



优化施肥下长江流域冬小麦产量及肥料增产效应

黄晓萌^{1,2}, 刘晓燕², 串丽敏³, 杨兰芳¹, 何萍², 王秀斌², 仇少君², 赵士诚², 徐新朋²

(¹湖北大学资源环境学院, 武汉 430062; ²中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

³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】针对长江流域冬小麦不合理施肥带来的肥料利用率低的现状, 探讨冬小麦产量分布特征及施用氮、磷和钾肥料的增产效应, 为长江流域冬小麦肥料减施增效和优化养分管理措施提供依据。【方法】本文数据来源于国际植物营养研究所(IPNI)于2000—2018年在我国长江流域开展的田间试验, 以及在中国知网(CNKI)数据库通过检索字段或字段组合(冬小麦、冬小麦+产量及冬小麦产量+肥料利用率等)得到的此期间关于长江流域冬小麦田间试验的论文, 共1732个田间试验。试验处理包括: 优化施肥处理, 农民习惯施肥, 以及在优化施肥和农民习惯施肥基础上的不施氮肥、不施磷肥和不施钾肥处理, 以探究长江流域各省(市)(四川、云南、贵州、重庆、湖北、安徽、江苏、浙江和上海)冬小麦在优化施肥下的可获得产量、产量反应、相对产量、农学效率和偏生产力特征。【结果】我国长江流域冬小麦优化施肥处理下的平均产量为 $6.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中安徽省平均产量水平最高, 为 $7.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 重庆市最低, 为 $3.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施用氮、磷和钾肥的平均产量反应分别为 2.3 、 0.9 和 $0.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但变异范围较大。氮、磷和钾肥平均相对产量分别为 0.6 、 0.8 和 0.9 , 氮是小麦产量的主要限制因子。优化施肥处理的氮、磷和钾肥的平均农学效率分别为 12.6 、 11.6 和 $7.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均偏生产力分别为 34.0 、 78.9 和 $73.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与农民习惯施肥措施相比, 优化施肥处理平均增产 $0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增幅为 8.8% ; 氮、磷、钾肥的农学效率分别提高了 41.1% 、 121.1% 和 84.6% ; 偏生产力分别提高了 42.4% 、 23.5% 和 25.4% 。【结论】优化施肥有效提高了长江流域冬小麦的产量和养分利用率, 但各省(市)间存在一定差异且省(市)内变异较大。四川、云南、湖北和江苏省的部分地区具有较低的产量反应, 说明具有较高的土壤养分供应, 应因地制宜地制定养分优化管理方案。分析长江流域优化养分管理措施下的小麦产量反应和肥料利用率等参数, 可以确定氮为小麦产量的第一限制因子。

关键词: 长江流域; 冬小麦; 产量反应; 肥料利用率

Effects of Yield and Fertilization on Yield Increase of Winter Wheat in Yangtze Valley Under Optimized Fertilization

HUANG XiaoMeng^{1,2}, LIU XiaoYan², CHUAN LiMin³, YANG LanFang¹, HE Ping², WANG XiuBin²,
QIU ShaoJun², ZHAO ShiCheng², XU XinPeng²

(¹Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062; ²Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ³Institute of Agricultural Information and Economics, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097)

收稿日期: 2019-11-20; 接受日期: 2020-02-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0200502, 2016YFD0200101)、国家自然科学基金项目(31801938)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132019022)、中国农业科学院-国际植物营养研究所植物营养创新研究联合实验室国际交流与合作研究(1610132019047)

联系方式: 黄晓萌, E-mail: Huangxmeng@163.com。通信作者徐新朋, Tel: 010-82105029; E-mail: xuxinpeng@caas.cn。通信作者杨兰芳, Tel: 027-88661699-8115; E-mail: lfyang@hubu.edu.cn

Abstract: 【Objective】Aiming to the low nutrient use efficiency caused by unreasonable fertilization of winter wheat in the Yangtze Valley, this study summarized the yield distribution characteristics of each province in the Yangtze Valley and the stimulation effect of applying nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer, so as to provide a scientific basis for optimizing the application fertilizer of winter wheat in the Yangtze Valley and improving nutrient management strategies. 【Method】The data of field experiments in this paper were derived from field experiments conducted by the International Institute of Plant Nutrition (IPNI) in China's Yangtze Valley from 2000 to 2018, as well as published papers on wheat field trials from 2000 to 2018 obtained by searching key words (winter wheat, winter wheat + yield, winter wheat yield + fertilizer utilization, etc.) in CNKI database, totally 1 732 field trials. The experimental treatment included optimized fertilization treatment, farmers practices, and none nitrogen, none phosphorus and none potassium treatments based on these two treatments, which was used to explore the characteristics of attainable yield, yield response, relative yield, agronomic efficiency and partial factor productivity of winter wheat under optimized fertilization in the Yangtze Valley (Sichuan, Yunnan, Guizhou, Chongqing, Hubei, Anhui, Jiangsu, Zhejiang and Shanghai). 【Result】For all the data, the average yield of winter wheat in the Yangtze Valley under optimal fertilization treatment was $6.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, of these, Anhui province had the highest average yield with $7.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the lowest average yield with $3.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Chongqing. The average yield response of N, P and K fertilizer application were 2.3, 0.9 and $0.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, but there were significant differences among provinces. The average relative yield of N, P and K were 0.6, 0.8 and 0.9, respectively. The average agronomic efficiency of N, P and K were 12.6, 11.6 and $7.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and the average partial productivity were 34.0, 78.9 and $73.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. As compared to farmers' practices, the optimized fertilization treatment increased wheat yield by $0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ with an increase by 8.8%, increased agronomic efficiency of N, P and K fertilizer application by 41.1%, 121.1% and 84.6%, and partial factor productivity by 42.4%, 23.5% and 25.4%, respectively. 【Conclusion】Optimized fertilization had positive effect on the yield and nutrient use efficiency of winter wheat in the Yangtze Valley, but there were certain differences among provinces and great variation within provinces. There was the lower yield response in some provinces, such as Sichuan, Yunnan, Hubei and Jiangsu, indicated that had the higher soil nutrient supply in these regions. Therefore, optimal nutrient management should be formulated according to local conditions. By analyzing the parameters of wheat yield response and nutrient use efficiency under optimal nutrient management measured in the Yangtze Valley, nitrogen could be identified as the first limiting factor of wheat yield.

