

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.016; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.016.

董海霞, 胡捧娟, 范浩博, 等. 石灰性¹土夏玉米—冬小麦作物体系硫铵替代减磷增效研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 235-242.

Dong Haixia, Hu Pengjuan, Fan Haobo, et al. Study on phosphorus reduction and efficiency increase of ammonium sulfate substitution measure under summer maize-winter wheat cropping system on calcareous eum-orthic anthrosols[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 235-242.

石灰性¹土夏玉米—冬小麦作物体系 硫铵替代减磷增效研究

董海霞¹, 胡捧娟¹, 范浩博¹, 赵 云¹,
高明霞², 杨学云¹, 冯 浩^{2,3}, 孙本华^{1,3}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院/农业农村部西北旱地农业绿色低碳重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3.西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:[目的]研究石灰性土壤上磷肥减施结合硫铵替代尿素措施的效果,为夏玉米—冬小麦体系合理施用磷肥和维持作物高产提供依据。[方法]在陕西关中设置 3 年田间定位试验,实施夏玉米—冬小麦轮作模式,共含有对照(CK,不施磷肥)、常规施磷(CP,年施磷量 180 kg P₂O₅/hm²,撒施)、减施磷肥(RP,年施磷量 134 kg P₂O₅/hm²,条施)、减磷结合硫铵替代尿素(RPSA,施磷量与 RP 相同,条施)4 个处理。作物收获期采集植物和土壤样品,测定玉米和小麦产量、磷肥效率、pH 及土壤磷水平。小麦拔节期测定根系形态、菌根侵染率等指标。[结果]与 CK 相比,施磷处理(CP,RP 和 RPSA)的玉米和小麦籽粒产量均显著提高,增幅分别为 17.3%~24.8%和 5.1%~19.0%;土壤有效磷(Olsen-P)和微生物量磷(MBP)显著提高;除 RP 外,施磷处理的土壤 pH 均显著降低。施磷处理间,2018—2019 年度 RP 较 CP 产量显著降低 14.6%,磷回收率和偏生产力显著提高。RPSA 较 RP 土壤 pH 显著降低,有效磷、微生物量磷含量和根系形态及菌根侵染率均显著提高。土壤 pH 与土壤磷水平、小麦根系形态指标和产量均呈显著负相关。RDA 结果表明:土壤 pH 是影响小麦菌根侵染率、根系形态和产量的最重要环境因子。[结论]磷肥减施结合硫铵替代尿素调控措施可以降低石灰性土壤 pH,提高土壤有效磷和微生物量磷含量,促进小麦根系生长并提高菌根侵染率,是石灰性¹土夏玉米—冬小麦体系有效的磷肥减施增效措施。

关键词:硫铵替代尿素; 减磷增效; 根系形态; 菌根侵染率

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)01-0235-08

Study on phosphorus reduction and efficiency increase of ammonium sulfate substitution measure under summer maize-winter wheat cropping system on calcareous eum-orthic anthrosols

Dong Haixia¹, Hu Pengjuan¹, Fan Haobo¹, Zhao Yun¹,
Gao Mingxia², Yang Xueyun¹, Feng Hao^{2,3}, Sun Benhua^{1,3}

(1.College of Natural Resources and Environment/Key Laboratory of Green and Low Carbon
Agriculture on Dryland in Northwest China, ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northwest A&F
University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Soil and Water Conservation Science and
Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Water-Saving
Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the effect of phosphorus fertilizer reduction

收稿日期:2024-01-31

修回日期:2024-03-01

资助项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1900300);国家重点研发计划课题(2017YFD0200205);大唐集团农光互补项目农业板块科技研究(DTDL-XNY-2023-025)

第一作者:董海霞(1998—),女,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为土壤化学。E-mail:2605035270@qq.com

通信作者:孙本华(1972—),男,江苏淮安人,博士,教授,主要从事土壤化学和土壤生态方面的研究。E-mail:sunbenhua@nwafu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

