

DOI: 10.11766/trxb202104210207

王一锬, 蔡泽江, 冯固. 不同磷肥调控措施下红壤磷素有效性和利用率的变化[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 235–246.

WANG Yikun, CAI Zejiang, FENG Gu. Effects of Different Phosphorus Application Techniques on Phosphorus Availability in a Rape System in a Red Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 235–246.

不同磷肥调控措施下红壤磷素有效性和利用率的变化*

王一锬¹, 蔡泽江^{2, 3†}, 冯 固¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/湖南祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南祁阳 426182)

摘 要: 南方红壤区磷肥当季利用率仅为 10%~25%, 提高磷肥利用率是亟待解决的问题。通过两年田间试验, 分析了不同磷肥品种(过磷酸钙、猪粪、钙镁磷肥、磷酸一铵、磷酸二铵)、磷肥梯度(常规施磷、减磷 20%、减磷 30%)以及调控措施(石灰、钙镁磷肥配施磷酸二铵、钙镁磷肥配施秸秆)对红壤磷素有效性和作物生长的影响, 探索提高磷肥利用率的途径。结果表明, 各磷肥品种间, 以猪粪处理土壤有效磷、地上部生物量、磷肥累积利用率等指标最高, 土壤有效磷较不施磷处理两年分别提高了 32%和 241%, 地上部生物量较不施磷处理两年分别提高了 73%和 510%, 两年的磷肥累积利用率分别为 16.4%和 26.5%; 伴随磷肥用量的减少, 土壤有效磷含量显著降低, 而对油菜生长、磷肥利用率及磷肥农学效率无显著影响; 与单施钙镁磷肥相比, 钙镁磷肥配施磷酸二铵能显著提高油菜籽粒产量、土壤有效磷含量、磷肥累积利用率、磷肥农学效率、土壤磷素盈余量等指标。添加石灰可提高作物产量及土壤有效磷含量。油菜产量与土壤有效磷呈极显著正相关关系。上述结果表明, 猪粪替代化学磷肥可达到减施增效、促进作物生长的目的, 且以减磷 30%为宜; 钙镁磷肥配施磷酸二铵可推荐为磷肥调控措施。

关键词: 红壤; 磷肥; 土壤有效磷; 作物产量; 磷肥利用率

中图分类号: S153 文献标志码: A

Effects of Different Phosphorus Application Techniques on Phosphorus Availability in a Rape System in a Red Soil

WANG Yikun¹, CAI Zejiang^{2, 3†}, FENG Gu¹

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. National Field Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Hunan Province/ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan 426182, China)

Abstract: 【Objective】 Phosphorus (P) is an indispensable nutrient needed for plant growth and development and P is deficient, especially in the red soil region of South China. However, the unsuitable application of P fertilizer results in low use efficiency of

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200)和国家自然科学基金项目(U19A2046, 41977104)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China(No. 2017YFD0200200) and the National Natural Science Foundation of China(Nos. U19A2046 and 41977104)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: caizejiang@caas.cn

作者简介: 王一锬(1997—), 男, 山东临沂人, 硕士, 主要从事磷肥高效利用方向。E-mail: 910365451@qq.com

收稿日期: 2021-04-21; 收到修改稿日期: 2021-08-17; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-10-25

the fertilizer, ranging from 10% to 25% in the current season in the region. This could result in P surpluses in soils, and runoffs and is one of the important nonpoint source pollutions of aquatic habitats and other water resources. Thus, it is important to investigate a suitable P fertilization in the region to improve P use efficiency and sustain crop yields. 【Method】 A field experiment was conducted at the Experimental Station of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan Province, China. The effects of different phosphorus fertilizers (superphosphate, swine manure, calcium magnesium phosphate, monoammonium phosphate, diammonium phosphate), P application rates (conventional phosphorus application, phosphorus reduction 20%, phosphorus reduction 30%), and P combined with amendments (lime, calcium magnesium phosphate fertilizer combined with diammonium phosphate, or crop straw return) on phosphorus availability and crop growth in red soil were tested. 【Result】 Of the different phosphorus fertilizers, swine manure induced the highest soil available phosphorus and aboveground biomass and P use efficiency in 2019. Also, under this treatment the crop yield in 2020 was significantly higher than that of other treatments. Compared with the control treatment, swine manure treatment significantly increased soil available phosphorus and aboveground biomass by 32% and 241%, respectively, in 2019, and by 73% and 510% in 2020. As P application rates decreased, the soil available P content was also significantly decreased. However there were no changes in rape seed yield, aboveground biomass, P use efficiency and phosphorus agronomy efficiency. Among them, 30% phosphorus reduction was the best treatment. Compared with a single application of calcium magnesium phosphate, the combined application of calcium magnesium phosphate and diammonium phosphate effectively improved crop yield, soil available phosphorus and phosphorus efficiency index to a certain extent. The treatment of calcium magnesium phosphate fertilizer + diammonium phosphate had the best effect on the crop yield, soil available phosphorus, phosphorus fertilizer cumulative use efficiency, phosphorus agronomic efficiency and soil phosphorus surplus. The addition of lime improved crop yield, soil available phosphorus and phosphorus fertilizer cumulative use efficiency, but did not reach a significant level as compared to superphosphate only treatment. There was a significant positive correlation between rape seed yield and soil available phosphorus. 【Conclusion】 From the above research results, we can conclude that the replacement of chemical phosphorus fertilizer by swine manure phosphorus could achieve the purpose of reducing application and increasing efficiency. Also the best amount of phosphorus fertilizer was a 30% reduction of conventional phosphorus application rate. The calcium magnesium phosphorus fertilizer as a P source should be applied combination with diammonium phosphate to supply P demand for crop growth in such weak acidic red soils.

