$  吸收转运系统 LATS 通过离子渠道起主导作用(Maathuis, Snaders, 1997; Hirsh, 1998)。在过去的二十年里,  $\text{K}^+$  转运体的复杂系统和基因编码已经得到确认(Szczerba, 2009)。

$\text{NH}_4^+$  会抑制高亲和  $\text{K}^+$  吸收转运系统,而低亲和  $\text{K}^+$  吸收转运系统则对  $\text{NH}_4^+$  相对不敏感(Hirsh, 1998; Nieves-Cordones, 2007 和其他, 详见图 5)。另一方面,当外部  $\text{K}^+$  浓度较高时,吸收  $\text{NO}_3^-$  的作物在调控细胞内  $\text{K}^+$  浓度方面优于吸收  $\text{NH}_4^+$  的作物(Szczerba, 2006)。

单价阴离子  $\text{NO}_3^-$  可作为  $\text{K}^+$  的反号离子,反之亦然(Abdolzadeh, 2008; Guo, 2007; Jarvis, 1990; Lu, 2005; Mathuis, 2007; Pettersson, 1984)。Ivasshikina 和 Feyziev (1998) 发现,与施用  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  等主要离子相比,当配合施用反号离子  $\text{K}^+$  时,玉米幼苗能更快地吸收  $\text{NO}_3^-$  (图 6)。生长在  $\text{K}^+$  亏缺营养液中的甘蔗幼苗减少了对  $\text{NO}_3^-$  的吸收(Subasnghe 2006)。而生长在氮素亏缺营养液中的甘蔗幼苗则降低了  $\text{K}^+$  初始吸收速率和对  $\text{K}^+$  的亲合力。

因为钾离子不被有机化合物吸收同化,所以钾素在植株体内具有较强的移动性。和其他阳离子一样,钾离子通过木质部从根系直达植株顶端,但其在韧皮部也有非常强的移动性,因此通过韧皮部钾离子再转移的程

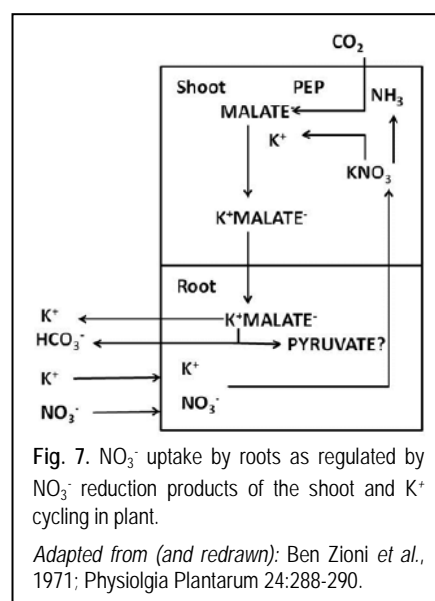


Fig. 7.  $\text{NO}_3^-$  uptake by roots as regulated by  $\text{NO}_3^-$  reduction products of the shoot and  $\text{K}^+$  cycling in plant.

Adapted from (and redrawn): Ben Zioni et al., 1971; *Physiologia Plantarum* 24:288-290.

度很高(Marschner, 1995)。钾素的吸收和转移在  $\text{NO}_3^-$  从根部运输到顶部的过程中起着非常重要的作用(Maathuis, 2007)。有关钾素循环和  $\text{NO}_3^-$  吸收的概念性模型由 Ben Zioni 在 1971 年提出。根据这个模型,当  $\text{K}^+$  为反号离子时,  $\text{NO}_3^-$  被根系吸

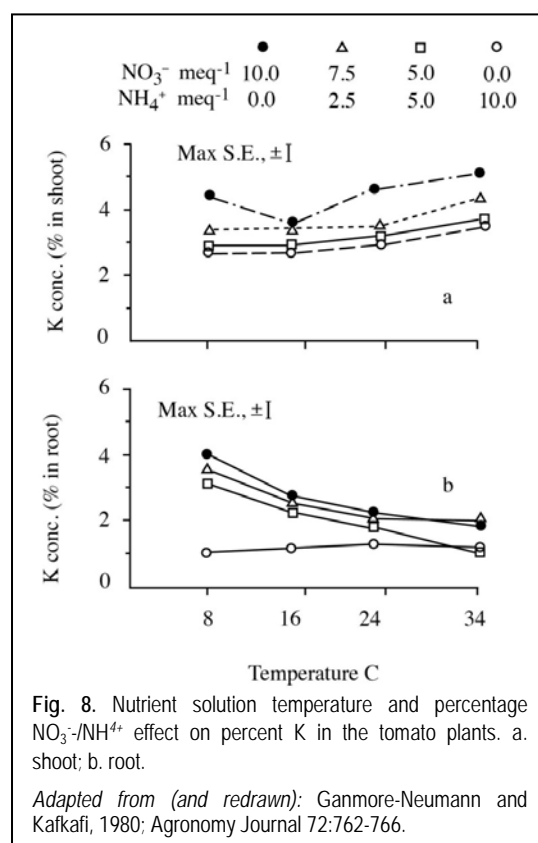


Fig. 8. Nutrient solution temperature and percentage  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  effect on percent K in the tomato plants. a. shoot; b. root.

Adapted from (and redrawn): Ganmore-Neumann and Kafkafi, 1980; *Agronomy Journal* 72:762-766.

收, 通过木质部运输至顶端。在植株顶端,  $\text{NO}_3^-$  因被同化形成有机化合物而减少, 而  $\text{K}^+$  与产生的苹果酸通过韧皮部被运输至根部 (见图 7)。然后根系吸收更多的  $\text{NO}_3^-$ , 并根据植株内部和外部钾离子浓度和氮素形态, 分泌出  $\text{HCO}_3^-$  或吸收更多的  $\text{K}^+$  来维持电中性。植株吸收钾素的速率和分配能否调整, 取决于氮素的形态。与  $\text{NO}_3^-$ -N 处理相比, 仅施  $\text{NH}_4^+$ -N 会减少烟草 (Lu 2005) 和番茄 (Ganmore-Neumann, Kafkafi, 1980) 对钾素的吸收。在烟草作物中, 与  $\text{NO}_3^-$ -N 处理相比, 单施  $\text{NH}_4^+$ -N 会使得更多钾素在叶片中被转移。作为比较, Ganmore-Neumann 和 Kafkafi (1980) 报道, 随着  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  比率的增加, 番茄植株根部和叶片中钾离子浓度也相应增加 (见图 8), 与  $\text{NO}_3^-$  浓度低的处理相比,  $\text{NO}_3^-$  浓度高的处理中番茄植株能吸收和转移更多的 ( $^{86}\text{Rb}$ )  $\text{K}^+$ , 这一结论与多数学者所得结论一致 (Pettersson, 1984; Zsoldos, 1990)。Ganmore-Neumann 和 Kafkafi (1980) 还发现, 当温度从  $8^\circ\text{C}$  上升至  $34^\circ\text{C}$  时, 植株根部钾含量逐渐减少, 而顶部钾含量逐渐增加, 这是因为升温促进了钾素向植株顶部的运输 (见图 8)。Engles 和 Krikby (2001) 认为, 随着植株新梢生长率不断提高,  $\text{K}^+$  的循环和再利用也在不断增加, 这一结论与 Ben Zioni (1971) 提出的概念性模型相符合。细胞内  $\text{K}^+$  浓度在 40 和 200mM 之间变化, 取决于  $\text{K}^+$  的供给和氮素的形态 ( $\text{NO}_3^-$  还是  $\text{NH}_4^+$ ), 表明了不同氮素形态对植株体内钾素动态变化有着重要影响。

#### 对整株植物、作物产量和质量的影响

氮素形态是影响植株生长发育和产量的重要因子。已有很多研究报

道, 增加氮肥中  $\text{N}-\text{NH}_4^+ : \text{N}-\text{NO}_3^-$  比例可减少植株对  $\text{K}^+$  和其他矿质阳离子的吸收, 但能增加番茄和其他作物对矿质阴离子的吸收 (Krikby, Mengel, 1967; Ganmore-Neumann, Kafkafi, 1980)。Bar-Tal (2001b) 表明增加  $\text{N}-\text{NO}_3^- : \text{N}-\text{NH}_4^+$  比例, 从 0.25 增加至 4.0, 植株对  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  的吸收呈二次方增长 (见图 9)。

营养液中  $\text{K}^+$  的亏缺促进了植株对  $\text{NH}_4^+$ -N 的吸收, 但是相比之下抑制了对  $\text{NO}_3^-$ -N 的吸收、运移和同化, 同时降低了叶片中硝酸盐还原酶的活力 (NRA)。因此, 在同化  $\text{NH}_4^+$ -N 时, 植株需要足够的钾用于吸收  $\text{NO}_3^-$ -N 和维持高活力的 NRA (Ali, 1991)。 $\text{K}^+$  能激活参与  $\text{NH}_4^+$  同化的酶活性和氨基酸的运移 (Hagin, 1990)。所以, 当同时使用两种形态的氮肥时, 提供充足的  $\text{K}^+$  可提高  $\text{NH}_4^+$  的利用率, 增加作物产量。已有报道证实钾能促进果实中羧酸的累积 (Erner, 1993)。这是因为, 作物吸收利用大量的  $\text{K}^+$  能促进植株组织中阴阳离子平衡, 为了维持电荷中性, 植株合成羧酸 (Marschner, 1995)。为了移除因  $\text{NO}_3^-$  减少而产生的氢氧根, 平衡多余积累的阳离子, 吸收  $\text{NO}_3^-$  也能促进植株组织中羧酸的产生 (Marschner, 1995)。所以,  $\text{K}^+$  和  $\text{NO}_3^-$  对植株叶片和果实中有机酸合成物具有相同的影响 (Serna, 1996)。

$\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^-$  比率

是氮素管理的重要调控因子, 尤其是无土栽培 (Silber, Bar-Tal, 2010) 和水肥一体化中氮素的管理 (Bar-Yosef, 1999)。这是因为氮的用量, 灌溉制度,  $\text{N}-\text{NO}_3^- : \text{N}-\text{NH}_4^+$  比率影响着钙、镁和钾的吸收 (Bar-Tal, 2001a,b; Krikby, Mengel, 1967; Neilsen, 1995), 以及羧酸的生理合成 (Kirkby, Mengel, 1967; Mengel, Kirkby, 2001)。但是, 新近有关氮源对葡萄柚的影响研究发现, 氮素对果实质量和果实酸度没有影响 (Erner 2011, 未出版)。有关这一结论可能的解释是: 植物体内  $\text{NH}_4^+$  发生两种复杂而界限不那么清晰的影响, 一方面较高浓度的  $\text{NH}_4^+$  会增加土壤溶液中的  $\text{K}^+$  的浓度 (图 4), 而另一方面  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{K}^+$  之间的竞争减少了植株对  $\text{K}^+$  吸收。

#### 结论

氮素形态和钾肥施用模式, 短期内通过离子交换作用, 长期通过土壤固定反应, 影响土壤中钾素的有效

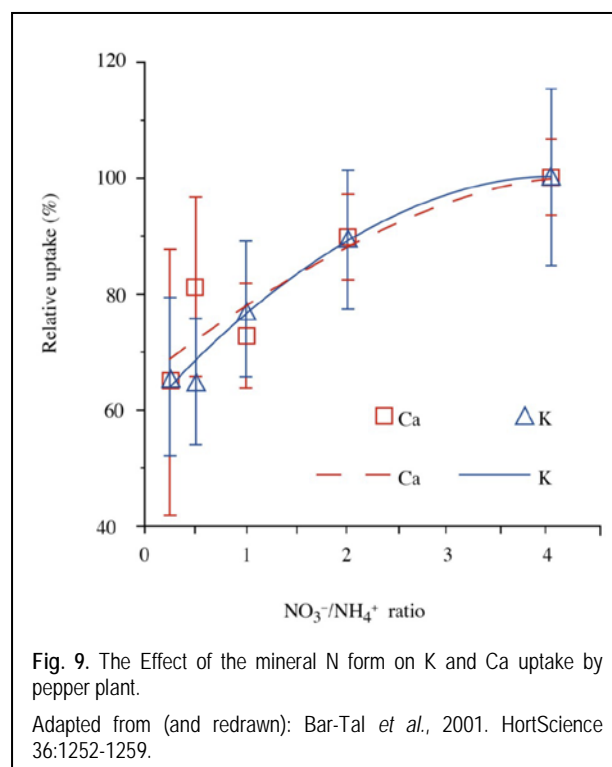


Fig. 9. The Effect of the mineral N form on K and Ca uptake by pepper plant.

Adapted from (and redrawn): Bar-Tal *et al.*, 2001. HortScience 36:1252-1259.



性。氮素形态通过以下几种机制影响植株对钾素的吸收： $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{K}^+$ 的竞争， $\text{K}^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ 的长距离运输，氮素参与新陈代谢与钾素吸收的相互影响。

综上所述所描述的各种效应的最终结果是，氮素形态和 $\text{K}^+$ 施用之间的交互作用使作物整体产生效应和影响产量。

适宜的 $\text{K}^+$ 施用可以提高氮肥有效性，增加作物产量，减少环境污染。

为了更好地理解N和K对植株有效性的长期影响，必须开展有关土壤粘土矿物固定 $\text{K}^+$ 和 $\text{NH}_4^+$ 机制的深入研究，为了提高氮肥和钾肥使用的有效性，需要进一步深化有关 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ 在分子和植株水平下三者交互作用的研究。

#### 参考文献

- Abdolzadeh, A., K. Shima, H. Lambers, and K. Chiba. 2008. Change in Uptake, Transport and Accumulation of Ions in *Nerium oleander* (Rosebay) as Affected by Different Nitrogen Sources and Salinity. *Annual Botany* 102:735-746.
- Ali, A.A., M. Ikeda, and Y. Yamada. 1991. Effects of the Supply of K, Ca, and Mg on the Absorption and Assimilation of Ammonium-Nitrogen and Nitrate-Nitrogen in Tomato Plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 37:283-289.
- Barré, P., B. Velde, and L. Abbadie. 2007a. Dynamic Role of "Illite-Like" Clay Minerals in Temperate Soils: Facts and Hypotheses. *Bio-geochemistry* 82:77-88.
- Barré, P., B. Velde, N. Catel, and L. Abbadie. 2007b. Soil-Plant Potassium Transfer: Impact of Plant Activity on Clay Minerals as Seen from X-Ray Diffraction. *Plant and Soil* 292:137-146.
- Barré, P., B. Velde, C. Fontaine, N. Catel, and L. Abbadie. 2008. Which 2:1 Clay Minerals are Involved in the Soil Potassium Reservoir? Insights from Potassium Addition or Removal Experiments on Three Temperate Grassland Soil Clay Assemblages. *Geoderma* 146:216-223.
- Bar-Tal, A., B. Aloni, L. Karni, J. Oserovitz, A. Hazan, M. Itach, A. Avidan, I. Posalski, and R. Rosenberg. 2001a. Nitrogen Nutrition of Greenhouse Pepper: I. Effects of Nitrogen Concentration and  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  Ratio on Yield, Fruit Shape, and the Incidence of Blossom-End Rot in Relation to Plant Mineral Composition. *HortScience* 36:1244-1251.
- Bar-Tal, A., B. Aloni, L. Karni, J. Oserovitz, A. Hazan, M. Itach, A. Avidan, I. Posalski, and R. Rosenberg, R. 2001b. Nitrogen Nutrition of Greenhouse Pepper: II. Effects of Nitrogen Concentration and  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  Ratio on Growth, Transpiration, and Nutrient Uptake. *HortScience* 36:1252-1259.
- Bar-Tal, A., M.J. Eick, S. Feigenbaum, D.L. Sparks, and S. Fishman. 1995. Determination of Rate Coefficients for Potassium-Calcium Exchange on Vermiculite Using a Stirred-Flow Chamber. *Soil Science Society American Journal* 59:760-765.
- Bar-Tal, A., S. Feigenbaum, and D.L. Sparks. 1991. Potassium-Salinity Interactions in Irrigated Corn. *Irrigation Science* 12:27-35.
- Bar-Yosef, B. 1999. Advances in Fertigation. *Advances in Agronomy* 65:1-77.
- Ben Zioni, A., Y. Vaadia, and H. Lips. 1971. Nitrate Uptake by Roots as Regulated by Nitrate Reduction Products of the Shoot. *Physiologia Plantarum* 24:288-290.
- Chung, J., and R.J. Zasoski. 1994. Ammonium-Potassium and Ammonium-Calcium Exchange Equilibria in Bulk and Rhizosphere Soil. *Soil Science Society American Journal* 58:1368-1375.
- Eberl, D.D., J. Srodon, and H.R. Northrop. 1986. Potassium Fixation in Smectite by Wetting and Drying. p. 296-326. *In: Geochemical Processes at Mineral Surfaces* (J.A. Davis, and K.F. Hayes, eds.). ACS Symposium Series No. 323, American Chemical Society, Washington, DC.
- Eberl, D.D., B. Velde, and T.C. McCormick. 1993. Synthesis of Illite-Smectite from Smectite at Earth Surface Temperatures and High pH. *Clay Minerals* 28:49-60.
- Eick, M.J., A. Bar-Tal, D.L. Sparks, and Feigenbaum Sala. 1990. Analysis of Adsorption Kinetics Using a Stirred-Flow Chamber: II. Comparison of K-Ca Exchange Kinetics on Vermiculite and Montmorillonite. *Soil Science Society American Journal* 54:1278-1282.
- Engels, C., and E.A. Kirkby. 2001. Cycling of Nitrogen and Potassium Between Shoot and Roots in Maize as Affected by Shoot and Root Growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164:183-191.
- Erner, Y., A. Bar-Tal, E. Tagari, I. Levkovich, and B. Bar-Yosef.



