



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 沈晓琳, 赵建宁, 王慧, 黄进, 张小福

引用本文:

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 等. 茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 371–380.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0605>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同覆盖作物模式对茶园土壤微生物群落功能多样性的影响

王明亮, 刘惠芬, 王丽丽, 杨殿林, 林艳艳, 修伟明, 王慧, 黄进, 张小福

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 332–339 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0028>

三峡库区不同林龄柑橘土壤酶活性的演变

张海玲, 贾国梅, 向翰宇, 程虎, 张宝林

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 121–127 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0167>

覆盖作物不同利用方式对猕猴桃园土壤微生物群落结构的影响

李青梅, 张玲玲, 赵建宁, 张艳军, 刘红梅, 王华玲, 王慧, 杨殿林, 张凡, 翁昌明

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 319–325 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0627>

不同类型地膜覆盖对玉米农田土壤酶活性的影响

白雪, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 程曼, 杜艳玲

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 381–388 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0033>

农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 赵建宁, 刘红梅, 谭炳昌, 王慧, 王明亮, 黄进, 张小福

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 340–352 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0329>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

汪 洋, 杨殿林, 王丽丽, 等. 茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 371–380.

WANG Yang, YANG Dian-lin, WANG Li-li, et al. Effects of cover crops on soil enzyme activity and organic carbon mineralization in a tea plantation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 371–380.



开放科学 OSID

茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响

汪 洋^{1,2}, 杨殿林^{1,2}, 王丽丽^{1,2*}, 沈晓琳^{1,2}, 赵建宁^{1,2}, 王 慧^{1,2}, 黄 进³, 张小福⁴

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部产地环境污染防治重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 3. 十堰市农科院果茶研究所, 湖北 十堰, 442000; 4. 十堰市经济作物研究所, 湖北 十堰, 442714)

摘 要:为量化不同覆盖作物种植模式对茶园土壤酶活性及有机碳矿化特征的影响,以湖北省十堰市郧阳区谭家湾茶园为研究对象开展覆盖作物多样性试验,设置四种覆盖作物种植模式:无覆盖作物(A0)、2种覆盖作物(A1)、4种覆盖作物(A2)、8种覆盖作物(A3),测定茶园0~20 cm和20~40 cm土层的土壤酶活性、有机碳矿化速率以及累积矿化量,并对其进行一级动力学方程拟合,得出有机碳潜在矿化势(C_p)和矿化常数(k)。结果发现,覆盖作物种植小区的土壤酶活性均高于对照小区,0~20 cm土层的酶活性均高于20~40 cm,不同覆盖作物类型对土壤过氧化氢酶和脲酶活性的影响具有显著差异($P<0.05$),但对土壤磷酸酶没有显著影响。与过氧化氢酶相比,土壤脲酶、磷酸酶是更重要的土壤碳循环参与者,其活性与有机碳矿化作用之间呈极显著正相关关系($P<0.01$),在土壤有机碳分解转化过程中具有重要作用。各处理的土壤有机碳矿化速率均呈现先升高后降低最后趋于平稳的趋势,0~20 cm土层的土壤有机碳矿化速率和累积矿化量均高于20~40 cm土层。0~20 cm土层 C_p/k 表现为 $A1>A2>A3>A0$, 20~40 cm土层 C_p/k 表现为 $A1>A2>A0>A3$, 两土层均以A1的土壤有机碳矿化作用最强。A1的微生物量碳和可溶性有机碳均高于其他处理,为作物生长发育提供了充足的养分,pH值也最高,有利于抵抗土壤酸化。

关键词:覆盖作物;酶活性;有机碳矿化;一级动力学方程

中图分类号:S571.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)03-0371-10

doi: 10.13254/j.jare.2019.0605

Effects of cover crops on soil enzyme activity and organic carbon mineralization in a tea plantation

WANG Yang^{1,2}, YANG Dian-lin^{1,2}, WANG Li-li^{1,2*}, SHEN Xiao-lin^{1,2}, ZHAO Jian-ning^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, HUANG Jin³, ZHANG Xiao-fu⁴

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Key Laboratory of Origin Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Agro-product Safety, Tianjin 300191, China; 3. Tea Research Institute, Shiyan Academy of Agricultural Sciences, Shiyan 442000, China; 4. Economic Crop Research Institute of Shiyan City, Shiyan 442714, China)

Abstract: The aim of this study was to quantify the effects of different mulch planting patterns on soil enzyme activity and organic carbon mineralization in a tea plantation. The cover crop diversity experiment was conducted in the Tanjiawan tea garden, Yunyang District, Shiyan City, Hubei Province. Four cover crop planting modes were set up, namely no crop cover (A0), two cover crops (A1), four cover crops (A2), and eight cover crops (A3). The enzyme activity, organic carbon mineralization rate, and cumulative mineralization of the 0~20 cm and 20~40 cm soil layers in the tea plantation were measured, and the data was fitted to the first order kinetic equation to obtain the miner-

收稿日期: 2019-12-11 录用日期: 2020-02-14

作者简介: 汪 洋(1994—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事生物多样性研究。E-mail: 1242455050@qq.com

*通信作者: 王丽丽 E-mail: lili0229ok@126.com

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2020-szjj-zjn)

Project supported: Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS (CAAS-XTCX2016015); Special Fund for Basic Scientific Research Operation of Central Level Public Welfare Research Institutes (2020-szjj-zjn)

alization potential (C_p) and mineralization constant (k) of organic carbon. The results showed that, the soil enzyme activity in the mulch plot was generally higher than that in the control plot, and the enzyme activity in the 0~20 cm soil layer was higher than that in the 20~40 cm layer. Different mulch types had significant effects on soil catalase and urease activity ($P<0.05$), but no significant effect on soil phosphatase. Compared with catalase, soil urease and phosphatase were more important participants in the soil carbon cycle, and there was a significantly positive correlation between their activities and organic carbon mineralization ($P<0.01$), showing that they play an important role in the decomposition and transformation of soil organic carbon. The organic carbon mineralization rates of all treatments showed a trend of first increasing, then decreasing, and finally stabilizing. The mineralization rate and cumulative amount of organic carbon in the 0~20 cm soil layer were higher than those in the 20~40 cm soil layer. In the 0~20 cm soil layer, the C_p/k value was as follows: A1>A2>A3>A0. In the 20~40 cm soil layer, the C_p/k value was as follows: A1>A2>A0>A3. This suggests that the organic carbon mineralization of A1 was the strongest in both soil layers. Moreover, the microbial biomass carbon and soluble organic carbon of A1 were higher than those of the other treatments, thereby providing sufficient nutrients for crop growth and development. A1 had the highest pH value, which was conducive to soil acidification.

