

# 长江流域冬小麦氮磷钾肥增产效应及其影响因素

黄晓萌<sup>1,2</sup>, 徐新朋<sup>1\*</sup>, 何萍<sup>1</sup>, 王秀斌<sup>1</sup>, 杨兰芳<sup>2</sup>, 仇少君<sup>1</sup>, 赵士诚<sup>1</sup>, 周卫<sup>1</sup>  
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430062)

**摘要:**【目的】分析长江流域施用氮、磷、钾肥对小麦产量的增产效应及主要影响因素的贡献率, 旨在明确不同条件下施用氮、磷、钾肥对小麦产量的影响, 为优化长江流域的小麦养分管理提供科技支撑。【方法】数据来源于国际植物营养研究所在我国长江流域开展的小麦田间试验, 以及在中国知网通过检索到的有关施肥增产效应的文献, 检索关键词为“冬小麦”、“冬小麦+产量”、“冬小麦产量+肥料利用率”, 符合 Meta 分析标准的氮、磷和钾数据分别有 724、624 和 658 组。以不施某种养分处理为对照, 以反应比作为该养分的增产效应值, 采用 Meta 分析方法, 定量分析施用氮、磷、钾肥对小麦产量变化的贡献, 并分别分析施肥水平、基础地力水平、种植区域、土壤有机质、pH 及土壤养分对产量效应的影响。【结果】与不施氮、磷或钾肥处理相比, 长江流域冬小麦施用氮、磷和钾肥分别可显著增加小麦产量 66.0%、17.9% 和 10.0%, 以氮肥增产效应最高。基础地力对氮、磷、钾肥的增产效应均具有显著影响, 氮、磷、钾肥均在低肥力土壤 (产量 < 2.0 t/hm<sup>2</sup>) 上的增产率最高, 分别为 134.2%、30.0% 和 12.1%, 氮、磷肥的增产效应与基础地力呈负相关关系。长江流域不同种植区域冬小麦氮、磷、钾肥的增产效应差异显著, 以重庆市的氮效应最高, 为 136.1% [ln(R) = 0.859], 以浙江省的磷效应最高, 为 39.1% [ln(R) = 0.330], 贵州省的钾效应最高, 为 19.1% [ln(R) = 0.175]。氮、磷、钾肥均在酸性土壤的增产效果最好, 增产效应随着土壤 pH 升高呈降低趋势, 增产率分别为 95.2%、29.4% 和 14.0%。土壤有机质含量对磷效应影响显著, 对氮和钾效应影响不显著。当土壤全磷 > 1.0 g/kg、全钾 > 20.0 g/kg、碱解氮 < 80.0 mg/kg、速效磷 > 25.0 mg/kg 及速效钾 < 90.0 mg/kg 时, 施氮增产效应最显著; 在土壤全磷 < 0.7 g/kg 和土壤速效磷 < 15.0 mg/kg 时, 施磷增产效应最显著; 在土壤速效钾 < 90.0 mg/kg 时, 施钾增产效应最显著。【结论】长江流域冬小麦施用氮、磷、钾肥的增产率分别为 66.0%、17.9% 和 10.0%, 氮肥仍是影响长江流域冬小麦增产的最重要养分因子。基础地力决定着施肥效应, 产量 < 2.0 t/hm<sup>2</sup> 的土壤施肥的增产潜力最高。土壤肥力因素中, pH、有机质和矿质养分含量应作为肥料投入的依据。

**关键词:** 长江流域; 冬小麦; 增产效应; Meta 分析; 综合效应值

## Yield response to NPK fertilization and the main impacts in production of winter wheat in Yangtze River catchments of China

HUANG Xiao-meng<sup>1,2</sup>, XU Xin-peng<sup>1\*</sup>, HE Ping<sup>1</sup>, WANG Xiu-bin<sup>1</sup>, YANG Lan-fang<sup>2</sup>, QIU Shao-jun<sup>1</sup>,  
ZHAO Shi-cheng<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China)

**Abstract:** 【Objectives】 This study analyzed the effects of N, P and K fertilizers on wheat yield in the Yangtze River catchments, and the contribution rates of the main influencing factors for the yield responses, which will provide data support for the managements of NPK fertilizers in production of wheat in the area. 【Methods】 The data were obtained from both the wheat field trials conducted by the International Plant Nutrition Institute in the Yangtze River catchments of China, and the published papers by searching the key words including winter wheat, winter wheat + yield, winter wheat yield + fertilizer utilization, etc. in CNKI database. According to the

收稿日期: 2020-03-04 接受日期: 2020-05-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (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 (1610132019047)。

联系方式: 黄晓萌 E-mail: huangxmeng@163.com; \* 通信作者 徐新朋 E-mail: xuxinpeng@caas.cn

requirement of Meta-analysis, there are total of 724, 624 and 658 data for nitrogen, phosphorus and potassium fertilization. The effect value of a nutrient was defined as the response ratio of its fertilization over no-fertilization treatment within a same trail, and Meta-analysis method was used to quantitatively analyze the contribution of each factors on the yield response effect. **【 Results 】** The application of NPK fertilizers increased the wheat yield in Yangtze River catchments significantly, and the yield increase rates by N, P and K fertilizers were averaged 66.0%, 17.9% and 10.0%, with the highest positive effect by N fertilizer. The yield effect was significantly affected by the inherent soil productivity, and the yield increase rates were as high as 134.2%, 30.0% and 12.1% on the low-productivity soil (yield < 2.0 t/hm<sup>2</sup>). There was a negative correlation between the yield-increasing effect of nitrogen and phosphate fertilizers and the inherent soil productivity. The fertilization effect varied significantly among planting areas, the highest N effect was in Chongqing [136.1%,  $\ln(R) = 0.859$ ], highest P effect in Zhejiang Province [39.1%,  $\ln(R) = 0.330$ ], and the highest K effect in Guizhou Province [19.1%,  $\ln(R) = 0.175$ ]. N, P and K fertilizers all had the best yield-increasing effects in acidic soils. The yield-increasing effects showed a downward trend with soil pH increasing, and the yield-increasing rates were 95.2%, 29.4% and 14.0%, respectively. Soil organic matter content had a significant effect on P production, but not on N and K. In soil of total-P > 1.0 g/kg, total-K > 20.0 g/kg, available-N < 80.0 mg/kg, available-P > 25.0 mg/kg and available-K < 90.0 mg/kg, N application had the most obvious yield increase. In soil of total-P < 0.7 g/kg and available-P < 15.0 mg/kg, P application was the most effective, and in soil of available-K < 90.0 mg/kg, K application increased the most. **【 Conclusions 】** The yield of winter wheat could be increased by 66.0%, 17.9% and 10.0% through the application of nitrogen, phosphate and potash fertilizers in Yangtze River catchments, respectively, and nitrogen is still the most effective nutrient. The inherent soil productivity affects the nutrient efficiency significantly and the high nutrient efficiency will be in the plot of yield < 2.0 t/hm<sup>2</sup>. The pH, organic matter and mineral nutrient content should be taken as the basis of fertilizer input in the winter wheat planting areas in Yangtze River catchments.

