中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

磷肥施用量对石灰性土壤磷组分和作物磷积累量的影响

徐晓峰，米　倩，刘　迪，付森林，王旭刚，郭大勇，周文利

Effect of phosphorus fertilizer rate on phosphorus fractions contents in calcareous soil and phosphorus accumulation amount in crop

XU Xiaofeng, MI Qian, LIU Di, FU Senlin, WANG Xugang, GUO Dayong, and ZHOU Wenli

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210186

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期不同供磷水平下南方黄泥田生产力及磷组分特征

Yellow-mud paddy soil productivity and phosphorus fractions under long-term different phosphorus supply levels in southern China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(7): 960-968

水肥管理及生物炭施用对作物产量和磷效率及磷淋失的影响

Effects of water and nutrient management and biochar application on crop yield, phosphorus use efficiency, and phosphorus leaching

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 187-196

福建耕地土壤磷素富集空间差异及其影响因素

Spatial variation in phosphorus accumulation and the driving factors in cultivated lands in Fujian Province

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 274-283

黄土旱塬黑垆土长期肥料试验土壤磷素和磷肥效率的演变特征

Change characteristics of soil phosphorus and phosphorus fertilizer efficiency in Black Loessial soil of dryland in the Loess Plateau under long-term fertilization

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(7): 1038-1047

我国水稻秸秆磷分布及其还田对土壤磷输入的贡献

Distribution of rice straw phosphorus resources in China and its utilization potential under straw return

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 1095-1104

外源磷输入对农区湿地土壤碳库有效性及周转特性的影响

Effect of exogenous phosphorus input on the availability and turnover characteristics of soil carbon pool in agro-riparian wetlands

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(10): 1433-1443

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 11 月 第 29 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2021, 29(11): 1857−1866

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210186

徐晓峰, 米倩, 刘迪, 付森林, 王旭刚, 郭大勇, 周文利. 磷肥施用量对石灰性土壤磷组分和作物磷积累量的影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(11): 1857−1866

XU X F, MI Q, LIU D, FU S L, WANG X G, GUO D Y, ZHOU W L. Effect of phosphorus fertilizer rate on phosphorus fractions contents in calcareous soil and phosphorus accumulation amount in crop[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1857−1866

磷肥施用量对石灰性土壤磷组分和作物磷积累量的影响*

徐晓峰, 米 倩, 刘 迪, 付森林, 王旭刚, 郭大勇, 周文利

(河南科技大学农学院/洛阳市植物营养与环境生态重点实验室 洛阳 471023)

摘 要: 为了明确磷肥减量施用对石灰性土壤磷组分及其与作物磷积累量关系的影响, 设置 3 个施磷量, 按纯磷计分别为 150 kg·hm^{-2}(P150)、37.5 kg·hm^{-2}(P37) 和 0 kg·hm^{-2}(P0), 经过连续 2 年 4 季冬小麦-夏玉米轮作, 采用 Hedley 土壤磷组分分组法, 研究土壤磷组分含量的变化及其存储贡献率、输出贡献率, 并采用回归分析、通径分析和结构方程模型探讨土壤关键磷组分及其与磷肥施用量、作物磷积累量间的关系。结果表明, 与 P37 处理相比, P150 处理导致土壤全磷显著增加, 并显著提高阴离子交换树脂态无机磷组分 (resin_P_i)、$NaHCO_3$ 提取态无机磷 ($NaHCO_3$_P_i)、NH_4OAc 提取态无机磷 (NH_4OAc_P_i)、NaOH-$Na_2S_2O_6$ 提取态无机磷 (Fe_P_i) 和 $NaHCO_3$ 提取态有机磷 ($NaHCO_3$_P_o) 等组分含量 (P<0.05)。P0 处理与 P37 处理相比, 土壤磷及其组分含量无显著变化。土壤无机磷组分和有机磷组分的存储贡献率分别为 72.6% 和 23.8%。土壤盈余磷主要存储在 HCl 提取态无机磷 (HCl_P_i)、Fe_P_i、NH_4OAc_P_i、resin_P_i 和 HCl 提取态有机磷 (HCl_P_o) 等组分中。土壤无机磷组分的输出贡献率为 41.0%, 有机磷组分的输出贡献率为 56.4%。其中 HCl_P_o、Fe_P_i 和 NH_4OAc_P_i 的输出贡献率分别为 39.44%、17.36% 和 13.06%。HCl_P_i 和 resin_P_i 的输出贡献率仅为 1.91% 和 0.40%。在结构方程模型中, 施磷量对 Fe_P_i、HCl_P_i、NH_4OAc_P_i、resin_P_i、NH_4F_P_o、$NaHCO_3$_P_i 和 $NaHCO_3$_P_o 等组分的载荷因子分别为 0.078、0.077、0.061、0.036、0.018、0.015 和 0.012。Fe_P_i、NH_4OAc_P_i 和 HCl_P_o 等组分对作物磷积累量的载荷因子分别为 0.355、0.334 和−0.039。上述结果表明, 石灰性土壤中, Fe_P_i、NH_4OAc_P_i 和 HCl_P_o 是关键磷组分, 其中 Fe_P_i 和 NH_4OAc_P_i 在不施磷时易消耗, 但也易通过施磷得到补充; HCl_P_o 有效性高, 不易更新。HCl_P_i 有效性低, 是磷肥当季有效性低的重要原因。建议磷肥施用量的决策应以关键磷组分的存储贡献率为依据。

关键词: 石灰性土壤; 土壤磷组分; 结构方程模型; 减量施磷; 输出贡献率

中图分类号: S158.5 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effect of phosphorus fertilizer rate on phosphorus fractions contents in calcareous soil and phosphorus accumulation amount in crop*

XU Xiaofeng, MI Qian, LIU Di, FU Senlin, WANG Xugang, GUO Dayong, ZHOU Wenli

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology / Luoyang Key Laboratory of Plant Nutrition and Environmental Ecology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Excessive application of phosphate fertilizer wastes phosphorus resources and induces eutrophication in lakes and rivers.

* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0201700) 资助
通信作者: 徐晓峰, 主要从事农田养分资源管理、农业废弃物资源化研究。E-mail: xuxf101@163.com
收稿日期: 2021-03-26 接受日期: 2021-08-29

* This study was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFD0201700).
Corresponding author, XU Xiaofeng, E-mail: xuxf101@163.com
Received Mar. 26, 2021; accepted Aug. 29, 2021