Keywords: cover crops; enzyme activity; organic carbon mineralization; first order dynamic equation

覆盖作物是在裸露地面人为种植用以防止土壤侵蚀的非目标作物^[1]。欧盟共同农业政策(CAP)和美国环境质量激励计划(EQIP)等农业法案认为覆盖作物的种植有利于提高生态系统服务功能,因此鼓励覆盖作物的广泛推广^[2]。目前研究发现,多样化种植覆盖作物可以有效增强土壤的防风蚀能力^[3]、抑制杂草生长^[4]、综合防治虫害^[5]。种植覆盖作物提高了土壤的有机投入,从而增加了不同层次土壤的有机碳含量,且增幅随着土层加深而更为显著^[6]。种植覆盖物成为增加土壤碳储存、提高农业系统适应气候变化潜力的关键策略^[7]。此外,由于物种间的互补性,多样化种植覆盖作物有利于农业生态系统产量的增加^[8],但这种效果因覆盖作物类型和耕作制度而异^[9]。近30年,我国专家学者在茶园也开展了覆盖作物的生态学研究^[10]。但是由于长期以来一直受到“草与茶争水争肥”思想的影响,我国茶园土壤管理一直以清耕为主导,种植覆盖作物起步较晚,至今还处于试验和推广应用阶段。

土壤酶对土壤生境变化十分敏感,能够灵敏、准确地反映土壤中各种生化过程的方向和强度,其活性易于检测,是监测土壤质量变化的较好指标^[11]。土壤过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶直接参与土壤中C、N的迁移转化,可用于评价土壤C、N肥力及土壤碳矿化特征^[12]。有研究显示在传统种植模式中加入覆盖作物可以增强土壤酶活性,从而增加土壤的功能基因丰度^[13-14]。覆盖作物主要通过影响土壤的有机质含量和土壤pH值来改变酶的生存环境,从而影响土壤酶活性^[15]。然而土壤是一个复杂的有机体,不同的土地管理模式对土壤酶活性的影响较大,不同覆盖作物类

型对土壤酶活性的影响不同^[16]。我国目前关于覆盖作物对土壤酶活性的研究主要集中于果园,关于茶园种植覆盖作物对土壤酶活性影响的研究较少^[17]。

土壤有机碳的周转速率决定着土壤碳储量,影响陆地植被养分获取^[18]。土壤有机碳矿化过程即土壤中的有机物通过自身化学氧化或微生物转化成为无机物的过程,在分解代谢时,土壤有机碳转化为CO₂^[19],是重要的温室气体排放源,使全球变暖潜势(GWP)升高,影响全球碳循环^[20]。覆盖作物的种植增加了农业生态系统的碳输入、刺激了微生物种群、改变了主要作物残渣分解速率,具有改善农业生态系统土壤有机碳循环的潜力^[21]。同时,覆盖作物的种植增加了农业生态系统的生物多样性,进而使土壤潜在可矿化碳增加,提高微生物的可利用碳,补充土壤活性碳库^[22-23]。有研究发现,覆盖作物对土壤活性碳库的影响主要受到土壤温度、含水量、基质有效性、土层深度以及土壤pH值的影响,另外不同覆盖作物对土壤有机碳矿化的影响程度不同^[24]。

包括湖北省在内的长江流域11个省(自治区、直辖市)的大部分茶园位于丘陵山地,而且以梯台开发种植为主,在山地梯台种植茶园覆盖作物(防控水土流失)是目前大力倡导的模式与技术^[25]。覆盖作物类型的选择应该符合以下几个条件:易于管理、适应性强、株矮、根浅、耐阴性强、与茶叶无共同病虫害^[26]。常用的覆盖作物为禾本科和豆科植物的混合种植,而菊科植物的种植有利于吸引害虫天敌,对茶园虫害的生态防治具有重要意义^[27]。目前为止在茶园生态系统中关于覆盖作物的研究主要集中于单一覆盖作物的种植,而关于多种覆盖作物组合种植的研究较少。

因此本试验从覆盖作物多样性入手,选取8种适合茶园土壤弱酸性环境生长的作物组合种植(黑麦草、白三叶、早熟禾、红三叶、紫羊茅、毛苕子、波斯菊、百日草),设计三种不同的作物种植模式:2种覆盖作物混播(1种禾本科植物+1种豆科植物)、4种覆盖作物混播(2种禾本科植物+2种豆科植物)、8种覆盖作物混播(3种禾本科植物+3种豆科植物+2种菊科植物),形成不同科属覆盖作物的组合模式以及生物多样性的递增趋势,探究多作物覆盖对茶园土壤酶活性和有机碳特征的影响,为幼龄茶园选择覆盖作物品种,提高土壤肥力,监测茶园土壤养分循环提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于湖北省十堰市郧阳区谭家湾镇圩坪寺村(32°55' N、110°52' E),海拔220 m,年降雨量800~1100 mm,无霜期248 d,属于北亚热带大陆性季风气候,年平均日照时数1655~1958 h,年平均气温16℃,土壤类型以泥质岩黄棕壤为主。试验开始前该土地进行了一年的茶树栽培。

1.2 试验设计

每年3月份种植覆盖作物,播种前,清除行间的杂草,在茶树行间种植覆盖作物。试验设置3种覆盖作物种植模式,分别为A1:2种覆盖作物混播(黑麦草、白三叶);A2:4种覆盖作物混播(黑麦草、白三叶、早熟禾、红三叶);A3:8种覆盖作物混播(黑麦草、白三叶、早熟禾、红三叶、紫羊茅、毛苕子、波斯菊、百日草)。以无覆盖作物的小区(A0)为对照。各处理分别设置5个生态学重复,每个小区面积为240 m²,处理面积共1200 m²,各小区不同作物等量混合,播种密度均为16.7 kg·km⁻²。试验期间行间杂草及时去除,保持茶园无杂草滋生,各小区的生态条件和田间管理措施保持一致。

1.3 土壤样品采集

2019年9月进行覆盖作物小区土壤样品的采集。采用“S”形取样法,每个小区选取15个点,用直径为3 cm土钻分别取0~20、20~40 cm土壤样品。将同一小区土壤样品混合均匀,去除植物根系和残留凋落物后过2 mm筛,采用“四分法”选取1 kg土壤样品装入无菌袋内,置于冰盒中带回实验室。土壤样品分两部分:一部分土样于室内自然风干后研磨过筛,用于土壤酶(脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶)活性测定及理化性

