区域尺度中国玉米可获得产量和肥料需求空间变异研究

徐新朋　何　萍*　张佳佳　Pampolino M.F.　Johnston A.M.　周　卫*

了解中国当前玉米主产区在区域尺度和国家尺度上的可获得产量、土壤养分供应能力和肥料需求特征对政策、研究以及投资决策的制定至关重要。本研究收集了2001–2015年中国玉米主产区大量的田间试验（n=5893），结合地理信息系统和玉米养分专家系统研究可获得产量、相对产量（RY）和肥料需求的空间分布特征。结果得出，就所有数据点而言，可获得产量具有较强的空间变异性，变异系数为25.5%。绘制RY的空间变异性得出，分别有85.3%、79.3%和72.5%的氮（N）、磷（P）和钾（K）的RY分别位于0.68–0.87、0.83–0.95和0.84–0.94之间。华北平原的RY高于其他地区。RY可以揭示土壤基础养分供应能力，并且已应用到玉米养分专家系统中用于计算肥料需求。总体而言，N、P和K的肥料需求有很强的空间异质性，变异系数分别为19.5%、31.6%和35.0%，其中位于150–210千克N/公顷、50–90千克P_2O_5/公顷和50–110千克K_2O/公顷的分别占到了全部研究区域的72.0%、81.7%和81.5%。2010–2014年10省605个田间试验得出，与农民习惯施肥相比，玉米养分专家系统不仅降低了31.6%的氮肥和15.5%的磷肥，而且提高了3.3%的产量。将推荐施肥系统和地理信息系统与大型数据库相结合对于研究和确定田块和区域尺度上肥料需求的变异性提供了一种有效的工具，有助于更加有效的进行肥料养分管理。

1　前言

作物产量在过去几十年里随着施肥量的增加、作物品种的改善以及农业管理措施的提升在不断增加（Mueller等，2012；Chen等，2014）。然而，进一步增加潜在产量仍面临着诸多挑战，如化肥成本增加、土壤质量退化、耕地面积减少、以及空气及水体污染增加等（Ju等，2009；Guo等，2010）。过量或不平衡施肥导致了利用率降低及环境污染等，并且对粮食安全、生态环境和农业可持续发展构成很大威胁（Zhang等，2013；Chen等，2014）。

优化养分管理措施作为应对这些问题的有效方法之一，在提高肥料利用效率和增加作物产量方面发挥了重要作用。施肥量很大程度上依赖于土壤养分，然而由于作物生长条件、土壤和作物管理措施以及气候的差异导致了土壤基础养分供应和作物对养分施入后的反应存在很大差异（Simmonds等，2013；He等，2015），这就要求发展基于土壤和作物信息管理技术去管理这种异质性，从而增加作物产量和养分利用率。为应对这种挑战，发展了基于土壤测试的优化养分管理技术（He等，2009），然而，基于土壤测试的推荐施肥仍然存在一些局限性，如需要消耗大量的人力、物力和财力，且土壤测试值与土壤基础养分供应间的相关性不高（Dobermann等，2003）。

施入土壤中的养分最终将被作物吸收并在作物产量上得到体现，因此，应用地上部作物反应来量化作物养分需求的养分管理策略是有效的。许多作物产量反应模型已经用于估测最佳养分用量，如肥料效应函数法（Greenwood等，2001；Sonar and Babhulkar，2002），基于产量反应和土壤养分关系推荐施肥（Bélanger等，2000；Cui等，2008a）等。土壤基础养分供应决定产量反应，且二者呈负相关，产量反应可以反应土壤养分供应状况，并用于推荐施肥指导（Xu等，2014a）。

玉米是我国种植面积最广的粮食作物，在保证我国粮食安全上发挥了重要作用。然而，集约化的玉米生产系统也面临着低生产力和低养分利用率等问题。过量和不平衡施肥导致了很多农户的氮肥回收率不足30%（He等，2009；Xu等，2014b），导致农民获得的产量往往低于应用当前优化的作物养分管理措施可以获得的产量（Chen等，2011；Men克等，2013）。地毯式的大面积推荐施肥存在很大局限性，这就需要一种新的综合养分管理方法。地统计学在土壤和作物实地养分管理方面发挥了重要作用（Robertson等，2008；Simmonds等，2013），基于半方差模型和克里格差值方法，可以绘制空间变异图并分析土壤和作物产量的时空变异特征（Wang等，2009；Tsirulev，2010）。

