

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.

铁还原菌对红壤菜地土壤磷形态转化的影响

令狐荣云^{1,2}, 王荣萍^{2*}, 梁嘉伟², 廖新荣², 詹振寿², 吴永贵¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 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)

摘要: 采用室内模拟试验, 通过外源输入铁还原菌, 研究铁还原菌对红壤菜地磷素形态转化的影响。试验结果表明: 活性磷(resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$) 占总磷的 10%~19%, 中稳定态磷(NaOH-P_i 和 NaOH-P_o) 约占总磷的 35%, 稳定态磷(D.HCl-P_i、C.HCl-P_i、C.HCl-P_o 和 residual-P) 占总磷的 46%~55%; 输入铁还原菌活化磷素, 使活性较高的 resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量上升, 活性较低的 D.HCl-P_i、C.HCl-P_i 以及 NaOH-P_o 含量降低, 但对 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 和 residual-P 的影响不大; 与此同时, 添加铁还原菌提高了土壤 pH 值与有效磷(Bray-P) 含量。相关性分析结果表明: pH 与有机质、有效磷、resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 之间均呈现负相关关系; 有机质与有效磷、resin-P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 之间、有效磷与土壤活性磷之间均达到显著正相关水平。总的来说, 铁还原菌的输入可以改变红壤菜地土壤中磷的形态, 提高土壤活性磷的含量, 对土壤磷素起到活化作用。

关键词: 铁还原菌; 磷形态; 转化; 红壤菜地

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)09-1742-08 doi:10.11654/jaes.2016-0508

Effects of Iron-reducing bacteria on the transformation of phosphorus in vegetable red soils

LINGHU Rong-yun^{1,2}, WANG Rong-ping^{2*}, LIANG Jia-wei², LIAO Xin-rong², ZHAN Zhen-shou², WU Yong-gui¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guangdong Institute of Eco-Environmental Technology, Guangdong Key Laboratory of Agro-Environment Integrated Control, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Indoor simulation experiments were carried out to investigate the effects of exogenous iron-reducing bacteria (IRB) on the transformation of phosphorus (P) in vegetable red soils. The results shows that: labile P (including resin-P, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ and $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$) accounted for 10%~19% of total P, moderately stable P (including NaOH-P_i and NaOH-P_o) was 35% and stable P (including D.HCl-P_i, C.HCl-P_i, C.HCl-P_o and residual-P) 46%~55%. The introduction of IRB increased the contents of resin-P_i, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ and NaOH-P_i which are of high P activity but declined the contents of D.HCl-P_i, C.HCl-P_i and NaOH-P_o which are of low P activity. In addition, the introduction of IRB increased soil pH and available P (Bray-P) content. Correlation analyses shows that: there is a negative correlation between pH and organic matter content, available P, resin-P and $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$; the organic matter content has a significant positive relationship with available P, resin-P and $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$; and there is also a significant positive correlation between available P and labile P. In summary, the introduction of iron-reducing bacteria changed the P species in the vegetable red soils, activated soil P and thus increased the content of soil active P.

Keywords: Iron-reducing bacteria; phosphorus species; transformation; vegetable red soil field

收稿日期: 2016-04-13

基金项目: 国家科技支撑项目“城郊区环保型高效农业关键技术研究与示范”(2014BAD14B05); 省院合作“华南不同类型土壤累积态磷素生物活化关键技术研究”(2013B091500016); 广州市科技计划项目“有机碳输入促进红壤菜地铁耦合固定态磷的活化机制”(201607010082); 广东省科技计划项目“农业面源污染综合生态防控创新能力建设”(2015B070701017)项目

作者简介: 令狐荣云(1992—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向为土壤与植物营养。E-mail: lhry92@163.com

* 通信作者: 王荣萍 E-mail: rpwang@soil.gd.cn

磷是植物生长必需的营养元素之一,在植物生长中起着不可缺少的作用,它不仅是植物体内多种化合物的重要组成成分,而且还通过多种途径参与植物的代谢活动^[1-2]。在我国南方广泛分布着由多种母质发育而成的红壤,但其活性磷含量较低,因此磷素成为限制南方农业生产的重要因素之一。为提高作物产量,大量磷肥被施入土壤中,但施入的磷素当季利用率极低,仅有10%~25%^[3-4],导致土壤磷素累积,增加了土壤中磷的移动性以及流失风险^[5-6]。作物对磷的吸收取决于土壤中磷素的有效性,而磷素的有效性又取决于其赋存形态。卜玉山等^[7]研究发现石灰性土壤中Ca-P占有很大的比例;王娅等^[8]研究发现Fe-P在稻田土壤中含量极高,可占总磷的60%~80%,但难以被植物利用;Batty等^[9]进一步研究发现酸性红壤中磷素易与土壤中的Fe和Al相结合,形成低溶解度的Fe-P和Al-P。不同类型土壤中各形态磷的含量不同,在某些特定条件下,它们之间可以相互转化^[10-11]。

