

施磷量与施磷方式对旱地土壤磷组分及 小麦磷吸收利用的影响

曾祥^{1,2}, 孔雪琴^{1,2}, 刘强^{1,2}, 程红岩^{1,2}, 李世清¹, 岳善超^{1,3}, 沈玉芳¹

(1.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学
资源环境学院,陕西 杨凌 712100; 3.山西农业大学自然资源与环境学院,太原 030031)

摘要: [目的] 从旱地土壤磷生物有效性的角度,探究不同施磷量与施磷方式对土壤磷生物有效性及冬小麦磷吸收利用的影响,为黄土旱塬冬小麦合理施磷提高产量及磷效率提供理论依据。[方法] 以“长旱 58”小麦品种为供试材料,设置 0(P0)、60(P60)、120 kg/hm²(P120)3 个施磷(P₂O₅)量和撒施(S)、条施(T)2 种施磷方式,研究施磷量与施磷方式对土壤各形态磷、冬小麦产量、生物量、磷吸收量及磷肥利用效率的影响,分析土壤磷生物有效性变化对产量形成和磷肥效率的影响。[结果] 2 种施磷方式下,随着施磷量增加,冬小麦产量、生物量和磷吸收量均显著增加。撒施方式下,与 P0 处理相比,P120 处理产量、生物量和磷吸收量分别显著增加 22.69%、29.57% 和 157.06%;与 P60 处理相比,分别显著增加 15.56%、14.92% 和 31.84%。条施方式下,与 P0 处理相比,P120 处理产量、生物量和磷吸收量分别显著增加 38.77%、43.57% 和 133.54%;与 P60 处理相比,分别显著增加 17.98%、23.67% 和 34.26%。不同施磷量下,与 S 处理相比,T 处理增加冬小麦产量、磷肥偏生产力和磷肥农学效率,P120 处理下分别增加 13.11%、13.24% 和 128.71%,差异均达显著水平。施磷显著增加土壤全磷(TP)、有效磷(AP)、盐酸提取态磷(HCl-P)、酶提取态磷(Enzyme-P)、氯化钙提取态磷(CaCl₂-P)和微生物量磷(MBP)质量分数;相较于 S 和 T 处理显著增加 Enzyme-P 和 MBP,且均以 P120 处理质量分数最高。与 S 相比,T 处理的土壤有效磷分布更符合冬小麦根系生长区域。相关分析表明,冬小麦产量与 AP 呈显著正相关,与 TP、MBP、HCl-P、Enzyme-P 呈极显著正相关。[结论] 施用磷肥可显著提高土壤磷质量分数和磷有效性,且以条施土壤磷有效性和有效磷分布更利于小麦养分吸收,显著提高冬小麦产量、磷吸收量和磷肥利用率,条施磷 120 kg/hm²可获得最高的籽粒产量和磷肥农学效率,是较高效的施磷方式。

关键词: 施磷方式; 施磷量; 生物有效性磷; 磷肥利用率

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)03-0315-10

Effects of Phosphorus Application Rate and Method on Soil Phosphorus Fractions and Phosphorus Uptake and Utilization of Winter Wheat in Dryland Soils

ZENG Xiang^{1,2}, KONG Xueqin^{1,2}, LIU Qiang^{1,2}, CHENG Hongyan^{1,2},
LI Shiqing¹, YUE Shanchao^{1,3}, SHEN Yufang¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.College of Natural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031)

Abstract: [Objective] From the perspective of soil phosphorus (P) bioavailability in dryland soils, this study evaluated the effects of different P application rates and methods on soil P bioavailability and winter wheat P uptake and utilization, aiming to provide a theoretical basis for optimizing P fertilization modes to enhance yield

收稿日期:2024-05-12

修回日期:2024-12-26

录用日期:2025-01-29

网络首发日期(www.cnki.net):2025-04-01

资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900700);国家自然科学基金项目(41671307)

第一作者:曾祥(1998—),男,硕士研究生,主要从事养分高效利用研究。E-mail:zengxiang2021@163.com

通信作者:沈玉芳(1975—),女,博士,研究员,主要从事作物养分机理研究。E-mail:shenyufang@nwsuaf.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

and P-use efficiency on the Loess Plateau. **[Methods]** Using the wheat variety "Changhan 58" as the test material, a two-factor experiment was implemented. The experiment included three P (P_2O_5) application rates, 0 (P0), 60 (P60) and 120 kg/hm² (P120), and two application methods, broadcast application (S) and strip application (T). The study investigated the effects of P application rate and method on soil P fractions, winter wheat yield, biomass, P uptake, and P-use efficiency. The impact of changes in soil P bioavailability on yield formation and P-fertilizer efficiency was analyzed. **[Results]** Under both application methods, winter wheat yield, biomass, and P uptake significantly increased with increasing P application rate. Under the broadcast method, the P120 treatment significantly increased the yield, biomass, and P uptake by 22.69%, 29.57% and 157.06%, respectively, compared to P0; these increases were 15.56%, 14.92% and 31.84%, respectively, compared to the P60 treatment. Similarly, under the strip application method, P120 significantly increased the yield, biomass, and P uptake by 38.77%, 43.57% and 133.54%, respectively, compared to P0; these increases were 17.98%, 23.67% and 34.26%, respectively, compared to P60. At different P application rates, strip application improved the yield, P-fertilizer partial productivity and agronomic efficiency, compared to the broadcast application method; under P120, these increases were 13.11%, 13.24% and 128.71%, respectively, with significant differences. Phosphorus application significantly increased soil total P (TP), available P (AP), hydrochloric acid-extractable P (HCl-P), enzyme-extractable P (Enzyme-P), calcium chloride-extractable P (CaCl₂-P), and microbial biomass P (MBP) contents; compared to the broadcast application, the strip application significantly increased Enzyme-P and MBP contents, which were the highest under P120. The distribution of AP in the soil under strip application better matched the root growth pattern of winter wheat. Correlation analysis revealed that winter wheat yield was significantly positively correlated with AP and strongly positively correlated with TP, MBP, HCl-P, and Enzyme-P. **[Conclusion]** Phosphorus fertilization significantly increases soil P content and availability. Strip application improves the distribution of available P, facilitating nutrient uptake by winter wheat and increasing yield, P uptake, and P-use efficiency. The application of 120 kg/hm² via strip application is a more effective mode for achieving high yield and agronomic P efficiency.

