

王秋君, 郭德杰, 马 艳. 连续施用有机肥下设施土壤碳氮磷化学计量学特征及其与土壤有效磷的关系[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 893-901.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.011

# 连续施用有机肥下设施土壤碳氮磷化学计量学特征及其与土壤有效磷的关系

王秋君<sup>1,2</sup>, 郭德杰<sup>1</sup>, 马 艳<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 南京 212013)

**摘要:** 为阐明设施土壤中连续施用有机肥条件下土壤碳氮磷化学计量学特征的动态变化, 并探讨碳氮磷化学计量比对土壤磷素有效性的影响, 通过定位试验研究连续 5 季大棚辣椒栽培中不同处理(CK, 空白对照; CF, 单施化肥; OCF1, 有机肥替代 49% 磷肥; OCF2, 有机肥替代 63% 磷肥; OCF3, 有机肥替代 73% 磷肥)对土壤碳氮磷化学计量比及不同形态磷的影响。结果表明, 与单施化肥相比, 3 个施用有机肥处理均显著增加了土壤全碳、全氮和全磷含量。OCF1 处理的土壤碳氮比在 5 季辣椒栽培中都显著高于 CF 处理, OCF3 处理的土壤碳磷比仅在第 5 季中显著高于 CF 处理。不同处理间的土壤氮磷比差异不显著。此外, 与 CF 处理相比, OCF3 处理在第 1 季和第 2 季显著增加了土壤有效磷含量, 在第 5 季中 OCF2 处理显著降低了土壤有效磷含量。相关性分析结果表明, 土壤全磷含量、无机磷含量及其占比、总碳含量、全氮含量与有效磷含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ), 而有机磷占比、碳磷比和氮磷比与有效磷含量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ )。结果说明在设施蔬菜栽培中长期施用有机肥替代磷肥可能会降低土壤有效磷含量, 其原因可能是提高了土壤的碳磷比, 造成土壤中有效磷的生物固持。

**关键词:** 设施土壤; 有机肥; 化学计量学; 有效磷

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)04-0893-09

## Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus and their relationship with soil available phosphorus under continuous application of organic fertilizer for vegetable cultivation in greenhouse

WANG Qiu-jun<sup>1,2</sup>, GUO De-jie<sup>1</sup>, MA Yan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to clarify the dynamic changes of the stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus under the condition of continuous application of organic fertilizer for vegetable cultivation soil in greenhouse, and to discuss the effect of stoichiometric ratio of carbon, nitrogen and phosphorus on the availability of soil phosphorus, a positioning experiment was conducted to study the effect of different treatments (CK, blank control; CF, single application of chemical fertilizer; OCF1, organic fertilizer instead of 49% phosphate fertilizer; OCF2, organic fertilizer instead of 63% phosphate fertilizer; OCF3, organic fertilizer instead of 73% phosphate fertilizer) on the stoichiometric ratio of soil carbon, nitrogen and phosphorus

收稿日期: 2020-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800405); 江苏省重点研发计划项目(BE2017379)

作者简介: 王秋君(1983-), 男, 山西万荣人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤养分管理研究。(E-mail) wangqiu jun461@163.com

通讯作者: 马 艳, (E-mail) myjaas@sina.com

and different forms of phosphorus during pepper cultivation in the greenhouse for five consecutive seasons. The results showed that, compared with single application of chemical fertilizer, three organic fertilizer treatments all increased the contents of total carbon, total nitrogen and total phosphorus in the soil significantly. The soil carbon-nitrogen ratio of

OCF1 treatment was significantly higher than that of CF treatment in all the five cultivation seasons of pepper, and the soil carbon-phosphorus ratio of OCF3 treatment was significantly higher than that of CF treatment only in the fifth season. There was no significant difference in soil nitrogen-phosphorus ratio among different treatments. In addition, compared with CF treatment, soil available phosphorus content increased significantly in the first and second seasons under OCF3 treatment, and decreased significantly in the fifth season under OCF2 treatment. Results of correlation analysis showed that, the total phosphorus content, inorganic phosphorus content and proportion, total carbon content, total nitrogen content in the soil were in extreme significant positive correlation ( $P < 0.01$ ) with soil available phosphorus content, while the proportion of organic phosphorus, carbon-phosphorus ratio and nitrogen-phosphorus ratio were in extreme significant negative correlation ( $P < 0.01$ ) with the soil available phosphorus content. The results indicate that, long-term application of organic fertilizer instead of phosphate fertilizer during vegetable cultivation in the greenhouse may reduce the soil available phosphorus content. The reason may be that the soil carbon-phosphorus ratio is improved, resulting in the biological fixation of soil available phosphorus.

**Key words:** facility soil; organic fertilizer; stoichiometry; available phosphorus

磷是作物生长所必需的大量元素之一,主要来源于土壤本身所含的磷及外源施入的磷肥。由于磷在土壤中易被固定,使得磷肥的当季利用率较低(10%~20%)<sup>[1]</sup>。为满足作物对磷素的需求,大量的磷肥被施入土壤,导致土壤中磷素发生过度累积,从而可能会通过径流和淋洗途径引起环境污染。相比于粮食作物,蔬菜生长过程中对养分的需求量较高,农户在种植设施蔬菜过程中施肥量更高,使得设施土壤中的富营养化现象更为严重。此外,由于设施土壤复种指数高,长期处于高温高湿条件,且缺少降水淋洗,使其更易发生养分富集、土壤酸化和盐渍化等<sup>[2]</sup>。有研究者发现,中国设施蔬菜  $P_2O_5$  的平均施用量超出推荐施用量的 5.3 倍<sup>[3]</sup>。中国日光温室和塑料大棚土壤有效磷平均含量分别为 201.1 mg/kg 和 140.3 mg/kg,且土壤有效磷含量大多大于 100.0 mg/kg<sup>[4]</sup>。河北省部分设施蔬菜的磷肥施用量甚至为蔬菜需磷量的 28.7 倍,土壤有效磷含量高达 205.4 mg/kg<sup>[5]</sup>。陕西省设施蔬菜栽培中  $P_2O_5$  的平均施用量高达 544.5~684.0 kg/hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。山西省南部地区的设施蔬菜栽培中  $P_2O_5$  的施用量为 500~1 800 kg/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。

