

不同绿肥腐解对烟田土壤有效磷含量影响的微生物机制^①

王仕海¹, 尚军^{1*}, 汤红印¹, 陈鹏¹, 黄占平¹, 魏忠秋¹, 王忠宇¹, 尚关兴¹, 易凯¹, 尚德双¹, 李珍权¹, 王晓玥²

(1 贵州省烟草公司六盘水市公司, 贵州六盘水 553000; 2 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院), 南京 211135)

摘要: 为阐明绿肥还田提高土壤有效磷含量的机制, 针对贵州植烟土壤, 选取光叶苕子、油菜和黑麦草3种绿肥为供试材料, 通过微宇宙试验, 研究了添加3种绿肥恒温培养30 d后土壤中有机酸含量、土壤微生物群落功能以及磷酸酶活性的变化。结果表明: 3种绿肥腐解均显著提升了植烟土壤有效磷含量、微生物代谢活性强度(AWCD)和磷酸酶活性, 特别是光叶苕子处理对上述指标的提升最为显著。同时, 光叶苕子处理中有机酸总量, 特别是柠檬酸的含量显著高于其他处理。随机森林分析和结构方程模型结果显示, AWCD、磷酸酶活性以及有机酸含量是影响土壤有效磷含量的关键因子, 其中AWCD的提高可以直接促进土壤中有效磷含量的提升; 此外, AWCD还可以通过影响磷酸酶的活性和有机酸的含量影响土壤中有效磷的含量, 其中微生物代谢活性通过促进磷酸酶活性从而提高土壤有效磷含量是土壤磷素有效性提升的首要途径。

关键词: 土壤有效磷; 绿肥腐解; 有机酸; 磷酸酶活性; 微生物碳源代谢

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

Deciphering Microbial Mechanism Underlying Changes of Available Phosphorus Content in Tobacco-planting Soils During Different Green Manure Decomposition

WANG Shihai¹, SHANG Jun^{1*}, TANG Hongyin¹, CHEN Peng¹, HUANG Zhanping¹, WEI Zhongqiu¹, WANG Zhongyu¹, SHANG Guanxing¹, YI Kai¹, SHANG Deshuang¹, LI Zhenquan¹, WANG Xiaoyue²

(1 Liupanshui Branch of Guizhou Tobacco Company, Liupanshui, Guizhou 553000, China; 2 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: An incubation experiment was conducted using soils taken from tobacco-planting filed in Liupanshui City of Guizhou to explore the effects of green manure incorporation on soil phosphorus availability and its underlying microbial mechanism. Three types of green manure, vetch, rape and ryegrass were selected as exogenous organic materials and incorporated into tested soils. After 30 days of incubation, soil samples were taken to analyze organic acid content, microbial community function and phosphatase activity. The results showed significant increases in available phosphorus content, average well color development (AWCD) and phosphatase activity under green manure treatments compared with the control treatment, among which vetch had the highest enhancements. In addition, the total amount of organic acids, especially citric acid content was significantly higher under vetch treatment than under other treatments. Random forest analysis and structural equation model results indicated that AWCD, phosphatase activity and organic acids concentrations were the key factors regulating available phosphorus content, among these factors AWCD showed direct effect, and moreover, AWCD also indirectly affected available phosphorus content via influencing soil phosphatase activity and organic acids concentrations of which promoting phosphatase activity by microbial activity was the primary pathway to improve soil phosphorus availability.

Key words: Soil available phosphorus; Green manure decomposition; Organic acids; Phosphatase activity; Microbial carbon metabolism

①基金项目: 中国烟草总公司贵州省公司重点研发项目(2021XM20)资助。

* 通讯作者(lpsycjszx@163.com)

作者简介: 王仕海(1974—), 男, 贵州遵义人, 学士, 高级农艺师, 主要从事烤烟生产管理研究。E-mail: 465062637@qq.com

贵州高海拔冷凉地区植烟土壤大部分属于黄壤, 其磷素容易被铝、铁等金属离子螯合^[1], 或被铁铝氧化物及黏土矿物吸附, 导致其磷素有效性较低。此外, 低温、贫瘠和连作障碍等问题也导致土壤生物功能退化, 限制微生物对土壤磷素的活化^[2-3]。绿肥是增辟绿色有机肥源、提高土壤磷素有效性和提升土壤生物功能的有效方法。