从区域角度出发研究玉米养分需求将有助于避免资源浪费、保证粮食安全和保护生态环境。当前依据个别试验点进行地毯式的大面积推荐施肥已不能满足当前集约化农

业生产的需要。因此，迫切需要建立一种基于大量田间试验的区域推荐施肥方法。本研究的目标是：（1）分析当前玉米产量分布特征；（2）绘制相对产量空间分布；（3）建立区域尺度推荐施肥方法；并（4）进行田间验证。

2 材料与方法

2.1 研究区域及数据

研究区域位于我国玉米主产区，根据地理特征、气候条件和试验点分布划分为五个区域，分别为：东北、西北、西南、华北以及长江中下游地区。春玉米和夏玉米在研究区域都有种植，春玉米主要是玉米单做，主要位于东北和西北地区，夏玉米主要位于其他区域，与小麦、油菜、玉米等作物轮作。春玉米数据主要包括吉林、辽宁、黑龙江、山西、甘肃、新疆等种植区，夏玉米数据主要包括河北、河南、山东、山西、安徽等种植区。试验点的分布几乎覆盖了中国主要玉米种植区域，遍布于 22 个省（自治区、直辖市），涵盖了不同气候类型和农艺措施。

收集和汇总 2000–2015 年中国玉米种植区的田间试验，这些试验来自于国际植物营养研究所（IPNI）中国项目部、同行在期刊中已发表的学术文章，以及博士和硕士学位论文共计 5893 个田间试验。试验点涵盖了中国玉米主产区春玉米和夏玉米不同种植类型。试验包括品种试验、肥料量级试验、养分限制因子试验及长期定位试验等。所收集的玉米数据处理包括优化养分管理处理、减氮处理、减磷处理、减钾处理、空白处理、农民习惯施肥措施处理，以及基于农民习惯施肥措施的减素处理等。数据点分布见图 1。

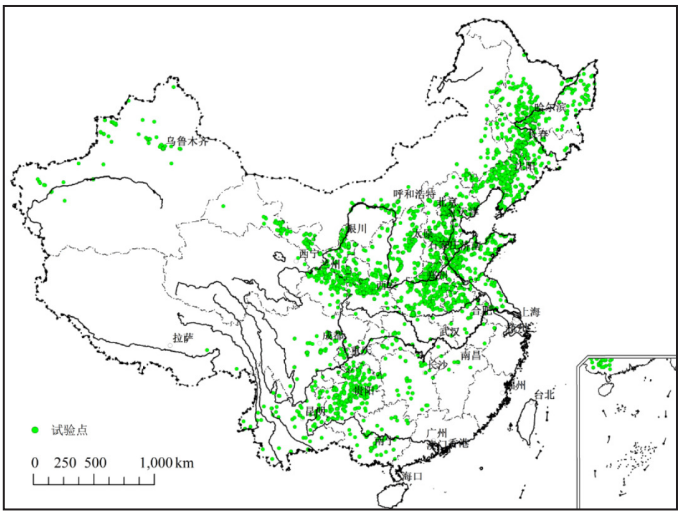

图 1 玉米数据点分布

2.2 推荐施肥及数据分析

采用基于陆地生态系统的光学遥感影像确定土地覆盖分类系统，得出旱地、水浇地和水田种植田块。采用 Nutrient Expert（NE）系统软件对每一个试验点进行推荐施肥，氮、磷和钾施用量分别为 N、P_2O_5 和 K_2O 施用量。NE 系统是在汇总过去十几年在全国范围内开展的肥料田间试验的基础上，建立了包含作物产量反应、农学效率及养分吸收与利用信息的数据库，依据土壤基础养分供应、作物农学效率与产量反应的内在关系，以及具有普遍指导意义的作物最佳养分吸收和利用特征参数，建立了基于产量反应和农学效率的推荐施肥模型。对于氮肥推荐，主要依据作物产量反应和农学效率的相关关系获得，并根据地块具体信息进行适当调整；而对于磷肥和钾肥推荐，主要依据作物产量反应所需要的养分量及补充作物地上部移走量所需要的养分量求算。对于中微量元素，主要根据土壤丰缺状况进行适当补充。该方法还考虑了作物轮作体系、秸秆还田、上季作物养分残效、有机肥施用、大气沉降、灌溉水等土壤本身以外的其他来源养分。基于以上养分管理原则，应用计算机软件技术，把复杂的施肥原理研发成了方便科研人员和农技推广人员使用的养分专家系统。NE 系统采用问答式界面，只需按照操作流程回答几个简单的问题，系统就能给出基于用户地点信息的个性化施肥方案。NE 养分专家系统采用“4R”养分管理原则，可以帮助农户在施肥推荐中选择合适的肥料品种和适宜的用量，并在合适的施肥时间施在恰当的位置，并考虑了施肥的农学、经济和环境效应。该方法在有和没有土壤测试的条件下均可使用。