Keywords: phosphorus application method; phosphorus application rate; bioavailable phosphorus; phosphorus-utilization efficiency

Received: 2024-05-12

Revised: 2024-12-26

Accepted: 2025-01-09

Online(www.cnki.net): 2025-04-01

小麦在粮食生产中具有极其重要的作用,2022年我国小麦播种面积为23.156万hm²,产量13 576万t,占我国粮食总产量和播种面积20%^[1],其高产和稳产对我国粮食安全至关重要^[2]。磷素是小麦生长发育和产量形成过程中的关键因素^[3-5],因此,磷肥在保障我国粮食安全中起着不可替代的作用。黄土高原土壤速效磷质量分数在3.7~66.1 mg/kg^[6],适量施用磷肥,可促进小麦分蘖和显著增产^[7],且土壤有效磷质量分数越低,施磷调控效果越明显^[8-9]。但小麦产量随施磷量的增加先增加后平衡,小麦获得高产需要的适宜施磷量与土壤肥力和养分供应有关;土壤有效磷质量分数<10、10~20、>20 mg/kg时,适宜施磷量分别为150、90~120、90 kg/hm²以下具有增产效果^[10-11],过量施磷肥造成资源浪费和环境问题^[12]。

肥料撒施是常用的施磷方式。已有研究^[13-14]表明,对于肥料移动性差且易固定的磷肥,这种施用方

式导致磷肥在土壤中分散,使得植物根系难以充分利用,限制其生物有效性,肥料利用率和经济效益较低。采用条施这种局部集中施用方式,可通过有针对性地将肥料施加在植物根系生长区域,增加磷肥在植物根际区域的浓度,提高磷的有效利用^[15-16],进而提高作物产量和品质^[17-18]。除通过根系直接吸收外,微生物也是土壤磷循环的重要组成部分,微生物与根系既相互共生,又相互竞争,介导植物对磷的吸收利用^[19-21]。前人对于磷素效率的研究主要集中于作物产量、作物磷素的吸收转运及土壤中有效磷质量分数之间关系的研究,作物与土壤构成一个动态体系,缺少从生物有效性的角度看待作物对于土壤磷的吸收利用。DELUCA等^[22]根据生物学利用难易程度提出基于磷素生物有效性的新型磷分级方法(biologically based phosphorus, BBP),此方法可模拟根系与微生物对土壤磷素的作用,不同磷组分可以

较全面地反映土壤中磷的生物有效性,以及磷素的生物学利用难易程度。

本研究针对旱地土壤磷素有效性较低的问题,以促进磷肥高效利用为目标,创新点是从旱地土壤磷生物有效性的角度,探究不同施磷方式与施磷量对旱作麦田土壤磷组分、磷生物有效性和作物磷吸收利用的影响。研究结果对提高黄土高原地区冬小麦磷肥利用率、促进旱作农业绿色发展具有重要的意义。

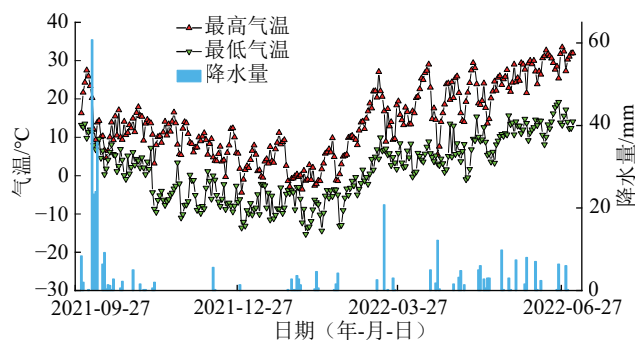
1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间定位试验于2016年10月布置于中国科学院院长武黄土高原生态农业试验站。该试验站位于黄土高原中南部陕西省长武县境内($34^{\circ}59'09''\sim 35^{\circ}18'37''N$, $107^{\circ}38'49''\sim 107^{\circ}58'02''E$),海拔1 200 m,年平均气温 $9.97^{\circ}C$,年平均降水量532 mm,冬小麦生长季(10—12月及翌年1—6月)月平均气温 $6.9^{\circ}C$,生长季降水总量的年平均值为213 mm属于半干旱半湿润性季风气候。试验地地貌属于高原沟壑区,成土母质为马兰黄土,地带性土壤属于黑垆土。无灌溉条件,农作物生长发育所需要的水分主要靠自然降水和土壤蓄水来维持,属于典型旱作农业区。2016年试验开始时0~20 cm土层土壤全氮质量分数0.78 g/kg,全磷质量分数0.79 g/kg,碱解氮质量分数23.10 mg/kg,有效磷质量分数5.21 mg/kg,有效钾质量分数106 mg/kg,有机质质量分数13.64 g/kg, pH为8.32。

1.2 试验设计

试验设置3个施磷(P_2O_5)量:0(P0)、60(P60)和120 kg/hm²(P120);2种施磷方式:条施(T)和撒施(S),共5个处理,3次重复,随机区组设计。每个小区面积28 m²(7 m × 4 m)。磷肥作为基肥于冬小麦播前一次性施入。条施方式于开沟5 cm后,将肥料均匀施入后覆土,小麦播种于磷肥上方;撒施方式将肥料均匀撒施于土壤表面,然后与表层土壤均匀混合。供试磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 16%),氮肥为尿素(N 46%),钾肥为硫酸钾(K_2O 45%),氮肥、钾肥于冬小麦播前作为基肥一次性施入。本试验冬小麦品种为“长旱58”(陕西省长武县选育品种),人工开沟条播,行距20 cm,播种密度350万株/hm²,于2021年9月27日播种,2022年6月27日收获,冬小麦生育期内无灌溉。不同处理其他田间管理一致。冬小麦生育时期降水和温度变化见图1,生育期降水量349.2 mm。



注:气象数据源自陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站。

图1 2021—2022年冬小麦生育期日降水量与气温变化

Fig. 1 Changes in daily precipitation and temperature during winter wheat growth period from 2021 to 2022

1.3 样品采集与测定

1.3.1 生物量及磷含量 于冬小麦成熟期,在每个试验小区随机采集具有代表性的2行40 cm连续小麦植株,分为茎、叶、籽粒和颖壳,105 °C杀青30 min,75 °C烘干至恒重。样品粉碎过筛,采用硫酸-过氧化氢消煮,钼锑抗比色法^[23]测定全磷质量分数。

1.3.2 产量及产量构成 成熟期每个小区随机选取具有代表性的2个1 m²测定小麦籽粒产量、穗数、穗粒数和千粒重。

1.3.3 土壤磷质量分数 采用五点采样法采集试验小区0~20 cm土层土壤样品,自然风干,粉碎过筛。土壤全磷(TP)采用硫酸-高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定;有效磷(AP)采用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;微生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸,0.5 mol/L碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法^[23]测定。

