

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

马悦¹, 田怡¹, 于杰¹, 王浩琳¹, 李永华¹, 李超¹, 党海燕¹,
牟文燕¹, 黄宁¹, 邱炜红¹, 石美¹, 王朝辉^{1,2*}, 何刚^{1*}

(1 西北农林科技大学资源环境学院/农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2 西北农林科技大学/旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】分析我国北方麦区不同土壤有效磷水平下, 监控施肥后小麦籽粒产量与养分吸收利用变化, 为保证减施磷肥后小麦的丰产、优质、绿色生产提供理论依据。【方法】于 2018—2020 年在我国北方麦区 49 个地点进行了田间试验。所有试验均设农户施肥 (FF)、监控施肥 (RF) 和监控无磷 (RF-P) 3 个处理, 监控施肥的磷 (P_2O_5) 肥用量较农户施肥平均减少 60 kg/hm², 相当于减少了 46%。在小麦成熟期调查了土壤不同磷素水平下, 小麦产量、产量构成、籽粒氮磷钾含量, 并计算了磷素养分吸收利用率; 在小麦收获期, 采样测定土壤有效氮磷钾含量。【结果】当土壤有效磷 <15 mg/kg 时, 小麦产量最低, 为 5155 kg/hm²; 当土壤有效磷在 25~30 mg/kg 时, 产量达到最高, 为 7217 kg/hm²; 有效磷过高并不能持续提高小麦产量, 反而因穗数、千粒重低导致产量降低。土壤有效磷 <15、15~20、20~25、25~30 和 >30 mg/kg 时, 监控施肥处理小麦产量与农户施肥处理相比差异虽然未达显著水平, 但小麦的磷肥吸收效率与磷肥偏生产力平均分别为 1.03 和 104.7 kg/kg, 分别较农户处理显著提高了 119.6% 和 112.2%, 籽粒氮磷钾含量与农户施肥处理相比无显著差异。当土壤有效磷 <15 mg/kg, 或速效钾达 171 和 200 mg/kg、有效磷为 15~20 和 >30 mg/kg 时, 不施磷肥小麦显著减产; 但土壤速效钾为 147 和 158 mg/kg、有效磷在 20~25 和 25~30 mg/kg 时, 不施磷肥不减产。土壤有效磷含量越高, 小麦籽粒平均氮含量越低、磷含量越高, 籽粒平均钾含量在有效磷为 20~25 mg/kg 时达到最高。【结论】在北方麦区, 过高的土壤有效磷含量有降低小麦氮素营养的风险, 适当降低磷肥用量在保证产量的同时, 还可大幅提高磷肥的利用率。土壤有效磷维持在 20~30 mg/kg 时, 减施或不施磷肥依然可以实现小麦高产, 但若速效钾 >170 mg/kg 时不施磷肥小麦有减产风险。因此, 应基于对小麦目标产量、籽粒养分含量和土壤有效磷钾的监控, 确定合理的磷肥用量, 实现北方麦区化肥减施, 小麦稳产提质增效和绿色生产。

关键词: 土壤有效磷阈值; 小麦; 产量; 籽粒氮磷钾含量; 监控施肥

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

MA Yue¹, TIAN Yi¹, YU Jie¹, WANG Hao-lin¹, LI Yong-hua¹, LI Chao¹, DANG Hai-yan¹, MU Wen-yan¹,
HUANG Ning¹, QIU Wei-hong¹, SHI Mei¹, WANG Zhao-hui^{1,2*}, HE Gang^{1*}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Northwest A&F University/State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】 We studied the changes in wheat grain yield and NPK concentration due to test-integrated P application at different soil available P levels. The study aims to provide information on the efficient

收稿日期: 2021-03-05 接受日期: 2021-08-26

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-03); 国家重点研发计划 (2018YFD0200400)。

联系方式: 马悦 E-mail: 381495288@qq.com

* 通信作者 王朝辉 E-mail: w-zhaohui@263.net; 何刚 E-mail: hegang029@nwfau.edu.cn

and green production of wheat. **【Methods】** Wheat field experiments were conducted in 49 locations in China's northern wheat production region from 2018 to 2020. The treatments were farmers' fertilizer application rate (FF), recommended P fertilizer application rate (RF), and using test-integrated fertilizer application, and no P application (RF-P). The P_2O_5 rate in RF was reduced by 60 kg/hm², corresponding to 46% lower than the rate in FF. The grain yield, yield components, grain N, P, and K concentration, and P uptake and utilization by wheat were analyzed under different soil available P levels. Soil samples were collected at harvest stage of wheat to measure available nitrogen, phosphorus and potassium content in soil **【Results】** The minimum grain yield (5155 kg/hm²) was recorded when soil available P was lower than 15 mg/kg, and the maximum (7217 kg/hm²) was observed at 25–30 mg/kg P in the soil. Higher soil available P did not increase grain yield sustainability. The observed reduction in grain yield was due to a significant decline in spike number and 1000-grain weight. Across the soil available P levels: <15, 15–20, 20–25, 25–30, and >30 mg/kg, the wheat yield in RF was similar to FF. However, P fertilizer uptake efficiency (1.03 kg/kg) and P partial factor productivity (104.7 kg/kg) significantly increased by 119.6% and 112.2% in RF compared to FF. Grain N, P, and K concentrations were similar in FF and RF. When the soil available P was <15 mg/kg, 15–20 mg/kg, and >30 mg/kg, readily available K was 156, 171, and 200 mg/kg, respectively. Wheat yield significantly decreased without P application. However, no yield reduction was observed when soil available P was 20–25 and 25–30 mg/kg with 147 and 158 mg/kg soil readily available K. An increase in the soil available P led to a corresponding increase in grain P concentration and a decrease in grain N concentration. The grain K concentration reached the highest value when available P was 20–25 mg/kg. **【Conclusions】** In northern China, high soil available P may deteriorate the N nutrition of wheat. Reducing P fertilizer rate could promote wheat yield and increase fertilizer P efficiency. 20–30 mg/kg soil available P is suitable for enhancing high wheat yield under reduced or no P application. Wheat yield may decline without P fertilization when soil available K is higher than 170 kg/hm². Therefore, the P fertilizer application rate should be recommended based on the target of wheat yield, grain nutrient concentration, and soil available P and K. This could help rationalize fertilizer application, stabilize yield, improve quality, efficiency and green agricultural production of wheat in northern China.

Key words: soil available phosphorus threshold; wheat; grain yield; grain nitrogen, phosphorus and potassium concentration; test-integrated fertilizer application

到 2050 年, 全世界食物需求将增加 70%~100%^[1], 对粮食产量提出了更高的要求。小麦是三大粮食作物之一, 我国小麦种植面积达 2373 万/hm², 占谷物总种植面积的 24%^[2], 对粮食安全至关重要。我国磷肥用量由 1980 年的 273 万 t 增加至 2019 年的 682 万 t, 增加 2.5 倍, 小麦产量由 1978 年的 5384 万 t 增加至 2019 年的 13360 万 t^[2]。施用磷肥对粮食增产发挥重要作用, 但不合理施用也导致磷素大量残留^[3-8]。因此合理施用磷肥对农业增产和可持续发展具有重要意义。

在有效磷含量低的土壤上, 小麦对磷反应敏感, 施用磷肥增产效果明显^[9-10]。然而当土壤有效磷含量很高, 能满足作物磷素需求时, 增施磷肥并不增产^[11-12]。缺磷时小麦根系发育不良、分蘖减少, 降低了穗数从而影响产量^[13]。在江苏泰兴砂壤土上研究发现, 随施磷量增加小麦产量先增加后降低, 呈二次曲线变

化^[14]。巴基斯坦的缺磷土壤, 施用 81 kg/hm² 磷 (P_2O_5) 肥的小麦产量是不施磷肥的 2.5 倍, 过量施用磷 (P_2O_5) 肥达 111 kg/hm² 时却导致产量降低 7.4%^[15]。在埃塞俄比亚的试验表明, 施磷量介于 0~92 kg/hm² 时, 69 kg/hm² 的施磷 (P_2O_5) 量使小麦获得最高产量^[16]。陕西杨凌的磷用量试验表明, 长期施磷使小麦产量平均提高 67%、生物量提高 58%、穗数和穗粒数分别增加 64% 和 8%, 而千粒重降低 7%, 籽粒氮含量也随施磷量增加而降低, 磷和钾含量却随施磷量增加而提高^[17]。河南的长期定位试验结果也发现, 随施磷量增加, 小麦籽粒磷含量大幅增加^[18]。陕西长武的试验显示, 随施磷水平提高, 小麦产量、千粒重、穗粒数呈现出先增后降的趋势^[19]。也有研究发现, 磷肥对产量构成因素的影响均不明显^[20]。磷肥的增产效果、对籽粒养分含量的影响应与土壤养分供应能力, 特别是有效磷水平有关, 然而关于不同土壤有

效磷水平磷肥效应的区域多点研究一直缺乏。

本研究于 2018—2020 年在我国北方陕西、山西、甘肃、宁夏、内蒙古、黑龙江、新疆、青海 8 省布置了多点试验, 通过对小麦植株与土壤的取样测定, 分析不同土壤有效磷水平下减施磷肥后小麦籽粒产量、产量构成、籽粒养分含量、土壤养分等的变化, 明确减施磷肥的效果及其对土壤有效磷的影响, 为解决磷肥过量使用问题, 实现合理减施和小麦丰产优质提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

2018—2020 年, 在北方麦区的 8 个省份 49 个地点布置田间试验: 山西 11 个、陕西 23 个、甘肃 15 个、宁夏 8 个、青海 2 个、新疆 12 个、内蒙古 5 个、黑龙江 4 个。各地点的降水、气温和试验开始前 0—20 cm 土层土壤理化性状见附表 1。

1.2 试验设计

试验设 3 个处理: 农户施肥 (FF)、监控施肥 (RF) 和监控无磷 (RF-P)。农户施肥的氮磷钾用量为调研试验所在地 30 个以上农户得到的施肥量均值。监控施肥的施肥量依据监控施肥技术确定^[21-24]。监控无磷为不施磷肥, 氮钾肥用量同监控施肥处理。田间排列采用完全随机区组设计, 每个处理重复 3 次, 小区面积 $\geq 300 \text{ m}^2$, 各试验点均种植当地主栽品种, 种植、灌溉、农药施用方式与农户一致。各地点的施肥量见附表 1。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集与测定 收获期时, 每个小区随机选取 5 个样点, 用土钻取 0—20 cm 土层的麦田土壤混匀。将土壤样品放置于阴凉通风处风干后, 磨碎过 1 mm 和 0.15 mm 的尼龙网土筛。过 1 mm 筛土样用于测定土壤硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾、pH, 过 0.15 mm 筛土样用于测定土壤全氮和有机质。土壤 pH 用 pH 计测定, 水土比为 2.5 : 1。土样分别经 1 mol/L KCl、0.5 mol/L NaHCO_3 浸提后, 用连续流动分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮、有效磷。土样经 1 mol/L NH_4OAc 浸提后, 火焰光度计测定速效钾^[25-26]。2018—2019 年土壤有机质用重铬酸钾外加热法测定; 全氮用浓硫酸加混合催化剂 ($\text{K}_2\text{SO}_4 : \text{CuSO}_4 = 10 : 1$) 消煮, 连续流动分析仪测定。2019—2020 年土壤有机质、全氮用全自动碳氮分析仪测定。

