

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.001

寇心悦, 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 Xinyue, SANG Lizhi, SHEN Yufang. 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.

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

寇心悦¹, 桑丽智², 沈玉芳^{1,3}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学水土保持与生态环境科技研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3. 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)

摘要: [目的] 为研究麦季不同施磷量对陕西关中地区不同轮作体系作物产量和磷肥效率的影响, 明确实现不同轮作体系作物高产高效的适宜麦季磷肥施用量。[方法] 以麦玉和麦豆 2 个轮作体系为研究对象, 设置 0, 75, 150, 225, 300 kg/hm² 5 个施磷(P₂O₅)水平, 分析 2021—2022 年和 2022—2023 年轮作周年作物产量、磷肥利用效率、土壤有效磷及其与施磷量之间的关系。[结果] 与不施磷处理(0 kg/hm²)相比, 试验 2 年仅麦季施磷处理显著增加麦玉和麦豆轮作体系小麦、玉米、大豆和周年产量($p < 0.05$), 且轮作周年产量和磷肥效率均达到较高水平。2 个轮作体系的周年产量均在施磷 150 kg/hm² 处理最高, 麦玉轮作体系显著高于施磷 75 kg/hm² 处理($p < 0.05$), 但麦豆轮作与施磷 75 kg/hm² 处理间差异不显著; 麦玉和麦豆轮作体系获得最高小麦产量的土壤有效磷分别为 20.07, 16.15 mg/kg。2 个轮作体系的磷肥农学效率、磷肥偏生产力、磷肥回收效率、磷效率指数(PEI)均随施磷量的增加而降低; 施磷 75 kg/hm² 麦玉和麦豆轮作体系的 PEI 分别为施磷 150 kg/hm² 处理的 1.24, 2.02 倍, 麦豆的 PEI 降低更显著。综合考虑粮食安全、环境安全和肥料利用率, 以 95% 的小麦最高产量为实际目标, 对应的麦玉和麦豆轮作体系施磷量分别为 115, 95 kg/hm², 可实现磷肥回收效率及较低的磷盈余, 保证麦玉和麦豆轮作体系周年产量分别达到最大产量的 96.23% 和 95.43%; 麦豆轮作体系具有较低的施磷量需求。[结论] 对不同轮作体系应从作物丰产、肥料高效利用和基于零盈余的管理政策考虑, 进行合理的磷肥施用, 以在满足作物-土壤磷养分的协调供应、保证作物高产的同时, 提高磷效率。

关键词: 施磷量; 麦玉轮作; 麦豆轮作; 产量; 磷肥效率

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0252-10

Effects of Different Phosphorus Application Rates in Wheat Season on Crop Yield and Phosphorus Efficiency in Wheat-Maize and Wheat-Soybean Rotation Systems

KOU Xinyue¹, SANG Lizhi², SHEN Yufang^{1,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. The Research Center of Soil and Water Conservation and Eco-Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] In order to study the effects of different phosphorus application rates in wheat season on crop yield and phosphorus fertilizer efficiency in different crop rotation systems in Guanzhong area of Shaanxi Province, the appropriate phosphorus fertilizers application rates in wheat season were defined to achieve high yield and high efficiency of crops in different rotation systems. [Methods] Two crop rotation systems, wheat-maize and wheat-soybean, were selected as the research objects, and five phosphorus application rates (P₂O₅) (0, 75, 150, 225, and 300 kg/hm²) were set. The annual crop yield, phosphorus fertilizer utilization efficiency, soil available P content and their relationships with phosphorus application

收稿日期: 2024-01-26

修回日期: 2024-03-03

录用日期: 2024-04-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-05-24

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: 寇心悦(1999—), 女, 硕士, 主要从事养分调控与环境研究。E-mail: 15389044656@139.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://stbxb.alljournal.com.cn

rates were analyzed in 2021—2022 and 2022—2023. [Results] Compared with no phosphorus application (0 kg/hm^2), only phosphorus application in wheat season significantly increased the annual yield of wheat, maize, soybean and annual yield of wheat-maize and wheat-soybean crop rotation systems ($p < 0.05$), and the annual yield and phosphorus fertilizer efficiency of crop rotation reached a high level. The annual yield of the two crop rotation systems was the highest in the 150 kg/hm^2 treatment, and the wheat-maize crop rotation system was significantly higher than the 75 kg/hm^2 treatment ($p < 0.05$), but there was no significant difference between wheat-soybean crop rotation and 75 kg/hm^2 treatment. The soil available P content of the wheat yield of wheat-maize and wheat-soybean crop rotation systems was 20.07, 16.15 mg/kg, respectively. The agronomy efficiency, partial productivity, recovery rate and phosphorus efficiency index (PEI) of phosphorus fertilizer in the two crop rotation systems decreased with the increase of phosphorus application rate. The PEI of wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with 75 kg/hm^2 P application were 1.24, 2.02 times of 150 kg/hm^2 P application, respectively, and the PEI of wheat-soybean rotation system decreased more significantly. Considering food security, environmental security and fertilizer utilization rate, and taking 95% of the maximum wheat yield as the actual target, the corresponding P application rates of wheat-maize and wheat-soybean rotation systems were 115, 95 kg/hm^2 , respectively, which could achieve phosphorus recovery efficiency and low phosphorus surplus, and ensure that the annual yield of wheat-maize and wheat-soybean rotation systems reached 96.23% and 95.43% of the maximum yield, respectively; the wheat-soybean rotation system had a lower P application requirement. [Conclusion] For different rotation systems, reasonable P application should be carried out from the perspective of crop yield, fertilizer efficient utilization and zero surplus management policy, so as to meet the coordinated supply of crop-soil P nutrients to ensure high yield while improving P efficiency.

Keywords: phosphorus application; wheat-maize rotation; wheat-soybean rotation; yield; P efficiency

Received: 2024-01-26

Revised: 2024-03-03

Accepted: 2024-04-06

Online(www.cnki.net): 2024-05-24

磷是限制植物生长的潜在因素,因此充足的磷供应对未来的粮食安全至关重要。对粮食生产和更高作物产量的需求推动着农田磷投入的增加,但同时磷资源的缺乏和不可再生性驱使生产者对磷资源管理的策略从开发型转为保护型^[1]。我国部分地区存在严重的农田磷亏缺问题,尤其是中低产田和水土流失严重区,造成我国磷平衡状况“两极化”发展^[2]。有机磷约占土壤全磷的 30%~80%,土壤有机磷需经过微生物过滤分解转化为无机磷后才能被植物直接吸收利用^[3]。长期适宜的磷投入可促进不稳定和中等稳定性有机磷的矿化和不稳定无机磷的积累^[4]。在保证作物高产前提下,对提高磷肥利用率、实现磷素在农田生产中的零盈余以平衡作物—土壤磷素营养具有重要意义。因此,如何确定合理磷肥用量,减少磷盈余仍是生产中亟待解决的重要生产问题。

农田磷平衡受肥料、秸秆、灌水等诸多生产管理因素影响,磷肥利用效率则主要受气候、土壤及轮作等因素影响^[5]。国内外对于单一种植模式适宜施磷的研究较多,关于施磷量及施磷方式对轮作产量、磷肥利用和磷回收的影响也开展了相关的工作。卢亚男等^[6]研究表明,在 4 年稻麦轮作中,麦季施磷