2011. Effects of Nitrogen Source and Nitrification Inhibitors on Nutrients Status in Soil and "Star Ruby" Grapefruit Performance. *Journal American Society Horticultural Science* (submitted).
- Erner, Y., Y. Kaplan, B. Artzi, and M. Hamou. 1993. Increasing Citrus Fruit Size Using Auxins and Potassium. *Acta Horticulturae* 329:112-119.
- Evangelou, V.P., and J. Lumbanraja. 2002. Ammonium-Potassium-Calcium Exchange on Vermiculite and Hydroxyl-Aluminum Ver-miculite. *Soil Science Society American Journal* 66:445-455.
- Ganmore-Neumann, R., and U. Kafafi. 1980. Root Temperature and Percentage  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  Effect on Tomato Plant Development. II. Nutrients Composition of Tomato Plants. *Agronomy Journal* 72:762-766.
- Guo, S.W., Q.R. Shen, and H. Brueck. 2007. Effects of Local Nitrogen Supply on Water Uptake of Bean Plants in a Split Root System. *Journal Integrative Plant Biology* 4472-480.
- Hagin, J., S.R. Olsen, and A. Shaviv. 1990. Review of Interaction of Ammonium Nitrate and Potassium Nutrition of Crops. *Journal of Plant Nutrition* 13:1211-1226.
- Hirsch, R.E., B.D. Lewis, E.P. Spalding, and M.R. Sussman. 1998. A Role for the AKT1 Potassium Channel in Plant Nutrition. *Science* 280:918-921.
- Ivashikina, N.V., and Y.M. Feyziev. 1998. Regulation of Nitrate Uptake in Maize Seedlings by Accompanying Cations. *Plant Science* 131:25-34.
- Jarvis, S.C., J.H. Macduff, J. Webb, and A. Mosquera. 1990. Effect of Nitrate Supply and Deprivation and/or Defoliation on Potassium Absorption and Distribution in Rye Grass. *Journal of Experimental Botany* 41:1-10.
- Kirkby, E.A., and K. Mengel. 1967. Ionic Balance in Different Tissues of the Tomato Plant in Relation to Nitrate, or Ammonium Nutrition. *Plant Physiology* 42:6-14.
- Khan, K.S., S. Heinze, and R.G. Joergensen. 2009. Simultaneous Measurements of S, Macronutrients, and Heavy Metals in the Soil Microbial Biomass with  $\text{CHCl}_3$  Fumigation and  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  Extraction. *Soil Biology & Biochemistry* 41:309-314.
- Li, Z., B. Velde, and D. Li. 2003. Changes in Soil Properties of Paddy Fields Across a Cultivation Chronosequence in Subtropical China. *Clays and Clay Minerals* 51:75-82.
- Liu, Y.D., D.A. Laird, and P. Barak. 1997. Release and Fixation of Ammonium and Potassium under Long-Term Fertility Management. *Soil Science Society American Journal* 61:310-314.
- Lu, Y.X., C.J. Li, and F.S. Zhang. 2005. Transpiration, Potassium Uptake and Flow in Tobacco as Affected by Nitrogen Forms and Nutrient Levels. *Annals of Botany* 95:992-998.
- Maathuis, F.J.M. 2007. Monovalent Cation Transporters; Establishing a Link between Bioinformatics and Physiology. *Plant and Soil* 301:1-5.
- Maathuis, F.J.M., Sanders, D. 1997. Regulation of  $\text{K}^+$  Absorption in Plant Root Cells by External  $\text{K}^+$ : Interplay of Different Plasma Membrane  $\text{K}^+$  Transporters. *Journal of Experimental Botany* 48:451-458.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Edition, Academic Press, London.
- McLean, E.O., and M.E. Watson. 1985. Soil Measurements of Plant Available Potassium. *In: Munson, R.D. (ed.), Potassium in Agriculture. CSSA SSSA, Madison. p. 277-308.*
- Mengel, K., and E.A. Kirkby. 2001. Principles of Plant Nutrition. 5th edition, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, Dordrecht.
- Miklos, D., and B. Cicel. 1993. Development of Interstratification in K- and  $\text{NH}_4^+$ -Smectite from Jelsovy Potok (Slovakia) Treated by Wetting and Drying. *Clay Minerals* 28:435-443.
- Milford, G.F.J., and A.E. Johnston. 2007. Potassium and Nitrogen Interactions in Crop Production. *Proceedings 615 International Fertilizers Society, York, UK.*
- Neilsen, G.H., P.B. Hoyt, and D. Neilsen. 1995. Soil Chemical Changes Associated with NP-Fertigated and Drip-Irrigated High-Density Apple Orchards. *Canadian Journal of Soil Science* 75:307-310.
- Nieves-Cordones, M., M.A. Martínez-Cordero, V. Martínez, and F. Rubio. 2007. An  $\text{NH}_4^+$ -Sensitive Component Dominates High-Affinity  $\text{K}^+$  Uptake in Tomato Plants. *Plant Science* 172:273-280.

- Pernes-Debuyser, A., M. Pernes, B. Velde, and D. Tessier. 2003. Soil Mineralogy Evolution in the INRA 42 Plots Experiment (Versailles, France). *Clays and Clay Minerals* 51:577-584.
- Pettersson, S. 1984. Effects of Nitrate on Influx, Efflux and Translocation of Potassium in Young Sunflower Plants. *Physiologia Plantarum* 61:663-669.
- Römheld, V., and E.A. Kirkby. 2010. Research on Potassium in Agriculture: Needs and Prospects. *Plant and Soil* 335:155-180.
- Sandler, A., and Y. Harlavan. 2006. Early Diagenetic Illitization of Illite-smectite in Cretaceous Sediments (Israel): Evidence from K-Ar Dating. *Clay Minerals* 41:637-658.
- Serna, M.D., F. Legaz, N. Munoz, B. Martin, and E. Primo-Millo. 1996. Inhibition of Nitrification by Dicyandiamide (DCD) in Citrus Soils. *Proceeding of the International Society, Citriculture* 2:718-724.
- Silber, A., and A. Bar-Tal. 2008. Nutrition of Substrates-Grown Plants. *In: M. Raviv and J.H. Lieth (eds.) "Soilless Culture: Theory and Practice"*. p. 291-339. Elsevier.
- Sparks, D.L. 2003. Kinetics of Soil Chemical Processes. *In: D.L. Sparks "Environmental Soil Chemistry"*. Academic Press Elsevier, San Diego, California. p. 207-244.
- Stehouwer, R.C., and J.W. Johnson. 1991. Soil Adsorption Interactions of Band-Injected Anhydrous Ammonia and Potassium Chloride Fertilizers. *Soil Science Society American Journal* 55:1374-1381.
- Szczerba, M.W., D.T. Britto, and H. Kronzucker. 2006. Rapid, Futile  $K^+$  Cycling and Pool-Size Dynamics Define Low-Affinity Potassium Transport in Barley. *Plant Physiology* 141:1494-1507.
- Szczerba, M.W., D.T. Britto, and H. Kronzucker. 2009.  $K^+$  Transport in Plants: Physiology and Molecular Biology. *Journal of Plant Physiology* 166:447-466.
- Velde, B., and T. Peck. 2002. Clay Mineral Changes in the Morrow Experimental Plots, University of Illinois. *Clays and Clay Minerals* 50:364-370.
- Wang H.Y., J.M. Zhou, C.W. Du, and X.Q. Chen. 2010. Potassium Fractions in Soils as Affected by Monocalcium Phosphate, Ammonium Sulfate, and Potassium Chloride Application. *Pedosphere* 20:368-377.
- Zhang, F., J. Niu, W. Zhang, X. Chen, C. Li, L. Yuan, and J. Xie. 2010. Potassium Nutrition of Crops under Varied Regimes of Nitrogen Supply. *Plant and Soil* 335:21-34.
- Zsoldos, F., E. Haunold, P. Heger, and P. Vasfagy. 1990. Effects of Sulfate and Nitrate;  $K^+$  Uptake and Growth of Wheat and Cucumber. *Physiologia Plantarum* 80:425-430.

这篇文章“不同氮素形态对氮钾交互作用的影响”可以在下面链接中找到:

[Regional Activities/India](#) and [N-K Interaction Center](#)



## 研究报告

### 氮、磷、钾和镁缺乏条件下水稻营养分配的改变和相关转运基因的表达

Jin Cai<sup>(1)(2)</sup>, Lu Chen<sup>(1)(2)</sup>, Juan Lian<sup>(1)</sup>,  
Yibing Hu<sup>(1)</sup>, Guohua Xu<sup>(1)(3)</sup>

#### 摘要

氮(N)、磷(P)、钾(K)和镁(Mg)对植物具有重要的生理功能。它们在植物中的交互作用还未完全清楚特别是在分子生物学层面上。在本研究中,我们探究了水稻营养生长阶段N、P、K、Mg饥饿条件下的生理和分子响应情况。N和P的缺乏导致可溶性糖和蔗糖在叶片中积累。N和P的缺乏增加了水稻的根冠比,而K和Mg的缺乏条件下根冠比是减小的。K和Mg的缺乏都致使地上部其他阳离子的积累。此外,K饥饿使根中K离子和可溶性糖含量明显增加。通过RT-PCR分析显示营养缺乏使得叶片构成中糖的积累是由于某些糖转运基因的作用。K饥饿下水稻根中高亲和钾离子转运基因 *OsHAK1* 和预测的镁离子转运基因 *OsMGT* 的表达显示了相反的下调和上调结果。这个结果显示主要的营养元素缺乏抑制碳水化合物从叶片源中的输出。本文中研究的糖和相关营养离子的转运基因可以用来说明植物在适应变化的营养供应条件下的分子机理。

#### 引言

氮(N)、磷(P)、钾(K)和镁(Mg)对植物细胞来说是非常重要的营养元素。他们的生理功能过去已经有很多的研究(Hermans *et al.*, 2006; Maathuis, 2009)。在分子水平

上,氮是蛋白质主要的构成成分,占植物有机体的比例很高。和氮相比,P在植物分子的构成中所占比例就很低。但是,磷是遗传物质DNA和RNA的重要构成成分。另外,磷在植物的能量代谢和分子活动调节中具有重要作用(Maathuis, 2009)。

与氮、磷相比,钾不是植物的任何新陈代谢活动的内部构成因素,只是一种阳离子,但占植物细胞离子浓度的比例最高(Karley and White, 2009; 2010)。作为一种渗透剂,钾参与植物韧皮部蔗糖的运输、促进光合作用和保持植物水分含量(Karley and White, 2010)。植物缺钾容易导致植物生物逆境比如病害的侵袭、非生物逆境比如机械的损伤,以及降低果品质量(Tuncay *et al.*, 1999)。Mg是另外一种植物叶绿体光合作用的基本营养元素。另外,镁还是细胞物理反应时酶的激活剂(Berkowitz and Wu, 1993)。

有研究显示,植物对营养元素缺乏有不同的响应机制。Lee (1982; 1993)证实大麦对N、P或者S的吸收跟植物营养状况有关,质流对养分的吸收只发挥较少的作用。1994年,Cakmak等报告了在P、K和Mg缺乏条件下大豆的干物质质量和碳水化合物在植物根系和地上部分的分布的不同比例。对阿拉伯芥菜(*Arabidopsis*)的研究表明,植物缺乏N、P、K和Mg导致碳水化合物和糖的转运不同(Hermans *et al.*, 2006)。在缺N的情况下,碳水化合物在植物的地上部分累积,而根系延展以获取更多的植物营养。在缺磷的条件下阿拉伯芥菜(*Arabidopsis*)有同样的表现。与此对照,植物缺钾不见根系的扩张,碳水化合物在地上部分的积累远远不及植物在缺乏N和P时那么多(Hermans *et al.*, 2006)。

除了作物在养分缺乏条件下植物生理适应性的变化外, Hermans等人的微阵列分析表明,有关基因组在此过程中过分表达或者下调。例如,光合作用和蔗糖合成相关基因在植物缺乏P的情况下他们的表达发生变化(Hermans *et al.*, 2006)。通常来说,蔗糖是植物体内长距离运输的主要碳水化合物形态(Hayashi and Chino, 1990)。蔗糖同时还扮演着基因表达和植物生长状况的控制信号(Li *et al.*, 2003; Gibson, 2005)。更多的针对西红柿、阿拉伯芥菜和车前草等的研究表明,SUT/C基因在控制蔗糖的运转中发挥重要的作用(Stadler *et al.*, 1995; Barker *et al.*, 2000; Matsukura *et al.*, 2000; Barth *et al.*, 2003; Carpaneto *et al.*, 2010)。在水稻上,已经有五组转运基因被克隆了出来,这些基因在胚芽、花粉和液薄膜中的表达不同(Matsukura *et al.*, 2000; Hirose *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2010; Eom *et al.*, 2011)。这些基因是否在营养缺乏的条件下参与蔗糖的转运是个有趣的问题。有证据表明缺钾条件下,高亲和K离子转运基因的表达得到强化(Okada *et al.*, 2008; Qi *et al.*, 2008; Horie *et al.*, 2010)。然而,单子叶植物比如水稻,是否像阿拉伯芥末(*Arabidopsis*)一样对不同元素营养缺乏有相似的表达,以及基因表达的变化是否伴随着植物的生理变化,这些问题是不太清楚的。

在*Arabidopsis*中,有2族基因可能与Mg的吸收有关,一族是AtMGTs基因,由包括Mg转运因子在酵母和细菌中的突变体在内的10条基因组成(Li *et al.*, 2001)。另一族是AtMHX基因,负责给单子叶植物蛋白质编码和作为H<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>离子的反向搬运因子(Galili, 1999; Shaul *et al.*, 1999)。通过研究水稻的AtMHX和AtMGT的氨基酸数据库,我们发

<sup>(1)</sup>南京农业大学资源与环境学院, 中国南京, 210095。

<sup>(2)</sup>这些作者贡献相同。

<sup>(3)</sup>通讯作者: [ghxu@njau.edu.cn](mailto:ghxu@njau.edu.cn)。

**Table 1.** Primer pairs for amplification of sucrose transporters, Mg transporters *OsMGT*, *OsMHX* and K transporter *OsHAK1*, respectively.

Gene	Sequence
	Sucrose transporters
OsSUT1	F: CAGCCCTCCCAACAAAATCAA R: CGAGAACTACAAAGCTCACCA
OsSUT2	F: TTCCTCGCCGACCTCACCGAG R: CACCAGCCACCGATAAAAGA
OsSUT3	F: TCTGTTCTTGGATGGCATTAGG R: GCACGACGATGGAGATGTTGA
OsSUT4	F: TTGGCTTTGTGGACCTATT R: GTCCCATCCAGTCAGTATCAA
	Mg transporters
OsMGT	F: TCACCCACAGAATCACGG R: TCAACAGCGTAGACGACAAT
OsMHX	F: TGGCAGATACTGTTCCCTT R: CCTCCATTTGTTCTTTA
	K: transporters
OsHAK1	F: TCTACACCCTCATCATCATCCC R: TACACCTGCCCTCGTACTTCT

现 *OsMGT* 和 *OsMHX* 是他们对应的同源染色体。然而，人们对这 2 个同源染色体知之甚少。

在本研究中，我们调查了不同缺素条件下水法栽培的水稻生理变化情况，目的在于试图弄清植物营养状况与植物基因表达之间的相互关系，对植物矿物质营养有更多的了解。

## 材料和方法

### 生长条件

水稻 (*Oryza sativa* L. ssp *japonica*) 种子用 10% 双氧水消毒 30 分钟，清洗 5 次后浸入去离子水，置入黑暗中放 24 小时。然后种子被送到玻璃盘中去发芽，用 14 小时/10 小时光照/黑暗循环处理和白天/夜间温度 32°C/22°C。发芽 15 天后在 3L 的塑料盒中移栽，用 1/4、1/2 和全营养液栽培（根据国际水稻所栽培指导）(Yoshida *et al.*, 1976)。移栽一个月后，施行缺磷、钾、镁处理，而缺氮处理在全营养液多生长一周后施行。对不同缺素处理， $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{KHPO}_4$ 、 $\text{KCl}$  和  $\text{MgSO}_4$  分别被等质量浓度的  $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$  和  $\text{CaSO}_4$  替代处理 4 周（缺氮处理 3 周）。植株 RNA 提取

分析样收获后立即放置在 -70°C 环境中。

### 植物样品分析

缺素处理 4 周（缺氮处理 3 周）后立即采取植物样。根系用去离子水洗 3 次，以去除附着其上的养分，在 70°C 抽风烤箱处理 48 小时去除水分至衡重。干燥的植物被粉碎，然后取 0.005g 用 5ml 98% 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和 1ml 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  在 270°C 温度下消化。冷却后，消化好的溶液用蒸馏水稀释到 100ml。

P、K、Mg 浓度分析用 ICP (Perkin Elmer Optima 2100DV) 分析。N 浓度彩色自动连续流动分析仪 (AutoAnalyser 3, Bran+Luebbe, Germany)，采用的方法是丁教授等建议的方法 (2006)。

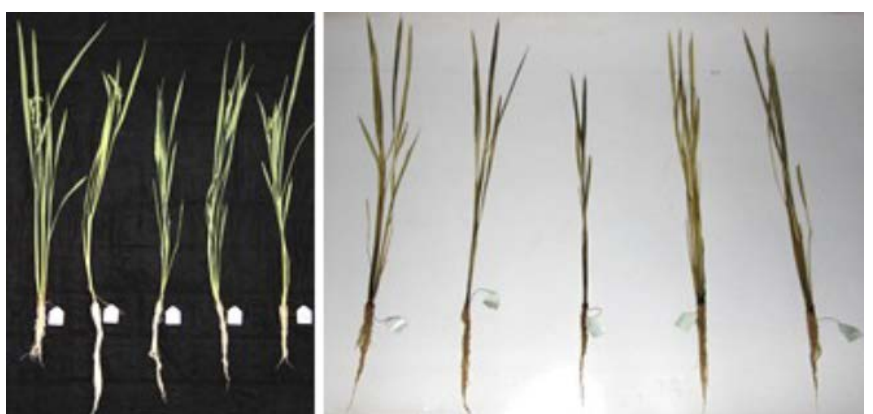
### 可溶性糖和淀粉浓度测定

植株和根系可溶性糖和淀粉的测定方法采用 Hansen and Møller (1975) 的建议方法 (Ding *et al.*, 2006)。

为了直观看到淀粉在整个植株中的分布，采用碘酒对全株进行处理。植株缺素处理后，植物样品浸入 70% 的酒精中培育，以去除叶绿素。然后，用碘酒处理 (0.5% KI+0.1%  $\text{I}_2$ ) 5 小时。

### 根系活性表面积测定

根系活动可以通过测定根系活性表面积以及活性表面积占全部根系表面面积的比来反映。根系活性表面积是根系能够吸收同化外界养分离子的区域。同化吸收离子是离子通过等离子膜进入细胞质的过程。根系活性表面积的测定采用张先生的方法 (1994)，用亚甲蓝染料 ( $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}_2\text{O}_3$ ) 吸收进根系表面。测定的原理是根据给定数量的亚甲蓝处理根系，看有多少亚甲蓝留在溶液中，这样就可以测出根系吸收了多少亚甲蓝，从而根据吸收亚甲蓝的多少计算出根系活性表面积。水稻根系按顺序浸在 3 个鹰嘴盘中，每个盘中含有 10ml 2mM 的亚甲蓝溶液。在每个盘中的时间是 5 分钟。后来，从每个盘中吸取 1ml 并稀释到 10ml。使用通用酶标仪 (SpectraMax M5) 测定其 660nm ( $A_{660}$ ) 的吸收光谱。通过



**Fig. 1.** Morphological comparison of rice plants grown in a complete nutrient solution or different nutrient-deficient solutions for three or four weeks. Period of N-deficiency treatment was three weeks; for P-, K- and Mg- deficiency four weeks. In the right panel, plants were stained with iodine solution (0.5% KI+0.1%  $\text{I}_2$ ) for five hours to visualize starch accumulation. Before iodine solution staining, plants were incubated in 70% ethanol overnight to remove chlorophyll. From left to right: Control; -N; -P; -K; -Mg, respectively.

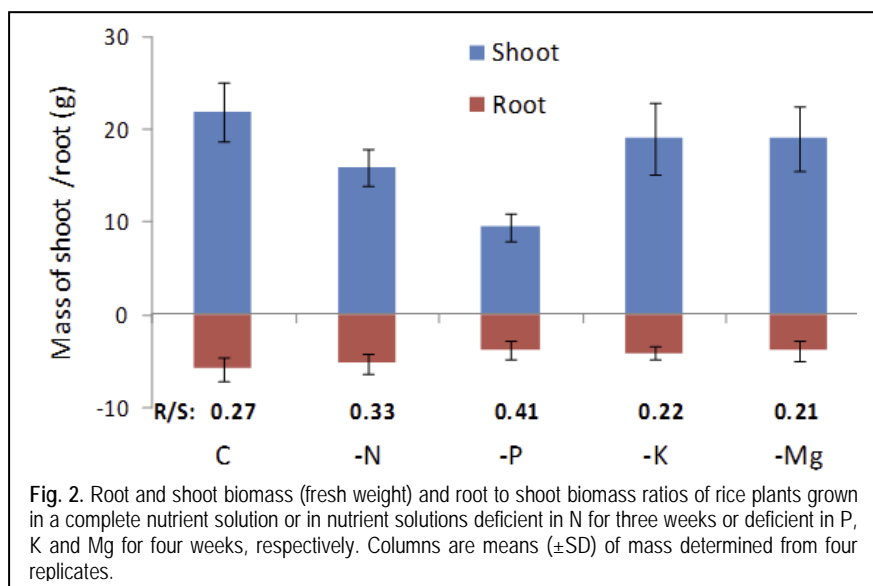


Fig. 2. Root and shoot biomass (fresh weight) and root to shoot biomass ratios of rice plants grown in a complete nutrient solution or in nutrient solutions deficient in N for three weeks or deficient in P, K and Mg for four weeks, respectively. Columns are means ( $\pm$ SD) of mass determined from four replicates.

