

基于产量反应和农学效率的中国水稻推荐施肥方法研究

徐新朋 何萍* 杨富强 马进川 Pampolino M.F. Johnston A.M. 周卫*

摘要: 一种基于科学、可靠且低成本的肥料推荐方法对解决水稻由于不合理施肥带来的养分利用率低下和产量降低等问题是必要的。本研究收集了2000–2013年间中国水稻主产区的2218个田间试验,建立一种科学施肥原理并用于水稻的推荐施肥。本研究分析了产量反应(YR)、农学效率(AE)、相对产量(不施N或P或K处理的产量与NPK全施处理的产量的比值,R_Y)和土壤基础养分供应间的相互关系。就平均值而言,施N、P和K的YR分别为2.4、0.9和1.0 t/ha, N、P和K的AE分别为13.0、12.7和8.4 kg/kg。相对产量用于划分土壤基础养分供应等级,平均的N、P和K相对产量分别为0.71、0.89和0.89。产量反应和相对产量间呈典型的线性负相关,而产量反应和AE间呈二次曲线关系。各参数间的相互关系用于建立水稻养分专家支持决策系统(Nutrient Expert, NE),并开展田间试验进行优化和验证。随着对NE系统的不断优化,结果显示使用NE推荐施肥可有效提高产量和净效益。且结果表明,NE系统模拟的AEN与观测的AEN间具有良好的一致性,表明NE方法是一种具有应用前景的推荐施肥工具,并可以在中国应用。

关键词: 水稻, 产量反应, 农学效率, QUEFTS模型, 养分专家系统

1. 前言

水稻是世界上最主要的粮食作物之一,在世界粮食安全中发挥着至关重要的作用。改良的水稻品种、优化的水、土壤和肥料管理和改善的病虫草害防治使世界水稻产量从1984年到2014年增加了59%(FAOSTAT, 2014)。然而,仍然迫切需要保持和增加作物产量以满足人口不断增长的需求,到2030年,全球水稻产量需要增加7.711亿吨才能满足粮食需求(Van Nguyen and Ferrero, 2006)。

在保持生态系统完整性的同时,以经济可行的方式增加农业生产力的挑战是农业可持续发展的基本目标(Liang et al., 2013; Zhao et al., 2015)。截止到2014年,中国水稻种植面积达到了3080万公顷,水稻总产量达到了2.082亿吨,分别占世界水稻总播种面积和总产量的19%和28%(FAOSTAT, 2014)。

为了提高水稻产量,尤其是具有高产潜力的水稻品种,施用足量的养分是必要的(Mueller et al., 2012;



Wang et al., 2012)。然而,农民在施用肥料时通常在很长一段时间内或很大的区域内保持不变,而不是依据作物营养需求进行量身定制,这不仅导致了不平衡施肥,并且导致了肥料效率低下以及低回报率(Pampolino et al., 2007)。此外,过度或不平衡施肥,尤其是氮肥和磷肥,导致了低养分利用率(Qin et al., 2013),还导致了负面环境影响,如温室气体排放(Feng et al., 2013; Liu et al., 2015)、土壤退化和水污染(Guo et al., 2010; Reidsma et al., 2012)等。

优化养分管理是指导密集型水稻系统朝着更加集约化、多样化和可持续农业发展的关键因素之一。水稻养分管理面临的主要挑战是由于作物生产条件、土壤和作物管理以及气候方面的差异,导致土壤养分供应和施肥产量反应具有很大差异(He et al., 2015; Xu et al., 2016)。因此,需要提高对密集型土壤和作物管理技术的改进,以便根据个别地块的具体特征制定养分管理策略(Dobermann and White, 1999)。许多算法和方法在全球已被开发用于作物养分管理(Nhamo et al., 2014; Chen et al., 2015),如作物生长模型(Zhu et al., 2008; Das et al., 2009; Sattari et al., 2014),作物实地养分管理(Alam et al., 2006; Pampolino et al., 2007)。但是,在推荐施肥时应考虑特定地点的土壤养分供应能力和肥料利用效率的临界值。

一种科学、可靠、低成本且农民愿意使用的肥料推荐方法对于解决我国农民养分管理知识短缺问题是必要的。养分专家系统是国际植物营养研究所(IPNI)为解决这些问题而开发的施肥支持决策系统。养分专家系统根据产量反应、农学效率以及QUEFTS模型进行实地养分管理(Janssen et al., 1990; Xu et al., 2015)。产量反应和农学效率作为重要的参数已引入到小麦和玉米养分专家中进行推荐施肥(Chuan et al., 2013; Xu et al., 2014)。同样有必要开发一种动态的实地养分管理工具来提高我国密集型水稻系统的作物产量和养分利用效率。因此,本研究的目标是,(1)分析水稻主产区的水稻产量反应、农学效率和土壤基础养分供应;(2)构建水稻养分专家系统;(3)在中国水稻主产区布置田间试验对水稻养分专家系统进行验证。