稻季不施磷明显降低土壤有效磷累积,提高磷肥利用率,保证作物较高产量水平和土壤磷素的环境安全;WANG 等^[7]研究发现,在稻麦轮作系统中,仅对小麦施用磷肥被推荐为减少 2 种作物轮作磷损失和提高磷肥利用率的最佳磷肥管理实践。但黄土高原旱作区常见的麦玉轮作中,麦季 1 次施磷对轮作周年产量及磷肥利用效率的影响研究较少。有研究^[8]表明,豆科作物在与小麦轮作时,其固氮作用能够提高土壤氮素养分,通过增加亩穗数和穗粒数来提高小麦产量;同时在磷含量较低土壤中,豆科禾本科间作可利用豆科根际分泌物活化土壤难溶性磷,从而提高禾本科对磷的吸收^[9]。还有研究^[10]发现,玉米和大豆在与小麦轮作时产量更高,增产率较大。但也有研究^[11]发现,干旱条件下的豆麦轮作,大豆降低小麦生长的土壤有效水分,降低小麦的产量和穗数。为此,本研究将不同轮作体系和施磷量水平相结合,通过综合分析产量、肥料效率、磷盈余和土壤有效磷,明确轮作仅麦季施磷的产量和肥效,解析不同轮作体系下的适宜施磷量差异,为黄土高原地区麦玉和麦豆轮作体系粮食生产、节磷增效及可持续发展提供一定的实践参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间定位试验于 2018 年布置于陕西省杨凌区西北农林科技大学曹新庄试验农场(34°30'N,108°09'E)。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,冬春干旱少雨,夏秋高温多雨,年平均气温 12.9℃,无霜期 211 天,年平均降水量 637.6 mm,主要集中在 6—9 月,多年平均蒸发量为 1 400 mm,农作物生产主要依赖自然降水,属半湿润易旱区。试验地土壤类型为土垫旱耕人为土,土质疏松,试验开始前耕层土壤(0—20 cm)有机质 13.69 g/kg,全氮 0.93 g/kg,全磷 0.95 g/kg,有效磷 13.53 mg/kg,pH 8.05。

1.2 试验设计

本研究于 2021 年 10 月至 2023 年 6 月进行,包括麦玉(小麦—玉米)和麦豆(小麦—大豆)2 个轮作体系,每轮作体系下设 0,75,150,225,300 kg/hm² 共 5 个磷水平(P₂O₅),3 次重复,随机区组排列。小区面积 35 m²。磷肥均在小麦季一次性基肥施用。

试验小麦品种为“西农 979”,条播,播种量 150 kg/hm²,行距 20 cm,播种深度 5 cm;施用氮肥 180 kg/hm²,作基肥一次施入。试验玉米品种为“郑单 958”,点播,播种密度 65 000 株/hm²,行距 50 cm,株距 30 cm;施用氮肥 200 kg/hm²,分 2 次施入,分别在播种时和 10 叶期施用 40%和 60%。试验大豆品种为“中黄 13”,点播,播种密度为 125 000 株/hm²,行距 60 cm,株距 13 cm;施用氮肥 40 kg/hm²,作基肥一次施入。试验中所施肥料磷肥为过磷酸钙(P₂O₅, 16%),氮肥为尿素(N,46%)。各小区田间管理措施如除草、防病虫害、灌水等措施均保持一致。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 产量 分别于小麦、玉米、大豆成熟期,在每个小区避开边行随机选取具有代表性的 1,10,1 m² 植株,收获地上部,样品自然风干,机械脱粒、烘干和称重,小麦、玉米和大豆分别以 12.5%,14.0%,13.0%含水率计算作物籽粒产量。

1.3.2 植株全磷含量 分别于小麦、玉米、大豆成熟期,在每个小区随机采取生长均匀并有代表性的 2 个 20 cm 小麦样段、2 株玉米植株、2 株大豆植株,将植株样品地上部按器官分开,在 105℃下杀青 30 min,75℃下烘干至恒重。将样品粉碎后过筛,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—钼锑抗比色法测定,称取提前磨细烘干的植物样品 0.450 g 置于消煮管中,加入 5 mL 浓硫酸,瓶口放弯颈漏斗。随着消煮炉的温度逐渐上升,大约每隔 1 h 向消煮管中加入适量 H₂O₂,如此反复操作 2~3 次,直至消煮管中溶液呈无色。取下消煮管,冷却后

用蒸馏水冲洗漏斗,并用蒸馏水定容至 100 mL。吸取 2 mL 滤液至 50 mL 容量瓶中,加 2 滴二硝基酚指示剂,再用 NaOH 和 H₂SO₄ 调节溶液 pH,至溶液呈淡黄色。然后加钼锑抗显色剂 5 mL,最后加水定容,在 700 nm 处比色测定。

1.3.3 土壤有效磷 分别于小麦、玉米、大豆成熟期,在每个小区用 5 点采样法采集 0—20 cm 土层土壤样品,剔除可见砾石和作物残茬,自然风干,过 1 mm 筛,采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 法测定。称取 2.5 g 风干土壤,加入 50 mL 浓度为 0.5 mol/L NaHCO₃ (pH 8.5) 溶液,振荡 30 min 后过滤,加入钼锑抗试剂定容,室温下静置 30 min 后在 880 nm 的波长下进行比色^[12]。

1.4 数据计算与统计分析

磷肥于小麦季一次性施入,对磷肥的利用考虑轮作体系的周年效果:

周年磷盈余=每年肥料输入土壤的磷—作物带走的磷
累积磷盈余=∑(每年肥料输入土壤的磷—作物带走的磷)

磷肥利用效率(PUE)=(施磷处理作物磷吸收量—不施磷处理作物磷吸收量)/施磷量×100%

磷肥回收效率(PRE)=施磷处理作物磷吸收量/施磷量×100%

磷素农学效率(AE-P)=(施磷处理籽粒产量—不施磷处理籽粒产量)/施磷量

磷肥偏生产力(PFP-P)=施磷处理籽粒产量/施磷量
式中:磷盈余、磷吸收量、施磷量、籽粒产量单位为 kg/hm²。

为了计算不同轮作体系的磷效率指数(phosphorus efficiency index,PEI)^[13],将每个相关指标转换为 0~1 的值:

$$PL_i = X / X_{\max}$$

$$PL_i = |X|_{\min} / |X|$$

式中:PL_i为参数*i*在 0~1 的线性分数;X、X_{max}、X_{min}分别为参数*i*的分析平均值、最大平均值和最小平均值。如果每个参数随着土壤质量而增加,则使用“越多越好”的分数(产量);反之,使用分数“越少越好”(如肥料成本和磷盈余)。根据所有标准磷参数指标生成的雷达图面积,使用 PEI-area 方法估算总体 PEI 得分。