Key words: Red soil; Phosphate fertilizer; Soil available phosphorus; Crop yield; Phosphate fertilizer use efficiency

磷是植物生长发育不可缺少的第二大营养元素^[1], 在保障作物高产中发挥着不可替代的作用^[2]。我国南方红壤区总面积约 110 万 km², 占国土面积的 11.8%^[3], 是重要的粮棉油产区^[4]。然而, 红壤由于强烈的脱硅富铝化作用, 土壤酸度强且存在大量的铁、铝等离子, 磷素易被固定为难溶性的磷酸盐, 从而导致磷素有效性和利用率低^[5]。研究表明, 我国红壤地区磷肥的当季利用率仅为 10%~25%^[6]。

研究表明, 磷肥品种与土壤酸碱度匹配对提高磷素有效性和利用率至关重要。余小兰等^[7]通过短期培养试验发现, 钙镁磷肥可有效提高酸性砖红壤 (pH5.67) 和酸性水稻土 (pH5.81) pH 和有效磷含量。李会枝^[8]则通过 2 年田间试验发现, 在酸性土壤的水稻季和油菜季分别施用磷酸二铵和钙镁磷肥, 均能有效提高作物产量和磷肥利用率。钙镁磷

肥和磷酸二铵均为碱性肥料, 其中钙镁磷肥含有丰富的钙、镁, 施入酸性土壤中, 可中和土壤酸度、释放出磷, 又能提供钙、镁, 促进作物生长^[9]。此外, 有机物料中含有较多的磷及解磷微生物, 这些微生物的分泌物可活化土壤中的磷, 提高土壤有效磷含量和磷肥利用率^[10]。石灰及秸秆还田作为红壤酸度调控和肥力提升的措施, 对提高红壤磷素有效性具有一定效果^[11-12]。

前人就如何提升红壤磷素有效性及磷肥利用率的问题已开展了大量工作, 但大部分研究集中在初始土壤 pH 较低的酸性或强酸性红壤上 (pH<6.0)^[11-14]。磷肥在红壤中的有效性在很大程度上取决于土壤酸度状况, 而不同磷肥品种及调控措施能否有效提高弱酸性红壤 (pH>6.0) 磷素有效性和磷肥利用率尚不明确。为此, 本研究将磷肥品种与施磷量及不同

调控措施相结合进行研究,探索出适于弱酸性缺磷红壤的磷肥高效利用途径。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

试验地位于湖南省永州市祁阳县文富市镇官山坪村中国农业科学院红壤实验站内(26°45'12"N, 111°52'32"E),海拔 120 m,年降水量 1 407.5 mm,年均温度 18.1℃,有效积温 3 258.9℃,无霜期 300 d,日照时数 1 458.3 h。土壤母质为第四纪红土;土壤基础性质为全氮 0.79 g·kg⁻¹、全磷 0.18 g·kg⁻¹、全钾 6.17 g·kg⁻¹、碱解氮 43.45 mg·kg⁻¹、有效磷 7.19 mg·kg⁻¹、速效钾 98.81 mg·kg⁻¹、有机质 12.68 g·kg⁻¹、pH 6.5。

1.2 试验设计及田间管理

本试验共设置 11 个处理,分别为:(1)不施磷(CK1),(2)常规施磷量(CK2,过磷酸钙),(3)减磷 20%(0.8SSP,过磷酸钙),(4)减磷 30%(0.7SSP,过磷酸钙),(5)猪粪磷(M),(6)减磷

30%+石灰(0.7SSPL,过磷酸钙),(7)钙镁磷肥(CMP),(8)磷酸二铵(DAP),(9)钙镁磷肥+磷酸二铵(CMPD),(10)磷酸一铵(MAP)和(11)钙镁磷肥+秸秆还田(CMPS),处理(5)~(11)施磷量相同,均为减磷 30%。每个处理 4 次重复,采用随机排列,小区面积为 40 m²。其中,CK1、CK2、0.7SSP、M、CMP、DAP、MAP 7 个处理比较不同磷肥品种间差异;CK1、CK2、0.8SSP、0.7SSP 4 个处理比较磷肥梯度对土壤磷有效性和磷肥利用率的影响;CK1、CK2、CMP、CMPD、CMPS 等 5 个处理为钙镁磷肥调控试验;CK1、CK2、0.7SSP、0.7SSPL 等 4 个处理为石灰调控试验。种植方式为一年两熟制的油菜—玉米轮作。供试油菜品种:2019 年用白菜型油菜(国审早熟 100 天),2020 年为甘蓝型油菜(农华油 101)。白菜型油菜于 2018 年 12 月移栽,2019 年 5 月收获;橄榄型油菜于 2019 年 10 月移栽,2020 年 5 月收获。各处理施肥量如表 1 所示。氧化钙于施肥前 10 d 一次性施入土壤;每季过磷酸钙、钙镁磷肥、磷酸二铵、磷酸一铵、猪粪均一次性施入作为底肥;每季氮、钾肥施入量的 40%

表 1 处理与油菜季施肥量

Table 1 Treatments and application rates of fertilizers for rape

处理 Treatments	施磷量 P application rates/ (P ₂ O ₅ , kg·hm ⁻²)	施氮量 N application rates/ (N, kg·hm ⁻²)	施钾量 K application rates/ (K ₂ O, kg·hm ⁻²)
CK1	0	180	120
CK2	75	180	120
0.8SSP	60	180	120
0.7SSP	53	180	120
M	53	180	120
0.7SSPL	53	180	120
CMP	53	180	120
DAP	53	180	120
CMPD	53	180	120
MAP	53	180	120
CMPS	53	180	120

注:CK1:不施磷,CK2:常规施磷,0.8SSP:减磷 20%(过磷酸钙),0.7SSP:减磷 30%(过磷酸钙),M:猪粪,0.7SSPL:过磷酸钙+石灰,CMP:钙镁磷肥,DAP:磷酸二铵,CMPD:钙镁磷肥+磷酸二铵,MAP:磷酸一铵,CMPS:钙镁磷肥+秸秆还田。下同。Note:CK1: no phosphorus,CK2: conventional phosphorus application,0.8SSP: phosphorus reduction 20%(superphosphate),0.7SSP: phosphorus reduction 30%(superphosphate),M: pig manure,0.7SSPL: Superphosphate + lime,CMP: calcium magnesium phosphate,DAP: diammonium phosphate,CMPD: calcium magnesium phosphate + diammonium phosphate,MAP: monoammonium phosphate,CMPS: calcium magnesium phosphate + straw return to the field. The same below.

