

基于产量反应和农学效率的小麦智能化推荐施肥方法研究

徐新朋¹, 串丽敏², 何萍^{1*}, 周卫¹

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 / 农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 2 北京市农林科学院农业信息与经济研究所, 北京 100097)

摘要:【目的】为更准确地优化小麦肥料用量, 提高肥料利用效率, 我们基于产量反应和农学效率, 分别建立了适用于长江流域和北方地区的小麦养分专家系统(NE), 并采用大量田间试验验证了其可行性。【方法】收集汇总来自于国际植物营养研究所中国项目部、团队研究以及公开发表的多年多点小麦田间试验结果, 建立产量和养分吸收数据库, 采用 QUEFTS 模型分析不同种植区域小麦养分吸收特征, 分析小麦产量反应、农学效率和相对产量参数及其内在联系, 构建施肥模型, 开发小麦养分专家系统。于 2011—2020 年, 在小麦主产区 11 省份开展了 467 个田间试验对系统进行校正和改进。每个试验包括 6 个处理: 小麦养分专家系统推荐施肥(NE)、农民习惯施肥(FP)、土壤测试施肥(ST)以及基于 NE 的不施氮、不施磷和不施钾处理。调查了小麦产量、经济效益、养分回收率和肥料农学效率。【结果】1) 将数据分为北方地区和长江流域两部分, 经 QUEFTS 模型模拟小麦养分吸收结果显示, 每生产 1 t 小麦籽粒地上部所需氮、磷和钾养分北方地区为 25.6、4.6 和 20.1 kg, 长江流域为 20.6、3.9 和 16.1 kg; 小麦对氮、磷和钾肥的平均产量反应北方地区为 1.69、0.85 和 0.69 t/hm², 长江流域为 2.60、0.99 和 0.72 t/hm²; 小麦氮、磷和钾肥的平均农学效率北方地区为 8.7、8.9 和 7.0 kg/kg, 长江流域为 12.6、12.2 和 8.4 kg/kg; 小麦氮、磷和钾养分的平均相对产量北方地区为 0.76、0.88 和 0.90, 长江流域为 0.59、0.83 和 0.87。2) 田间试验结果显示, 与 FP 处理相比, 我国北方地区和长江流域 NE 处理氮和磷肥用量平均分别减少了 37.4% 和 26.1%, 钾肥用量增加了 39.2%; 与 ST 处理相比, 氮、磷肥用量分别减少了 18.2%、14.1%, 而钾肥用量相当。NE 处理的产量和经济效益较 FP 处理分别增加了 0.22 t/hm² 和 998 元/hm², 与 ST 处理产量相同, 但经济效益增加了 260 元/hm²。NE 处理氮肥回收率较 FP 和 ST 处理分别增加了 12.9 和 4.6 个百分点, 农学效率分别增加了 4.0 和 1.5 kg/kg; 磷肥回收率分别增加了 5.7 和 1.1 个百分点, 农学效率分别增加了 2.9 和 0.6 kg/kg; 钾肥回收率较 FP 处理提高了 2.0 个百分点, 与 ST 处理相当。【结论】我国北方生产 1 t 小麦所需的氮、钾养分量高于长江流域, 两个区域磷养分需求量差异较小。长江流域小麦产量对氮肥的反应以及氮肥农学效率均高于北方, 两个区域磷肥和钾肥的产量反应和农学效率差异较小。经多年多点田间试验证实, 分区域建立的小麦养分专家系统进行施肥推荐, 可保证小麦产量, 增加农民经济效益, 提高肥料利用率, 是解决我国小麦种植区小农户推荐施肥难题的科学方法。

关键词: 小麦养分专家系统; QUEFTS 模型; 产量反应; 农学效率; 养分利用率

The study of intelligent fertilizer recommendation method for wheat based on yield response and agronomic efficiency

XU Xin-peng¹, CHUAN Li-min², HE Ping^{1*}, ZHOU Wei¹

(1 State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Institute of Agricultural Information and Economics, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: 【Objectives】Aiming to optimize fertilizer application rate and improve fertilizer use efficiency with a simple and easy-to-operate recommendation system, we constructed Nutrient Expert (NE) system suitable for

收稿日期: 2023-05-26 接受日期: 2023-07-10

基金项目: 农田智慧施肥项目(05); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200101); 中国农业科学院科技创新工程项目。

联系方式: 徐新朋 E-mail: xuxinpeng@caas.cn; * 通信作者 何萍 E-mail: heping02@caas.cn

the north of China and the Yangtze Valley, respectively, and verified their feasibility by large amount of field experiments. **【Methods】** The wheat yield and nutrient uptake database was setup using multi-year and -site wheat field experiments from International Plant Nutrient Institute (IPNI) China Program, our research group and the published literatures. QUEFTS model was used to calculate the nutrient uptake, yield response, agronomic efficiency and relative yield in the north of China and the Yangtze Valley, respectively, to establish the interrelationships among them, and construct a fertilizer application model and develop NE system for wheat. Totally 467 field experiments were conducted in eleven provinces in the main wheat producing areas of China from 2011 to 2020 to calibrate and improve the system. Each experiment included six treatments: fertilizer recommendation based on Nutrient Expert system (NE), farmers' practices (FP), conventional recommendation based on soil testing (ST), and N omission, P omission and K omission based on the NE treatment. Wheat yield, economic benefit, nutrient use efficiency and fertilizer agronomic efficiency were investigated. **【Results】** 1) The calculation results by QUEFTS model showed that the aboveground N, P and K requirements to produce 1 ton of wheat grain were 25.6, 4.6 and 20.1 kg in the north region, and 20.6, 3.9 and 16.1 kg in Yangtze Valley, respectively; the average yield responses to N, P and K fertilizer were 1.69, 0.85 and 0.69 t/hm² in the north region, and 2.60, 0.99 and 0.72 t/hm² in the Yangtze Valley; the average agronomic efficiency of N, P and K fertilizer were 8.7, 8.9 and 7.0 kg/kg in the north region, and 12.6, 12.2 and 8.4 kg/kg in the Yangtze Valley. The average relative yield of N, P and K fertilizer were 0.76, 0.88 and 0.90 kg/kg in the north region, and 0.59, 0.83 and 0.87 kg/kg in the Yangtze Valley. 2) The results of field validation showed that NE treatment applied 37.4% and 26.1% less N and P fertilizer and 39.2% more K fertilizer than FP treatment, and 18.2% and 14.1% less N and P fertilizer than ST treatment and the same amount of K fertilizer with ST. Compared with FP, NE treatment increased yield and net profit by 0.22 t/hm² and 998 yuan/hm²; compared with ST, NE treatment produced the same yield but extra 260 yuan/hm² of net profit. Compared with FP and ST treatments, NE increased N recovery efficiency by 12.9 and 4.6 percentage points, and the agronomic efficiency of N fertilizer by 4.0 and 1.5 kg/kg; increased P recovery efficiency by 5.7 and 1.1 percentage points, and the agronomic efficiency of P fertilizer increased by 2.9 and 0.6 kg/kg; increased K recovery efficiency by 2.0 percentage points than FP treatment and exhibited similar K recovery efficiency to the ST treatment. **【Conclusions】** The north of China requires more N and K, and similar P for one ton of wheat production, compared to the Yangtze Valley. The yield response to N and the agronomic efficiency of N fertilizers in the Yangtze valley are higher than in the north region, and both regions have similar yield response to P and K and the agronomic efficiencies of P and K fertilizers. The multi-year and -site field experiments verified the easy-to-operate and simplification of the constructed Nutrient Expert for Wheat system specified for the north region and the Yangtze Valley.

