

第二版  
2007 (Chinese)

# 水稻

## 养分管理实践指导



养分管理

养分缺乏

矿质养分毒害

工具与信息

Edited by Thomas Fairhurst, Christian Witt, Roland Buresh, and  
Achim Dobermann

水稻：养分管理实践指导（第二版）

Thomas Fairhurst, Christian Witt, Roland Buresh和Achim  
Dobermann编著



2007 国际水稻研究所(IRRI), 国际植物营养研  
究所(IPNI)和国际钾肥研究所(IPI)

**版权归属-非商业性使用-共享3.0 Unported.** 除非在本出版物中  
有特别说明, 使用者可以免费分发、展示和传播本手册, 依据  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>中所描述的条件允  
许修改本书内容。

## 责任限定

尽管作者已尽最大努力来确保本书在出版时内容的准确性, 但仍然会有诸多不完善的地方。本书所涉及的知识主要是基于当时的情况, 不能保证知识随时间发生变化。因此, 特别声明: 对于使用该手册所导致的直接或间接的损失, 作者和出版商都不负任何责任, 也不承担与之相关的任何经济损失。

译者: 申建波 荆晶莹 赵光明 李刚 张福锁 (中国农业大学)

排版格式与版面设计: Tham Sin Chee.

英: 第一版2002;重印2003, 2005.

第二版2007 ISBN: 978-981-05-7949-4

中译2009 ISBN: 978-3-9523243-5-6,

DOI: 10.3235/978-3-9523243-5-6

## 关于出版社

IRRI的宗旨是通过加强合作研究、建立合作伙伴关系和强化区域农业研究与推广系统, 减少饥饿与贫困, 提高稻农与消费者的健康水平, 保证环境的可持续性。

IPNI的宗旨是阐明合理利用与管理植物养分的基本原理, 主要集中在与养分使用有关的环境和经济问题上, 提供综合区域性的信息和研究结果, 帮助农民和企业解决环境和农学方面的问题。

IPI的宗旨是促进与发展平衡施肥, 实现高产作物与高营养价值食物的生产, 同时, 通过土壤肥力的保持以确保人类未来生产的可持续发展。



2007 国际水稻研究所(IRRI),  
国际植物营养研究所(IPNI)和  
国际钾肥研究所(IPI)

**版权归属-非商业性使用-共享3.0 Unported.** 除非在本出版物中有特别说明, 使用者可以免费分发、展示和传播本手册, 依据 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/> 中所描述的条件允许修改本书内容。



归属性: 本手册有严格的归属版权, 而非作者所做的任何方式的签注。



非商业性: 本手册不能用于商业目的



共享性: 如果本手册的内容被改变、形式被修改或被补充内容, 修订后的手册仍受此发行条款或类似条款的限制。

- ▶ 对于任何再利用与发行, 必须说明许可条款。
- ▶ 如果版权持有者许可, 以上任何条款都可放弃。
- ▶ 本版权许可的任何条款均不损害和限制作者的道德权利。
- ▶ 以上条款决不影响公平交易与其他权利。
- ▶ 本版权许可的完整条款, 请访问  
“<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>”

# 水稻

## 养分管理实践指导

如果需要与本手册有关的进一步信息，或者与热带作物生产和植物营养有关的其它资料，请与以下地址联系：



国际水稻研究所(International Rice Research Institute)  
邮政信箱 7777, 菲律宾, 马尼拉 (DAPO Box 7777, Metro Manila, Philippines)  
电话: +63 2 580 5600; 传真: +63 2 580 5699  
电子邮件: [irripub@cgiar.org](mailto:irripub@cgiar.org)  
网址: [www.irri.org](http://www.irri.org); [www.irri.org/irrc/ssnm](http://www.irri.org/irrc/ssnm)



国际植物营养研究所(International Plant Nutrition Institute)  
东南亚项目(Southeast Asia Program)  
PO Box 500 GPO, Penang 10670, Malaysia.  
马来西亚  
电话: +60 4 6202 284; 传真: +60 4 6264 380  
网址: [www.ipni.net.seasia](http://www.ipni.net.seasia)



与国际钾研究所共同合作(International Potash Institute)  
Baumgärtlistrasse 17, P.O. Box 569, CH-8810 Horgen, Switzerland  
电话: + 41 43 810 49 22; 传真: + 41 43 810 49 25  
网址: [www.ipipotash.org](http://www.ipipotash.org)

ISBN: 978-3-9523243-5-6  
DOI: 10.3235/978-3-9523243-5-6

## 前言

亚洲的食物安全高度依赖于适宜环境条件下基于灌溉稻作物系统的水稻集约化生产。人口的增长、水资源和土地面积的减少要求必须进一步提高水稻的生产力。未来产量的增加需要不断优化作物管理技术，集成各种资源管理方法，以及综合运用多学科的知识，提高各种物质投入（包括肥料养分）的利用效率。

实地养分管理技术(SSNM)的概念近年来被建立，是一种可在大面积范围内应用的推荐施肥方法。这些方法旨在实现肥料的高效利用。平衡施肥增加了农民的收益，使投入的单位质量的肥料获得更高的产量，同时可以防止过量施肥所造成的环境污染。实地养分管理技术已在亚洲区域范围广泛的农户稻田中获得了成功的评价，并正在进行大规模的田间校验和验证。

这本实践指导手册的出版是为了对热带、亚热带地区水稻生长期间出现的养分缺乏和毒害症状进行辨识并指导水稻的养分管理。它是继国际水稻研究所/磷钾研究所-加拿大磷钾研究所早期出版的Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management - 《水稻：养分失调和养分管理》之后出版的，并计划用其他语言翻译出版。

我们希望这本小册子能够广泛传阅，并促使正确的养分管理技术在亚洲稻农中的传播。

国际水稻所所长：Ronald P. Cantrell

磷钾研究所-加拿大磷钾研究所东亚及东南亚项目主任：Thomas Fairhurst

## 第二版前言

在过去的5年里，实地养分管理技术(SSNM)在很多亚洲国家已成为提高养分管理水平的重要手段。养分管理的推荐策略要按照特定地区的需求进行修订，由稻农进行评价，通过大规模的公共与私人间的合作推动养分管理策略的完善。《水稻：养分管理实践指导》第一版于2002年出版，很快就成为有关SSNM印刷材料的参考标准，这个手册的需求量很大，目前已经分发和销售2000册。

在过去的几年里，作为灌溉水稻研究网(IRRC)工作的一部分，SSNM通过研究和评价不断得到完善，特别是在氮管理方面，SSNM的概念不断被改进和简化，建立了标准的4阶叶色卡(LCC)，截至到2006年底，新的叶色卡已经发行了250,000块，并建立了新的SSNM网站([www.irri.org/irrc/ssnm](http://www.irri.org/irrc/ssnm))，为亚洲主要水稻产区提供即时的信息服务和区域推荐施肥建议。因此，为了保持与各地区新编培训材料和SSNM网站信息的一致性和时效性，重新对原来的手册进行再版修订是十分必要的。我们很高兴第二版将被翻译成许多语言发行，包括：孟加拉语、汉语、北印度语、印度尼西亚语和越南语。

我们希望本指导手册能继续有益于亚洲的稻农，帮助他们通过正确的养分管理提高水稻产量并增加收入。

Robert S. Zeigler

国际水稻研究所所长

Christian Witt

国际植物营养研究所/国际钾肥研究所东南亚项目主任

## 致谢

我们对以下组织和个人表示感谢:

- ▶ J. K. Ladha, David Dawe 和 Mark Bell 在我们努力将所有材料浓缩汇编成实践指导手册时所提供的许多有益的评论和建议。
- ▶ 国际水稻研究所的前工作人员特别是 Kenneth G. Cassman 和 John E. Sheehy 在基于植物的N管理的理论概念建立和水稻产量潜力分析方面作出了重要贡献, Heinz-Ulrich Neue 以及随后的 Dharmawansa Senadhira 提供了有关养分缺乏和毒害部分所需的图片以及未发表的资料。
- ▶ 灌溉稻研究协作网中所有的科研工作者、推广人员以及稻农, 他们提供了很多有价值的评论和建议。
- ▶ 对本手册做出贡献的所有出版物的作者, 以及本手册没有列出的在前言中所提到的早期的工作。
- ▶ 国际水稻研究所的 Bill Hardy 在本手册的准备过程中提供了帮助。
- ▶ Helmut von Uexküll 和 José Espinosa (国际植物营养研究所); Pedro Sánchez (ICRAF); Mathias Becker (德国, 波恩大学); Frank Mussnug (德国, ZEF); Takeshi Shimizu (日本, 大阪辖区农林研究中心) 所提供的幻灯片和照片。
- ▶ 瑞士发展与合作局(SDC)、国际肥料工业协会(IFA)、国际植物营养研究所(IPNI)、国际钾肥研究所(IPI)以及国际水稻研究所(IRRI)对于水稻实地养分管理SSNM的建立与传播给予的长期经济资助, 包括对本手册的出版所给予的财政支持。

## 目录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 前言 .....                       | i   |
| 第二版前言 .....                    | ii  |
| 致谢 .....                       | iii |
| <br>                           |     |
| 1 养分管理 .....                   | 1   |
| 1.1 产量差额形成的原因及分析 .....         | 1   |
| 1.2 氮、磷、钾养分平衡管理的基本原理 .....     | 6   |
| 1.3 肥料利用效率 .....               | 8   |
| 1.4 实地养分管理 (SSNM) .....        | 9   |
| 1.5 施肥方案的制定 .....              | 10  |
| 1.6 需求与机会评估 .....              | 12  |
| 1.7 区域推荐 .....                 | 15  |
| 1.8 氮、磷、钾推荐施肥方法的建立 .....       | 16  |
| 第一步、选定经济的目标产量 .....            | 17  |
| 第二步、估计土壤养分的供应量 .....           | 20  |
| 第三步、氮肥施用量的计算和基于植物需求的氮肥管理 ..... | 23  |
| 第四步、磷肥( $P_2O_5$ )施用量的计算 ..... | 34  |
| 第五步、钾肥( $K_2O$ )施用量的计算 .....   | 38  |
| 1.9 有机肥、秸秆和绿肥的管理 .....         | 42  |
| 1.10 大面积推广的策略评价 .....          | 46  |
| 1.11 有用的数据 .....               | 47  |



|          |                         |           |
|----------|-------------------------|-----------|
| <b>2</b> | <b>矿质元素的缺乏和毒害 .....</b> | <b>51</b> |
| 2.1      | 氮的缺乏 .....              | 51        |
| 2.2      | 磷的缺乏 .....              | 53        |
| 2.3      | 钾的缺乏 .....              | 55        |
| 2.4      | 锌的缺乏 .....              | 57        |
| 2.5      | 硫的缺乏 .....              | 60        |
| 2.6      | 硅的缺乏 .....              | 63        |
| 2.7      | 镁的缺乏 .....              | 65        |
| 2.8      | 钙的缺乏 .....              | 67        |
| 2.9      | 铁的缺乏 .....              | 69        |
| 2.10     | 锰的缺乏 .....              | 71        |
| 2.11     | 铜的缺乏 .....              | 73        |
| 2.12     | 硼的缺乏 .....              | 75        |
| 2.13     | 铁的毒害 .....              | 77        |
| 2.14     | 硫的毒害 .....              | 80        |
| 2.15     | 硼的毒害 .....              | 84        |
| 2.16     | 锰的毒害 .....              | 86        |
| 2.17     | 铝的毒害 .....              | 88        |
| 2.18     | 盐害 .....                | 91        |

## 附录

|                        |      |
|------------------------|------|
| 水稻田间管理 .....           | A-2  |
| 养分管理工具: 缺素小区 .....     | A-4  |
| 养分管理工具: 叶色卡(LCC) ..... | A-6  |
| 生长时期 .....             | A-8  |
| 水稻养分缺乏的诊断标准 .....      | A-10 |
| 缺氮症状 .....             | A-12 |
| 缺磷症状 .....             | A-14 |
| 缺钾症状 .....             | A-16 |
| 缺锌症状 .....             | A-18 |
| 缺硫症状 .....             | A-20 |
| 缺硅症状 .....             | A-22 |
| 缺镁症状 .....             | A-24 |
| 缺钙症状 .....             | A-26 |
| 缺铁症状 .....             | A-28 |
| 缺锰症状 .....             | A-30 |
| 缺铜症状 .....             | A-32 |
| 水稻养分毒害的症状及诊断标准 .....   | A-34 |
| 铁毒害症状 .....            | A-36 |
| 硫化物毒害症状 .....          | A-38 |
| 硼毒害症状 .....            | A-40 |
| 锰毒害症状 .....            | A-42 |
| 铝毒的症状 .....            | A-44 |
| 盐害症状 .....             | A-46 |

# 1 养分管理

C. Witt<sup>1</sup>, R.J. Buresh<sup>2</sup>, S. Peng<sup>2</sup>, V. Balasubramanian<sup>2</sup> and A. Dobermann<sup>2</sup>

## 1.1 产量差额形成的原因及分析

大多数稻农在某一特定地区所种植水稻的产量往往发挥不到其最大气候和水稻遗传潜力的60%，下面这个简单的模型可以用来说明影响“产量差额”形成的因素（图1）。

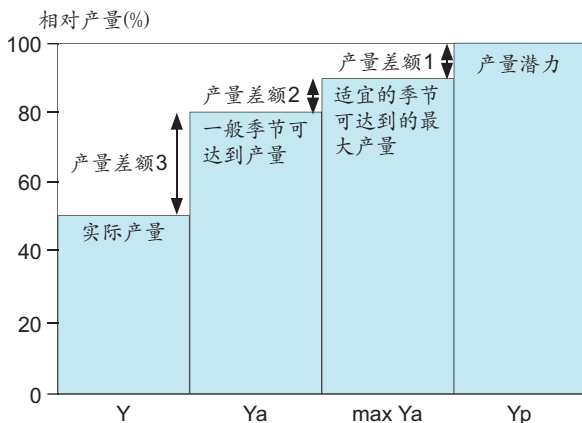


图 1. 养分和作物管理对水稻实际产量 (Y)、可达到产量 (Ya)、最大可达到产量 (max Ya) 与产量潜力 (Yp) 的影响举例。

1. 国际植物营养研究所 - 国际钾肥研究所东南亚项目部, 新加坡; 2. 国际水稻研究所, 菲律宾 Los Baños

水稻产量潜力 ( $Y_p$ ) 是指仅受气候和品种的影响, 而其他因素处于最佳水平时的产量(图1)。由于受气候影响, 最大产量在不同年份之间会出现波动 ( $\pm 10\%$ )。对于位于南亚和东南亚热带地区的大部分水稻生长环境而言, 目前广泛种植的高产水稻品种在高产季 (HYS) 其产量潜力大约为10吨/公顷, 而低产季 (LYS) 其产量潜力为7–8吨/公顷。

最大可达到产量 ( $\max Y_a$ ) 是指在适宜的气候条件以及优良的作物与水管理之下, 同时其他因素造成的减产效应(如病虫害的压力等等)很小的情况下所能达到的产量。这种情况下形成的产量差额较小 (产量差额1) (图1)。

可达到产量 ( $Y_a$ ) 是指在典型年份当作物、养分和水管理较好实施的情况下在农民田块可达到的有着较高收益的产量。在没有明显限产因素的情况下, 可达到产量往往是产量潜力的75–80% (例如: 在高产季可达到7–8吨/公顷, 在低产季可达到5–6.5吨/公顷)。在大多情况下, 若要缩小产量差额2 (图1) 是很不经济的, 这主要是因为需要大量的投入并且由于作物倒伏和病虫害加剧所导致的作物歉收的风险很高。

农民田块中的实际产量 ( $Y$ ) 通常低于可达到产量, 这主要归因于气候以外的其他因子的限制, 如养分、种子质量、杂草、虫害和病害以

及水分供应等限产因素（产量差额3）。提高养分管理水平，并结合优良的作物和水分管理，可以帮助农民降低产量差额3。通过优化养分管理可以获得最大的收益，这种情况主要发生在具有良好的作物管理和最少的虫害问题的农民田块上。

理解产量差额的成因是十分重要的，因为它们可导致：

- ▶ 农户收益的降低；
- ▶ 在水稻研究和发展上投资（例如：灌溉设备）利润的回报减少；
- ▶ 水稻生产能力降低，引起食物危机，增加了对水稻进口的需求。

农民需要理解一些特殊措施对生产力、收益率以及同时克服某些限制因子后所引起的综合效应的影响，例如病虫害问题可通过更适宜的养分管理得到减轻。推荐施肥策略可以基于可达到的产量目标（=产量目标）来建立，在作物歉收的风险最低的情况下实现高产和高收益。肥料的推荐策略对于氮而言应当足够灵活（N）同时提高磷钾活力（PK），以便在特别适宜的生产季能够实现最大可达到产量（maxYa）。

## 作物管理

大多数作物管理的措施都会影响作物对优化养分管理的响应。

考虑以下几点:

- ▶ 使用具有适合高产潜力的优质种子;
- ▶ 移栽适龄的幼苗 (例如: 苗龄10–20天);
- ▶ 适当平整土地并保持整个农田适宜均匀的水层, 使作物长势一致。这可减少用水总量;
- ▶ 选择合适的种植密度, 建立高效的冠层 (例如: 移栽稻的密度保持20–40穴/平方米、1–3株/穴; 浅水直播水稻每公顷撒播80–120公斤种子);
- ▶ 避免杂草与水稻竞争空间、水分、阳光和养分。

只有在良好的作物管理条件下才能使优化养分管理技术的潜力得到充分发挥。

## 病虫害

病虫害通过破坏叶片冠层、茎秆和籽粒从而影响优化养分管理对作物生长所发挥的效应。

灌溉稻最常见的病虫害有纹枯病、白叶枯病、茎腐病、螟虫、东格鲁病、褐飞虱、鼠害和鸟害。

考虑以下几点:

- ▶ 使用能抵抗常见病虫害的品种;
- ▶ 避免过量施氮, 防止叶片徒长诱发病虫害的发生;
- ▶ 在施用氮肥之前, 评价作物生长情况、叶片颜色 (使用叶色卡) 和病虫害发生频率;

- ▶ 缺钾水稻在氮肥用量过多和钾肥施用不足的情况下会引起多种病害（例如：褐斑病、纹枯病、稻白叶枯病、茎腐病和稻瘟病），导致更大的损失；
- ▶ 与其他农民合作实施综合虫害管理。

高效施用氮肥和平衡营养可把倒伏和病虫害发生的风险降到最低水平。

## 养分管理

只有保证在作物生长的适宜时期供给适宜的养分用量，在整个生育期满足作物对养分的需求，才能达到所确定的目标产量。

有效且经济的养分管理策略应达到以下目标：

- ▶ 通过良好的作物管理，使作物从肥料和土壤固有养分中吸收到尽可能多的养分；
- ▶ 要充分利用来自于秸秆、其它作物残茬和厩肥中的养分；
- ▶ 利用矿质肥料来克服具体的养分限制；
- ▶ 通过制订符合实际且经济可行的产量目标、提高肥料利用率并保持营养平衡，将作物歉收的风险降到最低；
- ▶ 充分考虑各种投入成本，包括劳动力、有机肥和无机肥，以实现最大收益。

## 1.2 氮、磷、钾养分平衡管理的基本原理

### 养分的输入和输出

稻田养分平衡（B）的估算方程如下所示（单位为 公斤/公顷）：

$$B = M + A + W + N_2 - C - PS - G$$

输入项：M是加入的养分源（有机和无机养分）；A是大气沉降（干湿沉降）；W是灌溉水、洪水和沉积物（溶解和悬浮养分）； $N_2$ 是生物固氮。

输出项：C是谷粒和秸秆的净带走养分量（作物吸收的养分只有很少一部分以残茬形式归还）；PS是径流和渗漏损失的养分；G是因反硝化和氨挥发的气体总损失。

### 土壤养分供应与营养平衡

固有养分供应是指某一特定养分在作物生长季节除了无机肥料外所有对植物有效的其他来源所提供的养分量（如：土壤、作物残留、灌溉水）。

表征土壤养分供应能力的可靠且实用的指标是养分限制的产量，可通过缺素小区的稻谷产量来测得（例如：无氮小区产量，只施磷钾肥而不施氮肥；见1.8节第二步）。

有些养分仅靠土壤是不能充分供应的，需要平衡施肥来补充（图2）。



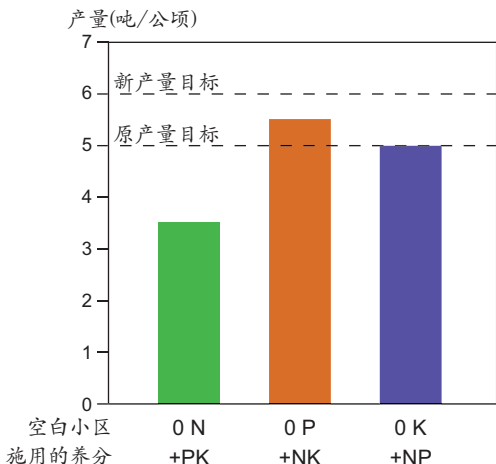


图2. 利用缺素小区的水稻产量对土壤氮、磷、钾养分供应进行估计。土壤氮素供应水平限制了原目标产量的实现，而不是磷和钾，而对于新目标产量的实现，土壤供给的氮、磷和钾均是不充分的，三种营养元素的限产次序为：氮>钾>磷。

在绿色革命的早期，产量的增加主要依赖于N肥的施用，通常政府给予氮肥补贴，同时也与现代杂交品种的应用密切相关。由于受到N肥增产效应的激励，农民为了获得高产通常施用过量的氮肥，而磷钾肥的用量较低，这导致了不平衡的养分供应。而且，随着目标产量的增加，以往不限制作物生长的养分现在变成了增产的限制因素(图2)。