2. 材料与方法

2.1 数据来源

数据来源于2000–2013年中国水稻种植区的田间和试验站试验,共计2218个田间试验,这些试验来自于国际植物营养研究所(IPNI)中国项目部以及同行在期刊中已发表的学术文章。试验点涵盖了中国主要的水稻种植区域,包含了不同气候类型、轮作系统、土壤肥力以及水稻品种;含有不同试验处理:优化施肥管理处理、农民习惯措施处理以及一系列基于这两个处理的不施某种养分处理,长期定位试验以及不同的肥料量级处理;包括生物质重、籽粒和秸秆N、P和K养分吸收等指标。

2.2 养分专家系统描述

作物施肥后的效果最终将在产量上得以体现,作物产量反应(施肥与不施某种肥料的产量差)、施肥量和养分利用率间存在着密切关系。随着施肥量的增加,作物产量反应呈二次曲线趋势变化,而养分利用率与产量反应具有相同的变化趋势。土壤基础养分供应可以采用不施某种养分地上部产量或者养分吸收表示(Dobermann et al., 2003a, 2003b),因此产量反应可以很好地表征土壤中某种养分在生育期内的供应状况,尤其是氮素。不施某种养分处理的产量越高,即较低产量反应,表明某种养分的土壤供应能力越高,相反,某种养分的产量反应越高,这种养分土壤基础供应能力就越低(Chuan et al., 2013b)。作物产量反应可以表征土壤的养分状况,而农学效率是评价施肥效应最为直接的手段。因此建立产量反应和农学效率间的内在联系可以为推荐施肥提供强有力的支撑,尤其是对在土壤-作物体系中比较活跃的氮素。而QUEFTS模型通过计算不同目标产量下的地上部和籽粒的养分吸收量为磷素和钾素的施肥推荐提供了有效手段(Buresh et al., 2010)。因此,利用强大的数据库将养分模型和推荐施肥原则相结合将是未来推荐施肥和养分管理的发展趋势。

在水稻养分专家系统中,氮肥推荐主要是依据氮素产量反应(目标产量与不施氮小区的产量差)和氮素农学效率确定,在有产量反应相关试验时可将产量反应数据直接填入系统,系统会根据已有的关系式进行氮肥推荐。在无氮素产量反应数据时,系统会依据相应的参数如可获得产量、土壤质地、有机质含量和土壤障碍因子等信息确定土壤肥力和相对产量,再由可获得产量得到产量反应,并计算氮肥施用量。

对于磷钾养分推荐,主要基于产量反应和一定目标产量下作物的移走量给出施肥量(施磷或施钾量=作物产

量反应施磷或施钾量 + 维持土壤平衡部分)，维持土壤平衡部分主要依据 QUEFTS 模型获得的养分最佳吸收量来求算。如果作物施肥不增产即产量反应为零时，则只考虑作物收获部分养分移走量。对磷钾肥料的推荐还考虑了上季作物养分残效，主要包括作物秸秆处理方式、有机肥施入及上季作物养分带入量等信息。

养分专家系统是在 SSNM 基础上应用 4R 原则结合 QUEFTS 模型计算最佳养分吸收，并依据产量反应和农学效率进行推荐施肥和养分管理的方法。其目的是充分利用农田的基础养分资源、提供合理的养分用量，避免作物对养分的奢侈吸收或不足，在保持土壤肥力的同时，使养分胁迫降到最低并最终达到获得高产、高效的目的。

2.3 田间验证

于 2013–2015 年在七个省布置了 211 个田间试验对养分专家系统进行田间验证（图 1），包括一季稻（吉林省和黑龙江省）、早稻和晚稻（江西省、湖南省和广东省）和中稻（湖北省和安徽省）。所有试验采用统一的标准化方案，每个试验布置六个处理，分别为农民习惯施肥措施（FP）、水稻养分专家系统推荐施肥（NE）、土壤测试（ST）、以及基于 NE 的减氮、减磷和减钾处理。

试验小区面积为 30m²，采用统一的管理措施，应用当地最佳的管理措施进行灌溉和病虫害防治。在 NE 处理中，所有的磷肥作为基肥一次性施入，如果钾肥施用量超过 60 kg K₂O/ha 时施两次肥，分别为基肥和孕穗肥，

否则一次性作基肥施入。氮肥分三次施用，基肥 30%、分蘖肥 35% 和孕穗肥 35%。基肥的肥料插秧前均匀撒在土壤表面，并与土壤混匀，追肥的肥料撒施后灌溉。在 FP 处理中，所有磷肥和钾肥都作为基肥，而氮肥的施用农民通常以不同比例两次施用。在 ST 处理中，所有磷肥和钾肥都以基肥施用，氮肥分两次施用，追肥时期为孕穗期，且基追比为 5:5。减素小区用于计算养分利用效率。各处理的施肥量见表 1。

在收获期，采集三个有代表性的 1m × 1m 的水稻确定秸秆和籽粒产量。将收获后的秸秆和籽粒在 60℃ 下烘 72 小时（直至达到恒重）用以测定干物质重；取部分秸秆和籽粒样品用于测定 N、P 和 K 含量，用于计算回收率、农学效率和偏生产力，并计算化肥成本和净效益（产量效益 - 肥料成本），以验证 NE 系统的农学和经济效益。使用 SPSS13.0 软件在 0.05 水平上对 NE、FP 和 ST 进行统计分析。