Key words: Nutrient Expert for wheat; QUEFTS model; yield response; agronomic efficiency; nutrient use efficiency

诸多调查结果显示,我国小麦种植区存在严重过量施肥问题^[1-3]。肥料的长期过量施用,减弱了施肥对小麦的增产效应,还造成肥料利用率低,肥料资源浪费等问题^[4-5]以及肥料损失引起的环境风险^[6]。因此,倡导合理施肥对小麦增产稳产和可持续发展十分重要。依据传统的土壤测试通过确定土壤养分丰缺水平,布置肥效试验进而建立土壤养分与产量或者养分吸收关系,确定最佳施肥量^[7],以及在此基础上开展的如基于GIS和SPAD值的养分推荐和施

肥配方^[8]等方法,仍然是当前较为盛行的配方施肥方法。测土配方施肥在提高作物产量和优化施肥方面发挥了重要作用,但需要投入大量的人力、物力和财力,存在工作量大、时耗长的缺点,且从土壤样品采集到实验室分析整个过程存在诸多不确定性^[9],土壤测试结果与作物反应相关性不高,导致肥料难以推荐。除此之外,我国华北以及长江流域小麦种植区域一年两茬的种植制度,存在测土不及时和小农户不具备测土条件等问题,这就给养分管理提出

了新的挑战。作物施肥效果最终将在产量上得到体现,如何建立土壤养分供应与作物产量间的量化关系是当前推荐施肥的关键。作物产量所需养分可以分为土壤供应和施肥供应两部分,应用不施某种养分处理的产量来表征土壤养分供应和施肥后的产量反应来表征施肥效应具有普遍意义,其将土壤养分供应看作一个黑箱,包含了环境中带入的养分,这就解决了氮素难以推荐的难题。与此同时,将复杂的推荐施肥原理简化为用户方便使用的操作系统也是实现科学施肥的重要组成部分。由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研发的基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法,采用 QUEFTS 模型考虑作物氮、磷、钾三大营养元素间的交互作用模拟作物养分吸收,通过建立各农学参数间的内在联系,同时考虑土壤养分平衡,依据产量反应进行推荐施肥,构建了小麦养分推荐模型,研发了智能操作系统^[10-11]。本研究分析了所构建的小麦养分专家系统中各农学参数,包括养分吸收、产量反应、相对产量和农学效率等,通过多年多点的田间试验对小麦养分专家系统进行验证,以实现小麦的科学施肥。

1 材料与方法

1.1 数据库建设

收集汇总来自国际植物营养研究所中国项目部、研究团队于 2000—2020 年在中国小麦主产区开展的田间试验,以及此期间在学术期刊上公开发表的学术论文,其中文献数据来源于中国知网数据库(CNKI)通过检索关键词及关键词组合“小麦”、“小麦+产量”、“小麦+养分吸收”、“小麦+肥料利用率”等得到的中文文献。根据气候特征,将数据分为北方地区和长江流域两部分,其中北方地区包括华北、东北和西北地区,长江流域包括西南和长江中下游地区。应用 QUEFTS 模型模拟小麦最佳养分吸收,其采用线性-抛物线-平台函数模拟产量和养分吸收关系,其中北方地区氮、磷和钾养分吸收数据量分别为 5634、4173 和 4289 个,长江流域分别为 2317、1779 和 1748 个。小麦养分专家系统基于产量反应和农学效率关系原理进行施肥推荐,本研究中,北方地区小麦氮、磷和钾产量反应数据分别有 1261、698 和 978 个,长江流域分别有 742、367 和 419 个。

1.2 田间验证试验

为验证小麦养分专家系统的可行性,于 2011—

2020 年在河北、河南、山东、山西、内蒙古、安徽、湖北、江苏、云南、四川、浙江 11 省份开展了 467 个田间试验,其中北方地区 405 个,长江流域 62 个。所有试验采用统一处理,均包含 6 个处理,分别为:1) 基于小麦养分专家系统推荐施肥,即 NE 处理,试验开始前调查试验地块农户过去 3 年小麦产量、施肥量及施肥措施等;2) 当地农民习惯施肥,即 FP 处理,完全遵循农民习惯施肥,记录施肥量、施肥措施等;3) 土壤测试施肥,即 ST 处理,如测土不及时或条件不具备,采用当地农技推广部门的推荐量;4)、5)、6) 处理分别为 NE 处理基础上不施氮(NE_N)、不施磷(NE_P)和不施钾(NE_K)处理,用于计算产量反应和肥料利用率。每个处理小区面积 30~50 m²,小麦品种选用当地主栽品种。同一试验各处理播种量、病虫草害防治均一致。田间试验使用肥料包括尿素、过磷酸钙、磷酸氢二铵、氯化钾和硫酸钾等。

采用随机采样法测定小麦产量,各试验点采用相同标准进行样品采集,小麦成熟期于每个小区中央部分均匀选取 3 个 1 m² 测定小麦产量,并最终折合成含水量 13.5% 的产量。每个小区采集 1 m 长有代表性样品带回室内分成籽粒和秸秆两部分,于 60℃ 下烘干至质量恒定,称重用于计算收获指数。选取部分烘干样品粉碎后,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,分别用凯氏法、钒钼黄比色法和原子吸收法测定氮、磷和钾养分含量。

1.3 统计与分析

采用 Excel 2020 对数据进行处理,使用 SPSS 17.0 软件对 NE、FP 和 ST 处理的施肥量、产量、净效益和养分利用率在 0.05 水平上进行 ANOVA 分析,使用 Sigmaplot 14.0 软件绘制箱图。NE、FP 和 ST 采用相同计算公式,以 NE 处理氮计算为例,磷和钾计算同氮,其相关计算如下:

氮产量反应 (kg/hm²) = NE 产量 - NE_N 产量;

氮农学效率 (kg/kg) = (NE 产量 - NE_N 产量) / 施氮量;

氮相对产量 = NE_N 产量 / NE 产量;

氮回收利用率 (%) = (NE 植株地上部氮累积量 - NE_N 植株地上部氮累积量) / NE 施氮量 × 100;

肥料成本 (元/hm²) 为氮、磷和钾肥料成本总和;净效益 (元/hm²) = 收获后产值 - 肥料成本。

所有计算公式中,氮、磷和钾施用量分别为 N、P₂O₅ 和 K₂O 量。

2 结果与分析

2.1 最佳养分吸收

应用 QUEFTS 模型模拟不同潜在产量下 (8、12、16 t/hm²) 小麦最佳养分吸收量得出, 当目标产量达到潜在产量的 60%~70% 时, 生产 1 t 小麦籽粒其地上部氮 (N)、磷 (P) 和钾 (K) 养分需求量北方地区分别为 25.6、4.6 和 20.1 kg, 长江流域分别为 20.6、3.9 和 16.1 kg (图 1)。相比长江流域, 北方地区生产 1 t 小麦籽粒需要吸收更多的氮、磷和钾养分。

2.2 产量反应与肥料农学效率

就全部产量反应数据而言, 我国小麦种植区施用氮肥的产量反应最高, 其次为磷, 最后为钾, 平均产量反应分别为 2.03、0.90 和 0.70 t/hm²。不同区域的产量反应存在一定差异, 长江流域的氮、磷和钾产量反应均高于北方地区, 其中长江流域分别为 2.60、0.99 和 0.72 t/hm², 北方地区分别为 1.69、0.85 和 0.69 t/hm² (图 2)。较高的氮素产量反应说明养分管理中氮肥施用在小麦增产方面发挥着最为重要的作用。就本研究数据库中全部肥料农学效率数