集约化的高产和每年2-3熟的水稻体系导致土

壤P和K库的严重耗竭，因为：

- ▶ 作物残茬、有机肥和矿质肥料的施用可能无法弥补水稻收获带走的养分量；
- ▶ 农民从田间移走大量的秸秆（含有大量的钾）用作饲料和燃料，或者用作工业用途；
- ▶ 籽粒移走的P和K的量增加。

值得注意的是施肥中养分的最佳N:P:K比例因不同田块而异，取决于欲达到的产量目标和每一种土壤养分的供应量。

如果作物生长仅受养分供应所限制，最佳的营养平衡应该是每形成1吨稻谷产量作物需要吸收15公斤N、2.6公斤P和15公斤K（表1）。

表1. 现代水稻品种收获时氮、磷和钾的最佳吸收量。

| 植株组成  | N                 | P   | K  |
|-------|-------------------|-----|----|
|       | (公斤 养分吸收量/吨 谷物产量) |     |    |
| 谷粒    | 9                 | 1.8 | 2  |
| 秸秆    | 6                 | 0.8 | 13 |
| 谷粒+秸秆 | 15                | 2.6 | 15 |

### 1.3 肥料利用效率

肥料的高效利用主要表现为：

- ▶ 施用的肥料大部分应被作物所吸收（称为养分回收效率，RE）；
- ▶ 每公斤肥料的施用会有较大幅度的增产（称为农学利用率，AE）。

$$RE(\%) = [ \text{施氮肥区作物吸氮量} - \text{不施氮肥区作物吸氮量 (公斤/公顷)} ] \times 100 / \text{氮肥用量 (公斤/公顷)}$$

$$AE \text{ (公斤/公斤)} = [ \text{施氮肥区稻谷产量} - \text{不施氮肥区稻谷产量 (公斤/公顷)} ] \times 100 / \text{氮肥用量 (公斤/公顷)}$$

要使养分回收率和农学利用率达到最大，需注意以下几点：

- ▶ 确定养分投入量时，要考虑到土壤养分供应量；
- ▶ 平衡供应作物所需各种养分；
- ▶ 把肥料施入作物吸收利用效率最高的土层中（例如：尿素的深施）；
- ▶ 氮肥的施用根据作物生长期间的氮素营养状况而定，可通过叶色卡确定植物的氮素营养状况；
- ▶ 选择适宜品种的高质量种子；
- ▶ 进行全面且高标准的作物管理（例如：控制杂草、种植密度、秧田管理、水分管理）；
- ▶ 应用综合的虫害管理技术来控制病虫害。

## 1.4 实地养分管理（SSNM）

实地养分管理策略旨在通过适宜的养分和作物管理达到可持续的、经济的高产，具体管理策略包括：

- ▶ 根据养分的有效性和成本充分利用所有可利用

的营养资源，包括有机肥（厩肥）、作物残茬和无机肥；

- ▶ 采用叶色卡(LCC)按作物需求进行氮素管理；
- ▶ 通过缺素小区来测定土壤养分的供应能力（特别是磷和钾）；
- ▶ 平衡供应作物所需养分（氮、磷、钾和微量元素）；
- ▶ 补充由谷粒和秸秆带走的养分（特别是磷和钾），避免土壤养分库的耗竭；
- ▶ 选择成本最低的肥料资源组合；
- ▶ 使用高质量的种子，最佳种植密度，综合的虫害管理和良好的作物管理来充分发挥SSNM技术的优势；
- ▶ 调整SSNM技术使之与当地具体情况相结合（例如：在农户参与下估计农田产量和收益）。

## 1.5 施肥方案的制定

在以下情况下制定基于SSNM的施肥方案：

- ▶ 针对单个农户的田块；
- ▶ 针对大面积技术推广者，技术推广区应是相对均匀的大面积区域，且具有相似的土壤养分供应特性（见1.7节）。

研究人员、推广人员和当地农民应采用参与式方法一同制定适宜的施肥方案，并且在新的推荐施肥方案大面积推广之前，要在示范小区至少进行1-2季的评价，表2给出了制定施肥方案的时间建议表。

表2. 参与式建立和测试养分优化管理技术的建议时间框架。

| 生长季度               | 实施内容                                                                                                                                |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 第一季作物<br>种植前       | <p>选择一个目标区域，召开区域内相关人员的讨论会议，做需求和机会评估 (Needs and Opportunity Assessment, NOA);</p> <p>选择区域推荐策略;</p> <p>基于NOA和SSNM原理制定初步的优化氮肥管理方案。</p> |
| 第一季作物 <sup>a</sup> | <p>在已选定为推荐区域的农户田块上通过农民的积极参与来测试新的优化氮肥施用方案;</p> <p>评估土壤氮磷钾的供应能力;</p> <p>检验所选定区域推荐施肥策略的正确性。</p>                                        |
| 第二季作物<br>种植前       | 与农民和推广专家合作制定推荐施肥建议。                                                                                                                 |
| 第二、三季作物            | <p>在农田示范小区测试和精细调整新的推荐施肥方案;</p> <p>在第二或三季进一步验证土壤氮、磷、钾的供应能力。</p>                                                                      |
| 第四、五季作物            | <p>在已选定的推荐区域大面积推广这种推荐施肥方案;</p> <p>进一步监测和评价。</p>                                                                                     |

<sup>a</sup>是指在较适宜气候和较少虫害条件下的理想高产季节。

## 注意:

-  要区分产量限制因素的优先次序：哪一项技术对于提高生产力有最大潜力？
-  不要一次引入太多新的推荐方法，主要针对二至三项技术（例如：改善种子品质和氮磷钾肥的优化施用）。
-  采用参与式方法在一定数量农田上对新的推荐

方法进行一到二季的测试，然后根据农民的反  
馈信息来调整这种推荐方法。

 水稻氮、磷、钾养分的缺乏最普遍，同时其他  
养分的缺乏也不容忽视，如：锌和硫，特别是在  
高强度的水稻集约化种植体系中这种情况更为  
突出。

## 1.6 需求与机会评估

以目前的生产水平和肥料价格，亚洲水稻种植  
业收益的增加主要是通过提高产量来实现，部  
分取决于成本的降低。充分利用当地的养分资  
源，选择低成本、易得到的肥料组合，结合高  
效合理的施用可以大大降低成本（例如：在养  
分最缺乏的地方投入更多的肥料，而在较少出  
现养分限制的地方则适当节省肥料投入）。

弄清农民在物质与社会经济方面水稻生产的  
限制因子对于建立有效的推广策略是相当重  
要的，这可以通过需求和机会评估(NOA)来实  
现：

- ▶ 评估当前农民的作物、养分和虫害管理措施以  
弄清与这些管理有关的限制因素；
- ▶ 通过调查，评价农民对生产力限制因素的认知  
程度；
- ▶ 评价提高生产力是否存在较大机会，这要考虑  
农民的兴趣（以及农民的机会成本）和所有参  
与者（农民、非政府组织、推广人员和地方政  
府等等）对计划的执行能力。

## 选择合适的目标区域

基于NOA的结果、最初的土地调查以及与有关人员的讨论结果和行政区域界线来选定目标区域，计划引入优化养分管理策略的目标区域应有如下特点：

- ▶ 尽管具有高产潜力，但低效或不平衡的肥料施用导致较低的可达到产量（见1.1节），弄清当地农民、肥料供应商和推广人员的肥料使用情况；
- ▶ 出现养分缺乏症（见第二章）；
- ▶ 出现由于养分不平衡供给或氮肥过量施用而引起的虫害（例如：纹枯病）；
- ▶ 由于氮肥总用量过高或肥料分配和施肥时期不合理而导致氮肥利用率低，例如：如果存在以下情况就会导致这样的效应：
  - ▶▶ 氮肥用量  $> 175$  公斤N/公顷；
  - ▶▶ 在作物生长早期施用大量氮肥（在移栽/播种后前十天氮肥施用量  $> 50$  公斤N/公顷或前二十天施用量  $> 75$  公斤N/公顷）；
  - ▶▶ 每次撒施的肥料用量  $> 50$  公斤N/公顷；
  - ▶▶ 与不施肥稻田产量相比，每公顷增加一吨的产量需要施氮肥  $> 55$  公斤N（相当于施尿素120公斤/公顷）；
  - ▶▶ 出现倒伏等问题。
- ▶ 土壤磷、钾库的显著耗竭，例如：在中高产水平下，如果农民每年种两季或多季作物，并且

在过去五年里:

- ▶ 每季作物施磷肥 < 20公斤/公顷 ( $P_2O_5$ ), 或者
- ▶ 每季作物施钾肥 < 10公斤/公顷 ( $K_2O$ ), 并且大部分秸秆被移走。

## 养分资源的价格、可利用程度及品质

优化施肥措施如果被农民采纳, 需符合以下条件:

- ▶ 对农民产生较大的经济回报;
  - ▶ 有充足高品质的无机肥料可被当地农民利用。
- 对肥料价格和肥料品质的总体核查应该作为NOA的一部分。

## 总利润分析

在田块尺度上测试新的推荐方法之前, 需要进行总利润分析来决定:

- ▶ 以谷物产量所表示的所有投入成本的数值 (例如: “无亏损产量”);
- ▶ 新的推荐方法所需要投入的额外成本;
- ▶ 执行新技术所需要的额外成本 (例如: 劳力);
- ▶ 与传统管理方法相比利润的净增加量。

## 自发的转变

在优化推荐施肥方法的建立过程中, 农民是最重要的合作伙伴, 从一开始就应该通过需求和



机会评估体系(NOAs)以及共同参与的方式与农民商讨新施肥技术的可行性。

研究者要确定有足量可用的土地、劳力和资金来采纳这种新的技术，在农民需要贷款购买所有投入物资的地方，需调查借贷的渠道和利率。

新的施肥技术只有达到下述效果，农民才可能接受这个技术：

- ▶ 至少实现增产0.5吨/公顷（“眼见为实”）；
- ▶ 显著提高农田收益；
- ▶ 能够与当前农民所采用的管理措施相结合（包括劳动力需求）。

## 1.7 区域推荐

在特定的目标区域内建立推荐施肥方案需要基于一个经过鉴定的推荐区域，推荐区域的确定可通过了解当地的农民施肥习惯与社会经济特点，因为这些特点在选定的区域内决定着作物产量潜力、土壤养分供应以及预期肥料效应之间的关系。推荐区域应具备以下特点：

- ▶ 具有一个流域边界；
- ▶ 具有共同的种植体系和农时规律；
- ▶ 相似的灌溉水源；
- ▶ 相似的土壤肥力状况（基于现有土壤肥力的知识，包括土壤质地图以及其它土壤性质、地貌、当地农民和推广人员的知识背景）；

- ▶ 可能包括了若干个行政单位的边界。

推荐区域的土壤肥力状况可通过缺素小区（见1.8节）估计出的土壤养分供应能力来评价，推荐区域面积的大小取决于上述参数的空间变异。

## 推荐方法

要在农民的共同参与下确定推荐方法，具体的施肥建议要根据以下条件作出调整：

- ▶ 目标产量（或养分输入水平）
- ▶ 作物种植方式
- ▶ 品种
- ▶ 作物残茬的管理方法

推荐方法也要考虑推荐区域中农民当前的管理措施、需求和兴趣。

## 1.8 氮、磷、钾推荐施肥方法的建立

这部分介绍为了实现产量目标如何计算氮、磷、钾肥的适宜施用量，并且给出了氮肥和钾肥分期施用的建议（表3）。据此技术推广人员可在较大区域内建立推荐施肥方法（见1.7节），农民也可应用这种方法在自己的田块上形成一套推荐施肥技术。

在推荐区域内制定一套完整的施肥计划，施肥量的计算应包括以下步骤：

**第一步**，选定一个经济的目标产量；

**第二步**，估计土壤养分的供应量；

**第三步**，计算氮肥施用量并采用基于作物需求的氮管理策略；

**第四步**，计算磷肥 ( $P_2O_5$ ) 施用量；

**第五步**，计算钾肥 ( $K_2O$ ) 施用量。

本节施肥量的计算方法基于如下假设：

- ▶ 高产水稻品种的收获指数约为0.5；
- ▶ 经济目标产量的选定没有超过最大产量潜力的75–80%；
- ▶ 氮、磷、钾肥的平衡施用；
- ▶ 通过叶色卡 (LCC) 的诊断，适时适量的施用氮肥；
- ▶ 良好的作物管理；
- ▶ 其他限制因素如水分供应、杂草和病虫害没有严重影响作物的生长。

### **第一步、选定经济的目标产量**

- ▶ 目标产量的确定是在良好作物管理和消除所有养分限制因子的前提下，基于过去3–5季作物可达到产量的平均值（同一季节）来计算（见图3，氮磷钾小区）；
- ▶ 目标产量反映了被作物所吸收的养分总量，随地区和季节而变，取决于气候、品种和作物管理；
- ▶ 目标产量应不高于通过作物模型估计的最大产量潜力 ( $Y_{max}$ ) 的75–80%。目标产量越接近

表3. 氮、磷、钾推荐施肥建议制定的步骤

第一步、选定经济目标产量

|             |  |  |  |
|-------------|--|--|--|
| 最大产量潜力      |  |  |  |
| 农民实际产量（平均值） |  |  |  |
| 目标产量        |  |  |  |

第二步、用空白小区产量估计土壤养分供应能力

|                 |  |  |  |
|-----------------|--|--|--|
| 氮限制型产量（无氮肥小区产量） |  |  |  |
| 磷限制型产量（无磷肥小区产量） |  |  |  |
| 钾限制型产量（无钾肥小区产量） |  |  |  |

第三步、计算氮肥用量并应用于作物需求的氮肥管理策略

|                       |  |  |  |
|-----------------------|--|--|--|
| 增产量（目标产量减去无氮肥小区产量）    |  |  |  |
| 估计氮肥总需求量              |  |  |  |
| 早期氮肥施用量（移栽14天后或播种21后） |  |  |  |
| 方法1: 实时调控法            |  |  |  |
| 某一时期的氮肥总用量（__到__天）    |  |  |  |
| 叶色卡阈值                 |  |  |  |
| 测定时间间隔                |  |  |  |

|        |    |    |
|--------|----|----|
| 单位     | 干季 | 湿季 |
| 吨/公顷   | —  | —  |
| 吨/公顷   | —  | —  |
| 吨/公顷   | —  | —  |
| 吨/公顷   | —  | —  |
| 吨/公顷   | —  | —  |
| 吨/公顷   | —  | —  |
| 公斤/公顷  | —  | —  |
| 公斤/公顷  | —  | —  |
| 公斤/公顷  | —  | —  |
| 公斤/公顷  | —  | —  |
| 叶色卡色阶号 | —  | —  |
| 天      | —  | —  |

## 方法2: 固定时期调控法

第一次追施氮肥: 分蘖期

第二次追施氮肥: 幼穗分化期

最适额外追施氮肥: 抽穗初期

叶色卡阈值

| 单位     | 干季 | 湿季 |
|--------|----|----|
| 公斤/公顷  | —  | —  |
| 公斤/公顷  | —  | —  |
| 公斤/公顷  | —  | —  |
| 叶色卡色阶号 | —  | —  |

## 第四步、计算磷肥用量 ( $P_2O_5$ )

维持型磷肥用量

## 第五步、计算钾肥用量 ( $K_2O$ )

在作物种植前秸秆还田的数量

维持型钾肥用量

第一次施用时期在\_\_天 (\_\_%)

第二次施用时期在\_\_天 (\_\_%)

| L/M/H <sup>a</sup> | — | — |
|--------------------|---|---|
| 公斤/公顷              | — | — |
| 公斤/公顷              | — | — |
| 公斤/公顷              | — | — |

<sup>a</sup>L=低量, M=中量, H=高量

最大产量潜力，需肥量就越大，同时也加大了作物歉收和利润损失的风险；

- ▶ 在高产季（适宜的气候条件）选定一个较高的目标产量，在低产季（不利的气候条件，以及存在因倒伏或者病虫害而引起的较高作物歉收风险）选定一个适中的目标产量。

## 第二步、估计土壤养分的供应量

采用空白小区的稻谷产量（在适宜气候条件和良好的生长环境下）作为在一个作物生长季内土壤氮、磷、钾养分潜在供应能力的衡量指标（图3），使用高品质种子并进行良好的作物管理，包括水分管理和虫害控制。

- ▶ 选定10–20个有代表性的农户田块作为推荐区域，在每个田块里划出一个 $20\text{m} \times 5\text{m}$ 的小区，然后把这个小区再划分成4个 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的空白小区（注意：畦埂的宽和高均为 $25\text{cm}$ 以防止小区之间的养分流动）：

**0 N:** 在不施氮小区内测得氮限制型产量

（N-limited yield），此区施用磷和钾肥，不施任何氮肥。作物生长季节农民施用到其它田块的氮肥会引起小区的交叉污染，所以要设置田埂加以防止。

**0 P:** 在不施磷肥小区内测得磷限制型产量

（P-limited yield），此区不施磷肥，仅施氮和钾肥，要施用足量的氮、钾肥以实现推荐区域内的目标产量。

**0 K:** 在不施钾肥小区内测得钾限制型产量 (K-limited yield)，此区不施钾肥，仅施氮和磷肥，要施用足量的氮、磷肥以实现推荐区域内的目标产量。

**NPK:** 在施氮、磷、钾肥的小区内测得可达到的产量 (attainable yield)，要施用足量的氮、磷、钾肥以实现推荐区域内的目标产量。

在0 P、0 K和NPK小区，必须采用一个适宜的氮肥分配比例，以防止倒伏。如果普遍存在Zn等微量元素缺乏的症状，应在所有的小区施用Zn肥和其他微量元素肥料。

- ▶ 作物成熟时，在每个空白小区中心 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$ 的面积内测定稻谷产量。收获所有的穗并把它们放置在塑料布上以避免产量损失。小心地剥开

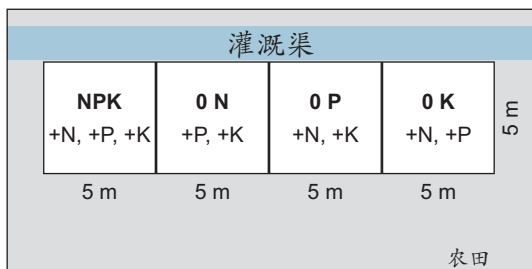


图3. 农田NPK施肥与缺素小区设计图。试验布置尽可能避免靠近田块的边缘，以防农民耕种时机具转弯对试验小区带来的影响。

所有的小穗，除去瘪穗，把谷粒铺平在塑料布上。将谷粒在充足的阳光下自然晾干一天，使谷粒含水量为12%–16%。如果在雨季，将谷粒充分晾干可能需要2–3天。谷物产量的单位用吨/公顷表示。

- ▶ 从10–20个田块获取各缺素小区的平均产量以确定相关参数进行区域推荐：

- ▶▶ 氮限制型平均产量（0 N小区产量）
- ▶▶ 磷限制型平均产量（0 P小区产量）
- ▶▶ 钾限制型平均产量（0 K小区产量）
- ▶▶ 可达到的产量（NPK小区产量）

- ▶ 如果缺素小区产量表明推荐区域土壤养分供应能力存在较大差异，那么就要把这个推荐区域再划分为两个或更多的区域。经验性原则是，不同的两块推荐区域内缺素小区产量应至少能保持1吨/公顷 的差异。

### 注意：

- ✎ 氮素是首要的产量限制因素，水稻磷、钾的吸收很大程度上受到氮管理的影响，所以，对于0 P、0 K和NPK小区，必须采取适宜的氮肥管理策略。为达到最大产量潜力的75–80%应该施用充足的氮肥，氮肥的管理要适时、适量（见第三步）。在0 P、0 K和NPK小区内不能采用现行的农民习惯氮肥管理措施；

- ✎ 根据产量和生长季，0 K小区至少要施用30–45公斤/公顷的磷肥（ $P_2O_5$ ），而0 P小区至少要



施用50–100公斤/公顷的钾肥 ( $K_2O$ ) ;

在适宜的气候条件和良好的作物管理下, 稻谷产量 (GY) 可作为潜在养分供应能力的指标。为了能正确反应供应养分的能力, 谷物的产量不应该受到其他因素的限制, 诸如其他养分的供应、水分供应和病虫害。如果由于倒伏、鼠害、虫害等等而导致产量大大降低, 那么这个产量指标就不能使用;

以植物吸收为基础的养分供应能力的测定方法会受到作物品种和种植方式带来的影响, 因此, 以稻谷产量为指标测定的养分供应能力, 浅水直播水稻一般低于移栽水稻。因而采用农民的水稻种植方式来衡量农田的土壤养分供应是十分重要的;

如果农民当前的管理措施中除了施用无机肥外还施用了诸如农家肥之类的有机肥, 那么各缺素小区也应该补充相同数量的有机肥。

### 第三步、氮肥施用量的计算和基于植物需求的氮肥管理

有两种互补的方法已经成功地应用在农田中用来指导氮肥的有效施用 (实时管理和固定时间管理)。表3给出了这两种方法的主要部分。建议在大面积推广之前, 要采用农民参与式的方式在农田中对比测试这两种方法, 从而评估其实施效果。在制定氮肥管理策略时, 要考虑到社会经济因素 (可用的劳动力和成本, 肥料和

水稻的价格，可用的肥料资源和当前的施用措施）。

## 氮肥优化管理方法一(Option N1): 实时管理方法

农民在作物生长季中常常用叶色作为一种可视指标来判断水稻氮素营养状况，并由此确定氮肥的施用。叶色卡（LCC）是一种在作物生长季节直接使用的、简单且价格低廉的检测植物氮营养状况的诊断工具，可以用来确定如何追施氮肥。当水稻叶片的颜色低于叶色卡阈值时，表明植株缺乏氮素，应施用一定数量的氮肥。这会帮助农民在影响作物生长的某一具体的气候条件下调控氮肥的施用（称之为实时氮肥管理）。良好的实时氮肥管理能够减少氮肥用量，提高氮肥的利用率，并能够降低水稻感染病虫害的几率。

