



郑淇元,谢意太,卞海洋,等.溶磷菌肥对红壤磷组分及土壤肥力的影响[J].江西农业大学学报,2022,44(1):233-244.
ZHENG Q Y,XIE Y T,BIAN H Y,et al.Effects of phosphate solubilizing bio-fertilizer on phosphorus fractions and fertility of red soil[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(1):233-244.

溶磷菌肥对红壤磷组分及土壤肥力的影响

郑淇元¹,谢意太²,卞海洋³,文洁¹,刘耀辉¹,吴若鸿¹,
修玉冰¹,朱裕煌²,盛可银¹,兰子钧¹,张文元^{1*}

(1.江西农业大学 林学院/江西省森林培育重点实验室,江西 南昌 330045;2.江西省贵溪市西窑采育林场,江西 贵溪 335415;3.安徽省六安市林业发展中心,安徽 六安 237010)

摘要:【目的】施用溶磷菌肥是缓解土壤磷素累积的方式之一,对提高红壤磷素利用率有重要作用。为揭示有机肥与溶磷菌肥施用下土壤磷组分的变化,探究施加溶磷菌肥对土壤肥力的影响,为溶磷菌肥的应用提供科学指导和理论参考。【方法】设置有机肥、溶磷菌肥、溶磷菌+EM混合菌肥、空白对照为试验处理,采用盆栽的方法,每个处理各6盆,于结实期取样测定不同施肥处理下红壤中各形态磷的含量,红壤速效钾、铵态氮、硝态氮的含量,测定高粱生物量、株高等指标。【结果】溶磷菌肥、溶磷+EM菌混合肥、有机肥处理下,中等分解态磷的含量分别为 $(63.92\pm 4.30)\text{mg/kg}$ 、 $(76.62\pm 4.97)\text{mg/kg}$ 和 $(69.67\pm 2.39)\text{mg/kg}$,相比空白对照 $(30.38\pm 1.77)\text{mg/kg}$,3种施肥处理下中等易分解态磷含量显著提高。溶磷菌肥处理下土壤HCl-P含量为 $(3.62\pm 0.53)\text{mg/kg}$,较有机肥处理减少了 3.1mg/kg ,说明施溶磷菌肥相比施加有机肥能够减少土壤难溶性磷的累积;溶磷菌肥处理下红壤速效钾含量为 $(154.90\pm 2.37)\text{mg/kg}$,相比空白处理增加 55.73mg/kg ;溶磷菌肥处理下土壤铵态氮含量为 $(4.34\pm 0.10)\text{mg/kg}$,相比空白对照增加 1.58mg/kg ,土壤硝态氮为 $(0.53\pm 0.20)\text{mg/kg}$,相比空白下降 0.99mg/kg ,说明溶磷菌肥能够显著提高土壤速效养分,提高土壤肥力。【结论】红壤施加溶磷菌肥能够显著提高土壤的速效养分,施加溶磷菌肥、溶磷+EM菌混合肥、有机肥均能够显著影响土壤磷素结构,溶磷菌肥、溶磷+EM菌混合肥能够显著减少土壤难溶性磷素的累积,从而显著增加土壤磷素的利用效率,显著增加土壤养分,适合推广以缓解土壤磷沉积问题。

关键词:磷组分;有效养分;溶磷菌肥;有机肥

中图分类号:S144.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2022)01-0233-12

Effects of Phosphate Solubilizing Bio-fertilizer on Phosphorus Fractions and Fertility of Red Soil

ZHENG Qiyan¹, XIE Yitai², BIAN Haiyang³, WEN Jie¹, LIU Yaohui¹,
WU Ruohong¹, XIU Yubing¹, ZHU Yuhuang², SHENG Keyin¹,
LAN Zijun¹, ZHANG Wenyuan^{1*}

(1.Jiangxi Key Laboratory of Silviculture, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, 330045, China; 2. Xiyao Forest Farm of Guixi City, Guixi, Jiangxi 335415, China; 3. Forestry Development Center of Liuan, Anhui 237010, China)

收稿日期:2020-08-16 修回日期:2021-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(31560204)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(31560204)

作者简介:郑淇元, orcid.org/0000-0001-5610-2207, zqy1182372132@outlook.com; *通信作者:张文元, 副教授, 博士, 主要从事土壤养分循环及微生物生态研究, orcid.org/0000-0001-9514-4813, zhangwenyuan@jxau.edu.cn。

Abstract: [Objective] AS one of the ways to alleviate the accumulation of phosphorus in soil, the application of phosphate solubilizing plays an important role in improving the phosphorus utilization rate of red soil. Through revealing the changes of soil phosphorus fractions under the addition of organic fertilizer or phosphate solubilizing bio-fertilizer and explore the effects of phosphate solubilizing bio-fertilizer on soil fertility, this study aims to provide scientific guidance and theoretical reference for the application of phosphate solubilizing bio-fertilizer. [Method] This study adopted the method of pot experiment and took organic fertilizer, phosphate solubilizing bio-fertilizer, phosphate solubilizing + effective microorganisms (EM) bacteria mixed fertilizer and a blank contrast group without fertilizer as experimental treatments. Each treatment was conducted on six pots. Samples were collected during maturing stage. The content of all phosphate species, the content of available potassium, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen in red soil, and the sorghum biomass, plant height were determined. [Result] The results showed that the contents of moderately labile P were (63.92 ± 4.30) mg/kg, (76.62 ± 4.97) mg/kg and (69.67 ± 2.39) mg/kg, respectively, under the treatment of phosphate solubilizing bio-fertilizer, phosphate solubilizing + EM bacteria mixed fertilizer and organic fertilizer. The contents of moderately labile P were (30.38 ± 1.77) mg/kg in the blank contrast group. Compared with that of the blank contrast group, the contents of moderately labile P under the three fertilization treatments were increased significantly. The content of HCl-P in soil treated with phosphate solubilizing bio-fertilizer was (3.62 ± 0.53) mg/kg. The content of HCl-P treated with phosphate solubilizing bio-fertilizer was 3.1 mg/kg lower than that treated with organic fertilizer, indicating that the application of phosphate solubilizing bio-fertilizer reduced the accumulation of insoluble phosphorus in soil compared with organic fertilizer. The content of available potassium in red soil treated with phosphate solubilizing bio-fertilizer was (154.90 ± 2.37) mg/kg, an increase of 55.73 mg/kg compared with that of the blank contrast group. Under the treatment of phosphate solubilizing bio-fertilizer, the content of soil ammonium nitrogen was (4.34 ± 0.10) mg/kg, an increase of 1.58 mg/kg compared with that of the blank contrast group, and the content of soil nitrate nitrogen was (0.53 ± 0.20) mg/kg, a decrease of 0.99 mg/kg compared with that of the blank contrast group. These results suggested that phosphate solubilizing bio-fertilizer could significantly improve soil available nutrients and soil fertility. [Conclusion] The application of phosphate solubilizing bio-fertilizer in red soil can significantly improve the soil available nutrients. The application of phosphate solubilizing bio-fertilizer, phosphate solubilizing + EM bacteria mixed fertilizer and organic fertilizer can significantly affect the soil phosphorus structure. Phosphate solubilizing bio-fertilizer and phosphate solubilizing + EM bacteria mixed fertilizer can significantly reduce the accumulation of soil insoluble phosphorus, increase the utilization efficiency of soil phosphorus as well as increase soil nutrients, thus they should be promoted to alleviate the problem of soil phosphorus deposition.

