

研究论文



照片拍摄: G. Peskovski.

乌克兰西部冬小麦、玉米和甜菜上不同氮肥水平下施钾的效益

Polevoy, V.M.⁽¹⁾, L.Y. Lukashchuk⁽¹⁾, and G. Peskovski⁽²⁾

摘要

20世纪末前苏联的农业生产急剧衰退,在过去的10~15年才开始慢慢恢复。农业系统的破坏导致放弃传统的(根深蒂固的)实践操作,特别是调整矿物营养是目前的一个重大挑战。本研究的目标是重新评估、展示并讨论在乌克兰西部冬小麦、玉米、甜菜生产上不同氮肥水平下施钾(K)的效益。在这里,对3种作物在连续3年的研究中所得到的主要试验结果做一下简述。2012~2014年连续3个生长季的田间试验安排在浅滩上进行,土壤是较为肥沃的黑

钙土,有机质(OM)含量不高。每个试验设9个处理,其中一个处理为对照,不施肥。其他8个处理为在2个施氮水平(120、180 kg ha⁻¹)上各设4个施钾水平,各作物上不同处理之间的施磷量保持一致。冬小麦和甜菜对照不施肥处理

⁽¹⁾ 乌克兰国家农业科学院Western Polissya农业研究所,乌克兰

⁽²⁾ IPI前中欧和东欧项目协调员, Belarusian钾肥公司, 明斯克, 白俄罗斯
通讯作者: g.peskovski@belpc.by

的产量与近年来获得的这两种作物年平均产量基本一致, 这表明了当前乌克兰冬小麦及甜菜种植上基本矿质营养的贫乏。另一方面, 玉米对照不施肥处理的产量和近年来年平均产量差别很大, 这表明玉米种植在乌克兰获得了重大进展。充足氮磷养分是这3种作物实现高产, 品质提高的先决条件。除此之外, 钾的施用量增加也会显著提高产量和质量参数。作物在吸收氮钾两元素上存在着相互作用的关系, 随钾的施用量增加会促进氮的吸收, 反之亦然。试验中3种作物获得产量、品质和净利润的最高值均是在钾肥施用最高水平下。然而, 对于冬季小麦和甜菜而言, 最大数值尚未实现, 因此可进一步增加年度钾肥施用量从而得出一个经济的肥料施用量。另一方面, 在玉米种植上, 随钾肥的施用量增加并没有带来预期的更高的产量。此外, 特别是在小麦和甜菜上, 应根据作物生长发育的进程分配年度钾肥的施用, 以检验是否会使得产量和品质实现进一步提高。

引言

在20世纪末前苏联农村的农业生产急剧衰退, 在过去的10~15年才开始慢慢恢复。在当前经济和食品价格危机的背景下, 俄罗斯、乌克兰和哈萨克斯坦如果能抓住这个稍纵即逝的好机会, 成功地提高生产力, 可能会在全球农业市场上占有一席之地。然而, 未来的农业对内部和外部因素如制度变迁、土地利用变化、气候变异及变化和全球经济的趋势高度敏感。今后这些地区的粮食生产可能会对来几十年全球和区域粮食安全产生重大影响 (Lioubimtseva and Henebry, 2012)。

冬小麦 (*Triticum aestivum*) 是乌克兰最主要的农作物, 这里在历史上曾被称为“欧洲粮仓”。冬小麦通常在秋季播种, 冬季来临之前出苗和营养生长, 然后在厚厚的积雪保护下度过冬天。在春天, 麦苗开始分蘖, 分化和伸长后再抽穗, 通常在夏末收获, 小麦产量通常由麦穗数、穗粒数和粒重来决定。虽然前30年乌克兰冬小麦收获面积相对稳定, 为500-700万公顷, 但是年产量波动较大。正常同比变化之上, 可以注意到从1990年到2003年有一个明显的下降, 随后是相对稳定的增长 (图1)。联系到巨大的政治变化和随之而来的经济崩溃, 这归因于先前农业系统的分离和新农业系统的重组。年平均产量的下降和后来的崛起可能是一



地图1.乌克兰地图, Western Polissya用红圈圈出的就是试验进行的地方。
来源: <https://www.studentnewsdaily.com/>

个很好的指标, 显示了矿物营养的变化。在农业经济危机期间根深蒂固的传统农业生产模式被抛弃, 同时新的思想和方法正在被验证和接受。在过去的10年, 无机肥料的使用稳步增加, 较高的肥料施用量很可能促进了小麦产量的增加。近年来, 虽然政府并没有对粮食和油菜籽生产者提供直接补贴, 但是农业部的报告和私人商品分析师指出, 无机肥料的施用量将再次增加 (Lindeman, 2013)。

在乌克兰, 玉米 (*Zea mays* subsp. *mays*) 是一种相对较新的农作物品种。作为不耐寒作物, 玉米必须在温带地区的春天种植。玉米是C₄植物, 比小颗粒的C₃植物如苜蓿和大豆相对更节水。虽然如此, 但玉米是浅根系植物, 因此对干旱非常敏感, 特别是在抽丝期, 而此时玉米花朵要授粉。青贮玉米的收获是在植株是绿色且果实不成熟的时候。秋天玉米被留在田地很晚直到谷物彻底干燥。在过去, 乌克兰种植的玉米主要用于动物饲料。目前, 玉米生产在乌克兰经历了一个显著提高的过程; 2000年到2013年, 玉米收获面积增长了4倍, 并且产量由每公顷3 mt到6 mt, 翻了一翻 (图2)。每年玉米产量超过3000万mt, 有60%的产品出口, 乌克兰飞速成为世界第二玉米出口国, 与阿根廷和巴西并列, 仅次于美国 (Olearchyk and Terazono, 2013)。

乌克兰优越的地理位置给对甜菜种植提供了有利的土壤条件和良好的气候条件 (*Beta vulgaris* L.)。然而, 近年来, 在乌克兰甜菜生产经历了放松管制。因此, 过去