combined with ammonium sulfate substitution of urea measure, and provide the basis for rational application of phosphorus fertilizer to maintain high crop yields under summer maize-winter wheat cropping system on calcareous Eum-Orthic Anthrosols. [Methods] A 3-year field experiment was set up under summer maize-winter wheat cropping pattern in the field with calcareous Eum-Orthic Anthrosols in Guanzhong, Shaanxi Province. The four treatments were included: control (CK, no P fertilizer applied), conventional phosphorus application (CP, annual P application rate of 180 kg P_2O_5 /hm², spreading), reduced phosphorus fertilizer (RP, annual P application rate of 134 kg P_2O_5 /hm², strip-localized application), and reduced phosphorus fertilizer combined with substitution of ammonium sulphate for urea (RPSA, the P application rate was the same as that of RP, strip-localized application). Crop and soil samples were collected to determine yields, phosphorus fertilizer efficiency and soil phosphorus levels at harvest stage. The root morphology and mycorrhizal infection rate of wheat were measured at the jointing stage. [Results] Compared with CK, the grain yields of maize and wheat were significantly increased in all phosphorus application treatments (CP, RP and RPSA) by 17.3%~24.8% and 5.1%~19.0%, respectively. The soil pH was significantly reduced for all treatments applied phosphorus except for RP. In all phosphorus application treatments, compared with CP, crop yield of RP decreased significantly by 14.6% in 2018—2019, whereas the phosphorus recovery rate and partial productivity increased. Compared with RP, RPSA significantly reduced soil pH, increased soil available phosphorus (Olsen-P) and microbial biomass phosphorus (MBP) content, and increased the densities of root length, root surface area, root volume, root dry weight, and mycorrhizal infection rate of wheat root. The Pearson correlation analysis showed that there was significant negative correlation between soil pH and phosphorus level, root morphology and yield. The results of RDA showed that soil pH was the most important environmental factor affecting the mycorrhizal infection rate, root morphology and yield of wheat. [Conclusion] The phosphate fertilizer reduction combined with ammonium sulfate instead of urea can reduce the pH of calcareous soil, increase the content of available phosphorus, microbial biomass P, the growth of wheat roots and the mycorrhizal infection rate, which is an effective regulating measure to reduce phosphorus fertilizer application amount and to increase the P efficiency under summer maize-winter wheat cropping pattern on calcareous Eum-Orthic Anthrosols.

Keywords: ammonium sulphate substitution; phosphorus reduction and efficiency improvement; root morphology; mycorrhizal infection rate

磷是作物生长发育所必需的营养元素之一,施磷能够改善土壤磷营养状况,维持并提高作物的产量和品质。自 20 世纪 70 年代以来,中国农田大量施用磷肥,成为世界施磷大国,农业作物生产力显著提高^[1-2]。有研究表明,近 30 多年来由于过量施磷农田土壤 Olsen-P 从 8.3 mg/kg 增长到 30 mg/kg,增长了将近 4 倍^[3],但磷肥利用率并未明显提高。过高的土壤磷水平不仅会阻碍作物对铜和锌等微量营养元素的吸收,影响人类食物和动物饲料,而且可提高磷流失的潜在风险,导致地表水富营养化^[4-5]。

小麦和玉米是重要的粮食作物,一年两熟的玉米—小麦轮作制度是全球常见的粮食种植制度,有效提高玉米—小麦的产量是保障我国粮食安全的重要途径。由于多年连续种植和施磷量的不断增加,大量磷素不断在土壤中积累,导致土壤磷水平大幅提高^[6],这也是磷肥利用率较低的重要原因。并且,我

国正面临优质磷矿资源的枯竭以及磷肥过度施用造成的严重环境污染风险,因此有效利用土壤累积态磷,提高磷利用率^[7],实现磷肥减施增效迫在眉睫。这不仅可以节约生产成本和磷矿资源,也有利于实现我国农业的可持续发展。

根系是作物吸收养分的重要部位,根系形态特征影响农作物对磷的吸收和利用,作物在生长过程中会通过根长密度、根毛数量等形态变化提高磷素的吸收效率。Fernandes 等^[8]研究表明,低磷状态下作物根长、根表面积、磷素吸收面积均增加,进而促进根系对土壤中磷素的吸收,提高磷肥利用率。AM 真菌可侵染根系与植物共生形成菌根,扩大植物吸收磷的表面积和接触的土体体积,促进对磷素的吸收,并且菌根真菌可以活化部分难溶性无机磷,进而提高土壤中磷有效性和磷素利用率^[9]。

硫铵是一种生理酸性肥料,施用硫铵可以诱导根

系释放质子影响钙质土壤阳离子/阴离子吸收比,引起根际酸化,提高磷的有效性和增加微量营养元素的溶解度。此外,硫铵与磷配施显著提高作物苗期根系生物量、根长和侧根增殖,极大地促进养分吸收和生物量积累,从而提高籽粒产量。与磷肥和尿素配施相比,用硫铵替代尿素可显著提高籽粒产量和含磷量,玉米籽粒产量提高了 $9.7\% \sim 12.5\%$ [10-11]。同时,低根际 pH 值能够调节根细胞增殖和细胞壁力学特性,激活外壁松动和加速细胞分裂,利于根细胞增殖和延伸以及菌根真菌对作物根系的侵染,利于磷肥利用率和作物产量的增加 [12]。

本试验以关中地区夏玉米—冬小麦轮作体系为研究对象,探究磷肥减施结合硫铵替代调控措施下作

物产量、磷效率、根系形态和菌根侵染率及土壤磷水平的变化情况,旨在为石灰性土壤条件下夏玉米—冬小麦作物体系磷肥合理施用和作物高产维持提供理论和实践支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验场所为陕西咸阳武功县 ($108^{\circ}20' \text{ E}$, $34^{\circ}27' \text{ N}$),地处关中平原,为暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 12.9°C ,年均降雨量为 633.7 mm ,年均蒸发量为 1068 mm ,降雨主要集中于 6—8 月份,无霜期 315 d。土壤为 L 土(土垫旱耕人为土),表层 (0—20 cm)土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soil tested

pH	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	铵态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
8.24	17.4	0.76	13.8	3.2	0.86	33.3	148.7

