我国玉米产量差、土壤基础养分供应和养分利用率

徐新朋[1,2] 刘晓燕[1] 何 萍[1,3*] Adrian M.Johnston[4] 赵士诚[1] 仇少君[1] 周 卫[1*]

（1. 农业部植物营养与肥料重点实验室，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京 100081；2. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所，北京 100097；3. 国际植物营养研究所中国项目部，中国农业科学院与国际植物营养研究所植物营养创新研究联合实验室，北京 100081；4. International Plant Nutrition Institute（IPNI），102-411 Downey Road，Saskatoon，SK，S7N 4L8，Canada）

摘要：我国在农业生产方面已经取得很大成就，然而仍然面临着诸多困难和挑战，需要投入更多的努力去克服，在保证粮食安全的同时也要保护环境。分析产量差和养分利用率有助于发展和制定农业政策与策略进而增加作物产量。从 2001–2012 年共收集了我国玉米主产区 1971 个田间试验，试验处理包括优化管理（OPT）、农民习惯措施（FP）以及一系列的缺素处理，采用 Meta 分析和方差分析相结合的方法对产量差、养分利用率和土壤基础养分供应进行统计分析。就所有数据点而言，OPT 和 FP 之间的平均产量差是 47 公斤 / 亩，N、P 和 K 产量反应（YR）分别为 120、67 和 80 公斤 / 亩。N、P 和 K 的平均土壤基础养分供应量分别为 9.3、2.3 和 8.5 公斤 / 亩。与 FP 相比较，OPT 处理下平均 N、P 和 K 回收率（RE）分别增加了 12.2、5.5 和 6.5 个百分点。本研究表明，在我国进一步的提高产量和养分利用率具有很大潜力，将有助于发展和制定农业政策与策略，然而一些管理措施如土壤、作物和养分是必要的，同时需要与先进的知识和技术相结合。

关键词：玉米；产量差；土壤基础养分供应；养分利用率

1 前言

粮食安全问题在我国一直备受关注，因为中国用占世界 9% 的耕地面积养活着世界 22% 的人口。较高的粮食需求需要不断扩大作物种植面积或增加单位产量。玉米作为主要的粮食作物之一，是我国种植面积最广的粮食作物，在保证粮食安全和稳定粮食市场中起着重要作用，而提高产量应该通过技术创新缩小产量差而不是扩大种植面积[1]。

分析可获得产量、产量差、养分利用率和土壤基础养分供应，对于在保持生态环境条件下制定农业政策，优化研究和实现粮食安全是至关重要的。可获得产量是在田间或试验站的试验条件下应用当前已知的信息技术和先进的管理措施在消除降低和限制产量的因素下获得的最大产量[2, 3]，但需要多年多点的试验数据以便获得最优的稳健估计，以确保所获得的产量能够反映典型气候变异范围[4]。本研究中采用可获得产量分析产量差。

大多数农民的产量低于试验条件下所获得的产量。计算并分析产量差有助于改善生产技术、提供增产目标，因为产量差在保证粮食安全中对于制定生产策略和研究生产技术是必不可少的[4, 5]。合理的养分管理措施可以缩小产量差，接近可获得产量[6, 7]，而不同地区之间产量差有很大差异，因为不同地区的气候、土壤类型、作物及养分管理措施存在很大的变异性。

缩小产量差对于我国非常重要，肥料在缩小产量差中有着决定性的作用。近年来我国农民为了获得高产，过多或过度的肥料施用在农民习惯措施中已经变成了一种普遍现象，尤其是氮肥和磷肥[8]。然而，过量施肥不仅无助于高产，并导致了土壤养分积累，养分利用率降低和严重的环境污染问题[9–11]。了解土壤养分状况是优化施肥的前提。土壤基础养分供应可以反映土壤养分状况或土壤肥力，可以用于指导推荐施肥。在养分缺乏的地块上，土壤基础养分供应越高，作物产量越高[12]。在推荐施肥时必须考虑土壤基础养分供应[15, 16]，因为较高的土壤基础养分供应对于环境是一个潜在的威胁[13, 14]，这些养分会通过淋洗和径流进入地下水，污染河流和湖泊。