1.3.2 植物样品采集与测定 收获期, 每个小区内随机采集 100 穗小麦植株地上部。植物样品自然风干后将其人工脱粒分为籽粒、茎叶、颖壳。取 50 g 籽粒、30 g 茎叶、30 g 颖壳用自来水和蒸馏水分别漂洗 3 次, 65℃ 烘至恒重, 测定风干样品的含水量。烘干样品用氧化锆球磨仪磨成粉状^[27]。用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解植物样品, 连续流动分析仪测定消解液, 获得植物各器官氮磷钾含量。小麦产量为各小区实际收获结果。产量与养分含量均以干重为基数表示。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 产量分组 为了解北方麦区小麦产量的区间分布规律, 将所有地点农户处理分为 5 级进行了统计分析, 以平均产量 (6000 kg/hm^2) 为中心, 分别上下浮动 10%、30%, 形成 5 个等级: 低产 ($< 4200 \text{ kg/hm}^2$), 偏低 ($4200 \sim 5400 \text{ kg/hm}^2$), 中产 ($5400 \sim 6600 \text{ kg/hm}^2$), 偏高 ($6600 \sim 7800 \text{ kg/hm}^2$), 高产 ($> 7800 \text{ kg/hm}^2$)^[22]。

1.4.2 土壤有效磷分组 为了解北方麦区麦田土壤的有效磷分布规律, 将土壤有效磷含量从低到高分 5 组: < 15 、 $15 \sim 20$ 、 $20 \sim 25$ 、 $25 \sim 30$ 、 $> 30 \text{ mg/kg}$ 5 组, 对农户的麦田土壤有效磷含量进行分析评价, 并按此分组分析小麦产量、籽粒养分含量等处理间差异对土壤有效磷含量的响应。

1.4.3 相关指标计算与数据处理方法 磷肥偏生产力 (kg/kg) = 产量 (kg/hm^2) / 施磷量 (kg/hm^2) (1)

磷肥吸收效率 (kg/kg) = 植株地上部吸磷量 (kg/hm^2) / 施磷量 (kg/hm^2) $\times 2.291$ ^[28] (2)

磷素利用效率 (kg/kg) = 产量 (kg/hm^2) / 地上部吸磷量 (kg/hm^2)^[28-29] (3)

(1)、(2)、(3) 式中, 土壤的氮、磷、钾含量, 植株氮、磷、钾的含量和吸收量均为纯养分 N、P 和 K 的量。施肥量中的氮为 N, 磷和钾分别为 P_2O_5 和 K_2O 。2.291 为 P_2O_5 换算为 P 的系数。

数据处理采用 Microsoft Excel 2016, 作图采用 Origin 2018, 统计分析采用 SPSS Statistics 23.0。多重比较采用 LSD (Least Significant Difference) 法, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 农户施肥处理小麦籽粒产量和麦田土壤有效磷水平

北方麦区农户施肥处理小麦产量介于 $888 \sim 11524 \text{ kg/hm}^2$, 平均为 6000 kg/hm^2 (图 1a)。两年

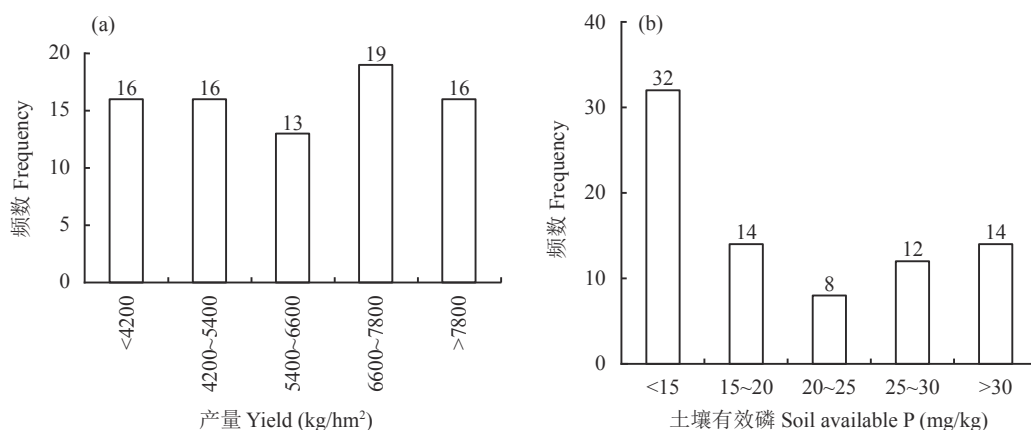


图 1 北方麦区农户的小麦籽粒产量与麦田表层 (0—20 cm) 土壤有效磷含量的频数分布

Fig. 1 Yield frequency distribution and frequency distribution of soil available P concentration in 0–20 cm soil depth of famers fields in the northern wheat production region of China

49 个地点 80 个农户中, 产量低于 4200 kg/hm² 与介于 4200~5400 kg/hm² 的各 16 个, 各占 20%; 介于 5400~6600 kg/hm² 的有 13 个, 占 16%; 介于 6600~7800 kg/hm² 的有 19 个, 占 24%; 超过 7800 kg/hm² 的有 16 个, 占 20%。可见, 北方麦区小麦产量偏低的农户占有较大比例。

麦田表层土壤有效磷介于 4.4~70.3 mg/kg, 平均为 21.1 mg/kg (图 1b)。80 个农户中, 有效磷含量 <15 mg/kg 的有 32 个, 占 40%; 介于 15~20 mg/kg 的有 14 个, 占 17.5%; 介于 20~25 mg/kg 的有 8 个, 占 10%; 介于 25~30 mg/kg 的有 12 个, 占 15%; 超过 30 mg/kg 的有 14 个, 占 17.5%。从分布区域看, 有效磷低于 15 mg/kg 的地点多位于黄土高原陕西、山西和甘肃, 以旱地为主; 介于 15~20 mg/kg 的地点位于陕西、山西、甘肃和宁夏, 雨养与灌溉麦田各占 36% 和 64%; 介于 20~25 mg/kg 的地点位于陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆, 雨养与灌溉麦田各占 25% 和 75%; 介于 25~30 mg/kg 的地点分布在陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆和内蒙古, 雨养与灌溉麦田各占 42% 和 58%; 高于 30 mg/kg 的地点分布在甘肃、宁夏、新疆、内蒙古和黑龙江, 雨养与灌溉麦田各占 38% 和 62%。可见, 北方麦区农户麦田土壤有效磷低于 15 mg/kg 的地点仍占有较大比例。

2.2 监控施肥引起的小麦产量、生物量、收获指数变化

土壤有效磷水平不同, 小麦籽粒产量存在显著差异 (图 2a)。土壤有效磷 <15、15~20、20~25、25~30 和 >30 mg/kg 时, 农户施肥、监控施肥、监控无磷 3 个处理的平均产量分别为 5155、6223、6868、7217 和 5803 kg/hm²。有效磷为 25~30 mg/kg 时产量

最高, 有效磷 <15 mg/kg 时产量最低。说明土壤有效磷含量较低时, 小麦产量较低, 但有效磷含量过高也不能持续提高产量, 有效磷含量超过 30 mg/kg 时产量降低。不同有效磷水平下, 监控施肥处理较农户施肥处理提高小麦籽粒产量程度不同 (图 2a)。有效磷为 15~20 mg/kg 与 >30 mg/kg 时, 监控施肥处理较农户施肥处理增产 4.6% 和 4.1%, 有效磷介于 20~30 mg/kg 或 <15 mg/kg 时, 监控施肥处理与农户施肥处理产量差异不显著。有效磷 <15 mg/kg 和介于 15~20 mg/kg 时, 监控无磷处理较监控施肥处理分别显著减产 7.1% 和 12.1%; 有效磷介于 20~25、25~30 mg/kg 时, 监控无磷处理与监控施肥处理无显著差异; 有效磷 >30 mg/kg 时, 监控无磷处理较监控施肥处理减产 18.7%。农户施肥、监控施肥和监控无磷 3 个处理的平均产量分别为 6000、6133 和 5675 kg/hm², 监控施肥处理较农户施肥处理高 2.2%, 但差异未达显著水平, 监控无磷处理较监控施肥处理减产 7.5%。

小麦地上部生物量与土壤有效磷水平的关系与产量相似 (图 2b), 先随土壤有效磷含量增加而提高, 有效磷为 25~30 mg/kg 时最高, 有效磷 >30 mg/kg 时又降低。有效磷从低到高 5 个等级下 3 个处理的平均生物量分别为 11887、14689、14821、15181 和 13758 kg/hm²。可见, 土壤有效磷含量低, 小麦生物量也较低, 但土壤有效磷过高时生物量也会降低。土壤有效磷 <15 和 15~20 mg/kg 时, 监控施肥处理的生物量较农户施肥处理分别显著增加 3.7% 和 6.1%; 有效磷 >30 mg/kg 时, 监控施肥处理与农户施肥处理无显著差异。有效磷 <15、15~20 和 >30 mg/kg 时, 监控无磷处理较监控施肥处理分别显

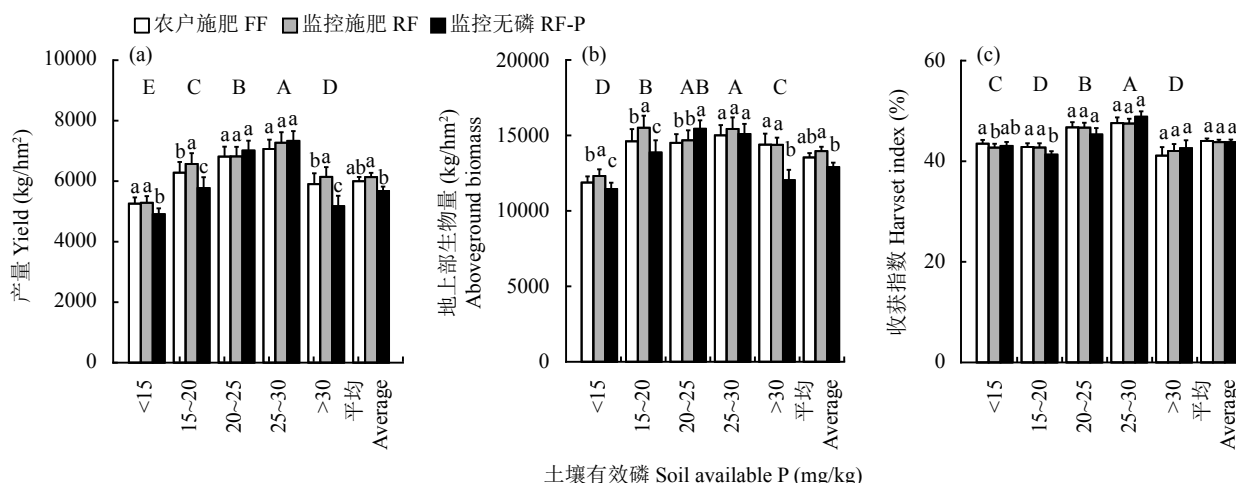


图2 不同土壤有效磷水平下小麦籽粒产量 (a)、地上部生物量 (b) 和收获指数 (c) 对监控施肥的响应

Fig. 2 Response of grain yield (a), aboveground biomass (b) and harvest index (c) of wheat to test-integrated fertilizer application at different soil available fertilizer levels

[注 (Note): 误差线表示平均数标准差 Error bars are standard deviations of the means; FF—Farmers' fertilizer application rate; RF—Recommended P fertilizer rate by the test-integrated fertilizer application; RF-P—Delete P from fertilizer recommendation; 柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同有效磷水平之间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars represent significant difference among treatments ($P < 0.05$), and different capital letters in the bars indicate significant difference among soil available P levels ($P < 0.05$).]