Keywords: soil phosphorus fractions; available nutrients; phosphate-solubilizing bacteria; organic fertilizer

【研究意义】磷素是植物生长发育所需的大量元素之一^[1],南方地区为追求高产稳产大量施用磷肥,带来了一系列土壤问题:土壤次生盐渍化、土壤养分失衡、土传病虫害加剧等^[2],土壤健康受到严重威胁,也造成了土壤磷素的有效性降低^[3],部分磷素随水循环进入江河湖泊等生态系统,引发河流富营养化^[4]。部分难利用磷素被吸附固定在土壤中,土壤磷组分及养分随之发生改变^[5]。因此,减少磷肥的施用是避免土壤环境继续恶化的必要途径。【前人研究进展】近些年,为寻找减少磷肥施用的方法,解决难利用磷素在土壤中累积的问题,溶磷微生物的开发利用成为研究热点,溶磷菌是能够将土壤中难溶磷酸盐转化为可利用形态的一类土壤微生物^[6],能够有效提高土壤中磷素的利用率。目前研究主要集中在筛选^[6-9]、改良应用^[10-11]、配施^[12-13]等方面。【本研究切入点】溶磷微生物促进土壤磷素的矿化过程,其溶磷过程受土壤有机质、土壤微生物种群影响^[12-15],能够改变土壤养分结构^[13]、分泌植物生长素从而促进植物的生长^[14]。对溶磷菌溶磷能力及磷素矿化的研究有很多,溶磷菌对土壤磷组分的影响却鲜有报道。【拟解决的关键

问题】研究采用盆栽试验的方式,分析了施肥条件下土壤各形态磷素的含量及速效氮、磷、钾等指标的含
量,探究了不同溶磷菌肥料处理下土壤磷组分变化及土壤难溶性磷的降解效果,以期对溶磷菌在提高土
壤磷素利用效率方面的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

有机肥:以菜枯饼、食用菌渣、牛粪为堆肥材料(菜枯饼:食用菌渣:牛粪=2:3:5)制作而成,由宜春辉
煌科技有限责任公司生产。

溶磷菌肥:供试溶磷菌由江西省森林培育重点实验室张文元课题组前期在土壤中筛选获得,经16S
rDNA序列相似性分析确定为伯克霍尔德菌(*Burkholderia* sp.)。在有机肥的基础上,添加供试溶磷菌制
成溶磷菌肥,有效活菌数 ≥ 0.2 亿/g,由宜春辉煌科技有限责任公司生产。

溶磷菌+EM混合菌肥:在有机肥的基础上,同时添加EM菌和溶磷菌,堆肥发酵制成混合菌肥。EM
菌即有益微生物群,由光合细菌群、乳酸菌群、酵母菌群、放线菌群、丝状菌群等为主的10个属80余种微
生物组成。

供试植物:高粱(京糯三号)种子。

供试土壤:红壤来自江西农业大学中药园。土壤基本性质:pH5.55,有效磷(AP)2.94 mg/kg,速效钾
(AK)97.21 mg/kg,土壤铵态氮(NH_4^+-N)2.76 mg/kg,土壤硝态氮(NO_3^--N)1.51 mg/kg。

1.2 盆栽试验

育苗:高粱种子表面消毒,用无菌蒸馏水冲洗3次,取颗粒饱满种子转入25℃恒温箱催芽。

设置处理:添加磷酸三钙作为磷源,磷源按1:1 000的比例,称量好后与1.5 kg土壤均匀混合,每盆装
2.5 kg土壤。依照处理分别添加有机肥(YJ)、溶磷菌肥(RL)、溶磷菌+EM复合菌肥(EMR),设置空白
(CK),每处理重复6次,共计24盆。

移栽:每盆移入4棵高粱种子,保持土壤湿度为65%~75%,盆栽底部设置托盘,收集浇水流失的土
壤,定期回填。出苗后温室种植,生长期间不施肥。

定期测量株高,盆栽试验在江西农业大学中药园进行,盆栽进行时间在2020年9—12月,浇水间隔
为一周。

1.3 样品采集与测定

土样采取破坏性取样,挖取整株高粱,105℃杀青后在75℃下烘干,测定植株干质量。采集植株根
际土壤,过2 mm筛后,自然风干,用于测定相关土壤指标。

土壤磷组分采用Sui等^[16]土壤磷素分级法,土壤速效磷采用0.5 mol/L的 NaHCO_3 溶液浸提,取滤液用
钼锑比色法测定。土壤速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计测定,土壤铵态氮、硝态氮使用全自动间断
化学分析仪(AMS SmartChem 200)分析测定。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2016、IBM SPSS 22.0软件进行数据整理与统计分析,数据作图使用Origin 2018,
采用Canoco5.1进行RDA制图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对高粱生长量及株高的影响

由图1a可知,施用肥料与不施肥料之间存在极大差异。有机肥(YJ)、溶磷菌(RL)、溶磷+EM混合菌
肥(EMR)3种施肥处理下的高粱生物量均显著大于CK,分别为CK的16.9倍、23.8倍和21.9倍($P<0.05$)。
YJ与RL处理下的高粱生物量均显著大于EMR处理($P<0.05$)。

从株高来看,高粱移栽初期,施肥处理与不施肥处理,株高差异显著(图1b)。株高排序由高到低依
次为RL、YJ、EMR、CK,移栽一段时间后,YJ处理下的高粱株高最高。栽培期间,RL处理株高增长呈现
慢-快-慢的趋势,YJ处理下呈现快-慢的趋势,EMR处理株高增长较为平缓,表明有机肥与溶磷菌肥有
效促进了高粱生长,提高生长速率。

这是由于磷对植物生长发育有重要作用^[17],参与合成DNA、RNA指导植物合成蛋白质^[18],促进光合作用提高根系活力^[19]。在长期磷限制条件下,提高土壤磷含量能够显著提高植物的生长。施加有机肥、溶磷菌肥能够提高土壤P含量,促进土壤磷的生物固持,缓解土壤磷限制条件^[20]。

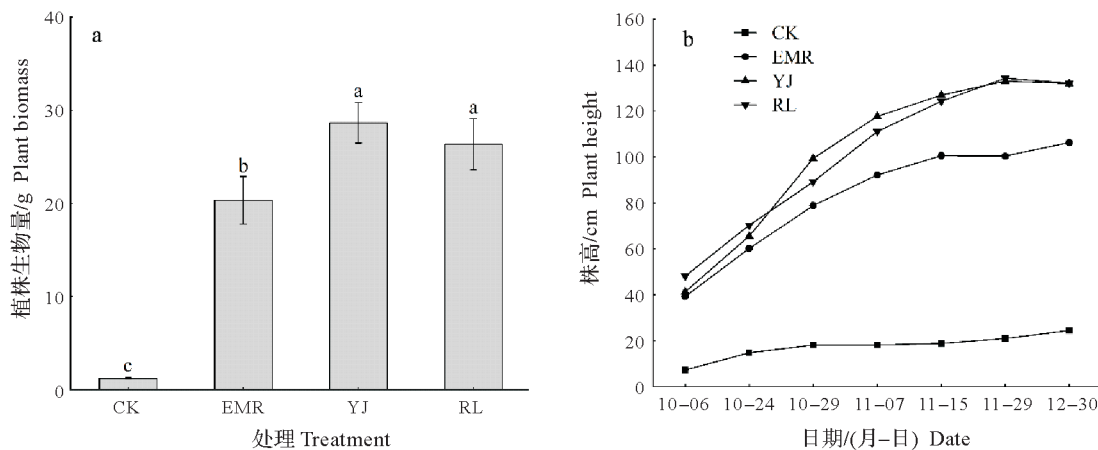


图1 不同施肥处理对高粱生物量及株高的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on *Sorghum bicolor* biomass and plant height