使用 GS+5.3 和 ArcGIS 9.3 软件，采用半方差模型和克里格插值法绘制产量反应、相对产量和肥料施用量分布图。半方差模型通过 GS+ 软件进行交叉验证而确定，而 ArcGIS 9.3 软件则使用克里格插值对每一个参数进行空间插值。对于没有数据的位置则由附近位置观测值的加权平均值估算。

3 结果

3.1 可获得产量空间分布

对玉米试验可获得产量数据进行空间插值得出，产量具有明显的空间分布特征，从南到北呈逐步增加趋势，这主要与轮作系统有关。华北平原、长江中下游以及西南地区东南部主要以一年两熟的夏玉米为主，而东北以及西北

地区主要以一季春玉米为主。生长周期长、有效积温高和昼夜温差大是东北和西北地区玉米产量高的主要原因。

就平均值而言，所有试验点的可获得产量为 9.9 吨 / 公顷，变异系数为 25.5%。东北、华北、西北、西南和长江中下游地区的平均可获得产量分别为 10.7、9.6、10.5、8.7 和 8.6 吨 / 公顷，变异系数分别为 21.0%、22.6%、30.3%、25.7% 和 28.6%（图 2）。可获得产量位于 8–10 吨 / 公顷的占到了全部研究区域的 37.9%，主要位于华北地区、长江中下游地区北部以及东北地区北部。可获得产量位于 10–12 吨 / 公顷的占到了全部研究区域的 23.5%，主要分布于东北黑土带、华北地区中部以及西南地区的西南部。而在西北地区，例如甘肃中部和西北部、以及新疆大部分地区的可获得产量大于 12 吨 / 公顷，新疆部分区域的可获得产量甚至大于 15 吨 / 公顷。在所有研究区域中，有 8.8% 的研究区域的可获得产量位于 12–14 吨 / 公顷，可获得产量大于 14 吨 / 公顷的占到了全部研究区域的 5.7%。然而，可获得产量小于 8 吨 / 公顷的占到了全部研究区域的 24.1%，主要位于华北地区南部、长江中下游北部以及四川盆地。

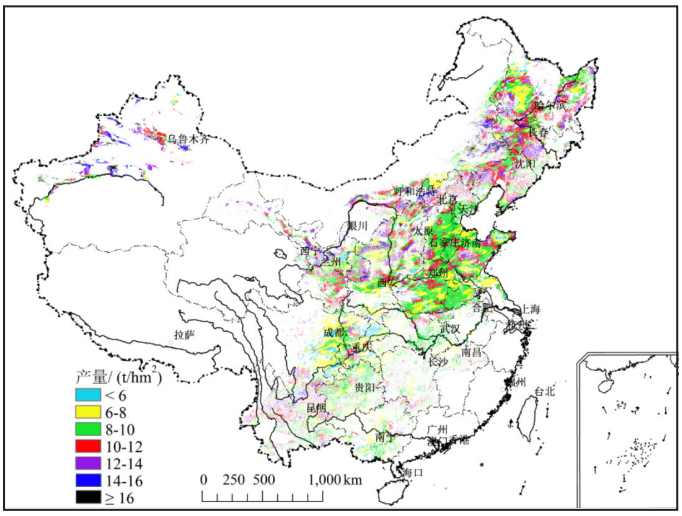

图 2 玉米可获得产量空间分布

3.2 相对产量空间分布

相对产量由产量反应和相对产量计算而得，并用于表征土壤养分供应能力或土壤肥力。高的相对产量意味着高的土壤养分供应能力。就全部研究区域而言，N、P 和 K 的平均相对产量分别为 0.77、0.88 和 0.88，变异系数分别为 17.0%、12.2% 和 12.0%。

