



**长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响**

柳开楼, 都江雪, 邬磊, 张文菊, 韩天富, 李文军, 施林林, 余喜初

引用本文:

柳开楼, 都江雪, 邬磊, 张文菊, 韩天富, 李文军, 施林林, 余喜初. 长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1115–1123.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0583>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

**长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响**

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

**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**

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

**有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响**

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

*农业资源与环境学报*. 2022, 39(1): 118–128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>

**猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响**

石纹磴, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

**利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响**

王超, 熊凡, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(3): 494–501 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0262>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

柳开楼, 都江雪, 邬磊, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1115-1123.

LIU K L, DU J X, WU L, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus distribution in soil aggregates of different depths in paddy fields[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1115-1123.



开放科学 OSID

## 长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响

柳开楼<sup>1,2</sup>, 都江雪<sup>2</sup>, 邬磊<sup>2</sup>, 张文菊<sup>2</sup>, 韩天富<sup>2</sup>, 李文军<sup>1,3</sup>, 施林林<sup>4</sup>, 余喜初<sup>1\*</sup>

(1. 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 湖南文理学院资源环境与旅游学院, 湖南 常德 415000; 4. 苏州农业科学院, 江苏 苏州 215007)

**摘要:**长期磷肥投入显著增加了耕层土壤各团聚体组分中磷素累积,而作为评判磷素是否向地下水迁移的重要指标,深层土壤团聚体磷素分配对长期磷肥投入的响应仍缺乏系统评估。本研究依托始于1981年红壤稻田长期定位试验,选取不施磷肥(NK)、氮磷钾化肥(NPK)和氮磷钾化肥配施有机肥(NPKM)处理,在长期试验40年后(2020年),分别采集0~20、20~40、40~60 cm深度的土壤样品,测定了全土和各团聚体组分的总磷和有效磷含量,并探讨了施肥-团聚体质量百分比-团聚体磷素之间的内在关系。结果表明,所有施肥处理均表现为>2 mm团聚体质量百分比随着土壤深度的增加而逐渐降低,与NK处理相比,磷肥施用显著提高了0~20 cm和20~40 cm全土和团聚体组分中有效磷含量,且NPKM处理的增幅最大。与NK处理相比,NPKM处理下0~20、20~40 cm和40~60 cm各团聚体总磷含量分别提高了2.14~2.60、1.39~2.80倍和27.03%~180%,各团聚体有效磷含量增幅分别为12.95~18.29、7.57~12.31倍和70.67%~709%。同时,NPKM处理总磷和有效磷的增幅呈现出随着团聚体粒径的增大而逐渐增加的趋势。水稻吸磷量和磷素盈余量也表现为NPKM处理最高,NPK处理次之,NK处理最低。进一步分析发现,团聚体总磷和有效磷含量主要受磷素盈余量的影响,且团聚体中的有效磷含量还受总磷含量的直接调控。研究表明,40年长期有机无机肥配施显著影响红壤稻田表层和深层团聚体磷素分配,且>2 mm团聚体组分中有效磷含量的响应最为敏感,通过调控磷素盈余可以显著影响团聚体中磷分配。

**关键词:**水稻土;团聚体;有效磷;有机肥;配施;土壤深度

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)06-1115-09

doi: 10.13254/j.jare.2021.0583

### Effects of long-term fertilization on phosphorus distribution in soil aggregates of different depths in paddy fields

LIU Kailou<sup>1,2</sup>, DU Jiangxue<sup>2</sup>, WU Lei<sup>2</sup>, ZHANG Wenju<sup>2</sup>, HAN Tianfu<sup>2</sup>, LI Wenjun<sup>1,3</sup>, SHI Linlin<sup>4</sup>, YU Xichu<sup>1\*</sup>

(1. Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. College of Resources and Environment and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China; 4. Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215007, China)

**Abstract:** Long-term phosphate (P) fertilizer application significantly increases P accumulation in bulk soil and aggregate components of the cultivated layer. However, the response of P distribution in aggregate to long-term P fertilization for deep soil is unclear, which is an important indicator for judging whether P migrates to groundwater. The long-term experiment (since 1981) was conducted on paddy fields

收稿日期: 2021-09-02 录用日期: 2021-11-29

作者简介: 柳开楼(1984—),男,河南滑县人,博士,副研究员,主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail: liukailou@126.com

\*通信作者: 余喜初 E-mail: yxchu@163.com

基金项目: 江西省双千计划项目(jxsq2020102116); 国家科技基础资源调查专项课题(2021FY100504); 国家自然科学基金项目(41907093); 江西省重点研发计划项目(20203BBFL63063)

**Project supported:** The Project of Double Thousand Plan in Jiangxi Province of China(jxsq2020102116); The Special Project of Fundamental Resources Survey for National Science and Technology of China(2021FY100504); The National Natural Science Foundation of China(41907093); The Key Research and Development Program in Jiangxi Province of China(20203BBFL63063)

from red soil, which included nitrogen and potassium fertilizer(NK), nitrogen, P, and potassium fertilizer(NPK), and NPK combined with organic fertilizer(NPKM). In 2020(After 40 years of long-term fertilization), soil samples from 0 to 20 cm, 20~40 cm, and 40~60 cm were collected, the total and available P content of bulk soil and each aggregate component was determined, and the relationships among fertilization, aggregate distribution, and aggregate P content were discussed. All treatments showed that the proportion of aggregates >2 mm gradually decreased with increasing soil depth. The application of P fertilizer treatment significantly increased the available P content in bulk soil and each aggregate component of 0~20 cm and 20~40 cm, compared with that of the no phosphate fertilizer treatment, with the highest increase observed in the NPKM treatment. The total P content in all aggregates of 0~20 cm, 20~40 cm, and 40~60 cm under NPKM treatment was increased by 2.14~2.60, 1.39~2.80 times, and 27.03%~180%, respectively, compared with that of NK treatment. Meanwhile, the available P content was increased by 12.95~18.29, 7.57~12.31 times, and 70.67%~709%, respectively. It also indicated that the growth rate of total P and available P content in the NPKM treatment showed a gradual increase with an increase in aggregate size. The P uptake of rice showed that the NPKM treatment had the highest rate, followed by the NPK treatment, while the NK treatment had the lowest rate. In-depth analysis revealed that the total and available P content in aggregates was mainly affected by the P surplus. Meanwhile, the available P content in the aggregates was also directly controlled by the total P content. Therefore, in paddy fields of red soil, long-term combined application of organic and inorganic fertilizers for 40 years significantly affected P distribution in surface and deep soil aggregates, and the response of the available P content was sensitive in large aggregates. The P distribution of soil aggregates could be significantly affected by regulating the P surplus.