以冬小麦播种行为中心(C),分别在左右两侧5 cm(L5和R5)和10 cm(L10和R10)处,采集0~5、5~10、10~20 cm土层的剖面土壤样品,测定土壤有效磷(AP)质量分数,分析土壤有效磷空间分布特征。

1.3.4 土壤生物有效性磷分级 基于生物有效性的土壤磷分级测定采用DELUCA等^[22]的BBP方法,其简要步骤为:称取0.5 g土壤样品于15 mL离心管中,加入10 mL的提取液,25 °C恒温振荡3 h(180 r/min),离心提取上清液。其中,0.01 mol/L CaCl₂提取液提取CaCl₂-P,10 mmol/L柠檬酸提取液提取Citrate-P,1 mol/L盐酸提取液提取HCl-P,0.02 EU/mL酶提取液提取Enzyme-P。0.02 EU/mL酶的提取液包含植酸酶(Sigma P1259; Enzyme Commission Number 3.1.3.26)、酸性磷酸酶(Sigma P3627; Enzyme Commission Number 2.3.1.3)和

碱性磷酸酶 (Sigma P5931; Enzyme Commission Number 3.1.3.1), 3 种酶的浓度均为 0.02 EU/mL。鉴于植酸酶本身含磷,在使用之前采用透析袋对植酸酶 4℃条件下透析 5 d,去除植酸酶含有的磷。

1.4 相关指标计算方法

$$PU = BM \times PC \tag{1}$$

$$PFP = GYP / PR \tag{2}$$

$$PAE = (GYP - GY) / PR \tag{3}$$

$$PRE = PUP / PR \times 100 \% \tag{4}$$

$$PARE = (PUP - PUR) / PR \times 100 \% \tag{5}$$

式中:PU 为植株磷吸收量,kg/hm²;BM 为植株生物量,t/hm²;PC 为植株氮质量分数,kg/t;PFP 为磷肥偏生产力,kg/hm²;GYP 为施磷处理籽粒产量,t/hm²;PR 为施磷量,kg/hm²;PAE 为磷肥农学利用效率,kg/hm²;GY 为不施磷处理籽粒产量,t/hm²;PRE 为磷肥回收率,%;PUP 为施磷处理下作物吸磷量,kg/hm²;PARE 为磷肥表观利用率,%;PUR 为不施磷处理下作物吸磷量。

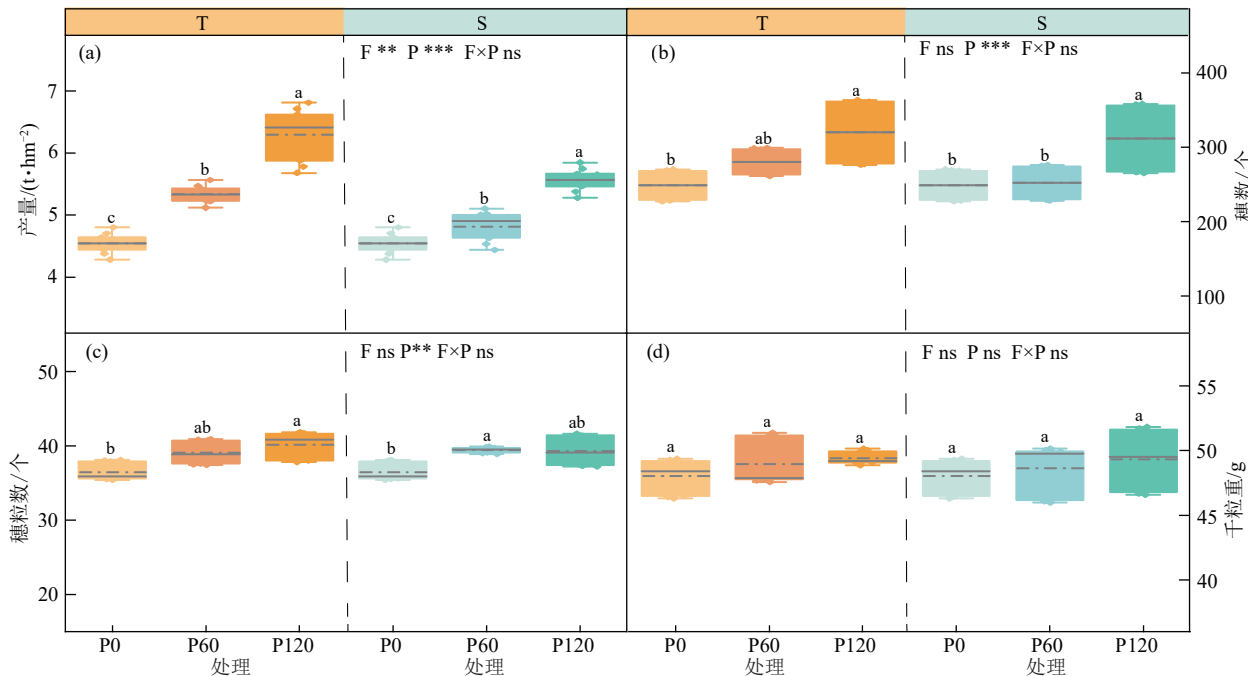
1.5 数据处理与统计分析

试验数据采用 SPSS Statistics 22.0 软件进行统计分析,多重比较采用邓肯 (Duncan) 新复极差法,差异显著水平为 $p < 0.05$,利用 Origin 2024 软件制图。

2 结果与分析

2.1 施磷量与施磷方式对冬小麦产量及产量构成的影响

由图 2 可知,施磷方式显著影响冬小麦产量,施磷量极显著影响冬小麦产量、穗数,显著影响穗粒数和千粒重均无显著交互作用。2 种施磷方式下,随着施磷量的增加,冬小麦产量、穗数、穗粒数和千粒重均呈增加趋势,以条施磷 120 kg/hm² 产量最高,为 6.30 t/hm²。条施方式下,与 P0 处理相比,P60 处理冬小麦产量、穗数和穗粒数分别增加 17.62%、12.68% 和 7.07%,产量差异显著;P120 处理分别增加 38.77%、28.57% 和 10.04%,差异均显著。与 P60 处理相比,P120 处理产量显著增加 17.98%,而穗数和穗粒数增加不显著。撒施方式下,与 P0 处理相比,P60 处理冬小麦产量、穗数和穗粒数分别增加 6.17%、1.41% 和 8.12%,产量和穗粒数差异显著;P120 处理分别增加 22.69%、25.35% 和 7.76%,产量和穗数差异显著。与 P60 处理相比,P120 处理产量和穗数分别显著增加 15.56% 和 23.61%。相较于撒施,条施方式下 P120 和 P60 处理产量分别显著增加 13.11% 和 10.79%,P120 穗数显著增加 11.11%。试验不同处理千粒重差异均不显著。