1.2 试验方案

试验于 2017 年 6 月开始,在夏玉米—冬小麦作物体系下连续进行了 3 a。本研究共涉及 4 个处理,分别为对照(CK):不施磷肥;常规施磷(CP):按照农户常规施磷,每年 $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$,均匀撒施(氮肥磷肥均匀撒施后翻耕入土);磷肥减施(RP):每年 $134 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$ (约为常规施磷的 74%),条施(氮肥磷肥均于行间开沟条施);硫铵替代调控措施(RPSA):施磷量与 RP 相同,氮肥用硫铵替代尿素,条施。每个处理 3 次重复,完全随机排列,小区面积 31.5 m^2 。夏玉米的氮肥施用量为 $187.5 \text{ kg N}/\text{hm}^2$,冬小麦的氮肥施用量为 $165 \text{ kg N}/\text{hm}^2$;磷肥分配按照“冬重夏轻”的原则,1/3 用于夏玉米,2/3 用于冬小麦。CK, CP, RP 处理的氮肥为尿素,RPSA 处理施用硫铵;磷肥为过磷酸钙;由于当地土壤速效钾含量较高,不施钾肥。肥料在播种时施入,玉米品种为“郑丹 958”,种植密度为 $68\ 580 \text{ 株}/\text{hm}^2$;小麦品种为“西农 20”,播种量为 $165 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。其他灌溉、除草等田间管理措施均与当地农民保持一致。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土样采集与测定 作物收获后采集土样,部分储存于 4°C 的冰箱用于微生物量磷(MBP)的测定,部分风干用于土壤有效磷(Olsen-P)、水溶态磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)的测定。土壤微生物量磷采用氯仿熏蒸—碳酸氢钠溶液浸提,土壤有效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液浸提,土壤水溶性磷采用 0.01 mol/L 氯化钙溶液浸提后通过钼锑抗分光光度法测定 [13]。

1.3.2 植物样采集与测定 玉米和小麦于成熟时人工进行收获计产,同时采集籽粒和秸秆样品用于后续分析。采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,流动分析仪测定籽粒和秸秆含磷量 [13]。

于 2020 年 4 月 20 日在小麦拔节期采集根系,进行根系形态指标和菌根侵染率的测定。根系采样方法:避开收获区和边行,选取一行长势均匀的小麦,用根钻在行上和行间分别取两钻 0—10 cm 和 10—20 cm 的土层样品,混匀后装袋带回实验室,将根系用清水洗净后用 WinRHIZO 根系扫描系统(Regent Instruments Inc.,加拿大)扫描并分析,采用 KOH-曲利苯蓝染色的方法测定菌根侵染率 [14]。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010,SPSS 20.0 进行数据计算和显著性差异分析,使用 Canoco 5 软件进行冗余分析并使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 作物产量

不同年份和不同处理下玉米籽粒产量存在显著差异(图 1)。2017 年,RP 显著高于 CK ($p < 0.05$),其余处理与两者无显著差异。2018 年,CP 和 RPSA 以及 CK 和 RP 之间差异不显著,但 CP 和 RPSA 显著高于 CK 和 RP ($p < 0.05$)。2019 年,CP 和 RP 显著高于 CK ($p < 0.05$),RPSA 与其他处理无显著差异。

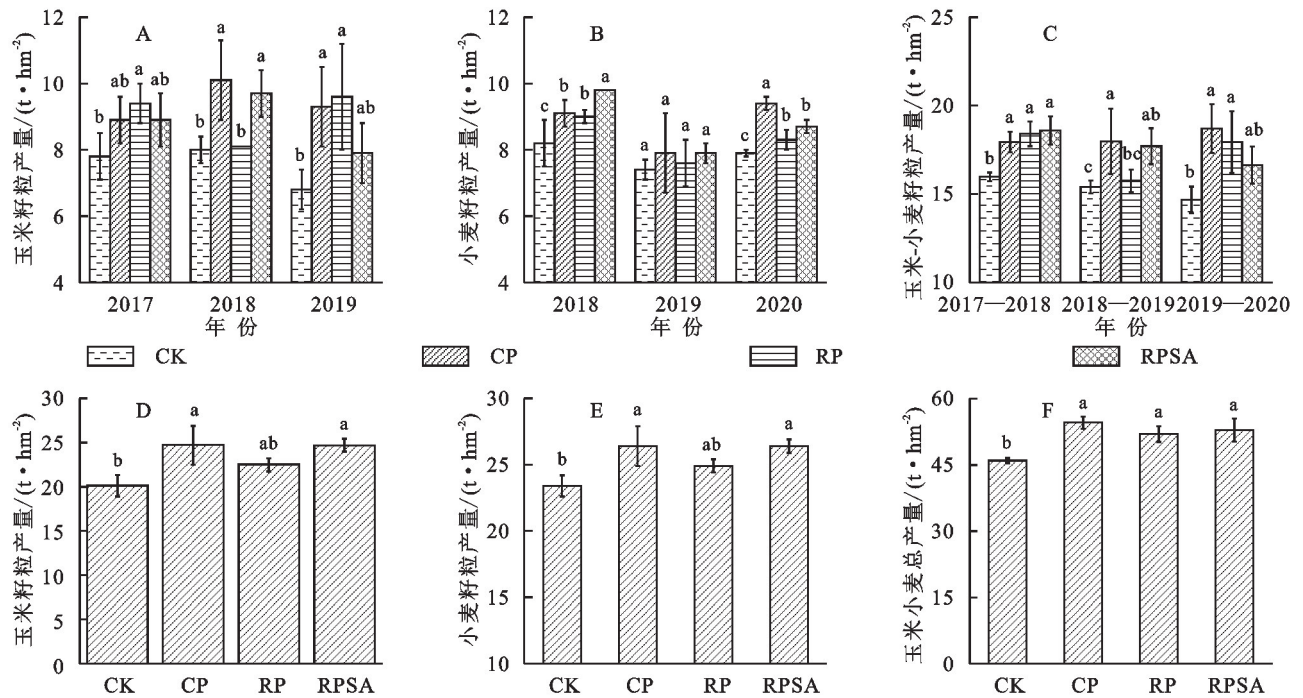
不同年份和不同处理下小麦籽粒产量同样存在显著差异。2018 年,RPSA 最高,显著高于 CP 和