养分利用率是权衡施肥合理性和先进性最为直接的指标。一些农学指标常常用于评价施肥效率，如养分回收率（RE，单位施用某种养分的作物吸收量增量），农学效率（AE，单位施用某种养分的作物籽粒产量的增量），偏生产力（PFP，单位施用某种养分的作物产量）[17–19]。养分利用率受籽粒产量、土壤基础养分供应、施肥量、以及其它作物管理措施的及时性与质量的影响[18]。推荐施肥策略应该同时考虑养分利用率和作物产量的最大化。

获得并了解我国主要玉米产区的可获得产量、产量差以及养分利用率对于养分管理提供依据是必需的[20–23]。因此，本研究的目的是：

（1）量化玉米产量差；

（2）分析土壤基础养分供应和产量反应；

（3）评估 OPT 处理和 FP 处理下的 AE，PFP 和 RE。

2 材料与方法

2.1 试验点描述和数据来源

本研究田间试验包括春玉米和夏玉米。春玉米主要种植在我国的东北（NE）、西北（NW）和西南（SW），而夏玉米主要种植在我国的华北（NC）和长江中下游（MLYR）。由于 MLYR 地区的玉米试验较少，主要位于安徽省和江苏省且轮作制度为冬小麦－夏玉米轮作，与华北地区种植制度相同，因此，将长江中下游数据合并入华北地区，统一进行数据分析。本研究中所使用的数据来源于学术期刊已发表的和未发表的研究，从 2001–2012 年共计 1971 个田间试验。未发表的研究由国际植物营养研究所（IPNI）中国项目部和本课题组实施，在学术期刊已发表的相关文章来源于中国知网。田间试验涵盖了不同的土壤、气候状况、农业措施和不同的试验处理，处理包括优化处理（OPT）、农民习惯施肥（FP）、以及基于 OPT 和 FP 的 N、P 和 K 减素处理 [12, 24]。试验点分布见图 1。

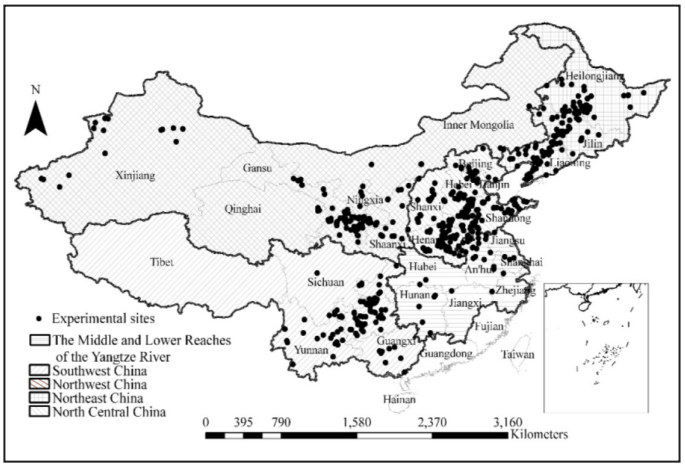

图 1 东北（NE）、华北（NC）、西北（NW）、西南（SW）和长江中下游（MLYR）玉米数据点地理分布

2.2 数据分析和定量化

本研究中可获得产量定义为在田间或试验站的试验条件下应用当前已知的信息技术和先进的管理措施在最佳养分管理措施下，可以获得的最大产量。产量差定义为可获得产量与平均农民措施产量间的差。土壤基础养分供应定义为土壤在不施某种养分而其它养分供应充足条件下土壤中该种养分的供应能力，这种养分在作物生长期内从土壤中可利用 [25, 26]。本研究中土壤基础氮供应（INS）、土壤基础磷供应（IPS）和土壤基础钾供应（IKS）分别是在不施 N、P 和 K 的地块中收获期地上部干物质中 N、P 和 K 的积累量。

