

潮土小麦和玉米 Olsen-P 农学阈值及其差异分析

郭斗斗, 黄绍敏*, 张水清, 张珂珂, 宋晓

(河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南郑州 450002)

摘要: 【目的】磷农学阈值是指导不同作物磷肥用量并获取最佳经济产量的重要依据, 然而, 不同地区不同的耕作制度、土壤类型、作物种类、pH、温湿度条件下, 作物的磷农学阈值不同。明确小麦-玉米轮作体系下, 典型潮土区小麦和玉米的磷农学阈值, 并分析其差异。【方法】本研究基于“国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测站”25年的定位试验, 选取氮、钾肥施用充足和磷肥用量不同的NK(不施磷肥)、NPK(施用氮磷钾化肥)、NPKM(氮磷钾化肥和有机肥配施)、1.5NPKM(高量氮磷钾化肥配施有机肥)、NPKS(氮磷钾化肥与玉米秸秆还田配施)5个处理的试验数据, 使用米切里西指数模型(Mitscherlich exponential model)拟合小麦和玉米的Olsen-P农学阈值, 并通过对比不同土壤磷水平下两种作物的磷吸收利用特性, 分析其阈值不同的原因。【结果】获得最大相对产量的95%时, 潮土区小麦Olsen-P农学阈值为13.1 mg/kg, 玉米Olsen-P农学阈值为7.5 mg/kg。玉米Olsen-P农学阈值低于小麦主要原因: 1) 土壤磷水平较低时, 小麦对磷缺乏更为敏感, 而玉米可保持相对较强的吸磷能力, 25年不施磷处理玉米吸磷量是小麦的1.4倍; 2) 土壤Olsen-P含量达到玉米阈值, 而未能达到小麦阈值时, 可保障玉米籽粒、茎秆及小麦籽粒正常生长对磷的需求, 但小麦茎秆磷浓度仅能达到相对最大磷浓度的68.9%, 严重影响了小麦的正常生长和获取较高产量的能力; 土壤Olsen-P含量提高到小麦阈值后, 小麦茎秆磷浓度提高到相对最大磷浓度的80.5%以上, 进而可保障小麦获得较高的产量; 3) 土壤磷素养分充足时, 小麦对磷的吸收量大于玉米, 且主要是由于小麦茎秆磷浓度和吸磷量随土壤Olsen-P含量的增加而大幅度增加。【结论】小麦和玉米作为典型潮土区两种重要的粮食作物, Olsen-P农学阈值分别为13.1和7.5 mg/kg。由于两种作物的生理特性不同, 小麦对磷素的吸收利用率较低, 茎秆需要较高的土壤磷浓度维持正常生长, 产量形成对磷养分需求更大。因此, 小麦-玉米轮作体系下, 小麦的磷农学阈值更高, 小麦季所需土壤磷供应量大于玉米季。为增强磷肥利用效率, 减少磷肥投入量和土壤中磷素的过量累积, 玉米季磷肥使用量应适当小于小麦季。当土壤Olsen-P水平高于作物磷农学阈值后, 减少或短时间停止施用磷肥并不会对作物产量有明显影响。

关键词: 潮土; 小麦; 玉米; 磷农学阈值; 差异分析

Threshold values of soil Olsen-P for maize and wheat in fluvo-aquic soil

GUO Dou-dou, HUANG Shao-min*, ZHANG Shui-qing, ZHANG Ke-ke, SONG Xiao

(Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Sciences,
Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: 【Objectives】Critical soil P levels are important basis for guiding phosphate fertilizer rate and obtaining the best economic benefits for different crops, however, critical soil P values may vary among different crops because of different areas, farming systems, soil types, pH, temperature and humidity conditions. Critical values of soil Olsen-P between maize and wheat in a wheat-maize rotation system in typical fluvo-aquic soil area were determined and analyzed in this study. 【Methods】This study was based on a 25 year fertilization experiment on “National Long-term Monitoring Station of Fluvo-aquic Soil Fertility and Fertilizer Effects”. Five fertilization treatments were investigated: NK, NPK, NPK plus farmyard manure (NPKM), 1.5 times of

收稿日期: 2017-02-20 接受日期: 2017-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200109-07, 2016YFD0300809-3); 2017年河南省农业科学院自主创新专项基金资助。

作者简介: 郭斗斗(1983—), 女, 河南三门峡人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤养分演变规律研究。