Key words: Yangtze Valley; winter wheat; yield response; nutrient use efficiency

0 引言

【研究意义】长江流域小麦种植区是我国重要的农业生产基地, 其小麦播种面积和小麦产量分别为 777.8 万 hm^2 和 3 829.9 万 t, 分别占全国小麦总耕地面积和总产量的 31.7% 和 28.5%^[1]。施肥作为提高粮食产量的重要措施之一, 在保证我国小麦产量及粮食安全上发挥着重要作用^[2]。农民为了追求高产盲目施用化肥的现象非常普遍, 致使化肥施用量不断攀高, 我国已成为世界上最大的化肥生产国和消费国, 而我国的小麦产量增长率却呈负增长趋势, 养分利用效率不断降低^[3-5]。研究表明我国小麦的氮、磷和钾肥的平均生理利用率仅为 28.3、67.8 和 17.4 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[4], 氮肥的平均偏生产力仅为 $28.0 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[6], 氮、磷和钾肥平均利用率分别为 32.0%、19.0% 和 44.0%^[7], 仍处于较低水平。大量养分资源投入致使土壤养分盈余过剩^[8-9], 如华北平原和太湖流域的土壤氮素养分的盈余量介于 200.0—256.0 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[10]。因此, 合理地进行养分管理以促使小麦产量与肥料利用率协同发展变得尤为重

要。【前人研究进展】诸多学者开展了关于提高小麦产量和肥料利用率方面的田间试验研究, 如赵营等^[11]的研究表明, 与农民习惯施肥措施相比, 优化施肥在不降低产量的前提下, 可节约 29.0% 的氮肥, 提高 6.4%—7.3% 的肥料利用率, 并减少 24.0%—44.0% 的土壤氮素盈余; 苏瑞光等^[12]在不同土壤类型上的优化施肥研究表明, 应用小麦养分专家系统和 ASI 法推荐施肥均可提高 5.0% 以上的小麦产量; 以小麦生育期养分需求规律为基础, 根据土壤水分和养分进行优化的水肥管理, 可节约氮肥一半以上^[13]; 以及刘德平等^[14]应用“3414”试验可以得出小麦的最佳施肥量范围。【本研究切入点】分析可获得产量、施肥后的增产效应和肥料利用率特征参数将有助于优化养分管理措施, 但长江流域作为冬小麦的重要产区还缺少此方面参数的综合分析。【拟解决的关键问题】本文通过汇总分析我国长江流域开展的 1 732 个田间试验, 探究长江流域冬小麦在优化施肥下的产量和肥料利用率特征, 以为长江流域冬小麦推荐施肥和优化养分管理措施提供数据支撑, 实现减肥增效。

1 材料与方法

研究区域为长江流域冬小麦种植区各省（市），试验数据按照长江上游至下游流经的省（市），即四川、云南、贵州、重庆、湖北、安徽、江苏、浙江和上海的顺序进行归纳整理分析。

1.1 数据来源

本研究的试验数据来源于国际植物营养研究所（IPNI）中国项目组于 2000—2018 年在中国长江流域开展的小麦田间试验，以及此期间在学术期刊上公开发表的文章，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“冬小麦”、“冬小麦+产量”及“冬小麦产量+肥料利用率”等得到的中文文献，所有数据均来自于田间试验，共计 1 732 个田间试验。试验涵盖了长江流域冬小麦主要种植区域，试验类型主要包括“3414”试验、不同肥料用量试验、减肥试验、耕作措施试验等，处理包

括优化施肥处理、农民习惯施肥处理、以及基于这两个处理的减氮、减磷和减钾处理等。长江流域冬小麦产区的试验点气候和土壤理化性状见表 1。

1.2 数据分析与统计

作物产量和肥料利用率特征是优化养分管理和提高小麦施肥水平的关键，探讨可获得产量及肥料增产效应有助于确定粮食产量目标，分析和制定农业管理措施，对确定地区粮食增产潜力、农业的可持续发展至关重要^[15]。本研究，采用可获得产量即在田间或试验站的试验条件下可以获得的最大产量来表征优化施肥处理产量。使用产量反应表征肥料的增产效应，相对产量表征土壤的基础养分供应能力，农学效率和偏生产力表征肥效。以氮为例计算公式如下，磷、钾计算同氮：

氮产量反应(yield response to N fertilizer application, YR-N, t·hm⁻²) = 氮磷钾全施处理产量-不施氮处理产量，磷和钾产量反应分别用 YR-P 和 YR-K 表示；

表 1 长江流域冬小麦试验点信息

Table 1 The soil characteristics of experimental sites in winter wheat growing-region in Yangtze Valley

省（市） Province	样本数 No. of samples	小麦种植面积 Wheat planting area (×10 ³ hm ²)	土壤类型 Soil type	降雨量 Precipitation (mm)	pH	有机质 OM (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Hydrolyzable N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Olsen P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
四川 Sichuan	186	64.2	潮土、棕壤土、水稻土 Fluvo-aquic soil, Brown soil, Paddy soil	900-1800	5.5-8.2	1.6-48.6	13.4-191.3	1.8-62.4	23.9-130.4
云南 Yunnan	89	343.7	水稻土、红壤土、紫色土 Paddy soils, Red soil, Purplish soil	600-1500	4.3-7.8	16.5-60.9	21.9-224.0	5.0-50.8	23.9-133.0
贵州 Guizhou	35	156.0	黄壤土、紫色土 Yellow soil, Purplish soil	700-1500	6.1-7.6	1.5-32.0	53.0-165.0	5.0-25.3	44.5-123.2
重庆 Chongqing	20	30.1	黄壤土、水稻土、紫色土 Yellow soil, Paddy soil, Purplish soil	900-1600	6.5-7.7	9.6-31.2	7.8-145.0	3.0-26.6	58.8-182.4
湖北 Hubei	106	1153.2	潮土、棕壤土、黄棕壤土 Fluvo-aquic soil, Brown soil, Yellow-brown soil	800-1600	4.8-8.3	11.0-43.2	42.0-167.3	2.9-34.8	37.1-166.0
安徽 Anhui	451	2822.8	黑土、潮土、水稻土 Black soil, Fluvo-aquic soil, Paddy soil	600-1500	4.1-8.4	4.0-28.4	7.6-139.1	1.6-56.6	40.4-270.0
江苏 Jiangsu	751	2412.8	棕壤土、水稻土、潮土 Brown soil, Paddy soil, Fluvo-aquic soil	800-1400	5.2-8.5	1.1-46.3	7.3-186.3	2.3-83.1	23.8-213.0
浙江 Zhejiang	69	103.7	水稻土、红壤土 Paddy soil, Red soil	1000-1800	3.4-8.3	10.8-60.1	106.0-318.0	0.7-98.5	20.0-237.0
上海 Shanghai	29	21.0	黄棕壤、水稻土、紫色土 Yellow-brown soil, Paddy soil, Purplish soil	700-1700	6.1-7.9	10.8-27.9	34.5-134.0	9.4-50.1	62.0-164.0

氮相对产量 (relative yield to N fertilizer application, $RY-N$) = 不施氮处理产量/氮磷钾全施处理产量, 磷和钾相对产量分别用 $RY-P$ 和 $RY-K$ 表示;

氮农学效率 (agronomic efficiency to N fertilizer application, $kg \cdot kg^{-1}$, $AE-N$) = (氮磷钾全施处理产量 - 不施氮处理产量) / 施氮量, 磷和钾农学效率分别用 $AE-P$ 和 $AE-K$ 表示, 氮、磷和钾分别为 N 、 P_2O_5 和 K_2O ;

