

有机无机外源磷素长期协同使用对潮土磷素有效性的影响

郭斗斗¹, 黄绍敏^{1*}, 张珂珂¹, 张水清¹, 宋晓¹, 王柏寒^{1,2}, 岳克¹

(1 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘要:【目的】施入外源磷素是提升土壤有效磷的重要途径, 不同磷源在土壤中的化学行为和存在形态对土壤磷素有效性起决定作用。研究有机无机外源磷素长期配合使用的协同关系及其对潮土磷素有效性的影响, 可为合理减少磷肥施用, 提高磷肥利用率和科学管理土壤磷素资源提供理论依据。【方法】本研究基于 25 年肥料定位试验, 选取不施磷肥 (P0)、单施化肥 (FP)、化肥与有机肥配施 (FP+M)、化肥与秸秆配施 (FP+S) 四个处理, 分析了化肥、有机肥、秸秆作为主要外源磷素长期协同使用对作物可持续生产能力、磷肥利用效率、施肥后效及潮土磷素形态和有效性的影响。【结果】连续处理 25 年后, P0、FP、FP+M、FP+S 处理小麦产量变异系数分别为 49.0%、14.8%、17.2%、15.4%, 玉米产量变异系数分别为 28.7%、27.1%、24.4%、23.2%, 产量的稳定性均比不施磷提升, 尤其是小麦产量稳定性显著增加; P0、FP、FP+M、FP+S 处理产量的可持续性指数小麦依次为 0.23、0.62、0.60、0.64, 玉米依次为 0.45、0.47、0.53、0.52, 施磷对小麦产量的可持续指数影响比玉米更大。FP、FP+M、FP+S 处理的磷素累积生理效率分别为 188.3、163.2 和 177.6 kg/kg, 平均后效分别为 1.30%、0.71% 和 1.16%, 单施化肥磷素的效果高于磷肥配施有机肥、秸秆。长期不施磷肥, 土壤无机磷各组分含量均降低, 且主要消耗了土壤中无效态的 O-P, P0 处理减少的 O-P 占无机磷减少量的 41.3%。长期投入化学磷素, 降低了无效态磷的比例, 但土壤对化学磷素的固定作用仍较强, FP 处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量由 12.0% 提升到 21.1%, 无效态的 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 由 77.7% 减少为 62.9%(占比仍超过 60%), 土壤 Olsen-P 由 6.4 mg/kg 提升到 20.7 mg/kg。化学磷素与有机肥磷素协同使用可促使无效态磷向有效态磷及缓效态磷转化, 提升土壤磷素有效性, FP+M 处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占比由 2.0% 提升到 5.4%, 缓效态的 Al-P、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P 占比增加 25.6 个百分点, 无效态的 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比减少 29.0 个百分点, 土壤 Olsen-P 含量由 6.3 mg/kg 提升到 51.8 mg/kg。秸秆磷素增加了具有缓冲作用的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量, 降低了无效态磷含量, 提升了土壤潜在供磷能力, 与 FP 相比, FP+S 处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占比增加 7.9 个百分点, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比减少 6.5 个百分点, 土壤 Olsen-P 含量由 6.3 mg/kg 提升到 21.7 mg/kg。【结论】投入外源磷素均可显著提高作物产量、提升产量稳定性和产量可持续性指数。在小麦玉米轮作体系下, 磷肥加秸秆最有利于维持土地的可持续生产能力。单施磷肥, 磷素的后效和累积生理效率最高, 但在土壤中的固定也高; 有机无机磷协同使用可快速提升土壤磷素的有效性, 对维持磷素组分结构和土壤质量作用显著; 无机磷素与秸秆磷素协同使用对土壤磷素具有较强的激发效应, 可减弱土壤对磷素的固定作用, 提升土壤潜在供磷能力。

关键词: 外源磷素; 有机无机磷协同; 磷素有效性; 磷形态

Effects of long-term synergistic use of organic and inorganic exogenous P on phosphorus availability in fluvo-aquic soil

GUO Dou-dou¹, HUANG Shao-min^{1*}, ZHANG Ke-ke¹, ZHANG Shui-qing¹, SONG Xiao¹, WANG Bo-han^{1,2}, YUE Ke¹
(1 Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;
2 Henan Agricultural University, College of Resources & Environment, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: 【Objectives】Application of exogenous phosphorus is an important way to increase phosphorus availability of soil. The forms and their chemical behaviors of different phosphorus sources in soil play a decisive role in the effectiveness of soil phosphorus. Understanding of the synergistic relationship between long-term

收稿日期: 2018-06-05 接受日期: 2018-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0301103-3, 2016YFD0200109-07, 2016YFD0300809-3); 2018 年度河南省科技攻关项目 (182102310055); 2018 年河南省农业科学院自主创新专项基金资助。