**Keywords:** paddy soil; aggregate; available phosphorus; organic fertilizer; combined application; soil depth

磷素作为水稻生长必需的营养元素之一,其对水稻开花发育和籽粒形成具有十分重要的作用<sup>[1]</sup>。在我国南方双季稻区,较强的土壤固磷能力导致该地区红壤稻田的土壤有效磷含量偏低<sup>[2]</sup>。因此,为满足水稻高产的吸磷需求,合理施用外源磷肥成为该地区粮食安全和稳定的重要途径之一。

大量研究表明,虽然长期施用磷肥提高了土壤供磷能力,有效保障了水稻对磷素的吸收<sup>[3-4]</sup>。但是,随着磷肥的持续施用,大量增加的土壤磷素盈余量也带来了较为严重的环境风险<sup>[5]</sup>。吕真真等<sup>[6]</sup>的研究表明,在近30年施磷的条件下,红壤稻田的土壤总磷含量( $1.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )比初始值( $0.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )提高了1.18倍,土壤磷素活化系数也显著较高,导致土壤磷素流失风险较高。很多长期试验表明,有机无机肥配施处理下,土壤总磷和有效磷的增加幅度较大<sup>[4-7]</sup>;同时,也进一步提高了土壤耕层以下(20~40 cm)的磷素含量<sup>[8]</sup>,从而可能威胁地下水安全。团聚体组分是表征土壤物理结构差异的主要指标之一<sup>[9]</sup>,不同团聚体组分中磷素分配特征对土壤磷素供给能力和根系磷素吸收的影响较大<sup>[10-12]</sup>,且磷素在不同团聚体组分中的累积也可能影响磷素的有效性<sup>[12]</sup>。对于不同类型的土壤,各团聚体组分对土壤磷素的供给能力差异较大,但总体表现为较大粒径团聚体组分中磷素的贡献较大<sup>[13-16]</sup>。

在稻田土壤中长期配施有机无机肥一方面导致耕层土壤磷素大量累积<sup>[3-4,6-7]</sup>,存在向土壤深层迁移

的风险;另一方面也显著增加了耕层土壤有机质含量和较大粒径团聚体的质量百分比<sup>[17]</sup>,而较高的有机质含量显著影响耕层土壤磷的吸附<sup>[18]</sup>,再加上耕层土壤中铝氧化物的变化<sup>[19]</sup>,从而导致耕层土壤团聚体磷素含量增加。陈惟财等<sup>[20]</sup>的研究表明,长期施用磷肥与有机物还田导致稻田土壤总磷主要聚集在>1 mm团聚体组分中,并显著提高了>2 mm团聚体的有效磷含量。目前,关于团聚体磷素分配的研究主要集中在耕层土壤,探究土壤磷素是否向深层土壤迁移的研究较少。已有研究表明长期施用磷肥显著提高了30~40 cm土壤深度中<0.25 mm团聚体的有效磷含量<sup>[21]</sup>,但有机无机肥配施下大幅增加的土壤磷素如何在逐渐改变的团聚体组分中进行分配还有待进一步分析,特别是不同土壤深度上。因此,本研究拟基于长期施肥定位试验,选择不同磷肥施用处理,采集0~20、20~40、40~60 cm深度的土壤样品,系统分析不同土层各团聚体组分中总磷和有效磷的分配特征,并进一步探讨施肥-团聚体质量百分比-团聚体磷素之间的内在关联,以期科学评估红壤稻区的磷素流失风险和指导磷肥合理施用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验地位于江西省南昌市进贤县张公镇,该地区属于亚热带季风气候,年均温度和降水分别为 $18.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1537 \text{ mm}$ ,在南方丘陵区具有典型的代表性,土壤

类型属于水稻土,成土母质为第四纪红黏土。在1981年定位试验前已经进行了40余年的双季稻种植,初始土壤pH为6.9,有机质含量为 $27.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,总磷和有效磷含量分别为 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。初始土壤的黏粒含量( $<0.001\text{ mm}$ )为24.1%。

### 1.2 试验设计

长期试验设计了9个不同的施肥处理,本研究选择3种不同的施肥处理:①不施磷肥处理(NK, N和 $\text{K}_2\text{O}$ 每季用量分别为 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $37.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );②施氮磷钾化肥处理(NPK,在NK处理的基础上施用 $\text{P}_2\text{O}_5$ ,每季用量为 $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );③施氮磷钾化肥和有机肥处理(NPKM,在NPK处理的基础上早稻季翻压新鲜紫云英 $22\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,晚稻季施用腐熟猪粪 $22\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。其中多年检测的新鲜紫云英和腐熟猪粪含水量分别为64%~75%和30%~49%,紫云英的氮、磷、钾含量(烘干基)为8.0~9.2、2.1~3.4、7.3~8.4 $\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,猪粪的氮、磷、钾含量(烘干基)为10.0~12.0、8.2~9.0、9.2~10.0 $\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。每种处理3个重复小区,每个小区面积均为 $46.7\text{ m}^2$ 。