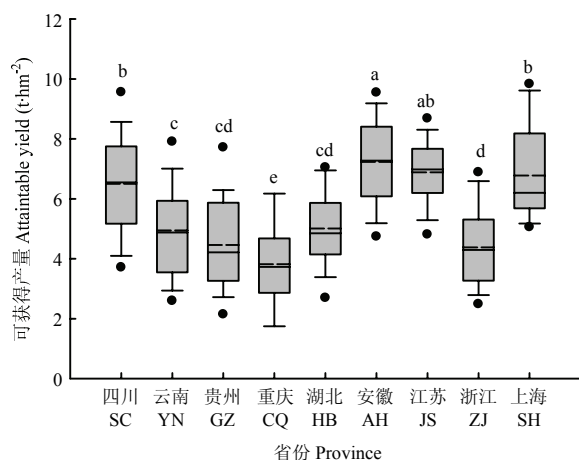
氮偏生产力 (partial factor productivity to N fertilizer application, $kg \cdot kg^{-1}$, $PFP-N$) = 氮磷钾全施处理产量 / 施氮量, 磷和钾偏生产力分别用 $PFP-P$ 和 $PFP-K$ 表示, 氮、磷和钾分别为 N 、 P_2O_5 和 K_2O 。

采用 Microsoft Excel 2010 和 Sigmaplot 10.0 对数据进行计算和图表绘制, 用 SPSS 17 对数据进行方差分析, 采用 LSD 最小极差法在 0.05 水平上进行多重比较。

2 结果

2.1 可获得产量分布特征

优化施肥措施的产量结果显示 (图 1), 我国长江流域冬小麦的平均产量可达 $6.6 t \cdot hm^{-2}$, 但各省 (市)



中间实线代表中值, 短线代表均值, 不同字母表示差异达 5% 显著水平, 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。下同

The middle solid line represents the median value and the short line represent the mean value, the different letters represent the significant difference of 5%, the upper and lower edges of the box, the upper and lower solid lines, and the solid circle represents represent the upper and lower 25%, the 90% and 10% values, the 95% and 5% values. SC: Sichuan; YN: Yunnan; GZ: Guizhou; CQ: Chongqing; HB: Hubei; AH: Anhui; JS: Jiangsu; ZJ: Zhejiang; SH: Shanghai. The same as below

图 1 长江流域各省 (市) 冬小麦可获得产量比较

Fig. 1 Comparison of attainable yield of winter wheat among provinces in Yangtze Valley

的可获得产量变异范围较大, 其变化范围为 $1.4—14.6 t \cdot hm^{-2}$, 其中浙江省、重庆市、云南省和贵州省的产量变异系数超过 30.0%。下游的产量整体要高于上游和中游, 其中以安徽省冬小麦的平均可获得产量最高, 平均为 $7.3 t \cdot hm^{-2}$, 其次为江苏省、上海市和四川省, 平均可获得产量分别为 6.8 、 6.7 和 $6.5 t \cdot hm^{-2}$ 。云南省、湖北省、贵州省和浙江省的冬小麦平均可获得产量则处于相对较低水平, 分别为 4.9 、 4.9 、 4.4 和 $4.3 t \cdot hm^{-2}$ 。而重庆市冬小麦的平均可获得产量最低, 仅为 $3.6 t \cdot hm^{-2}$ 。

2.2 产量反应和相对产量分布特征

优化施肥措施下的肥料产量反应 (YR) 结果显示, 长江流域冬小麦施用氮、磷和钾肥的平均 YR 分别为 2.3 、 0.9 和 $0.6 t \cdot hm^{-2}$, 氮肥产量反应 (YR-N) 明显高于磷肥产量反应 (YR-P) 和钾肥产量反应 (YR-K)

(图 2)。其中安徽省、湖北省、云南省、四川省和贵州省的 YR-N 的变异系数均超过 50.0%, 其中有 18.6% 的样本高于 $3.6 t \cdot hm^{-2}$, 处于 $1.4—3.6 t \cdot hm^{-2}$ 的 YR-N 占总样本的 64.4%, 上海市的 YR-N 均值高于其他省份, 为 $3.9 t \cdot hm^{-2}$, 其次为江苏省, 为 $3.0 t \cdot hm^{-2}$, 湖北省、四川省、安徽省和浙江省的 YR-N 均值较为接近, 分别为 2.5 、 2.4 、 2.4 和 $2.2 t \cdot hm^{-2}$, YR-N 均值较低的省份为重庆市、云南省和贵州省, 分别为 1.8 、 1.4 和 $1.2 t \cdot hm^{-2}$ 。各省的 YR-P 变异系数均超过 60%, 其中 YR-P 介于 $0.3—1.7 t \cdot hm^{-2}$ 之间的占全部样本数的 70.2%, 以安徽省的 YR-P 均值最高, 为 $1.2 t \cdot hm^{-2}$, 较低的 YR-P 均值出现在湖北省和贵州省, 均为 $0.6 t \cdot hm^{-2}$, 其余各省 (市) 的平均 YR-P 主要分布在 $0.8—1.0 t \cdot hm^{-2}$ 之间。长江流域的 YR-K 总体较低, 除浙江和贵州外, 各省 (市) 数据变异系数均在 70% 以上, YR-K 处于 $0.2—1.2 t \cdot hm^{-2}$ 的占全部样本数的 69.9%, 最高的 YR-K 均值出现在上海市和安徽省, 均为 $0.9 t \cdot hm^{-2}$, 较低的 YR-K 均值出现在浙江省, 为 $0.2 t \cdot hm^{-2}$, 其余各省 (市) 的 YR-K 的平均值分布在 $0.5—0.7 t \cdot hm^{-2}$ 之间。就总体情况而言, 上海市施用氮、磷和钾肥的增产效果最好, 贵州省的则最差。

优化施肥措施下的相对产量 (RY) 显示, 长江流域冬小麦施用氮、磷和钾肥的平均 RY 分别为 0.6 、 0.8 和 0.9 (图 3)。各省 (市) 的氮、磷和钾肥的 RY 存在较大差异, 其中 RY-N 数据的变异系数范围为 19.4%—43.0%, 有 65.2% 的 RY-N 处于 $0.4—0.7$ 之间, 以贵州省和云南省的 RY-N 均值最高, 为 0.7 , 以浙江省和上海市的最低, 分别为 0.5 和 0.4 , 其余各省 (市) 的平均 RY-N 分布在 $0.5—0.6$ 之间。重庆市具有较低的