3. 结果与讨论

3.1 产量反应和相对产量

就所有数据而言，具有较高的 YRN，平均为 2.4t/ha，其中有 77.8% 的 YRN 位于 1.0–4.0t/ha。施用磷肥和钾肥的平均 YR 分别为 0.9t/ha 和 1.0t/ha，约有 80.5% 的 YRP 和 82.1% 的 YRK 低于 1.5t/ha（图 2）。氮素仍然是产量的首要限制因子，而结果也表明施用磷肥和钾

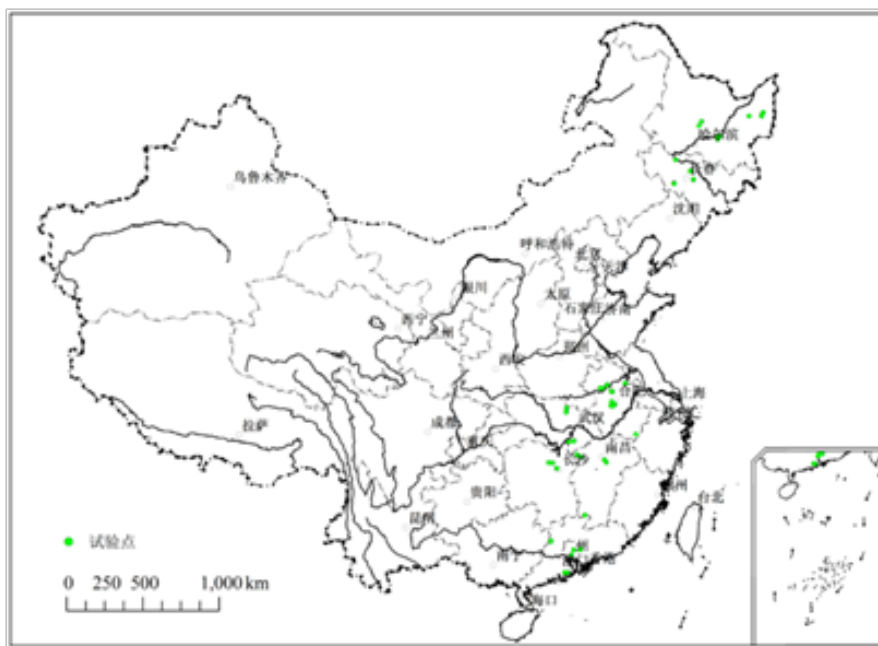


图 1 水稻田间试验点分布

表 1 早稻、中稻、晚稻和一季稻养分专家系统田间验证施肥量 (2013–2015)

水稻类型	省份	试验数	处理	施肥量 (kg/ha)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
早稻	湖南	48	NE	146 (133-170)	67 (35-90)	78 (38-150)
	广东		FP	152 (87-320)	56 (26-113)	87 (38-185)
	江西		ST	151 (120-180)	65 (45-90)	99 (67-135)
中稻	湖北	57	NE	157 (103-195)	68 (55-90)	77 (41-150)
	安徽		FP	191 (108-270)	62 (30-135)	79 (45-150)
			ST	182 (120-210)	66 (45-90)	95 (60-180)
晚稻	湖南	48	NE	152 (135-170)	68 (43-90)	74 (31-150)
	广东		FP	159 (79-342)	59 (26-135)	101 (37-225)
	江西		ST	163 (120-180)	59 (30-90)	105 (75-135)
一季稻	黑龙江	58	NE	167 (147-195)	71 (53-96)	86 (45-123)
	吉林		FP	165 (104-220)	67 (35-120)	80 (45-120)
			ST	158 (105-194)	56 (35-80)	84 (45-112)

NE: 养分专家系统; FP: 农民习惯施肥措施; ST: 测土施肥

肥的重要性。根据 Pearson 相关分析得出, 产量反应与土壤肥力相关, 并与土壤养分呈显著负相关 ($P < 0.05$) (Xu et al., 2016), 但产量反应也取决于气候、土壤特性以及前季作物养分残效等 (Pampolino et al., 2012)。

N、P 和 K 的 YR 与 RY 间呈显著线性负相关 (图 3), 其相关系数 (R^2) 分别达到了 0.845 ($n=1448$)、0.929 ($n=862$) 和 0.888 ($n=942$)。水稻平均 N、P 和 K 的 RY 分别为 0.71、0.89 和 0.89。RYN 低于 0.80 的占全部观察数据的 73.6%, 而 P 和 K 的 RY 高于 0.80 的

分别占全部观察数据的 87.0% 和 85.8% (图 4)。

3.2 农学效率与产量反应相关性

N、P 和 K 平均 AE 分别为 13.0、12.7 和 8.4 kg/kg, 所有观察数据中有 79%、70% 和 86% 的分别位于 5–20、0–15 和 0–15 kg/kg 范围内 (图 5)。农学效率高很大程度上取决于养分管理措施, 在高产年份结合好的养分管理措施, AEN 可以达到 15 kg/kg, 甚至可以达到 25 kg/kg (Buresh and Witt, 2007), 而 AEP 可以达到