据报道,在现有开采技术条件下,中国磷矿石储量预计至 21 世纪中期枯竭<sup>[7]</sup>,因此,通过增施有机肥以替代部分磷肥势必成为提供作物所需磷素的主要措施。有研究者发现,大量施用有机肥可通过降低土壤对磷的吸附从而提高土壤有效磷含量。韩晓飞等<sup>[8]</sup>发现在紫色土中通过施用猪粪有机肥替代 20% 的化肥磷可提高土壤有效磷含量和磷肥利用率。然而,近年来随着有机肥替代化肥的大力提倡,有机肥的投入量明显提高,尤其在设施蔬菜生产中

有机肥投入量占总肥料投入的 60%~80%<sup>[9]</sup>。有研究者发现,长期不合理地施用有机肥也会造成土壤中磷素的过度积累,且提高土壤磷的迁移性及磷素的淋溶强度。王敏锋等<sup>[10]</sup>通过多年田间定位试验研究了粪肥不同施用量对设施土壤磷素影响,发现土壤有效磷含量随着粪肥施用量的增加而增加,且连续施用 4 年粪肥后磷素在土壤剖面的迁移可达 90 cm 土层。石宁等<sup>[11]</sup>也发现在设施蔬菜栽培中长期施用有机无机肥料会促进土壤磷素的积累及迁移,在连续种植设施蔬菜 5~10 年的土壤中有有效磷的积累主要发生在 0~40 cm 土层,在 10~15 年的土壤中则在 40~100 cm 土层发生有效磷积累。目前,关于有机肥替代磷肥对土壤磷素影响的研究对象大多为粮食作物,而在设施土壤中尤其是富磷的设施菜地中的相关研究较少。

土壤碳氮磷化学计量元素比是表征土壤质量的重要指标,可表征多种因素影响下土壤碳氮磷元素平衡及循环特征<sup>[12-14]</sup>。土壤碳氮比( $C:N$ )的大小不仅可作为土壤有机质降解的预测指标<sup>[15]</sup>,还可用以衡量土壤中硝酸盐淋溶风险的阈值<sup>[16]</sup>。土壤碳磷比( $C:P$ )可被用以衡量土壤微生物对磷的固持作用及磷的有效性<sup>[17-18]</sup>。此外,土壤氮磷比( $N:P$ )也往往被用以预测土壤氮磷元素对作物的限制状况<sup>[19]</sup>。土壤碳氮磷化学计量元素比的影响因素主要包括气候状况、植被类型、土壤类型及人类活动等<sup>[20-21]</sup>。宋亚辉等<sup>[22]</sup>也发现不同施肥方式也会影响土壤  $C:N:P$ 。然而,目前关于不同施肥方式对土壤碳氮磷生态化学计量比尤其是设施土壤中的相关研究较少。

本研究以设施蔬菜富磷土壤为研究对象,通过 5 季的定位试验研究有机无机配施不同比例下土壤

碳氮磷计量比的动态变化过程及其对有效磷含量的影响,为设施蔬菜富磷土壤的磷素管理提供新的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点概况

试验地点为江苏省淮安市一辣椒种植大棚。试验时间为2016年8月至2019年1月,连续种植5茬辣椒。该地区气候为北温带半湿润季风气候,年降水量906.6 mm,年平均气温14.1~14.8℃。试验区土壤类型为黄棕壤。土壤有机质含量18.8 g/kg,全氮含量1.4 g/kg,全磷含量0.8 g/kg, pH5.8,矿质态氮含量97.3 mg/kg,有效磷含量132.0 mg/kg,

速效钾含量196.0 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验共设5个处理。处理1:空白对照(CK),不施任何肥料;处理2:化肥(CF),单施化肥,不施有机肥;处理3:有机肥+化肥(OCF1),施用3.8 t/hm<sup>2</sup>有机肥并减施49%磷肥;处理4:有机肥+化肥(OCF2),施用4.9 t/hm<sup>2</sup>有机肥并减施63%磷肥;处理5:有机肥+化肥(OCF3),施用5.6 t/hm<sup>2</sup>有机肥并减施73%磷肥。所有施肥处理的化肥施用种类一致。各处理养分施用量见表1。各处理除施肥外,其他田间管理一致。每个处理设4个重复小区,各小区随机排列。每个小区长6.2 m,宽3.3 m,面积20.5 m<sup>2</sup>。

表1 不同处理养分施用量

Table 1 Application amount of nutrients in different treatments

处理	有机肥养分施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )			化肥养分施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )			总养分施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CF	—	—	—	300.0	154.2	418.4	300.0	154.2	418.4
OCF1	90.8	125.3	31.3	225.0	79.2	343.4	315.8	204.4	374.7
OCF2	118.0	162.8	40.7	202.5	56.7	320.9	320.5	219.5	361.6
OCF3	136.2	187.9	47.0	187.5	41.7	305.9	323.7	229.5	352.9