**Key words:** Yangtze River catchments; winter wheat; yield-increasing effect; Meta-analysis; comprehensive effect value

长江流域是我国传统的粮食生产基地, 农业生产条件优越, 其小麦播种面积占全国小麦种植面积的 31.7%, 在保障我国粮食安全上占有重要地位<sup>[1-2]</sup>。为实现粮食增产, 必须提高有限耕地的单位面积产量, 而施用化肥是最有效的增产措施之一, 其增产作用可达 50% 左右<sup>[3]</sup>, 但小麦种植区普遍存在不合理施肥现象<sup>[4-6]</sup>, 造成肥料利用率下降, 大量养分流失, 严重危害生态环境<sup>[7-9]</sup>。研究表明, 2002—2015 年我国小麦的平均过量施肥程度为 34.6%, 其中长江中下游过量施肥程度为 40.5%, 江苏、安徽、湖北等省份过量施肥程度大于 31.5%, 已成为高过量施肥区<sup>[10]</sup>。因此, 明确小麦施肥的增产效应及其影响因素, 对于优化长江流域小麦的养分管理、提高肥料区域配置、保障粮食安全和保护生态环境具有重要意义。

施肥可显著增加小麦产量<sup>[11-12]</sup>, 但近年来随着施肥量的不断增加, 导致施肥增产效应不断降低<sup>[6-7]</sup>,

如王旭等<sup>[13]</sup>研究表明, 与 20 世纪 80 年代初相比, 长江中下游小麦磷肥农学效率下降了 6.2%。大量的养分在土壤中累积, 造成许多地区小麦施肥后的增产效果不明显<sup>[14]</sup>, 串丽敏等<sup>[15]</sup>研究表明, 长江中下游的氮养分盈余已达 N 66.0 kg/hm<sup>2</sup>; Liu 等<sup>[16]</sup>研究表明, 长江中下游小麦种植区的土壤基础养分供应氮、磷和钾分别达到了 91.2、33.7 和 92.0 kg/hm<sup>2</sup>。在各个地区进行的肥料用量试验<sup>[17-19]</sup>, 在一定程度上可以反映该试验区域的肥料增产效应, 也给出了合理的肥料用量, 但个别的田间试验结果不能定量体现小麦施肥增产的综合效应, 且未能同时考虑到不同研究中各种因素对试验结果造成的差异。Meta-analysis 分析方法是一种将若干独立研究的统计结果进行定量系统分析的统计方法, 能对统计结果进行综合评价并分析影响因素<sup>[20]</sup>。Meta 分析可将多个同类的独立研究结果进行定量合并, 分析研究间的差异, 得到研究的综合效应结果<sup>[21-22]</sup>。因此, 本研究应用

Meta 分析探讨不同土壤理化性质、种植区域、施肥水平及基础地力水平下的施肥增产效应, 旨在为优化长江流域小麦养分管理措施、发挥肥料增产作用及提高肥料利用效率提供数据参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究试验数据来源于国际植物营养研究所 (IPNI) 中国项目部于 2000—2019 年在我国长江流域开展的小麦田间试验, 以及在中国知网数据库 (CNKI) 通过检索“冬小麦”、“冬小麦 + 产量”、“冬小麦产量 + 肥料利用率”等关键词及关键词组合所得到的文献。基于以下标准对试验数据进行筛选: 1) 试验位于长江流域冬小麦种植区域; 2) 同一试验需同时包括不施肥处理、优化施肥处理以及不施某种养分处理; 3) 同时具有不同处理的产量均值及其标准差; 4) 具有明确的施肥量及土壤养分情况等。基于以上标准, 共获取 2006 组数据 (样本量、产量均值和标准差), 并收集汇总了其试验地点、施肥量、土壤理化性质 (pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾) 等相关数据参数。

### 1.2 数据处理

以优化施肥的施肥量为基准, 对各试验的施肥水平进行划分。将氮、磷、钾肥的施用量分别设 5 个水平进行比较分析, 分别为: 0 水平, 不施某种养分; 1 水平 = 2 水平  $\times$  0.5 (施肥不足水平); 2 水平, 推荐施肥量 (氮、磷和钾肥的平均施用量为  $183.2 \pm 57.2$ 、 $80.8 \pm 23.7$  和  $85.1 \pm 31.6$  kg/hm<sup>2</sup>); 3 水平 = 2 水平  $\times$  1.5 (过量施肥水平); 4 水平 = 2 水平  $\times$  2 (严重过量施肥水平) 或更高。氮肥各施肥水平分别用 N0、N1、N2、N3 和 N4 表示, 磷肥各施肥水平分别用 P0、P1、P2、P3 和 P4 表示, 钾肥各施肥水平分别用 K0、K1、K2、K3 和 K4 表示。

采用不施肥处理的小麦产量表征土壤基础地力<sup>[23]</sup>, 本研究中长江流域基础地力产量范围为 0.5~9.7 t/hm<sup>2</sup>, 平均为 3.1 t/hm<sup>2</sup>, 变异系数为 51.5%。根据基础地力状况采用平均单产法<sup>[24]</sup>按  $< 2.0$  t/hm<sup>2</sup>、 $2.0 \sim 3.0$  t/hm<sup>2</sup> (包含 3.0 t/hm<sup>2</sup>)、 $3.0 \sim 4.0$  t/hm<sup>2</sup> 和  $> 4.0$  t/hm<sup>2</sup> 将基础地力产量划分为 4 个等级。4 个地力等级的样本量分别占总样本的 22.4% ( $n = 450$ )、33.1% ( $n = 624$ )、22.3% ( $n = 447$ ) 和 24.2% ( $n = 485$ )。

### 1.3 效应值计算

本研究选用反应比 (response ratio,  $R$ )<sup>[25-26]</sup>作为统

计学指标, 其计算公式为:

$$R = \frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}$$

式中,  $\bar{X}_1$  为氮、磷或钾肥不同水平下施肥处理小麦产量均值;  $\bar{X}_2$  为不施氮、磷或钾肥处理的小麦产量均值。

采用自然对数反应比 [log ratio of means,  $\ln(R)$ ] 衡量氮、磷或钾肥对小麦产量的影响程度, 其计算公式为:

$$\ln(R) = \ln\left(\frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}\right) = \ln(\bar{X}_1) - \ln(\bar{X}_2)$$

$\ln(R)$  的方差 [ $v_{\ln(R)}$ ] 计算公式为:

$$v_{\ln(R)} = \frac{SD_1^2}{n_{1\bar{X}_1}} + \frac{SD_2^2}{n_{2\bar{X}_2}}$$

式中,  $SD_1$  和  $SD_2$  分别表示施用和不施用某种养分处理的小麦产量的标准偏差;  $n_1$  和  $n_2$  分别表示施用和不施用某种养分处理的样本数量。以上计算运用 Meta 分析的 openMEE 软件完成, 并计算反应比 95% 的置信区间, 如果效应值 95% 的置信区间均大于 0, 则说明施肥对小麦产量有显著的正效应; 若置信区间均小于 0, 则说明施肥对小麦产量具有显著的负效应; 若置信区间包含 0, 则说明施肥对小麦产量无显著影响。