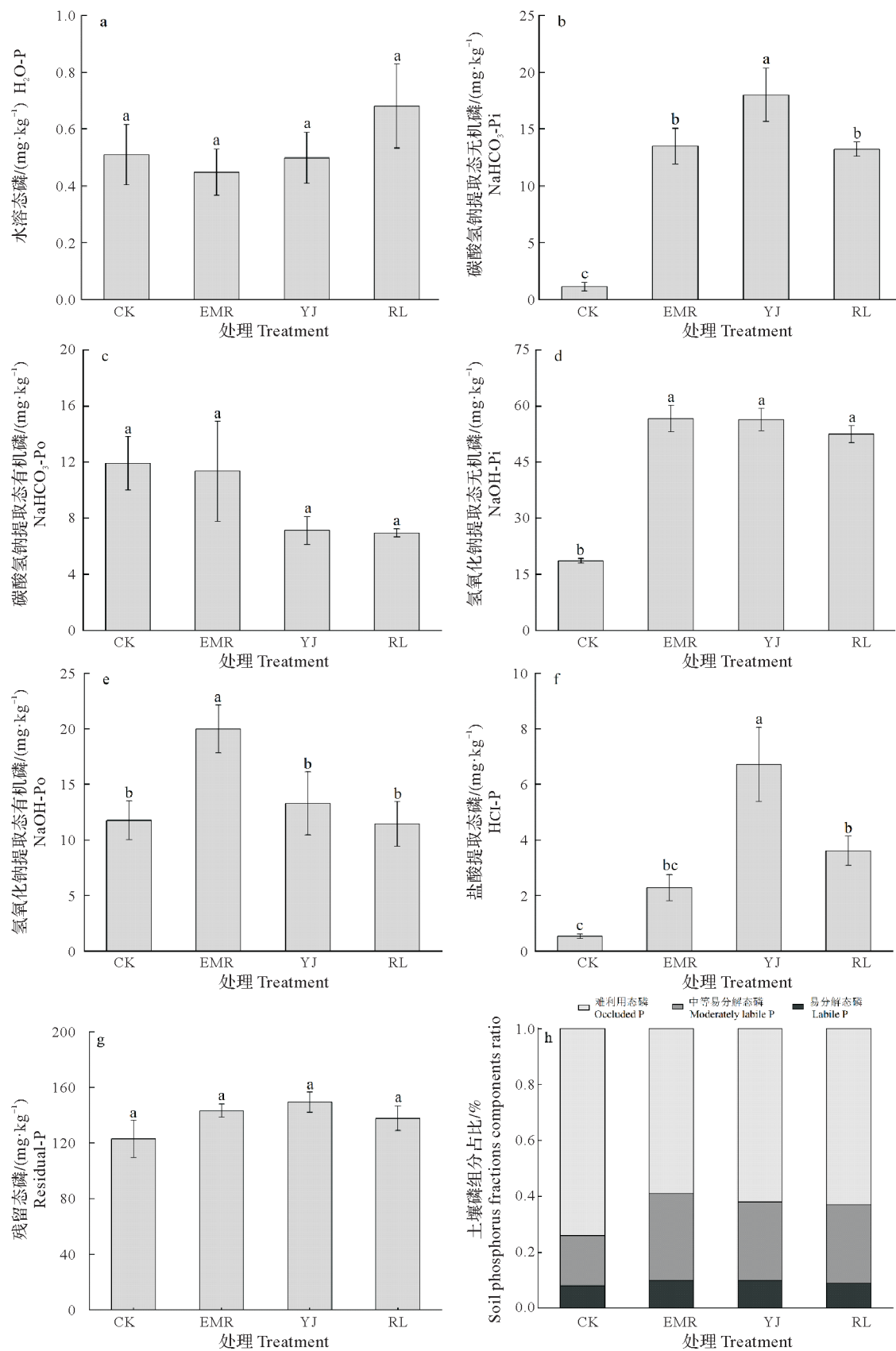
2.2 不同处理对土壤磷组分的影响

H_2O-Pi 、 $NaHCO_3-Pi$ 、 $NaOH-Pi$ 、 $HCl-Pi$ 为无机磷, $NaHCO_3-Po$ 、 $NaOH-Po$ 、 $Residual-Po$ 有机磷, $NaHCO_3-Pi$ 、 $NaHCO_3-Po$ 能够及时补充转化被植物吸收的 H_2O-Pi ^[17]。也可以将以上不同形态的磷依据有效性划分为易分解态磷(H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 、 $NaHCO_3-Po$)、中等易分解态磷($NaOH-Pi$ 、 $NaOH-Po$)、难分解态磷($HCl-P$ 、 $Residual-P$)^[21]。分析土壤磷组分能够用于预测土壤磷的生物有效性^[16]。

2.2.1 易分解态磷 3种土壤易分解态磷中, $NaHCO_3-Pi$ 的含量受施肥处理的影响最显著。由图2a及图2c不难发现:各处理下 H_2O-Pi 、 $NaHCO_3-Po$ 的含量没有显著差异。图2b表明EMR、YJ、RL处理的 $NaHCO_3-Pi$ 的含量远大于CK,是CK的11~15倍,而YJ对 $NaHCO_3-Pi$ 的提升效果最优,YJ处理 $NaHCO_3-Pi$ 相比EMR、RL分别显著增加了36%、30%($P<0.05$)。这说明3种处理施入土壤能够显著增加土壤 $NaHCO_3-Pi$,从而使土壤易分解态磷显著增加,有机肥的效果最好。这与宋佳明等^[27]的研究结果一致。原因可能为有机肥腐解及溶磷微生物溶磷代谢产生有机酸,与土壤中金属阳离子螯合,释放出磷酸根离子^[22-23]。有机肥堆肥过程中也能够产生有大量有效磷。

2.2.2 中等易分解态磷 施肥处理能够提高 $NaOH-Pi$ 的含量,对有机态中等易分解态磷影响不显著(图2d,图2e)。特别的,由图2e可知,EMR处理则显著提高了 $NaOH-Po$,相比CK提高了约70%($P<0.05$)。这说明3种肥料处理能够提高中等易分解磷的含量,溶磷+EM混合菌肥提高土壤中等易分解态磷含量的效果最好。有机肥的有机成分降解产生植酸等含磷有机质,这可能是中等易分解态有机磷增加的原因,EM菌剂能够提高土壤微生物多样性,促进了3种肥料中有机质降解产生植酸等含磷有机物^[24],从而显著增加土壤中等易分解态有机磷。有机质分解还会产生大量有机酸使土壤pH降低^[25],提高土壤铁铝等金属阳离子的吸附活性^[26],活化的铁铝阳离子吸附土壤游离磷酸根离子,从而提高了土壤中易分解态无机磷的含量。