联系方式: 郭斗斗 E-mail: guodoudou_822@163.com; * 通信作者 黄绍敏 E-mail: hsm503@126.com

combined use of organic and inorganic exogenous phosphorus and its effect on phosphorus availability in fluvo-aquic soil can provide a theoretical basis for rationally reducing the application rate of phosphate fertilizers and increasing their utilization rate, and scientifically managing soil phosphorus resources. **【 Methods 】** A 25 year in situ fertilization experiment was used. Four fertilization treatments were investigated: no phosphorus fertilizer (P0), chemical fertilizer only (FP), chemical fertilizer plus organic manure (FP+M) and chemical fertilizer plus maize straw (FP+S). The effects of long-term combined use of chemical phosphate, organic manure, and straw as major exogenous phosphorus on sustainable production capacity, phosphorus fertilizer use efficiency(PUE), fertilizer after-effect, soil phosphorus forms and availability were analyzed. **【 Results 】** Continuous application of phosphorus for 25 years, the coefficient of variation of P0, FP, FP+M and FP+S treatments for wheat yield were 49.0%, 14.8%, 17.2%, 15.4% respectively, and for maize yield were 28.7%, 27.1%, 24.4%, 23.2% respectively, the stability of yield was higher than that of no phosphorus fertilizer treatment, especially the increase in wheat yield stability was significant; sustainable yield index (SYI) of P0, FP, FP+M and FP+S treatments for wheat were 0.23, 0.62, 0.60, 0.64 respectively, and for maize were 0.45, 0.47, 0.53, 0.52 respectively, the effect of phosphorus application on SYI of wheat yield was greater than that of maize. The accumulative phosphorus physiology efficiency(APPE) of FP, FP+M and FP+S treatments were 188.3 kg/kg, 163.2 kg/kg and 177.6 kg/kg respectively. Chemical phosphate had the highest APPE, when combined with organic fertilizer or straw, the APPE was reduced. The average after-effects of FP, FP+M and FP+S treatments were 1.30%, 0.71% and 1.16% respectively, application of inorganic phosphate fertilizer alone had the highest after-effect. Long-term no application of phosphorus fertilizer, the content of soil inorganic phosphorus decreased, and mainly consumed invalid O-P, the reduction of O-P in P0 treatment accounted for 41.3% of the inorganic phosphorus reduction. Long-term application of chemical phosphate fertilizer reduced the proportion of invalid phosphorus, but the fixation of chemical phosphorus was still strong, by FP treatment the content of $\text{Ca}_8\text{-P}$ increased from 12.0% to 21.1%, the content of invalid O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ decreased from 77.7% to 62.9% (still more than 60%) and the content of Olsen-P increased from 6.4 mg/kg to 20.7 mg/kg. The synergistic use of chemical phosphorus and organic phosphorus could promote the conversion of invalid phosphorus into available phosphorus and slow-effective phosphorus, which could improve soil phosphorus efficiency, by FP+M treatment the proportion of $\text{Ca}_2\text{-P}$ was increased from 2.0% to 5.4%, the proportion of slow-effective Al-P, $\text{Ca}_8\text{-P}$ and Fe-P increased by 25.6 percentage points, the proportion of invalid O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ decreased by 29.0 percentage points, and the content of Olsen-P increased from 6.3 mg/kg to 51.8 mg/kg. The application of straw phosphorus increased the content of slow-effective $\text{Ca}_8\text{-P}$, reduced the content of invalid phosphorus, and increased the potential phosphorus supply capacity of soil. Compared with FP the proportion of $\text{Ca}_8\text{-P}$ by FP+S treatment increased by 7.9 percentage points, the proportion of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ decreased by 6.5 percentage points, and the content of Olsen-P increased from 6.3 mg/kg to 21.7 mg/kg. **【 Conclusions 】** The input of exogenous phosphorus significantly increased crop yield, yield stability and sustainable yield index. FP+S treatment maintained the best sustainable production capacity in the wheat-maize rotation system. Using inorganic phosphorus alone had the highest fertilizer after-effect and accumulative phosphorus physiology efficiency, but the fixation of chemical phosphorus in soil was high. The synergistic use of inorganic phosphorus and organic fertilizer could rapidly improve the efficiency of soil phosphorus, and had a significant effect on maintaining the composition of phosphorus fractions and soil quality. The synergistic use of inorganic phosphorus and straw phosphorus has a strong excitation effect on soil phosphorus, and weakens the fixation of phosphorus in soil, and enhances the potential phosphorus supply capacity of soil.

Key words: exogenous phosphorus; synergistic effect of organic and inorganic phosphorus; phosphorus availability; inorganic phosphorus fraction

磷是植物生长必需的营养元素, 土壤磷素有效性高低直接影响作物的正常生长和产量水平, 投入外源磷素可以有效提升土壤磷素有效性。化学磷肥是最常用的外源无机磷素, 然而长期使用化学磷肥, 土壤磷素不断累积但有效性降低, 磷肥利用率及产量效应不断下降^[1-2], 造成磷矿资源消耗的同时, 土壤质量水平下降, 环境风险增大^[3-4]。为改善长期化学磷素投入带来的弊端, 有机肥和秸秆作为重要的有机磷源与化肥配合投入土壤, 成为重要的外源磷素^[5-6]。受外源磷素载体性质的影响, 不同磷源的磷素组分特征及形态转化不同。外源磷素在土壤中的化学行为和存在形态决定土壤磷素的有效性^[7-8]。已有研究表明, 施用有机肥可促进土壤中磷素活化, Lourenzi 等^[9]的研究显示施用畜禽粪便可增加土壤剖面中速效磷的含量; Sharpley 等^[10]研究发现大量施用有机肥后产生的有机酸可降低土壤对磷的吸附强度; Niu 等^[11]研究显示秸秆还田可降低土壤对磷酸根离子的吸附量, 提高磷肥的利用率; 刘盼盼等^[12]研究发现在化肥基础上配施有机肥和秸秆, 土壤速效磷和全磷含量、磷素活化系数及中性磷酸酶活性均显著增加。外源磷素载体性质是影响磷素形态转化的主要因素, 不同外源磷素在农田系统中的转化特性直接影响作物对磷素的吸收利用^[13]。为进一步明确化肥磷素、有机肥磷素和秸秆磷素作为主要外源磷素长期协同使用的生物有效性、潮土磷素行为和组分转化特征, 本研究依托 25 年的潮土区长期肥料定位试验, 分析冬小麦-夏玉米轮作体系下, 化学磷肥、有机肥、秸秆长期配合使用对作物可持续生产能力、磷肥利用效率、施肥后效以及潮土磷素形态及有效性的影响, 以期合理减少磷肥施用、提高磷肥利用率和科学管理土壤磷素资源提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