为了更清晰的对分析结果进行解释, 将  $R$  转化为增长率 ( $E$ ), 其计算公式为:

$$E = (R - 1) \times 100\%$$

### 1.4 模型选择与发表偏倚检验

本研究通过异质性检验确定分析模型, 若数据分析的显著性结果  $P_{QM} > 0.05$ , 则不同试验结果间不存在显著差异, 选择固定效应模型; 若  $P_{QM} < 0.05$ , 则存在显著差异, 使用随机效应模型。统计结果显示, 不同试验数据间存在明显异质性, 因此选择随机效应模型计算综合效应值 (表 1)。

为探究分析结果异质性来源和影响比重, 明确氮、磷及钾肥在不同条件下的产量效应和影响因素, 本研究从施肥水平、基础地力水平、种植区域、土壤有机质和 pH 及土壤养分等方面进行亚组分析。长江流域小麦种植区域包括四川、云南、贵州、重庆、湖北、安徽、江苏、浙江和上海 9 个省市; 研究不同施氮水平的综合效应时将 N1、N2、N3 和 N4 处理分别与 N0 处理进行对比分析 (不同施磷、钾水平的综合效应比较同理); 根据试验地区的土壤条件, 将土壤有机质 (g/kg) 划分为  $< 15.0$ 、

表 1 不同养分增产综合效应值样本描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistics of sample size

养分 Nitrite	样本量 Number	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Minimum	最大值 Maximum	$Q_i$	$df$	$P_{OM}$
N	724	0.507	0.025	0.483	0.532	89697.215	723	<0.001
P	624	0.165	0.018	0.147	0.183	32314.305	623	<0.001
K	658	0.095	0.008	0.086	0.103	9668.906	657	<0.001

注 (Note) :  $Q_i$ —异质性检验统计量 Statistic of heterogeneity;  $df$ —自由度 Degree of freedom;  $P_{OM}$ —显著性检验 Significance test.

15.0~20.0、> 20.0 等水平, pH 划分为 < 6.5、6.5~7.5、> 7.5 等水平, 全氮 (g/kg) 划分为 < 1.0、1.0~1.5、> 1.5 等水平, 全磷 (g/kg) 划分为 < 0.7、0.7~1.0、> 1.0 等水平, 全钾 (g/kg) 划分为 < 10.0、10.0~20.0、> 20.0 等水平, 碱解氮 (mg/kg) 划分为 < 80.0、80.0~120.0、> 120.0 等水平, 速效磷 (mg/kg) 划分为 < 15.0、15.0~25.0、> 25.0 3 个水平, 速效钾 (mg/kg) 划分为 < 90.0、90.0~130.0、> 130.0 等水平。

本研究采用 Rosenthal's 失安全系数 (fail-safe number, Nfs) 对各数据集进行发表偏倚检验, 如果  $Nfs > 5n + 10$  ( $n$  为样本量), 则认为结果可信<sup>[27]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦施肥的增产效应

施用氮、磷和钾肥对长江流域小麦产量均具有显著的正效应 (图 1), 即施用氮肥、磷肥及钾肥对产量的综合效应值的 95% 置信区间均大于 0。氮肥对小麦的增产效应最大 ( $Q_i = 89697.215$ ,  $df = 723$ ,  $P < 0.001$ ), 其综合效应值  $\ln(R)$  为 0.507 (0.483~0.532), 增产率为 66.0% (62.1%~70.2%);

其次为磷肥的增产效应 ( $Q_i = 32314.305$ ,  $df = 623$ ,  $P < 0.001$ ), 其  $\ln(R)$  为 0.165 (0.147~0.183), 增产率为 17.9% (15.8%~20.1%); 最后为钾肥的增产效应 ( $Q_i = 9668.906$ ,  $df = 657$ ,  $P < 0.001$ ), 其  $\ln(R)$  为 0.095 (0.086~0.103), 增产率为 10.0% (9.0%~10.9%)。Meta 分析结果的发表偏倚检验结果表明, 氮、磷和钾肥增产效应的失安全系数 (Nfs) 分别为 32209755、2480970 和 1740327, 而  $5n + 10$  分别为 3630、3130 和 3300, Nfs 远大于  $5n + 10$ , 表明分析结果可靠, 不存在发表偏倚。

然而, 不同施肥量的增产效应存在一定差异 (图 1)。对于氮肥而言, 随着施氮量的增加小麦的综合增产效应值和增长率呈先增加后降低的趋势, N2 和 N3 水平表现出较高的增产效应, 其综合效应值分别为 0.549 和 0.555, 相应增产率分别为 73.2% 和 74.2%, 二者之间无显著差异; 施氮量过高和过低都无助于产量的增加, N4 和 N1 水平的综合效应值分别为 0.430 和 0.401, 相应增产率分别为 53.7% 和 49.3%。对于磷肥而言, 随着施磷量增加小麦的综合增产效应值和增产率呈先增加后趋于平稳的趋势, P2 水平表现出最高的增产效应, 其综合效应值和增产率分别为 0.208 和 23.1%; 最低的为 P1 处理, 其

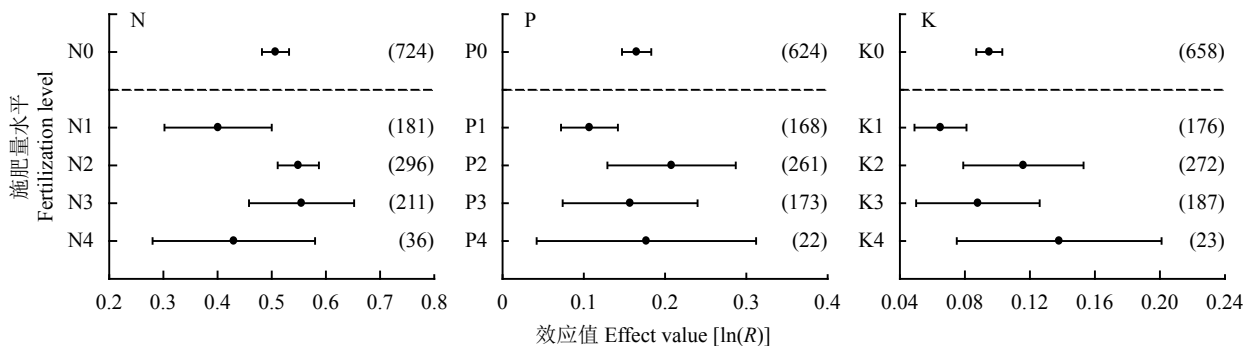


图 1 小麦氮、磷和钾肥的增产效应分析

Fig. 1 Effect analysis of wheat yield to nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer application

[注 (Note) : 圆点表示反应比 The dots represent the response ratio; 误差线表示 95% 的置信区间 The error lines represent the 95% confidence interval; 括号中的数字表示样本量 The numbers in parentheses represent the sample size.]