To study the effect of reduction of phosphorus fertilizer on phosphorus fractions in calcareous soil and its relationship with crop phosphorus accumulation, three treatments were set up, i.e., phosphorus application rates of 150 kg·hm^{-2} (P150), 37.5 kg·hm^{-2} (P37), and 0 kg·hm^{-2} (P0). After two consecutive years of "winter wheat-summer maize" crops rotation, the changes in the contents of soil phosphorus fractions were studied using Hedley soil phosphorus fractionation method, and the storage contribution rate and output contribution rate of each fraction were also estimated. The relationship between soil phosphorus fractions contents, phosphorus fertilizer application rate, and crop phosphorus uptake amount were explored by using regression analysis, path analysis, and structural equation model. The results showed that compared with P37, P150 led to a significant increase in soil total phosphorus content. The contents of inorganic phosphorus extracted with anion exchangeresin (resin_P_i), with $NaHCO_3$ ($NaHCO_3$_P_i), with NH_4OAc (NH_4OAc_P_i) and with NaOH-$Na_2S_2O_6$ (Fe_P_i), and organic phosphorus extracted with $NaHCO_3$ ($NaHCO_3$_P_o) in P150 were significantly higher than those in P37, while the other fractions showed no significant change. P0 did not cause a significant decrease in the contents of soil phosphorus fractions. The storage contribution rates of soil inorganic phosphorus fractions and organic phosphorus fractions were 72.6% and 23.8%, respectively. Among them, the storage contribution rates of inorganic phosphorus extracted with HCl (HCl_P_i), Fe_P_i, NH_4OAc_P_i, resin_P_i, and organic phosphorus extracted with HCl (HCl_P_o) were 24.45%, 18.1%, 13.62%, 11.15%, and 9.30%, respectively. The output contribution rate of soil inorganic phosphorus fractions was 41.0%, and that of organic phosphorus fractions was 56.4%. Among them, the output contribution rates of HCl_P_o, Fe_P_i, and NH_4OAc_P_i were 39.44%, 17.36%, and 13.06%, respectively. The output contribution rates of HCl_P_i and resin_P_i were only 1.91% and 0.40%, respectively. In the structural equation model, the load factors of phosphorus fertilizer application rate on Fe_P_i, HCl_P_i, NH_4OAc_P_i, resin_P_i, organic phosphorus extracted with NH_4F (NH_4F_P_o), $NaHCO_3$_P_i, and $NaHCO_3$_P_o were 0.078, 0.077, 0.061, 0.036, 0.018, 0.015, and 0.012, respectively. The load factors of Fe_P_i, NH_4OAc_P_i, and HCl_P_o on crop phosphorus uptake were 0.355, 0.334, and −0.039, respectively. The above results show that in calcareous soil, Fe_P_i, NH_4OAc_P_i, and HCl_P_o were the key phosphorus fractions. Among them, Fe_P_i and NH_4OAc_P_i were easily consumed when no phosphorus fertilizer was applied, but they can be easily supplemented by phosphorus fertilizer application. However, HCl_P_o was available to the crop but was not easily replenished by phosphorus fertilizer application. The high storage contribution rate and low output contribution rate of HCl_P_i fraction were the important reasons for the low efficiency of phosphate fertilizer in the current season. It is suggested that the choice of phosphorus application rate should be based on the storage contribution rate of the key phosphorus fractions.

Keywords: Calcareous soil; Phosphorus fractions in soil; Structural equation model; Reducing phosphorus rate; Output contribution rate

磷肥当季利用率低, 长期施用磷肥导致土壤中磷的积累[1-2]。在磷过量积累的耕地上增施磷肥并不能实现增产[3], 既造成磷肥的浪费, 也易带来磷流失导致的面源污染问题[4]。在磷过量积累的土壤上应如何实施磷肥减量, 目前并不明确。农户习惯继续施用三元复合肥或磷酸二铵; 而长期施肥试验表明, 采用补偿性施肥 (如以作物吸收量为补充量), 或隔年施用磷肥, 可能是更好的选择。继续施用三元复合肥将保持土壤的磷盈余, 停用磷肥将导致土壤磷的亏缺。土壤中磷的化学形态、存在方式繁多, 生物有效性有很大差异[5-7]。常把土壤中对磷肥施用敏感, 与作物磷吸收关系密切的组分称为土壤关键磷组分。施磷对土壤关键磷组分、土壤有效磷和作物磷吸收的影响已有较多报道, 但关于磷过量积累土壤上实施磷肥减量将对土壤关键磷组分、作物磷吸收产生怎样的影响报道很少[8-10]。我们并不清楚, 这 3 种施磷策略将对磷积累土壤中哪些组分产生影响, 土壤磷组分的这种变化是否影响作物磷吸收? 也不清楚磷盈余和磷亏缺影响的是否是相同的组分[11]? 我国磷肥消费量占全球的 1/4, 减少磷肥施用量是实现化肥零增长的主要内容。因此有必要开展磷肥减量策略对土壤关键磷组分及其变化规律、作物磷吸收影响的研究。

在石灰性土壤地区, 蒋柏藩等 (蒋顾法)[12-14] 和 Hedley 等 (Hedley 法)[15-16] 报道的土壤磷组分分组法是两种常用方法。其中蒋顾法将土壤无机磷区分为 6 种组分, 但未对有机磷组分进行分组[12-14]; Hedley 法将土壤磷区分为 13 种组分, 包括有机磷组分[15-16]。方差分析和相关分析常用于研究土壤关键磷组分及其与生物有效性的关系。王海龙等[17] 利用相关分析和通径分析发现, 二钙磷 (Ca_2_P)、铝磷 (Al_P) 等组分与有效磷相关性强。谢英荷等[15] 则发现碳酸氢钠提取磷 ($NaHCO_3$_P)、水提取磷 (H_2O_P) 与有效磷关系最密切。廖文华等[18] 认为, 连续施肥主要导致 Ca_2_P、八钙磷 (Ca_8_P)、Al_P 的增加。方差分析和相关分析适宜于识别含量显著变化的组分, 并不能识别组分间及组分与作物磷吸收间的源库关系。王海龙等[17] 在研究中引入了土壤磷组分对作物的贡献率概念, 以探讨作物磷吸收与土壤磷组分的源库关系, 但并未对贡献率结果开展统计检验。回归与通径分析也常用于土壤关键磷组分及其相互关系的研究[19]。土壤磷组分间在热力学和动力学因素调控下,

存在复杂的转化关系, 不同磷组分含量的变化同时也受施磷量、作物磷吸收等因素的影响, 土壤磷组分间、施磷量及作物磷吸收间构成复杂的因果关系网络[20]。已报道的这些土壤关键磷组分往往缺乏在土壤磷转化因果关系网络中的必要检验。相关分析、回归分析和通径分析并不能很好地满足这种分析需求。

结构方程模型适合描述组分间的复杂网络关系。Tiessen 等[8] 在合并和简化土壤磷组分的基础上, 成功建立了磷组分间转化关系的结构方程。Gama-Rodrigues 等[21] 和 Hou 等[22] 利用文献资料和结构方程建模途径, 进一步评价了关键磷组分和关键转化过程。结构方程模型在建模过程中习惯引入潜变量, 使模型的结果解释困难。在结构方程建模过程中取消潜变量, 往往使结果更直观易解释。Liang 等[23] 在研究土壤微生物群落对气候变化的响应过程中, 采用没有潜变量的结构方程模型, 探讨了年平均降雨量、年均温等与 pH、有机质、微生物多样性的关系, 取得较好结果。Xu 等[24] 利用无潜变量的结构方程模型研究了长期施肥对土壤有机质矿化的影响; Li 等[25] 则利用无潜变量的结构方程模型研究了牛粪中磷形态在堆肥和施入土壤后的形态转化。这些研究都取得很好的效果。把简化的结构方程模型应用于土壤关键磷组分的研究, 可以把关键磷组分放在网络关系中进行评价, 从而改善关键磷组分研究的有效性。为此, 本研究通过大田试验, 采用 Hedley 土壤磷组分分组法, 探讨磷肥减量对土壤磷组分的影响, 并采用多元回归方程、通径分析和结构方程模型评价关键磷组分及其与施磷量、作物磷吸收量间的关系。研究结果可为石灰性土壤磷肥高效利用策略和途径的设计提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地区概况