绿肥腐解过程中, 土壤磷素有效性的提升主要通过两种途径。一方面, 绿肥残体在土壤微生物的作用下分解, 产生的小分子有机酸可以通过溶解、解吸和螯合等作用活化土壤中的无机磷, 降低钙、铁、铝等金属元素对磷的固持, 提高土壤中有效磷的含量^[4-5]。但不同绿肥腐解液中小分子有机酸的组成和含量存在显著差异^[6]。关于不同绿肥还田如何通过影响小分子有机酸, 进而影响土壤中有效磷含量及其机制的研究有待进一步加强。另一方面, 绿肥腐解通过为土壤微生物提供新鲜的碳源和氮源^[7], 提高微生物活性^[8], 或通过改变微生物群落组成, 提升微生物群落的功能, 从而促进微生物分泌磷酸酶, 提高磷酸酶活性^[9], 使更多的有机磷矿化形成无机磷^[10]。研究表明, 不同绿肥还田对土壤微生物功能以及磷酸酶活性的影响存在显著差异^[11-12]。然而豆科和非豆科绿肥分解后对土壤磷酸酶活性的影响是否存在显著差异尚无定论^[13-14]。目前在植烟土壤中, 对绿肥分解过程中这两种提高磷素有效性途径的相对贡献鲜有报道。

表 1 不同绿肥秸秆养分含量
Table 1 Nutrient contents of different green manures

秸秆类型	全碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	C/N
光叶苕子	370.56	37.13	4.15	33.13	9.98
油菜	344.83	16.14	3.89	17.83	21.37
黑麦草	386.95	20.15	3.42	32.17	19.22

1.2 试验设计

本试验共设 4 个处理, 分别为不添加绿肥的对照 (CK)、添加光叶苕子、油菜和黑麦草处理, 每个处理 3 个重复。试验时, 首先称取 100 g 风干土与 3 g 剪至 2 mm 大小的绿肥秸秆充分混合均匀, 置于 300 mL 组培瓶中, 调节含水量至其田间持水量的 60%, 用含透气孔的配套瓶盖封口; 然后称重并记录样品瓶重量, 将样品瓶放入 25 °C 恒温培养箱避光培养 30 d。培养期间每周通过称重法补充土壤水分。在培养 7、30 d 时进行破坏性采样, 一部分样品风干后用于测定土壤基本理化性质, 另一部分样品保存在 4 °C 冰箱用于测定土壤小分子有机酸、酶活性和土壤微生物碳源代谢特征。

基于以上研究背景与现状, 本研究针对贵州植烟黄壤, 选取豆科、十字花科和禾本科 3 种绿肥秸秆为供试材料, 通过微宇宙模拟试验, 研究绿肥腐解 30 d 后土壤有效磷含量的变化, 以及不同绿肥分解过程中产生的小分子有机酸的组成和含量, 分析不同绿肥处理土壤微生物群落功能以及酸性磷酸酶活性的差异。并在此基础上, 利用统计学方法解析影响土壤有效磷含量的关键因子, 量化有机酸活化和磷酸酶矿化两种提高磷素有效性的途径对土壤有效磷提升的相对重要性。本研究结果可为促进植烟土壤的化肥减施和提高磷素有效性提供科学依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集于贵州省六盘水市典型烟田的 0~20 cm 耕层, 土壤类型为黄壤, 其基本性质为: pH 6.29, 有机质 25.14 g/kg, 全氮 1.52 g/kg, 全磷 0.80 g/kg, 全钾 35.04 g/kg, 有效磷 19.05 mg/kg。采集的混合土壤样品带回实验后, 剔除砂石和动植物残体等杂质, 经自然风干和过 2 mm 筛用于室内培养试验。供试绿肥为光叶苕子、油菜和黑麦草茎叶残体, 为盆栽试验种植的绿肥鲜样经杀青烘干后用粉碎机粉碎过 2 mm 筛备用, 其养分含量见表 1。

1.3 样品测定

土壤 pH(土水质量比 1:5)测定采用玻璃电极法测定, 有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 全氮采用全自动凯氏定氮法测定, 全磷采用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法测定, 全钾采用 NaOH 碱熔-火焰光度计法测定, 有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定^[15]。土壤小分子有机酸的测定: 称取 5 g 新鲜土样于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL 超纯水, 振荡 30 min 后离心 10 min, 浸提液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤, 滤液中的小分子有机酸利用高效液相色谱仪进行测定^[16]。

土壤 β-葡萄糖苷酶活性的测定: 采用索莱宝生物科技公司活性检测试剂盒提取, 利用多功能酶标仪

于400 nm处测定其OD值,通过标准物的浓度与OD值绘制标准曲线并得到其线性回归方程,将样品的OD值代入方程式,计算样品浓度^[17]。酶活性以37 °C下培养24 h后1 g土壤中生成的对硝基苯酚的微摩尔质量表示。土壤酸性磷酸酶活性的测定方法与土壤β-葡萄糖苷酶类似,其活性以37 °C下培养24 h后1 g土壤中生成的苯酚的纳摩尔质量表示。

