

长期施用猪粪对土壤磷含量及无机磷组分的影响

张春龙, 李冰, 黄容, 唐晓燕, 肖怡, 白根川, 王昌全

引用本文:

张春龙, 李冰, 黄容, 唐晓燕, 肖怡, 白根川, 王昌全. 长期施用猪粪对土壤磷含量及无机磷组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2241–2249.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0162>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液体牛粪与化肥配施对东北春玉米农田土壤磷素平衡的影响

姜佰文, 刘丽红, 刘俊辉, 于士源, 梁源, 申海峰, 邵慧

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2232–2240 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0404>

玉米种植体系土壤磷素有效性对有机肥长期施用响应的Meta分析

吕春玲, 陈延华, 何文天, 张思宇, 姜娜, 樊代佳, 杨华薇, 杨殿林, 邹国元

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 2011–2022 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0015>

低磷红壤的玉米磷肥农学效应与农学阈值

苏丽珍, 张连娅, 王思睿, 曹卉敏, 肖靖秀, 郑毅, 汤利

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 2004–2010 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0068>

小麦玉米秸秆长期还田对砂姜黑土磷库组成的影响

徐悦, 陈翔, 王擎运, 罗来超, 张朝春, 李金才, 叶新新, 邵红建, 柴如山

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1768–1777 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1504>

柠檬酸对温室土壤磷有效性的影响

房福力, 姚志鹏, 林伟, 李玉中, 徐春英, 李巧珍

农业环境科学学报. 2015(6): 1166–1173 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.021>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张春龙, 李冰, 黄容, 等. 长期施用猪粪对土壤磷含量及无机磷组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2241–2249.
ZHANG C L, LI B, HUANG R, et al. Effects of long-term application of swine manure on soil phosphorus content and inorganic phosphorus components[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2241–2249.



开放科学 OSID

长期施用猪粪对土壤磷含量及无机磷组分的影响

张春龙, 李冰*, 黄容, 唐晓燕, 肖怡, 白根川, 王昌全

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要:为研究长期猪粪施用下土壤无机磷组分变化及其对土壤磷素有效性的影响,本研究通过7 a定位试验,探明了稻-麦轮作中不同猪粪磷施用量下土壤磷素有效性以及土壤无机磷组分含量变化特征,并采用通径系数与逐步回归拟合方程剖析了土壤无机磷组分变化对磷有效性的贡献。结果表明:长期施用猪粪显著提升了土壤磷素有效性及土壤中各无机磷组分含量,其中当猪粪磷(P_2O_5)施用量超过 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M3)时,随着猪粪磷施用量提高土壤有效磷含量及磷活化系数(PAC)增加,但增加幅度逐渐下降,于M5处理($1\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)达到最大值,与单施化肥处理(CK)相比,增幅分别为 $86.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和4.50个百分点;在土壤无机磷组分中,土壤 $Ca_8\text{-P}$ 含量及占比最大,分别达 $268.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和20.73%。与当年施用猪粪(1 a, 2013年)相比,长期施用猪粪后(7 a, 2019年)有效磷主要贡献源由易利用磷源 $Ca_2\text{-P}$ 转变为中等活性磷源 $Ca_8\text{-P}$,且 $Ca_8\text{-P}$ 直接作用系数由0.302增至1.679。研究表明,长期连续猪粪投入改变了土壤无机磷蓄积方式,显著提高了土壤磷有效性及供磷潜力,有效磷贡献源由易利用磷源转变为中等活性磷源,土壤磷活性过高也可能导致磷淋失风险,稻-麦轮作系统中猪粪磷施用量不宜超过 $800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,结合稻麦季作物产量,猪粪磷施用量以 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为宜。

关键词:猪粪;土壤;无机磷;有效磷

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)10-2241-09 doi:10.11654/jaes.2022-0162

Effects of long-term application of swine manure on soil phosphorus content and inorganic phosphorus components

ZHANG Chunlong, LI Bing*, HUANG Rong, TANG Xiaoyan, XIAO Yi, BAI Genchuan, WANG Changquan

(College of Resources, Sichuan Agriculture University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to investigate the change in inorganic phosphorus components in soil and its effects on soil phosphorus availability under long-term application of swine manure, a 7-year field experiment was conducted in a rice-wheat rotation system to determine the effects of swine manure application on soil inorganic phosphorus content and its proportion and soil phosphorus availability. The contribution of soil inorganic phosphorus content to soil phosphorus availability was analyzed using path coefficient and stepwise regression fitting equations. The results showed that long-term application of swine manure could significantly improve soil inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability. Six treatments with swine manure phosphorus application rates of $(0\text{--}1\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}, P_2O_5)$ were evaluated. When the application amount was more than $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M3), the increase range of soil Olsen-P and phosphorus activation coefficient (PAC) decreased with the increase in application amount, and reached the maximum value in M5 ($1\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) at $86.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 4.50 percent points, respectively. In terms of soil inorganic phosphorus, soil $Ca_8\text{-P}$ content and its proportion increased the most, reaching $268.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 20.73%, respectively. After long-term application of swine manure, the main contribution source of available

收稿日期:2022-02-22 录用日期:2022-05-16

作者简介:张春龙(1994—),男,辽宁大连人,博士研究生,主要从事土壤磷循环研究。E-mail:820318763@qq.com

*通信作者:李冰 E-mail:benglee@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31972505);四川省科技计划重点研发项目(2021YFN0127)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31972505); The Science and Technology Plan Key Research Project of Sichuan Province, China (2021YFN0127)

phosphorus altered from $\text{Ca}_2\text{-P}$, an easily available phosphorus source, to $\text{Ca}_8\text{-P}$, a moderately active phosphorus source, and the direct action coefficient of $\text{Ca}_8\text{-P}$ increased from 0.302 to 1.679. Long-term application of swine manure significantly improved the availability of soil phosphorus and the potential of soil phosphorus supply, altered soil inorganic phosphorus fractions, and the contribution source of available phosphorus changed from an easily available to a medium active phosphorus source. However, high soil phosphorus activity may lead to the risk of phosphorus leaching. Therefore, under the conditions of this study, the application amount of phosphorus in swine manure in a rice-wheat rotation system should not be higher than $800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; the M3 ($600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) treatment is relatively better associated with the total rice and wheat yield than the other treatments in this study.