在每季水稻的肥料中,60%的氮肥(尿素)、100%的磷肥(钙镁磷肥)、50%的钾肥(氯化钾)和有机肥全部作基肥,在水稻移栽前2~3 d一次性施用,施肥深度约为15~20 cm,基肥施用后耙平。40%的氮肥和50%的钾肥作为追肥,在水稻移栽后7~10 d一次性撒施,撒施后3~5 d避免排水。同时,按照当地习惯做好病虫害防控。

### 1.3 样品采集和指标测定

2020年11月下旬使用土钻采集0~20、20~40、40~60 cm的土壤样品,每个小区随机采集5个点混匀成1个样品,带回室内将样品分成2份并风干,其中一份在风干过程中沿土壤颗粒的自然断裂面轻轻掰碎。考虑到成土母质为第四纪红黏土的水稻土黏粒含量较高,不同粒径的比例容易受样品数量的干扰,且湿筛的样品量较少,因此,为体现各处理样品的代表性,

按照干筛湿筛相结合的办法进行团聚体分级,具体方法参考LIU等<sup>[22]</sup>的研究,即先用干筛将土壤分成 $>5$ 、2~5、0.25~2 mm和 $<0.25\text{ mm}$ 等4份,再按照干筛各组分比例配成200 g的土壤,用湿筛法获得 $>2$ 、0.25~2、0.053~0.25 mm和 $<0.053\text{ mm}$ 团聚体组分,并计算团聚体平均质量直径。具体计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i \times \bar{X}_i \quad (1)$$

式中: $MWD$ 表示土壤平均质量直径,mm; $\bar{X}_i$ 表示第*i*级团聚体组分中上下筛子的平均孔径,mm; $W_i$ 表示第*i*级团聚体组分的比例,%。

另一份土样留待测定全土的总磷和有效磷含量。分别根据NaOH碱熔-钼锑抗比色法和 $\text{NaHCO}_3$ 提取-钼锑抗比色法测定全土和团聚体组分中总磷和有效磷的含量<sup>[23]</sup>。

于早晚稻成熟期在每个小区实打实收测定水稻籽粒和秸秆产量;同时,每个小区分别采集代表性的3穴植株,烘干研磨后测定籽粒和秸秆的磷含量,进而计算水稻吸磷量,并进一步根据磷肥投入和磷素吸收的差值计算磷素盈余量<sup>[5]</sup>。

### 1.4 数据分析

数据分析采用Excel 2010进行,统计分析采用SAS 9.1进行,处理间差异显著性采用单因素方差分析进行检验( $P<0.05$ ),图件采用Origin 8.5进行制作。利用R语言对施肥、团聚体、团聚体磷素和水稻吸磷量的相互关系进行解析,方法为偏最小二乘路径模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 全土的总磷和有效磷含量

由表1可知,NPKM处理土壤总磷和有效磷含量均呈现出随着土壤深度增加而逐渐降低的趋势。同时,40年长期施肥对0~20 cm土壤总磷和有效磷含量的影响程度明显大于20~40 cm和40~60 cm。在0~20 cm土层,与不施磷肥处理(NK)相比,施磷处

表1 40年长期施肥下不同深度全土的总磷和有效磷含量

Table 1 Total and available phosphorus contents in bulk soil at different depths under long-term fertilization of 40 years

处理 Treatment	总磷 Total phosphorus/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			有效磷 Available phosphorus/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
NK	0.34±0.11c	0.40±0.08c	0.23±0.07a	2.80±0.35c	1.80±0.48c	2.68±0.26b
NPK	0.63±0.15b	0.65±0.06b	0.24±0.03a	7.76±0.84b	9.90±1.03b	2.99±0.37b
NPKM	1.34±0.22a	0.89±0.03a	0.25±0.06a	63.31±3.25a	58.41±2.44a	4.94±0.74a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  level. The same below.

理(NPK和NPKM)下总磷含量分别提高了85.29%和294%,有效磷含量也分别增加了1.77倍和21.61倍;在20~40 cm土层,与NK处理相比,NPK和NPKM处理的总磷含量分别增加了62.50%和1.23倍,有效磷含量分别增加4.50倍和31.45倍。在40~60 cm土层,所有施磷处理的总磷含量与不施磷肥处理无显著差异,但NPKM处理的有效磷含量比NK处理提高了84.33%。

### 2.2 团聚体质量百分比和平均质量直径

在不同土壤深度中,随着土壤深度的增加,>2 mm团聚体质量百分比逐渐降低,而<0.053 mm团聚体质量百分比则逐渐增加(图1)。40年长期施肥显著影响0~20 cm和20~40 cm土壤中各团聚体质量百分比,但40~60 cm土壤中各团聚体质量百分比则无显著变化。在0~20 cm土层,与NK处理相比,NPKM处理下>2 mm团聚体质量百分比显著增加了18.17个百分点,而0.25~2 mm团聚体质量百分比则降低了6.60个百分点,NPK处理下<0.053 mm团聚体质量百分比也比NK处理增加了3.70个百分点。在20~40 cm土层,与NK处理相比,NPKM和NPK处理下>2 mm团聚体质量百分比分别提高了9.96个百分点和4.54个百分点,0.053~0.25 mm团聚体质量百分比分别比NK处理降低了10.39个百分点和7.88个百分点,此外,NPKM处理下<0.053 mm团聚体质量百分比也比