试验地位于河南省焦作市温县祥云镇平安种业农场 (113°0′11″E, 34°57′17″N)。该地属于温带大陆性季风气候, 年均温 14 ℃, 降雨量 700 mm。试验地土壤类型为垆土。供试土壤 0~20 cm 土层 pH 8.22, 有机质 12.3 $g\cdot kg^{-1}$, 全氮 0.72 $g\cdot kg^{-1}$, 全磷 1.06 $g\cdot kg^{-1}$, 有效磷 14.3 $mg\cdot kg^{-1}$, 速效钾 295 $mg\cdot kg^{-1}$, 黏粒 19.6%, 粉粒 67.7%, 砂粒 12.7%。该地区种植模式为冬小麦 (*Triticum aestivum*)-夏玉米 (*Zea mays*) 一年两熟, 是我国传统的冬小麦主产区和高产区, 也是优质麦生产基地。

1.2　试验设计

设置 3 个施磷量水平, 按纯磷计分别为 150 $kg\cdot hm^{-2}$ (P150)、37.5 $kg\cdot hm^{-2}$ (P37)、0 $kg\cdot hm^{-2}$ (P0)。每处理重复 3 次。各小区面积为 10 m×10 m。小麦季栽种品种为‘平安 11 号’, 播种量为 150 $kg\cdot hm^{-2}$; 玉米季品种为‘郑单 958’, 密度 6.75×10^4 株$\cdot hm^{-2}$。磷肥选用云南云天化股份有限公司生产的过磷酸钙, 含有效磷 (P_2O_5 计) 12.0%, 于小麦季播种前一次施入。小麦季氮肥选用山西兰花科技创业有限公司生产的颗粒尿素, 含氮 45.0%, 施氮量为 225 $kg\cdot hm^{-2}$, 按基追比 1∶1 分两次施入。玉米季氮肥选用河南心连心化肥有限公司缓释尿素, 施氮量为 195 $kg\cdot hm^{-2}$, 作基肥一次施入。小麦季与玉米季均不施用钾肥, 其他管理按常规生产管理实行。试验于 2017 年 10 月至 2019 年 6 月进行。

1.3　测定项目与方法

样品的采集和测定: 小麦样品在收获时每小区收割 1 m^2。玉米样品在收获时每小区收割 5 株。小麦和玉米样分为籽粒和秸秆两部分, 分别测定磷含量。两年 4 季地上部积累的磷总量为作物磷吸收量 (P_uptake)。土壤样品在 2019 年 6 月小麦收割后, 每小区按对角线 5 点取样法采集 0~20 cm 土层的混合样, 风干过筛后备用。土壤全磷 (TP)、有效磷 (P_Olsen)、植物样全磷和土壤主要理化性质依据常规农化分析方法进行。

土壤磷组分依据 Hedley 土壤磷分级法分为[15-16]: 阴离子交换树脂态无机磷组分 (resin_P_i)、阴离子交换树脂态有机磷 (resin_P_o)、$NaHCO_3$ 提取态无机磷 ($NaHCO_3$_P_i)、$NaHCO_3$ 提取态有机磷 ($NaHCO_3$_P_o)、NH_4OAc 提取态无机磷 (NH_4OAc_P_i)、NH_4OAc 提取态有机磷 (NH_4OAc_P_o)、NH_4F 提取态无机磷 (NH_4F_P_i)、NH_4F 提取态有机磷 (NH_4F_P_o)、NaOH-$Na_2S_2O_6$ 提取态无机磷 (Fe_P_i)、NaOH-$Na_2S_2O_6$ 提取态有机磷 (Fe_P_o)、HCl 提取态无机磷 (HCl_P_i)、HCl 提取态有机磷 (HCl_P_o)、残渣态磷 (res_P) 等组分, 具体分析方法和步骤参见附件 1(扫描本文首页二维码可查看附件)。

1.4　数据处理

1.4.1　土壤磷组分输出贡献率、存储贡献率和土壤磷盈亏量的计算方法

P0 处理无外加磷肥, 作物吸收的磷来自土壤磷各组分。P0 处理下磷组分含量变化大小对应于对作物磷的贡献大小。P150 处理下磷肥施入量高于作物吸收带走量, 盈余磷则在土壤各组分积累, 组分中磷增加的多, 则对磷积累贡献大。据此可计算土壤磷组分的输出贡献率和存储贡献率[17]:

输出贡献率(%) = (P37处理下某土壤磷组分磷含量 – P0处理下该组分磷含量) / (P37处理下土壤总磷 – P0处理下土壤总磷) × 100 (1)

存储贡献率(%) = (P150 处理下某土壤磷组分磷含量 – P37 处理下该组分磷含量) / (P150 处理下土壤总磷 – P37处理下土壤总磷) × 100 (2)

土壤磷盈亏量 = 施磷量 – 作物磷吸收量 (3)

1.4.2 结构方程模型建立方法

对各土壤磷组分、施磷量和作物磷吸收量进行相关分析, 对具有显著相关性的组分分别与土壤磷盈亏量、磷肥施用量和作物磷吸收量进行回归分析。显著水平设为 $P<0.05$, 保留达到显著水平并 $R^2 \geqslant 0.20$ 的回归方程 (见附件 3)。在方差分析、贡献率分析、相关分析和回归分析的基础上, 把有显著相关性或回归分析符合要求或存储和输出贡献率较大的组分进行归一化处理, 再纳入结构方程模型中, 建立“施肥量-土壤磷组分-作物磷吸收量”结构方程模型[26]。模型为:

$$\text{P_uptake} = a_{11}\text{NH}_4\text{OAc_P}_\text{i} + a_{12}\text{Fe_P}_\text{i} + a_{13}\text{HCl_P}_\text{o} + a_{14}\text{resin_P}_\text{o} + a_{15}\text{resin_P}_\text{i} + a_{16}\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{i} + a_{17}\text{NH}_4\text{F_P}_\text{i} + \varepsilon_1 \quad (4)$$

$$\text{HCl_P}_\text{i} = a_{21}\text{P_rate} + \varepsilon_2 \quad (5)$$

$$\text{resin_P}_\text{i} = a_{31}\text{P_rate} + \varepsilon_3 \quad (6)$$

$$\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{i} = a_{41}\text{P_rate} + \varepsilon_4 \quad (7)$$

$$\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{o} = a_{51}\text{P_rate} + \varepsilon_5 \quad (8)$$

$$\text{NH}_4\text{OAc_P}_\text{i} = a_{61}\text{P_rate} + \varepsilon_6 \quad (9)$$

$$\text{Fe_P}_\text{i} = a_{71}\text{P_rate} + \varepsilon_7 \quad (10)$$

$$\text{NH}_4\text{F_P}_\text{o} = a_{81}\text{P_rate} + \varepsilon_8 \quad (11)$$

式中: a_{ij} 为载荷因子项, ε_i 为随机误差项。

1.4.3 逐步多元回归及通径分析

对土壤所有磷组分与作物磷吸收量间进行后向逐步多元回归, 逐步多元回归初始模型:

$$\text{P_uptake} = b_1\text{resin_P}_\text{i} + b_2\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{i} + b_3\text{NH}_4\text{OAc_P}_\text{i} + b_4\text{NH}_4\text{F_P}_\text{i} + b_5\text{Fe_P}_\text{i} + b_6\text{HCl_P}_\text{i} + b_7\text{resin_P}_\text{o} + b_8\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{o} + b_9\text{NH}_4\text{OAc_P}_\text{o} + b_{10}\text{NH}_4\text{F_P}_\text{o} + b_{11}\text{Fe_P}_\text{o} + b_{12}\text{HCl_P}_\text{o} + b_{13}\text{res_P} + b_{14}\text{P}_{\text{applying}} + b_{15}\text{P_Olsen} + \varepsilon \quad (12)$$