土壤是一个复杂的系统,其中最活跃的部分是土壤微生物,它们在土壤中起着不可替代的作用,正是由于微生物的存在,使土壤成为一个具有生命力的活体^[12]。土壤养分的循环来自于微生物的转化,前人以微生物作为工具已找出多种途径来提高土壤中养分的利用率,如Pastor等^[13]发现假单胞菌PCI2能促进磷酸铝的溶解,使番茄增产;边武英等^[14]研究发现,与一般土壤微生物相比,高效解磷菌(PEM)对针铁矿-磷复合体吸附磷的活化作用较高;Blum等^[15]发现外生菌根可吸收磷灰石风化过程中释放出的Ca²⁺,并以此作为钙源供给植物生长;接种菌根真菌不仅可以促进植物对多聚磷酸盐的吸收,提高红壤磷素的利用效率,而且能够提高Fe(III)-P的活化利用效率^[16-17]。这表明微生物在土壤磷循环中也占据重要地位。土壤微生物生长时固持的磷可以作为土壤磷素的“汇”,微生物死亡后释放的磷又可以作为土壤磷素的“源”^[18]。铁还原菌(iron-reducing bacteria, IRB)是一类能异化还原Fe(III)并从中获取其生长所需能量的微生物^[19-21]。铁还原菌异化还原Fe(III)使磷酸铁还原成磷酸亚铁,增加磷酸盐的溶解性和磷的有效性,但目前有关铁还原菌施入南方菜地土壤引起磷形态变化的研究鲜见报道。因此,本研究拟以南方菜地红壤为研究对象,通过向其中添加铁还原菌,研究菜地红壤磷形态的变化,以期对红壤固定态磷的活化提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

供试土壤采集于广东省湛江市徐闻县正常耕作的菜地土,采样后将土壤置于通风处自然风干后过2 mm尼龙筛,密封保存备用。其基本理化性质为:pH5.1,有机质19.6 g·kg⁻¹,速效氮69.0 mg·kg⁻¹,速效钾358 mg·kg⁻¹,缓效钾154 mg·kg⁻¹,有效磷104 mg·kg⁻¹。培养试验所用铁还原菌为广东省生态环境技术研究所提供的固体铁还原菌种,菌种为克雷伯氏肺炎菌(*Klebsiella pneumonia* L17),兼性厌氧菌。

1.2 试验设计与分析方法

称取200 g过2 mm筛的风干土样于250 mL聚乙烯瓶中,按菌土质量比1:20添加固体铁还原菌(10 g),然后将土壤含水量调节到田间持水量的120%,充分混匀后于25℃生化培养箱中恒温培养35 d。培养试验设置2个处理,分别为处理1(对照土壤,添加已灭活性的铁还原菌),处理2(加菌土壤,添加活性铁还原菌),每组处理3次重复,于培养的第0、7、14、21、28、35 d破坏性采集土壤样品,将土样风干后分别过10目、100目尼龙筛,用以测定各项指标。

土壤pH采用土水比1:2.5测定,有机质采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定,有效磷(Bray-P)采用适用于酸性土壤的HCl-NH₄F方法浸提、钼蓝法测定,土壤微生物生物量碳、微生物生物量磷均采用氯仿熏蒸浸提法测定^[22]。土壤磷分级采用文献^[23]的分级方法进行,通过加入不同浸提能力的浸提剂进行提取。

1.3 数据统计与分析

数据统计采用Microsoft Office Excel 2003,分析采用IBM SPSS statistics 20,同一时间不同处理之间的显著性差异采用独立样本 t 检验,对照和处理之间的总体差异性采用重复测量数据方差分析,采用Pearson相关性分析,Oringin 8.5.1作图。

2 结果与分析

2.1 土壤磷素形态百分含量变化

本研究采用经过修正的Hedley磷素分级方法,其中resin-P和NaHCO₃-P_i为活性无机磷,NaHCO₃-P_o为活性有机磷,三者统称活性磷;NaOH-P_i及NaOH-P_o分别为中稳定态无机磷和有机磷;D.HCl-P_i、C.HCl-P_i、C.HCl-P_o以及residual-P为稳定态磷。两组处理土壤中各磷素形态占各形态总量的百分比

如图1所示。可以看出,加菌土壤活性磷含量在每个时段均有不同程度的上升,其含量为 $183\sim 335\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占各形态含量总和的 $10\%\sim 19\%$,其中 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量最高,占各形态含量总和的 $6\%\sim 9\%$;中稳定态磷的变化不大,含量为 $615\sim 670\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占各形态含量总和的 35% 左右,同时, NaOH-P_o 也是含量最高的有机磷形态,约占各形态含量总和的 10% ;含量最高的为稳定态磷,与对照土壤相比,加菌土壤的稳定态磷含量均呈现减小的现象,其含量为 $825\sim 1022\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占各形态含量总和的 $46\%\sim 55\%$ 。