NK处理提高了6.65个百分点。

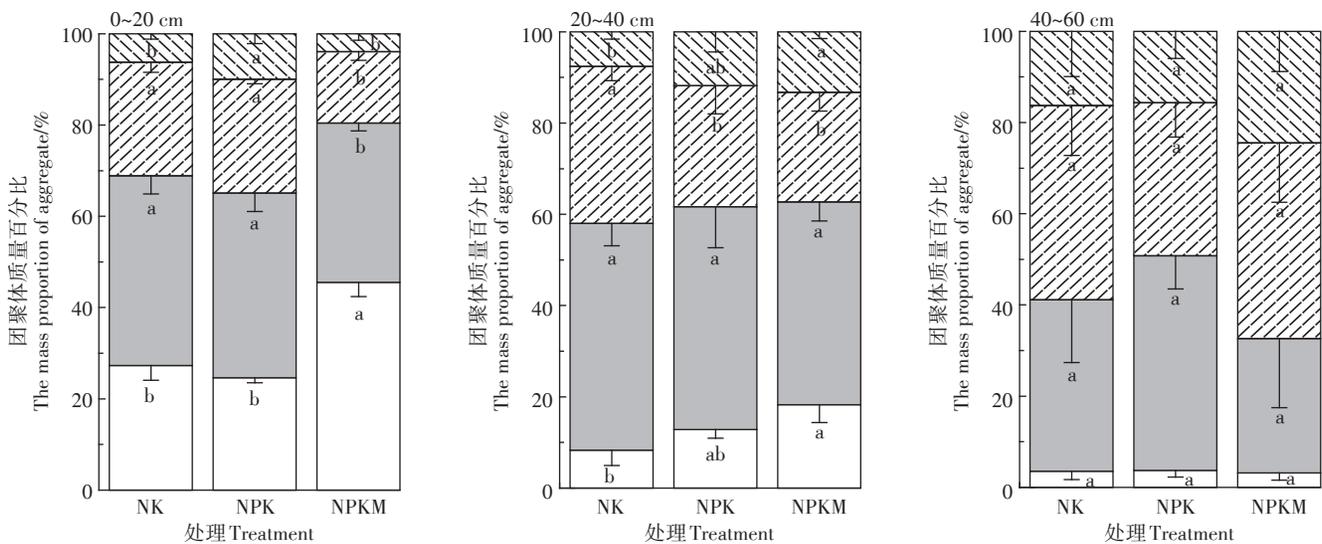
随着土壤深度的增加,各处理的团聚体平均质量直径均呈明显降低趋势(表2)。在不同施肥处理中,NPKM处理显著提高了0~20 cm团聚体平均质量直径,其比NK处理增加了27.66%,但对20~40 cm和40~60 cm土层团聚体则无显著影响,说明NPKM处理显著提高了团聚体结构的稳定性。NK和NPK处理下,0~20 cm团聚体平均质量直径均无显著差异,表明单独的磷肥添加不会显著影响团聚体结构的稳定性。

### 2.3 团聚体总磷和有效磷含量

在不同土壤深度,相同团聚体组分中总磷含量均无明显差异(图2)。与NK处理相比,各土壤深度中NPK处理下所有团聚体组分的总磷含量均未显著增加,但NPKM处理下所有团聚体组分的总磷含量均显著高于NK处理。在0~20 cm土层,NPKM处理下>2、0.25~2、0.053~0.25、<0.053 mm团聚体总磷含量分别

表2 40年长期施肥下不同土壤深度团聚体平均质量直径  
Table 2 Mean mass diameter of aggregates at different soil depths under long-term fertilization of 40 years

处理 Treatment	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
NK	1.88±0.17b	1.36±0.04a	0.97±0.30a
NPK	1.76±0.08b	1.47±0.16a	1.11±0.21a
NPKM	2.40±0.12a	1.58±0.23a	0.80±0.25a



▨ <math>0.053\text{ mm}</math> ▩ <math>0.053\text{--}0.25\text{ mm}</math> ■ <math>0.25\text{--}2\text{ mm}</math> □ <math>>2\text{ mm}</math>

相同团聚体组分的不同小写字母表示处理间差异显著(<math>P < 0.05</math>)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at <math>P < 0.05</math> level for the same aggregate. The same below

图1 40年长期施肥下不同土壤深度团聚体质量百分比

Figure 1 The mass proportion of aggregates at different soil depths under long-term fertilization of 40 years

比NK处理提高了2.14、2.20、2.20、2.60倍;在20~40 cm土层,NPKM处理下各团聚体总磷含量的增幅分别为2.80、1.46、1.39、1.71倍;在40~60 cm土层,NPKM处理下各团聚体总磷含量的增幅分别为180%、69.34%、41.24%和27.03%,但<0.053 mm团聚体的增幅不显著。

与总磷的结果相似,在不同土壤深度,相同团聚体组分中有效磷含量无明显差异(图3)。在0~20 cm土层,与NK处理相比,NPK和NPKM处理下>2 mm团聚体有效磷含量分别提高了1.16倍和18.29倍,0.25~2 mm团聚体有效磷含量增幅为1.02倍和18.24倍,0.053~0.25 mm团聚体有效磷含量增幅为53.27%和12.95倍,<0.053 mm团聚体有效磷含量增幅为47.14%和13.52倍。在20~40 cm土层,NPK和NPKM处理下>2 mm团聚体有效磷含量分别比NK处理增加了59.10%和12.31倍,0.25~2 mm团聚体有效磷含量增幅

为60.05%和9.74倍,0.053~0.25 mm团聚体有效磷含量增幅为44.38%和7.57倍,<0.053 mm团聚体有效磷含量增幅为56.65%和11.08倍。在40~60 cm土层,NPK处理下各团聚体有效磷含量未显著增加,NPKM处理下>2、0.25~2、0.053~0.25 mm和<0.053 mm团聚体有效磷含量分别提高了7.09、3.22、1.30倍和70.67%。

#### 2.4 水稻吸磷量和磷素盈余

40年长期施肥显著改变水稻吸磷量(表3)。与NK处理相比,NPK和NPKM处理下籽粒吸磷量分别提高了77.57%和1.37倍,秸秆吸磷量分别增加了66.12%和1.02倍,总吸磷量也分别提高了75.37%和1.30倍。在施磷处理中,NPKM处理下籽粒、秸秆和总吸磷量均最高,分别比NPK处理增加了33.55%、21.71%和31.39%。同时,40年长期施用磷肥导致磷素大量盈余。除了NK处理的磷素为匮乏之外,NPK