著降低 7.1%、10.6% 和 16.3%; 有效磷为 25~30 mg/kg 时两者的生物量无显著差异; 有效磷为 20~25 mg/kg 时监控无磷处理增产 5.2%。农户施肥、监控施肥、监控无磷 3 个处理的生物量平均值分别为 13542、13961 和 12901 kg/hm², 监控施肥处理的生物量较农户施肥处理提高 3.1%, 但差异未达显著水平, 监控无磷处理较监控施肥处理的生物量显著降低 7.6%。

从不同土壤磷水平下 3 个处理的平均值来看, 小麦收获指数亦随土壤有效磷水平升高而先提高 (图 2c), 土壤有效磷介于 25~30 mg/kg 时最高, 平均为 47.9%, 但有效磷>30 mg/kg 时又降低。从不同有效磷水平的平均值来看, 农户施肥、监控、施肥、监控无磷 3 个处理的收获指数分别为 44.0%、43.8% 和 43.8%, 处理间无显著差异。监控施肥处理的收获指数除有效磷<15 mg/kg 时比农户施肥处理降低 1.8% 外, 二者其余施磷条件下无显著差异。监控无磷处理的收获指数也仅在有效磷为 15~20 mg/kg 时较监控施肥处理显著降低 3.3%。

可见, 无论土壤有效磷水平高低, 采用监控施肥处理均不降低小麦产量和生物量, 但当土壤有效磷较低 (<20 mg/kg) 或较高 (>30 mg/kg) 时, 不施磷会降低小麦产量和生物量, 原因有待进一步分析。除有效磷较低 (<20 mg/kg) 时外, 监控施肥处理或监控无磷对小麦收获指数无显著影响。

2.3 监控施肥引起的小麦产量构成要素变化

穗数随土壤有效磷含量的增加而先升高 (表 1), 有效磷为 20~25 和 25~30 mg/kg 时穗数最高, 但有效磷>30 mg/kg 时穗数又降低, 从低到高 5 个有效磷等级小麦的平均穗数分别为 416、481、591、567 和 530 万/hm²。监控施肥处理有明显提高小麦穗数的趋势, 且在有效磷为 15~20 mg/kg 时, 穗数较农户施肥处理显著提高 8.2%。与监控施肥处理相比, 监控无磷处理在有效磷<15、15~20 和>30 mg/kg 时的穗数分别降低 8.2%、8.9% 和 10.4%; 有效磷为 20~25 和 25~30 mg/kg 时监控无磷的穗数增加不显著。农户施肥、监控施肥和监控无磷的平均穗数分别为 483、504 和 474 万/hm², 监控施肥的穗数较农户施肥高 4.2%, 但差异未达显著水平, 监控无磷处理的穗数较监控施肥处理显著降低 5.9%。

从低到高 5 个有效磷等级下 (表 1), 农户施肥、监控施肥、监控无磷 3 个处理的平均穗粒数分别为 29、30、29、32 和 30。有效磷为 25~30 mg/kg 时穗粒数最多, 有效磷<15 和 20~25 mg/kg 时穗粒数最少。农户施肥、监控施肥和监控无磷 3 个处理的穗粒数平均值分别为 30、30 和 29, 差异均未达到显著水平。

土壤有效磷越高, 小麦千粒重越低 (表 1), 土壤有效磷从低到高 5 个等级, 农户施肥、监控施肥、

表 1 北方麦区不同土壤有效磷水平下小麦穗数、穗粒数和千粒重

Table 1 Spike number, grains per spike, and 1000-grain weight of wheat at different soil available P levels in northern wheat production region of China

土壤有效磷 Soil available P (mg/kg)	穗数 Spike number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)				穗粒数 Grains per spike				千粒重 1000-grain weight (g)			
	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average
<15	424 a	429 a	394 b	416 D	29 a	29 a	29 a	29 C	43.1 a	43.0 a	43.3 a	43.2 A
15~20	469 b	508 a	463 b	481 C	31 a	31 a	30 a	30 B	43.3 a	43.0 a	42.4 a	42.9 A
20~25	565 b	588 ab	632 a	591 A	30 a	29 a	28 a	29 C	41.5 ab	41.1 b	42.7 a	41.7 B
25~30	540 a	571 a	593 a	567 A	32 a	32 a	31 a	32 A	41.8 b	40.8 b	43.0 a	41.8 B
>30	529 ab	554 a	496 b	530 B	30 a	30 a	29 a	30 B	38.3 a	37.6 a	36.4 b	37.5 C
平均 Average	483 ab	504 a	474 b		30 a	30 a	29 a		41.9 a	41.5 a	42.1 a	

注 (Note): FF—Farmers' fertilizer application rate; RF—Recommended P fertilizer rate by the test-integrated fertilizer application; RF-P—Delete P from fertilizer recommendation. 同行数据后不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 同列数据后不同大写字母表示不同土壤有效磷水平之间差异显著 ($P < 0.05$). Values followed by different lowercase letters in a row indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$), and different capital letters in a column indicate significant difference among different soil available P levels ($P < 0.05$).

监控无磷 3 个处理的平均千粒重分别为 43.2、42.9、41.7、41.8 和 37.5 g。监控施肥处理的千粒重较农户施肥处理无显著变化。有效磷为 20~25 和 25~30 mg/kg 时, 监控无磷处理的千粒重分别较监控施肥处理升高 3.8% 和 5.3%, 有效磷>30 mg/kg 时, 前者较后者反而降低 3.1%。农户施肥、监控施肥、监控无磷 3 个处理的平均千粒重分别 41.9、41.5 和 42.1 g, 无显著差异。

2.4 监控施肥引起的小麦养分含量变化

小麦籽粒氮含量随土壤有效磷升高而降低 (图 3a), 5 个有效磷等级 3 个处理的平均氮含量分别为 23.5、23.3、21.4、21.6 和 22.7 g/kg, 有效磷为 20~25 和 25~30 mg/kg 时最低。与农户施肥处理相比, 仅有效磷<15 mg/kg 时监控施肥处理籽粒氮含量降低 2.9%。监控无磷处理的籽粒氮含量也仅在有效磷>30 mg/kg 时较监控施肥处理降低 5.0%。农户施肥、监控施肥和监控无磷 3 个处理的平均籽粒氮含量分别为 22.9、22.7 和 22.8 g/kg, 差异不显著。

小麦籽粒磷含量随土壤有效磷水平升高而提高 (图 3b), 有效磷>30 mg/kg 时最高, <15 mg/kg 时最低。5 个有效磷等级 3 个处理的平均磷含量分别为 3.1、3.4、3.8、3.8 和 4.2 g/kg。不同有效磷水平下监控施肥处理的籽粒磷含量较农户施肥处理均差异不显著。除有效磷<15 和 15~20 mg/kg 时监控无磷处理较监控施肥处理籽粒磷含量分别降低 6.1% 和 8.5% 外, 其他有效磷含量水平下籽粒磷含量二者均

差异不显著。农户施肥、监控施肥和监控无磷 3 个处理的平均籽粒磷含量分别为 3.5、3.6 和 3.4 g/kg, 监控施肥处理较农户施肥高 1.4%, 但两者差异不显著, 监控无磷处理较监控施肥显著降低 4.8%。

5 个有效磷等级 3 个处理的平均籽粒钾含量分别为 3.6、3.8、4.2、3.8 和 4.0 g/kg (图 3c), 有效磷介于 20~25 mg/kg 时最高, 有效磷<15 mg/kg 时最低。除有效磷<15 mg/kg 时监控施肥处理小麦籽粒钾含量比农户施肥处理升高 2.8% 外, 其他有效磷含量水平下二者的籽粒钾含量无显著差异。有效磷在<15、20~25、25~30 和>30 mg/kg 时, 监控无磷处理的籽粒钾含量分别较监控施肥处理降低 3.3%、3.1%、6.1% 和 5.6%, 有效磷为 15~20 mg/kg 时二者差异不显著。农户施肥、监控施肥和监控无磷 3 个处理的平均籽粒钾含量分别为 3.8、3.8 和 3.7 g/kg, 农户施肥处理与监控施肥处理差异不显著, 监控无磷处理较监控施肥处理显著降低 3.9%。

2.5 监控施肥引起的小麦养分吸收分配变化

有效磷在 15~20 mg/kg 时 3 个处理的平均地上部吸氮量最高, 有效磷<15 mg/kg 时地上部吸氮量最低; 有效磷介于 25~30 mg/kg 时平均氮收获指数最高, 有效磷>30 mg/kg 时最低 (表 2)。除有效磷在 15~20 mg/kg 监控施肥处理的吸氮量较农户施肥增加 7.0% 外, 其他有效磷水平二者差异均不显著。有效磷在<15、15~20 和>30 mg/kg 时, 监控无磷处理的吸氮量较监控施肥分别减少 7.1%、15.8 和

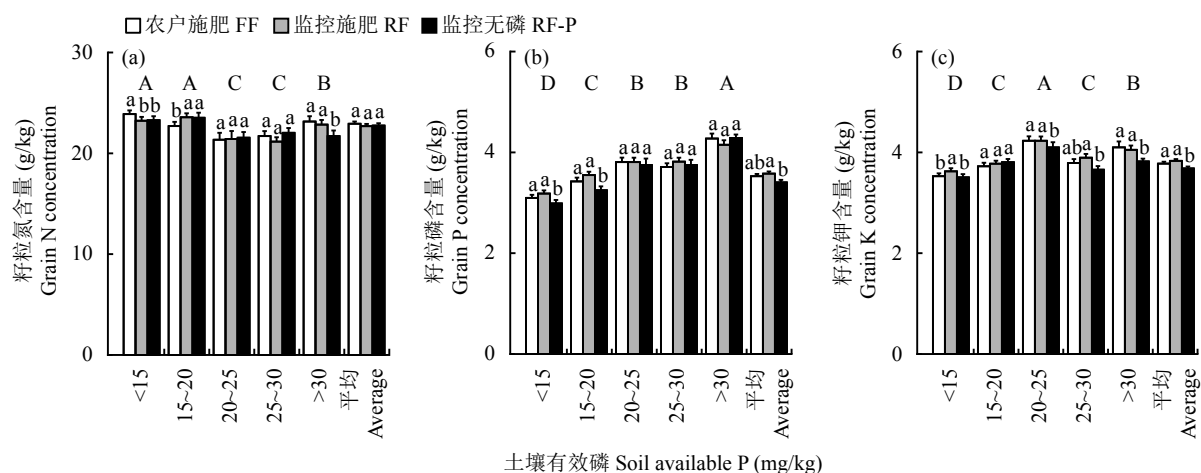


图3 北方麦区不同土壤有效磷水平下小麦籽粒氮、磷、钾含量对监控施肥的响应

Fig. 3 Response of grain N, P and K concentration of wheat to test-integrated fertilizer application at different soil available P levels in northern wheat production region of China

[注 (Note): FF—Farmers' fertilizer application rate; RF—Recommended P fertilizer rate by the test-integrated fertilizer application; RF-P—Delete P from fertilizer recommendation. 柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同有效磷水平之间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars represent significant difference among treatments ($P < 0.05$), and different capital letters in the bars indicate significant difference among soil available P levels ($P < 0.05$).]

