

# 两种外源性有机物料对设施土壤磷变化的影响

黄敏, 尹维文, 余婉霞, 周开来, 黄永炳, 石小娟

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

**摘要:**采用室内强化模拟试验研究了90 d培养期内稻草和草炭2种外源性有机物料对设施菜地土壤磷素转化的影响。结果显示,与对照相比,添加量为 $2\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的稻草处理土壤微生物量磷分别增加111.1%~310.0%和197.7%~356.3%,草炭处理分别增加23.7%~54.6%和63.2%~157.1%;添加量为 $2\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的稻草处理土壤有效磷平均降低了15.0%和20.2%,草炭处理土壤有效磷与对照差异在前期(45 d)并不显著;土壤易解吸磷30 d后持续降低,培养结束时稻草和草炭处理土壤易解吸磷均值分别降低了21.3%和10.9%。以培养结束时各组分磷占全磷的比例来看,稻草和草炭均可促进土壤无机态的Al-P、Fe-P、O-P及有机态的MLOP、HROP等组分向有机态的LOP和MROP转化,土壤微生物量磷、有效磷和易解吸磷均与Fe-P呈显著线性相关。研究表明,添加稻草和草炭有利于设施土壤磷素的管理,且稻草的效果总体上比草炭的要好;Fe-P是调控设施土壤磷素周转与流失的重要形态。

**关键词:**土壤磷;转化;设施菜地;磷形态;外源性有机物料

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)03-0501-08 doi:10.11654/jaes.2015.03.012

## Effects of Two Organic Amendments on Phosphorus Transformation in Greenhouse Soil

HUANG Min, YIN Wei-wen, YU Wan-xia, ZHOU Kai-lai, HUANG Yong-bing, SHI Xiao-juan

(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Greenhouse soils are different from common agricultural soils in nutrient transformation, due to high temperature and moisture. In this study, the effects of rice straw and peat applications on the transformation of phosphorus(P) in a greenhouse vegetable soil were studied in a laboratory incubation. Dynamics of soil microbial biomass P(MBP), available P(Olsen-P) and readily desorption P( $\text{CaCl}_2\text{-P}$ ) were examined during a 90-day experimental period. Inorganic P was fractionated as aluminum(Al-P), ferric(Fe-P), calcium(Ca-P) and occluded P(O-P), while organic P as labile organic P(LOP), moderately labile organic P(MLOP), moderately resistant organic P(MROP) and highly resistant organic P(HROP). Compared to the control, soil MBP increased by 111.1%~310.0% and 197.7%~356.3% following rice straw amendments at  $2\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $4\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, while it increased by 23.7%~54.6% and 63.2%~157.1% following peat additions at  $2\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $4\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$  peat, respectively. Soil Olsen-P decreased by average 15.0% and 20.2% after additions of rice straw at  $2\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $4\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. However, peat additions did not significantly change soil Olsen-P until 45 days of incubation. Soil  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  kept declining after 30 days of incubation. After 90-day incubation, rice straw and peat reduced  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  by average 21.3% and 10.9%, respectively, in comparison with the control. By comparing the percentages of each P fractions over total P at the end of incubation, rice straw and peat both enhanced the conversion of Al-P, Fe-P, O-P, LOP and HROP to LOP and MROP. The correlation coefficients between MBP, Olsen-P,  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  and Fe-P fractions were statistically significant at  $P<0.05$ . In conclusion, rice straw and peat amendments would help control P transformations in greenhouse soils, with rice straw more effective than peat. Fe-P may be a vital chemical fraction in regulating cycling, transformation and runoff of phosphorus in greenhouse soils.

**Keywords:** soil phosphorus; transformation; greenhouse vegetable soil; phosphorus fraction; organic amendments

收稿日期:2014-10-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41101210);武汉理工大学国家级大学生创新创业训练计划项目(20141049708004)

