张 峰,王荣萍,梁嘉伟,等.蚯蚓粪肥对水稻土磷形态及微生物活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2774-2784. ZHANG Feng, WANG Rong-ping, LIANG Jia-wei, et al. Impacts of vermicompost application on phosphorus species and microbial activity in paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2774-2784.

蚯蚓粪肥对水稻土磷形态及微生物活性的影响

张峰1,2,王荣萍1*,梁嘉伟1,廖新荣1,黎森1,石永锋1,吴永贵2*

(1.广东省生态环境技术研究所,广东省农业环境综合治理重点实验室,广州 510650;2.贵州大学资源与环境工程学院,贵阳 550025)

摘 要:采用盆栽试验方法,以小白菜为试验作物,研究蚯蚓粪肥对水稻土磷形态以及微生物活性的影响。结果表明:蚯蚓粪肥 对土壤pH、Eh、水溶态Fe(II)、盐酸提取态Fe(II)、微生物生物量碳、微生物生物量磷、微生物生物量碳磷比以及酸性磷酸酶活性 均有显著影响(P<0.05);蚯蚓粪肥对于除稳定性磷C.HCl-P;外的土壤各形态磷含量均有明显提高,其中对活性磷(Resin-P、 NaHCO₃-P;和NaHCO₃-P。)和中稳定性磷(NaOH-P;和NaOH-P。)具有极显著性影响(P<0.01)。相关性分析结果表明:在蚯蚓粪肥 添加的土壤中,酸性磷酸酶活性与微生物生物量碳之间存在极显著正相关关系,与NaHCO₃-P。存在显著负相关关系,与Resin-P、 NaOH-P。均达到极显著负相关水平;微生物生物量碳之间存在极显著正相关关系,与NaHCO₃-P。存在显著负相关关系,与Resin-P、 NaOH-P。均达到极显著负相关水平;微生物生物量碳与Resin-P、NaHCO₃-P。之间均存在极显著负相关关系,与盐酸提取态Fe(II) 之间存在极显著正相关关系;盐酸提取态Fe(II)与NaHCO₃-P。、NaOH-P;之间均为显著负相关;NaHCO₃-P,与NaOH-P;之间存在极 显著正相关关系,Resin-P与NaHCO₃-P。、NaOH-P。均存在极显著正相关关系。研究表明:蚯蚓粪肥能够有效促进土壤铁溶解和还 原,进而促进NaOH-P,释放;蚯蚓粪肥添加有效改善土壤微生物环境,促进微生物对磷的活化和固持,同时增强了土壤酸性磷酸酶 活性,其对NaOH-P。活化具有显著影响;蚯蚓粪肥添加的土壤中Resin-P主要来自NaHCO₃-P。、NaOH-P。的分解,而NaOH-P;是 NaHCO₃-P;的主要来源。

关键词:水稻土;磷形态;转化;蚯蚓粪肥

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)12-2774-11 doi:10.11654/jaes.2018-0936

Impacts of vermicompost application on phosphorus species and microbial activity in paddy soils

ZHANG Feng^{1,2}, WANG Rong-ping^{1*}, LIANG Jia-wei¹, LIAO Xin-rong¹, LI Sen¹, SHI Yong-feng¹, WU Yong-gui^{2*}

(1.Guangdong Institute of Eco-Environmental Science & Technology, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangzhou 510650, China; 2.Resource and Environmental Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In this study, a pot experiment was conducted to investigate the effects of vermicompost application on phosphorus (P) transformation and microbial activity in a paddy soil cropped with pakchoi. The results showed that: (1) vermicompost application significantly affected the pH, Eh, water soluble Fe(II), hydrochloric acid extractable Fe(II), microbial biomass carbon(C), microbial biomass P, microbial biomass C/P ratio, and acid phosphatase activity of paddy soils (P < 0.05) and (2) with the exception of C.HCl-P_i, vermicompost application greatly increased the contents of various P species in soil; specifically, labile P (including Resin-P, NaHCO₃-P_i and NaHCO₃-P_o)

收稿日期:2018-07-20 录用日期:2018-09-17

作者简介:张 峰(1991—),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为土壤与植物营养。E-mail:1547761096@qq.com

^{*}通信作者:王荣萍 E-mail:rpwang@soil.gd.cn;吴永贵 E-mail:ygwu72@126.com

基金项目:院属骨干科研机构创新能力建设专项(2017GDASCX-0106);广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2018GDASCX-0106);广 东省科技计划项目(2017LM2149);广州市科技计划项目(201607010082);国家科技支撑项目(2014BAD14B05)

Project supported: The Innovation-driven Development Capability Construction Program of GDAS (2017GDASCX-0106); GDAS' Project of Science and Technology Development(2018GDASCX-0106); Science and Technology Program of Guangdong Province(2017LM2149); Science and Technology Program of Guangzhou (201607010082); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2014BAD14B05)

and moderately stable P(including NaOH-P_i and NaOH-P_o) were significantly increased (P < 0.01). Correlation analyses indicated the following: acid phosphatase activity had a significant positive correlation with microbial biomass C, but a significant negative correlation with NaHCO₃-P_o (P < 0.05), Resin-P (P < 0.01), and NaOH-P_o (P < 0.01); microbial biomass C had a significant negative correlation with both Resin-P and NaHCO₃-P_o (P < 0.01), but a significant positive correlation with hydrochloric acid extractable Fe (II) (P < 0.01); hydrochloric acid extractable Fe (II) had a significant negative correlation with both NaHCO₃-P_o and NaOH-P_i (P < 0.05); NaHCO₃-P_i had a significant positive correlation with NaOH-P_i (P < 0.01); and Resin-P had a significant positive correlation with both NaHCO₃-P_o and NaOH-P_i (P < 0.05); NaHCO₃-P_o and NaOH-P_o (P < 0.01). These results indicated that earthworm cast application could effectively promote the dissolution and reduction of Fe (III) and the consequent release of NaOH-P_i. In addition, earthworm cast application could effectively improve soil quality, promote P activation and fixation by soil microorganisms, and enhance acid phosphatase activity, which has a significant impact on NaOH-P_o. The Resin-P increase was mainly due to the decomposition of NaHCO₃-P_o and NaOH-P_o, and NaOH-P_i was the main source of NaHCO₃-P_i. These results are expected to provide a scientific basis for improving the utilization rate of P fertilizers and promote the better use of vermicompost. **Keywords**: paddy soils; phosphorus species; transformation; vermicompost