作为基肥, 60%作为追肥(尿素和氯化钾); 秸秆还田于每季作物收获、测产后, 将秸秆剁碎还田。田间管理措施与当地习惯相同。

1.3 样品采集与分析

油菜收获后测产和采集土壤样品。按照茎、壳、籽粒等器官采集植株样品, 带回并烘干、称重、打碎测定养分含量。在每个小区选择 5 个样点, 用土钻取 0~20 cm 的土壤样品, 混匀、风干后, 分别过 20 目和 60 目筛。用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮、钼蓝比色法^[15]测定油菜秸秆和籽粒中的磷含量; 用 Olsen 法^[11]测定土壤有效磷含量。通过上述数据进行磷平衡(土壤磷素累积盈亏量)、磷肥农学效率、磷肥累积利用率的计算以及相关性分析。主要计算公式:

油菜相对产量 (relative yield of rape, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 各处理产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) / 不同处理之间的最大产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

土壤磷素累积盈亏量 (cumulative phosphorus surplus, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 当年投入磷总量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 当年作物吸磷量 (籽粒+秸秆) ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

磷肥农学效率 (phosphorus agronomy efficiency, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) = [施磷处理油菜籽粒产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 不施磷处理油菜籽粒产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)] / [施磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)]^[11]

磷肥累积利用率 (cumulative utilization rate of phosphate fertilizer, %) = [施磷处理地上部含磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) - 不施磷处理地上部分含磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)] / [当季施磷量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) + 往季残留量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)] $\times 100$

1.4 数据分析

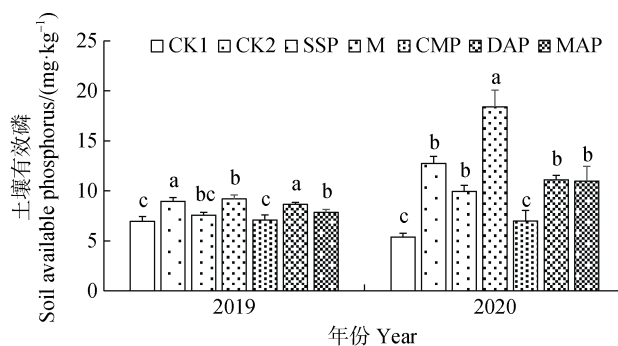
采用 SPSS 23.0 软件进行数据统计分析, 用最小显著差异法 (LSD) 法进行多重比较和方差分析, 在 0.05 水平下检验差异显著性, 用 K-S 法在 5% 水平下进行非参数检验; 采用 Excel 2019 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 磷肥品种对红壤磷素有效性和磷肥利用率的影响

2.1.1 磷肥品种对红壤磷素有效性及作物产量的影响 施用不同磷肥品种后土壤有效磷含量变化如

图 1 所示。与 CK1 相比, 2019 年 CK2、M、DAP、MAP 处理土壤有效磷含量分别提高了 29%、32%、24%、13%; 至 2020 年 CK2、0.7SSP、M、DAP、MAP 处理土壤有效磷较 CK1 提高了 130%、86%、241%、110%、100%, 其中以 M 处理土壤有效磷含量最高, 显著高于其他处理。这主要由于猪粪中含有大量的解磷微生物, 可以活化土壤中难溶性的磷, 提高土壤磷素有效性^[16], 相同施磷量下猪粪提高土壤有效磷含量效果最佳。



注: 不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different letters showed significant differences between different treatments in the same year ($P < 0.05$). The same below.

图 1 施用不同品种磷肥后土壤有效磷含量变化
Fig. 1 Changes in soil available phosphorus under different P fertilizers

不同磷肥品种对油菜产量及地上部生物量的影响见表 2。2019 年 CK2、M、DAP、MAP 处理油菜产量较 CK1 处理显著增产 67%、73%、64%、77%, 而 0.7SSP、CMP 处理与 CK1 无显著差异。2019 年除 CMP 处理外, 其他磷肥品种处理油菜地上部生物量均显著高于 CK1 处理。2020 年, 各磷肥品种处理油菜产量和地上部生物量均显著高于 CK1 处理, 增产幅度分别为 240%~510%和 410%~780%, 其中, 以猪粪处理油菜产量最高, 显著高于其他磷肥品种处理。2019 年和 2020 年各处理的油菜相对产量与土壤有效磷含量呈极显著正相关 (图 2), 可见不同磷肥品种提高土壤有效磷效果不同是影响油菜产量的主要因素之一。此外, 本研究发现, 2020 年甘蓝型油菜籽粒产量整体高于 2019 年白菜型油菜的籽粒产量, 这种差异是由油菜类型或者油菜生育期的不同造成的, 本试验是在低磷的红壤中进行, 田飞等^[17]研究发现在低磷或低氮的条件下, 甘蓝型油菜籽粒产量高于白菜型油菜籽粒产量。

表 2 施用不同品种的磷肥后油菜产量及地上部生物量的变化

Table 2 Changes in yield and aboveground biomass of rape under different P fertilizers

年份及油菜类型 Year and rape type	处理 Treatment	油菜籽粒产量 Seed yield of rape/ (kg·hm ⁻²)	油菜地上部生物量 Aboveground biomass of rape/ (kg·hm ⁻²)
2019 年白菜型 <i>Brassia campestris</i> L.	CK1	450c	1 340c
	CK2	753ab	2 765a
	0.7SSP	6 56abc	2 237ab
	M	778a	2 934a
	CMP	512bc	1 765bc
	DAP	737ab	2 818a
2020 年甘蓝型 <i>Brassica napus</i> L.	MAP	800a	2 809a
	CK1	384c	1 183d
	CK2	1 615b	8 797b
	0.7SSP	1 528b	8 537b
	M	2 328a	10 405a
	CMP	1 312b	6 016c
	DAP	1 546b	9 280ab
	MAP	1 596b	9 254ab

注：同列不同字母表示相同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: the year of 2019 and 2020 are compared separately, different letters in the same column showed significant differences ($P < 0.05$). The same below.