作者简介:黄敏(1973—),女,湖北荆州人,博士,副教授,研究方向为土壤环境与区域生态。E-mail:huangmin@whut.edu.cn

设施土壤是高度集约化管理条件下发育的一种人为作用强烈的旱地土壤,由于其长期处于“高温、高湿、高度连作、连续大量施肥、无降水淋洗”等条件下,设施土壤往往表现出养分富集、结构板结和酸化盐渍化等特性<sup>[1-2]</sup>。稻草和草炭是设施蔬菜种植实践中常用于改良土壤的两种典型有机物料。这是因为稻草易地还田、覆盖设施作物,可有效改善土壤结构、调节土壤的温度和水分、强化有机质积累<sup>[3]</sup>;草炭属于生物质炭,具有高度稳定性,其有机质含量高、孔隙率大(达80%~90%)、比表面积大(200 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>以上)等优点<sup>[4-6]</sup>,在改善设施土壤次生盐渍化和酸化问题上效果明显<sup>[1]</sup>。另外,盲目大量施肥在设施栽培这种高投入、高产出的生产模式中相当普遍,尤其是磷肥的施用,而磷肥对当季作物的利用率仅有10%~25%,导致磷在菜地土壤中的大量积累<sup>[1-2]</sup>。设施栽培的微环境虽然相对封闭,但其水分管理中灌排措施仍会引起土壤磷素流失到周边地表水中,引发水体富营养化<sup>[7-9]</sup>。设施栽培中土壤中磷的积累浪费了磷矿资源,还会影响设施蔬菜种植区域的水生态环境。因此,如何保证设施菜地土壤的磷素供应能力,同时降低其磷素流失风险,是涉及到设施农业的可持续发展和区域生态平衡的重要问题。稻草和草炭两种有机物料对土壤磷库有着重要的调节作用。稻草也是重要的生物营养源,比如稻草还田不仅能明显提高稻田0~5 cm土层全磷和有效磷的含量<sup>[10]</sup>;而且能促进水旱轮作土壤微生物生物量碳和磷的形成<sup>[11-12]</sup>,微生物所利用的磷约有30%以上的无机磷被转化到有机磷库中<sup>[11]</sup>。稻草含碳量高达40%以上,降解时能产生多种有机酸<sup>[4]</sup>,有利于活化土壤固定态磷<sup>[13]</sup>。草炭含有氨基酸、腐植酸、氮磷钾等多种养分<sup>[4]</sup>,它不仅能维持土壤水分和提高土壤团聚性<sup>[4-6]</sup>,还能促进土壤养分循环<sup>[4]</sup>。有研究结果显示,添加生物炭后增加旱地麦田土壤无机磷组分中的Ca-P和Al-P含量,同时降低了Fe-P含量<sup>[6]</sup>。可见,目前有机物料对土壤磷素转化的研究,主要集中在露天自然的草地、水田或旱地土壤上,而对富磷的设施菜地土壤而言,所见报道并不多见。事实上,由于设施菜地受人为作用强烈,其化学过程往往不同于自然条件下的土壤<sup>[1]</sup>。

本研究以武汉近郊的富磷设施土壤为研究对象,分别向土壤中添加不同量的稻草或草炭,探讨两种实际生产中所用的有机物料对磷素转化的影响规律及其差异,以期对设施菜地土壤磷素的管理和有机物料的施用,改善区域环境提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自武汉市东西湖区石榴红村具有代表性的设施蔬菜种植基地,该基地蔬菜种植历史有20多年,其设施面积近70 hm<sup>2</sup>。供试土壤为设施菜地的表层(0~20 cm)土壤,时至采样时其连续设施种植年限达5年。为保证土壤及其蔬菜种植的相对均一性,供试土壤在同一大棚(规格为8 m×150 m)内按“S”形线路随机多点(采样点总数超过50)采集混合而成。采得的土样装入无菌塑料袋中带回实验室及时研磨,过10目分析筛后置入4℃冰箱保存备用。该设施土壤为中性灰潮土,其pH值为7.18,可溶性盐分含量0.58 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量55.18 mg·kg<sup>-1</sup>,全磷含量2.73 g·kg<sup>-1</sup>,有机碳含量9.97 g·kg<sup>-1</sup>。供试的稻草和草炭分别取自湖北荆州和武汉,均在105℃下烘干后磨碎过100目筛备用。稻草全磷含量0.67 g·kg<sup>-1</sup>,有机碳含量439.37 g·kg<sup>-1</sup>;草炭全磷含量0.11 g·kg<sup>-1</sup>,有机碳含量419.45 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验设计

将供试土壤用蒸馏水调节土壤含水量到田间持水量的45%,然后置于25±1℃恒温恒湿的条件下进行7 d的预培养。称取若干份1 kg(以烘干基计)预培养过的新鲜土壤,进行添加稻草和草炭的处理。根据当地生产中两种有机物料的常规用量(一般在5100~5400 kg·hm<sup>-2</sup>之间),本研究对稻草和草炭的添加量强化了2~4倍,即添加量分别为稻草2 gC·kg<sup>-1</sup>(S2)、稻草4 gC·kg<sup>-1</sup>(S4)和草炭2 gC·kg<sup>-1</sup>(B2)、草炭4 gC·kg<sup>-1</sup>(B4),同时设不添加有机物料的对照(CK),并加入1%硫酸铵溶液以保证所有处理碳氮比和含水量相同,即所有处理土壤的碳氮比为10:1,水分含量为土壤田间持水量的50%。各处理土壤充分混匀后,加盖密封置于(25±1)℃恒温恒湿培养箱中,每3 d揭盖换气一次以保证土壤微生物氧气供应充足。每个处理均设3次重复,培养期按实践一茬设施作物最短周期(约3个月)来设定,在培养期0、3、6、10、15、20、30、45、60和90 d分别取样分析,并对培养结束时所有处理土壤磷各组分进行相关性分析。