2.2 输入铁还原菌对红壤菜地土壤 pH、有机质及有效磷的影响

土壤 pH、有机质及有效磷含量变化如图2所示。在培养试验的前21 d,加菌土壤与对照土壤的 pH 差异不显著,但在培养28 d之后,加菌土壤的 pH 与对照土之间存在显著差异,在整个培养过程中,两组处理 pH 总体之间存在显著差异($F=14.5, P<0.05$);加菌土壤的有机质含量在整个培养过程中均略低于对照土,总体差异均不显著($F=5.5, P>0.05$),加菌土壤的有效磷含量在培养过程中呈现降低趋势,除第35 d外,两组处理各时段含量之间存在显著差异,并且对照土与加菌土总体间存在极显著性差异($F=419.5, P<0.01$)。从图2还可以看出,随着培养时间的延长,三者含量均发生变化,其中 pH 整体呈现上升趋势,而有机质与有效磷则呈现下降趋势,对照土与加菌土壤的 pH 由培养初期的5.8上升至6.6和7.2,分别上升了0.8和1.4个 pH 单位;至培养结束,对照和加菌土的有机质分别下降了22%和23%,有效磷则下降了73.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和98.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

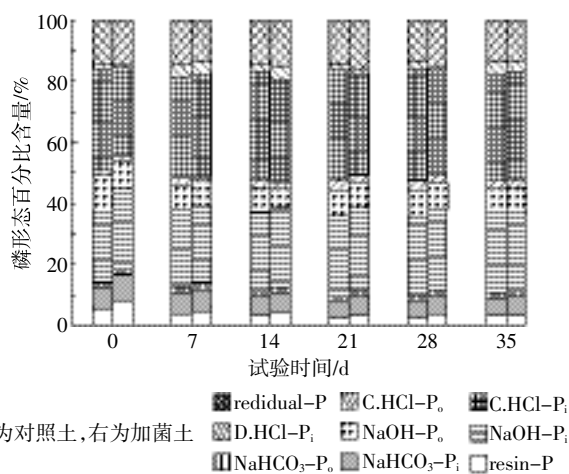
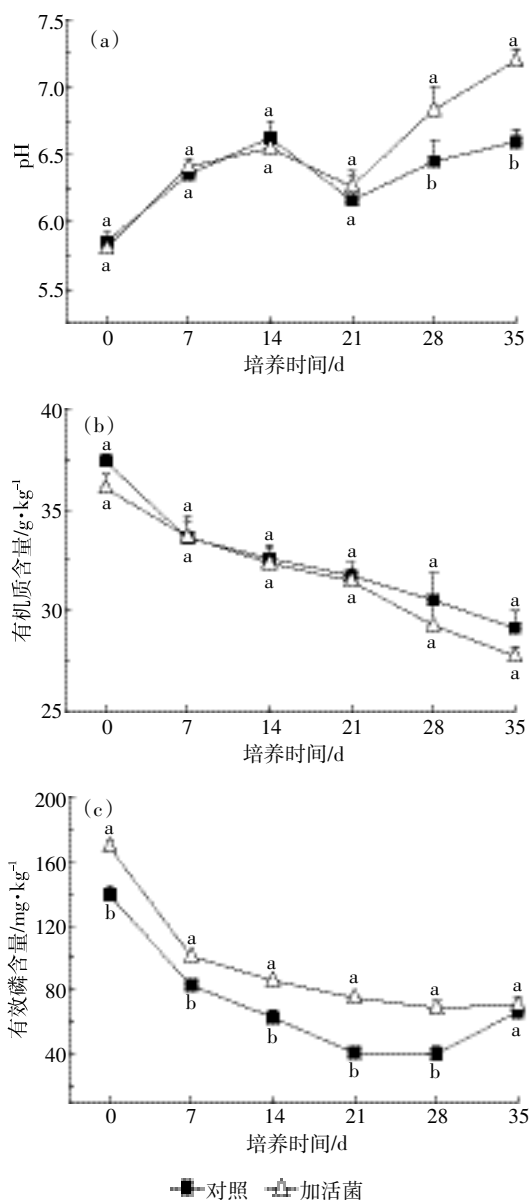


图1 土壤磷素各形态百分含量

Figure 1 The percentage of phosphorus forms

2.3 铁还原菌对红壤菜地土壤无机磷形态及残渣磷的影响

土壤无机磷形态与残渣磷的变化如图3所示,其中 resin-P 是土壤中有效性最高的磷素形态, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 是被吸附在土壤表面的磷,两者均易于被植物利用。从图3a及图3b可以看出,加菌土壤 resin-P 及 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量均大于对照土壤,说明铁还原菌能使土壤中活性较强的磷素形态含量增加,但随着培养时间的延长,两组处理的 resin-P 及



同一时间不同小写字母代表两组处理差异显著($P<0.05$),下同

图2 铁还原菌对红壤菜地土 pH、有机质及有效磷的影响

Figure 2 Effects of IRB on pH, organic matter, Olsen-P content on vegetable red soils