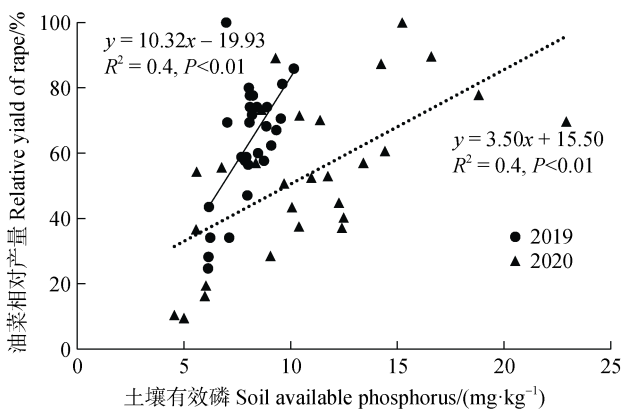


图 2 施用不同品种磷肥后土壤有效磷与油菜相对产量的关系

Fig. 2 Relationship between soil available phosphorus and relative yield of rape under different P fertilizers

2.1.2 磷肥品种对磷肥农学效率、磷素累积盈亏量和磷肥利用率的影响 由表 3 知, 2019 年 M 处理磷肥累积利用率为 16.4%, 与 CK2、SSP、CMP、MAP 处理相比显著提升 8.8、11.6、15.1、4.8 个百分点; 2020 年 M 处理磷肥累积利用率较其他处理显著提升 8.3~19.2 个百分点。2019 年 M 及 MAP 处理磷肥农学效率分别为 6.2 kg·hm⁻² 和 6.6 kg·hm⁻²,

均显著高于 CMP 处理。2020 年 M 处理磷肥农学效率显著高于 CK2、SSP、CMP、DAP、MAP 处理, 分别高 124%、70%、110%、68%、60%。2019 年各施磷处理之间相比, M 处理磷素盈余量最低, 为 11.8 kg·hm⁻² (表 3), 显著低于 CK2、SSP、CMP、MAP 处理。2020 年 M 处理土壤磷素亏损 1.5 kg·hm⁻², 显著低于其他施磷处理, 其他施磷处理盈余量为 5.7~16.0 kg·hm⁻²。

本研究表明, 猪粪处理的油菜籽粒产量 (表 2)、土壤有效磷 (图 1)、磷肥累积利用率 (表 3) 均为最佳。猪粪一方面能活化土壤磷素, 另一方面含有较多的营养元素供给作物吸收利用, 促进作物生长。本研究中猪粪处理土壤磷素处于亏缺状态, 但有效磷含量增幅仍为最大, 这与他人^[18]研究结果不一致, 即长期定位试验结果表明土壤有效磷含量与土壤磷素盈余量呈显著正相关关系。本研究结果的差异, 可能是由于玉米季土壤磷素盈余量过多, 并且加入猪粪后微生物能够活化累积态磷, 减少磷的固定, 因此猪粪处理有效磷增加幅度较大。此外, 前人^[9]研究发现钙镁磷肥在南方酸性红壤具有很好的改良土壤酸度以及提高土壤有效磷含量、作物产量和磷

肥利用率的效果。而本试验并未发现钙镁磷肥对土壤有效磷、油菜产量及磷肥利用率有显著的提升,相反钙镁磷肥处理的油菜产量、土壤有效磷等指标均为最低(图1,表2),这主要是因为本试验红壤初始pH为6.5,不存在酸害的问题,因此钙镁磷肥的改良酸度作用不显著,而其作为一种缓效磷肥,供磷作用较其他磷肥弱^[19],在一定程度上限制了土壤磷素有效性和

作物生长。与磷酸一铵相比,磷酸二铵作为碱性肥料对土壤有效磷、作物产量及磷肥累积利用率影响并未出现显著性差异(图1,表2,表3),进一步说明本研究所选土壤酸碱度对作物生长无限制作用,碱性肥料的改良作用不明显,而磷酸一铵和磷酸二铵均为高浓度水溶性磷肥,二者对弱酸性红壤磷素有效性和磷肥利用率的影响无显著差异。

表3 施用不同品种的磷肥后磷素累积盈亏量、磷肥农学效率及磷肥利用率的变化

Table 3 Changes in cumulative phosphorus surplus, phosphorus agronomy efficiency and cumulative utilization rate of phosphate fertilizer under different P fertilizers

年份及油菜类型 Year and rape type	处理 Treatment	磷素累积盈亏量 Cumulative phosphorus surplus/ (kg·hm ⁻²)	磷肥农学效率 Phosphorus agronomy efficiency/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥累积利用率 Cumulative utilization rate of phosphate fertilizer/ %
2019年白菜型 <i>Brassia campestris</i> L.	CK1	-3.5e	—	—
	CK2	24.0a	4.0ab	7.6cd
	0.7SSP	17.3b	3.9ab	4.8de
	M	11.8d	6.2a	16.4a
	CMP	19.0b	1.2b	1.3e
	DAP	12.7cd	5.4ab	15.1ab
2020年甘蓝型 <i>Brassica napus</i> L.	CK1	-2.1c	—	—
	CK2	16.0a	16.4b	11.2cd
	0.7SSP	9.0b	21.6b	13.0bcd
	M	-1.5c	36.7a	26.5a
	CMP	14.1a	17.5b	7.3d
	DAP	5.7b	21.9b	18.2b
	MAP	7.2b	22.9b	16.4bc