东北、华北、西北、西南和长江中下游地区的 RYN 的变异系数分别为 8.3%、8.6%、12.5%、12.8% 和 8.9%（图 3）。大部分研究区域的 RYN 位于 0.68–0.79 之间，占全部研究区域的 66.1%。而位于 0.79–0.87 间的 RYN 占到了全部研究区域的 19.2%，主要位于华北地区中部。RYN 位于 0.60–0.68 间的占到了全部研究区域的 11.7%，主要位于西北地区，如甘肃、青海和宁夏。而较低的 RYN（<0.60）占到了全部研究的 2.3%，主要位于西南地区的东部。而 RYN 大于 0.87 的占到了全部研究区域的 0.7%。

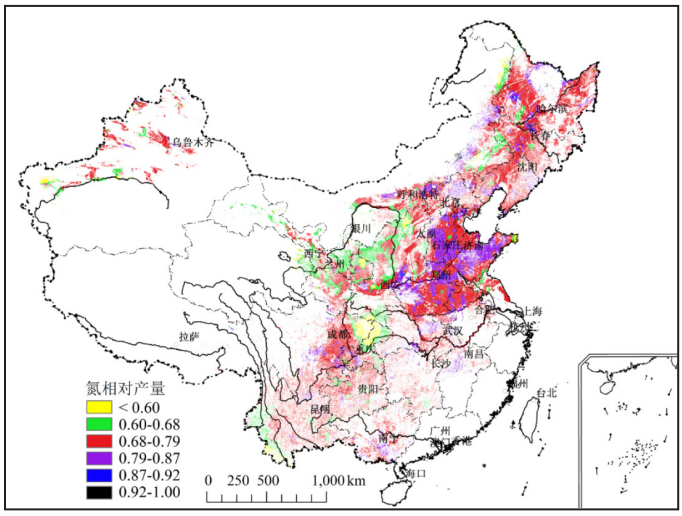

图 3 玉米氮相对产量空间分布

RYP 具有明显的空间分布特征（图 4）。RYP 位于 0.83–0.89 间的占到了全部研究区域的 44.8%，在各个区域都有分布。位于 0.89–0.95 间的占到了全部研究区域的 34.5%，主要位于东北和华北地区。高的磷肥施用历史导致了高的 RYP，大于 0.95 的占到了全部研究区域的 3.1%，主要位于华北地区中部。低的 RYP 主要位于西北地区和西南地区东部，其中有 15.0% 研究区域的 RYP 位于 0.75–0.83 之间，而 RYP 小于 0.75 的仅占到了全部研究区域的 2.6%。

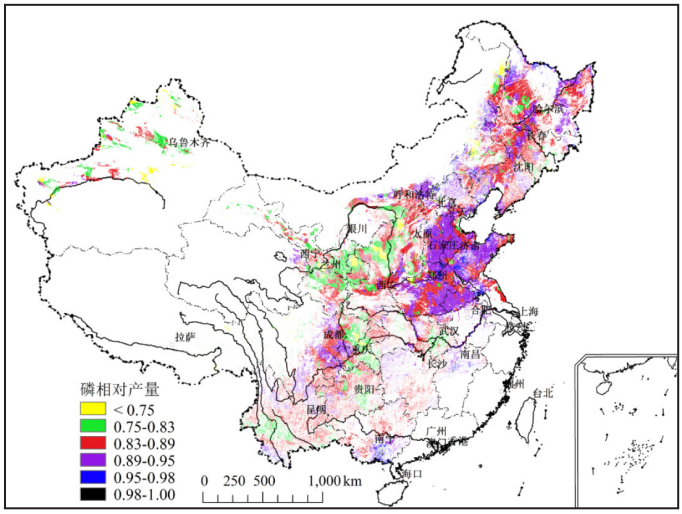

图 4 玉米磷相对产量空间分布

RYK 具有明显的空间分布特征（图 5），位于 0.84–0.90 间的占到了全部研究区域的 49.5%，主要位于东北地区中部，华北大部分地区和西南地区。RYK 位于 0.90–0.94 间的占到了全部研究区域的 23.0%，而大于 0.94 的占到了全部研究区域的 5.3%，主要位于华北中部地区。西北地区的大部分区域，钾肥施用效果超过 15%。在所有研究区域中，钾肥施用效果大于 16%（RYK 小于 0.84）的占到了 22.2%。