状分析;一部分土样于4℃保存,用于土壤微生物量碳、可溶性有机碳的测定以及土壤有机碳矿化的培养。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤理化因子

土壤含水率测定采用烘干法;土壤硝态氮、铵态氮采用CaCl₂浸提法,之后用流动分析仪(AA3, Bran+Luebbe Crop, 德国)进行测定;土壤pH采用MP511 pH计进行测定,土水比为1:2.5;土壤有机碳(SOC)采用水合热重铬酸钾氧化-比色法进行测定^[28];微生物量碳(MBC)的测定采用氯仿熏蒸的方法,用TOC仪测定含量;采用TOC仪测定可溶性有机碳(DOC)含量^[29]。

1.4.2 土壤酶活性

土壤酶活性的测定采用北京索莱宝科技有限公司生产的土壤脲酶(Soil urease, S-UE)、土壤过氧化氢酶(Soil catalase, S-CAT)、土壤磷酸酶(Soil alkaline phosphatase, S-AKP/ALP)活性检测试剂盒(可见分光光度计法)进行测定。

1.4.3 土壤有机碳矿化

准确称取相当于60 g干土的新鲜土壤均匀放入250 mL玻璃培养瓶底部,在25℃的恒温培养箱中避光放置一周,使土壤恢复自然状态后继续在培养箱中避光密封培养,进行土壤有机碳矿化培养试验。在培养的第1、3、5、7、14、21、28、35、42、49、56、63、70、84、98 d用注射器从培养瓶抽取20 mL气体,用Agilent Technologies 7890B气相色谱分析CO₂浓度。每次抽取气体后将培养瓶于空气流通处通风20 min,以保证瓶中氧气得到补充,瓶内外气压一致。设置5个空瓶作为空白对照,培养条件及测定方法与实验瓶完全一致^[30]。

土壤有机碳矿化速率:

$$F = \rho \times \Delta C \times V \times 273 / (273 + T) / m \quad (1)$$

式中: F 为土壤有机碳矿化速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹; ρ 为CO₂标准气体浓度,g·L⁻¹; ΔC 为密闭1 d后CO₂与空白样品浓度差,μL·L⁻¹·d⁻¹; V 为培养瓶的体积,mL; T 为培养温度,℃; m 为培养土壤干质量,kg。

土壤有机碳累积矿化量:

$$y = F \times t \quad (2)$$

式中: y 表示 t 时刻土壤有机碳累积矿化量,mg·kg⁻¹; t 表示时间,d。

有机碳累积矿化量用一级动力学方程^[30]进行拟合:

$$\gamma=C_p(1-e^{-kt}) \quad (3)$$

式中: C_p 表示有机碳矿化势, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; k 表示有机碳矿化常数, d^{-1} 。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行前处理,用 IBM SPSS Statistics 21.0 统计软件对试验数据进行单因素方差分析和相关性分析,Duncan、LSD 多重比较判断处理间的差异显著性($P<0.05$),用 Origin 9.4 对有机碳累积矿化量进行方程拟合以及图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

由表 1 可知,0~20 cm 土层的含水率低于 20~40 cm,A3 的土壤含水率较低;A1、A2、A3 的 pH 值均大于 A0,其中 A1 最高,覆盖作物的种植有利于阻抗土壤酸化;0~20 cm 土层中 A1、A2、A3 的土壤有机碳与 A0 相比分别增加了 17.35%、36.28%、15.25%,20~40 cm 土层中 A1、A2、A3 的土壤有机碳与 A0 相比分别增加了 19.06%、54.84%、5.94%;铵态氮含量在 0~20 cm 土层中各处理间没有显著差异($P>0.05$),但是在 20~40 cm 土层中铵态氮含量表现为 $A3>A0>A2>A1$;在 0~20 cm 土层中土壤硝态氮含量在各处理间表现为 $A3>A1>A2>A0$,但是在 20~40 cm 土层中土壤硝态氮含量没有显著差异($P>0.05$);0~20 cm 土层中,A1 显著增加了土壤微生物量碳的含量($P<0.05$),0~20 cm 土层的土壤微生物量碳含量高于 20~40 cm;覆盖作物的种植增加了土壤的 DOC 含量,但是两个土层间表现出差异,在 0~20 cm 土层中,A1 的 DOC 含量最高,而在 20~40 cm 土层中 A1 和 A2 的 DOC 含量都比

较高,0~20 cm 土层的 DOC 含量高于 20~40 cm 土层。

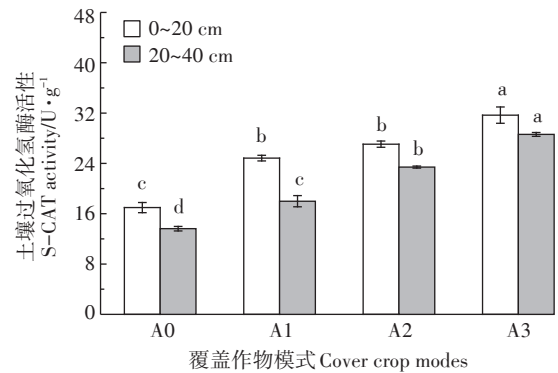
2.2 不同覆盖作物模式下土壤酶活性变化

2.2.1 不同覆盖作物模式下土壤过氧化氢酶活性

由图 1 可见,同一覆盖作物种植模式下,随着土层深度的增加,土壤过氧化氢酶活性降低。不同覆盖作物模式对土壤过氧化氢酶活性具有显著影响($P<0.05$),覆盖作物的种植增加了土壤的过氧化氢酶活性,其中 A1、A2、A3 的过氧化氢酶活性在 0~20 cm 土层比 A0 分别增加了 46.31%、59.38%、86.57%,在 20~40 cm 土层分别增加了 32.03%、71.84%、109.96%,两个土层均表现为 A3 增幅最大,A1 增幅最小。

2.2.2 不同覆盖作物模式下土壤脲酶活性

由图 2 可见,同一覆盖作物种植模式下,随着土层深度的增加,土壤脲酶活性降低。覆盖作物对土壤



同一土层不同小写字母表示不同覆盖作物模式下酶活性差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters in the same soil layer indicate the significant difference of enzyme activity with different cover crop modes($P<0.05$). The same below

图 1 覆盖作物模式对土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 1 Effects of cover crop mode on S-CAT activity