查亚甲蓝的 660nm( $A_{660}$ )标准曲线可以获得植物根系吸收的亚甲蓝的量。每个缺素处理有 3 个重复。

#### 糖、镁和钾转运基因的表达

使用一步法总 RNA 提取试剂 (Invitrogen) 对每个缺素处理的根系和叶片 3 段植株组合的总 RNAs。用

DNaseI(TaKaRa)去除总 RNAs 中的残余 DNA。第一条 cDNA 和 5 $\mu$ g 总 RNA 合成为模板。检测不同营养缺素下糖转运基因的表达, 翻转水稻 SUT 族基因片段 (见表 1) 合成基因库 (Os03g 07480; Os12g 44380; Os10g26470; Os02g 58080; Os02g 36700, 分别等价于 SUT1-5)。

RT-PCR 表现平行作为正常施肥条件下的对照。看家基因肌动蛋白 (*OsRac1*, 编号 AB047313) 放大了作为内部对照。PCR 引子作为放大假定的 Mg 转运基因 *OsMHX*(Os11G43860), *OsMGT* (Os06g44150), 与钾的转运基因 *OsHAK1*(Os04G32920) 非常相似 (见表 1)。

#### 结果

缺素对根系和植株生物量比率以及活性根系表面积的影响

去除营养液中的氮营养 3 周, P、K、Mg 营养 4 周, 与正常营养生长相比, 减少生物产量, 改变根系形态 (图 1)。缺素 N 和 P 比缺素 K 和 Mg 对植株生长影响更大 (图 1 和图 2)。但是, 四个处理的根系的总生物量差别不大 (图 2)。根系和地上部生物量比率是基于鲜重的, 缺素 N 和 P 其比率上升, 但缺素 K 和 Mg, 其比

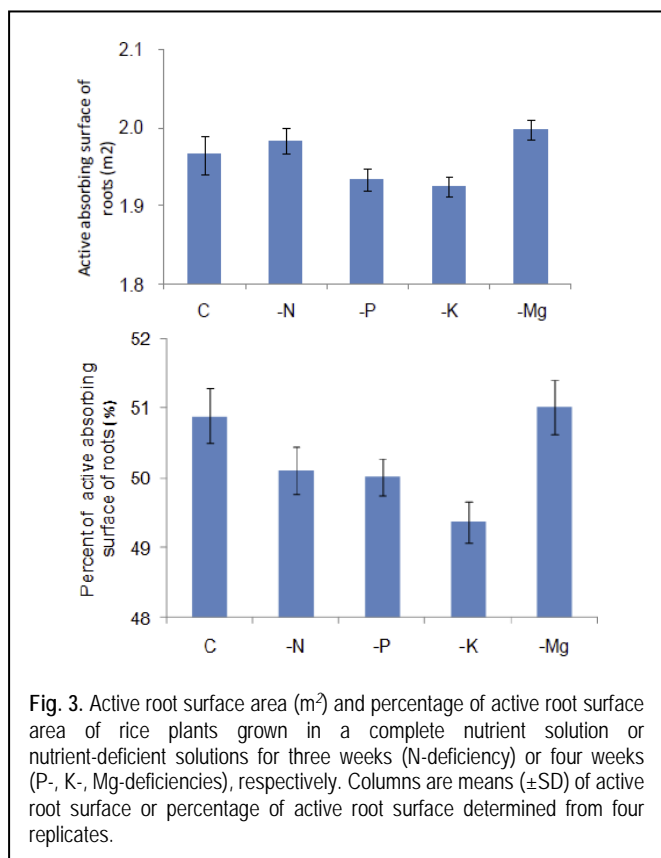


Fig. 3. Active root surface area (m<sup>2</sup>) and percentage of active root surface area of rice plants grown in a complete nutrient solution or nutrient-deficient solutions for three weeks (N-deficiency) or four weeks (P-, K-, Mg-deficiencies), respectively. Columns are means ( $\pm$ SD) of active root surface or percentage of active root surface determined from four replicates.

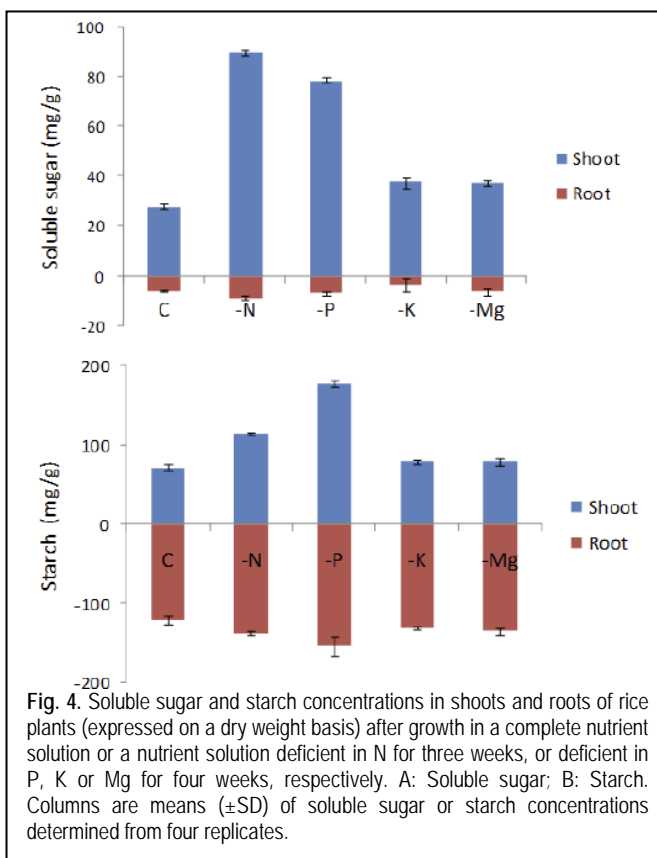


Fig. 4. Soluble sugar and starch concentrations in shoots and roots of rice plants (expressed on a dry weight basis) after growth in a complete nutrient solution or a nutrient solution deficient in N for three weeks, or deficient in P, K or Mg for four weeks, respectively. A: Soluble sugar; B: Starch. Columns are means ( $\pm$ SD) of soluble sugar or starch concentrations determined from four replicates.

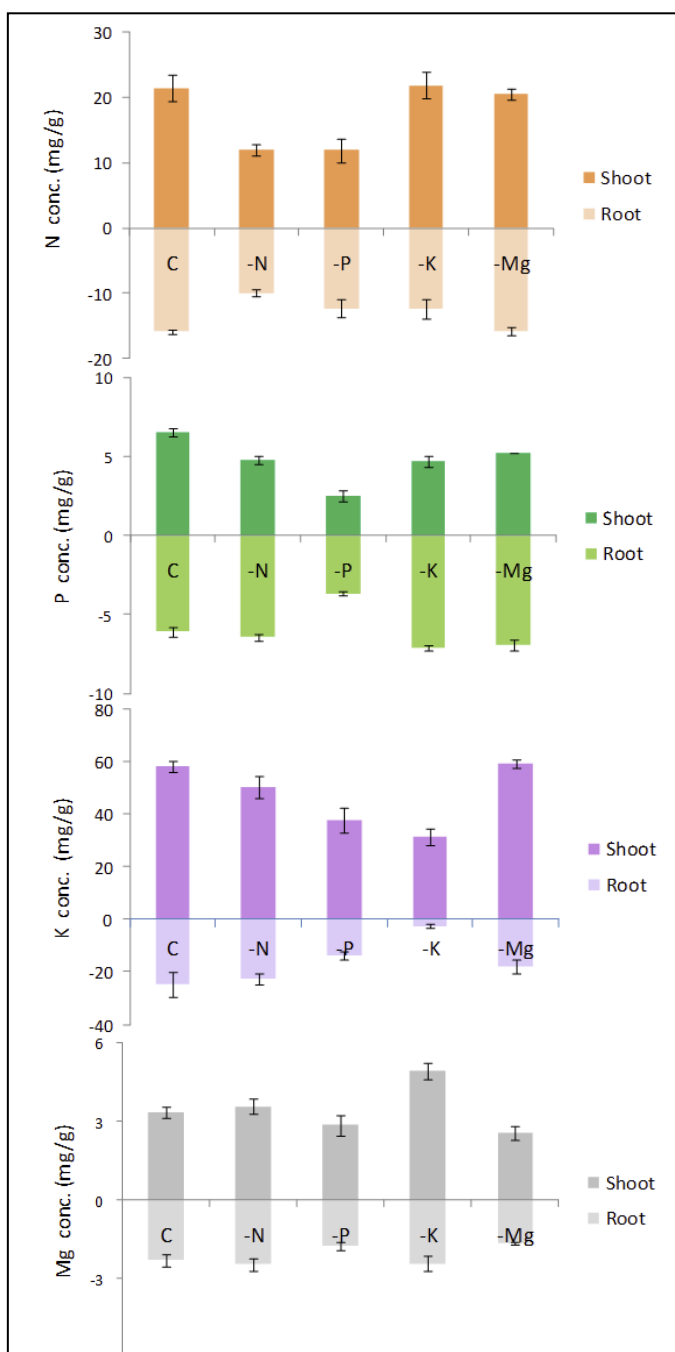


Fig. 5. N, P, K, Mg concentrations of rice plants (expressed on a dry weight basis) after growth in a complete nutrient solution or nutrient-deficient solutions for three weeks (N deficiency) or four weeks (for P-, K-, Mg-deficiencies). Columns are means ( $\pm$ SD) of ion concentrations determined by ICP-emission spectrometer (Perkin Elmer Optima 2100DV) from four replicates. N concentration was determined by colorimetric continuous flow analysis (AutoAnalyser 3, Brank Luebbe, Germany).

率下降 (图 2)。

缺素 N、P、K 导致根系活性表面积百分数降低, 表示缺素损害根系活性。但是, 缺素 N 和 Mg 时, 根系

3)。非常有趣的是, 缺 Mg 并改变根系活性表面积百分数, 虽然它增加了根系活性表面积的重量 (图 3)。

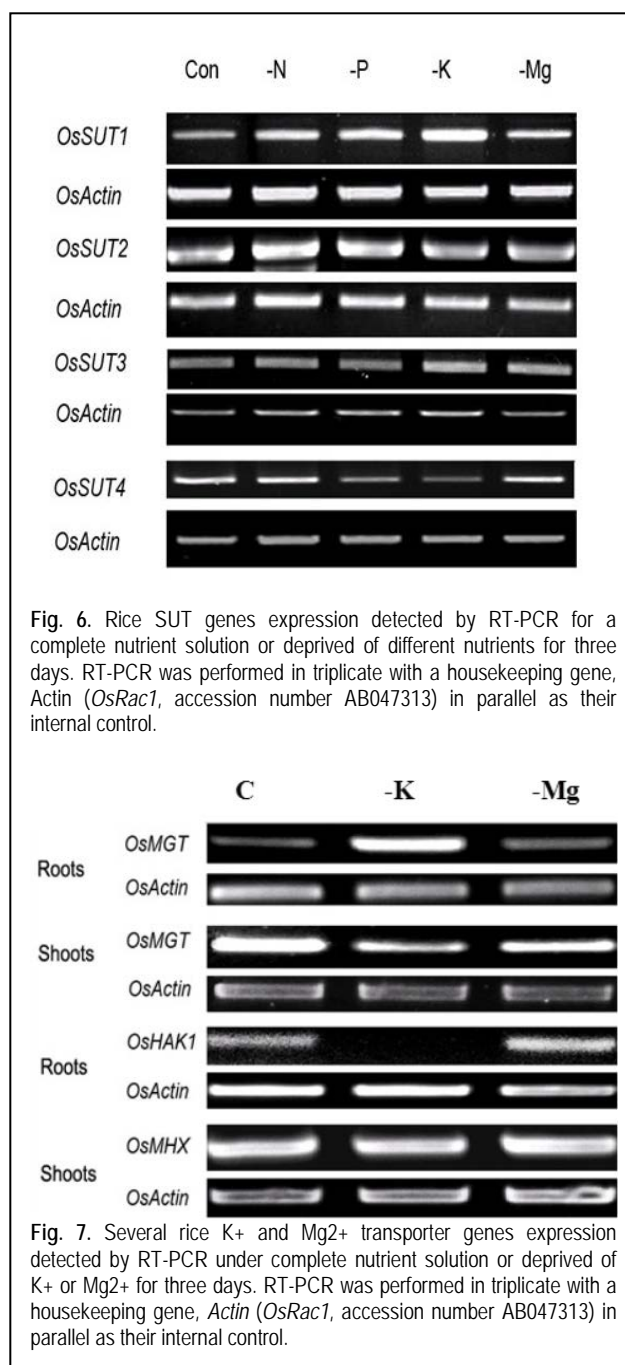


Fig. 6. Rice SUT genes expression detected by RT-PCR for a complete nutrient solution or deprived of different nutrients for three days. RT-PCR was performed in triplicate with a housekeeping gene, Actin (*OsRac1*, accession number AB047313) in parallel as their internal control.

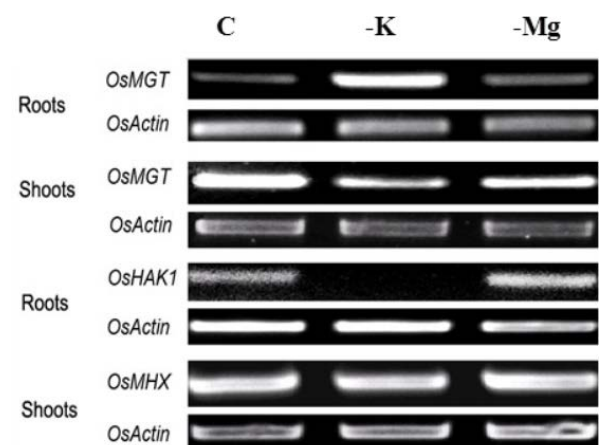


Fig. 7. Several rice K+ and Mg2+ transporter genes expression detected by RT-PCR under complete nutrient solution or deprived of K+ or Mg2+ for three days. RT-PCR was performed in triplicate with a housekeeping gene, Actin (*OsRac1*, accession number AB047313) in parallel as their internal control.

活性表面积比正常营养的要大, 但缺素 P 和 K 的根系表面积比正常营养的要小 (图

缺素的地上部分植株碳水化合物累积, 但缺 K 的根系水溶性糖缺乏

四种主要营养元素的缺乏导致水溶性糖在地上部分含量增加, 特别是缺素 N 和 P 处理 (图 4)。水稻根系缺素 N 时, 其水溶性糖轻微增加, 但似乎不受缺 P 和 Mg 的影响 (图 4)。与此对照的是, 缺钾时根系水溶性糖

含量非常低,表示缺 K 影响糖从地上部分向根系的转运。

缺素四种营养成分对淀粉的影响与缺素对水溶性糖的影响趋势基本一致(图 1,图 4)。四种处理中,缺 P 导致的淀粉累积在地上部分的量最大。四种处理导致的根系淀粉浓度的差异比其在地上部分的差异要小得多(图 4)。

*缺素 N、P、K、Mg 对其在水稻上浓度的交互作用*

就像预期的一样,从营养液中去除这些营养元素导致植株地上部分和根系中这些营养元素含量的下降(以干重计)(图 5)。植株地上部分总磷含量因为缺 N、K 和 Mg(图 5)。钾的浓度在缺素处理根系中的变异最大。有趣的是,钾浓度在地上部分的含量远高于其在根系中的浓度,显示在较低的钾浓度预示着从外界获得任何的钾快速地从根系运输到地上部分(图 5)。

与植物缺素 Mg 相比,缺 Mg 导致根系中较低的钾浓度和地上部分较高的钾浓度,显示从根系到地上部分的钾的运输得到了强化(图 5),这点和缺素 K 的结果一致。

值得注意的是,与对照和缺素 N 和 P 处理相比,缺素钾状态下水稻生长 4 周时,地上部分 Mg 的含量增加了但根系中 Mg 含量变化不大(图 5)。同样地,缺素 Mg 时比缺素 N 和缺素 P 相比,植株钾含量较高。和对照相比,结论也一样。数据显示,钾和镁有强烈的互补效应。也就是说,缺钾增强了植株对镁的吸收,缺镁增强了植株对钾的吸收。另外,钾抑制了水稻镁的吸收。

*缺素 N、P、K、Mg 对地上部分糖转运基因表达的影响*

为了研究是否缺素状态下糖在叶片的累积抑制了糖向根系的转运,测试了水稻叶片 5 种糖的转运基因的表达。有趣的是,OsSUT1 在缺素叶片上是上调的,特别是缺素 K 时更是如此(图 6)。与此相对照,OsSUT2 和 OsSUT3 受营养状况的调节不明显。OsSUT5 在我们的试验调节下没有检测到其表达。

*K 和 Mg 调节假定的 K、Mg 转运基因*

因为前面讨论的钾镁在植物生理作用上严重交互作用,我们分析了与假定的钾转运基因(OsHAK1)和 2 个镁转运基因(OsMGT 和 OsMHX)转录表达。

值得高度关注的是,植物根系中 OsHAK1 的转录表达被缺素钾 K 抑制而被缺素 Mg 上调(图 7)。与此对照的是,OsMGT 的表达在植物根系中因缺素 K 而上调,在地上部分因缺素 K 而下调。他们的表达不受 Mg 营养状态的调节。OsMHX 表达在缺素 K 和 Mg 的处理中,没有观察到其变化(图 7)。

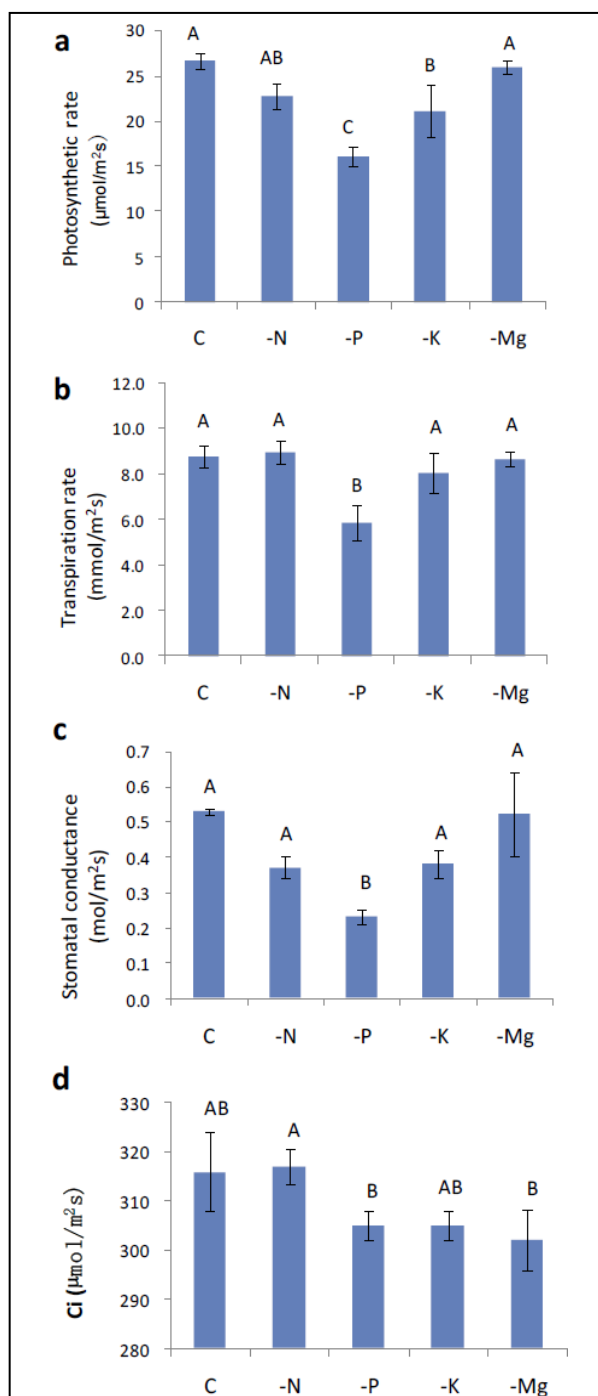


Fig. 8. Photosynthetic parameters including photosynthetic rate (a), transpiration rate (b), stomatal conductance (c), and intercellular CO<sub>2</sub> concentration (Ci) of rice plants (d). Rice plants were measured with a portable infrared gas exchange system (Li-6400) according to the manufacturer's instruction. The measurements were performed between 10 and 11 am in rice plants grown in nutrient deficient solutions for three weeks (for -N treatment) or four weeks (for control and -P, -K, -Mg treatments). The measurements were made in three repeated experiments. Different letters in large case in the figure indicated statistical differences among means by Duncan's multiple range test ( $p \leq 0.01$ ).