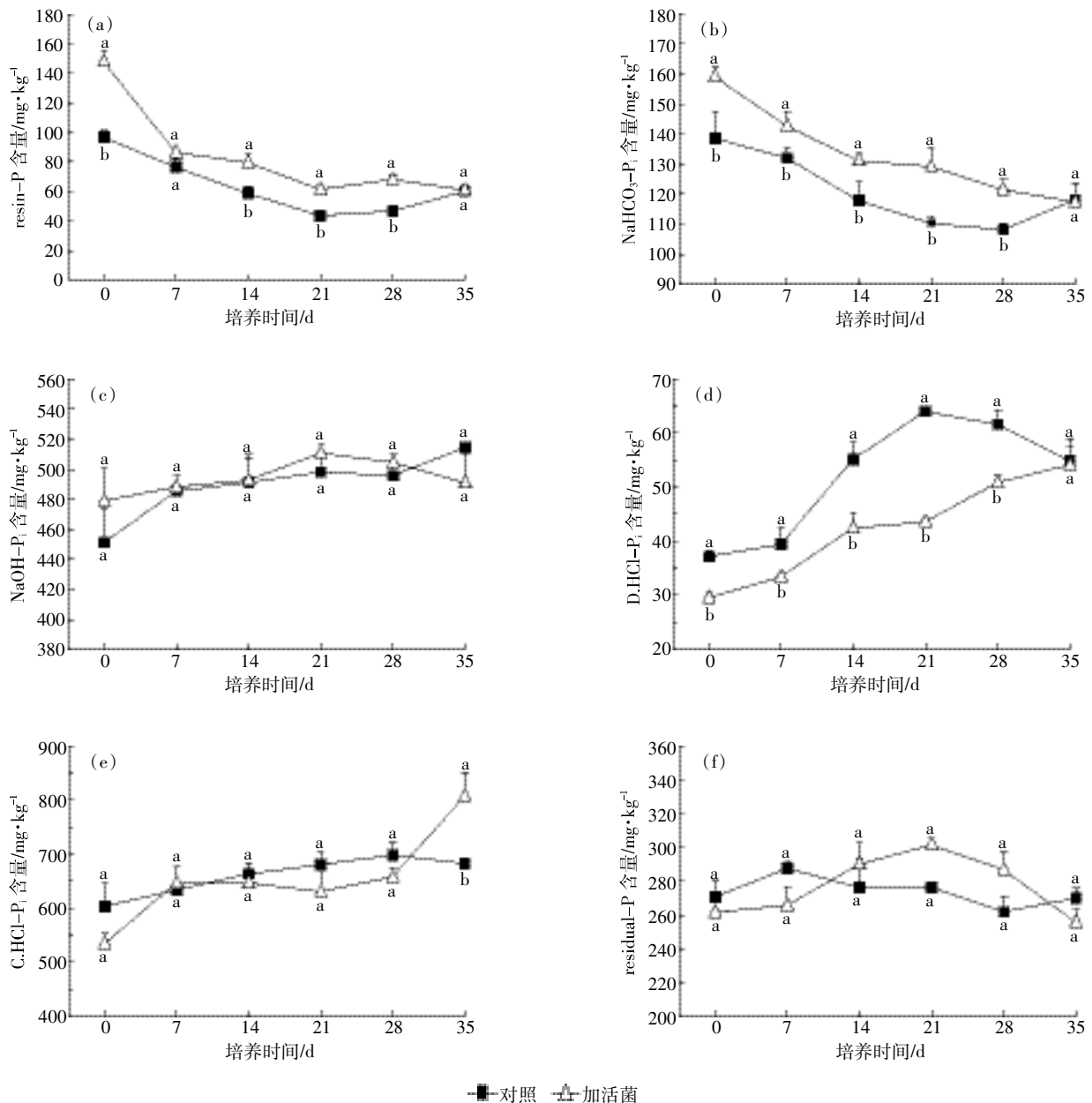


图3 铁还原菌对红壤菜地土壤无机磷形态及残渣磷的影响

Figure 3 Effects of IRB on inorganic phosphorus and forms residual-P on vegetable red soils

$\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量均呈现降低现象;当培养进行至第 14 d 时,加菌土壤的 resin-P 及 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量分别降低了 68.6、28.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对照土壤仅降低了 38.1、20.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,此后两者含量逐渐缓慢变化,在培养过程中对照与处理的 resin-P 含量总体间均存在极显著差异 ($F_{\text{resin-P}}=288.3, P<0.01$),两组处理的 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量总体间均存在显著差异 ($F_{\text{NaHCO}_3\text{-P}_i}=59.6, P<0.05$)。

NaOH-P_i 是通过化学吸附固着在铁、铝氧化物中,以磷酸铁盐和磷酸铝盐形式存在于土壤中。由图 3c、图 3d 可以看出,加菌土壤中 NaOH-P_i 含量高于

对照土壤,随着培养时间的增加, NaOH-P_i 含量呈现上升的现象,说明铁还原菌的存在能够将其其他形式的磷素转化成 NaOH-P_i ,从而使其含量上升;但其含量在培养过程中无显著差异 ($F=161.7, P>0.05$)。D.HCl- P_i 为中稳定性无机磷,主要为磷灰石型磷。土壤中 D.HCl- P_i 含量随着培养时间的增加而呈现上升的现象,其中加菌土壤在培养过程中 D.HCl- P_i 含量均低于对照土,说明铁还原菌的存在能使磷素被固定的量降低,减缓土壤中磷素被固定的速度;但两组处理间存在显著差异 ($F=80.1, P<0.05$)。