表 1 不同覆盖作物模式下的土壤理化性质

Table 1 Edaphic physicochemical properties under different cover crop modes

覆盖作物模式 Cover crop modes	土层深度 Soil depth/cm	土壤含水率 Soil moisture/%	pH	土壤有机碳 SOC/g·kg ⁻¹	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	微生物量碳 MBC/mg·kg ⁻¹	可溶性有机碳 DOC/mg·kg ⁻¹
A0	0~20	12.62±0.21a	5.84±0.07c	9.51±0.49c	5.71±0.14a	4.95±0.32d	130.76±3.15c	63.68±2.01b
	20~40	13.50±0.19a	5.83±0.03c	6.40±0.40b	6.31±0.26ab	3.67±0.29a	55.48±5.65b	42.70±0.30c
A1	0~20	12.88±0.44a	6.17±0.03a	11.16±0.19b	6.31±0.12a	6.40±0.35b	171.11±3.31a	81.92±1.33a
	20~40	13.54±0.30a	6.27±0.03a	7.62±0.56b	5.31±0.12c	4.14±0.04a	77.90±2.38ab	55.82±1.77a
A2	0~20	11.82±0.27ab	6.05±0.01ab	12.96±0.14a	6.00±0.64a	5.11±0.22c	139.06±0.50c	62.72±5.94b
	20~40	13.68±0.19a	6.21±0.02a	9.91±0.32a	5.90±0.21bc	3.78±0.15a	86.76±3.03a	58.58±2.18a
A3	0~20	11.56±0.41b	5.97±0.02b	10.96±0.48b	5.89±0.19a	6.87±0.49a	154.37±6.98b	52.15±6.28c
	20~40	11.88±0.23b	6.06±0.02b	6.78±0.45b	7.02±0.39a	3.49±0.39a	56.13±3.27b	48.50±0.61b

注:同一土层不同小写字母表示不同覆盖作物模式下土壤理化性质差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same soil layer indicate the significant difference of edaphic physicochemical properties with different cover crop modes($P<0.05$).

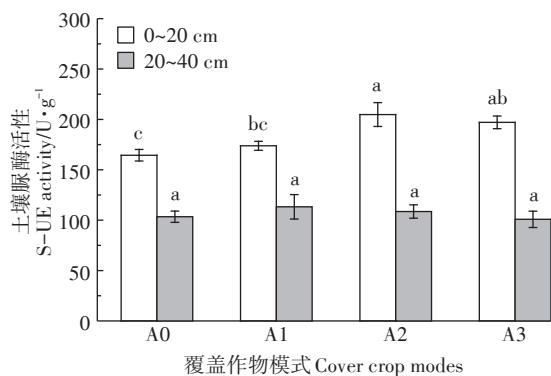


图2 覆盖作物模式对土壤脲酶活性的影响

Figure 2 Effects of cover crop mode on S-UE activity

脲酶的影响主要表现在土壤表层(0~20 cm),对 20~40 cm 土层深度的脲酶活性没有显著影响。土壤表层四种处理下土壤脲酶活性表现为 $A0 < A1 < A3 < A2$, 三种覆盖作物模式均增加了土壤脲酶活性,其中 A1、A2、A3 的脲酶活性分别比 A0 增加了 5.69%、24.57%、19.85%。

2.2.3 不同覆盖作物模式下土壤磷酸酶活性

由图 3 可见,同一覆盖作物种植模式下,随着土层深度的增加,土壤磷酸酶活性降低。覆盖作物的种植增加了土壤磷酸酶的活性,但是三种覆盖作物种植模式之间没有显著差异($P > 0.05$),说明覆盖作物的种植类型对土壤磷酸酶活性没有显著影响。

2.3 不同覆盖作物模式下土壤有机碳矿化特征

2.3.1 不同覆盖作物模式下土壤有机碳矿化速率

由图 4 可见,不同覆盖作物模式下,两个土层的有机碳矿化速率均呈现先增高后降低最后趋于平稳的变化趋势。培养的第 7 d 两土层的有机碳矿化速率均达到最高值,0~20 cm 土层有机碳矿化速率在第 35 d 趋于平稳;而 20~40 cm 土层第 21 d 趋于平稳,在第

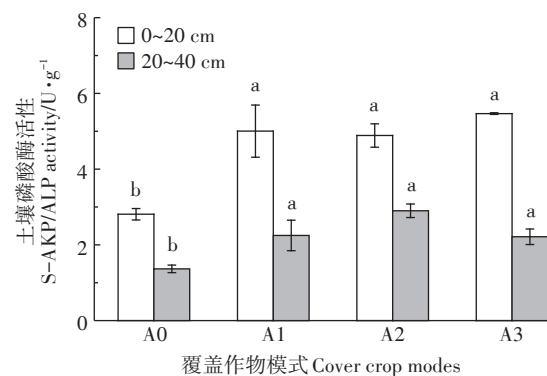


图3 覆盖作物模式对土壤磷酸酶活性的影响

Figure 3 Effects of cover crop mode on S-AKP/ALP activity

42 d 后又开始降低。不同覆盖作物模式下,0~20 cm 土层的有机碳矿化速率表现为 $A1 > A3 > A2 > A0$; 而 20~40 cm 土层的有机碳矿化速率表现为 $A2 > A1 > A3 > A0$ 。虽然覆盖作物种植的有机碳矿化速率在两个土层中都高于对照,但是不同覆盖作物模式影响却并不相同。从整体来看,同一覆盖作物种植模式的土壤有机碳矿化速率在培养时间内 0~20 cm 土层均大于 20~40 cm 土层。

2.3.2 不同覆盖作物模式下土壤有机碳累积矿化量

由图 5 可见,同种覆盖作物种植的土壤有机碳累积矿化量在培养时间内 0~20 cm 土层均大于 20~40 cm 土层。培养结束时,不同覆盖作物模式下,0~20 cm 土层的有机碳累积矿化量表现为 $A1 > A3 > A2 > A0$; 20~40 cm 土层的有机碳累积矿化量表现为 $A2 > A1 > A3 > A0$ 。说明覆盖作物的种植增加了土壤有机碳累积矿化量。

2.3.3 不同覆盖作物模式下土壤有机碳累积培养矿化量模拟

一级动力学参数潜在矿化势(C_p)和矿化常数(k)