## 讨论

植物有各种缺素调节机制，这样在环境条件发生改变时其发挥作用，以维持作物生长发育。用水培试验，我们研究了不同缺素条件下水稻的反应。水稻和阿拉伯芥 (*Arabidopsis*) 的碳水化合物转运以及根系与地上部分的比率的一致性，表示双子叶植物和单子叶植物对养分胁迫时反应一致。另外，这些缺素带来的生理参数的变换以及基因表达的不同，为植物缺素时的生理活动提供了更多有用的信息。

在我们的试验中，水稻缺素 P 和缺素 N 时，水溶性糖和淀粉在水稻地上部分快速累积 (图 4)。与此对照的是，这类化合物在缺素 K 和缺素 Mg 时累积较少 (图 4)，而根系与地上部分生物量的比例和对照相比只下降了很少一部分 (图 2)。这些发现和 Hermans *et al.* (2006) 在阿拉伯芥 (*Arabidopsis*) 上的试验结论一致。缺素 N 和缺素 P 时，水稻的光合作用下降很厉害，但缺素 K 和缺素 Mg 时，光合作用受的影响非常小 (图 8)。根据 Hermans *et al.* (2006) 的研究结论，缺素 N 和缺素 P 时光合作用下降是因为碳水化合物在地上部分的积累。

对阿拉伯芥 (*Arabidopsis*) 试验中，Ca 离子在低钾情况下可以调节钾的通道 (Li *et al.*, 2006)，显示植物中这两种离子有交互作用。有趣的是，缺素 K 时植株中镁的浓度增加，反之亦然 (图 5)。这显示出 K 和 Mg 在植物体内有互补作用，也验证了我们先前的研究结论 (Ding *et al.*, 2006)。一个貌似合理的解释是 K 和 Mg 是最丰富的单价和二价阳离子，在维持植物体内离子自平衡中发挥至关重要的作用 (Li *et al.*, 2001)。所以，缺乏一种离子，将诱导积累另一

种离子。为了验证这种假设，我们的 RT-PCR 分析结果显示，缺素 Mg 时，根系 OsHAK1 表达是显著上调。与此类似，缺素 K 时，根系 OsMGT 表达是轻微上调 (表 7)。这些结果表明，OsHAK1 和 OsMGT 可能对植物中 K 和 Mg 的交互作用调节时起重要作用。

值得注意的是，水稻缺素 K，根系中 K 离子浓度比地上部分 K 离子浓度要低 (图 5)。这显示植物缺素 K 时，营养从根部转运到地上部分的效率非常高。与对照生长在正常全营养溶液中的植物相比，根系 OsHAK1 的表达下降了，说明其他的转运机制也许在发挥作用。另外，有研究显示，在水稻育秧期缺素 K 或者 Na，水稻根系的 OsHAK1 表达增强了 (Okada *et al.*, 2008; Horie *et al.*, 2010)。而在我们的试验中，缺素 K 的情况下，移栽后的 6 周它的表达减弱了。这些发现显示这个基因的表达在水稻不同的生育期基因的表达不同。

很久以前就证明了把营养元素输送进植物的韧皮部需要钾离子 (Doman and Geiger, 1979)。更多的研究表明，蔗糖长距离运输时，SUT 族基因发挥重要的作用 (Stadler *et al.*, 1995; Matsukura *et al.*, 2000; Scofield *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2010)。有研究表明，OsSUT1 是韧皮部蔗糖转运因子 (Hirose *et al.*, 1997; Matsukura *et al.*, 2000; Scofield *et al.*, 2007)。我们的数据显示，OsSUT1 在根系的表达在缺素 K 时是上调。与此增加一致的是，缺素 K 时水溶性糖比缺素 P 和缺素 N 时要低。OsSUT1 在缺素 N 和缺素 P 时，其表达轻微增加。但是，植物地上部分中水溶性糖和淀粉浓度保持非常高的状态，这表明也许其他的调节机制在发挥作用。

有研究表明，OsSUT4 被证实在下部叶片中其有选择性的表达 (Aoki *et al.*, 2003)。缺素 P 和缺素 K 时，OsSUT4 的表达减少 (图 7)，表明其下调可能受到资源叶片中糖累积的影响。

综上所述，我们研究了作物单子叶植物的水稻，其缺素反应与双子叶植物阿拉伯芥 (*Arabidopsis*) 类似，显示高等植物应对植物营养缺素时的方法相类似。另外，我们的植物生理测试数据显示，在缺素状态下，K 和 Mg 有交互作用。在缺素 K 的情况下，钾在植物根系和地上部分的分布比较特别。检测缺素条件下糖与 K 和 Mg 的转运基因的表达调节，更进一步支持植物生理数据的结论，便于更好地从分子水平了解植物的活动。

## 致谢

该项目是南京农业大学作物基因及种质强化重点实验室的开放课题 (ZW2008005)。

## 参考文献

- Aoki, N., T. Hirose, G.N. Scofield, P.R. Whitfield, and R.T. Furbank. 2003. The Sucrose Transporter Gene Family in Rice. *Plant Cell Physiol.* 44:223-232.
- Barker, L., C. Kühn, A. Weise, A. Schulz, C. Gebhardt, B. Hirner, H. Hellmann, W. Schulze, J.M. Ward, and W.B. Frommer. 2000. SUT2, A Putative Sucrose Sensor in Sieve Elements. *Plant Cell* 12:1153-1164.
- Barth, I., S. Meyer, and N. Sauer. 2003. PmSUC3: Characterization of a SUT2/SUC3-type Sucrose Transporter from *Plantago Major*. *Plant Cell* 15:1375-1385.
- Berkowitz, G.A., and W. Wu. 1993. Magnesium, Potassium Flux and



- Photosynthesis. *Magnes. Res.* 6:257-265.
- Cakmak, I., C. Hengeler, H. Marschner. 1994. Partitioning of Shoot and Root Dry Matter and Carbohydrates in Bean Plants Suffering from Phosphorus, Potassium and Magnesium Deficiency. *J. Exp. Bot.* 45:1245-1250.
- Carpaneto, A., H. Koepsell, E. Bamberg, R. Hedrich, and D. Geiger. 2010. Sucrose- and H-Dependent Charge Movements Associated with the Gating of Sucrose Transporter ZmSUT1. *PLoS One* 5:e12605.
- Doman, D.C., and D.R. Geiger. 1979. Effect of Exogenously Supplied Foliar Potassium on Phloem Loading in Beta Vulgaris L. *Plant Physiol.* 64:528-533.
- Eom, J.S., J.I. Cho, A. Reinders, S.W. Lee, Y. Yoo, P.Q. Tuan, S.B. Choi, G. Bang, Y.I. Park, M.H. Cho, S.H. Bhoo, G. An, T.R. Hahn, J.M. Ward, and J.S. Jeon. 2011. Impaired Function of the Tonoplast-Localized Sucrose Transporter in Rice, OsSUT2, Limits the Transport of Vacuolar Reserve Sucrose and Affects Plant Growth. *Plant Physiol.* 157:109-19.
- Gibson, S.I. 2005. Control of Plant Development and Gene Expression by Sugar Signaling. *Curr. Opin. Plant. Biol.* 8:93-102.
- Hansen, J., and I.B. Møller. 1975. Percolation of Starch and Soluble Carbohydrates from Plant Tissue for Quantitative Determination with Anthrone. *Anal. Biochem.* 68:87-94.
- Hayashi, H., and M. Chino. 1990. Chemical Composition of Phloem Sap from the Uppermost Internode of the Rice Plant. *Plant Cell Physiol.* 31:247-251.
- Hermans, C., J.P. Hammond, P.J. White, and N. Verbruggen. 2006. How do Plants Respond to Nutrient Shortage by Biomass Allocation? *Trends Plant Sci.* 12:531-532.
- Hirose, T., Z. Zhang, A. Miyao, H. Hirochika, R. Ohsugi, and T. Terao. 2010. Disruption of a Gene for Rice Sucrose Transporter, OsSUT1, Impairs Pollen Function but Pollen Maturation is Unaffected. *J. Exp. Bot.* 61:3639-3646.
- Horie, T., M. Sugawara, T. Okada, K. Taira, P. Kaothien-Nakayama, M. Katsuhara, A. Shinmyo, and H. Nakayama. 2010. Rice Sodium-Insensitive Potassium Transporter, OsHAK5, Confers Increased Salt Tolerance in Tobacco BY2 Cells. *J Biosci. Bioeng.* 2010.
- Karley, A.J., and P.J. White. 2009. Moving Cationic Minerals to Edible Tissues: Potassium, Magnesium, Calcium. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12:291-298.
- Karley, A.J., and P.J. White. 2010. Potassium. In: *Cell Biology of Metals and Nutrients*, R. Hell, and R.R. Mendel (eds). p. 199-224. *Plant Cell Monographs* 17.
- Lee, R.B. 1982. Selectivity and Kinetics of Ion Uptake by Barley Plants Following Nutrient Deficiency. *Ann. Bot.* 50:429-449.
- Lee, R.B. 1993. Control of Net Uptake of Nutrients by Regulation of Influx in Barley Plants Recovering from Nutrient Deficiency. *Ann. Bot.* 72:223-230.
- Li, C.Y., D. Weiss, and E.E. Goldschmidt. 2003. Effects of Carbohydrate Starvation on Gene Expression in Citrus Root. *Planta* 217:11-20.
- Li, L., A.F. Tutone, R.S. Drummond, R.C. Gardner, and S. Luan. 2001. A Novel Family of Magnesium Transport Genes in *Arabidopsis*. *Plant Cell.* 13:2761-2775.
- Li, L., B.G. Kim, Y.H. Cheong, G.K. Pandey, and S. Luan. 2006. A Ca<sup>2+</sup> Signaling Pathway Regulates a K<sup>+</sup> Channel for Low-K Response in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 103:12625-12630.
- Maathuis, F.J. 2009. Physiological Functions of Mineral Macronutrients. *Curr. Opin. Plant. Biol.* 12:250-258.
- Matsukura, C., T. Saitoh, T. Hirose, R. Ohsugi, P. Perata, and J. Yamaguchi. 2000. Sugar Uptake and Transport in Rice Embryo. Expression of Companion Cell-Specific Sucrose Transporter (OsSUT1) Induced by Sugar and Light. *Plant Physiol.* 124:85-93.
- Miller, A.J., Q. Shen, and G. Xu. 2009. Freeways in the Plant: Transporters for N, P and S and their Regulation. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12:284-290.
- Okada, T., H. Nakayama, A. Shinmyo, and K. Yoshida. 2008. Expression of OsHAK Genes Encoding Potassium Ion Transporters in Rice. *Plant Biotechnology* 25:241-245.
- Qi, Z., C.R. Hampton, R. Shin, B.J. Barkla, P.J. White, and D.P. Schachtman. 2008. The High Affinity K<sup>+</sup> Transporter AtHAK5 Plays a Physiological Role in *Planta* at Very Low K<sup>+</sup>

- Concentrations and Provides a Caesium Uptake Pathway in *Arabidopsis*. *J. Exp. Bot.* 59:595-607.
- Scofield, G.N., T. Hirose, N. Aoki, and R.T. Furbank. 2007. Involvement of the Sucrose Transporter, OsSUT1, in the Long-Distance Pathway for Assimilate Transport in Rice. *J. Exp. Bot.* 58:3155-169.
- Shaul, O., D.W. Hilgemann, J. de-Almeida-Engler, M. Van Montagu, D. Inz, and G. Galili. 1999. Cloning and Characterization of a Novel  $Mg^{2+}/H^{+}$  Exchanger. *EMBO J.* 18:3973-3980.
- Stadler, R., J. Brandner, A. Schulz, M. Gahrtz, and N. Sauer. 1995. Phloem Loading by the PmSUC2 Sucrose Carrier from *Plantago Major* Occurs into Companion Cells. *Plant Cell* 7:1545-1554.
- Sun, Y., A. Reinders, K.R. LaFleur, T. Mori, J.M. Ward. 2010. Transport Activity of Rice Sucrose Transporters OsSUT1 and OsSUT5. *Plant Cell Physiol.* 51:114-122.
- Tuncay, Ö., M.E. Irget, A. Gül, and N. Budak. 1999. Relationships between Fruit Quality Characteristics and Leaf Nutrient Contents of Cucumber Plants. *Developments in Plant and Soil Sciences* 86, 5:193-195.
- Yoshida, S., D.A. Forno, K.J.H. Coc, and K.A. Gomex. 1976. *Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice*, 3rd edn. Manila: The International Rice Research Institute.
- Zhang, X.Z. 1994. *Experimental Technology of Plant Physiology* (in Chinese). Liaoning Science and Technology Press, Shenyang. p.1 23-126.

这篇文章“氮、磷、钾和镁缺乏条件下水稻营养分配的改变和相关转运基因的表达”在下面链接中可以找到:

[Regional Activities/China](#)



研究报告

营养元素钾对谷类作物氮肥利用率的影响

Brar, M.S.<sup>(1)</sup>, Bijay-Singh<sup>(1)</sup>, S.K. Bansal<sup>(2)</sup>, Ch. Srinivasarao<sup>(3)</sup>

摘要

随着氮肥用量的不断增加，单位施肥量的氮素养分所提高的作物产量（氮肥利用率，NUE）却显著降低。不管从经济还是从环保角度来看，提高氮肥利用率都显得尤为重要。在提高氮肥利用率的途径中，平衡施肥，特别是 N、K 养分元素的平衡和 N-K 养分平衡中的协同作用，最近正受到人们的关注。水稻作物上的氮肥利用率只有 30%~40%，其他谷类作物为 50%~60%。有报道称，N 和 K 的交互作用有利于作物产量和经济效益，但世界上很多地区，N、K 平衡施用的措施并未得到有效实施。在如高粱、珍珠粟、穆子、玉米和细柄黍 (minor millets) 等很多旱地谷物上，都存在着 N 和 K 的正交互作用。在中国、印度和北美等地区 241 个长期定位点开展的试验中，平衡施用氮、磷、钾肥，能提高当年的养分利用率，平均提高 54%，而单施氮肥的条件下，当年的养分利用率仅为 21%。有报道称，在使用钾肥后，提高了萨凡纳地区(Savannah regions) 种植的高粱中氮的含量，同时还提高了氮肥利用率。在施用 PK 肥时也可以发现上述情况，氮肥农学效率 (AE<sub>N</sub>) 得到明显提高，其中，高粱作物达 6.7kg/kg，珍珠粟为

<sup>(1)</sup> 庞泽普农业大学，卢迪亚纳，141 004，庞泽普，印度

<sup>(2)</sup> 印度钾研究所，古尔冈，122 001，庞泽普，印度

<sup>(3)</sup> 旱地农业中心研究所，三妥那嘴，赛得巴，海德拉巴 500 059，印度

表 1. 水稻和小麦作物氮肥利用率 (资料来自: Cassman et al., 2002)

作物	地区	农民数	氮素平均	氮素利用
			用量	效率
			Kg ha <sup>-1</sup>	%
水稻	亚洲-农民习惯管理	179	117±39	31±18
	亚洲-科学定位管理	179	112±28	40±18
小麦	印度 - 恶劣天气	23	145±31	18±11
	印度 - 有利天气	21	123±20	49±10

10.36.7kg/kg。平衡施肥能提高当地的氮肥农学效率和氮肥偏生产力。

前言

钾肥施用不足而氮肥使用过量，是当今集约农业生产体系所面临的一个严重问题，导致了大量氮素养分流失、环境污染和氮肥利用率 (NUE) 较低等情况的发生。近年来，肥料用量在增加，但单位养分的增产量却明显降低 (Sharma 和 Sharma, 2011; Benbi and Brar, 2011)。1960 至 2008 年，印度灌溉地区粮食作物上，单位养分增产量就呈显著降低 (图 1, Biswas and Sharma, 2008a)。因此，无论是考虑经济因素还是环境因素，提高

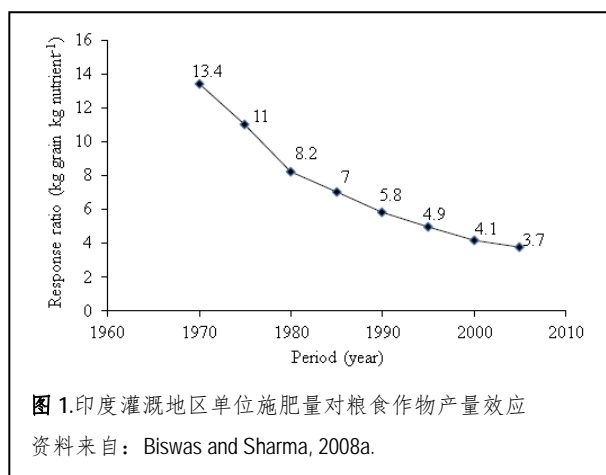


图 1. 印度灌溉地区单位施肥量对粮食作物产量效应  
资料来自: Biswas and Sharma, 2008a.