18.3%, 有效磷在 20~25、25~30 mg/kg 时二者差异不显著。监控施肥处理的平均吸氮量较农户施肥提高 1.7%, 但差异未达显著水平, 监控无磷平均吸氮量较监控施肥处理显著降低 10.1%。各有效磷水平下监控施肥处理的籽粒氮收获指数与农户施肥均无显著差异。有效磷在 20~25 mg/kg 时, 监控无磷较监控施肥籽粒氮收获指数降低 6.4%, 有效磷在 25~30 mg/kg 时前者较后者反而升高 3.9%。农户施肥、监控施肥和监控无磷 3 个处理的氮收获指数差异均不显著。

土壤有效磷含量低时, 地上部吸磷量低, 籽粒磷收获指数高; 反之, 土壤有效磷含量高时, 地上部吸磷量高, 籽粒磷收获指数低 (表 2)。有效磷 <15 mg/kg 时 3 个处理的平均地上部吸磷量最低, 平均籽粒磷收获指数最高; 有效磷在 25~30 mg/kg 时平均地上部吸磷量最高, >30 mg/kg 时平均籽粒磷收获指数最低。分析农户施肥、监控施肥、监控无磷处理的变化发现, 有效磷 <15 和 15~20 mg/kg 时, 监控施肥处理的吸磷量较农户施肥处理分别增加 4.7% 和 6.0%。有效磷在 <15、15~20 和 >30 mg/kg 时, 监控无磷处理的吸磷量较监控施肥处理分别降低 10.5%、15.0% 和 11.4%。监控施肥处理的平均地上部吸磷量高于农户施肥处理 3.7%, 但差异不显著, 监控无磷处理较监控施肥处理减少 10.4%。监控施肥处理的平均籽粒磷收获指数较农户施肥、监控无磷处理略有变化, 但差异均不显著。

土壤有效磷低时, 地上部吸钾量低, 籽粒钾收获指数低; 土壤有效磷过高时, 地上部吸钾量并不高, 籽粒钾收获指数高 (表 2)。有效磷在 15~20、20~25 mg/kg 时 3 个处理的平均地上部吸钾量最高, 有效磷 <15 mg/kg 时最低; 有效磷 >30 mg/kg 时平均籽粒钾收获指数最高, 有效磷 15~20 mg/kg 时最低。有效磷在 15~20 mg/kg 时, 监控施肥处理的吸钾量较农户施肥处理增加 9.1%, 有效磷 >30 mg/kg 时反而减少 7.3%。有效磷在 <15、15~20 和 >30 mg/kg 时, 监控无磷处理的吸钾量较监控施肥处理分别降低 6.1%、11.5% 和 27.6%。监控施肥处理的平均吸钾量较农户施肥处理增加 1.2%, 但差异未达到显著水平, 监控无磷处理较监控施肥降低 10.6%。除有效磷 >30 mg/kg 时监控施肥处理的籽粒钾收获指数较农户施肥处理降低 19.6% 外, 其余有效磷水平下二者均差异不显著。有效磷在 15~20 mg/kg 时, 监控无磷处理的籽粒钾收获指数较监控施肥处理降低 7.0%, 有效磷 >30 mg/kg 时反而显著增加 14.9%。农户施肥、监控施肥、监控无磷处理的籽粒钾收获指数差异均未达到显著水平。

2.6 监控施肥引起的土壤氮磷钾的变化

0—20 cm 土层土壤的硝态氮含量随土壤有效磷水平升高而降低。5 个土壤有效磷水平下, 3 个处理的平均土壤硝态氮含量分别为 26.4、19.4、12.9、18.1 和 15.3 mg/kg (图 4a)。有效磷 <15 mg/kg 时土壤

表 2 北方麦区不同土壤有效磷水平下小麦地上部氮、磷、钾吸收量和籽粒氮、磷、钾收获指数
Table 2 Shoot N, P, and K uptake, and grain N, P, and K harvest index of wheat at different soil available P levels in northern wheat production region of China

土壤有效磷 Soil available P (mg/kg)	地上部吸氮量 (kg/hm ²) N uptake in aboveground part				地上部吸磷量 (kg/hm ²) P uptake in aboveground part				地上部吸钾量 (kg/hm ²) K uptake in aboveground part			
	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average
<15	157 a	156 a	145 b	153 C	18.6 b	19.5 a	17.5 c	18.5 C	106 ab	110 a	104 b	107 D
15~20	195 b	209 a	176 c	194 A	25.6 b	27.2 a	23.1 c	25.4 B	145 b	159 a	140 b	148 A
20~25	176 a	176 a	179 a	177 B	29.9 a	30.5 a	30.0 a	30.1 A	158 a	155 a	148 a	154 A
25~30	192 a	193 a	195 a	193 A	30.1 a	31.5 a	31.3 a	31.0 A	144 a	141 a	136 a	141 B
>30	183 a	186 a	152 b	176 B	31.2 a	31.3 a	27.7 b	30.3 A	148 a	138 b	100 c	132 C
平均 Average	175 a	178 a	162 b		25.0 a	25.9 a	23.2 b		132 a	133 a	119 b	

土壤有效磷 Soil available P (mg/kg)	氮收获指数 N harvest index (%)				磷收获指数 P harvest index (%)				钾收获指数 K harvest index (%)			
	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average	农户施肥 FF	监控施肥 RF	监控无磷 RF-P	平均 Average
<15	79.4 a	78.6 a	78.9 a	79.0 A	87.3 a	86.3 a	86.8 a	86.8 A	19.1 a	19.0 a	18.6 a	18.9 C
15~20	76.8 a	76.4 a	76.9 a	76.7 B	84.6 a	84.2 a	84.8 a	84.5 BC	19.0 a	18.1 a	16.8 b	18.0 D
20~25	79.6 a	79.8 a	75.1 b	78.5 A	84.9 a	84.4 a	78.9 a	83.0 C	19.9 a	20.0 a	19.2 a	19.7 C
25~30	79.5 ab	78.3 b	81.3 a	79.6 A	85.6 a	84.8 a	85.6 a	85.3 B	20.8 a	20.7 a	22.5 a	21.3 B
>30	76.4 a	76.2 a	77.2 a	76.5 B	79.2 a	79.2 a	80.0 a	79.4 D	29.5 a	23.8 c	27.3 b	26.8 A
平均 Average	78.5 a	77.9 a	78.3 a		84.9 a	84.3 a	84.6 a		21.2 a	20.0 a	20.1 a	

注 (Note) : FF—Farmers’ fertilizer application rate; RF—Recommended P fertilizer rate by the test-integrated fertilizer application; RF-P—Delete P from fertilizer recommendation. 同行数据后不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 同列数据后不同大写字母表示不同土壤有效磷水平之间差异显著 ($P < 0.05$). Values followed by different lowercase letters in a row indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$), and different capital letters in a column indicate significant difference among different soil available P levels ($P < 0.05$).

硝态氮含量最高, 20~25 mg/kg 时最低。有效磷在 <15 和 15~20 mg/kg 时, 监控施肥处理的土壤硝态氮含量较农户施肥处理分别降低 42.4% 和 56.0%, 其他有效磷水平时二者差异不显著。仅在有效磷 <15 mg/kg 时监控无磷处理的土壤硝态氮含量高于监控施肥处理 34.1%, 其余有效磷水平下监控无磷处理与监控施肥处理无显著差异。农户施肥、监控施肥、监控无磷 3 个处理的平均土壤硝态氮含量分别为 23.5、17.3 和 21.3 mg/kg, 监控施肥处理较农户施肥处理显著降低 26.4%, 监控无磷处理与监控施肥处理差异未达显著水平。

不同于硝态氮, 0—20 cm 土壤的有效磷含量随土壤有效磷水平升高而升高 (图 4 b)。5 个土壤有效磷水平下, 3 个处理的平均土壤有效磷含量分别为 10.5、15.9、20.2、23.7 和 40.9 mg/kg。各有效磷水平下监控施肥处理的土壤有效磷含量较农户施肥处

理差异均不显著。在有效磷 <15、15~20 和 25~30 mg/kg 时, 监控无磷处理的土壤有效磷含量较监控施肥处理分别降低 18.8%、31.0% 和 22.6%。农户施肥、监控施肥、监控无磷 3 个处理的平均土壤有效磷含量分别为 21.1、20.5 和 16.1 mg/kg, 农户施肥处理与监控施肥处理无显著差异, 监控无磷处理较监控施肥处理显著降低 21.2%。

0—20 cm 土层土壤的速效钾含量随土壤有效磷水平升高亦呈升高趋势 (图 4 c)。5 个土壤有效磷水平下, 3 个处理的平均土壤速效钾含量分别为 156、171、158、147 和 200 mg/kg。在有效磷 >30 mg/kg 时土壤速效钾含量最高。除有效磷 15~20 mg/kg 时监控施肥处理的土壤速效钾含量较农户施肥提高 17.5% 和有效磷 20~25 mg/kg 时降低 20.3% 外, 其他有效磷水平下二者差异均不显著。有效磷介于 15~20 和 25~30 mg/kg 时, 监控无磷处理的土壤速

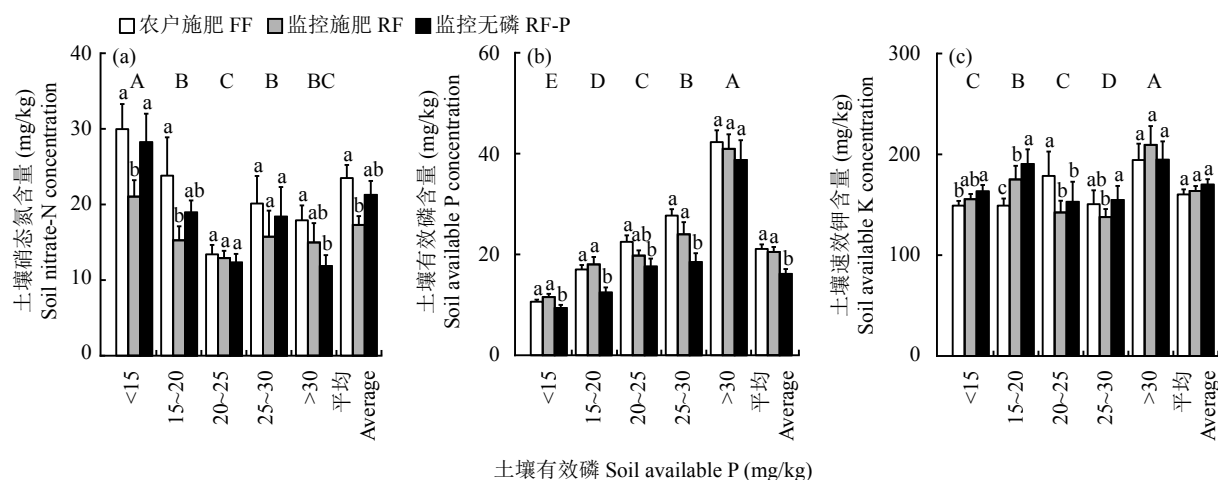


图 4 北方麦区不同土壤有效磷水平下土壤硝态氮、有效磷和速效钾含量对监控施肥的响应

Fig. 4 Response of soil nitrate-N, available P and available K concentrations to test-integrated P application at different soil available fertilizer levels in northern wheat production region of China

[注 (Note): FF—Farmers' fertilizer application rate; RF—Recommended P fertilizer tare by the test-integrated fertilizer application; RF-P—Delete P from fertilizer recommendation. 柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同有效磷水平之间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars represent significant difference among treatments ($P < 0.05$), and different capital letters in the bars indicate significant difference among soil available P levels ($P < 0.05$).]