注: T 为条施磷肥; S 为撒施磷肥; P0 为 0 kg/hm² P₂O₅; P60 为 60 kg/hm² P₂O₅; P120 为 120 kg/hm² P₂O₅; F 为施肥方式处理间差异显著水平; P 为施肥水平处理间差异显著水平; ***表示 $p \leq 0.001$; **表示 $p \leq 0.01$; *表示 $p \leq 0.05$; ns 表示不显著; 图柱上方小写字母表示同一施肥不同施磷量间差异显著 ($p < 0.05$); 箱体的上下边缘为分位数, 箱体实线为中位数, 虚线为平均值, 箱体外的上短横线为最大值, 下短横线为最小值。下同。

图 2 不同施磷量与施磷方式处理下冬小麦产量及产量构成

Fig. 2 Yield and yield components of winter wheat under different phosphorus application rates and methods
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

2.2 施磷量与施磷方式对冬小麦生物量及磷吸收量的影响

由图 3 可知,施磷量极显著影响生物量与磷吸收量,施磷方式未显著影响生物量与磷吸收量,且施磷量与施磷方式无显著交互作用。2 种施磷方式下,随着施磷量增加,冬小麦生物量和磷吸收量均显著增加,以条施 120 kg/hm²生物量和磷吸收量最高,分别为 13.74、13.63 t/hm²。条施方式下,与 P0 处理相比,P60 和 P120 处理冬小麦地上部生物量分别显著增加 16.09% 和 43.57%,磷吸收量分别显著增加

91.46% 和 157.06%。与 P60 处理相比,P120 处理生物量和磷吸收量分别显著增加 23.67% 和 34.26%。撒施方式下,与 P0 处理相比,P60 和 P120 处理生物量分别显著增加 12.75% 和 29.57%,磷吸收量分别显著增加 77.14% 和 133.54%。与 P60 处理相比,P120 处理生物量和磷吸收量分别显著增加 14.92% 和 31.84%。不同施磷量水平下,相较于撒施,条施方式下 P120 处理生物量、磷吸收量分别显著增加 10.81% 和 10.07%,P60 处理生物量和磷吸收量增加不显著。

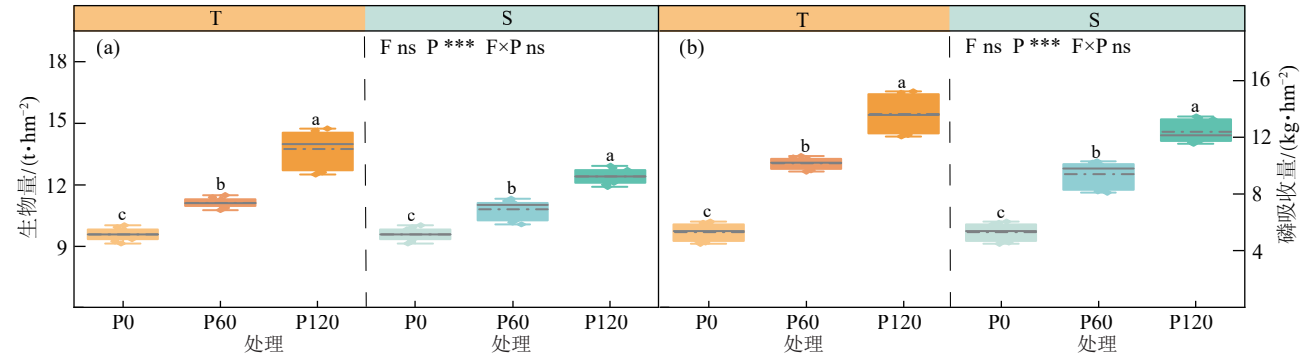


图 3 不同施磷量与施磷方式处理下冬小麦生物量及磷吸收量

Fig. 3 Biomass and phosphorus uptake of winter wheat under different phosphorus application rates and methods

2.3 施磷量与施磷方式对冬小麦磷利用效率的影响

由表 1 可知,施磷量显著影响冬小麦磷肥农学利用效率和表观利用率,极显著影响磷肥偏生产力和回收率;施磷方式显著影响冬小麦磷肥偏生产力和表观利用率,极显著影响农学利用效率;施磷量与施磷方式对磷肥表观利用率有显著交互作用。2 个施磷量下,条施处理磷肥偏生产力和磷肥农学效率高于撒施处理。TP60 处理的磷肥偏生产力最高,较

SP60、TP120 和 SP120 分别显著提高 10.78%、69.43% 和 91.85%,TP120 和 SP120 间差异不显著。TP120 处理的磷肥农学效率最高,较 TP60、SP60 和 SP120 分别显著提高 10.00%、170.40% 和 128.71%,SP60 和 SP120 间差异不显著。TP60、TP120 和 SP60 处理间磷肥表观利用率差异不显著,但均显著高于 SP120 处理。条施和撒施方式下,P60 处理的磷回收率较 P120 处理分别显著提高 48.94% 和 61.34%。

表 1 不同施磷量与施磷方式处理下的磷肥利用效率

Table 1 Phosphorus-utilization efficiency under different phosphorus application rates and methods

施磷方式 (F)	施磷量 (P)	磷肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥农学利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥表观利用率/%	磷回收率/%
T	P60	89.00±1.20a	14.70±0.42b	7.44±0.16a	16.92±0.43a
	P120	52.53±2.30c	16.17±0.34a	7.58±0.05a	11.36±0.72b
S	P60	80.34±2.40b	5.98±0.57c	7.22±0.08a	16.65±0.19a
	P120	46.39±0.90c	7.07±0.06c	5.90±0.44b	10.32±0.43b
变异来源					
F		**	***	**	ns
P		***	*	*	***
F * P		ns	ns	*	ns