长期定位试验设在“国家潮土肥力与肥料效益

长期定位试验基地”(113°40′42″E、34°47′55″N), 1990 年开始定位试验。该区域属于温带季风气候, 年均降雨量约 660 mm, 主要集中于 7、8、9 月。试验区基础土壤耕层 (0—20 cm)、亚耕层 (20—40 cm) 基本属性见表 1。

1.2 试验设计

本研究基于 1990—2015 年间不施磷肥处理 (P0)、单施化肥处理 (FP)、化肥与有机肥配施处理 (FP+M)、化肥与秸秆配施处理 (FP+S) 的试验结果, 分析三种外源磷素及其协同使用对潮土磷素行为的影响。所有试验区每年施用氮肥为尿素, 2002 年前钾肥为硫酸钾, 之后为氯化钾, 磷肥为普过磷酸钙; 1990—1999 年施用的有机肥为马粪, 2000—2010 年为牛粪, 2011—2015 年为商品有机肥。FP 处理小麦季施氮肥 (以 N 计) 165 kg/hm², 磷肥 (以 P₂O₅ 计) 和钾肥 (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) 和钾肥 (以 K₂O 计) 各 93.75 kg/hm²。每年施肥前测定有机肥及玉米秸秆的氮、磷、钾含量。FP+M 处理小麦季在施用相当于 FP 处理磷、钾肥的基础上增施有机肥, 有机肥用量以含氮量计算, 相当于 FP 处理氮量的 70% 来自有机肥, 另 30% 的氮量由尿素补充; 玉米季施肥量同 FP 处理; FP+S 处理在小麦季施用相当于 FP 处理磷、钾肥的基础上, 将前茬玉米秸秆粉碎还田, 1991—2001 年间, 相当于 FP 处理氮量的 70% 来自秸秆 (不足部分由同期其他试验区秸秆补充), 另 30% 的氮量由尿素补充, 2002—2015 年间则为前茬总秸秆量, 不足 FP 处理的氮量以尿素补充, 玉米季施肥量同 FP 处理。

每季磷、钾肥和有机肥作为底肥一次性施入, 氮肥按基追比 6 : 4 施入。25 年间, FP 处理累积投入化肥磷素 1926.1 kg/hm²; FP+M 处理累积投入磷素 3524.6 kg/hm², 其中化肥磷素占 54.6%, 有机肥磷素占 45.4%; FP+S 处理累积投入磷素 2160.4 kg/hm², 其中化肥磷素占 89.2%, 有机肥磷素占 10.8%。

表 1 试验初期土壤基本属性
Table 1 Basic properties of soil at the initial of experiment

土层深度 Soil depth (cm)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	缓效钾 Slowly avail. K (mg/kg)	有效氮 Avail. N (mg/kg)	有效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	容重 Bulk density (g/cm ³)	pH
0—20	11.3	0.70	0.64	670.2	56.9	6.9	72.8	1.31	8.47
20—40	8.2	0.53	0.56	647.2	51.9	4.5	65.1	1.41	8.49

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或当天。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, 玉米地上部植株全部移出。各年度依据土壤状况适当灌溉, 保证作物正常生长。

1.3 样品采集及测定方法

收获时各小区取 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、颖壳/穗轴三部分采样, 带回室内 105℃ 下杀青 30 min, 后烘干至恒重, 粉碎过 0.15 mm 筛备用。小麦季收获后使用五点法采集各处理土壤样品, 带回室内风干, 拣去杂物后, 研磨过筛备用。

植株全磷含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—钼锑抗比色法测定; 土壤全磷含量使用 H₂SO₄-HClO₄ 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; 土壤有机磷及无机磷分级使用顾益初等^[14]的连续浸提法测定。

1.4 计算及统计方法

磷肥累积利用效率 (accumulative phosphorus use efficiency, APUE) 计算公式如下:

$$\text{APUE}(\%) = (\text{施磷处理作物累积吸磷量} - \text{不施磷处理作物累积吸磷量}) / \text{累积施磷量} \times 100$$

磷肥累积生理效率 (accumulative phosphorus physiology efficiency, APPE) 计算公式如下:

$$\text{APPE}(\text{kg/kg}) = (\text{施磷处理作物累积产量} - \text{不施磷处理作物累积产量}) / (\text{施磷处理作物累积吸磷量} - \text{不施磷处理作物累积吸磷量})$$