E-mail: guodoudou_822@163.com. *通信作者 E-mail: hsm503@126.com

application rates of N, P, K plus farmyard manure (1.5NPKM) and N, P, K plus maize straw (NPKS). The critical values of soil Olsen-P for crop yields were calculated using the Mitscherlich exponential model, and the absorption and utilization characteristics of phosphorus in two crops under different soil phosphorus levels were compared. **【 Results 】** Correspond to 95% of the maximum predicted relative yields, the critical value of Olsen-P was 13.1 mg/kg for wheat and 7.5 mg/kg for maize. The critical value of Olsen-P for maize was lower than that for wheat, and the reasons were: 1) When the soil phosphorus level was low, wheat was more sensitive to the phosphorus deficiency, while maize could maintain a relatively strong ability to absorb phosphorus. Total phosphorus absorption for maize was 1.4 times of wheat in no P fertilization treatment for 25 years. 2) When the content of soil Olsen-P reached the critical value for maize and did not reach the critical value for wheat, the requirement of phosphorus for maize grain, maize straw and wheat grain could be ensured, but the P concentration of wheat straw could only reach 68.9% of the relative maximum P concentration, which seriously affected the normal growth and high yield formation of wheat. When the soil Olsen-P content was increased to the wheat critical value, the P concentration of wheat straw increased to 80.5% of the relative maximum P concentration, and the high yield of wheat could be ensured. 3) When there was adequate soil phosphorus nutrient, the amount of phosphorus absorbed by wheat was higher than that of maize, mainly because with the increase of soil Olsen-P content, the wheat straw P concentration and P uptake amount were greatly increased. **【 Conclusions 】** The critical values of Olsen-P for wheat and maize were 13.1 and 7.5 mg/kg respectively in the typical fluvo-aquic soil. Wheat was relatively less efficient than maize in the absorption and utilization of soil P. Wheat straw needed higher P concentration to maintain normal growth, and needed stronger soil phosphorus supply accordingly for high yield.

Key words: fluvo-aquic soil; wheat; maize; critical value of soil P; difference analysis

施用磷肥可以保证较高的土壤磷水平和稳定的作物产量, 然而磷矿是有限的不可再生资源, 过量的磷素也是水体富营养化最为关键的因素, 连续多年重施磷肥可能会带来资源浪费和环境问题, 因此合理施用农业磷肥是保证作物产量兼具环境效益的必要措施。现代施肥体系应该考虑土壤性质, 磷在不同耕作制度中的循环潜力, 在一定的土壤、气候环境条件下保证较高产量时作物对磷的需求量等^[1-2]。土壤中速效磷肥对作物生长状态及产量有重大影响, 对于典型潮土而言, 土壤 Olsen-P 与作物对磷养分的吸收利用和产量有显著的相关关系, 可很好地反映土壤的供磷能力。通过拟合土壤 Olsen-P 含量与作物产量的关系, 在一定的栽培环境下可获得作物最佳经济效益时最适宜的土壤 Olsen-P 值, 超过该 Olsen-P 阈值之后, 作物的产量不再随施磷量的增加而显著增加^[3]。

已有的研究显示, 不同耕作制度下, 由于土壤结构、深度、土壤有机质和 pH 等因素不同, 磷的有效性差异较大^[4-5], Olsen-P 阈值在不同作物和种植条件下的值不同^[6-7], 不同的阈值拟合方法获取的磷农学阈值也有较大差异, Zhao 等^[8]研究显示杨凌塬土区小麦-玉米轮作体系下, 使用线性平台模型获取的小

麦、玉米 Olsen-P 阈值分别为 14.6、16.1 mg/kg, 祁阳红壤区小麦-玉米轮作体系下, 小麦、玉米 Olsen-P 阈值分别为 28.2 mg/kg、12.7 mg/kg, 重庆紫色土区小麦水稻轮作体系下小麦、水稻 Olsen-P 阈值为 11.1、10.9 mg/kg; 席雪琴等^[9]应用米切里西指数模型模拟获得 90% 最大相对产量时杨凌塬土区小麦、玉米 Olsen-P 农学阈值分别为 26.2、13.9 mg/kg; Shi 等^[10]使用两种方法获取太湖流域水稻土小麦-水稻轮作体系下小麦、水稻农学阈值较低, 平均值分别为 4.08、3.40 mg/kg。Xu 等^[11]对不同地区使用三种不同的模型获得的小麦磷农学阈值范围为 12.5~19.0 mg/kg, 玉米磷农学阈值范围为 12.1~17.3 mg/kg。Jordan 等^[12]通过对不同国家 18 个地区磷肥推荐量的研究发现, 有效磷测定方法、作物类型和土壤类型都会影响磷农学阈值。为明确典型潮土区小麦玉米轮作体系下, 小麦和玉米两大主要作物的 Olsen-P 农学阈值, 本研究基于“国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测站”25 年间的定位试验, 选取氮、钾肥施用充足, 磷肥用量不同的 5 个处理, 通过米切里西指数模型确定小麦和玉米的 Olsen-P 农学阈值, 并分析相同耕作条件下小麦、玉米 Olsen-P 阈值不同的原因, 为实现作物高产和小麦季、玉米季磷肥的合理分配提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况及施肥设计