效钾含量较监控施肥处理分别升高 8.7% 和 12.2%。农户施肥、监控施肥和监控无磷 3 个处理的平均土壤速效钾含量分别为 160、164 和 170 mg/kg, 三者差异均不显著。

2.7 氮磷钾肥减施情况

土壤有效磷<15、15~20、20~25、25~30 和 >30 mg/kg 时, 农户施肥的施氮量分别为 195、223、270、238 和 213 kg/hm², 监控施肥处理的施氮量分别为 132、182、224、214 和 173 kg/hm² (图 5a), 监控施肥处理较农户施肥处理施氮量分别减少 63、41、46、24 和 41 kg/hm², 相当于减少 32.3%、18.5%、17.2%、9.9% 和 19.1%。农户施肥处理与监控施肥处理的平均施氮量分别为 218 和 170 kg/hm², 差异显著。

不同土壤有效磷水平下, 农户施肥处理的施磷量分别为 124、125、176、142 和 124 kg/hm², 监控施肥处理的施磷量分别为 61、79、97、77 和 71 kg/hm² (图 5b), 监控施肥处理较农户施肥处理的施磷量分别显著减少 63、46、79、65 和 52 kg/hm², 相当于减少 50.9%、36.9%、44.9%、45.6% 和 42.4%。农户施肥处理与监控施肥处理的平均施磷量分别为 133 和 72 kg/hm², 差异显著。

农户施肥处理的施钾量分别为 33、42、32、31 和 18 kg/hm², 监控施肥处理的施钾量分别为 22、

36、41、45 和 33 kg/hm² (图 5c)。在有效磷<15 和 15~20 mg/kg 时, 监控施肥处理的施钾量较农户施肥处理分别减少 11 和 6.0 kg/hm², 有效磷<15 mg/kg 时差异显著。有效磷在 20~25、25~30 和 >30 mg/kg 时, 监控施肥处理较农户施肥处理分别增加 9、14 和 16 kg/hm², 有效磷>30 mg/kg 时差异显著。农户施肥处理与监控施肥处理的平均施钾量分别为 31 和 32 kg/hm², 差异不显著。

2.8 减肥增效的效果

不同土壤有效磷水平下, 监控施肥处理的磷肥偏生产力和吸收效率均高于农户施肥 (图 6a 和 b)。有效磷<15、15~20、20~25、25~30 和 >30 mg/kg 时, 农户施肥的磷肥偏生产力分别为 45.9、54.8、43.0、55.0 和 50.8 kg/kg, 监控施肥的磷肥偏生产力分别为 100.3、97.9、78.7、125.6 和 118.8 kg/kg, 较农户施肥分别显著提高 118.7%、78.7%、82.9%、128.3% 和 134.0%, 两个处理的磷肥偏生产力平均分别为 49.4 和 104.7 kg/kg, 监控施肥显著提高 112.2%。

不同土壤有效磷水平下, 农户施肥处理的磷肥吸收效率分别为 0.36、0.51、0.43、0.55 和 0.62 kg/kg, 监控施肥处理的磷肥吸收效率分别为 0.85、0.90、0.85、1.31 和 1.43 kg/kg, 监控施肥处理的磷肥吸收效率较农户施肥处理显著提高 134.1%、76.8%、96.6%、137.9% 和 130.0%。两个处理的磷肥吸收效

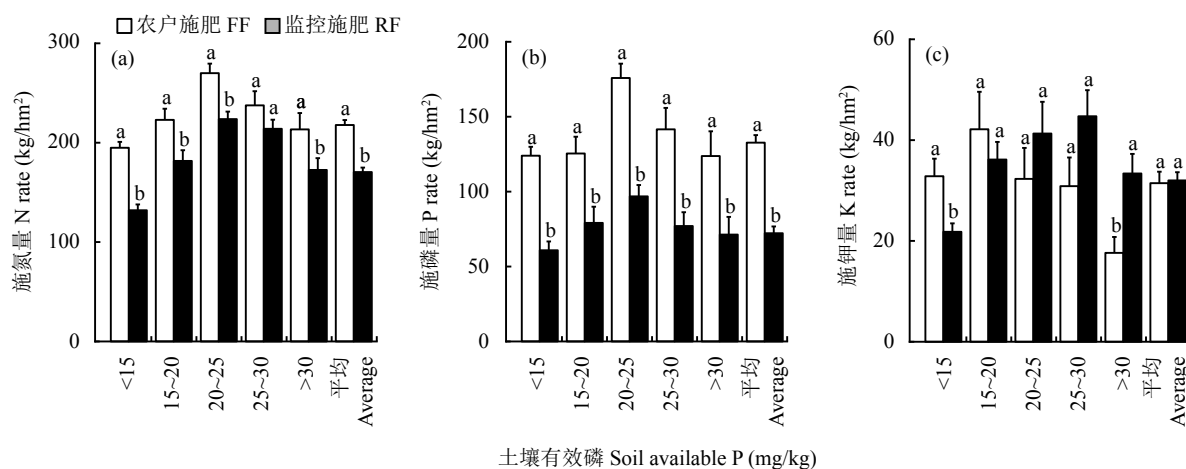


图 5 北方麦区不同土壤有效磷水平下施氮、磷和钾量对监控施肥的响应

Fig. 5 Responses of N, P and K rates to test-integrated fertilizer application at different soil available P levels in northern wheat production region of China

[注 (Note): FF—Farmers' fertilizer application rate; RF—Recommended P fertilizer rate by the test-integrated fertilizer application; 柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars represent significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

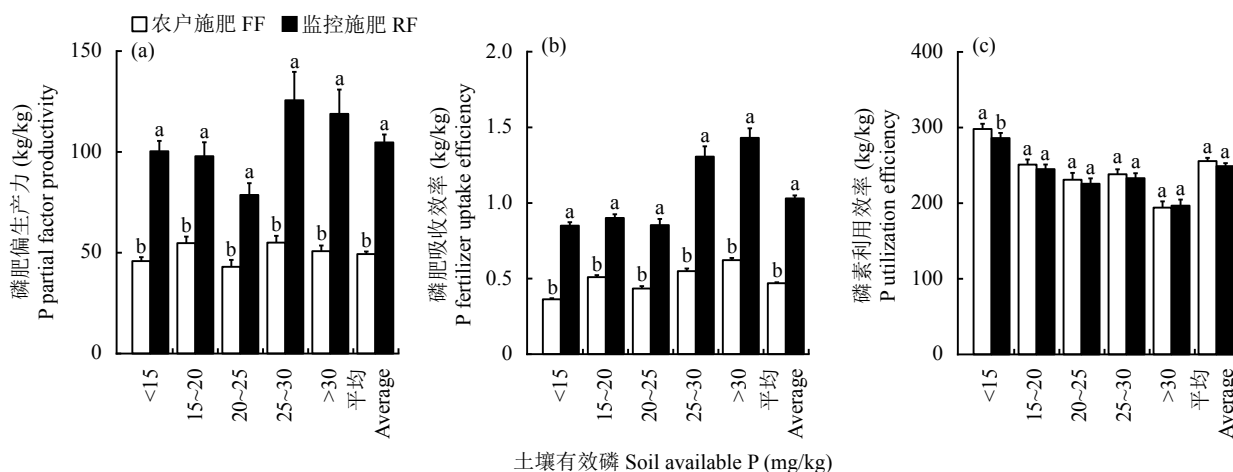


图 6 北方麦区不同土壤有效磷水平下磷肥偏生产力、吸收效率和利用效率对监控施肥的响应

Fig. 6 Responses of P partial factor productivity, P fertilizer uptake efficiency and P utilization efficiency to test-integrated fertilizer application at different soil available P levels in northern wheat production region of China

[注 (Note): FF—Farmers' fertilizer application rate; RF—Recommended P fertilizer rate by the test-integrated fertilizer application; 柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars represent significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

率平均分别为 0.47 和 1.03 kg/kg, 监控施肥处理显著提高 119.6%。

不同土壤有效磷水平下, 农户施肥和监控施肥处理的磷素利用率多无显著差异 (图 6c)。从低到高 5 个有效磷水平下, 农户施肥处理的磷素利用效率分别为 298、251、231、238 和 195 kg/kg, 监控施肥处理的磷素利用效率分别为 286、245、226、233 和 197 kg/kg, 仅在有效磷 <15 mg/kg 时监控施肥处理磷

素利用效率较农户施肥处理降低 4.0%, 其他水平下两者无显著差异。两个处理的磷素利用效率平均分别为 256 和 249 kg/kg, 差异不显著。

3 讨论

3.1 监控施肥引起的小麦产量变化与土壤有效磷的关系

本研究表明, 在北方麦区小麦产量随土壤有效

磷含量提高先增高, 土壤有效磷介于 25~30 mg/kg 时, 小麦籽粒产量最高, 但有效磷高于 30 mg/kg 时, 产量显著下降, 仅高于有效磷<15 mg/kg 时的产量。有研究显示, 耕层土壤有效磷小于 30 mg/kg 时, 小麦施磷增产效果随土壤有效磷升高而降低, 而土壤有效磷大于 30 mg/kg 时, 施磷增产率一般低于 10%^[30-32]。在山东有效磷为 15.9 (中磷) 和 30.4 mg/kg (高磷) 的土壤上的试验发现, 中磷土壤上施磷显著提高了小麦产量, 高磷土壤上施磷 (P_2O_5) 135 kg/hm² 较施磷 (P_2O_5) 105 kg/hm² 时产量无显著变化^[32]。河南的试验显示, 土壤有效磷为 33.6 mg/kg 时小麦产量为 9279 kg/hm², 有效磷为 18.6 mg/kg 时产量为 8815 kg/hm², 亦无显著差异^[33]。本研究对比产量三要素发现, 穗数、穗粒数和千粒重显著降低是土壤有效磷高于 30 mg/kg 时产量下降的主要原因。

本研究表明, 与农户施肥处理相比, 监控施肥处理降低了氮磷肥料用量, 还能使小麦产量呈增加趋势, 特别是土壤有效磷>30 mg/kg 时, 增产效应达到显著水平, 不同土壤有效磷水平下监控施肥处理平均增产 2.2%。对比产量三要素发现, 土壤有效磷介于 15~20 mg/kg 时, 监控施肥处理的穗数较农户施肥处理显著增加, 二者穗粒数和千粒重在各有效磷水平时差异均不显著。说明合理减肥可以维持小麦丰产, 实现减肥不减产。与监控施肥处理相比, 监控无磷处理只有在土壤有效磷介于 20~25 和 25~30 mg/kg 时不减产。当土壤有效磷在<15 和 15~20 mg/kg (低磷) 时, 监控无磷处理的产量较监控施肥显著降低, 主要原因是穗数显著降低。然而, 土壤有效磷>30 mg/kg (高磷) 时监控无磷的产量也显著低于监控施肥, 减产的地点分别位于黑龙江、内蒙古的雨养春麦区 and 新疆、宁夏、甘肃河西的灌溉春麦区, 各试验点监控无磷处理的土壤有效磷介于 10.0~46.4 mg/kg, 平均为 40.9 mg/kg, 土壤并不缺磷, 但这些地点春季气温低, 可能影响小麦对土壤磷素的吸收利用^[34], 从而导致植株缺磷, 穗数和千粒重显著降低, 造成了小麦减产。也可能和这些地点的土壤速效钾含量高有关(图 4c), 有效磷>30 mg/kg 时, 各地点 3 个处理土壤速效钾含量平均为 200 mg/kg, 不施磷小麦减产, 而土壤有效磷为 20~25、25~30 mg/kg 时, 各地点土壤速效钾含量平均为 158 和 147 mg/kg, 不施磷没有减产; 土壤速效钾为 15~20 mg/kg 时, 土壤有效钾水平也很高, 各地点平均为 171 mg/kg, 不施磷小麦也减产, 说明较高的土壤速效钾可能是土壤有效磷较高而不施磷小麦仍会减产