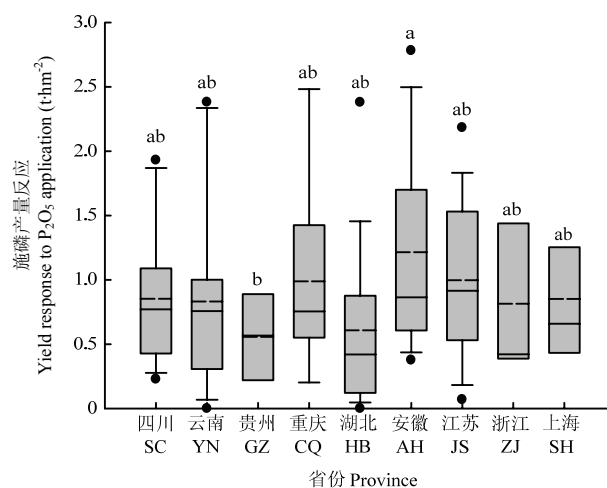
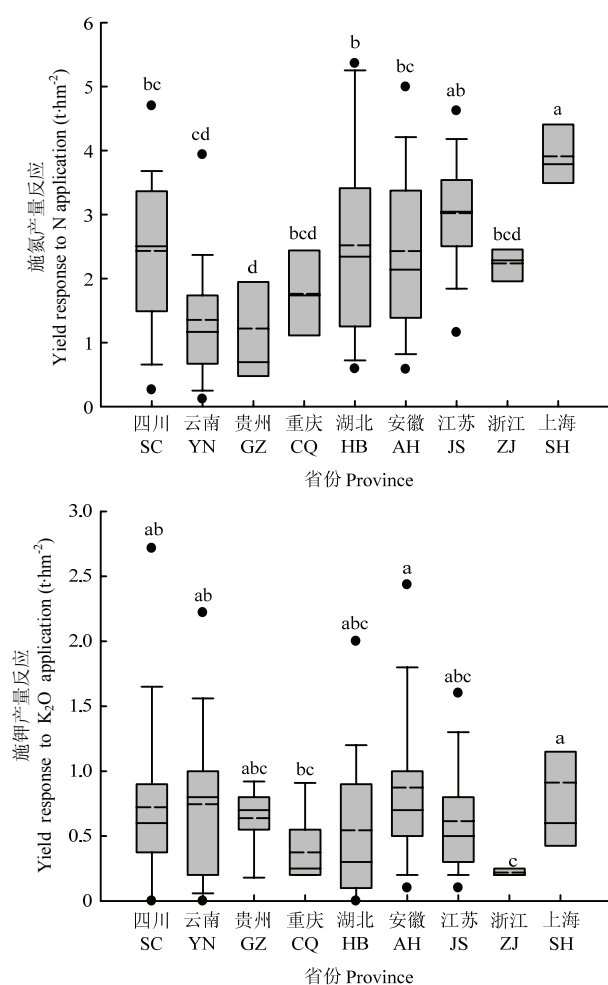


图2 长江流域各省(市)冬小麦氮、磷和钾肥产量反应

Fig. 2 Comparison of yield response to N, P and K fertilizer application for winter wheat among provinces in Yangtze Valley

RY-P 均值 (0.7) 且具有较高的变异系数, 为 29.1%, 其他各省(市)的 RY-P 均值较为接近, 普遍在 0.8 左右, 变异系数范围为 5.6%—18.0%。最高的平均 RY-K 出现在浙江省, 为 0.9, 最低的出现在贵州省, 为 0.8, 其余各省的 RY-K 较为接近, 平均值都处于 0.8—0.9 之间, 且各省内的变异系数范围为 2.0%—15.5%。

2.3 农学效率和偏生产力特征

农学效率(AE)结果表明(图4), 在优化施肥处理下, 我国长江流域冬小麦的平均 AE-N、AE-P 和 AE-K 分别为 12.6、11.6 和 7.7 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。AE-N 中, 有 68.0% 的样本处于 7.4—18.2 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 变异系数为 11.4%—82.4%, 以上海市平均 AE-N 最高, 为 16.1 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 云南省的最低, 为 7.9 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 主要是因为该省的 YR-N 较低, 其他各省份的 AE-N 平均值处于 10.5—14.5 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 且无显著差异。AE-P 中, 各省数据的变异系数均高于 58.6%, 处于 4.6—19.8 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 AE-P 占总样本数的 67.4%, AE-P 均值以浙江省最高, 为 15.4 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 云南省最低, 为 8.1 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

江苏省、湖北省和云南省的 AE-P 最低值接近于零, 其余各省的 AE-P 的平均值处于 8.6—14.0 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 且无显著差异。各省(市)AE-K 的数据变异范围为 39.7%—98.3%, 有 63.9% 的样本分布在 2.8—12.9 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各省(市)间 AE-K 差异较大, 四川省、云南省、贵州省和上海市的平均值均高于 9.3 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而浙江省和重庆市都低于 4.1 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, AE-K 在湖北省、云南省和四川省的最小值都接近于零。

优化施肥处理的偏生产力(PFP)结果表明(图5), 长江流域冬小麦的 PFP-N、PFP-P 和 PFP-K 的平均值分别为 34.0、78.9 和 73.4 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。PFP-N 中, 各省(市)变异系数范围为 14.3%—83.6%, 且 70.0% 的样本分布在 23.4—42.8 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, PFP-N 的均值以四川省和贵州省的最高, 且显著高于其他各省(市), 分别为 46.6 和 42.6 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 重庆市和上海市较低, 分别为 25.7 和 24.4 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其他各省(市)的平均 PFP-N 介于 30.6—36.7 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。PFP-P 中, 各省(市)变异系数范围为 29.0%—65.4%, 其中 68.1% 样本的 PFP-P 分

布于 49.2—108.8 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 重庆市的 PFP-P 均值显著低于其他各省(市), 为 44.7 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其余各省的平均 PFP-P 介于 61.7—87.2 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。PFP-K 中, 各省(市)变异系数范围为 37.9%—57.6%, 其中 67.8% 样本处于 42.5—103.2 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 以四川省的平均值最高, 为 83.8 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 重庆市最低, 为 42.4 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其他各省(市)的平均 PFP-K 介于 54.3—80.4 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

2.4 优化施肥措施与农民习惯施肥措施比较

在分析优化施肥与农民习惯施肥措施间产量及利用率差异时, 采用同时具有这两个处理的试验

($n\approx 337$, 四川 18 个, 云南 24 个, 贵州 2 个, 重庆 3 个, 湖北 17 个, 安徽 76 个, 江苏 150 个, 浙江 39 个, 上海 8 个)。结果显示, 与农民习惯施肥措施相比(表 2), 优化施肥措施显著提高了长江流域冬小麦产量, 平均增加了 0.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 平均增幅为 8.8%, 变化范围为 1.3%—59.1%; 显著降低了氮、磷和钾肥的用量, 平均减少了 25.6%、24.1%和 32.9%; 显著提高了 AE 和 PFP, 其中 AE-N、AE-P 和 AE-K 平均分别增加了 3.9、6.9 和 4.4 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; PFP-N、PFP-P 和 PFP-K 平均分别提高了 12.1、19.1 和 25.4 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

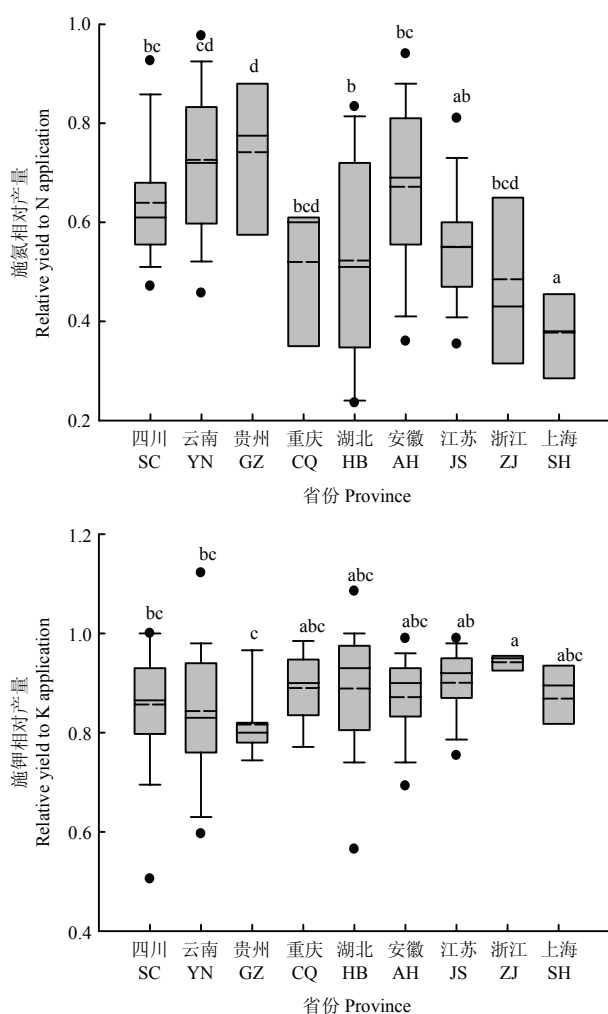


图 3 长江流域各省(市)冬小麦氮、磷和钾肥相对产量

Fig. 3 Comparison of relative yield to N, P and K fertilizer application for winter wheat among provinces in Yangtze Valley