“国家潮土土壤肥力与肥料效益长期监测站”(113°40'42"E, 34°47'55"N), 属于典型温带季风气候, 年均降雨量 665 mm, 分布不均, 主要集中于 7、8、9 月。土壤类型为潮土, 质地为轻壤。试验基地 1989 年建成, 1990 年开始定位试验, 试验初期土壤 pH 为 8.1、有机质含量 10.6 g/kg、全氮 1.69 g/kg、全磷 0.65 g/kg、Olsen-P 6.9 mg/kg、有效氮 52.3 mg/kg、速效钾 71.7 mg/kg、缓效钾 647.2 mg/kg, 土壤容重 1.45 g/cm³。本研究选取了试验站 1990~2015 年 5 个处理的试验数据用于确定土壤 Olsen-P 农学阈值: 不施磷肥 (NK)、施用氮磷钾化肥 (NPK)、氮磷钾化肥和有机肥配施 (NPKM)、NPKM 施肥量的 1.5 倍 (1.5NPKM)、氮磷钾化肥与玉米秸秆还田配施 (NPKS)。

每年施用的磷肥为普通过磷酸钙, 氮肥为尿素, 钾肥为氯化钾, 施用的有机肥 1990~1999 年为马粪, 2000~2010 年为牛粪, 2011~2014 年为商品有机肥; 每年小麦季将前茬玉米秸秆粉碎还田。小麦季施氮肥 (以 N 计) 165 kg/hm², 磷肥 (以 P₂O₅ 计)、钾肥 (以 K₂O 计) 各 82.5 kg/hm², 玉米季施氮肥 (以 N 计) 187.5 kg/hm², 磷肥 (以 P₂O₅ 计)、钾肥 (以 K₂O 计) 各 93.75 kg/hm²。每年施肥前测定施用有机肥及玉米秸秆的氮、磷、钾含量。MNPk 处理在施用相当于 NPK 处理磷、钾肥的基础上, 增施相当于 70%NPK 处理氮量的有机肥, 相当于 30%NPK 处理的氮肥由尿素补充; SNPK 处理在施用相当于 NPK 处理磷、钾肥的基础上, 将前茬玉米秸秆粉碎还田, 秸秆还田量以每年测定的秸秆氮含量计算, 在 1991~2001 年秸秆还田量相当于 70%NPK 处理氮量 (不足部分由同期其他试验区秸秆补充), 2002~2014 年为地上部生产的全部秸秆量, 不足 70%NPK 处理氮量的部分, 追肥期间以尿素补足。每季磷、钾肥和有机肥作为底肥一次性施入, 氮肥按基追比 5:5 施入。

各年度依据土壤和天气状况播种, 小麦播种时间为 10 月中旬, 玉米为 6 月上旬。施肥时间为播种前一天, 小麦季施肥后, 深耕一次, 玉米季免耕。作物收获时, 小麦底部留茬约 15 cm, 玉米植株全部移出, NPKS 处理玉米秸秆粉碎还田用于下一季小麦生产。各年度依据土壤状况适当灌溉, 保证作物正常生长。

1.2 样品采集及测定方法

各年度不同处理收获 5 m² 测产; 选取长势均匀的 20 株小麦、3 株玉米样品, 分为籽粒、茎秆两部分, 采集混合样, 带回室内 105℃ 下杀青 30 min, 烘干至恒重后, 粉碎过 0.15 mm 筛备用。小麦季收获后使用五点采样法采集各处理 0—20 cm 土样, 带回室内风干, 拣去杂物后, 研磨过 1 mm 筛备用。

植株全磷含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—钼锑抗比色法测定, 土壤 Olsen-P 含量使用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定^[13]。

1.3 潮土磷农学阈值确定方法

依据前人研究结果和实际生产中作物产量与土壤 Olsen-P 的响应关系^[14-15], 本研究使用米切里西指数模型 (Mitscherlich exponential model) 拟合土壤 Olsen-P 与作物相对产量间的关系。

作物相对产量的计算公式为: $Y = Y_i/Y_m \times 100$ 其中: Y 为作物的相对产量 (%); Y_i 为每年不同处理的籽粒产量 (kg/hm²); Y_m 为每年各处理的最大籽粒产量 (kg/hm²)。