RP,显著高于CK($p<0.05$)。2019年,所有处理间无显著差异。2020年,CP处理显著高于RP和RPSA,显著高于CK($p<0.05$)。

不同年度和不同处理下作物体系(玉米+小麦)的籽粒产量也存在一定差异。2017—2018年,CK最低(15.96 t/hm^2),显著低于所有施磷处理($p<0.05$),而施磷处理间无显著差异。2018—2019年,CK最低(16.0 t/hm^2),显著低于除RP处理以外的施磷处理($p<0.05$);施磷处理中,CP显著高于RP

处理($p<0.05$),而RPSA与两者差异不显著。2019—2020年,CK最低(14.7 t/hm^2),显著低于除RPSA处理以外的施磷处理($p<0.05$);各施磷处理间无显著差异。

3年的玉米籽粒总产量和3年的小麦籽粒总产量各处理的表现一致,均为CK最低,显著低于除RP处理以外的施磷处理($p<0.05$);各施磷处理间没有显著差异。3年的作物(玉米+小麦)籽粒总产量,施磷处理均显著高于CK处理,而施磷处理间无显著差异。



注:图内不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著($p<0.05$)。

图1 不同处理下作物籽粒产量

Fig. 1 C rop grain yields under different treatments

2.2 磷效率

磷回收率,减磷处理(RP和RPSA)之间差异不显著,但均显著高于常规施磷(CP),RPSA和RP分别较CP提高了32.3%和30.7%($p<0.05$)。磷肥偏生产力,减磷处理(RP和RPSA)之间差异不显著,但均显著高于常规施磷(CP),RP和RPSA处理分别较CP提高了28.2%和30.3%($p<0.05$)。磷肥农学效率及磷表观利用率,均表现为硫铵替代处理(RPSA)最高,但施磷处理间差异不显著(表2)。

表2 不同施磷处理的磷效率

Table 2 Phosphorus efficiency of different phosphorus application treatments

处理	磷表观 利用率/%	磷回 收率/%	磷肥农学效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	磷肥偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CP	21.9±2.6a	94.5±2.5b	15.9±2.6a	101.1±2.6b
RP	25.8±6.7a	123.5±6.7a	15.0±4.4a	129.6±4.4a
RPSA	27.3±3.4a	125.0±3.3a	17.1±6.5a	131.7±6.5a

2.3 土壤 pH、磷含量和磷平衡

不同处理的土壤 pH 存在明显差异(表3)。除RP外,施磷显著降低了土壤 pH($p<0.05$)。施磷处理中,减磷结合硫铵替代措施 RPSA 的土壤 pH 最低,且显著低于 CP 和 RP 处理($p<0.05$),而 CP 和 RP 差异不显著。

不同处理的土壤有效磷含量存在明显差异(表3)。与CK相比,施磷后显著提高了22.9%~51.7%($p<0.05$)。施磷处理中,CP和RPSA的有效磷含量显著高于RP。

不同处理的土壤微生物量磷含量存在明显差异(表3)。施磷显著提高了土壤 MBP 含量,与CK相比提高了55.1%~140.8%($p<0.05$)。施磷处理中,RPSA显著高于RP($p<0.05$),而CP与两者没有显著差异。所有处理的土壤水溶态磷含量没有显著差异。

不同处理的土壤表观磷平衡存在明显差异(表

3),其中 CP 表现为磷盈余,其余处理表现为磷亏缺。减施处理($p<0.05$),而磷肥减施的 RPSA 和 RP 差异不显著。

表 3 不同处理的土壤 pH、磷含量和表观磷平衡

Table 3 Soil pH, phosphorus contents and apparent phosphorus balance under different treatments