Keywords: swine manure; soil; inorganic phosphorus; availability phosphorus

畜禽粪便是重要的农业废弃物之一^[1], 2019年, 我国畜禽粪便年产生量达到 24.3 亿 t, 猪粪占比 31.25%, 且其中 40% 的猪粪尚未得到有效利用^[2-4]。据报道, 全球磷矿资源将在 200 a 内枯竭^[5-6], 而猪粪富含磷素 (6.45%)^[7], 将其肥料化后施入土壤不仅可以缓解其直接排放对环境造成的压力, 而且可以替代部分磷肥, 在解决不可再生矿物肥料资源尤其是磷矿枯竭问题方面具有重要现实意义。猪粪在堆肥过程中形成的可溶性磷酸盐 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 晶体, 使其磷组分主要为无机态磷, 且随着堆肥发酵时间延长, 铝、钙、镁和铁等多价金属离子与可溶性磷酸盐发生反应形成不溶性磷酸盐胶体或磷酸钙等, 从而降低了猪粪堆肥中磷的溶解度^[8-9]。因此, 当含有不同溶解度磷组分的腐熟猪粪替代化肥施入土壤时, 可能会引起土壤磷组分发生明显改变, 且这种改变因磷投入量的不同而存在差异^[6]。此外, 在水-旱轮作系统中, 干湿交替引起的土壤水分及氧化还原电位的变化均会提升土壤活性磷组分及磷素有效性^[10], 且水稻季可能会增加土壤磷淋失而改变土壤磷素循环平衡^[11]。

不同组分磷对土壤磷循环的贡献及土壤磷素有效性存在差异^[12], 从而会引起土壤供磷能力的不同^[13]。有研究表明, 土壤铝磷 (Al-P)、铁磷 (Fe-P) 是土壤磷转化过程中的重要中间过渡性磷组分, 其中 Fe-P 对有效磷含量提升的直接通径系数达 0.556^[14], 也有研究认为土壤无机磷组分中二钙磷 ($\text{Ca}_2\text{-P}$)、八钙磷 ($\text{Ca}_8\text{-P}$) 对土壤有效磷含量变化的贡献较大^[15]。一般而言, 在偏酸性土壤中土壤磷素有效性主要受 Al-P、Fe-P 组分影响^[14], 在土壤 pH 较高的钙质土壤中, 土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的变化对土壤有效磷含量影响较大^[15]。当腐熟猪粪施入土壤时, 一方面其可以作为磷源引起土壤磷组分发生明显改变, 另一方面可以通过改变土壤理化性质 (如土壤有机质含量及土壤阳离子交换量等) 间接影响土壤磷组分^[16-17]。研究表明, 猪粪的投入会提高土壤活性相对较高的磷组分含量

及有效磷活性^[18]。当前, 长期大量猪粪投入对土壤无机磷组分含量变化的影响及对土壤磷素有效性的贡献研究较少。因此, 本文通过 7 a 田间定位试验, 探讨长期持续猪粪施用对土壤磷累积、有效性及无机磷各组分含量的影响, 探明土壤无机磷组分对土壤磷素有效性的贡献及其对长期猪粪施用的响应, 为合理施用猪粪提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于都江堰市区东南的天马镇, 该地属中亚热带季风湿润气候, 年均气温 15.2°C , 年均降水量约 1 200 mm。供试土壤为岷江流域灰色冲积物发育的水稻土, 试验前土壤 pH 为 6.63, 有机质 (OM)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK) 含量分别为 28.40、1.40、0.88、22.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 (AN) 含量为 113.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 (Olsen-P) 含量为 8.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 (AK) 含量为 53.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

田间定位试验始于 2012 年, 试验共设置 6 个处理, 包括单施化肥处理 (CK) 和 5 个猪粪磷 (以 P_2O_5 计) 施用处理: 150、300、600、900、1 200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别标记为 M1、M2、M3、M4、M5, 每个处理重复 3 次, 随机排列, 具体施肥情况见表 1。试验区种植模式为小麦-水稻轮作, 小区面积 20 m^2 。小区间用塑胶薄膜区隔, 防止串水串肥。于稻季 (6 月至 10 月) 插秧和麦季 (11 月至次年 5 月) 播种前一次性将所有肥料均匀施入田块。供试化肥为市售尿素 (46.40% N)、过磷酸钙 (12.00% P_2O_5)、氯化钾 (60.00% K_2O), 猪粪为都江堰德宏农业公司所提供的干湿分离的腐熟猪粪, 每年所用猪粪采用的发酵方法及时间均保持一致, 其含氮 (N) 17.50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、含磷 (P_2O_5) 29.13 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、含钾 (K_2O) 12.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 猪粪中无机磷组分分别为 $\text{H}_2\text{O-P}$ 2.79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 4.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 NaOH-P

表1 田间试验处理及施肥情况($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 1 Experimental fertilization application($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	猪粪用量 Manure	尿素 Urea	过磷酸钙 Superphosphate	氯化钾 KCl	施磷量(P_2O_5) Phosphorus application	施氮量(N) Nitrogen application	施钾量(K_2O) Potassium application
CK	0	776	1 250	250	150	360	150
M1	5 150	588	0	150	150	360	150
M2	10 300	388	0	40	300	360	150
M3	20 600	0	0	0	600	360	250
M4	30 900	0	0	0	900	540	370
M5	41 200	0	0	0	1 200	720	495

注:表中施肥量为每年稻麦两季施用总量。

Note: The amount of fertilizer application is in rice-wheat rotation.