$$PEI\text{-area} = 0.5 \sum_{i=1}^n PL_i^2 \sin(2\pi/n)$$

式中:*n*为应用于 PEI-area 的指标的数量。

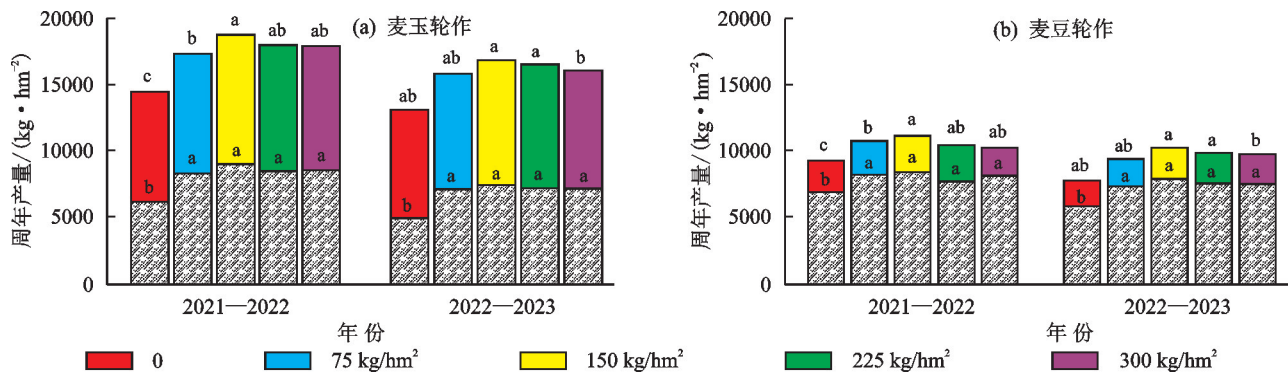
所有数据采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 软件进行数据统计、方差分析和相关性分析。施磷量、轮作和年份之间的交互作用采用多因素方差分析法分析。多重比较采用 LSD 法进行显著性检验(*p*≤0.05)。Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 麦季不同施磷量对不同轮作体系作物产量的影响

试验2年施磷显著增加麦玉和麦豆轮作体系作物产量(图1)。与不施磷相比,试验2年不同施磷处理麦玉轮作体系玉米产量显著增加4.5%~17.1%,周年产量显著增加19.5%~29.5%,均在施磷150 kg/hm²处

理最高。与不施磷相比,试验2年不同施磷处理麦豆轮作体系大豆产量显著增加6.2%~23.2%,周年产量显著增加11.7%~31.2%,施磷150 kg/hm²处理最高。与不施磷相比,试验2年麦玉和麦豆轮作体系小麦产量分别显著增加35.4%~52.1%和17.1%~34.1%,但不同施磷处理间差异均不显著。



注:灰色图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异达5%显著水平,彩色图柱上方小写字母表示玉米/大豆的显著性差异。下同。

图1 2021—2023年不同施磷麦玉和麦豆轮作体系周年产量

Fig.1 Annual yield of wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with different phosphorus application rates in 2021–2023

方差分析(表1)表明,施磷量极显著影响小麦、玉米和周年产量($p < 0.01$),显著影响大豆产量($p < 0.05$);年份极显著影响小麦、大豆和周年产量($p < 0.01$),显著影响玉米产量($p < 0.05$);轮作极显著影

响小麦和周年产量($p < 0.01$);施磷量和轮作交互作用显著影响小麦产量($p < 0.05$),极显著影响周年产量($p < 0.01$);年份和轮作交互作用极显著影响小麦产量($p < 0.01$),显著影响周年产量($p < 0.05$)。

表1 作物产量及磷吸收量的方差分析结果(F值)

Table 1 Analysis results (F value) of annual phosphorus absorption and annual yields of maize, soybean, wheat

变异来源	产量				周年磷吸收量
	小麦	玉米	大豆	周年	
施磷量(P)	52.477 **	9.998 **	2.678 *	86.924 **	141.181 **
轮作(R)	7.820 **	—	—	3 280.735 **	396.949 **
年份(Y)	85.821 **	2.639 *	12.036 **	130.961 **	422.843 **
施磷量×轮作(R×P)	2.899 *	—	—	8.698 **	8.054 **
施磷量×年份(Y×P)	ns	ns	ns	ns	14.992 **
轮作×年份(R×Y)	10.292 **	—	—	6.556 *	327.062 **
施磷量×轮作×年份(P×R×Y)	ns	—	—	ns	3.026 *

注:***表示 $p < 0.01$; **表示 $p < 0.05$; ns表示 $p > 0.05$ 。

2.2 麦季不同施磷量对不同轮作体系作物磷吸收量的影响

施磷显著增加麦玉和麦豆轮作体系作物地上部周年磷吸收量,且均以施磷150 kg/hm²时最高,2021—2022年,分别较不施磷处理显著增加36.28%和48.37%,与其他施磷处理间差异不显著;2022—2023年,分别较不施磷处理显著增加52.24%和74.73%,与施磷225和300 kg/hm²处理间差异不显著(图2)。方差分析表明,施磷量、轮作和年份极显著影响周年磷吸收量;施磷量和轮作、轮作和年份、施磷量和年份交互作用均极显著影响周年磷吸收量;年份、轮作和施磷量交互作用对周年磷吸收量有显著影响(表1)。

2.3 麦季不同施磷量对不同轮作体系周年磷盈余和累积磷盈余的影响

从图3可以看出,试验2年不同施磷处理轮作体系磷盈余存在显著差异($p < 0.05$),麦玉和麦豆轮作体系均以施磷300 kg/hm²处理的周年和累积磷盈余最高,麦玉轮作体系周年磷盈余、累积磷盈余较施磷225 kg/hm²处理分别增加60.28%和74.81%,较施磷150 kg/hm²处理分别增加284.41%和533.57%;麦豆轮作体系周年磷盈余、累积磷盈余较施磷225 kg/hm²处理分别增加58.90%和55.42%,较施磷150 kg/hm²处理分别增加383.33%和354.08%。麦玉轮作体系施磷150, 75 kg/hm²处理的累积磷盈余分别为58.68, -47.02 kg/

hm², 麦豆轮作体系分别为 94.18, -18.98 kg/hm²; 不施

磷处理的周年磷盈余和累积磷盈余均处于负平衡状态。

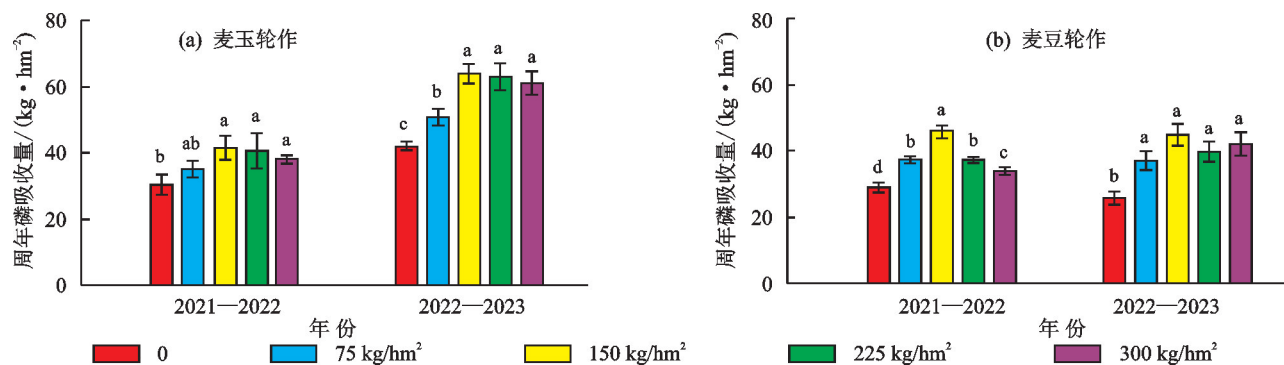


图 2 2021—2023 年不同施磷麦玉和麦豆轮作体系作物周年磷吸收量

Fig.2 Annual phosphorus uptake in wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with different phosphorus application rates in 2021–2023