磷是植物生长必不可少的营养元素,直接或间 接参与植物体内许多代谢过程,在很大程度上影响 着植物的生长发育,因此它的供给量严重制约全球 农业的生产力水平^[1-2]。地壳平均含磷约1200 mg· kg⁻¹,总量位列地壳元素第11位,但全球陆地土壤却 广泛缺磷^[3]。施肥能够解决耕地土壤缺磷问题,但是 施入土壤中的活性磷扩散速度慢,移动性差,绝大部 分活性磷很快被土壤中的矿物质和有机质吸附或者 固定而不能被植物所利用^[4-5],有研究显示,磷肥的 当季利用率仅为7%~20%^[6]。磷肥的低利用率导致 全球每年磷肥施用量持续增加,而磷肥的过度使用, 不仅造成了大量的经济损失和资源的浪费,同时造 成土壤板结和酸碱化等问题,进而对生态环境安全 产生了严重威胁^[7]。

土壤中磷素对植物的有效性取决于其赋存形态, 而自然条件下的土壤中能被植物吸收利用的活性磷 含量极少,大部分以稳定态和中稳定态形式存在^[8]。 由于气候、土壤母质、成土过程以及耕作方式等不同, 土壤磷库的组成往往存在很大差异。但在一定条件 下不同赋存形态的磷素之间可以相互转化,Mendes 等^[9]发现施加生物炭能够增加土壤溶磷菌有机酸分 泌,从而提高溶磷菌溶解固定态磷为有效态磷的速 率;梁国庆等^[10]研究发现长期对石灰性潮土单施化 肥,施入土壤的有效磷大部分转化为Ca₁₀-P和O-P; 杨佳佳等^[11]研究表明温度和水分及其交互作用对黑 土磷形态转化和有效性具有显著影响。

蚯蚓粪肥作为一种由有机废弃物发酵和蚯蚓消 化系统酶作用生产的绿色生态有机肥和土壤改良剂, 其在物理、化学和生物性质上明显区别于普通堆肥产 物,具有优良的营养状态、良好的微生物调节系统以 及较强的排水持水能力等诸多特点^[12-13],能够将土壤 中的有机物、微生物以及其他影响因子有效结合起来 达到改善土壤环境,实现培肥育土,提高农业产量的 目的¹⁴¹。同时相比化肥而言蚯蚓粪肥价格低廉,可通 过回收利用农业和生活有机垃圾进行批量生产,实现 了废弃物资源化和对环境的保护¹¹⁵⁻¹⁶¹。目前关于蚯 蚓粪肥在环境保护、土壤改良以及农业生产上已有大 量研究¹¹⁷⁻¹⁸¹,而蚯蚓粪肥在土壤环境调理,土壤营养 元素各形态之间的转化以及作用机制等方面研究甚 少。本试验以广东省代表性蔬菜小白菜为试验作物, 采用盆栽试验模拟研究水稻土在施入蚯蚓粪肥条件 下,作物生物量、土壤中微生物以及磷素形态等各相 关指标的变化,探讨分析在作物生长周期内,蚯蚓粪 肥处理的土壤中微生物活性变化与铁还原过程对磷 活化的协同耦合作用机制,为提高耕地土壤磷肥利用 率以及更好地开发利用蚯蚓粪提供科学理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试土壤为水稻土,河流冲击物母质发育,质地 为壤质黏土,采自广州市南沙农业科学研究院多年耕 作的试验田。土壤样品经室内自然风干,剔除植物残 根、石块和昆虫残体等,并将土块碾碎,过筛,使土壤 粒径小于3mm,备用于盆栽试验,另取部分土样用于 测定土壤理化性质,该土壤基本理化性质见表1。

供试无机肥为尿素(N 46.1%)、磷酸二氢钾(P₂O₅ 45.9%,K₂O 20.4%)和氯化钾(K₂O 60.4%),供试蚯蚓 粪肥由广东省清远市佛冈沃土农业科技有限公司提 供(原料为养殖场禽畜粪便和农业废弃生物质)。为 保证蚯蚓粪肥理化性质均衡,使用前自然风干,去除 小石块,磨碎过2 mm筛,其基本理化性质为pH 7.05、 有机质 272.679 g·kg⁻¹、DOC(MV<3500 Da)156.72

农业环境科学学报 第37卷第12期

Table 1 Thysical and chemical characteristics of the experimental soft										
供试土壤		有机质	全氮	全磷Total	全钾	碱解氮	有效磷(Olsen-P)	速效钾		
类型	pН	Organic matter/	Total nitrogen/	phosphorus/	Total potassium	Alkali-hydrolyzable	Available phosphorus/	Available		
Test soil type		$g \cdot kg^{-1}$	$g \cdot kg^{-1}$	g•kg ⁻¹	$/g \cdot kg^{-1}$	nitrogen/mg•kg ⁻¹	mg∙kg ⁻¹	potassium/mg \cdot kg ⁻¹		
壤质黏土 Loamy clay	7.50	22.30	0.97	1.20	3.92	71.60	36.60	139.26		