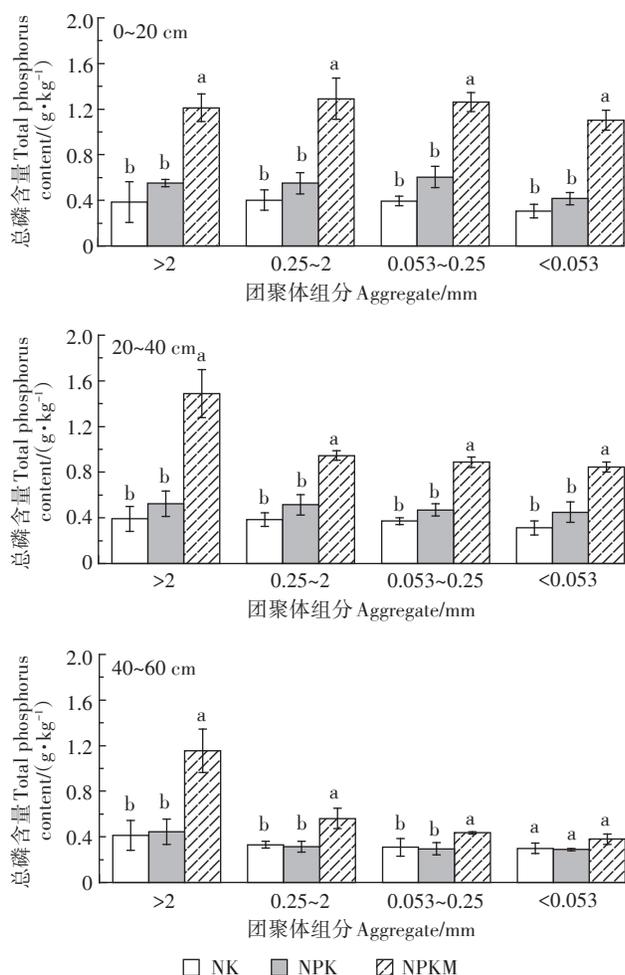


图2 40年长期施肥下不同土壤深度团聚体总磷含量

Figure 2 Total phosphorus content of aggregates at different soil depths under long-term fertilization of 40 years

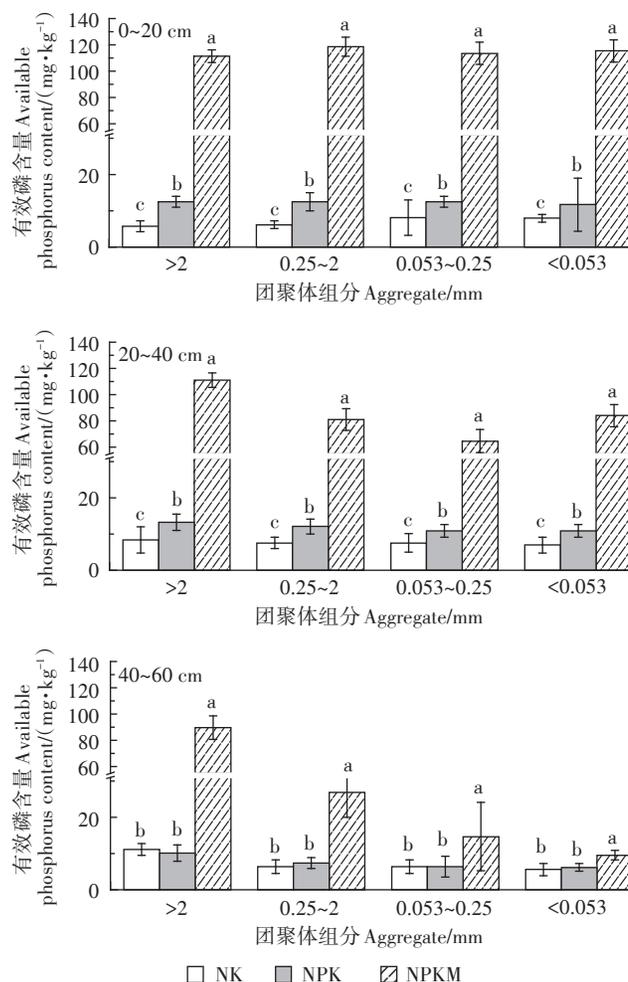


图3 40年长期施肥下不同土壤深度团聚体有效磷含量

Figure 3 Available phosphorus content of aggregates at different soil depths under long-term fertilization of 40 years

表3 40年长期施肥下水稻吸磷量和磷素盈余(kg·hm<sup>-2</sup>)  
Table 3 Phosphorus uptake and surplus of rice under long-term fertilization of 40 years(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	籽粒吸磷量 Phosphorus uptake of grain	秸秆吸磷量 Phosphorus uptake of straw	总吸磷量 Phosphorus uptake of grain and straw	磷素盈余 Phosphorus surplus
NK	7.67±0.67c	1.83±0.16c	9.50±0.83c	-9.50±1.22c
NPK	13.62±1.55b	3.04±0.35b	16.66±1.89b	2.99±3.05b
NPKM	18.19±0.60a	3.70±0.13a	21.89±0.72a	75.65±11.76a