$1.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{HCl-P } 13.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Residual-P } 3.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 样品采集及测定

分别于施用猪粪初期(1 a, 2013年)和长期连续施用猪粪后(7 a, 2019年)采集水稻季成熟期土壤表层(0~20 cm)土样,按五点取样法用土钻取样,样品混合后采用四分法保留1.00 kg土样,土样风干并分别过1.00 mm和0.149 mm的尼龙筛后密封保存。

TP采用NaOH熔融-钼锑抗显色-分光光度法测定^[19]; Olsen-P采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ (pH 8.5)浸提-钼锑抗显色-分光光度法测定^[19]。由于土壤偏中性,故采用蒋柏藩等^[20]改进后的无机磷分级方法,将土壤中的无机磷分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、闭蓄态磷(O-P)、十钙磷($\text{Ca}_{10}\text{-P}$)6级,进行土壤磷分级的测定。

土壤磷活化系数(PAC)=有效磷含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)/全磷含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\times 100\%$

1.4 数据分析

采用Excel 2010和SPSS 19.0进行试验数据处理和制图。数据显著性分析采用方差分析法(ANOVA)和Tukey法($P<0.05$),相关分析采用皮尔逊相关系数法,无机磷组分对有效磷的贡献采用通径分析法和逐

步回归分析法。

2 结果与分析

2.1 长期施用猪粪对作物产量的影响

如表2所示,长期施用猪粪能显著提高作物产量($P<0.05$,下同)。与CK相比,长期施用猪粪后,作物产量随猪粪施用量的变化规律与施用猪粪初期相似,小麦季最高增产为M1处理(21.98%),而水稻产量与稻麦总产量均在M2处理表现出最大值,增产分别达34.46%、27.00%;相较于施用猪粪初期,长期施用猪粪后各猪粪(M2~M5)处理的作物产量均显著增加。总体而言,作物产量随施用猪粪年限延长显著增加,而随猪粪施用量的增加呈先升高后降低的趋势。

2.2 长期施用猪粪对土壤TP含量及其有效性的影响

2.2.1 土壤TP含量

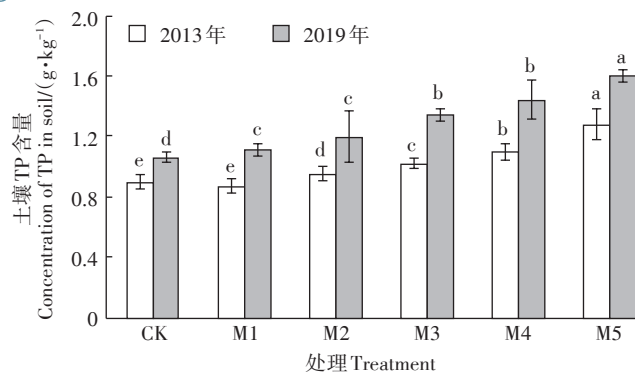
如图1所示,土壤TP含量随猪粪施用量增加和施用猪粪年限延长而显著增加。与CK相比,在施用猪粪初期,猪粪不同施用水平处理的土壤TP含量提高了5.56%~42.22%;而长期施用猪粪后,各猪粪(M2~M5)处理的土壤TP含量显著提高了4.91%~51.14%,相较施用猪粪初期,各处理土壤TP含量相应

表2 不同处理下作物产量的变化($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 2 The crops yield under different treatments($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	2013年			2019年		
	水稻季 Rice	小麦季 Wheat	稻麦季 R+W	水稻季 Rice	小麦季 Wheat	稻麦季 R+W
CK	8 159±155c	3 941±46c	12 100±198cd	7 974±256d	4 336±76c	12 310±234d
M1	8 372±306c	4 492±74a	12 864±275b	9 721±505c	5 289±122a	15 010±442a
M2	9 088±341a	4 222±74b	13 310±243a	10 723±563a	4 911±166b	15 634±514a
M3	8 992±265a	3 853±78c	12 846±234b	10 590±437a	4 795±198b	15 385±448a
M4	8 916±244ab	3 349±196d	12 265±373c	10 483±403ab	3 689±220d	14 171±439b
M5	8 509±155bc	3 300±284d	11 810±304d	9 912±255bc	3 621±268d	13 533±369c

注:不同字母表示相同年份相同季度不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference among the treatments in the same year and season($P<0.05$).



不同字母表示相同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different letters indicate significant difference among the treatments in the same year ($P < 0.05$). The same below

图1 不同处理对土壤TP含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on TP content

增加了 $0.16 \sim 0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中以 M4 处理的增幅最大。总体上, 猪粪施用能显著提升土壤 TP 含量, 但长期连续施用条件下, 当猪粪磷施用量在 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上时 (M3~M5), 土壤 TP 含量增幅随猪粪施用量增加而趋缓。

2.2.2 土壤 Olsen-P 含量及 PAC

如图2所示, 长期施用猪粪显著提高土壤 Olsen-P 含量及 PAC。在猪粪施用初期, 土壤 Olsen-P 含量随猪粪施用量增加而显著增加, 其中 M5 处理的土壤 Olsen-P 含量提升效果最大, 较 CK 增加了 787.5%。随着施用时间的增加 (2019 年), 各处理土壤 Olsen-P 含量 ($9.50 \sim 96.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著高于 2013 年 ($8.00 \sim 71.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。土壤 PAC 用于表征土壤 TP 向土壤 Olsen-P 转化的难易程度。与 CK 相比, 各猪粪处理的土壤 PAC 值均显著增加, 分别在 2013 年和 2019 年时增加了 0.26~4.66 个和 0.71~5.11 个百分点。对比 2013 年和 2019 年两个时期土壤 PAC 值发现, M3、M4 处理的差值较大。总体上, 长期施用猪粪可以显著提高土壤 Olsen-P 含量和 PAC, 随着施用时间的增加, 猪粪磷投入量为 $600 \sim 1200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时对土壤 PAC 含量提升效果较佳, 其中猪粪磷投入量为 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时对土壤 PAC 提升效果最明显。