### 1.3 供试材料

供试作物为辣椒,品种为先红一号,株距为35 cm,行距为55 cm。连续种植5季,每年种植2季,春季种植时间为3月-7月,秋季种植时间为8月-第2年1月。

供试有机肥为猪粪有机肥,其性状为:有机质含量42.6%,N含量2.9%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量1.8%,K<sub>2</sub>O含量0.9%,pH7.9,电导率3.5 mS/cm,含水量16.5%。

### 1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤样品采集 土壤样品采集时间为每季辣椒收获后,采用梅花形5点采样法采集每小区混合土样。采样深度为20 cm。土壤样品采集后风干。风干后剔除石块、植物残渣等后研磨,使其全部过20目筛。过筛后的土壤采用四分法取一部分土壤进一步研磨过100目筛。将过筛的样品写好标签并密封保存,以供后续测定。

1.4.2 土壤化学性状测定 采用NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼蓝比色法测定有效磷含量,采用元素分析仪测定全

碳和全氮含量,用高氯酸-硫酸消煮后利用全自动化学分析仪法测定土壤全磷含量,采用灼烧后0.2 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定土壤有机磷含量,全磷与有机磷含量的差值即为土壤无机磷含量。

### 1.5 数据分析

用SPSS 22.0进行数据的统计分析。采用单因素方差分析比较不同处理间差异显著性。

## 2 结果与分析

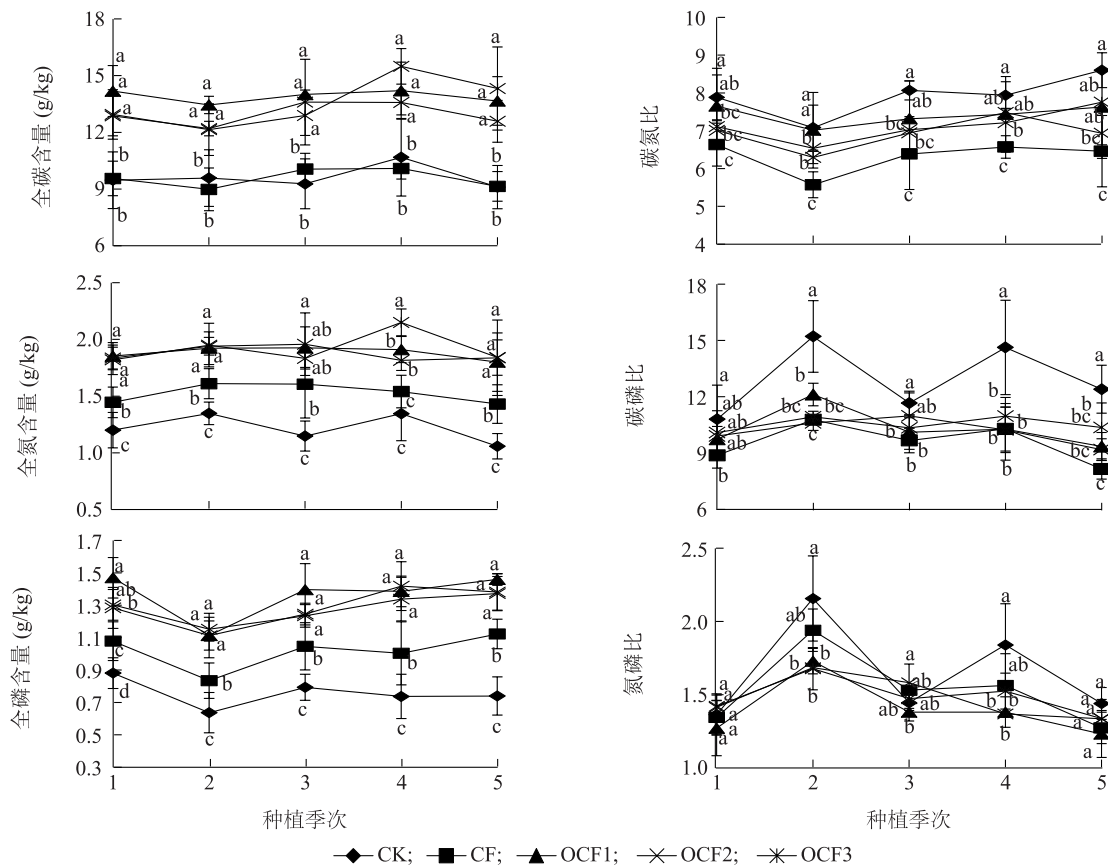
### 2.1 不同施肥处理对土壤碳氮磷化学计量学特征的影响

从图1可以看出,在每季试验中,与化肥处理相比,3个施用有机肥处理均显著增加了土壤全碳含量。与化肥处理相比,在第3季中,OCF2处理显著增加了土壤全氮含量,而在其他季中,3个施用有机肥处理均显著增加了土壤全氮含量。此外,在第4季中,OCF3处理的土壤全氮含量显著高于其他2个施用有机肥处理。从图1还可看出,在每季辣椒种

植中,所有施用有机肥处理的土壤全磷含量均显著高于化肥处理。在不同种植季中,各施肥处理对土壤碳氮比的影响也不同。与化肥处理相比,在第 1 季和第 3 季中 OCF1 处理的碳氮比显著增加,在第 2 季和第 4 季中 3 个施用有机肥处理的碳氮比均显著增加,在第 5 季中 OCF1 和 OCF3 处理的碳氮比显著增加。各施肥处理间土壤碳磷比的差异较小。与化肥处理相比,在第 5 季中,OCF3 处理的碳磷比显著