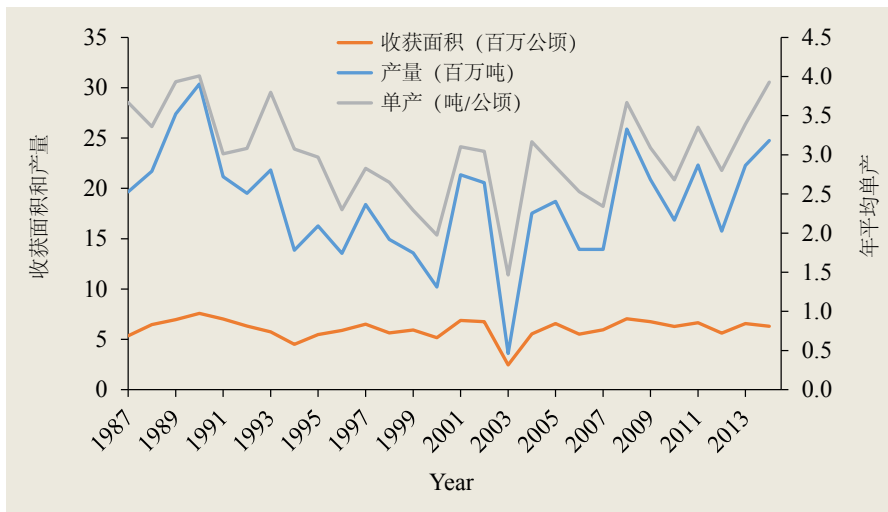


图1.乌克兰小麦生产: 收获面积, 产量, 平均单产。

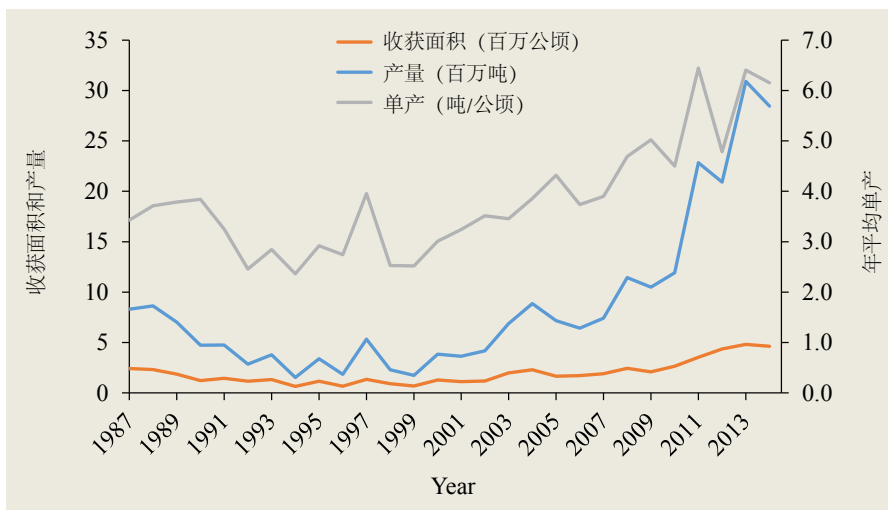
数据来源: <http://www.indexmundi.com/agriculture/?country=ua&commodity=wheat>

图2.乌克兰小麦生产: 收获面积, 产量, 平均单产。

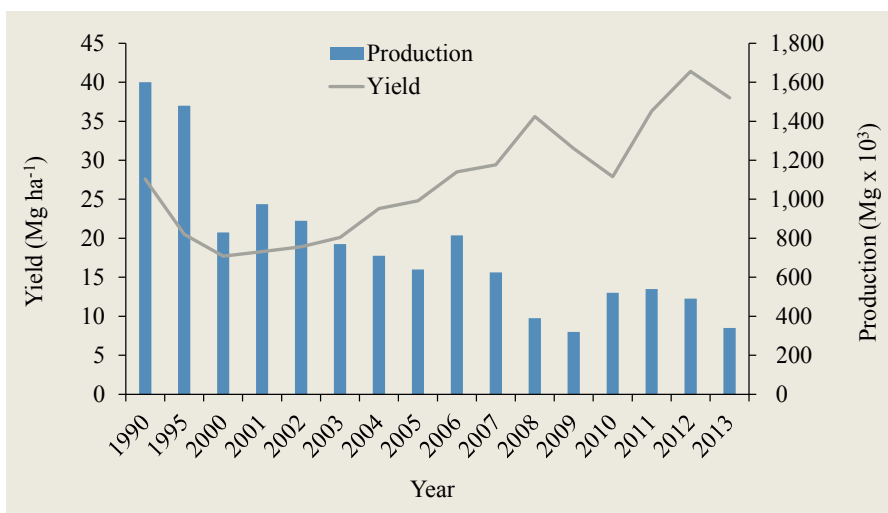
数据来源: <http://www.indexmundi.com/agriculture/?country=ua&commodity=corn>

图3.乌克兰甜菜生产: 年产量和单产水平 (Dubinyuk and Hager, 2013) .

二十年中甜菜生产面积一直在下降 (图3)。引起种植面积下降的主要因素是精制甜菜糖缺乏出口市场, 国内食糖市场供应过剩, 库存加大, 随之发生的是糖的国内市场价格下降 (Dubinyuk and Hager, 2013)。因此, 生产者对甜菜已经失去了兴趣, 即使这种作物在轮作作物中非常重要, 制糖厂工作效率低下, 农村地区的失业人数增加, 甚至越来越多的糖进口到乌克兰。

这里有两个方面可能会改变这种低迷的形势, 使其更加乐观。首先是燃料和能源资源需求的稳步增加, 乌克兰对进口天然气, 石油及其衍生物的依赖, 复杂的生态状况, 所有这些使生物燃料的生产在乌克兰显得非常重要和有前途。其他国家如美国、巴西、欧洲国家的经验, 表明了处理农业原材料和有机废物转化成生物燃料的有效性。因此, 通过甜菜生产生物乙醇似乎是一个解决上述问题的有效办法, 可能会使乌克兰衰退的甜菜产业重建 (Pryshliak, 2014)。第二个方面是, 虽然甜菜生产下降, 但是年平均产量却稳步增加 (图3), 这表明农业生产方法和体制得到了明显改善。

尽管在此期间这3种主要作物的年产量均取得了较大的提高, 但是相比其他气候条件相似的国家取得的成果, 这些仍然是低水平的产量 (Chuan et al., 2013)。在乌克兰要进一步提高这些作物的产量和质量是当前的主要挑战。潜在产量的实现无疑是要显著改善无机施肥的实践和概念。农作物对氮 (N) 和磷 (P) 需求已经很好地传播给农民, 而对钾 (K) 关注较少。施用钾肥对大多数农作物的主要贡献是证据确凿的 (Pettigrew, 2008)。然而, 这一原理的实现总是需要试验工作, 旨在使实践适应当地条件, 且展示在农业以及经济水平下可能的优势。

本研究的目标是重新评估, 展示并讨论在乌克兰西部冬小麦、玉米、甜菜3种作物不同施氮水平下钾肥施用(氯化钾)的效益。在这里对3种作物在连续3年的研究项目中获得了的主要研究结果做一下简短总结。

材料和方法

本试验于2012-2014年连续3年的生长季节进行, 试验安排在乌克兰西部的Western Polissya农业研究所。试验土壤为土层较浅薄, 稍微肥沃的黑土, 有机质(OM)含量不高。在3个生长季节, 分别取表土层进行理化分析, 测试土壤中的有机质、有效磷、速效钾(DSTU, 2005)、碱解氮(Cornfield, 1960)含量及pH。详细的试验布置见表1和表2。