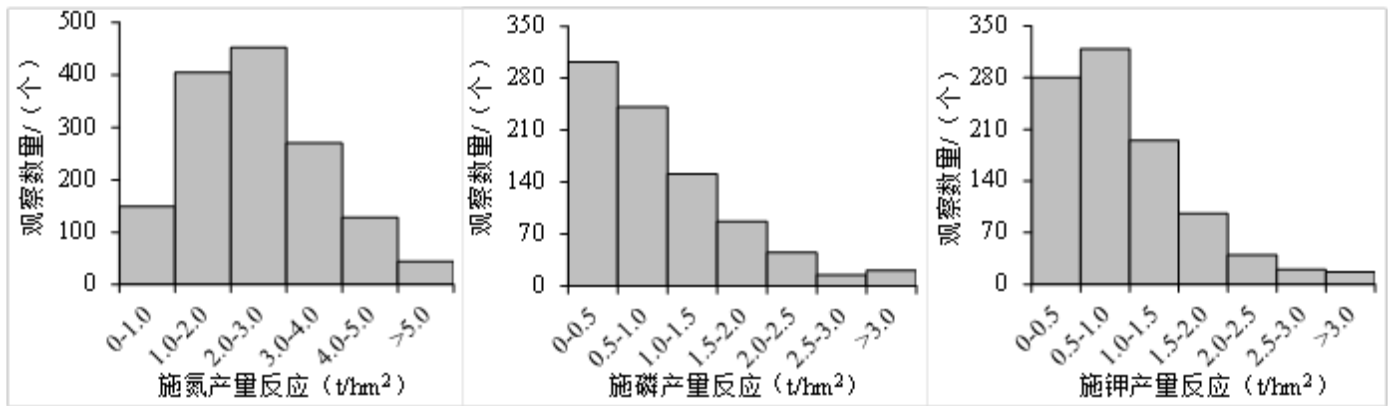


图 2 水稻 N、P 和 K 产量反应频率分布

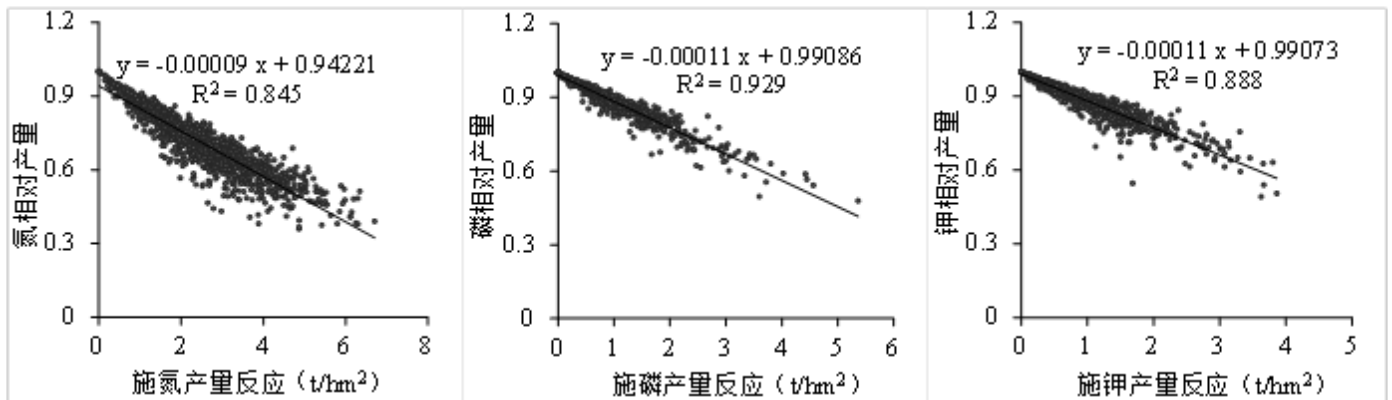


图 3 水稻产量反应与相对产量的关系

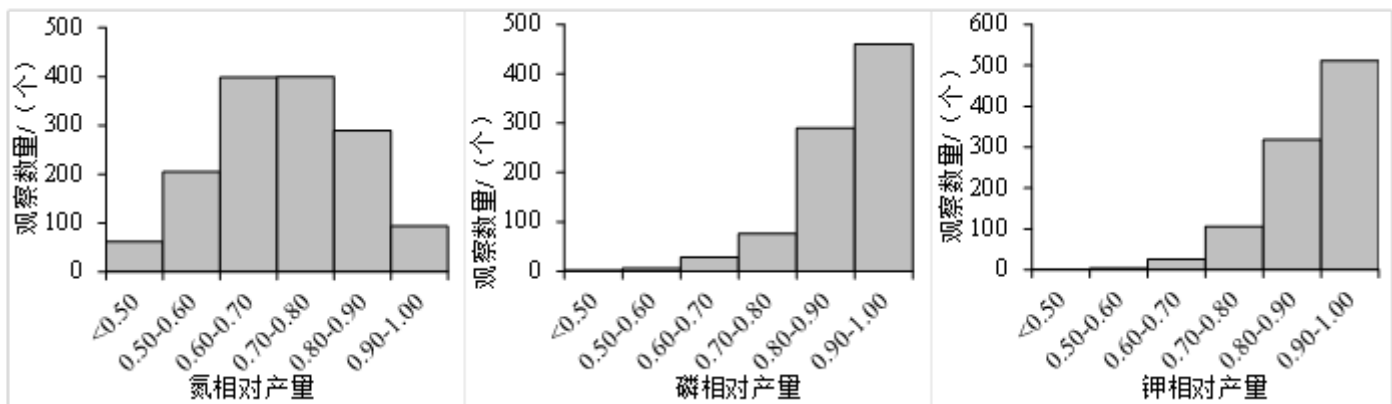


图4 水稻 N、P 和 K 相对产量频率分布

20–50 kg/kg (Dobermann et al., 2007)。提高养分利用效率仍然是中国要面临的主要挑战，因为当前大多数农民的管理措施不能做到将养分供应与作物养分需求保持一致 (Zhao et al., 2013; Sui et al., 2013)。对于特定地块或地区，养分限制的产量与可获得产量一样受气候的影响。产量反应和农学效率随着季节变化而变化，这就要求我们要依据不同季节和轮作系统进行动态推荐施肥。

作物产量随着养分吸收的不断增加会达到一个吸收阈值。因此，基础土壤养分供应可以用缺素小区的产量反应来确定。但是，单位粮食产量增加所需的化肥量也取决于化肥利用效率。因此，在推荐施肥时，这些数据对于建立产量反应与农学效率间的关系至关重要。本研究确定了产量反应和农学效率间的关系，呈二次曲线关系 (图6)，其关系式为：

$$AEN = -5E-07X_N^2 + 0.006X_N + 0.598 \quad (R^2 = 0.640, n = 1448, p < 0.001),$$