米切里西模型表示作物的增产量随限制性养分 (土壤 Olsen-P) 的递增而减少。计算公式如下:

$$Y = A(1 - e^{-bx})$$

其中: Y 是各年度作物的相对产量 (%); X 是各年度玉米种植前取样测定的土壤 Olsen-P 含量 (mg/kg); A 是预测的最大相对产量 (%); b 是效应因子。

使用米切里西模型拟合时, 作物产量达到最大相对产量的 95% 时获取的土壤 Olsen-P 值为农学阈值, 土壤 Olsen-P 大于该阈值后, 作物产量随 Olsen-P 的增加不再有明显的增加^[14]。

1.4 数据统计分析方法

使用 SPSS 软件对作物产量、植株磷含量和土壤 Olsen-P 含量进行统计分析, 使用 Origin 8 软件的非线性曲线拟合功能对作物产量、植株磷含量与土壤 Olsen-P 进行米切里西模型拟合。

2 结果与分析

2.1 磷农学阈值的确定

经米切里西指数模型拟合, 获得小麦、玉米各自的拟合模型。

$$\text{小麦: } Y = 93.29(1 - e^{-0.229X})(R^2 = 0.731, n = 125)$$

$$\text{玉米: } Y = 93.35(1 - e^{-0.398X})(R^2 = 0.622, n = 125)$$

米切里西模型很好地描述了作物相对产量与土壤 Olsen-P 的关系, 随着土壤 Olsen-P 含量的增加,

初期小麦和玉米的相对产量显著增加, 土壤 Olsen-P 增加到一定阶段后相对产量不再明显增加。潮土区小麦-玉米轮作体系下, 通过模型拟合获取的作物理论最大相对产量基本相同, 小麦为 93.4%, 玉米为 93.3%, 获得理论最大相对产量的 95% 时, 小麦 Olsen-P 农学阈值为 13.1 mg/kg, 玉米 Olsen-P 农学阈值为 7.5 mg/kg (图 1)。玉米 Olsen-P 农学阈值较小, 模型中的效应因子 b 值较大 (玉米是小麦的 1.74 倍), 这表明玉米植株可利用有效磷量较大, 玉米季的土壤供磷能力较强。

2.2 不同施磷量对小麦和玉米产量的影响

比较不同施磷量条件下小麦和玉米 25 年间产量可知, 小麦最高产量出现在施磷量最高的 1.5NPKM 处理和 NPK 处理 (其中最高产量在 2011 年达到 9331 kg/hm²), 不施磷处理 (NK) 产量最低, 且有逐步下降的趋势。由于试验初期 Olsen-P 含量较低 (6.9 mg/kg), 长期不施磷肥对作物产量影响很大 (图 2), NK 处理小麦产量与最大产量的比值 (Y_{NK}/Y_{max}), 试

验第 1 年为 0.94, 6 年后下降到 0.4 之下, 之后 10 年逐步稳定在 0.3 左右, 2015 年下降到 0.2 左右。玉米最高产量和最低产量也分别出现在 1.5NPKM 和 NK 的处理 (其中最高产量在 2012 年达到 11487 kg/hm²), 下降趋势和小麦相同, 但下降幅度较小。Y_{NK}/Y_{max} 值试验第 1 年为 0.88, 6 年后下降到 0.6 之下, 之后 10 年逐步稳定在 0.5 左右, 2015 年下降到 0.4 左右。比较可知, 小麦对磷肥缺乏更为敏感, 不施磷肥对小麦产量影响更大。

2.3 作物磷含量和吸磷量与施磷量的响应关系

长期不同施磷量处理, 作物磷含量因土壤 Olsen-P 的增量不同而有较大差异。如图 3 所示, 长期不施磷处理, 作物籽粒与茎秆多年平均磷含量显著低于施磷肥各处理 (P < 0.05), 平衡施肥 (NPK) 处理小麦籽粒、玉米籽粒、小麦茎秆、玉米茎秆多年平均磷含量分别比常年不施磷 (NK) 处理提高 37.6%、51.6%、131.4%、95.3%, 随着施磷量的增加, 作物植株磷含量均有较大幅度的增加, 施磷量最大的 1.5NPKM 处