3 讨论

分析可获得产量, 有助于决策者确定目标产量, 并优化作物养分管理措施。长江流域的集约化农业生产体系在保障我国粮食安全方面发挥着不可替代的作用。品种改良和优化管理等措施显著提高了小麦

产量^[16-18], 本研究中长江流域冬小麦优化施肥处理可获得产量的平均值可达 6.6 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 高于国家农业部统计的全国冬小麦的平均单产 (5.6 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[1], 与农民习惯施肥措施相比, 优化施肥处理的产量平均提高了 0.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占农民实际获得产量的 8.8%, 即如果农民采用良好的养分管理策略, 其小麦产量可提高 8.8%。

然而整个长江流域不同区域的土壤类型、气候条件和种植制度等存在明显差异，造成不同省（市）的小麦可获得产量存在明显异质性^[19]，如冬小麦-夏玉米轮作

体系且具有灌溉条件的安徽省和江苏省具有较高的可获得产量，而冬小麦-水稻轮作体系且降雨量大的区域其可获得产量相对较低。

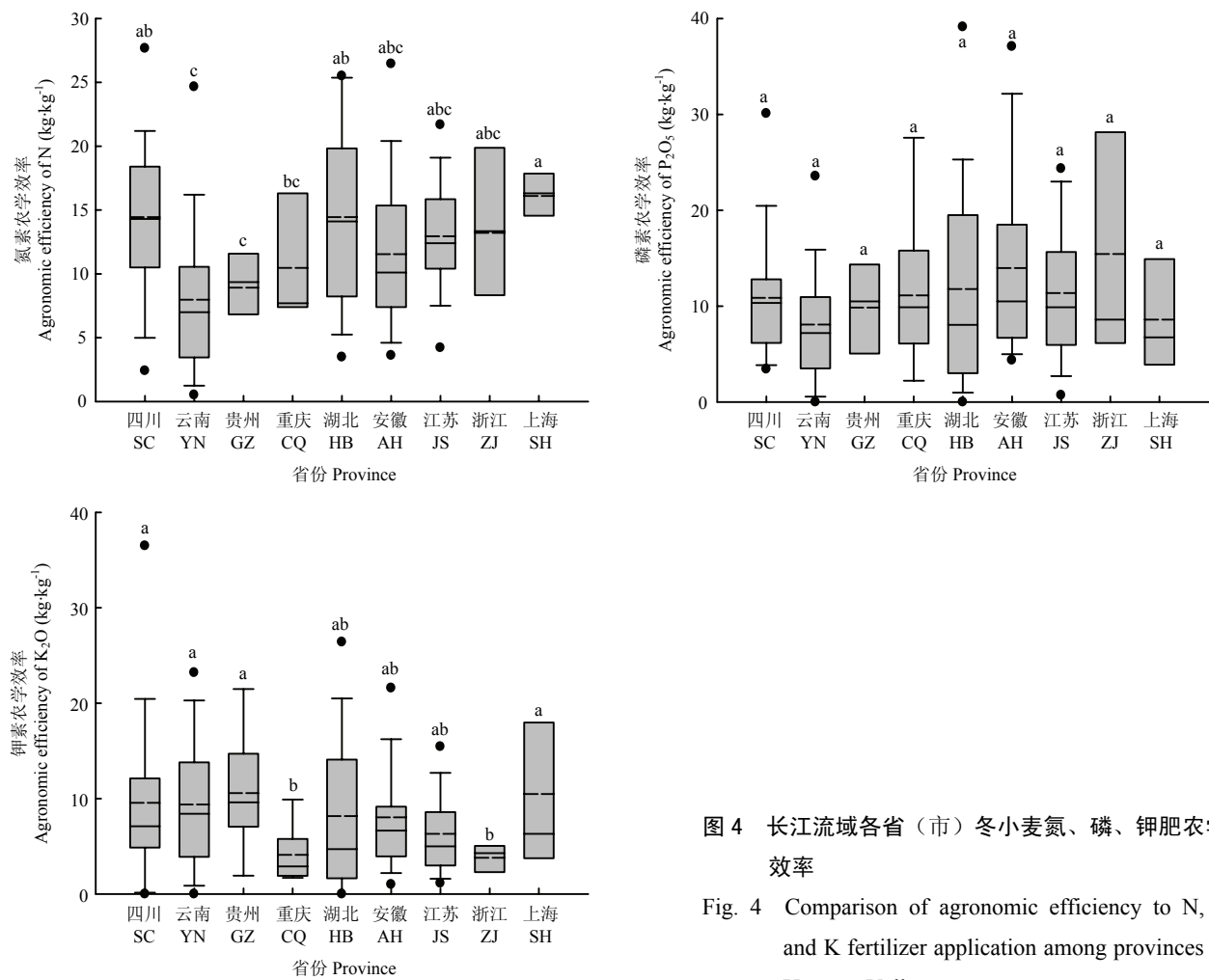


图 4 长江流域各省（市）冬小麦氮、磷、钾肥农学效率

Fig. 4 Comparison of agronomic efficiency to N, P and K fertilizer application among provinces in Yangtze Valley

表 2 优化施肥和农民习惯施肥产量及利用率比较

Table 2 Comparison of grain yield and nutrient use efficiency between optimal fertilizer practice and farmers' practices

参数 Parameter	优化施肥措施 Optimal practice	农民习惯施肥措施 Farmers' practice
产量 Yield (t·hm ⁻²)	6.2±1.6a	5.7±1.7b
施氮量 Fertilizer N application (kg·hm ⁻²)	154.0±34.0b	207±69.0a
施磷量 Fertilizer P ₂ O ₅ application (kg·hm ⁻²)	63.0±14.0b	83±52.0a
施钾量 Fertilizer K ₂ O application (kg·hm ⁻²)	55.0±10.0b	82±43.0a
氮肥农学效率 AE-N Agronomic efficiency of N (kg·kg ⁻¹)	13.4±6.8a	9.5±4.0b
磷肥农学效率 AE-P Agronomic efficiency of P (kg·kg ⁻¹)	12.6±9.0a	5.7±11.1b
钾肥农学效率 AE-K Agronomic efficiency of K (kg·kg ⁻¹)	9.6±8.3a	5.2±6.4b
氮肥偏生产力 PFP-N Partial factor productivity of N (kg·kg ⁻¹)	40.6±18.3a	28.5±10.2b
磷肥偏生产力 PFP-P Partial factor productivity of P (kg·kg ⁻¹)	100.5±37.4a	81.4±36.9b
钾肥偏生产力 PFP-K Partial factor productivity of K (kg·kg ⁻¹)	113.5±47.1a	88.1±51.1b