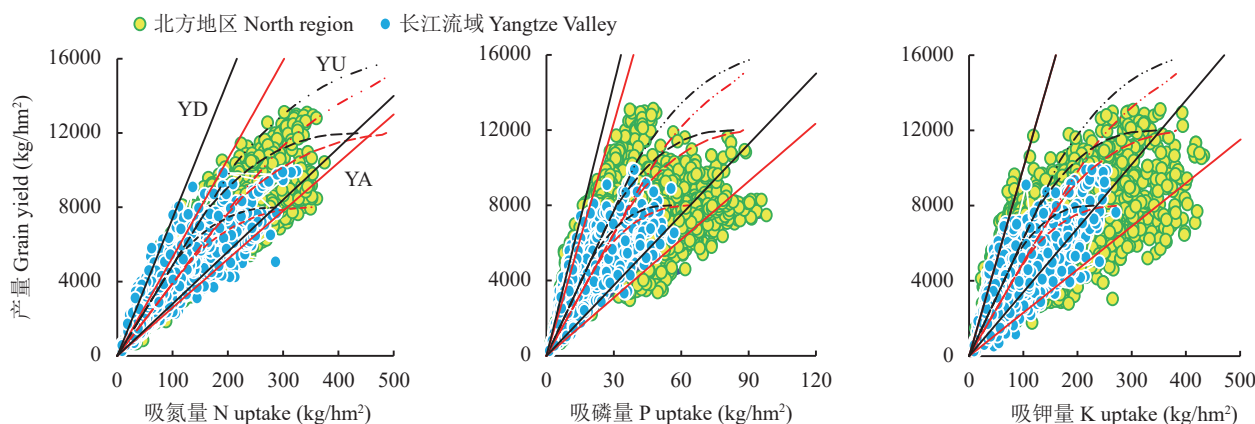


图 1 QUEFTS 模型模拟的不同潜在产量小麦最佳养分吸收量

Fig. 1 The optimum nutrient requirements simulated by QUEFTS model under different potential yields of wheat

注: 红色线条表示北方地区, 黑色线条表示长江流域; YA、YD 和 YU 分别表示最大累积边界线、最大稀释边界线和 QUEFTS 模型模拟的养分吸收曲线; 自下而上的潜在产量分别为 8、12 和 16 t/hm²。

Note: The red and black lines represent the north region and the Yangtze Valley, respectively. YA, YD and YU indicate the lines of maximum accumulation, maximum dilution, and balanced N, P and K uptake predicted by QUEFTS model. The lines from bottom to top indicate the potential yield of 8, 12 and 16 t/hm².

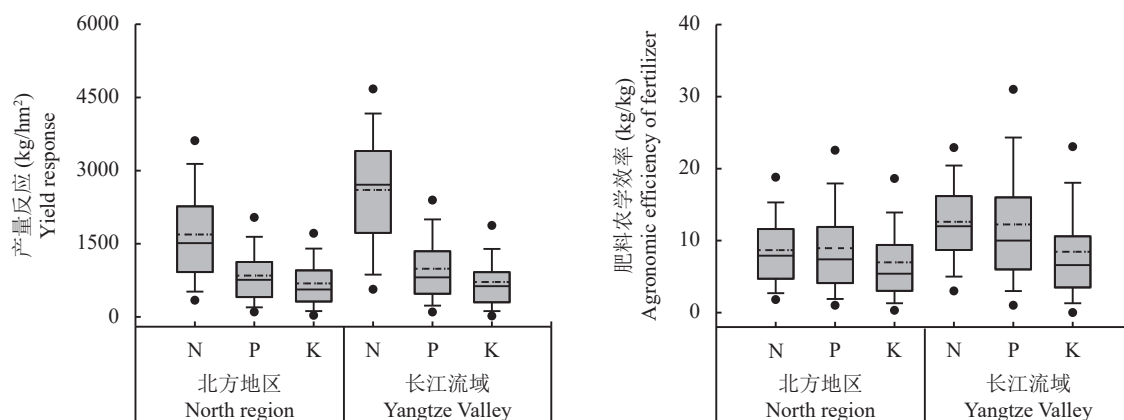


图 2 小麦产量反应和肥料农学效率分布

Fig. 2 The distribution of yield response and agronomic efficiency of fertilizer for wheat

注: 箱体中间实线代表中值, 虚线代表均值, 方框上下边缘、上下实线和实心圆圈分别代表上下 25% 的数值、90% 和 10% 的数值、95% 和 5% 的数值。

Note: The solid and dotted lines inside the boxes represent the median and mean values, the upper and lower frames of the box, the upper and lower solid lines, and the solid circles outside the boxes represent the upper and lower 25%, the 90% and 10% values, the 95% and 5% values.

据而言,施用氮、磷和钾肥的平均农学效率分别为 10.1、10.1 和 7.4 kg/kg。北方地区施用氮、磷和钾肥的平均农学效率均低于长江流域,其中北方地区分别为 8.7、8.9 和 7.0 kg/kg,长江流域分别为 12.6、12.2 和 8.4 kg/kg (图 2)。

小麦产量反应和肥料农学效率间存在显著的二次曲线关系 (图 3),小麦养分专家系统则是在分析大量试验数据基础上以产量反应和肥料农学效率为依据进行推荐施肥。研究结果显示,北方地区和长江流域氮的产量反应和农学效率关系曲线较为接近,而磷和钾的产量反应和农学效率关系曲线北方地区要低于长江流域,说明在相同的产量反应下,北方地区的肥料农学效率要低于长江流域,在同等目标产量下则需要更多的磷和钾肥。

2.3 相对产量

就全部数据而言,当前我国小麦主产区的土壤氮、磷和钾养分对小麦总养分需求的供应程度分别达到了 70%、86% 和 89%。北方地区的氮、磷和钾平均相对产量均高于长江流域,北方地区分别为 0.76、0.88 和 0.90,长江流域分别为 0.59、0.83 和 0.87 (图 4)。

2.4 田间验证

2.4.1 施肥量验证 就总体施肥量数据平均值而言,NE 处理氮、磷和钾肥用量分别为 166、85 和 71 kg/hm²,FP 处理分别为 265、115 和 51 kg/hm²,ST 处理分别为 203、99 和 72 kg/hm²。与 FP 处理相比,NE 处理的氮肥和磷肥用量分别降低了 37.4% ($P<0.001$) 和 26.1% ($P<0.001$),但增加了 39.2% 的钾肥

用量 ($P<0.001$);与 ST 处理相比,NE 处理氮、磷肥用量分别减少了 18.2% ($P<0.001$) 和 14.1% ($P<0.001$),而钾肥用量相当 ($P=0.785$)。统计不同区域各处理施肥量,与 FP 和 ST 处理相比,NE 处理在北方地区的氮肥用量分别降低了 38.6% 和 19.5%,磷肥用量分别降低了 26.9% 和 13.2%,但钾肥用量分别增加了 48.4% 和 3.4%;在长江流域的氮肥用量分别降低了 25.8% 和 8.0%,磷肥用量分别降低了 11.8% 和 16.5%,钾肥用量分别降低了 4.5% 和 24.1% (图 5)。