综合效应值和增产率分别为 0.107 和 11.3%; 而高施磷量水平 P3 和 P4 处理, 并未进一步显著增加产量, 相反其产量低于 P2 处理, 其综合效应值分别为 0.157 和 0.177, 相应增产率分别为 17.0% 和 19.4%。对于钾肥而言, K4 的增产效应最高, 其综合效应值和增产率分别为 0.138 和 14.8%; K2 处理的增产效应与 K4 无显著差异, 其综合效应值和增产率分别为 0.116 和 12.3%, 其次分别为 K3 和 K1, 其综合效应值分别为 0.088 和 0.065, 相应的增产率分别为 9.2% 和 6.7%。氮、磷和钾的增产效应分析结果显示, 氮素仍然是长江流域冬小麦最主要的养分限制因子。

### 2.2 不同基础地力水平下小麦施肥的增产效应

不同地力水平下施用氮 ( $Q_M = 377.534$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.001$ )、磷 ( $Q_M = 34.475$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.001$ ) 和钾肥 ( $Q_M = 7.928$ ,  $df = 3$ ,  $P = 0.048$ ) 对小麦产量均具有显著的正效应, 但不同地力水平间存在一定差异 (图 2)。

小麦施氮肥的增产效应表现为随基础地力水平升高而降低的趋势, 4 个地力水平下 (从低到高) 小麦施氮增产的综合效应值分别为 0.851、0.559、0.444 和 0.268, 其相应增产率分别为 134.2%、74.9%、55.9% 和 30.7%。施磷肥的增产效应趋势与施氮相同, 4 个地力水平下小麦施磷增产的综合效应值分别为 0.262、0.164、0.133 和 0.114, 其相应增产率分别为 30.0%、17.8%、14.2% 和 12.1%。小麦施钾肥对增产的综合效应值在不同地力水平下表现为先降低后升高, 4 个地力水平下小麦施钾增产的综合效应值分别为 0.114、0.086、0.083 和 0.098, 其相应的增产率分别为 12.1%、9.0%、8.7% 和 10.3%。

### 2.3 不同种植区域小麦施肥的增产效应

长江流域不同省市小麦施用氮 ( $Q_M = 149.383$ ,  $df = 8$ ,  $P < 0.001$ )、磷 ( $Q_M = 21.804$ ,  $df = 8$ ,  $P = 0.005$ ) 及钾肥 ( $Q_M = 36.607$ ,  $df = 8$ ,  $P < 0.001$ ) 的增产效应均呈显著正效应, 但不同省市间具有显著异质性

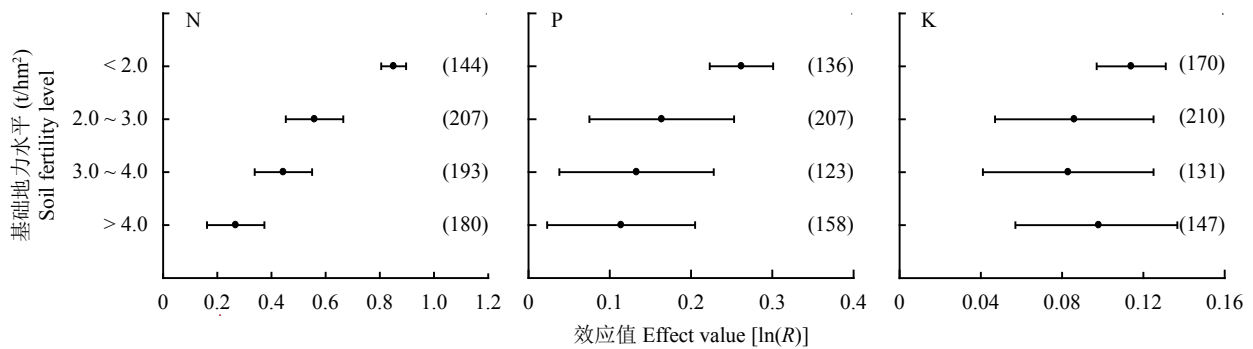


图 2 基础地力水平对小麦施肥效应反应比的影响

Fig. 2 Effect of soil fertility level on wheat fertilization effect response ratio

[注 (Note): 圆点表示反应比 The dots represent the response ratio; 误差线表示 95% 的置信区间 The error lines represent the 95% confidence interval; 括号中的数字表示样本量 The numbers in parentheses represent the sample size.]

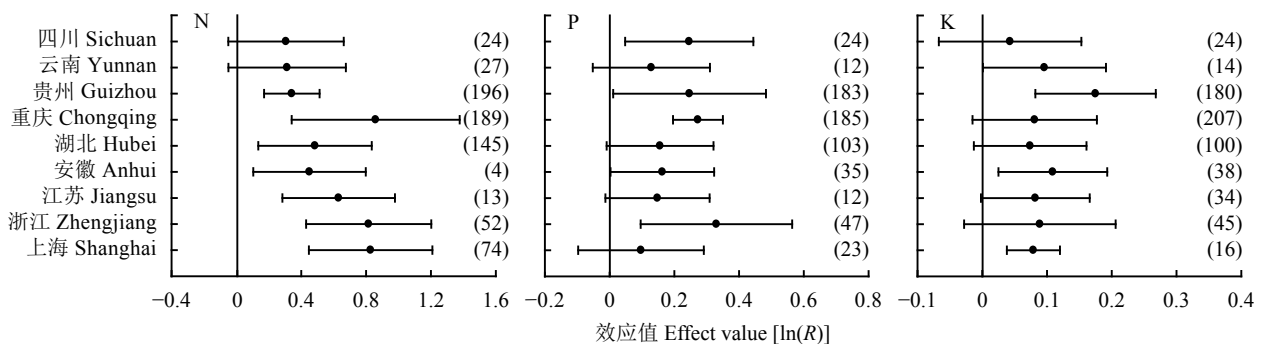


图 3 种植区域对小麦施肥效应反应比的影响

Fig. 3 Effect of planting area on wheat fertilization response ratio

[注 (Note): 竖线表示效应值  $\ln(R) = 0$  The vertical moulding indicates the effect value  $\ln(R) = 0$ ; 圆点表示反应比 The dots represent the response ratio; 误差线表示 95% 的置信区间 The error lines represent the 95% confidence interval; 括号中的数字表示样本量 The numbers in parentheses represent the sample size.]