2.2.3 难分解态磷 施加溶磷菌能够缓解土壤难溶态磷的累积。研究结果发现3种施肥处理下土壤 $HCl-Pi$ 的含量有显著的不同程度的增加,其中EMR处理下 $HCl-Pi$ 含量相比其他施肥处理增量最小,含量为 (2.29 ± 0.47) mg/kg。有机肥处理下 $HCl-Pi$ 含量是EMR处理的2.9倍(图2f)。土壤 $Residual-P$ 的含量几个处理与CK间没有显著差异(图2g)。这说明单施有机肥会加剧土壤磷素累积,添加溶磷菌处理的肥料能够缓解。这可能是由于肥料中的有机质施入土壤后不能完全分解,致使有机质中含有的磷素不能完全释放,导致土壤磷素累积,添加溶磷菌后,溶磷菌代谢活动主动分解了土壤中累积的难溶态磷,减少了磷素累积,含有有益微生物的EM菌剂增加了土壤微生物多样性,促进溶磷菌的代谢活动。



YJ,RL,EMR,CK分别代表有机肥、溶磷菌、溶磷+EM混合菌肥、空白,不同字母表示在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下差异显著。

YJ, RL, EMR, CK stand for organic fertilizer, phosphorus soluble bacteria, EM mixed phosphorus soluble bacteria, blank, different letters mean significant difference at the significance level of $\alpha=0.05$.

图2 不同施肥处理对土壤磷组分的影响

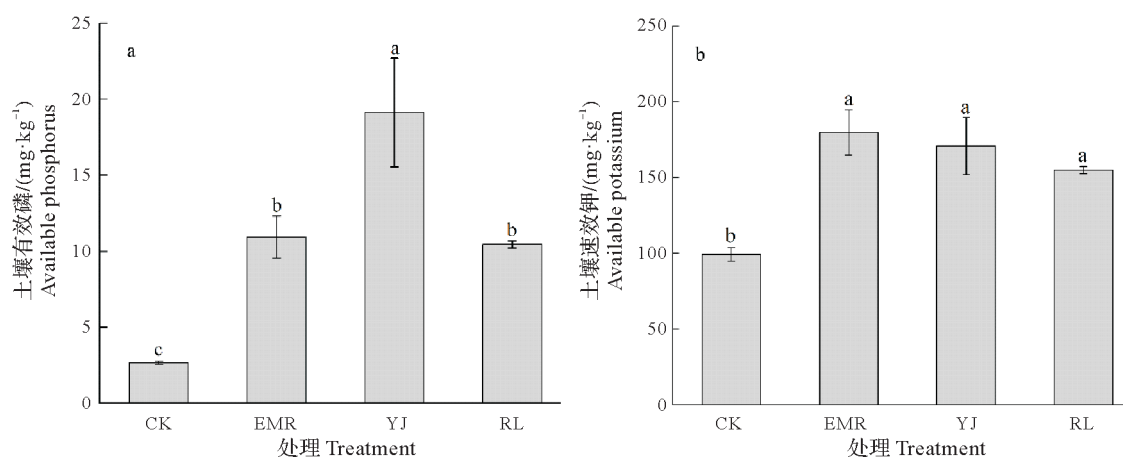
Fig.2 Effects of different fertilization treatments on soil phosphorus fractions

综上,有机肥、溶磷菌肥、溶磷+EM混合菌肥对土壤易分解态磷、中等易分解态磷、难溶态磷均有较大程度的改变。有机肥全面增加3种形态的磷含量,溶磷菌肥、溶磷+EM混合菌肥能够提高土壤易分解态磷、中等易分解态磷,在提高土壤磷素利用效率方面相比有机肥效果更优越。

2.3 不同处理对土壤速效氮(NH_4^+-N , NO_3^--N)、有效磷(AP)、速效钾(AK)的影响

从图3a可知,有效磷的含量由大到小依次为YJ、RL、EMR、CK,最大值为YJ处理下的含量(19.11 ± 3.58)mg/kg,最小值为CK处理下的含量(2.65 ± 0.11)mg/kg。EMR与RL处理下,有效磷的含量没有显著差异($P > 0.05$),但两者均显著大于CK($P < 0.05$)。这说明3种处理均能够显著提高土壤有效磷含量,其中有机肥单施提高有效磷含量的效果最好。有机肥提高土壤有效磷主要有3种途径^[27],有机肥本身含有丰富的有效磷,能够直接供给植物吸收利用^[28];另外有机肥在土壤中分解的过程中产生有机酸与土壤中金属阳离子发生螯合,从而释放出磷酸根离子^[22];有机肥能够提高土壤微生物活性,促进土壤有机磷转化^[29]。溶磷菌肥是以有机肥为基质添加溶磷菌剂发酵而成,肥料中含有大量单一类群的微生物,施入土壤后改变土壤微生物群落结构,可能会抑制对土壤原生微生物的代谢活动。

由图3b可以看出,EMR、YJ、RL 3种施肥处理下,土壤速效钾的含量分别为(179.67 ± 14.93)mg/kg、(170.82 ± 18.74)mg/kg和(154.90 ± 2.37)mg/kg,与CK相比含量显著增加($P < 0.05$)。由图4可以看出,EMR与RL处理的铵态氮含量存在显著差异,EMR、YJ、RL 3种处理的土壤铵态氮含量均显著高于CK,相比CK分别增加68.1%、61.8%和57.2%($P < 0.05$),EMR处理下铵态氮含量显著大于RL($P < 0.05$)。这说明3种施肥处理改变了土壤氨化作用与硝化作用的平衡,促进土壤氨化作用,减弱土壤硝化作用。有机肥在溶磷菌和EM菌配合发酵后施入土壤,能够提高土壤铵态氮的作用。但是土壤的硝态氮含量相比CK显著减少($P < 0.05$),硝态氮的含量减少了50.0%~60.0%。土壤中的有机氮经过氨基化、氨化过程转化成 NH_4^+-N ,铵离子大部分通过亚硝化、硝化微生物的作用氧化成 NO_3^--N ^[30-31]。另外植物与微生物在吸收同化 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 过程中存在竞争关系^[32]。碳氮比越高,土壤硝化作用越低^[33]。施肥处理下,硝化作用减弱,可能是由于有机肥的加入,使得土壤碳氮比提高,抑制土壤硝化作用的进行^[33]。施加菌肥导致土壤微生物间的竞争关系加剧可能也是硝化作用减弱的原因^[13]。施肥处理下速效钾含量显著增加,这与闫洪奎等^[34]研究结果一致。



YJ,RL,EMR,CK分别代表有机肥、溶磷菌、溶磷+EM混合菌肥、空白,不同字母表示在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下差异显著。