#### 1.2.2 仪器和药品规格

本研究使用的紫外-可见分光光度计为龙尼柯仪器有限公司生产的WF2UV-2000型。所使用的化学药品均为国药集团生产,规格为分析纯。

### 1.2.3 测定方法

土壤全磷(TP)的测定采用  $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$  溶液消化法<sup>[15]</sup>,微生物生物量磷(MBP)采用熏蒸提取法<sup>[16]</sup>;有效磷(Olsen-P)用  $\text{NaHCO}_3$  ( $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH}=8.5$ ) 提取,本研究中采用未熏蒸提取的磷;易解吸磷( $\text{CaCl}_2\text{-P}$ )用  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  提取<sup>[17]</sup>;磷组分测定中,无机磷采用改进的 Chang-Jackson 法<sup>[18]</sup>,分为铝结合态磷(A1-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)和钙结合态磷(Ca-P)4个组分;有机磷分级采用 Bowman-Cole 法<sup>[19]</sup>,分为活性有机磷(LOP)、中等活性有机磷(MLOP)、中等稳定性有机磷(MROP)和高等稳定性有机磷(HROP)4个组分。以上所有溶液中的磷均采用钼锑抗-抗坏血酸比色法测定<sup>[15]</sup>。

### 1.2.4 统计分析

本研究采用 Microsoft Office 与 SPSS17.0 进行数据处理分析及相关制图。用  $t$  检验来分析处理间的差异显著性,用 Pearson 相关系数来判断两个变量线性相关的程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 设施土壤微生物生物量磷的动态变化

图1表示了添加有机物料后土壤MBP的变化。在90d的培养期内,稻草和草炭均可增加土壤MBP含量,且随其添加量的增加而增加。S2处理(图1A)土壤MBP在第3d比S4处理的要高,其含量分别达  $102.88$ 、 $84.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,较CK分别增加了3.0倍和2.3倍,而之后的培养期间内其趋势发生逆转,S4处理土壤MBP均显著高于S2,培养结束时,S2和S4处理MBP含量较CK分别增加了1.3倍和2.2倍( $P <$

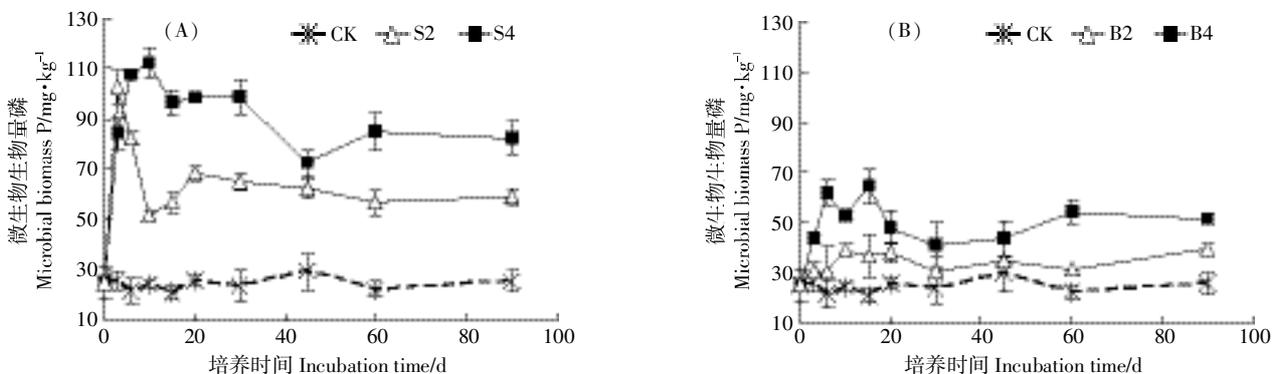
$0.01$ )。添加草炭后设施土壤MBP的变化趋势与稻草的影响有所不同,即添加草炭后土壤MBP在前6d与CK的差异不显著。在第6d,B2和B4处理的土壤MBP较CK分别增加了  $5.94$ 、 $36.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,此后B4处理土壤MBP含量均显著高于B2(见图1B)。培养结束时,B2和B4处理土壤MBP较CK仅增加了  $53.9\%$ 和  $100.0\%$ 。

### 2.2 设施土壤有效磷的动态变化

由图2可以看出,培养期间CK的Olsen-P含量在  $44.22\sim 71.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  间波动。与CK对比,添加稻草后的第3d,土壤Olsen-P含量显著下降,且S2和S4处理的土壤Olsen-P分别降低了  $36.1\%$ 和  $19.8\%$ ;第10~45d,S2和S4处理的土壤Olsen-P含量分别降低了  $10.7\%$ 和  $21.8\%$ ,且S4处理的土壤Olsen-P含量低于S2处理(见图2A)。而添加草炭处理后的土壤Olsen-P在前30d与CK无明显差异( $P > 0.05$ ),45d后,B2处理的土壤Olsen-P显著低于B4和CK,90d时,B2处理的土壤Olsen-P较CK明显降低了  $10.1\%$ ,而B4处理土壤Olsen-P与CK的差异并不显著(见图2B)。值得注意的是,在90d的培养期内,添加有机物料虽降低了土壤Olsen-P含量,但所有土壤Olsen-P一直维持在  $29.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上,且前30d同种有机物料两种添加量间土壤Olsen-P含量的差异均不显著。

### 2.3 设施土壤易解吸磷的动态变化

分析土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的动态变化(图3)可知,CK处理的  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量由培养开始时的  $5.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  至培养结束下降到  $5.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与CK处理相比,添加稻草和草炭后土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量均明显下降。稻草处理