式中: b_k 为系数项, ε 为随机误差项。对保留在逐步多元回归方程中的组分进行通径分析, 评价土壤磷组分对作物磷吸收量的直接和间接效应。

各处理的土壤磷组分测定值进行方差分析, 并对均值采用 LSD 多重比较法进行差异性检验, 显著水平均设为 $P<0.05$。上述分析过程均采用 R 软件 (4.0.2) 及其辅助包完成, 其中分段线性模型采用辅助包 lavaan、semTools、semPlot 和 sqldf 完成, 逐步多元回归和通径分析采用 MASS 和 agricolae 辅助包完成。

2 结果与分析

2.1 施磷量对土壤磷组分含量的影响

各处理中, 含量最高的组分均为 res_P, 其次是 HCl_P_i、HCl_P_o 和 $\text{NH}_4\text{OAC_P}_\text{i}$。$\text{Fe_P}_\text{i}$、$\text{Fe_P}_\text{o}$ 和 $\text{NH}_4\text{F_P}_\text{i}$ 等组分含量也较丰富。无机磷组分占土壤全磷 71.8%, 有机磷组分占 28.1% (表 1)。磷肥管理策略对不同磷组分的影响存在很大差异。连续 2 年 4 季 P150 处理下, resin_P_i、$\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{i}$、$\text{NH}_4\text{OAc_P}_\text{i}$、

表 1 不同施磷处理下土壤各磷组分及总磷含量

Table 1 Contents of phosphorus fractions and total phosphorus in soil under different phosphorus rates mg·kg^{-1}

施磷量 Phosphorus rate (kg·hm^{-2})	resin_P_i	$\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{i}$	$\text{NH}_4\text{OAC_P}_\text{i}$	$\text{NH}_4\text{F_P}_\text{i}$	Fe_P_i	HCl_P_i	res_P
0 (P0)	6.61±0.96b	6.01±0.48c	77.11±5.54b	30.67±2.25a	31.42±5.12b	274.08±25.01a	326.50±22.03a
37 (P37)	6.72±0.67b	7.29±0.31bc	80.73±3.15b	31.68±1.73a	36.23±10.52b	274.61±43.99a	327.23±76.24a
150 (P150)	17.64±4.71a	9.43±2.62a	94.07±4.95a	34.69±11.81a	53.96±3.58a	298.57±64.08a	330.81±42.40a

施磷量 Phosphorus rate (kg·hm^{-2})	resin_P_o	$\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{o}$	$\text{NH}_4\text{OAC_P}_\text{o}$	$\text{NH}_4\text{F_P}_\text{o}$	Fe_P_o	HCl_P_o	TP
0 (P0)	11.81±0.99b	0.37±0.15b	11.26±0.98a	6.44±1.63ab	33.86±6.19a	236.25±27.04a	1052.38±20.38b
37 (P37)	13.36±0.87b	0.67±0.58b	12.25±2.49a	7.42±2.20ab	34.73±11.62a	247.18±36.04a	1080.09±64.76b
150 (P150)	17.08±5.96ab	4.51±4.75a	13.53±11.72a	11.52±5.21a	35.98±6.88a	256.29±49.04a	1178.07±11.25a

不同小写字母表示$P<0.05$水平不同施磷量间差异显著。resin_P_i: 阴离子交换树脂态无机磷; resin_P_o: 阴离子交换树脂态有机磷; $\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{i}$: $NaHCO_3$提取态无机磷; $\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{o}$: $NaHCO_3$提取态有机磷; $\text{NH}_4\text{OAC_P}_\text{i}$: NH_4OAc提取态无机磷; $\text{NH}_4\text{OAC_P}_\text{o}$: NH_4OAc提取态有机磷; $\text{NH}_4\text{F_P}_\text{i}$: NH_4F提取态无机磷; $\text{NH}_4\text{F_P}_\text{o}$: NH_4F提取态有机磷; Fe_P_i: NaOH-$Na_2S_2O_6$提取态无机磷; Fe_P_o: NaOH-$Na_2S_2O_6$提取态有机磷; HCl_P_i: HCl提取态无机磷; HCl_P_o: HCl提取态有机磷; res_P: 残渣态磷; TP: 全磷。Different lowercase letters indicate significant differences among different phosphorus rates at $P<0.05$. resin_P_i: inorganic phosphorus extracted with anion exchangeresin; resin_P_o: organic phosphorus extracted with anion exchangeresin; $\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{i}$: inorganic phosphorus extracted with $NaHCO_3$ solution; $\text{NaHCO}_3\text{_P}_\text{o}$: organic phosphorus extracted with $NaHCO_3$ solution; $\text{NH}_4\text{OAC_P}_\text{i}$: inorganic phosphorus extracted with NH_4OAc solution; $\text{NH}_4\text{OAC_P}_\text{o}$: organic phosphorus extracted with NH_4OAc solution; $\text{NH}_4\text{F_P}_\text{i}$: inorganic phosphorus extracted with NH_4F solution; $\text{NH}_4\text{F_P}_\text{o}$: organic phosphorus extracted with NH_4F solution; Fe_P_i: inorganic phosphorus extracted with NaOH-$Na_2S_2O_6$ solution; Fe_P_o: organic phosphorus extracted with NaOH-$Na_2S_2O_6$ solution; HCl_P_i: inorganic phosphorus extracted with HCl solution; HCl_P_o: organic phosphorus extracted with HCl solution; res_P: residual phosphorus; TP: total phosphorus.

Fe_P_i、$NaHCO_3$_P_o 和 TP 等含量比 P37 处理显著升高, 其他组分则无显著变化。P0 处理与 P37 处理相比土壤各磷组分含量均无显著变化。

2.2　土壤磷盈亏对磷组分存储和输出贡献的影响

在磷亏缺时, HCl_P_o 组分的输出贡献率最高, 其次是 Fe_P_i、NH_4OAc_P_i 组分。其中无机磷组分的输出贡献率为 41.00%, 有机磷组分的输出贡献率为 56.37%。在磷盈余时, HCl_P_i 组分的存储贡献率最高, 其次是 Fe_P_i、NH_4OAc_P_i 和 resin_P_i 等组分。其中无机磷组分的存储贡献率占 72.57%, 有机磷组分的存储贡献率占 23.78% (表 2)。上述结果表明, Fe_P_i、NH_4OAc_P_i 组分既是土壤磷盈余时的重要存储库, 也是磷亏缺时作物的重要磷源; HCl_P_i 组分是重要的土壤磷存储库, 但不易输出, 有效性低; HCl_P_o 组分在磷盈余时得到的补充少, 但输出占比高。磷盈余和磷亏缺对土壤不同磷组分含量的影响并不完全一致。土壤磷盈余更多地提高无机磷组分含量, 土壤磷亏缺更多地导致有机磷组分损失。

表 2　不同土壤磷组分对磷在土壤中存储和输出的贡献

Table 2　Contribution rates of soil phosphorus fractions to storage and output of phosphorus in soil　　%

项目 Item	resin_P_i	$NaHCO_3$_P_i	NH_4OAc_P_i	NH_4F_P_i	Fe_P_i	HCl_P_i	合计 Total
输出贡献率 Output contribution rate	0.40	4.62	13.06	3.64	17.36	1.91	41.00
存储贡献率 Storage contribution rate	11.15	2.18	13.62	3.07	18.10	24.45	72.57
项目 Item	resin_P_o	$NaHCO_3$_P_o	NH_4OAc_P_o	NH_4F_P_o	Fe_P_o	HCl_P_o	合计 Total
输出贡献率 Output contribution rate	5.59	1.08	3.57	3.54	3.14	39.44	56.37
存储贡献率 Storage contribution rate	3.80	3.92	1.31	4.18	1.28	9.30	23.78

各磷组分说明见表1的表注。The description of each phosphorus fraction is shown in the note of Table 1.