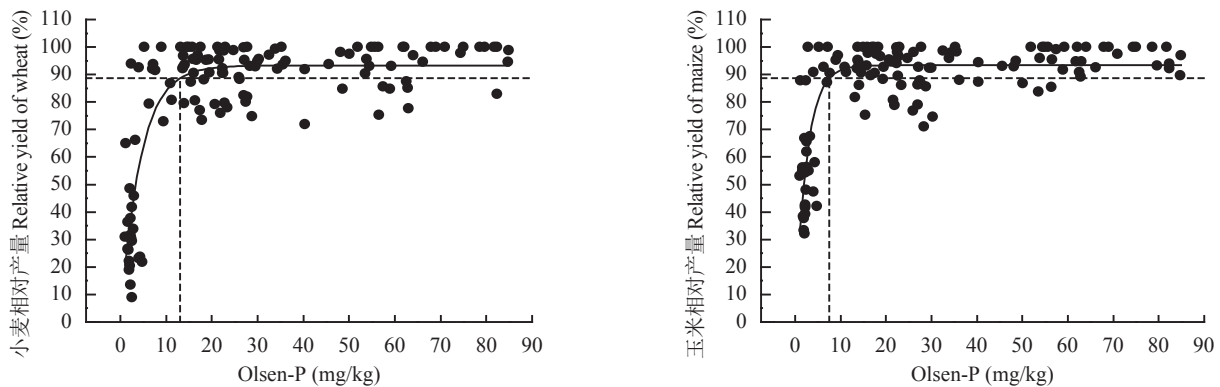


图 1 小麦、玉米相对产量对土壤 Olsen-P 含量的响应

Fig. 1 Response of relative yield of wheat and maize to soil Olsen-P fitted by the Mitscherlich model

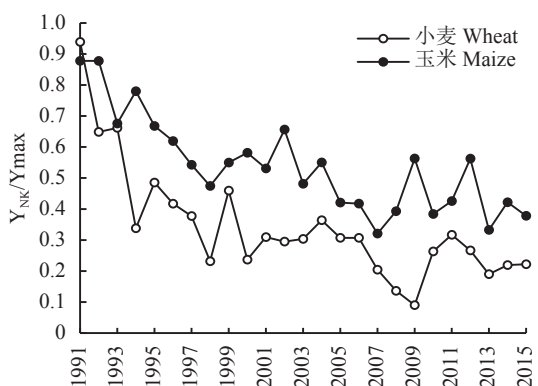


图 2 25 年间不施磷处理产量与最大产量比值的变化
Fig. 2 Variation of the yield ratios of the NK treatment to the maximum yield treatment over 25 years

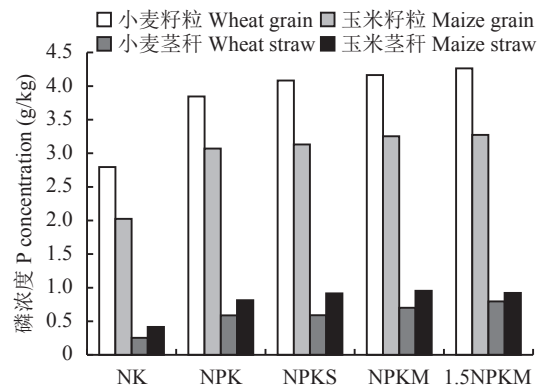


图 3 不同处理小麦和玉米植株 25 年平均磷含量
Fig. 3 Average P concentrations of wheat and maize over 25 years under different treatments

理小麦籽粒、玉米籽粒、小麦茎秆、玉米茎秆磷含量比 NPK 处理分别提高 10.9%、6.6%、35.5%、13.5%，比较可知，随着施磷量和土壤 Olsen-P 含量的增加，小麦植株磷含量增幅大于玉米，其中小麦茎秆磷含量增幅最大。

不施磷处理，由于 Olsen-P 的消耗，从第 4 年开始作物吸磷量迅速下降，小麦籽粒吸磷量维持在 5.4 kg/(hm²·a)，玉米籽粒吸磷量高于小麦，维持在 8.0 kg/(hm²·a)。两种作物茎秆吸磷量的差异大于籽粒，第 4 年之后，小麦茎秆吸磷量维持在 0.55 kg/(hm²·a)，玉米茎秆吸磷量维持在 1.4 kg/(hm²·a)，远高于小麦茎秆。比较可知，在土壤 Olsen-P 含量极低的情况下，玉米仍能获取一定量的土壤磷养分供作物生长，整体上，不施磷处理玉米吸磷量是小麦吸磷量的 1.4 倍。

随着施肥时间的增加，不同施磷处理的土壤 Olsen-P 含量有不同程度的增加，作物产量也随之不断增加，将 25 年间 5 个处理小麦、玉米产量和作物吸磷量进行相关分析表明，作物产量与吸磷量之间呈极显著的线性关系(图 4)，每生产 1 t 小麦，作物平均吸磷量为 5.2 kg，每生产 1 t 玉米，作物平均吸磷量为 4.4 kg。25 年间，NPK、NPKM、1.5NPKM、