2.2 磷肥用量对红壤磷素有效性和磷肥利用率的影响

2.2.1 磷肥用量对红壤磷素有效性及作物产量的影响

与CK1相比,各施磷处理土壤有效磷含量均显著升高(图3)。与CK2相比,2019年0.8SSP和0.7SSP处理土壤有效磷含量分别减少11%和15%,而2020年则分别减少14%和22%。

与CK1相比,2019年CK2、0.8SSP、0.7SSP处理分别增产67%、64%、46%,地上部生物量分别提高106%、83%、67%;2020年则分别增产321%、322%、298%,地上部生物量分别提高644%、690%、

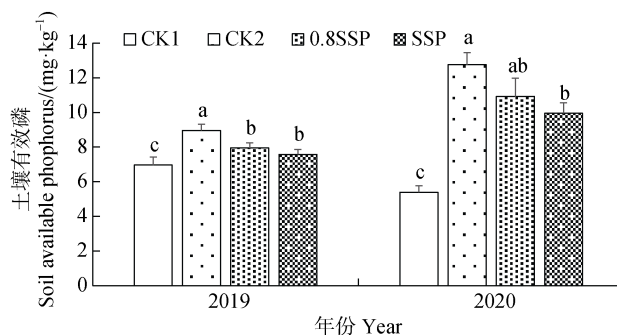


图3 施用不同量磷肥后土壤有效磷变化

Fig. 3 Changes of soil available phosphorus under different amounts of P fertilizer

表 4 施用不同量磷肥后油菜产量及地上部生物量的变化

Table 4 Changes in yield and aboveground biomass of rape under different amounts of P fertilizer

年份及油菜类型	处理	油菜籽粒产量	油菜地上部生物量
Year and rape type	Treatment	Seed yield of rape/ (kg·hm ⁻²)	Aboveground biomass of rape/ (kg·hm ⁻²)
2019 年白菜型 <i>Brassica campestris</i> L	CK1	450b	1 340b
	CK2	753a	2 765a
	0.8SSP	740a	2 456a
	0.7SSP	656ab	2 237a
2020 年甘蓝型 <i>Brassica napus</i> L	CK1	384b	1 183b
	CK2	1 615a	8 797a
	0.8SSP	1 621a	9 344a
	0.7SSP	1 528a	8 537a

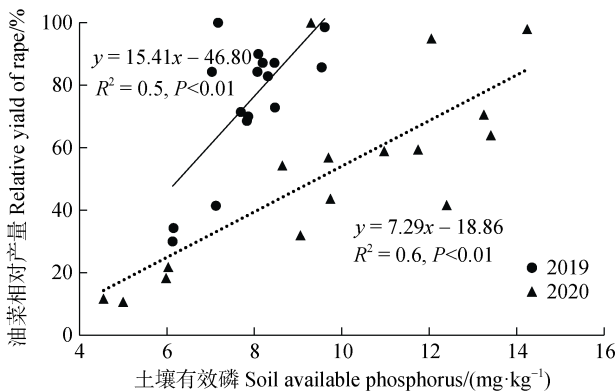


图 4 施用不同量磷肥后土壤有效磷与作物相对产量的关系

Fig. 4 Relationship between soil available phosphorus and crop relative yield under different amounts of P fertilizers

622% (表 4)。与常规施磷量 (CK2) 相比, 施磷量减少 20% 和 30% 对油菜产量和地上部生物量无显著影响。相关分析表明, 油菜相对产量随着土壤有效磷含量增加而显著增加 ($P < 0.01$) (图 4)。

2.2.2 磷肥梯度对磷肥农学效率、磷素累积盈亏量、磷肥利用率的影响 伴随磷肥施用量降低, 磷肥累积利用率有增加趋势 (表 5), 但未达到显著差异。随施磷量的减少, 土壤磷素盈余量降低 (表 5), 2019 年和 2020 年减磷处理盈余量显著低于 CK2 处理; 0.8SSP 与 0.7SSP 处理之间无显著差异。随着施磷量减少磷肥农学效率呈升高趋势, 但处理间无显著差异 (表 5)。

已有研究^[20]表明, 当土壤有效磷含量较低时, 作物产量随土壤有效磷含量增加而显著增加, 当超过磷的农学阈值时作物产量不再增加, 为此土壤有效磷含量高于农学阈值, 减少施磷量作物产量不会

降低。本研究表明, 减少施磷量后尽管土壤有效磷含量显著降低, 但油菜产量无显著变化, 且磷肥累积利用率显著提升 (图 3, 表 4, 表 5); 根据 2019 年和 2020 年的土壤有效磷与油菜产量非线性拟合结果发现, 当土壤有效磷含量达到 $16.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 作物产量不再随土壤有效磷含量的增加而增加, 因此在该土壤有效磷水平下减施磷肥不会造成作物产量降低。

2.3 不同磷肥调控措施对红壤磷素有效性和磷肥利用率的影响

2.3.1 不同磷肥调控措施对红壤磷素有效性及作物产量的影响 钙镁磷肥及其调控对土壤有效磷的影响如图 5a 所示, 与 CK1 处理相比, 2019 年 CMPD 处理将土壤有效磷提升 21%, 而 CMP、CMPS 处理无显著变化。2020 年 CMP、CMPD、CMPS 处理分别提升 30%、37%、9%, 三个处理之间无显著差异, 均显著低于 CK2 处理。石灰调控试验中 (图 5b), 0.7SSPL 处理土壤有效磷含量与 0.7SSP 处理无显著差异, 二者均显著低于 CK2 处理。

钙镁磷肥及其调控对作物产量及地上部生物量的影响如表 6 所示, 2019 年 CMPD 处理与 CK1 处理相比显著增产 58%, 其产量显著高于 CMP、CMPS 处理; 2020 年 CMP、CMPD、CMPS 处理分别显著增产 242%、291%、282%, 但三个处理间无显著差异。2019 年 CMPD 处理地上部生物量显著高于 CK1、CMPS 处理, 2020 年显著高于 CMPS、CK1 处理。