2.3　施磷量、土壤磷组分含量及作物磷吸收量间关系的回归分析和通径分析

表 3 是土壤磷组分和作物磷吸收量间的逐步多元回归分析和通径分析结果。通过逐步回归, 模型最终包含 10 个磷组分。对回归模型所包含的磷组分进行通径分析, resin_P_i、$NaHCO_3$_P_i、NH_4OAc_P_i、$NaHCO_3$_P_o 和 NH_4F_P_i 等 5 个磷组分对作物磷吸收量总效应值相对较大。其中 resin_P_i 组分对作物磷吸收正向的影响主要表现为间接效应, 直接效应表现为负的影响。$NaHCO_3$_P_i、$NaHCO_3$_P_o 和 NH_4F_P_i 组分对磷吸收的影响主要表现为正向的直接效应, 间接效应为负。NH_4OAc_P_i 组分的直接效应和间接效应比较接近。NH_4F_P_o 组分的总效应值相对较小。HCl_P_o 组分的总效应表现为负值。

表 4 是磷肥施用量与土壤磷组分间的回归分析。结果表明, 土壤中有 7 个组分对磷肥施用量敏感, 这些组分主要由水溶态、交换态和铁铝结合态磷组分构成。

表 3　作物磷吸收量与土壤磷组分含量多元回归及通径分析结果

Table 3　Multiple regression and path analysis between soil phosphorus fractions contents and phosphorus uptake amount of crop

项目 Item	系数 Coefficient	*P*值 *P* value	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
截距 Intercept	−19.07	0.67	—	—	—
resin_P_i	−1.99	0.16	−0.74	1.34	0.60
$NaHCO_3$_P_i	3.47	0.06	0.72	−0.16	0.56
NH_4OAc_P_i	0.44	0.28	0.31	0.22	0.53
$NaHCO_3$_P_o	2.80	0.11	0.56	−0.05	0.51
NH_4F_P_i	1.70	0.05	0.68	−0.20	0.48
resin_P_o	−1.85	0.10	−0.64	0.82	0.19
res_P	0.07	0.22	0.26	−0.09	0.17
NH_4OAc_P_o	−0.81	0.29	−0.30	0.45	0.15
NH_4F_P_o	2.07	0.13	0.60	−0.57	0.03
HCl_P_o	−0.07	0.23	−0.25	0.04	−0.21

各磷组分说明见表1的表注。The description of each phosphorus fraction is shown in the note of Table 1.

2.4　施磷量、土壤磷组分含量及作物磷吸收量间关系的结构方程模型分析

对磷肥施用量、土壤磷组分含量和作物磷吸收量间进行相关分析, 发现共有 35 组间存在显著的相关关系 (表 5)。其中与作物磷吸收量呈显著相关的组分包括 resin_P_i、$NaHCO_3$_P_i、NH_4OAc_P_i、NH_4F_P_i、Fe_P_i 和 $NaHCO_3$_P_o 等 6 种。与磷肥施用量关系密切的磷组分则包括 resin_P_i、$NaHCO_3$_P_i、NH_4OAc_P_i、

表 4　磷肥施用量与土壤磷组分含量的线性回归方程

Table 4　Regression relationship between soil phosphorus fractions contents and phosphorus fertilizer rate

磷组分 Phosphorus fraction	截距 Intercept	斜率 Slope	R^2	*P*值 *P* value
Fe_P_i	3.28	7.40	0.66	1.02×10^{-6}
NH_4OAc_P_i	7.63	6.09	0.69	4.21×10^{-7}
resin_P_i	5.41	3.65	0.76	2.11×10^{-8}
resin_P_o	1.21	2.48	0.41	4.32×10^{-4}
$NaHCO_3$_P_i	6.32	1.76	0.61	4.63×10^{-6}
NH_4F_P_o	5.68	1.66	0.25	7.56×10^{-3}
$NaHCO_3$_P_o	0.47	1.27	0.37	9.83×10^{-4}

各磷组分说明见表1的表注。The description of each phosphorus fraction is shown in the note of Table 1.

表 5 土壤磷组分含量及施肥量和作物磷吸收量的相关关系

Table 5 Correlations between soil phosphorus fractions contents, phosphorus fertilizer rate and crop phosphorus absorption

	$NaHCO_3$_P_i	NH_4OAc_P_i	NH_4F_P_i	Fe_P_i	HCl_P_i	resin_P_o	$NaHCO_3$_P_o	NH_4OAc_P_o	NH_4F_P_o	Fe_P_o	HCl_P_o	res_P	P_uptake	$P_{applying}$
Resin_P_i	0.57**	0.72**	0.39	0.77**	0.07	0.32	0.80**	0.03	0.32	0.03	0.17	0.22	0.60**	0.88**
$NaHCO_3$_P_i		0.70**	0.36	0.64**	0.45*	0.72**	0.28	0.39	0.40	0.20	−0.01	−0.10	0.56**	0.79**
NH_4OAc_P_i			0.29	0.81**	0.20	0.65**	0.50*	0.09	0.42*	0.10	0.11	−0.05	0.53**	0.83**
NH_4F_P_i				0.38	0.17	0.06	0.23	0.54**	−0.19	0.05	0.09	−0.21	0.48*	0.38
Fe_P_i					0.15	0.51*	0.68**	0.15	0.33	−0.32	0.14	−0.03	0.57**	0.82**
HCl_P_i						0.20	−0.06	0.45*	0.14	0.37	−0.68**	−0.36	0.30	0.27
resin_P_o							0.14	0.14	0.62**	0.27	0.26	−0.16	0.19	0.66**
$NaHCO_3$_P_o								−0.26	0.00**	−0.15	0.10	0.25	0.51*	0.63**
NH_4OAc_P_o									0.29	0.00**	0.06	−0.50*	0.15	0.22
NH_4F_P_o										0.13	0.38	−0.17	0.03	0.53**
Fe_P_o											−0.30	0.05	0.09	0.17
HCl_P_o												−0.07	−0.21	0.18
res_P													0.17	0.05
P_uptake														0.59**

各磷组分说明见表1的表注。$P_{applying}$: 施磷量; P_uptake: 吸磷量。*和**分别表示在P<0.05和P<0.01水平显著相关。The description of each phosphorus fraction is shown in the note of Table 1. $P_{applying}$: phosphorus rate; P_uptake: phosphorus uptake. * and ** indicate significant correlations at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively.