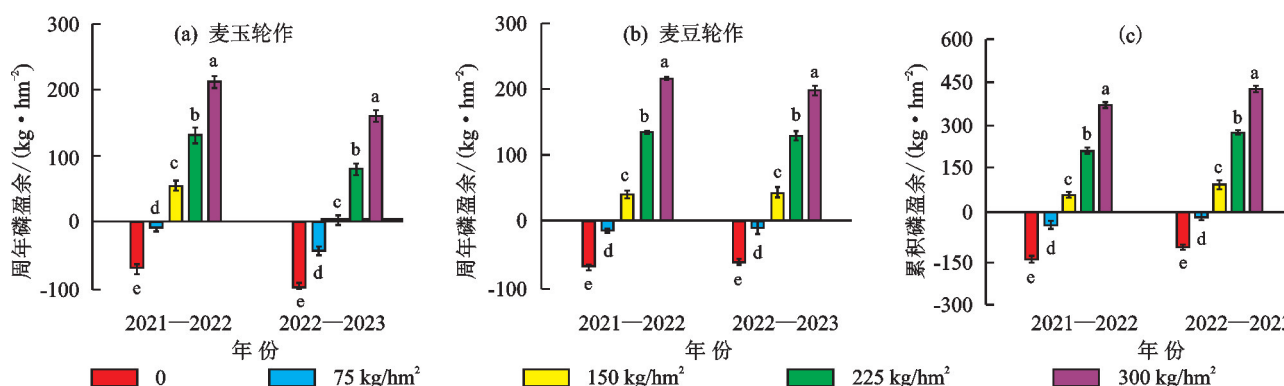


图 3 2021—2023 年不同施磷麦玉和麦豆轮作体系周年磷盈余和累积磷盈余

Fig.3 Annual phosphorus surpluses and cumulative phosphorus surpluses in wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with different phosphorus application rates in 2021–2023

2.4 麦季不同施磷量对不同轮作体系作物磷肥利用效率的影响

从图 4 可以看出, 试验 2 年麦玉轮作体系磷肥利用效率(PUE)以施磷 150 kg/hm² 处理最高, 2021—2022 年较施磷 300 kg/hm² 处理显著提高 169.56%, 2022—2023 年较施磷 75, 225, 300 kg/hm² 处理分别显著提高 21.98%, 56.26% 和 130.03%; 麦豆轮作体系 PUE 2021—2022 年和 2022—2023 年较施磷 225, 300 kg/hm² 处理分别显著提高 201.54%~573.46% 和 105.66%~135.91%, 与 75 kg/hm² 处理间差异不显著。磷肥偏生产力(PFP-P)同样以施磷 75 kg/hm² 处理最高, 除麦豆轮作体系 2022—2023 年施磷 225, 300 kg/hm² 处理无显著性差异外, 其他施磷处理间均有显著性差异; 麦玉和麦豆轮作体系 PFP-P 施磷 75 kg/hm² 处理较其他施磷处理分别显著提高 85.45%~291.03% 和 83.33%~314.62%。试验 2 年麦玉轮作体系的磷肥农学效率(AE-P)以施磷 75 kg/hm² 处理最高, 显著高于其他施磷处理 36.20%~250.71%; 麦豆轮作体系的 AE-P 以施磷 75 kg/hm² 处理最高, 与施磷 150 kg/hm² 处理间差异不显著, 2021—2022 年较施磷 225, 300 kg/hm² 处理分别显著

提高 278.07% 和 439.19%, 2022—2023 年较施磷 225, 300 kg/hm² 处理分别显著提高 130.33% 和 230.98%。试验 2 年麦玉和麦豆轮作体系的磷肥回收效率(PRE)均以施磷 75 kg/hm² 处理最高, 显著高于其他施磷处理。

2.5 麦季不同施磷量对不同轮作体系的土壤有效磷含量的影响

由图 5a 可知, 施磷显著提高麦玉轮作体系土壤有效磷质量分数, 试验 2 年施磷处理小麦季、玉米季土壤有效磷与不施磷处理相比分别显著提高 41.42%~277.85%, 82.6%~211.1%; 除 2022 玉米季, 小麦和玉米季土壤有效磷均随施磷量的增加而显著增加 ($p < 0.05$)。施磷显著提高麦豆轮作体系土壤有效磷(图 5b), 试验 2 年施磷处理小麦季、大豆季土壤有效磷与不施磷处理相比分别显著提高 73.45%~384.80%, 27.1%~145.2%, 小麦季土壤有效磷随施磷量增加而显著增加 ($p < 0.05$)。

麦玉和麦豆轮作体系下小麦产量与小麦成熟期土壤有效磷均呈抛物线关系, 可用一元二次方程拟合(图 6)。麦玉轮作体系拟合方程为: $y = -13.2x^2 + 530.62x + 2836.81$, 获得最高产量的土壤有效磷为 20.07 mg/kg;