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the experimental soil

mg·kg⁻¹、全氮 1.861 g·kg⁻¹、全磷 3.39 g·kg⁻¹、全钾 10.05 g·kg⁻¹、碱解氮 435.52 mg·kg⁻¹、速效磷 460.97 mg·kg⁻¹、速效钾 300.02 mg·kg⁻¹。

小白菜种子由江西省丰城市航城种业有限公司 提供,品种为优选上海青,采用128孔穴育苗盘育苗, 育苗至第三片真叶长出立即移栽开始盆栽试验。

1.2 试验设计

本次试验采用随机区组设计,试验用小塑料盆 (直径13 cm,高11 cm)每盆装土1 kg,为保证小白菜 生长周期内充足的氮磷钾养分,各组每千克土按施 肥量 N: P₂O₅: K₂O=1.5: 1.0: 1.5 施入化肥,即施尿素 332 mg·kg⁻¹土、磷酸二氢钾 192 mg·kg⁻¹土、氯化钾 182 mg·kg⁻¹土。处理组每盆施加蚯蚓粪肥 80 g,另设 对照组即不施加蚯蚓粪肥。移栽前化肥和蚯蚓粪肥 统一做基肥一次性施加,并与土混合均匀,调节各处 理组含水量为田间最大持水量的60%,每盆种植3株 小白菜,处理组和对照组分别设置4个重复。培养期 间称质量定量定时补水。在白菜培养的第0、7、14、 21、35 d破坏性采集土壤样品,第14、21、35 d采集植 株,测定各项指标。

1.3 主要指标及测定方法

土壤磷形态分级采用Tiessen等^[19]对Hedley磷素 分级改进后的方法;微生物生物量C、微生物生物量P 均采用氯仿熏蒸提取法测定^[20];土壤盐酸提取态 Fe(II)和水溶态Fe(II)分别采用0.5 mol·L⁻¹HCl和 超纯水提取,邻菲罗啉比色法测定^[21];酸性磷酸酶活 性采用磷酸苯二钠-4-氨基安替比林比色法测定^[22]。 土壤和蚯蚓粪肥Eh、pH、有机质、DOC、全氮、全磷、全 钾、有效磷(Olsen-P)、碱解氮、速效钾以及小白菜生 物量测定均参照鲁如坤的方法测定^[23]。

1.4 数据分析

本次试验数据统计采用 Microsoft Office Excel 2010,数据分析采用 IBM SPSS statistics 20,作图采用 Oringin8.5.1,各因素之间的相关性采用 Pearson 相关 性分析,不同处理的试验各组间的显著性差异采用独 立样本 t 检验。

2 结果与分析

2.1 培养期间小白菜生物量变化

小白菜地上部和地下部生物量随培养时间变化 如图1所示,随着培养时间增长小白菜各部分生物量 均有明显增加,14~21 d增加最为显著。从整体上看, 处理组和对照组小白菜在培养期间各部分长势均较 为接近,差异不显著。

2.2 蚯蚓粪肥对水稻土 pH、Eh、亚铁的调节

土壤 pH 值变化情况如图 2A 所示, 对照组在第 0~21 d呈明显下降趋势, 与处理组之间差异显著, 21



同一时间不同小写字母表示两组处理差异显著(P<0.05)。下同 The different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same time. The same below

图1 培养期间小白菜生物量变化情况

Figure 1 The changes of pakchoi biomass during the cultivation period

d之后趋势渐于平缓,与处理组之间并无显著性差 异,处理组土壤pH则在培养期间内保持相对稳定且 始终低于对照组,总体上两组之间差异显著(F= 5.466,P<0.05)。土壤Eh如图2B所示,0~21 d两组土 壤Eh值均呈明显上升趋势且相互之间差异显著,21 d之后两组Eh值趋于稳定,相互之间并无显著性差 异,在整个培养期间蚯蚓粪处理组Eh比对照组高1~ 13 mV,总体上两组呈显著性差异(F=1.596,P>0.05)。

此次试验根据土壤铁还原过程测定了两种提取态亚铁含量,从图2C可以看到,处理组土壤水溶态Fe(Ⅱ)浓度在0~14d呈快速下降趋势,而对照组下降趋势相对平缓,14d后两组水溶态Fe(Ⅱ)浓度均趋于稳定。在整个培养期间,对照组水溶态Fe(Ⅱ)浓度始终高于处理组4.76~8.92 mg·kg⁻¹,两组之间存在显著性差异(F=16.628,P<0.01)。盐酸提取态Fe(Ⅱ)浓度变化情况如图2D所示,0~7d其含量在两组中均较为稳定,7~21d处理组呈快速升高趋势,21d后趋于平稳,而对照组盐酸提取态Fe(Ⅱ)含量在培养期间虽有上升,但不显著。整体上看,处理组盐酸提取态Fe(Ⅱ)浓度在整个培养期间始终高于对照组10.8~

11.1 mg·kg⁻¹,两组之间差异显著(F=7.832, P<0.05)。
2.3 蚯蚓粪肥对水稻土微生物生物量碳、微生物生物
量磷以及酸性磷酸酶活性的影响

从图3A和图3B可以看出,两组土壤微生物生物 量碳和微生物生物量磷浓度在0~14d均呈快速上升 趋势,至14d后趋于稳定,且在整个培养期间处理组 始终远高于对照组。其中处理组微生物生物量磷浓 度则在整个培养过程增加21.09 mg·kg⁻¹,显著高于对 照组增加量。在整个培养期间,土壤微生物生物量碳 和微生物生物量磷在两组之间均存在极显著性差异 (P<0.01)。微生物生物量碳磷比如图 3C,在 0~14 d 处理组远高于对照组,两组之间存在极显著性差异, 而随着培养时间增长,差距逐渐缩小,至14d后两组 碳磷比处于稳定状态并有互相持平趋势,并无显著性 差异。从整个培养过程来看,两组总体间差异显著 (F=8.157, P<0.05)。土壤酸性磷酸酶活性变化情况 如图 3D. 培养试验初始 7 d 内两组土壤酸性磷酸酶活 性均急速升高,且蚯蚓粪肥处理组提升速率高于对照 组,7d后两组酶活性均呈平缓上升趋势。整个培养 期间处理组酸性磷酸酶活性均明显高于对照组且两