增加。在所有种植季中,与化肥处理相比,施用有机肥处理未显著影响土壤氮磷比。

对连续 5 季辣椒栽培中土壤碳氮磷含量及其化学计量比的动态变化进行线性拟合,结果如图 2 所示。从图 2 可知,随着辣椒种植季次的增加,OCF3 处理的土壤总碳、全磷含量和碳氮比增加趋势显著 ( $P<0.05$ )。



各处理见表 1。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 不同施肥处理土壤总碳、全氮、全磷含量、 $C:N$ 、 $C:P$ 、 $N:P$  的动态变化

Fig.1 Change of concentration of total C, total N, total P,  $C:N$ ,  $C:P$  and  $N:P$  in soil under different fertilizer treatments

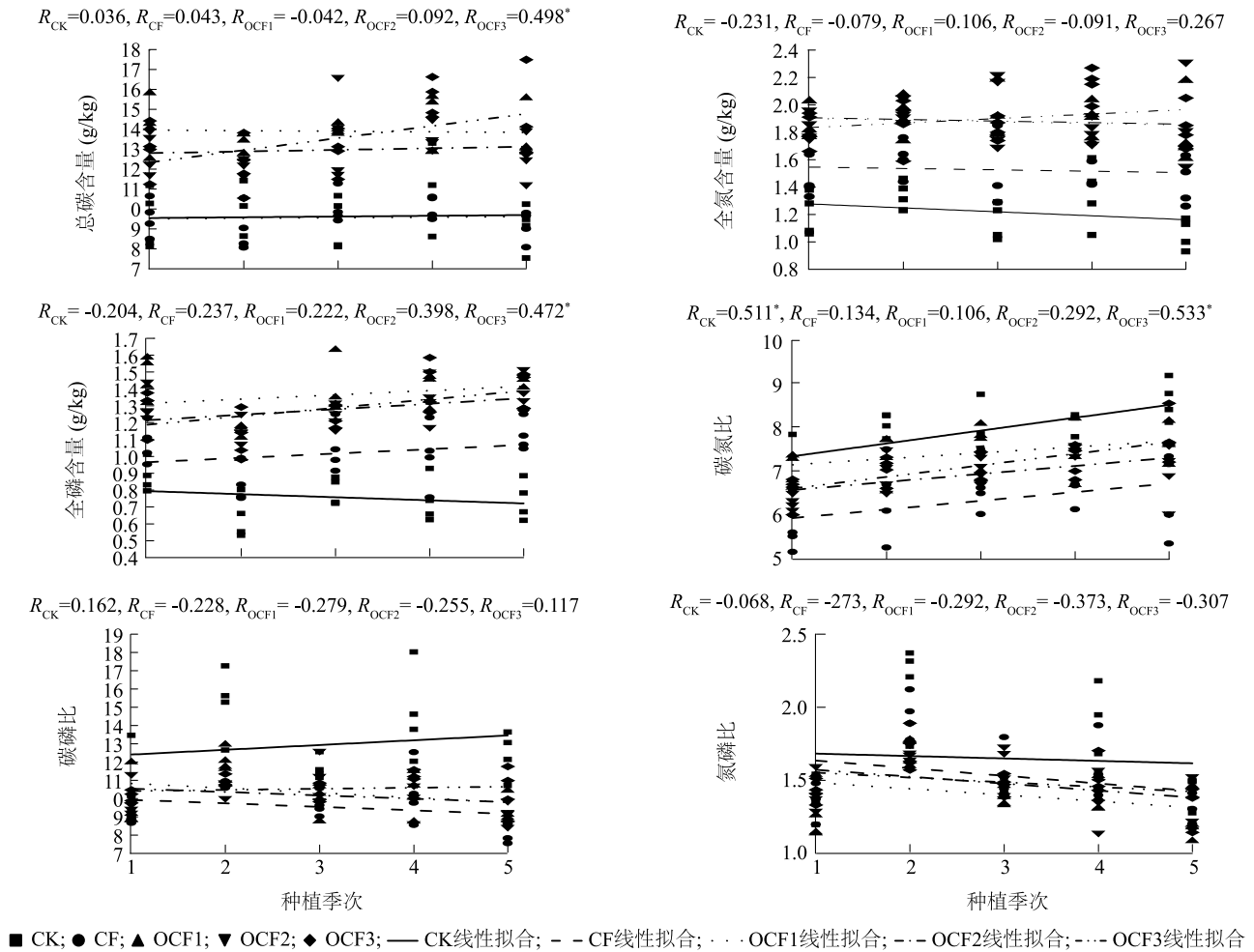
## 2.2 不同施肥处理对土壤不同形态磷含量的影响

不同处理的土壤有效磷、有机磷、无机磷含量及其占全磷含量比例的动态变化如图 3 所示。与化肥处理相比,在第 1 季中 OCF1 和 OCF3 处理显著增加了土壤有效磷含量,在第 2 季中 OCF2 和 OCF3 处理显著增加了土壤有效磷含量,而在第 5 季中 OCF2 处理显著降低了土壤有效磷含量。与化肥处理相比,在第 3 季中,OCF1 处理显著降低了土壤有效磷占比,在第 4 季和第 5 季中,3 个施用有机肥处理均

显著降低了有效磷占比。

在不同种植季中,各施肥处理对土壤有机磷含量的影响不同。在第 1 季中 OCF2 处理的土壤有机磷含量显著高于 CF 处理,而在第 2 季中 OCF2 处理的土壤有机磷含量显著低于 CF 处理,在第 3 季中 OCF1 和 OCF3 处理的土壤有机磷含量显著低于 CF 处理,在第 4 季中 OCF2 和 OCF3 处理的土壤有机磷含量显著低于 CF 处理。各施肥处理对土壤有机磷占全磷比例也有显著影响,尤其在第 2 季和第 4 季