麦豆轮作体系拟合方程为: $y = -14.5x^2 + 468.94x +$

$4\ 405.36$, 获得最高产量的土壤有效磷为 16.15 mg/kg 。

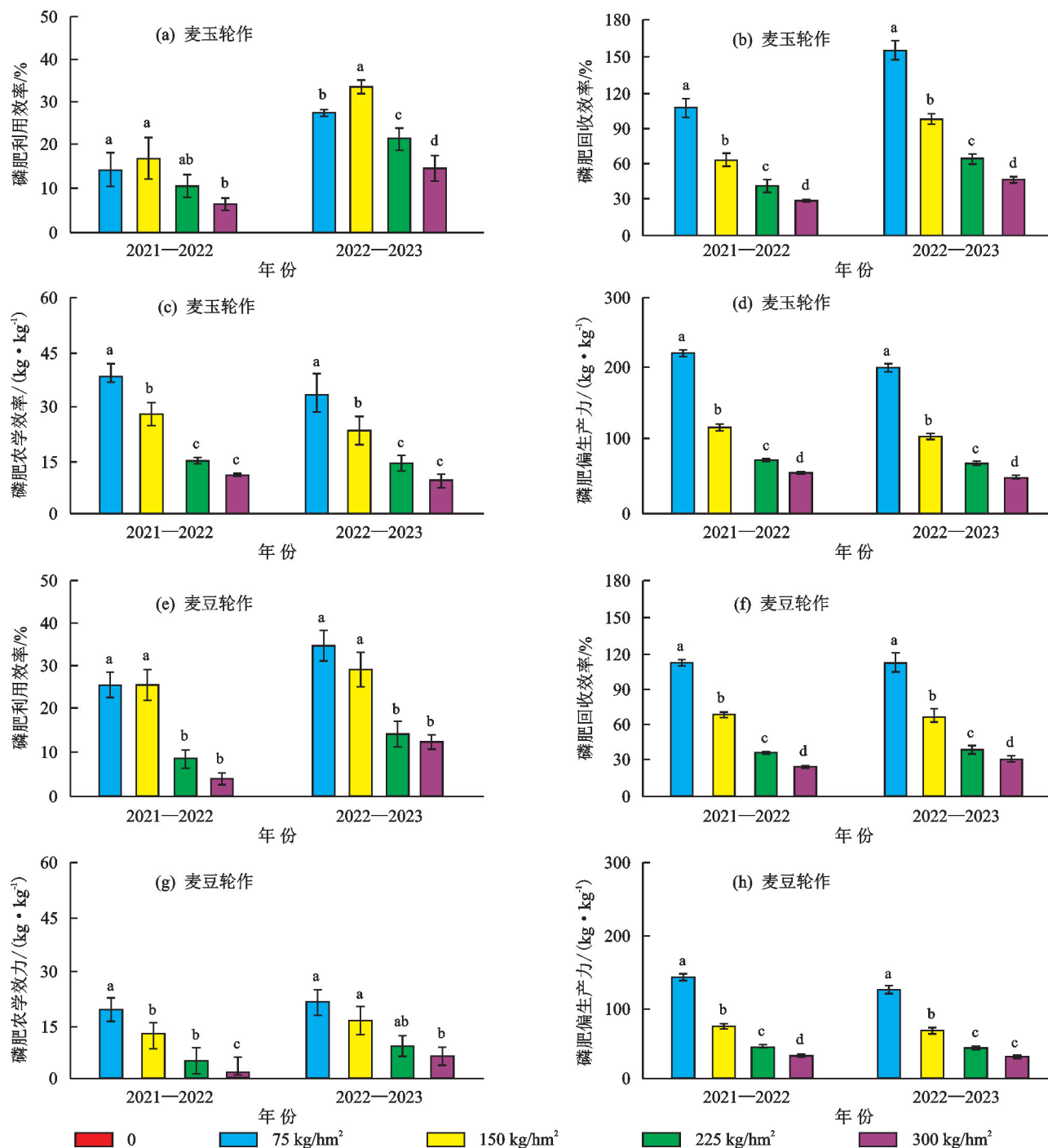


图4 2021—2023年不同施磷麦玉和麦豆轮作体系磷肥利用效率(PUE)、磷肥回收效率(PRE)、磷肥农学效率(AE-P)和磷肥偏生产力(PFP-P)

Fig.4 Phosphorus utilization efficiency (PUE), phosphorus recovery efficiency (PRE), phosphorus agronomic efficiency (AE-P) and phosphate partial factor productivity (PFP-P) of wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with different phosphorus application rates in 2022—2023

2.6 麦季不同施磷量对不同轮作体系磷效率指数的影响

根据影响磷源汇的相关指标,通过计算磷效率指数(phosphorus efficiency index, PEI)可评估不同施磷麦玉和麦豆轮作体系的综合效应。本研究基于所有标准磷参数指标生成的雷达图面积估算不

同处理的 PEI 得分(图 7)。麦玉和麦豆轮作体系施磷 75 kg/hm^2 的 PRE、PFP-P 和 P surplus 得分最高,但 P uptake、Olsen-P 得分相对较低;施磷 150 kg/hm^2 的产量、P uptake 得分最高,但 P surplus、PFP-P 和 PRE 得分相对较低;麦玉轮作体系施磷 150 kg/hm^2 处理 PUE 得分最高,麦豆轮作体系施磷 75 kg/hm^2 处理的 PUE

得分最高;麦玉和麦豆轮作体系 PEI 综合得分均以施磷 75 kg/hm² 处理最高,分别为 2.37 和 2.51,与施

磷 150 kg/hm² 处理相比,麦玉和麦豆轮作体系的 PEI 综合得分分别增加 1.24, 2.02 倍。

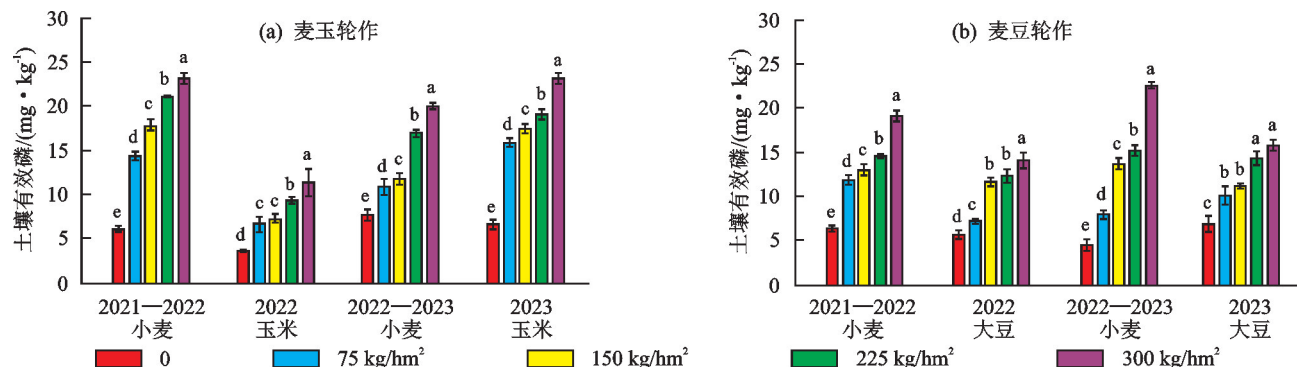


图 5 2021—2023 年不同施磷量麦玉和麦豆轮作体系的土壤有效磷

Fig.5 Soil available phosphorus in wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with different phosphorus application rates in 2021—2023

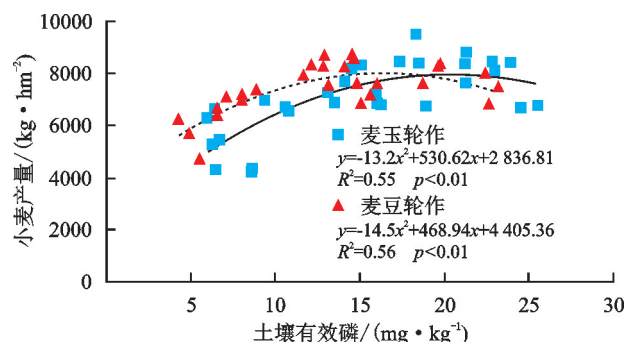


图 6 不同施磷麦玉和麦豆轮作体系小麦产量和土壤有效磷的关系

Fig.6 Relationship between soil available phosphorus and wheat yield of wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with different phosphorus application rates