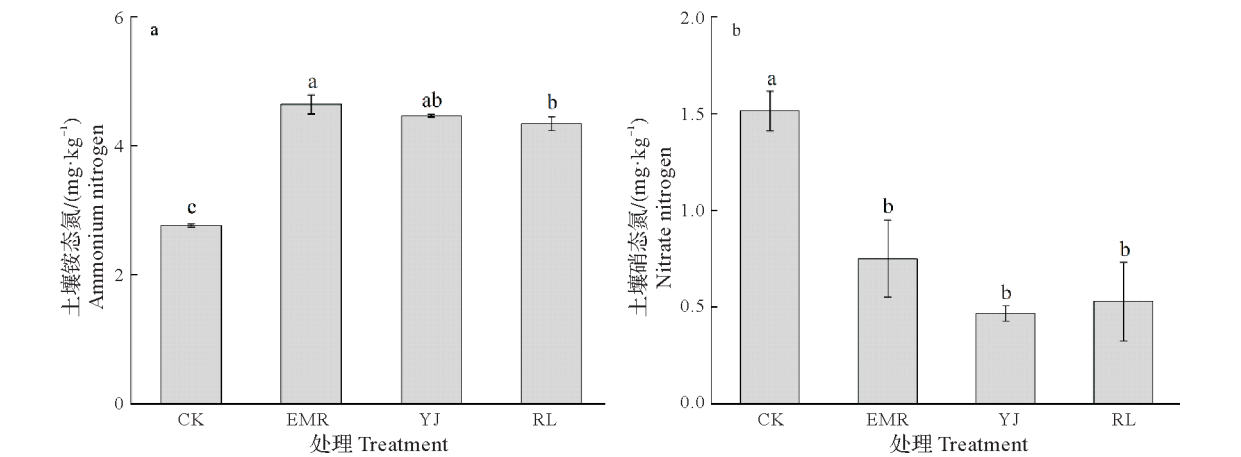
YJ,RL,EMR,CK stand for organic fertilizer, phosphorus soluble bacteria, EM mixed phosphorus soluble bacteria, blank, different letters mean significant difference at the significance level of $\alpha=0.05$.

图3 不同施肥处理对土壤有效磷、速效钾含量的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on soil available P and available K contents

2.4 植物生物量、土壤有效养分与土壤磷组分之间的相关性

各形态磷素与HCl-P的相关性分析发现, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 与HCl-P呈显著的正相关关系,拟合系数 $R^2=0.564$ (图5b)。其余磷组分与磷组分相关性较弱。这可能是土壤HCl-P经土壤微生物代谢后会转化为 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$,在土壤中代谢转化平衡会随着代谢底物的增加而向 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 方向转移。



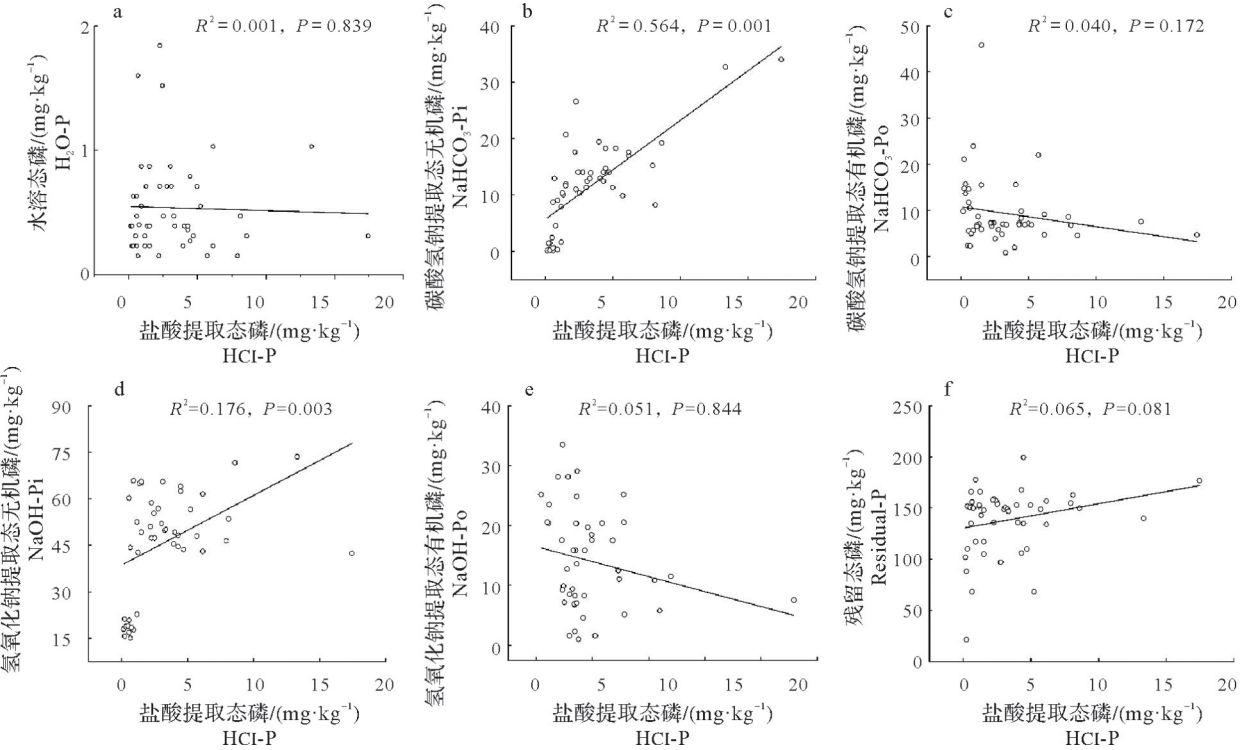
YJ,RL,EMR,CK 分别代表有机肥、溶磷菌、溶磷+EM 混合菌肥、空白,不同字母表示在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下差异显著。

YJ,RL,EMR,CK stand for organic fertilizer,phosphorus soluble bacteria,EM mixed phosphorus soluble bacteria,blank ,different letters mean significant difference at the significance level of $\alpha=0.05$.

图 4 不同施肥处理对土壤铵态氮、硝态氮的影响

Fig.4 Effects of different fertilization treatments on ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in soil

冗余分析表明(图 6),高粱生物量、土壤速效钾、土壤铵态氮和有效磷与 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 NaOH-Pi 、 HCl-P 具有正相关关系,高粱生物量与 NaOH-Pi 相关性最高,土壤速效钾与 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 相关性最高,土壤铵态氮和有效磷与 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 相关性最高,磷组分能解释 69.3% 的总变异,其中 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 对解释土壤速效养分、植株生物量的影响最显著,能够解释 57.5% 总变异($F=29.8;P<0.05$)。由图 6 b 可以看出磷组分的变化对 YJ、EMR、RL 3 类样本影响程度最大。这说明 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 对土壤速效养分的关联度较大, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 的增加与土壤部分速效养分的增加存在着协同机制。