由于 FP 处理完全遵循农户自己的施肥管理模式,导致施肥量变异很大,总体存在施肥过量问题。就总体数据而言,FP 处理中有 88.9% 的试验点施氮量大于 180 kg/hm²,而 60.2% 的试验点施氮量大于 250 kg/hm²。北方地区的 FP 处理平均氮肥用量显著高于长江流域,北方地区和长江流域 FP 处理平均氮肥用量分别达到了 273 和 210 kg/hm²,减施幅度北方地区显著高于长江流域。与施氮量相似,FP 处理小麦施磷量总体较高,高施磷量主要集中在北方地区,平均施磷量北方地区和长江流域分别为 121 和 74 kg/hm²。FP 处理中有 62.7% 的试验点施磷量超过 100 kg/hm²,而 19.9% 的试验点施磷量超过 150 kg/hm²。与氮、磷肥相反,FP 需要加强钾肥的施用,尤其是北方地区,平均钾肥用量仅有 49 kg/hm²。FP 处理中施钾量小于 50 kg/hm² 的试验点占到了全部试验数量的 63.2%,而有 20.3% 的试验点不施钾肥。

2.4.2 产量和经济效益验证 就总体数据而言 (图 6),与 FP 处理相比,NE 处理提高了产量和经济效益,分别增加了 0.22 t/hm² (3.0%, $P=0.071$) 和 998 元/hm² (7.1%, $P<0.001$);与 ST 处理相比,NE 处理的平均

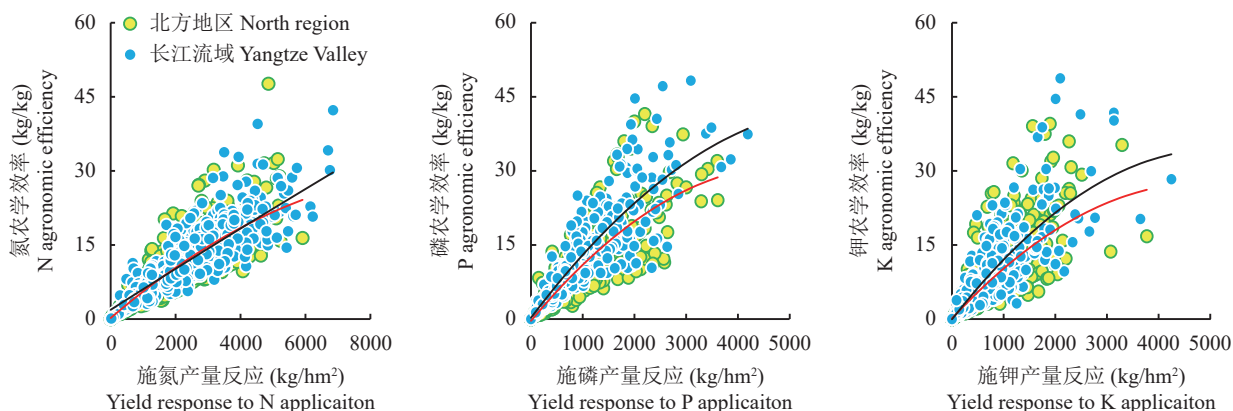


图 3 小麦产量反应和肥料农学效率关系

Fig. 3 The relationship between yield response and agronomic efficiency of fertilizer for wheat

注:图中红色曲线表示北方地区,黑色曲线表示长江流域。

Note: Red lines represent the north region, and black lines represent Yangtze Valley.

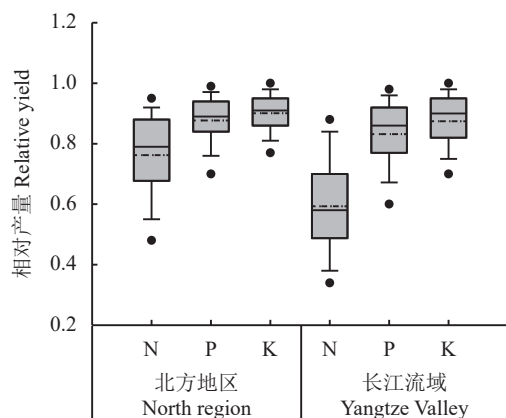


图 4 小麦相对产量分布

Fig. 4 The distribution of wheat relative yield

注: 箱体中间实线代表中值, 虚线代表均值, 方框上下边缘、上下实线和实心圆圈分别代表上下 25% 的数值、90% 和 10% 的数值、95% 和 5% 的数值。

Note: The solid and dotted lines inside the boxes represent the median and mean values, the upper and lower frames of the box, the upper and lower solid lines, and the solid circles outside the boxes represent the upper and lower 25%, the 90% and 10% values, the 95% and 5% values.

产量相同 (7.71 t/hm^2), 但经济效益增加了 260 元/hm^2 (1.8% , $P=0.340$)。就不同地区小麦而言, 与 FP 处理相比, NE 处理在北方地区的产量和经济效益分别提高了 0.21 t/hm^2 (2.8%) 和 1012 元/hm^2 (6.8%), 长江流域分别增加了 0.26 t/hm^2 (5.4%) 和 901 元/hm^2 (10.7%); 与 ST 处理相比, NE 处理在北方地区和长江流域的产量均无显著差异, 但经济效益分别增加了 216 元/hm^2 (1.4%) 和 547 元/hm^2 (6.2%), 而此经济

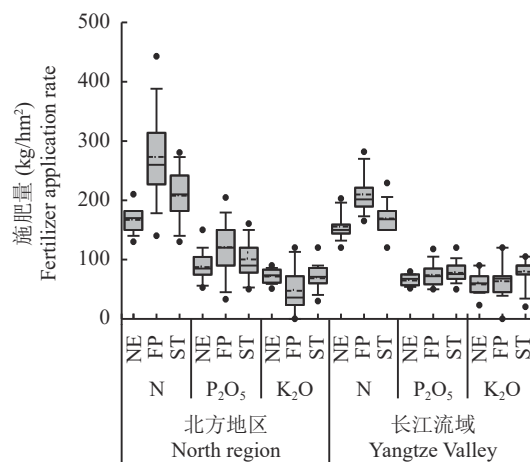


图 5 不同施肥处理小麦施肥量

Fig. 5 Fertilizer application rate of wheat under different treatments

注: NE—小麦养分专家系统; FP—农民习惯施肥; ST—测土施肥。箱体中间实线代表中值, 虚线代表均值, 方框上下边缘、上下实线和实心圆圈分别代表上下 25% 的数值、90% 和 10% 的数值、95% 和 5% 的数值。

Note: NE—Nutrient expert for wheat; FP—Farmers' practice; ST—Soil testing based recommendation. The solid and dotted lines inside the boxes represent the median and mean values, the upper and lower frames of the box, the upper and lower solid lines, and the solid circles outside the boxes represent the upper and lower 25%, the 90% and 10% values, the 95% and 5% values.