本研究使用 Excel 软件对数据进行统计分析和作图, 使用 SPSS 软件进行 LSD 差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同外源磷素对产量可持续性指数的影响

长期投入不同外源磷素, 土壤养分及理化性质有较大的改变, 进而对作物产量产生影响。在一定的施肥条件及管理措施下, 产量标准方差 (standard deviation, SD) 和变异系数 (coefficient of variation, CV) 可用于表达年度间产量的变异或稳定状况^[15-16], 产量可持续性指数 (sustainable yield index, SYI) 可用于评价农田系统是否能持续生产, SYI 值越大系统的可持续性越好^[17-18]。本研究基于 25 年的长期定位试验, 产量的变异主要来自土壤肥力的变化和气候因素。表 2 表明, 与 P0 相比, FP、FP+M、FP+S 处理小麦和玉米产量都极显著增加, 小麦平均增产 170.5%、159.8% 和 172.0%, 玉米平均增产 68.3%、75.2% 和 81.1%; FP、FP+M、FP+S 处理比 P0 处理年际间产量稳定性和可持续性指数均有提高, 且在小麦季增幅更大。小麦季 FP 处理产量稳定性最高, FP+S 处理产量可持续性指数最大, 玉米季的 FP+S、FP+M 处理产量稳定性和可持续性指数基本一致, 高于其他处理。说明小麦玉米轮作体系下, 投入外源磷素均可有效提高作物产量, 提升产量稳定性和产量可持续性指数, 而 FP+S 处理在小麦玉米轮作体系下可保持最高的可持续生产能力。

2.2 不同外源磷素的利用效率

不同外源磷素作为肥料进入土壤后, 经过植株、土壤、微生物的共同作用, 土壤各形态磷素达到动态平衡, 供给作物生长需要。多年定位试验结果证实磷肥累积利用率高于单季表观利用率, 表明施用磷肥有较长时间的后效^[19]。为反映作物利用外源磷素和吸收磷素转化为经济产量的能力, 本研究使

表 2 长期投入不同外源磷素对小麦玉米轮作体系产量标准差、变异系数和可持续性指数的影响

Table 2 Sustainable yield index (SYI), Coefficient of variation (CV) and standard deviation (SD) influenced by various phosphorus sources in wheat-maize cropping systems

处理 Treatment	小麦 Wheat				玉米 Maize			
	平均产量 Mean yield (kg/hm ²)	标准差 SD (kg/hm ²)	变异系数 CV (%)	可持续性指数 SYI	平均产量 Mean yield (kg/hm ²)	标准差 SD (kg/hm ²)	变异系数 CV (%)	可持续性指数 SYI
P0	2337.8	1146.3	49.0	0.23	4246.4	1219.1	28.7	0.45
FP	6324.7	938.6	14.8	0.62	7144.7	1935.9	27.1	0.47
FP+M	6073.8	1042.2	17.2	0.60	7438.1	1814.5	24.4	0.53
FP+S	6359.7	970.7	15.4	0.64	7691.6	1781.4	23.2	0.52

用磷肥累积利用效率和累积生理效率分析不同外源磷素被作物利用的程度。

磷肥累积利用效率以多年施用的磷肥被作物吸收的比例对外源磷素的利用情况进行评价。图 1 显示, 随施肥时间的增加, 作物对外源磷素的累积利用率逐年增加, FP 和 FP+S 处理累积利用率快速增加, 25 年累积利用率分别为 47.5% 和 48.5%, 比试验初期提高了 36.7 和 31.2 个百分点; FP+M 处理累积磷肥利用率缓慢增加, 25 年后磷肥累积利用率为 30.1%, 比试验初期提高了 19.5 个百分点。磷肥累积利用率与施肥时间有极显著的线性关系, 以施肥时间每增加 1 年磷肥累积利用率的增量作为后效, FP、FP+M、FP+S 处理平均后效分别为 1.30%、0.71% 和 1.16%。磷素养分供应量高于作物吸磷量后, 肥料累积利用率因施磷量的增加而减少。施磷量较适宜的 FP 与 FP+S 处理, 随施肥时间的增加, 磷肥累积利用率有较快的增加, 磷肥后效较大,

FP+M 处理因常年施磷量较高, 磷肥累积利用率明显低于 FP 与 FP+S 处理, 磷肥后效较小。

磷肥累积生理效率指一定阶段内作物吸收一定数量的磷素增加的经济产量, 反映作物吸收磷量转化为经济产量的能力。长期投入不同外源磷素磷肥累积生理效率变化趋势如图 2 所示。随施肥时间的延长, 磷肥累积生理效率不断提高, 说明外源磷素的投入使作物减弱了对土壤基础磷素的依赖, 作物增产的肥料效应不断累积; 最初 4~5 年磷肥累积生理效率快速增长, 之后增长速度渐缓趋于稳定, 这主要是由于试验初期土壤基础磷水平较低, 投入外源磷素的处理作物产量及吸磷量快速增加, 而不施磷处理产量及吸磷量因磷素消耗下降较多; 随施肥时间的增加, 施磷处理土壤磷水平不断提高, 土壤磷素水平达到作物高产需求量, 产量增长缓慢, 磷肥的增产效应减弱, 累积生理效率增速变缓。连续施磷 25 年, FP、FP+M、FP+S 处理的累积生理效率