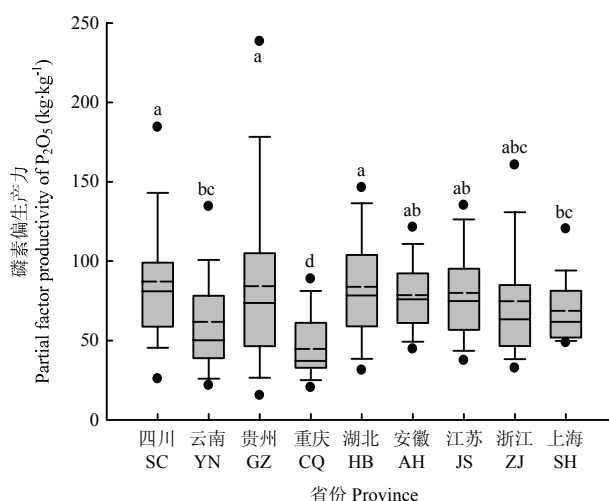
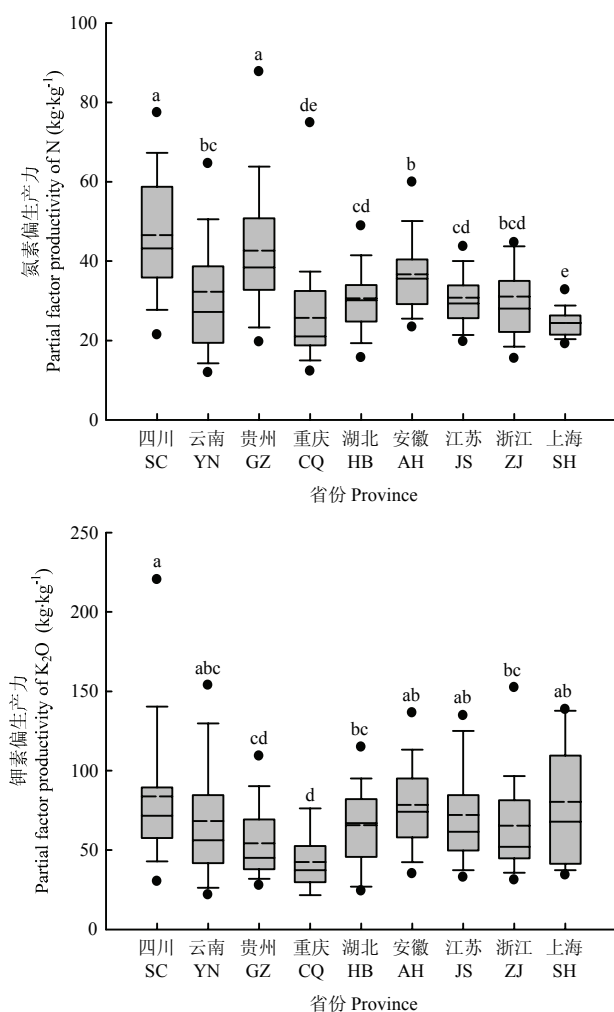


图 5 长江流域各省(市)冬小麦氮、磷和钾肥偏生产力

Fig. 5 Comparison of fertilizer partial productivity to N, P and K fertilizer application among provinces in Yangtze Valley

肥料增产效应很大程度上取决于土壤养分供应能力, 相对产量可以表征土壤的基础养分供应能力, 而产量反应可以反映施肥的增产效应^[20]。本研究中的 RY-P 与 RY-K 与吴良泉^[21]的研究结果基本一致, 均为 0.8 和 0.9, YR-N、YR-P 和 YR-K 也均高于 2001—2005 年全国小麦肥料增产效应的平均水平(1.9、0.8 和 0.4 t·hm⁻²)^[22]。当前小麦的过量施肥现象非常普遍, 过量的养分残留在土壤中导致土壤基础养分供应过高, 施肥效果不显著, 即具有较高的相对产量和较低产量反应^[23]。LIU 等^[24]研究表明, 长江中下游的氮、磷和钾的土壤基础养分供应可以分别达到 91.2、33.7 和 92.0 kg·hm⁻², 与 1985—1995 年土壤基础养分供应数据^[25]相比(N、P 和 K 分别为 54.1、14.2 和 93.4 kg·hm⁻²), 氮和磷的土壤基础养分供应量已大幅增加。本研究中, 有些地区不施某种养分处理的产量高于氮磷钾全施处理, 如云南省和湖北省的 RY-P 和 RY-K 最高值已超过 1.0, 说明土壤具有较

高的土壤磷和钾养分供应, 因此需要因地制宜地设计养分管理方案, 合理利用土壤的基础养分供应, 调控肥料用量, 进而提高肥料增产效应。YR 中以 YR-N 最高, 表明氮仍是长江流域冬小麦产量的主要养分限制因子。

不合理的化肥施用导致肥料利用率降低, 过量的养分残留在土壤中或流失到环境中, 对生态环境安全构成威胁。串丽敏等^[26]的研究结果显示, 长江中下游冬小麦氮肥投入量已超过 183.0 kg·hm⁻², 远远超出了养分允许平衡盈亏率。吴良泉等^[21]对整个长江流域冬小麦肥料的推荐用量研究表明, 氮、磷和钾施用量分别为 165.0 kg N·hm⁻²、68.0—70.0 kg P₂O₅·hm⁻² 和 53.0 kg K₂O·hm⁻² 时可以达到最佳的产投比。在四川省的肥料用量试验结果表明, 氮、磷和钾的施用量在 96.0 kg N·hm⁻²、60.0 kg P₂O₅·hm⁻² 和 45.0 kg K₂O·hm⁻² 下即可维持小麦产量, 且能提高肥料利用率并降低土壤养分盈余^[27]。本研究中, 优

化施肥处理的施肥量显著低于农民习惯施肥措施, 显著提高了肥料利用效率, 其中 AE-N、AE-P 和 AE-K 分别提高了 41.1%、121.1% 和 84.6%, PFP-N、PFP-P 和 PFP-K 提高了 42.4%、23.5% 和 25.4%。与早期的统计数据相比^[22,28-29], 优化施肥处理显著提高了 AE-P 和 AE-K, 但 AE-N 仍远低于世界平均水平 ($22 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[30]。已有研究表明, 在合理的肥料施用和管理措施下, AE-N 可以达到 $25.0 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上^[31]。全球的 PFP-N 需要保持每年平均 0.1%—0.4% 的增长率才能满足粮食需求^[32], 本研究中, 优化施肥下的偏生产力高于 CHUAN 等^[29]的研究结果 (PFP-N、PFP-P 和 PFP-K 分别为 32.9、65.9 和 $48.0 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。然而肥料利用率的高低不仅仅与作物施肥量有关, 还需要结合生长环境和养分管理措施才能有效提高肥效, 如不同水分条件, 轮作体系等等^[4,10,15]。对于整个长江流域冬小麦种植区而言, 其养分效率还有待进一步提高, 而科学的养分管理对于提高肥料利用效率和保障产量上具有重要意义。