3 讨论

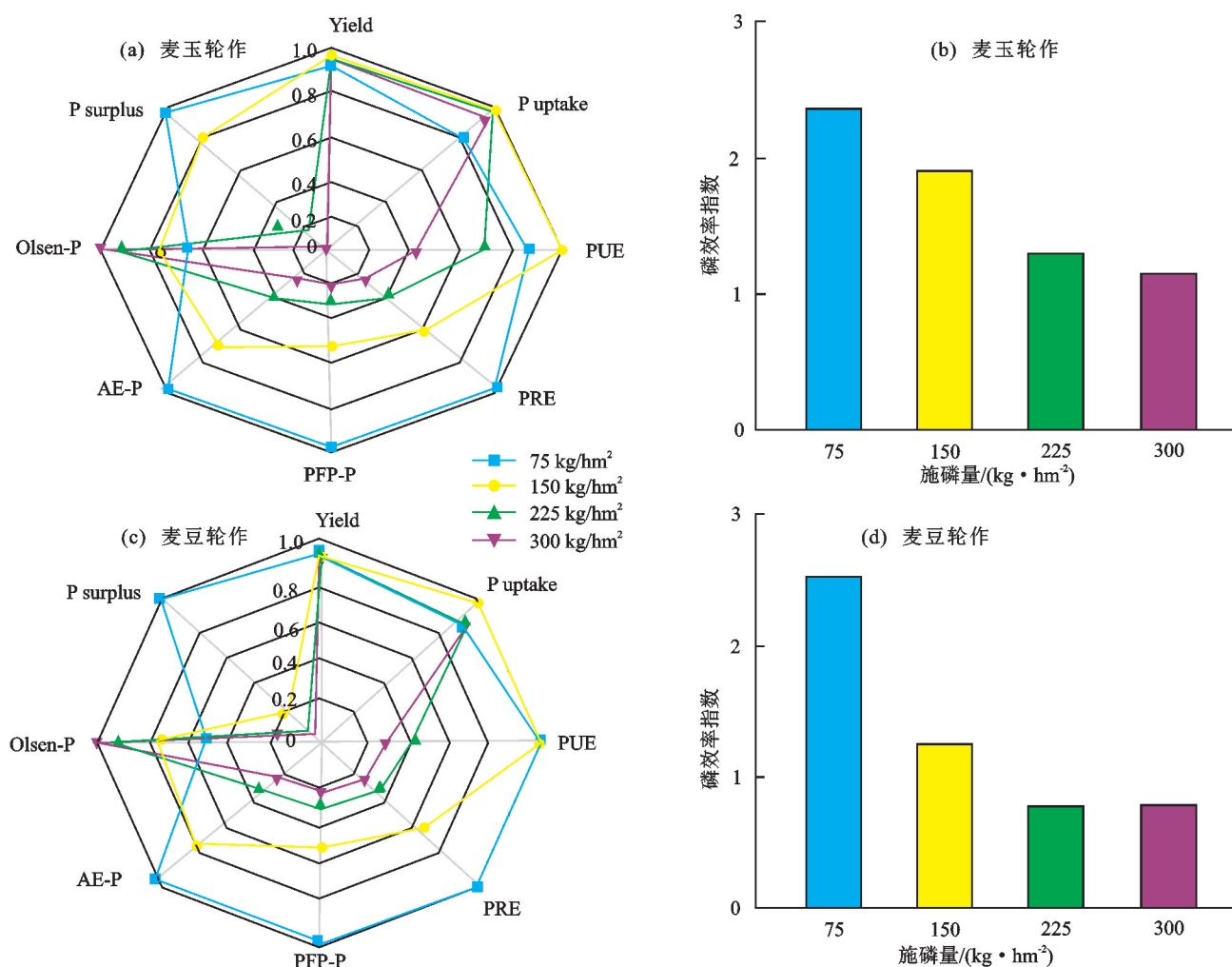
3.1 麦季不同施磷量对不同轮作体系产量和磷效率的影响

有研究^[14]表明,小麦种植增施氮肥、磷肥、增加秸秆覆盖等均可促进产量增收。土壤管理和作物轮作可以促进土壤不稳定性磷的转化,并对后茬作物产生有益影响;也研究^[15]发现,河北地区秸秆还田条件下,小麦施磷量在 105~150 kg/hm²,能够保证作物高产同时使磷肥利用率保持较高水平;同时有研究^[16]发现,在河南地区,与不施磷相比,施磷肥显著提高冬小麦单位面积穗数、穗粒数,同时提高茎、叶干物质积累,促进干物质向籽粒的转移,施磷 180 kg/hm²时小麦产量最高。本研究发现,小麦季施磷量为 75~150 kg/hm²时,可获得麦玉和麦豆轮作体系较高作物产量和肥料利用率。适宜施磷量的差异性可能是由于地点、栽培年份和作物及种植模式等综合原因导致^[17]。有研究^[7]表明,在稻麦轮作中,仅向小麦施磷足以满足 2 种作物对磷的需求。本研究中麦季一次性施磷,麦玉和麦豆轮作体系可分别达到最高产量的

96.23%和 95.43%,满足轮作体系磷肥需求量。

相较于麦玉轮作体系,麦豆轮作既减少化肥投入,大幅降低氮、磷、钾养分盈余量,同时取得较高经济效益^[18]。豆科作物也有效促进后茬作物对氮、磷、钾养分吸收,提高后茬作物产量 18.8%~20.0%^[19]。胡根海等^[20]同样在研究中指出,缺磷条件下,尤其在有效磷含量很低的条件下,适当施磷对提高大豆产量有显著效果,当 P₂O₅ 施用量为 108 kg/hm²时,大豆可达最大产量 2 640 kg/hm²。本研究结果(图 1)表明,与施磷量 75 kg/hm²相比,225,300 kg/hm²麦豆轮作体系的小麦产量和轮作周年产量并未显著增加,同时磷肥利用效率低。不同施磷量对小麦磷素的吸收利用有显著差异^[21],且磷素的积累转运对小麦产量的形成产生重要影响^[22]。砂姜黑土施用不同磷肥均可显著提高植株磷素累积量,较不施磷提高 15.40%~50.90%^[23]。本研究结果(图 2)显示,施磷量在 150 kg/hm²以上时,不同施磷量对磷吸收的影响未出现显著差异,施磷量在 0,75,150 kg/hm²时磷吸收结果差异显著。

作物生长过程中对磷素的吸收利用能力称为磷效率。关于磷效率研究的表示方式有多种,例如,磷肥利用效率、磷肥偏生产力和磷肥回收效率等^[24-25]。本研究中(图 4),麦玉轮作体系下的磷肥利用效率为 10.37%~33.47%,麦豆轮作的磷肥利用效率为 3.78%~34.49%。麦玉轮作和麦豆轮作的磷肥农学效率、磷肥偏生产力、磷肥回收效率均随着磷肥用量的增加而降低,与邢丹等^[26]发现施磷量达到一定水平时,施磷增产率将达到一个相对较低的稳定状态,对应的肥料利用率和经济效益将呈下降趋势研究结果一致。肥料利用率是衡量是否合理施肥的重要表征。因此,应该协调产量和磷肥利用率之间的矛盾,保证作物产量的前提下,提高磷肥利用效率,降低肥料的损失。作物的磷肥利用率受多种因素的影响,还需在田间试验基础上开展进一步的探索研究。