各试验均有9个处理, 其中一个处理为对照, 不施肥, 其他8个处理为在2个施氮水平上各设4个施钾水平, 各作物上不同处理之间的施磷量保持一致(表2)。各处理重复4次。氮磷钾肥的施用量分别换算成N、P₂O₅、K₂O的施用量(kg ha⁻¹)。同样, 植物体内的养分含量分别用N、P₂O₅、K₂O含量占植株干重的百分比表示。小区面积为89 m², 收获时各小区取50 m²测产。试验中用到的肥料有硝酸铵(AN), 磷酸一铵(MAP)和氯化钾(MOP), 试验施肥均为人工撒施。

对冬小麦的生长分析包括平均籽粒产量、每平方米有效分蘖数、株高、穗长、穗粒数、每穗粒重、千粒重。测定

麦粒及秸秆中氮、磷和钾的含量。麦粒质量测定项目有蛋白质及谷蛋白的含量。玉米的生产分析包括每平方米的株数、株高、每株穗轴数, 穗轴重, 穗粒数、千粒重、整体产量。测定玉米粒及秸秆中氮、磷和钾的浓度。测定玉米粒中蛋白质含量。在收获时分别测定甜菜叶片和根中氮、磷、钾的含量、根产量、根中糖含量、精制糖的产量。每种作物施肥的经济效益按照乌克兰当时的市场价(Ukrainian Hryvnia)来确定净收益。施肥处理与不施肥处理相比, 通过减去所需的额外费用来计算获得的边际收益率。

结果分析

3种作物的试验中每年获得的试验结果非常相似。为了简化, 仅取2013年冬小麦及2014年玉米、甜菜的试验结果进行分析报告。

冬小麦

施钾肥能显著增强植株对氮和钾的吸收, 表现为这些元素在植物体内的浓度增加。与NP处理(不施钾肥)相比, 每公顷施用60-90 kg K₂O(同时施用氮磷肥)会使麦粒中N的浓度增加0.7-1.2 mg g⁻¹。处理N₁₈₀P₇₀K₆₀麦秸中氮浓度最高, 为4.9 mg N g⁻¹。麦粒中钾浓度为5.3-6.6 mg g⁻¹。所有施用钾肥的处理中, 麦秸中钾的浓度为9.4-13 mg g⁻¹, 其中处理N₁₈₀P₇₀K₁₂₀最高。

籽粒产量分析(图4A)表明, 不施肥的对照处理产量为4 mt ha⁻¹, 而施氮量为120、180 kg ha⁻¹的处理(不施钾

表1. 三个试验点和作物的技术细节和土壤属性

作物	品种	前作	播种时间	播种量	表土属性				
					pH	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. K ₂ O	Hydrol. N
				m ²		%	-----mg kg ⁻¹ soil-----		
小麦	Voloshkova	油菜籽	30-09-2012	5 x 10 ⁶	6.74	1.71	173	120	139
玉米	Mariin 190 SV	冬小麦		6 x 10 ⁵	6.15	1.83	220	107	106
甜菜	Shevchenkovsky	冬小麦	04-2014		6.40	2.13	220	102	111

表2. 小区NPK施肥量

Treatment	Control	N ₁ PK ₁	N ₁ PK ₂	N ₁ PK ₃	N ₁ PK ₄	N ₂ PK ₁	N ₂ PK ₂	N ₂ PK ₃	N ₂ PK ₄	
		-----kg ha ⁻¹ -----								
小麦	N	0	120	120	120	120	180	180	180	180
	P	0	70	70	70	70	70	70	70	70
	K	0	0	60	90	120	0	60	90	120
玉米	N	0	120	120	120	120	180	180	180	180
	P	0	90	90	90	90	90	90	90	90
	K	0	0	60	120	180	0	60	120	180
甜菜	N	0	120	120	120	120	180	180	180	180
	P	0	160	160	160	160	160	160	160	160
	K	0	0	80	160	240	0	80	160	240

肥, 磷的施用量为 70 kg ha^{-1}) 产量分别比对照高出 1.15 、 2 mt ha^{-1} 。钾肥的施用量与产量成线性关系, 相同施钾条件下高氮水平下的产量高。因此, 在不考虑其他肥料施用量的情况下, 每千克钾能使麦粒增产 5.1 - 5.7 kg ha^{-1} 。

进一步的分析揭示了施肥对产量构成的直接影响。基施N和P ($N_{120}P_{70}$) 肥对小麦的有效分蘖产生了明显的影响, 使它的数量从每平方米 489 个增加到 569 个, 增加了 16.4% 。进一步增加氮肥施用量 ($N_{180}P_{70}$) 带来的边际效应相对较小, 仅仅增加了 4% 。钾肥施用量与有效分蘖之间呈线性关系, 每千克钾能使每公顷的有效分蘖增加 2500 个 (图4B)。相比对照, 施用NP肥使穗粒数增加了 5% - 6% , 施用K对穗粒数的影响是重要的和积极的, 但是随着钾施用量的增加似乎有逐渐下降的趋势 (图4C)。因此, 虽然该产量构成的线性函数显示每千克钾大约可增加 3% 的穗粒数, 但是在较高的施钾水平下边际效应将会小得多。相比对照, 虽然施用NP肥使千粒重增加了 11% - 16% , 但是钾的施用对这个产量构成没有任何重大影响 (图4D)。钾肥施用并不影响冬小麦的株高和穗长。

处理 $N_{180}P_{70}K_{60}$ 的籽粒品质、蛋白质和谷蛋白含量达到最高, 其中蛋白质含量为 13.2% , 谷蛋白含量为 25.8% , 钾肥施用量的增加并没有使籽粒的任何品质得到进一步改善。然而, 由于施钾对籽粒产量有影响, 因此钾的施用量最高 (处理 $N_{180}P_{70}K_{120}$) 时所获的净收益也最高, 为 1067 UAH ha^{-1} 。

玉米

玉米植株体内氮的含量反映了作物对氮的吸收, 随钾肥的施用增加, 作物对氮的吸收也增加, 各施钾处理植株体内氮的含量为 8.5 - 11 mg g^{-1} , 最高比对照处理 NPK_0 的高出 2.6 mg g^{-1} 。植株对钾的吸收也增加了, 各施钾处理植株体内钾的含量为 13.1 - 15.7 mg g^{-1} , 比对照处理 NPK_0 的高 0.8 - 2.8 mg g^{-1} 。施用钾肥带来的影响也明显表现在收获时的籽粒中, 每克干的籽粒中N、 P_2O_5 、 K_2O 、K含量分别增加了 0.8 - 1.3 、 1.2 、 0.3 - 1.1 mg 。