石灰调控试验中 (表 6), 与 CK1 处理相比, 2019 年 CK2、0.7SSP、0.7SSPL 处理分别显著增产 67%、

表 5 施用不同量磷肥后磷素累积盈亏量、磷肥农学效率及磷肥累积利用率变化

Table 5 Changes in cumulative phosphorus surplus, phosphorus agronomy efficiency and Cumulative utilization rate of phosphate under different amounts of P fertilizers

年份及油菜类型 Year and rape type	处理 Treatment	磷素累积盈亏量 Cumulative phosphorus surplus/ (kg·hm ⁻²)	磷肥农学效率 Phosphorus agronomy efficiency/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥累积利用率 Cumulative utilization rate of phosphate/%
2019 年白菜型 <i>Brassia campestris</i> L.	CK1	-3.5c	—	—
	CK2	24.0a	4.0a	7.6a
	0.8SSP	18.2b	4.8a	8.1a
2020 年甘蓝型 <i>Brassica napus</i> L.	0.7SSP	17.3b	3.8a	4.8a
	CK1	-2.1c	—	—
	CK2	16.0a	16.4a	11.1a
	0.8SSP	10.7b	20.6a	12.6a
	0.7SSP	9.0b	21.5a	13.0a

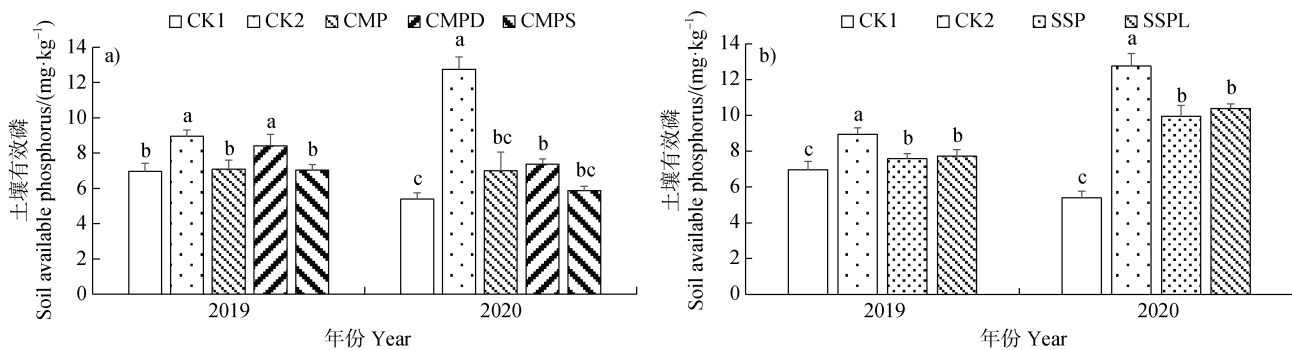


图 5 不同磷肥调控措施处理下土壤有效磷的变化 (图 a 为钙镁磷肥及其调控处理的土壤有效磷, 图 b 石灰调控的土壤有效磷)

Fig. 5 Changes of soil available phosphorus under different P fertilizer control measures (Figure a shows the soil available phosphorus of calcium magnesium phosphate fertilizer and its control treatment, figure b shows the soil available phosphorus of lime control)

46%、63%，2020 年分别显著增产 321%、298%、377%，但 0.7SSP 与 0.7SSPL 之间无显著差异。2019 年和 2020 年 0.7SSPL 处理地上部生物量与 CK1 处理相比分别增加 109%、670%，两年均为最高，仅在 2019 年 0.7SSPL 与 0.7SSP 处理有显著差异。

油菜相对产量与土壤有效磷有显著的相关性 (图 6)，由此可见在红壤上，提高土壤有效磷的含量对油菜产量的提高非常重要。

2.3.2 不同磷肥调控措施对磷肥农学效率、磷素累积盈亏量、磷肥利用率的影响 由表 7 可知，钙镁磷肥及其调控处理间相比，CMPD 处理磷肥累积利用率两年分别为 7.0%和 10.9%，仅在 2019 年显著高于 CMP、CMPS 处理；CMPD 处理磷素盈余量

两年均为最低，分别为 16.3 kg·hm⁻² 和 11.0 kg·hm⁻²，仅在 2019 年与 CMP、CMPS 处理有显著差异 (表 7)；CMPD 处理磷肥农学效率两年均为最高，分别为 5.0 kg·kg⁻¹ 和 21.1 kg·kg⁻¹，但是与 CMP、CMPS 处理无显著差异 (表 7)。

0.7SSPL 处理磷肥累积利用率两年分别为 9.5% 和 14.2%，仅 2019 年显著高于 0.7SSP 处理 (表 7)。0.7SSPL 处理磷肥农学效率仅在 2019 年显著高于 0.7SSP 处理 (表 7)。0.7SSPL 处理土壤磷素盈余量两年均为最低，在 2019 年与 0.7SSP 处理有显著差异 (表 7)。

本研究表明，钙镁磷肥+秸秆还田处理土壤有效磷含量低于单施钙镁磷肥处理 (图 5a)，这与前人

研究结果相反,如王昆昆等^[21]研究发现,秸秆还田较单施化学磷肥能显著提高土壤有效磷的含量,归因于秸秆还田提高了土壤微生物数量,进而提高磷酸酶活性^[22],促进了微生物对土壤难利用磷的活化。而本研究土壤初始有效磷含量较低($7.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且钙镁磷肥供磷效果较慢,秸秆还田后土壤 C/P 比值增大^[23],磷被微生物固定。当钙镁磷肥配施磷酸