在 Hedley 磷素分级中, 仅有稀盐酸提取态磷, Tiessen 对其进行修正后, 在稀盐酸提取部分磷后, 接着用浓盐酸提取, 也可将其纳入残渣态磷, 因这部分磷很难被动植物所利用。图 3e、图 3f 所示为 $C.HCl-P_i$ 及 $residual-P_i$ 两者在土壤中的总含量高达 $796\sim 961\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 $C.HCl-P_i$ 含量随培养时间的增加呈上升趋势, 同初始含量相比, 添加铁还原菌的土壤 $C.HCl-P_i$ 上升了 $96.8\sim 272\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而对照土壤的 $C.HCl-P_i$ 仅上升了 $30.4\sim 94.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。虽然稳定态磷素的含量随着培养时间的增加总体呈现增加的趋势, 但是在整个培养过程中, 对照土壤中稳定态的磷素含量却一直高于加菌土壤, 说明铁还原菌的存在能够减少土壤中被固化的磷素量, 但对照与处理总体之间无显著差异 ($F_{C.HCl-P_i}=0.7, P>0.05$; $F_{residual-P_i}=1.2, P>0.05$)。

2.4 输入铁还原菌对红壤菜地土壤有机磷形态的影响

本研究所采用的磷素分级方法中有机磷形态包括 $NaHCO_3-P_o$ 、 $NaOH-P_o$ 和 $C.HCl-P_o$ 。 $NaHCO_3-P_o$ 是可溶性有机磷, 被矿化后短期内能被植物利用, $NaOH-P_o$ 是由腐植酸和褐菌素组成的有机磷, $C.HCl-P_o$ 主要是一些化学性质十分稳定的有机磷^[24]。各形态有机磷含量变化如图 4 所示, 其中以 $NaOH-P_o$ 含量最高。在整个培养过程中, 两组处理的各有机磷形态中, $NaOH-P_o$ 含量总体存在显著差异 ($F=29.7, P<0.05$), 而 $NaHCO_3-P_o$ 和 $C.HCl-P_o$ 无显著差异 ($F_{NaHCO_3-P_o}=80.1, P>0.05$; $F_{C.HCl-P_o}=1.2, P>0.05$)。但加菌土壤中 $NaHCO_3-P_o$ 含量高于对照土壤, 说明铁还原菌将其他形态的磷转化成为有机磷并贮存下来, $NaHCO_3-P_o$ 含量均在培养的第 14 d 达到最高值, 其中添加铁还原菌土壤的 $NaHCO_3-P_o$ 含量为 $34.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 土壤 $NaOH-P_o$ 含量随着培养时间的增加呈现降低的趋势, 添加铁还原菌土壤 $NaOH-P_o$ 含量为 $122\sim 162\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对照土壤 $NaOH-P_o$ 含量为 $145\sim 213\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.5 土壤 pH、有机质、有效磷与各形态磷素的相关关系

将添加铁还原菌后的 pH、有机质、有效磷与各形态磷素含量作 Pearson 相关性分析, 结果如表 1 所示。pH 与有机质、有效磷之间均呈负相关; 有机质与 $resin-P_i$ 、 $NaHCO_3-P_i$ 均呈正相关; 有效磷与 $resin-P_i$ 、 $NaHCO_3-P_i$ 间均达到极显著正相关水平 (相关系数分别为 0.940 和 0.817), 而与 $D.HCl-P_i$ 以及 $C.HCl-P_i$ 间呈显著负相关; $D.HCl-P_i$ 以及 $C.HCl-P_i$ 与 $resin-P_i$ 和 $NaHCO_3-P_i$ 之间亦呈显著负相关; 而有机磷与 pH、有机质、有效磷之间的相关性均不显著。

2.6 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

两组处理的土壤微生物生物量碳、微生物生物量磷以及微生物量碳磷比如表 2 所示。可以看到, 在整个培养过程中, 加菌土壤的微生物生物量碳、磷均大于对照土壤, 两者含量均存在显著差异 ($P<0.05$), 并且均在第 14 d 达到最大值, 此后两者均呈下降趋势, 微生物生物量碳氮比则一直呈现减小的趋势。