注:表中数据为平均值±标准误;同列数据后不同小写字母表示处理间差异达到5%显著水平。

2.4 不同施磷量与施磷方式对土壤不同形态磷质量分数的影响

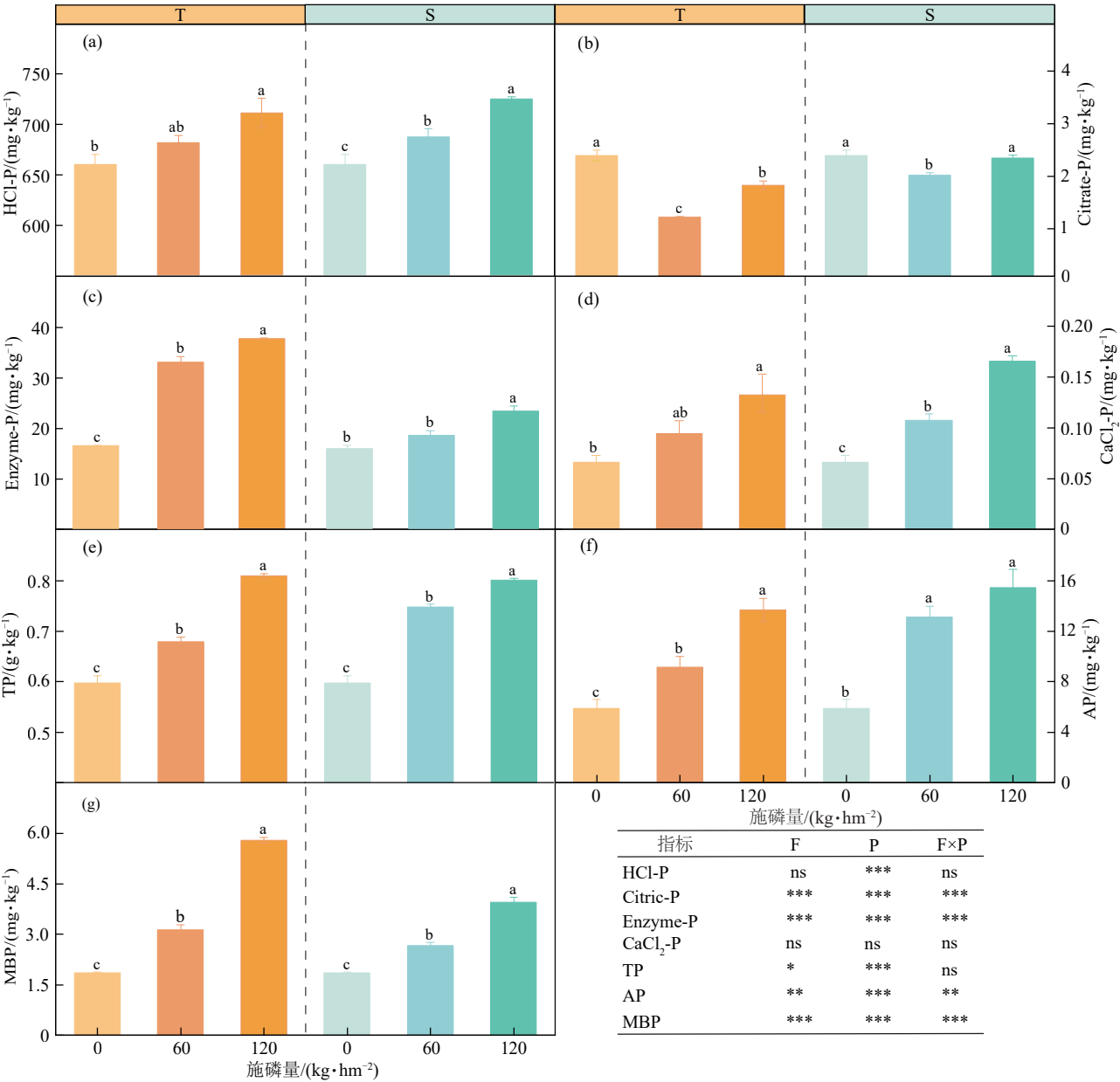
由图 4 可知,施磷方式显著影响 TP、AP,极显著影响 Citrate-P、Enzyme-P 和 MBP;施磷量极显著影响了 TP、AP、Citrate-P、Enzyme-P、HCl-P 和 MBP;施磷

量与施磷方式对 TP 有显著的交互作用,对 Citrate-P、Enzyme-P 和 MBP 有极显著的交互作用。

条施方式下,与 P0 处理相比,P120 和 P60 处理 Enzyme-P 分别显著增加 133.33% 和 103.40%;Citrate-P 分别显著降低 23.61% 和 48.96%;HCl-P 在

P120 处理显著增加 7.68%;CaCl₂-P 增加不显著。撒施方式下,与 P0 处理相比,P120 处理 HCl-P、Enzyme-P 和 CaCl₂-P 显著增加 9.74%、43.21% 和 150.00%;Citrate-P 在 P60 处理显著降低 15.63%。不同施磷量水平下,相较于撒施,条施方式下 Enzyme-P 在 P120 和 P60 处理分别显著增加 62.93% 和 73.99%;Citrate-P 分别显著降低 21.99% 和 39.51%;HCl-P 和 CaCl₂-P 降低不显著。

2 种施磷方式下,随着施磷量的增加,HCl-P、Enzyme-P、CaCl₂-P、TP、AP 和 MBP 均呈增加趋势,Citrate-P 降低。2 种施磷方式下,与 P0 处理相比,P60 和 P120 处理土壤 TP、AP 和 MBP 均显著增加,且 P120 处理最高。不同施磷量下,相较于撒施,条施方式下 P60 和 P120 处理 MBP 分别显著增加 17.88% 和 46.52%;P60 处理 TP 和 AP 显著降低 9.23% 和 30.33%。



注:HCl-P 为盐酸提取态磷;Citrate-P 为柠檬酸提取态磷;Enzyme-P 为酶提取态磷;TP 为土壤全磷;AP 为土壤有效磷;MBP 为微生物量磷;图柱上方不同小写字母表示同一施肥处理不同施磷量间差异($p<0.05$)。

图 4 不同施磷量与施磷方式处理下土壤磷组分质量分数

Fig. 4 Contents of soil phosphorus fractions under different phosphorus application rates and methods