A 为添加稻草处理,B 为添加草炭处理。下同

Figures A and B indicate rice straw and peat amendments, respectively. The same below

图1 设施土壤微生物生物量磷含量动态变化

Figure 1 Dynamics of microbial biomass phosphorus in greenhouse soil

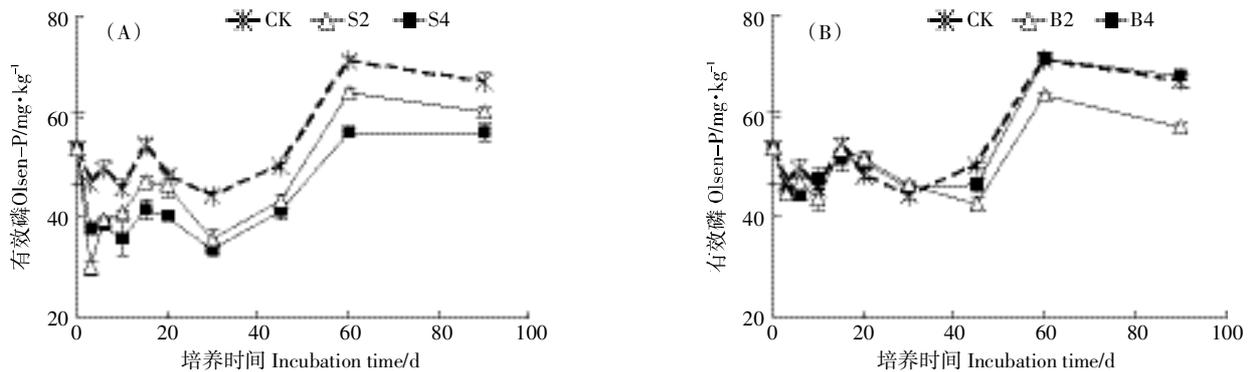


图2 设施土壤有效磷含量动态变化

Figure 2 Dynamics of Olsen-P content in greenhouse soil

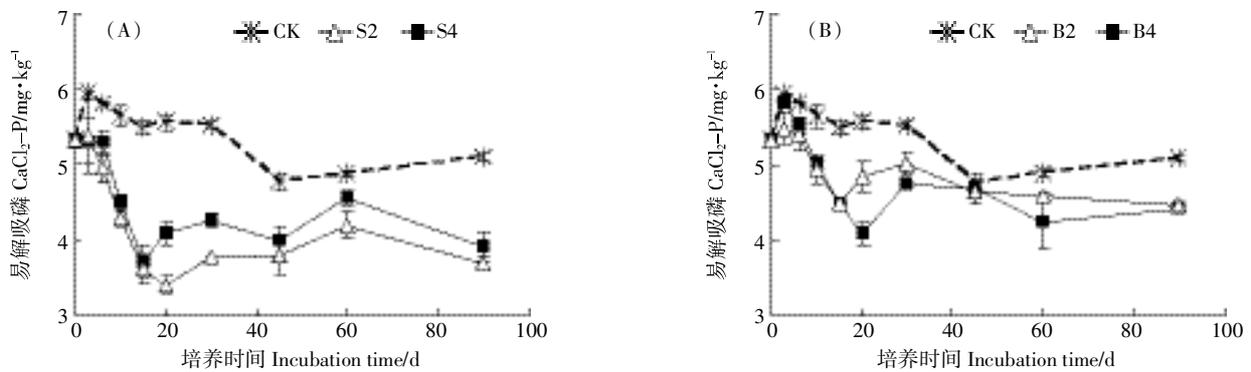


图3 设施土壤易解吸磷含量动态变化

Figure 3 Dynamics of CaCl<sub>2</sub>-P content in greenhouse soil

土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量在第 20 d 降至最低, 90 d 时 S2 和 S4 的稻草处理 CaCl<sub>2</sub>-P 含量显著低于 CK, S2 和 S4 较 CK 平均降低了 21.3% (见图 3A)。草炭处理的 CaCl<sub>2</sub>-P 含量变化趋势与稻草处理相似, 第 90 d 时, B2 和 B4 处理土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量较 CK 平均降低了 10.9% (图 3B)。不同的是, 在第 30~60 d 的培养期内, 稻草处理的 CaCl<sub>2</sub>-P 含量有回升趋势, 而草炭处理呈持续下降趋势。整个培养期间, 比较添加两种有机物料后同一时间点上的土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量, 稻草处理的土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量总体上比草炭处理的略低。比较同种有机物料不同添加量间的差异, 2 种有机物料添加量对土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量的影响不同, 稻草处理土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量的差异在 20 d 后则达显著性水平 ( $P < 0.05$ ), 其土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量总体上随有机物料用量的增加有所增加, 而草炭处理土壤 CaCl<sub>2</sub>-P 含量差异总体上不显著。