3 讨论

土壤磷循环是一个快速且复杂的过程, 土壤中磷

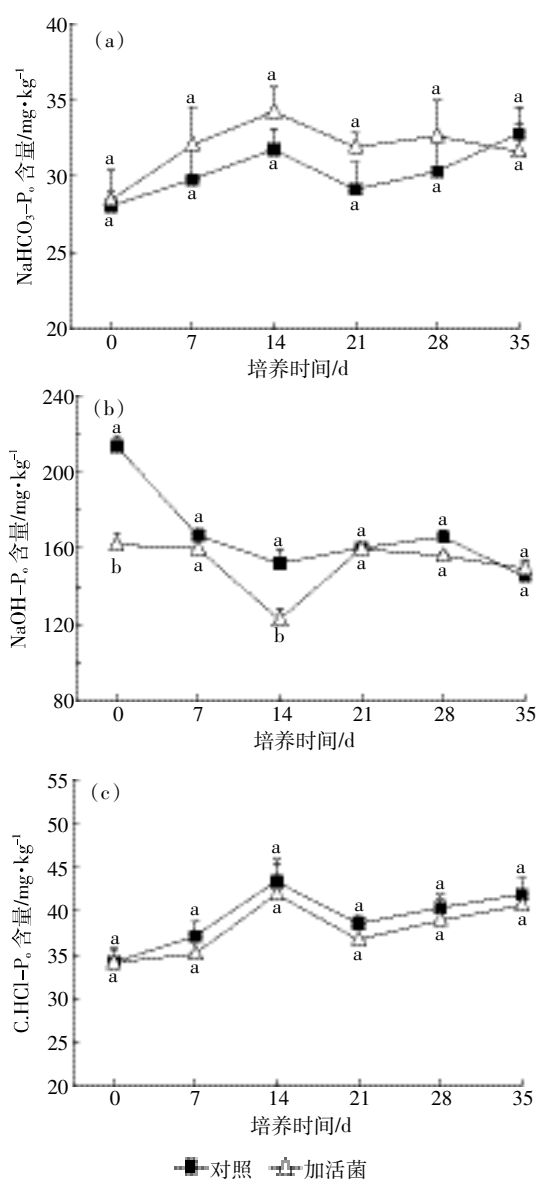


图 4 铁还原菌对红壤菜地土壤有机磷形态含量的影响

Figure 4 Effect of IRB on organic phosphorus forms on red vegetable soils

表 1 加菌土壤 pH、有机质、有效磷与各形态磷素含量的相关关系

Table 1 Correlation between pH, organic matter, Olsen-P and phosphorus forms

	pH	有机质	有效磷	resin-P	NaHCO ₃ -P _i	NaHCO ₃ -P _o	NaOH-P _i	NaOH-P _o	D.HCl-P _i	C.HCl-P _i	residual-P
pH	1										
有机质	-0.832**	1									
有效磷	-0.573**	0.729**	1								
resin-P	-0.397*	0.580**	0.940**	1							
NaHCO ₃ -P _i	-0.429**	0.522**	0.817**	0.852**	1						
NaHCO ₃ -P _o	0.167	-0.126	-0.164	-0.165	-0.247	1					
NaOH-P _i	0.436**	-0.680**	-0.538**	-0.397*	-0.147	0.125	1				
NaOH-P _o	-0.399*	0.370*	0.282	0.120	-0.091	-0.146	-0.649**	1			
D.HCl-P _i	0.419*	-0.648**	-0.862**	-0.827**	-0.851**	0.142	0.350*	-0.114	1		
C.HCl-P _i	0.607**	-0.684**	-0.605**	-0.546**	-0.551**	0.079	0.363*	-0.221	0.669**	1	
residual-P	0.083	-0.057	-0.119	-0.082	-0.115	0.050	0.074	-0.048	0.023	-0.345*	1

注:** 在 0.01 水平上显著相关;* 在 0.05 水平上显著相关。

表 2 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

Table 2 Soil microbial biomass C, soil microbial biomass P, soil microbial biomass C/P

培养时间	对照土微生物 生物量碳/mg·kg ⁻¹	加菌土微生物 生物量碳/mg·kg ⁻¹	对照土微生物 生物量磷/mg·kg ⁻¹	加菌土微生物 生物量磷/mg·kg ⁻¹	对照土微生物 生物量碳磷比	加菌土微生物 生物量碳磷比
第 0 d	728ab	768b	2.73e	3.67d	266a	209a
第 7 d	781ab	1018a	3.66d	8.84ab	218b	115bc
第 14 d	807a	1184a	6.02a	9.84a	137c	121b
第 21 d	659b	999a	5.34ab	8.12bc	131c	123b
第 28 d	476c	725b	4.70bc	7.46c	94d	97cd
第 35 d	373c	643b	4.37cd	7.10c	90d	91d

注:采用 Duncan 新复极差法分析,同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

的有效性受到诸如 pH、有机质、水分、土壤微生物等因素的影响^[25]。目前关于微生物与磷之间的研究主要集中于微生物对磷素有效性的影响,较少深入研究微生物对磷素各形态的影响,本研究的创新之处在于通过对微生物作用后的磷素形态进行分析,可以明确微生物作用下不同活性的磷素含量的变化^[26-27];并且,研究对象为南方酸性红壤,其中大量的铁可为铁还原菌的生长提供底物,促进铁的生物地球化学循环,此过程中可能伴随着磷素的释放,但其机理还在进一步试验中^[28]。本文研究结果显示,随着培养时间的增加,两组处理的土壤 pH 均呈现上升的趋势,且添加铁还原菌土壤 pH 高于对照土壤。土壤中交换性铝与磷的结合、土壤中硝酸盐的还原、有机质的分解均会消耗土壤中质子,这些原因均可导致土壤 pH 增大;同对照土相比,加菌土壤中大量的微生物在生长过程中会分解更多有机质同时产生还原性物质,这些还原性物质与红壤中的铁氧化物发生反应,因此加菌土壤会消耗土壤溶液中更多的质子,导致加菌土壤的 pH 大于对

照土壤,同时此作用也是 pH 与有机质之间呈负相关关系的原因^[29]。此外,土壤有机质和有效磷均呈现下降的现象,且加菌土壤的有机质含量低于对照土,其原因是微生物生长消耗土壤中碳源以及磷源,同时生成其他形态的磷,如 FeHPO₄ 等^[30],并且微生物矿化有机质,致使有机质含量降低,加菌土壤中有丰富的微生物,导致有机质被矿化的速率高于对照土,因而有机质含量较低^[31]。土壤有机质与有效磷之间呈显著正相关,陶士峰等^[32]的研究也说明土壤中有机质含量能影响有效磷的含量,从而改变土壤中磷的有效性。