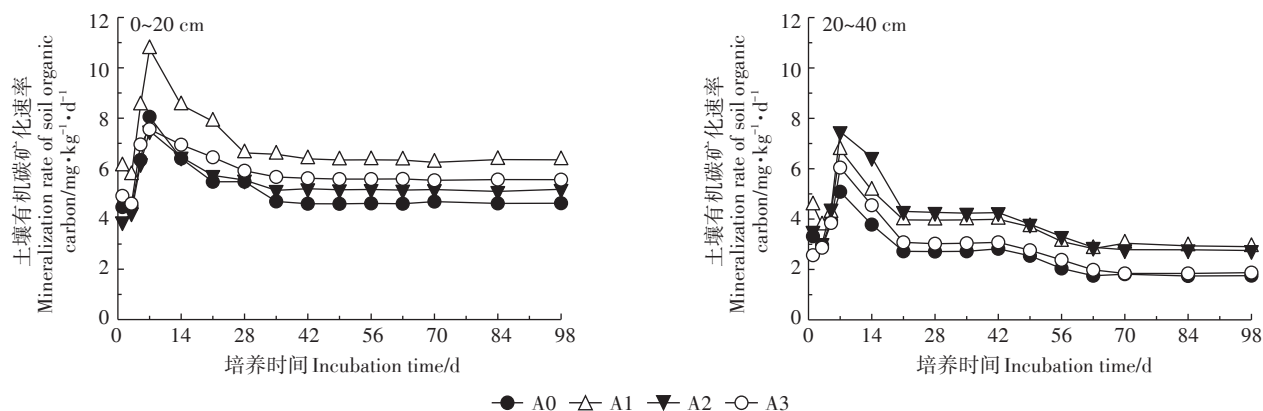


图4 覆盖作物模式对土壤有机碳矿化速率的影响

Figure 4 Effects of cover crop mode on mineralization rate of SOC

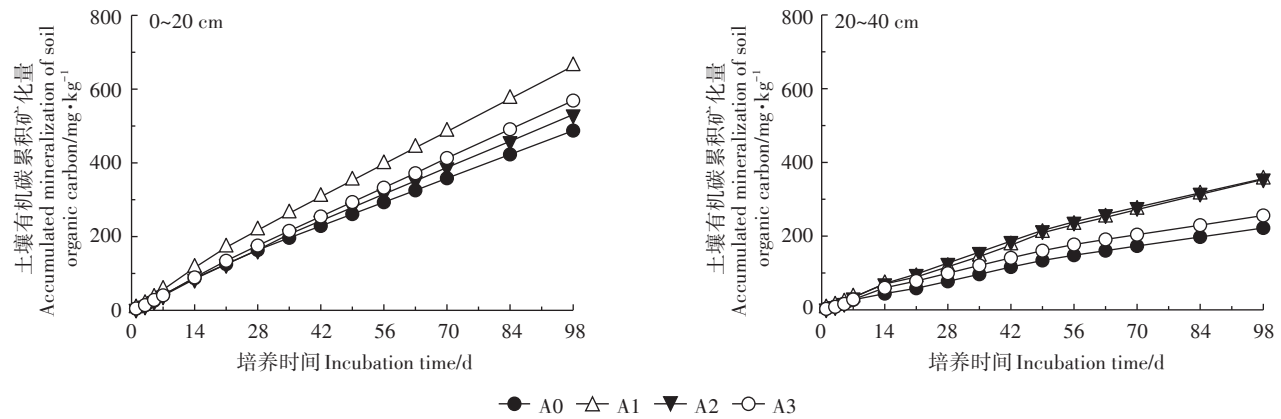


图5 覆盖作物模式对土壤有机碳累积矿化量的影响

Figure 5 Effects of cover crop mode on accumulated mineralization of SOC

用以描述碳矿化的强弱,其中 C_p 值越大, k 值越小,即 C_p/k 值越大,表示土壤有机碳矿化作用越强,反之则越弱^[31]。由表2可见,0~20 cm土层, C_p/k 值表现为A1>A2>A3>A0,覆盖作物的种植增强了土壤有机碳矿化作用;20~40 cm土层, C_p/k 值表现为A1>A2>A0>A3,A1、A2的有机碳矿化作用强于A0,而A3则弱于A0。另外,0~20 cm土层的有机碳矿化作用均强于20~40 cm土层。

2.4 土壤有机碳矿化特征与土壤酶活性和理化性质的关系

由表3可见,潜在矿化势与过氧化氢酶活性呈显著正相关关系($P<0.05$),与脲酶和磷酸酶活性呈极显著正相关关系($P<0.01$);矿化常数与磷酸酶活性呈显著负相关关系($P<0.05$),与脲酶活性呈极显著负相关关系($P<0.01$)。由表4可见,潜在矿化势与土壤铵态氮含量呈显著负相关关系($P<0.05$),与土壤有机碳、硝态氮、微生物量碳呈极显著正相关关系($P<0.01$);

过氧化氢酶活性与有机碳、微生物量碳呈显著的正相关关系($P<0.05$);脲酶、磷酸酶活性与土壤有机碳、硝态氮、微生物量碳和可溶性有机碳含量均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 多植物覆盖对茶园土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤健康的敏感指标。本研究发现覆

表3 土壤 C_p 、 k 与土壤酶活性的相关性Table 3 Correlation analysis of C_p , k and soil enzyme activities

项目 Items	过氧化氢酶S-CAT	脲酶S-UE	磷酸酶S-AKP/ALP
潜在矿化势 C_p	0.507*	0.845**	0.840**
矿化常数 k	-0.115	-0.533**	-0.477*

注:**表示在0.01水平(双侧)显著相关;*表示在0.05水平(双侧)显著相关。下同。

Note: ** indicates significant correlation at 0.01 level (bilateral); * indicates significant correlation at the 0.05 level (bilateral). The same below.

表2 土壤有机碳矿化一级动力学参数

Table 2 First order kinetic parameters of SOC mineralization

拟合参数 Parameters	土层深度 Soil depth/cm	A0	A1	A2	A3
潜在矿化势 $C_p/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0~20	930.01±88.88b	2 182.39±426.03a	2 082.06±469.45a	1 373.21±153.86b
	20~40	478.39±86.48bc	1 149.17±357.28a	847.57±138.21ab	399.25±36.62c
矿化常数 $k/10^{-3}\text{d}^{-1}$	0~20	6.78±0.77a	2.96±0.62b	2.94±0.71b	6.10±0.80a
	20~40	6.56±1.39bc	7.86±1.36b	5.87±1.11c	10.40±1.23a
$(C_p/k)/10^5$	0~20	1.374±0.014d	7.389±0.066a	7.102±0.074b	2.255±0.024c
	20~40	0.733±0.014c	1.926±0.063a	1.449±0.023b	0.385±0.006d
R^2	0~20	0.999 39	0.999 34	0.999 46	0.999 59
	20~40	0.997 69	0.997 80	0.998 60	0.998 34

注:同一土层不同小写字母表示不同覆盖作物模式下一级动力学参数差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same soil layer indicate the significant difference of first order kinetic parameters with different cover crop modes ($P<0.05$).