### 实时氮素管理方法的基本原理

国际水稻所自2003年建立和供应标准的叶色卡（见封面图片），叶色卡随着颜色由浅黄绿色（2号）到暗绿色（5号）包括四个色阶板。由

表4. 不同品种和种植方式下的叶色卡阈值。

| 品种    | 种植方式 | 叶色卡LCC阈值 |
|-------|------|----------|
| 香米    | —    | 2        |
| 半矮秆籼稻 | 直播   | 3        |
| 半矮秆籼稻 | 移栽   | 3.5      |
| 杂交水稻  | 移栽   | 3.5      |

于水稻品种和种植方式的不同，叶色卡的阈值从2到4不等，低于阈值就应追施氮肥。表4中所给出的叶色卡阈值在应用时要在当地进行校验。

## 叶色卡的使用原则

- ▶ 从移栽稻移栽14天后或浅水直播稻播种21天后，每隔7到10天测一次叶色卡值，最后一次测定要在刚开花时完成。农民更希望能减少测定的工作量，可以推荐固定时期调控法即仅在水稻生长的关键时期测定叶色值（如：分蘖盛期，穗分化初期[见A-9]）。
- ▶ 因为水稻顶端完全展开叶可以很好地指示水稻植株的氮营养状况，所以通常用LCC测定它们的叶色，把叶片中部的颜色与叶色卡色阶相比较得出叶色卡LCC值。如果叶片颜色居于叶色卡两个色阶之间，那么这两个色阶数值的平均数就是这个叶片的叶色卡读数。例如：如果叶片颜色在3和4色阶之间，那么此叶片的叶色卡读数为3.5。
- ▶ 因为叶片颜色会受到太阳角度和阳光强度所影响，所以在测量过程中要始终用身体挡住阳光。如果可能的话，尽量在每次测量时，由同一个人在每次测定当天的同一时间读取叶色卡值。
- ▶ 在每一个田块从选定的穴中随机选取10片叶子进行读数。如果有6个或6个以上叶片叶色卡读

表5. 叶色卡读数低于阈值时对半矮秆籼稻的氮肥建议施用量。

| 预计相对于无氮区产量的增加量 (吨/公顷) | 移栽14天或播种21天后到穗分化氮肥的施用量 (公斤 N/公顷) <sup>a</sup> |
|-----------------------|-----------------------------------------------|
| 1-2                   | 25                                            |
| 2-3                   | 35                                            |
| 3-4                   | 45                                            |

<sup>a</sup>从穗分化到开花初期施用约25公斤N/公顷。

数低于规定的叶色卡阈值，那么就应立即补施氮肥。

- ▶ 表5给出了半矮秆籼稻品种的氮肥推荐施用量。

## 叶色卡的校验原则

叶色卡的校验试验可以在试验田或农田实施。选取3-4个当地最常用的水稻品种，选取不同阈值比较作物生长的情况（例如：取阈值3，3.5和4）。按表5所示使用叶色卡调控氮肥施用。除了记录肥料的使用情况外，也要记录水稻产量和产量组成（可选择的）、病虫害发生几率以及倒伏程度。

- ▶ 在试验站安排田间试验，选择一个析因试验方案，例如，三个品种、三个LCC临界值作为处理，四次重复，完全随机区组设计；
- ▶ 如果要在农民的田块中进行校验试验，那么就选择农户作为重复。每个品种至少选取四个农户田块作为重复，每个田块测试2-3个叶色卡阈值；
- ▶ 不同处理都要设置无肥小区来计算肥料的农学利用率（AE，施用单位数量的氮肥增加的产

量，见1.3节）；

- ▶ 尽管每次追氮量因季节而变，并且主要受气候决定的预期增产量的影响（表5），而叶色卡的阈值则主要由品种和种植方式所决定（表4）。

### 注意：

- 因为叶色卡法是一种基于植株的氮素管理方法，对于移栽水稻而言，通过对无氮区产量进行近似估计，可以决定水稻生长的前14天是否需要早期施肥。在土壤供氮能力较低的土壤上减少基肥的使用可能会降低水稻分蘖。因此，是否需要施用基肥将在方法2中论述（见下文），而本节主要介绍应用叶色卡精细调控后期氮肥的追施。
- 把以叶色卡为基础的氮肥管理技术融入到综合的实地养分管理策略中会更为有效。为了得到植物对氮肥的最佳效应，其它养分（磷、钾、硫、锌）不能成为限制因素。磷、钾肥的施用以下第四步和第五步有所论述，微量元素（硫、锌）要基于土壤测定和当地的推荐技术。
- 磷的缺乏（见2.2节）可使叶片颜色变暗而导致叶色卡读数不准。
- 实时氮管理方法要求各地的叶色卡值都应进行校验，对于叶色卡使用方法的说明书应该力求简练并且要采用当地通俗语言，使农民明白如何在特定的生长季里决定正确的氮肥施用时间和施用量。

## 氮肥优化管理方法二(Option N2): 固定分期调控方法

固定分期调控方法给出了氮肥推荐总量，制定了与作物生育时期、作物生长季、水稻品种和种植方式相一致的氮肥施用时期和分配计划，用叶色卡来调节每次的追肥量。

固定分期调控方法的基本原则：

估计氮肥的总施用量并制定氮肥分配模式，在水稻主要生长临界期使用叶色卡调整预定的氮肥施用量。

通过表6来获得氮肥的总施用量要基于：

- ▶ 根据目标产量和无氮区（0 N）产量之间的差值计算作物对氮肥的产量效应（第一和第二步）；
- ▶ 可达到的氮农学效率（AEN，见第7-8页）。

经验原则：对氮肥而言，形成1吨的产量效应（即每增产1吨）需要施用40-60公斤氮。

在多雨季节里对作物施用较少的氮肥（低光照、低产量效应），在干旱季节里施用较多的氮肥（高光照、高产量效应）。

只有在良好的气候条件和高产季节，才可选择高于0 N小区产量4吨/公斤及其以上的预期的产量效应。

亚洲热带地区的经验表明，在良好的作物管理和高产季节，农学效率AEN可以达到25公斤/

公斤N，在良好的作物管理和低产季节，农学效率AEN也可以达到16.7或20公斤/公斤N。

应注意到低氮用量条件下农学效率AEN通常比高氮肥用量时要高。在热带地区，高效环境友好型氮管理的目标是实现较高的经济产量，农学效率达到16.7–25公斤/公斤N；在亚热带气候条件下，优化的农学效率可超过25公斤/公斤N，增产效应可达5吨/公顷，在这种情况下，表6中的数据需要作出调整。

- ▶ 氮肥推荐总量要分2–4次施用，对于生育期较长的品种和高产季节，应增加氮肥的分施次数，在作物生长需肥最大时期要施用较多的氮肥（例如：分蘖中期到开花期），只有在气候条件适宜且作物的产量效应较大时，氮肥的一次施用量才可大于45公斤/公顷。

表6. 根据可达到的增产量（目标产量 – 无氮区产量）和预期的氮农学效率（AEN, 施用每公斤氮的增产量，单位：公斤/公斤N）确定氮肥总用量。

| 氮农学效率<br>( 谷物增产量/公斤N) → | 16.7         | 20  | 25  |
|-------------------------|--------------|-----|-----|
| 氮的产量效应 (吨/公顷) ↓         | 氮肥用量 (公斤/公顷) |     |     |
| 1                       | 60           | 50  | 40  |
| 2                       | 120          | 100 | 80  |
| 3                       | 180          | 150 | 120 |
| 4                       | ↙            | 200 | 160 |
| 5                       | ↙            | ↙   | 200 |

↙ 指不可能实现的目标产量。

- ▶ 采用表7-9确定氮肥分期施用的大致的数量，尽管作物生长阶段可以清楚地确定，但实际的氮肥施用日期取决于具体的品种（作物生育期），对于热带水稻，幼穗分化大约出现在收获前的60天，活跃分蘖期（分蘖中期）大约发生在水稻移栽14天或直播21天到幼穗分化期之间。
- ▶ 确定水稻移栽14天或直播21天之前的基肥用量，需参照以下原则：
  - ▶▶ 当产量效应小于1吨/公顷时，一般前期不施基肥；当产量效应在1-3吨/公顷时，前期施用20-30公斤 N/公顷；当产量效应大于3吨/公顷时，前期氮肥的施用占施氮总量的25%-30%；
  - ▶▶ 当施用高质量的有机物质或厩肥时，前期可减少或不施氮肥；
  - ▶▶ 对于移栽稻，避免早期施用大量氮肥（如：施用量大于50公斤/公顷），因为早期水稻生长缓慢，移栽后的前3周氮素的吸收较慢；
  - ▶▶ 对于低分蘖大穗型品种进行大苗移栽（>24天）或采用生育期较短的品种时，应当增加早期氮的施用，植株的株、行距（<20穴/m<sup>2</sup>）较宽，提高了分蘖能力。或者播种与移栽时气温与水温较低的稻田（如高纬度地区），为了增加分蘖，需要适当增加早期氮肥的施用；



- ▶ 基肥应在播种之前施用，或者在移栽的14天内或直播21天内施用，基肥氮的形态以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为佳，而不用 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，也不需要应用LCC进行早期施氮的推荐。
- ▶ 水稻移栽14天或直播21天之后，使用LCC评价叶片的氮营养状况与作物的氮需求，当叶色较黄时，适当上调氮肥的用量；当叶色较绿时，适当下调氮肥的用量。
- ▶ 为了延迟叶片的衰老，提高灌浆能力，适当推迟氮肥的施用（如：在抽穗初期），但这种施肥策略仅适用于有高产潜力生长良好的作物。杂交稻和大穗型品种在高产季节通常需要在抽穗初期施用氮肥。为了减少倒伏和病虫害的风险，避免在孕穗初期到开花期施用过量氮肥，在低产季节尤为如此。
- ▶ 对于适用于大多数水稻品种的标准的LCC（IRRI），叶色与叶色卡读数（表7-9）的对应关系如下：
  - ▶ 黄绿色 = LCC的值为3
  - ▶ 中间绿色 = LCC的值为3.5(代表3-4之间的取值)
  - ▶ 绿色 = LCC的值为4
- ▶ 表7-9中的施肥量适用于氮肥利用率较高的情况（农学利用率，AEN），例如：在预期施肥的产量效应为1-2 吨/公顷的生产季，施用每公斤氮肥可增加籽粒产量16.7-20公斤；当预期施

表7. 氮肥利用效率较高的移栽和直播常规稻的氮肥分配时期及用量。

| 与无氮区相比的产量效应→    |                 | 1            | 2  | 3  | 4  |
|-----------------|-----------------|--------------|----|----|----|
|                 |                 | 吨/公顷         |    |    |    |
| 生长阶段            | 叶色 <sup>a</sup> | 施氮量 (公斤N/公顷) |    |    |    |
| 移栽后14天内或直播后21天内 |                 | —            | 20 | 30 | 45 |
| 分蘖盛期            | 黄绿              | 35           | 45 | 45 | 60 |
|                 | 黄 - 绿中间色        | 25           | 35 | 35 | 45 |
|                 | 绿色              | —            | —  | 25 | 25 |
| 幼穗分化期           | 黄绿              | 35           | 45 | 60 | 60 |
|                 | 黄 - 绿中间色        | 25           | 35 | 45 | 45 |
|                 | 绿色              | —            | 25 | 25 | 35 |

<sup>a</sup> 见A-6页附录中LCC对应值的说明。

表8. 氮肥利用效率较高的移栽杂交稻的氮肥分配时期及用量。

| 与无氮区相比的产量效应→ |                 | 1            | 2  | 3  | 4  |
|--------------|-----------------|--------------|----|----|----|
|              |                 | 吨/公顷         |    |    |    |
| 生长阶段         | 叶色 <sup>a</sup> | 施氮量 (公斤N/公顷) |    |    |    |
| 移栽后14天内      |                 | —            | 20 | 30 | 45 |
| 分蘖盛期         | 黄绿              | 35           | 45 | 45 | 60 |
|              | 黄 - 绿中间色        | 25           | 35 | 35 | 45 |
|              | 绿色              | —            | —  | 25 | 25 |
| 幼穗分化期        | 黄绿              | 35           | 45 | 60 | 60 |
|              | 黄 - 绿中间色        | 25           | 35 | 45 | 45 |
|              | 绿色              | —            | 25 | 25 | 35 |
| 抽穗初期         | 黄绿              | —            | —  | 20 | 20 |

<sup>a</sup> 见A-6页附录中LCC对应值的说明。

表9. 大穗型(穗重型)水稻品种氮肥分配时期及用量。

| 与无氮区相比的产量效应 → |                 | 1            | 2  | 3               | 4               |
|---------------|-----------------|--------------|----|-----------------|-----------------|
|               |                 | 吨/公顷         |    |                 |                 |
| 生长阶段          | 叶色 <sup>a</sup> | 施氮量 (公斤N/公顷) |    |                 |                 |
| 移栽后14天内       |                 | 25           | 30 | 40              | 50              |
| 分蘖盛期          | 黄绿              | —            | 35 | 45              | 45              |
|               | 黄-绿中间色          | —            | 25 | 35              | 35              |
|               | 绿色              | —            | —  | 25              | 25              |
| 幼穗分化期         | 黄绿              | 45           | 45 | 45              | 60              |
|               | 黄-绿中间色          | 35           | 35 | 35              | 45              |
|               | 绿色              | 25           | 25 | 25              | 35              |
| 抽穗初期          |                 | —            | —  | 25 <sup>b</sup> | 25 <sup>b</sup> |

<sup>a</sup> 见A-6页附录中LCC对应值的说明。<sup>b</sup> 不考虑LCC读数，进行氮肥施用。

肥的产量效应为3—4吨/公顷的生产季时，施用每公斤氮肥可增加籽粒产量25公斤（见表6）。

- ▶ 按植物的氮需求与土壤供应特点采用LCC监测植物的氮营养状况优化氮肥分配的施用量。表7—9中基于LCC值的施肥量试图给予足够灵活的施肥量推荐值以适合特定的水稻生长季节及不同产量效应。
- ▶ 表7—9中的氮肥推荐量可以进行细调，以适应于不同的地点、不同的生长条件和不同的水稻品种。

### 1. 移栽水稻（普通自交品种）（见表7）

种植密度为20—40穴/米<sup>2</sup>，高产常规品种，持续或间歇淹水。移栽水稻在生长初期叶面积扩

展、干物质积累和氮素吸收速率较慢，但从分蘖中期到灌浆期，氮素吸收加快，生长迅速。

## 2. 浅水直播水稻（见表7）

播种量为80–150公斤/公顷，撒播，采用高产常规品种，出苗后持续淹水。在生长初期，浅水直播水稻叶面积迅速扩大，干物质积累很快，氮素吸收量大，但从穗分化初期后，特别是在灌浆期，氮素吸收和作物生长均较慢。直播稻叶片的早衰和倒伏比移栽稻要更严重。直播水稻在生长后期需要较少或不需要施用氮肥。

## 3. 移栽水稻（杂交品种）（见表8）

种植密度为20–30穴/米<sup>2</sup>，具有高产潜力的杂交水稻，持续淹水或间歇灌溉。移栽杂交稻在高产季节加强后期氮肥的供应通常具有明显的增产效果。

## 4. 移栽水稻(大穗型品种)(见表9)

高产大穗型水稻(穗重型)，分蘖较少且抗倒伏能力较强，包括很多新种植类型以及一些杂交水稻如中国的超级杂交稻。

### 注意：

 如果预报有大的降雨时，尽量不要追施氮肥。

## 第四步、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)施用量的计算

磷肥管理的主要目的是防止磷素缺乏，而不是

在出现磷素缺乏症状之后再去做处理。如果土壤供磷能力低导致不能达到目标产量，那么磷肥管理就要着重建立和维持充足的土壤有效磷水平，确保土壤磷素供应不会限制作物生长和降低氮肥利用率。

磷在土壤中是不易损失的，但诸如象灌溉水和秸秆等来源的磷素输入量通常是很小的。磷肥施用的残留效应可持续几年，保持土壤供磷能力需要长期管理措施，并且这种措施应该适合当地的条件，并考虑所有磷素输入的来源。

磷素的可持续性管理需要土壤磷库的补充，特别是在高产条件下的双季或三季水稻种植体系，即使作物对磷肥的施用没有直接的产量反应也要考虑磷肥的补充问题。

经验原则：在土壤供磷能力低的地方，目标产量每增加1吨需施用20 公斤 $P_2O_5$ /公顷（目标产量和无磷肥小区产量的差）。

表10给出了维持性的磷肥施用量，在低量至中度的秸秆还田的情况下，用来补充由谷粒和秸秆带走的磷。磷肥的施用量取决于：

- ▶ 目标产量（见第一步）；
- ▶ 通过无磷肥小区产量估计的土壤供磷能力（见第二步）。

理论上，在选定的目标产量下，如果产量效应不明显表明并不需要磷肥的施用（例如：如果

目标产量=养分限制区产量)，则无须施用磷肥。这种“无磷肥”措施可导致土壤磷库的消耗，从中长期来看也会影响作物产量，特别是在没有秸秆和绿肥等其它养分来源的情况下土壤磷库的消耗更为明显。

### 注意：

如果增产效应（与无磷肥小区相比）为3吨/公顷，在表10中要选定稍低一点的产量目标。这种情况下，首要的目标是要在几季作物种植中逐渐提高土壤肥力状况；

为了防止土壤磷库的消耗，可采用以下原则：

▶▶ 如果大部分秸秆都还田（例如：联合收割之后或只收割稻穗），同时有机肥养分输入很少的情况下，收获每吨谷粒至少应该施用4公斤 $P_2O_5$ /公顷（例如：产量为5吨/公顷，

表10. 根据目标产量和无磷肥小区产量确定的维持性磷肥施用量（ $P_2O_5$ ）。

| 目标产量（吨/公顷）→        | 4                     | 5  | 6  | 7  | 8  |
|--------------------|-----------------------|----|----|----|----|
| 无磷肥小区产量<br>（吨/公顷）↓ | 施肥总量（公斤 $P_2O_5$ /公顷） |    |    |    |    |
| 3                  | 20                    | 40 | 60 | ◀  | ◀  |
| 4                  | 15                    | 25 | 40 | 60 | ◀  |
| 5                  | 0                     | 20 | 30 | 40 | 60 |
| 6                  | 0                     | 0  | 25 | 35 | 45 |
| 7                  | 0                     | 0  | 0  | 30 | 40 |
| 8                  | 0                     | 0  | 0  | 0  | 35 |

◀ 指不切合实际的目标产量。

需施用20公斤 $P_2O_5$ )来补充谷粒所带走的养分;

- ▶ 如果稻田中全部秸秆被移走同时其他养分(有机肥、水、沉降物)输入很少,那么收获每吨谷粒至少应施用6公斤 $P_2O_5$ /公顷(如:产量为5吨/公顷,需施用30公斤 $P_2O_5$ )来补充谷粒和秸秆所带走的养分。

如下情况可以减少维持性磷肥的施用量(见表10):

- ▶ 土壤施入了农家肥等有机物质(见表13)。有机物质能充分建立和维持土壤磷库,取决于有机物质的养分浓度和施用量。在缺素小区施用有机物质可评价土壤和所施有机物质的综合养分供应能力;
- ▶ 土壤的周期性淹水而导致沉积物中大量养分的输入(例如:越南的湄公河三角洲)。

无论对水稻还是小麦施用磷肥都会对后茬作物有残余效应,但是对每季作物来说直接施用磷肥的效果会更好。磷肥应该在播种或移栽前混入土壤,或者在移栽稻移栽后的14天之前或浅水直播稻播种后21天之前在土壤中撒施磷肥;

如果无磷肥小区作物管理良好,所有其它营养元素供应充分并且条件适宜,其产量高于目标产量,那么就不建议施用磷肥;

在8-10个作物周期之后,有必要重新评价土壤供磷能力。

## 第五步、钾肥 ( $K_2O$ ) 施用量的计算

一般来说，钾肥的管理与磷肥的管理遵循相同的原则（见第四步），但是水稻对钾的吸收量要远远高于磷（表1）。此外，水稻收获后超过80%的吸钾量保留在秸秆中，这使得秸秆在计算钾肥的需求量时成为一项重要的输入源（表11）。

经验原则：在土壤供钾能力低的土壤上，目标增产量每增加1吨需要施用钾肥30公斤 $K_2O$ /公顷（目标产量-无钾肥小区产量）。

表12列出了一些具体维持性的钾肥施用量，在考虑前茬作物秸秆还田的基础上，施用这些钾肥以补充由谷粒和秸秆带走的钾量。

钾肥的施用量取决于：

- ▶ 目标产量（见第一步）；
- ▶ 通过无钾肥小区产量估计的土壤供钾能力（见第二步）；
- ▶ 秸秆的钾素循环量以及上一季作物的秸秆管理措施（表11）。

土壤钾库的消耗从中长期来看会影响产量，特别是在大部分秸秆被移走的情况下。作为钾肥用量的最低限，施入钾肥的数量应该能够补充由谷粒和秸秆所带走的钾量。



表11. 根据前季作物的产量和秸秆管理措施确定秸秆还田的钾素输入量。

| 秸秆管理                                         | 前季                                                               |                                                                  |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                                              | 低产季<br>4-5吨/公顷                                                   | 高产季<br>4-5吨/公顷                                                   |
| 地表收割，秸秆全部移走，小于10%的秸秆以残茬存留，如印度、尼泊尔、孟加拉国和越南    | 秸秆钾素输入量：<br><b>低</b><br>(0-1吨的秸秆还田量)                             | 秸秆钾素输入量：<br><b>低</b><br>(0-1t的秸秆还田量)                             |
| 低位收割，25-30cm的残茬留在土壤中，不焚烧，如菲律宾                | 秸秆钾素输入量：<br><b>中</b><br>(2-3吨的秸秆还田量)                             | 秸秆钾素输入量：<br><b>中到高</b><br>(3-5吨的秸秆还田量)                           |
| 高位收割，30cm以上的残茬留在土壤中，不焚烧，如菲律宾、印尼              | 秸秆钾素输入量：<br><b>中到高</b><br>(3-4吨的秸秆还田量)                           | 秸秆钾素输入量：<br><b>高</b><br>(5-7吨的秸秆还田量)                             |
| 联合高位收割，长残茬和收割后的秸秆一同留在土壤中并将其全部焚烧掉，如泰国、越南和印度北部 | 秸秆钾素输入量：<br><b>高</b><br>(4-5吨的秸秆还田量，由于焚烧（磷）和钾的淋洗导致20-25%的磷、钾素损失） | 秸秆钾素输入量：<br><b>高</b><br>(6-8吨的秸秆还田量，由于焚烧（磷）和钾的淋洗导致20-25%的磷、钾素损失） |