土壤微生物碳源代谢特征及其多样性的测定:采用Biolog-ECO微平板法^[18]。称取相当于5 g干土的新鲜土样,加入45 mL 0.85%灭菌生理盐水(NaCl)溶液,振荡30 min后静置5 min,用NaCl溶液将土壤悬浊液稀释20倍接种于ECO微平板的每个孔中,接种量为150 μL。接种后的平板置于25 °C的恒温培养箱中避光培养,持续培养7 d,每隔24 h在酶标仪上于590 nm处测定每孔的吸光值。

1.4 数据处理与分析

平均颜色变化率(AWCD)反映了土壤微生物整体代谢活性及其功能多样性,其计算公式为:AWCD= $\sum(C_i-R)/n$,式中 C_i 为第*i*孔的吸光度值, R 为对照孔的吸光度值, n 为培养基碳源总种类数。本研究中土壤有效磷、小分子有机酸、酶活性、土壤微生物的代谢活性及碳源代谢强度等指标均采用SPSS 22.0进行统计分析,采用GraphPad Prism 9.0作图。土壤微生物功能多样性计算和主成分分析采用R软件“vegan”软件包完成。采用R软件“corrplot”软件包进行Pearson相关性分析,“randomforest”软件包进行随机森林分析,筛选土壤有效磷的重要影响因子。通过AMOS 21软件构建结构方程模型,揭示土壤有效磷的影响路径。

2 结果与分析

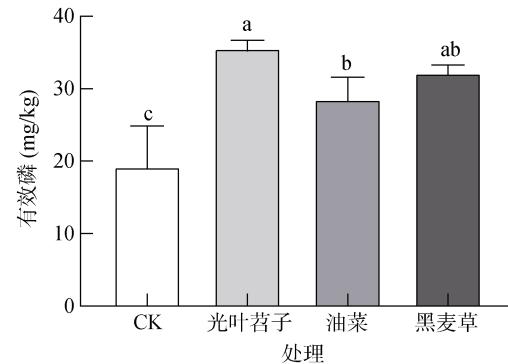
2.1 不同绿肥腐解对土壤中有效磷的影响

与CK处理相比,不同绿肥在腐解30 d后均显著提高了土壤有效磷的含量(图1, $P<0.05$)。其中,光叶苕子处理有效磷的含量最高,分别是CK、油菜和黑麦草处理的1.85倍、1.24倍和1.10倍。油菜处理对有效磷含量的提升最少,仅是CK处理的1.49倍。

2.2 不同绿肥腐解对土壤中小分子有机酸的影响

在CK处理中,仅检测到柠檬酸,其他小分子有机酸的含量均低于仪器检测限。与CK处理相比,不同绿肥在腐解30 d后均显著提高了土壤中小分子有机酸的含量($P<0.05$)。甲酸含量在油菜处理中最高,分别是黑麦草和光叶苕子处理的1.90倍和3.80倍(图2A)。苹果酸含量在不同处理间的变化表现出与甲酸

相似的趋势,即油菜>光叶苕子和黑麦草>CK。其中,油菜处理的苹果酸含量分别是黑麦草和光叶苕子处理的2.50倍和1.80倍(图2B)。柠檬酸含量在光叶苕子处理中最高,其次为油菜处理,而黑麦草处理中柠檬酸含量与CK处理没有显著差异(图2C)。乳酸含量表现在黑麦草处理中最高,分别是油菜和光叶苕子处理的1.47倍和4.52倍(图2D)。



(图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著,下同)

图1 不同处理土壤有效磷含量

Fig. 1 Soil available phosphorus contents under different treatments

2.3 不同绿肥腐解对土壤中酶活性的影响

与CK处理相比,不同绿肥在腐解30 d后均显著提高了土壤酸性磷酸酶的活性($P<0.05$),其中光叶苕子处理的酸性磷酸酶活性最高,是CK处理的1.29倍。油菜处理对土壤酸性磷酸酶活性的提升最少,是CK处理的1.18倍(图3A)。而β-葡萄糖苷酶在油菜和黑麦草处理的土壤中最高,分别是CK处理的2.00倍和2.32倍($P<0.05$),而光叶苕子处理中土壤β-葡萄糖苷酶的活性与CK处理没有显著差异(图3B)。