产量反应是表征土壤基础肥力的另一个有效指标，氮、磷和钾产量反应定义为可获得产量与不施某种养分的产量差。产量反应与土壤基础养分供应有关，土壤基础养分供应决定了不施某种养分的产量 [15, 26]，产量反应可以用于评价土壤养分供应能力 [12]。

养分利用率参数包括 RE，AE 和 PFP，可以从下面方程式计算：

$$AEi = (Y - Y0) / Fi \quad (1)$$

$$REi = (U - U0) / Fi \quad (2)$$

$$PFPi = Y / Fi \quad (3)$$

i 代表 N、P 或 K；F 是施肥量（公斤 / 亩）；Y 是 OPT 或 FP 处理下的产量；Y0 是不施 N、P 或 K 处理的产量（公斤 / 亩）；U 是 OPT 或 FP 处理成熟期地上部总养分吸收（公斤 / 亩）；U0 是不施 N、P 或 K 处理成熟期地上部总养分吸收（公斤 / 亩）。

采用 SAS V8 软件利用最小显著差数法（LSD）对 OPT 与 FP 处理间的 AE、RE、PFP 平均值差异在 0.05 概率水平下进行 ANOVA 分析。Meta 分析使用科克伦协作网（牛津大学，英国）的 Revman 5.0 软件分析了可获得产量与农民产量、可获得产量与对照区产量之间的异质性以及不同区域间的差异。对于每一个数据点，计算加权平均数的差异（包括可获得产量 (YA)、农民措施产量 (YF)、及产量反应 (YR)）。使用 Q 检验进行异质性检验，如果异质性结果 P 值小于 0.1，则认为在统计上具有显著的异质性。对于产量差与产量反应在 0.05 概率水平下对合并的分析效应值进行异质性检验，如果分析结果的整体效应值 95% 置信区间与 0 不重叠，说明结合效应值有显著的差异。

3 结果

3.1 不同地区产量和产量差

NE 地区的产量最高，然后依次为 NW>NC>SW（表 1）。NE 和 NW 地区有较长的生育期，其生育期比 NC 和 SW 地区长 40–50 天，较大的昼夜温差也有助于干物质积累。Meta 分析结果显示，YA 显著地高于 YF（$P<0.00001$），所有数据点 YA 比 YF 平均高 44.6 公斤 / 亩，相当于 YF 的 8.4%，而不同试验点 YA 和 YF 间的产量差存在一定差异（$P=0.07$）。NW 地区的产量差（120 公斤 / 亩）显著

表 1 不同地区玉米可获得产量、农民实际产量及其产量差								
区域	可获得产量（公斤 / 亩）			农民措施产量（公斤 / 亩）			权重	产量差（公斤 / 亩）
	平均值	标准差	n	平均值	标准差	n	(%)	95% 置信区间
东北	720	127	653	680	127	290	32.9	40（20, 60）
西北	700	193	192	580	200	50	2.8	120（60, 180）
华北	593	127	992	553	127	544	61.1	40（27, 53）
西南	560	127	134	493	133	24	3.2	67（7, 127）
总（95% 置信区间）	640	147	1971	593	147	908	100	47（27, 73）
异质性				P=0.07				
整体效应检验				P<0.00001				

地高于其它三个地区，95% 置信区间存在较大的变化区间，因为在 NW 地区试验中优化处理采用了膜下滴灌技术，因此有助于提高 YA。然而，随着各种农业技术和机械设备应用到农业生产中，在过去的十年里农民的产量不断提高，并逐渐接近 YA，导致了低的产量差（图 2）。