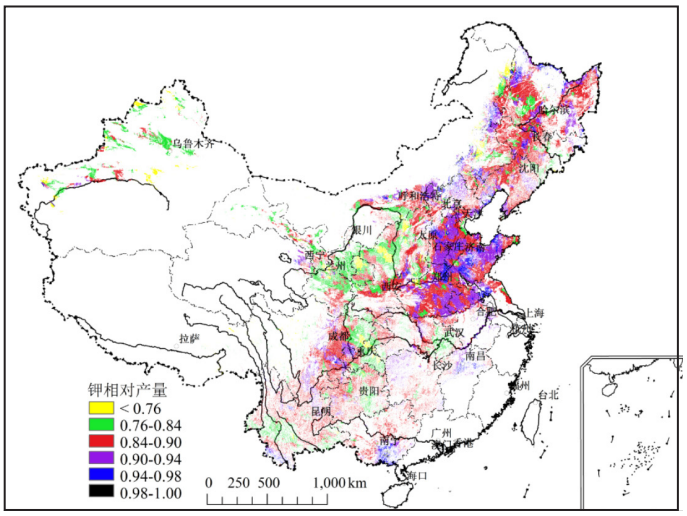

图 5 玉米钾相对产量空间分布

3.3 施肥量空间分布

施氮量的空间分布显示，施氮量在地区间具有较强的空间变异性，变异系数为 19.5%（图 6）。在所有研究区域中，有 42.9% 的施氮量位于 150–180 千克 / 公顷，主要位于东北和华北地区、西南地区中部和西北地区东部。而施氮量位于 180–210 千克 / 公顷的占到了全部研究区域的 29.1%。西北地区由于其具有较高的可获得产量和较低的氮相对产量使得该地区许多区域的施氮量大于 210 千克 / 公顷。而在一些地区施氮量小于 150 千克 / 公顷即可满足作物需求，占到了全部研究区域的 17.5%，主要位于华北地区中部，东北地区北部和西南地区的四川东部。然而在一些高产地区，需要较高的施氮量（>210 千克 / 公顷），主要位于华北中部和西北地区的新疆。

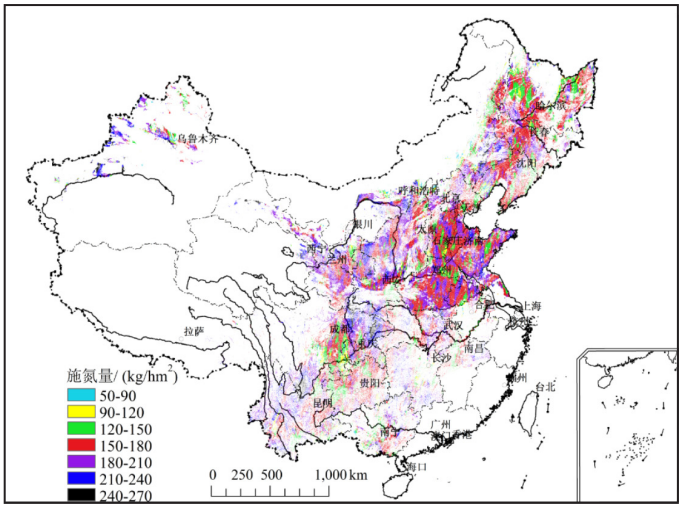

图 6 玉米施氮量空间分布

施磷量在地区间具有较强的空间分布特征，变异系数为 31.6%（图 7）。春玉米种植区的需磷量大于夏玉米种植区。施磷量位于 50–70 千克 / 公顷间的占到了全部研究区域的 49.9%，主要位于华北地区、长江中下游地区、西南地区北部和东北地区北部。施磷量位于 70–90 千克 / 公顷间的占到了全部研究区域的 31.8%，主要位于东北、华北地区西北部和西南地区南部。而施磷量大于 90 千克 / 公顷的占到了全部研究区域的 11.1%，主要位于西北地区。需要注意的是需磷量小于 50 千克 / 公顷的占到了全部研究的 7.2%，主要位于华北地区南部和长江中下游地区北部，以及四川中部。