效益增量并未考虑 ST 处理的测土费用。与 FP 处理相比, NE 处理的经济效益增加量有 48.7% 来自于产量增量, 而与 ST 相比, NE 处理的经济效益增加量主要来自于节约肥料费用。

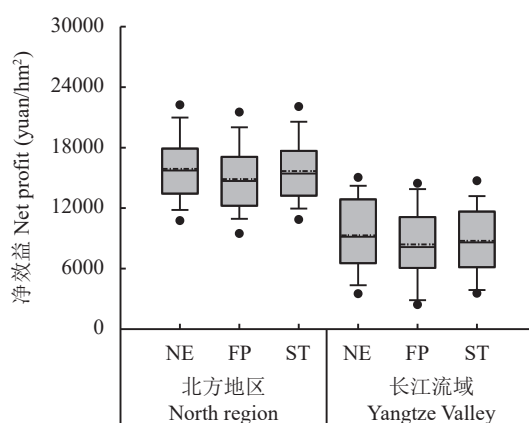
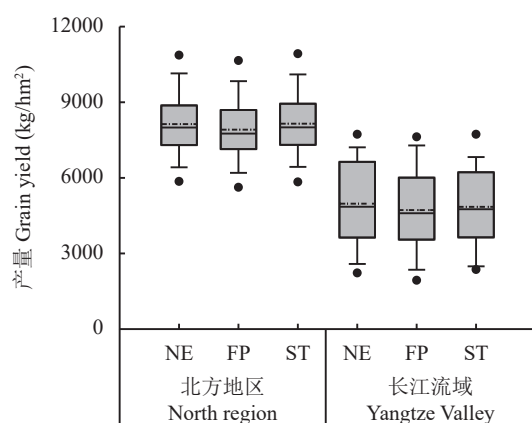


图 6 不同施肥处理小麦产量和净效益比较

Fig. 6 Comparison of wheat yield and net profit under different treatments

注: NE—小麦养分专家系统; FP—农民习惯施肥; ST—测土施肥。箱体中间实线代表中值, 虚线代表均值, 方框上下边缘、上下实线和实心圆圈分别代表上下 25% 的数值、90% 和 10% 的数值、95% 和 5% 的数值。

Note: NE—Nutrient expert for wheat; FP—Farmers' practice; ST—Soil testing based recommendation. The solid and dotted lines inside the boxes represent the median and mean values, the upper and lower frames of the box, the upper and lower solid lines, and the solid circles outside the boxes represent the upper and lower 25%, the 90% and 10% values, the 95% and 5% values.

2.4.3 肥料利用率 就总体数据而言,与 FP 和 ST 处理相比,NE 处理的氮肥回收率分别提高了 12.9 个百分点 ($P<0.001$) 和 4.6 个百分点 ($P<0.001$),氮肥农学效率分别提高了 4.0 kg/kg ($P<0.001$) 和 1.5 kg/kg ($P<0.001$) (图 7)。就不同地区而言,北方地区 NE 处理的氮肥回收率和农学效率较 FP 处理分别提高了 13.2 个百分点和 3.8 kg/kg,较 ST 处理分别提高了 4.5 个百分点和 1.3 kg/kg;长江流域 NE 处理的氮肥回收率和农学效率较 FP 处理分别提高了 11.2 个百分点和 5.5 kg/kg,较 ST 处理分别提高了 4.8 个百分点和 2.3 kg/kg。NE 处理较 FP 处理显著提高了磷肥回收率和农学效率,分别提高了 5.7 个百分点 ($P<0.001$) 和 2.9 kg/kg ($P<0.001$),而与 ST 处理无显著差异,但分别提高了 1.1 个百分点 ($P=0.164$) 和 0.6 kg/kg ($P=0.297$) (图 7)。长江流域磷肥利用率要高于北方地区,与 FP 和 ST 处理相比,北方地区 NE 处理的磷肥回收率分别增加了 5.6 和 0.4 个百分点,农学效率分别提高了 2.6 和 0.2 kg/kg;长江流域的磷肥回收率分别增加了 6.0 和 5.3 个百分点,农学效率分别提高了 4.2 和 3.1 kg/kg。就钾肥利用率总体数据而言,由于 NE 处理较 FP 处理提高了钾肥用量,其钾肥回收率仅提高了 2.0 个百分点 ($P=0.408$),而与 ST 处理相当 (图 7)。北方地区 NE 处理施钾量显著高于 FP 处理,与 ST 处理相当,三者的钾肥回收率和农学效率无显著差异;长江流域 NE 处理较 FP 和 ST 处理的钾肥回收率分别提高了 13.3 和 11.5 个百分点,农学效率分别提高了 5.2 和 3.6 kg/kg。

3 讨论

确定目标产量的养分需求量是开展养分管理的前提,QUEFTS 模型通过应用田间试验大数据并考虑养分间交互作用得出最佳养分吸收量,为研究区域间的养分吸收差异提供了技术手段^[12-13]。本研究中小麦养分吸收分析结果显示,相较于水稻和玉米^[14],在相同气候条件下,生产 1 t 小麦籽粒需要更多的养分,属于高耗养分作物,尤其是氮和磷。而前人在中国关于小麦方面的研究主要集中在华北平原地区,如 Liu 等^[15]应用 1985—1995 年的 642 个数据模拟的氮磷钾养分需求量分别为 24.6、3.7 和 23.0 kg/t,Chuan 等^[10]利用 2000—2011 年数据 (氮磷钾养分吸收数据量分别为 3372、2088 和 2098 个) 研究氮磷钾养分需求量分别为 22.8、4.4 和 19.0 kg/t。本研究得出的北方地区单位产量氮和磷养分需求量要高于前人的研究结果^[10,15],这与该区域的可获得产量不断提升具有一定关系,因为随着目标产量的提升,当达到一定潜在产量后,其作物养分内在效率呈降低趋势,导致生产 1 t 籽粒所需养分逐渐增加^[16-17]。由于气候、品种和管理上的差异,不同国家和地区间的小麦养分需求也存在一定差异,如 Pathak 等^[18]应用整个印度的数据得出生产 1 t 小麦籽粒产量其地上部氮、磷、钾养分需求分别为 23.1、3.5 和 28.5 kg/t,而 Maiti 等^[19]应用印度东北地区的数据研究氮磷钾养分需求量则为 15.8、3.2 和 28.4 kg/t。本研究中根据气候和土壤类型差异将数据分为北方地区和长江流域进行养分吸收模拟,如我国长江流域轮作

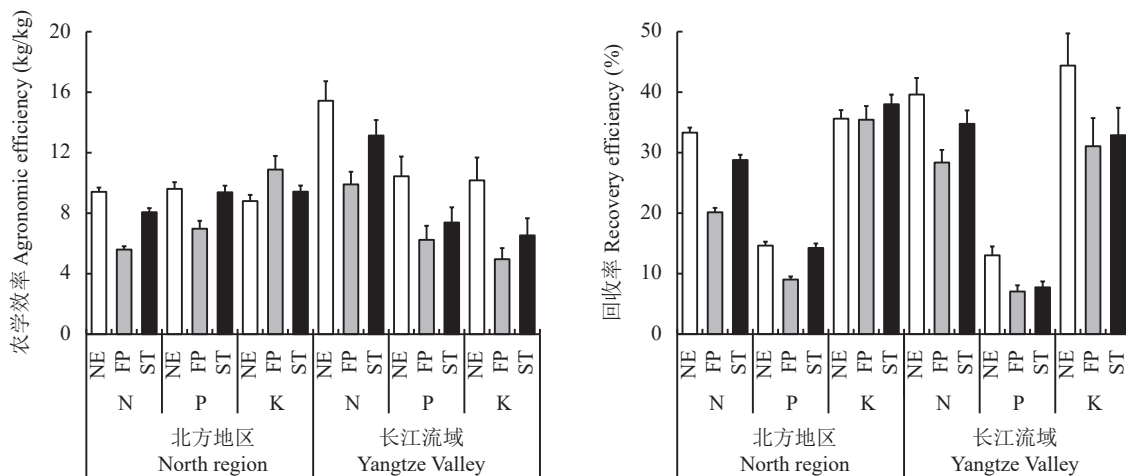


图 7 不同施肥处理小麦肥料利用率比较

Fig. 7 Comparison of fertilizer use efficiency of wheat among different treatments

注: NE—小麦养分专家系统; FP—农民习惯施肥; ST—测土施肥。误差线代表标准误。

Note: NE—Nutrient expert for wheat; FP—Farmers' practice; ST—Soil testing based recommendation. Error bar represents standard error.