## 注意:

 如下情况可适当降低表12中维持性钾肥的用量:

- ▶▶ 土壤施入了农家肥等有机物质（有机物质中钾的一般含量见表13）。有机物质能从根本上建立和维持土壤钾库，取决于钾素养分的浓度和所施用的量。在缺素小区施用有机物可评价土壤和施入有机物质的综合养分供应能力；
- ▶▶ 土壤周期性淹水可导致沉积物中大量养分的输入（例如：越南的湄公河三角洲）。

 与无钾肥小区相比，当产量增加超过3吨/公顷时，在表12中要选定稍低的产量目标。如果想达到如此高的增产目标，需要经过长期的培肥土壤。

 作为另一种选择，要考虑以下经验原则：

- ▶▶ 在大部分秸秆都还田（如：联合收割之后），同时有机肥养分输入很少的情况下，收获每吨谷粒至少应该施用3.5公斤 $K_2O$ /公顷（如：产量为5吨/公顷时，需补充17.5公斤 $K_2O$ ）来补偿谷粒所带走的养分；
- ▶▶ 如果全部秸秆从稻田中被移走同时其他养分（有机肥、水、沉降物）输入很少，那么收获每吨谷粒至少应施用12公斤 $K_2O$ /公顷（如：产量为5吨/公顷时，需施用60公斤 $K_2O$ ）来弥补谷粒和秸秆所带走的养分。

表12. 根据目标产量、秸秆还田量和无钾肥小区产量确定的维持性钾肥施用量 ( $K_2O$ )。

| 目标产量 (吨/公顷) →    |                  | 4                           | 5  | 6   | 7   | 8   |
|------------------|------------------|-----------------------------|----|-----|-----|-----|
| 秸秆还田量            | 无钾肥小区产量 (吨/公顷) ↓ | $K_2O$ 施用总量 (公斤 $K_2O$ /公顷) |    |     |     |     |
| 低<br><1<br>吨/公顷  | 3                | 45                          | 75 | 105 | ◀   | ◀   |
|                  | 4                | 30                          | 60 | 90  | 120 | ◀   |
|                  | 5                |                             | 45 | 75  | 105 | 135 |
|                  | 6                |                             |    | 60  | 90  | 120 |
|                  | 7                |                             |    |     | 75  | 105 |
|                  | 8                |                             |    |     |     | 90  |
| 中<br>2–3<br>吨/公顷 | 3                | 30                          | 60 | 90  | ◀   | ◀   |
|                  | 4                | 0                           | 35 | 65  | 95  | ◀   |
|                  | 5                |                             | 20 | 50  | 80  | 110 |
|                  | 6                |                             |    | 35  | 65  | 95  |
|                  | 7                |                             |    |     | 50  | 80  |
|                  | 8                |                             |    |     |     | 65  |
| 高<br>4–5<br>吨/公顷 | 3                | 30                          | 60 | 90  | ◀   | ◀   |
|                  | 4                | 0                           | 30 | 60  | 90  | ◀   |
|                  | 5                |                             | 0  | 30  | 60  | 90  |
|                  | 6                |                             |    | 10  | 35  | 70  |
|                  | 7                |                             |    |     | 25  | 55  |
|                  | 8                |                             |    |     |     | 40  |

◀ 指不可能实现的目标产量。

从短期来看，在选定的目标产量下，如果产量效应不明显（例如：如果目标产量=养分限制区产量），从理论上来说则无需施用钾肥。这种管理措施从中长期来看可导致土壤钾库的消

耗，也会影响产量，特别是在没有秸秆和绿肥等其它养分来源的情况下。

在播种21天内或移栽后14天内可以提前施用少量的钾肥，大量施用钾肥（40–120公斤 $K_2O$ /公顷）应该分两次施用（在作物移栽之前或在移栽之后的两周之内施用50%的钾肥作为前期肥料，其余50%的钾肥在穗分化期施用）。更大的钾肥（>120公斤 $K_2O$ /公顷）应该分三次施用（ $\frac{1}{3}$ 用做前期肥料， $\frac{1}{3}$ 用在穗分化期， $\frac{1}{3}$ 用在抽穗期到第一片颖花出现）。

## 1.9 有机肥、秸秆和绿肥的管理

无论在什么地区在条件允许的情况下，农家肥、秸秆和绿肥等养分资源应该和矿质肥料配合使用，这一方面为水稻生长提供部分养分，从长远来看也可以保持土壤肥力。对大部分水稻种植农户来说，秸秆是他们主要可以利用的有机物质。水稻成熟后其所吸收的养分大约有40%的氮、30–35%的磷、80–85%的钾和40–50%的硫保存在秸秆和残茬中。然而，在很多地区，有机肥料的投入量并不足以平衡养分的移出，同时使用有机肥料比投入相同数量的化学肥料所消耗的费用更高。

理解投入的有机物分解的基本规律以及有机物在不同稻作体系中的作用是十分重要的：

- ▶ 在水稻-其他作物轮作体系中（如：水稻-小麦轮作）或者雨养水田或旱作水稻体系：较长的

有氧时期会导致有机物质更快更彻底的周转，这可能会导致土壤有机质含量的降低，以及在旱地条件下对土壤物理结构产生负面效应

（如：减少持水能力、损坏结构、降低水分渗透性、生物活性及磷的有效性）。

- ▶ 在稻-稻（-稻）集约化种植体系中：残茬的分解是在厌氧淹水条件下进行的，导致更稳定和较好保存的有机质存留在土壤中。维持“物理性的”土壤质量并不重要，因为土壤结构会在土地种植准备时被破坏。有机质的作用仅体现在对养分供应的直接或间接的影响上。有时，有机质通过导致矿质元素的缺乏（如锌）或毒性（如铁、硫化物）对作物生长产生负面效应，还会影响根系健康。

## **秸秆管理和耕作**

- ▶ 作物残茬和秸秆的还田可使被作物吸收的大多数养分重新回到土壤当中（见表14），经过长期还田有助于土壤养分库的保持。这种做法短期看来对谷物产量的影响是很小的（与秸秆移出或焚烧相比），但从长期来看增产效果明显。矿质肥料和秸秆同时使用时，土壤氮、磷、钾和硅库可以保持平衡甚至有所增加。在已耕翻过的潮湿土壤上施入作物残茬和秸秆可导致土壤氮素的暂时固定，所以应该在秸秆还田2-3周后再进行水稻的移栽；或者在秸秆还田的同时施用尿素。

- ▶ 秸秆的焚烧可导致几乎所有氮素的损失、大约25%磷的损失和5–60%硫的损失，秸秆焚烧后由淋洗间接损失的钾为20%。在施用的肥料不含硫时，秸秆可能是硫的重要来源，因此不应焚烧秸秆，否则会造成硫的损失。相对而言，焚烧是将秸秆转化为矿质钾素的一个重要来源，而在此过程中钾的损失量很小。为了防止在农田中形成“养分富集点”应该均匀撒散秸秆。
- ▶ 长期来看，秸秆移除对土壤钾肥力的影响要远大于磷（见表1）。尽管如此，秸秆还田（均撒秸秆并与土壤混合）的工作量是巨大的，权宜之下农民更愿意把秸秆焚烧掉。秸秆也是微量营养元素（锌）的重要来源，并且对水稻中累积的硅的平衡有重要的作用（见2.6节）。
- ▶ 早期，在土面较干的情况下进行浅耕（深度为5–10cm）将作物的残茬混入，并通过休闲加强土壤通气来增加氮的有效性以满足后续水稻生长的需要。干土的浅耕需要四轮拖拉机在作物收获后2–3周进行，如果是在两季作物之间干湿交替期，则需要30天之后进行。然而，也要从经济角度考虑附加的燃料和劳力的花费。
- ▶ 通过定期的排水和晾田可提高淹水土壤的供氮能力，例如：在分蘖末期（大约在移栽后的35天）进行5–7天的中期排水。

## 其他有机物质的管理

- ▶ 有机肥料因其组成、对土壤肥力的作用以及养分供应的不同而千差万别（表13）。在条件允许的情况下，应在有机质含量较少的土壤施用2–10吨/公顷（或更多）的农家肥或者其他可利用的有机物质（作物秸秆、堆肥），特别是雨养洼地水稻种植体系以及水稻与其他旱地作物如小麦和玉米轮作的集约化种植体系，要避免在作物开始生长不久即投入大量有机物质。
- ▶ 许多豆科绿肥作物如生长快、周期短的茎生根瘤田菁属（长喙田菁）可以迅速的积累氮（在生长期45–60天可以积累80–100公斤氮）。大部分的氮（大约80%）来自生物固氮。当把绿肥作物翻入土壤，其分解速度很快并且可以代替氮肥，特别是在营养生长阶段。利用叶色卡来决定是否需要投入化学氮肥。绿肥可以改善土壤物理性质，但长期来看对提高土壤有机质含量的潜力却是很小的。绿肥的投入对加速盐碱土的改良是十分有效的。
- ▶ 如果土壤水分条件和农民经济状况允许，在水稻-其他作物轮作的休闲期种植捕获作物（豆类、其他绿肥作物、人工管理的草）来维持土壤氮素、积累额外的有机物质并提高经济收入（豆类粮食作物）。

## 1.10大面积推广的策略评价

评价一个新建立的养分管理技术，需要在农民的田块上布置不少于500–1000平方米的小区试验。

- ▶ 如果要评估多个因子对产量的效应，应考虑用两个示范小区来分别表明每个因子对产量的贡献（例如：在一个小区验证改良种子质量的效果，在第二个小区示范改良种子加上养分管理的效果）；
- ▶ 测量稻谷产量并监测肥料用量；
- ▶ 在农户参与评估后进一步优化推荐施肥技术，并在大面积推广前进行总利润分析。在推广时应分析偶然出现的那些与养分无关的限制因素；
- ▶ 给农民和推广人员提供一些宣传画、单页的分发材料，这些材料应含有不同生长季节作物与养分实时管理的“黄金法则”（如：品种、秧苗年龄、种植密度、平整土地、氮磷钾肥的推荐、叶色卡的使用等等）。

### 如果没有实现目标产量该如何？

- ▶ 如果没有实现目标产量（ $\text{实际产量} < \text{目标产量} \times 80\%$ ），应尽力排除其他限产因素。实地养分管理技术已经被证明可以提高产量，即使是在作物管理不善（水分、种子等等）导致养分利用率较低的农场上。在这种条件下，降低目标产量和减少肥料投入来增加养分效率的做法



表 13. 有机物质主要养分的含量。

| 有机物质 <sup>a</sup> | 含水量<br>(%) | C       | N       | P       | K       | Ca      |
|-------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                   |            | (占鲜重的%) |         |         |         |         |
| 人粪                |            |         | 1.0     | 0.2     | 0.3     |         |
| 牛粪                |            |         | 0.3     | 0.1     | 0.1     |         |
| 猪粪                |            |         | 0.5     | 0.2     | 0.4     |         |
| 新鲜粪肥              | 60         | 8–10    | 0.4–0.6 | 0.1–0.2 | 0.4–0.6 | 0.2–0.4 |
| 腐熟粪肥              | 35         | 30–35   | 1.5     | 1.2     | 2.1     | 2.0     |
| 猪粪                | 80         | 5–10    | 0.7–1.0 | 0.2–0.3 | 0.5–0.7 | 1.2     |
| 家禽粪肥              | 55         | 15      | 1.4–1.6 | 0.5–0.8 | 0.7–0.8 | 2.3     |
| 垃圾堆肥              | 40         | 16      | 0.6     | 0.2     | 0.3     | 1.1     |
| 污水污泥              | 50         | 17      | 1.6     | 0.8     | 0.2     | 1.6     |
| 蔗滤饼               | 75–80      | 8       | 0.3     | 0.2     | 0.1     | 0.5     |
| 蓖麻饼               | 10         | 45      | 4.5     | 0.7     | 1.1     | 1.8     |

<sup>a</sup> 每吨新鲜有机肥的养分量 (公斤) = 养分含量% × 10

可能会进一步导致实际产量和效益的降低。为了提高作物产量和效益，应及早发现并消除其他限产因素的副作用。

- ▶ 如果当前高水平的肥料养分投入 (氮) 加大了虫害和倒伏的风险，使作物歉收，那么就on应该降低目标产量 (减少投入)。

### 1.11 有用的数据

这一节列出了用于计算作物籽粒和秸秆平均带走养分量的计算参数 (表 14)，也包括了养分换算因子 (表 15)。

表14. 现代灌溉稻品种的平均养分移走量和谷粒、秸秆中的养分含量。

| N                        | P    | K    | Zn    | S     | Si  |
|--------------------------|------|------|-------|-------|-----|
| 每吨谷物产量谷粒和秸秆带走的养分量 (公斤/吨) |      |      |       |       |     |
| 17.5                     | 3.0  | 17.0 | 0.05  | 1.8   | 80  |
| 每吨谷物产量谷粒带走的养分量 (公斤/吨)    |      |      |       |       |     |
| 10.5                     | 2.0  | 2.5  | 0.02  | 1.0   | 15  |
| 每吨谷物产量秸秆带走的养分量 (公斤/吨)    |      |      |       |       |     |
| 7.0                      | 1.0  | 14.5 | 0.03  | 0.8   | 65  |
| 谷粒中的矿质元素含量 (%)           |      |      |       |       |     |
| 1.10                     | 0.20 | 0.29 | 0.002 | 0.100 | 2.0 |
| 秸秆中的矿质元素含量 (%)           |      |      |       |       |     |
| 0.65                     | 0.10 | 1.40 | 0.003 | 0.075 | 5.5 |

| Mg                       | Ca   | Fe    | Mn    | Cu     | B     |
|--------------------------|------|-------|-------|--------|-------|
| 每吨谷物产量谷粒和秸秆带走的养分量 (公斤/吨) |      |       |       |        |       |
| 3.5                      | 4.0  | 0.50  | 0.50  | 0.012  | 0.015 |
| 每吨谷物产量谷粒带走的养分量 (公斤/吨)    |      |       |       |        |       |
| 1.5                      | 0.5  | 0.20  | 0.05  | 0.009  | 0.005 |
| 每吨谷物产量秸秆带走的养分量 (公斤/吨)    |      |       |       |        |       |
| 2.0                      | 3.5  | 0.30  | 0.45  | 0.003  | 0.010 |
| 谷粒中的矿质元素含量 (%)           |      |       |       |        |       |
| 0.15                     | 0.05 | 0.025 | 0.005 | 0.0010 | 0.005 |
| 秸秆中的矿质元素含量 (%)           |      |       |       |        |       |
| 0.20                     | 0.30 | 0.035 | 0.045 | 0.0003 | 0.001 |

表 15. 养分换算系数。

| 由                                         | 乘以    | 得到/由                                      | 乘以    | 得到                                        |
|-------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|
| $\text{NO}_3^-$                           | 0.226 | N                                         | 4.426 | $\text{NO}_3^-$                           |
| $\text{NH}_3$                             | 0.823 | N                                         | 1.216 | $\text{NH}_3$                             |
| $\text{NH}_4^+$                           | 0.777 | N                                         | 1.288 | $\text{NH}_4^+$                           |
| $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ -urea          | 0.467 | N                                         | 2.143 | $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ -urea          |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$              | 0.212 | N                                         | 4.716 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$              |
| $\text{NH}_4\text{NO}_3$                  | 0.350 | N                                         | 2.857 | $\text{NH}_4\text{NO}_3$                  |
| $\text{P}_2\text{O}_5$                    | 0.436 | P                                         | 2.292 | $\text{P}_2\text{O}_5$                    |
| $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$              | 0.458 | $\text{P}_2\text{O}_5$                    | 2.185 | $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$              |
| $\text{K}_2\text{O}$                      | 0.830 | K                                         | 1.205 | $\text{K}_2\text{O}$                      |
| KCl                                       | 0.632 | $\text{K}_2\text{O}$                      | 1.583 | KCl                                       |
| KCl                                       | 0.524 | K                                         | 1.907 | KCl                                       |
| $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | 0.364 | Zn                                        | 2.745 | $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  |
| $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 0.227 | Zn                                        | 4.398 | $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |
| $\text{SO}_2$                             | 0.500 | S                                         | 1.998 | $\text{SO}_2$                             |
| $\text{SO}_4^{2-}$                        | 0.334 | S                                         | 2.996 | $\text{SO}_4^{2-}$                        |
| $\text{MgSO}_4$                           | 0.266 | S                                         | 3.754 | $\text{MgSO}_4$                           |
| $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | 0.232 | S                                         | 4.316 | $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  |
| $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 0.130 | S                                         | 7.688 | $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$              | 0.243 | S                                         | 4.121 | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$              |
| $\text{SiO}_2$                            | 0.468 | Si                                        | 2.139 | $\text{SiO}_2$                            |
| $\text{CaSiO}_3$                          | 0.242 | Si                                        | 4.135 | $\text{CaSiO}_3$                          |
| $\text{MgSiO}_3$                          | 0.280 | Si                                        | 3.574 | $\text{MgSiO}_3$                          |
| MgO                                       | 0.603 | Mg                                        | 1.658 | MgO                                       |
| MgO                                       | 2.987 | $\text{MgSO}_4$                           | 0.355 | MgO                                       |
| MgO                                       | 3.434 | $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | 0.291 | MgO                                       |
| MgO                                       | 6.116 | $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 0.164 | MgO                                       |
| MgO                                       | 2.092 | $\text{MgCO}_3$                           | 0.478 | MgO                                       |

续表 15.

| 由                                                                | 乘以    | 得到/由                          | 乘以    | 得到                                                               |
|------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------|
| CaO                                                              | 0.715 | Ca                            | 1.399 | CaO                                                              |
| CaCO <sub>3</sub>                                                | 0.560 | CaO                           | 1.785 | CaCO <sub>3</sub>                                                |
| CaCl <sub>2</sub>                                                | 0.358 | Ca                            | 2.794 | CaCl <sub>2</sub>                                                |
| CaSO <sub>4</sub>                                                | 0.294 | Ca                            | 3.397 | CaSO <sub>4</sub>                                                |
| Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                  | 0.388 | Ca                            | 2.580 | Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                  |
| FeSO <sub>4</sub>                                                | 0.368 | Fe                            | 2.720 | FeSO <sub>4</sub>                                                |
| MnSO <sub>4</sub>                                                | 0.364 | Mn                            | 2.748 | MnSO <sub>4</sub>                                                |
| MnCl <sub>2</sub>                                                | 0.437 | Mn                            | 2.090 | MnCl <sub>2</sub>                                                |
| MnCO <sub>3</sub>                                                | 0.478 | Mn                            | 2.092 | MnCO <sub>3</sub>                                                |
| MnO <sub>2</sub>                                                 | 0.632 | Mn                            | 1.582 | MnO <sub>2</sub>                                                 |
| CuSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O                              | 0.358 | Cu                            | 2.795 | CuSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O                              |
| CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O                             | 0.255 | Cu                            | 3.939 | CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O                             |
| Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·5H <sub>2</sub> O | 0.138 | B                             | 7.246 | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·5H <sub>2</sub> O |
| Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·7H <sub>2</sub> O | 0.123 | B                             | 8.130 | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·7H <sub>2</sub> O |
| B                                                                | 3.230 | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.310 | B                                                                |

## 2 矿质元素的缺乏和毒害

T. Fairhurst<sup>1</sup>, A. Dobermann<sup>2</sup>, C. Quijano-Guerta<sup>2</sup>, and V. Balasubramanian<sup>2</sup>

### 2.1 氮的缺乏

#### 氮的功能及其移动性

氮能促进植株快速生长，增加叶面积和穗粒数，氮素影响所有的产量构成因子，叶色是植株氮素状况的指标，与叶片光合速率和作物生产有密切关系，当植株施用了足够的氮后，对其它的营养元素如磷和钾的需要量会增加。

#### 氮的缺素症状及对生长的影响

发育迟缓，植株矮小变黄。老叶或整个植株呈黄绿色（附件A-7, A-10, A-13）。

#### 氮素缺乏原因

- ▶ 土壤供氮能力低；
- ▶ 矿质氮肥施用不足；
- ▶ 氮利用率低（挥发和反硝化、施用时间和地点不当、渗漏或径流等造成的损失）。

由于土壤不能为现代高产品种提供足够的氮素，所以缺氮在水稻种植区是普遍存在的。在几乎所有的低地水稻土上，增施氮肥都会使产量显著提高。

---

1 CTP Holdings Pte Ltd., Singapore; 2 International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.

## 氮素缺乏的发生

- ▶ 土壤有机质含量低（如：有机碳 $<0.5\%$ ，粗质地的酸性土壤）；
- ▶ 土壤自身供氮能力低（如：酸性硫酸盐土壤、盐碱土壤、缺磷土壤、灌溉不良的湿地土壤）；
- ▶ 土壤有机质缺乏的碱性和石灰性土壤。

## 淹水对氮的有效性与吸收的影响

如果铵态氮肥（如：尿素）在淹水后施入土壤还原层，铵离子会被被土壤胶体吸附，或暂时被土壤微生物固定，或被非生物固持，如被土壤有机质如酚类化合物所束缚。除在质地较差的土壤之外，渗漏损失一般是非常小的。

表施尿素很快被水解（在2-4天内），并且很容易以氨挥发的形式损失掉。

在分蘖中期以后，形成密集的浅层根系，植株吸收施入水层中氮的效率会增加（ $\leq 10$ 公斤/公顷/天），而氨挥发损失将会很小。

## 氮素的一般管理方法

对氮缺乏的症状处理比较简单，施用氮肥的效果也非常明显。一般在2-3天后就可以观察到施肥效果（变绿，促进了植株的生长）。需要基于土壤和植株的动态管理来达到优化每季氮肥效率的目的（见1.8）