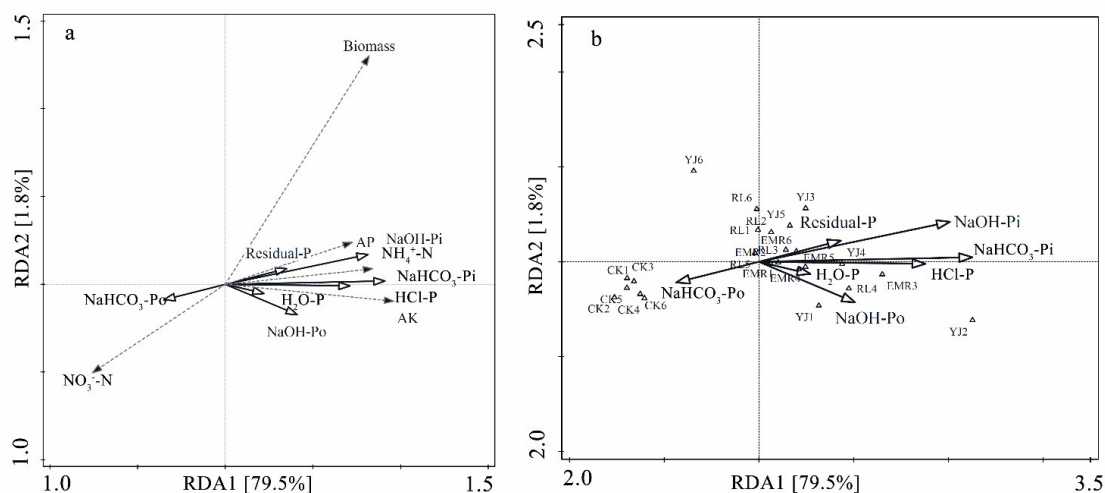


图中直线代表拟合曲线, R^2 为拟合系数。

The line in the figure represents the fitting curve, R^2 is the fitting coefficient.

图 5 难溶态 HCl-P 与其他形态磷的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between different phosphorus fractions and HCl-P



AP: 土壤有效磷; AK: 土壤速效钾; NO_3^- -N: 土壤硝态氮; NH_4^+ -N: 土壤铵态氮; H_2O -P, NaHCO_3 -Pi, NaHCO_3 -Po, NaOH -Pi, NaOH -Po, HCl -P, Residual-P 为不同土壤磷组分。

AP: soil available phosphorus; AK: soil available potassium; NO_3^- -N: ammonium-nitrogen, NH_4^+ -N: nitrate-nitrogen content; H_2O -P, NaHCO_3 -Pi, NaHCO_3 -Po, NaOH -Pi, NaOH -Po, HCl -P, Residual-P refers to phosphorus components in different soils.

图6 磷组分与土壤有效养分、高粱生物量冗余分析

Fig.6 Sequence diagram of soil available nutrients and sorghum biomass under different fertilization treatments

3 讨论

3.1 溶磷菌肥在非原位条件下难以发挥最优降解效果

研究表明溶磷菌在真实土壤环境下对土壤难溶性磷难以发挥最佳降解作用,需要搭配EM菌等有益菌等。这与韩亚杰等^[14]的研究结果一致。这可能是土壤微生物的代谢受土壤微生物环境、理化性质等多种环境条件影响,土壤环境的异质性使不同性质的土壤有不同的优势菌株^[35],这就导致提取自特定土壤环境的微生物接种在性质不同的土壤中无法保持在原位环境下的代谢速率^[36]。EM菌含有大量有益菌株及物质,能够提高土壤微生物多样性,促进了溶磷微生物的代谢作用,能够对溶磷菌肥起到增效作用。

土壤微生物的分布受土壤生物和非生物因素的影响,表现出强烈的异质性与复杂性^[37]。合适的微生物生存条件包括但不限于友好的土壤微生物群落关系、充足的土壤微生物代谢底物等。在溶磷微生物研究中,为溶磷微生物营造接近原位的生存条件有利于充分发挥土壤溶磷微生物的溶磷作用,减少土壤磷素累积提高磷素利用效率。

3.2 有机肥施入加剧磷素累积

研究表明施用有机肥会加剧土壤难溶性磷素累积,施加溶磷菌肥则能够缓解磷素累积问题,这与杨振兴等^[38]的研究结果一致。这可能是由于南方红壤地区土壤侵蚀作用强烈,土壤磷素流失严重^[39],磷成为限制红壤地区植物生长的重要因子。在低磷条件下植物根系能够分泌有机酸、磷酸酶等物质促进难溶性磷转化^[40]。施用有机肥化肥等使土壤有效磷在短时间内迅速增加,打破了低磷环境,抑制了植物根系溶磷作用,易导致土壤难溶性磷的累积。施用溶磷菌肥能够弥补植物对土壤难溶性磷的溶解作用^[3]。

土壤中植物能够利用的磷一部分来源于肥料本身含有的速效磷^[27],另一部分来源于 HCl -P 的转化^[41-42]。溶磷菌通过酸解作用、酶解作用等途径转化土壤难溶性磷 HCl -P^[43-44]。在有机肥中配施溶磷菌的施肥方式有利于利用土壤中闭蓄态磷素,扩充植物磷素来源途径。

3.3 NaHCO_3 -Pi 与土壤速效氮、磷、钾具协同效应

冗余分析结果表明有机肥、溶磷菌肥、溶磷菌+EM复合菌肥处理下 NaHCO_3 -Pi 与铵态氮、有效磷、速效钾表现出协同效应。这可能与有机肥的分解有关,有机肥含有大量的有机质在短期内能够全面提升土壤速效养分及土壤碳氮比例^[13,40,45]。提升土壤微生物的活性^[46-47],溶磷菌的添加也提高了土壤溶磷的效

率。有机肥与溶磷菌肥的混施在土壤中形成了有机质-微生物体系,这使土壤微生物通过分解有机质来提高土壤速效养分。

有效氮、有效磷等速效养分在土壤中能够被植物根系直接吸收,是植物从土壤中获取生物代谢所需氮、磷的主要形态^[48]。土壤氮、磷、钾有效性与土壤磷组分等土壤环境因子的变化密切相关^[42,49]。

综上所述,盆栽试验结果表明土壤施加溶磷菌肥能够有效提高土壤磷素的利用效率,减少土壤磷素累积,提高土壤的速效氮、磷、钾的含量。野外环境复杂多变,溶磷菌降解土壤难溶态磷的机理还有待研究,试验结果中施肥处理下土壤硝态氮含量下降的现象也需要进一步深入探究。