Figure 2 Effects of vermicompost application on paddy soils pH, Eh and Fe(II) content



图 3 土壤微生物生物量碳、微生物生物量磷、微生物生物量碳磷比和酸性磷酸酶活性变化趋势 Figure 3 Trend of soil microbial biomass C, microbial biomass P, microbial biomass C/P and acid phosphatase activity change

组之间存在极显著性差异(F=7.750, P<0.01)。

2.4 蚯蚓粪肥对水稻土活性磷形态的影响

在本次试验的磷形态分级中,Resin-P、NaHCO₃-P_i和 NaHCO₃-P_o是活性磷,其中 Resin-P为土壤中有效性最高的磷形态,同时也是土壤活性磷最主要的组成部分,NaHCO₃-P_i和 NaHCO₃-P_o则分别为吸附在土壤表面的无机磷和有机磷。从图4可以看出,蚯蚓粪添加极大提高了土壤各活性磷含量,其中 Resin-P浓度提升最大,其在整个试验期内平均浓度高于对照组319.88 mg·kg⁻¹。从整个培养期间的磷浓度变化趋势来看,0~21 d处理组土壤各活性磷浓度均呈明显下降趋势,21 d后随培养时间增长浓度降低缓慢,趋于稳定。而对照组土壤在整个培养期间各活性磷浓度虽均有所缓慢降低,但变化不明显。在整个培养期内,处理组土壤中三种形态活性磷含量均明显高于对照组,且三种形态活性磷浓度在处理组和对照组之间均存在极显著性差异(*P*<0.01)。

2.5 蚯蚓粪肥对水稻土中稳定性磷形态的影响

NaOH-Pi和NaOH-P。分别为中稳定性无机磷和 有机磷,主要指通过化学吸附而紧密结合于土壤铁铝 氧化物表面的磷,是植物的缓释磷源。由图5可看 出,中稳定性磷在土壤中主要以无机态NaOH-Pi形式 存在,有机态NaOH-P。只占极小部分。在整个培养期 间处理组土壤NaOH-Pi和NaOH-P。浓度均呈明显下 降趋势,其中NaOH-Pi浓度至培养末期下降19%, NaOH-P。下降44%,而对照组土壤两种形态磷浓度至 培养末期均为微下降,且始终保持远低于处理组水 平,在培养期间内NaOH-Pi和NaOH-P。浓度在两组之 间均存在极显著性差异(P<0.01)。

2.6 蚯蚓粪肥对水稻土稳定性磷形态的影响

D.HCl-P_i、C.HCl-P_i和 Residual-P 是稳 定性磷,其中 D.HCl-P_i主要为磷灰石型磷,C.HCl-P_i 和 C.HCl-P_o分别为浓盐酸提取的无机磷和有机磷,也 可归为残渣态磷 Residual-P,C.HCl-P_i、C.HCl-P_o和 Residual-P在土壤中极难被植物所利用。从图 6 可以 看出,D.HCl-P_i和 C.HCl-P_i在土壤稳定性磷中占主要 部分,且两者含量均较为稳定,其中对照组和处理组 土壤 D.HCl-P_i浓度在整个培养期间分别为 338.26 mg·kg⁻¹和 424.87 mg·kg⁻¹左右,整体上两组浓度差异 极显著(F=63.196,P<0.01)。C.HCl-P_i浓度在处理组 和对照组之间并无显著性差异(F=0.02, P>0.05)。 C.HCl-P_o浓度在处理组和对照组中随时间增长变化



-□- 对照CK -▼ 处理Treatment



Figure 5 Effects of vermicompost application on moderately stable phosphorus forms in paddy soils

趋势一致,0~7 d含量均较为稳定,7~21 d呈快速升高 趋势,21 d后趋于稳定。总体上看,蚯蚓粪添加极大 提高了土壤C.HCl-P。浓度,且两组之间存在显著性差 异(F=5.424, P<0.05)。从Residual-P变化情况看,蚯 蚓粪肥在极大程度上提高了其在土壤中的浓度,但在 处理组和对照组中Residual-P浓度随时间增长并无明 显变化,在整个培养过程中两组之间存在极显著性差 异(F=58.860,P<0.01)。

2.7 酸性磷酸酶活性、微生物生物量碳、二价铁和各 磷形态的相关性分析

对蚯蚓粪肥处理组和对照组土壤的酸性磷酸酶 活性、微生物生物量碳、盐酸提取态Fe(Ⅱ)、水溶态 Fe(Ⅱ)和各磷形态含量进行相关性分析,结果如表2 所示。处理组和对照组土壤酸性磷酸酶活性与微生 物生物量碳之间均呈极显著正相关关系(相关系数分 别为0.738和0.697)。除此之外,处理组酸性磷酸酶



Figure 6 Effects of vermicompost application on stable phosphorus forms in paddy soils