## 2.2 磷的缺乏

### 磷的功能及其移动性

磷是植株体内能量储存和转移的基本元素，磷可以在植株体内移动并且促进分蘖、根系生长、开花和成熟，磷在植株早期的生长阶段尤其重要。

### 磷的缺素症状及对生长的影响

植株矮化、呈深绿色，叶片直立、分蘖减少  
(附录A-10,A-15)

### 土壤中磷的丰缺

对于含较低或没有游离态 $\text{CaCO}_3$ 的低地水稻土,Olsen-P和Bray-1P测试的结果可以将磷含量做如下的分类:

| 磷的效应 | Olsen-P | Bray-1 P (mg P/kg) |
|------|---------|--------------------|
| 缺乏   | <5      | <7                 |
| 中度   | 5-10    | 7-20               |
| 丰富   | >10     | >20                |

### 磷缺乏的原因

- ▶ 土壤供磷能力低;
- ▶ 矿质态磷肥施用不足;
- ▶ 由于土壤高的固磷能力或水土流失(只在旱稻中)导致磷肥利用率低;
- ▶ 氮肥用量过高而磷肥施用不足;

- ▶ 品种对缺磷的敏感性和对磷肥的响应程度存在差异；
- ▶ 种植方法的差异（由于直播稻密度过高，根系较浅容易发生缺磷）。

### **易于缺磷的土壤**

- ▶ 含有机质较少和磷库较小且质地较差的土壤；
- ▶ 石灰性土和盐碱土；
- ▶ 火山岩（固磷能力强）、泥炭和酸性硫酸盐土壤。

### **磷素缺乏的发生**

- ▶ 过量施用氮肥或氮肥与钾肥共同施用而磷肥施用不足。

### **淹水对磷的有效性与吸收的影响**

干燥的土壤淹水可以使土壤中磷的有效性提高。

### **磷素的一般管理方法**

磷素需要长期管理策略，施用的磷肥具有残留效果并且可以持续数年。管理的重点应该是建立和维持土壤中的有效磷水平，保证磷不限制植物生长、产量和氮的利用率（见1.8）。



## 2.3 钾的缺乏

### 钾的功能及其移动性

钾在植物细胞和光合产物运输中起重要作用。钾可以增加细胞壁强度，促进冠层光合作用和作物生长。与氮、磷不同，钾对分蘖没有显著的影响。钾增加了穗粒数、灌浆率和千粒重。

### 钾的缺素症状及对生长的影响

植株呈深绿色，叶片边缘黄化或在老叶尖部先出现坏死的深棕色斑点（附录A-10, A-17）。

如果氮肥施用过量而钾肥施用不足，病害（棕色叶斑、褐斑病、白叶枯病、纹枯病、叶鞘枯萎病、茎腐病和稻瘟病）出现的几率上升。

### 土壤中钾的丰缺

对于低地水稻土，交换性钾土壤测试结果可做如下分类：

| 钾的效应 | 交换性钾(cmol <sub>c</sub> /kg) |
|------|-----------------------------|
| 缺乏   | <0.15                       |
| 中度   | 0.15–0.45                   |
| 丰富   | >0.45                       |

因为低地水稻土固钾能力很强，所以用1当量醋酸铵浸提出的交换性钾的量通常很小(<0.2 cmol<sub>c</sub>/kg)，用这样的土壤测试值来评定钾的供应量是不可取的。

## 钾缺乏的原因

- ▶ 土壤供钾能力低;
- ▶ 矿质态钾肥施用不足;
- ▶ 秸秆全部移除;
- ▶ 灌溉水中钾的输入量很小;
- ▶ 由于土壤固钾能力很强或淋洗损失较大, 使得钾肥的吸收效率很低;
- ▶ 由于排水不畅, 导致大量还原性物质累积 (如:  $\text{H}_2\text{S}$ 、有机酸、 $\text{Fe}^{2+}$ ), 阻碍了根系发育和钾的吸收;
- ▶ 盐碱条件下土壤中钠钾比、镁钾比或钙钾比过高。由超基性岩的存在使土壤含有过量的镁。灌溉水中重碳酸盐浓度过高。

## 钾素缺乏的发生

- ▶ 过量施用氮肥或氮磷肥而钾肥施用不足;
- ▶ 直播稻在生长初期由于群体过密和根系尚浅;
- ▶ 杂交水稻对钾需求过大。

## 易于缺钾的土壤

- ▶ 土壤质地较差, 阳离子交换量低, 且钾库容量较小;
- ▶ 高度风化的酸性土壤, 阳离子交换量低, 且钾库容量较小;
- ▶ 含有2:1型粘土矿物的低地粘土, 固钾能力很强;
- ▶ 土壤钾含量很高, 但是 $(\text{Ca}+\text{Mg}):\text{K}$ 比例过高;

- ▶ 老成淋溶性的酸性硫酸盐土壤；
- ▶ 排水不良和强还原性土壤；
- ▶ 有机土壤。

### 淹水对钾的有效性吸收的影响

淹水导致溶液钾浓度增加并且增强了钾扩散到水稻根系的能力，特别是在固钾能力较弱的土壤上（如：土壤的主要成分是1:1型的高岭石类粘土矿物）。

含有2:1型粘土矿物的低地水稻土，在淹水的情况下会增加钾的固定和减少溶液浓度，所以水稻只能依靠非交换性钾库提供钾营养。

### 钾素的一般管理方法

钾的管理应该作为长期土壤肥料管理的一部分考虑，因为钾不同于氮，它不会轻易由于短期微生物的作用和化学过程从根区损失或在根区增加。

钾素管理中一定要保证钾不会降低氮肥利用率。（见1.8节）

## 2.4 锌的缺乏

### 锌的功能及其移动性

锌是水稻植株内的多种生物化学反应的基本元素，锌在根中积累并且可以从根中转移到生长旺盛的部位。因为在叶片中锌的再转移比较微

弱，特别是在氮缺乏的情况下，植株锌的缺乏症状更容易在幼叶中出现。

## 锌的缺乏症状及其对生长的影响

植株矮小在上部叶片上有棕色斑点，一般发生在移栽后2-4周（附件A-10, A-19）。

生长紊乱，植株矮化。

## 土壤中锌的缺乏

锌缺乏的临界值

- ▶ 0.6 mg Zn/kg:1 N醋酸铵，pH 4.8;
- ▶ 1.0 mg Zn/kg:0.05 N盐酸;
- ▶ 2.0 mg Zn/kg:0.1 N盐酸。

## 锌缺乏原因

- ▶ 土壤中有效锌含量较少;
- ▶ 种植了容易缺锌的品种（例如：IR26）;
- ▶ 高pH（厌氧条件下大于7）;
- ▶ 有机质高的石灰性土壤在还原条件下 $\text{HCO}_3^-$ 浓度过高，或者因为灌溉水中 $\text{HCO}_3^-$ 浓度过高导致土壤中高的 $\text{HCO}_3^-$ 浓度;
- ▶ 由于淹水后铁、钙、镁、铜、锰、磷的有效性增加使锌的吸收受到抑制;
- ▶ 由于大量施用磷肥使锌固定（磷可以引发锌缺乏）;
- ▶ 灌溉水中磷浓度过高（只发生在用污水灌溉地区）;

- ▶ 大量施用有机肥和秸秆;
- ▶ 石灰施用过量。

### 锌缺乏的发生

- ▶ 过去大量施用氮磷钾肥（不包含锌）的集约化种植土壤;
- ▶ 一年三季水稻的种植系统。

### 易于缺锌的土壤

- ▶ 易渗漏的土壤、老成酸性硫酸盐土、盐碱土、石灰性土壤、含泥炭层的土壤、砂土、高度风化的土壤、酸性和质地较差的土壤。
- ▶ 磷、硅有效性高的土壤。

### 淹水条件对锌的有效性及其吸收的影响

在淹水条件下，由于pH值的上升导致了锌的溶解性下降，降低了锌的有效性。

### 锌缺乏的预防措施

- ▶ 品种：选择锌高效品种;
- ▶ 种植方式：深播或在2—4%氧化锌悬浮液浸种（如：每升水放入20—40克氧化锌）;
- ▶ 肥料管理：施用有机肥。为了防止锌的缺乏，在育苗和移栽前每公顷施用5—10公斤Zn（硫酸锌、氧化锌或氯化锌），或在移栽前几天施入苗床。在大多数土壤上，每隔2—8季作物要全面施用一次硫酸锌;
- ▶ 水管理：对种植三季作物的土壤定期排水，

不要用高pH值(>8)的水灌溉。

## 锌缺乏的处理

施用锌肥可以很有效的解决锌的缺乏。在高pH值土壤上，表施比深施入土更有效。硫酸锌是最普遍的锌源（但是氧化锌更便宜）。下面的方法，不论是单独使用还是配合使用都是有效的，但是要在症状开始出现的时候立即施肥：

- ▶ 如果缺锌的症状在大田中发现，在土壤中每公顷表施10–25公斤 $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 或20–40公斤 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。硫酸锌（25%）与沙土（75%）混合施用使锌的施用更均匀。
- ▶ 植株生长缺锌的紧急处理措施是叶面喷施0.5–1.5公斤Zn/公顷（如：每公顷0.5%  $\text{ZnSO}_4$ 溶液200升）。

## 2.5 硫的缺乏

### 硫的功能及其移动性

硫对于蛋白质合成、植物器官功能的发挥和植株结构的形成是必须的，硫也在碳水化合物代谢中起作用，与氮相比它的移动性较差，所以缺素症状首先出现在幼叶中。

### 硫的缺乏症状和对生长的影响

植株淡绿色，幼叶浅绿（附件A-10, A-21）。

## 土壤中硫的缺乏

缺硫的症状有时会 and 缺氮的症状相混淆。对土壤硫的测试是不可信的，除非包含无机硫和可矿化的有机硫（硫酸酯）

土壤硫缺乏的临界值如下：

- ▶  $<5 \text{ mg S/kg 土}$ :  $0.05\text{M}$  盐酸；
- ▶  $<6 \text{ mg S/kg 土}$ :  $0.25\text{M KCl}$  加热到  $40^{\circ}\text{C}$  持续 3 小时；
- ▶  $<9 \text{ mg S/kg 土}$ :  $0.01\text{M Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 。

## 硫缺乏的原因

- ▶ 土壤有效态硫的含量低；
- ▶ 由于集约化的耕作耗尽了土壤中的硫；
- ▶ 施用不含硫的肥料（尿素代替了硫酸铵，三过磷酸钙代替了普通过磷酸钙，氯化钾代替了硫酸钾）；
- ▶ 在发展中国家的许多农村，由于工业排放的气体很少，降雨中的硫含量也很少；
- ▶ 硫的浓度在地表水中变幅很大，灌溉水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度往往较小；
- ▶ 燃烧秸秆使硫大量损失。

## 易于缺硫的土壤

- ▶ 含水铝英石的土壤（如：火山灰土）；
- ▶ 低有机质土壤；
- ▶ 风化程度高、含大量铁氧化物的土壤；

- ▶ 易淋溶的砂质土壤。

## 硫缺乏的发生

- ▶ 在气体排放量较高的工业中心地区，附近的水稻产区缺硫现象较少。

## 淹水条件对硫的有效性及其吸收的影响

- ▶ 在淹水条件下硫的有效性降低。

## 硫缺乏的预防措施

在大多数的低地土壤上，从环境或从肥料中获得的硫等于或超过籽粒带走的硫。

硫缺乏可以通过施用含硫肥料得到补充。

- ▶ 自然环境输入：估算由大气沉降带进的硫量；
- ▶ 育苗期：将含硫肥料（硫酸铵、普通过磷酸钙）施入苗床；
- ▶ 肥料管理：通过施用含硫的氮磷肥（如：硫酸铵[含硫24%]，普通过磷酸钙[含硫12%]）来补充作物带走的硫，该措施根据实际情况可不定期实施；
- ▶ 秸秆管理：要将秸秆还田而不要移走或焚烧，秸秆中40–60%的硫在燃烧时损失掉；
- ▶ 土壤管理：优化土壤管理来提高硫的吸收：
  - ▶▶ 保持充足的渗漏性（大约每天5毫米）避免土壤过度还原；
  - ▶▶ 在休闲期，排水干田耕作来增加土壤硫的氧化率。



## 硫缺乏的处理

在生长初期如果确定植株缺硫，那么增施硫肥是非常有效的，一般在5天内缺硫的症状将得到纠正。

- ▶ 如果出现中度缺硫症状，每公顷施10公斤S。
- ▶ 如果土壤出现了严重的硫缺乏，每公顷施20–40公斤S。

## 2.6 硅的缺乏

### 硅的功能及其移动性

硅对水稻来说是有益元素。硅可促进叶片、茎和根系的发育。由于缺硅植株的蒸腾损失量增加，其水分利用率降低。

### 硅的缺素症状及其对生长的影响

茎和叶片软化，下垂（附录A-11, A-23）。缺硅的植株特别易于倒伏。

### 土壤中硅的缺乏

土壤出现硅缺乏的临界浓度为40 mg Si/kg土（1M醋酸钠，pH 4的缓冲溶液）

### 硅缺乏的原因

- ▶ 老成水稻土或强烈风化导致土壤供硅能力下降；
- ▶ 母质中含硅较少；

- ▶ 在集约化栽培条件下由于秸秆长期被移走导致土壤有效硅的耗竭。

## 缺硅的发生

在亚洲热带地区，集约化水稻种植体系硅缺乏并不常见。

## 易于出现硅缺乏的土壤

- ▶ 温带或亚热带的老成、退化水稻土；
- ▶ 矿质硅含量较少的有机土壤；
- ▶ 高度风化和淋溶的热带土壤。

## 淹水条件对硅有效性及其吸收的影响

淹水后植物有效硅含量增加

## 硅缺乏的预防措施

- ▶ 环境输入：在某些地区灌溉水会持续的带入硅，特别是用火山岩地貌下的地下水灌溉。
- ▶ 秸秆管理：从长期来看，可以用秸秆还田来避免硅缺乏的发生，要考虑水稻秸秆（5–6%的硅含量）和稻谷外壳（10%的硅含量）的循环利用。
- ▶ 肥料管理：在磷钾肥不足的情况下避免施用过多的氮肥。

## 硅缺乏的处理

在退化的水稻土或泥炭土上定期施用含硅酸钙的矿渣，每公顷1–3吨。

施用粒状硅肥可以快速弥补硅的缺乏

- ▶ 硅酸钙：120–200公斤/公顷
- ▶ 硅酸钾：40–60公斤/公顷

## 2.7 镁的缺乏

### 镁的功能及其移动性

镁是叶绿素的组成成分同时参与光合作用，镁的移动性较强，可以从老叶转移到幼叶。因此缺素症状通常最先出现在老叶上。

### 镁的缺素症状及其对生长的影响

在老叶上出现橘黄色脉间黄化病（附录A-10, A-25）。

### 土壤中镁的丰缺

镁浓度 $<1 \text{ cmol}_c \text{ Mg/kg}$ 土，表明土壤已经极度缺镁。浓度 $>3 \text{ cmol}_c \text{ Mg/kg}$ 对水稻来说一般是充足的。

### 缺镁的原因

- ▶ 土壤有效镁含量低；
- ▶ 由于交换性钾与镁的比例过高（如： $>1:1$ ）使镁的吸收下降。

### 镁缺乏的发生

一般灌溉水会带入足够量的镁，所以镁缺乏在大田中并不常见。由于镁被作物不断的带走，

在雨养低地稻和旱地稻田中经常会出现缺镁的症状。

### 易于发生镁缺乏的土壤

- ▶ 酸性、阳离子代换量低的低地和旱地土壤；
- ▶ 渗漏量和淋洗量较大的粗质砂壤；
- ▶ 盐基含量低的淋溶性的老成酸性硫酸盐土壤。

### 淹水条件对镁的有效性及其吸收的影响

淹水后土壤溶液中的镁浓度将会增加。

### 镁缺乏的预防措施

- ▶ 作物管理：施用足够的镁肥、有机肥或其他养分资源来平衡籽粒和秸秆带走的镁；
- ▶ 水分管理：通过整地压实表土来减少粗质土壤的渗漏量；
- ▶ 土壤管理：通过适合的水土保持方法减少旱地体系中水土侵蚀和地表径流造成的损失。

### 对镁缺乏的处理

镁缺乏应该做如下处理：

- ▶ 施用含镁肥料。施用可溶性镁肥（如：硫酸镁、无水钾镁矾、氯化镁等）可以迅速改善缺镁症状；
- ▶ 喷施含镁的叶面肥（如：氯化镁）；
- ▶ 在酸性旱地土壤上，施用白云石供镁同时提高土壤pH值（缓解铝毒；2.17节）。

## 2.8 钙的缺乏

### 钙的功能及其移动性

缺素症状首先在幼叶发生。钙缺乏也会导致根系功能减弱，并使植株易于受到铁的毒害（2.13节）。

供应足够的钙可以增加植株对病害的抵抗能力，如枯叶病、棕斑病。

### 钙的缺素症状及其对生长的影响

幼叶尖部裂开、卷曲并萎黄坏死（附录A-11，A-27）。

### 土壤中钙的丰缺

当土壤中交换性钙 $<1 \text{ cmol/kg}$ 或阳离子代换量中钙的饱和度 $<8\%$ 可能出现钙缺乏的现象。阳离子交换量中钙的饱和度应大于 $20\%$ ，才适合植株生长，同时可交换性土壤的钙镁比应该为 $3-4:1$ ，土壤溶液中应为 $1:1$ 。

### 钙缺乏的原因

- ▶ 土壤有效钙含量低（退化、酸化、砂质土壤）；
- ▶ 高pH下，交换性钠钙比过高，导致了钙吸收的下降；
- ▶ 铁钙比或镁钙比过高导致钙的吸收减少；
- ▶ 过量施用氮或钾肥，导致了铵钙比或钾钙比过高，使钙吸收下降；

- ▶ 过量施用磷肥，降低了钙的有效性（在碱性土壤中形成磷酸钙）。

## 钙缺乏的发生

缺钙在低地水稻土上不常出现，因为土壤中有施肥和灌溉水带来足够的钙。

## 易于缺钙的土壤

- ▶ 强烈淋溶的、阳离子交换量低的酸性旱地和低地土壤；
- ▶ 由蛇纹岩发育而来的土壤；
- ▶ 高渗漏或淋溶的砂土；
- ▶ 低盐基含量的淋溶、老成酸性硫酸盐土。

## 淹水条件对钙有效性及其吸收的影响

淹水后土壤溶液钙的浓度会增加。

## 钙缺乏的预防措施

- ▶ 作物管理：施用有机肥或秸秆（施入或燃烧）平衡从土壤中移出的钙；
- ▶ 肥料管理：用普通过磷酸钙(13–20%Ca)或三料过磷酸钙(9–14%Ca)作为磷源。

## 对钙缺乏的处理

钙缺乏应做如下处理：

- ▶ 当缺钙严重时施用氯化钙（固体或溶液态）或含钙叶面肥作为快速处理方法；
- ▶ 在缺钙的高pH土壤上施用石膏（如：含钠和高

钾土壤)；

- ▶ 在酸性土壤上施用石灰增加pH值和钙的有效性；
- ▶ 施用钙的同时也要施用镁或钾，因为钙可能导致这些元素的缺乏；
- ▶ 施用黄铁矿可减轻富含 $\text{NaHCO}_3$ 的灌溉水对钙吸收的抑制作用。

## 2.9 铁的缺乏

### 铁的功能及其移动性

光合作用需要铁。缺铁可能会抑制钾的吸收，由于铁在植物体内的移动性较差，所以幼叶首先出现缺铁黄化症状。

### 铁的缺素症状及其对生长的影响

新叶出现黄色带状斑纹，并出现萎黄病（附录A-11, A-29）。

### 土壤铁的缺乏

土壤铁为如下浓度时很可能出现缺铁：

- ▶  $<2 \text{ mg Fe/kg土}$ ：醋酸铵，pH 4.8
- ▶  $<4\text{--}5 \text{ mg Fe/kg土}$ ：DTPA- $\text{CaCl}_2$ ，pH 7.3

### 铁缺乏的原因

- ▶ 在旱地上可溶性 $\text{Fe}^{2+}$ 的浓度过低；
- ▶ 在淹水条件下，土壤还原能力较弱时（如：含有机质较少的土壤）；

- ▶ 淹水条件下高pH值碱性或含钙土壤（如：由于重碳酸盐浓度过高导致铁的溶解度和吸收降低）；
- ▶ 土壤磷铁比过高（如：由于过量施入磷肥形成磷酸铁沉淀）。

### 铁缺乏的发生

- ▶ 中性、含钙和碱性的旱地土壤；
- ▶ 有机质较少的碱性和含钙的低地土壤；
- ▶ 用碱性水灌溉的低地土壤；
- ▶ 由花岗岩发育成的粗质土壤。

### 淹水条件对铁的有效性和吸收的影响

淹水后铁的有效性增加， $\text{Fe}^{3+}$ 在有机质分解过程中被还原为可溶的 $\text{Fe}^{2+}$ ，在淹水土壤中，铁的缺乏经常是由于有机质的分解不充分而不能使 $\text{Fe}^{3+}$ 还原为 $\text{Fe}^{2+}$ 而造成的。

### 铁缺乏的预防措施

- ▶ 品种：选择含铁较高的品种来增加人体的铁营养。
- ▶ 土壤管理：施用有机物质（如：秸秆，动物粪便）。
- ▶ 肥料管理：在高pH值土壤上用酸性肥料（如：用硫酸铵而不用尿素），施用含铁的肥料。