2.4 不同绿肥腐解对土壤中微生物功能及其多样性的影响

与CK处理相比,不同绿肥在腐解30 d后均显著提高了土壤微生物代谢活性(AWCD, $P<0.05$)。其中,光叶苕子处理土壤微生物代谢活性最高,分别是CK、油菜和黑麦草处理的1.95倍,1.26倍和1.28倍(图4A)。黑麦草处理对土壤微生物代谢活性的提升最少,仅是CK处理的1.50倍。将31种碳源分为碳水化合物、羧酸、多聚物、酚酸、胺类和氨基酸6类碳源,进一步分析不同处理土壤微生物对各类碳源的代谢能力差异(图4B),结果表明,相对于其他处理,光叶苕子处理提高了土壤微生物对羧酸和胺类的代谢能力。与CK处理相比,3种绿肥还田均显著提升了土壤微生物对碳水化合物、羧酸和多聚物的代谢能力,不同绿肥处理之间没有显著差异。

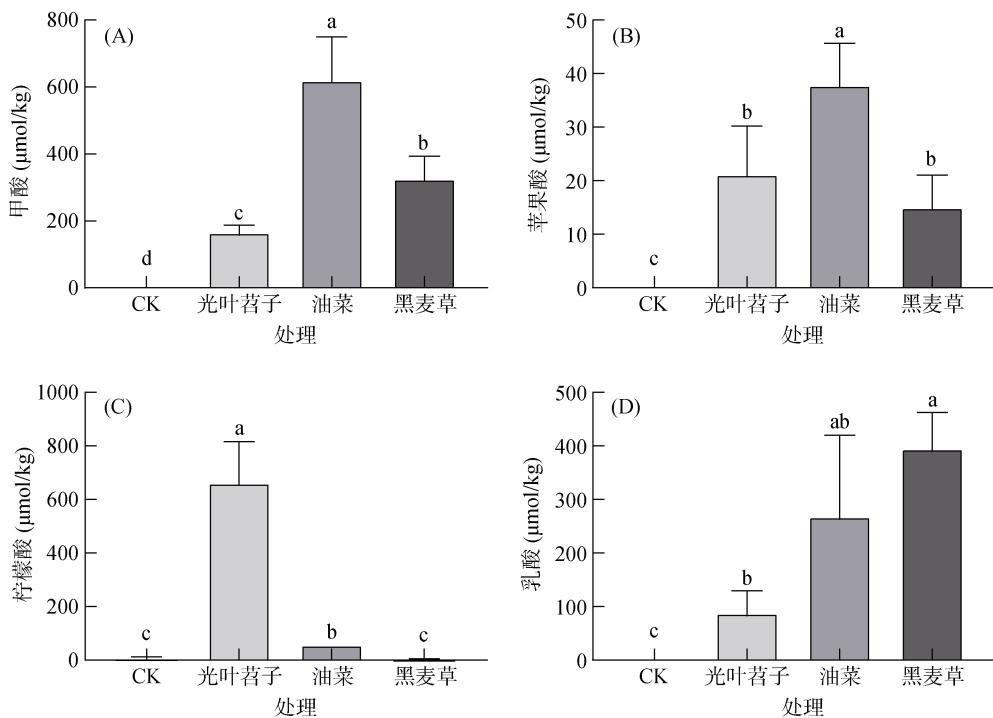


图 2 不同处理各小分子有机酸含量
Fig. 2 Low molecular organic acids contents under different treatments

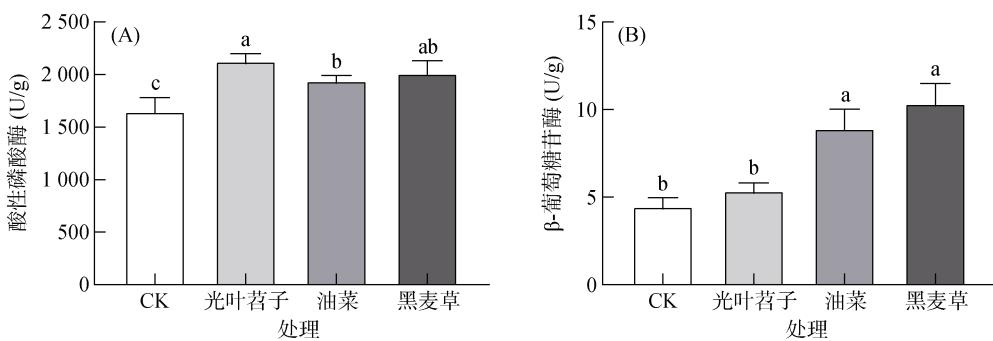


图 3 不同处理土壤酸性磷酸酶(A)和 β -葡萄糖苷酶(B)活性
Fig. 3 Acid phosphatase (A) and β -glucosidase (B) activities under different treatments