氮肥利用率都是十分必要的。

包括印度在内的很多发展中国家不重视施用钾肥，导致这些国家农业生态系统中土壤钾亏缺和作物减产 (Regmi et al., 2002; Panaullah et al., 2006; Ladha et al., 2003; Wang et al., 2007b; Lal et al., 2007)。最优的 N:K 的养分比例可以提高作物的产量和品质。K 是植物生长发育所

表 2. 印度哈里亚纳邦冲积土上施用钾肥对珍珠粟和小麦作物子粒中蛋白质含量的直接效应和残余效应

Nutrient application		Pearl millet		Wheat	
Pearl millet	Wheat	Protein content	Protein yield	Protein content	Protein yield
-----kg ha <sup>-1</sup> -----		%	kg ha <sup>-1</sup>	%	kg ha <sup>-1</sup>
N90P60K0	N120P60K0	09.85	211	10.62	426
N90P60K30	N120P60K0	10.75	257	11.13	462
N90P60K60	N120P60K0	11.29	282	11.74	506
N120P60K0	N150P60K0	10.01	244	10.86	451
N120P60K30	N150P60K0	10.93	297	11.45	452
N120P60K60	N150P60K0	11.51	329	11.87	528
CD (5%)		0.79		0.81	

资料来自: Yadav et al., 2007

必需的一种大量营养元素。K除了能激活多种酶外，对于维持细胞膜之间的电位梯度和细胞组织膨胀等也起着重要作用。光合作用、蛋白质合成和气孔运动中，K也是必不可少的营养元素，是维持正负离子平衡中的一种主要阳离子(Marschner, 1995)。

施用氮肥是农民促进作物生长的一种主要手段。要使氮肥利用率达到最高，从而提高作物产量，就必须使作物能获得和吸收足量的，来自于土壤K库中的交换性钾。由于N和K之间交互作用对作物的生长发育有着较大的影响，因此，当土壤中交换性K含量低于临界水平时，施氮肥反而会造作物的减产。这种N和K之间的交互作用，使得在低钾含量的土壤中施用氮肥变得毫无意义，因为在这种土壤中施用氮肥非但没有肥效，相反还会导致种植户遭受经济损失，同时过量的氮肥还造成了环境风险。

提高氮肥利用率的各种途径中，平衡施肥，特别是氮、钾肥平衡和达到氮和钾营养元素之间的协同作用，对灌溉农业和旱作农业都十分重要

(Ganeshamurthy and Srinivasarao, 2001)。氮肥利用率受许多农学因素的影响，包括耕作方式、播种时间、作物品种、种植方式、灌溉、杂草控制、病虫害管理和养分的平衡利用等(Srinivasarao, 2010)。这些因素无论是个体作用还是共同作用，都对氮肥利用率有很重要的影响。例如，种植材料的选择、种植密度和平衡施肥这3个因素共同作用能提高氮肥利用率25%~50%(Srinivasarao et al., 2006)。在中国的华北和东北地区做的多点田间试验结果也表明，在施用适量钾肥的条件下，通过采用高产栽培技术措施(HP)获得的玉米作物的产量，要高

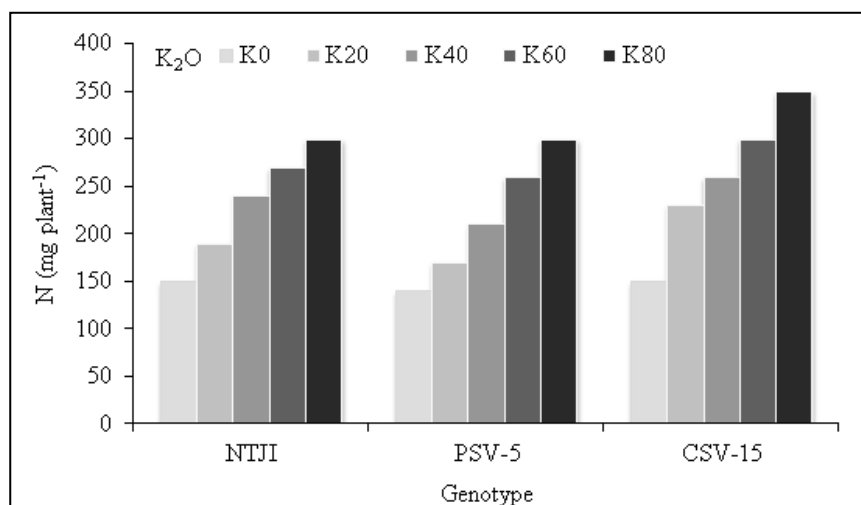


图2. 印度安德拉邦贡土尔区三种高粱品种上施用钾肥对氮素吸收的影响  
(资料来自: Pillai and Nookaraju, 1997.)

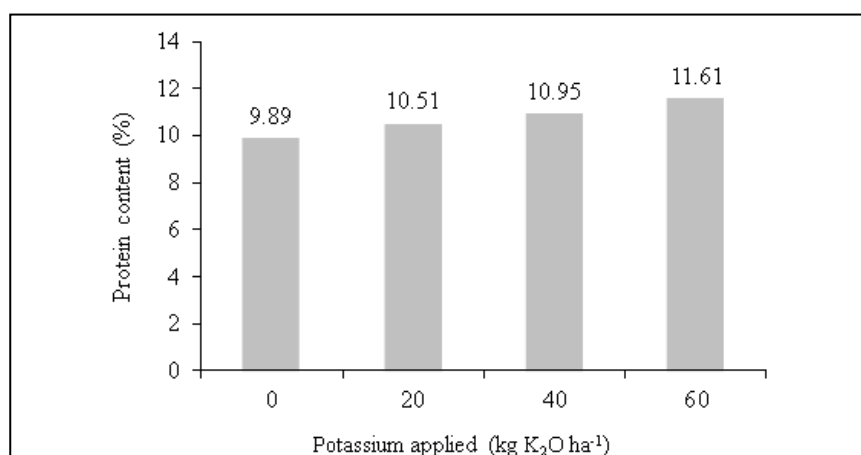


图3. 施用钾肥对印度哈雅拉邦冲积土上珍珠粟作物蛋白质含量的影响  
(N 施用量为 120kg ha<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施用量为 60kg ha<sup>-1</sup>, 资料来自: Yadav et al., 2007)

表3. 平衡施肥对作物产量和氮肥农学效率的影响

Crop	Yield			Agronomic efficiency (AE <sub>N</sub> )		
	Control	N alone	+PK	N	+PK	Increase
	-----mt ha <sup>-1</sup> -----			-----kg grain kg N <sup>-1</sup> -----		
Pearl millet	1.05	1.24	1.65	4.7	15.0	10.3
Maize	1.67	2.45	3.24	19.5	39.0	19.5
Sorghum	1.27	1.48	1.75	5.3	12.0	6.7

资料来自: Prasad, 2009.

于一般栽培措施 (CP) 条件下获得的产量 (Zhang *et al.*, 2011)。

施肥不足和不平衡会使土壤产生退化, 这引发了土壤养分固持和其他的养分管理问题。据估计, 2011-2012 年氮肥 (N) 供需缺口约为 180 万 t, 磷肥 (P) 约为 190 万 t。所有 K 的需求将继续依靠进口来解决。关于肥料偏生产力持续降低的问题正被人们所关注。水稻的氮肥利用率只有 30%~40%, 其他谷类作物氮肥利用率为 50%~60%。在多数作物上的磷肥利用率为 15%~20%, 钾肥则为 60%~80%。养分利用率偏低不仅增加了农作物的生产成本, 同时导致了环境污染。

N-K 交互作用还取决于氮的供给形式。钾素养分的亏缺会促进  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸收, 而抑制  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的吸收、转移和同化, 同时降低叶片中硝酸还原酶 (NR) 活性。这表明, 相比对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的同化, 植物更需要有足够量的 K 素供给来保证  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的吸收, 维持叶片中硝酸还原酶的活性 (NRA) (Ali *et al.*, 1991)。K 能激活植物中酶的铵盐同化和氨基酸运输的作用 (Hagin *et al.*, 1990)。因此, 提供足量的 K 素营养能促进铵盐的利用, 使得 K 在同多种 N 素营养混施时, 提高作物产量 (Hagin *et al.*, 1990)。有许多关于不同作物中  $\text{NH}_4^+$  和 K 之间交互作用的研究。K<sup>+</sup> 可以通过抑制  $\text{NH}_4^+$  的吸收、促进 C 和 N 在植物根际的同化作用, 从而减轻  $\text{NH}_4^+$  的毒害作用 (Roosta 和 Schjoerring, 2008)。NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup> 类似的化学作用和同样的离子状态, 表明他们通过运输体系中可能存在酶作用物的竞争

表 4. 玉米的钾肥利用率与氮肥利用率提高百分比的关系

Treatment*	RE <sub>K</sub> (%)**		NUE increase (%)***	
	Range	Mean	Range	Mean
N <sub>1</sub> K <sub>0</sub>	-	-	-	-
N <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	26.7-39.5	33.8	9.4-22.3	14.8
N <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	38.3-42.7	40.5	20.7-25.1	22.2
N <sub>1</sub> K <sub>3</sub>	39.2-43.6	38.3	20.7-36.7	29.7
N <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	-	-	-	-
N <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	29.0-38.2	29.3	12.2-25.1	18.3

资料来源: Xie *et al.*, unpublished data; In: Zhang *et al.*, 2011

\* 试验地点位于河南省的遂平县、西平县和安徽省的肥东县。N1 和 N2 处理的 N 施用量分别为 195-240 和 255-312 kg ha<sup>-1</sup>。K1、K2 和 K3 处理的 K<sub>2</sub>O 施用量分别为 105、150 和 195 kg ha<sup>-1</sup>。

\*\* 钾肥利用率 (%) = 植物对 K 的吸收百分比 [(钾肥用量 - 未被利用的钾肥量) / 钾肥用量] × 100

\*\*\* 氮肥利用率提高百分比 (%) = 植物对 N 的吸收百分比 [(钾肥用量 - 未被利用的钾肥量) / 氮肥用量] × 100

表 5. N-K 交互作用对水稻和花生的产量和氮肥农学效率的影响

K rates	N rates (kg ha <sup>-1</sup> )				N rates (kg ha <sup>-1</sup> )			
	60		80		60		80	
	Rice yield		AE <sub>N</sub>		Groundnut pod yield		AE <sub>N</sub>	
kg ha <sup>-1</sup>	mt ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	mt ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	
0	3.10	3.02			1.68	1.70		
30	3.40	3.30	5.16	3.50	1.84	1.93	2.66	2.87
60	3.64	3.61	9.00	7.37	2.07	2.15	6.50	5.62
90	3.75	3.83	10.83	10.12	2.06	2.23	6.30	6.62
Mean	3.48	3.44			1.91	2.00		

LSD (0.05): N=NS, K=0.10, N×K=0.12

N=0.05, K=0.08, N×K=NS

资料来源: Mitra *et al.*, 2001

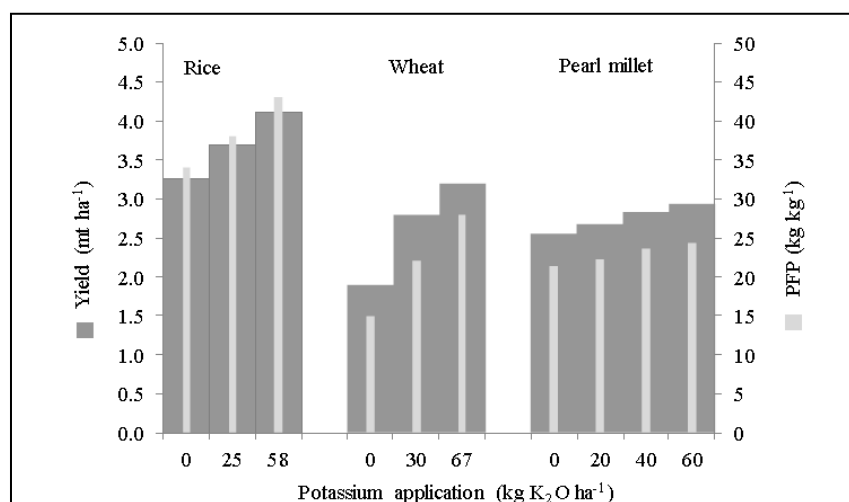


图 4. 施用钾肥对水稻、小麦和珍珠粟产量和氮肥偏生产力的影响

(改编自: Magen and Nosov, 2008; Yadav *et al.*, 2007)

**表6.N-K交互作用对小麦和高粱的产量和氮肥农学效率的影响**

K rates	N rates (kg ha <sup>-1</sup> )		AE <sub>N</sub>	N rates (kg ha <sup>-1</sup> )		AE <sub>N</sub>
	0	120		0	80	
	Wheat yield			Sorghum (f) yield		
kg ha <sup>-1</sup>	-----kg ha <sup>-1</sup> -----		kg kg <sup>-1</sup>	-----kg ha <sup>-1</sup> -----		kg kg <sup>-1</sup>
0	1.42	1.52	0.83	5.27	5.24	-
50	1.89	2.12	1.85	5.48	6.72	15.5
Mean	1.63	1.82		5.37	5.98	
LSD(0.05): N=0.16, K=NS, NxK=NS				N=0.42, K=NS, NxK=0.53		

 资料来源: Golakiya *et al.*, 2001

(Jarvis 1987; Guo *et al.*, 2007)。氮、钾肥的优化施用是农业养分资源管理中一项不可缺少的内容。N-K交互作用在农业生态系统中普遍存在 (Gething, 1993; Johnston and Milford, 2009)。本文中,我们就 N-K交互作用对谷类作物氮肥利用率的影响进行了综述。

氮肥利用率是一项综合效率指标,包含了从土壤中吸收的 N 对作物产量的贡献率、肥料中 N 的吸收利用率和植物吸收氮后转换为产量的效率等参数。谷类作物的氮肥利用率不高。大量野外田间试验 (Cassman *et al.*, 2002) 表明,有超过 50% 的氮肥未能被作物所吸收利用 (表 1)。在适宜的气候条件下,氮肥的最大利用率也只是接近 50%。全球谷类作物氮肥利用率约为 33%,每提高氮肥利用率 1 个百分点,需要花费 2.34 亿美元 (Magen and Nosov, 2008)。

### 钾对提高氮肥利用率的作用

提高氮肥利用率最普遍采用的一项措施就是肥料养分的平衡施用,这种措施无论在发展中国家还是在发达国家实施,效果都是一样。最近,在中国、印度和北美等地区开展的 241 个长期定位试验表明,平衡施用 NPK 肥平均能使当年养分利用率提高到 54%,而单施 N 肥时,养分利用率则只有 21% (Fixen and West, 2002)。虽然通过降低产量的方式也可以提高养分利用率,但这样会降低农户的经济效益,同时也不利于环境的保护 (Srinivasarao and Subbarao, 1999)。

### 钾肥施用和氮素吸收

通过施用钾肥来提高作物对氮素养分的吸收,就能从根本上提高氮肥利用率。施用钾肥的作物的产量很大程度上取决于氮素养分含量水平和养分间的正交互作用 (MacLeod,

1969; Blevins, 1978; Loué, 1978; Guo *et al.*, 2004; Bruns 和 Ebellhar, 2006; Brennan 和 Bolland, 2007, 2009)。小麦施用适量的氮肥 (112.5kg ha<sup>-1</sup>) 时,再施用钾肥后作物的增产量,要比只施氮肥或者只施钾肥时作物获得的增产量高。当用农家厩肥作为钾肥施用时,玉米的产量和氮肥利用率之间的相互关系更加明显 (Nakashgir, 1992)。然而,过量施用氮肥和钾肥则不能获得更高的作物增产量。

通过在印度安德拉邦贡土尔区缺 K 的沙土上种植三种不同基因型的高粱作物,研究施用钾肥对作物吸收氮素的影响。所有三种基因型的高粱作物,施用钾肥都可以提高作物干物质产量和氮素的吸收量 (图 2, Pillai and Nookaraju, 1997)。最佳的 NK 比例有利于作物的健康生长,反之 NK 养分不平衡则不利于作物生长 (Xie, 2000; Wells and Wood, 2007)。

### 钾肥施用和植物蛋白质含量

施用钾肥能促进氮素向地上部分的吸收和运输,也增加了氮素同化酶的活性 (Anjana *et al.*, 2009)。由于氮素养分含量的提高和氮素同化酶活性的增强具有一致性,表明这些酶通过调节作用以同化植物中的 N,从而提高氮肥利用率。

在小麦-珍珠粟轮作试验中,因为施用钾肥,使得珍珠粟和小麦子粒中蛋白质的含量得到增加 (表 2)。在 K<sub>2</sub>O 增施 0 到 60kg ha<sup>-1</sup> 条件下,施用 N 为 90kg ha<sup>-1</sup> 时,珍珠粟子粒中蛋白质含量从 9.85% 增加到 11.29%,施用 N 为 120kg ha<sup>-1</sup> 时,珍珠粟子粒中蛋白质含量从 10.01% 增加到 11.51% (Yadav *et al.*, 2007)。在 K<sub>2</sub>O 增施 0 到 60kg ha<sup>-1</sup> 条件下,施用

**表7.施用钾肥在2个施氮水平上对珍珠粟的氮肥偏生产力的影响**

K rates (kg K ha <sup>-1</sup> )	90 kg N ha <sup>-1</sup>		120 kg N ha <sup>-1</sup>	
	PFP <sub>N</sub>	Increase	PFP <sub>N</sub>	Increase
	kg kg <sup>-1</sup>	%	kg kg <sup>-1</sup>	%
20	23.8	-	20.3	-
40	26.6	11.7	22.6	11.3
60	27.8	16.8	23.8	17.3
N level 120 kg N ha <sup>-1</sup>				

 资料来源: Yadav *et al.*, 2007.