3.2 产量反应和土壤基础养分供应

自 2000 年以来在不施肥的情况下产量呈逐年增加的趋势（图 2），高的施肥量导致了养分在土壤中不断积累。

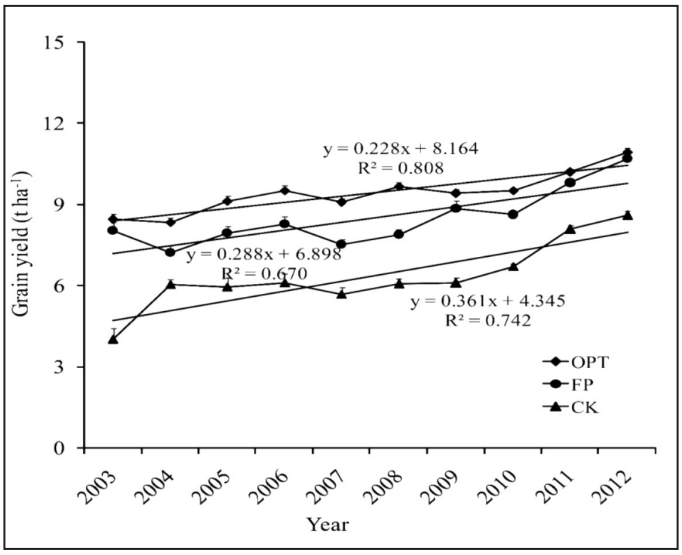

图 2 过去十年我国玉米种植区在优化处理 (OPT)、农民习惯措施 (FP) 和不施肥处理 (CK) 下玉米产量年际变化趋势

注：产量数据为 2003–2012 年所收集数据，误差线为标准误。

结果显示，就所有数据点而言，平均 N、P 和 K 的 YR 分别是 120、67 和 80 公斤 / 亩，Meta 分析结果显示四个地区的 YR 存在很大变异性，N、P 和 K 的 YR 区域间的异质性分别为 P<0.00001、P=0.02 和 P=0.04（表 2）。SW 地区 N、P 和 K 的 YR 最高分别为 167、113 和 107 公斤 / 亩，而 NC 地区 N 和 P 的 YR 最低分别为 100 和 60 公斤 / 亩，NW 地区 K 的 YR 最低，为 20 公斤 / 亩。

产量反应与土壤基础养分供应之间存在显著地负相关，N、P 和 K 的相关系数分别为 P<0.001、P=0.017 和 P<0.001。结果显示不同区域间的 INS 存在很大变异（P=0.0134）（图 3）。NE、NC 和 NW 地区的 INS 分别为 9.0、9.3 和 9.7 公斤 / 亩，并显著地高于 SW 地区，SW 地区仅有 5.4 公斤 / 亩。这与 SW 地区较低的 YA（表 1）和较高的 N 肥 YR（表 2）有关。NC 和 NW 地区的 IPS 高于 SW 地区（P=0.0242），NW 地区的 IKS（15.6 公斤 / 亩）大约是 SW 地区（4.4 公斤 / 亩）的四倍，是 NE（7.7 公斤 / 亩）和 NC（8.5 公斤 / 亩）地区的两倍（图 3）。NW 地区高的 IKS 与低降雨量和低 K 淋洗有关，并与伊利石的母质具有较高的土壤 K 供应能力有关 [19]。区域间的土壤基础养分供应差异与施肥量的变化存在很大的联系。比如在 NC 地区，农民通常在玉米季仅施氮肥而不施磷钾肥，而在 NE 地区，农民通常施氮磷肥，而不施钾肥。

表 2 中国不同玉米种植区 N、P 和 K 产量反应						
区域	氮（公斤 / 亩）		磷（公斤 / 亩）		钾（公斤 / 亩）	
	产量反应	n	产量反应	n	产量反应	n
华北	100（87, 113）	639	60（47, 73）	546	80（67, 93）	610
东北	127（113, 147）	348	60（47, 80）	290	80（67, 100）	361
西北	160（120, 200）	127	80（33, 120）	105	20（-27, 67）	94
西南	167（140, 200）	100	113（80, 147）	98	107（73, 140）	106
总（95% 置信区间）	120（107, 127）	1214	67（53, 73）	1039	80（73, 87）	1171
异质性	P<0.0001		p= 0.02		p= 0.04	
整体效应检验	P<0.00001		P<0.00001		p<0.00001	