表 4 土壤矿化特征及酶活性与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlation of mineralization characteristics and soil enzyme activity with edaphic physicochemical properties

项目 Items	土壤含水率 Soil moisture	酸碱度 pH	土壤有机碳 SOC	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	微生物量碳 MBC	可溶性有机碳 DOC
潜在矿化势 C_p	-0.359	-0.134	0.821**	-0.283*	0.752**	0.738**	0.374
矿化常数 k	-0.066	0.131	-0.668**	0.473*	-0.550**	-0.474*	-0.085
过氧化氢酶 S-CAT	-0.734**	0.165	0.443*	0.276	0.323	0.419*	0.258
脲酶 S-UE	-0.434*	-0.155	0.876**	-0.227	0.839**	0.891**	0.563**
磷酸酶 S-AKP/ALP	-0.427*	0.082	0.856**	-0.059	0.611**	0.865**	0.635**

盖作物的种植可以显著提高土壤过氧化氢酶、脲酶和磷酸酶的活性,这与之前研究结果^[13]一致,且随着土壤深度的增加,土壤酶活性降低,这与徐凌飞等^[32]的研究结果一致。豆科作物根系发达,其根系分泌物增加了土壤有机质含量,豆科植物残体富含氮素,分解后使土壤含有更多的氮素,从而促进了土壤生物活性和酶活性^[33],禾本科植物的种植有利于土壤有机碳的积累^[34],土壤酶被不同程度地激活。酶活性与有机碳、硝态氮呈显著的正相关关系(表4),即覆盖作物的生长增加了碳的周转和氮的利用,为土壤基质中微生物的增殖和酶的合成、积累提供了有利的环境^[35]。土壤受侵蚀程度会影响土壤酶活性,覆盖作物的种植减少了土壤受侵蚀程度,增加了土壤酶活性^[36]。

覆盖作物类型会对土壤酶活性造成影响,A3 过氧化氢酶活性显著高于 A1 和 A2,是因为 A3 种植了豆科植物毛苕子。有研究显示,毛苕子作为覆盖作物进行种植有利于土壤过氧化氢酶活性的提高^[37],因为毛苕子根系发达,能进入土壤深层改变土壤结构,提高土壤通透性^[38],有利于土壤中好氧微生物的生长及繁殖,进而增强土壤酶活性。A2 脲酶活性显著高于 A1 和 A3,这是因为 A2 种植模式下,土壤有机碳含量最高(表1),微生物可获得的碳源增加,微生物数量增加,进而促进了脲酶活性的提高,也就是说,脲酶活性与土壤有机碳含量正相关(表4),这与 Nevins 等^[39]的研究结果一致。

此外,在干旱环境中,随着覆盖作物种植时间的延长,覆盖作物对土壤微生物群落结构、土壤酶活性的有益影响将会更加明显^[40]。

3.2 多植物覆盖对茶园土壤有机碳矿化特征的影响

研究结果显示,0~20 cm 土壤中有有机碳的矿化速率和累积矿化量明显大于 20~40 cm,这与表层土壤微生物活性高于深层有关^[41]。三种覆盖作物种植模式下的土壤有机碳矿化趋势与对照基本一致,都表现为前期矿化较为快速,后期明显减慢并且趋于平稳,

这与李隽永等^[31]的研究结果相同。培养初期的有机碳矿化速率较高,因为这一时期与对照相比,覆盖作物明显增加了微生物可利用的有机碳不稳定组分,微生物生长代谢过程中可以获得足够的养分,数量较多,活性较强^[42]。然而随着时间延长,培养的中后期土壤中易分解有机碳不断被消耗,微生物的代谢活动受到营养源的制约,活性慢慢降低,致使土壤有机碳矿化速率低于培养初期逐渐趋于稳定^[41,43]。

本研究显示,有机碳矿化作用与土壤有机碳含量呈极显著正相关关系(表4),除此之外土壤有机碳矿化速率还与土壤温度与湿度有关,土壤温度与湿度主要通过影响微生物的活性来影响土壤有机碳的矿化过程^[44]。因此培养后期随着土壤有机碳不断被消耗和土壤湿度逐渐下降,微生物活性降低,有机碳矿化速率下降。

在 0~20 cm 土层覆盖作物种植小区的土壤有机碳累积矿化量和矿化速率均高于对照,且 A1 最高,这与 Jennifer^[45]的研究结果一致。这是因为无论覆盖作物类型如何,覆盖作物残体都能促进碳矿化,但并非覆盖作物越多越好^[46]。在 20~40 cm 土层,A1、A2 的有机碳矿化作用强于 A0,而 A3 则弱于 A0。矿化势与土壤铵态氮含量呈显著负相关关系,而矿化常数则与土壤铵态氮含量呈显著正相关关系,这一结果的产生是因为谭家湾茶园碳、氮较为匮乏,微生物分解有机物释放的无机氮首先要满足自身需求,然后才释放到土壤中,这与 Song 等^[47]的研究结果一致,由此可以推断有机碳矿化速率与土壤铵态氮含量呈显著负相关关系($P<0.05$)。在 20~40 cm 土层土壤铵态氮含量表现为 $A3>A0>A2>A1$,故 C_p/k 值表现为 $A1>A2>A0>A3$ 。

微生物量碳和可溶性有机碳是土壤微生物重要的养分来源,也是有机碳矿化的重要组成成分^[48],覆盖作物的种植增加了微生物量碳和可溶性有机碳的含量,其中 A1 处理含量最高,这与 Frasier^[49]的研究结论一致。另外,覆盖作物白三叶的种植可以有效减缓