### 铁缺乏的处理

铁元素缺乏的纠正是最困难、最昂贵的。在土



壤中施用无机铁对防止铁缺乏效果较差，除非施用量很高。出现铁缺乏时应该作如下处理：

- ▶ 紧邻水稻行条施（约30公斤Fe/公顷）或撒施（施用量较大时可撒施）；
- ▶ 用铁的螯合物或硫酸铁（2–3%的溶液）作为叶面肥。因为植株体内铁的移动性较差，为了持续的为植物生长提供足够的铁营养，每隔两周喷施2–3次（从分蘖期开始）。

## 2.10 锰的缺乏

### 锰的功能及其移动性

锰对于光合作用是必需的。锰在转移到地上部之前，在根部累积，部分锰可以从老叶转移到幼叶。

### 锰的缺素症状和对生长的影响

在幼叶顶部出现脉间萎黄病（附录A-11, A-31）。

### 土壤锰的缺乏

土壤出现锰缺乏的临界浓度

- ▶ 1 mg Mn/kg土：对苯二甲酸+氯化钙，pH值7.3。
- ▶ 12 mg Mn/kg土：1 N醋酸铵+0.2%对苯二酚，pH值7。

## 锰缺乏原因

- ▶ 土壤有效锰含量低;
- ▶ 由于土壤中铁浓度过高, 导致锰缺乏;
- ▶ 由于土壤中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 或 $\text{NH}_4^+$ 的浓度过高, 导致锰吸收下降;
- ▶ 在酸性土壤上过量施用石灰;
- ▶ 由于硫化氢的积累导致了锰吸收下降。

## 锰缺乏的出现

旱地水稻土经常出现锰缺乏, 在淹水条件下锰的溶解性提高, 所以在低地或雨养水稻土上不易出现缺锰。

## 易于缺锰的土壤

- ▶ 酸性旱地土壤 (老成土、氧化土);
- ▶ 有机质含量低并且还原态锰含量小的碱性或含钙土壤;
- ▶ 含有大量活性铁的退化水稻土;
- ▶ 含锰较少的易淋溶的砂质土壤;
- ▶ 盐基含量低的淋溶性老成酸性硫酸盐土;
- ▶ 碱性和含钙的有机土壤 (有机土);
- ▶ 总锰含量低的高度风化土壤。

## 淹水条件对锰的有效性及其吸收的影响

淹水后 $\text{Mn}^{4+}$ 被还原为植物可利用的 $\text{Mn}^{2+}$ , 锰的有效性提高。

## 锰缺乏的预防性措施

- ▶ 栽培管理：施用有机肥或秸秆（混入土壤或燃烧）。
- ▶ 肥料管理：使用酸性肥料，如用硫酸铵而不用尿素。

## 对锰缺乏的处理

缺锰很容易处理，可以通过施用含锰叶面肥或在施用酸性肥料之后条施锰肥。缺锰应该作如下处理：

- ▶ 在水稻栽培行旁边条施硫酸锰或小颗粒的氧化锰（5–20公斤Mn/公顷）。
- ▶ 施用硫酸锰作为叶面肥来快速处理锰缺乏（1–5公斤Mn溶入200升水/公顷）。
- ▶ 使用螯合物质效果较差，因为铜铁可取代锰。

## 2.11 铜的缺乏

### 铜的功能及其移动性

铜在下列反应中起主导作用：

- ▶ 氮、蛋白质和激素代谢；
- ▶ 光合作用和呼吸作用；
- ▶ 花粉的形成和授精。

铜的移动性对水稻而言部分依赖于叶片中氮营养状况；在缺氮植株中铜一般很少发生再转移，幼叶更易出现缺铜症状。

## 铜的缺乏症状和对生长的影响

出现黄色条纹，叶片蓝绿色，叶尖发黄（附录A-11, A-33）。

## 土壤铜的丰缺

出现铜缺乏的土壤临界值：

- ▶ 0.1 mg Cu /kg, 0.05 N盐酸；
- ▶ 0.2–0.3 mg Cu/kg, DTPA+CaCl<sub>2</sub>, pH 7.3。

## 缺铜的原因

- ▶ 土壤中有效铜含量较少；
- ▶ 胡敏酸和富啡酸对铜的吸附较强（泥炭土）；
- ▶ 母质中含铜较少（由石英发育的砂质土壤）；
- ▶ 氮磷钾肥施用过多，植物生长迅速，加速了土壤溶液中铜的耗竭；
- ▶ 酸性土壤上过量施用石灰；
- ▶ 土壤中锌过多，抑制了铜的吸收。

## 缺铜症状的发生

- ▶ 土壤中有机质含量过高（有机土、有机火山灰土、泥炭土）；
- ▶ 红壤及高度风化土壤（老成土、氧化土）；
- ▶ 由海水沉积物发育的土壤（石灰石）；
- ▶ 砂质土壤，钙化土壤。

## 淹水对土壤铜有效性及其吸收的影响

在淹水条件下，铜的有效性会下降。

## 铜缺乏的预防性措施

- ▶ 作物管理：在移栽前一小时用1%CuSO<sub>4</sub>的悬浊液沾根；
- ▶ 土壤管理：避免在酸性土上过量施用石灰，因为这样做会降低铜的吸收；
- ▶ 肥料管理：在铜缺乏的土壤上，为了长期保持土壤中铜的含量施用氧化铜或硫酸铜（每隔5年施入或拌入土壤5–10公斤Cu/公顷）。

## 对铜缺乏的处理

- ▶ 对于快速处理铜缺乏的症状，可施用硫酸铜（每公顷施用1–5公斤Cu，固态或液态）。若进行土壤施用，将细的硫酸铜原料撒施（条施）或作为基肥混施入土壤；
- ▶ 可以在分蘖期到抽穗期之间施用铜的叶面肥，但是这有可能导致叶片生长组织烧伤；
- ▶ 由于铜缺乏和铜毒害的浓度范围较窄，所以要注意不要过量施用铜肥。

## 2.12 硼的缺乏

### 硼的功能及其移动性

硼是细胞壁的重要组成成分，硼缺乏降低了授粉能力。

由于硼不能转移到新组织中，所以缺硼症状首先出现在幼叶上。

## 硼缺乏和对生长的影响

幼叶变白，叶尖部卷曲（附录A-11）。

## 土壤硼的丰缺

缺硼症状的土壤临界值是0.5 mg B/kg（用热水进行浸提）。

## 硼缺乏的原因

- ▶ 土壤中有效硼的含量较少；
- ▶ 有机物质，粘土矿物和倍半氧化物对硼的吸附；
- ▶ 由于干旱使硼的移动性降低；
- ▶ 过量施用石灰。

## 硼缺乏的发生

- ▶ 高度风化的土壤以及酸性红壤和砂质水稻土；
- ▶ 由火成岩发育的酸性土；
- ▶ 含有机质高的土壤。

## 淹水对硼的有效性及其吸收的影响

当 $\text{pH} < 6$ 时，硼主要以未解离的硼酸形式 $\text{B}(\text{OH})_3$ 存在，作物主要依靠质流吸收。当 $\text{pH} > 6$ 时， $\text{B}(\text{OH})_3$ 解离增加，水化形成 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ ，植物可主动调节硼吸收。随着 $\text{pH}$ 值的增加，有机质、倍半氧化物、粘土矿物对硼的吸附增加。因此，在淹水后，硼在酸性土壤上的有效性下降而在碱性土壤上有效性提高。

## 对硼缺乏的预防性措施

- ▶ 水分管理：避免过量淋失，因为硼在淹水水稻土中的移动性很强；
- ▶ 肥料管理：在缺硼的土壤每隔2–3年，施用缓效硼肥（如：硬硼酸钙石）。

## 对硼缺乏的处理

- ▶ 施用可溶态的硼肥（硼砂，每公顷0.5–3公斤B）能迅速解决硼缺乏症状，在移栽前混施、表施、撒施或在水稻营养生长期作为叶面肥施用；
- ▶ 硼砂和硼酸类肥料不要和铵肥混合，因为这会导致氨挥发。

## 2.13 铁的毒害

### 铁毒害的产生机理

铁毒害的发生主要是由于土壤溶液中铁浓度的增加导致对铁的过量吸收而引起的。刚刚移栽的秧苗可能受到毒害，主要是在淹水后大量的 $\text{Fe}^{2+}$ 迅速累积。在生长后期，由于根系较高的渗透率和微生物铁在根际中还原，导致了 $\text{Fe}^{2+}$ 的过量吸收，影响了植株的生长。铁的过量吸收导致叶片呈现青铜色。植物体内大量的铁会对植物产生毒害，铁的毒害与多种营养胁迫有关，最后使根系的氧化能力下降。根表出现黑色的硫化铁斑点（过度还原条件和铁毒症状）。

## 铁毒的症状及其对生长的影响

在下部叶片的尖部开始出现棕色斑点或整个叶片的颜色从桔黄色渐变成棕色。根表出现黑斑（附录A-37）。

## 植株中铁的丰缺

铁中毒的植株，体内铁的浓度一般（但不总是）很高(300–2,000 mg Fe/kg)，但是铁的临界浓度要根据植株年龄和营养状况而定。由于营养不均衡，一般在低肥力土壤上临界值都很低。

## 淹水条件对铁毒害的影响

在大多数土壤上， $\text{Fe}^{2+}$ 的浓度一般在淹水后2–4周达到高峰。土壤中铁浓度过高会抑制钾和磷的吸收。在强还原条件下，产生硫化氢和硫化亚铁，导致根系氧化能力减弱。水稻根系泌氧使 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ ，使根际酸化并且形成铁膜。

## 引起铁毒的原因

- ▶ 由于土壤的强还原条件和/或低pH值，使土壤溶液中 $\text{Fe}^{2+}$ 浓度过高；
- ▶ 较差的或不平衡的植物营养状况。由于磷、钙、镁、钾缺乏导致对根系的氧化能力或二价铁的排除能力下降；
- ▶ 由于根际有机酸、硫化氢或硫化亚铁的积累抑制呼吸作用，导致根系对 $\text{Fe}^{2+}$ 的排除能力下降



(2.14节)；

- ▶ 施用大量未腐解的有机残渣；
- ▶ 山上流下的水或地下水不断供应的铁离子；
- ▶ 用含有大量铁的城镇或工业污水灌溉。

## 铁毒害的发生

铁毒害在多种土壤上都会发生，但是经常发生在连续淹水的低地水稻土上。通常发生铁毒的地点总是排水不畅，阳离子代换量低，大量元素缺乏，铁毒害发生的pH范围较宽（从 pH 4–7）。易于出现铁毒害的土壤有如下的特点：

- ▶ 旱地酸性土壤上的物质流入内陆排水不良的河谷地土壤（潮新成土、潮始成土、潮老成土）；
- ▶ 阳离子代换量和有效磷、钾含量低的高岭土；
- ▶ 冲积的、塌积的酸性粘土；
- ▶ 新形成的酸性硫酸盐土壤；
- ▶ 酸性低地或泥炭土高地土壤。

## 预防铁毒害的管理措施

- ▶ 品种：选用抗铁毒的品种（如：IR8192-200, IR9764-45, Kuantik Putih, Mahsuri）。
- ▶ 籽粒处理：在温带直播地区，采用氧化剂进行种子包衣（如：占种子重量50–100%的过氧化氢钙），并通过增加氧气供应来提高发芽率。
- ▶ 栽培管理：推迟播种躲过土壤 $\text{Fe}^{2+}$ 浓度的高峰（如：不要在淹水后10–20天后播种）。

- ▶ **水分管理:** 间歇灌水, 避免对铁含量和有机质含量较高并且排水不良的土壤连续淹水。
- ▶ **肥料管理:** 平衡施肥 (氮磷钾肥或氮磷钾肥+石灰) 避免养分胁迫。在酸性土壤上施用石灰。在含铁和有机质较高或排水不良的土壤上不要施用过量的有机物质 (有机肥、秸秆)。
- ▶ **土壤管理:** 在收获后对耕地进行排水, 可以在休闲期使土壤中的铁氧化。

### 对铁毒害的处理方法

在栽培期处理铁毒害是非常困难的, 所以预防性措施非常重要。对铁毒的处理方法建议如下:

- ▶ 多施用钾、磷和镁肥;
- ▶ 在酸性土上将石灰与表土混合以提高土壤pH;
- ▶ 每公顷将100–200 kg  $\text{MnO}_2$  混入表土以减少  $\text{Fe}^{3+}$  的还原;
- ▶ 在作物生长季的中期进行排水, 防止土壤中  $\text{Fe}^{2+}$  的累积。在分蘖中期(25–30 DAT/DAS)进行7–10天的排水为分蘖期提供氧气但要保持土壤湿润。

## 2.14 硫的毒害

### 硫毒害的产生机理

土壤中硫化氢浓度过高抑制了根系的呼吸作用进而减少了对营养元素的吸收。吸收过量硫化

氢会对植物的代谢产生很严重的负面影响。

水稻根系可分泌氧气氧化根际的硫化氢。硫化氢毒害的程度依赖于根系氧化能力、土壤溶液中硫化氢的浓度和根系的健康状况。幼嫩的水稻根系在根际氧化条件形成之前特别易于受到硫化物的毒害。严重的硫化氢毒害会造成作物的生理紊乱，如日本发生的秋衰病和美国发生的青枯病。

### 硫毒害症状及其对生长的影响

正在展开的叶片出现脉间失绿症状。根系粗糙、稀少、变黑（附录A-39）。

硫毒害造成的叶片症状与缺铁造成的叶片黄化现象比较相似（2.9节）。其它的诊断标准也和铁毒害类似（但是铁毒害在叶片上具有不同的症状，2.13节）。

- ▶ 根系粗糙、稀疏、颜色为暗棕色到黑色。新挖出的受毒害的根系通常发育不良，出现大量的黑根（硫化铁斑点）。而健康的根系被一层均匀光滑、棕色的氢氧化物和铁膜所包被。
- ▶ 植物组织中钾、镁、钙、锰和硅的浓度较低。

### 硫毒害出现的一般范围和临界值

硫毒害的出现没有固定的临界值。硫毒害取决于土壤溶液中的硫浓度，一般与根系的氧化能力有关。当土壤溶液中硫化氢 $\text{H}_2\text{S}$   $> 0.07$ 毫克/升时就会出现硫化氢毒害症状。

## 淹水条件对硫毒害的影响

在淹水土壤上硫酸盐还原成硫化物对于水稻栽培而言意味着以下3点:

- ▶ 单质硫缺乏;
- ▶ 铁、锌、铜变为固定态;
- ▶ 在含铁较少的土壤中易发生硫化氢毒害。

在淹水土壤上, 硫酸盐在低氧化还原电位( $< -50$  mV,  $\text{pH} = 7$ )被还原为硫化氢, 然后形成难溶性硫化物如 $\text{FeS}$ 。

硫化铁对水稻没有毒害, 但是他们降低了养分的吸收(2.13节)。

## 硫化物毒害的产生原因

- ▶ 土壤溶液中硫化氢的浓度过高(由于强烈的还原条件和 $\text{FeS}$ 沉淀量少);
- ▶ 作物的营养状况不良或养分不平衡, 导致根系氧化能力下降(特别是缺钾的土壤, 而且磷、钙、镁的缺乏也同样会造成不良的影响);
- ▶ 在排水不畅、还原性强的土壤上过量施用含硫酸盐肥料或用城镇和工业污水进行灌溉。

## 易于受硫化氢毒害的土壤

- ▶ 排水良好的砂质土壤, 有效铁含量低;
- ▶ 退化的水稻土, 有效铁含量低;
- ▶ 排水不畅的有机土壤;
- ▶ 酸性硫酸盐土壤。

易于受到硫化物毒害和铁毒害的土壤具有以下相似特征，即：含有大量的有效铁、CEC低以及交换盐基浓度低。

### 对硫化物毒害的预防性措施

- ▶ 品种：种植耐硫化物品种，一般根系分泌氧气能力较强。
- ▶ 种子处理：在温带地区，用氧化物作种衣（如：过氧化钙）来提高作物出苗时的氧气供应。
- ▶ 水管理：避免对硫含量高、有机质含量高且排水不畅的土壤连续淹水，要进行间歇灌溉。
- ▶ 肥料管理：平衡施肥（NPK或NPK+石灰）避免养分胁迫，增加根系氧化能力。施用充足的钾肥（2.3节）。避免在含铁高、有机质含量高且排水不畅的土壤上施用过量的有机物质（有机肥、秸秆）。
- ▶ 土壤管理：在收获后对耕地进行排水干田耕作，提高休闲期硫和铁的氧化。

### 硫毒害的处理方法

- ▶ 使用钾、磷和镁肥；
- ▶ 在低铁土壤上施用铁肥（盐或氧化物），使 $\text{H}_2\text{S}$ 沉淀为固定态的 $\text{FeS}$ ；
- ▶ 在作物生长季的中期进行排水，减少 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{Fe}^{2+}$ 的积累量。在分蘖前期（移栽后或播种后25–30天）排水7–10天来增加分蘖期氧气供应量，但要保持土壤湿润。

## 2.15 硼的毒害

### 硼毒害的产生机理

当土壤溶液中硼含量高，硼就会随着水分的蒸腾作用进入植株内部，导致硼在叶片边缘和叶尖积累。过量的硼阻碍了糖向淀粉的转化或形成硼-碳水化合物复合体，阻碍了籽粒的灌浆，但可维持正常的营养生长。

### 硼毒的症状及其对生长的影响

叶尖棕色，叶片出现椭圆型黑棕色斑点（附录 A-41）

### 植物

- ▶ 在叶片中硼的浓度梯度差异很大，叶片基部浓度较低而叶尖浓度较高；
- ▶ 在大田中种植的水稻的硼毒害临界值要比温室中的低，因为受降雨影响硼会从叶片上淋洗掉；
- ▶ 对不同水稻品种产量的影响差异很大。

### 土壤

土壤中产生硼毒害的临界值：

- ▶  $>4 \text{ mg B/kg}$ :  $0.05 \text{ N HCl}$
- ▶  $>5 \text{ mg B/kg}$ : 热水浸提可溶性硼
- ▶  $>2.5 \text{ mg B/L}$ : 土壤溶液

### 灌溉水

硼的浓度  $>2 \text{ mg B/L}$  可能引起硼毒害

## 淹水条件对硼毒害的影响

- ▶ 酸性土壤淹水会降低硼的有效性；
- ▶ 碱性土壤淹水会增加硼的有效性。

## 硼毒产生的原因

- ▶ 由于用含硼较多的地下水灌溉并且温度较高，使土壤溶液中的硼浓度增加；
- ▶ 由于母质中含硼较多，导致土壤溶液中硼含量较高。在以海洋沉积物、火成岩和其他以火山岩为母质的土壤中，一般硼含量较高；
- ▶ 过量施用硼砂或城市废弃物。

## 硼毒害的发生

硼毒害一般出现在干旱或半干旱地区，但在其它地区的稻田中也可能会发生。

## 易于受硼毒害的土壤

- ▶ 在以火山岩为母质的土壤，通常与富含硼的深井地下水灌溉有关；
- ▶ 一些滨海盐土。

## 对硼毒害的预防性措施

- ▶ 品种：选用耐硼品种（如：IR42, IR46, IR48, IR54, IR9884-54）；
- ▶ 水分管理：用含硼较低的地表水灌溉。如果用地下水灌溉必须要进行监测。如果硼含量太高，用未被硼污染的水进行稀释；
- ▶ 土壤管理：当土壤干燥时进行翻耕，以使硼积

累在表土，然后用含硼少的水进行淋洗。

## 硼毒害的处理

在土壤的渗透性较好并且有适宜且充足水源的情况下，可以用低硼含量的灌溉水进行淋洗。

## 2.16 锰的毒害

### 锰毒的产生机制

在土壤pH较低或者淹水后土壤的氧化还原势较低的情况下，土壤溶液中锰的含量会升高。在根系缺乏排除或忍受机制时，土壤溶液中存在过量的锰会导致锰的大量吸收。锰在植物组织中的大量积累会改变代谢过程（如：酶活性和有机组成），出现锰毒症状如萎黄病或黑斑症。

### 锰毒的症状及其对生长的影响

叶脉间有淡黄褐色斑点，并会一直扩展到整个脉间区域。（附录A-43）

### 淹水条件对锰毒害的影响

在稻季淹水会对锰毒产生影响

- ▶ 由于氧化还原势的降低使锰的溶解度上升；
- ▶ 由于氧气的缺乏，在根系所进行的氧化反应大大减少。

### 锰毒的产生原因

锰毒可能由以下原因产生：



- ▶ 由于土壤较低的pH(<5.5)或者较低的氧化还原电势，而使土壤溶液中二价锰离子浓度较高；
- ▶ 不良和不平衡的营养状况；
- ▶ 根氧化作用和二价铁离子的排除能力较低，其原因为：
  - ▶▶ 硅、钾、磷、钙或镁的缺乏
  - ▶▶ 产生了抑制植物呼吸作用的物质（如：有机酸、硫化氢、硫化亚铁）（见2.14）
- ▶ 施用含有大量锰的居民或工业废弃物。

## 锰毒的发生

锰毒极少发生在低地稻田，除非溶液中含有大量的锰。锰毒并不常见，这是因为水稻对锰浓度有相对较高的忍耐力。水稻的根系可以排除锰，并且水稻内部组织对高浓度锰也有较强的耐性。锰毒可能发生的土壤：

- ▶ 在旱地酸性土壤(pH <5.5)锰毒通常伴随铝毒发生(2.17)；低地土壤往往含有大量易还原的锰，以及酸性硫酸盐类土壤；
- ▶ 受锰矿影响的地区（如：日本）。

## 预防锰毒发生的方法

- ▶ 种子处理：在温带气候下，使用氧化剂种衣（例如钙的过氧化物）以及提高氧气的供应来提高发芽率以及秧苗的萌发；
- ▶ 水分管理：地表排水会使锰的吸收量提高；
- ▶ 肥料管理：平衡肥料的施用（氮磷钾或氮磷钾

+ 石灰)，避免养分胁迫引起的锰毒。在酸性土壤上施用石灰以降低活性锰的浓度。在锰浓度以及有机物含量都很高的土壤以及排水不良的土壤上不要过量施用有机物质（有机肥、秸秆）；