处理	pH	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	微生物量磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水溶性磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	表观磷平衡/ ($\text{kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	8.26a	20.5c	5.0c	0.18a	-171.3c
CP	8.19b	29.4a	9.5ab	0.23a	12.9a
RP	8.23ab	25.2b	7.6b	0.20a	-41.2b
RPSA	8.01c	31.1a	11.8a	0.20a	-43.9b

2.4 作物根系和菌根侵染率

表层土壤(0—20 cm)小麦根系的相关指标和菌根侵染率的结果(表 4),根长密度(RLD)、根表面积密度(RSAD)、根体积密度(RVD)和根干重密度

(RDWD)均表现为 $\text{RPSA} > \text{RP} > \text{CK}$ ($p < 0.05$)。CK 和 RP 的小麦根系菌根侵染率(MIR)没有显著差异,但均显著低于 RPSA($p < 0.05$)。

表 4 不同处理的小麦根系指标和菌根侵染率

Table 4 Wheat root indexes and mycorrhizal infestation rate in different treatments

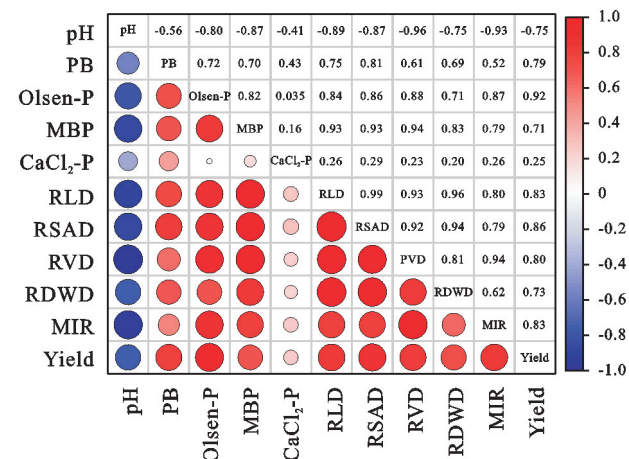
处理	根长密度/ ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)	根表面积密度/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$)	根体积密度/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	根干重密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	菌根 侵染率/%
CK	3.60c	0.64c	0.008c	232.43c	20.6b
RP	4.21b	0.80b	0.011b	253.87b	21.9b
RPSA	5.07a	0.96a	0.023a	277.33a	34.2a

2.5 土壤磷水平、根系、菌根和产量之间的相互关系

对 2020 年小麦季各指标之间进行了 Pearson 相关分析(图 2)。结果表明,土壤 pH 与根体积密度、菌根侵染率呈极显著负相关($p < 0.001$),与微生物量磷、根长密度和根表面积密度极显著负相关关系($p < 0.01$),与有效磷、根干重密度和作物产量显著负相关($p < 0.05$)。有效磷与作物产量,微生物量磷与根长、根表面积、根体积密度,根长密度与根表面积、根体积和根干重密度,根表面积密度与根体积和根干重密度,根体积与菌根侵染率呈极显著正相关($p < 0.001$)。土壤磷平衡与根表面积密度,有效磷与微生物量磷、根长、根表面积、根体积密度和菌根侵染率,微生物量磷与根干重密度,根长密度与菌根侵染率,根体积与根干重密度,作物产量与根长、根表面积、根体积密度和菌根侵染率,呈极显著正相关($p < 0.01$)。土壤磷平衡与有效磷、微生物量磷、根长、根干重密度和作物产量,有效磷与根干重密度,菌根侵染率与微生物量磷和根表面积密度,作物产量与微生物量磷和根干重密度,呈显著正相关($p < 0.05$)。其余各指标间的相关性不显著。

以土壤 pH 和磷水平(Olsen-P 和 MBP)为解释变量,根系形态(RLD, RSAD 和 RVD)、菌根侵染率和产量为响应变量进行了冗余分析(图 3),通过小麦产量、根系形态和菌根侵染率可以很好地将 3 个处理区分开来,RDA1 和 RDA2 分别解释了 87.12% 和

3.38%。环境因子土壤 pH, Olsen-P 和 MBP 分别解释了 79.3%($p = 0.004$),9.1%($p = 0.022$)和 3.5%($p = 0.12$),表明土壤 pH 和有效磷是影响小麦产量、根系形态和菌根侵染率的主要因子。土壤 pH 与 Olsen-P 和 MBP 负相关,与产量和根系形态指标负相关;菌根侵染率与根系形态指标(RLD, RSAD 和 RVD)和产量正相关;根系形态指标与产量正相关。



注:pH 为土壤酸碱度;PB 为磷平衡;Olsen-P 为土壤有效磷;MBP 为土壤微生物量磷;CaCl₂-P 为土壤水溶性磷;RLD 为根长密度;RSAD 为根表面积密度;RVD 为根体积密度;RDWD 为根干重密度;MIR 为菌根侵染率;Yield 为作物产量。

图 2 土壤 pH、磷水平、根系、菌根及产量之间的相互关系

Fig. 2 Correlation between pH, phosphorus level, root system, mycorrhiza and yield