#### 2.4 对设施土壤磷组分的影响

表 1 为培养结束时各处理土壤磷组分占全磷的比例。设施土壤 (CK) 无机磷以 Ca-P 为主, 占全磷的

21.92%, 其次为 O-P, 占 9.46%, 而 Al-P 和 Fe-P 分别占 7.21% 和 5.41%。稻草和草炭均能降低土壤无机磷中的 Al-P、Fe-P 和 O-P, 而对 Ca-P 影响不显著。稻草对土壤 Fe-P 的影响最大, S2 和 S4 处理的 Fe-P 较 CK 分别降低了 7.93% 和 12.29%; 而草炭对土壤 O-P 的影响最大, B2 和 B4 处理土壤 O-P 较 CK 分别降低了 8.99% 和 11.70%。

设施土壤 (CK) 的有机磷以 MLOP 组分为主 (占全磷的 37.51%), 其次是 HROP (占全磷的 1.63%), 而 MROP 和 LOP 分别仅占全磷的 0.58% 和 0.29%。添加稻草和草炭后土壤 LOP 和 MROP 占全磷的比例均较 CK 有所提高, 不同之处在于 LOP 的增幅随添加量的增加而降低, 而 MROP 的增幅则随添加量的增加而增加。稻草和草炭均能降低土壤 MLOP 和 HROP 占全磷的比例, 但 MLOP 的降幅为稻草处理大于草炭处理 (S2 和 S4 处理 MLOP 占全磷的比例较 CK 分别降低了 23.16% 和 10.72%, B2 和 B4 处理 MLOP 占全磷的比例较 CK 分别降低了 4.67% 和 1.15%), 而 HROP 的降幅则是稻草处理小于草炭处理 (S2 和 S4 处理

HR0P 占全磷的比例较 CK 分别降低了 1.23% 和 29.4%, 而 B2 和 B4 处理 HR0P 占全磷的比例较 CK 分别降低了 52.14% 和 41.10%)。

### 2.5 土壤磷的相互关系分析

土壤 MBP、Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  与磷各组分间的相关性见表 2。除土壤 MBP 与无机磷中的 Ca-P 呈正相关(但不显著)外,MBP 与其他各无机磷组分呈负相关关系,且仅与 Fe-P 的相关系数达到显著水平( $P<0.05$ )。Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  与 4 种无机磷组分均呈正相关,Olsen-P 与 Fe-P 的关系达到极显著( $P<0.01$ )水平, $\text{CaCl}_2\text{-P}$  与 Al-P 和 Fe-P 的相关系数分别为 0.779 和 0.784,均达到显著水平( $P<0.05$ )。

MBP 与有机磷各组分的线性关系中,与 LOP 和 MROP 呈正相关,且与 MROP 的相关系数达到显著正相关( $P<0.05$ )。Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  与有机磷各组分的线性关系基本一致,即两者均与 LOP、MROP 呈负相关关系,而与 MLOP、HR0P 和有机磷总量呈正相关,但仅有  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  与 MLOP、有机磷总量的相关性达到显著性水平( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

土壤微生物是土壤有机质和养分循环转化的驱动者,对土壤养分的供应起重要作用。土壤 MBP 周转率快,可迅速参与循环而成为植物有效磷的重要来

源<sup>[11-12,14]</sup>。有研究显示,在土壤 Olsen-P 不足  $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的稻田土壤上,较高的土壤 MBP 有利于维持作物的磷素供应<sup>[12]</sup>。在高磷的设施土壤(全磷为  $2.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , Olsen-P 为  $55.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )中,添加稻草和草炭均能使土壤 MBP 含量大幅增加。这是因为添加有机物料后对土壤微生物存在激发效应:一方面土壤微生物因短期内得到充分的碳源物质而在快速生长繁殖,其间会吸收大量磷(主要是 Olsen-P)来构建其生命组分,并以 MBP 的形式固定在体内;另一方面外源性有机物的添加提高了土壤微生物或磷酸酶的活性,从而加速了微生物对有机物料中有机磷的分解和利用。稻草对土壤 MBP 形成的促进作用显著大于草炭,且稻草添加量为  $2\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理(S2)的 MBP 含量还略高于草炭  $4\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理(B4)的。原因可能在于由稻草和草炭输入到设施土壤中磷的总量与形态不同所致。稻草含磷量( $0.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )是草炭( $0.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的近 6 倍;而在磷的组成上,稻草中的磷几乎全为有机磷,而草炭是在有过多水分的缺氧条件下,死亡植物残体长期积累转化形成的较稳定的有机-无机复合体,其磷组分大部分为有机磷,也有部分的无机磷。有研究显示,土壤微生物可能优先利用有机物料释放的磷而形成 MBP<sup>[11,16]</sup>。

土壤磷素组成存在多种形态,且处于各种动态平衡中。土壤 Olsen-P 包括水溶态磷和交换态磷(主要

表 1 培养结束时设施土壤磷各组分占全磷的百分数(%)

Table 1 Percentages of various fractions to total phosphorus in greenhouse soil at the end of incubation