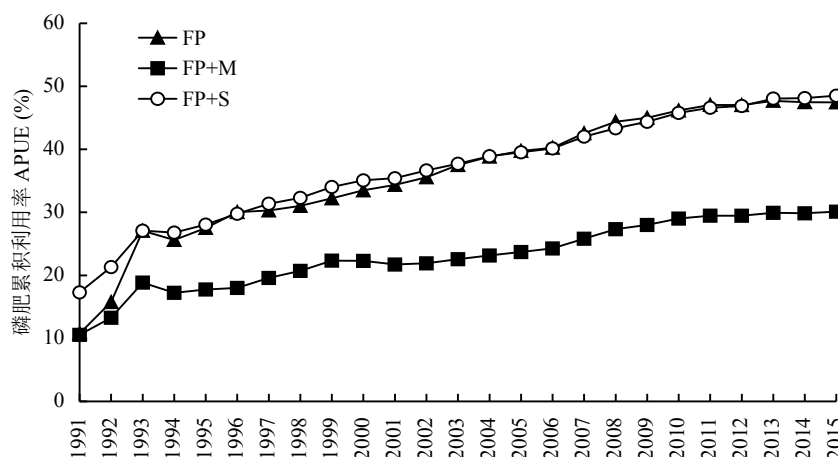


图 1 长期投入不同外源磷素对累积利用率的影响

Fig. 1 Accumulative phosphorous use efficiencies (APUE) under long-term exogenous phosphorus fertilizer input

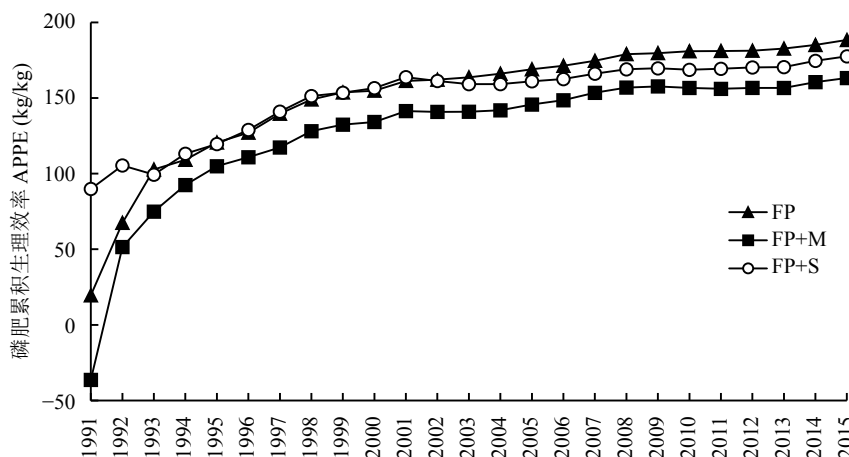


图 2 长期投入不同外源磷对磷累积生理效率的影响

Fig. 2 Accumulative phosphorous physiological efficiencies (APUE) under long-term exogenous phosphorus input

分别为 188.3 kg/kg、163.2 kg/kg 和 177.6 kg/kg, 表明单独施用化学磷素累积生理效率最高, 配施有机肥或秸秆磷素, 累积生理效率有所下降。特别是 FP+S 处理试验前 2 年, 磷肥累积生理效率显著高于 FP 和 FP+M 处理, 说明化肥磷素与秸秆磷素配施对土壤磷素具有较强的激发效应, 这主要是由于在石灰性土壤中投入秸秆磷素可降低土壤 pH 和 pH 缓冲能力, 减少土壤中碳酸钙含量^[20], 进而提高磷素活化效率, 土壤磷水平较低时可迅速提升磷素生产力。

2.3 不同外源磷素长期协同使用对土壤各形态磷的影响

不同外源磷素通过改变土壤各形态磷的含量、化学行为、存在形态, 逐步影响土壤中磷的转化、运移及供磷能力。对比 2015 年和 1990 年土壤无机磷、有机磷和全磷含量可知 (表 3), P0 处理土壤全磷减少 83.8 mg/kg, 且主要是由于无机磷减少 (86.6 mg/kg) 引起的, 有机磷总量维持不变, 说明长期不施磷土壤, 作物生长过程中植物根系分泌物及微生物活动等共同作用可促使土壤中无机磷活化供作物生长使用。FP 处理无机磷增加 239.4 mg/kg, 有机磷也略有增加 (14.1 mg/kg), 说明长期单独投入化学磷素, 可有效增加无机磷库总量, 同时对土壤有机磷库也略有补充。FP+M 处理, 因化学磷素和有机肥素磷的协同作用, 土壤全磷增加 448.8 mg/kg, 其中无

机磷增加了 377.0 mg/kg, 有机磷总量增加 71.8 mg/kg, 说明投入有机磷素补充了土壤有机磷库, 同时有效增加了土壤中无机磷的含量。FP+S 处理土壤无机磷增加了 282.3 mg/kg, 有机磷减少 20.4 mg/kg, 说明秸秆磷素和无机磷素配合使用, 可促使土壤中有机磷转化为无机磷, 增加土壤中无机磷库比例。