和NPKM处理均为磷素盈余,且NPKM处理的磷素盈余量显著高于NPK处理。

### 2.5 磷素盈余与团聚体磷素的相关关系

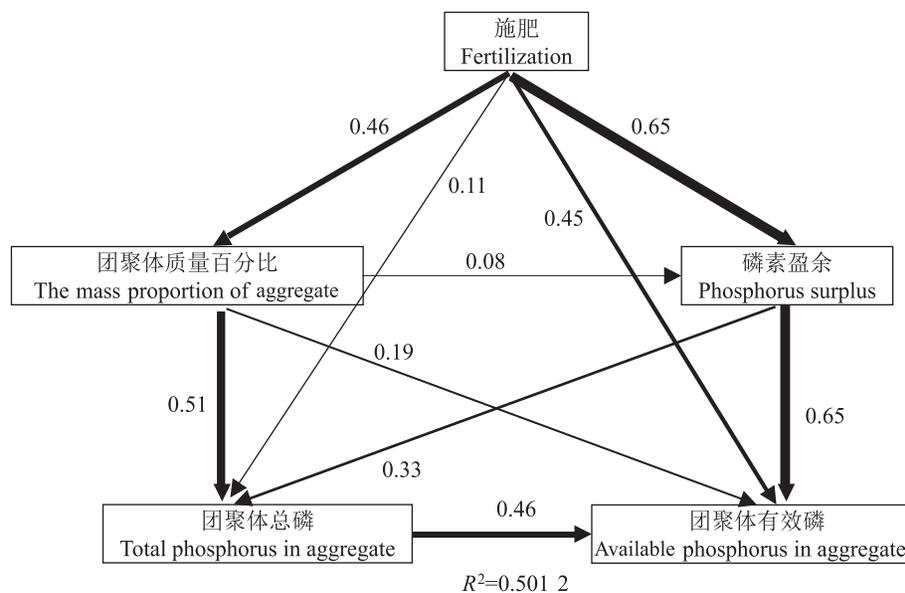
偏最小二乘路径模型的结果(图4)显示,施肥是直接影响团聚体质量百分比和磷素盈余的主要因素(通径系数分别为0.46和0.65),但土壤深度对其无显著影响,故结构方程不考虑深度的作用。同时,由于团聚体平均质量直径主要由各团聚体的质量百分比计算得来,本研究在进行偏最小二乘路径模型运算时,模型自动去除了团聚体平均质量直径。团聚体总磷含量主要受团聚体质量百分比和磷素盈余的影响(通径系数为0.51和0.33),而团聚体有效磷含量则受施肥、磷素盈余、团聚体质量百分比和团聚体总磷含量的多重影响(通径系数分别为0.45、0.65、0.19和0.46)。同时,与施肥相比,团聚体总磷和有效磷含量

受磷素盈余的影响较高(通径系数分别为0.33和0.65)。此外,团聚体总磷含量还可以直接调控团聚体有效磷含量变化(通径系数为0.46)。

## 3 讨论

### 3.1 40年长期有机无机肥配施增加红壤稻田不同土壤深度的全土磷素含量和团聚体质量百分比

在红壤稻田,连续40年的磷肥投入不仅导致0~20 cm土壤中磷素大量累积,而且进一步提高了20~40 cm土壤中总磷和有效磷含量。在不同磷肥处理中,有机无机肥配施下土壤总磷和有效磷含量的增幅最大,这与前人的研究结果<sup>[3-4,6-7]</sup>一致,且有机无机肥配施进一步导致40~60 cm土壤中有有效磷含量的累积。王建国等<sup>[24]</sup>的研究表明,长期施用磷肥导致太湖地区稻田土壤无机磷的下移深度可达25 cm,且有机



实线表示直接影响,线的粗细程度表示各指标之间影响程度的大小,线旁的数值为通径系数  
The solid lines indicate direct effects. The line thickness indicates the strength of the effects of variables on each other. The attached values of different indexes indicate path coefficients

图4 施肥、团聚体质量百分比和团聚体磷素的相关关系

Figure 4 The complex interrelationships between fertilization, mass proportion of soil aggregate and phosphorus contents in aggregate

无机肥配施下无机磷的下移深度明显高于化学磷肥处理。这一方面与有机无机肥配施处理的磷肥投入量较高有关<sup>[9]</sup>,另一方面可能是由于长期有机无机肥配施下较高的土壤有机质含量增加了土壤磷素吸附<sup>[17-18]</sup>,并降低了有效磷的固定。同时,红壤旱地长期定位试验也表明,长期有机培肥促进了20~40 cm深层土壤磷素累积<sup>[8]</sup>。此外,由于稻田土壤经常处于淹水状态,且地下水位较低(50 cm左右),长期有机无机肥配施带来的土壤磷素增加极易导致磷素通过地表径流流失或者向地下水迁移<sup>[24-25]</sup>。大量研究<sup>[17,26]</sup>表明,有机无机培肥措施显著提高了土壤有机质含量,从而显著提高了0~20 cm和20~40 cm土壤深度中>2 mm团聚体质量百分比。但本研究表明,40年长期配施有机无机肥处理仅显著增加了0~20 cm土层团聚体平均质量直径,而20~40 cm土层则增幅不显著,这说明,受施肥和耕作深度以及水稻根系长度的综合影响,有机无机肥配施显著改善了红壤稻田耕层土壤团聚体结构的稳定性,而对深层土壤团聚体结构的稳定性则无显著影响。总之,虽然长期有机无机肥配施是红壤稻田较好的培肥措施,但其导致的土壤磷素流失风险也应引起足够的重视。

### 3.2 40年长期有机无机肥配施调控红壤稻田不同深度的团聚体磷素分配

在不同团聚体组分中,相同处理下总磷和有效磷变化较为相似,不同深度的差异也不明显。这不同于东北黑土区、西北半干旱区和珠江三角洲农田的研究结果<sup>[10,13,15]</sup>,但与前人在热带和亚热带地区的研究结果<sup>[11-12,27]</sup>相似。与不施磷肥处理相比,40年长期有机无机肥配施处理下0~20、20~40、40~60 cm土壤深度各团聚体组分中总磷含量均显著提高(除了40~60 cm土壤深度<0.053 mm团聚体),但化学磷肥处理下各团聚体组分中总磷含量则未显著增加。这充分证明,与单纯的化学磷肥投入相比,长期有机无机肥配施促进了磷素在深层土壤大团聚体中的累积。氮磷钾化肥配施处理下,0~20 cm和20~40 cm土壤深度各团聚体组分中有效磷含量均显著高于不施磷肥处理,原因还可能与二者的土壤pH、有机质和氮磷钾含量等理化性质差异有关<sup>[7]</sup>,有研究表明,土壤碳氮含量是调节土壤磷循环的重要因素<sup>[28]</sup>,但具体原因还有待进一步研究。不同于总磷,40年长期施用磷肥处理下0~20 cm和20~40 cm土壤深度各团聚体组分中有效磷含量均显著高于不施磷肥处理,但40~60 cm则未显著增加。原因可能是0~40 cm为水稻根系的主