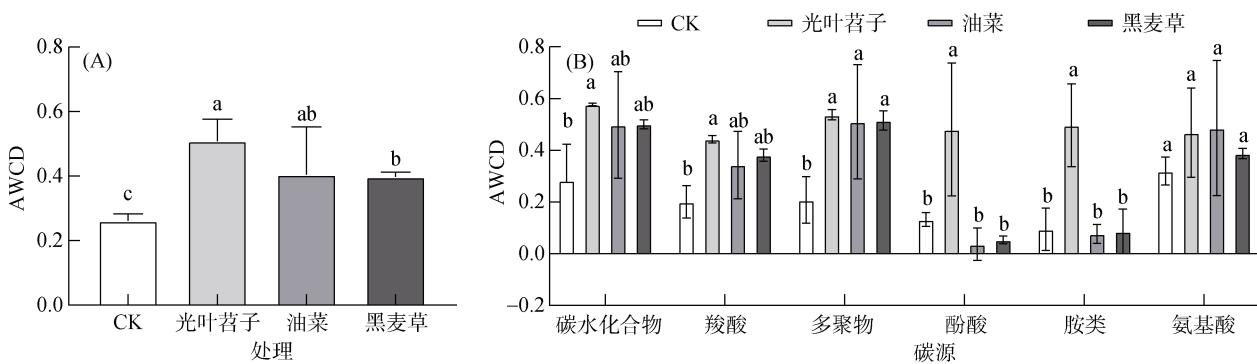


图 4 不同处理土壤微生物的代谢活性(A)及其对 6 大类碳源的代谢强度(B)

Fig. 4 Microbial carbon metabolic activities reflected by average well color development (AWCD) (A) and carbon source utilization rates based on six specific carbon classes (B) under different treatments

虽然不同处理下反映微生物群落功能 α 多样性的 Shannon 指数没有显著差异 ($P>0.05$, 图 5A), 但主坐标分析结果表明, 不同绿肥处理下微生物

群落的碳源利用模式差异显著(图 5B)。其中, PCoA1 轴和 PCoA2 轴分别解释了微生物群落碳源利用模式的 28.8% 和 21.7%; 与 CK 处理相比,

不同绿肥处理均改变了微生物群落的碳源利用模式($P<0.05$), 其中光叶苕子处理与CK处理的差异最大, 而油菜和黑麦草处理下微生物碳源利用模

式相似。上述结果与不同处理下微生物对6大类碳源的利用规律相似, 即光叶苕子处理对微生物碳源利用模式的改变最大。

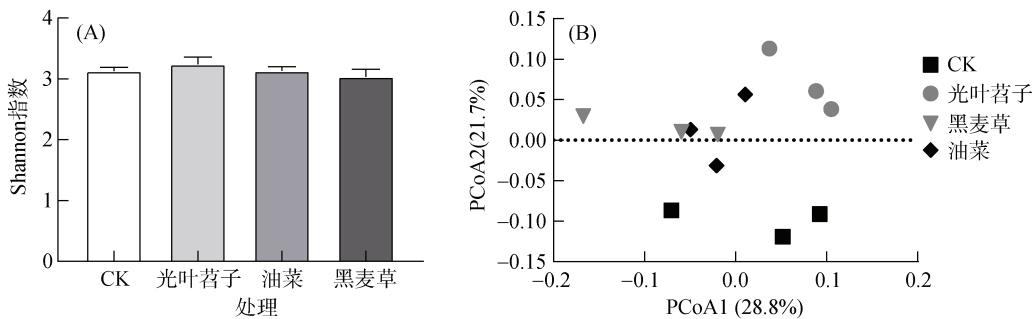
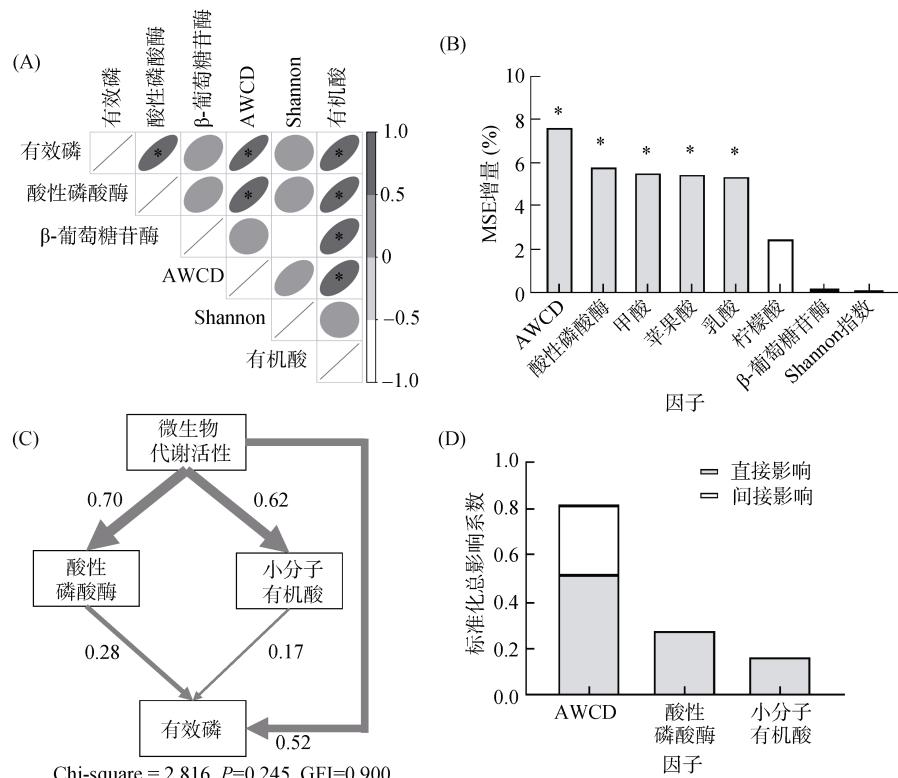