1990 年不同处理基础土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的平均含量分别为 11.1 mg/kg、67.0 mg/kg、22.6 mg/kg、24.2 mg/kg、135.3 mg/kg、298.7 mg/kg。由表 4 可知, 连续投入外源磷素 25 年后, P0 处理土壤无机磷各组分含量均降低, 以 O-P 降低最多为 35.8 mg/kg, 占无机磷减少总量的 41.3%。其次是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量降低了 15.3 mg/kg, 占无机磷降低总量的 17.6%, 说明长期不施磷肥, 主要消耗了土壤中的 O-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 。连续投入外源磷素, 除 FP+M 处理 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量减少外, 其他处理各无机磷各组分均有增长, 且主要增加的是具有缓效功能的 $\text{Ca}_8\text{-P}$, 而 Al-P 、 Fe-P 增加量均为无机磷增量的 15% 和 11%, 说明潮土中 Al-P 、 Fe-P 的转化与外源磷素性质基本无关; FP+M 处理有效性高的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和具有缓效功能的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 增量分别是 FP 处理的 3.2 和 2.4 倍, 有效态磷含量最高; FP+S 处理显著减少了无效态的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 的含量, 增加了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量, 缓效态磷含量最高。

表 3 不同外源磷素长期投入对土壤磷库的影响 (mg/kg)

Table 3 Effects of long-term different exogenous P input on soil phosphorus pool from 1990 to 2015

处理 Treatment	1990			2015		
	无机磷总量 Total inorganic P	有机磷总量 Total organic P	全磷 Total P	无机磷总量 Total inorganic P	有机磷总量 Total organic P	全磷 Total P
P0	570.2	80.1	650.3	483.6	82.9	566.5
FP	542.2	97.9	640.1	781.6	112.0	893.6
FP+M	578.6	101.8	680.4	955.6	173.6	1129.2
FP+S	544.3	145.9	690.2	826.6	125.5	952.1

表 4 连续投入不同外源磷素 25 年后土壤无机磷各组分的变化量 (mg/kg)

Table 4 Change amounts of inorganic P fractions after 25 years' treatment of different exogenous P

处理 Treatment	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$
P0	-5.8	-15.3	-7.9	-10.0	-35.8	-11.9
FP	13.1	96.7	35.0	24.0	21.9	48.7
FP+M	41.6	235.6	53.7	46.7	19.3	-19.8
FP+S	16.0	167.6	46.8	30.3	7.0	14.7

因投入土壤中的外源磷素不同, 土壤无机磷组分形态转化及分布特征不同。由连续处理 25 年土壤无机磷各组分的变化量可知 (图 3), P0 处理无机磷各组分分布变化不大, 有效性高的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占比下降, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比略有上升, 土壤 Olsen-P 由 6.5 mg/kg 降低到 2.0 mg/kg; FP 处理具有缓效功能的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 由 12.0% 提升到 21.1%, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占比略有增加, 无效态 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 由 77.7% 减少为 62.9%, 土壤 Olsen-P 由 6.4 mg/kg 提升到 20.7 mg/kg, 说明长期投入化学

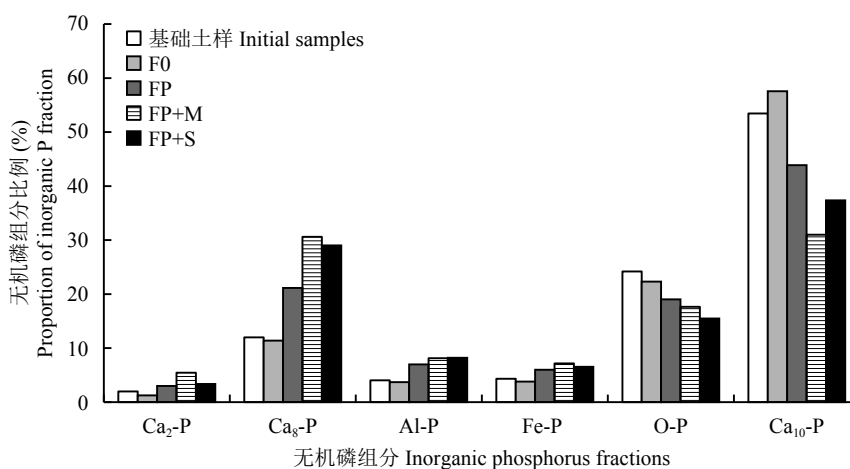


图3 基础土壤和不同外源磷素处理 25 年后土壤各无机磷组分的百分比

Fig. 3 Proportion of P fractions in total inorganic phosphorus in the initial soil and soils under different exogenous phosphorus input for 25 years

[注 (Note): 基础土壤为 1990 年采集 Initial soil was from 1990; 处理土样为 2015 年采集 The treatment soil samples were in 2015; F0—不施磷肥 No exogenous input; FP—单施无机磷肥 Inorganic P fertilizer input; FP+M—无机磷肥配合有机肥 Inorganic P plus manure P; FP+S—无机磷肥配施秸秆 Inorganic P plus straw P.]