(图 3)。对于施氮增产效应而言,重庆市的最高,其效应值和增产率分别为 0.859 和 136.1%;其次为上海市,其效应值和增产率分别为 0.828 和 128.9%;其余具有显著正效应的省市还有浙江省、江苏省、湖北省、安徽省及贵州省,其效应值分别为 0.816 ( $E = 126.1\%$ )、0.631 ( $E = 87.9\%$ )、0.485 ( $E = 62.4\%$ )、0.451 ( $E = 57.0\%$ ) 和 0.342 ( $E = 40.8\%$ );虽然云南省和四川省的 95% 置信区间包含 0,但其平均效应值仍大于 0 (效应值分别为 0.313 和 0.306,增产率分别为 36.8% 和 35.8%),说明云南省和四川省的施氮增产效应虽不显著,但仍保持增产。对于施磷增产效应而言,具有显著增产效应的省市有浙江省、重庆市、贵州省、四川省及安徽省,其效应值分别为 0.330、0.273、0.247、0.246 和 0.163,相应的增产率分别为 39.1%、31.4%、28.0%、27.9% 和 17.7%;其余各省施磷的综合增产效应不显著,但均为正效应且增产率均大于 10.0%。对于施钾增产效应而言,具有显著增产效应的省市有上海市 [ $\ln(R) = 0.079$ ,  $E = 8.2\%$ ]、安徽省 [ $\ln(R) = 0.109$ ,  $E = 11.5\%$ ]、贵州省 [ $\ln(R) = 0.175$ ,  $E = 19.1\%$ ] 和云南省 [ $\ln(R) = 0.096$ ,  $E = 10.1\%$ ];其余各省施钾增产效应不显著,但仍表现为正效应,除四川省外 (增产率仅为 4.4%),其它省市增产率在 8.5% 左右。

#### 2.4 不同 pH 值、有机质含量土壤上小麦施肥的增产效应

不同土壤 pH 条件下,施用氮、磷及钾肥对小麦产量均具有显著的正效应 (图 4),且不同土壤 pH 条件下小麦施用氮 ( $Q_M = 29.719$ ,  $df = 2$ ,  $P < 0.001$ )、磷 ( $Q_M = 13.589$ ,  $df = 2$ ,  $P < 0.001$ ) 及钾肥 ( $Q_M = 7.424$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.024$ ) 的增产效应均具有显著差异。小麦

在酸性 [ $\ln(R) = 0.669$ ,  $E = 95.2\%$ ] 和中性 [ $\ln(R) = 0.665$ ,  $E = 94.4\%$ ] 土壤的施氮增产效应值相近且显著高于在碱性土壤 [ $\ln(R) = 0.457$ ,  $E = 57.9\%$ ];磷肥的增产效应在酸性土壤条件下最高,其效应值为 0.258 ( $E = 29.4\%$ ),且增产率随 pH 的升高呈下降趋势;钾肥的增产效应同样在酸性土壤条件下最好 [ $\ln(R) = 0.131$ ,  $E = 14.0\%$ ],而在中性土壤条件下最差 [ $\ln(R) = 0.075$ ,  $E = 7.8\%$ ]。

不同土壤有机质条件下,施用氮、磷及钾肥对小麦产量均具有显著的正效应 (图 4)。土壤有机质对小麦施磷增产具有显著影响 ( $Q_M = 9.307$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.01$ ),施磷增产综合效应值随着有机质含量增加呈下降趋势,有机质  $< 15.0$ 、 $15.0 \sim 20.0$  和  $> 20.0$  g/kg 时的施磷增产综合效应值分别为 0.204 ( $E = 22.6\%$ )、0.159 ( $E = 17.2\%$ ) 和 0.136 ( $E = 14.6\%$ )。不同土壤有机质水平下,小麦施用氮肥 ( $Q_M = 5.311$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.07$ ) 和钾肥 ( $Q_M = 2.326$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.312$ ) 的增产效应无显著差异 ( $P > 0.05$ ),施用氮肥的产量增产率在土壤有机质含量  $> 20.0$  g/kg 时最高 (81.7%),而施用钾肥的增产率在土壤有机质含量为  $15.0 \sim 20.0$  g/kg 时最高 (10.8%)。

#### 2.5 土壤养分对小麦产量的效应分析

施氮增产效应影响因素分析结果 (图 5) 显示,不同土壤全氮含量水平间小麦施氮增产效应无显著差异 ( $Q_M = 2.323$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.313$ ),土壤全磷 ( $Q_M = 11.906$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.003$ ) 和全钾 ( $Q_M = 11.968$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.003$ ) 含量水平对小麦施氮增产效应均具有显著影响,均以最高含量水平下的增产效应最大,增产率分别为 126.8% [ $\ln(R) = 0.819$ ] 和 137.3% [ $\ln(R) = 0.864$ ]。土壤碱解氮 ( $Q_M = 22.416$ ,  $df = 2$ ,

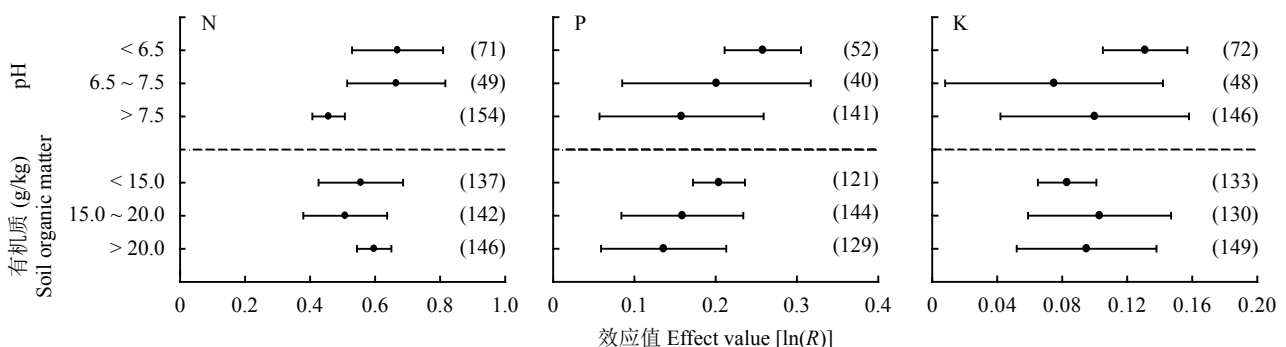


图 4 土壤 pH 和有机质含量对小麦施肥效应反应比的影响

Fig. 4 Effects of pH and soil organic matter content on wheat fertilization response ratio

[注 (Note): 圆点表示反应比 The dots represent the response ratio; 误差线表示 95% 的置信区间 The error lines represent the 95% confidence interval; 括号中的数字表示样本量 The numbers in parentheses represent the sample size.]