$$AEP = -9E-07X_P^2 + 0.014X_P + 0.340 \quad (R^2 = 0.686, n = 862, p < 0.001),$$

$$AEK = -7E-07X_K^2 + 0.009X_K + 0.321 \quad (R^2 = 0.663, n = 967, p < 0.001),$$

XN、XP 和 XK 分别表示 N、P 和 K 产量反应 (t/ha)。

3.3 土壤基础养分供应

确定和管理来自土壤和其他来源的养分是实现养分高效利用的重要途径。肥料施用量和养分平衡主要受产量目标和土壤基础养分供应的影响，而产量反应和相对产量与土壤基础养分供应相关 (Chuan et al., 2013; Xu et al., 2014)。基础土壤养分供应 (土壤肥力) 决定土壤基础产量，是建立推荐施肥和养分管理原则的重要指标。较高的土壤基础养分供应导致低的产量反应和较高的相对产量 (Xu et al., 2014)。当前研究中，平均的基础 N、P 和 K 养分供应分别为 91.3、27.5 和 135.9 kg/ha，变化范围分别为 29.6–204.3、6.8–68.4 和 43.6–307.2 kg/ha (图7)。基础土壤养分供应的频率分布表明 N、P 和 K 的分别有 38%、33% 和 36% 的高于 100、30 和 150 kg/ha。土壤中的基础养分供应大部分来自于土壤矿化、作物和肥料 (有机和无机) 残留、灌溉水和大气沉降。如，在太湖地区的大气沉降和灌溉水对农业系统的贡献达到了 89 kg N/ha (Ju et al., 2009)。