各处理见表1。\*表示在0.05水平上显著相关,\*\*表示在0.01水平上显著相关。

图2 不同施肥处理土壤总碳含量、全氮含量、全磷含量、C:N、C:P和N:P的线性拟合

Fig.2 Linear fitting of concentration of total C, total N, total P, C:N, C:P and N:P in soil under different fertilizer treatments

中,与化肥处理相比,OCF2和OCF3处理的土壤有机磷占比显著降低。

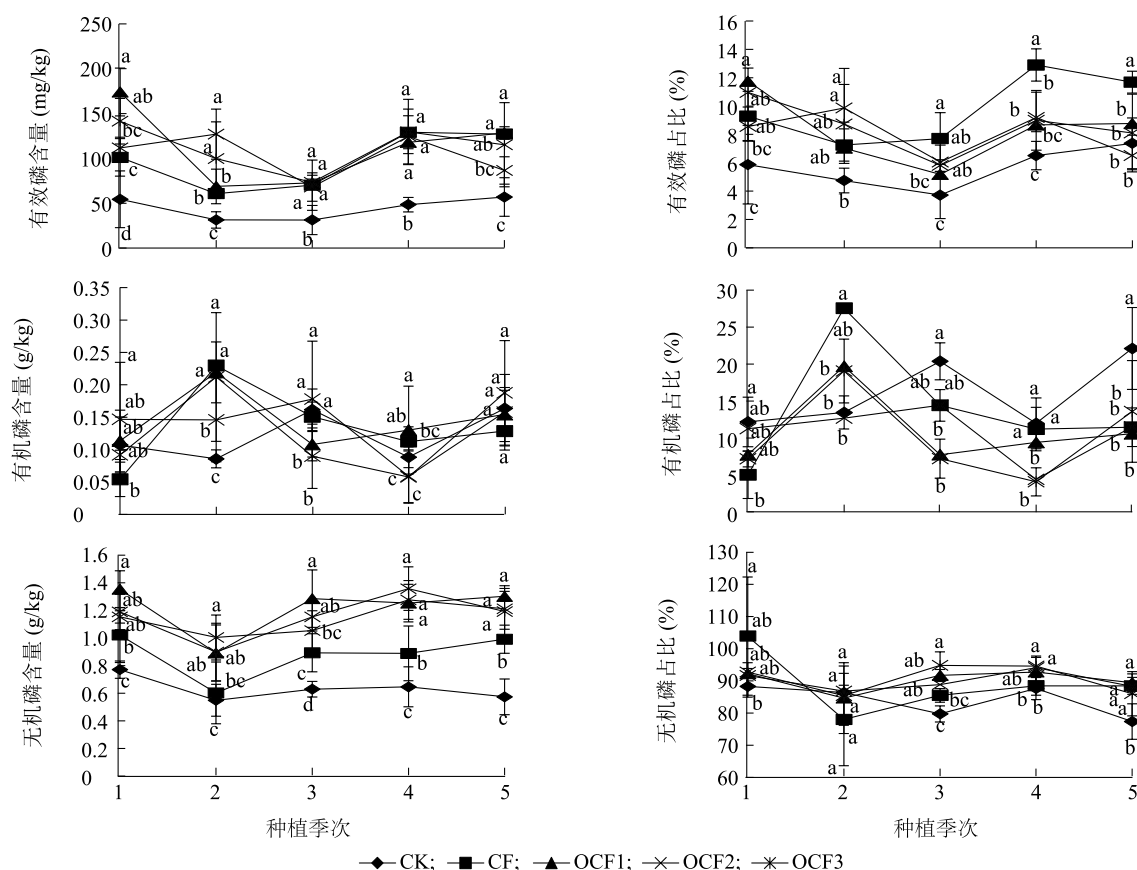
各施肥处理对土壤无机磷含量也有显著影响。与化肥处理相比,在第1季中OCF1处理显著增加了无机磷含量,在第2季中OCF2处理显著增加了无机磷含量,在第3季中OCF1和OCF3处理显著增加了无机磷含量,在第4季和第5季中3个施用有机肥处理均显著增加了无机磷含量。各处理间无机磷占比差异不同于无机磷含量差异。在第3季中OCF3处理的无机磷占比显著高于化肥处理,在第4季中OCF2和OCF3处理的无机磷占比显著高于CF处理。

对连续5季辣椒栽培中土壤有效磷、有机磷和

无机磷含量及其占比的动态变化进行线性拟合。从图4可知,随着辣椒种植季次的增加,CF处理的土壤有效磷含量及其占比增加趋势显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )。此外,CK处理的土壤有机磷占比增加趋势和无机磷占比降低趋势均达显著水平( $P<0.05$ )。

### 2.3 土壤有效磷含量与其他指标的相关性

对所有处理中土壤有效磷与其他指标进行了相关性分析。从图5可以看出,土壤全磷含量、无机磷含量及其占比、总碳含量、全氮含量与有效磷含量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),而有机磷占比、碳磷比和氮磷比与有效磷含量呈极显著负相关关系( $P<0.01$ )。



各处理见表 1。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 不同施肥处理土壤有效磷、有机磷和无机磷含量及其占比的动态变化