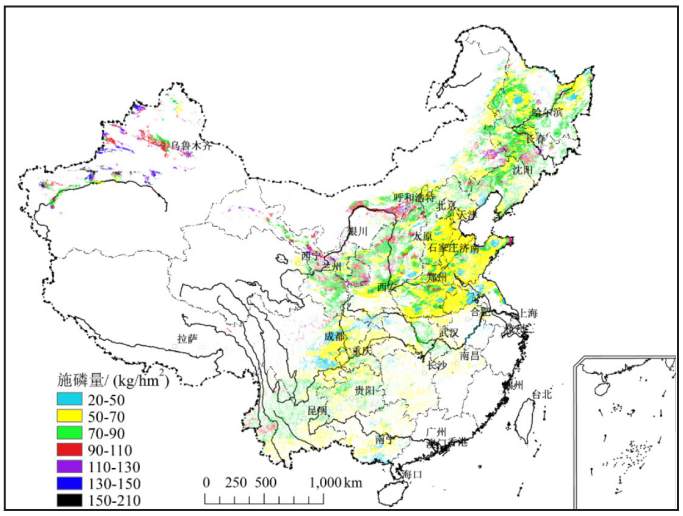

图 7 玉米施磷量空间分布

施钾量在地区间同样具有较强的空间变异性，变异系数为 35.0%（图 8）。东北、华北、西北、西南和长江

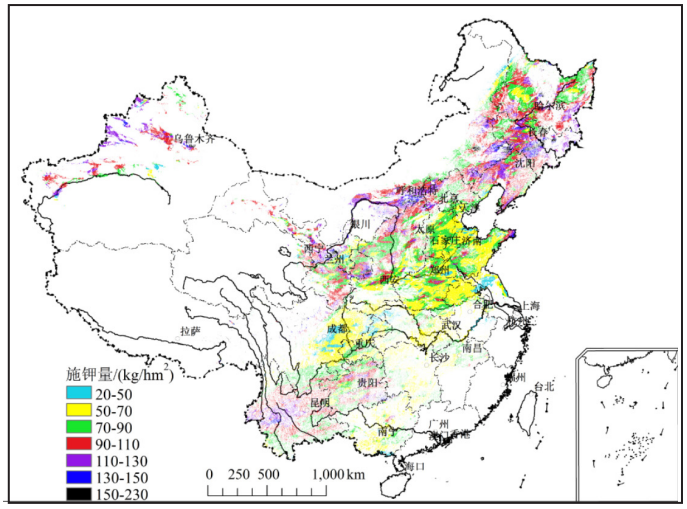

图 8 玉米施钾量空间分布

中下游地区的变异系数分别为 27.4%、30.6%、36.2%、39.2% 和 31.6%。华北地区中部、长江中下游中部、以及西南地区北部的需钾量低于其它地区，大部分位于 50–90 千克 / 公顷，占到了全部研究区域的 57.8%。需钾量位于 90–110 千克 / 公顷的占到了全部研究区域的 23.7%，主要位于东北地区、西北地区南部和西南地区南部。而在所有研究区域中，有 13.8% 的需钾量大于 110 千克 / 公顷，主要位于东北和西北地区，而在新疆一些地区的需钾量甚至超过 150 千克 / 公顷。然而，仅有 4.7% 的研究区域的需钾量小于 50 千克 / 公顷。

3.4 田间验证

于 2010–2014 年共开展了 605 个玉米田间试验验证玉米养分专家系统的可行性。试验涵盖了 10 个省份，位于东北（黑龙江、吉林和辽宁），华北（河北、河南、山东和山西），西北（宁夏），西南（云南）和长江中下游（安徽）。与农民习惯施肥相比，应用养分专家系统的春玉米和夏玉米产量分别增加 0.6 和 0.2 吨 / 公顷，增长率分别为 5.7% 和 1.7%，氮肥施用量分别减少了 25.8% 和 34.7%，磷肥施用量分别降低了 27.3% 和 3.6%，但钾肥施用量分别增加了 29.6% 和 63.2%（图 9）。