N 为  $120\text{kg ha}^{-1}$  时, 小麦蛋白质含量从 10.62% 增加到 11.74%, 施用 N 为  $150\text{kg ha}^{-1}$  时, 小麦子粒中蛋白质含量从 10.86% 增加到 11.87%。子粒中蛋白质含量随着钾肥施用量的增加而明显提高, 而与氮肥施用水平无关。以上试验结果表明, K 有利于蛋白质的形成, 从而提高氮肥利用率。

同样, 在珍珠粟-芥菜轮作的试验中, 施用钾肥也能提高珍珠粟子粒中蛋白质的含量, 在施用量  $\text{K}_2\text{O}$  为  $40\text{kg ha}^{-1}$  时, 蛋白质含量的提高效果最明显 (表 3)。蛋白质产量 (作物产量  $\times$  蛋白质含量%) 因钾肥的施用而显著增加, 这可能是由于钾能通过促进光合作用产物的移动性, 提高氮肥利用率。珍珠粟作物蛋白质产量从  $252\text{kg ha}^{-1}$  提高到了  $340\text{kg ha}^{-1}$ 。

施用钾肥有利于提高谷物中蛋白质含量和氨基酸含量 (Yang *et al.*, 2004; Venkatesan *et al.*, 2004; Zou *et al.*, 2006b), 但提高的效果会随作物品种的不同而有所区别 (Zou *et al.*, 2006b)。K 对于提高扬麦 10 号 (一种中等蛋白质含量的小麦品种) 的蛋白质含量的作用就要明显好于宁麦 9 号 (一种低蛋白质含量的小麦品种)。小麦子粒中蛋白质含量不同的情况表明, N 素的积累和转运之间存在很好的正相关性 (Zou *et al.*, 2006b)。

#### 施用钾肥和氮肥回收率 ( $\text{RE}_N$ )

在印度开展的大量多点田间试验表明, 平衡施肥对于增加作物产量和提高氮素利用率 ( $\text{NUE}$ ) 方面的重要性 (表 3)。在旱作农业为主的地区, 氮肥农学效率 ( $\text{AE}_N$ ) 从 6% 提高到 20%。根据一些养分平衡的试验结果表明, 氮肥农学效率随着 P 和 K 肥的施用得到提高, 高粱作物中每公斤 N 能提高子粒产量 6.7kg, 珍珠粟作物中每公斤 N 提高子粒产量

表 8. 钾对玉米氮肥偏生产力和表观氮肥利用率的影响

K level	2003	2004	2005	2006	2007	Average	Increase over $\text{K}_0$
kg $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$	-----PFP <sub>N</sub> (kg kg N <sup>-1</sup> )-----						%
0	21.1	32.0	26.8	38.2	45.4	32.7	-
30	24.2	37.9	27.3	39.5	47.6	35.3	7.9
60	27.0	41.8	27.4	41.3	53.3	38.0	16.2
90	26.4	40.9	30.9	48.2	48.8	39.0	19.3
	-----Apparent N recovery (%)-----						
0	19	32	30	41	40	32	-
30	22	39	31	41	44	35	9.3
60	24	44	30	41	42	36	12.5
90	23	46	37	50	47	41	28.1

资料来源: Brar *et al.*, 未发表数据

$10.3\text{kg}$ , 玉米作物中每公斤 N 提高子粒产量  $19.5\text{kg}$  (Prasad, 2009)。

相比其他处理, 小麦作物上喷施叶面氯化钾肥和施用尿素的处理所获得的生物产量最高, 其他处理有对照 (未采取喷施的处理)、单施  $\text{KNO}_3$ 、单施 KCl 和单施尿素等肥料 (Khan *et al.*, 2006)。在许多长期定位试验中, 都有关于 N-K 正交互作用的报道 (Belay *et al.*, 2002; Cai and Qin, 2006; Wang *et al.*, 2007a)。同时施用氮肥和钾肥能提高水稻和小麦的产量的情况说明, 氮肥施用的高效率

是钾肥施用高效率的前提 (Mondal, 1982)。玉米作物上钾肥的回收率 ( $\text{RE}_K$ ) 和氮肥施用量分别得到提高, 其中,  $\text{K}_2\text{O}$  为  $105\sim 150\text{kg ha}^{-1}$ , N 为  $195\sim 240\text{kg ha}^{-1}$  (表 4)。最佳的 N-K 施用比例有利于作物的生长, 提高钾肥和氮肥利用率。N-K 交互作用不仅对提高水稻和花生的产量有利 (表 5), 同时还能提高氮肥农学效率。

N 和 K 之间的交互作用对作物生长和最终产量的影响, 可以解释为对作物生长过程中的植物组织和单个

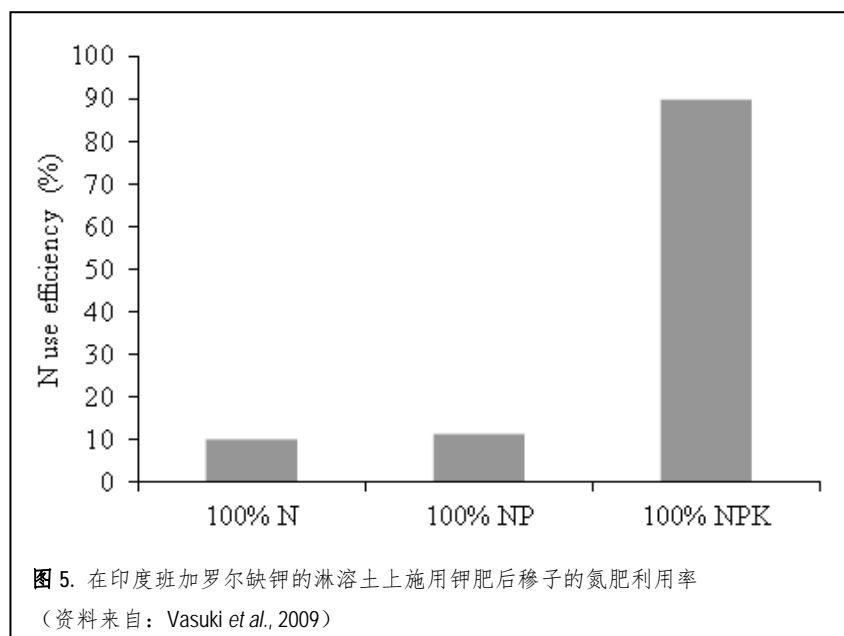


图 5. 在印度班加罗尔缺钾的淋溶土上施用钾肥后移子的氮肥利用率 (资料来源: Vasuki *et al.*, 2009)



细胞水平产生的影响和交互作用。了解这些植物体内的交互作用如何控制作物的生长，有助于我们理解土壤中拥有足量的可交换性 K 的重要性。由于钾在植物韧皮部具有很好的移动性，使得钾能通过韧皮部运输获得重复利用（Marschner, 1995; Marschner *et al.*, 1997）。由于钾离子所带电荷与硝酸根离子所带电荷相反，且它在韧皮部具有同化作用，因此，钾的循环和再循环对于  $\text{NO}_3^-$  从根向地上部的运输有着重要作用（Maathuis, 2007）。植物茎部和从根际开始的循环中，韧皮部  $\text{K}^+$  再运输的数量和种类，因植物类型不同而有着很大的区别，而且还会因胁迫作用而发生变化（Jiang *et al.*, 2001; Lu *et al.*, 2005）。 $\text{K}^+$  的循环和再循环随着植物新梢生长量的增加而得到增强，这与  $\text{K}^+$  在植物木质部的  $\text{NO}_3^-$  和韧皮部的有机酸中所起的电荷平衡的作用相一致（Engels and Kirkby, 2001）。皮层中  $\text{K}^+$  浓度变化与钾对木质部中  $\text{NO}_3^-$  转运的影响、钾对根际木质部循环的影响，都有着密切的关系（Jarvis *et al.*, 1990）。不同的条件下，钾提高农学效率的作用会发生变化。施用  $\text{K}_2\text{O}$  为  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  时，高粱属的饲料作物的氮肥农学效率比小麦作物高（表 6）。

#### 钾肥施用和氮肥偏生产力 (PFP<sub>N</sub>, 每施用 1kg N 获得的作物产量, kg/kg)

在印度，氮肥偏生产力正逐渐下降。氮肥偏生产力最初的下降在预料之中，这是因为农户在施用氮肥时因系统背景所致的偶然问题（Bijay-Singh and Yadvinder- Singh, 2008）。然而，近 10 年由于氮肥利用率的降低所致的较低的氮肥偏生产力正受到特别的关注。施用钾肥不仅提高水稻、小麦和珍珠粟作物的产量，同时还能提高氮肥偏生产力（图

4）。亚达夫等人（Yadav *et al.*, 2007）开展的研究更进一步说明，不论氮肥施用水平，只要施用钾肥就能提高氮肥偏生产力（表 7）。在氮肥施用量为  $90$  和  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  时，珍珠粟的氮肥偏生产力得到提高，而在高施钾水平和高施氮水平条件下，氮肥偏生产力提高的更多。

玉米作物中施用钾肥对氮肥偏生产力（每施用  $1 \text{ kg N}$  获得的作物产量,  $\text{kg/kg}$ ）有着明显的影响。在施用钾肥条件下，不同地区和时间氮肥偏生产力变化为  $21.1$  到  $53.3 \text{ kg/kg}$ （表 8）。在 N 用量为  $0$ 、 $30$ 、 $60 \text{ kg ha}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  用量为  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  条件下，各地区多年平均氮肥偏生产力分别为  $32.7$ 、 $35.3$ 、 $38.0$  和  $39.0 \text{ kg/kg}$ 。相比  $\text{K}_0$  处理，不同施钾水平分别能提高氮肥偏生产力为  $7.9\%$ 、 $16.2\%$  和  $19.3\%$ 。在不同试验点和试验年份中，氮肥利用率为  $19\%$  到  $50\%$ ，在  $\text{K}_0$  和  $\text{K}_{90}$  处理中，氮肥利用率平均能提高  $32\%$  到  $41\%$ ，这说明施用钾肥有利于氮肥利用率的提高。在实际生产中推广施用钾肥，可以提高平衡施肥中的氮肥利用率，减少氮损失。

#### 钾肥施用和氮肥利用率

氮肥利用率受多种因素影响，如作物对氮的需求量，土壤对氮素养分的供给能力，肥料及有机肥的施用，

氮在土壤-植株系统中的损失。农业生态系统中施肥不平衡和氮、钾等养分的不当施用，都会影响到氮肥利用率。国际钾肥研究所（IPI）在亚洲和欧洲开展的田间试验结果表明，在施用适量钾肥条件下，除了提高产量外，氮肥利用率也得到提高，提高量平均从乌克兰玉米的  $15.5\%$  到孟加拉水稻的  $26.3\%$ （表 9）。

氮肥利用率通常取决于缺钾程度。在印度班加罗尔的缺钾的淋溶土上，施用钾肥能提高氮肥利用率。在不施钾肥条件下，施用氮肥和磷肥都不能提高氮肥利用率。在缺钾的红土上施用钾肥，能提高氮肥利用率  $10\%$  到  $90\%$ （Vasuki *et al.*, 2009, Srinivasarao 2010, 图 5）。

#### 结论

为了提高氮肥利用率，亟需在不同作物上结合钾肥的施用，开展氮肥的平衡施用。施用钾肥条件下进行平衡施肥，可以很轻易的提高氮肥利用率  $20\%$ 。N 和 K 之间存在着正交互作用，有利于植物吸收和利用氮肥，从而形成蛋白质和氨基酸，最终提高作物的产量和品质。在谷类和其他作物上平衡施用氮肥和钾肥，不仅为农户提供了更高的经济效益，还能减少农田土壤中的氮排放所致的环境退化和温室效应。

表 9. 国际钾肥研究所在亚洲和欧洲开展的田间试验中获得的作物增产和氮肥利用率

Crop	Country	N rates	K rates	Yield	Increase in
				increase	NUE
				----- $\text{kg ha}^{-1}$ -----	
				%	
Maize	India	125	30-90	200-1300	18 (6-29)
	China	150	75-180	200-1800	18 (5-29)
	Ukraine	30	30	720	15.5
Rice	Bangladesh	100	33-66	690-900	26.3 (23-30)
Wheat	China	90	60-120	230-610	10-23

氮肥利用率提高的幅度值

资料来源: Magen and Nosov, 2008



### 参考文献

- Ali, A.A., M. Ikeda, and Y. Yamada. 1991. Effects of the Supply of K, Ca, and Mg on The Absorption and Assimilation of Ammonium-Nitrogen and Nitrate-Nitrogen in Tomato Plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37(2):283-289.
- Anjana, S. Umar, and M. Iqbal. 2009. Effect of Applied Potassium in Increasing the Potential for N Assimilation in Spinach (*Spinacea oleracea* L). e-*ifc* No. 20, June 2009.
- Benbi, D.K., and M.S. Brar. 2011. Evaluation of Soil Fertility and Nutrient Balances under Intensive Agriculture. In: M.S. Brar, and S.S. Mukhopadhyaya (ed.) Potassium Role and Benefits in Improving Nutrient Management for Food Production, Quality and Reduced Environmental Damages. Volume-I, p. 499-518.
- Bijay-Singh, and Yadvinder-Sing. 2008. Reactive Nitrogen in Indian Agriculture: Inputs, Use Efficiency and Leakages. *Current Sci.* 94:1382-1393.
- Biswas, P.P., and P.D. Sharma. 2008a. A new Approach for Estimating Fertilizer Response Ratio: The Indian Scenario, *Indian J. Fert.* 4(7):59-62.
- Blevins, D.G., N.M. Bamett, and W.B. Frost. 1978. Role of Potassium and Malate in Nitrate Uptake and Translocation by Wheat Seedlings. *Plant Physiol.* 62:784-788.
- Brennan, R.F., and M.D.A. Bolland. 2007. Influence of Potassium and Nitrogen Fertiliser on Yield, Oil and Protein Concentration of Canola (*Brassica napus* L.) Grain Harvested in South-Western Australia. *Aust. J. Exp. Agr.* 47(8):976-983.
- Brennan, R.F., and M.D.A. Bolland. 2009. Comparing the Nitrogen and Potassium Requirements of Canola and Wheat for Yield and Grain Quality. *J. Plant Nutr.* 32(12):2008-2026.
- Bruns, H.A., and M.W. Ebellhar. 2006. Nutrient Uptake of Maize Affected by Nitrogen and Potassium Fertility in a Humid Subtropical Environment. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 37:275-293.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, and D. Walters. 2002. Agroecosystems, Nitrogen-Use Efficiency and Nitrogen Management. *Ambio* 31:132-140.
- Engels, C., and E.A. Kirkby. 2001. Cycling of Nitrogen and Potassium Between Shoot and Roots in Maize as Affected by Shoot and Root Growth. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164:183-191.
- Fixen, F.E., and F.B. West. 2002. Nitrogen Fertilizers: Meeting Contemporary Challenges. *Ambio* 31(2):169-176.
- Ganeshamurthy, A.N., and Ch. Sriniva-sarao. 2001. Interaction of Potassium with Other Nutrients. Special publication "Potassium in Indian Agriculture". International Symposium on Importance of Potassium in Nutrient Management for Sustainable Crop Production in India. International Potash Institute, Switzerland and Potash Research Institute of India, Gurgaon. India. p. 159-174.
- Gething, P.A. 1993. Improving Returns from Nitrogen Fertilizer - The Potassium-Nitrogen Partnership. IPI Research Topics No. 13 (2nd revised edition). IPI, Switzerland.
- Golakiya, B.A., J.D. Gundalia, and K.B. Polara. 2001. Potassium Dynamics in the Soils of Saurashtra. Poster at the IPI-PRII International Symposium on the Importance of Potassium in Nutrient Management for Sustainable Crop Production in India, 3-5 December 2001, New Delhi, India.
- Guo, S.W., Q.R. Shen, and H. Brueck. 2007. Effects of Local Nitrogen Supply on Water Uptake of Bean Plants in a Split Root System. *J. Integr. Plant Biol.* 49:472-480.
- Guo, X.S., H.B. Zhu, W.J. Wang, S.Y. Ye, J. Wu, and L.S. Wu. 2004. Effect of Different Rates of Nitrogen and Potash on Yield and Quality of Cabbage. *Plant Nutri. Fertil. Sci.* 10(2):161-166 (in Chinese).
- Hagin, J., S.R. Olsen, and A. Shaviv. 1990. Review of Interaction of Ammonium Nitrate and Potassium Nutrition of Crops. *J. Plant. Nutr.* 13:1211-1226.
- Jarvis, S.C. 1987. The Effect of Low Regulated Supplies of Nitrate and Ammonium Nitrogen on the Growth and Composition of Perennial Rye Grass. *Plant Soil* 100:99-112.
- Jarvis, S.C., J.H. Macduff, J. Webb, and A. Mosquera. 1990. Effect of Nitrate Supply and Deprivation and/or Defoliation on Potassium Absorption and Distribution in Rye Grass. *J. Exp. Bot.* 41:1-10.
- Jiang, F., C.J. Li, W.D. Jeschke, and F.S. Zhang. 2001. Effect of Top Excision and Replacement by 1-Naphthylacetic Acid on Partition and Flow of Potassium in Tobacco Plants. *J. Exp. Bot.* 52:2143-2150.

- Johnston, A.E., and G.F.J. Milford. 2009. Nitrogen and Potassium Interactions in Crops. The Potash Development Association. PO Box 697, York YO32 5WP, UK.
- Khan, M.Z., S. Muhammad, M.A. Naeem, E. Akhtar, and M. Khalid. 2006. Response of Some Wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties to Foliar Application of N and K Under Rainfed Conditions. *Pak. J. Bot.* 38:1027-1034.
- Ladha, J.K., D. Dawe, H. Pathak, A.T. Padre, R.L. Yadav, Bijay-Singh, Yadvinder-Singh, Y. Singh, P. Singh, A.L. Kundu, R. Sakal, N. Ram, A.P. Regmi, S.K. Gami, A.L. Bhandari, R. Amin, C.R. Yadav, S. Bhattarai, S. Das, H.P. Aggarwal, R.K. Gupta, and P.R. Hobbs. 2003. How Extensive are Yield Declines in Long-Term Rice-Wheat Experiments in Asia? *Field Crop Res.* 81:159-181.
- Lal, K., A. Swarup, and K.N. Singh. 2007. Potassium Balance and Release Kinetics of Non-Exchangeable K in a Typic Natrustalf as Influenced by Long-Term Fertilizer Use in Rice-Wheat Cropping System. *Agrochimica* 51:95-104.
- Loué, A. 1978. The Interaction of Potassium with other Growth Factors, Particularly with other Nutrients. *Proceedings of the 11th Congress of the International Potash Institute.* p. 407-433.
- Lu, Y.X., C.J. Li, and F.S. Zhang. 2005. Transpiration, Potassium Uptake and Flow in Tobacco as Affected by Nitrogen Forms and Nutrient Level. *Ann. Bot.* 95:991-998.
- Magen, H., and V. Nosov. 2008. Putting Potassium in the Picture: Achieving Improved Nitrogen Use Efficiency. *In: IPI-BFA-BRRI International Workshop on Balanced Fertilization for Increasing and Sustaining Productivity.* 30 March - 1 April 2008, Dhaka, Bangladesh.
- Maathuis, F.J.M. 2007. Monovalent Cation Transporters; Establishing a Link Between Bioinformatics and Physiology. *Plant Soil* 301:1-5.
- Macleod, L.B. 1969. Effects of N, P, and K and their Interactions on the Yield and Kernel Weight of Barley in Hydroponic Culture. *Agron. J.* 61:26-29.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants.* 2<sup>nd</sup> edn. London: Academic Press.
- Marschner, H., E.A. Kirkby, and C. Engels. 1997. Importance of Cycling and Recycling of Mineral Nutrients within Plants for Growth and Development. *Bot. Act.* 110:265-273.
- Mitra, G.N., D. Sahoo, and K.K. Rout. 2001. Effect of N-K Interaction on Yield, Nutrient Uptake and Grain Quality of Rice Groundnut Cropping Sequence in the Alluvial Soils of Orissa. *J. Potassium Res.* 17:71-78.
- Mondal, S.S. 1982. Potassium Nutrition at High Levels of N Fertilization on Rice. *Potash Review* 3:1-4.
- Nakashgir, G.H. 1992. Influence of Potassium on Nitrogen Utilization by Maize under Dryland Conditions as Affected by Water Storage. *Adv. Plant Sci.* 5(1):134-142.
- Panaullah, G.M., J. Timsina, M.A. Saleque, M. Ishaque, A.B.M.B.U. Pathan, D.J. Connor, P.K. Saha, M.A. Quayyum, E. Humphreys, and C.A. Meisner. 2006. Nutrient Uptake and Apparent Balances for Rice-Wheat Sequences. III. Potassium. *J. Plant Nutr.* 29:173-187.
- Pillai, R.N., and Y. Nookaraju. 1997. Effect of Graded Levels of Applied Potassium on Dry Matter Production and Nutrient Uptake in Sorghum. *Potassium Research* 13:239-244.
- Prasad, R. 2009. Enhancing Nutrient Use Efficiency: Environmental Benign Strategies. *Souvenir 67-74, The Indian Society of Soil Science, New Delhi.*
- Regmi, A.P., J.K. Ladha, E. Pasuquin, H. Pathak, P.R. Hobbs, L.L. Shrestha, D.B. Gharti, and E. Duveiller. 2002. The Role of Potassium in Sustaining Yields in a Long-Term Rice-Wheat Experiment in the Indo-Gangetic Plains of Nepal. *Biol. Fert. Soils* 36:240-247.
- Roosta, H.R., and J.K. Schjoerring. 2008. Effects of Nitrate and Potassium on Ammonium Toxicity in Cucumber Plants. *J. Plant Nutr.* 31:1270-1283.
- Samra, J.S., and P.D. Sharma. 2011. Food Security – Indian Scenario. *In: Brar, M.S., and S.S. Mukhopadhyaya (ed.) Potassium Role and Benefits in Improving Nutrient Management for Food Production, Quality and Reduced Environmental Damages. Volume I IPI, IPNI.* p. 15-43.
- Srinavasarao, Ch., and A. Subba Rao. 1999. Impact of Farmyard Manure and Phosphorus Application on Soil Potassium Status and K Uptake in a Vertisol under Soybean-Wheat System. *J. Indian*

- Soc. Soil Sci. 47:176-178.
- Srinivasarao, Ch. 2010. Analysing Nitrogen Use Efficiency in Relation to Potassium in Long-Term Manurial Trials in Dryland Agriculture. IPI-FAI Round Table Discussion on "Analyzing Nutrient Use Efficiency in Relation to Potassium", Fertilizer Association of India, New Delhi 9-6-2010, New Delhi.
- Srinivasarao, Ch., A.N. Ganeshamurthy, M. Ali, and B. Venkateswarlu. 2006. Phosphorus and Micronutrient Nutrition of Chickpea Genotypes in a Multi-Nutrient Deficient Typic Ustochrept. *J. Plant Nutr.* 29(4):747-763.
- Vasuki, N., S.B. Yogananda, D.C. Preethu, K. Sudhr, and S.M. Jayaprakash. 2009. Impact of Long-Term Fertilizer Application on Soil Quality, Crop Productivity and Sustainability: Two Decades Experience. Department of Soil Science and Agricultural Chemistry, University of Agricultural Sciences, Bangalore, Karnataka. p 22.
- Venkatesan, S., S. Murugesan, M.N.K. Ganapathy, and D.P. Verma. 2004. Long-term Impact of Nitrogen and Potassium Fertilizers on Yield, Soil Nutrients and Biochemical Parameters of Tea. *J. Sci. Food Agr.* 84:1939-1944.
- Wang, X.B., W.B. Hoogmoed, D.X. Cai, U.D. Perdok, and O. Oenema. 2007b. Crop Residue, Manure and Fertilizer in Dryland Maize Under Reduced Tillage in Northern China: II Nutrient Balances and Soil Fertility. *Nutr. Cycling in Agroecosys.* 79:17-34.
- Wells, M.L., and B.W. Wood. 2007. Relationships Between Leaflet Nitrogen: Potassium Ratio and Yield of Pecan. *Hort. Technology* 17:473-479.
- Xie, J.C., J.M. Zhou, and R. Härdter. 2000. Potassium in Chinese Agriculture. Hohai University Press, Nanjing, China (in Chinese).
- Yadav, S.S., S. Singh, A. Tikoo, and J.S. Yadav. 2007. Studies on Potash Responses to Field Crops in Light Textured Soils of Southern Haryana, India. *e-ipc* No. 13, September 2007. p. 4-7.
- Yang, S.M., F.M. Li, S.S. Malhi, P. Wang, D.R. Suo, and J.G. Wang. 2004. Long-term Fertilization Effects on Crop Yield and Nitrate Nitrogen Accumulation in Soil in Northwestern China. *Agron. J.* 96:1039-1049.
- Zou, T.X., T.B. Dai, D. Jiang, Q. Jing, and W.X. Cao. 2006b. Potassium Supply Affected Plant Nitrogen Accumulation and Translocation and Grain Protein Formation in Winter Wheat (in Chinese). *Scientia Agri Sinica* 39(4):686-692.