处理 Treatment	无机磷 Inorganic P					有机磷 Organic P				
	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Total P	LOP	MLOP	MROP	HR0P	Total P
CK	7.21±0.17c	5.41±0.04d	9.46±0.01d	21.92±0.28b	43.99±0.41c	0.29±0.01b	37.51±0.51d	0.58±0.12a	1.63±0.03d	40.01±0.66c
S2	5.87±0.12a	4.86±0.01b	8.82±0.04c	22.12±0.45b	41.66±0.61b	0.68±0.01e	28.82±0.18a	1.01±0.17b	1.61±0.09d	32.12±0.10a
S4	6.14±0.12b	4.63±0.09a	8.52±0.22b	21.75±0.58b	41.05±1.00b	0.34±0.01c	33.49±0.10b	2.05±0.03d	1.15±0.05c	37.03±0.06b
B2	6.37±0.15b	4.80±0.09b	8.24±0.02ab	19.85±0.67a	39.26±0.90a	0.53±0.01d	35.76±0.84c	1.46±0.31c	0.78±0.03a	38.52±0.87b
B4	5.72±0.07a	5.22±0.12c	7.99±0.17a	21.97±0.32b	40.90±0.68b	0.26±0.02a	37.18±0.01d	1.54±0.06c	0.96±0.05b	39.94±0.01c

注:同列不同字母表示差异显著  $P<0.05$ 。Note: Different letters within a column indicate statistical significance at  $P<0.05$  level.

表 2 设施土壤微生物生物量磷、有效磷及易解吸磷与各组分磷间的线性相关系数

Table 2 Correlation coefficients between microbial biomass P, Olsen-P,  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  and P fractions in greenhouse soil

	无机磷 Inorganic P					有机磷 Organic P				
	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Total P	LOP	MLOP	MROP	HR0P	Total P
MBP	-0.649	-0.757*	-0.382	0.267	-0.343	0.112	-0.555	0.788*	-0.126	-0.480
Olsen-P	0.180	0.954**	0.201	0.492	0.574	-0.398	0.504	-0.562	0.283	0.467
$\text{CaCl}_2\text{-P}$	0.779*	0.784*	0.367	0.171	0.440	-0.622	0.867*	-0.526	0.014	0.827*

注:(1)相关分析的样本数为 5,-表示负相关;(2)\* 表示显著相关( $P<0.05$ ),\*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ )。

Note: (1) Sample number in correlation analysis was 5, and - indicates negative linear correlation; (2) \* and \*\* indicate statistical significance at  $P<0.05$  and  $P<0.01$ , respectively.

是后者),它是土壤中植物最易利用的部分,其含量的高低能反映土壤磷素对植物的有效性,是磷素供应水平高低和指导施用磷肥的重要指标<sup>[11-13]</sup>。本研究中,稻草和草炭的添加均能降低高磷(全磷为  $2.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )设施土壤 Olsen-P 含量,但土壤 Olsen-P 含量仍可维持在  $29.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上,足以满足作物对磷的需求<sup>[2,8]</sup>。土壤 Olsen-P 含量的变化与微生物对土壤磷素的固定与释放有关,主要受外源有机物碳磷比(C/P)的影响。当有机物 C/P 大于 300,固持速率大于矿化速率,出现微生物对磷的净固持;当有机物料 C/P 低于 200,有机物分解释放的磷一般超过微生物的需求,从而表现为磷的净释放而使土壤有效磷提高<sup>[11-12]</sup>。在高风化低磷(全磷为  $0.530 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )水田土壤中,稻草对 Olsen-P 的影响很小,就是由于添加稻草 C/P 高(高达 128)所致<sup>[11]</sup>。本研究中稻草和草炭的 C/P 分别为 656 和 3813,其值均远高于 300,其添加会引起土壤微生物对有效磷的净固持而使土壤 Olsen-P 含量显著下降。本研究中稻草处理土壤 Olsen-P 的含量均低于草炭处理,可能是由于稻草的成分以纤维素、半纤维素和木质素为主,微生物在 90 d 内对稻草难以矿化分解利用,而草炭含有大量的氨基酸和腐植酸等有机酸<sup>[4]</sup>,可直接活化土壤中的固定态磷,短期内可能更容易被土壤微生物利用,故添加草炭可减小土壤有效磷含量的降低幅度。

$\text{CaCl}_2\text{-P}$  几乎全部是水溶态磷,它能表征土壤固相磷向液相释放的难易程度,作为土壤磷素流失的重要指标<sup>[7-9,17,20]</sup>。 $\text{CaCl}_2\text{-P}$  是土壤磷酸盐沉淀与溶解、吸附与解吸、矿化与固定等反应平衡的结果,其大小与土壤粘粒含量、有机质、交换性钙镁、活性铁铝及土壤磷吸附饱和度等土壤性质有关<sup>[9,20]</sup>。添加稻草和草炭均降低了设施土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的含量,且稻草的这种降低作用更为显著。这说明对富磷设施土壤而言,施用有机物料可减少土壤磷流失风险,在控制高磷设施土壤磷流失的应用实践中,稻草和草炭的添加可为行之有效的措施,且稻草的控制效果比草炭的要好。有机物料降低土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量的原因可能在于施用有机物料降低了土壤水溶性磷的比例<sup>[20-21]</sup>。草炭与稻草的总有机碳含量虽相近,但其有机碳的具体组成差别甚大,草炭本身富含的有机酸提高了土壤磷的水溶性,在 90 d 的培养期内不利于降低土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 。有研究表明,土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  与其交换性钙镁呈显著负相关<sup>[20]</sup>,而草炭的钙镁离子丰富<sup>[4]</sup>,可能是草炭添加降低设施土壤  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  含量的幅度比稻草低的另一原因。