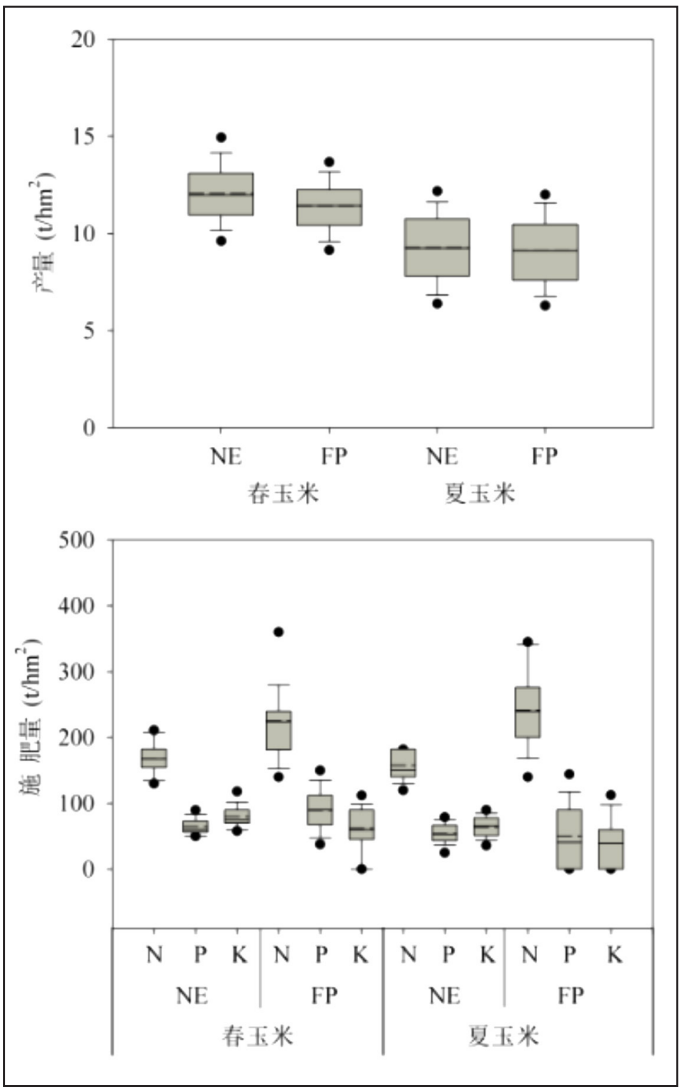

图 9 不同处理下产量和施肥量

4 讨论

我国的粮食产量必须保持持续增长，以满足未来粮食需求和有限资源的竞争。应用以往的田间试验数据从区域和国家尺度估测可获得产量将为政策制定、科学研究以及投资决策提供信息（Van Ittersum 等，2013）。就我国整体而言，通过改良水稻品种、优化土壤与养分管理、以及提高病虫草害防控，玉米产量与农民习惯措施相比提高了 10%（Xu 等，2015）。Meng 等人（2013）使用 137 个田间试验的数据得出平均可获得产量为 12.3 吨 / 公顷，而农民平均产量仅为 7.4 吨 / 公顷。本研究中可获得产量仅为 Chen 等（2011）研究的潜在产量（15.1 吨 / 公顷）的 65%，而在理想状态下，可获得产量应该达到潜在产量的 80%（Setiyono 等，2010）。然而，在 1980–2008 年期间有 32.4% 玉米产区的产量停滞不前（Tao 等，2015）。为分析可获得产量的空间变异性，需要长期的多点试验以及当前可获得产量的地理分布，以便减少估测偏差和变异系数，特别是雨养地区（（Lobell 等，2009；Van Ittersum 等，2013）。当前研究中，各区域间的可获得产量差异较大，变异系数为 25.5%，春玉米种植地区（东北、西北、西南和华北北部）的可获得产量要高于夏玉米种植区（华北平原、长江中下游以及西南地区的东北部）。气候和轮作制度的差异是导致产量区域分布差异的主要控制因素。例如，东北和西北地区的春玉米生育期比华北和长江中下游的夏玉米种植区长 40–50 天，并且较高的昼夜温差也有助于物质累积。

许多研究表明，田间试验与农民习惯措施间的产量差主要是因为农民的作物管理措施效率低下（He 等，2009；Zhang 等，2011；Meng 等，2013）。Meng 等（2013）研究发现我国有 63% 的农民过多或过少的施用氮肥。在进行推荐施肥时考虑相对产量十分重要，相对产量是由可获得产量和施肥后的产量反应获得（Pasuquin 等，2014）。相对产量可以用于表征土壤肥力水平，高的相对产量表示高的土壤养分供应能力（Xu 等，2014a）。在本研究中，华北地区的相对产量要高于其他地区，主要与该地区高施肥量和秸秆还田有关。在我国华北平原的小麦 – 玉米轮作系统中，农民的年施氮量可超过 500 千克 / 公顷，有些甚

至达到了 600 千克 / 公顷（Cui 等，2010），而磷的盈余量每年达到了 50 千克 / 公顷（Vitousek 等，2009），而秸秆还田则有助于提高土壤钾含量（Zhao 等，2014）。