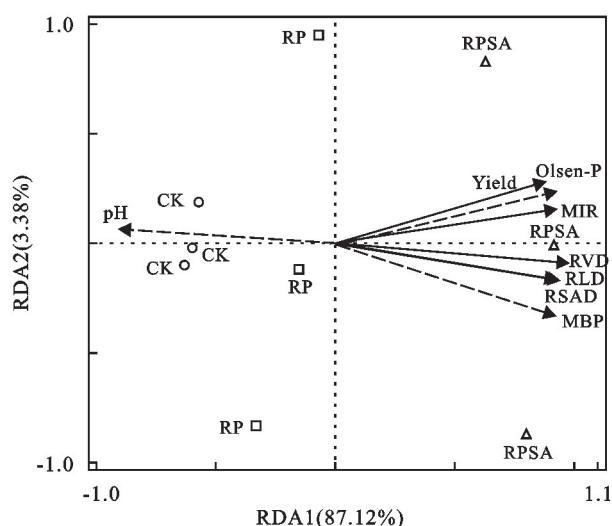


图 3 土壤 pH、磷水平、根系形态、菌根和产量的 RDA 分析

Fig. 3 Redundancy analysis between pH, phosphorus level, root system, mycorrhiza and yield

3 讨论

玉米—小麦作物体系是中国北方常见的种植模式,当前我国农户陷入施磷即可获得高产的误区之中,使得农田中累积了大量作物难以吸收的磷素,不利于作物生长和磷效率的提高^[15]。本研究,不施磷处理的作物产量显著低于各施磷处理,且随着年限的延长,这种减产的趋势也愈加显著,同时土壤磷表观平衡也表现为严重亏缺,显著降低土壤磷水平(Olsen-P 和 MBP)。这与 Ron 等^[16]研究结果一致,表明即使土壤磷水平较高,当季作物种植时不施磷依旧有减产风险。可见,在土壤磷含量相对较高的情况下,为了维持土壤磷平衡和作物高产,仍需要合理施用磷肥^[17]。此外,不施磷的土壤磷存在耗竭情况,长期来看不利于土壤磷素水平的维持。

传统施肥 CP $[180 \text{ kg P}_2\text{O}_5/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 能够获得较高产量,但磷效率相对较低,且存在磷盈余,会进一步加剧土壤磷的累积,远超作物所需^[18],这不仅会造成磷矿资源的浪费,同时会增加土壤磷的淋溶风险。有研究显示,当土壤磷素相对较高时,作物产量并不会因适量减磷显著下降^[19]。本研究结果,减施磷肥并采用条施方式(RP),尽管可以显著提高磷回收率和偏生产力,但消耗了土壤部分有效磷且部分年份会减产,同时导致土壤磷亏缺。由此,单纯减磷而不采取其他调控措施不利于维持高产,不宜采用。

崔磊^[20]和马琴^[21]等研究表明,硫铵调控措施降低土壤 pH,酸化根际土,加速根系发育,增强捕获土壤养分的能力进而提高产量。本研究中 RPSA 处理的土壤 pH 显著降低,RPSA 相比 CK, CP 和 RP 分别降低了 0.25, 0.18, 0.22 个 pH 单位,这与上述研究相同。同时与 CP 相比,除 2020 年小麦产量显著降低外,其余没有显著

差异,同样能够维持相对较高的产量,而磷回收率和偏生产力均有显著提高。相对于 RP, RPSA 的 Olsen-P 和 MBP 含量显著增加,部分年份作物产量有一定提升,虽然土壤磷仍旧处于亏缺状态,但其能够消耗部分长久累积于土壤中的磷素,降低淋溶风险,是一种高效的磷肥减施增效调控措施。然而持续消耗土壤磷素,土壤有效磷含量可能会不断降低^[22],不利于持续性发展,因此需要定期监测土壤磷含量并适时改善施磷方法,以便将土壤磷水平控制在合适的范围。

菌根是菌根真菌与植物根系形成的共生体。作物根系被菌根真菌侵染后,能够到达根系无法接触的土壤孔隙,活化难溶性无机磷,进而增加了植株对磷的吸收^[23]。有研究表明,土壤有效磷含量较低(磷的限制)会导致植物与 AMF 之间互利共生加强,从而提高菌根侵染率^[24];张淑彬等^[25]研究表明,当土壤磷含量较高时,AMF 感染寄主植物的能力受到限制。本研究结果,土壤有效磷与菌根侵染率显著正相关,表明土壤有效磷越高,小麦根系的菌根侵染率越大,与上述结果相反,可能是因为本研究采用了硫铵替代调控措施,通过转化过程产生的酸化作用降低土壤 pH 从而活化了土壤养分(包括磷)提高了土壤有效磷含量,同时石灰性土壤 pH 的下降也可能促进了土壤微生物包括菌根真菌的活动,从而提高了菌根侵染率^[26]。