2.3 长期施用猪粪对土壤无机磷组分变化的影响

除 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 外其他各无机磷组分的含量均随猪粪施用量及施用时间的增加而显著增加 (图 3)。与 CK 相比, M5 处理的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量最高, 2013 年和 2019 年时分别为 $91.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $268.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3b)。相较 2013 年, 2019 年时土壤 Al-P 、 Fe-P 含量的

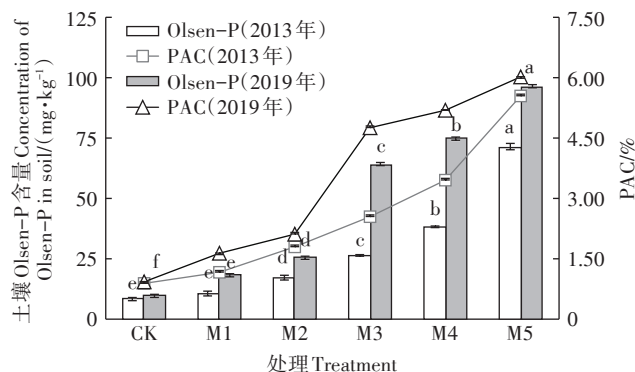


图2 不同处理对土壤 Olsen-P 含量和土壤 PAC 的影响

Figure 2 Effects of different treatments on Olsen-P content and PAC

增加幅度随猪粪施用量增加而降低 (图 3d 和图 3e), 即长期施用猪粪后土壤 Al-P 、 Fe-P 可能向其他磷组分转化。

如图4所示, 各处理土壤无机磷组分的占比存在差异。与 CK 相比, 2013 年时猪粪的投入增加了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 的占比, 2019 年时增加了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 的占比, 但减少了 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的占比, 其中 M5 处理的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比最小, 较 CK 减少了 18.00 个百分点。随着施肥时间的增加, 各处理的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占比均上升, 2019 年较 2013 年增加 6.60~10.91 个百分点, 而各处理的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比均降低, 2019 年较 2013 年时减少 13.13~20.90 个百分点, 可见施肥改变了土壤无机磷组分占比, 且随着施肥时间的增加, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比显著降低。总体而言, 长期施用猪粪会显著提升土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 含量及其占比, 而对 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量无显著影响, 但会显著降低其在无机磷组分中的占比。

2.4 土壤无机磷组分变化对土壤磷素有效性的贡献

采用通径分析法, 根据直接相关系数及间接相关系数进一步阐述不同猪粪施用量处理下土壤无机磷组分对土壤磷素有效性的贡献。从表3可以看出, 在施用猪粪初期, 无机磷组分中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对土壤 Olsen-P 含量的直接作用系数最大, 达 0.690, 其次是 $\text{Ca}_8\text{-P}$, 这表明本试验条件下作物主要有效磷源为 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 潜在磷源为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 。 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 对土壤 Olsen-P 含量的直接作用系数均较低, 但对 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 均有相对较高的相关系数, 可见 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 可能通过影响 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 组分, 进而对土壤磷有效性作出贡献。采用逐步回归法分析了土壤各无机磷组分对 Olsen-P 的影响效应, 证实 2013 年时仅 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 表现为显著影响 (表 4), 其他无机磷组分均对土壤