活性与Resin-P、NaHCO₃-P。、NaOH-P。均呈显著负相 关关系,其中与Resin-P、NaOH-P。相关关系均达极显 著(相关系数分别为-0.705和-0.843),而对照组酸性 磷酸酶活性与Resin-P、NaHCO3-P。之间相关性显著 但相关系数均小于处理组,且与NaOH-P。不显著相 关;土壤微生物生物量碳在两组中均与盐酸提取态 Fe(Ⅱ)存在显著正相关关系,其中在处理组中达极 显著(相关系数为0.711)。与各磷形态的相关性分析 结果显示处理组土壤微生物生物量碳与 Resin-P、 NaHCO₃-P。均呈极显著负相关(相关系数分别为 -0.876和-0.777),与NaOH-P。呈显著负相关,而对照 组微生物生物量碳与Resin-P、NaHCO3-Pi均呈极显 著负相关关系(相关系数分别为-0.875和-0.786);盐 酸提取态 Fe(Ⅱ)在处理组中与 NaHCO₃-P_i呈显著负 相关关系,与NaOH-P;呈极显著负相关关系(相关 系数为-0.798),而在对照组中盐酸提取态Fe(Ⅱ)与 NaHCO₃-P_i、NaOH-P_i均呈显著负相关关系;各磷形态 之间相关性分析中,处理组中Resin-P与NaHCO3-P。、 NaOH-P。均存在极显著正相关关系(相关系数分别为 0.681和0.725), NaHCO3-Pi与NaOH-Pi呈极显著正相 关关系(相关系数为0.899),而在对照组中Resin-P与 NaHCO₃-P_i相关性极显著(相关系数为0.796)。

讨论 3

土壤酸碱度大小能够直接影响营养元素的形态 和生物有效性,以及微生物的数量、组成和活性[24]。 在本试验中,0~21 d对照组 pH呈下降趋势,根据小白 菜在培养期间生物量的变化推测部分原因可能为小 白菜处于快速生长期而需要大量的营养物质,从而根 系质子和有机酸分泌有所增加。与一般禽畜粪肥施 入土壤易导致pH值快速升高不同,本次试验处理组 土壤pH相比对照组有所降低,并在培养期间保持土 壤酸碱度相对稳定,主要原因可能为风干蚯蚓粪肥施 入土壤后,蚯蚓粪肥本身含有的大量小分子有机酸以 及经复杂化学过程形成的部分腐植酸等酸性物质不 断溶解^[25],使得其质子产生量大于土壤硝酸盐还原、 有机质分解以及铁还原等过程对质子的消耗量。土 壤Eh是反应土壤氧化还原强度的指标,其高低受氧 体系支配,对土壤物质转化和养分有效性有很大影 响。有机肥一次性大量输入土壤通常会因嫌气分解 有机质而导致Eh下降,而蚯蚓粪肥颗粒的较大孔隙 率能改良土壤通气性,同时因其富含有机质,能显著

表2 土壤酸性磷酸酶活性、微生物生物量碳、水溶态 $Fe(\Pi)$ 、盐酸提取态 $Fe(\Pi)$ 与各形态磷素的相关关系

Table 2 Correlation between acid phosphatase activity, microbial biomass C, water soluble Fe(II), hydrochloric acid

extractable Fe(II) and phosphorus forms

	酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity	微生物 生物量碳 Microbial biomass carbon	水溶态 Fe(Ⅱ) Water soluble Fe(Ⅱ)	盐酸提取态 Fe(Ⅱ) Hydrochloric acid extractable Fe(Ⅱ)	Resin-P	NaHCO3-Pi	NaHCO3-P。	NaOH-P _i	NaOH-P。	D.HCl-P _i	C.HCl-P _i	C.HCl-P _o	Residual-P
酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity	1.000	0.738**	0.178	0.243	-0.705**	0.256	-0.633*	0.001	-0.843**	0.364	-0.238	0.454	-0.528*
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	0.697**	1.000	-0.283	0.711**	-0.876**	-0.015	-0.777**	-0.118	-0.602*	0.229	0.269	0.804**	-0.767**
水溶态 Fe(Ⅱ) Water soluble Fe(Ⅱ)	0.387	-0.364	1.000	-0.542*	-0.060	-0.281	0.392	-0.309	-0.312	-0.454	-0.785**	-0.609*	0.001
盐酸提取态 Fe(Ⅱ) Hydrochloric acid extractable Fe(Ⅱ)	0.582*	0.574*	-0.453	1.000	-0.628*	-0.679*	-0.132	-0.798**	-0.214	0.124	0.596*	0.843**	-0.607*
Resin-P	-0.673**	-0.875**	0.581*	-0.650**	1.000	0.366	0.681**	0.454	0.725**	0.108	-0.168	-0.585*	0.756**
NaHCO ₃ -P _i	0.431	-0.786**	0.474	-0.531*	0.796**	1.000	0.317	0.899**	0.018	0.895**	-0.242	0.177	0.170
NaHCO3-Po	-0.526*	0.382	-0.174	-0.289	-0.207	-0.419	1.000	0.381	0.328	0.150	-0.489	-0.627*	0.540*
NaOH-P _i	-0.283	-0.139	-0.472	-0.599*	0.344	0.206	-0.174	1.000	0.312	0.847**	-0.279	-0.212	0.053
NaOH-P.	-0.081	0.169	-0.276	-0.491	0.133	-0.077	0.144	0.400	1.000	-0.046	0.127	-0.199	0.290
D.HCl-P _i	-0.470	-0.171	-0.215	-0.729**	0.353	0.240	-0.364	0.690**	0.474	1.000	-0.071	0.481	-0.095
C.HCl-Pi	-0.597*	-0.173	0.145	-0.334	0.158	-0.260	-0.031	0.335	0.383	0.394	1.000	0.404	0.070
C.HCl-P.	0.223	0.691**	-0.586*	0.353	-0.730**	-0.817**	-0.058	0.056	0.205	-0.006	0.260	1.000	-0.710**
Residual-P	-0.575*	-0.635*	0.724**	-0.063	0.280	0.253	-0.255	-0.367	-0.488	-0.105	0.102	-0.310	1.000

注:**在0.01水平上显著相关,*在0.05水平上显著相关;表中左下部分为对照组相关系数,右上部分为蚯蚓粪处理组相关系数。

Notes: ** mean significant correlation at 0.01 level, * mean significant correlation at 0.05 level; Data on the left half of the table are the correlation coefficient of the control group, data on the right half of the table are the correlation coefficient of the treatment group.