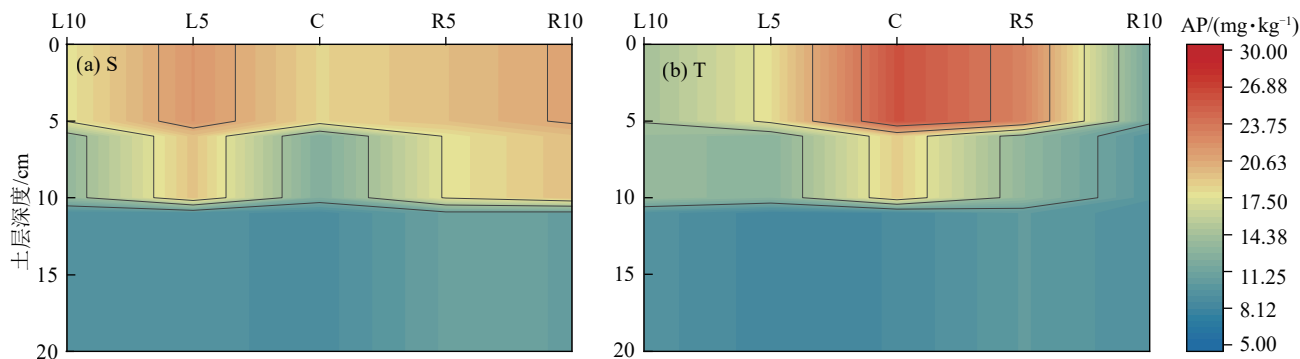
土壤 TP、AP 和 MBP 均为 P120 处理最高。条施方式下,与 P0 处理相比,P120 处理 TP、AP 和 MBP 分别增加 35.55%、133.29% 和 211.68%,P60 处理分别增加 13.64%、55.60% 和 68.74%,差异均显

著。撒施方式下,与 P0 处理相比,P120 处理 TP、AP 和 MBP 分别增加 34.25%、163.77% 和 112.73%,P60 处理分别增加 25.20%、123.33% 和 43.14%,差异均显著。不同施磷量水平下,相较于撒施,条施方式下

P120 和 P60 处理 MBP 分别显著增加 46.52% 和 17.88%; P60 处理 TP 和 AP 显著降低 9.23% 和 30.33%。

2.5 不同施磷方式下土壤有效磷剖面分布

由图 5 可知,不同施磷方式下,土壤有效磷含量



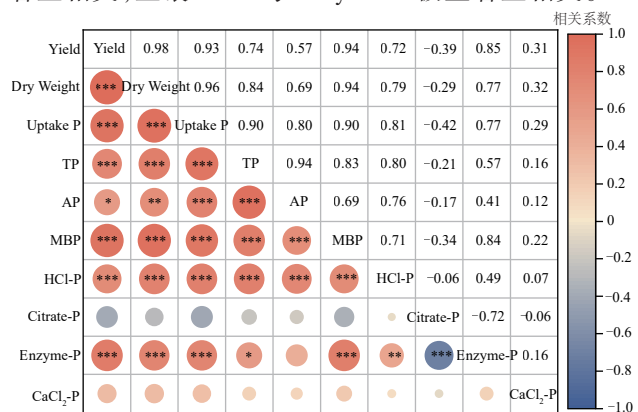
注: C 表示小麦播种位置中心区域; L5、L10、R5、R10 分别表示小麦播种行的左侧 5、10 cm 位置和右侧 5、10 cm 区域位置。

图 5 不同施磷方式下土壤有效磷剖面分布

Fig. 5 Distribution of soil available phosphorus in the soil profile under different phosphorus application methods

2.6 不同施磷量与施磷方式处理下各指标相关性分析

由图 6 可知,冬小麦产量、生物量、磷吸收量与 TP、MBP、Enzyme-P、HCl-P 均呈极显著正相关,产量、生物量与 AP 呈显著正相关,磷吸收量与 AP 呈极显著正相关;冬小麦产量、生物量和磷吸收量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 呈一定的正相关,与 Citrate-P 呈负相关关系。冬小麦产量与生物量、磷吸收量极显著正相关。土壤 TP 与 AP、MBP、HCl-P 极显著正相关,与 Enzyme-P 显著正相关;土壤 AP 与 MBP、HCl-P 极显著正相关;土壤 MBP 与 Enzyme-P 极显著正相关。



注:***表示 $p \leq 0.001$; **表示 $p \leq 0.01$; *表示 $p \leq 0.05$ 。

图 6 不同施磷量与施磷方式处理下各指标相关性

Fig. 6 Correlations of various indices under different phosphorus application rates and methods

3 讨论

我国黄土高原旱地土壤主要以碱性土壤为主,土地普遍存在磷素缺乏的情况,提高磷肥投入可增加产量^[24-25]。本研究结果显示,施磷显著提高小麦产

分布随土层深度总体表现为 $0 \sim 5 \text{ cm} > 5 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm}$; T 处理下 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 与 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤有效磷分布较撒施更为集中。与撒施相比, T 处理下土壤有效磷分布随植株距离显示出中心趋向性,表现为 $C > L5, R5 > L10, R10$ 。

量、生物量和磷吸收量,且随着施磷量的增加显著增加。前人^[26]研究证明,协调小麦穗数、穗粒数和千粒重 3 个要素的关系是获得小麦高产的关键,适量施磷可以促进小麦的有效分蘖和根系发展,增加小麦有效穗数^[27],本试验条件下,随施磷量增加,穗数或穗粒数增加是不同施磷处理下产量增加的关键因素; 2 种施磷方式下, P120 处理产量、生物量和磷吸收量均最高,与本长期施磷处理条件下,土壤有效磷质量分数从 5.21 mg/kg 增长到 $9.46 \sim 15.37 \text{ mg/kg}$ 有关。冯媛媛等^[10]研究表明,土壤有效磷在 $10 \sim 20 \text{ mg/kg}$ 时,推荐施用 $90 \sim 120 \text{ kg/hm}^2$ 。随着施磷量的增加,磷效率有先增加后减少的趋势^[28],在本研究中 P120 处理的磷肥偏生产力、磷回收率和磷肥表观利用率显著低于 P60。

磷肥集中施用可增加肥料与根系的接触机会,并减少肥料在土壤中的固定,从而提高作物产量与磷肥利用率^[29]。由于磷在土壤中的移动性差,不同磷肥输入方式下土壤中磷的分布状况差异也可能是影响磷吸收的原因之一。本研究撒施磷肥后,土壤有效磷趋于分散于 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 浅层土壤;且小麦成行播种,因为根系对于养分的吸收,从土壤剖面,小麦播种行土壤有效磷质量分数低,播种行行间有效磷质量分数高,在热图上呈“波浪”状分布;条施磷肥后,土壤有效磷趋于集中分布于小麦根系生长区域,在热图上呈“点源”状或“漏斗”状,与前人^[30]研究结果一致,即常年条施磷肥处理下的土壤剖面,磷集中于小麦根系生长区域,磷浓度向外辐射减弱。相较于撒施,条施磷肥下土壤磷的分布与小麦种子发育和

根系生长区域更为匹配,更有利于满足小麦生长过程中对于磷的需求,所以显著提高产量,穗数、穗粒数、千粒重、生物量和磷吸收量也有不同程度提高。磷肥条施有效地优化土壤中养分的分布,更为精准地满足根系对磷的需求,为植物生长提供更为适宜的生长环境^[9,31],使得试验条施处理的磷肥生产力、磷肥农学效率、磷肥表观利用率显著高于撒施处理,是一种较高效的施磷方式。