有研究表明,磷肥进入土壤后,土壤有效磷含量提高,同时促进微生物对磷的吸收,微生物量磷含量也明显提高^[27],本研究结果有效磷和微生物量磷之间显著正相关,与其相一致。土壤有效磷与产量呈极显著正相关关系,这与 Yu 等^[22]研究结果一致。根长、根表面积、根体积和根干重密度等根系形态指标均与产量呈显著正相关,这与程文龙等^[28]研究结果根长密度对作物产量有显著的正影响相一致。RDA 结果表明,土壤 pH 是影响根系形态及产量的最主要因素,且为负向影响,同时土壤 pH 与土壤有效磷和微生物量磷负相关,表明随着土壤 pH 下降,土壤有效磷和微生物量磷显著提升,促进土壤磷的周转,直接影响土壤作物的根长、根表面积和根体积密度^[29]。菌根侵染率与小麦根系形态指标及产量均显著正相关,根系形态指标均与产量正相关,表明菌根侵染率提高有助于改善小麦根系形态,而改善根系形态可提高小麦产量。

可见,磷肥减施结合硫铵替代尿素调控措施可以降低石灰性土壤 pH,提高土壤有效磷含量和加速磷的周转,进一步通过提高菌根侵染率和改善作物根系特性,最终提高作物产量和磷效率。

4 结论

夏玉米—冬小麦作物体系下,常规施磷基础上减磷并改为条施后,磷效率显著提高,但有减产风险,不宜直

接采用。磷肥减施结合硫铵替代尿素调控措施,通过降低石灰性土壤 pH 提高了土壤有效磷含量和加速磷的周转,改善作物根系特性和提高菌根侵染率,从而保持作物高产和提高磷效率,是一种有效的磷肥减施增效措施,但可能会引起土壤磷亏缺,需定期对土壤磷素水平进行监测,以便及时调整施磷策略。

参考文献(References):

- [1] Thornton M K, Novy R G, Stark J C. Improving phosphorus use efficiency in the future[J]. American Journal of Potato Research, 2014,91(2):175-179.
- [2] Li G H, van Ittersum M K, Leffelaar P A, et al. A multi-level analysis of China's phosphorus flows to identify options for improved management in agriculture[J]. Agricultural Systems, 2016,144:87-100.
- [3] 李佳琪,孙凤霞,孙楠,等.黑土累积磷的释放动力学特征及主要影响因素[J].植物营养与肥料学报,2023,29(2):253-263.
Li J Q, Sun F X, Sun N, et al. Release kinetics characteristics and the main drivers of phosphorous accumulated in black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,29(2):253-263.
- [4] Wu Q H, Zhang S X, Feng G, et al. Determining the optimum range of soil Olsen P for high P use efficiency, crop yield, and soil fertility in three typical cropland soils[J]. Pedosphere, 2020,30(6):832-843.
- [5] van Wesenbeeck C F A, Keyzer M A, van Veen W C M, et al. Can China's overuse of fertilizer be reduced without threatening food security and farm incomes[J]. Agricultural Systems, 2021,190:103093.
- [6] 席雪琴,孙本华,陈勇,等.壤土区作物和土壤淋溶磷临界值研究及推荐施磷建议[J].中国土壤与肥料,2015(6):34-40.
Xi X Q, Sun B H, Chen Y, et al. Research of phosphorus critical value for crop yield and soil leaching, and phosphorus fertilizer recommendation on an anthropogenic Loess soil area[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(6):34-40.
- [7] Wang F, Sims J T, Ma L, et al. The phosphorus footprint of China's food chain: implications for food security, natural resource management, and environmental quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2011,40(4):1081-1089.
- [8] Fernandes A M, Soratto R P, Gonsales J R. Root morphology and phosphorus uptake by potato cultivars grown under deficient and sufficient phosphorus supply[J]. Scientia Horticulturae, 2014,180:190-198.
- [9] Minemba D, Gleeson D B, Veneklaas E, et al. Variation in morphological and physiological root traits and organic acid exudation of three sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivars under seven phosphorus levels[J]. Scientia Horticulturae, 2019,256:108572.
- [10] 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.
- [11] Ma Q H, Wang X, Li H B, et al. Localized application of NH_4^+ -N plus P enhances zinc and iron accumulation in maize via modifying root traits and rhizosphere processes[J]. Field Crops Research, 2014,164:107-116.
- [12] Jing J, Rui Y, Zhang F, et al. Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification[J]. Field Crops Research, 2010,119(2/3):355-364.
- [13] 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 Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] 盛萍萍,刘润进,李敏.丛枝菌根观察与侵染率测定方法的比较[J].菌物学报,2011,30(4):519-525.
Sheng P P, Liu R J, Li M. Methodological comparison of observation and colonization measurement of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Mycosystema, 2011,30(4):519-525.
- [15] 陈露,王秀斌,朱瑞利,等.长江中下游小麦产量、土壤酶活性及微生物群落结构对磷肥减施的响应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):392-402.
Chen L, Wang X B, Zhu R L, et al. Response of wheat yield and soil microbial activity to phosphorus fertilizer reduction in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021,27(3):392-402.
- [16] Ron M M, Loewy T. Effect of phosphorus placement on wheat yield and quality in Southwestern Buenos Aires(*Argentina*)[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000,31(17/18):2891-2900.
- [17] Xu M Z, Wang Y H, Nie C E, et al. Identifying the critical phosphorus balance for optimizing phosphorus input and regulating soil phosphorus effectiveness in a typical winter wheat-summer maize rotation system in North China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023,22(12):3769-3782.
- [18] Singh J, Brar B S, Sekhon B S, et al. Impact of long-term phosphorous fertilization on Olsen-P and grain yields in maize-wheat cropping sequence[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016,106(2):157-168.
- [19] Singh J, Brar B S. Build-up and utilization of phosphorus with continues fertilization in maize-wheat cropping sequence[J]. Field Crops Research, 2022,276:108389.
- [20] 崔磊,马腾飞,哈丽哈什·依巴提,等.滴施酸化剂种类及用量对棉花生长的影响[J].新疆农业科学,2023,60