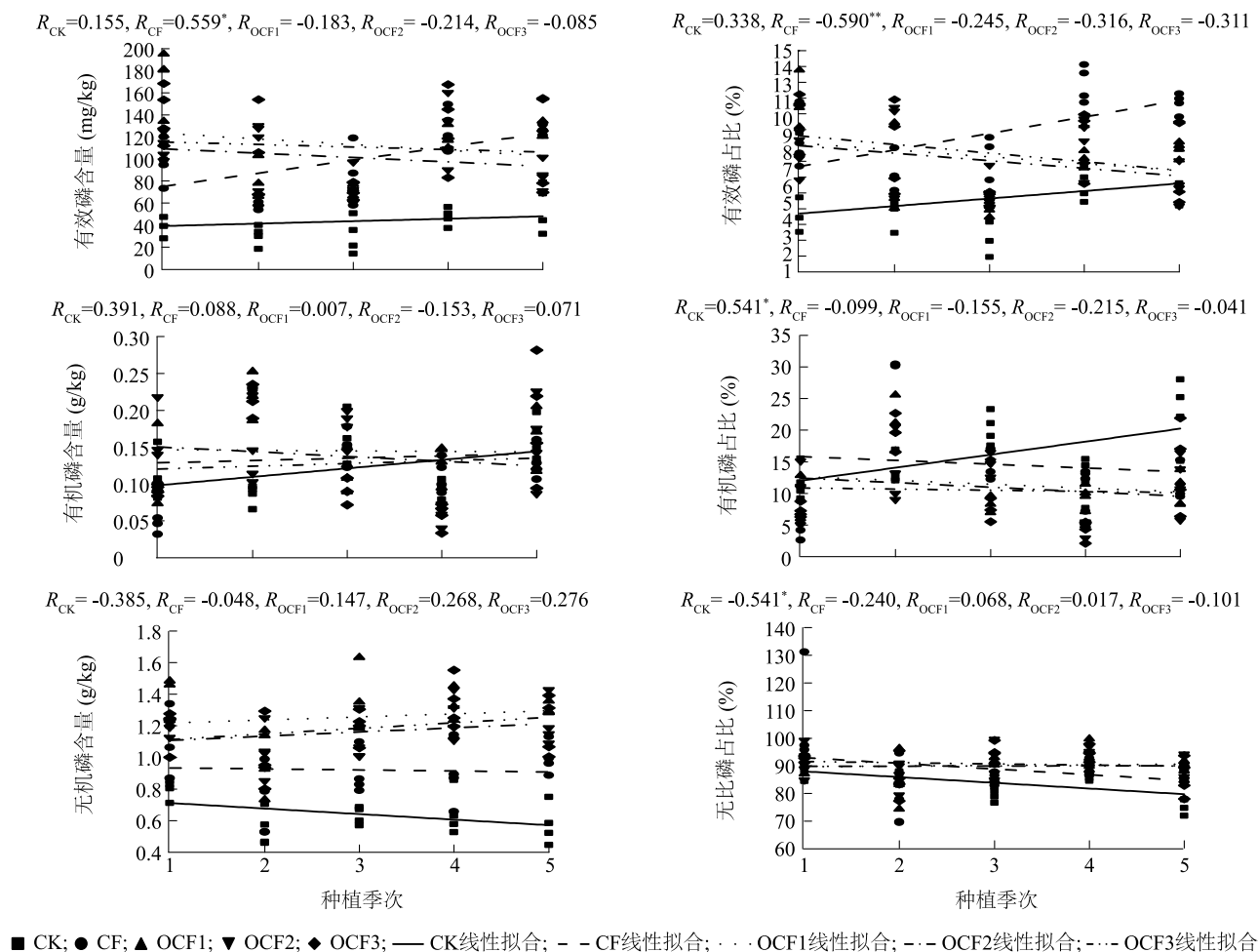
Fig.3 Change of concentration and percentage of available P, organic P and inorganic P in soil under different fertilizer treatments

### 3 讨论

本研究结果表明,与单施化肥相比,在大棚辣椒栽培中施用有机肥磷替代部分化肥磷可增加土壤有效磷含量,且不同替代比例对有效磷含量的影响效果也不同。在大棚辣椒第 1 季和第 2 季栽培中,施用有机肥磷替代 70% 化肥磷处理 (OCF3) 显著增加了土壤有效磷含量,这与很多研究者的研究结果相似。很多研究者发现施用有机肥可提高土壤有效磷含量,其机理主要包括 5 个方面<sup>[23-26]</sup>: 有机肥本身所含水溶性磷和有效态磷施入土壤可增加土壤有效磷含量;有机肥经土壤微生物矿化分解后可产生有机阴离子,可与土壤中磷酸根竞争固相表面的专型吸附位点,从而减少土壤中磷的吸附并提高其有效性;有机肥中有机质降解所产生的有机酸可溶解土壤中难溶态磷;有机肥中的腐殖质通过在铁、铝氧化物等胶体表面形成保护膜而减少土壤对磷酸根的吸附;有机肥中有机物在土壤中降解产生的  $\text{CO}_2$  溶于

水形成的碳酸可增加土壤中钙、镁磷酸盐的溶解度;在酸性土壤中施用有机肥可通过提高土壤 pH 促使铁、铝形成氢氧化物沉淀,从而减少其对磷的吸附固定。本研究发现 3 个施用有机肥的处理均显著增加了土壤全碳含量,且土壤全碳含量与有效磷含量呈极显著正相关关系,这证实了施用有机肥可通过提高土壤有机质含量而间接提高土壤磷的有效性。

有研究者认为,施用有机肥还可增加土壤有机磷含量,且通过土壤微生物对有机磷的矿化作用而提高有效磷的含量<sup>[27-28]</sup>。然而,本研究却发现,与单施化肥相比,施用有机肥并未显著增加土壤有机磷含量及其所占全磷比例(除了 OCF2 处理在第 1 季中显著增加了土壤有机磷含量),且相关性分析结果表明,土壤有效磷与有机磷所占全磷比例呈极显著负相关,而与有机磷含量未呈现出显著相关性。这可能是由于施用有机肥在增加土壤有机磷含量的同时也提高土壤微生物活性及其对有机磷的矿化,从而未表现出有机肥对土壤有机磷的显著增加效