“营养元素钾对谷类作物氮肥利用率的影响”这篇文章还出现在 IPI 网站 [区域活动/印度和氮钾交互作用中心](#)。

## 研究报告

### 以色列死海工业公司钾肥生产中的碳足迹计算

Weidberg, R.<sup>(1)</sup>

#### 引言

死海工业公司 (DSW)，作为一家以色列的钾肥生产商，与国际咨询公司<sup>(2)</sup>一起，通过对其产品、生产设施和供应链中碳足迹 (CFP) 的深入分析，强化了公司在低碳成果方面的竞争优势。基于上述分析，我们概述了两类钾肥 (精细型和紧实型) 的碳足迹，并与现行的行业标准进行比较。此计算涵盖了可直接使用和造粒使用的“精细”型钾肥，以及可直接使用和复混使用的“紧实”型钾肥生产 (提取、加工、配送等) 中所有相关的环节。

#### CFP 资格的计算

为了准确地计算出每吨 (或千克) 钾肥产生的二氧化碳当量 (CO<sub>2</sub>e)，死海工业公司把钾肥的生产过程划分成为 4 个阶段，涵盖了所有涉及温室气体 (GHG) 排放的过程 (表 1)。该过程采用了评估碳足迹的标准方法“PAS2050 指南：如何评估商品和服务中的碳足迹” (BSI, 2008)。2011 年，根据公共通用规范 (PAS) 2050:2011 (BSI, 2011) 对碳足迹的评估方法进行了修改。

对于每个阶段，我们分别制作了一个过程图，并确定引起温室气体排

本文所报道的项目由位于以色列特拉维夫的以色列化工集团温室气体管理中心承担。

<sup>(1)</sup> 通讯作者: [Roy-W@DSW.CO.IL](mailto:Roy-W@DSW.CO.IL)

<sup>(2)</sup> SKM Enviros (英国) 在此过程中给予了以色列化工集团帮助，钾肥作为产品的一部分经历了由碳信托公司进行的认证过程。



死海工业公司在 Sdom 的钾肥工厂鸟瞰图。由以色列化工集团 (ICL) 拍摄。

放的各个活动。本文对 2008 年的数据进行了评估。针对每个排放来源，我们都通过以下方法 (每吨原材料或每度电相当于多少 CO<sub>2</sub> 当量) 测算了每年的排放数据 (所消耗的原材料吨数或使用的电度数)。以上计算得出的结果就是每年由各种来源产生的

CO<sub>2</sub> 当量吨数。然后所有来源释放的 CO<sub>2</sub> 当量总和再除以该年生产量，即为每吨精细型或紧实型钾肥从生产到送达消费者所产生的 CO<sub>2</sub> 当量。

#### 光卤石的生产

在第一个生产阶段，死海中的水

**表 1** 钾肥生产中概要阶段和产生温室气体的主要过程

阶段	温室气体产生的主要过程
光卤石生产	<ul style="list-style-type: none"> <li>抽取死海的水到蒸发池</li> <li>管理，收获和输送光卤石到工厂</li> </ul>
从光卤石到钾肥	<ul style="list-style-type: none"> <li>过程中使用的水</li> <li>过程中使用的能源</li> </ul>
压实	<ul style="list-style-type: none"> <li>过程中使用的能源</li> </ul>
输送 <sup>(1)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>运输过程 (卡车，铁路和船舶) 使用能源，直到产品到达一个普通的港口为止 (计算涉及的港口都在英国)。</li> </ul>

<sup>(1)</sup> 运输是一个额外的阶段，超出 PAS 指南 2050: 2011 (BSI, 2011) 所描述的“从摇篮到大门”的边界。

术语“产品碳足迹”是指一个产品的温室气体 (GHG) 排放贯穿了它的生命周期，从其原料生产 (或提供服务)、配送、消费者使用到丢弃或回收。它包括碳的温室气体二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)、甲烷 (CH<sub>4</sub>) 和氧化亚氮 (N<sub>2</sub>O)，以及包括氢氟烃 (HFCs)，全氟化碳 (PFCs) 和六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 等气体 (BSI, 2008; [http://www.carbontrust.co.uk/solutions/CarbonFootprinting/what\\_is\\_a\\_carbon\\_footprint.htm](http://www.carbontrust.co.uk/solutions/CarbonFootprinting/what_is_a_carbon_footprint.htm))。“从摇篮到大门”描述的生命周期阶段是对原料提取或收购到产品离开生产厂进行评估。



被泵入盐和光卤石池（相距约 10 公里）。这一阶段温室气体的排放主要涉及到需要用电控制泵。所用的电是在 Sdom 的以色列电网和 ICL 热电

厂（CHP）供应。

### 从光卤石到钾肥

这一阶段包括抽取光卤石浆进行筛选、增稠、过滤、浮选、结晶、

浓缩、洗涤、烘干和筛选、入仓及露天存放（用于供应“精细”型钾肥）或者进行压实（用于供应“紧实”型钾肥）。

### 压实

生产紧实型（颗粒状的）钾肥所需的额外步骤为：压实，处理，筛选，烘干，入仓和露天存储。

**运输（为额外阶段，对此过程的碳足迹进行了评估但本文没有列出）**

运输包括电动输送带，卡车，火车和船舶的运输。每种运输方式吨每公里排放的  $\text{CO}_2$  吨数都有各自的影响因素，进而计算运输过程总的碳足迹（每吨产品产生的  $\text{CO}_2$  吨数）。根据最新的指南 PAS2050（2011 年出版）所推荐的“从摇篮到大门”的评估方法，运输阶段不是计算产品碳足迹的强制性附加条件。

不同阶段使用原材料所产生温室气体排放的影响因子由 ICL 热电厂提供，或者由已发表的数据来估算（例如生命循环分析数据库），再叠加到总的碳足迹中。

### 结果和结论

根据死海工业公司钾肥碳足迹的计算，从摇篮到工厂的大门<sup>(3)</sup>，每生产 1 吨精细型钾肥会产生 0.095 吨  $\text{CO}_2$  当量，每生产 1 吨颗粒型钾肥会产生 0.161 吨  $\text{CO}_2$  当量。

<sup>1</sup> 以色列化工集团还计算了其产品在大多数客户港口的 CFP 值，纳入了产品运输过程产生 CFP 的计算中。其结果是每吨精细型钾肥产生 0.159 吨  $\text{CO}_2$  当量，而每吨颗粒型钾肥产生 0.245 吨  $\text{CO}_2$  当量。当然，这些数据与客户所在的具体的位置高度相关，所以 2011 年发布的 PAS2050 标准并不推荐这一方法。

图 1 列出了不同生产阶段碳足迹的分配情况。

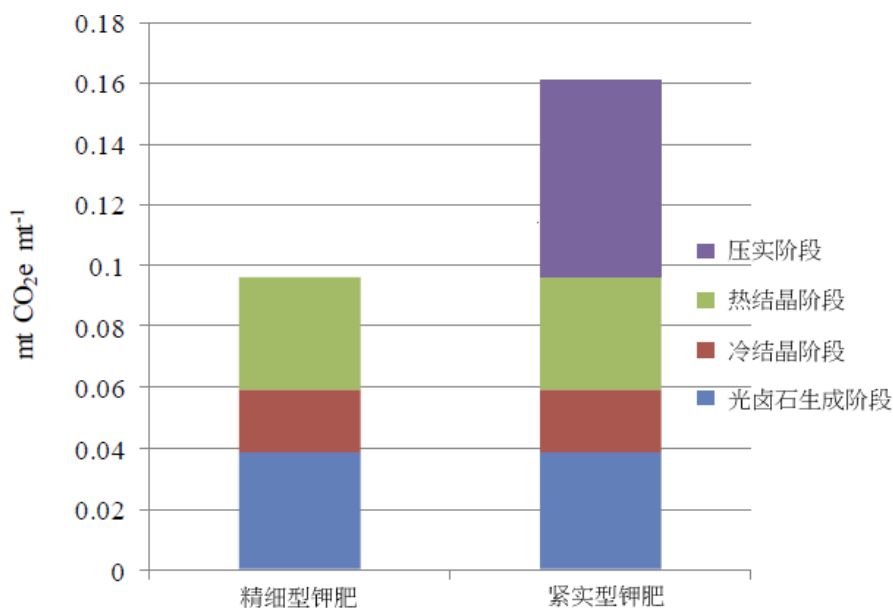


图 1 各个生产阶段（从摇篮到大门）精细型和紧实型钾肥的碳足迹。

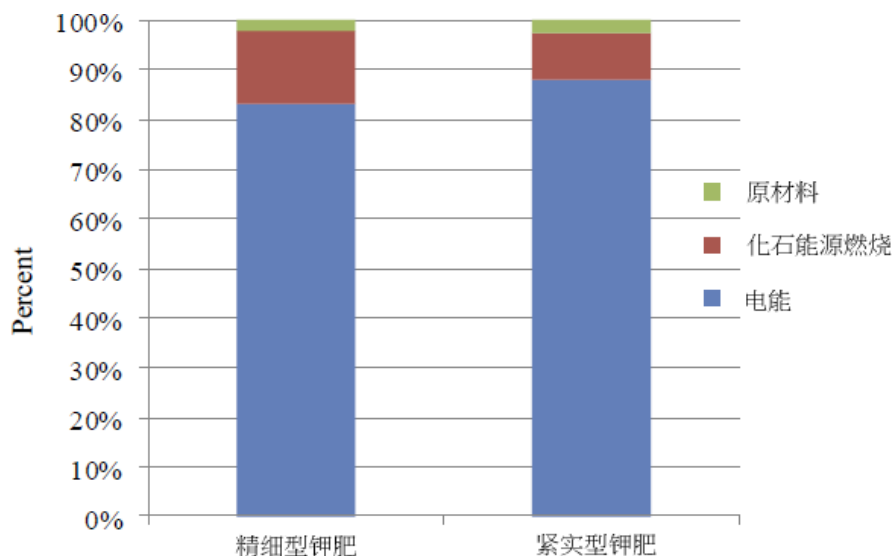


图 2 精细型和紧实型钾肥生产中（从摇篮到大门）不同排放源在碳足迹总量中所占的比例。

注：有关废物处理和水的消耗所排放温室气体忽略不计（0.1% 以下），因而没有标注在图 2 中。不同阶段所使用的原材料（表 1）常用于钾肥的生产过程中。



用挖泥船从池塘河床上获取光卤石。由以色列化工集团 (ICL) 拍摄。

颗粒型钾肥排放较多的温室气体是由额外的压实阶段以及集约运输时较高的碳排放所产生。原材料提取和制造阶段的温室气体主要来源于电力的消耗。2008 年（这年数据被用于分析）后，由于改为使用天然气，以色列国家电力公司发布的温室气体排放下降了 20%。死海工业公司已开始在 Sdom 的 CHP 工厂和其他设备上使用天然气。因而，现阶段由死海工业公司产生的钾肥碳足迹会更低一些。根据 ICL 温室气体管理中心估测，因为钾肥生产中与能源相关的 CO<sub>2</sub> 排放减少了 20%，也潜在的使碳足迹下降，每吨精细型钾肥约产生 0.076 吨 CO<sub>2</sub> 当量，每吨颗粒型钾肥约产生 0.130 吨 CO<sub>2</sub> 当量。对碳足迹更为精确的测算计划将于 2012 年进行。

Kongshaug (1998) 及此后的 Jensenn 和 Kongshaug (2003) 对氮磷钾肥的碳足迹进行了计算。根据他们的计算，欧洲钾肥生产出厂时，平均每吨钾肥产生 0.2 吨 CO<sub>2</sub> 当量。根据相同的生命循环阶段估算，这一数据是 ICL 精细型钾肥产生量（每吨产生 0.095 吨 CO<sub>2</sub> 当量）的两倍。可

能的原因是，死海工业公司在光卤石提取过程中采用了节省能源的措施。一方面，工厂利用死海地区非常强的太阳能来浓缩蒸发池中的卤水。另一方面，钾肥的碳足迹比其他各种形式氨基肥料都低，因为氮素固定过程中需要消耗大量的能量（现代合成氨的工厂生产 1 吨氨就会产生 1.97 吨 CO<sub>2</sub> 当量，Kongshaug, 1998）。

总之，当考虑可持续发展因素时，对于不同产品的比较，碳足迹计算是必要的工具。而根据我们推断，在不久的将来，工厂必须要向官方提供碳足迹的计算结果（例如 Poidevin, 2011）。由于农业约占全球温室气体排放的 30%，因而提高农业能源利用效率就非常必要。死海工业公司有效地利用太阳能，进而显著地减少公司钾肥生产中的碳足迹。

#### 参考文献

BSI. 2008. Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. BSI 389 Chiswick High Road, London W4 4AL.  
[www.bsigroup.com/upload/Standards%20%20Publications/Energy/](http://www.bsigroup.com/upload/Standards%20%20Publications/Energy/)

[PAS2050%20Guide.pdf](http://www.bsigroup.com/upload/Standards%20%20Publications/Energy/PAS2050%20Guide.pdf).

BSI. 2011. PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. BSI 389 Chiswick High Road, London W4 4AL.  
[www.bsigroup.com/upload/Standards%20%20Publications/Energy/PAS2050.pdf](http://www.bsigroup.com/upload/Standards%20%20Publications/Energy/PAS2050.pdf).

Jensenn, T.K., and G. Kongshaug 2003. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions in Fertiliser Production. Proceedings No. 509. International Fertiliser Society. York, UK. 28 p.

Kongshaug, G. 1998. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions in Fertilizer Production. International Fertilizer Industry Association. IFA Technical Conference, Marrakech, Morocco, 28 September-1 October 1998. 18 p.  
[www.fertilizer.org/ifacontent/download/5377/84620/version/1/file/1998\\_ifa\\_marrakech\\_kongshaug.pdf](http://www.fertilizer.org/ifacontent/download/5377/84620/version/1/file/1998_ifa_marrakech_kongshaug.pdf).

Poidevin, G. 2011. Carbon Footprint of Companies: An Initiative of the Fertilizer Sector in France. IFA Annual Conference, Montreal, Canada, 23-25 May 2011.  
[www.fertilizer.org/ifacontent/download/63604/927674/version/1/file/2011\\_montreal\\_poidevin\\_slides.pdf](http://www.fertilizer.org/ifacontent/download/63604/927674/version/1/file/2011_montreal_poidevin_slides.pdf) (note: this link requires authentication).

本篇文章“以色列死海工业公司钾肥生产中的碳足迹计算”也可以在 IPI 网站“[钾素中心与环境](#)”栏目找到。

## IPI 学术活动

2012 年 7 月

中国土壤和作物系统中的钾素管理国际研讨会。2012 年 7 月 24-27 日在中国四川成都召开。由国际钾肥研究所和中国科学院南京土壤研究所、中国农业大学共同举办。想获得第一轮通知或了解更多详细情况，请访问 [IPI 网站](#) 或者与 IPI 中国项目协调员 [Mr. Eldad Sokolowski 先生](#) 联系。

## 其他学术活动

2012 年 5 月

2012 年以色列农业技术博览会暨第 18 届国际农业展览。2012 年 5 月在以色列特拉维夫召开。2012 年以色列农业技术博览会是全球农业技术交流展览领域最重要的活动。展览期间将召开国际农用塑料协会 (CIPA) 的会议。欲了解更多详情，请访问 [Agritech 会议网站](#)。

## 出版物

西亚和北非地区土壤管理和钾肥应用国际学术研讨会论文集。论文集收录了邀请报告，479P，2011 年出版。E.A.