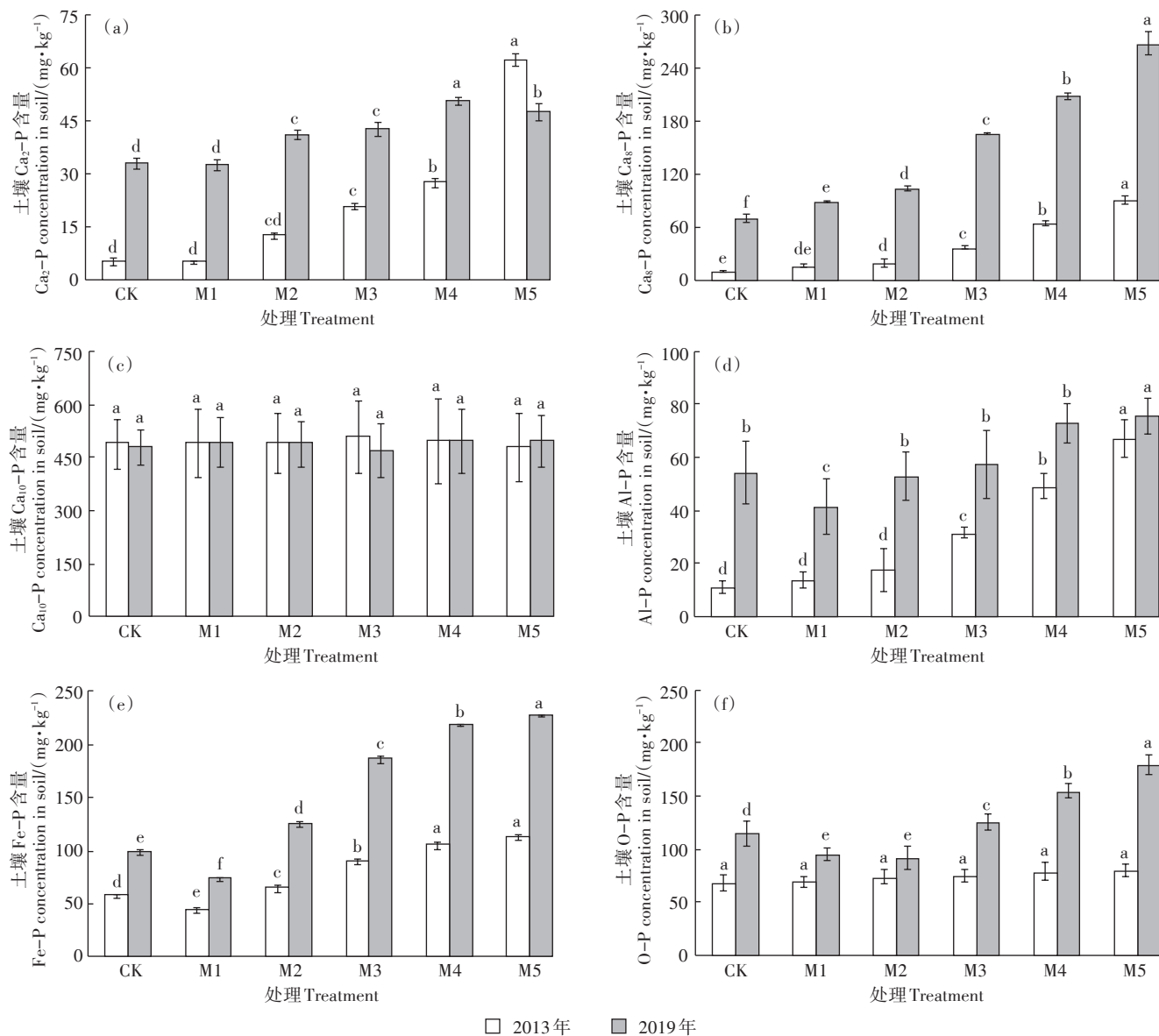


图3 不同处理对土壤各无机磷组分含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on inorganic phosphorus fractions content in soil

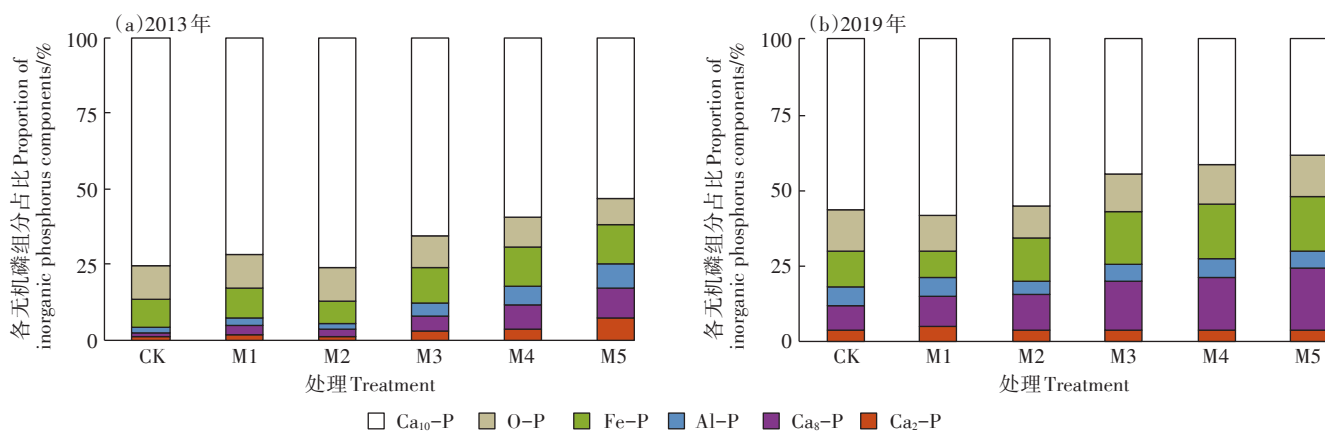


图4 不同处理土壤各无机磷组分占比

Figure 4 Proportion of soil inorganic phosphorus components in different treatments

Olsen-P 含量影响不显著。

在长期连续施用猪粪后,影响土壤 Olsen-P 含量的主要无机磷组分为 $\text{Ca}_8\text{-P}$,直接作用系数达 1.679,其次是 Al-P (0.268),这说明随着施用时间的增加,作物的主要有效磷源由 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 变为 $\text{Ca}_8\text{-P}$,潜在磷源由 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转变为 Al-P ,而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 仍为难利用磷源(表 3)。无论是 2013 年还是 2019 年, Fe-P 对土壤 Olsen-P 的贡献均为负值,但其直接作用系数绝对值变大。总体上,在本试验条件下, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 分别是作物主要有效磷源和潜在磷源,但随着施用时间的增加, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转变为主要有效磷源。

3 讨论

3.1 土壤磷素有效性及磷组分对长期施用猪粪的响应

本研究中,长期施用猪粪显著提高了土壤磷含量与磷素有效性,尤其是猪粪磷投入量为 $600\sim 1\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M3~M5)时,土壤 Olsen-P 含量和 PAC 提升效果较佳,这与 ZHANG 等^[8]和张珂珂等^[16]的研究结果一致。一般而言,猪粪中磷素占比较高(0.93%~5.20%),且以可利用性相对较高的无机磷为主(约 70%),猪粪以有机粪肥形式施入土壤可以直接增加土壤磷的含量,提升土壤磷活性^[15],且施磷量越高,Ol-