- ▶ 秸秆管理：秸秆和草木灰还田可补充从土地中移走的硅和钾。供应足够的硅可以阻止锰的毒害，不仅可以降低作物对锰的吸收（提高根的氧化作用），而且可以提高植株内部对过量锰的忍耐。

### 锰毒的处理

- ▶ 在旱地土壤上使用石灰来降低土壤酸度；
- ▶ 施用硅渣（1.5–3吨/公顷）来缓和硅的缺乏(2.6)。

## 2.17 铝的毒害

### 铝毒的产生机制

铝毒的主要特征是阻止根系的生长。植物长期处于铝毒下会诱导养分（镁、钙、磷）缺乏以及干旱胁迫，从而抑制地上部的生长。

### 铝毒的症状及其对生长的影响

叶片出现脉间萎黄病，呈橘黄色。根系生长较差，植株矮小。（附录A-45）

## 土壤

在铝饱和度 $>30\%$ ，土壤pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )  $<5.0$ ，土壤溶液中铝浓度大于 $1\text{--}2\text{ mg Al/L}$ 的条件下会有潜在的铝毒发生。

### 淹水条件对铝毒的影响

在旱地有氧条件下以及酸性土壤条件下铝毒是一个主要的限制因素。在淹水时，土壤中铝浓度是随土壤pH值上升而下降的，一般可以降低到铝毒产生的临界值以下。在这种条件下，铁毒(2.13)发生的可能性要高于铝毒。

### 铝毒的产生原因

土壤pH  $<5$ 时会引起土壤溶液中形成过量的三价铝离子。土壤溶液中的铝浓度取决于土壤pH以及能与铝形成复合体的有机和无机化合物的数量。

### 铝毒的发生

铝毒极少发生在低地稻田，除非在淹水后一些土壤还原性进程缓慢的土壤上。铝毒会发生在以下土壤上：

- ▶ 有大量可交换性铝的酸性、旱地土壤（老成土、氧化土）上。铝毒经常伴随着锰毒的发生(2.16)；
- ▶ 酸性硫酸盐土壤，特别是旱作水稻在淹水前的几周；

- ▶ 在铁毒症状出现之前 $\text{pH} < 4$ 的淹水土壤。

## 预防铝毒发生的方法

- ▶ 品种：种植耐铝品种，如IR43, CO37, Basmati370（印度）、Agulha Arroz, Vermelho, IAC3（巴西）、IRAT109（科特迪瓦）、Dinorado（菲律宾）；
- ▶ 作物管理：延迟播种时间直到淹水后土壤 $\text{pH}$ 上升到足够高（以固定铝）；
- ▶ 水分管理：为作物提供足够的水以保持土壤的还原条件，阻止表层土壤干旱；
- ▶ 肥料管理：在有铝毒发生的酸性旱地土壤，应特别注意镁肥的施用（2.7节）。施用碳酸钙并不一定很有效，施用白云石代替碳酸钙，不仅可以提高土壤 $\text{pH}$ ，而且还可以给土壤补充镁。少量的硫酸镁石和无水钾镁矾（50公斤/公顷）所产生的效果可能与施用1000公斤以上的碳酸钙的效果相当。

## 铝毒的处理

- ▶ 每公顷施用1–3吨石灰来提高土壤 $\text{pH}$ ；
- ▶ 通过表施石灰将钙淋洗到底土来改善底土的酸性，以此促进犁底层以下根系的生长；
- ▶ 在干旱酸性土壤上，建立土壤侵蚀存水弯，并混合施用1吨/公顷的活性磷矿石来改善磷缺乏的状况（2.2节）。

## 2.18 盐害

### 盐害的产生机制

盐害是指土壤中存在过量的可溶性盐，钠、钙、镁、氯化物和硫酸盐是盐害产生的主要离子，盐害对水稻生长的主要影响如下：

- ▶ 渗透性（水分胁迫）；
- ▶ 过量钠和氯等有毒离子的吸收；
- ▶ 拮抗效应减少养分的吸收（钾、钙）。

水稻在发芽期对盐害忍耐力较强，而生长早期（1-2叶期）对盐度非常敏感，到分蘖期和拔节期抗性较强，但到开花期又会对盐度很敏感。

### 盐害的症状及其对生长的影响

叶尖变白植株矮小，田间植株参差不齐（附录A-47）。

对水稻生长进一步的影响如下：

- ▶ 发芽率的降低；
- ▶ 株高和分蘖降低
- ▶ 根系生长较差；
- ▶ 不孕穗增多。

### 土壤

由于水稻生长在淹水土壤，因而需要测量土壤溶液的电导(EC)或饱和提取液的电导( $EC_e$ )。对

于旱稻种植于达到或低于田间持水量的田块上时,土壤溶液的电导是饱和溶液的两倍。由于盐害引起减产的估计值为:

- ▶  $EC_e < 2 \text{ dS/m}$ : 最优, 无减产发生
- ▶  $EC_e > 4 \text{ dS/m}$ : 小幅度的减产(10–15%)
- ▶  $EC_e > 6 \text{ dS/m}$ : 生长和产量中等程度降低(20–25%)
- ▶  $EC_e > 10 \text{ dS/m}$ : 对于敏感品种可造成>50%的减产

### 可交换性钠的百分率(ESP):

- ▶  $ESP < 20\%$ : 无显著减产情况发生
- ▶  $ESP > 20\text{--}40\%$ : 小幅度减产(10%)
- ▶  $ESP > 80\%$ : 50%的减产

### 钠吸附比(SAR):

- ▶  $SAR > 15$ : 碱土 (在饱和提取液中作为阳离子来测量)

### 灌溉水水质的分类标准

- ▶  $pH \text{ } 6.5\text{--}8$ ,  $EC < 0.5 \text{ dS/m}$ : 高质量
- ▶  $pH \text{ } 8\text{--}8.4$ ,  $EC \text{ } 0.5\text{--}2 \text{ dS/m}$ : 中等偏低
- ▶  $pH > 8.4$ ,  $EC > 2 \text{ dS/m}$ : 不适宜灌溉
- ▶  $SAR < 15$ : 高质量, 钠含量低
- ▶  $SAR \text{ } 15\text{--}25$ : 质量中等偏低, 钠含量高
- ▶  $SAR > 25$ : 不适宜灌溉, 钠含量过高

## 淹水条件对盐害的影响

盐害的潜在影响主要有两个方面：

- ▶ 盐类的溶解度增加以及铁锰从微溶向可溶态的还原作用使得离子电导增加；
- ▶ 由于灌溉造成土壤的持续渗漏。如果灌溉水中的离子交换量高于土壤溶液，那么土壤溶液中的盐浓度则会上升。

## 盐害的产生原因

高含量的可溶性盐（氯化钠）所引起的离子毒害、离子的不平衡以及对水平衡的破坏是植物在盐土上生长的主要影响因素。在碱土上，植物的生长主要受高pH和高 $\text{HCO}_3^-$ 浓度的影响。

盐害、碱害引起的主要原因如下：

- ▶ 年际降水少并且灌溉方式不正确，灌溉不充分；
- ▶ 高蒸发量；
- ▶ 地下水的含盐量上升；
- ▶ 沿海地区海水入侵、倒灌。

## 盐害的发生

受盐分影响的土壤可以分为以下几类：

- ▶ 盐土( $\text{EC} > 4 \text{ dS/m}$ ,  $\text{ESP} < 15\%$ ,  $\text{pH} < 8.5$ )；
- ▶ 盐碱土( $\text{EC} 4 \text{ dS/m}$ ,  $\text{ESP} > 15\%$ ,  $\text{pH}$ 在8.5左右)；

- ▶ 碱土( $EC < 4 \text{ dS/m}$ ,  $ESP > 15\%$ ,  $pH > 8.5$ ,  $SAR > 15$ )。

受盐分影响的土壤包括:

- ▶ 滨海盐土（在很多国家沿海岸广泛分布）；
- ▶ 酸性硫酸盐类土壤（例如：湄公河三角洲、越南）；
- ▶ 中性到碱性盐土、盐碱土和碱性内陆土壤（例如：印度、巴基斯坦、孟加拉国）；
- ▶ 酸性砂质盐土（泰国东北部Korat地区）。

### 预防盐害发生的方法

盐碱害的管理方法必须采取综合措施。主要可选择的措施如下:

- ▶ 作物体系: 在水稻旱作种植体系, 如果水分较充足以及气候条件允许, 可以改为双季稻体系。土壤盐分淋失后, 在接下来的几年内作物种植模式应包括水稻和其他耐盐作物（例如: 豆科的三叶草和田菁属的作物）。
- ▶ 品种: 种植耐盐品种（例如: Pobbeli, 印度尼西亚; IR2151, 越南; AC69-1, 斯里兰卡; IR6, 巴基斯坦; CSR10, 印度; Bicol, 菲律宾）。
- ▶ 水分管理: 在种植水稻前将田块浸水2–4周。不能使用碱性灌溉水或者碱性-非碱性的交替水源。播种后进行间歇性的土壤淋溶以便移走过多的盐分。收集储存雨水以便在旱季进行灌溉



(建水库)。在沿海地区，应注意防止盐水的倒灌与侵入。

- ▶ **肥料管理**：施用5–10公斤Zn/公顷来缓解锌的缺乏（见2.4）。施用充足的氮磷钾肥。钾的补充是十分重要的（见2.3），因为可以提高植物的钾钠比、钾镁比、钾钙比。在作物生长的养分临界期，使用硫酸铵作为氮源，并进行氮肥的表施（见2.1）（在盐碱土上土壤氮的有效性很低）。在碱土上，钙取代钠会降低磷的有效性（施用石膏肥料），并导致对磷肥需求量的升高。
- ▶ **有机物质的管理**：施用有机物可通过提高二氧化碳分压以及降低pH促进盐碱土的改良。施用秸秆来促进钾的循环利用，还要注意农家肥的施用。

## 盐害的处理

盐害的处理措施：

- ▶ **盐土**：土壤盐度可以通过不含盐分的灌溉水淋洗来降低。由于水稻根系较浅，只有表土（0–20厘米）需要淋洗。成本消耗、适宜水源的可利用性、土壤的物理结构和排水性能决定着对盐分淋洗的可行性。为了降低受影响土壤的盐度，灌溉水的电导率应小于0.5 dS/m。使用高质量（EC约为0）的表层水，灌溉的水量需要把给定的 $EC_e$ 降低到临界水平即 $EC_c$ ，水的需求量的计算式如下：

$$A_{iw} = A_{sat} [ (EC_e / EC_c) + 1 ]$$

$A_{iw}$  代表灌溉水量（厘米）

$A_{sat}$  代表土壤饱和水量（厘米）

例如：为了把粘砂质( $A_{sat} = 8-9$ 厘米)表土20厘米的起始 $EC_c$ 从16 dS/m降低到4 dS/m, 需要40厘米的新鲜水。粘土则需要把盐分从亚表层排水淋洗出来。

- ▶ 碱土：施用石膏（硫酸钙）来降低土壤钠的浓度。

在分蘖末期和孕穗初期对叶面喷施钾肥，特别是在盐碱土上种植低忍耐性的品种时更应如此。

## 附录

## 水稻田间管理

高质量的作物管理是保证实地养分管理技术的效益最大化所必需的。

---

### 图片注释

- (a) 适宜的平整土地可减少用水量，确保作物早期的生长。
- (b) 采用高发芽率的种子可以减少种子用量，并确保秧苗茁壮成长。
- (c) 对于移栽水稻来说，秧龄为14–18天时最适合移栽，每穴1–2株秧苗；若秧龄在21天以上时，每穴种植秧苗2–3株。
- (d) 适宜的种植密度才可形成良好的冠层，移栽水稻每穴之间距离为16–23厘米，浅水直播水稻每公顷撒播80–120公斤的种子。
- (e) 杂草会与水稻竞争空间、水分和养分，导致产量降低。
- (f) 加强病虫害观察，可降低成本；应用综合虫害管理可减少杀虫剂的使用。
- (g) 应用叶色卡同步氮素的供给和作物的需求，结合养分平衡技术，实施氮素的实时管理，避免作物抗倒。
- (h) 适宜的收获时期是能实现最大产量的完全成熟期，此时期的谷粒坚硬且饱满。



### 养分管理工具：缺素小区

土壤氮、磷和钾的供应能力可用无氮肥小区产量、无磷肥小区产量和无钾肥小区产量来确定。

---

#### 图片注释

- (a) 在田块的长边设置无肥小区（ $5 \times 5$ 米），而不要在田块的一角。
- (b) 设置25厘米高的田埂以避免肥料交叉污染。
- (c) 双排的田埂能有效地减少肥料交叉污染，在作物的整个生长期里都要对田埂进行良好的维护。
- (d) 理想的灌溉方式是对每个小区进行单独灌溉，避免肥料交叉污染。
- (e) 农民田块里管理良好的无氮肥小区,正处于在生长中期。
- (f) 在无磷肥和无钾肥小区适时适量的追施氮肥是十分重要的，以确保氮素不成为限产因素。
- (g) 一个好的无肥小区与附近农田相比，作物的生长状况有着明显的差异。
- (h) 当作物完全成熟时，在田块中心5平方米的范围内收割所有水稻，不要在田块边界收割。仔细采集穗上所有谷粒，然后晾干，称重。



## 养分管理工具：叶色卡(LCC)

应用叶色卡评价植株氮素状况可以优化氮肥的施用时期。

注意：这种新的卡片，包括四个色带，分别标记为2, 3, 4, 5，并且与旧叶色卡的阈值一致。

国际水稻所的标准叶色卡适用于大部分的水稻品种，在表7-9中提到的叶片颜色与叶色卡读数的关系如下：

- ▶ 黄绿色 = 叶色卡读数为3
- ▶ 中间 = 叶色卡读数3.5 (3到4的中间值)
- ▶ 绿色 = 叶色卡读数为4

---

### 图片注释

(a) 在没有施用肥料的农田上，从外观就可以看出植株缺乏氮素。

(b) 通过叶色卡的测量可以确定植株缺氮，叶片浅黄，介于2-3色带之间。

(c), (d) 在氮肥施用量较少的田块，植株看上去生长稍好，但较低的叶色卡读数仍然表明植株缺乏氮素。

(e), (f) 在氮肥施用量较高的田块，植株长势良好，冠层郁闭，此时的叶色卡读数在3到4之间，为大多数移栽水稻的阈值。采用实时的氮素管理，当移栽水稻的读数低于3.5或者浅水直播稻的读数低于3时，氮肥应该及时施用。当采用固定时期施用氮肥的方法时，当移栽水稻叶色卡读数降到3或浅水直播稻的读数低于3时，氮肥的用量要稍微提高一点。

(g), (h) 在氮肥施用量非常高的田块，植株颜色看起来发暗。叶片呈暗绿色，比叶色卡第四色带还要暗，表明作物不缺氮。



叶色卡色板:

2 3 4 5



养分缺乏

A-7

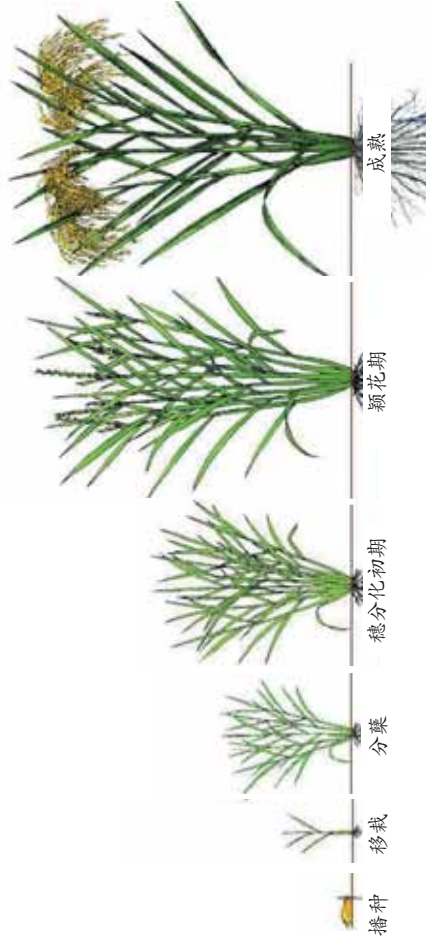
## 生长时期

推广人员要和农民一同确定当地水稻最重要的几个生长时期以便适时施用肥料。

---

## 图片注释

营养生长期会随着品种的不同而有所不同，30–80天不等。对于大多数品种来说，生殖生长期和成熟期的天数大致相同，一般为30–35天。应用叶色卡调控氮肥，从分蘖初期到穗分化初期分2–4次施用氮肥。对于高产季或杂交稻而言，在抽穗期到颖花期需要追施一次后期氮肥。颖花期直至水稻成熟大约需要30天。因此，灌溉水稻从播种到收获一般需要90–160天，这主要取决于品种。



|              |       |       |     |
|--------------|-------|-------|-----|
| 生长阶段<br>持续时间 | 营养生长期 | 生殖生长期 | 成熟期 |
|              | 变化不定  | 35天   | 30天 |

# 水稻养分缺乏的诊断标准

| 首先在老叶上出现       |             |                                                          | 首先在幼叶上出现                                     |                                                   |
|----------------|-------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 叶片浅绿、窄小        | 叶片深绿色、窄小、直立 | 叶片绿色到深绿；<br>叶片边缘黄化，坏死；<br>锈化棕色坏死斑点；<br>绿色和黄色平行条纹；<br>叶卷曲 | 桔黄色脉间黄化条纹、斑点；<br>整个叶片颜色变灰白；<br>绿叶出现斑点（而不是条纹） | 浅绿色，灰白叶片；<br>上部叶片枯黄；<br>整个植株都受到影响，<br>但上部叶片最早受到影响 |
| 植株矮小；分蘖不良      | 植株矮小；分蘖不良   | 植株矮小                                                     |                                              | 植株矮小；<br>分蘖减少                                     |
| 整块田看起来较黄<br>早熟 | 成熟延迟        | 早熟，枯萎；<br>根系不健康；<br>疾病发生几率上升                             | 根系不健康                                        | 成熟延迟                                              |
| N              | P           | K                                                        | Mg                                           | Zn                                                |
|                |             |                                                          |                                              | S                                                 |

# 水稻养分缺乏的诊断标准

| 首先在幼叶上出现                  |                                      |                       |                 |                    | 不在特定位置出现   |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|------------|
| 黄化坏死斑点或叶尖卷曲；症状只有在严重缺乏时才可见 | 脉间黄化的条纹或新生叶黄化；叶片中叶绿素含量降低；随后整个叶片黄化或变白 | 幼叶尖端出现浅灰绿色的脉间萎黄病；坏死斑点 | 黄化条纹；蓝绿色叶片；新叶卷曲 | 变白，幼叶尖端卷曲；严重时生长点坏死 | 叶片软化、下垂    |
|                           |                                      | 植株较矮                  | 分蘖减少            | 株高降低               |            |
| 根系不健康；在灌溉稻上较少出现           | 只出现在旱地上；灌溉稻较少出现                      | 只出现在旱地上；灌溉稻较少出现       | 穗不育程度增加         | 不抽穗；灌溉稻较少出现        | 倒伏；病害发病率增加 |
| <b>Ca</b>                 | <b>Fe</b>                            | <b>Mn</b>             | <b>Cu</b>       | <b>B</b>           | <b>Si</b>  |

## 缺氮症状

发育迟缓，矮小，植株变黄。老叶或整个植株变为黄绿色。

老叶或全部叶片变浅绿色或叶尖变黄，严重缺氮时叶片坏死。除了幼叶较绿外，叶子一般窄、小、直立并且呈黄绿色。整个田块看起来颜色较黄。氮缺乏一般出现在需氮量大的分蘖、抽穗等生育临界时期。氮缺乏导致分蘖减小，叶片变小，植株矮化，结实率下降。缺氮和缺硫观察到的症状经常容易被混淆（2.5节），但硫缺乏首先影响的是幼叶或整个植株叶片，并且一般不易出现。

---

## 图片注释

- (a) 因为没有施肥，无肥对照区的植株较黄。
- (b) 缺氮叶片窄、较小、呈浅绿色。
- (c) 缺氮植株分蘖减少。
- (d) 在施氮肥的地方分蘖较好。



## 缺磷症状

植株矮化，呈深绿色，叶片直立，分蘖减少。

缺磷的植株矮化，分蘖很少。叶片窄、小、直立，呈灰绿色。茎细、呈纺锤形，植株生长发育受阻。叶数、穗数、穗粒数也减少。幼叶看起来生长健康但老叶枯黄死亡。成熟期推迟（通常延迟1周或更晚）。当缺磷严重时，植株不能开花。如果有的品种能产生花青素，那么在缺磷时叶片就会产生红色或紫色。植株同时出现缺磷缺氮，叶片呈现灰绿色（2.1节）。轻度磷缺乏在大田中很难识别。磷缺乏常常与其它营养元素的紊乱有关，如：低pH值下铁毒害（2.13节）、锌缺乏（2.4节）、铁缺乏（2.9节）、碱性土壤的盐化（2.18节）。