的原因。因此, 在实际生产中, 应依据土壤有效磷、速效钾水平确定磷肥用量: 速效钾>170 mg/kg 时, 即使有效磷>15 mg/kg, 不施磷也可能导致小麦减产。

3.2 监控施肥引起的小麦籽粒氮磷钾含量变化与土壤养分的关系

本研究发现, 在北方麦区土壤有效磷含量越高, 籽粒平均氮含量越低。减施磷肥后, 仅有效磷<15 mg/kg 时监控施肥处理较农户施肥处理籽粒氮含量显著降低 2.9%, 此时监控施肥处理较农户施肥处理的磷肥用量减少 63 kg/hm²。在其他土壤有效磷水平下, 前者较后者磷肥用量分别显著减少 46、79、65、52 kg/hm², 籽粒氮含量并没有显著降低。监控无磷处理籽粒氮含量也仅在有效磷>30 mg/kg 时较监控施肥显著降低 5.0%, 其他土壤有效磷水平下两者的籽粒氮含量无显著差异。说明基于监控土壤养分合理推荐施肥平衡了土壤养分, 减施磷肥对籽粒氮含量没有显著影响。

在北方麦区土壤有效磷含量越高, 籽粒平均磷含量越高, 且高磷条件下减施磷肥不影响籽粒磷含量。5 个土壤有效磷水平下减施磷肥后监控施肥的籽粒磷含量较农户施肥差异均不显著, 说明合理减施磷肥不会降低籽粒磷含量。不施磷肥对籽粒磷含量有显著影响, 特别是土壤有效磷<20 mg/kg 时不施磷肥会显著降低籽粒磷含量, 有效磷>20 mg/kg 时不施磷肥不会降低籽粒磷含量。在实际生产中若要维持与当地农户小麦相当的籽粒磷含量, 土壤有效磷<20 mg/kg 的土壤上不能不施磷肥。

北方麦区土壤有效磷在 20~25 mg/kg 时小麦平均籽粒钾含量达到最高。减施磷肥后, 有效磷在 15~20、20~25、25~30 和>30 mg/kg 时, 监控施肥处理与农户施肥处理的籽粒钾含量无显著差异, 而有效磷<15 mg/kg 时显著升高 2.8%。也仅在有效磷介于 15~20 mg/kg 时, 监控无磷处理与监控施肥处理籽粒钾含量无显著差异, 其他有效磷水平下监控无磷处理均较监控施肥处理显著降低。说明合理减磷不会降低籽粒钾含量, 不施磷肥可能会降低籽粒钾含量。

3.3 北方麦区小麦磷肥的减肥增效潜力

本研究发现, 监控施肥处理的施磷量较农户施肥处理平均减少 60 kg/hm²; 在所有土壤有效磷水平下, 监控施肥处理均较农户施肥处理显著提高了磷肥偏生产力与磷肥吸收效率, 平均提高 112.2% 和

119.6%。总体来看, 监控施肥处理的磷素利用效率与农户施肥无显著差异, 这主要是因为磷素利用效率是作物的一种特性, 即作物吸收单位数量的磷养分形成小麦籽粒产量的能力, 施磷或不施磷对其影响不大。一项英国砂质黏壤土的磷用量试验显示, 在土壤有效磷为 4.0 或 33 mg/kg 时, 磷肥吸收效率均随施磷量的增加而减少, 当 4 年总施磷 (P) 量从 55 kg/hm² 增加到 165 kg/hm² 时, 两种土壤相同轮作系统 (土豆-大麦-甜菜-大麦) 的磷肥吸收效率分别减少 44.2% 和 64.3%^[35]。汾河平原和渭河平原 725 个农户调研发现, 小麦磷肥偏生产力平均分别为 59.6 和 56.1 kg/kg^[36], 低于我国平均磷肥生产力 63.7 kg/kg^[37], 更低于本研究中监控施肥的平均磷肥偏生产力 104.7 kg/kg。河北两个小麦品种的磷用量试验显示, 施 180 kg/hm² 磷肥 (P₂O₅) 时的磷肥偏生产力较施 60 kg/hm² 时分别显著降低 111.4% 和 124.7%^[38]。江苏的 4 个小麦品种磷用量试验发现, 磷肥偏生产力随施磷量增加而降低, 扬麦 9 号施用 108 kg/hm² 磷肥 (P₂O₅) 较施用 72 kg/hm² 时的磷肥偏生产力降低了 27.7%^[14]。这些研究结果皆与本研究吻合。

采用基于产量的小麦施肥量评价方法^[39]对本研究中 80 个农户的施磷量进行评价 (图 7) 发现, 仅有 2 个农户的施磷量低于推荐施磷量, 占 2.5%, 10 个农户施磷量处于适中水平, 占 10%, 说明北方麦区农户过量施磷的问题较为严重。5 个土壤有效磷等级下施磷过量 (偏高+很高) 的农户的比例分别为 90.6%、78.6%、87.5%、91.7% 和 71.4%, 平均为 85.0%, 分别需减施磷肥 (P₂O₅) 71、60、95、70 和 80 kg/hm², 平均需减磷 (P₂O₅) 73 kg/hm²; 农户的减肥潜力 (需减磷量/农户施磷量) 分别为 45.5%、32.6%、42.1%、44.2% 和 36.4%, 平均为 41.1%。全国 1030 个农户的调研发现, 各麦区磷肥减施潜力因产量水平而异, 减磷量随产量增加而降低, 春麦区、旱作区、麦玉区的整体减磷潜力高达 31.0%、55.6% 和 25.0%^[40]。宁夏引黄灌区的试验发现, 磷肥 (P₂O₅) 用量在 48~96 kg/hm² 时, 比农户减磷 40.7%~70.3%, 更有利于稳定春小麦产量^[41]。华北潮土区麦田的研究显示, 土壤有效磷在 <7、7~12、12~18 和 18~38 mg/L 时, 磷肥 (P₂O₅) 推荐用量分别为 135、105、90 和 60 kg/hm², 而土壤有效磷 >38 mg/L 时, 建议不施或者少施磷肥^[42]。陕西关中灌区土壤有效磷 <25、25~40 和 >40 mg/kg 时, 冬小麦推荐施磷 (P₂O₅) 量为 80~95、60~80 和 10~15 kg/hm²^[4], 土壤有效磷含量越高推荐施磷量越低。北方麦区幅员辽阔, 土

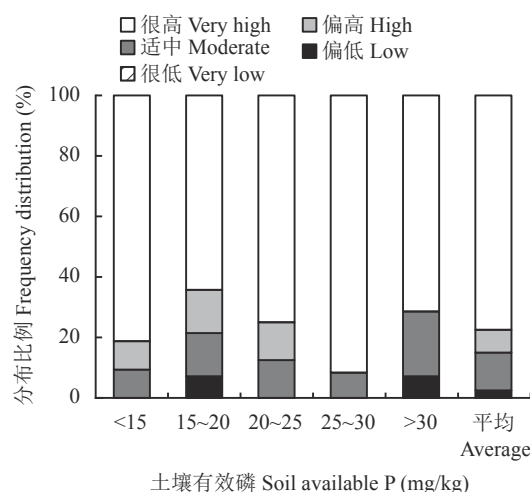


图 7 北方麦区不同土壤有效磷水平下农户施磷量分布比例

Fig. 7 Frequency distribution of farmers' P rate at different soil available P levels in northern wheat production region of China

壤类型与肥力水平各异, 合理施肥量不应是只设定一个值或一个范围值, 应根据土壤有效磷水平和产量等多种因素综合推荐。有效磷 <15 mg/kg 的土壤以雨养旱地为主, 尤其是黄土高原旱地, 土壤肥力低且受水分的限制, 建议结合当地降雨条件以水定产、因土施肥。有效磷介于 15~30 mg/kg 的土壤, 多位于陕西、山西、甘肃和宁夏的灌区, 水分不再是限制条件, 但灌水会引起磷素淋溶, 特别是砂质土壤, 建议加强水肥管理, 协同水肥供应, 合理减施磷肥, 防止土壤有效磷含量过高。有效磷 >30 mg/kg 的土壤, 一部分位于黑龙江、内蒙古这些土壤有机质较高的旱地, 建议维持较低施磷量, 充分利用土壤中现有磷素, 节本增效; 另一部分多位于新疆、宁夏、甘肃的灌区麦田, 建议加强水肥一体化管理, 合理减施磷肥, 降低土壤有效磷含量, 在维持小麦高产的同时防止砂质土壤磷素过量发生淋溶损失。

4 结论

监控施肥处理的磷肥用量较农户施肥处理平均减少 60 kg/hm² (46%), 增产 2.2%, 籽粒氮磷钾含量与农户施肥处理相比无显著差异。当土壤有效磷 <15 mg/kg 时, 小麦产量最低, 为 5155 kg/hm², 在土壤有效磷 25~30 mg/kg 时, 产量达到最高, 为 7217 kg/hm², 有效磷过高并不能持续提高小麦产量。除土壤有效磷外, 磷肥的产量效应也受土壤速效钾的影响, 在土壤速效钾 >170 mg/kg 时, 即使有效磷 >15

mg/kg, 不施磷也可能导致小麦减产。采用监控施肥技术合理减施磷肥, 无论土壤有效磷含量高低, 均不会减产, 同时小麦磷肥吸收效率与磷肥偏生产力显著提高。综合考虑, 在北方麦区土壤有效磷维持在 20~30 mg/kg 时, 小麦产量可达较高水平; 速效钾 >170mg/kg 时, 不施磷肥小麦有减产风险。应针对北方麦区具体区域的土壤和水肥管理条件, 基于土壤有效磷钾和小麦产量水平, 确定合理的磷肥用量, 实现小麦磷肥科学减施、绿色生产。

致谢: 感谢参加国家重点研究计划项目“北方小麦化肥农药减施技术集成研究与示范”实施的黄冬琳、李紫燕、张树兰、郑险峰(西北农林科技大学)、仇会芳(陕西永寿农业技术推广中心)、杨珍珍(陕西彬县农业技术推广中心)、兰涛(陕西大荔农业技术推广中心)、张花梅(陕西合阳农业技术推广中心)、梁永强(陕西蒲城农业技术推广中心)、刘斌侠(陕西岐山农业技术推广中心)、强大勇(陕西乾县农业技术推广中心)、李廷亮、孙敏(山西农业大学)、党建友、周怀平(山西省农业科学院)、柴守玺(甘肃农业大学)、鲁清林、孙建好、王勇、赵刚(甘肃省农业科学院)、郭鑫年、沈强云(宁夏农林科学院)、王西娜(宁夏大学)、李松龄(青海省农林科学院)、陈署晃、雷钧杰(新疆农业科学院)、李俊华(石河子大学)、张磊(新疆农垦科学院)、贾立国、张永平(内蒙古农业大学)、张久明、郑淑琴(黑龙江省农业科学院)在试验实施、栽培信息调研及样品采集等方面给予的大力支持与帮助。