氮磷肥对玉米籽粒的产量有惊人的影响。当磷 (P_2O_5) 的施用量为 90 kg ha^{-1} , 氮的施用量为 120 kg ha^{-1} 和 180 kg ha^{-1} 时, 与不施肥的空白处理相比, 分别会使玉米籽粒增产 61% 和 84% (图5A)。增加钾肥的施用量也会使玉米籽粒产量增加, 但似乎当钾的施用量为 $180 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ 时产量可达到最大。因此, 玉米籽粒最高的产量出现在 $N_{180}P_{90}K_{180}$ 处理, 为 11.79 mt ha^{-1} , 比 $N_{180}P_{90}K_0$ 处理高超过 31% , 比对照不施肥处理高 141% 。

钾肥施用对每平方米的植株数及株高的影响相对较小, 甚至是微不足道的 (数据没有显示)。同时也没有观察



照片提供: IPI

到对每株玉米穗轴数量有影响 (~ 1.02)。然而, 施肥却能显著增加玉米穗轴的平均重 (图5B)。对照不施肥处理玉米穗轴的平均重为 140 g , 而不施钾肥 NPK_0 处理, 两个施氮水平下玉米穗轴的平均重分别为 187 g 和 204 g 。钾肥施用会进一步增加穗轴重, 处理 $N_{180}P_{90}K_{180}$ 的最高, 为 231 g 。穗轴重的增加主要归因于穗轴上籽粒的显著增加。仅对不施钾肥的处理 NPK_0 进行分析, 穗轴上籽粒数从不施肥的空白对照处理的 64% 增长到了 73% - 76% , 并随钾肥的施用而进一步增加, 当钾肥的施用量为 $180 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ 时达到最大, 为 81% (图5C)。

处理 $N_{180}P_{90}K_{120-180}$ 的籽粒中蛋白质含量最高, 为 9.95% 。处理 $N_{180}P_{90}K_{180}$ 的净收益最高, 为 5048 UAH ha^{-1} 。

甜菜

施用钾肥可显著提高甜菜对氮的吸收; 甜菜植株地上部组织中氮的含量从 NPK_0 处理中的 3.32% 上升到 $N_{180}P_{160}K_{240}$ 处理的 3.93% 。甜菜根部氮的含量为 0.97% - 1.05% , 施用钾肥对其的影响较小。另一方面, K_2O 含量由处理 NPK_0 的 0.8% - 0.88% 增加到处理 $N_{180}P_{160}K_{240}$ 的 0.99% 。

氮磷肥的施用能显著影响甜菜根的产量。当磷的施用量为 $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, 氮的施用量在 120 kg ha^{-1} 和 180 kg ha^{-1} 时, 与不施肥的空白对照处理相比, 甜菜根的产量分别增加了 32% 和 39% , 分别比non-fertilized制 (图6A)。钾肥施用可引起产量的进一步增加, 甜菜根产量与钾肥施用量呈线性关系, 处理 $N_{180}P_{160}K_{240}$ 的产量最大, 为 60.3 mt ha^{-1} , 比不施钾肥的处理高出约 10% 。

甜菜中糖浓度为 17.3% - 17.6% , 且各处理之间没有显著差异。因此, 精制糖产量与新鲜根产量一致, 对各种肥料的施用显示出类似的反应 (图6B)。不施肥的空白对