4 结论

(1)试验施用的溶磷微生物肥料能够显著促进土壤难溶态磷的转化,从而显著提高土壤磷素利用率,配合有机肥施用则能够缓解有机肥造成的磷素沉积。

(2)试验施用的溶磷菌肥对土壤速效氮、磷、钾养分有显著的促进作用,适合替代化肥、有机肥用来改善土壤肥力。

致谢:中央财政林业科学推广示范资金项目(JXTG[2020]25号)、江西省创新专项基金项目(YC2020-S255)和江西农业大学大学生创新创业训练计划项目(202110410111)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 刘建玲,张福锁,杨奋翮.北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):179-186.
LIU J L, ZHANG F S, YANG F H. Fractions of phosphorus in cultivated and vegetable soils in northern China[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2000, 6(2): 179-186.
- [2] 秦海娟,顿建明,李静,等.不同施肥模式对蒜苗生长及土壤性状的影响[J].甘肃农业大学学报,2020,55(5):47-55.
QIN H J, XIE J M, LI J, et al. Effects of different fertilization modes on growth and soil properties of green garlic[J]. Journal of Gansu agricultural university, 2020, 55(5): 47-55.
- [3] 李宁,王珊珊,马丽丽,等.两株高效溶磷菌的溶磷能力及其对玉米生长和红壤磷素形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(2):275-283.
LI N, WANG S S, MA L L, et al. Phosphate-solubilizing capacity of two bacteria strains and its effect on maize growth and the phosphorus fractions in red soil[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2021, 27(2): 275-283.
- [4] 刘艳萍,肖雅倩,张颖.洞庭湖流域人类活动净磷输入及其空间分布[J].应用生态学报,2019,30(7):2404-2414.
LIU Y P, XIAO Y J, ZHANG Y. Spatial distribution of the net anthropogenic phosphorus input (NAPI) to the Dongting Lake basin China[J]. Chinese journal of applied ecology, 2019, 30(7): 2404-2414.
- [5] 王晓红,柳小琪,吴璐璐,等.3种磷肥在北方6种土壤中的吸持固定特点[J].河南科技大学学报(自然科学版),2020,41(4):75-81.
WANG X H, LIU X Q, WU L L, et al. Adsorption and fixation characteristics of three kinds of phosphate fertilizers in six soils in northern China[J]. Journal of Henan university of science and technology (natural science), 2020, 41(4): 75-81.
- [6] 赵小蓉,林启美,李保国.溶磷菌对4种难溶性磷酸盐溶解能力的初步研究[J].微生物学报,2002,42(2):236-241.
ZHAO X R, LIN Q M, LI B G. The solubilization of four insoluble phosphates by some microorganisms[J]. Acta microbiologica Sinica, 2002, 42(2): 236-241.
- [7] 关晓辉,魏德洲,戚长谋.两种芽孢杆菌脱磷行为的比较[J].长春科技大学学报,1998,28(1):98-101.
GUAN X H, WEI D Z, QI C M. Comparison of the dephosphorization performance of *Bacillus pumilus* and *Bacillus subtilis*[J]. Journal of Changchun university of science and technology, 1998, 28(1): 98-101.
- [8] 王光华,赵英,周德瑞,等.解磷菌的研究现状与展望[J].生态环境,2003,12(1):96-101.
WANG G H, ZHAO Y, ZHOU D R, et al. Review of phosphate-solubilizing microorganisms[J]. Ecology and environment, 2003, 12(1): 96-101.
- [9] 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 B G, LI G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus[J]. Acta pedologica Sinica, 1998, 35(1): 104-111.
- [10] 陈俊,陆俊锟,康丽华,等.红树林溶磷菌的初步鉴定、溶磷能力测定及其优化培养[J].微生物学通报,2009,36(8):

- 1183-1188.
- CHEN J, LU J K, KANG L H, et al. Primary identification, capability of phosphate-solubilization and optimization of medium of some microorganism from mangrove[J]. *Microbiology*, 2009, 36(8): 1183-1188.
- [11] 郝晶, 洪坚平, 刘冰, 等. 石灰性土壤中高效解磷细菌菌株的分离、筛选及组合[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(3): 404-408.
- HAO J, HONG J P, LIU B, et al. Isolation screening and combination of highly-effective phosphorus solubilizing bacterial strains in calcareous soil[J]. *Chinese journal of applied & environmental biology*, 2006, 12(3): 404-408.
- [12] 刘芳, 韩丹, 赵铭钦, 等. 微生物菌剂配施腐殖酸钾对植烟土壤改良及烤烟经济效益的影响[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(7): 1064-1069.
- LIU F, HAN D, ZHAO M Q, et al. Effects of application of microbial agents along with humic acid potassium on tobacco-planted soil and economic benefit of flue-cured tobacco[J]. *Acta agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(7): 1064-1069.
- [13] 王志康, 徐子恒, 陈紫云, 等. 有机肥和解磷固氮菌配施对缺碳黄棕壤养分特性的协同效应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3413-3423.
- WANG Z K, XU Z H, CHEN Z Y, et al. Synergistic effects of organic fertilizer coupled with phosphate-solubilizing and nitrogen-fixing bacteria on nutrient characteristics of yellow-brown soil under carbon deficiency[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2020, 31(10): 3413-3423.
- [14] 韩亚杰, 李玉娇, 吕晓晨, 等. 溶磷菌组合 WF542 的筛选及多菌剂联合对辣椒的促生作用[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 100-105.
- HAN Y J, LI Y J, LV X C, et al. Screening of phospholytic bacterium combination wf542 and combination of multi-bacterial agents on growth of pepper[J]. *Science and technology of food industry*, 2020, 41(24): 100-105.
- [15] 张宇, 王海新, 史普想, 等. 不同类型有机肥+EM 菌对花生光合特性、土壤养分和产量的影响[J]. *花生学报*, 2020, 49(3): 74-78.
- ZHANG Y, WANG H X, SHI P X, et al. Effects of different types of manure+em bacteria on photosynthetic characteristics, soil nutrients and yield of peanut[J]. *Journal of peanut science*, 2020, 49(3): 74-78.
- [16] SUI Y, THOMPSON M L, SHANG C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids[J]. *Soil science society of America journal*, 1999, 63(5): 1174-1180.
- [17] 王亚茹, 林鑫宇, 惠昊, 等. 杨树人工林类型对土壤磷组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1549-1556.
- WANG Y R, LIN X Y, HUI H, et al. Effects of poplar plantation types on soil phosphorus fractions[J]. *Chinese journal of ecology*, 2021, 40(6): 1549-1556.
- [18] 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 等. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因子[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 159-166.
- MA Y Z, ZHONG Q L, JI B J, et al. Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China[J]. *Chinese journal of plant ecology*, 2015, 39(2): 159-166.
- [19] 孙杰, 王立华, 成七星, 等. 磷肥对玉米杂交制种增产提质的生理作用[J]. *作物杂志*, 2003(1): 27-29.
- SUN J, WANG L H, CHENG Q X, et al. The physiological effect of phosphate fertilizer on the yield and quality improvement of maize hybrid seed production[J]. *Crops*, 2003(1): 27-29.
- [20] 方晰, 陈金磊, 王留芳, 等. 亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(12): 1-12.
- FANG X, CHENG J L, WANG L F, et al. Research progress on soil phosphorus availability and its influential factors in subtropical forests[J]. *Journal of central south university of forestry & technology*, 2018, 38(12): 1-12.
- [21] MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYAKOV Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils[J]. *Catena*, 2017, 149: 385-393.
- [22] FOX T R, COMERFORD N B, MCFEE W W. Phosphorus and aluminum release from a spodic horizon mediated by organic acids[J]. *Soil science society of America journal*, 1990, 54(6): 1763-1767.
- [23] 王雪娜, 张芮瑞, 周少奇, 等. 不良环境解磷微生物研究进展[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(7): 8-17.
- WANG X L, ZHANG B R, ZHOU S Q, et al. Research progress of phosphate-solubilizing microorganisms in bad environments[J]. *Journal of Henan agricultural sciences*, 2020, 49(7): 8-17.
- [24] 袁可能. 土壤化学[M]. 北京: 农业出版社, 1990.