各处理见表1。\*表示在0.05水平上显著相关,\*\*表示在0.01水平上显著相关。

图4 不同施肥处理土壤有效磷、有机磷和无机磷含量及其占比的线性拟合

Fig.4 Linear fitting of concentration and percentage of available P, organic P and inorganic P in soil under different fertilizer treatments

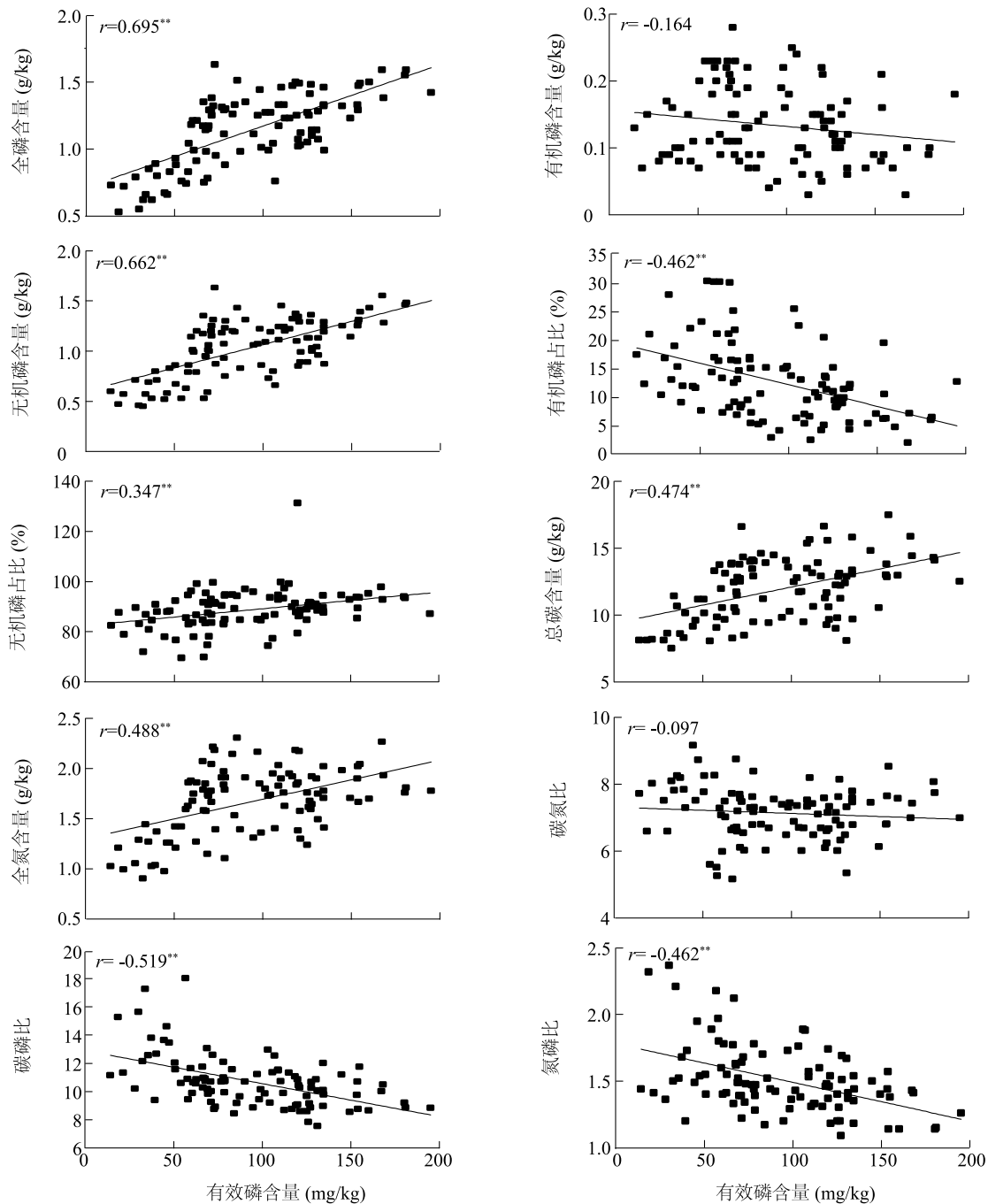
果。

然而,本研究中随着大棚辣椒栽培次数的增加,单施化肥处理的土壤有效磷含量增加趋势达显著水平( $P<0.05$ ),而3个有机肥磷替代化肥磷处理的土壤有效磷含量表现出降低趋势,且在第5季辣椒栽培中,有机肥磷替代60%和70%化肥磷处理均降低了土壤有效磷含量,这说明设施土壤中的有效磷含量可能随着有机肥施用年限的增加而降低。这与其他学者的研究结果不同。许多研究者认为,长期施用有机肥可提高土壤磷的有效性。王敏锋等<sup>[10]</sup>通过多年田间定位试验发现,长期施用粪肥可显著增加土壤有效磷含量。本研究中的相关性分析结果表明,土壤有效磷含量与土壤C:P、N:P均呈极显著负相关关系,且连续施用5季有机肥后 OCF1 和

OCF2 2个处理的土壤C:P和N:P均高于CF处理,这说明在本试验中连续施用有机肥可能通过提高土壤C:P和N:P从而逐渐降低土壤磷的有效性。有研究者发现土壤有效磷含量随着土壤C:P的增加而降低<sup>[29-30]</sup>。姜一等<sup>[31]</sup>发现当施入土壤中的有机物料C:P>300时,则土壤微生物对磷进行生物固定,从而降低磷的有效性。