体系以小麦-水稻为主, 土壤以水稻土为主, 而北方地区则以小麦-玉米轮作体系为主, 土壤以潮土为主; 长江流域生育期降雨量较大, 产量潜力较低, 昼夜温差低导致其形成单位产量的养分需求量要低于北方地区, 而 QUEFTS 模型模拟得出的养分吸收差异也说明了进行养分吸收差异化分析的必要性。虽然本研究中的数据量得到了大幅度扩充, 尤其是长江流域的养分吸收数据方面, 然而我国小麦种植区的自然环境、土壤类型差异较大, 且当前研究的数据主要集中在主产区, 进一步细分麦区进行养分吸收差异相关研究对于优化养分管理十分必要, 但这需要一个庞大的数据库作为支撑。

充分利用土壤养分是提高肥料利用效率需要考虑的重要因素之一, 孙昭安等^[20]研究结果显示冬小麦的氮素吸收中有 2/3 都来自于土壤, 如应用本研究数据得到的平均土壤氮、磷、钾养分供应量北方地区分别达到了 148、32 和 159 kg/hm², 长江流域分别为 73、18 和 82 kg/hm² (数据未显示)。长期过量施肥导致北方冬小麦种植区的土壤供肥能力呈逐渐增加趋势, 年均增加 1.6%, 其施肥增产率已由 2005 年的 30.9% 下降至 2016 年的 20.2%^[1]。虽然土壤基础养分供应随着土壤养分含量的增加而增加, 但土壤养分测试值与土壤基础养分供应间的相关性较弱^[21], 因此需要选择合适的指标来反映土壤基础养分供应。采用作物产量反应表征土壤养分供应可以考虑土壤本体及外界环境带入的养分, 并使用农学效率表征施肥效应可有效解决此问题, 在同一气候条件下, 施用某种养分的产量反应越大, 说明土壤中该养分的供应量越小, 而肥料农学效率则随着产量反应的增加呈增加趋势。长期过量施肥导致我国小麦种植区的肥料农学效率呈降低趋势, 维持在 6.3~6.7 kg/kg^[1], 与其相比, 本研究数据库计算获得了较高的肥料农学效率, 是因为本研究采用的是优化施肥下计算得到的肥料农学效率, 由此计算得到的施肥量也更加合理。而在缺乏相关数据时, 小麦养分专家系统可通过总结大量的田间试验, 采用相对产量对产量反应进行估测^[10], 这就克服了田间试验中样品采集工作量大、土壤和植株测试时间长等缺点, 在测土不及时和条件不具备时更加凸显了该技术的优势。根据不同麦区的气候条件和土壤类型等建立产量反应和肥料农学效率关系, 分析其变化规律, 有助于养分专家系统对小麦进行精准的差异化养分管理。然而由于一些区域相关数据较少, 在建立产量反应与肥料农学效率关系过程中就会出现因为个别

试验点的数据对关系曲线造成很大影响, 因此当前研究中仅划分了两个区域, 未来在不同麦区的产量反应和肥料农学效率关系方面仍需进行深入研究。

小麦种植区是当前我国粮食作物化肥减施的重点区域, 其过量施肥程度远高于其它粮食作物, 尤其是氮肥和磷肥用量。研究显示我国华北平原冬小麦种植区的氮素盈余均值达到了 165 kg/hm²^[22], 氮肥在减施 30% 情况下不会显著影响我国小麦产量^[23]。而全国的平均磷肥用量达到了 137.7 kg/hm²^[24], 在巢湖流域稻麦轮作区磷肥减量 20% 仍可保证作物稳产^[25]。长期的过量施肥导致土壤养分累积, 我国潮土区 (小麦和玉米主产区) 29 年长期监测结果显示土壤全氮提升了 37.8%, 土壤有效磷含量提升了 226%^[26]。虽然本研究中与 FP 处理相比, NE 处理通过优化肥料用量显著提高了氮肥和磷肥利用效率, 但仍有进一步提高的空间。所有试验点中, NE 处理仅有 15.4% 的试验点氮肥回收率超过了 50%, 磷肥回收率超过 30% 的试验点仅占 10.3%, 而 FP 处理氮肥回收率超过 50% 和磷肥回收率超过 30% 的试验点分别仅占 4.7% 和 2.4%, 说明高施肥量和土壤中累积的养分两方面限制了肥料利用率的提升。马悦等^[27-28]研究显示, 在我国北方麦区土壤有效磷含量应维持在 20~30 mg/kg, 收获期 1 m 土层硝态氮残留量应介于 55~100 kg/hm², 但当前我国小麦主产区的土壤养分含量或累积量通常高于这个数值。因此, 倡导合理施肥十分必要, 是从源头解决肥料过量施用的基本措施之一。

我国化肥零增长目标已经实现, 农业养分管理已步入一个新的阶段, 但目前农民盲目施肥导致的化肥不合理施用现象仍然突出, 实现化肥科学施用仍有很长的路要走。随着农业人口的短缺, 节约劳动力成本对进一步提高经济效益至关重要, 智能化推荐施肥方法则显得尤为重要。应用当前信息技术, 小麦养分专家系统已从最初的网络版发展到现在只需关注微信公众号即可使用, 用户只需回答一些简单问题, 如作物过去 3 年平均产量、上季作物施肥量、秸秆还田方式和有机肥施用情况等, 系统就会给出推荐用量, 其操作更加简便、智能。针对当前高强度利用下的耕地系统, 减少肥料投入的另一重要途径是提高耕地质量, 因为肥料贡献率随着土壤地力的提高呈下降趋势, 在促进小麦增产、增收的同时, 可降低小麦产量对施用化肥的依赖^[29]。当前的一些措施如有机无机肥配施是培肥土壤, 提高小麦目标产量和进一步肥料减施的主要措施^[30-31]; 施

用土壤改良剂,改善土壤理化性质,提高团聚体稳定性,进而提高土壤肥力,促进产量提升^[32]。在养分专家系统中用户可自行添加购买的肥料品种,系统会根据推荐用量和选择的肥料品种给出肥料的实物用量。然而施用肥料也要因地制宜,不同土壤施用不同的肥料品种,如砂姜黑土施用重过磷酸钙和聚磷酸铵、红壤施用磷酸二铵和重过磷酸钙,对土壤有效磷含量提升、小麦磷素吸收以及产量提高更加有利^[33];酰胺态氮在中氮条件下有助于提高强筋小麦产量和籽粒含氮量,更加有助于小麦蛋白质的积累^[34-35]。而在当前小麦养分专家系统中,其关注点主要集中在肥料用量合理推荐上,虽然考虑了秸秆还田和上季养分残效等因素,并给出了以氮肥为准的有机替代比例,但在施用有机肥情况下磷和钾肥用量优化以及肥料品种选择方面有待开展相关研究。