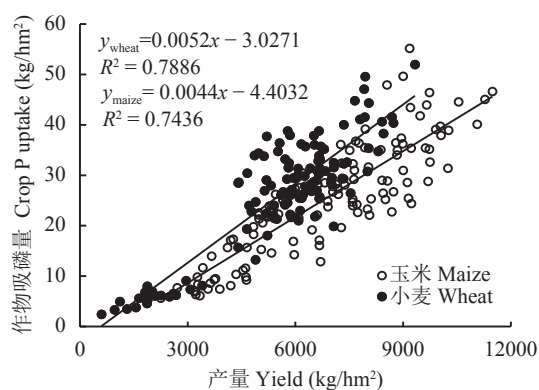


图 4 小麦玉米产量与作物吸磷量的关系

Fig. 4 Relationship between yields and P uptakes of maize and wheat

NPKS 处理小麦平均吸磷量分别为 28.3、30.3、34.5、30.2 kg/(hm²·a)，玉米平均吸磷量分别为 26.2、29.8、31.1、29.6 kg/(hm²·a)，其中，小麦茎秆吸磷量分别为 4.11、4.98、6.46、4.55 kg/(hm²·a)，玉米茎秆吸磷量分别为 4.53、5.77、6.23、5.76 kg/(hm²·a)。对比可知，土壤磷素养分充足时，与平衡施肥 NPK 处理相比，施磷量最大的 1.5NPKM 处理小麦和玉米籽粒增加的吸磷量基本一致，约为 15.5%，但茎秆吸磷量大幅增加，小麦、玉米茎秆吸磷量分别增加 57.3% 和 37.6%。整体上小麦对磷的吸收量大于玉米，且主要是由于小麦茎秆磷浓度和吸磷量随土壤 Olsen-P 的增加而大幅度增加。

2.4 不同 Olsen-P 阈值对作物磷含量的影响

作物磷含量随土壤 Olsen-P 含量的增加，呈现一个无限接近平台的曲线关系。为进一步明确 Olsen-P 阈值与作物磷含量的量化关系，本试验使用米切里西模型分别拟合土壤 Olsen-P 含量与小麦籽粒、玉米籽粒、小麦茎秆、玉米茎秆相对磷含量的关系，并将上文获取的小麦和玉米 Olsen-P 阈值分别带入所得回归方程，计算获取 95% 最大相对产量对应的植株相对磷含量(玉米 Olsen-P 阈值和小麦 Olsen-P 阈值对应的植株相对磷含量分别用 M_p 和 W_p 表示，表 1)。结果显示，土壤 Olsen-P 含量达到玉米 Olsen-P 农学阈值时，小麦籽粒、玉米籽粒磷含量相应达到了最大相对磷含量的 90% 以上，玉米茎秆磷含量达到相对最大磷含量的 80% 以上，但小麦茎秆磷含量只能达到最大磷含量的 68.9%，因此土壤 Olsen-P 含量超过玉米阈值，即可保障玉米正常生长对土壤磷的需求，但不能满足小麦茎秆生长对磷的需求，进而影响了小麦的高产。当土壤 Olsen-P 达到小麦阈值后，小麦茎秆磷含量提升了 11.2%，达到最大磷含量的 80.5% (图 5)，基本保障了小麦茎秆对磷的需求，最终可确保小麦获得较高的产量。

表 1 作物植株相对磷含量与土壤 Olsen-P 的米切里西模型

Table 1 Response of relative P concentration to soil Olsen-P fitted by the Mitscherlich models for maize and wheat

植株器官 Crop organ	回归方程 Regression	R^2	n	M_p (%)	W_p (%)
小麦籽粒 Wheat grain	$Y = 94.02(1 - e^{-0.51x})$	0.58	123	92.0	93.9
玉米籽粒 Maize grain	$Y = 94.04(1 - e^{-0.44x})$	0.72	118	90.6	93.7
小麦茎秆 Wheat straw	$Y = 85.26(1 - e^{-0.22x})$	0.65	118	68.9	80.5
玉米茎秆 Maize straw	$Y = 89.55(1 - e^{-0.30x})$	0.66	117	80.1	87.8

注 (Note): M_p 、 W_p 分别表示玉米、小麦 Olsen-P 阈值对应的植株相对磷含量 M_p and W_p represented relative crop P concentration response to Olsen-P critical values for maize and wheat, respectively.