sen-P 含量增加越快,但土壤有效性高会加速磷素淋失,造成磷流失风险并降低磷收益^[16]。因此本研究中长期猪粪磷施用量在 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M3)以上时,土壤 TP、Olsen-P 的提升效果与猪粪施用量不成等比,这可能是因为较高的猪粪投入量显著提高了土壤 Olsen-P 含量(图 2),而表层(0~20 cm)土壤磷素因 Olsen-P 含量过高而导致淋失、转移速度增加,从而降低了随猪粪施用量增加而增加的幅度,这也在一定程度上解释了本研究中土壤 PAC 在猪粪投入量超过 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时提升效果反而下降的原因。相较于 2013 年,2019 年相同处理土壤 Olsen-P 增加量与猪粪磷施用量间呈二项式关系,为 $y=-0.000\ 08x^2+0.125\ 2x-14.018$, $R^2=0.868\ 1$,二项式顶点横坐标为 782.5,这表明当猪粪磷施用量低于 $782.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,与 2013 年相比,长期施用猪粪土壤 Olsen-P 含量增加量随猪粪施用量的增加而增加,当猪粪磷施入量高于 $782.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,与 2013 年相比,长期施用猪粪土壤 Olsen-P 含量增加量随猪粪施用量的增加而呈下降趋势,即当猪粪磷施用量高于 $782.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,表层土壤中大量活性磷发生转移,并可能导致土壤磷淋失风险,同时结合产量数据来看,M3 处理为本研究中的最佳处理(表 2)。

施用猪粪除了可直接为土壤提供磷源外,其含有

表 3 土壤无机磷组分与 Olsen-P 含量之间的通径分析

Table 3 Path analysis for soil Olsen-P content as a function of soil inorganic phosphorus fractions

作用因子 Factor	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect						与 y 的相关系数 r_y
		$\text{Ca}_2\text{-P}\rightarrow y$	$\text{Ca}_8\text{-P}\rightarrow y$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}\rightarrow y$	$\text{Al-P}\rightarrow y$	$\text{Fe-P}\rightarrow y$	$\text{O-P}\rightarrow y$	
$\text{Ca}_2\text{-P}$	0.690*/—	—/—	0.291/—	0.004/—	—/—	-0.032/—	0.044/—	0.997/—
$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.302*/1.679*	0.662/—	—/—	0.003/0.010	-0.109	-0.034/-0.461	0.047/0.011	0.981/0.991
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	-0.012/0.230	-0.244/—	-0.072/0.555	—/—	-0.051	-0.002/-0.252	0.001/-0.018	-0.331/0.360
Al-P	-0.268*	—/—	-1.243	-0.011	—/—	-0.466	-0.013	-0.916
Fe-P	-0.037/-1.331*	0.598/—	0.281/1.243	-0.001/0.013	-0.111	—/—	0.048/0.011	0.888/0.888
O-P	0.051/0.092	0.599/—	0.280/0.432	-0.001/-0.013	-0.044	-0.035/-0.162	—/—	0.894/0.334

注:/左侧为 2013 年数据计算结果,右侧为 2019 年数据计算结果,y 为有效磷含量,下同。 Al-P 为处理一年后排除因子,*表明该组分与土壤 Olsen-P 间显著相关。

Note: The data in the table,/ on the left calculate year 2013 processing and year 2019 on the right, y is the effective phosphorus content, the same below. Al-P is the exclusion factor after one year of processing, * shows that there is a significant correlation between Olsen-P and this component.

表 4 土壤无机磷组分与 Olsen-P 含量之间的逐步回归分析

Table 4 Stepwise regression analysis between soil inorganic phosphorus fractions and available phosphorus content at initial stage of treatment

作用因子 Factor	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect			与 y 的相关系数 r_y	显著水平 Significant level
		$\text{Ca}_2\text{-P}\rightarrow y$	$\text{Ca}_8\text{-P}\rightarrow y$	$\text{Fe-P}\rightarrow y$		
$\text{Ca}_2\text{-P}$	0.709/—	—/—	0.281/—	—/—	0.997/—	<0.001/—
$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.299/1.357	0.614/—	—/—	-0.366	0.981/0.991	0.005/<0.001
Fe-P	-0.389	—/—	-1.277	—/—	-0.888	-0.011

较高比例的有机质还可以提供大量的阴离子来掩蔽土壤钙、铁、铝等金属氧化物对磷的吸附位,从而导致土壤对磷的吸附固定作用降低,增加土壤相对活性磷组分的比例^[21-22],这也解释了本研究中长期施用猪粪显著增加作物相对易利用土壤无机磷组分($\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P)含量的原因。在猪粪磷进入土壤后, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量无显著变化而其他无机磷组分含量显著增加,从而使得土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在无机磷组分中的占比显著降低,作物可利用无机磷组分占比均显著提高。一方面是由于猪粪中几乎不存在 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$,且 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在自然环境中很难进行分解与转化^[23]。另一方面,猪粪中大量有机质分解产生的有机酸促进了土壤 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 分解^[24],猪粪中的有机阴离子在土壤微生物作用下分解,有机酸被脱羧的过程中会消耗土壤中的 H^+ 并释放 CO_2 ,从而提高土壤 pH,土壤 pH 提高会加速土壤难溶磷组分的解吸、溶解,最终增加土壤活性无机磷组分含量^[25-28],降低 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在无机磷组分中的占比。本研究中猪粪施用初期显著增加了土壤 OM 和 AK 含量,而对 pH 无显著影响(表 5),此时仅土壤 OM 含量与土壤 Olsen-P 含量呈显著相关关系($P<0.05$,下同);长期连续施用猪粪能显著增加土壤 OM、TN、TK、AK、AN 的含量,并显著提高土壤 pH(表 5),其中土壤 OM、pH、TN 含量与土壤 Olsen-P 含量显著相关。在不同猪粪施用量处理中,M5 处理的土壤各磷组分中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比降至 38.37%(图 4),此时土壤 pH 达 6.98(表 5),即长期施用猪粪可以显著提升土壤中作物易利用磷源的占比,而土壤理化性质发生改变对于土壤磷组分的变化有一定影响,但具体贡献仍需进一步探讨。