化肥在保证粮食安全方面发挥了重要作用，自 20 世纪 90 年代以来，我国的肥料用量大幅增加（Fan 等，2012）。然而，过量施肥也导致了一系列的环境问题（Ju 等，2009）。总体而言，施入农田的肥料回收率低于 50%，其余大部分释放到环境中（Ju 等，2009；Zhang 等，2013）。我国的平均土壤 Olsen–P 含量由 1980 年的 7.4 毫克 / 千克增到了 2007 年的 24.7 毫克 / 千克（Li 等，2011）。而对全国 5406 个农民田地的调查结果显示，氮素盈余（输入 – 输出）达到了 72 千克 N/ 公顷（Chen 等，2014），而华北地区玉米播前 0–90 厘米土层的平均硝态氮含量达到了 190 千克 / 公顷（Cui 等，2008b）。因此，我国农业生产在增加产量同时降低环境污染方面仍面临巨大挑战。

通过平衡施肥和优化养分管理减少化肥投入，降低环境污染对于维持未来农业生产非常重要（Chen 等，2014；Wu and Ma，2015）。本研究中，有些地区的相对产量接近于 1，这意味着土壤中具有较高的土壤养分累积，导致了施肥后的低产量反应。许多试验表明在我国的小麦 – 玉米轮作系统中，最佳的经济氮肥施用量为 140–160 千克 / 公顷（Cui 等，2008b；Xu 等，2014b），而在一些高产区（产量在 12–14 吨 / 公顷）氮肥需要量则达到了 200 千克 / 公顷。在本研究中，就全部试验而言，与农民习惯施肥相比，基于玉米养分专家系统的推荐施肥不仅减少了 31.6% 的氮肥和 15.5% 的磷肥用量，并且增加了 3.3% 的玉米产量。Pampolino 等（2012）和 Pasuquin 等（2014）的研究结果显示，与农民习惯施肥相比，使用玉米养分专家系统在菲律宾、越南和印度尼西亚增加玉米产量 0.2–1.6 吨 / 公顷。而在我国在不降低玉米产量的前提下，可以节省 30% 的氮肥而实现氮素平衡并且降低环境风险。

近日，中国政府发布了关于到 2020 年通过限制化肥消费提高化肥利用效率的行动计划，随后启动了“国家重点研发计划”，开发高效肥料推荐方法，制定肥料施用限量标准。公众的期望是政府能够采取行动，明确政策方向以控制当前农民实际生产中化肥施用量的增加，甚至可以制定法律。根据作物产量反应绘制的土壤肥力分布特征，政府可以制定粮食产量和土壤肥力状况的综合审计和报告制度，规范化肥供应，在保证粮食产量的同时，提高资源利用效率并且保护环境。

当前大多数的推荐施肥策略依据的是对特定的地块或区域推荐一个平均肥料需求量或单一的施肥量。在区域水平上应用大量的田间试验形成玉米产量和肥料需求量的地理分布特征，有助于量化粮食生产能力并为投资决策提供信息（Van Ittersum 等，2013）。推荐施肥系统与地理信息系统相结合提供了一个有用的工具，可以确定不同田块或区域的肥料需求在空间上的变化差异。了解产量、土壤肥力和肥料需求的空间变异性能够指导技术开发，并有助于进行高效的肥料管理。然而，在制定优化养分管理策略并保持农业可持续健康发展，必须考虑诸如土壤类型、表层土壤厚度、水土保持能力以及农田坡度等等因素。

5 结论

以大量的田间试验为基础，结合地理信息系统和推荐施肥系统，分析了我国主要玉米产区可获得产量、相对产量以及肥料需求的空间变异性。结果发现，可获得产量和相对产量在区域内和区域间具有较大的变异系数，这与气候、轮作系统、肥料施用和管理有关。这些异质性在玉米养分专家系统中加以考虑并纳入作物管理策略，并在田块尺度上推荐施肥方面取得了成功。该方法是实现区域养分管理的重要一步，结合大量田间试验数据可以进一步完善该系统，并且有助于在区域尺度上精准的推荐施肥提供科学依据。然而，合理的推荐施肥方法还应包含每个地区的土壤和气候等详细信息，如微量元素供应强度和土壤持水能力，对气候变化的响应，以便更加精确的估测区域尺度上的养分需求实现最佳养分管理策略。如果实施得当，可以在农田、区域以及国家尺度上实现产量效益和降低环境成本的双赢。

参考文献见 Field Crops Research, 2017, 203:8–15.