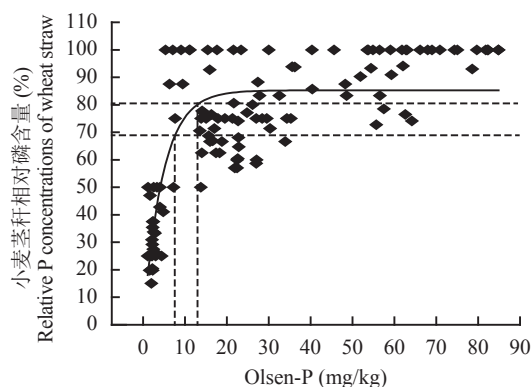


图 5 不同 Olsen-P 阈值对小麦茎秆相对磷含量的影响

Fig. 5 Effect of different Olsen-P critical values on relative P concentrations of wheat straw

[注 (Note): 垂直线分别代表玉米和小麦的 Olsen-P 农学阈值, 水平线分别代表玉米和小麦 Olsen-P 农学阈值对应的小麦茎秆相对磷含量 The vertical reference lines indicate Olsen-P critical values for maize and wheat and the horizontal reference lines indicate the corresponding relative wheat straw P concentration respectively.]

3 讨论

不施磷处理, 磷素从土壤中的有机或无机物中释放来供给作物生长, 这种释放会以一定的速率持续多年, 释放速率大小由初始土壤磷含量和土壤性质决定^[16-17]。随着时间的变化, 储备磷的释放速率下降, 因此供给作物生长需要的磷肥缺乏量相应地增加, 不施磷肥处理作物产量有降低趋势, 但小麦比玉米产量下降更多, 主要是因为玉米根系分泌的羧酸酯等可使根系周围土壤酸化, 活化了土壤中的无机磷, 增强了玉米对磷的吸收^[18-19]。多年小麦产量的分析显示, 不施磷处理小麦产量不断下降, 本试验中最大产量随施肥时间的增加而增大, 因此后者与前者的比值有较大的增加。同时, 有报道称现代的栽培品种比以前品种提高了对氮肥的利用, 而有效磷的降低将阻止作物对氮肥的利用效率^[20], 这可能可以解释为什么不施磷处理小麦产量与最大产量之间的差距越来越大。

不同作物对磷素缺乏的敏感性不同, 依据多年不施磷肥处理平均相对产量可知, 小麦对磷敏感性更高, 该结论和 Colomb 等^[14]认为硬质小麦对磷最敏感的结论一致。

前人研究结果显示, 玉米 Olsen-P 农学阈值范围为 3.9~17.3 mg/kg^[3, 11, 14, 21], 小麦 Olsen-P 农学阈值范围为 4.9~20.0 mg/kg^[11, 14, 22-23], 本研究使用米切里西指数模型获取的玉米 Olsen-P 阈值为 7.5 mg/kg, 小麦 Olsen-P 阈值为 13.1 mg/kg, 符合前人研究结果。

玉米 Olsen-P 农学阈值低于小麦, 该结论和 Colomb 等^[14]认为小麦对磷的需求大于玉米的结论相同, 然而本研究的小麦、玉米 Olsen-P 阈值均低于后者; 但和席雪琴等^[9]研究获取的玉米磷农学阈值高于小麦的结论不同。产生这些差异的原因主要是因为不同研究的区域、土壤类型、管理措施及气候环境不同。因此, 在特定区域和一定的土壤类型和种植模式下, 有必要对当地主要作物的磷农学阈值进行研究和确定, 为指导磷肥用量提供科学依据。Barrow 等^[24]的研究认为, 由于小麦越冬期较低的生长温度减少了根系活性和土壤磷的扩散, 从而抑制了小麦对磷的吸收, 本研究区域小麦越冬期多年的平均温度仅为 1.6°C, 小麦正常生长需要更多的土壤磷素, 这也解释了为什么本研究中的小麦 Olsen-P 农学阈值高于玉米。

由 ³²P 同位素标记试验可知, 土壤中已有磷水平显著影响小麦和玉米对施入磷肥的利用效率^[25-26]。Singh 等使用三维米切里西模型, 拟合同一地区土壤磷水平和施磷量对小麦和玉米磷阈值的影响, 结果显示, 玉米对原有土壤磷素利用率较高, 对施磷量要求较低, 小麦则相反^[27]。因此, 考虑地力贡献对土壤供磷能力的影响, 确定可有效提升磷肥利用效率的土壤磷阈值显得非常重要, 这将是进一步研究的方向。

4 结论

1) 小麦-玉米轮作体系下, 获得最大相对产量的 95% 时, 典型潮土区土壤 Olsen-P 农学阈值小麦为 13.1 mg/kg, 玉米为 7.5 mg/kg。