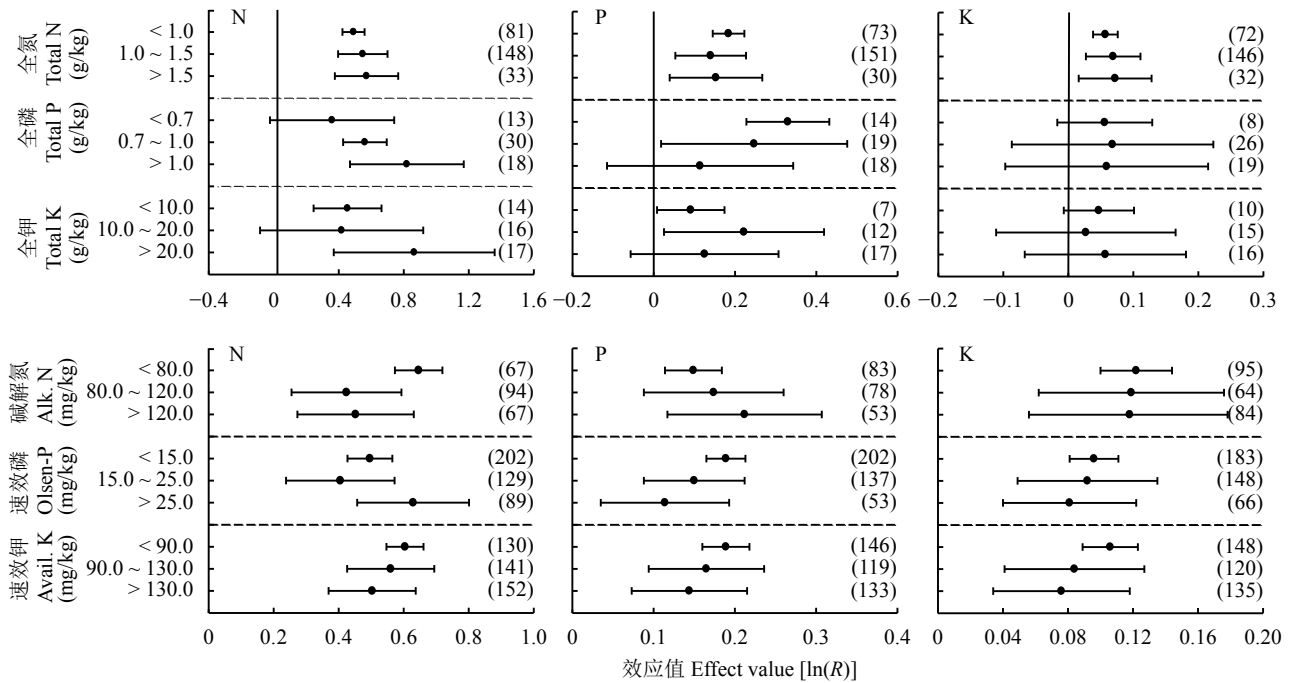


图 5 土壤矿质养分对小麦施肥效应响应比的影响

Fig. 5 Effects of soil mineral nutrients on wheat fertilization response ratio

[注 (Note): 圆点表示反应比 The dots represent the response ratio; 误差线表示 95% 的置信区间 The error lines represent the 95% confidence interval; 括号中的数字表示样本量 The numbers in parentheses represent the sample size.]

$P < 0.001$ )、速效磷 ( $Q_M = 18.469$ ,  $df = 2$ ,  $P < 0.001$ ) 及速效钾 ( $Q_M = 6.815$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.033$ ) 含量对小麦施氮增产效应均具有显著影响。不同养分水平下, 碱解氮含量  $< 80.0$  mg/kg 时施氮增产效应值最高, 为 0.646 ( $E = 90.8\%$ ); 速效磷含量  $> 25.0$  mg/kg 时的施氮增产效应值最高, 为 0.629 ( $E = 87.6\%$ ); 小麦施氮增产效果随速效钾含量的升高而降低, 当速效钾含量  $< 90$  mg/kg 时, 施氮增产效应值和增长率最高, 分别为 0.604 和 82.9%。

施磷增产效应影响因素分析结果显示, 土壤全磷含量对小麦施磷增产效应影响显著 ( $Q_M = 12.322$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.002$ ), 而土壤全氮 ( $Q_M = 3.423$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.181$ ) 和全钾 ( $Q_M = 5.876$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.053$ ) 含量对小麦施磷增产效应影响不显著 (图 5)。施磷增产效应随土壤全磷含量的增加呈降低趋势, 当全磷含量  $> 1.0$  g/kg 时, 小麦施磷后的增产效应不再显著。土壤全氮  $< 1.0$  g/kg 时施磷的增产效应值最高, 为 0.184 ( $E = 20.2\%$ ), 而土壤全钾 10.0~20.0 g/kg 时施磷的增产效应值最高, 为 0.222 ( $E = 24.9\%$ ), 当土壤全钾  $> 20.0$  g/kg 时, 施磷增产效果不再显著。土壤速效磷含量显著影响小麦施磷增产效应 ( $Q_M = 9.309$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.010$ ), 其施磷增产效应随速效磷含量的增加呈下降趋势, 当速效磷  $< 15.0$  mg/kg 时, 其施磷

增产效应值最高, 为 0.189 ( $E = 20.8\%$ )。不同水平土壤碱解氮 ( $Q_M = 4.264$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.119$ ) 和速效钾 ( $Q_M = 4.502$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.105$ ) 条件下, 小麦施磷增产效应均无显著差异。施磷增产效应随土壤碱解氮含量的升高呈上升趋势, 以土壤碱解氮  $> 120.0$  mg/kg 时的施磷产量效应值最高, 为 0.212 ( $E = 23.6\%$ ); 而随着土壤速效钾含量升高, 施磷的增产效应呈下降趋势, 速效钾含量  $< 90.0$  mg/kg 时的施磷增产效应值最高, 为 0.189 ( $E = 20.8\%$ )。

施钾增产效应影响因素分析结果显示, 土壤全氮 ( $Q_M = 1.214$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.545$ )、全磷 ( $Q_M = 0.138$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.934$ ) 及全钾 ( $Q_M = 0.559$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.756$ ) 含量对小麦施钾增产效应的影响均不显著 (图 5)。不同土壤全氮含量水平下小麦施钾增产均呈正效应, 且全氮含量  $> 1.5$  g/kg 时的施钾产量增长率最高 [ $E = 7.5\%$ ,  $\ln(R) = 0.072$ ]; 虽然施钾在全磷和全钾含量水平条件下具有一定的增产效应, 但其置信区间均包含 0, 施钾增产效应均不显著。土壤碱解氮 ( $Q_M = 0.046$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.977$ ) 和速效磷 ( $Q_M = 1.296$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.523$ ) 含量对小麦施钾增产效应影响均不显著, 但不同水平的土壤碱解氮和速效磷下施钾对增产均具有显著的正效应, 土壤碱解氮  $< 80.0$  mg/kg 时的施钾增产效应值最高, 为 0.122 ( $E =$



13.0%)，速效磷含量  $< 15.0 \text{ mg/kg}$  时的施钾增产效应值最高，为  $0.096 (E = 10.1\%)$ 。土壤速效钾含量对小麦施钾增产效应具有显著影响 ( $Q_M = 6.015, df = 2, P = 0.049$ )，施钾增产效应随土壤速效钾含量的升高呈下降趋势，以土壤速效钾含量  $< 90.0 \text{ mg/kg}$  时的施钾增产效应值最高，为  $0.110 (E = 11.6\%)$ 。