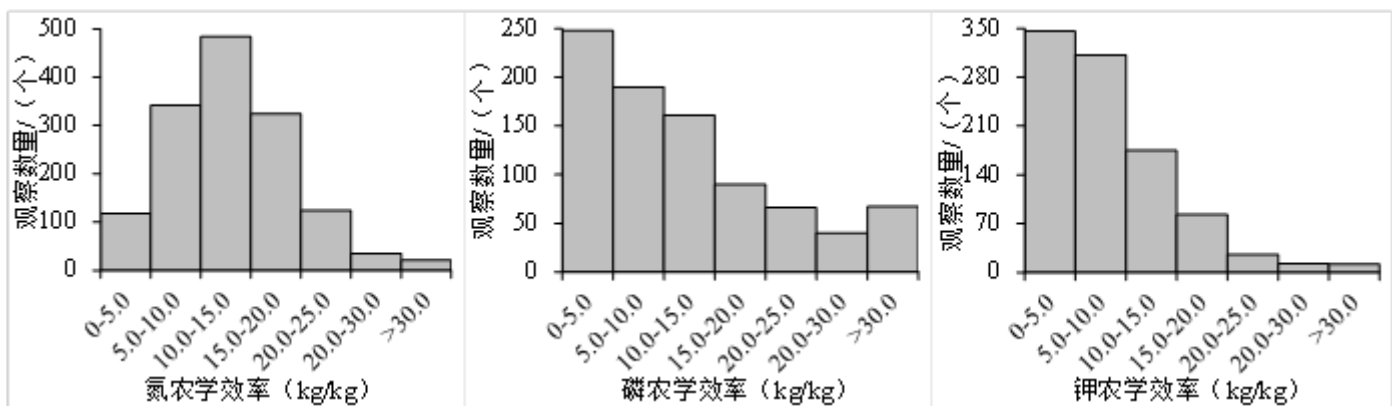


图5 水稻 N、P 和 K 农学效率频率分布

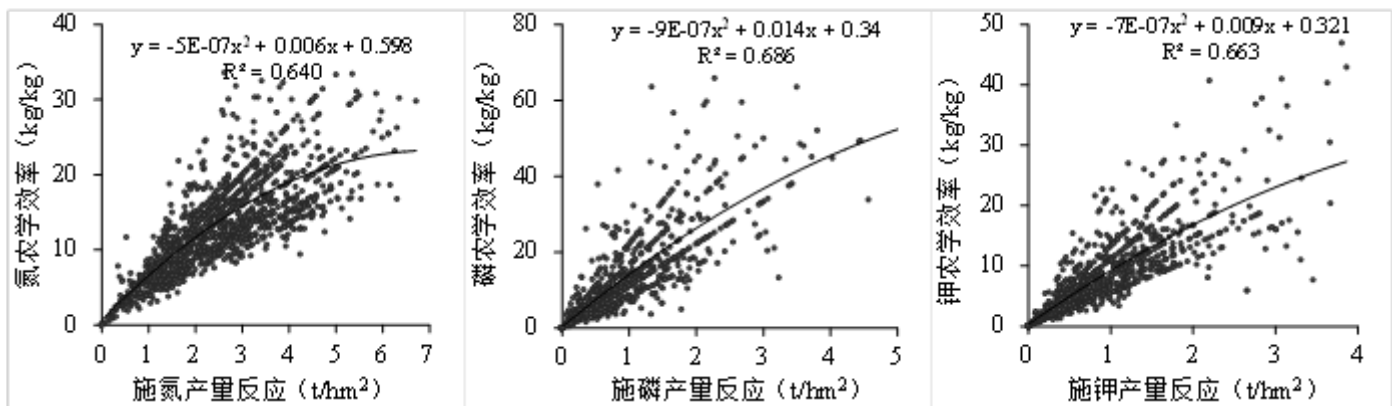


图6 水稻产量反应和农学效率关系

产量反应或相对产量可以表征土壤基础养分供应。根据 Pearson 相关分析，产量反应与土壤基础养分供应呈显著负相关 ($P < 0.001$)，相对产量和土壤基础养分供应呈显著正相关 ($P < 0.001$)。在确定最佳肥料施用量时，考虑土壤总的养分供应量非常重要。然而，对于小农户经营为主体的经营模式要做到每个田块都进行养分吸收测试是不可行的；因此，在估算土壤基础养分供应时使用某种养分所限制的产量（产量反应）进行表征 (Dobermann et al., 2003)。当产量反应数据不可用时，相对产量可以根据给定的可获得产量和土壤肥力分级对产量反应进行估算 (Pampolino et al., 2012)。已有研究表明可以应用产量反应或相对产量来表征土壤基础养分供应对小麦和玉米的施肥量进行推荐 (Chuan et al., 2013; Xu et al., 2014)。

3.4 田间验证

2013 年试验结果显示 (表 2)，NE 处理与 FP 和 ST 处理相比，产量分别增加了 0.2 和 0.1 t/ha，提高了 2.5% 和 1.3%；而经济效益分别增加了 417 和 205 元 /ha。2014 年试验与 2013 试验结果相比效果更加显著，NE 处

理与 FP 和 ST 处理相比，产量分别增加了 0.4 和 0.3t/ha，提高了 5.5% 和 3.6%；而经济效益分别增加了 1184 和 863 元 /ha。随着养分专家系统不断优化，产量差和经济效益差异逐渐扩大，2015 年 NE 处理与 FP 和 ST 处理相比，产量分别增加了 0.8 和 0.4 t/ha，提高了 9.8% 和 4.7%；而经济效益分别增加了 2147 和 1147 元 /ha。

2013 年为水稻养分专家系统进行的第一年田间试验，而下一年试验是在应用前一年试验结果对系统进行校正与改进后进行的田间试验，其施肥量和施肥措施更加合理，因此 NE 处理的产量和经济效益与 FP 和 ST 相比都有所提高。就三年试验而言，NE 处理与 FP 和 ST 处理相比产量分别增加了 0.5 和 0.3t/ha，提高了 6.3% 和 3.7%；经济效益分别增加了 1311 和 782 元 /ha，提高了 6.6% 和 3.8%。然而不同种植类型水稻的产量和经济效益增加幅度有所差异 (图 8)，中稻的 NE 处理与 FP 处理相比显著地提高了产量和经济效益 ($P < 0.05$)，分别增加了 0.6 t/ha 和 1734 元 /ha，提高了 7.4% 和 9.2%；但与 ST 相比无显著差异，产量和经济效益分别提高了 0.2 t/ha 和 643 元 /ha。虽然早稻和晚稻三个处理间无显著差异，但早稻的 NE 处理与 FP 和 ST 处理相比产量分别增加了 0.6