参 考 文 献:

- [1] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, *et al.* Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 812–818.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020.
- [3] Wang R, Guo S, Li N, *et al.* Phosphorus accumulation and sorption in calcareous soil under long-term fertilization[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(8): e135160.
- [4] 席雪琴. 土壤磷素环境阈值与农学阈值研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2015.
Xi X Q. The critical value of soil P level for crop and environmental safety in different soil types[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest Agriculture and Forestry University, 2015.
- [5] Yang X L, Lu Y L, Ding Y, *et al.* Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008-2014)[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 1–10.
- [6] Khan A, Lu G Y, Ayaz M, *et al.* Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 256: 1–11.
- [7] 林诚, 王飞, 李清华, 等. 长期不同施肥下南方黄泥田有效磷对磷盈亏的响应特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1175–1183.
Lin C, Wang F, Li Q H, *et al.* Response characteristics of Olsen-P balance in yellow paddy fields of southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1175–1183.
- [8] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1471–1485.
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Evolution of soil phosphorus in reddish paddy soil under long-term fertilization varying in formulation and its response to P balance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1471–1485.
- [9] 索东让, 王平. 土壤磷素对作物产量及供磷能力的影响[J]. *土壤通报*, 2002, 33(4): 316–317.
Suo D R, Wang P. Relationship between soil phosphorus supply and crop yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4): 316–317.
- [10] Wiatrak P. Evaluation of phosphorus application with avail on growth and yield of winter wheat in Southeastern Coastal Plains[J]. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 2013, 8(3): 222–229.
- [11] Dodd J R, Mallarino A P. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1118–1128.
- [12] 姚珊, 张东杰, Batbayar Javkhan, 等. 冬小麦-夏玉米体系磷效率对矮土磷素肥力的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1640–1650.
Yao S, Zhang D J, Batbayar J, *et al.* Responses of phosphorus use efficiency to soil phosphorus fertility under winter wheat-summer maize cropping in loess soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1640–1650.
- [13] 刘冲, 贾永红, 张金汕, 等. 播种方式和施磷对冬小麦群体结构、光合特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 919–928.
Liu C, Jia Y H, Zhang J S, *et al.* Effects of seeding pattern and phosphorus application on population structure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 919–928.
- [14] Zhu X K, Li C Y, Jiang Z Q, *et al.* Responses of phosphorus use efficiency, grain yield, and quality to phosphorus application amount of weak-gluten wheat[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(7): 1103–1110.
- [15] Rahim A, Ranjha A M, Rahamtullah, *et al.* Effect of phosphorus application and irrigation scheduling on wheat yield and phosphorus use efficiency[J]. *Soil & Environment*, 2010, 29(1): 15–22.
- [16] Agegnehu G, Nelson P N, Bird M I, *et al.* Phosphorus response and fertilizer recommendations for wheat grown on nitroisols in the central Ethiopian highlands[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(19): 2411–2424.

- [17] 马清霞, 王朝辉, 惠晓丽, 等. 基于产量和养分含量的旱地小麦施磷量和土壤有效磷优化[J]. 中国农业科学, 2019, 52(1): 73–85.
Ma Q X, Wang Z H, Hui X L, *et al.* Optimization of phosphorus rate and soil available phosphorus based on grain yield and nutrient contents in dryland wheat production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(1): 73–85.
- [18] 郭斗斗, 黄绍敏, 张水清, 等. 潮土小麦和玉米Olsen-P农学阈值及其差异分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1184–1190.
Guo D D, Huang S M, Zhang S Q, *et al.* Threshold values of soil Olsen-P for maize and wheat in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1184–1190.
- [19] 胡雨彤, 郝明德, 付威, 等. 不同降水年型和施磷水平对小麦产量的效应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 299–309.
Hu Y T, Hao M D, Fu W, *et al.* Effect of precipitation patterns and different phosphorus nutrition levels on winter wheat yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(2): 299–309.
- [20] 陆梅, 孙敏, 高志强, 等. 不同施磷水平对旱地小麦产量及其构成要素的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 13–19.
Lu M, Sun M, Gao Z Q, *et al.* Impact of different phosphorus application levels on yield and grain traits of winter wheat in drylands[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(7): 13–19.
- [21] 黄倩楠, 王朝辉, 黄婷苗, 等. 中国主要麦区农户小麦氮磷钾养分需求与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2722–2734.
Huang Q N, Wang Z H, Huang T M, *et al.* Relationships of N, P and K requirement to wheat grain yield of farmers in major wheat production regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2722–2734.
- [22] 曹寒冰, 王朝辉, 师渊超, 等. 渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3826–3838.
Cao H B, Wang Z H, Shi Y C, *et al.* Optimization of nitrogen fertilizer recommendation technology based on soil test for winter wheat on weibe dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19): 3826–3838.
- [23] 章孜亮, 刘金山, 王朝辉, 等. 基于土壤氮素平衡的旱地冬小麦监控施氮[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1387–1396.
Zhang Z L, Liu J S, Wang Z H, *et al.* Nitrogen recommendation for dryland winter wheat by monitoring nitrate in 1 m soil and based on nitrogen balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(6): 1387–1396.
- [24] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部办公厅关于推介发布2018年农业主推技术的通知[EB/OL]. (2018-05-09)[2020-02-05]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201805/t20180509_6141720.htm.
The Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on the promotion and release of the main agricultural technologies in 2018[EB/OL]. (2018-05-09)[2020-02-05]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201805/t20180509_6141720.htm
- [25] 刁超朋, 李小涵, 王朝辉, 等. 旱地高产小麦品种籽粒含磷量差异与氮磷钾吸收利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3): 351–361.
Diao C P, Li X H, Wang Z H, *et al.* Difference in grain phosphorus content of high-yielding wheat cultivars and its relation to NPK uptake and utilization in dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 351–361.
- [26] 蒋龙刚, 黄明, 宋庆赞, 等. 基于土壤有机质含量推荐的旱地冬小麦施氮量研究[J]. 中国农业科学, 2020, 53(10): 2020–2033.
Jiang L G, Huang M, Song Q Y, *et al.* Research on nitrogen fertilizer application recommended method based on soil organic matter in dryland wheat production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(10): 2020–2033.
- [27] 黄宁, 王朝辉, 王丽, 等. 我国主要麦区主栽高产品种产量差异及其与产量构成和氮磷钾吸收利用的关系[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 81–93.
Huang N, Wang Z H, Wang L, *et al.* Yield variation of winter wheat and its relationship to yield components, NPK uptake and utilization of leading and high yielding wheat cultivars in main wheat production regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(1): 81–93.
- [28] Fatholahi S, Ehsanzadeh P, Karimmojeni H. Ancient and improved wheats are discrepant in nitrogen uptake, remobilization, and use efficiency yet comparable in nitrogen assimilating enzymes capabilities[J]. *Field Crops Research*, 2020, 249: 107761.
- [29] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1768–1781.
Pei X X, Dang J Y, Zhang D Y, *et al.* Effects of organic substitution on the yield and nutrient absorption and utilization of wheat under chemical fertilizer reduction[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1768–1781.
- [30] 岳寿松, 于振文. 磷对冬小麦后期生长及产量的影响[J]. 山东农业科学, 1994, (1): 13–15.
Yue S S, Yu Z W. Effects of phosphorus on late growth and yield of winter wheat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1994, (1): 13–15.
- [31] 王旭东, 于振文. 施磷对小麦产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2003, (6): 35–36.
Wang X D, Yu Z W. Effect of applying phosphorus on yield and quality of wheat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2003, (6): 35–36.
- [32] 孙慧敏, 于振文, 颜红, 等. 不同土壤肥力条件下施磷量对小麦产量、品质和磷肥利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2006, (3): 45–47.
Sun H M, Yu Z W, Yan H, *et al.* Effect of phosphorus rate applied on yield, quality and phosphorus utilization ratio in winter wheat under different fertility soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006, (3): 45–47.
- [33] 郭战玲, 寇长林, 杨占平, 等. 潮土区小麦高产与环境友好的磷肥施用量研究[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 52–55.
Guo Z L, Kou C L, Yang Z P, *et al.* Phosphate fertilizer application amount for high yield of wheat and environmental safety in fluvo-aquic soil region[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(2): 52–55.
- [34] 王海龙, 张民, 刘之广, 等. 温度和施磷对石灰性潮土小麦苗期生长及磷形态的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4135–4142.
Wang H L, Zhang M, Liu Z G, *et al.* Effects of temperature and phosphorus application on wheat growth at seedling stage and phosphorus form in calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4135–4142.

- [35] Roberts T L, Johnston A E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 105: 275–281.
- [36] 韩燕, 郑景瑞, 卢慧宇, 等. 汾渭平原农户冬小麦氮磷养分投入调查与分析[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(11): 1382–1388.
Han Y, Zheng J R, Lu H Y, *et al.* Investigation and analysis of nitrogen and phosphorus input for winter wheat in Fenwei Plain[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(11): 1382–1388.
- [37] 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.
- [38] 白倩倩, 史桂清, 郭程瑾, 等. 节水灌溉条件下不同施磷量对冬小麦磷素吸收利用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(7): 809–816.
Bai Q Q, Shi G Q, Guo C J, *et al.* Effect of phosphorus fertilizer on acquisition and utilization of phosphorus in winter wheat under water-saving cultivation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(7): 809–816.
- [39] 曹寒冰, 王朝辉, 赵护兵, 等. 基于产量的渭北旱地小麦施肥评价及减肥潜力分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2758–2768.
Cao H B, Wang Z H, Zhao H B, *et al.* Yield based evaluation on fertilizer application and analysis of its reduction potential in Weibei dryland wheat production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2758–2768.
- [40] 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.
- [41] 王西娜, 于金铭, 谭军利, 等. 宁夏引黄灌区春小麦氮磷钾需求及化肥减施潜力[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(23): 4891–4903.
Wang X N, Yu J M, Tan J L, *et al.* Requirement of nitrogen, phosphorus and potassium and potential of reducing fertilizer application of spring wheat in Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4891–4903.
- [42] 孙克刚, 和爱玲, 李向东, 等. 潮土区麦田土壤有效磷施肥指标及小麦施磷推荐基于ASI法的土壤养分丰缺指标[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (2): 72–74.
Sun K G, He A L, Li X D, *et al.* Abundance and deficiency indices of soil available P for wheat and fertilization recommendation in fluvo-aquic soil district indices of soil available P based on ASI method[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, (2): 72–74.