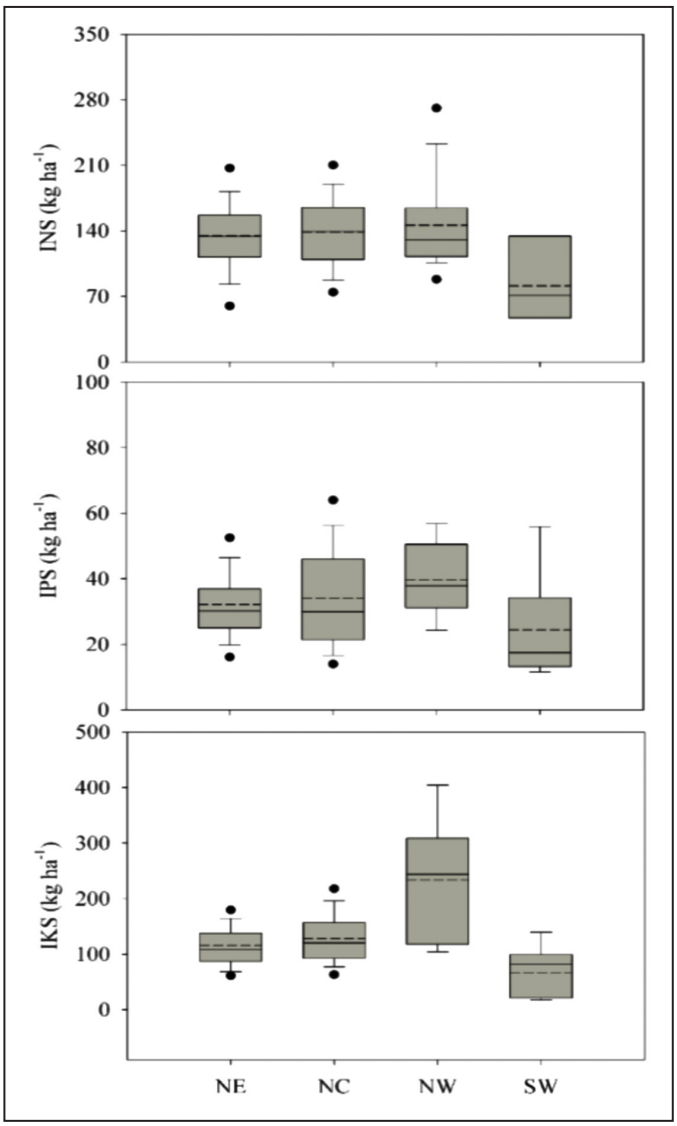

图 3 不同地区玉米土壤基础养分供应；INS、IPS 和 IKS 分别代表土壤基础 N、P 和 K 供应。

注：中间实线和虚线分别代表中值和均值，方框上下边缘分别代表上下 25%，上下帽子分别代表 90% 和 10% 的数值，实心圆圈分别代表 95% 和 5% 的数。

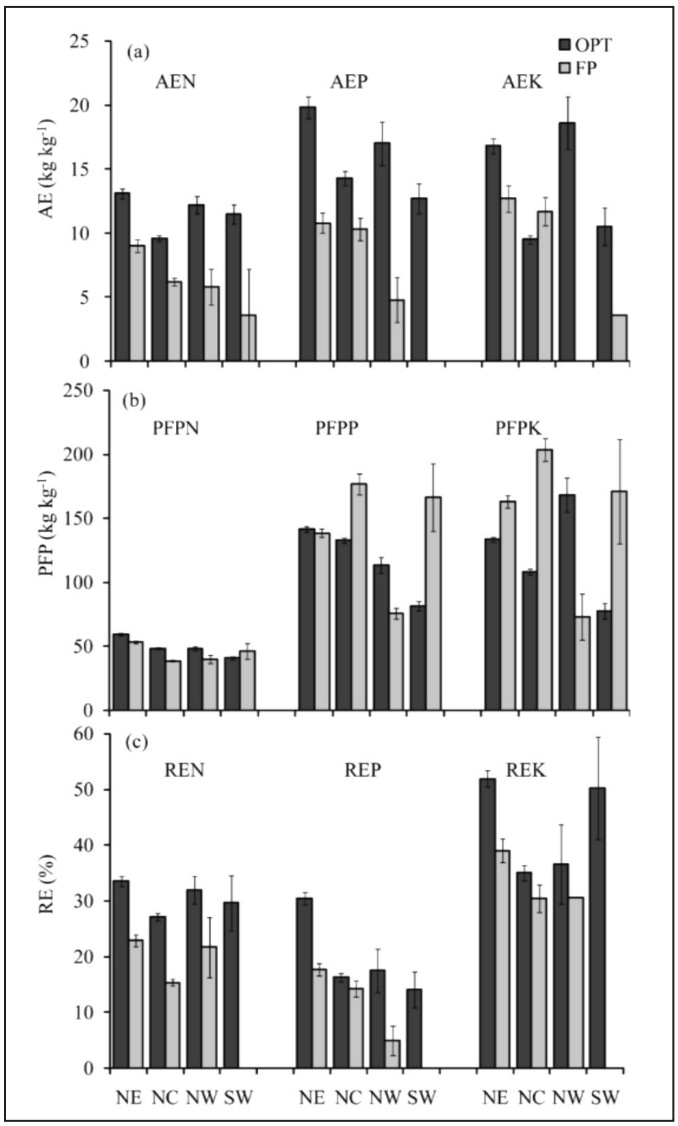

图 4 不同地区玉米优化处理（OPT）和农民习惯措施（FP）下的农学效率（AE）、偏生产力（PFP）和养分回收率（RE）

注：误差线为标准误。

3.3 不同管理措施下养分利用率的变化

就所有试验点而言，OPT 处理的平均 N 和 P 的 AE 显著高于 FP 处理，分别高 3.9 和 5.8 公斤 / 公斤，但 K 的 AE 差异较小（P=0.2823）（图 4A）；OPT 处理（51.6 公斤 / 公斤）的 PFPN 显著高于 FP 处理（43.3 公斤 / 公斤，n=884）（图 4B），而 OPT 处理的 PFPP 和 PFPK 低于 FP 处理，分别降低了 23.0 和 62.5 公斤 / 公斤；OPT 处理的平均 REN、REP 和 REK 显著高于 FP 处理，分别增加了 12.2、5.5 和 6.5 个百分点（图 4C）。