比较土壤 MBP、Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$  的变化规律来看,在设施土壤磷素高积累(全磷为  $2.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )条件下,土壤 MBP 的含量明显高于 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$ ,且稻草和草炭均可增加设施土壤 MBP,降低 Olsen-P 和  $\text{CaCl}_2\text{-P}$ ,表明土壤有效磷供应充足状况下(如 Olsen-P 达到  $55.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时),稻草和草炭可通过促进土壤微生物固定有效磷来减少磷素的流失,并可能通过微生物生物量磷的快速周转来维持作物的磷素供应。

通过 Chang-Jackson 法<sup>[18]</sup>和 Bowman-Cole 法<sup>[19]</sup>测得的土壤无机磷和有机磷之和占全磷的比例为 73.78%~84.00%,此范围与对石灰性土壤的研究结果<sup>[22]</sup>较为一致,这是由于这两种方法在土壤磷素分级过程中有不能被提取的超高稳性磷<sup>[19]</sup>。向设施土壤添加有机物料后,这 2 种分级方法测得的各处理土壤无机磷与有机磷之和占全磷的比例降低,原因可能在于有机物料可使设施土壤中超高稳性磷含量增加。土壤中 Al-P 和 Fe-P 是有效磷的重要潜在供给源,而土壤 O-P 和大部分的 Ca-P 为植物难利用的磷<sup>[12,22-23]</sup>。添加稻草和草炭均能降低设施土壤无机磷中的 Al-P、Fe-P 和 O-P,增加 LOP 和 MROP 的比例,而降低有机磷中 MLOP 和 HROP 的比例,说明在高有机质高磷的设施土壤中,有机物料可能促进土壤 Al-P、Fe-P 和 O-P 等无机磷向有机态的 LOP 和 MROP 转化。这一点与低磷的稻田土壤<sup>[11-12]</sup>明显不同。添加有机物料能增加土壤 LOP 的比例,减少 MLOP 比例,但随其用量的增加,LOP 比例反而降低,而 MLOP 比例则增加。这可能与研究中设置的有机物料添加水平( $2 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $4 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ )或土壤磷偏高有关,其原因值得进一步细化研究证实。

土壤 MBP 与 Fe-P 和 MROP 分别呈显著的正相关和负相关,由此推断设施土壤 Fe-P 和 MROP 是影响微生物对磷素转化的重要途径,其中 Fe-P 可能抑制 MBP 的形成,MROP 则对 MBP 具有促进作用。有人研究稻田土壤 MBP 与各形态磷的相关性<sup>[11]</sup>与本研究的结果并不一致,原因可能是设施土壤和稻田土壤在磷素组成等理化性质上差异太大。Olsen-P 与 Fe-P 呈极显著正相关,而与其他无机磷形态关系并不显著,说明设施土壤中的有效磷可能主要来源于无机磷中的 Fe-P 部分,这也印证了 Fe-P 是土壤有效磷的重要潜在源的说法<sup>[12,23]</sup>。 $\text{CaCl}_2\text{-P}$  与无机态的 Al-P 和 Fe-P、有机态 MLOP 及有机磷总量均呈显著正相关,说明从磷素形态转化的角度来控制设施土壤磷素流

失,促使 Al-P、Fe-P 和有机磷(尤其是 MLOP)向其他形态转化可能是最直接的途径。总之,Fe-P 可能是影响设施土壤 MBP、Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 含量最重要的磷素形态。

#### 4 结论

(1)稻草和草炭两种有机物料均使土壤 MBP 含量增加而促进土壤磷素的周转,使土壤 Olsen-P 含量降低但维持在作物需求水平上,且能降低 CaCl<sub>2</sub>-P 含量以控制磷素的流失,说明添加稻草和草炭有利于设施土壤磷素的管理,且稻草的效果总体上比草炭好。

(2)设施土壤磷素形态的变化受有机物料种类及其用量的影响。就各形态磷素占全磷的比例来看,稻草和草炭均能降低设施土壤无机磷中 Al-P、Fe-P 和 O-P,增加有机磷中 LOP 和 MROP,而降低 MLOP 和 HROP,说明在高磷的设施土壤中,有机物料可能促进土壤 Al-P、Fe-P 和 O-P 等无机磷向有机态的 LOP 和 MROP 转化。

(3)从设施土壤磷素各组分与土壤 MBP、Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 的相关性分析来看,Fe-P 和 MROP 是影响土壤 MBP 含量变化的重要形态,Fe-P 对 Olsen-P 影响最大,而 Fe-P、Al-P 和 MLOP 均是影响 CaCl<sub>2</sub>-P 含量变化的重要形态,表明 Fe-P 是综合影响设施土壤 MBP、Olsen-P 和 CaCl<sub>2</sub>-P 含量变化的重要形态。

#### 参考文献:

[1] 张乃明,常晓冰,秦太峰. 设施农业土壤特性与改良[M]. 北京:化学工业出版社,2008:6-204.  
ZHANG Nai-ming, CHANG Xiao-bing, QIN Tai-feng. Characteristics and improvement of greenhouse soils[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 6-20.