注:图中 Yield、P uptake、PUE、PRE、PFP-P、AE-P、Olsen-P、P surplus 分别表示周年产量、周年磷吸收量、磷肥利用效率、磷肥回收效率、磷肥偏生产力、磷肥农学效率、土壤有效磷和周年磷盈余。

图7 基于磷效率指数对不同施磷量麦玉和麦豆轮作体系的综合评价

Fig.7 Comprehensive evaluation of wheat-maize and wheat-soybean rotation systems with different phosphorus application rates based on the P efficiency index

有研究^[27-29]发现,河南地区施 P_2O_5 量为 194.2~197.4 kg/hm² 时最佳,土壤有效磷质量分数 25.5~25.8 mg/kg,产量最高为 9 752~10 349 kg/hm²;北方冬小麦的土壤 Olsen-P 平均临界值为 14.4 mg/kg;陕西省土壤有效磷平均质量分数为 19.2 mg/kg,变幅为 0.03~73.6 mg/kg,其中关中平原土壤有效磷平均质量分数最高,达到 26.7 mg/kg。与玉米茬相比,大豆茬的土壤有效磷质量分数的降低表明大豆可作为冬小麦种植区两熟复种模式的适宜前茬作物^[30]。本试验 2 年的大豆土壤有效磷质量分数平均值为 11.01 mg/kg,而玉米土壤有效磷质量分数平均值为 12.62 mg/kg。大量施用磷肥增加土壤有效磷的质量分数,但磷肥施用超过一定限度不仅增加环境风险,还降低产量,增加土壤中的磷盈余。为了实现作物高产和高经济效益,降低磷淋失环境风险,将土壤有效磷质量分数保持在农业土壤磷阈值左右,有助于高质量维持土壤磷平衡^[31]。

3.2 麦季不同施磷量对不同轮作体系土壤磷平衡的影响

研究^[32]表明,连续种植 2 季玉米后,施磷 0~60 kg/hm² 处理土壤磷素表观平衡值为亏缺状态,亏缺量随磷肥用量的增加而下降,施磷 90 kg/hm² 处理磷素输入量与输出量基本保持平衡,而施磷 130,160 kg/hm² 处理的土壤磷素表现为盈余;本研究施磷 0~75 kg/hm² 时磷盈余处于负平衡状态,施磷 150~300 kg/hm² 时磷盈余呈增加趋势,同时 2 年时间跨度导致 2 个轮作体系的累积磷盈余均处于增加状态(图 3)。回归分析表明,麦玉和麦豆轮作体系在满足玉米大豆生产需求同时,实现零盈余的施磷量水平分别为 102,81 kg/hm²。磷零盈余对应的施磷量研究结果不同可能与品种、环境及土壤基础地力有关。

根据作物产量、磷吸收量、磷盈余等相关指标,通过磷效率指数形式对不同施磷轮作体系进行综合评

价。麦玉和麦豆轮作体系的 PEI 综合得分均以施磷 75 kg/hm² 时最高;麦玉轮作体系的施磷 150 kg/hm² 的 PUE 得分最高,磷素在土壤中的累积降低,因此麦玉轮作体系施磷量应更接近 150 kg/hm²。但麦豆轮作体系下施磷 75 kg/hm² 的 PUE 得分较施磷 150 kg/hm² 增加。因此,从磷效率指数综合得分角度考虑,麦豆轮作相对麦玉轮作而言,施磷量 75 kg/hm² 时可以维持土壤磷供需,实现土壤作物磷平衡。

通过对施磷量与磷肥回收效率进行拟合表明,100% PRE 的施磷量分别为 142,94 kg/hm²。郭大勇等^[33]研究表明,不同磷肥品种对玉米的生物学指标和土壤速效磷质量分数的差异较大,导致磷肥回收利用效率差异较大,与本研究麦玉和麦豆轮作体系磷肥回收效率差异较大结果一致。对施磷量与作物产量进行回归分析表明,麦玉和麦豆轮作体系小麦产量均随施磷量增加呈抛物线变化,可用一元二次方程分别拟合为 $y = -0.07x^2 + 26.5x + 5\ 645.02$ 和 $y = -0.04E^{-5}x^2 + 16.31x + 6\ 616.16$,均可获得小麦最高产量为 8 200 kg/hm²。若综合考虑磷肥回收效率 and 经济效益,以 95% 小麦最高产量为目标,对应的麦玉和麦豆轮作体系施磷量分别为 115,95 kg/hm²,磷肥回收效率分别为 114%,106%,磷盈余分别为 24.55,27.01 kg/hm²,同时保证麦玉和麦豆轮作体系周年产量分别达到最高产量的 96.23%,95.43%。因此,本研究建议生产实践中麦豆轮作体系可以适当降低施磷水平,以减少磷素累积和提高磷肥利用率,麦玉和麦豆轮作体系分别在施磷 115~150,75~95 kg/hm² 时可以达到有效增产的同时减少磷素在土壤中的累积。

4 结论

(1)麦季一次性施磷可满足麦玉和麦豆轮作体系磷素需求,仅在麦季施磷实现麦玉和麦豆轮作体系小麦最高产量达 8 800 kg/hm²,周年最高产量分别达到 18 700,11 300 kg/hm²。麦玉和麦豆轮作体系产量随施磷量增加而提高,并在施磷 150 kg/hm² 时达到峰值。

(2)不同施磷处理显著影响麦玉和麦豆轮作体系的作物磷肥利用效率、磷效率指数和土壤有效磷质量分数。2 个轮作体系的磷肥农学效率、磷肥偏生产力、磷肥回收率、磷效率指数 (PEI) 均随施磷量的增加而降低,土壤有效磷随着施磷量的增加而增加。

(3)综合考虑粮食安全、环境安全和肥料利用效率,以 95% 小麦最高产量为目标,麦玉和麦豆轮作体系分别在施磷 115~150,75~95 kg/hm² 时可以达到有效增产的同时减少磷素在土壤中的累积。

参考文献:

[1] SHARPLEY A, JARVIE H, FLATEN D, et al. Cele-

brating the 350th anniversary of phosphorus discovery: A conundrum of deficiency and excess [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47(4): 774-777.

[2] 冀宏杰,张怀志,张维理,等.我国农田磷养分平衡研究进展[J].*中国生态农业学报*, 2015, 23(1): 1-8.

JI H J, ZHANG H Z, ZHANG W L, et al. Research progress on cropland phosphorus balance in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1): 1-8.

[3] STEFFENS D, LEPPIN T, LUSCHIN-EBENGREUTH N, et al. Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(5): 765-771.

[4] LIAO D, ZHANG C C, LAMBERS H, et al. Changes in soil phosphorus fractions in response to long-term phosphate fertilization under sole cropping and intercropping of maize and faba bean on a calcareous soil [J]. *Plant and Soil*, 2021, 463(1): 589-600.

[5] YU X, KEITEL C, DIJKSTRA F A. Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops [J]. *Global Food Security*, 2021, 29: e100545.

[6] 卢亚男,汪玉,王慎强,等.太湖稻麦轮作农田减施磷肥盆栽试验研究[J].*农业环境科学学报*, 2016, 35(3): 507-513.
LU Y N, WANG Y, WANG S Q, et al. Reduced P fertilization for rice/wheat rotation in Taihu Lake Region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 507-513.