要活动区域<sup>[29]</sup>,较多的根系分泌物和较高的微生物活性进一步促进了0~20 cm和20~40 cm各团聚体组分中磷素的活化<sup>[30]</sup>。与不施磷肥处理相比,40年长期有机无机肥配施对总磷和有效磷的增幅整体呈现出随团聚体粒径增加而提高的趋势。这表明较大粒径的团聚体(>2 mm)对磷素累积的作用明显大于较小粒径的团聚体(<0.25 mm)。这主要与不同团聚体组分中的有机碳和铁铝氧化物含量差异有关<sup>[17,19]</sup>,且无定型铁、铝是引起不同施肥处理磷吸附差异的主要因素<sup>[31]</sup>,铁铝氧化物和有机质的综合作用可能通过与磷素的吸附解吸作用影响各团聚体组分的磷素有效性。PENG等<sup>[32]</sup>的研究也表明,较大粒径团聚体的周转速率显著高于较小粒径团聚体组分,其对土壤结构稳定的作用至关重要。而在红壤旱地上,>2 mm团聚体的钾素含量也是作物钾素吸收的重要组分<sup>[22]</sup>。但>2 mm团聚体组分中较高的磷素累积是否能够被水稻充分吸收还有待结合同位素示踪试验进一步研究。

### 3.3 磷素盈余团聚体磷素分配

与土壤团聚体总磷和有效磷的结果一致,40年长期有机无机肥配施也显著提高了磷素盈余量,这与前人的研究结果<sup>[4-5]</sup>高度一致。结合偏最小二乘路径模型,本研究结果表明,在长期施肥条件下,施肥、团聚体质量百分比、磷素盈余均可以显著影响团聚体总磷和有效磷含量。进一步分析发现,与团聚体总磷相比,磷素盈余对团聚体有效磷的影响程度更大,说明磷素盈余量的增加不仅直接提高土壤全土的磷素含量,而且进一步增加了团聚体组分中的总磷和有效磷含量。这可能是由于团聚体组分的形成受有机质的驱动<sup>[32]</sup>,而有机质可以显著影响土壤磷素的吸附解吸<sup>[18]</sup>。此外,团聚体组分中与磷周转相关的微生物也可能是主要的影响因素<sup>[33]</sup>。但是,本研究的磷肥用量为20世纪80年代的标准,而随着社会经济的发展,当前我国种植业中磷肥用量已大幅提高<sup>[34]</sup>,这势必进一步影响稻田的磷素盈余。都江雪等<sup>[35]</sup>的研究表明,1988—2018年我国水稻土有效磷平均年增速为0.36 mg·kg<sup>-1</sup>。因此,关于磷素盈余与团聚体磷素分配的关系还有待结合当前的磷肥施用水平进行验证。

## 4 结论

(1)与不施磷肥处理相比,40年长期施用磷肥处理显著提高了红壤稻田0~20 cm和20~40 cm土壤深度全土的总磷和有效磷含量,尤其是有机无机肥配施处理。

(2)在0~20、20~40、40~60 cm土壤深度中,随着团聚体粒径的增加,40年长期有机无机肥配施处理下团聚体组分中总磷和有效磷的增幅也逐渐提高,其中>2 mm团聚体的增幅最大。