增强土壤好氧微生物活性及其呼吸强度[26],这可能是 处理组土壤 Eh升高的主要原因。土壤中铁活性对土 壤环境条件变化较为敏感,土壤溶液的pH和Eh为其 主要影响因子,其中pH决定着土壤中铁的溶解性,并 对土壤中Fe(Ⅲ)的还原有显著影响^[27]。本次试验中 处理组土壤水溶态Fe(Ⅱ)浓度和pH在0~21 d均呈 下降趋势且低于对照组,主要原因一方面为蚯蚓粪肥 的添加增加了土壤通气性,在较高的Eh下,活性高的 土壤水溶态 Fe(Ⅱ)更易被接触氧化;另一方面可能 为蚯蚓粪肥添加造成土壤较高的C/Fe而在液相产生 共沉淀现象。Riedel 等[28]发现对 C/Fe 为 10~30 的厌氧 沼泽孔隙水进行通气,大量的DOM会与铁离子发生 共沉淀。Colombo等^[29]研究发现铁离子易与胡敏酸中 的羧基和酚羟基螯合形成较大的团聚体。除以上原 因之外,蚯蚓粪肥中带负电、大比表面积颗粒对水溶 态 Fe(Ⅱ)也有一定吸附作用。目前大量研究已发现 土壤中的铁主要以铁氧化物形式存在,铁氧化物可变 电荷表面对磷具有较强的吸附固定作用[30]。本次试

验处理组盐酸提取态 Fe(Ⅱ)浓度随时间增长明显上 升且高于对照组,部分原因可能为处理组土壤团聚体 颗粒中富含有机质,形成大量独立的微型厌氧环境, 有机质分解产生的还原性物质促进团聚体内部铁氧 化物的还原。另外根据相关性分析结果显示处理组 土壤中盐酸提取态 Fe(Ⅱ) 与微生物生物量存在极显 著正相关关系,说明蚯蚓粪肥添加后微生物大量繁殖 能够促进铁的还原,可能原因为蚯蚓粪肥添加后促进 土壤中铁还原微生物数量的增长,其中铁还原菌是主 要的一类能够异化还原Fe(Ⅲ)并从中获取能量生长 的微生物[31]。除以上原因,蚯蚓粪肥富含的小分子有 机物(如糖类、有机酸等)不仅是微生物生长的基质, 也可作为铁还原的电子供体,除此之外蚯蚓粪肥中还 含有大量腐植酸,有研究发现腐植酸上的醌基在充当 铁还原过程中微生物和铁氧化物之间的电子穿梭体 方面发挥重要作用^[32],土壤中这些有机物与微生物的 协同作用可进一步促进铁的还原,而已知土壤中铁还 原可以导致铁氧化物活化,大量研究表明不同活化程 度的铁氧化物颗粒比表面积大小不同,对土壤磷素的 吸附强度也存在一定差异^[33-34]。通过相关性分析发 现蚯蚓粪肥添加后土壤盐酸提取态 Fe(II)浓度变化 与 NaOH-P_i呈极显著负相关,相关性远高于对照组, 这与前人研究结果相同^[35]。

微生物可以促进土壤磷素活化,微生物生物量 碳、微生物生物量磷以及微生物生物量碳磷比可以反 映土壤解磷和贮磷微生物活性及其对土壤中磷的矿 化和固持速率,而微生物对磷的固持有利于抑制活性 磷被土壤固定的速率。本次试验结果显示,处理组和 对照组土壤微生物生物量碳均与Resin-P存在极显 著负相关关系,根据微生物生物量碳磷比随培养时间 增长所呈现的下降趋势推测,两组主要原因可能为土 壤中微生物对活性磷的固定和储存,张宝贵等1361研究 认为土壤中有效磷浓度取决于有机磷矿化和微生物 对磷的固持这两个同时进行的过程之间的相对速率, 另有研究发现蚯蚓粪肥中含有促进菌根侵染的激素, 通过扩散菌根加大对土壤有效磷素的吸收[37]。另外, 在碳酸氢钠提取的活性磷中,处理组微生物生物量碳 与NaHCO₃-P。存在极显著负相关关系,而在对照组中 则与NaHCO3-Pi呈极显著负相关,表明蚯蚓粪肥添加 促进了微生物对 NaHCO₃-P。的降解和固持。酸性磷 酸酶是一种主要由植物分泌的蛋白酶,部分真菌和细 菌也能分泌,可以从有机磷底物上水解磷酸基团,生 成可供植物吸收的磷酸根离子,其活性易受pH、有效 磷和微生物等多种因素影响[38]。本次试验结果中处 理组和对照组酸性磷酸酶活性与 Resin-P含量均呈 显著负相关关系,原因可能为土壤中酸性磷酸酶水解 产生的Pi对其活性的负反馈抑制作用^[39-40]。对于有机 磷,两组土壤酸性磷酸酶活性与NaHCO3-P。浓度之间 均呈显著负相关关系,而与C.HCl-P。相关性很小,其 中在处理组中酸性磷酸酶活性还与NaOH-P。呈极显 著负相关,并且NaOH-P。与微生物生物量碳之间呈显 著负相关,综合考虑两组土壤中的微生物生物量碳与 土壤酸性磷酸酶活性均呈极显著正相关关系,试验结 果表明土壤微生物除分解利用土壤中活性有机磷获 得能量快速增殖生长以外,部分解磷微生物可通过自 身分泌或者刺激植物分泌酸性磷酸酶来活化有机磷, 而蚯蚓粪肥的添加能够促进土壤微生物增长,从而增 加土壤酸性磷酸酶活性,且在蚯蚓粪肥处理的土壤中 NaOH-P。更易被酸性磷酸酶活化。