Fe_P_i、resin_P_o、$NaHCO_3$_P_o 和 NH_4F_P_o 等 7 种。

结构方程模型分析结果表明: 施磷量与 7 种磷组分有密切关系, 依载荷因子大小依次为 Fe_P_i、HCl_P_i、NH_4OAc_P_i、resin_P_i、NH_4F_P_o、$NaHCO_3$_P_i、$NaHCO_3$_P_o。其中 HCl_P_i 的载荷因子不显著。作物磷累积量与 NH_4OAc_P_i、Fe_P_i、HCl_P_o 等组分关系密切。作物磷积累量与土壤磷 3 个组分间的载荷因子均不显著。上述结果表明, NH_4OAc_P_i、Fe_P_i 和 HCl_P_o 是该土壤的关键磷组分, NH_4OAc_P_i 和 Fe_P_i 两种组分可以从磷肥中得到补充, 但 HCl_P_o 组分缺乏有效的补充机制, 易被消耗。磷在 HCl_P_i 组分的积累是磷肥当季利用率低的重要原因 (图 1)。

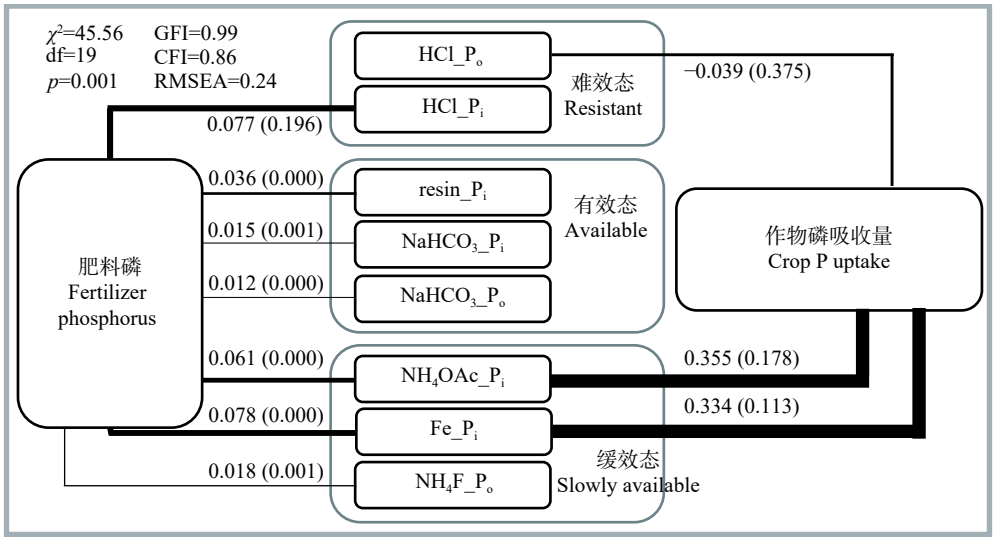

图 1 肥料磷在土壤磷组分中的分配及磷组分对作物磷吸收量的贡献

Fig. 1 Distribution of fertilizer phosphorus in soil phosphorus fractions and contributions of phosphorus fractions to crop phosphorus uptake

各磷组分说明见表 1 的表注。线段宽度代表载荷因子大小, 线段上数值为“载荷因子 (P 值)”。The description of each phosphorus fraction is shown in the note of Table 1. The width of line segment represents the load factor size, and the value on the line segment is “load factor (P value)”.

3 讨论

3.1 磷盈余和磷亏缺对磷积累土壤磷组分含量的影响

磷盈余主要导致无机磷组分的积累, 磷亏缺主要带来有机磷组分的消耗, 两者趋势并不完全一致。我们的研究明确了石灰性土壤在磷盈亏时不同组分的贡献比例。磷盈余时 HCl_P_i 的存储贡献为 24.45%, Fe_P_i 贡献 18.10%, NH_4OAc_P_i 贡献 13.62%; 磷亏缺时作物带走的磷 39.44% 来自 HCl_P_o, 17.36%

来自 Fe_P_i, 13.06% 来自 NH_4OAc_P_i。石灰性土壤中, 钙是决定磷移动性的主要因素。杜振宇等[2] 在研究肥际微域磷移动性和形态时证实, 磷肥中的磷在进入土壤后移动距离很小, 主要被钙所沉淀, 形成酸溶性组分。我们的研究结果与杜振宇的报道一致, 但与长期定位施肥试验的报道不完全一致。曹莹菲等[27] 在塿土上 29 年的试验仅发现磷在 Ca_2_P、Ca_8_P、Al_P、Fe_P 等组分中的积累, Ca_{10}_P、O_P 等组分含量无增加。吴璐璐等[28] 在潮土上 28 年试验发现磷积累主要体现在 resin_P_i、$NaHCO_3$_P_i、NaOH_P_i 等组分。杨振兴等[29] 和杜艳玲等[14] 发现, 随着施磷年限增加, 磷积累由 H_2O_P、$NaHCO_3$_P 组分向 $NaHCO_3$_P_i、NaOH_P_i、HCl_P、$NaHCO_3$_P_o、residual_P 等组分转变。金欣等[30] 认为长期施磷提高 resin_P_i、$NaHCO_3$_P_i、NaOH_P_i、浓 HCl_P 和残渣态磷, 同时消耗 $NaHCO_3$_P_o 和 NaOH_P_o 组分。王海龙等[17] 认为磷的积累与消耗趋势是一致的。宋书会[31] 在黑土上的试验则发现磷肥减量对土壤磷组分含量无显著影响, 不施磷引起高活性的 resin_P_i、$NaHCO_3$_P_i 和中稳性的 NaOH_P_i、HCl_P_i 降低。陈磊等[32] 在潮土上减磷则仅导致 Ca_2_P 组分下降。谢英荷等[15] 认为, 减少磷肥施用量将导致 H_2O_P、$NaHCO_3$_P、NaOH_P、HCl_P 等组分降低。不同研究间存在这种差异, 可能主要与不同磷组分在土壤中含量的差异有关。如 H_2O_P、$NaHCO_3$_P 等组分, 含量低, 易受施磷量影响, 容易出现显著的变化。HCl_P 和 residual_P 含量高, 施肥往往不易导致其显著变化。以往的研究多采用方差分析来研究土壤磷组分对磷盈亏的响应, 含量高的组分掩盖了磷盈亏对组分变化的影响。我们的研究表明, 在探讨土壤磷组分变化与作物磷吸收的关系时, 采用包括结构方程等在内的多种方法是很必要的。我们的研究结果还解释了化学磷肥利用效率低的一种机制, 土壤盈余磷将近 1/4 存储于 HCl_P_i, 但输出贡献率却不足 2%。正是 HCl_P_i 组分这种高存储低输出, 造成磷肥利用效率不高。

3.2　石灰性土壤中的关键磷组分

石灰性土壤中关键磷组分在不同报道间存在较大分歧。依据长期施肥试验, 侯云鹏等[33] 和王斌等[34] 认为 Ca_8_P、Al_P 和 Ca_2_P 是该土壤中的关键组分。张为政[19] 以东北黑土长期施肥试验发现, Al_P 和 Fe_P 的相对有效性较高, 土壤各组分与有效磷的关系依次为 Al_P、中稳性有机磷、Fe_P、中等活性有机磷、活性有机磷、H_2O_P 和 Ca_P。基于磷组分与有效磷的关系, 王海龙等[17] 认为作物主要利用 Ca_8_P、Al_P 和 Fe_P 等组分。李若楠等[35] 和陈磊等[32] 认为二钙磷、树脂交换态磷是耗竭条件下的首要磷源。许艳等[36] 则认为氢氧化钠提取态无机磷、水溶性无机磷和碳酸氢钠提取态无机磷是关键的磷组分。这些研究大多认同 Ca_8_P、Al_P、Fe_P 等中等活性磷组分是关键磷组分, 但对 H_2O_P 和 Ca_2_P 高活性的磷组分, 以及有机磷组分是否是关键磷组分有较多争议。我们发现土壤磷组分与作物磷积累量关系都不紧密, 但把 NH_4OAc_P_i、Fe_P_i 和 HCl_P_o 作为关键磷组分是相对较合理的。NH_4OAc_P_i 是土壤中固定较强但能被小分子有机酸活化的组分, Fe_P_i 是铁氧化物胶膜包裹的组分。这两种组分在以往的报道中也被广泛认为是关键磷组分[17,19], 这种观点在分段线性模型中也得到了验证。我们的研究发现这两种组分的存储贡献率和输出贡献率接近, 在石灰性土壤上易通过施肥实现更新。