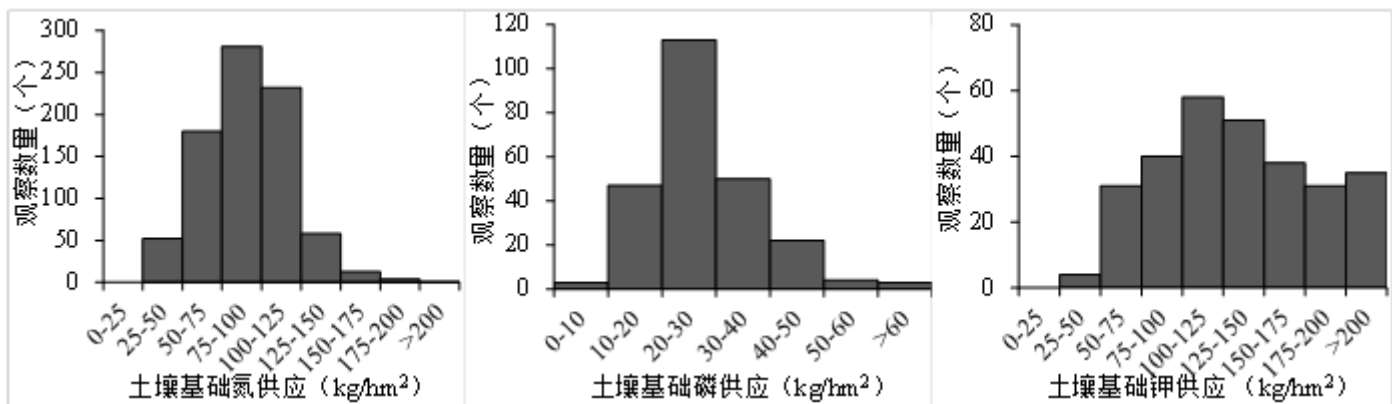


图7 水稻土壤 N、P 和 K 基础养分供应频率分布

和 0.5t/ha，经济效益分别增加了 1377 和 1147 元 /ha，而晚稻的 NE 处理与 FP 和 ST 处理相比产量分别增加了



0.6 t/ha 和 0.3t/ha，经济效益分别增加了 1613 和 875 元 /ha。但一季稻的产量 NE 处理与 FP 和 ST 处理间统计上没有显著性差异，但产量和经济效益都略有增加，产量分别增加了 0.2 和 0.2t/ha，经济效益分别增加了 62

和 572 元 /ha。

养分利用率分析结果得出（表 2），NE 处理与 FP 和 ST 处理相比，REN 在 2013 年分别增加了 7.3 个百分点和 2.7 个百分点；2014 年分别增加了 10.6 个百分点和 8.7 个百分点；2015 年分别增加了 17.7 个百分点和 12.6 个百分点；三年平均 REN 分别增加了 12.2 个百分点和 8.4 个百分点。NE 处理中 REN 大于 40% 的占全部试验数的 42.2%，而大于 50% 的占全部试验数的 23.2%。FP 处理中近半数施氮量过量是导致 REN 低的主要原因，FP 处理中 REN 小于 20% 的占全部试验数的 43.3%。农民的氮磷钾养分施用比例失衡，且很多农民氮肥施用只分两次施用，每次的施肥量比较随意，也是导致 REN 低的原因。

水稻养分专家系统依据的是基于产量反应和农学效率原理进行推荐施肥，农学效率的准确设定对试验结果至关重要。从产量反应和农学效率的关系曲线结果得出（图 9a），系统设置的产量反应和农学效率关系曲线与实测值得出的曲线非常相近，只是在较高产量反应时才表现出差异。实测产量反应计算得出的氮素农学效率和水稻养分专家系统设定的氮素农学效率比较得出（图 9b），均方根误差（RMSE）、标准化均方根误差（n-RMSE）和平均差（ME）分别为 2.8 kg/kg、18.6% 和 -1.4 kg/kg。水稻养分专家系统中，为降低施肥风险，当产量反应超过一定数值时降低了农学效率，因此在高产量反应时实测值高于系统设定值。试验结果得出，系统设定的氮素农学效率和实测的氮素农学效率比较吻合。

表 2 不同处理水稻产量、净收入和氮素利用比较

年份	处理	籽粒产量 (t/ha)	净效益 (元 /ha)	氮素回收率 (%)	氮素农学效率 (kg/kg)	氮素偏生产力 (kg/kg)
2013	OPT	8.2	21430	30.8	13.3	52.8
	FP	8.0	21013	23.5	11.4	47.8
	ST	8.1	21225	28.1	12.3	51.3
2014	OPT	8.1	20352	36.7	16.2	52.4
	FP	7.7	19168	26.1	12.8	47.7
	ST	7.8	19489	28.0	13.8	48.2
2015	OPT	9.0	22145	44.5	20.2	56.8
	FP	8.2	19998	26.8	16.3	52.9
	ST	8.6	20998	31.9	17.2	51.7
所有	OPT	8.4	21277	37.8	16.8	54.0
	FP	7.9	19966	25.6	13.6	49.5
	ST	8.1	20495	29.4	14.6	50.3