[7] WANG Y, ZHAO X, GUO Z Y, et al. Response of soil microbes to a reduction in phosphorus fertilizer in rice-wheat rotation paddy soils with varying soil P levels [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 181: 127-135.

[8] 李洋,石柯,朱长伟,等.不同轮作模式对黄淮平原潮土区土壤养分及作物产量的影响[J].*水土保持学报*, 2022, 36(2): 312-321.

LI Y, SHI K, ZHU C W, et al. Effect of different crop rotations on soil nutrients and crop yield in fluvo-aquic soil in Huang Huai Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 312-321.

[9] 张德闪,王宇蕴,汤利,等.小麦蚕豆间作对红壤有效磷的影响及其与根际 pH 值的关系[J].*植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 127-133.

ZHANG D S, WANG Y Y, TANG L, et al. Effects of wheat and fababean intercropping on available phosphorus of red soils and its relationship with rhizosphere soil pH [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 127-133.

[10] JANOVICEK K, HOOKER D, WEERSINK A, et al. Corn and soybean yields and returns are greater in rotations with wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(2): 1691-1711.

- [11] NIE J W, ZHOU J, ZHAO J, et al. Soybean crops penalize subsequent wheat yield during drought in the North China Plain[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:e947132.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社, 2000:85.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:85.
- [13] 王媛.有机肥施用下有机磷转化及玉米磷高效利用机制[D].重庆:西南大学, 2023.
WANG Y. Mechanisms of organic phosphorus transformation and efficient phosphorus utilization in maize with organic fertilizer application[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [14] SOLTANGHEISI A, RODRIGUES M, COELHO M J A, et al. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179:20-28.
- [15] 吉庆凯,王栋,杨文宝,等.长期施磷对玉米—小麦轮作系统作物产量和磷素吸收及土壤磷积累的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7):2469-2476.
JI Q K, WANG D, YANG W B, et al. Effects of long-term phosphorus application on crop yield, phosphorus absorption, and soil phosphorus accumulation in maize-wheat rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7):2469-2476.
- [16] 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.
- [17] FREILING M, VON TUCHER S, SCHMIDHALTER U. Factors influencing phosphorus placement and effects on yield and yield parameters: A meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 216:e105257.
- [18] 马小艳,杨瑜,黄冬琳,等.小麦化肥减施与不同轮作方式的周年养分平衡及经济效益分析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(8):1589-1603.
MA X Y, YANG Y, HUANG D L, et al. Annual nutrients balance and economic return analysis of wheat with fertilizers reduction and different rotations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(8):1589-1603.
- [19] 李昊焱.华北平原南部两熟区不同种植模式周年养分利用效率及土壤肥力质量评价[D].河南 新乡:河南师范大学, 2019.
LI H Y. Evaluation of nutrient utilization efficiency and soil fertility quality in different planting patterns of double-cropping region in southern part of North China Plain[D]. Xinx-
- iang, Henan: Henan Normal University, 2019.
- [20] 胡根海,章建新,唐长青.北疆春大豆生长动态及干物质积累与分配[J]. *新疆农业科学*, 2002, 39(5):264-267.
HU G H, ZHANG J X, TANG C Q. Growth changing and dry matter accumulation and distribution in spring soybean BeiJiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2002, 39(5):264-267.
- [21] 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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7):1265-1279.
- [22] JAGDEEP-SINGH, BRAR B S. Build-up and utilization of phosphorus with continues fertilization in maize-wheat cropping sequence[J]. *Field Crops Research*, 2022, 276:e108389.
- [23] 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.
- [24] WANG X R, SHEN J B, LIAO H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? [J]. *Plant Science*, 2010, 179(4):302-306.
- [25] HAYATU N G, LIU Y R, ZHANG S X, et al. Long-term organic manure substitution increases yield and phosphorus use efficiency in a double-rice system by altering soil phosphorus uptake and apparent balance[J]. *Agronomy*, 2023, 13(6):e1440.
- [26] 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.
- [27] 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.

- hill region of Southern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 338-342.
- [32] 魏玉杰, 吴新亮, 蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 153-159.
WEI Y J, WU X L, CAI C F. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 153-159.
- [33] 王娜, 王佳妮, 张晓明, 等. 控制厚度条件下崩岗土体的裂隙演化特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 175-182.
WANG N, WANG J N, ZHANG X M, et al. Evolution characteristics of cracks in Benggang soil under controlled thickness[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 175-182.
- [34] 陶禹. 崩岗坡面壤中流及其水动力特征与崩岗侵蚀的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
TAO Y. The effect of subsurface flow along a hillslope of Benggang and its hydrodynamic characteristics on Benggang erosion[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [35] 段晓倩, 倪晨, 陈姣, 等. 基于含水量高频监测的花岗岩崩岗侵蚀红壤优先流研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 82-88.
- DUAN X Q, NI C, CHEN J, et al. Study on the preferential flow of red soil erosion in granite slope collapse with high frequency monitoring of water content[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 82-88.
- [36] 高钰淇, 陈家宙, 邹自强, 等. 宽沟是崩岗早期发育的形态标志[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 105-111.
GAO Y H, CHEN J Z, ZOU Z Q, et al. Niche-like ephemeral gully is a morphological symbol of the early development of Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 105-111.
- [37] 陈亮, 卢亮. 土体干湿循环过程中的体积变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 229-235.
CHEN L, LU L. Investigation on the characteristics of volumetric change during the wet-dry cycle of the soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 229-235.
- [38] 黄琬云. 土壤侵蚀预报模型中的生物结皮因子研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
HUANG W Y. A study on biological soil crust factors in soil erosion mode[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.

(上接第 261 页)

- [28] WU Q H, ZHANG S X, REN Y, et al. Soil phosphorus management based on the agronomic critical value of Olsen P[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49(8): 934-944.
- [29] 严玉梅, 李水利, 李茹, 等. 陕西省耕地土壤养分现状与分布特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1298-1305.
YAN Y M, LI S L, LI R, et al. Current situation and distribution characteristics of soil nutrients in cultivated land of Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1298-1305.
- [30] 邵云, 李昊烺, 翁正鹏, 等. 不同茬口对小麦养分利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(3): 356-363.
SHAO Y, LI H Y, WENG Z P, et al. Effects of different previous crops on nutrient utilization and yield of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(3): 356-363.
- [31] BAI Z H, MA L, MA W Q, et al. Changes in phosphorus use and losses in the food chain of China during 1950—2010 and forecasts for 2030[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 104(3): 361-372.
- [32] 张磊, 都钧, 孔丽丽, 等. 施磷对东北黑土区春玉米产量、磷素吸收利用及土壤磷素平衡的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(5): 38-42.
ZHANG L, DU J, KONG L L, et al. Effects of phosphorus fertilizer application on yield, phosphorus absorption and utilization, soil phosphorus balance of spring maize in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(5): 38-42.
- [33] 郭大勇, 袁玉玉, 曾祥, 等. 石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 243-249.
GUO D Y, YUAN Y Y, ZENG X, et al. Effect of phosphorus fertilizer on maize growth and inorganic phosphorus fractions in a calcareous soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 243-249.