磷素, 整体降低了无效态 O-P 和 Ca₁₀-P 的比例, 但无效态磷占比仍达到 60% 以上, 表明潮土对化学磷素有较强的固定作用。FP+M 处理 Ca₂-P 占比由 2.0% 提升到 5.4%, 缓效态 Al-P、Ca₈-P、Fe-P 占比增加 25.6 个百分点, 无效态 O-P 和 Ca₁₀-P 占比减少 29.0 个百分点, 土壤 Olsen-P 由 6.3 mg/kg 提升到 51.8 mg/kg, 说明化学磷素与有机肥磷素协同使用可促使无效态磷向有效态及缓效态磷转化, 显著提升土壤磷素有效性; FP+S 处理无机磷组分分布与 FP 处理相似, 但 Ca₈-P 占比提高了 7.9 个百分点, Ca₁₀-P 的占比减少 6.5 个百分点, 土壤 Olsen-P 含量由 6.3 mg/kg 提升到 21.7 mg/kg, 与 FP 基本一致, 说明秸秆磷素可增加具有缓冲作用的 Ca₈-P 的含量, 降低无效态磷含量, 提升土壤潜在供磷能力; 然而与 FP 处理相比土壤磷素有效性提升不明显, 说明土壤 Olsen-P 含量主要由有效性高的 Ca₂-P 含量决定。

3 讨论

3.1 长期定位试验研究不同磷肥后效更具科学性

磷肥当季利用率较低, 但由于土壤对磷的强吸附作用, 使磷肥具有较长时间的后效^[21-22]。因受气候因素、土壤条件、作物品种等的影响, 用短期试验评价不同磷肥的累积效应和后效得出的结论与长期试验的结果有差异。长期定位试验经历不同气候年份、不同作物品种, 因而可以减少试验误差, 更科学的说明磷肥的有效利用程度。本研究中 25 年定位

试验获取的最大磷肥累积利用率为 48.5%, 与李渝等^[23]长期试验的结果相近; 不同外源磷素长期定量施入土壤, 其磷肥后效趋于稳定, 本研究中 FP、FP+M、FP+S 处理磷肥平均后效分别为 1.30%、0.71% 和 1.16%。

3.2 外源磷素载体性质对磷素形态转化和有效性的影响差异

由于石灰性土壤中 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量较高, 而且土壤 pH 值为 8 左右, 不同外源磷素投入土壤后, 容易形成难溶性的 Ca₃(PO₄)₂, 并逐渐向更稳定的 Ca₈-P、Ca₁₀-P 等无效磷转化^[24], 降低了磷肥的当季有效性。FP+M 比 FP 处理磷肥的有效性高, 主要由于有机肥腐解过程中产生的有机酸化物降低了土壤 pH, 减少了外源磷素转化为难溶性的 Ca₁₀-P、O-P 的比重, 增加了有效性较高的 Ca₂-P、Al-P, 以及具有持续供磷能力的 Ca₈-P、Fe-P 的含量; 同时每年进入土壤的大量有机肥, 可显著提高酸性磷酸酶、脲酶和转化酶的活性, 促进了有机磷的矿化^[25], 从而提高磷肥的有效性。本研究 FP+M 处理经 25 年协同使用有机肥和化学磷肥, 提升了土壤中有机磷的含量, 并使大量有机磷转化为可供作物直接使用的有效态磷素, 土壤 Olsen-P 比 FP 处理提高了 31.1 mg/kg, 该结论和刘建玲等^[26]、谢林花等^[27]的研究相同。秸秆磷素的投入对难溶性 Ca₁₀-P、O-P 形成的抑制作用高于化学磷素, FP+S 处理土壤磷素潜在供磷能力较高, 但土壤磷素有效性提升不明显, 该结果与林诚等^[28]在研究南

方黄泥田磷库形态时,得出秸秆还田对土壤磷库总量与组分形态影响与使用化肥相比并不明显的结论不同。本研究中长期单独投入化学磷素土壤有机磷含量略有增加,这和 Reddy 等^[29]、黄庆海等^[30]研究认为使用化学磷素对耕层有机磷含量没有影响或使有机磷含量增加的结论一致。说明不同外源磷素载体性质是影响潮土磷素形态转化和有效性的主要因素。

4 结论

单施无机磷素或有机无机配合均可显著提高作物产量,提升产量稳定性和产量可持续性指数,磷肥与秸秆配施最有利于维持小麦玉米轮作体系的可持续生产能力,实现高产稳产。

单施磷肥、磷肥配施有机肥、磷肥配合秸秆的平均后效分别为 1.30%、0.71% 和 1.16%。单施磷肥的累积生理效率最高,配施有机肥或秸秆后有所降低。化肥磷素与秸秆磷素配施对土壤磷素具有较强的激发效应,可迅速提升磷素生产力。

长期单独投入化学磷素,可有效增加无机磷库总量,但土壤磷素更易转化为无效态的 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,磷素有效性不高。化学磷素和有机肥磷素协同使用,能有效维持潮土有机磷含量,增加可供作物直接利用的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和具有缓效作用的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 比例,提升土壤 Olsen-P 含量。化学磷素与秸秆磷素协同使用可减少土壤中难溶性的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比例,增加 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量,提升土壤潜在供磷能力。

Al-P、Fe-P 在潮土中的转化基本不受外源磷素性质的影响。

参 考 文 献:

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [2] 黄绍敏,宝德俊,皇甫湘荣,等. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与盈余的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(1): 102–108.
Huang S M, Bao D J, Huangfu X R, *et al.* Effect of long term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in fluvo-aquic soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1): 102–108.
- [3] 李书田,金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [4] Singh B R, Krogstad T K, Shinvay Y S, *et al.* Phosphorus fraction and sorption in P-enriched soils of Norway[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 73(2/3): 245–256.
- [5] 赵金花,张丛志,张佳宝. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 438–449.
Zhao J H, Zhang C Z, Zhang J B. Effect of straw returning via deep burial coupled with application of fertilizer as primer on soil nutrients and winter wheat yield[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 438–449.
- [6] 赵士诚,曹彩云,李科江,等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1441–1449.
Zhao S C, Cao C Y, Li K J, *et al.* Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(6): 1441–1449.
- [7] Li Y F, Luo A C, Wei X H, *et al.* Changes in phosphorus fractions, pH and phosphatase activity in rhizosphere of two rice genotypes[J]. *Pedosphere*, 2008, 18: 785–794.
- [8] Wang Y, Marschner P, Zhang F S. Phosphorus pools and other soil properties in the rhizosphere of wheat and legumes growing in three soils in monoculture or as a mixture of wheat and legume[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354: 283–298.
- [9] Lourenzi C R, Ceretta C A, Cerini J B, *et al.* Available content, surface runoff and leaching of phosphorus forms in a typical alfalfa treated with organic and mineral nutrient sources[J]. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 2014, 38(2): 544–556.
- [10] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P. Amounts, forms and solubility of phosphorus in soils receiving manure[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 2048–2057.
- [11] Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, *et al.* Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the north China plain[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 813–820.
- [12] 刘盼盼,周毅,付光玺,等. 基于秸秆还田的小麦-玉米轮作体系施肥效应及其对土壤磷素有效性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2014, 37(5): 27–33.
Liu P P, Zhou Y, Fu G X, *et al.* Effects of fertilization on crop yield and soil phosphorus availability based on the returning straw[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, 37(5): 27–33.
- [13] Terry J R, Bingah H, Zed R. Wheat canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326: 159–170.
- [14] 顾益初,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. *土壤*, 1990, 22(2): 101–102.
Gu Y C, Jiang B F. Methods of determination of inorganic phosphorus fractionation in calcareous soil[J]. *Soils*, 1990, 22(2): 101–102.
- [15] Yadav R L, Dwivedi B S, Pandey P K. Rice-wheat cropping systems: assessment of sustainability under green manuring and chemical fertilizer inputs[J]. *Field Crops Research*, 2000, 65: 15–30.
- [16] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, *et al.* Yield trends and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manure and fertilizers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68: 219–246.

- [17] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: issues and challenges[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69: 93-132.
- [18] Timsina J, Singh U, Badaruddin M, *et al.* Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice-wheat sequences of Bangladesh[J]. *Field Crops Research*, 2001, 72: 143-161.
- [19] 陈远学, 李汉邯, 周涛, 等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2799-2806.
- Chen Y X, Li H H, Zhou T, *et al.* Effects of phosphorus fertilization on leaf area index, biomass accumulation and allocation, and phosphorus use efficiency of intercropped maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 2799-2806.
- [20] Zhang Y, Zhang S, Wang R, *et al.* Impacts of fertilization practices on pH and the pH buffering capacity of calcareous soil[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2016, 62(5-6): 432-439.
- [21] Kuo S, Huang B, Bembenek R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(2): 116-123.
- [22] Saleque M A, Abedub M J, Bhuiyan N I, *et al.* Long-term effects of inorganic and organic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice[J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(1): 53-65.
- [23] 李渝, 刘彦伶, 张雅蓉, 等. 长期施肥条件下西南黄壤旱地有效磷对磷盈亏的响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(07): 2321-2328.
- Li Y, Liu Y L, Zhang Y R, *et al.* Response of Olsen-P to P balance in yellow soil upland of southwestern China under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(07): 2321-2328.
- [24] 来璐, 郝明德, 彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 65-67.
- Lai L, Hao M D, Peng F L. Development of researches on soil phosphorus[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 65-67.
- [25] 李和生, 王林权, 赵春生. 小麦根际磷酸酶活性与有机磷之关系[J]. *西北农业大学学报*, 1997, 25(2): 47-50.
- Li H S, Wang L Q, Zhao C S. Relationship between phosphatase activity and organic phosphorus in wheat rhizosphere[J]. *Journal of A&F University (Natural Science Edition)*, 1997, 25(2): 47-50.
- [26] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 II. 土壤Olsen-P及各形态无机磷的动态变化[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 365-368.
- Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 365-368.
- [27] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 无机磷和有机磷[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 790-794.
- Xie L H, Lu J L, Zhang Y P, *et al.* Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Inorganic and organic phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 790-794.
- [28] 林诚, 王飞, 何春梅, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田磷库及其形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 541-549.
- Lin C, Wang F, He CM, *et al.* Effects of long term fertilization on phosphorus pools and forms in yellow paddy fields of southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 541-549.
- [29] Reddy D D, Rao A S, Rupa T R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75: 113-118.
- [30] 黄庆海, 赖涛, 吴强, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机磷组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 63-66, 97.
- Huang Q H, Lai T, Wu Q, *et al.* Effect of long-term fertilization on the forms of organic phosphorus in paddy soil derived from red earth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2003, 9(1): 63-66, 97.