图5 不同处理土壤微生物功能多样性的Shannon指数(A)以及土壤微生物碳源利用模式(B)
Fig. 5 Shannon indexes and microbial carbon utilization reflected by principal coordinate analysis under different treatments

2.5 不同绿肥腐解影响土壤有效磷的关键因素及其相对贡献

为分析绿肥腐解过程中影响土壤有效磷的关键影响因素, 首先利用Pearson相关分析研究有效磷与土壤微生物和化学性质之间的相关关系, 结果表明, 不同处理土壤有效磷含量的变化与AWCD值、酸性磷酸酶活性以及土壤中小分子有机酸的总量显著相关($P<0.05$, 图6A)。为了进一步探究绿肥腐解过程中影响土壤有效磷的各因素的相对贡献率, 本研究开展

了随机森林分析以揭示土壤有效磷的重要预测因子。结果表明, AWCD值的贡献最大(7.69%, $P<0.05$), 其次为酸性磷酸酶活性(5.86%, $P<0.05$), 以及小分子有机酸中的甲酸(5.60%, $P<0.05$)、苹果酸(5.54%, $P<0.05$)和乳酸(5.44%, $P<0.05$)的含量(图6B)。利用相关分析和随机森林分析结果, 筛选出AWCD、酸性磷酸酶活性和3种小分子有机酸的含量进行结构方程模型构建(图6C), 结果表明, 微生物的碳源代谢活性(AWCD)可以直接促进土壤中有效磷含量的



(图A、B中*表示相关性或影响在 $P<0.05$ 水平显著)

图6 绿肥腐解过程与土壤有效磷含量的关系

Fig. 6 Relations between green manure decomposition and soil available phosphorus content

提升,此外,还可以通过影响酸性磷酸酶的活性和小分子有机酸的含量间接影响土壤中有效磷的含量。通过对结构方程模型中各影响因素进行影响系数的标准化(图 6D),结果表明微生物的碳源代谢活性的直接作用对土壤有效磷含量的标准化影响系数为 0.52,间接影响为 0.30,酸性磷酸酶活性和小分子有机酸的直接作用标准化影响系数分别为 0.28 和 0.17。

3 讨论

本研究表明,不同绿肥腐解后均提高了土壤有效磷含量,其中光叶苕子处理土壤有效磷含量最高(图 1)。微生物的碳源利用率、酸性磷酸酶活性以及各小分子有机酸的含量均是影响土壤有效磷含量的重要因素(图 6A 和图 6B)。