## 4 结论

在大棚辣椒连续5季种植中,与单施化肥相比,施用有机肥替代49%~73%磷肥均可显著提高土壤全碳、全氮和全磷含量。然而,施用有机肥处理仅在第1季和第2季显著增加了土壤有效磷含量,甚至在第5季中施用有机肥替代63%磷肥显著降低了土



各处理见表 1。\* 表示在 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

图 5 土壤有效磷含量与其他化学性状的相关性

Fig.5 Correlation between soil available P concentration and other chemical characteristics

壤有效磷含量。在连续种植 5 季后,施用有机肥替代 73% 磷肥的处理显著提高了土壤 C:P,且土壤 C:P 与有效磷含量呈极显著负相关关系。这说明在设施蔬菜栽培中长期施用有机肥替代磷肥可能会通过提高土壤 C:P 而降低土壤有效磷含量。

#### 参考文献:

- [1] 张田,许浩,茹淑华,等. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J]. 环境科学, 2017(12): 5247-5255.
- [2] 肖辉,潘洁,程文娟,等. 不同有机肥对设施土壤有效磷累



- 积与淋溶的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1195-1200.
- [3] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [4] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 减量施磷对温室菜地土壤磷素积累、迁移与利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3944-3952.
- [5] 张彦才, 李巧云, 翟彩霞, 等. 河北省大棚蔬菜施肥状况分析与评价[J]. 河北农业科学, 2005, 9(3): 61-67.
- [6] 唐 珧, 李丽君, 白光洁, 等. 山西南部设施蔬菜施肥及土壤氮磷累积现状调查分析[J]. 山西农业科学, 2017(5): 773-776.
- [7] SATTARI S Z, VAN ITTERSUM M K, GILLER K E, et al. Key role of China and its agriculture in global sustainable phosphorus management[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(5): 1-8.
- [8] 韩晓飞, 谢德体, 高 明, 等. 紫色土减磷配施有机肥的磷肥效应与磷素动态变化[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 207-213.
- [9] 刘 蕾, 王 凌, 徐万强, 等. 设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施[J]. 华北农学报, 2019, 34(增刊1): 197-203.
- [10] 王敏锋, 严正娟, 陈 硕, 等. 施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1351-1359.
- [11] 石 宁, 李 彦, 井永苹, 等. 长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2434-2442.
- [12] 赵 栋, 王 琪, 连 娥, 等. 白龙江干旱河谷不同植被土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 178-185.
- [13] 陶 晓, 俞元春, 张云彬, 等. 城市森林土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 88-96.
- [14] 李 森, 李 玲, 樊 华, 等. 川西北高寒沙地不同生态治理模式下土壤碳氮磷储量及生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2567-2573.
- [15] AITKENHEAD J A, MCDOWELL W H. Soil C : N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(1): 127-138.
- [16] GUNDERSEN C, VRIES D. Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios[J]. Environmental Pollution, 1998, 102(1): 403-407.
- [17] HOANG D T T, RAZAVI B S, KUZUYAKOV Y, et al. Earthworm burrows: kinetics and spatial distribution of enzymes of C-, N- and P- cycles[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 99: 94-103.
- [18] HEUCK C, WEIG A, SPOHN M. Soil microbial biomass C : N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 85: 119-129.
- [19] LIU Z F, FU B J, ZHENG X X, et al. Plant biomass, soil water content and soil N : P ratio regulating soil microbial functional diversity in a temperate steppe: a regional scale study[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(3): 445-450.
- [20] 欧延升, 汪 霞, 李 佳, 等. 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 38-45.
- [21] 刘旭阳, 陈晓旋, 陈优阳, 等. 福州不同农田土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 348-355.
- [22] 宋亚辉, 艾泽民, 乔磊磊, 等. 施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响[J]. 水土保持研究, 2019(6): 38-45.
- [23] KOCH M, KRUSE J, EICHLER-LÖBERMANN B, et al. Phosphorus stocks and speciation in soil profiles of a long-term fertilizer experiment: evidence from sequential fractionation, P K-edge XANES, and  $^{31}\text{P}$  NMR spectroscopy[J]. Geoderma, 2018, 316: 115-126.
- [24] NEST T V, G RUYSSCHAERT, B VANDECASTEELE, et al. The long term use of farmyard manure and compost: effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 216: 23-33.
- [25] YE D H, LI T X, YU H Y, et al. P accumulation of *Polygonum hydropiper*, soil P fractions and phosphatase activity as affected by swine manure[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 86: 10-18.
- [26] VANDEN N T, VANDECASTEELE B, RUYSSCHAERT G, et al. Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and P leaching in a long term trial on a silt loam soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 309-317.
- [27] WEI K, BAO H, HUANG S, et al. Effects of long-term fertilization on available P, P composition and phosphatase activities in soil from the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 237: 134-142.
- [28] TAN H, BARRET M, MOOIJ M J, et al. Long-term phosphorus fertilisation increased the diversity of the total bacterial community and the *phoD* phosphorus mineraliser group in pasture soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(6): 661-672.
- [29] ROMANYÀ J, BLANCO-MORENO J M, SANS F X. Phosphorus mobilization in low-P arable soils may involve soil organic C depletion[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 113: 250-259.
- [30] JING Z, CHEN R, WEI S, et al. Response and feedback of C mineralization to P availability driven by soil microorganisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 105: 111-120.
- [31] 姜 一, 步 凡, 张 超, 等. 土壤有机磷矿化研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 160-166.

(责任编辑:张震林)