不同地区 OPT 与 FP 处理间养分利用率存在很大差异。较高氮肥施用量和不合理的管理措施（比如一次性施肥）是导致 FP 处理氮素利用率低的主要原因。对于 FP 处理而言，氮肥施用量高于 12 公斤 / 亩的数据点占到了总数据点的 79.8%。在一些地区较低的磷肥施用量导致了较高的 PFPP，比如在 NC 地区 52.7% 的农民施用磷肥量低于 2.7 公斤 / 亩。较低的钾肥施用量导致 FP 处理的 AEK 接近 OPT 处理（图 4A），且具有较高的 PFPK（图 4B），FP 处理的钾肥施用量低于 3 公斤 / 亩的数据点占到了总数据点的 55.1%，但是 OPT 处理与 FP 处理相比较有较高的 REP 和 REK。

4 讨论

量化玉米可获得产量和产量差对地区、国家乃至全球粮食安全、环境保护及研究和制定农业政策是必要的[5, 27]。本研究中，产量差不断缩小主要是由于农民使用先进

的技术与高量化肥的投入，导致了较高的 FP 产量和 CK 产量（图 2）。缩小 YA 与 YF 间的产量差对保障粮食安全是非常重要的，然而与 YA 相比，YF 仍然较低，因为 YA 是在田间或试验站的试验条件下应用最佳的管理措施，如新的作物品种、先进的耕作技术、以及优化的草害和病虫害防治等，可以获得的最大产量，而农民并没有完全采用这些管理措施。此外，产量差与灌溉、技术可操作性、市场影响、农业劳动力和市场走向有显著相关性 [28]。