Kirkby 主编。该学术研讨会由国际钾肥研究所和 Ege 大学农学院土壤科学与植物营养系于 2010 年 11 月在土耳其 Antalya 共同举办。

土壤碳库与应对气候变化和食物安全。

2011 年出版。

Srinivasa Rao, Ch. B. Venkateswarlu,

K. Srinivas, Sumanta Kundu and Anil Kumar

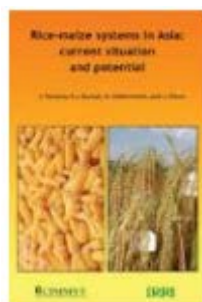
Singh. 编，印度旱作农业研究中心 (CRIDA) 出版。地址：

Santoshnagar, Hyderabad, 500059, Andhra Pradesh, India。



该书共 24 章，阐述了多种农业系统中碳固定的各个方面。Ch. Srinivasa Rao 等人编写的第四章为“雨养农业系统中的土壤碳固定”，分析了 6 种不同的典型雨养农作系统中不同施肥方式对土壤有机碳的长期影响。索取该书，[请通过 cherukumalli2011@gmail.com](mailto:cherukumalli2011@gmail.com)，联系 Ch. Srinivasa Rao 先生。

亚洲水稻-玉米种植模式：现状和发展前景。2011 年出版。232P。作者：Timsina, J., R.J. Buresh, A. Dobermann, and J. Dixon。国际玉米小麦改良中心 (CIMMYT) 和国际水



稻所 (IRRI) 共同出版。ISBN 978-971-22-0263-6。通过 [Google books](#) 可以查到。

因为快速增长的水稻作为人口口粮和玉米作为饲料的需求，水稻-玉米种植制度近年来在亚洲快速增加到 350 万公顷。增长最快的地区是印度和孟加拉南部和东北部。主要驱动因素是畜禽养殖业和渔业的发展对饲料的需求以及趋紧的国际进出

口市场需求。更多信息，参阅 [国际水稻所 \(IRRI\) 网站](#)。

钾盐发展协会 (PDA) 的出版物  
钾盐发展协会 (PDA, Potash Development Association)



成立于 1984 年，是一个独立组织，其目的在于为英国的土壤肥力、植物营养和肥料特别是钾肥的施用提供技术支持和施肥建议。参见：[www.pda.org.uk](http://www.pda.org.uk)。

注：PDA 纸质出版物只能在英国和爱尔兰可以获得。

土壤分析：植物营养管理的钥匙。2011 年 11 月修订版。

从土壤采样到分析结果解读指南，包括在其他地方很难获得的必不可少的参考资料。可以从 [PDA 网站](#) 下载。



平衡营养需要适当的氮硫比。2011 年 11 月出版。除了芸薹类植物 (如油菜、卷心菜、甘蓝等)，很多植物蛋白质中氮和硫含量很高，而且像绝大多数动物蛋白质中氮硫有适当的比例一样，植物蛋白质中 N: S 比为 12:1。更多信息，请参阅 [PDA 网站](#)。

平衡营养需要适当的氮硫比。2011 年 11 月出版。除了芸薹类植物 (如油菜、卷心菜、甘蓝等)，很多植物蛋白质中氮和硫含量很高，而且像绝大多数动物蛋白质中氮硫有适当的比例一样，植物蛋白质中 N: S 比为 12:1。更多信息，请参阅 [PDA 网站](#)。





## 钾素文献

苜蓿-玉米轮作过程中的钾素管理。Yost, M.A., M.P. Russelle, J.A. Coulter, C.C. Sheaffer, and D.E. Kaiser. *Agron. J.* 103(6):1785-1793. 2011.

### 摘要:

较高的钾肥价格使苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 的合理施钾显得更加重要。最近, 大学研究推出的玉米带施肥指导, 对于苜蓿不是一个主要考虑的上一个种植年度来说, 没有什么变化。另外, 对第一年种植玉米 (*Zea mays* L.) 时施钾对苜蓿籽粒和青储产量的后续效应, 我们知道的很少。从 2008 到 2010 年, 开展了 10 个点的试验, 测试土壤钾素状况, 了解钾对上季苜蓿产量和质量的影响, 以及施钾对第一年玉米的后效。施钾对苜蓿的产量、相对饲养值 (RFV) 和质量 (RFQ) 都没有影响。随着不同试验点施肥量的增加, 植株中钾的含量和吸收量都在增加, 表示在施肥季节施钾是可以被作物利用的。施钾对玉米的后效, 每  $100\text{kg ha}^{-1}$  施钾量增加玉米籽粒  $0.5\text{ Mt ha}^{-1}$ , 减少冬饲料干草  $0.4\text{ Mt ha}^{-1}$ , 而对青储饲料产量没有影响。无论苜蓿施不施钾, 玉米施钾使冬饲料干草增加 10% 而青储饲料产量增加 8%。这表明苜蓿季施钾的后效不如直接在玉米季施钾效果好。在土壤含钾量中等的情况下, 在上季苜蓿季施钾不如在当季玉米季施钾经济效益更高。

表施和深施磷钾肥对免耕和条耕条件下大豆产量的影响。Farmaha, B.S., F.G. Fernández, and E.D. Nafziger. *Agron. J.* 103(6):1862-1869. 2011.

### 摘要:

和免耕相比, 条耕可以改善种子生长条件, 使种子和肥料更好的接触。这项研究的目的在于量化了解

免耕和条耕条件下施钾的数量和施钾方法对大豆 [*Glycine max* (L.) Merr.] 产量的影响。在意大利 Urbana 市附近 Flanagan 砂壤质和 Drummer 砂粘质土壤上试验进行了 3 年。大豆玉米轮作 (*Zea mays* L.)。耕作加施肥是主要试验内容, 加上免耕和撒施 (NTBC); 免耕加深施 (NTDB); 条耕钾深施肥 (STDB); 深施肥是指把肥施在种植带种子下面 15cm。施磷 ( $0, 12, 24, 36\text{ kg P ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ ) 是副区, 施钾 ( $0, 42, 84, 168\text{ kg K ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ ) 是次副区。土壤水、枸溶性磷和钾和产量等进行了测定。总起来看, STDB 产量达到  $3.1\text{ Mt ha}^{-1}$ , 分别比 NTBC 和 NTDB 增长 10% 和 7%。耕作加施肥处理中施磷, 籽粒产量、单株荚果数和枸溶磷浓度和累积增加, 表明要保持一定的产量的话, 底施时也不要减少施肥量, 要和表施一样的施肥量。但是底施增加了土壤养分的测试值。施钾在免耕系统中都是减产的, 但在 STDB 处理中是增产的。磷和钾施肥方式没有差别, 相对免耕来说, 耕作对 STDB 的影响, 可以提高大豆产量和增加土壤养分累积。

增加覆盖作物可以增加免耕改善土壤物理性状的优点。Blanco-Canqui, H., M.M. Mikha, D.A.R. Presley, and M.M. Claassen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75(4):1471-1482. 2010.

### 摘要:

增加覆盖作物 (CCs) 对提高免耕条件下土壤物理性状也许是一个不错的选择。为了评估这种影响, 我们选择了冬小麦 (*Triticum aestivum* L.)-食用高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] 轮作方式, 4 个氮素处理水平, 野豌豆 (HV; *Vicia villosa* Roth) 作为覆盖, 在上个轮作季小麦收获后种植, 接着是赫麻 (SH; *Crotalaria*

*juncea* L.) 和晚熟大豆 [LMS; *Glycine max* (L.) Merr.] 作为覆盖作物。试验土壤是砂质壤土, 免耕。15 年的试验结束后, 我们分析覆盖作物的累积效应, 评估土壤物理性状和土壤有机碳 (SOC) 浓度之间的关系。所有施氮处理中, 有覆盖作物相对没有覆盖作物的, SH 使近表层土壤容重减少 4%, 土壤透水性增加了 3 倍。不施氮处理, SH 和 LMS 减少了普诺克托 (Proctor) 最大表层容重-一种表征土壤被压实程度的参数 -5%, 表明有覆盖作物的土壤表层可能不太容易被压实。覆盖作物还增加了表层 (0-7.5cm) 土壤团聚体的平均重量直径 (MWDA) 80%。同时, 在 0-7.5cm 深层次内, 有覆盖作物的比没有覆盖作物的土壤有机碳 (SOC) 都有增加, SH 增加 30%, LMS 增加 20%。有覆盖作物增加土壤有机碳含量与普诺克托 (Proctor) 最大表层容重呈负相关, 但与 MWDA 和累积透水性呈正相关。总之, 在免耕条件下增加覆盖作物, 可以改善土壤的物理性质, 改变土壤有机碳的浓度。

华北平原长期施肥和耕作管理对土壤肥力的影响。Niu, L.A., J.M. Hao, B.Z. Zhang, and X.S. Niu. *Pedosphere* 21(6):813-820. 2011.

在华北平原, 施肥和土壤管理在过去 30 年中发生了急剧变化, 但是长期施肥和耕作管理对受盐分影响的土壤下一年 2 季, 冬小麦 (*Triticum aestivum* L.)-玉米 (*Zea mays* L.) 耕作条件下对土壤肥力的影响了解并不多。试验开始于 1985 年, 在中国农业大学河北曲周试验站进行, 主要目的是为了解施肥和耕作对土壤肥力的影响。试验设计是正交试验, 9 个处理, 分别是不同的耕作方式和施不施肥处理。2001 年 10 月, 分别取 0-20cm 和 20-40cm 土层分析土壤养



分状况。结果显示, 经过 17 年的使用氮肥和磷肥, 以及秸秆还田处理, 施用氮肥的 0-20cm 表层土壤有机质含量从  $7.00 \text{ g kg}^{-1}$  增加到  $9.3\text{-}13.14 \text{ g kg}^{-1}$ , 20-40cm 土壤有机质含量从  $4.00 \text{ g kg}^{-1}$  增加到  $5.48\text{-}7.75 \text{ g kg}^{-1}$ 。0-20cm 和 0-40cm 土壤总氮 (TN) 分别从  $0.37 \text{ g N kg}^{-1}$  增加到  $0.79\text{-}1.11 \text{ g N kg}^{-1}$  和从  $0.22 \text{ g N kg}^{-1}$  增加到  $0.61\text{-}0.73 \text{ g N kg}^{-1}$ 。然而, 秸秆还田对土壤总 N 的影响不大。施用磷肥的土壤表层 (0-20cm) 和下层 (20-40cm) 土壤总磷 (TP) 和有效磷 (RP) 都显著增加, 分别从  $0.60 \text{ g kg}^{-1}$  增加到  $0.67\text{-}1.31 \text{ g kg}^{-1}$  和从  $0.52 \text{ g kg}^{-1}$  增加到  $0.60\text{-}0.73 \text{ g kg}^{-1}$ , 但氮磷配合施用的则土壤总磷和有效磷含量都下降了。施氮和施磷显著增加了作物产量, 但降低了土壤有效钾的含量。秸秆还田只能部分满足作物需钾要求。结果还显示, 长期的施肥和秸秆还田可以保持或提高土壤肥力指标, 当然需要详尽的分析了解是否造成其他营养元素的缺乏。翻耕以前进行秸秆还田, 或者用秸秆还田覆盖而采取免耕栽培, 都能够提高土壤表层有机质含量。翻耕打破土壤团粒结构, 增加土壤孔隙度, 有利于土壤有机质矿化作用。

**中国半干旱黄土地地区长期种植苜蓿对土壤钾含量和粘土矿物的影响。** Li, D.C., B. Velde, F.M. Li, G.L. Zhang, M.S. Zhao, and L.M. Huang. *Pedosphere* 21(4):522-531. 2011.

#### 摘要:

种植苜蓿是一种有效提高土壤肥力的方法。通常认为根瘤菌固氮是土壤氮素增加的主要因素。在中国西北部的兰州附近的最开始含有伊利石和绿泥石的黄土上开展一个试验, 持续种植了 21 年 (5 个采样周期) 苜蓿, 以了解苜蓿种植、土壤钾素 (K)

含量和土壤粘土矿物含量的关系。结果显示, 土壤钾含量增加很快, 在第 15 年的时候达到最高, 然后呈下降趋势。土壤钾素累积与伊利石矿物的风化有关, 这部分风化出来的钾素通常在实验室中有钾素提取剂提取不出来。15 年后种植苜蓿的土壤肥力明显下降, 土壤钾素含量突然下降很多。在第 9 年的时候, 植物生物生长达到顶峰, 这是土壤钾素含量和粘土矿物继续增加, 直到第 15 年的时候。这表明土壤表层钾素的增加来自于深根层。土壤钾含量达到最大后, 种植苜蓿继续增加粘土矿物中钾的储藏量。土壤氮没有这个趋势, 而是和没有耕作的自然土壤相比, 土壤氮素有所下降。所以, 传统的种植苜蓿可以增加表层土壤钾素含量。

**钾磷交互作用对巴基斯坦北部向日葵籽粒产量和品质的影响。** Amanullah, and M.W. Khan. *Pedosphere* 21(4):532-538. 2011.

#### 摘要:

在巴基斯坦北部 Peshawar 农业大学 Khyber Pakhtunkhwa 试验农场进行的试验, 采用完全随机区组设计裂区试验, 3 次重复, 以研究施钾和施磷对向日葵 (*Helianthus annuus* L.) 的影响。6 水平 K (0, 25, 50, 75, 100 and  $125 \text{ kg K ha}^{-1}$ ) 作为主区, 4 水平的 P (0, 45, 90 and  $135 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) 作为副区。增施磷钾肥都能增加向日葵籽粒的含油量。提高施磷量可以提高籽粒蛋白质含量, 而增施钾肥降低籽粒蛋白质含量。提高施磷钾水平, 均可以显著提高向日葵籽粒含油量和蛋白质产量。含油量和蛋白质含量提高主要归功于产量构成因素, 如向日葵每盘粒数、粒重和盘头大小的变化, 以及籽粒产量的变化。从籽粒产量和含油量得到的经济回报来看, 最高的经济回报是施用  $100 \text{ kg K ha}^{-1}$

和  $45 \text{ kg P ha}^{-1}$  的处理, 经济效益分别为 297 和  $268 \text{ US\$ ha}^{-1}$ 。

**长期施肥对黄土土壤有机碳、物理性状和小麦产量的影响。** Yang, X., P. Li, S. Zhang, B. Sun, and C. Xinping. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174:775-784. 2011.

#### 摘要:

中国黄土高原广大的干旱地区是可持续农业生产重要的研究课题, 例如改进养分管理模式影响土壤质量和土壤产出能力。一个持续了 19 年的长期试验, 研究了长期施肥对土壤有机碳 (SOC) 变化动态、土壤物理性质和小麦产量的影响。在没有施肥处理小区中 (CK), 土壤 SOC 含量在表层 0-20cm 土层没有变化, 但在施用化肥 NPK 肥料 (NPK) 以及有机肥 (M) 和 NPK 肥料配合施用 (MNPK) 处理中, 土壤 SOC 增加显著。18 年试验, MNPK 处理和 NPK 处理中土壤 SOC 含量与对照 (CK) 相比无论在 10cm 表层还是 20cm 表层土壤 SOC 都高很多。MNPK 处理比 CK 土壤含水量增加, 0-5cm 土层土壤张力分别为 0-0.25kPa 和 8-33kPa。在 10-15cm 土层中, MNPK 处理比 NPK 和对照土壤含水量增加, 张力分别为 0-0.75kPa 和 100-300kPa。但 3 个处理无论 0-5cm 土层还是 10-15cm 土层, 土壤饱和和导水性都没有变化。与此对照, MNPK 处理的 0-5cm 土层和 10-15cm 土层土壤非饱和和导水性比对照 (CK) 要低。平均来看, MNPK 和 NPK 处理小麦产量变化不大, 但都显著高于对照 (CK)。这样, 考虑到土壤质量保持和可持续的农业产出, 对雨养农业区小麦-休闲农作制度下的土壤养分管理, NPK 与有机肥的合理配合施用是一个较好的选择。

有机肥和化肥施用对养分淋洗的影响。Spiess, E., V. Prasuhn, and W. Stauffer. *Recherche Agronomique Suisse* 2(9):376-381. 2011. French.

#### 摘要:

在 Bern-Liebefeld 土壤渗漏试验站从 2002 年至 2009 年, 试验研究了单季作物下不同施肥方式对水体污染和养分淋洗的影响。单施用有机肥的作物产量比单施用无机化肥或者有机无机配合施用处理的产量稍微高一点点。一个原因可能是在渗漏试验站有机肥的施用处理是最优的, 达到了作物养分需求。但三种施肥处理引起的渗漏液、渗漏液中氮的浓度以及渗漏养分总量等都变化不大。气候条件和作物耕作制度可能影响更大。可能要通过长期的试验才能看出不同处理的差别, 因为有机氮的后效长期才能显现出来。一方面, 这些后效对产量的影响长期来看也不强, 但另一方面因为腐殖质的矿化越来越强, 可以预期渗漏量也呈增加趋势。

#### 相关阅读:

植物利用备选策略利用矿物中非交换性钾。Wang, H.Y., Q.H. Shen, J.M. Zhou, J. Wang, C.W. Du, and X.Q. Chen. 2011.

[Plant Soil 343:209-220](#)

华北土壤生产谷物钾素评价。Deshui Tan *et al.* 15 February 2012.

[Agriculture, Ecosystems & Environment 148:65-71](#)

全球植物吸收和释放碳量研究综述。Macaulay, C. 10 October 2011.

[ECOS magazine, CSIRO](#)

磷素循环: 一个没有封闭的生物地球化学循环。Elser, J., and E. Bennett. 6 October 2011.

[Nature 478:29-31](#)

土壤有机质的保持是重要的生态资源。Schmidt *et al.* 6 October 2011.

[Nature 478:49-56](#)

全球种植解决方案。Foley *et al.* 20 October 2011.

[Nature 478:337-342](#)

碳足迹: 农业排放点滴。Seip, H.M. 15 December 2011.

[Nature 480:321](#)

蔗糖作为生物能源污染大气。15 December 2011.

[Nature 480:295](#)

食品安全: 超越印度转基因作物的偏见。Govindarajan Padmanaban, 15 December 2011.

[Nature 480:321](#)

提高土壤肥力的 5 种新方法。Zaleski, J. 22 November 2011.

[Nourishing the Planet](#)

施钾对杂交玉米营养特性和生理性状的影响。M. Ahmad Alias Haji A. Bukhsh *et al.* 2012.

[Pak. J. Nutr. 11\(2\):187-202](#)

施用草甘膦对大豆根际土壤微生物活性、群体结构和钾素动力学的影 响。Lane *et al.* 26 December 2011.

[Pedobiologia](#)

更多的钾素文献, 请参见 [IPI 网站](#)。

注: 钾素文献部分的所有摘要都得到了版权所有人的授权。在相关阅读部分的所有内容都会出现在我们的 [Twitter](#) 中。敬请关注 [twitter](#)。



**国际肥料通讯 (e-*ifc*) 中文版 版权信息:**

ISSN 1664-8765 (网络); ISSN 1664-8757 (印刷)

出版者: 国际钾肥研究所 (IPI)

英文版编辑: Ernest A. Kirkby, UK; Susanna Thorp, WRENmedia, UK;  
Patrick Harvey, Green-Shoots, UK; Hillel Magen, IPI

中文版主编: 田有国, 全国农技中心, 中国

版式设计: Martha Vacano, IPI

地址: 国际钾肥研究所 (IPI)

P.O.BOX 260

Baumgartlistrasse 17

CH-8810 Horgen, Switzerland

电话: +41 43 8104922

电传: +41 43 8104925

E-Mail: [ipi@ipipotash.org](mailto:ipi@ipipotash.org)

网址: [www.ipipotash.org](http://www.ipipotash.org)

每季度一刊的国际肥料通讯, 订阅的用户可以通过 E-mail 定期发送, 同时在 IPI 网站上定期发布。

订阅国际肥料通讯电子杂志, 请发送电子邮件到[网站的杂志订阅](#)。退订的, 请点击给您发送的邮件底部的杂志退订链接。

**国际钾肥研究所成员公司:**

ICL Fertilizers; JSC Belaruskali; JSC Uralkali; K+S KALI GmbH; Tessenderlo Chemie; JSC Belarusian Potash Company (BPC); and JSC International Potash Company (IPC).

**Copyright©国际钾肥研究所 (IPI)**

IPI 保有其所有出版物和网站内容的版权但是鼓励非商业目的的复制传播。引用有关内容的要注明出处。不用提出特别申请, 也不用付费, IPI 允许用于个人或教育目的而非盈利或商业目的的使用其有关电子或印刷资料, 但必须在材料的首页注明材料来源。对 IPI 不拥有所有权的材料, 如果要复制或使用时, 必须要得到其版权所有人的许可。