一般认为土壤中的磷含量也可以反映作物可以吸收利用的磷的多少,TP 和 AP 在传统上代表着土壤磷库的丰缺和土壤供磷能力的大小,我国的磷肥利用率只有 20% 左右,剩余的磷储存在土壤中,长期施磷可造成磷积累,土壤磷库与土壤的供磷能力因此得到提高,在本研究结果中,TP 和 AP 均呈现随施磷量的增加而增加。从剖面图来看,小麦播种行之间(L10 与 R10 区域),S 处理比 T 处理速效磷质量分数高,因为五点取样法选点都是小麦播种行之间,所以 S 处理的 TP 与 AP 高于 T 处理。MBP 是指土壤中活体微生物细胞中各种化合物磷的总量,也被认为可以作为反映土壤磷肥力的指标^[32],是土壤中有有效磷的重要来源,可以持续缓慢地释放无机磷;与 TP、AP 呈极显著正相关,随着施磷量的增加而增加;T 处理 AP 低于 S 处理,但 MBP 高于 S 处理,因为低磷条件下,土壤微生物与植物存在一定的竞争关系,刺激微生物与植物根系活化土壤中的磷。HCl-P、Enzyme-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 均随施磷量的增加而增加,HCl-P 模拟氢质子活化的最大潜力磷库, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 模拟的是植物根系直接可以截获的磷,与土壤磷库与土壤的供磷能力都有关系,在结果中也显示为与 AP 和 TP 的趋势一致,都呈现 T 处理质量分数显著小于 S 处理,Enzyme-P 模拟的是被微生物矿化的有机磷^[33-34],与 TP、AP 和 MBP 呈显著正相关,也呈现 T 处理的质量分数显著大于 S 处理,原因与微生物磷一样,五点取样点均在小麦种植行间,微生物和根系在缺磷条件下分泌碱性磷酸酶活化有机磷,微生物介导土壤磷转化的各种生物地球化学过程,是土壤碳磷循环过程中的重要驱动者^[35]。Citrate-P 无此趋势(图 4),与前人^[28,36]研究结果一致,可能是因为 Citrate-P 模拟能够被有机酸活化释放的无机磷,而旱地土壤中以有机磷矿化为无机磷为主,Citrate-P 对旱地土壤磷库贡献较小,因此与 TP、AP 呈一定的负相关。Enzyme-P 与 Citrate-P 呈极显著负相关,与前人^[28]研究相同,Enzyme-P 在旱地中与 AP 呈正相关,Citrate-P 在稻田土中与 AP 呈正相关。除其他因素外,TP、MBP、HCl-P 和 Enzyme-P 均与小麦产量、

生物量及磷吸收量呈极显著相关(图 6),Enzyme-P 与 MBP 与土壤微生物、根系活动密切相关,可以作为一个与作物产量、生物量和磷吸收量极显著相关的磷生物有效性的有效指标。

4 结 论

施磷显著提高冬小麦产量、生物量和磷吸收量,且随施磷量增加显著增加。相较于撒施磷肥,条施磷肥土壤有效磷分布更加符合小麦根系生长需求,且可通过增加土壤 Enzyme-P 和 MBP 质量分数,提高旱作麦田土壤中磷的生物有效性,进一步增加小麦产量和磷肥利用率。

参考文献:

- [1] 李龙,毛新国,王景一,等.小麦抗旱性研究进展与展望[J].干旱地区农业研究,2023,41(3):11-20.
LI L, MAO X G, WANG J Y, et al. Progress and prospect of wheat research on drought resistance[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 11-20.
- [2] 马悦,田怡,牟文燕,等.北方麦区小麦产量与籽粒氮磷钾含量对监控施钾和土壤速效钾的响应[J].中国农业科学,2022,55(16):3155-3169.
MA Y, TIAN Y, MU W Y, et al. Response of wheat yield and grain nitrogen, phosphorus and potassium concentrations to test-integrated potassium application and soil available potassium in northern wheat production regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(16): 3155-3169.
- [3] 黄晓萌,刘晓燕,串丽敏,等.优化施肥下长江流域冬小麦产量及肥料增产效应[J].中国农业科学,2020,53(17):3541-3552.
HUANG X M, LIU X Y, CHUAN L M, et al. Effects of yield and fertilization on yield increase of winter wheat in Yangtze valley under optimized fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(17): 3541-3552.
- [4] 汤明尧,沈重阳,陈署晃,等.新疆小麦、玉米的产量和氮磷钾肥利用效率[J].中国农业科学,2022,55(14):2762-2774.
TANG M Y, SHEN C Y, CHEN S H, et al. Yield of wheat and maize and utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium in Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(14): 2762-2774.
- [5] 王箫璇,张敏,张鑫尧,等.不同磷肥对砂姜黑土和红壤磷库转化及冬小麦磷素吸收利用的影响[J].中国农业科学,2023,56(6):1113-1126.
WANG X X, ZHANG M, ZHANG X Y, et al. Effects of different varieties of phosphate fertilizer application on soil phosphorus transformation and phosphorus uptake and utilization of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(6): 1113-1126.