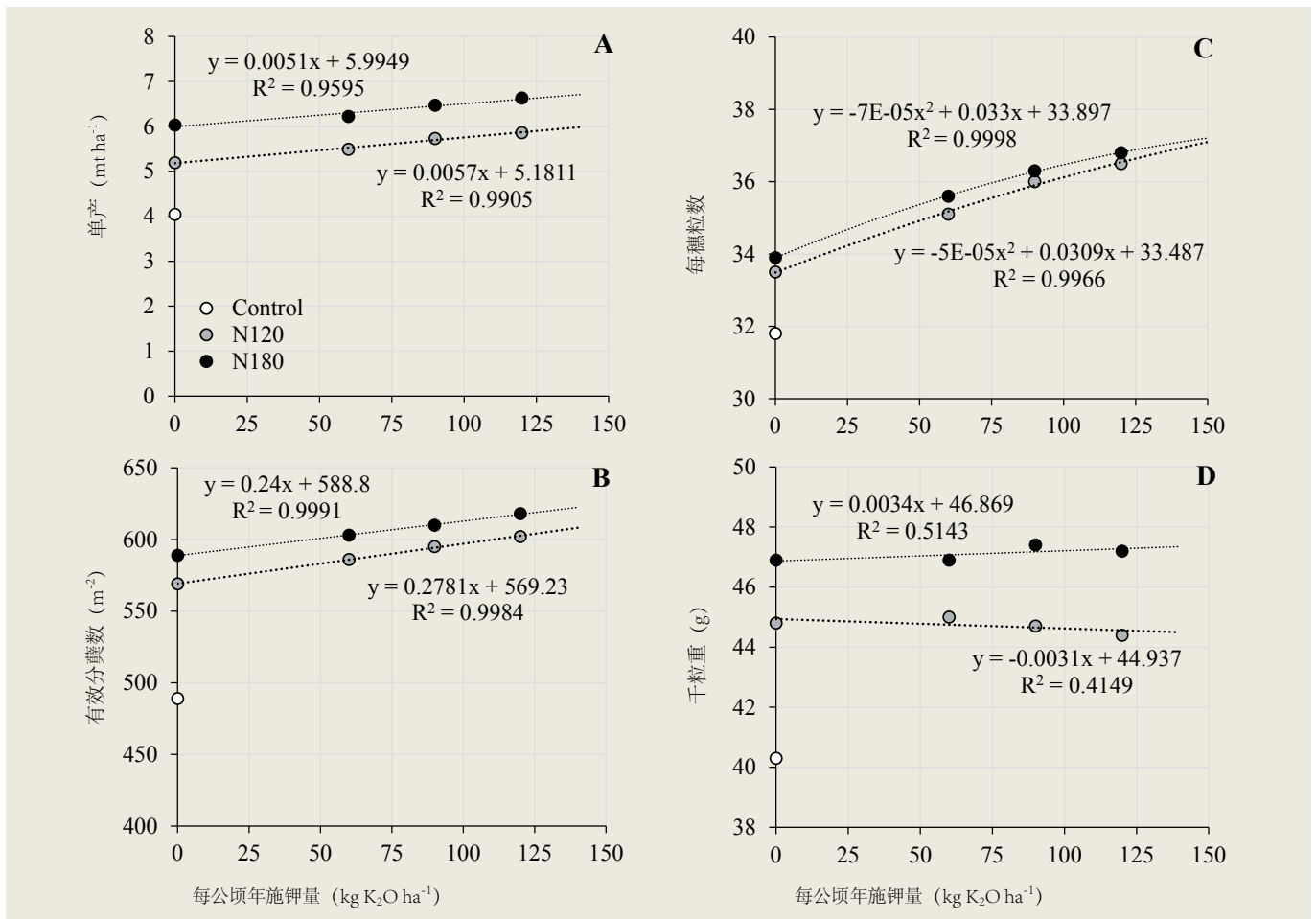


图4.施肥对小麦产量指标的影响: A.单产; B.有效分蘖数; C.穗粒数; D.千粒重

照处理糖产量为 6.76 mt ha^{-1} ，而 NPK_0 处理糖的产量为 $9\text{-}9.5 \text{ mt ha}^{-1}$ ，当氮磷钾的施用量最大 ($\text{N}_{180}\text{P}_{160}\text{K}_{240}$)，糖的产量也达到最大，为 10.55 mt ha^{-1} 。最终结果是当氮磷钾的施用量最大 ($\text{N}_{180}\text{P}_{160}\text{K}_{240}$) 时，净效益最高，为 9450 UAH ha^{-1} 。

讨论

冬小麦 (图4) 和甜菜 (图6) 不施肥空白对照处理的产量与乌克兰近年来获得的年平均产量基本一致，分别约为 4 mt ha^{-1} (图1) 和 38 mt ha^{-1} (图3)。这些结果突出表明了乌克兰在这两种作物种植上现有的基本矿物营养的贫乏。玉米 (图2和图5) 不施肥空白对照处理的产量与乌克兰近年来获得的年平均产量差别较大，这表明了乌克兰最近在栽培玉米上获得了重大进展。

当前的研究表明在这三种作物上施用基本的氮磷肥 (NPK_0) 可对产量的最大影响。当施氮水平为 N_{120} ，即 120 kg N ha^{-1} ，冬小麦、玉米、甜菜3种作物磷肥的施用

量分别为 $70\text{、}90\text{、}160 \text{ kg ha}^{-1}$ 时，相比不施肥的空白对照，3种作物的产量分别增加了28%、61%、33%。当施氮量增加50%，到 180 kg N ha^{-1} ，冬小麦的产量增加最多，为21%，显示了高且稳定的边际产出。这些结果与中国最近在冬小麦上的研究结果一致，研究显示当氮肥施用量为 180 kg N ha^{-1} 仅仅可以使小麦产量达到中等水平 (约为 6 mt ha^{-1})，如果想要获得更高的产量，则需要增加氮肥的施用量 (Chuan *et al.*, 2013)。因此，鉴于当前试验的研究情况下，小麦对氮的需求仍远远没有实现。另一方面，在玉米和甜菜上，高氮水平下所得到的边际产出下降，这表明作物对氮的需求基本已经满足。

钾是保障作物产量及质量的基本养分之一。当钾离子参与众多生理过程时，如影响水分关系，光合作用，吸收运输和酶的激活，则可以直接影响农作物产量。缺钾会导致叶片数量的减少，且叶片变小，从而由于单位叶面积光合速率降低导致光合作用生成的产物减少，结果是用于作

物生长而获得的光合作用同化物整体降低。光合作用同化物减少以及从叶片向果实中运输的同化物减少造成了缺钾对作物产量和品质的负面影响 (Pettigrew, 2008)。实际上, 本试验中所研究的3种作物, 钾肥施用使各自的产量得到进一步提高。冬小麦的产量与钾肥施用量呈线性关系, 在2个施氮水平下, 施用钾肥分别会使产量最多增加10%和13%, 产量增加的多少取决于基施氮肥的水平, 这也表明钾素对作物的影响与土壤中氮的含量密切相关。根据He *et al.* (2012) 和Chuan *et al.* (2013) 的研究, 当钾的施用量为120 kg ha⁻¹, 再把氮的施用量提高到200 kg ha⁻¹以上时, 可使冬小麦产量得到进一步提高, 达到约7 mt ha⁻¹。施用钾肥使玉米产量最高增加30%, 且与氮的施用水平无明显的关系。与冬季小麦和甜菜相比, 当钾的施用量最高 (180 kg ha⁻¹) 时, 钾素对产量的影响似乎达到最佳, 因此进一步提高钾的施用量将是无效的。施用钾肥可使甜菜根和糖的产量最大增长12%, 试验表明钾的施用量和甜菜产量呈线性关系, 进一步增加钾肥的施用量可能会使产量升高, 应该考虑经济效益。

应当注意在作物上施用钾肥对作物发育的具体作用及对各作物产量构件影响的显著性, 尽量搞清楚钾素所扮演的角色, 并阐明实际结论 (Grzebisz *et al.*, 2013)。本试验中的3种作物, 从播种到收获冬小麦的历程最复杂 (Haun, 1973; Zadoks *et al.*, 1974)。秋季播种, 冬季还要经历众多胁迫而存活, 只有长势良好的麦苗在冬季的才有生存机会。钾对幼苗成功建立强大的根系中扮演重要的角色 (Weaver, 1926; Ma *et al.*, 2013)。小麦籽粒产量可以表示为三个变量 (产量构件) 的乘积:

$$\text{籽粒产量} = (\text{穗数}) * (\text{穗粒数}) * (\text{粒重})$$

每个产量构成都会影响最终籽粒产量, 这影响是在作物生长季节期间的不同阶段决定的。成功及时的建立麦苗是每株植物产生的有效分蘖的先决条件, 这决定了麦穗数量的上限。春天, 湿润温暖的气候以及良好的土壤肥力有助于分蘖。分蘖必须生存直至成熟, 才能对籽粒产量作出贡献。孕育的麦穗以及延伸的麦秆需求大量的植物养分, 因此相对较弱, 发育不好的分蘖往往失去了竞争, 经常失去, 这特别是在不利的环境条件下经常出现 (Lopes *et al.*, 2014)。本研究的结果显示钾素在保持分蘖数发展上的作用很关键, 能增加有效分蘖数 (图4B)。钾能对根系生长和发展产生有益影响, 干旱的时候可能会使根系在土壤中的延伸能力得到增强 (Weaver, 1926)。同时, 钾素参与了植物体内的水分调节 (Fischer, 1968; Haeder and