2) 土壤磷水平较低时, 小麦对磷缺乏更为敏感, 而玉米可保持相对较强的吸磷能力, 25 年不施磷处理玉米吸磷量是小麦的 1.4 倍。

3) 土壤 Olsen-P 含量达到玉米阈值, 而未能达到小麦阈值时, 可保障小麦籽粒正常生长对磷的需求, 但小麦茎秆磷含量仅能达到相对最大磷含量的 68.9%, 严重影响小麦的正常生长和获取较高产量的能力。土壤 Olsen-P 含量提高到小麦阈值后, 小麦茎秆磷含量提高到相对最大磷含量的 80.5% 以上, 进而可保障小麦获得较高的产量。

4) 土壤磷素养分充足时, 小麦对磷的吸收量大于玉米, 且主要是由于小麦茎秆磷含量和吸磷量随土壤 Olsen-P 含量的增加而大幅度增加。

参考文献:

[1] Wang B, Li J M, Ren Y, *et al.* Validation of a soil phosphorus

- accumulation model in the wheat-maize rotation production areas of China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 178: 42–48.
- [2] Johnston A E, Syers J K. Changes in understanding the behavior of soil and fertilizer phosphorus: implications for their efficient use in agriculture [C]. International Fertiliser Society, 2006.
- [3] Mallarino A P, Blackmer A M. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn[J]. *Agronomy Journal*, 1992, 84(5): 850–856.
- [4] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和 Olsen-P 的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 90–98.
Qu J F, Li J M, Xu M G, *et al.* Total-P and Olsen-P dynamics of long term experiment without fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 90–98.
- [5] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 789–794.
Liu E K, Zhao B Q, Hu C H, *et al.* Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 789–794.
- [6] Johnston A E, Poulton P R, White R P. Plant-available soil phosphorus. Part II. The response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(1): 12–21.
- [7] Poulton P R, Johnston A E, White R P. Plant-available soil phosphorus. Part I. The response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(1): 4–11.
- [8] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, *et al.* The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(1–2): 27–37.
- [9] 席雪琴, 孙本华, 陈勇, 等. 塿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.
- [10] Shi L L, Shen M X, Lu C Y, *et al.* Soil phosphorus dynamic, balance and critical P values in long term fertilization experiment in Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2446–2455.
- [11] Tang X, Ma Y, Hao X, *et al.* Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 323(1–2): 143–151.
- [12] Jordan-Meille L, Rubæk G H, Ehlert P A I, *et al.* An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(4): 419–435.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000.
- [14] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, *et al.* Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(2): 154–165.
- [15] 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.
- [16] Sharpley A N, Jones C A, Gray C, *et al.* A simplified soil and plant phosphorus model: II. Prediction of labile, organic, and sorbed phosphorus[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(4): 805–809.
- [17] Jackson G D, Kushnak G D, Carlson G R, *et al.* Correlation of the Olsen phosphorus soil test: Winter wheat response[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1991, 22(9–10): 907–918.
- [18] Zhang F, Shen J, Jing J, *et al.* Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China[A]. Xu J M, Huang P. Molecular environmental soil science at the interfaces in the Earth's critical zone[A]. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 52–54.
- [19] Neumann G, Römheld V, Waisel Y, *et al.* Root-induced changes in the availability of nutrients in the rhizosphere[J]. *Cheminform*, 2003, 34 (4): 617–649.
- [20] Brancourt-Hulmel M, Doussinault G, Lecomte C, *et al.* Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992[J]. *Crop Science*, 2003, 43(1): 37–45.
- [21] Mallarino A P, Atia A M. Correlation of a resin membrane soil phosphorus test with corn yield and routine soil tests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 266–272.
- [22] Johnston A E, Lane P W, Mattingly G E G, *et al.* Effects of soil and fertilizer P on yields of potatoes, sugar beet, barley and winter wheat on a sandy clay loam soil at Saxmundam Suffolk[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1986, 106(1): 155–167.
- [23] Bollons H M, Barraclough P B. Assessing the phosphorus status of winter wheat crops: inorganic orthophosphate in whole shoots[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1999, 133(3): 285–295.
- [24] Barrow N J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications[J]. *Plant and Soil*, 2015, 397(1–2): 401–409.
- [25] Saroa G S, Biswas C R, Vig A C. Phosphate utilization by maize under differential residual P fertility[J]. *Journal of Nuclear Agriculture and Biology*, 1991, 19(4): 221–226.
- [26] Saroa G S, Biswas C R, Vig A C. Residual and applied P availability to wheat[J]. *Journal of Nuclear Agriculture and Biology*, 1992, 21: 221–226.
- [27] 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.