优化施肥处理对长江流域冬小麦具有显著增产效果, 本研究中增幅范围可达 1.3%—59.1%, 但为维持小麦高产, 提高养分利用率, 除优化施肥外, 仍需从土壤养分供应、肥料调控与种植方式等诸多方面针对长江流域冬小麦进行综合管理。土壤肥力直接决定着小麦产量和施肥量, 并最终影响肥料利用率, 通过培肥地力, 可以达到削减肥料用量, 实现小麦增产的目的^[33], 本研究中四川、云南、湖北等省份的部分地区产量反应接近于零, 表明土壤具有较高的基础养分供应能力, 施肥的增产效果较低, 可以通过降低肥料投入来增加肥料利用效率。采用有机替代化肥、控释肥与普通肥料配施、硝化抑制剂等肥料调控措施也是优化养分管理的重要举措, 可以促进作物增产, 减少肥料损失, 提高肥料利用率, 也是我国“十三五”计划“两减”重大专项和“2020 年化肥零增长行动计划”重点研究方向之一^[34]。已有研究表明, 许多地区在当前施肥水平下减氮 20%, 不仅能够保证产量, 还能显著提高肥料利用率, 而在优化施氮条件下, 施用控释尿素的氮肥效率更高^[35]。施用小麦专用肥料并结合恰当的耕种方式可以在减少化肥投入的同时, 增产 6.1%—11.3%, 节约生产成本^[36]。合理增加种植密度可在保障产量的前提下减少 15.0%—30.0% 的施氮量, 并显著提高氮肥农学效率^[37]。此外, 改变单一的种植模式、调整茬口作物的种类, 如将大豆和花生作为

冬小麦种植区两熟复种模式的前茬作物, 可以增加农田生物多样性, 增强农田的持续生产力^[16]。采取相关的养分管理措施, 如氮肥后移, 能不同程度地促进产量提高, 最高可达 22.2%^[38]。而农民在施肥时对作物生长环境、土壤类型、土壤养分、作物轮作系统及环境差异缺乏考虑, 都将导致产量损失和养分利用率降低。本研究主要分析了施肥量对产量和肥料利用率的影响, 如果将土壤培肥、种植模式和肥料调控等综合为一个有机整体, 包括“4R”精准养分管理技术 (合适的肥料种类、合适的肥料用量、合适的施肥时间、合适的施肥位置) 及合理的水肥调控等技术, 从不同角度采取不同的作物管理措施进行集约化管理将有效促进我国长江流域冬小麦高产高效生产。

4 结论

优化施肥措施下长江流域各省 (市) 冬小麦产量存在明显差异性, 以安徽省、江苏省和四川省的产量最高。总体而言, 长江流域冬小麦的氮磷钾平均产量反应分别为 2.3、0.9 和 $0.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均农学效率分别为 12.6、11.6 和 $7.7 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均偏生产力分别为 34.0、78.9 和 $73.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于气候、土壤和轮作制度等差异, 产量反应、农学效率和偏生产力各省 (市) 间存在显著差异性。但与农民习惯施肥措施相比, 优化施肥措施显著提高了小麦产量, 平均增加了 $0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮、磷和钾肥的农学效率增幅均超过 40%, 偏生产力增幅均超过 20%。可见优化施肥具有显著增产增效的作用, 这仅仅是优化了肥料用量、施肥时间和施肥比例, 如果与其他耕作管理措施相结合, 效果将更佳。

Reference

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 中国农业统计资料 2017. 北京: 中国农业出版社, 2019: 29-30.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. *China Agriculture Statistical Report 2017*. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 29-30. (in Chinese)
- [2] ZHANG J H. China's success in increasing per capita food production. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(11): 3707-3711.
- [3] HEFFER P, PRUDPHOMME M. World agriculture and fertilizer demand, global fertilizer supply and trade 2008-2009 summary report. Vietnam: HoChiMinh City, 2008.
- [4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣凤. 中国

- 主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, CUI Z L, MA W Q, CHEN X P, JIANG R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [5] 李秋梅, 陈新平, 张福锁, V. Romheld. 冬小麦-夏玉米轮作体系中磷钾平衡的研究. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 152-156.
- LI Q M, CHEN X P, ZHANG F S, ROMHELD V. Study on balance of phosphorus and potassium in winter wheat and summer maize rotation system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 8(2): 152-156. (in Chinese)
- [6] DOBERMANN A R. Nitrogen use efficiency-state of the art//*IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Agronomy & Horticulture*. Faculty Publications, Frankfurt, Germany, 28-30 June, 2005: 1-16.
- [7] 农业农村部新闻办公室. 科学施肥促进肥料利用率稳步提高我国肥料利用率达 33%. 农业工程技术, 2013(10): 89.
- Agriculture Department Press Office. Scientific fertilization promotes the utilization rate of fertilizers and steadily improves the utilization rate of fertilizers in China to 33%. *Agricultural Engineering Technology*, 2013(10): 89. (in Chinese)
- [8] KHAN A, LU G Y, AYAZ M, ZHANG H T, WANG R J, LV F L, YANG X Y, SUN B H, ZHANG S L. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 256: 1-11.
- [9] 王朝辉. 粮食作物养分管理与农业绿色发展. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2719-2721.
- WANG Z H. Nutrient management of grain crops and green agricultural development. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2719-2721. (in Chinese)
- [10] NORSE D, JU X T. Environmental costs of China's food security. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209: 5-14.
- [11] 赵营, 周涛, 郭鑫年, 梁锦秀, 吴霞, 冀宏杰, 张维理. 优化施肥对春小麦产量、氮素利用及氮平衡的影响. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 119-124.
- ZHAO Y, ZHOU T, GUO X N, LIANG J X, WU X, JI H J, ZHANG W L. Effect of optimum fertilization on spring wheat yield, N utilization and apparent N balance. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(6): 119-124. (in Chinese)
- [12] 苏瑞光, 王宜伦, 刘举, 韩燕来, 李慧, 谭金芳. 养分专家系统推荐施肥对潮土冬小麦产量及养分吸收利用的影响. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 120-125.
- SU R G, WANG Y L, LIU J, HAN Y L, LI H, TAN J F. Effects of nutrient expert recommended fertilization on yield, absorption and utilization of nutrient of winter wheat in fluvo-aquic soil. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(1): 120-125. (in Chinese)
- [13] 范仲学, 王璞, M. Boening-Zilkens, 梁振兴, W. Claupein. 优化灌溉和施肥对冬小麦产量的影响. 麦类作物学报, 2003, 23(4): 99-103.
- FAN Z X, WANG P, ZILKENS M B, LIANG Z X, CLAUPEIN W. Effects of optimized irrigation and nitrogen fertilization on grain yield of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(4): 99-103. (in Chinese)
- [14] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 郑晓波, 孙玲玉, 常春龙. 小麦/玉米套作条件下氮、磷配施的肥料效应研究. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 262-269.
- LIU D P, YANG S Q, SHI H B, ZHENG X B, SUN L Y, CHANG C L. Effect of combined nitrogen and phosphorus fertilizer application of wheat-maize intercropping system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(3): 262-269. (in Chinese)
- [15] ITTERSUM M K. V, CASSMAN K G, GRASSINI P, JOOST W, TITTONELL P, HOCHMAN Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 2013, 143: 4-17.
- [16] 邵云, 李昊烺, 翁正鹏, 王璐, 李斯斯, 刘晴. 不同茬口对小麦养分利用和产量的影响. 麦类作物学报, 2019, 39(3): 356-363.
- SHAO Y, LI H Y, WANG Z P, WANG L, LI S S, LIU Q. Effects of different previous crops on nutrient utilization and yield of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(3): 356-363. (in Chinese)
- [17] 李廷亮, 谢英荷, 高志强, 洪坚平, 孟丽霞, 马红梅, 孟会生. 黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2735-2746.
- LI T L, XIE Y H, GAO Z Q, HONG J P, MENG L X, MA H M, MENG H S. Analysis on yield increasing and nitrogen efficiency enhancing of winter wheat under film mulching cultivation in the loess plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2735-2746. (in Chinese)
- [18] 刘红江, 殷跃军, 郭智, 张岳芳, 盛婧, 郑建初, 陈留根. 硝化抑制剂对小麦产量和氮素吸收利用的影响. 生态学杂志, 2019, 38(2): 443-449.