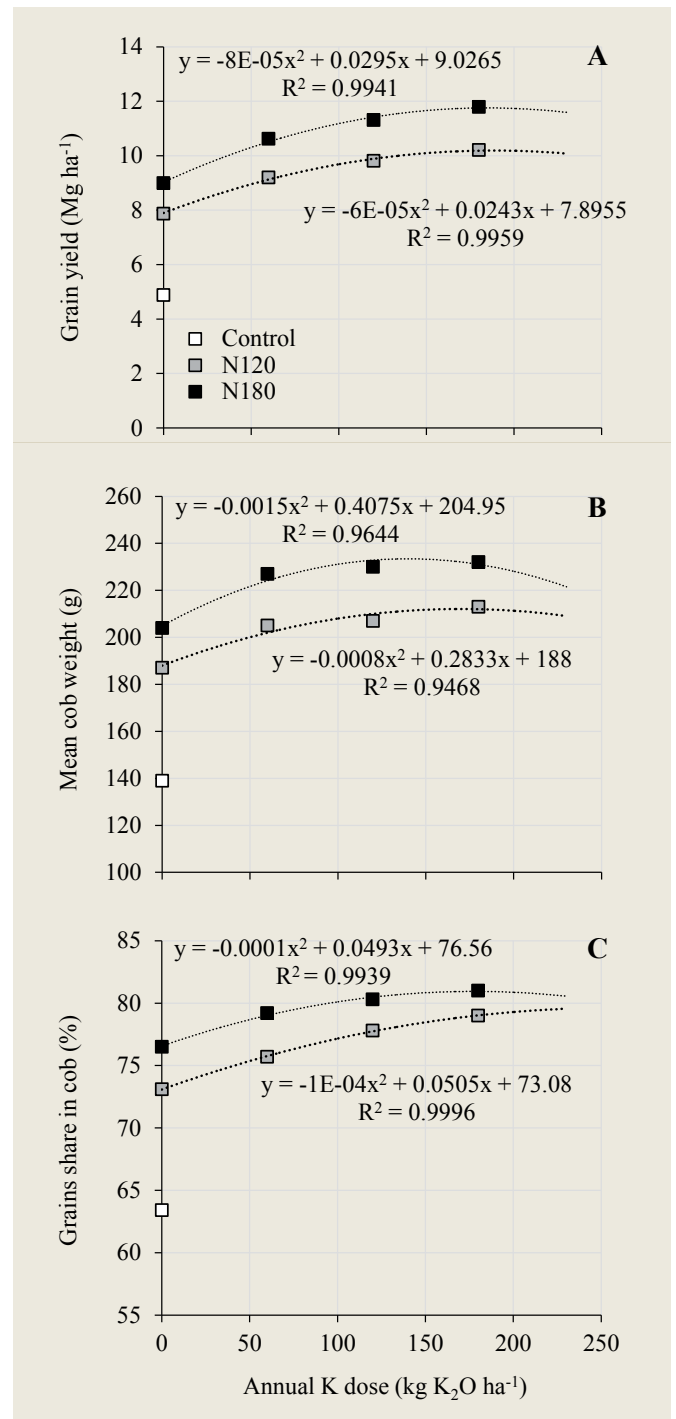


图5. 施肥对玉米产量指标的影响: A. 单产; B. 穗轴均重; C. 单穗轴籽粒数

Beringer, 1981), 充足的钾素含量将会增强植物的抗旱能力 (Grzebisz *et al.*, 2013)。

提高钾肥的施用量会使穗粒数显著上升 (图4C), 这

表明钾素在生育阶段的初期就影响其萌动及发展。这种影响可能归因于钾素提高了植物体内碳水化合物的含量，从而可以延长麦粒在麦穗中的最初发育过程。在众所周知的促进光合作用 (Huber, 1985) 和碳水化合物易位 (Conti and Geiger, 1982) 过程中, 钾素的影响更是不足为怪。然而, 在灌浆期的后期, 并没有观察到不同的钾肥施用水平对其显著的影响 (图4D), 这可能是因为植株从根际区吸收消耗钾素随季节变化。随植株生育期施用矿质营养的时机和分配量可能是至关重要的, 特别是在施钾肥时, 要考虑对植物的生长和发展的综合影响。在当前的研究中, 考虑到该地区普遍的耕作习惯, 年度钾肥施用量在播种前基施。钾不仅在植物体内非常容易移动, 而且在土壤中也易于移动, 因此很容易从根际区淋失掉。已有的研究获得的冬小麦的产量潜力是该地区产量的两倍, 可达12 mt ha⁻¹ (Chuan *et al.*, 2013; Dang *et al.*, 2013)。在作物的整个生长季应根据植物需求随时调整钾肥施用规程可进一步提高乌克兰冬小麦的产量 (He *et al.*, 2012; Dang *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2013; Scanlan *et al.*, 2015)。换句话说, 在出现基因层面的对策之前, 施用缓释肥料、分次施用钾肥、叶面施肥 (Niu *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2014) 都是非常值得考虑 (Wang and Wu, 2015) 方法。同时, 如Chuan *et al.* (2013) 及当前试验的研究 (图4A) 显示, 小麦想要获得高产, 高氮和高钾是必需的。

与冬小麦相对较长且复杂的生长发育模式相比, 温带气候条件下的玉米生长发育则是集中在短暂的夏季。于是精选的玉米品种能快速生长且产量高。播种的时候就已经决定了株数和穗轴数。穗轴的大小及穗粒数是有效的产量构成。Pettigrew (2008) 描述缺钾对玉米造成的一系列生理障碍 (还包括其他植物)。缺钾会叶面积的扩张受阻导致叶片变小 (Jordan-Meille and Pellerin, 2004)。缺钾后叶面积变小, 光合速率降低 (Basile *et al.*, 2003), 导致源组织 (叶子) 中储存的碳水化合物总量减少, 随之限制的光合作用的产物运输到果实中, 这是缺钾植物特有的性质 (Ashley and Goodson, 1972), 结果是库组织 (穗轴) 获得的吸收供应减少, 最终导致植物的产量及品质下降。因此, 钾肥施用对玉米产量非常重要, 本研究中 (图5A) 也表明钾素对植物生产力产生了有效的影响。玉米抽丝之前大量的钾素在植物体内积累 (Hanway, 1962, Karlen *et al.*, 1988), 这表明钾素在籽粒生成及随后的发展中扮演重要的角色。事实上, 施钾量越大, 穗轴和穗粒数就越大 (图5), 这与 Heckman、Kamprath (1992) 和 Qiu *et al.* (2014) 的研究结果一致。