- (1):25-31.
- Cui L, Ma T F, Halilhashi • Yibati, et al. Effects of acidifier types and dosage on cotton growth[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023,60(1):25-31.
- [21] 马琴,刘小雨,冉瑾怡,等.磷肥减量结合硫酸铵配施提高西北地区旱地春玉米磷素利用效率[J].植物营养与肥料学报,2020,26(6):1047-1058.
- Ma Q, Liu X Y, Ran J Y, et al. Improving phosphorus use efficiency of spring maize by reducing phosphate fertilizer rate and replacing urea with ammonium sulfate in dryland of Northwest China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020,26(6):1047-1058.
- [22] Yu X J, Chen Q, Shi W C, et al. Interactions between phosphorus availability and microbes in a wheat-maize double cropping system: a reduced fertilization scheme [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022,21(3): 840-854.
- [23] White P J, Hammond J. The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions[M]. Dordrecht: Springer, 2008.
- [24] Vázquez E, Benito M, Espejo R, et al. No-tillage and liming increase the root mycorrhizal colonization, plant biomass and N content of a mixed oat and vetch crop [J]. Soil and Tillage Research, 2020,200:104623.
- [25] 张淑彬,王幼珊,殷晓芳,等.不同施磷水平下 AM 真菌发育及其对玉米氮磷吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):649-657.
- Zhang S B, Wang Y S, Yin X F, et al. Development of arbuscular mycorrhizal(AM) fungi and their influences on the absorption of N and P of maize at different soil phosphorus application levels [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017,23(3):649-657.
- [26] Ikoyi I, Fowler A, Storey S, et al. Sulfate fertilization supports growth of ryegrass in soil columns but changes microbial community structures and reduces abundances of nematodes and arbuscular mycorrhiza [J]. Science of the Total Environment, 2020,704:135315.
- [27] Huo W G, Chai X F, Wang X H, et al. Indigenous arbuscular mycorrhizal fungi play a role in phosphorus depletion in organic manure amended high fertility soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022,21(10): 3051-3066.
- [28] 程文龙,李敏,王慧,等.深耕配合施用有机肥提高 15—30 cm 土层小麦根长密度[J].植物营养与肥料学报, 2023,29(7):1280-1289.
- Cheng W L, Li M, Wang H, et al. Deep tillage combined with organic fertilizer improves the root length density of wheat in 15—30 cm soil layer[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,29(7):1280-1289.
- [29] Lyu Y, Tang H L, Li H G, et al. Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply[J]. Frontiers in Plant Science, 2016,7:1939.

~~~~~

(上接第 234 页)

- [19] 张世参,骆亚生,田堪良,等.风积沙的微生物固化试验研究[J].人民黄河,2021,43(10):144-149,160.
- Zhang S C, Luo Y S, Tian K L, et al. Experimental study on microbial solidification of aeolian sand [J]. Yellow River, 2021,43(10):144-149,160.
- [20] Abo-El-Enein S A, Ali A H, Talkhan F N, et al. Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation[J]. Hbrc Journal, 2012,8(3):185-192.
- [21] 程瑶佳,唐朝生,泮晓华,等.微生物矿化作用(MICP)-铺砂联合提高黄土抗侵蚀性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):1010-1018.
- Cheng Y J, Tang C S, Pan X H, et al. Experimental study on erosion resistance improvement in loess through coupled microbial mineralization(MICP)-sand paving[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022,42(5):1010-1018.
- [22] 刘诗雅,刘家庆,周成,等.边坡植被恢复中 MICP 表层矿化格构填土的水土保持模型试验[J].岩土工程学报,2022,44(S1):29-34.
- Liu S Y, Liu J Q, Zhou C, et al. Soil and water conservation model test of mineralized lattice fill on MICP surface in slope vegetation restoration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022,44(S1):29-34.
- [23] 张玉斌,景泉,崔金虎,等.富钼专用保水剂对东北典型土壤保墒性能及大豆幼苗生长的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(1):63-69.
- Zhang Y B, Jing Q, Cui J H, et al. Effects of molybdenum-rich super absorbent polymers on soil water retention and soybean seedling growth in typical soils of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(1):63-69.
- [24] 钱春香,王安辉,王欣.微生物灌浆加固土体研究进展[J].岩土力学,2015,36(6):1537-1548.
- Qian C X, Wang A H, Wang X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(6):1537-1548.