土壤酸化^[50],本研究中,A1的土壤pH值最高,所以,A1是三种覆盖作物种植模式中较为适合茶园的覆盖作物种植模式。

3.3 土壤酶活性对土壤有机碳矿化的影响

土壤过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶等是土壤碳循环的主要参与者^[51],主要来源于微生物的代谢和植物根系的分泌^[52],在土壤有机碳的分解转化过程中具有重要作用。覆盖作物种植模式的差异导致其凋落物以及根系分泌物性质有所不同,进而影响土壤酶、微生物和有机碳的空间分布,最终影响土壤有机碳矿化^[53-54]。土壤微生物是土壤有机碳矿化的主要承担者^[55],其数量与土壤有机碳累积矿化量呈显著正相关关系^[56],土壤酶通过酶促反应增加土壤中营养元素的含量,从而激发或者抑制微生物活性,间接参与土壤有机碳的矿化^[57]。本研究中,土壤过氧化氢酶、脲酶以及磷酸酶活性均与 C_p 具有显著或者极显著正相关关系,这之前研究结果一致,说明土壤酶活性可以直接反映土壤有机碳矿化特点^[58]。另外,土壤脲酶和磷酸酶活性与 C_p 呈极显著正相关关系,相关系数大于土壤过氧化氢酶活性与 C_p 的相关系数,说明脲酶和磷酸酶比过氧化氢酶更能反映土壤有机碳矿化特征。

4 结论

(1)覆盖作物种植小区的土壤酶活性均高于对照小区,0~20 cm土层的酶活性均高于20~40 cm土层,不同覆盖作物类型对土壤过氧化氢酶和脲酶活性影响不同,但是对土壤磷酸酶没有显著影响。

(2)与过氧化氢酶相比,土壤脲酶、磷酸酶是更重要的土壤碳循环参与者,其活性与有机碳矿化作用之间呈极显著正相关关系,在土壤有机碳的分解转化过程中具有重要作用。

(3)不同覆盖作物模式有机碳矿化变化趋势基本一致,覆盖作物的种植增加了土壤有机碳矿化速率和累积矿化量。不同覆盖作物模式对土壤有机碳矿化影响不同,随着覆盖作物多样性的增加,0~20 cm土层土壤有机碳的矿化作用增强,但是在20~40 cm土层A3的土壤有机碳矿化作用低于A0。

参考文献:

- [1] 刘瑞丰. 陆地生态系统[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [2] Liu Rui-feng. Terrestrial ecosystem[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998.
- [3] Shackelford G E, Kelsey R, Dicks L V. Effects of cover crops on multiple ecosystem services: Ten meta-analyses of data from arable farm-

- land in California and the Mediterranean[J]. *Land Use Policy*, 2019, 88: 104204.
- [4] 王 雯, 张 雄, 任董董. 不同覆盖作物对马铃薯冬闲田土壤物理性质及防风蚀能力的影响[J]. 榆林学院学报, 2018, 28(6): 67-70.
- WANG Wen, ZHANG Xiong, REN Dong-dong. Effects of different cover crops on soil's physical property and wind erosion resistance of potato fallow in winter[J]. *Journal of Yulin University*, 2018, 28(6): 67-70.
- [5] Vincent-Caboud L V L, Casagrande M C M, David C D C, et al. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39(5): 1-15.
- [6] Kadziene G, Suproniene S, Auskalniene O, et al. Tillage and cover crop influence on weed pressure and *Fusarium* infection in spring cereals [J]. *Crop Protection*, 2020, 127: 104966.
- [7] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 465-473.
- TANG Hai-ming, CHENG Kai-kai, XIAO Xiao-ping, et al. Effects of different winter cover crops on soil organic carbon in a double cropping rice paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 465-473.
- [8] Tautges N E, Chiartas J L, Gaudin A C M, et al. Deep soil inventories reveal that impacts of cover crops and compost on soil carbon sequestration differ in surface and subsurface soils[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3753-3766.
- [9] Elhakeem A, Van der Werf W, Ajal J, et al. Cover crop mixtures result in a positive net biodiversity effect irrespective of seeding configuration [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 285: 106627.
- [10] Acharya B S, Dodla S, Gaston L A, et al. Winter cover crops effect on soil moisture and soybean growth and yield under different tillage systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 195: 104430.
- [11] 罗旭辉, 钟珍梅, 詹 杰, 等. 几种牧草在福建侵蚀茶园生态修复中的应用[J]. 亚热带水土保持, 2009, 21(4): 45-48.
- LUO Xu-hui, ZHONG Zhen-mei, ZHAN Jie, et al. Application of several grasses in ecological restoration of tea garden erosion in Fujian [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2009, 21(4): 45-48.
- [12] 陶宝先, 张金池, 崔志华, 等. 苏南丘陵地区林地土壤酶活性及其与土壤理化性质的相关性[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 44-48.
- TAO Bao-xian, ZHANG Jin-chi, CUI Zhi-hua, et al. Soil enzyme activity under different forest stands and its correlation with soil physical and chemical characters in the south hilly region of Jiangsu Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(2): 44-48.
- [13] 徐华勤, 肖润林, 向佐湘, 等. 稻草覆盖、间作三叶草茶园土壤酶活性与养分的关系[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1537-1543.
- XU Hua-qin, XIAO Run-lin, XIANG Zuo-xiang, et al. Soil enzyme activities and their relations with soil fertility in a tea plantation under straw mulching and white clover intercropping[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1537-1543.
- [14] Hamido S A, Kpombrekou A K. Cover crop and tillage effects on soil enzyme activities following tomato[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009,