土壤中磷的浓度取决于有机磷的矿化以及微生物对磷的固定这两个同时进行但方向相反过程的相对速率^[33];当微生物的碳磷比 ≥ 300 时,会出现净固持作用(固持作用速率 $>$ 矿化速率);反之,当该比值 ≤ 200 时就会出现净矿化作用。本研究表明,除第 0 d 之外,其他时段的微生物生物量碳磷比均小于 200,并且随培养时间的增加呈现降低的趋势,说明铁还原菌在生长过程中出现的净矿化作用致使加菌土壤中活

性磷含量增大。此外, resin-P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 与 D.HCl-P_i 以及 C.HCl-P_i 呈显著负相关, 说明土壤中 D.HCl-P_i 以及 C.HCl-P_i 的增加可能主要来源于活性磷的转化。加菌土壤的活性无机磷含量高于对照土壤, 而稳定态无机磷则低于对照土壤, 说明铁还原菌的添加能够减缓活性无机磷利用的速度, 同时使磷素的固化速度变慢。铁还原菌能利用 Fe(III) 进行生长繁衍^[34], 从而释放与之结合的磷素, 对磷素起到活化作用, 但在本试验中并未涉及铁的转化, 关于铁还原菌利用磷酸铁从而影响磷释放的试验目前正在进行中。

4 结论

(1) 向红壤菜地土中添加铁还原菌会增大土壤 pH, 同时使磷素活性增强; 随着培养时间增加, 土壤有机质及有效磷被消耗导致含量降低。土壤无机磷中含量最高的为稳定态无机磷, 其次为中稳定无机磷, 含量最低的为活性无机磷, 而有机磷含量为 $\text{NaOH-P}_o > \text{NaHCO}_3\text{-P}_o > \text{C.HCl-P}_o$ 。

(2) 铁还原菌能将红壤菜地土壤中固定态磷素活化成活性磷, 导致土壤中 resin-P 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 以及 NaOH-P_i 含量均高于对照土壤, NaOH-P_o 、 D.HCl-P_i 和 C.HCl-P_i 含量低于对照土壤。

(3) pH 与有机质、有效磷、活性无机磷之间均呈负相关关系; 有机质与 resin-P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 、有效磷与 resin-P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 均达到显著正相关水平; 而有机磷与 pH、有机质及有效磷之间的相关性均不显著。

参考文献:

- [1] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 763-768.
- [2] LI Jie, SHI Yuan-liang, CHEN Zhi-wen. Research on phosphorus in southern red soils of in China[J]. *Chinese Journal of Science*, 2011, 42(3): 763-768.
- [3] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对不同肥力土壤磷素的活化作用[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 60-64.
- [4] YANG Shao-qiong, DANG Ting-hui, QI Rui-sheng, et al. Activation of organic acids on phosphorus of soil with different fertility[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 60-64.
- [5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [6] ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [7] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010, 26(1): 12-14.
- [8] CHENG Ming-fang, HE Ping, JIN Ji-yun. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. *Crops*, 2010, 26(1): 12-14.
- [9] Liu J L, Liao W H, Zhang Z X, et al. Effect of phosphate fertilizer and manure on crop yield soil P accumulation and the environmental risk assessment[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(9): 1107-1114.
- [10] Dou Z, Ramberg C F, Toth J D, et al. Phosphorus speciation and sorption-desorption characteristics in heavily manured soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 93-101.
- [11] 卜玉山, 梁美英, 张广峰, 等. 不同石灰性土壤磷素形态及其有效性差异[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2011, 31(3): 193-199.
- [12] BU Yu-shan, LIANG Mei-ying, ZHANG Guang-feng, et al. Difference of phosphorus fractions and availability of different calcareous soils[J]. *Journal of Shanxi Agriculture University(Nature Science Edition)*, 2011, 31(3): 193-199.
- [13] 王娅, 吴永贵, 付天岭, 等. 酸性矿山废水对稻田土壤中磷形态及磷有效性的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(1): 138-142, 156.
- [14] WANG Ya, WU Yong-gui, FU Tian-ling, et al. Impacts of acid mine drainage on form and availability of phosphorus in paddy soil[J]. *Guangdong Agriculture Science*, 2015, 42(1): 138-142, 156.
- [15] Batty L C, Baker A J M, Wheeler B D, et al. The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel[J]. *Annals of Botany*, 2000, 86(3): 647-653.
- [16] 秦胜金, 刘景双, 王国平. 影响土壤磷有效性变化作用机理[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1012-1016.
- [17] QIN Sheng-jin, LIU Jing-shuang, WANG Guo-ping. Mechanism of phosphorus availability changing in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 1012-1016.
- [18] 王睿喆, 王沛芳, 任凌霄, 等. 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1301-1308.
- [19] WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, et al. Effects of nutrient inputs on changes of phosphorus forms and phytoplankton growth in Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1301-1308.
- [20] 宋长青, 吴金水, 陆雅海, 等. 中国土壤微生物学研究 10 年回顾[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1087-1105.
- [21] SONG Chang-qing, WU Jin-shui, LU Ya-hai, et al. Advances of soil microbiology in the last decade in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(10): 1087-1105.
- [22] Pastor N, Rosas S, Luna V, et al. Inoculation with *Pseudomonas putida* PCI2, a phosphate solubilizing rhizobacterium stimulates the growth of tomato plants[J]. *Symbiosis*, 2014, 62(3): 157-167.
- [23] 边武英, 何振立. 高效解磷菌对矿物专性吸附磷的转化及生物有效性的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2000, 26(4): 461-464.
- [24] BIAN Wu-ying, HE Zhen-li. Increasing transformation and bioavailability of specifically sorbed P by P-efficient microorganisms(PEM)[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2000, 26(4): 461-464.
- [25] Blum J D, Klaue A, Nezat C A, et al. Mycorrhizal weathering of apatite as an important calcium source in base-poor forest ecosystems[J]. *Nature*, 2002, 417(6890): 729-731.
- [26] 曹庆芹, 冯永庆, 刘玉芬, 等. 菌根真菌促进植物磷吸收研究进展[J].