3.2 土壤无机磷各组分对土壤磷素有效性的贡献

不同组分磷对土壤磷循环贡献存在差异^[14],且对作物磷素养分供应均有重要作用,但只有其中小部分对作物直接有效,而且不同组分无机磷的有效性也不尽相同,从而导致土壤供磷能力的差异^[13]。一般而言,无机磷组分中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 为直接有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 为中等活性磷源, O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为潜在磷源^[22]。本研究中,施用猪粪第一年除 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 外,土壤 Olsen-P 及 PAC 与其他土壤无机磷组分均显著正相关,且通径分析、逐步回归分析表明在施用猪粪第一年 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是土壤 Olsen-P 的主要磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是潜在磷源,其他无机磷组分主要通过影响土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量而间接对土壤 Olsen-P 含量产生影响。这与焦亚鹏等^[29]、李若楠等^[30]的研究结果相似,二者研究结果均表明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是土壤 Olsen-P 的主要磷源,这是由于在偏中、碱性土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 活性最高且包含部分水溶性磷,猪粪中的正磷酸盐进入土壤显著增加了土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量,提升了土壤磷素有效性^[8]。

本研究中施用猪粪 7 a 后,对土壤 Olsen-P 含量产生正贡献直接作用系数最高的无机磷组分由 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 变为 $\text{Ca}_8\text{-P}$,而 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对土壤 Olsen-P 含量影响极小,这是由于土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 活性极高,为直接有效磷源,易向更稳定的中等活性磷源 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 沉淀、转化^[23],而长期猪粪施用下土壤活性磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的累积促进了这种转化过程,且作为土壤中等活性磷源的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的增加幅度与增加量均表现为最高。本研究中 Fe-P 对土壤 Olsen-P 含量的直接作用系数也相对较高,但表现为负贡献,这与其他无机磷组分通过间接作用影响

表 5 不同处理土壤理化性质

Table 5 Soil physical and chemical properties of different treatments

施用年限 Apply year	处理 Treatment	OM/(g·kg ⁻¹)	pH	TN/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)	AK/(mg·kg ⁻¹)	AN/(mg·kg ⁻¹)
2013 年	CK	28.42±0.34c	6.63±0.02a	1.43±0.08b	22.35±0.14b	56.33±0.85c	113.17±5.32c
	M1	28.33±0.35c	6.62±0.04a	1.45±0.06ab	22.19±0.42b	57.56±1.07b	116.30±1.55c
	M2	28.78±0.43c	6.63±0.02a	1.45±0.06ab	22.55±0.65ab	56.85±1.21bc	93.13±1.00d
	M3	29.41±0.36b	6.64±0.01a	1.45±0.08ab	23.48±0.39a	57.08±0.43bc	116.76±0.16c
	M4	29.56±0.53b	6.67±0.06a	1.47±0.06a	23.08±0.88ab	57.61±1.12b	129.42±5.13b
	M5	29.90±0.36a	6.68±0.04a	1.52±0.01a	23.17±0.48a	59.44±0.87a	140.29±7.84a
2019 年	CK	19.03±1.24f	5.83±0.06f	1.46±0.09c	25.55±4.17b	46.33±2.85d	130.11±1.93d
	M1	28.56±1.38e	6.32±0.04e	1.45±0.08c	27.19±2.53b	37.56±<0.01e	128.91±1.12d
	M2	36.85±0.36d	6.51±0.05d	1.43±0.08c	28.55±6.71ab	52.85±4.42c	120.14±2.99e
	M3	41.01±0.49c	6.65±0.03c	1.71±0.09b	27.48±5.44b	67.08±<0.01a	158.89±3.68a
	M4	44.20±1.38b	6.87±0.06b	1.87±0.09a	32.08±2.90a	60.61±2.92b	149.19±2.76c
	M5	46.52±0.88a	6.98±0.06a	1.91±0.02a	33.17±0.54a	69.44±2.95a	154.80±2.98b

注:不同英文字母表示相同年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference among treatments in the same year ($P<0.05$).

土壤 Fe-P 含量而对这种负贡献产生缓冲作用有关。在中碱性土壤中按蒋柏藩等^[20]的分级方法得到 Fe-P、Al-P 稳定性高于 $\text{Ca}_8\text{-P}$, 且前人研究结果表明长期施用猪粪提高了土壤 pH 并促进了 P 吸附位点 (Fe、Al) 的饱和, 从而使 Al-P、Fe-P 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化^[24-25], 因此在本研究中猪粪投入 7 a 后, 猪粪磷施用量超过 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤 pH 显著提高 (较 CK 增加了 0.28~0.39 个单位, 表 5), 土壤无机磷组分 (Fe-P、Al-P) 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化, 增加了 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量, 土壤直接有效磷源变为 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 。

4 结论

(1) 长期施用猪粪显著提高了土壤磷素有效性和活性相对较高的磷组分 ($\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P) 的含量及其占比, 降低了作物难利用的 O-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占比, 猪粪磷投入量为 $600 \sim 1\,200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的提升效果较佳, 但考虑磷淋失风险, 猪粪磷投入量不宜高于 $800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(2) 施用猪粪 1 a 对土壤 Olsen-P 含量直接作用系数较大的无机磷组分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$, 施用猪粪 7 a 后土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 直接作用系数增加, 变为直接有效磷源, 潜在磷源为 Al-P。

(3) 总体而言, 长期猪粪施用在增加土壤 Olsen-P 及无机磷组分含量的同时促进了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的转化, 在一定程度上改变了土壤直接有效磷源, 提高了潜在有效磷源比例, 增加了土壤供磷潜力, 结合作物产量来看, 猪粪磷投入量为 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相对适宜。