- [6] 孙洪仁,吴哲,玉柱,等.中国五大自然区域籽实和青贮玉米土壤有效磷丰缺指标与推荐施磷量[J].黑龙江畜牧兽医,2020(21):116-121.
SUN H R, WU Z, YU Z, et al. Study on abundance-deficiency index of soil available P and recommended phosphorus fertilizer application rates for grain and silage corn in five great natural regions of China[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2020(21): 116-121.
- [7] 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.
- [8] 娄梦玉,薛华龙,郭彬彬,等.施磷水平与冬小麦产量和土壤有效磷含量的关系[J].植物营养与肥料学报,2022,28(9):1582-1593.
LOU M Y, XUE H L, GUO B B, et al. Relationship of phosphorus application rate, winter wheat yield and soil available phosphorus content [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(9): 1582-1593.
- [9] HOPKINS B G, HANSEN N C. Phosphorus management in high-yield systems[J]. Journal of Environmental Quality, 2019, 48(5): 1265-1280.
- [10] 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.
- [11] 徐新朋,串丽敏,何萍,等.基于产量反应和农学效率的小麦智能化推荐施肥方法研究[J].植物营养与肥料学报,2023,29(7):1190-1201.
XU X P, CHUAN L M, HE P, et al. The study of intelligent fertilizer recommendation method for wheat based on yield response and agronomic efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(7): 1190-1201.
- [12] 寇心悅,桑丽智,沈玉芳.麦季不同施磷量对麦玉和麦豆轮作体系作物产量及磷效率的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):252-261.
KOU X Y, SANG L Z, SHEN Y F. Effects of different phosphorus application rates in wheat season on crop yield and phosphorus efficiency in wheat-maize and wheat-soybean rotation systems [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 252-261.
- [13] 刘小雨,杨豫,马琴,等.优化栽培与施磷措施对春玉米生育期生长及土壤性质的影响[J].华中农业大学学报(自然科学版),2022,41(2):80-87.
LIU X Y, YANG Y, MA Q, et al. Effects of optimized cultivation and phosphorus fertilization practices on spring maize growth and soil properties [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 41(2): 80-87.
- [14] BNEJDI F, GAZZAH M E. Epistasis and genotype-by-environment interaction of grain protein content in durum wheat [J]. Genetics and Molecular Biology, 2010, 33(1): 125-130.
- [15] 帕尔哈提·克依木,张少民,孙良斌,等.磷肥做种肥条施对棉花根系活力及产量的影响[J].中国农学通报,2015,31(9):158-161.
PA E H T K, ZHANG S M, SUN L B, et al. Banding phosphorus as seed manure enhances root activity and seed yield of cotton [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9): 158-161.
- [16] 冯国瑞,张新疆,王祥斌,等.滴灌玉米苗期根系形态对启动磷肥施用位置的响应[J].水土保持学报,2022,36(5):337-343.
FENG G R, ZHANG X J, WANG X B, et al. Response of drip-irrigated maize root morphology to the applied position of starter phosphate fertilizer at seedling stage [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 337-343.
- [17] MA Q H, ZHANG F S, RENGEL Z, et al. Localized application of NH_4^+ -N plus P at the seedling and later growth stages enhances nutrient uptake and maize yield by inducing lateral root proliferation [J]. Plant and Soil, 2013, 372(1): 65-80.
- [18] 王慧云,王珍,冉彦立,等.磷肥类型和滴灌带埋深对滴灌氮磷分布及玉米产量的影响[J].灌溉排水学报,2024,43(10):67-75.
WANG H Y, WANG Z, RAN Y L, et al. Combined effect of phosphate fertilizer types and dripline depth on distribution of nitrogen and phosphorus in soil and maize yield [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(10): 67-75.
- [19] 雷宏军,刘鑫,朱端卫.酸性土壤磷分级新方法建立与生物学评价[J].土壤学报,2007,44(5):860-866.
LEI H J, LIU X, ZHU D W. Development of a new phosphorus fractionation scheme in acid soils and biological evaluation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 860-866.
- [20] HEUCK C, WEIG A, SPOHN M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 85: 119-129.
- [21] SPOHN M, CARMINATI A, KUZYAKOV Y. Soil zymography: A novel in situ method for mapping distribu-

- tion of enzyme activity in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 275-280.
- [22] DELUCA T H, GLANVILLE H C, HARRIS M, et al. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 110-119.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] 张文伟, 李峰, 耿智广, 等. 氮磷配比和播种量对陇东旱地冬小麦的影响[J]. 甘肃农业科技, 2017, 48(6): 41-43.
- ZHANG W W, LI F, GENG Z G, et al. Effects of nitrogen and phosphorus ratio and sowing amount on winter wheat in Longdong dryland [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2017, 48(6): 41-43.
- [25] 薛华龙, 娄梦玉, 李雪, 等. 施磷水平对不同茬口下冬小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3712-3725.
- XUE H L, LOU M Y, LI X, et al. Effects of phosphorus application levels on growth and yield of winter wheat under different crops for rotation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3712-3725.
- [26] 王贺正, 张冬霞, 张静, 等. 秸秆还田配施磷肥对旱地小麦籽粒灌浆特性及磷素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 150-159.
- WANG H Z, ZHANG D X, ZHANG J, et al. Effects of straw returning and phosphorus fertilizer application on grain filling characteristics and phosphorus absorption and utilization of dryland wheat [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(10): 150-159.
- [27] 邢丹, 李淑文, 夏博, 等. 磷肥施用对冬小麦产量及土壤氮素利用的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 437-442.
- XING D, LI S W, XIA B, et al. Effects of phosphorus fertilization on yield of winter wheat and utilization of soil nitrogen [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 437-442.
- [28] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 等. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1606-1612.
- CAI G, HU Y J, WANG T T, et al. Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1606-1612.
- [29] 闫蓉, 朱利, 冉瑾怡, 等. 渭北旱地磷肥减施措施对冬小麦产量及磷吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(7): 1265-1279.
- YAN R, ZHU L, RAN J Y, et al. Effects of phosphorus reduction measures on winter wheat yield and phosphorus uptake and utilization in Weibei dryland [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2023, 29(7): 1265-1279.
- [30] DE OLIVEIRA L E Z, DE SOUZA NUNES R, DE FIGUEIREDO C C, et al. Spatial distribution of soil phosphorus fractions in a clayey Oxisol submitted to long-term phosphate fertilization strategies [J]. *Geoderma*, 2022, 418: e115847.
- [31] 耿玉辉, 曹国军, 叶青, 等. 磷肥不同施用方式对土壤速效磷及春玉米磷素吸收和产量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(4): 470-474.
- GENG Y H, CAO G J, YE Q, et al. Effects of different phosphorus applications on soil available phosphorus, phosphorus absorption and yield of spring maize [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2013, 34(4): 470-474.
- [32] PENG Y, DUAN Y S, HUO W G, et al. Soil microbial biomass phosphorus can serve as an index to reflect soil phosphorus fertility [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(5): 657-669.
- [33] 刘玉槐, 魏晓梦, 魏亮, 等. 水稻根际和非根际土磷酸酶活性对碳、磷添加的响应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9): 1653-1663.
- LIU Y H, WEI X M, WEI L, et al. Responses of extracellular enzymes to carbon and phosphorus additions in rice rhizosphere and bulk soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9): 1653-1663.
- [34] 龚梦瑶, 李巧云, 陈安磊, 等. 长期弃耕降低红壤稻田土壤磷库[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(8): 1398-1408.
- GONG M Y, LI Q Y, CHEN A L, et al. Long-term abandonment of reddish paddy fields decreases soil phosphorus pool [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8): 1398-1408.
- [35] WEI X M, ZHU Z K, WEI L, et al. Biogeochemical cycles of key elements in the paddy-rice rhizosphere: Microbial mechanisms and coupling processes [J]. *Rhizosphere*, 2019, 10: e100145.
- [36] SAIYA-CORK K R, SINSABAUGH R L, ZAK D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.