甜菜对钾的需求较高, 且与其他植物相比, 甜菜的存

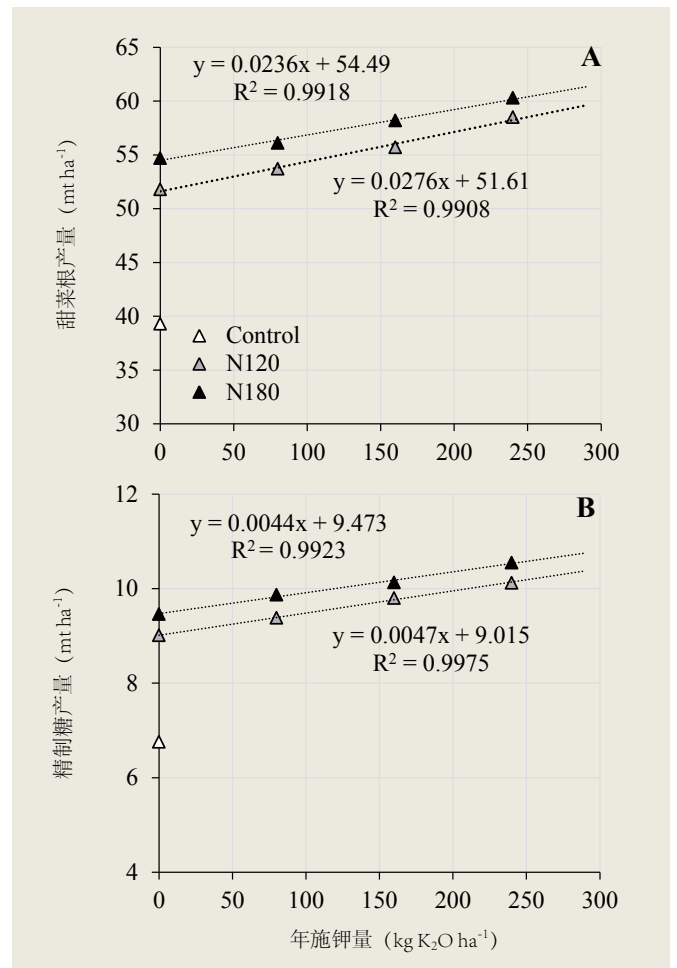


图6. 施肥对2014年甜菜生产的影响: A. 甜菜根产量; B. 精制糖产量

储器官更大。假如天气条件适宜, 地上部生物量越大 (从生叶子) 获得主根生物量及其糖含量就越大 (Kenter *et al.*, 2006)。甜菜生产需要特别肥沃的土壤, 富含矿物质营养物质和有机物质。在植株发育的早期, 氮是植株叶片和直根生长最重要的营养元素, 生长后期糖分从叶子易位到根部, 钾很可能成为了更基本的元素 (Giaquinta, 1979)。因此, 正如本文所示, 通过提高钾肥施用量来影响甜菜产量并不令人惊讶。此外, 由图6中的线性函数可以看出甜菜对钾的需求比较高。另外, 年度钾肥分次施用, 着重关注下半个生育期钾肥施用, 可能会增加该作物的上的钾肥利用效率。

在人类饮食和动物饲料中, 钾是一个非常重要的矿物质元素。钾肥的施用量增加易于使小麦和玉米籽粒及秸秆、甜菜根中钾的含量也增加。众所周知, 钾施用量的增加会导致籽粒中蛋白质含量也增加 (Mengel *et al.*, 1981; Blevins,

1985),尤其是谷蛋白增加,这可是小麦面粉的一个重要质量参数。因此,钾肥施用量的增加会提高农产品的质量,从而也会给种植者带来好的价格和收入。

有趣的是,施钾量的增加会促进作物对氮的吸收,如本文所示随施钾量的增加3种作物组织内的氮含量均有所增加,前人的研究也证明了这一点(Mengel and Kirkby, 1987; Chuan *et al.*, 2013)。从植物营养的角度来看,很容易证明钾在提高氮利用效率方面的有益作用,从而提高了作物产量和品质(Stromberger *et al.*, 1994)。试验地土壤pH较高,透气性较好,钾肥提供了主要的阳离子,硝酸根(NO_3^-)是作物从土壤溶液中吸收的主要的阴离子,这些离子不仅在作物吸收养分时保持明显的平衡作用,而且在从根部到地上部的运输中也保持平衡。在大多数农作物中, NO_3^- 减少、氨基酸和糖的合成主要是在地上部的组织中进行。钾也是运输养分到储存器官使其生长发育必不可少的元素,本试验中的储存器官包括冬小麦的麦粒,玉米穗轴,甜菜的根。

结论

施用充足的氮磷肥是乌克兰冬小麦、玉米、甜菜3种重要农作物生产上获得可观产量和收益的先决条件。除此之外,增施钾肥对作物产量和品质带来了明显改善。氮和钾吸收之间的相互关系为增加钾的施用量似乎能促进氮的吸收,反之亦然。本试验中3种作物产量、品质和净收益的最高值均出现在钾肥施用量最高时。然而,对于冬小麦和甜菜而言,最高值尚未实现,因此应从经济学的角度进一步增加年度钾肥施用量进行检验。另一方面,在玉米种植上,额外的钾肥施用量估计不会使产量进一步提高。此外,特别是在小麦和甜菜上,应根据作物生长发育的进展分配年度钾肥的施用,以检验是否会使产量和品质实现进一步提高。