[2] 余海英,李廷轩,张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学,2010,43(3):514-522.  
YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 514-522.

[3] 苏衍涛,王凯荣,刘迎新,等. 稻草覆盖对红壤旱地土壤湿度和水分的调控效应[J]. 农业环境科学学报,2008,27(2):670-676.  
SU Yan-tao, WANG Kai-rong, LIU Ying-xin, et al. Effect of rice straw mulching on soil temperature and moisture regulation in an upland red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 670-676.

[4] 王忠强,刘婷婷,王升忠,等. 泥炭在环境修复中的应用研究概况和展望[J]. 科技通报,2007,23(2):277-281.  
WANG Zhong-qiang, LIU Ting-ting, WANG Sheng-zhong, et al. Review and prospect applied of peat in environmental remediation[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2007, 23(2): 277-281.

[5] 位蓓蕾,胡振琪,张建勇,等. 紫花苜蓿对草炭改良露天矿表土替代材料的响应[J]. 农业环境科学学报,2013,32(10):2020-2026.  
WEI Bei-lei, HU Zhen-qi, ZHANG Jian-yong, et al. The response of the peat improved open pit mine topsoil alternative materials for *Medicago sativa*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10): 2020-2026.

[6] Xu G, Shao H B, Sun J N, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 30(10):1946-1952.

[7] Hooda P S, Truesdale V W, Edwards A C, et al. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implication[J]. *Advances in Environmental Research*, 2001, 5(1):13-21.

[8] 张瑞龙,吕家珑,刁展. 秦岭北麓两种土地利用下土壤磷素淋溶风险预测[J]. 农业环境科学学报,2014,33(1):121-127.  
ZHANG Rui-long, LÜ Jia-long, DIAO Zhan. Prediction of soil phosphorus leaching risk under two types of land use in Northern area of Qinling Mountains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1): 121-127.

[9] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):105-110.

[10] 黄景,顾明华,徐世宏,等. 稻草还田免耕抛秧对土壤剖面氮、磷、钾含量的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(13):2648-2657.  
HUANG Jing, GU Ming-hua, XU Shi-hong, et al. Effects of no-tillage and rice-seedling casting with rice straw returning on content of nitrogen, phosphorus and potassium of soil profiles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(13): 2648-2657.

[11] Wu J S, Huang M, Xiao H A, et al. Dynamics in microbial immobilization and transformations of phosphorus in highly weathered subtropical soil following organic amendments[J]. *Plant and Soil*, 2007, 290(1-2):333-342.

[12] 黄敏,肖和艾,童成立,等. 稻田土壤微生物磷变化对土壤有机碳和磷素的响应[J]. 中国农业科学,2004,37(9):1400-1406.  
HUANG Min, XIAO He-ai, TONG Cheng-li, et al. Responses of the microbial biomass P to the changes of organic C and P in paddy soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(9): 1400-1406.

[13] Kpombekou A K, Tabatabai M A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 100:275-284.

[14] 乔洁,任秀艳. 草炭对设施土壤有机碳、氮及土壤微生物生物量的影响[J]. 西北农业学报,2012,25(5):1777-1781.  
QIAO Jie, REN Xiu-yan. Effects of peat on organic carbon, total nitrogen and soil microbial biomass in greenhouse soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(5): 1777-1781.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社,2000:70-71.  
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis(Third edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 70-71.

[16] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial

- biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14:319-329.
- [17] Houba E L. Applicability of the 0.01 M CaCl<sub>2</sub> as a single extraction solution for the assessment of the nutrient status of soils and other diagnostic purposes[J]. *Communications Soil Science Plant Annual*, 1990, 21(19/20):2281-2287.
- [18] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus in soils[J]. *Soil Science*, 1957, 84:133-144.
- [19] Bowman R A, C V Cole. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soil [J]. *Soil Science*, 1978, 125:95-101.
- [20] 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评 II 淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系[J]. *生态学报*, 2006, 26(9):3011-3017.  
ZHAO Xiao-rong, ZHONG Xiao-ying, LI Gui-tong, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils: II. The relationships between soil properties, P adsorption characteristics and the leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9):3011-3017.
- [21] Blake L, Hesketh N, Fortune S, et al. Assessing phosphorus 'change-points' and leaching potential by isotopic exchange and sequential fractionation[J]. *Soil Use and Management*, 2002, 18:199-207.
- [22] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II. 无机磷和有机磷[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5):790-794.  
XIE Lin-hua, LÜ Jia-long, ZHANG Yi-ping, et al. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil: II. Inorganic and organic phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5):790-794.
- [23] 徐秋桐, 邱志腾, 章明奎, 等. 生物质炭对不同 pH 土壤中碳氮磷的转化与形态的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2014, 40(3):303-313.  
XU Qiu-tong, QIU Zhi-teng, ZHANG Ming-kui, et al. Effects of biochar application on transformation and chemical forms of C, N and P in soils with different pH[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2014, 40(3):303-313.