- YUAN K N. Soil chemistry[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1990.
- [25] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 303-313.
- LIU K L, LING D M, HUANG Q H, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments[J]. Scientia agricultura Sinica, 2014, 47(2): 303-313.
- [26] 王敬国. 植物营养的土壤化学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.
- WANG J G. Soil chemistry of plant nutrition[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Publishing House, 1995.
- [27] 宋佳明, 蔡红光, 张秀芝, 等. 施用不同种类有机肥对黑土磷素含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(6): 707-712.
- SONG J M, CAI H G, ZHANG X Z, et al. Effects of different organic manures application on phosphorus content in black soil[J]. Journal of Jilin agricultural university, 2019, 41(6): 707-712.
- [28] 尹杰. 不同有机肥与化肥配施对土壤磷转化与迁移的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008.
- YIN J. Effect of combined application of different organic fertilizers and chemical fertilizers on soil phosphorus transformation and the impact of migration[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2008.
- [29] 李和生, 王林权, 赵春生. 小麦根际磷酸酶活性与有机磷之关系[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(2): 56-59.
- LI H S, WANG L Q, ZHAO C S, et al. Relationship between phosphatase activity and organic phosphorus in wheat rhizosphere[J]. Acta agriculturae boreali-occidentalis Sinica, 1997, 25(2): 56-59.
- [30] 陈洪. 森林土壤及养分循环[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1988.
- CHEN H. Forest soils and nutrient cycles[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 1988.
- [31] 张国娟, 濮晓珍, 张鹏鹏, 等. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2624-2634.
- ZHANG G J, PU X Z, ZHANG P P, et al. Effects of stubble returning to soil and fertilization on soil nitrogen availability and root biomass of cotton in arid region[J]. Scientia agricultura Sinica, 2017, 50(13): 2624-2634.
- [32] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- HUANG C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Publishing House, 2000.
- [33] GUNDERSEN P, RASMUSSEN L. Nitrification in forest soils: effects from nitrogen deposition on soil acidification and aluminum release[J]. Reviews of environmental contamination and toxicology, 1990, 113: 1-45.
- [34] 闫洪奎, 胡博, 高立桢. 长期施用秸秆及有机肥对辽宁北部棕壤土壤有效养分的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(6): 812-815.
- YAN H K, HU B, GAO L Z, et al. Effects on available nutrients of brown soil in northern liaoning under long-term use of straw and organic fertilizer[J]. Journal of Shenyang agricultural university, 2013, 44(6): 812-815.
- [35] 高海宁, 李彩霞, 孙小妹, 等. 黑河上游冰沟流域土壤养分与微生物空间异质性研究[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 23-33.
- GAO H N, LI C X, SUN X M, et al. Study of microorganism abundance and communities in response to soil factors in Binggou Valley, the upper reaches of Heihe[J]. Acta praeiculturae Sinica, 2018, 27(6): 23-33.
- [36] ZENG Q, WU X, WEN X. Erratum to: identification and characterization of the rhizosphere phosphate-solubilizing bacterium *Pseudomonas frederiksbergensis* JW-SD2, and its plant growth-promoting effects on poplar seedlings[J]. Annals of microbiology, 2017, 67(3): 287-287.
- [37] 贺纪正, 陆雅海, 傅博杰. 土壤生物学前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- HE J Z, LU Y H, FU B J. Frontiers of soil biology[M]. Beijing: Science Publishing House, 2015.
- [38] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土不同磷组分对磷素盈余的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 924-933.
- YANG Z X, ZHOU H P, XIE W Y, et al. Response of phosphorus components to phosphate surplus in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2020, 26(5): 924-933.
- [39] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 南方红壤区不同侵蚀程度下耕地土壤有效磷空间分布特征及其驱动因素[J]. 土壤, 2018, 50(5): 1013-1021.
- JIANG Y F, YE Y C, GUO X, et al. Spatial distribution of soil available phosphorus and its driving factors under different erosion degrees in south China[J]. Soils, 2018, 50(5): 1013-1021.

- [40] 龚雪蛟,秦琳,刘飞,等.有机类肥料对土壤养分含量的影响[J].应用生态学报,2020,31(4):1403-1416.
GONG X J, QIN L, LIU F, et al. Effects of organic manure on soil nutrient content [J]. Chinese journal of applied ecology, 2020, 31(4): 1403-1416.
- [41] 周鑫斌,洪坚平,谢英荷.溶磷细菌肥对石灰性土壤磷素转化的影响[J].水土保持学报,2005,19(6):72-75.
ZHOU X B, HONG J P, XIE Y H. Effects of phosphorous bacteria fertilizer on phosphorus validity of calcareous soil [J]. Journal of soil and water conservation, 2005, 19(6): 72-75.
- [42] 栗丽,李廷亮,孟会生,等.溶磷菌剂对施磷复垦土壤无机磷形态及油菜磷吸收的影响[J].应用与环境生物学报,2020,26(3):612-618.
LI L, LI Y L, MENG H S, et al. Effects of a phosphorus-dissolving agent on the phosphorus absorption of rape and inorganic phosphorus fractions in reclaimed soil supplemented with phosphorus fertilizers [J]. Chinese journal of applied & environmental biology, 2020, 26(3): 612-618.
- [43] WEI Y, ZHAO Y, SHI M, et al. Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation [J]. Bioresource technology, 2018, 247: 190-199.
- [44] SHARMA S B, SAYYED R Z, TRIVEDI M H, et al. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils [J]. Springer plus, 2013, 2(1): 1-14.
- [45] 库永丽,徐国益,赵骅,等.微生物肥料对猕猴桃高龄果园土壤改良和果实品质的影响[J].应用生态学报,2018,29(8):2532-2540.
KU Y L, XU G Y, ZHAO Y, et al. Effects of microbial fertilizer on soil improvement and fruit quality of kiwifruit in old orchard [J]. Chinese journal of applied ecology, 2018, 29(8): 2532-2540.
- [46] 丁维婷,房静静,武雪萍,等.有机肥替代化肥不同比例对黑土土壤微生物学性质及春麦产量品质的影响[J].中国土壤与肥料,2021(2):44-52.
DING W T, FANG J J, WU X P, et al. Effects of different ratios of organic fertilizers instead of chemical fertilizers on black soil microbiological properties and spring wheat yield and quality [J]. Soils and fertilizers sciences in China, 2021(2): 44-52.
- [47] 段淇斌,赵冬青,姚拓,等.施用生物菌肥对饲用玉米生长和土壤微生物数量的影响[J].草原与草坪,2015,35(2):54-58.
DUAN Q B, ZHAO D Q, YAO T, et al. Effects of using biofertilizer on forage maize growth and soil microbial number [J]. Grassland and turf, 2015, 35(2): 54-58.
- [48] 赵楚,盛茂银,白义鑫,等.喀斯特石漠化地区不同土地利用类型土壤氮磷有效性及其环境影响因子[J].应用生态学报,2021,32(4):1383-1392.
ZHAO C, SHENG M Y, BAI Y X, et al. Soil available nitrogen and phosphorus contents and their environmental impact factors of different land use types in typical karst rocky desertification area, Southwest China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2021, 32(4): 1383-1392.
- [49] TAOTAO H, HAI R, DAFENG H, et al. Light availability, soil phosphorus and different nitrogen forms negatively affect the functional diversity of subtropical forests [J]. Global ecology and conservation, 2020, 24: e01334.