关于土壤有机磷组分与植物磷吸收的关系已有一些报道。朱芸芸等[37] 在研究芦苇 (*Phragmites communis*) 根际土壤磷有效性时发现有机磷的含量、磷酸酶的活性与芦苇磷吸收量有密切的关系。陈磊等[32] 报道在减磷 20%~40% 时, 引起根际中等活性有机磷含量显著降低。刘津等[38] 报道, 土壤有机磷组分与有效磷关系密切。Tian 等[6] 利用氧同位素分馏技术对我国主要农业土壤磷循环过程的研究中发现, 微生物是该过程的积极参与者, 有机磷在该过程中起重要作用。孙锋等[39] 发现缺磷时菊科作物能通过提高根际环境中碱性磷酸酶的活性促进有机磷的分解。曾晓敏等[40] 在亚热带不同植被土壤磷组分的研究中也有类似的发现。这些研究虽然证明了有机磷组分是农田土壤磷循环的重要参与者[35,41], 但并未识别出 HCl_P_o 组分的关键作用[42]。我们的研究通过分段线性模型验证了 HCl_P_o 组分在作物磷积累过程中的主要作用, 同时指出该组分在土壤中存储贡献率低、输出贡献率高的特点。在磷肥减量过程中, HCl_P_o 组分的这种特点很容易导致该组分的消耗。因此, 有必要考虑在磷肥减量过程中增施有机肥或有机无机磷肥配施, 以避免 HCl_P_o 组分过度消耗[27,43]。

3.3　磷富集土壤磷肥施用量的决策依据

磷肥合适的减量幅度已有较多报道, 陈磊等[32] 认为在华北地区小麦玉米轮作地块减量 20%~40% 较合适; 宋书会[31] 认为东北黑土减量 20% 不会引起产量的损失; 陈浩等[11] 认为, 在太湖稻麦轮作地块仅在麦季施磷肥不会引起水稻和小麦产量的损失。这些磷肥减量研究都表明, 短期的磷肥减量不会引起

土壤磷组分的显著下降, 这点在我们的研究中也得到了证实。但长期施肥试验已多次证明, 土壤磷组分的消耗是不均衡的, 关键磷组分往往易被消耗。而关键磷组分的过度消耗往往伴随作物产量的下降[27-30]。这种现象很难在短期观察到。磷肥减量应该考虑土壤磷供应能力的可持续性。因此合理的磷肥减量幅度, 或磷肥的施用量, 应充分考虑关键磷组分的含量变化。土壤磷组分的存储贡献率从一个侧面反映了关键磷组分的更新特性, 把土壤关键磷组分的存储贡献率作为磷肥施用量决策的依据, 可能比以产量为依据更合理。我们的研究表明, $NH_4OAc_P_i$、Fe_P_i 和 HCl_P_o 3 种关键磷组分的存储贡献率为 41.02%。考虑到豫北地区小麦玉米两季磷吸收量在 40 $kg\cdot hm^{-2}$, 因此我们建议该地区小麦玉米轮作种植体系中纯磷施用量应控制在 100 $kg\cdot hm^{-2}$ 左右。在此基础上, 进一步开展磷肥减量技术的开发。

4 结论

在石灰性土壤上, 磷盈余将导致土壤全磷增加。土壤无机磷和有机磷组分对盈余磷的存储贡献率分别为 72.6% 和 23.8%, 主要积累在 HCl_P_i、Fe_P_i、$NH_4OAc_P_i$ 和 resin_P 等组分。作物吸收的磷 40.1% 来自土壤无机磷组分, 56.37% 来自土壤有机磷组分, HCl_P_o、Fe_P_i 和 $NH_4OAc_P_i$ 等组分是作物吸收磷的主要来源。$NH_4OAc_P_i$、Fe_P_i 和 HCl_P_o 是石灰性土壤中的关键磷组分。Fe_P_i 和 $NH_4OAc_P_i$ 的储存贡献率和输出贡献率接近, 易得到肥料磷的补充, 有效性高。HCl_P_o 组分储存贡献率低, 输出贡献率高, 易被消耗。

参考文献 References

[1] 王莹, 方俊文, 李博. 2019年我国磷复肥行业运行情况及发展趋势[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(8): 1−8
WANG Y, FANG J W, LI B. Production and developing trends of phosphate and compound fertilizer industry in China in 2019[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(8): 1−8

[2] 杜振宇, 王清华, 周健民, 等. 磷在潮土肥际微域中的迁移和转化[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 725−730
DU Z Y, WANG Q H, ZHOU J M, et al. Movement and transformation of phosphorus in fertilizer microsites in a fluvo-aquic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 725−730

[3] 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

[4] 李发, 王农, 徐应明, 等. 水稻土对磷的吸持能力及环境风险研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4734−4739
LI F, WANG N, XU Y M, et al. Characteristics of phosphorus sorption capacity and its environmental risk in paddy soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(12): 4734−4739

[5] GUPPY C N, MCLAUGHLIN M J. Options for increasing the biological cycling of phosphorus in low-input and organic agricultural systems[J]. Crop and Pasture Science, 2009, 60(2): 116

[6] TIAN L Y, GUO Q J, YU G R, et al. Phosphorus fractions and oxygen isotope composition of inorganic phosphate in typical agricultural soils[J]. Chemosphere, 2020, 239: 124622

[7] 汪洪, 宋书会, 张金尧, 等. 土壤磷形态组分分级及^{31}P-NMR技术应用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 512−523
WANG H, SONG S H, ZHANG J Y, et al. Research advance in soil phosphorus fractionations and their characterization by chemical sequential methods and ^{31}P-NMR techniques[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2): 512−523

[8] TIESSEN H, STEWART J W B, COLE C V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(4): 853−858

[9] COSTA M, GAMA-RODRIGUES A, GONÇALVES J, et al. Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under *Eucalyptus* plantations, Brazil[J]. Forests, 2016, 7(12): 15

[10] 赵伟, 杨圆圆, 蒋丽媛, 等. 减施磷肥提高设施番茄氮磷钾生理效率并减少土壤速效磷累积[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1710−1718
ZHAO W, YANG Y Y, JIANG L Y, et al. Reducing conventional phosphorus input increase physiological efficiencies of absorbed nitrogen, phosphorus and potassium in greenhouse tomato and decrease soil available phosphorus accumulation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1710−1718

[11] 陈浩, 汪玉, 袁佳慧, 等. 太湖稻麦轮作区减施磷肥对土壤供磷和小麦吸收磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 741−746
CHEN H, WANG Y, YUAN J H, et al. The effect of phosphorus-reduction on soil phosphorus supply and wheat phosphorus uptake in a rice-wheat rotation system in the Taihu Lake Region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(4): 741−746

[12] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58−66
JIANG B F, GU Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1989, 22(3): 58−66

[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: 172–178
LU R K. Analysis Methods of Soil Agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 172–178

[14] 杜艳玲, 周怀平, 杨振兴, 等. 长期施肥下褐土中不同磷组

分对磷素盈余的响应[J]. 华北农学报, 2018, 33(3): 224−231
DU Y L, ZHOU H P, YANG Z X, et al. Response of different P component to P balance in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(3): 224−231