对土壤中各磷形态之间的主要相互关系研究发现,对照组土壤Resin-P与NaHCO3-Pi存在极显著正

农业环境科学学报 第37卷第12期

相关关系,主要原因可能为对照土壤中NaHCO₃-P_i为 Resin-P的直接来源,而在处理组中土壤Resin-P与 NaHCO₃-P_o、NaOH-P_o均呈极显著正相关,可能由于 蚯蚓粪肥添加促进了土壤微生物增殖和酸性磷酸酶 活性的提高,而蚯蚓粪肥本身含有丰富的有机磷,导 致有机磷被大量水解和矿化,成为了Resin-P的主要 来源,这与上述讨论结果相同。除此之外,处理组土壤 中NaHCO₃-P_i与NaOH-P_i存在极显著正相关关系,表 明蚯蚓粪肥添加的土壤中中稳定性NaOH-P_i是活性 无机磷NaHCO₃-P_i的主要来源,而NaOH-P_i主要为吸附 在铁铝氧化物表面的无机磷,这与上述关于Fe(II) 的讨论结果相同。

4 结论

(1)蚯蚓粪肥有助于维持水稻土体系内质子平衡,对土壤pH具有持续调节作用,同时改善土壤氧化还原环境;相比对照组,蚯蚓粪肥对水稻土铁的溶解以及还原具有促进作用,显著提高土壤盐酸提取态Fe(Ⅱ)含量,使其在整个培养期间始终保持较高水平,促进了中稳定态磷NaOH-P;的释放。

(2)与对照组相比,蚯蚓粪肥添加后的土壤更有 利于微生物生长和繁殖,同时固磷微生物对磷的固持 作用加强,有利于抑制土壤活性磷被固定;在蚯蚓粪 肥处理的土壤中,酸性磷酸酶主要作用于中稳定态有 机磷 NaOH-P。和活性有机磷 NaHCO₃-P。,而对稳定态 有机磷 C.HCI-P。无明显作用,其中中稳定态有机磷 NaOH-P。含量与酶活性呈极显著负相关关系,表明蚯 蚓粪肥能提高中稳定性磷的活性,促进其释放。

(3)蚯蚓粪肥能显著增加土壤中除稳定态 C.HCl-P_i以外的各形态磷含量,其中对土壤活性磷含量 提升作用最明显;添加蚯蚓粪肥后的土壤中Resin-P 与NaHCO₃-P_o、NaOH-P_o之间均存在极显著正相关关 系,NaHCO₃-P_i与NaOH-P_i存在极显著正相关关系, 表明蚯蚓粪肥添加后土壤有效性最高的活性无机磷 Resin-P主要来自活性和中稳定性有机磷的分解,而 中稳定性磷NaOH-P_i为活性磷NaHCO₃-P_i主要来源。

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2010.
- HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [2] Lynch J P. Roots of the second green revolution[J]. Australian Journal of Botany, 2007, 55(5):493-512.
- [3] Tiessen H. Phosphorus in the global environment[J]. The Ecophysiology

of Plant-phosphorus Interactions, 2008:1-7.

- [4] Zhou Y, Zhu H, Yao Q. Contrasting P acquisition strategies of the bacterial communities associated with legume and grass in subtropical orchard soil[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2018, 10(3): 310– 319.
- [5] Richardson A E, Lynch J P, Ryan P R, et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1/2):121-156.
- [6] 赵 伟,宋 春,周 攀,等.施磷量与施磷深度对玉米-大豆套作系统磷素利用率及磷流失风险的影响[J].应用生态学报,2018,29
 (4):1205-1214.

ZHAO Wei, SONG Chun, ZHOU Pan, et al. Effects of phosphorus application rates and depths on P utilization and loss risk in a maize-soybean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4):1205-1214.

- [7] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2):173–195.
- [8] Nelson N O, Janke R R. Phosphorus sources and management in organic production systems[J]. *Hort Technology*, 2007, 17(4):442-454.
- [9] Mendes G D O, Zafra D L, Vassilev N B, et al. Biochar enhances aspergillus niger rock phosphate solubilization by increasing organic acid production and alleviating fluoride toxicity[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2014, 80(10):3081–3085.
- [10] 梁国庆,林 葆,林继雄,等.长期施肥对石灰性潮土无机磷形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2001(3):241-248. LIANG Guo-qing, LIN Bao, LIN Ji-xiong et al. Effect of long-term

fertilization on the forms of inorganic phosphorus in calcareous fluvo– aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001 (3) : 241– 248.

[11] 杨佳佳,李兆君,梁永超,等.温度和水分对不同肥料条件下黑土 磷形态转化的影响及机制[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6): 1295-1302.

YANG Jia-jia, LI Zhao-jun, LIANG Yong-chao, et al. Effects and their mechanisms of temperature and moisture on phosphorous transformation in black soil manured with different fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6):1295–1302.