参考文献

- Ashley, D.A., and R.D. Goodson. 1972. Effect of Time and Plant Potassium Status on ^{14}C -labeled Photosynthate Movement in Cotton. *Crop Sci.* 12:686-690.
- Basile, B., E.J. Reidel, S.A. Weinbaum, and T.M. Dejong. 2003. Leaf Potassium Concentration, CO_2 Exchange and Light Interception in Almond Trees (*Prunus dulcis* (Mill) D.A. Webb). *Sci. Hort.* 98:185-194.
- Blevins, D.G. 1985. Role of Potassium in Protein Metabolism in Plants. *In: Munson, R.D. (ed.). Potassium in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA. p. 413-424.*
- Chuan, L., P. He, J. Jin, S. Li, C. Grant, X. Xu, S. Qiu, S. Zhao, and W. Zhou. 2013. Estimating Nutrient Uptake Requirements for Wheat in China. *Field Crops Research* 146:96-104.
- Conti, T.R., and D.R. Geiger. 1982. Potassium Nutrition and Translocation in Sugar Beet. *Plant Physiol.* 70:168-172.
- Cornfield, A.H. 1960. Ammonia Released On Treating Soils with N-Sodium Hydroxide as a Possible Means of Predicting the Nitrogen-Supplying Power of Soils. *Nature* 187:260-261.
- Dang, H., R. Li, Y. Li, Y. Sun, X. Zhang, and J. Meng. 2013. Absorption, Accumulation and Distribution of Potassium in Super Highly-Yielding Winter Wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 2013-02.
- DSTU. 2005. Quality of Soil: Measuring Mobile Compounds of Phosphorus and Potassium Using Kirsanov Method Modified by NNTIGA. DSTU (State of Ukraine for Standardization) 4405.
- Dubinyuk, Y., and R. Hager. 2013. Ukraine Sugar Annual Report. USDA Foreign Agricultural Service, GAIN Report No. 1316.
- Fischer, R.A. 1968. Stomatal Opening: Role of Potassium Uptake by Guard Cells. *Science* 160:784-785.
- Giaquinta, R.T. 1979. Sucrose Translocation and Storage in Sugar Beet. *Plant Physiol.* 63:828-832.
- Grzebisz, W., A. Gransee, W. Szczepaniak, and J. Diatta. 2013. The Effects of Potassium Fertilization on Water-Use Efficiency in Crop Plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176:355-374.
- Haeder, H.E., and H. Beringer. 1981. Influence of Potassium Nutrition and Water Stress on the Content of Abscisic Acid in Grains and Flag Leaves of Wheat During Grain-Development. *J. Sci. Food Agric.* 32:552-556.
- Hanway, J.J. 1962. Corn Growth and Composition in Relation to Soil Fertility: III. Percentages of N, P and K in Different Plant Part in Relation to Stage of Growth. *Agron. J.* 54:222-229.
- Haun, J.R. 1973. Visual Quantification of Wheat Development. *Agron. J.* 65:116-119.
- He, P., J. Jin, H. Wang, R. Cui, and C. Li. 2012. Yield Responses and Potassium Use Efficiency for Winter Wheat in Northcentral China. *Better Crops* 96:26-28.
- Heckman, J.R., and E.J. Kamprath. 1992. Potassium Accumulation and Corn Yield Related to Potassium Fertilizer Rate and Placement. *Soil Sci.* 56:141-148.
- Huber, S.C. 1985. Role of Potassium in Photosynthesis and Respiration. *In: Munson, R.D. (ed.). Potassium in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA. p. 369-396.*
- Jordan-Meille, L., and S. Pellerin. 2004. Leaf Area Establishment of a Maize (*Zea Mays* L.) Field Crop Under Potassium Deficiency. *Plant Soil* 265:75-92
- Karlen, D.L., R.L. Flannery, and E.J. Sadler. 1988. Aerial Accumulation and Partitioning of Nutrients by Corn. *Agron. J.* 80:232-242.
- Kenter, C., C.M. Hoffmann, and B. Märlander. 2006. Effects of Weather Variables on Sugar Beet Yield Development (*Beta vulgaris* L.). *European J. Agron.* 24:62-69.

- Lindeman, M. 2013. Ukraine: Wheat Prospects Remain Favorable. http://www.pecad.fas.usda.gov/highlights/2013/05/ukr_13may2013/.
- Lioubimtseva, E., and G.M. Henebry. 2012. Grain Production Trends in Russia, Ukraine and Kazakhstan: New Opportunities in an Increasingly Unstable World? *Frontiers of Earth Science* 6:157-166.
- Lopes, M.S., D. Saglem, M. Ozdogan, and M. Reynolds. 2014. Traits Associated with Winter Wheat Grain Yield in Central and West Asia. *Journal of Integrative Plant Biology* 56:673-683.
- Lu, Q., D. Jia, Y. Zhang, X. Dai, and M. He. 2014. Split Application of Potassium Improves Yield and End-Use quality of Winter Wheat. *Agron. J.* 106:1411-1419.
- Ma, Q., C. Scanlan, R. Bell, and R. Brennan. 2013. The Dynamics of Potassium Uptake and Use, Leaf Gas Exchange and Root Growth Throughout Plant Phenological Development and its Effects on Seed Yield in Wheat (*Triticum aestivum*) on a Low-K Sandy Soil. *Plant and Soil* 373:373-384.
- Mengel, K., and E.A. Kirkby. 1987. Principles of Plant Nutrition, 4th edn. International Potash Institute, Switzerland.
- Mengel, K., M. Secer, and K. Koch. 1981. Potassium Effect on Protein Formation and Amino Acid Turnover in Developing Wheat Grain. *Agron. J.* 73:74-78.
- Niu, J., W. Zhang, S. Ru, X. Chen, K. Xiao, X. Zhang, M. Assaraf, P. Imas, H. Magen, and F. Zhang. 2013. Effects of Potassium Fertilization on Winter Wheat under Different Production Practices in the North China Plain. *Field Crops Research* 140:69-76.
- Olearchyk, R., and E. Terazono. 2013. Ukraine Hopes to Cash in on Massive Corn Harvest. *Financial Times*, 16 Sep 2013. <http://www.ft.com/cms/s/0/54852a9a-1ba2-11e3-b678-00144feab7de.html>.
- Pettigrew, W.T. 2008. Potassium Influences on Yield and Quality Production for Maize, Wheat, Soybean and Cotton. *Physiologia Plantarum* 133:670-681.
- Pryshliak, N.V. 2014. Perspectives of Bioethanol Production of Sugar Beets in Ukraine. *Економіка АПК* 3:126-131.
- Qiu, S., J. Xie, S. Zhao, X. Xu, Y. Hou, X. Wang, W. Zhou, P. He, A.M. Johnston, P. Christie, and J. Jin. 2014. Long-Term Effects of Potassium Fertilization on Yield, Efficiency, and Soil Fertility Status in a Rain-Fed Maize System in Northeast China. *Field Crops Research* 163:1-9.
- Scanlan, C.A., N.I. Huth, and R.W. Bell. 2015. Simulating Wheat Growth Response to Potassium Availability under Field Conditions with Sandy Soils. I. Model Development. *Field Crops Research* 178:109-124.
- Stromberger, J.A., C.Y. Tsai, and D.M. Huber. 1994. Interactions of Potassium with Nitrogen and their Influence on Growth and Yield Potential in Maize. *J. Plant Nutr.* 17:19-37.
- Wang, Y., and W.H. Wu. 2015. Genetic Approaches for Improvement of the Crop Potassium Acquisition and Utilization Efficiency. *Current Opinion in Plant Biology* 25:46-52.
- Weaver, J.E. 1926. Root Habits of Wheat. *In: Root Development of Field Crops*, Chapter V. McGraw-Hill Book Company Inc., New York and London. <http://soilandhealth.org/wp-content/uploads/01aglibrary/010139fieldcroproots/010139ch5.html>.
- Zadoks, J.C., T.T. Chang, and C.F. Konzak. 1974. A Decimal Code for Growth Stages of Cereals. *Weed Res.* 14:415-421.

论文“乌克兰西部冬小麦、玉米和甜菜上不同氮肥水平下施钾的效益”可以在国际钾肥研究所官方网站上浏览下载：[Regional activities/Eastern Europe, Nitrogen and Potassium Interactions](http://www.internationalpotashinstitute.org/Regional%20activities/Eastern%20Europe,%20Nitrogen%20and%20Potassium%20Interactions)