### 3 讨论

肥料对粮食增产具有决定性作用<sup>[28]</sup>，长江中下游的化肥增产率达到了  $74.3\%$ ，显著高于全国的平均水平  $42.5\%$ <sup>[13]</sup>。本研究结果显示，施用氮肥、磷肥和钾肥均可显著提高长江流域冬小麦产量，增产率分别为  $66.0\%$ 、 $17.9\%$  和  $10.0\%$ ，氮作为冬小麦的主要养分限制因子，其增产率显著高于磷肥和钾肥，且显著高于全国小麦施氮的平均增产效应 ( $28.2\%$ )<sup>[29]</sup>。有研究<sup>[30-31]</sup>表明，不同地区间的肥料农学效率相差  $4.0 \sim 5.0 \text{ kg/kg}$ ，肥效相差  $50.0\%$  以上，长江流域冬小麦较高的肥料增产效应表明，优化长江流域冬小麦施肥量，提高其施肥效应，对我国的粮食增产具有重要意义。本研究结果表明，长江流域冬小麦的氮、磷和钾的优化施肥量范围分别为  $183.2 \pm 57.2$ 、 $80.8 \pm 23.7$  和  $85.1 \pm 31.6 \text{ kg/hm}^2$ ，与 2005—2008 年的施肥量 ( $206.0$ 、 $67.1$  和  $49.2 \text{ kg/hm}^2$ )<sup>[13]</sup> 相比，氮肥施用量减少了，而磷、钾肥的施用量有所增加。

施肥量高的地区化肥增产效应并非必然会低于施肥量低的地区<sup>[13, 32]</sup>，因为小麦产量受多种因素的影响。不同养分的增产效应存在一定差异，在进行推荐施肥和养分管理时需要考虑当地的土壤肥力及各养分的增产潜力。本研究中，不同基础土壤肥力水平下施用氮、磷及钾肥对小麦的增产效应具有显著差异 ( $P < 0.001$ )。氮肥和磷肥的增产效应随基础地力水平的升高呈降低趋势，与前人<sup>[11-12]</sup> 研究结果基本一致，而钾肥的增产效应随着基础地力水平的升高呈先降低后升高的趋势，这是由于  $2.0 \sim 3.0$  和  $3.0 \sim 4.0 \text{ t/hm}^2$  这两个肥力水平的土壤速效钾含量较高，分别为  $117.1 \pm 58.5$  和  $140.3 \pm 64.1 \text{ mg/kg}$ ，而  $< 2.0$  和  $> 4.0 \text{ t/hm}^2$  两个肥力水平的速效钾含量相对较低，分别为  $88.4 \pm 41.23$  和  $113.0 \pm 58.5 \text{ mg/kg}$ 。武际等<sup>[33]</sup> 得出的不同土壤供钾水平下钾肥对小麦的增产幅度为  $5.3\% \sim 18.8\%$  的研究结果与本研究中  $8.7\% \sim 12.1\%$  的钾肥增产范围相近。

长江流域各省市间的小麦施肥增产效应存在一定差异，如重庆的施氮增产效应最高，浙江的施磷增产效应最高，贵州的施钾增产效应最高。种植区

域间小麦增产效应的差异主要是由于长江流域冬小麦种植区域分布范围广，各地区间的水热条件、土壤性质及耕作方式等存在明显区域异质性，且各地区的基础地力及土壤养分供应能力存在显著差异<sup>[34]</sup>。如重庆和贵州属于云贵高原地区，土壤肥力相对较低<sup>[35]</sup>，而浙江高温多雨，土壤类型多为红壤，土壤酸化严重，养分相对贫瘠<sup>[36]</sup>。

除此之外，土壤理化性状直接影响肥料增产效应<sup>[37]</sup>。pH 对长江流域小麦氮、磷和钾肥的增产效应均具有显著影响 ( $P < 0.05$ )，效应值随着土壤 pH 的增加而降低。pH 是影响土壤硝化作用最重要的环境因子之一，对土壤养分转化和微生物的群落结构具有调节作用，高 pH 导致土壤中氨挥发和硝化作用显著增加，大量氮素以  $\text{NH}_3$  的形式挥发，造成氮损失，影响作物的养分吸收，从而对作物产量造成影响<sup>[38]</sup>。土壤有机质和土壤矿质养分含量是表征土壤肥力的重要指标<sup>[39]</sup>，有机质和速效磷含量对小麦施磷增产效应具有显著影响 ( $P = 0.01$ )，且呈负相关关系，土壤肥力越高，基础养分供应量越高，则施肥效应相对越弱<sup>[41]</sup>，同理，土壤碱解氮含量最低时施氮效应最高，速效钾含量最低时施钾效应最高。土壤有机质含量对施氮和施钾的增产效应影响不显著，但存在一定差异，这与土壤碱解氮和速效钾含量存在一定联系，速效养分含量较低的土壤具有较高的肥料增产效应。如有机质含量  $> 20.0 \text{ g/kg}$  的土壤具有较高的氮肥增产效应，因为该有机质水平下的土壤碱解氮含量 ( $98.9 \pm 45.1 \text{ mg/kg}$ ) 低于  $< 15.0 \text{ g/kg}$  和  $15.0 \sim 20.0 \text{ g/kg}$  两个有机质水平下的土壤碱解氮含量 (分别为  $103.2 \pm 35.5$  和  $112.7 \pm 33.8 \text{ mg/kg}$ )。3 个有机质水平 (从低到高) 土壤的速效钾含量分别为  $122.5 \pm 68.5$ 、 $98.5 \pm 44.5$  和  $118.8 \pm 59.2 \text{ mg/kg}$ ，钾肥增产效应在有机质含量  $15.0 \sim 20.0 \text{ g/kg}$  的土壤最高。土壤全磷、全钾、速效磷及速效钾含量对小麦施氮增产效应影响显著 ( $P < 0.05$ )，则说明在土壤肥力和理化性质基本一致时，磷肥和钾肥的用量也会影响小麦的施氮效应。养分之间的作用是相互的，陈雨露等<sup>[40]</sup> 研究表明施磷可显著提高小麦营养器官氮素转运量和籽粒产量等参数，而适宜的钾肥施用量也可促进小麦对氮素的吸收利用并提高产量<sup>[41]</sup>。在生产中确定施肥量除了需要考虑作物的养分需求外，还需要考虑土壤的基础养分供应和养分间的相互作用，与此同时，长江流域冬小麦需要更加科学的适合小农户经营模式的推荐施肥方法，才能协调作物养分的供需平衡，减少养分损失，保证小麦增产的同时提高肥料利用率。