首先,绿肥腐解通过为微生物提供新鲜易分解的碳源,促进微生物生长,改变微生物群落的功能^[19]。本研究中,与 CK 处理相比,不同绿肥腐解均显著提高了土壤微生物碳源利用能力(图 4A),这与前人的研究结果一致^[20]。其中,豆科绿肥光叶苕子对土壤微生物碳源利用能力的提升高于其他绿肥,特别是禾本科绿肥黑麦草(图 4A)。这可能是由于豆科绿肥碳氮比(C/N)低,在为微生物提供充分碳源的同时,也提供了充分的有机氮源^[21]。本研究还发现,光叶苕子处理中微生物对含氮化合物胺类的利用效率显著高于其他绿肥处理(图 4B)。此外,光叶苕子处理中微生物对羧酸类化合物的利用效率也显著高于其他绿肥处理。这可能与光叶苕子分解过程中产生了更多有机酸(特别是柠檬酸)有关(图 2),并且相关分析也表明小分子有机酸含量与碳源利用效率显著正相关(图 6A)。

其次,由于不同绿肥腐解后土壤中微生物群落组成和碳源代谢功能不同^[21-23],因此导致不同绿肥残体腐解后产生的有机酸的组成和含量存在差异,这与前人研究结果一致^[6]。本研究中,结构方程模型分析表明微生物代谢活性与绿肥腐解过程中有机酸组成有显著相关性(图 6C)。油菜处理中产生的有机酸主要为甲酸和乳酸,柠檬酸和苹果酸的含量相对较低;光叶苕子处理中产生的柠檬酸含量远高于其他有机酸。这可能是由于豆科绿肥不仅在生长的过程中可以通过根际分泌大量柠檬酸^[24],而且在腐解的过程中也可以释放大量柠檬酸^[6]。黑麦草处理中产生的有机酸主要是乳酸和甲酸,而柠檬酸和苹果酸含量较低。前期研究表明,柠檬酸对磷的活化能力高于其他有机

酸^[25],这是光叶苕子处理有效磷含量高于其他处理的原因之一。

除小分子有机酸外,绿肥腐解通过提高土壤微生物生物量和改变土壤微生物群落结构和功能,提高土壤微生物胞外酶的分泌和活性^[19]。其中,酸性磷酸酶是土壤中有机磷转化为无机磷的关键酶^[26]。本研究表明,绿肥腐解提高了酸性磷酸酶的活性,并且微生物群落功能是影响酸性磷酸酶的重要因素(图 6C);这与前人研究结果一致^[11]。同时,酸性磷酸酶活性表现出光叶苕子处理大于油菜和黑麦草处理的趋势(图 3A)。这主要是由于光叶苕子残体中磷含量(7.4~8.7 g/kg)显著高于油菜(5.1~8.1 g/kg)和黑麦草残体(4.8~5.6 g/kg)^[27]。此外,葡萄糖苷酶活性与绿肥中易分解碳的含量显著相关^[23]。与非豆科绿肥相比,光叶苕子处理由于腐解速率快^[28],残留的易分解碳含量低,因此葡萄糖苷酶活性低于非豆科绿肥处理(图 3)。这也从侧面说明,光叶苕子处理的绿肥残留量低,释放的磷等养分多,因此进一步提高了土壤中有效磷含量。

综合比较不同因素对土壤磷有效性的相对贡献,本研究表明,在绿肥还田 30 d 后,微生物通过分泌酸性磷酸酶从而矿化有机磷的途径是植烟土壤绿肥还田下有效磷提升的首要途径,其贡献率高于有机酸活化途径(图 6C 和图 6D)。这可能是由于土壤中小分子有机酸的含量随绿肥的分解而增加,但在短期内(通常<15 d)达到峰值,然后下降^[29]。在绿肥还田 30 d 后,绿肥残体的腐解率可达 50%~70%^[30],因此土壤中有机酸含量与腐解初期(15 d 以内)相比有所下降,因此通过有机酸活化土壤中固态磷提高土壤磷素有效性的途径的贡献率相对较低。而随着绿肥的分解,植物源大分子有机碳分解为小分子有机碳,同时伴随氮磷钾等元素的释放,微生物生长及其群落活性在绿肥还田 30 d 后显著提升^[31],从而进一步提高微生物通过分泌酸性磷酸酶矿化有机磷途径对土壤有效磷的贡献。未来需要进一步研究绿肥还田对解磷微生物群落的影响,明确主导酸性磷酸酶分泌的关键微生物,为通过绿肥还田措施,促进植烟土壤的化肥减施和提高磷素有效性提供科学依据。

4 结论

不同绿肥还田显著提升植烟土壤中磷素的有效性,其中光叶苕子还田的提升效果最佳。不同绿肥还田通过提高微生物代谢功能,从而提高绿肥分解过程中小分子有机酸含量,同时提高微生物分泌的胞外酶