二铵时作物产量、磷肥累积利用率优于单施钙镁磷肥处理(图 5a,表 6,表 7),说明增加水溶性磷含量可提升作物产量和肥料利用率。有研究^[24]表明石灰可提高红壤磷素有效性、作物产量和磷肥利用率,本研究结果与其一致:在施等量磷的前提下,石灰处理的各项指标要优于单施过磷酸钙处理(图 5b,表 6,表 7),原因可能是石灰中含有大量的钙元素

表 6 钙镁磷肥及其调控处理和石灰调控处理下油菜产量及地上部生物量的变化

Table 6 Changes in yield and aboveground biomass of rape under calcium magnesium phosphate fertilizer and its regulation and lime control treatment

年份及油菜类型 Year and rape type	处理 Treatment	油菜籽粒产量 Seed yield of rape/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	油菜地上部生物量 Aboveground biomass of rape/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
2019 年白菜型 <i>Brassia campestris</i> L	CK1	450b	1 340d
	CK2	753a	2 765ab
	CMP	512b	1 765cd
	CMPD	712a	2 240bc
	CMPS	506b	1 590d
	0.7SSP	656a	2 237bc
	0.7SSPL	734a	2806a
2020 年甘蓝型 <i>Brassica napus</i> L	CK1	384c	1 183c
	CK2	1 615ab	8 797a
	CMP	1 312b	6 016b
	CMPD	1 503ab	8 206a
	CMPS	1 468ab	6 446b
	0.7SSP	1 528ab	8 537a
	0.7SSPL	1 831a	9 113a

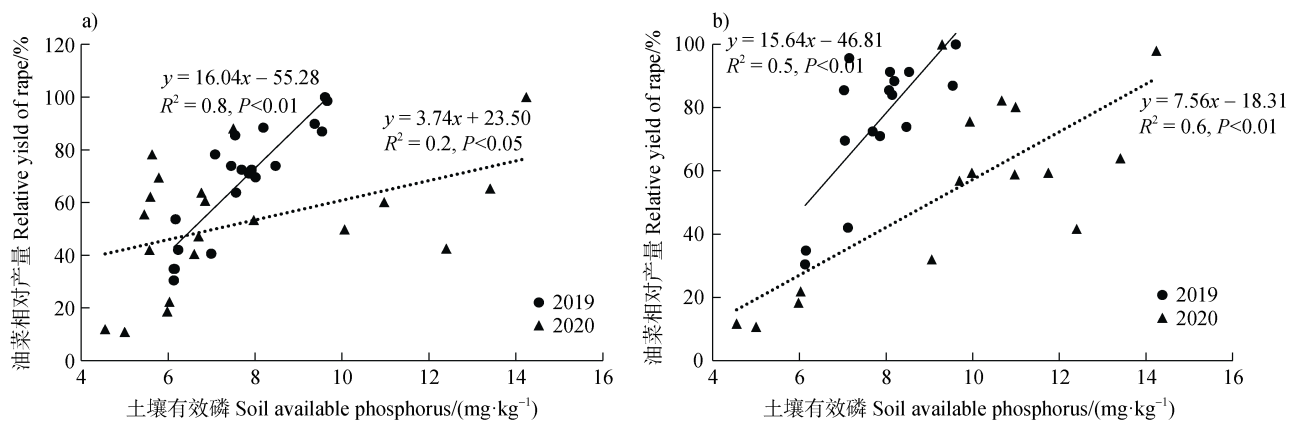


图 6 不同磷肥调控措施下土壤有效磷与油菜相对产量的关系

Fig. 6 Relationship between soil available phosphorus and relative yield of rape under different phosphorus fertilizer control measures

表 7 钙镁磷肥及其调控处理和石灰调控处理下磷素累积盈亏量、磷肥农学效率及磷肥累积利用率的变化

Table 7 Changes in cumulative phosphorus surplus, phosphorus agronomy efficiency and cumulative utilization rate of phosphate under calcium magnesium phosphate fertilizer and its control treatment and lime control treatment

年份及油菜类型 Year and rape type	处理 Treatment	磷素累积盈亏量 Cumulative phosphorus surplus/ (kg·hm ⁻²)	磷肥农学效率 Phosphorus agronomy efficiency/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥累积利用率 Cumulative utilization rate of phosphate/%
2019 年白菜型 <i>Brassia campestris L</i>	CK1	-3.5e	—	—
	CK2	24.0a	4.0ab	7.6ab
	CMP	19.0b	1.2b	1.3c
	CMPD	16.3cd	5.0ab	7.0ab
	CMPS	18.9b	1.1b	1.5c
	0.7SSP	17.3c	3.9b	4.8b
	0.7SSPL	15.2d	5.4a	9.5a
2020 年甘蓝型 <i>Brassica napus L</i>	CK1	-2.1d	—	—
	CK2	16.0a	16.4b	11.1ab
	CMP	14.1ab	17.5b	7.1c
	CMPD	11.0bc	21.1ab	10.9abc
	CMPS	13.2ab	20.5ab	8.2bc
	0.7SSP	9.0c	21.6ab	13.0a
	0.7SSPL	7.9c	27.3a	14.2a

对植物钙起到了补充作用，或是因为石灰作为碱性物质对于酸性的过磷酸钙进行中和，进而起到提升磷素有效性的作用。

3 结论

综合两年田间试验结果，在弱酸性低磷红壤上 (pH6.5) 猪粪对油菜产量及磷肥累积利用率的提升效果最佳，其次为水溶性磷肥，而以钙镁磷肥效果最差，在弱酸性红壤上钙镁磷肥需配施水溶性磷肥施用，以满足对作物的供磷需求；结合油菜产量和磷肥利用率，减磷 30% 可以作为该地区农业生产中的推荐施磷量。

参考文献 (References)