通过小麦养分专家系统可以获得合理的氮磷钾肥用量,辅助一些先进的管理措施和高效产品可进一步发挥其作用。一些含有小分子氨基酸如黄腐酸、天冬氨酸的肥料产品等能显著促进小麦根系生长和养分吸收、提高生物量,并有利于改善小麦籽粒营养^[36-37];结合包衣和添加抑制剂等手段可保障小麦整个生育期的土壤氮素持续供应能力,且减少氮素淋溶损失^[38-39];增效剂^[40]、绿色新型肥料^[41]等等也都是研究养分增效的热点。控释肥施用技术是当前较为流行的措施^[42],卞文新等^[43]研究显示,与农民习惯施肥相比,施用控释包膜尿素可降低30%的氮肥用量。但碍于当前市售的能够实现小麦一次性施肥的相关产品较少,在小麦养分专家系统推荐施肥下,不同小麦种植区实现一次性施肥的控释肥施用技术还有待进一步研究。除此之外,结合水氮耦合^[44]和优化施肥位置^[45]等措施可进一步实现化肥减施增效,如同时优化氮肥用量和基追比可使氮肥对小麦的增产效应提高8%~30%^[46];配合中微量元素有利于建成良好根系形态,调节根系生理活性,促进养分吸收利用^[47-48]等。各种单项技术或者产品已经很成熟,高效的集成技术模式才是今后的研究重点,如山东省冬小麦农户产量只实现了最高纪录产量的64.34%,通过优化并集成水肥投入、优化追肥比例、增施有机肥和锌肥等措施可使冬小麦产量差缩减23.46%,氮肥偏生产力提高56.99%^[49]。推荐施肥在化肥减施增效方面发挥了不可替代的作用,但今后仍需建立适宜不同生态区的集养分专家系统、有机替代、水肥耦合、肥料机械深施等土壤培肥综合技术模式,聚焦耕地科技创新,着力解决好土壤与肥料的重

大科技问题,实现粮食增产和养分资源高效利用双赢。

4 结论

以田间试验大数据为支撑分区域建立的小麦养分专家系统,应用QUEFTS模型分析了北方地区和长江流域小麦养分吸收特征,以及产量反应和肥料农学效率等参数的内在联系,研发了简便、易操作的推荐施肥方法。大量田间试验证明,在当前生产条件下,小麦养分专家系统可降低氮肥和磷肥用量,提高小麦产量,并获得了优于传统测土施肥方法的经济效益。较好的实践效果显示,小麦养分专家系统可实现小农户不具备土壤测试条件下的肥料推荐,是全面提高我国小麦生产效益、适应范围广泛的推荐施肥系统。

参 考 文 献:

- [1] 赵亚南,徐霞,黄玉芳,等.河南省小麦、玉米氮肥需求及节氮潜力[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2747-2757.
Zhao Y N, Xu X, Huang Y F, *et al.* Nitrogen requirement and saving potential for wheat and maize in Henan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2747-2757.
- [2] 李健敏,赵庚星,李涛,等.山东省小麦施肥特征与评价[J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2322-2335.
Li J M, Zhao G X, Li T, *et al.* The characteristics and evaluation of wheat fertilization in Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(12): 2322-2335.
- [3] 黄倩楠,党海燕,黄婷苗,等.我国主要麦区农户施肥评价及减肥潜力分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4816-4834.
Huang Q N, Dang H Y, Huang T M, *et al.* Evaluation of farmers' fertilizer application and fertilizer reduction potentials in major wheat production regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4816-4834.
- [4] 贾可,刘建玲,沈兵.近14年北方冬小麦肥料产量效应变化及优化施肥方案[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2032-2042.
Jia K, Liu J L, Shen B. Yield effect change of fertilizers in the past 14 years and optimized fertilization of winter wheat in north of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(11): 2032-2042.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [6] 李建政,王道龙,王立刚,等.华北冬小麦/夏玉米农田水氮管理的温室效应评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 921-929.
Li J Z, Wang D L, Wang L G, *et al.* Evaluation of nitrogen and water management on greenhouse gas mitigation in winter wheat-summer maize cropland system in North China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4): 921-929.

- [7] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国小麦区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(11): 30–40.
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, *et al.* Optimal regional nitrogen, phosphorus, potassium rates recommendations and special fertilizer formulae study for wheat in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(11): 30–40.
- [8] 赵亚南, 徐霞, 孙笑梅, 等. 基于GIS的河南省不同区域小麦氮磷钾推荐量与施肥配方[J]. 植物营养与肥科学报, 2021, 27(6): 938–948.
Zhao Y N, Xu X, Sun X M, *et al.* GIS-based NPK recommendation and fertilizer formulae for wheat production in different regions of Henan Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(6): 938–948.
- [9] Schut A G T, Giller K E. Soil-based, field-specific fertilizer recommendations are a pipe-dream[J]. *Geoderma*, 2020, 380: 114680.
- [10] Chuan L M, He P, Jin J Y, *et al.* Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146: 96–104.
- [11] Chuan L M, He P, Pampolino M F, *et al.* Establishing a scientific basis for fertilizer recommendation for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 140: 1–8.
- [12] Janssen B H, Guiking F C T, van der Eijk D, *et al.* A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS)[J]. *Geoderma*, 1990, 46: 299–318.
- [13] Smaling E M A, Janssen B H. Calibration of QUEFTS: A model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices[J]. *Geoderma*, 1993, 59: 21–44.
- [14] 何萍, 徐新朋, 周卫, 等. 肥料养分推荐原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021, .
He P, Xu X P, Zhou W, *et al.* Principle and application of fertilizer nutrient recommendation[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [15] Liu M Q, Yu Z R, Liu Y H, Konijn N T. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: The QUEFTS approach[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74: 245–258.
- [16] Witt C, Dobermann A, Abdurachman S, *et al.* Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia [J]. *Field Crops Research*, 1999, 63: 113–138.
- [17] Buresh R J, Pampolino M F, Witt C. Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirements for irrigated rice-based cropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2010, 335: 35–64.
- [18] Pathak H, Aggarwal P K, Roetter R, *et al.* Modelling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency, and fertilizer requirements of wheat in India[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65: 105–113.
- [19] Maiti D, Das D K, Pathak H. Fertilizer requirement for irrigated wheat in eastern India using the QUEFTS simulation model[J]. *The Scientific World Journal*, 2006, 6: 231–245.
- [20] 孙昭安, 陈清, 朱彪, 等. 化肥氮对冬小麦氮素吸收的贡献和土壤氮库的补偿[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(3): 413–430.
Sun Z A, Chen Q, Zhu B, *et al.* Contributions of fertilizer N to winter wheat N uptake and compensation of soil N pool in farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3): 413–430.
- [21] Dobermann A, Witt C, Abdurachman S, *et al.* Estimating indigenous nutrient supplies for site-specific nutrient management in irrigated rice[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 924–935.
- [22] 任思洋, 张青松, 李婷玉, 张福锁. 华北平原五省冬小麦产量和氮素管理的时空变异[J]. 中国农业科学, 2019, 52(24): 4527–4539.
Ren S Y, Zhang Q S, Li T Y, Zhang F S. Spatiotemporal variation of winter wheat yield and nitrogen management in five provinces of North China plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(24): 4527–4539.
- [23] 杜文婷, 雷肖肖, 卢慧宇, 等. 氮肥减量施用对我国三大粮食作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(24): 4863–4878.
Du W T, Lei X X, Lu H Y, *et al.* Effects of reducing nitrogen application rate on the yields of three major cereals in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(24): 4863–4878.
- [24] 都江雪, 韩天富, 曲潇林, 等. 中国主要粮食作物磷肥偏生产力时空演变特征及驱动因素[J]. 植物营养与肥科学报, 2022, 28(2): 191–204.
Du J X, Han T F, Qu X L, *et al.* Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of partial phosphorus productivity in major grain crops in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 191–204.
- [25] 张鑫尧, 张敏, 朱远芄, 等. 巢湖流域磷肥减量施用对稻麦轮作体系作物产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(19): 3791–3806.
Zhang X Y, Zhang M, Zhu Y P, *et al.* Effects of reduced phosphorus application on crop yield and grain nutritional quality in the rice-wheat rotation system in Chaohu Lake Basin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(19): 3791–3806.
- [26] 王乐, 张淑香, 马常宝, 李春花. 潮土区29年来土壤肥力和作物产量演变特征[J]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24(6): 1435–1444.
Wang L, Zhang S X, Ma C B, Li C H. Characteristics of soil fertility and crop yield evolution in fluvo-aquic soil area in the past 29 years [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1435–1444.
- [27] 马悦, 田怡, 于杰, 等. 北方麦区土壤有效磷阈值及小麦产量、籽粒氮磷钾含量对监控施肥的响应[J]. 植物营养与肥科学报, 2021, 27(10): 1675–1691.
Ma Y, Tian Y, Yu J, *et al.* Threshold of soil available P and the response of wheat yield and grain N, P, and K concentrations to test-integrated fertilizer application in the northern wheat production region of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(10): 1675–1691.
- [28] 马悦, 田怡, 苑爱静, 等. 北方麦区小麦产量与蛋白质含量变化对土壤硝态氮的响应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(18): 3903–3918.
Ma Y, Tian Y, Yuan A J, *et al.* Response of wheat yield and protein concentration to soil nitrate in northern wheat production region of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(18): 3903–3918.
- [29] 徐霞, 赵亚南, 黄玉芳, 等. 不同地力水平下的小麦施肥效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4076–4086.
Xu X, Zhao Y N, Huang Y F, *et al.* Fertilization effect of wheat under