- [12] Bhat S A, Singh S, Singh J, et al. Bioremediation and detoxification of industrial wastes by earthworms: Vermicompost as powerful crop nutrient in sustainable agriculture[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 252: 172–179.
- [13] Abdissa B, Kibebew K, Bobe B, et al. Effects of lime, vermicompost and chemical P fertilizer on yield of maize in Ebantu District, Western highlands of Ethiopia[J]. African Journal of Agricultural Research, 2018, 13(10):477-489.
- [14] Arancon N Q, Edwards C A, Bierman P. Influences of vermicomposts on field strawberries: Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(6):831–840.
- [15] Atiyeh R M, Edwards C A, Subler S, et al. Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: Effects on physicochemical properties and plant growth[J]. Bioresource Technolo-

gy, 2001, 78(1):11-20.

- [16] Lim S L, Wu T Y, Lim P N, et al. The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(6):1143–1156.
- [17] 高 海,王彦靖,刘迎春,等.蚯蚓粪资源化利用研究现状与展望
 [J].现代农业科技,2015(6):255-256.
 GAO Hai, WANG Yan-jing, LIU Ying-chun, et al. Research status and prospects on the utilization of vermin compost resource[J]. Mod-
- ern Agricultural Science and Technology, 2015(6):255-256.
 [18] 单 颖, 赵凤亮, 林 艳, 等. 蚯蚓粪对土壤环境质量和作物生长影响的研究现状与展望[J]. 热带农业科学, 2017, 37(6):11-17.

SHAN Yin, ZHAO Feng-liang, LIN Yan, et al. Research advances and prospective on effects of vermicompost on soil environment quality and crop production[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2017, 37(6):11–17.

- [19] Tiessen H, Jwb S, Moir J O. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60–90 years of cultivation[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 34(4):815–823.
- [20] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社, 2006.
 WU Jin-shui. The method of microbial biomass assay and its applica-

tion[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.

- [21] Yu H Y, Liu C, Zhu J, et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: The effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. Environmental Pollution, 2016, 209:38–45.
- [22] Ge Y, Wang Q, Wang L, et al. Response of soil enzymes and microbial communities to root extracts of the alien *Alternanthera philoxeroides* [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018, 64(5):708-717.
- [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 Ru-kun. The analytic method of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

- [24] 顾 兵, 吕子文, 方海兰, 等. 绿化植物废弃物堆肥对城市绿地土壤的改良效果①[J]. 土壤, 2009, 41(6):940–946.
 GU Bing, LÜ Zi-wen, FANG Hai-lan, et al. Effects of green plant waste compost on soil remediation in urban greenbelts ① [J]. Soils, 2009, 41(6):940–946.
- [25] Ndegwa P M, Thompson S A, Das K C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids[J]. *Bioresource Technolo*gy, 2000, 71(1):5–12.
- [26]García-Sánchez M, Taušnerová H, Hanč A, et al. Stabilization of different starting materials through vermicomposting in a continuousfeeding system: Changes in chemical and biological parameters[J]. *Waste Management*, 2017, 62:33-42.
- [27] Jugsujinda A, Patrick Jr W H. Methane and water soluble iron production under controlled soil pH and redox conditions[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(9/10):2221–2227.
- [28] Riedel T, Zak D, Biester H, et al. Iron traps terrestrially derived dissolved organic matter at redox interfaces[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(25):10101–10105.

农业环境科学学报 第37卷第12期

- [29] Colombo C, Palumbo G, Sellitto V M, et al. Characteristics of insoluble, high molecular weight iron-humic substances used as plant iron sources[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76 (4): 1246-1256.
- [30] Liu J Z, Li Z S, Li J Y. Utilization of plant potentialities to enhance the bio-efficiency of phosphorus in soil[J]. *Ecoagric Res*, 1994, 2:16– 23.
- [31] Ding X, Zhang S, Wang R, et al. Exogenous labile C application enhances Fe-P utilization for mycorrhizal plants through iron-reducing bacteria in subtropical soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(4):803-817.
- [32] Burgos W D, Fang Y, Royer R A, et al. Reaction-based modeling of quinone-mediated bacterial iron(Ⅲ) reduction[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(15):2735-2748.
- [33] 马毅杰, 陈家坊. 我国红壤中氧化铁形态及其特性和功能[J]. 土壤, 1998(1):1-6.

MA Yi-jie, CHEN Jia-fang. Iron oxide forms and characteristics and functions in red soil of China[J]. *Soils*, 1998(1):1-6.

[34] 马 良, 徐仁扣. 不同耕种年限红壤性水稻土理化性质的变化特征①[J]. 土壤, 2010, 42(4):560-563.

MA Liang, XU Ren-kou. Physico-chemical characteristics of paddy soils derived from quaternary red clay under different cultivated years ①[J]. Soils, 2010, 42(4):560-563.

[35] 令狐荣云, 王荣萍, 梁嘉伟, 等. 铁还原菌对红壤菜地土壤磷形态

转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9):1742-1749. LINGHU Rong-yun, WANG Rong-ping, LIANG Jia-wei, et al. Effects of iron reducing bacteria on the transformation of phosphorus in vegetable red soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (9):1742-1749.

[36] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998(1):104-111.

ZHANG Bao-gui, LI Gui-tong. The role of soil organisms in the availability of soil phosphorus[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998(1):104-111.

- [37] Li H, Li X L, Dou Z X, et al. Earthworm (Aportectodea trapezoides) mycorrhiza (Glomus intraradices) interaction and nitrogen and phosphorus uptake by maize[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48 (1):75-85.
- [38] Margalef O, Sardans J, Fernández-Martínez M, et al. Global patterns of phosphatase activity in natural soils[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1):1337.
- [39] Duff S M G, Sarath G, Plaxton W C. The role of acid phosphatases in plant phosphorus metabolism[J]. *Physiologia Plantarum*, 1994, 90 (4):791-800.
- [40] Coello P. Purification and characterization of secreted acid phosphatase in phosphorus-deficient Arabidopsis thaliana[J]. Physiologia Plantarum, 2002, 116(3):293-298.