[15] 谢英荷, 洪坚平, 韩旭, 等. 不同磷水平石灰性土壤Hedley磷形态生物有效性的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 141−144
XIE Y H, HONG J P, HAN X, et al. Study on soil bioavailability of the Hedley P forms in calcareous soil with different phosphorus level[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 141−144

[16] YANG X, POST W M. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method[J]. Biogeosciences, 2011, 8(10): 2907−2916

[17] 王海龙, 张民, 刘之广, 等. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤无机磷分级的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 318−324
WANG H L, ZHANG M, LIU Z G, et al. Effects of different phosphorus application levels on the inorganic phosphorus fraction under multi-year location experiment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 318−324

[18] 廖文华, 刘建玲, 黄欣欣, 等. 潮褐土上蔬菜产量和土壤各形态磷变化对长期过量施磷的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 894−903
LIAO W H, LIU J L, HUANG X X, et al. Responses of vegetable yield and changes of phosphorus fractions in cinnamon soil to long-term excess phosphorus application[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4): 894−903

[19] 张为政. 土壤磷组分的通径分析及其相对有效性[J]. 土壤学报, 1991, 28(4): 417−425
ZHANG W Z. Path analysis and relative availability of inorganic and organic phosphorus fractions in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1991, 28(4): 417−425

[20] ACKSEL A, BAUMANN K, HU Y F, et al. A critical review and evaluation of some P-research methods[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, 50(22): 2804−2824

[21] GAMA-RODRIGUES A C, SALES M V S, SILVA P S D, et al. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling[J]. Biogeochemistry, 2014, 118(1/2/3): 453−469

[22] HOU E Q, CHEN C R, KUANG Y W, et al. A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2016, 30(9): 1300−1309

[23] LIANG Y T, XIAO X, NUCCIO E E, et al. Differentiation strategies of soil rare and abundant microbial taxa in response to changing climatic regimes[J]. Environmental Microbiology, 2020, 22(4): 1327−1340

[24] XU P D, LIU Y R, ZHU J, et al. Influence mechanisms of long-term fertilizations on the mineralization of organic matter in Ultisol[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 201: 104594

[25] LI Y H, JONES D L, CHEN Q, et al. Acidification and anaerobic digestion change the phosphorus forms and distribution in particle fractions of cattle slurry and phosphorus dynamics in soil after application[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 101−111

[26] KAMEL G, GUILLAUME B. Structural Equatin Modeling with Lavaan[M]. London: Wiley, 2019: 73–85

[27] 曹莹菲, 张红, 刘克, 等. 不同施肥方式对塿土土壤磷素各组分含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 115−120
CAO Y F, ZHANG H, LIU K, et al. Effects of different fertilization implementations on phosphorus fraction of manural loessial soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 115−120

[28] 吴璐璐, 张水清, 黄绍敏, 等. 长期定位施肥对潮土磷素形态和有效性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 379−386
WU L L, ZHANG S Q, HUANG S M, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus fraction and availability in fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(2): 379−386

[29] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土不同磷组分对磷素盈余的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 924−933
YANG Z X, ZHOU H P, XIE W Y, et al. Response of phosphorus components to phosphate surplus in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(5): 924−933

[30] 金欣, 姚珊, Batbayar Javkhlan, 等. 冬小麦–夏休闲体系作物产量和土壤磷形态对长期施肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1660−1671
JIN X, YAO S, JAVKHLAN B, et al. Response of wheat yield and soil phosphorus fractions to long-term fertilization under rainfed winter wheat-summer fallow cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1660−1671

[31] 宋书会. 磷肥减施及覆膜条件下黑土磷素供应特征与转化机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019
SONG S H. Phosphorus supply and transformation in mollisol under reduced phosphate rate and plastic film mulching[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019

[32] 陈磊, 云鹏, 高翔, 等. 磷肥减施对玉米根系生长及根际土壤磷组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1548−1557
CHEN L, YUN P, GAO X, et al. Effects of reducing phosphorus fertilizer rate on root growth and phosphorus fractions in rhizosphere soils of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1548−1557

[33] 侯云鹏, 王立春, 李前, 等. 覆膜滴灌条件下基于玉米产量和土壤磷素平衡的磷肥适用量研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3573−3584
HOU Y P, WANG L C, LI Q, et al. Research on optimum phosphorus fertilizer rate based on maize yield and phosphorus balance in soil under film mulched drip irrigation conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(20): 3573−3584

[34] 王斌, 刘骅, 马义兵, 等. 长期施肥对灰漠土无机磷组分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 917−921
WANG B, LIU H, MA Y B, et al. Effect of long-term fertilization on fractions of inorganic phosphorus in grey desert

soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(4): 917−921

[35] 李若楠, 王政培, BATBAYAR Javkhlan, 等. 等有机质埁土有效磷和无机磷形态的关系[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3852−3865
LI R N, WANG Z P, JAVKHLAN B, et al. Relationship between soil available phosphorus and inorganic phosphorus forms under equivalent organic matter condition in a tier soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(21): 3852−3865

[36] 许艳, 张仁陟. 陇中黄土高原不同耕作措施下土壤磷动态研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 670−681
XU Y, ZHANG R Z. Dynamics of soil phosphorus as affected by tillage on the Loess Plateau in central Gansu, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 670−681

[37] 朱芸芸, 李敏, 曲博, 等. 芦苇根际土壤有机磷组分的季节变化及与磷酸酶活性的关系[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1108−1113
ZHU Y Y, LI M, QU B, et al. Seasonal variations of organic phosphorus composition and their relationship with phosphatase activity in *Phragmites communis* rhizosphere soil[J]. Soils, 2016, 48(6): 1108−1113

[38] 刘津, 李春越, 邢亚薇, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤有机磷组分及小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 157−164
LIU J, LI C Y, XING Y W, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic phosphorus fractions and wheat yield in farmland of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 157−164

[39] 孙锋, 曾令达, 彭长连, 等. 南美蟛蜞菊、蟛蜞菊和杂交蟛蜞菊土壤磷组分特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 798−804
SUN F, ZENG L D, PENG C L, et al. Effect of growing of *Wedelia trilobata*, *W. chinensis* or their hybrid on soil phosphorus fractionation in south China and their affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 798−804

[40] 曾晓敏, 范跃新, 林开淼, 等. 亚热带不同植被类型土壤磷组分特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2156−2162
ZENG X M, FAN Y X, LIN K M, et al. Characteristics of soil phosphorus fractions of different vegetation types in subtropical forests and their driving factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2156−2162

[41] QU Y, WANG C, GUO J S, et al. Characteristics of organic phosphorus fractions in soil from water-level fluctuation zone by solution ^{31}P-nuclear magnetic resonance and enzymatic hydrolysis[J]. Environmental Pollution, 2019, 255: 113209

[42] 袁佳慧, 汪玉, 王慎强, 等. 稻麦轮作磷肥减施下水稻土磷素生物有效性特征[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(7): 599−605
YUAN J H, WANG Y, WANG S Q, et al. Characteristic of soil P availability in reduced P-input rice-wheat cropping rotation paddy soils[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(7): 599−605

[43] 王静, 王磊, 张爱君, 等. 长期增施有机肥对土壤不同组分有机磷含量及微生物丰度的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1161−1168
WANG J, WANG L, ZHANG A J, et al. Effects of long-term organic fertilization on the content of soil organic phosphorus fractions and abundance of soil microorganism[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(9): 1161−1168