(3)40年长期有机无机肥配施主要通过磷素盈余显著影响团聚体总磷和有效磷分配。

#### 参考文献:

- [1] RUAN W Y, GUO M N, XU L, et al. An SPX-RLI1 module regulates leaf inclination in response to phosphate availability in rice[J]. *Plant Cell*, 2018, 30(4):853-870.
- [2] 张淑香, 徐明岗. 土壤磷素演变与高效利用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21):3828-3829. ZHANG S X, XU M G. Change of soil phosphorus and its efficient utilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21):3828-3829.
- [3] 黄晶, 张淑香, 石孝均, 等. 长期不同施肥模式下南方典型农田磷肥回收率变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1630-1639. HUANG J, ZHANG S X, SHI X J, et al. Change of phosphorus recovery efficiency under long-term fertilization in typical farmland in southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6):1630-1639.
- [4] 叶会财, 李大明, 黄庆海, 等. 长期不同施肥模式红壤性水稻土磷素变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1521-1528. YE H C, LI D M, HUANG Q H, et al. Variation of soil phosphorus under long-term fertilization in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6):1521-1528.
- [5] 樊红柱, 陈庆瑞, 郭松, 等. 长期不同施肥紫色水稻土磷的盈亏及有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):154-162. FAN H Z, CHEN Q R, GUO S, et al. Phosphorus balance and availability in a purple paddy soil under long-term different fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1):154-162.
- [6] 吕真真, 刘秀梅, 侯红乾, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土磷素及水稻磷营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8):1316-1324. LÜ Z Z, LIU X M, HOU H Q, et al. Effects of long-term fertilizations on soil phosphorus and its supply to rice in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8):1316-1324.
- [7] 展晓莹, 任意, 张淑香, 等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4728-4737. ZHAN X Y, REN Y, ZHANG S X, et al. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in the main types of soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4728-4737.
- [8] 李大明, 柳开楼, 叶会财, 等. 长期不同施肥处理红壤旱地剖面养分分布差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3):633-640. LI D M, LIU K L, YE H C, et al. Differences of soil nutrient distribution in profiles under long-term fertilization in upland red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3):633-640.
- [9] GUO Z C, ZHANG J B, FAN J, et al. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660:1029-1037.
- [10] 宋春, 韩晓增, 王凤菊, 等. 长期不同施肥条件下黑土水稳性团聚体中磷的分布及其有效性[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2):272-276. SONG C, HAN X Z, WANG F J, et al. Distribution and availability of phosphorus in black soil water-stable aggregate under different long-term fertilizations[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2):272-276.
- [11] 许杏红, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对红壤旱地团聚体磷素储存容量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3):730-738. XU X H, WANG Y L, YAO Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus storage capacity of soil aggregates in red soil upland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3):730-738.
- [12] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5):1240-1250. WANG J W, WANG Y L, YAO Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5):1240-1250.
- [13] 文倩, 赵小蓉, 张书美, 等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量磷的分布特征[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2):327-332. WEN Q, ZHAO X R, ZHANG S M, et al. Distribution characteristics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in semi-arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(2):327-332.
- [14] 郭万伟, 肖和艾, 吴金水, 等. 红壤旱土和水稻土团聚体中磷素的分布特点[J]. 土壤学报, 2009, 46(1):85-92. GUO W W, XIAO H A, WU J S, et al. Distribution of phosphorus in water-stable aggregates in upland and paddy red earths[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1):85-92.
- [15] 杨华, 龙健, 李兆君, 等. 土地利用方式对红枫湖入湖流域土壤团聚体磷含量及其形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11):2214-2220. YANG H, LONG J, LI Z J, et al. Effects of land use types on phosphorus forms and their contents in soil aggregates in watershed of Hongfeng Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11):2214-2220.
- [16] 王超, 熊凡, 卢瑛, 等. 利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3):494-501. WANG C, XIONG F, LU Y, et al. Effect of land use on topsoil aggregate distribution and stoichiometric characteristics of C, N, and P in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3):494-501.
- [17] LIU K L, HUANG J, LI D M, et al. Comparison of carbon sequestration efficiency in soil aggregates between upland and paddy soils in a red soil region of China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(6):1348-1359.
- [18] 林诚, 王飞, 林新坚, 等. 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响[J]. 福建农业学报, 2011, 26(6):1034-1038. LIN C, WANG F, LIN X J, et al. The effect of phosphorus adsorption and desorption of long-term fertilization on south yellow clayey soil[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(6):1034-1038.
- [19] 王莹, 尧水红, 李辉信, 等. 长期施肥稻田土壤团聚体内氧化铁分布特征及其与有机碳的关系[J]. 土壤, 2013, 45(4):666-672. WANG Y, YAO S H, LI H X, et al. Relationship between distribution patterns of iron oxides and soil organic matter in aggregates of paddy soil in a long-term fertilization[J]. *Soils*, 2013, 45(4):666-672.

- [20] 陈惟财, 谢小立, 王凯荣. 不同施肥模式下红壤性水稻土中磷的分布及其有效性[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3):87-90, 100. CHEN W C, XIE X L, WANG K R. Distribution and efficiency of phosphorus under different fertilization models in reddish paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(3):87-90, 100.
- [21] 宋美芳, 胡镇江, 胡义涛, 等. 长期施磷对水旱轮作生产力及土壤团聚体磷分布的影响[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(18):1-6. SONG M F, HU Z J, HU Y T, et al. Effects of long-term application of phosphate fertilizer on the production and distribution of soil aggregates in a paddy-upland rotation system[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2018, 15(18):1-6.
- [22] LIU K L, HAN T F, HUANG J, et al. Response of soil aggregate-associated potassium to long-term fertilization in red soil[J]. *Geoderma*, 2019, 352:160-170.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000. LU R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [24] 王建国, 杨林章, 单艳红, 等. 长期施肥条件下水稻土磷素分布特征及对水环境的污染风险[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3):88-92. WANG J G, YANG L Z, SHAN Y H, et al. Phosphorus distribution in paddy soil and its pollution risk to water body in long-term experiments[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(3):88-92.
- [25] 刘娟, 包立, 张乃明, 等. 我国4种土壤磷素淋溶流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5):64-70. LIU J, BAO L, ZHANG N M, et al. Characteristics of phosphorus leaching losses in four soils in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5):64-70.
- [26] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 基于红壤稻田肥力与相对产量关系的水稻生产力评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1425-1434. LIU K L, HUANG J, ZHANG H M, et al. Assessment of productivity of red paddy soil based on soil fertility and relative yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6):1425-1434.
- [27] ZHANG Y Q, BHATTACHARYYA R, DALAL R C, et al. Impact of land use change and soil type on total phosphorus and its fractions in soil aggregates[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(7):828-841.
- [28] MA Q X, WEN Y, MA J Z, et al. Long-term farmyard manure application affects soil organic phosphorus cycling: A combined metagenomic and  $^{33}\text{P}/^{14}\text{C}$  labelling study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 149:107959.
- [29] 侯丹平, 余超, 刘海浪, 等. 水稻高产高效的根系特性及其调控[J]. 中国稻米, 2018, 24(4):3-8. HOU D P, YU C, LIU H L, et al. Characteristics of high yield and high efficiency root and regulation in rice[J]. *China Rice*, 2018, 24(4):3-8.
- [30] SUN B R, GAO Y Z, WU X, et al. The relative contributions of pH, organic anions, and phosphatase to rhizosphere soil phosphorus mobilization and crop phosphorus uptake in maize/alfalfa polyculture[J]. *Plant and Soil*, 2020, 447(1/2):117-133.
- [31] YAN X, WEI Z Q, HONG Q Q, et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources[J]. *Geoderma*, 2017, 295:80-85.
- [32] PENG X H, ZHU Q H, ZHANG Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109:81-94.
- [33] 沈晓琳, 王丽丽, 汪洋, 等. 保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3):361-370. SHEN X L, WANG L L, WANG Y, et al. Progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates, microbes, and nematode communities[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3):361-370.
- [34] LIU X W, YUAN Z W, LIU X, et al. Historic trends and future prospects of waste generation and recycling in China's phosphorus cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(8):5131-5139.
- [35] 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. DU J X, LIU K L, HUANG J, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to phosphorus balance in paddy soil in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2):476-486.