尽管 OPT 和 FP 处理下玉米获得了较高产量，但与一些研究相比较仍然存在很大的差距。比如，本研究中的 YF 与 YA 分别只能达到 Chen 等人研究所得到潜在产量（1007 公斤 / 亩）的 59% 和 64%[22]。将作物养分需求规律与来自土壤、环境、施入土壤中的养分保持同步能够显著的提高产量 [6, 22]。气候、土壤以及轮作制度的差异导致了我国不同地区 YA 的变异性。此外如播种日期、播种量、栽培模式、水分以及作物管理也导致了实际产量的显著差异，进而导致了不同区域间产量差的变异 [27]。如果这些措施能够很好得到实施，YA 与 YF 间的产量差将进一步缩小。

化肥的合理施用有助于缩小产量差，而较高的施肥量会导致较高的土壤基础养分供应 [6, 9, 14]。本研究中 INS 和 IPS 明显高于 Liu 等人研究的我国 1985–1995 年间的数据（INS 5.1 公斤 / 亩，IPS 1.1 公斤 / 亩）[29]。本研究中较高的 INS 和 IPS 与前茬作物的长期过量施肥密切相关 [13, 19, 30]。INS 与 IPS 分别占到了地上部干物质中 N 与 P 吸收的 73.1% 和 84.4%。

在农业生产中需要维持作物产量、减小化肥向环境中流失以及提高养分利用率间的平衡。养分利用率一直是科研人员以及政府部门重点关注的对象，一些农学指标常常用于评价养分利用率 [18, 31]。在我国农民习惯措施中过量或不平衡施肥（如一次性施肥）是非常常见的，较低的氮素利用率也是很普遍的 [32]。本研究 OPT 处理中平均的 REN 和 AEN 仍然低于其他人的研究 [18, 29, 33]。为满足粮食需求，到 2025 年氮肥消费仍需要缓慢的增长，而全球的 PFPN 需要每年平均增加 0.1%–0.4%[34]。许多研究表明如果农民采用新的氮肥管理技术其 REN 可以增加 30%–50%[35, 36]。

本研究中，与 FP 处理相比，OPT 处理有较高的磷素和钾素利用率，OPT 处理的平均 REP（21.2%）和 REK（40.8%）接近 Dobermann 等人建议的利用率 [18]。玉米磷肥与钾肥的管理已有诸多研究 [32, 37]，基于土壤测试和作物的方法已经广泛地应用在磷肥与钾肥管理指导中 [12, 14, 38]。然而我国很多地区存在着磷肥与钾肥不平衡施用现象，具有较低的养分利用率。例如，在 NE 地区磷肥施用量较高，NC 地区施用量非常低，而这四个区域 FP 处理钾肥施用量普遍较低。在我国 NE 和 NW 地区，由于冬季温度较低作物秸秆很难腐解，导致 K 出现了严重的负平衡 [39]。磷肥和钾肥管理的基本要求是保持土壤 – 作物系统的可持续性。因此，其它的农业管理策略如轮作、耕作、水分管理等等也需要与养分管理措施相结合从而保证较高的产量和养分利用率，促进我国农业的可持续发展。

在我国对于提高玉米产量和养分利用率仍有很大的空间。然而许多因素如小农户经营导致土壤基础养分供应、产量差和养分利用率间存在很大异质性，如何管理这些差异，对于建立优化的管理措施，实现可持续地提高玉米产量、经济效益、养分利用率和保护环境都是必不可少的。与此同时，对农民进行培训以增加农民的农业知识，田间试验示范以及社会资金对于保证优化管理措施的采用和传播是必需的。因此，获得经济活力、环境健康、农民可接受以及政策体系间的平衡是非常重要的，这可能对于我国小规模农户生产体系是一个困难且漫长的过程，但非常具有前景的。

参考文献（略）

参见英文版：Xu X, Liu X, He P, Johnston AM, Zhao S, Qiu S, et al. (2015) Yield Gap, Indigenous Nutrient Supply and Nutrient Use Efficiency for Maize in China. PLoS ONE 10(10): e0140767. doi:10.1371/ journal.pone.0140767