- [1] Yan X J, Su D, Zheng C Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus forms and availability in acid soil[J]. Soils, 2020, 52 (6): 1139-1144. [颜晓军, 苏达, 郑朝元, 等. 长期施肥对酸性土壤磷形态及有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52 (6): 1139—1144.]
- [2] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011, 156 (3): 997—1005.
- [3] Lan X J, Liu Y R, Hou H Q, et al. Effects of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on microbial biomass and organic matter structure of red soil paddy soil[J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021: 1—16. 10.13254/j.jare.2020.0584. [蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报, 2021: 1—16. 10.13254/j.jare.2020.0584]
- [4] Liang Y, Zhang B, Pan X Z, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for hilly region in the Southern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6 (1): 22—27. [梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 22—27.]
- [5] Li N, Wang S S, Ma L L, et al. Phosphate solubilizing ability of two high efficient phosphate solubilizing bacteria and their effects on maize growth and phosphorus forms in red soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2021, 27 (2): 275—283. [李宁, 王珊珊, 马丽丽, 等. 两株高效溶磷菌的溶磷能力及其对玉米生长和红壤磷素形态的影响[J]. 植物营养

- 与肥料学报, 2021, 27(2): 275—283.]
- [6] Zhu Z L. Fertilizer and agriculture and environment[J]. Natural Exploration, 1998(4): 24. [朱兆良. 肥料与农业和环境[J]. 大自然探索, 1998(4): 24.]
- [7] Yu X L, Yang F S, Zhou D, et al. Dynamic effect of calcium magnesia phosphate fertilizer on chemical properties of paddy soil and laterite[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(5): 1042—1047. [余小兰, 杨福锁, 周丹, 等. 钙镁磷肥对水稻土和砖红壤土壤化学性状的动态影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1042—1047.]
- [8] Li H Z. Effects of different phosphorus fertilizers on crop yield and nutrient utilization in rice rape rotation system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. [李会枝. 不同种类磷肥对水稻-油菜轮作体系作物产量和养分利用的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.]
- [9] Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, et al. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(6): Article number 145.
- [10] Chen L J, Jiang Y J, Wang H T, et al. Effects of long-term application of organic materials on phosphorus composition and phosphorus availability in upland red soil[J]. Soils, 2020, 52(3): 451—457. [陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 451—457.]
- [11] Wu Q H. Difference mechanism of phosphorus availability and utilization efficiency of three soils under long-term different fertilization[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. [吴启华. 长期不同施肥下三种土壤磷素有效性和磷肥利用率的差异机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.]
- [12] Liu Y C, Zeng X Z, Feng W Q, et al. Effects of long-term straw mulch and fertilization on crop yields and soil physical and chemical properties under rice-rape seed rotation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1450—1459. [刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 等. 稻—油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1450—1459.]
- [13] Zhang L Y, Wang R X, Zheng Y, et al. Effects of different forms of phosphate fertilizer on phosphorus uptake and utilization efficiency of maize in red soil[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 158—163. [张连娅, 王瑞雪, 郑毅, 等. 不同形态磷肥对红壤玉米磷素吸收利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 158—163.]
- [14] Gong R, Liu Q, Rong X M, et al. Effects of reduced phosphorus on maize yield and P surface runoff loss in embankment upland[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(20): 18—20. [龚蓉, 刘强, 荣湘民, 等. 南方丘陵区旱地减磷对玉米产量及磷径流损失的影响[J]. 湖南农业科学, 2014(20): 18—20.]
- [15] Bao S D. Analysis for soil and agrochemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [16] Long G Q, Jiang Y J, Sun B, et al. Effects of long-term application of pig manure on ameliorating acidity of red soil [J]. Soils, 2012, 44(5): 727—734. [龙光强, 蒋瑀霁, 孙波, 等. 长期施用猪粪对红壤酸度的改良效应[J]. 土壤, 2012, 44(5): 727—734.]
- [17] Tian F, Xu F S, Shi T X, et al. Differences in response of *Brassica campestris*, *Brassica juncea* and *Brassica napus* to low nitrogen and phosphorus stress[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(6): 725—730. [田飞, 徐芳森, 石桃雄, 等. 白菜型、芥菜型和甘蓝型油菜对低氮低磷胁迫反应的差异[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(6): 725—730.]
- [18] Du J X, Liu K L, Huang J, et al. Spatiotemporal evolution of available phosphorus in paddy soil and its response to phosphorus balance in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 476—486. [都江雪, 柳开楼, 黄晶, 等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 476—486.]
- [19] Zhu D F, Chen M L. Rethinking calcium magnesium phosphate fertilizer[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2018, 45(1): 1—3. [朱东方, 陈明良. 重新认识钙镁磷肥[J]. 化肥工业, 2018, 45(1): 1—3.]
- [20] Zhang W W, Zhou H P, Huang S M, et al. Response of available phosphorus to phosphorus profit and loss in alkaline soil under long-term different fertilization patterns[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2021, 27(2): 263—274. [张微微, 周怀平, 黄绍敏, 等. 长期不同施肥模式下碱性土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 263—274.]
- [21] Wang K K, Liao S P, Ren T, et al. Effects of continuous straw returning on soil phosphorus availability and crop phosphorus utilization efficiency in rape rice rotation[J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences, 2020, 53(1): 94—104. [王昆昆, 廖世鹏, 任涛, 等. 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 94—104.]
- [22] Xia W J, Liu K L, Zhang L F, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass and enzyme activity in red soil paddy field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 328—637. [夏文建, 柳开楼, 张丽芳, 等. 长期施肥对红壤稻田土壤微生物生物量和

- 酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 628—637.]
- [23] Shen F F, Wu J P, Fan H B, et al. Soil N/P and C/P ratio regulate the responses of soil microbial community composition and enzyme activities in a long-term nitrogen loaded Chinese fir forest[J]. Plant and Soil, 2019, 436 (1/2): 91—107.
- [24] Lu Y H, Liao Y L, Nie J, et al. Effects of long-term application of N, P, K and lime on acid characteristics of red soil paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (1): 202—212. [鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53 (1): 202—212.]

(责任编辑: 陈荣府)