酸性磷酸酶的活性, 促使土壤中有效磷含量增加。其中, 微生物通过分泌酸性磷酸酶矿化有机磷途径是土壤磷有效性提升的首要途径, 而微生物通过分解绿肥产生有机酸从而活化固态磷的途径贡献率较低。

参考文献:

- [1] 王一锟, 蔡泽江, 冯固. 不同磷肥调控措施下红壤磷素有效性和利用率的变化[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 235–246.
- [2] 常亚锋, 于文豪, 陈厚朴, 等. 种植年限对健康三七根际土壤微生物活性和功能的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 132–139.
- [3] 李莹, 刘兰英, 何肖云, 等. 连作年限对辣椒根际土壤真菌群落结构的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2023, 52(3): 400–407.
- [4] Tamburini F, Pfahler V, von Sperber C, et al. Oxygen isotopes for unraveling phosphorus transformations in the soil-plant system: A review[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(1): 38–46.
- [5] 庄正, 王俊男, 刘志刚, 等. 外源低分子有机酸对南方红壤磷、铁、铝释放及相互关系的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 277–280.
- [6] 顾炽明, 李越, 李银水, 等. 绿肥腐解液中有机酸组成对铝磷和铁磷活化能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1627–1635.
- [7] 王慧, 韩上, 唐杉, 等. 紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成及其碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 868–880.
- [8] Hallama M, Pekrun C, Lambers H, et al. Hidden miners—the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems[J]. Plant and Soil, 2019, 434(1): 7–45.
- [9] 张明发, 田峰, 王兴祥, 等. 翻压不同绿肥品种对植烟土壤肥力及酶活性的影响[J]. 土壤, 2017, 49(5): 903–908.
- [10] 郁恒福, 黄嘉璞, 线琳, 等. 施用豆科绿肥对酸性土壤有机磷组分的动态影响[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1216–1221.
- [11] 张黎明, 邓小华, 周米良, 等. 不同种类绿肥翻压还田对植烟土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(4): 13–18.
- [12] 赵冬雪, 王盼盼, 常春丽, 等. 绿肥套作对植烟土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 201–207.
- [13] 祖韦军, 潘文杰, 张金召, 等. 耕作深度与翻压绿肥对植烟土壤微生物功能多样性及酶活性的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(10): 2383–2393.
- [14] 张建伟. 绿肥翻压促进果园土壤磷素活化周转的特征及机理[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 曹莹菲. 腐解过程中还田秸秆和土壤有机酸、质能及结构变化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [17] Tabatabai M A. Soil enzymes[M] // Weaver R W, Angle J R, Bottomley P S. Methods of soil Analysis. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties. Madison WI: Soil Science Society of America, 1994: 903–947.
- [18] 王顶, 伊文博, 李欢, 等. 玉米间作和施氮对土壤微生物代谢功能多样的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 793–800.
- [19] 赵书军, 秦兴成, 张新然, 等. 不同绿肥翻压量及施肥条件下土壤酸性磷酸酶活性的变化[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(S1): 99–102.
- [20] 许小虎, 车宗贤, 赵旭, 等. 长期施用绿肥对小麦玉米间作土壤微生物的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 33–44.
- [21] 马昕伶, 秦文婧, 刘凯, 等. 竹豆间种对柑橘园土壤化学性质及微生物碳源代谢特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 200–206.
- [22] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. Nature Microbiology, 2017, 2: 17105.
- [23] Wang X Y, Liang C, Mao J D, et al. Microbial keystone taxa drive succession of plant residue chemistry[J]. The ISME Journal, 2023, 17(5): 748–757.
- [24] 李欣雨, 刘函亦, 薛少琪, 等. 几种绿肥的根系分泌物对土壤锌的活化效应[J]. 中国土壤与肥料, 2022(1): 81–89.
- [25] 冯晨, 关连珠, 颜丽, 等. 持续淋溶条件下有机酸对土壤磷素释放及无机磷组分的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 607–611.
- [26] Goldstein A H, Baertlein D A, McDaniel R G. Phosphate starvation inducible metabolism in *Lycopersicon esculentum*[J]. Plant Physiology, 1988, 87(3): 711–715.
- [27] 杨叶华, 张松, 王帅, 等. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 39–55.
- [28] 董浩, 于淑慧, 史桂芳, 等. 春季翻压3种果园绿肥腐解及养分释放特征研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(6): 75–81.
- [29] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 100–104.
- [30] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 等. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 216–223.
- [31] 张义宁, 王俊. 绿肥腐解过程及其对旱作农田土壤碳氮和玉米产量的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(11): 2613–2621.