附表 1 北方麦区各试验地点 0—20 cm 土层的基本理化性质、降水、气温和肥料用量

Supplment table 1 Basic physical and chemical properties of the top 0–20 cm soil, annual precipitation, average temperature and fertilizer rates at each experimental site in northern wheat production region of China

试验地点 Experimental site	春/冬麦 小麦 Wheat	年降水 Apr. (mm)	年均气温 AVT (°C)	有机质 OM (g/kg)	pH	全氮 TN (g/kg)	矿质氮 MN (mg/kg)	有效磷 AP (mg/kg)	速效钾 AK (mg/kg)	农户施肥量 FF fertilizer rates (N–P ₂ O ₅ –K ₂ O) (kg/hm ²)	监控施肥量 RF fertilizer rates (N–P ₂ O ₅ –K ₂ O) (kg/hm ²)
甘肃天水 Gansu Tianshui	冬小麦 Winter wheat	607	12.09	11.7	8.4	0.7	9.62	28.2	139.5	150–120–0	198–30–0
甘肃通渭1 Gansu Tongwei1	春小麦 Spring wheat	429	9.06	10.9	8.6	0.6	3.72	11.6	134.2	121–90–0	10–26–0
甘肃通渭2 Gansu Tongwei2	冬小麦 Winter wheat	405	9.19	10.0	8.6	0.7	5.64	7.3	134.9	120–90–0	74–31–0
甘肃通渭3 Gansu Tongwei3	冬小麦 Winter wheat	405	9.19	9.0	8.9	0.6	4.90	12.0	161.0	120–90–0	89–39–0
甘肃通渭4 Gansu Tongwei4	冬小麦 Winter wheat	405	9.19	10.5	8.6	0.6	9.26	8.0	121.0	150–120–0	79–24–0
甘肃武威 Gansu Wuwei	春小麦 Spring wheat	212*	7.95	13.9	8.6	0.8	23.23	27.0	145.6	267–242–0	183–30–0
甘肃张掖 Gansu Zhangye	春小麦 Spring wheat	172*	8.75	17.4	9.2	0.9	19.28	38.2	97.6	300–200–0	200–120–75
甘肃庄浪 Gansu Zhuanglang	冬小麦 Winter wheat	568	8.83	14.5	8.4	0.9	31.62	26.4	135.7	180–120–0	120–90–0
黑龙江黑河1 Heilongjiang Heihe1	春小麦 Spring wheat	689	1.67	38.2	5.5	2.1	18.54	33.9	166.5	80–75–38	73–73–20
黑龙江黑河2 Heilongjiang Heihe2	春小麦 Spring wheat	892	2.29	41.03	5.49	1.97	12.74	31.07	115.69	77.5–81–30	76.3–30–30
黑龙江克山1 Heilongjiang Keshan1	春小麦 Spring wheat	780	3.78	31.2	6.6	1.6	14.08	68.6	296.9	0–75–45	5–30–45

续附表1 Supplement table 1 continued

试验地点 Experimental site	小麦 Wheat	年降水 Apr. (mm)	年均气温 AVT (°C)	有机质 OM (g/kg)	pH	全氮 TN (g/kg)	矿质氮 MN (mg/kg)	有效磷 AP (mg/kg)	速效钾 AK (mg/kg)	农户施肥量 FF fertilizer rates (N- P ₂ O ₅ -K ₂ O) (kg/hm ²)	监控施肥量 RF fertilizer rates (N- P ₂ O ₅ -K ₂ O) (kg/hm ²)
黑龙江克山2 Heilongjiang Keshan2	春小麦 Spring wheat	636	3.37	34.48	6.87	1.63	13.51	33.81	305.43	90-75-45	75-30-45
内蒙古临河 Neimenggu Linhe	春小麦 Spring wheat	90*	9.40	15.1	8.6	0.8	23.98	70.3	206.9	302-207-0	177-62-60
内蒙古五原 Neimenggu Wuyuan	春小麦 Spring wheat	105*	7.95	7.4	8.4	0.4	57.64	4.4	59.8	344-173-0	203-72-60
内蒙古海拉尔 Neimenggu Hailaer	春小麦 Spring wheat	295	-0.13	31.9	8.3	1.6	18.54	47.1	208.1	90-60-39	120-68-14
宁夏贺兰 Ningxia Helan	春小麦 Spring wheat	148*	9.98	13.3	8.4	0.6	11.86	20.7	129.7	300-120-75	218-120-75
宁夏永宁1 Ningxia Yongning1	春小麦 Spring wheat	226*	11.33	12.4	8.6	0.7	23.36	18.0	144.6	313-104-0	278-138-90
宁夏永宁2 Ningxia Yongning2	春小麦 Spring wheat	177*	12.37	14.6	8.6	0.8	16.94	29.0	135.9	240-120-75	225-113-45
宁夏永宁3 Ningxia Yongning3	春小麦 Spring wheat	226*	11.33	12.8	8.4	0.7	17.31	21.2	95.4	300-150-75	270-90-90
宁夏永宁4 Ningxia Yongning4	春小麦 Spring wheat	191*	10.53	18.16	8.68	0.88	15.51	38.90	124.06	279-138-0	230.25-104-45
青海湟中 Qinghai Huangzhong	春小麦 Spring wheat	465	4.80	18.1	8.6	1.2	14.77	28.8	103.2	90-93-0	198-30-50
山西洪洞1 Shanxi Hongtong1	冬小麦 Winter wheat	328	16.08	11.3	7.9	0.7	112.03	4.8	158.9	150-60-0	104-42-0
山西洪洞2 Shanxi Hongtong2	冬小麦 Winter wheat	237*	13.79	18.7	8.4	1.0	16.58	8.8	129.0	268-135-90	188-56-31
山西洪洞3 Shanxi Hongtong3	冬小麦 Winter wheat	570*	14.83	33.81	8.70	1.41	23.58	17.06	171.47	300-150-150	264-134-28
山西临汾 Shanxi Linfen	冬小麦 Winter wheat	343*	15.24	19.0	8.5	0.8	13.59	11.7	160.0	266-120-66	179-111-30
山西闻喜1 Shanxi Wenxi1	冬小麦 Winter wheat	289	16.75	14.0	8.2	0.7	12.59	5.6	121.3	180-60-60	142-60-34
山西闻喜2 Shanxi Wenxi2	冬小麦 Winter wheat	289*	16.75	18.1	8.5	1.0	20.41	12.3	131.3	240-150-150	172-82-0
山西永济 Shanxi Yongji	冬小麦 Winter wheat	465*	14.82	14.8	8.5	0.8	14.23	10.1	145.5	268-180-90	251-75-0
陕西彬县 Shaanxi Binxian	冬小麦 Winter wheat	366	10.01	12.3	8.3	0.3	33.92	16.1	181.2	234-129-44	77-75-30
陕西大荔 Shaanxi Dali	冬小麦 Winter wheat	381	6.57	10.7	8.8	0.3	117.77	14.8	201.7	255-217-21	147-21-30
陕西合阳 Shaanxi Heyang	冬小麦 Winter wheat	347	6.57	12.6	8.2	0.7	35.60	10.5	237.7	135-162-18	111-79-30
陕西蒲城 Shaanxi Pucheng	冬小麦 Winter wheat	345	6.57	18.0	8.2	0.7	31.49	9.4	169.5	148-93-32	83-99-30
陕西岐山1 Shaanxi Qishan1	冬小麦 Winter wheat	288	12.44	12.1	7.8	0.6	71.77	12.2	122.2	203-113-35	30-92-30
陕西岐山2 Shaanxi Qishan2	冬小麦 Winter wheat	288*	12.44	18.2	8.5	1.1	7.23	7.7	119.8	180-144-35	150-90-0

续附表 1 Supplement table 1 continued

试验地点 Experimental site	小麦 Wheat	年降水 Apre. (mm)	年均气温 AVT (°C)	有机质 OM (g/kg)	pH	全氮 TN (g/kg)	矿质氮 MN (mg/kg)	有效磷 AP (mg/kg)	速效钾 AK (mg/kg)	农户施肥量 FF fertilizer rates (N- P ₂ O ₅ -K ₂ O) (kg/hm ²)	监控施肥量 RF fertilizer rates (N- P ₂ O ₅ -K ₂ O) (kg/hm ²)
陕西乾县 Shaanxi Qianxian	冬小麦 Winter wheat	413	13.35	10.9	8.4	0.4	74.68	14.2	98.5	214-244-6	105-8-30
陕西武功1 Shaanxi Wugong1	冬小麦 Winter wheat	561*	13.35	19.2	8.3	1.2	19.66	23.0	257.6	255-180-30	206-89-5
陕西武功2 Shaanxi Wugong2	冬小麦 Winter wheat	561*	13.35	17.2	8.3	1.1	18.23	19.4	128.2	255-180-30	225-105-45
陕西永寿1 Shaanxi Yongshou1	冬小麦 Winter wheat	370	13.35	12.0	8.1	0.7	92.00	9.8	178.0	189-132-28	98-63-30
陕西永寿2 Shaanxi Yongshou2	冬小麦 Winter wheat	370	13.35	10.5	8.2	0.5	47.38	9.6	139.2	199-129-20	39-91-30
陕西永寿3 Shaanxi Yongshou3	冬小麦 Winter wheat	370	13.35	13.5	8.3	0.8	27.28	15.6	80.7	138-105-0	126-51-30
陕西永寿4 Shaanxi Yongshou4	冬小麦 Winter wheat	370	13.35	11.1	8.4	0.6	49.27	13.4	116.5	193-117-20	64-41-30
新疆泽普1 Xinjiang Zepu1	冬小麦 Winter wheat	92*	12.31	14.4	8.6	0.7	12.92	29.2	126.4	296-173-0	295-68-68
新疆木垒 Xinjiang Mulei	春小麦 Winter wheat	52*	7.33	9.6	8.3	0.7	17.50	7.0	198.1	240-105-38	224-81-0
新疆奇台 Xinjiang Qitai	冬小麦 Winter wheat	528*	2.08	12.9	8.5	0.8	24.18	20.9	462.1	315-180-20	240-120-20
新疆塔城1 Xinjiang Tacheng1	冬小麦 Winter wheat	255*	6.15	31.1	8.3	1.8	28.24	47.8	285.0	240-105-38	192-50-0
新疆塔城2 Xinjiang Tacheng2	春小麦 Spring wheat	188*	8.40	20.14	8.75	1.20	9.09	14.98	212.51	240-105-38	192-49.5-0
新疆石河子 Xinjiang Shihezi	春小麦 Spring wheat	231*	8.43	15.5	8.3	0.9	32.33	36.2	391.2	300-133-0	216-30-0
新疆泽普2 Xinjiang Zepu2	冬小麦 Winter wheat	92*	12.31	9.7	8.7	0.6	12.03	22.5	95.9	295-173-0	282-138-0
新疆泽普3 Xinjiang Zepu3	冬小麦 Winter wheat	115*	12.89	15.74	8.91	0.53	21.49	34.29	68.35	362.25-173-0	213-173-0

注 (Note): Apre.—Annual precipitation; AVT—Annual average temperature; OM—Organic matter; TN—Total N; MN—Mineral nitrogen; AP—Available P; AK—Available K. 冬小麦季降水与气温为9月至次年8月的总降雨量与月平均气温, 春小麦季降水与气温为全年1—12月的总降雨量与月平均气温。*代表灌溉, 各试验地点0—20 cm 土层的基本理化性状为第一年收获期农户施肥处理的测定结果。Precipitation and temperatures of winter wheat season are the total rainfall and mean monthly temperatures from September to August of next year, respectively. Precipitation and temperatures of spring wheat season are the total rainfall and mean monthly temperatures of this year. * indicates irrigation. The basic physical and chemical properties of 0—20 cm soil at each experimental site were from the determination of FF treatment at wheat harvest in the first year.