参考文献:

- [1] FU D G, WU X N, DUAN C Q, et al. Response of soil phosphorus fractions and fluxes to different vegetation restoration types in a subtropical mountain ecosystem[J]. *Catena*, 2020, 193: 63-72.
- [2] BAI Z, MA L, JIN S, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 13409-13418.
- [3] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462-1479. NIU X S, JU X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [4] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. National Bureau of Statistics of the Rural Social and Economic Survey Division. China rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [5] LIU X, SHENG H, JIANG S Y, et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113: 2609-2614.
- [6] NOBILE C M, BRAVIN M N, BECQUER T, et al. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifications in soil as compared to phosphorus accumulation[J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124709.
- [7] 单英杰, 章明奎. 不同来源畜禽粪的养分和污染物组成[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 80-86. SHAN Y J, ZHANG M K. Contents of nutrient elements and pollutants in different sources of animal manures[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 80-86.
- [8] ZHANG T, WU X, SHAHEEN S M, et al. Effects of microorganism-mediated inoculants on humification processes and phosphorus dynamics during the aerobic composting of swine manure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125738.
- [9] ZHANG T, HE X Y, DENG Y, et al. Swine manure valorization for phosphorus and nitrogen recovery by catalytic-thermal hydrolysis and struvite crystallization[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 99-111.
- [10] GU S, GRUAU G, MALIQUE F R, et al. Drying/rewetting cycles stimulate release of colloidal-bound phosphorus in riparian soils[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 32-41.
- [11] SAMADDAR S, CHATTERJEE P, TRUJILLO J, et al. Long-term phosphorus limitation changes the bacterial community structure and functioning in paddy soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 134: 111-115.
- [12] HALLAMA M, PEKRUN C, LAMBERS H, et al. Hidden minerse the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agro-ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2019, 434(1/2): 7-45.
- [13] KANTER D R, BROWNLIE W J. Joint nitrogen and phosphorus management for sustainable development and climate goals[J]. *Environmental Science and Policy*, 2019, 92: 1-8.
- [14] 蒋芬, 黄娟, 褚国伟, 等. 增温对南亚热带森林土壤磷形态的影响及其对有效磷的贡献[J]. 植物生态学报, 2021, 45(2): 197-206. JIANG F, HUANG J, CHU G W, et al. Effects of warming on soil phosphorus fractions and their contributions to available phosphorus in south subtropical forests[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(2): 197-206.
- [15] GUO T, LOU C L, ZHAI W W, et al. Increased occurrence of heavy metals, antibiotics and resistance genes in surface soil after long-term application of manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 995-1003.
- [16] 张珂珂, 黄绍敏, 郭斗斗, 等. 长期定位施肥对潮土磷素下移及有效磷生态阈值的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 64-69. ZHANG K K, HUANG S M, GUO D D, et al. Study on transfer of phosphorus and threshold values of available phosphorus in fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(5): 64-69.
- [17] WAN W J, LI X, HAN S, et al. Soil aggregate fractionation and phosphorus fraction driven by long-term fertilization regimes affect the abundance and composition of P-cycling-related bacteria[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 75-84.
- [18] DE SOUZA OLIVEIRA FILHO J, FERRARI A C, PEREIRA M G, et al. Phosphorus accumulation in soil after successive applications of swine manure: A long-term study in Brazil[J]. *Environmental Earth*

- Sciences*, 2020, 79:3–12.
- [19] 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, 1999. LU R K. Methods for soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [20] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2):101–102. JIANG B P, GU Y C. Method for determination of inorganic phosphorus classification in calcareous soils[J]. *Soils*, 1990, 22(2):101–102.
- [21] KING K W, BALOGH J C, AGRAWAL S G, et al. Phosphorus concentration and loading reductions following changes in fertilizer application and formulation on managed turf[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14(11):2929–2938.
- [22] 李娟娟, 滕艳敏, 李季. 不同温室蔬菜种植模式下土壤磷素形态分布与转化[J]. 土壤, 2020, 52(2):271–278. LI W W, TENG Y M, LI J. Soil phosphorus fraction and transformation under different production modes of greenhouse vegetables[J]. *Soils*, 2020, 52(2):271–278.
- [23] WEIHRAUCH C, OPP C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far[J]. *Geoderma*, 2018, 325:183–194.
- [24] ZHENG Z M, ZHANG T Q, WEN G, et al. Soil testing to predict dissolved reactive phosphorus loss in surface runoff from organic soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5):1786–1796.
- [25] LAURICELLA D, BUTTERLY C R, CLARK G J, et al. Effectiveness of innovative organic amendments in acid soils depends on their ability to supply P and alleviate Al and Mn toxicity in plants[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(11):3951–3962.
- [26] 王彦丽, 范庭, 王旭东, 等. 长期磷肥不均投入下黄土高原土壤磷素有效性及与土壤性质关系分析[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5):237–242, 250. WANG Y L, FAN T, WANG X D, et al. Soil phosphorus fraction and transformation under different production modes of greenhouse vegetables[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):237–242, 250.
- [27] SHEN P, HE X H, XU M G, et al. Soil organic carbon accumulation increases percentage of soil Olsen P to total P at two 15-year monocropping systems in northern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):597–603.
- [28] 夏丽丹, 曹升, 张虹, 等. 不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5):1101–1111. XIA L D, CAO S, ZHANG H, et al. Effect of biochar on phosphorus forms and phosphatase activity in red soil under different water conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5):1101–1111.
- [29] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8):1459–1472. JIAO Y P, QI P, WANG X J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on inorganic phosphorus forms of typical farmland soil in the dry farming area of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8):1459–1472.
- [30] 李若楠, 王政培, BATBAYAR J, 等. 等有机质壤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, BATBAYAR J, 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.

(责任编辑:李丹)