## 4 结论

长江流域冬小麦施用氮肥、磷肥和钾肥可显著增加小麦产量, 增产率分别为 66.0%、17.9% 和 10.0%。不同基础地力水平下施用氮、磷和钾肥的增产效应具有显著差异, 均以低肥力土壤 (产量 < 2.0 t/hm<sup>2</sup>) 的增产效应最高, 分别为 134.2%、30.0% 和 12.1%。长江流域各省份冬小麦的施肥增产效应均表现为正效应, 但存在显著差异, 各省份施用氮、磷和钾肥的增产范围分别为 35.8%~136.1%、10.2%~39.1% 和 4.4%~19.1%。土壤 pH 对小麦增产效应具有显著影响, 施肥增产效益随着 pH 增加而降低。土壤有机质含量对小麦施磷增产效应具有显著影响。土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷及速效钾含量对小麦施氮的增产效应影响显著; 土壤全磷和速效磷含量对小麦施磷的增产效应影响显著; 土壤速效钾含量对小麦施钾的增产效应影响显著。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 中国农业统计资料 2017[M]. 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[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019. 29-30.
- [2] 史常亮, 朱俊峰. 我国粮食生产中化肥投入的经济评价和分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 57-63.  
Shi C L, Zhu J F. Economic evaluation and analysis of fertilizer input in China's grain production[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 57-63.
- [3] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601-609.  
Jin J Y, Li J K, Li S T. Chemical fertilizer and food security[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2006, 12(5): 601-609.
- [4] Sims J L, Ma L, Oenema O, et al. Advances and challenges for nutrient management in China in the 21st century[J]. Journal of Environment Quality, 2013, 42(4): 947-950.
- [5] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.
- [6] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7696): 363-366.
- [7] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(2): 259-273.  
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 19(2): 259-273.
- [8] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [9] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.  
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [10] 孔凡斌, 郭巧苓, 潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. 经济地理, 2018, 38(10): 201-210.  
Kong F B, Guo Q L, Pan D. Evaluation on overfertilization and its spatial-temporal difference about major grain crops in China[J]. Economic Geography, 2018, 38(10): 201-210.
- [11] 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.
- [12] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 552-558.  
Liu F, Tong Y A, Wang X Y, et al. Effects of N, P and K fertilization on wheat yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(3): 552-558.
- [13] 王旭, 李贞宇, 马文奇, 等. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2469-2476.  
Wang X, Li Z Y, Ma W Q, et al. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different agro-ecological regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(12): 2469-2476.
- [14] Chan L M, He P, Pampolino M F, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: yield response and agronomic efficiency[J]. Field Crops Research, 2013, 140: 1-8.
- [15] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 等. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 76-86.  
Chuan L M, He P, Zhao T K, et al. Nitrogen cycling and balance for wheat in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 76-86.
- [16] Liu X Y, He P, Jin J Y, et al. Yield gaps, indigenous nutrient supply, and nutrient use efficiency of wheat in China[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(5): 1-12.
- [17] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 864-873.  
Zhao Y N, Su M M, Lü Y, et al. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(4): 864-873.
- [18] 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: 中国农业大学博士学位论文, 2014.  
Wu L Q. Fertilizer recommendations for three major cereal crops based on regional fertilizer formula and site specific adjustment in China[D]. Beijing: PhD Thesis of China Agricultural University, 2014.
- [19] 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[J]. 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[J]. Soils, 2017, 49(6): 1067-1077.

- [20] Bender D J, Contreras T A, Fahrig L. Habitat loss and population decline: A meta-analysis of the patch size effect[J]. *Ecology*, 1998, 79(2): 517–533.
- [21] Ellenberg S S. Meta-analysis: the quantitative approach to research review[J]. *Seminars in Oncology*, 1988, 15(5): 472.
- [22] 操一凡, 沈宗专, 刘珊珊, 等. Meta 分析评估中国木霉对枯萎病防控效果及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 716–727.  
Cao Y F, Shen Z Z, Liu S S, *et al.* Evaluation of effect of *Trichoderma* controlling fusarium wilt disease and its influencing factors with meta-analysis in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 716–727.
- [23] Fan M, Lal R, Cao J, *et al.* Plant-based assessment of inherent soil productivity and contributions to China's cereal crop yield increase since 1980[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(9): e74617.
- [24] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(14): 2886–2894.  
Zeng X M, Han B J, Xu F S, *et al.* Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2886–2894.
- [25] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, *et al.* (李国春, 吴勉华, 余小金译). Meta 分析导论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, *et al.* (Translated by Li G C, Wu M H, Yu X J). Introduction to meta-analysis[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [26] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The Meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150–1156.
- [27] Koricheva J, Gurevitch J, Mengersen K. Handbook of Meta-analysis in ecology and evolution[M]. London: Princeton University Press, 2013.
- [28] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.  
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [29] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, *et al.* How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636–639.
- [30] 中国农业生产资料集团公司课题组. 中国肥料资源的合理分配与利用[J]. *中国农村经济*, 1999, (10): 34–41.  
Chinese Agriculture Production Corporation Groups. Rational allocation and utilization of fertilizer in China[J]. *Chinese Rural Economy*, 1999, (10): 34–41.
- [31] 王激清. 我国主要粮食作物施肥增产效应和养分利用效率的分析和评价[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2007.  
Wang J Q. Analysis and evaluation of yield increase of fertilization and nutrient utilization efficiency for major cereal crops in China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2007.
- [32] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 154–157.  
Zhang F S, Ma W Q. The relationship between fertilizer input level and nutrient use efficiency[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2): 154–157.
- [33] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同土壤供钾水平下施钾对弱筋小麦产量和品质的调控效应[J]. *麦类作物学报*, 2007, 27(1): 102–106.  
Wu J, Guo X S, Wang Y Q, *et al.* Effects of potassium on grain yield and quality of soft-gluten wheat on soil with different K supplying levels[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(1): 102–106.
- [34] 赵广才. 中国小麦种植区划研究 (一)[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(5): 886–895.  
Zhao G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (1)[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(5): 886–895.
- [35] 任意, 张淑香, 穆兰, 等. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (6): 13–17.  
Ren Y, Zhang S X, Mu L, *et al.* Change and difference of soil nutrients for various regions in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009, (6): 13–17.
- [36] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [37] 冯媛媛, 申艳, 徐明岗, 等. 施磷量与小麦产量的关系及其对土壤、气候因素的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 683–691.  
Feng Y Y, Shen Y, Xu M G, *et al.* Relationship between phosphorus application amount and grain yield of wheat and its response to soil and climate factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 683–691.
- [38] Laegreid M, Bockman O C, Kaarstad O. Agriculture, fertilizers and the environment[M]. New York: CABI Publishing in Association with Norsk Hydro ASA, 1999.
- [39] 康瑞昌, 李铮. 土壤有机质与施有机肥对产量的影响[J]. *山西农业科学*, 1995, (3): 31–34.  
Kang R C, Li Z. Effect of soil organic matter and manure fertilization on crop yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 1995, (3): 31–34.
- [40] 陈雨露, 康娟, 王家瑞, 等. 灌水与施磷对小麦氮素积累运转及水分利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(9): 1095–1104.  
Chen Y L, Kang J, Wang J R, *et al.* Effect of irrigation and phosphorus application on nitrogen accumulation and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(9): 1095–1104.
- [41] 郭明明, 赵广才, 郭文善, 等. 追氮时期和施钾量对小麦氮素吸收运转的调控[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 590–597.  
Guo M M, Zhao G C, Guo W S, *et al.* Regulation of nitrogen topdressing stage and potassium fertilizer rate on absorption and translocation of nitrogen by wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3): 590–597.