- 生命科学, 2011, 23(4):407-413.
- CAO Qing-qin, FENG Yong-qing, LIU Yu-fen, et al. Advance of plant phosphorus uptake improved by mycorrhiza fungi[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2011, 23(4):407-413.
- [17] Achat D L, Baker M R, Saur E, et al. Quantifying gross mineralisation of P in dead soil organic matter: Testing an isotopic dilution method[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 163-172.
- [18] Bücking H, Heyser W. Microautoradiographic localization of phosphate and carbohydrates in mycorrhizal roots of *Populus tremula* × *Populus alba* and the implications for transfer processes in ectomycorrhizal associations[J]. *Tree physiology*, 2001, 21(2/3): 101-107.
- [19] Bünemann E K, Marschner P, McNeill A M, et al. Measuring rates of gross and net mineralisation of organic phosphorus in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(4):900-913.
- [20] 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.
- [21] Weelink S A B, Van Eekert M H A, Stams A J M. Degradation of BTEX by anaerobic bacteria: physiology and application[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2010, 9(4):359-385.
- [22] 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.
- [23] 张林, 吴宁, 吴彦鹏, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775-1782.
- ZHANG Lin, WU Ning, WU Yan-peng, et al. Soil phosphate form fraction scheme[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1775-1782.
- [24] Wang G P, Liu J S, Wang J D, et al. Soil phosphorus forms and their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China)[J]. *Geoderma*, 2006, 132:59-74.
- [25] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):260-268.
- WANG Yong-zhuang, CHEN Xin, SHI Yi. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1):260-268.
- [26] 张宇亭, 朱敏, 线岩相洼, 等. 接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22):7091-7101.
- ZHANG Yu-ting, ZHU Min, XIANYAN Xiang-wa, et al. Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22):7091-7101.
- [27] 冯固, 杨茂秋, 白灯莎, 等. VA 菌根真菌对石灰性土壤不同形态磷酸盐有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997(1):43-48.
- FENG Gu, YANG Mao-qiu, BAI Deng-sha, et al. Influence of VA fungion availability of different phosphates in calcareous soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997(1):43-48.
- [28] 林超峰, 龚骏. 嗜中性微好氧铁氧化菌研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(18):5889-5899.
- LIN Chao-feng, GONG Jun. Recent progress in research on neutrophilic microaerophilic iron(II)-oxidizing bacteria[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18):5889-5899.
- [29] 吴超, 曲东, 刘浩. 初始 pH 值对碱性和酸性水稻土微生物铁还原过程的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4):933-942.
- WU Chao, QU Dong, LIU Hao. Effect of initial pH value on microbial (Fe) reduction alkaline and acid paddy soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4):933-942.
- [30] 王亚娥, 冯娟娟, 李杰. 不同 Fe(III) 对活性污泥异化铁还原及除磷影响研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(6):993-998.
- WANG Ya-e, FENG Juan-juan, LI Jie. Phosphorous removal using dissimilatory reduction of different Fe(III) in activated sludge[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(6):993-998.
- [31] 邹德乙, 隋小慧. 有机肥和腐植酸类肥料对土壤碳循环及温室效应的影响[J]. 腐植酸, 2009, 127(2):45-46.
- ZOU De-yi, SUI Xiao-hui. Effect of organic fertilizer and humic acid fertilizer on the soil carbon cycle and greenhouse effect[J]. *Humic Acid*, 2009, 127(2):45-46.
- [32] 陶士锋, 徐晓峰, 寇太记. 土壤有机质对有效磷及水提取磷含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8):1054-1058.
- TAO Shi-feng, XU Xiao-feng, KOU Tai-ji. Effect of soil organic matter on the contents of available and water-extracted phosphorus[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8):1054-1058.
- [33] 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, 35(1):104-111.
- ZHANG Bao-gui, LI Gui-tong. Roles of soil organisms on the enhance plant availability of soil phosphorus [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1):104-111.
- [34] Lovley D R. Bug juice: Harvesting electricity with microorganisms[J]. *Nature Reviews, Microbiology*, 2006, 4(7):497-508.