- different soil fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(21): 4076–4086.
- [30] 张晶, 张定一, 王丽, 等. 不同有机肥和氮磷组合对旱地小麦的增产机理研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 238–243.
- Zhang J, Zhang D Y, Wang L, *et al.* The mechanism of different combinations of organic and N, P fertilizers increasing yield of dry-land wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 238–243.
- [31] 李燕青, 温延臣, 林治安, 赵秉强. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(11): 1835–1846.
- Li Y Q, Wen Y C, Lin Z A, Zhao B Q. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1835–1846.
- [32] 张贺, 杨静, 周吉祥, 等. 连续施用土壤改良剂对砂质潮土团聚体及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 791–801.
- Zhang H, Yang J, Zhou J X, *et al.* Effects of organic and inorganic amendments on aggregation and crop yields in sandy fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5): 791–801.
- [33] 王箫璇, 张敏, 张鑫尧, 等. 不同磷肥对砂姜黑土和红壤磷库转化及冬小麦磷素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(6): 1113–1126.
- Wang X X, Zhang M, Zhang X Y, *et al.* Effects of different varieties of phosphate fertilizer application on soil phosphorus transformation and phosphorus uptake and utilization of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(6): 1113–1126.
- [34] 代新俊, 杨珍平, 陆梅, 等. 不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 710–720.
- Dai X J, Yang Z P, Lu M, *et al.* Effects of nitrogen forms and amounts on nitrogen translocation, yield and quality of strong-gluten wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 710–720.
- [35] 付帅, 刘晓明, 马阳, 等. 氮素形态对强筋和中筋小麦产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(1): 83–93.
- Fu S, Liu X M, Ma Y, *et al.* Effects of nitrogen supply forms on the quality and yield of strong and medium gluten wheat cultivars[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(1): 83–93.
- [36] 梁媛媛, 王泽平, 史秋哲, 等. 不同分子量黄腐酸对冬小麦生长和养分吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(2): 308–322.
- Liang Y Y, Wang Z P, Shi Q Z, *et al.* Effects of fulvic acid with different molecular weights on growth and nutrient utilization of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2): 308–322.
- [37] 刘媛, 袁亮, 张水勤, 等. 不同分子量聚天冬氨酸对小麦根系生长和养分吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(13): 2526–2537.
- Liu Y, Yuan L, Zhang S Q, *et al.* Effects of polyaspartic acid with different molecular weights on root growth and nutrient uptake of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(13): 2526–2537.
- [38] 李玉, 贺明荣, 代兴龙, 董元杰. 氮素与抑制剂双控脲素的制备及其对土壤供氮能力和小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1612–1624.
- Li Y, He M R, Dai X L, Dong Y J. Preparation of dual controlled release urea with nitrogen inhibitor and resine coating and the effects on soil nitrogen supply capacity and wheat yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1612–1624.
- [39] 杜思婕, 张艺磊, 张志勇, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系不同新型尿素的氮素利用率及去向[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(1): 24–34.
- Du S J, Zhang Y L, Zhang Z Y, *et al.* Nitrogen use efficiency and fate of new urea types in a winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1): 24–34.
- [40] 严艳鸽, 张水勤, 李燕婷, 等. 葡聚糖改性尿素对冬小麦产量和肥料氮去向的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(2): 287–299.
- Yan Y G, Zhang S Q, Li Y T, *et al.* Effects of dextran modified urea on winter wheat yield and fate of nitrogen fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(2): 287–299.
- [41] 郝胜磊, 蔡廷瑶, 冯小杰, 等. 新型肥料对全球三大粮食作物产量和土壤生物学活性影响的Meta分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1496–1505.
- Hao S L, Cai T Y, Feng X J, *et al.* Effects of new fertilizers on the yield and soil biological activity of three major food crops: A global meta-analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1496–1505.
- [42] 谭德水, 林海涛, 朱国梁, 等. 黄淮海东部冬小麦一次性施肥的产量效应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3887–3896.
- Tan D S, Lin H T, Zhu G L, *et al.* Effect of one-off fertilization on winter wheat yield in Huang-Huai-Hai east region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3887–3896.
- [43] 卞文新, 马晓晓, 孙东旭, 等. 包膜氮肥一次性减量施用对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(10): 1840–1851.
- Bian W X, Ma X X, Sun D X, *et al.* Effects of coated nitrogen fertilizer under one-time reduced application on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(10): 1840–1851.
- [44] 张经廷, 陈青云, 吕丽华, 等. 冬小麦-夏玉米轮作产量与氮素利用最佳水氮配置[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 886–896.
- Zhang J T, Chen Q Y, Lü L H, *et al.* Optimum combination of irrigation and nitrogen for high yield and nitrogen use efficiency in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4): 886–896.
- [45] 黄明, 王朝辉, 罗来超, 等. 垄覆沟播及施肥位置优化对旱地小麦氮磷钾吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1158–1168.
- Huang M, Wang Z H, Luo L C, *et al.* Effects of ridge mulching, furrow seeding, and optimized fertilizer placement on NPK uptake and utilization in dryland wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1158–1168.
- [46] 邓丽娟, 焦小强. 氮管理对冬小麦产量和品质影响的整合分析[J].

- 中国农业科学, 2021, 54(11): 2355–2365.
- Deng L J, Jiao X Q. A meta-analysis of effects of nitrogen management on winter wheat yield and quality[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(11): 2355–2365.
- [47] 梁振凯, 郭聪颖, 王彩芝, 等. 氮锌配施促进小麦根系形态建成及其生理活性提高[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 826–839.
- Liang Z K, Guo C Y, Wang C Z, *et al.* Synergistic effect of combined application of nitrogen and zinc on construction of good morphology and high physiological activities of wheat root[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5): 826–839.
- [48] 聂兆君, 秦世玉, 刘红恩, 等. 氮锌配施对冬小麦产量及土壤氮素转化相关酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 431–441.
- Nie Z J, Qin S Y, Liu H E, *et al.* Effects of combined application of nitrogen and zinc on winter wheat yield and soil enzyme activities related to nitrogen transformation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 431–441.
- [49] 韩守威, 司纪升, 余维宝, 等. 山东省冬小麦产量差与氮肥利用效率差形成机理解析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(16): 3110–3122.
- Han S W, Si J S, Yu W B, *et al.* Mechanisms analysis on yield gap and nitrogen use efficiency gap of winter wheat in Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(16): 3110–3122.