- LIU H J, YIN Y J, GUO Z, ZHANG Y F, SHENG J, ZHENG J C, CHEN L G. Effects of nitrification inhibitor on yield and nitrogen use efficiency of wheat. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2): 443-449. (in Chinese)
- [19] 车升国. 区域作物专用复合(混)肥料配方制定方法与应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- CHE S G. Design method and application of formula of regional crop-based compound fertilizer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [20] XU X P, HE P, ZHAO S C, QIU S J, JOHNSTON A M, WEI Z. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China. *Field Crops Research*, 2016, 186: 58-65.
- [21] 吴良泉. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- WU L Q. Fertilizer recommendations for three major cereal crops based on regional fertilizer formula and site specific adjustment in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [22] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率. *土壤*, 2017, 49(6): 1067-1077.
- YAN X, JIN J Y, LIANG M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China. *Soils*, 2017, 49(6): 1067-1077. (in Chinese)
- [23] CHUAN L M, HE P, PAMPOLINO M F, JOHNSTON A M, JIN J Y, XU X P, ZHAO S C, QIU S J, ZHOU W. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 2013, 140: 1-8.
- [24] LIU X Y, HE P, JIN J Y, ZHOU W, GAVIN S, STEVE P. Yield gaps, indigenous nutrient supply, and nutrient use efficiency of wheat in China. *Agronomy Journal*, 2011, 103(5): 1-12.
- [25] LIU M Q, YU Z R, LIU Y H, KONIJN N T. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: The QUEFTS approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74: 245-258.
- [26] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 徐新朋, 周卫, 郑怀国. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 76-86.
- CHUAN L M, HE P, ZHAO T K, XU X P, ZHOU W, ZHENG H G. Nitrogen cycling and balance for wheat in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 76-86. (in Chinese)
- [27] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 况福虹, 陈轩敬, 张跃强, 石孝均. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 864-873.
- ZHAO Y N, SU M M, LV Y, KUANG F H, CHEN X J, ZHANG Y Q, SHI X J. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 864-873. (in Chinese)
- [28] 王激清, 马文奇, 江荣凤, 张福锁. 养分资源综合管理与中国粮食安全. *资源科学*, 2008, 30(3): 415-422.
- WANG J Q, MA W Q, JIANG R F, ZHANG F S. Integrated soil nutrients management and China's food security. *Resources Science*, 2008, 30(3): 415-422. (in Chinese)
- [29] CHUAN L M, HE P, ZHAO T K, ZHENG H G, XU X P. Agronomic characteristics related to grain yield and nutrient use efficiency for wheat production in China. *PLoS ONE*, 2016, 11(9): e0162802.
- [30] LADHA J K, PATHAK H, KRUPNIK T J, SIX J, KESSEL C V. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 86-156.
- [31] DOBERMANN A. Nutrient use efficiency-measurement and management//*Fertilizer Best Management Practice: General Principles, Strategy for Their Adoption and Voluntary Initiatives vs Regulations*. Brussels, Belgium: IFA Int. Worksh. on Fertilizer Best Management Practices, 2007.
- [32] DOBERMANN A, CASSMAN K G. Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption. *Science China Life Series C: Life Sciences*, 2005, 48: 745-758.
- [33] 陆晓松, 于东升, 徐志超, 黄晶晶, 周聪聪, 孙波. 土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究. *土壤学报*, 2019, 56(2): 487-494.
- LU X S, YU D S, XU Z C, HUANG J J, ZHOU C C, SUN B. Study on comprehensive quantitative relationship of soil fertility quality and nitrogen application rate with wheat nitrogen use efficiency. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 487-494. (in Chinese)
- [34] 张建军, 樊延录, 赵刚, 党翼, 王磊, 李尚中. 长期定位施不同氮源有机肥替代部分含氮化肥对陇东旱塬冬小麦产量和水分利用效率的影响. *作物学报*, 2017, 43(7): 1077-1086.
- ZHANG J J, FAN Y L, ZHAO G, DANG Y, WANG L, LI S Z. Yield and water use efficiency of winter wheat in response to long-term application of organic fertilizer from different nitrogen resources replacing partial chemical nitrogen in dry land of eastern Gansu Province. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(7): 1077-1086. (in Chinese)
- [35] 常凤, 王海标, 陶静静, 任明炬, 王宜伦. 减氮配施控释尿素对冬

- 小麦产量及氮肥效率的影响. 中国农学通报, 2018, 34(25): 1-6.
- CHANG F, WANG H B, TAO J J, REN M J, WANG Y L. Combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate affect yield and N utilization efficiency of winter wheat. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(25): 1-6. (in Chinese)
- [36] 刘苹, 谭德水, 徐钰, 林海涛, 李彦, 宋效宗, 沈玉文, 刘兆辉. 施肥方法对小麦专用控释氮肥肥效的影响. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3897-3908.
- LIU P, TAN D S, XU Y, LIN H T, LI Y, SONG X Z, SHEN Y W, LIU Z H. Effects of fertilization methods of self-made wheat-specific controlled-release nitrogen fertilizer on fertilizer efficiencies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3897-3908. (in Chinese)
- [37] 易媛, 苏盛楠, 李福建, 徐凯峰, 朱新开, 李春燕, 丁锦峰, 朱敏, 郭文善. 密度氮肥互作对稻茬小麦产量及氮效率的协同调控效应. 麦类作物学报, 2018, 38(12): 1465-1472.
- YI Y, SU S N, LI F J, XU K F, ZHU X K, LI C Y, DING J F, ZHU M, GUO W S. Coordinate effects of interaction between density and nitrogen application on the yield and nitrogen-use efficiency in wheat under rice stubble. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(12): 1465-1472. (in Chinese)
- [38] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 刘于斌, 李伯群, 樊高琼, 熊涛. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1889-1898.
- WU X L, LI C S, TANG Y L, LIU Y B, LI B Q, FAN G Q, XIONG T. Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1889-1898. (in Chinese)
- (责任编辑 李云霞)