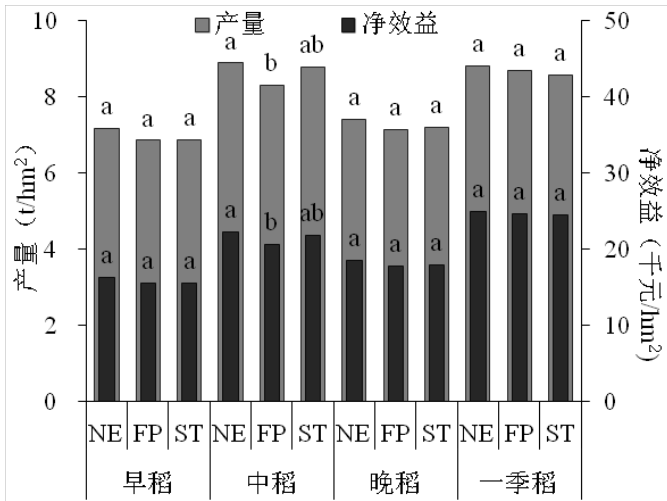


图8 不同种植类型水稻产量和净效益比较

4. 结论

利用2000–2013年收集的大量水稻田间试验数据分析了产量反应、农学效率、相对产量和土壤基础养分供应

的分布及内在联系。研究结果用来开发基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法，即水稻养分专家决策支持系统。基于水稻养分专家系统的推荐施肥和养分管理是根据田块特定条件和变量（如作物产量、作物残留管理、历史化肥施用、有机肥施用和养分投入等）而量身定制。在七个省份的211个农户四种不同种植类型的田间试验结果显示，随着对水稻养分专家系统的不断优化，产量、净效益和养分回收率都得到提高，且田间试验中得到的氮素农学效率结果与水稻养分专家系统中的模拟曲线一致。养分专家系统为精准养分管理提供了一种有效的通用方法，但需要配合其他土壤和作物改良措施以提高效益。

参考文献

见 Field Crops Research, 2017, 206:33–42.

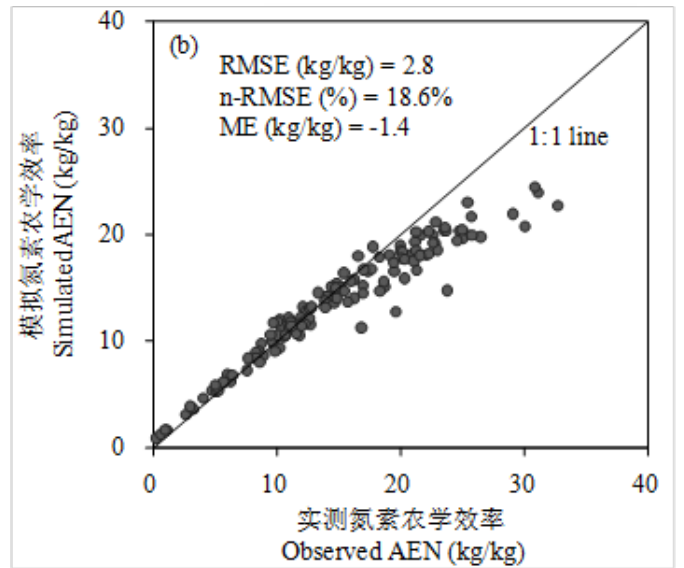
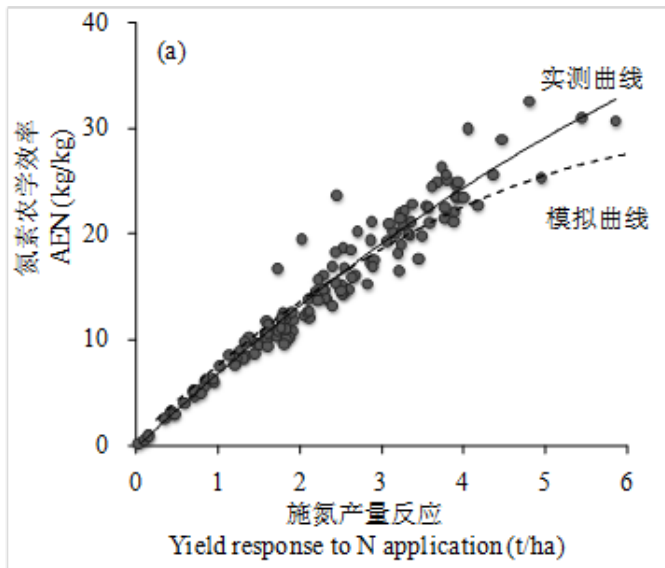


图9 水稻养分专家系统设定农学效率和实测值关系