---

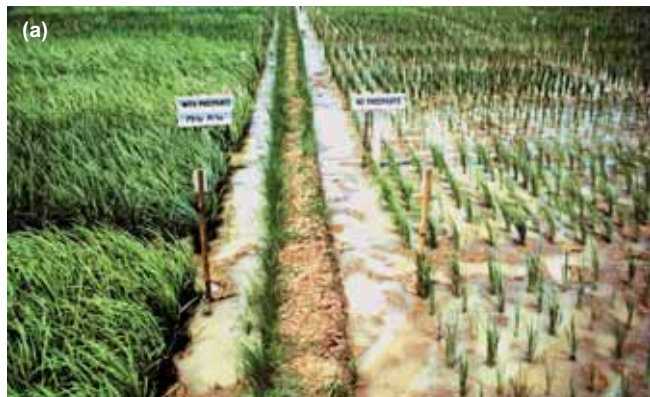
## 图片注释

(a) 缺磷时分蘖减少。

(b) 少量缺磷时，茎变细，呈纺锤形，植株生长受到抑制。

(c), (d) 与正常植株相比矮小、直立。





## 缺钾症状

植株深绿色，叶片边缘黄棕色，或者首先在老叶尖部出现坏死的深棕色斑点。

在极度缺钾的情况下，叶尖变成黄棕色。症状首先在老叶的叶尖出现，沿叶缘蔓延，最后到达叶基部。上部叶片小、下垂、呈灰绿色。较老的叶片会从黄色变成棕色，如果缺素状况没有得到及时改善，幼叶也会逐渐变色。叶尖和叶缘会干枯，沿叶脉形成黄色条纹，下部叶片下垂。缺钾叶片的症状和感染东格鲁病的症状很相似（特别是出现黄棕色叶缘）。但是，和缺钾不同的是，东格鲁病总是在稻田呈斑状出现，病害影响个体苗簇而不是整个田块儿。当钾缺乏严重的时候，锈棕斑首先在老叶叶尖出现而后蔓延到整个叶片，最后叶片变棕色并干枯。在穗上也会随机的出现一些坏死的斑点。

---

## 图片注释

- (a), (b), (c) 在缺钾情况下，叶尖和叶缘变棕黄、干枯。
- (d) 植株易于受到病虫害感染，也容易受到二次感染。
- (e) 叶片会发生卷曲。
- (f) 与常规稻相比较，杂交稻生物量较高，同时需要的钾量也多，所以杂交稻（左图）比常规稻（右图）更早出现缺钾症状。
- (g) 植物生长受到缺钾限制。



## 缺锌症状

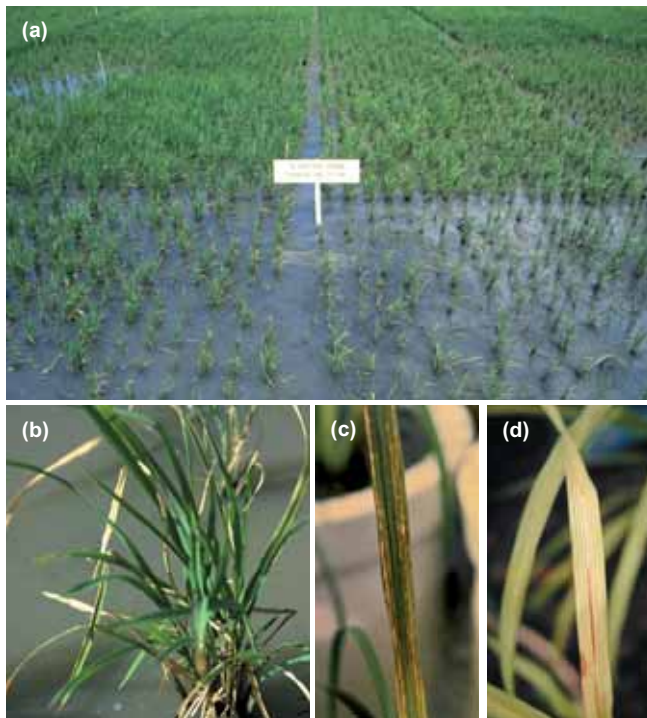
植株矮化，在下部叶片卷曲干枯、下垂，并出现棕色斑点或条纹，一般发生在移栽后2-4周。

症状在移栽后的2-4周出现，植株长势不均匀，长势不好的植株呈簇状出现，但是症状在没有任何外界干扰的情况下也可以自然恢复。在极度缺锌的情况下，分蘖会减少甚至完全停止生长，作物成熟的时间会延后。缺锌会增加水稻小穗不育。叶中脉，特别是幼叶基部，会变黄。叶片失去膨压，出现棕色斑点，下部叶片出现棕色条纹，并伸长扩大，最终互相连在一起。在叶中脉可出现白线。植株矮化、叶片面积减小。在日本，缺锌是导致“赤枯病类型 II”的原因。

---

## 图片注释

- (a) 植株矮化，生长受阻，田间分布不均匀。
- (b) 分蘖减少，叶片下垂，干燥、枯黄。
- (c), (d) 出现锈棕色斑点和条纹。



## 缺硫症状

植株白绿色，幼叶浅绿。

与氮缺乏不同（2.1节），缺硫不是影响老叶，而是首先导致整个植株发黄，特别是幼叶易于发生黄化，叶尖可能坏死。在缺氮的植株上，不会出现下部叶片坏死的情况。和缺氮不同的是，缺硫植株呈黄白色。因为缺硫对产量的影响在营养生长期最明显，所以症状应该在早期发现并被纠正。但硫缺乏一般较难诊断，因为叶部症状容易和缺氮混淆。

其它症状和对植株生长的影响：

- ▶ 植株矮化、生长受阻；
- ▶ 分蘖数减少；
- ▶ 植株发育和成熟延迟1-2周。

---

## 图片注释

(a), (b) 由于幼叶变黄导致整个群体呈现灰黄色，植株高度和分蘖均减少。

(c), (d) 在幼叶中更容易发生黄化，叶尖容易坏死。



## 缺硅症状

茎和叶片软化、下垂。

叶片软化下垂，这导致叶片互相遮盖，降低光合作用活性，使产量下降。

缺硅可以增加病害出现几率，如：枯萎（由稻瘟病引起的）或出现棕斑（由胡麻斑病菌引起）。严重缺硅会使单位面积的穗数和每穗的灌浆粒数减少，缺硅植株特别容易倒伏。

---

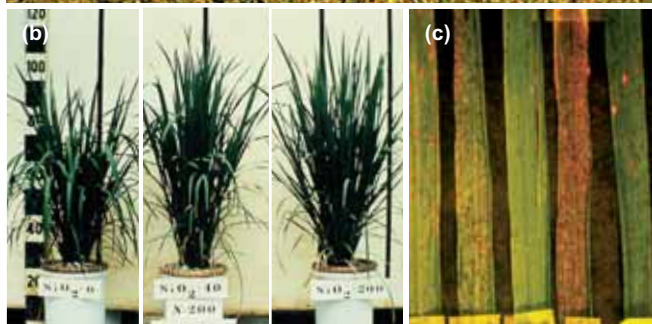
## 图片注释

(a) 对病害的抵抗能力下降，如：稻平脐蠕孢。

(b) 与正常叶片相比较（右侧）缺硅植株叶片下垂（左侧）。

(c) 叶片出现棕斑。





## 缺镁症状

老叶脉间出现橙黄色的失绿条纹。

缺镁的植物颜色较浅成灰白色，一些脉间失绿条纹首先在老叶上出现，症状严重的话，黄化会蔓延到新叶上。和缺钾相比，缺镁叶片的绿色像“一串珠子”，而缺钾叶片出现平行的黄绿色带（2.3节）。在缺镁症状特别严重的情况下，老叶会变黄直到坏死。

其它症状及对生长的影响：

- ▶ 减少亩穗数和千粒重；
- ▶ 降低品质（出米率、蛋白质和淀粉含量）；
- ▶ 在钾、钙、磷、镁等多种养分胁迫条件下，缺镁容易出现铁毒症状。

---

## 图片注释

(a) 老叶首先出现橘黄色脉间失绿。

(b) 旗叶也会出现黄化的症状。

(c) 在低镁土壤上施用过量钾肥可以导致镁缺乏。



## 缺钙症状

幼叶尖部出现变色坏死的开裂或卷曲。

只有在严重钙缺乏的条件下，才能看到缺素症状（如：在盆栽试验或土壤耗竭试验中）。幼叶的尖端变白色（漂白）、卷曲。坏死组织沿着叶缘扩展，老叶最后脱落坏死。缺钙的症状和缺硼的症状很相似（2.12节），所以只能靠分析植物组织来鉴别。除非严重缺钙，否则植株外观一般差别不大。极度缺乏会导致植株矮小和生长点坏死。

---

## 图片注释

(a), (b) 只有在严重缺钙情况下幼叶尖部才会出现黄白色。



## 缺铁症状

正在展开的叶片叶脉间黄化、出现萎黄。

整个叶片变黄或变白。当铁严重缺乏时，整个植株变黄或坏死。旱地土壤铁缺乏相当严重，但是在水稻种植一个月后，症状一般会自行消失。铁缺乏导致了生物量减少，叶片叶绿素含量下降，糖代谢中酶活性降低。

---

## 图片注释

- (a) 缺铁在旱地上是主要的问题。
- (b) 正在展开的叶片叶脉间黄化。
- (c) 如果缺铁严重，植株矮化，叶片变窄（左边植株）。



## 缺锰症状

幼叶顶部出现脉间黄化失绿。

浅灰绿色的脉间黄化条纹从叶尖部蔓延到叶基部，之后出现坏死的棕色斑点，叶片变暗棕色。新生叶片小、窄、呈浅绿色。在分蘖期，缺素植株较矮，叶片较小，重量轻，与不缺锰的植株相比，根系小。植株生长受阻但对分蘖无影响。缺锰植株易于出现棕色斑点(由胡麻斑病菌引起)。缺锰的植株也常常缺磷。在缺锰和铁毒害的情况下，锰缺乏的水稻植株积累大量的铁，同时可能出现棕色症状(2.13节)。

---

## 图片注释

- (a) 锰含量较低的旱地或有机土上种植水稻，缺锰是主要问题。  
(b), (c) 幼叶尖部出现脉间黄化失绿的条纹，影响叶片生长。





## 缺铜症状

出现黄化条纹，叶片蓝绿色，叶尖褪绿。

缺铜的叶片在叶脉的两边出现褪绿线条，接着在叶尖上出现暗棕色坏死组织。新叶卷曲，叶尖像针一样直立，而叶基部表现正常。分蘖下降，在缺铜条件下花粉活性下降，导致穗不育和未灌浆籽粒数增加（通过分析产量构成因素可发现）。锌会抑制植株从土壤溶液中吸收铜，反之亦然。

---

## 图片注释

- (a) 缺铜症状主要出现在有机土壤上。
- (b) 幼叶叶尖出现黄化条纹和暗棕色坏死组织。
- (c) 新叶如同针状。



# 水稻养分毒害的症状及诊断标准

| 首先在老叶出现                                                            |                                 |                                                 |                                          |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 小的棕色斑点在下部叶片的叶尖开始出现；<br>斑点在叶脉间扩展融合；<br>叶片从桔黄色变为棕色；<br>叶片坏死；<br>叶片狭窄 | 棕色叶尖干枯；<br>叶片出现椭圆形深棕色斑点         | 棕色斑点出现在下层叶片和叶鞘的叶脉上；<br>种植8周后叶尖干枯；<br>幼叶症状与缺铁时相似 | 叶尖变白                                     |
| 植株矮化；分蘖减少                                                          |                                 | 矮化，分蘖减少；<br>不育                                  | 植株矮化；分蘖减少；<br>水稻长势不齐，呈斑块分布               |
| 根表出现黑膜；<br>持续淹水；<br>经常与其它缺素症状同时出现                                  | 干旱和半干旱地区；<br>灌溉水含硼较高；<br>一些滨海盐土 | 酸性旱地土；<br>酸性硫酸盐土；<br>灌溉水稻较少出现                   | 滨海盐土；<br>酸性硫酸盐土；<br>盐碱或碱性内陆土壤；<br>酸性砂质盐土 |
| Fe                                                                 | B                               | Mn                                              | 盐害                                       |

| 首先在老叶出现                         | 不集中出现                                                      |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 叶片症状与缺铁时相似                      | 叶脉间有黄白色斑点;<br>叶尖坏死;<br>叶缘焦枯;<br>桔黄色条纹                      |
| 黑根;<br>根系弱;<br>病害增加<br>只在低铁土壤出现 | 矮化但分蘖有时候正常<br>抗性弱的品种, 其根系生长受阻、变形;<br>主要在酸性旱地上;<br>淹水土壤pH<4 |
| 硫酸盐                             | Al                                                         |

## 铁毒害症状

在下部叶片的尖部或整个叶片出现小的棕色斑点，叶片颜色是从桔黄色渐变成棕色。根表出现黑膜。

症状首先在移栽1-2周后出现（但是有时候多于2个月）。首先，小的棕色斑点在底部叶片出现，先从叶尖，慢慢延伸到叶基部。然后，斑点和条纹合为一体，叶片变成黄棕色，最后坏死。叶片窄小但常常保持绿色。当铁毒害严重时，叶片出现紫棕色。有一些品种，叶尖变成桔黄色之后干枯。在幼苗期根系氧化能力很弱时，水稻更容易受到铁毒害。铁毒害的其它影响包括：

- ▶ 植株矮化，分蘖大量减少；
- ▶ 根系粗糙，稀疏，表面被许多棕黑色物质包裹，许多根坏死。刚刚被挖出的水稻土中常常含有许多黑色根系（被硫化铁污染）。相反，健康的根系通常被光滑的棕黄色氧化铁或氢氧化铁膜包裹。

---

## 图片注释

(a) 小的棕色斑点首先出现在叶尖，之后蔓延到叶基部。

(b) 叶片变棕黄色然后死亡。

(c) 症状首先在老叶发生。

(a), (d) 在严重铁毒条件下，整个叶片都受到影响。

(e) 棕色叶片（左）与健康植株（右）对照。



### 硫化物毒害症状

正在展开的叶片叶脉间失绿黄化。根系粗糙、稀少、发黑。

硫毒害的症状和铁毒害的症状相似，都会出现黄化（2.9节）。其它的诊断标准也和铁毒害相似（但是铁毒害有不同的叶片症状，2.13节）：

- ▶ 粗糙、稀疏、暗棕色到黑色的根系。受到毒害的新鲜根系一般发黑（铁硫化物斑点）而健康的根系被一层光滑的、棕色铁膜所包裹。
- ▶ 植物组织中钾、镁、钙、锰和硅的浓度较低。

---

### 图片注释

硫毒害的根系粗糙、稀疏、发黑。





## 硼毒害症状

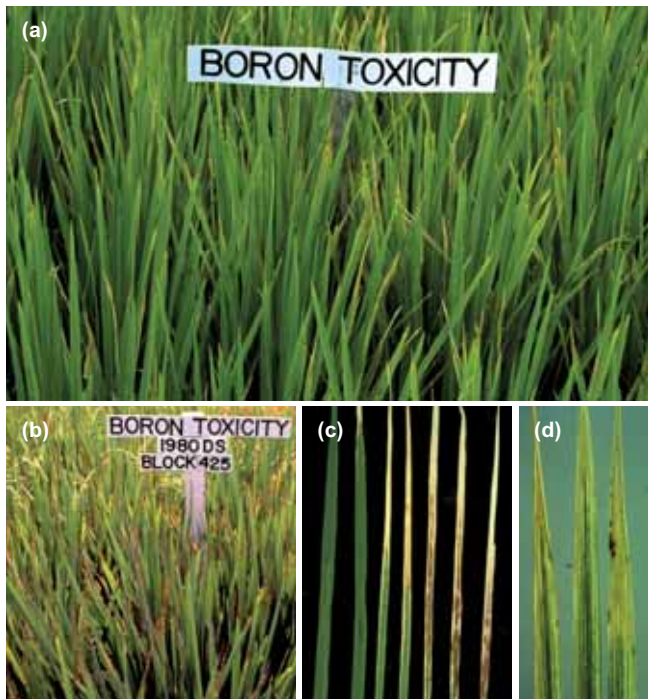
叶尖棕色，叶片出现椭圆型棕斑。

硼毒害首先使老叶的叶尖和叶缘变黄。2到4周之后，出现暗棕色的椭圆斑点，之后整个叶片变成棕色，最后枯萎。坏死的斑点大多出现在幼穗分化的时候。有些品种只在叶尖和叶缘出现脱色。植株营养生长没有明显降低。

---

## 图片注释

(a) 棕色叶尖是典型的硼毒害症状，首先在老叶边缘出现黄化。  
(b), (c), (d) 2到4周后，棕色椭圆斑点在脱色区扩展。



### 锰毒害症状

叶脉间有淡黄褐色斑点，可一直扩展到整个脉间区域。

症状首先在下部叶出现，表现为叶片和叶鞘出现棕色斑点。种植8周后叶尖干枯。锰毒也会造成幼叶（上层叶片）失绿，与缺铁黄化症状相似(2.9)。植株矮小、分蘖减少，不育导致减产。吸收过量的锰会减少硅、磷和铁的吸收量，同时抑制磷向稻穗的再转移。

---

#### 图片注释:

(a), (b), (c) 低叶位的叶片和叶鞘交错布满了黄褐色的斑点。



## 铝毒的症状

叶片出现桔黄色脉间失绿，根系生长较差且变形，植株长势差，发育迟缓。

脉间出现黄至白色的斑点分布，随后叶尖死亡、叶缘枯萎。如果铝毒严重，会出现枯斑坏死。铝毒可减少地上部和根系的生长，不同的品种对铝毒的抗性不同。对敏感的品种来说，根系往往较小，并易变形。植株发育迟缓，但可正常分蘖。根系生长受到阻碍，导致对养分吸收的抑制以及抗旱性的降低。

---

## 图片注释

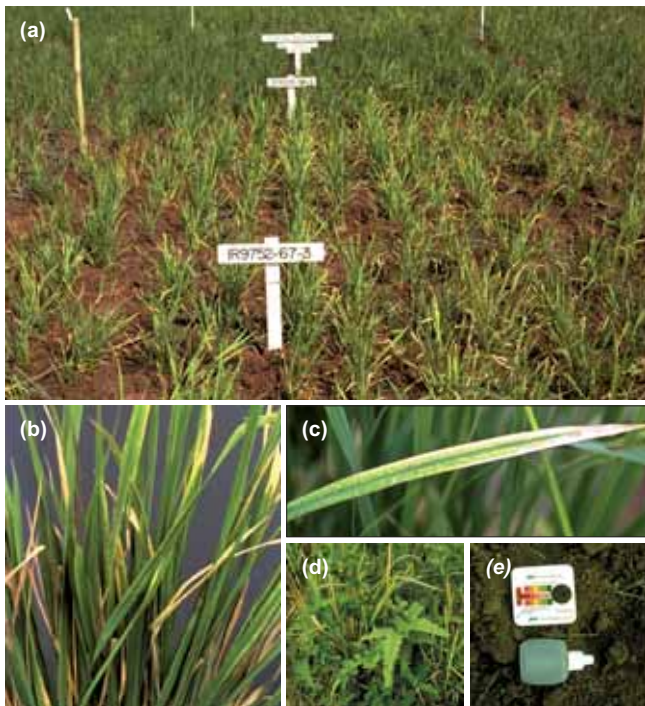
(a) 酸性旱地土容易发生铝毒害，但作物品种对铝毒的敏感性存在差异。

(b) 脉间出现黄至白色的斑点分布，随后叶尖死亡。

(c) 叶缘枯萎。

(d) 指示植物如热带欧洲蕨(*Dicranopteris linearis*)、野牡丹(*Melastoma malabathricum*)、茅根草(*Imperata cylindrica*)可对酸性土壤以及低磷条件进行指示。

(e) 袖珍pH计能提供可靠的土壤pH测定结果。



## 盐害症状

叶尖变白植株矮小，田间植株参差不齐，呈斑块状分布。

受到影响的植株叶尖呈白色，一些叶片出现萎黄病的斑点。盐害将导致植株矮小以及分蘖减少。田间生长参差不齐。症状主要表现在第一叶，紧接着是第二叶，然后是正在生长的叶片。水稻在发芽期有较高的抗性，但植株在移栽时、幼苗期以及扬花期更容易受到影响。盐碱害的发生同时伴随有磷的缺乏(2.2)、锌的缺乏(2.4)、铁的缺乏(2.9)、或者硼的毒害(2.15)。

---

## 图片注释

(a) 田间生长呈特点鲜明的簇状斑块分布。

(b) 使用含盐灌溉水的地区，在靠近水流的入水口处作物呈斑块状分布。

(c), (d) 植株矮小且叶尖变白色。





Salinity

## SSNM 的新网页

最初的SSNM的理念已被系统广泛地传播,目的是为农民和推广工作者提供简化的养分管理方法。很多亚洲国家参与了水稻研究协作网 (Irrigated Rice Research Consortium, IRRC, [www.irri.org/irrc](http://www.irri.org/irrc)) 的试验研究工作,使得SSNM已经成为作物管理策略中不可缺少的一部分。IRRC 建立了一个SSNM的新网站 ([www.irri.org/irrc/ssnm](http://www.irri.org/irrc/ssnm)) 为稻区的稻农提供有关灌溉稻和雨养稻 SSNM 原理和实践方面的最新信息。

**IRRI**  
International Rice Research Institute

# SSNM

SITE-SPECIFIC NUTRIENT MANAGEMENT

enabling rice farmers to optimally supply their crop with essential nutrients

HOME | ABOUT US | COUNTRY LOCATIONS | PUBLICATIONS | DOWNLOADS | PARTNERS | FAQS | CONTACT US

**What is SSNM?**  
N Management  
SSN Management  
**Recommendations**  
Country locations  
Making a recommendation for a specific location  
**Products**  
Leaf color chart (LCC)  
Nutrient balance  
Fertilizer calculator  
Nutrient disorders in rice  
**Downloadable**  
Nutrient calculator (Excel)  
Presentations (PowerPoint)  
Publications  
**Techniques**

**Climate**

**Feeding crop needs!**

**Indigenous nutrient supply**

**Inorganic fertilizer**

**Leaf Color Chart:**  
Order leaf color chart  
Local Recommendations:  
Phosphorus  
Nitrogen  
Downloadable:  
Site Page SSNM  
Recommendations for rice in the Philippines version 2.2  
Publications:  
December 2006 issue of International Fertilizer Conference Volume SSNM  
Large request and economic benefits of SSNM - by Professor of Agriculture, University of the Philippines  
SSNM paper prepared for a 15 February 2007 workshop convened by APA, IFI, IFDCS

Last Update: 6 March 2007

**IRRI**

[www.irri.org/irrc/ssnm](http://www.irri.org/irrc/ssnm)