- 105(2):269-274.
- [14] Ouyang Y, Reeve J R, Norton J M. Soil enzyme activities and abundance of microbial functional genes involved in nitrogen transformations in an organic farming system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54:437-450.
- [15] Mukumbareza C, Muchaonyerwa P, Chidzuza C. Effects of oats and grazing vetch cover crops and fertilisation on microbial biomass and activity after five years of rotation with maize[J]. *South African Journal of Plant and Soil*, 2015, 32(4):189-197.
- [16] Liang S, Grossman J, Shi W. Soil microbial responses to winter legume cover crop management during organic transition[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 65:15-22.
- [17] 巩庆利, 翟丙年, 郑 伟, 等. 渭北旱地苹果园生草覆盖下不同肥料配施对土壤养分和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1):205-212.
- GONG Qing-li, ZHAI Bing-nian, ZHENG Wei, et al. Effects of grass cover combined with different fertilization regimes on soil nutrients and enzyme activities in apple orchard in Weibei dryland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1):205-212.
- [18] 周 焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(11):1901-1907.
- ZHOU Yan, XU Xian-gen, RUAN Hong-hua, et al. Mineralization rates of soil organic carbon along an elevation gradient in Wuyi Mountain of southeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(11):1901-1907.
- [19] Davidson E A, Galloway L F, Strand M K. Assessing available carbon: Comparison of techniques across selected forest soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18(1):45-64.
- [20] 闵继胜, 胡 浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7):21-27.
- MIN Ji-sheng, HU Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7):21-27.
- [21] Ghimire B, Ghimire R, Vanleeuwen D, et al. Cover crop residue amount and quality effects on soil organic carbon mineralization[J]. *Sustainability*, 2017, 9(12):2361.
- [22] McDaniel M D, Grandy A S, Tiemann L K, et al. Crop rotation complexity regulates the decomposition of high and low quality residues [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78:243-254.
- [23] Zhou X, Chen C, Lu S, et al. The short-term cover crops increase soil labile organic carbon in southeastern Australia[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(2):239-244.
- [24] Sainju U M, Schomberg H H, Singh B P, et al. Cover crop effect on soil carbon fractions under conservation tillage cotton[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1):205-218.
- [25] 黎小萍, 陈华玲. 茶园生草栽培技术及作用[J]. *中国茶叶*, 2001, 23(1):16-17.
- LI Xiao-ping, CHEN Hua-ling. Cultivation techniques and functions of green grass in tea garden[J]. *China Tea*, 2001, 23(1):16-17.
- [26] 王林军, 李玉胜, 王兆顺, 等. 北方茶园生草栽培关键技术[J]. *中国茶叶*, 2019, 41(5):52-54.
- WANG Lin-jun, LI Yu-sheng, WANG Zhao-shun, et al. Key techniques for the cultivation of green grass in northern tea garden[J]. *China Tea*, 2019, 41(5):52-54.
- [27] Bone N J, Thomson L J, Ridland P M, et al. Cover crops in Victorian apple orchards: Effects on production, natural enemies and pests across a season[J]. *Crop Protection*, 2009, 28(8):675-683.
- [28] 祁小旭, 王红岩, 林 峰, 等. 黄顶菊对入侵地群落动态及植物生长生理特征的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(12):4463-4477.
- QI Xiao-xu, WANG Hong-yan, LIN Feng, et al. Effects of *Flaveria bidentis* invasion on the community composition and performance of native plants grown in invaded soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12):4463-4477.
- [29] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9):1231-1243.
- [30] 刘德燕, 宋长春, 王 丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(12):3525-3530.
- LIU De-yan, SONG Chang-chun, WANG Li, et al. Exogenous nitrogen enrichment impact on the carbon mineralization and DOC of the freshwater marsh soil[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3525-3530.
- [31] 李隽永, 窦晓琳, 胡印红, 等. 城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化的差异[J]. *生态学报*, 2018, 38(1):112-121.
- LI Jun-yong, DOU Xiao-lin, HU Yin-hong, et al. Variation in soil organic carbon mineralization under various land cover types in urban areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 38(1):112-121.
- [32] 徐凌飞, 韩清芳, 吴中营, 等. 清耕和生草梨园土壤酶活性的空间变化[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(23):4977-4982.
- XU Ling-fei, HAN Qing-fang, WU Zhong-ying, et al. Spatial variability of soil enzyme activity in pear orchard under clean and sod cultivation models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(23):4977-4982.
- [33] 吴玉森, 张艳敏, 冀晓昊, 等. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤养分、酶活性及果实品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(1):99-108.
- WU Yu-sen, ZHANG Yan-min, JI Xiao-hao, et al. Effects of natural grass on soil nutrients, enzyme activity and fruit quality of pear orchard in Yellow River Delta[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(1):99-108.
- [34] Mullen M, Melhorn C, Tyler D, et al. Biological and biochemical soil properties in no-till corn with different cover crops[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 53(3):219-224.
- [35] Dinesh R, Suryanarayana M A, Shyam P G, et al. Influence of leguminous cover crops on microbial and selected enzyme activities in soils of a plantation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, 162(1):57-60.
- [36] Salam A, Afandi S, Sriyani N, et al. Soil enzymatic activities in a hilly coffee plantation in Lampung Province, South Sumatra, Indonesia, under plant cover management[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2001, 47(4):695-702.
- [37] Jihyun L, Sangin S. Differences of soil enzyme activity after incorpora-

- tion with Chinese milk vetch litter cut at different growth stages[J]. *Korean Journal of Crop Science*, 2007, 52(3):341-347.
- [38] 徐宏强, 汪贵斌, 曹福亮, 等. 生物覆盖对银杏用材林土壤酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(2):21-26.
XU Hong-qiang, WANG Gui-bin, CAO Fu-liang, et al. Effects of biological mulching on soil enzyme activity of ginkgo (*Ginkgo biloba* L.) timber plantation[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 39(2):21-26.
- [39] Nevins C J, Lacey C, Armstrong S. The synchrony of cover crop decomposition, enzyme activity, and nitrogen availability in a corn agroecosystem in the midwest United States[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 197:104518.
- [40] Calderón F J, Nielsen D, Acosta-Martínez V, et al. Cover crop and irrigation effects on soil microbial communities and enzymes in semiarid agroecosystems of the central great plains of North America[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2):192-205.
- [41] 康成芳, 宫渊波, 车明轩, 等. 川西高寒山地灌丛草甸不同海拔土壤有机碳矿化的季节动态[J]. 生态学报, 2020, 40(4):1367-1375.
KANG Cheng-fang, GONG Yuan-bo, CHE Ming-xuan, et al. Seasonal dynamics of soil organic carbon mineralization for alpine shrub meadow at different elevations, western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4):1367-1375.
- [42] Zhou X, Chen C, Lu S, et al. The short-term cover crops increase soil labile organic carbon in southeastern Australia[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(2):239-244.
- [43] 柳 敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11):1412-1417.
LIU Min, YU Wan-tai, JIANG Zi-shao, et al. A research review on soil active organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11):1412-1417.
- [44] 常宗强, 马亚丽, 刘 蔚, 等. 土壤冻融过程对祁连山森林土壤碳氮的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1):200-206.
CHANG Zong-qiang, MA Ya-li, LIU Wei, et al. Effect of soil freezing and thawing on the carbon and nitrogen in forest soil in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1):200-206.
- [45] Jennifer B. Feedbacks between nitrogen fixation and soil organic matter increase ecosystem functions in diversified agroecosystems[J]. *Ecological Applications*, 2019, 29(8):e01986.
- [46] Ghimire B, Ghimire R, Vanleeuwen D, et al. Cover crop residue amount and quality effects on soil organic carbon mineralization[J]. *Sustainability*, 2017, 9(12):2316.
- [47] Song M H, Jiang J, Xu X L, et al. Correlation between CO₂ efflux and net nitrogen mineralization and its response to external C or N supply in an alpine meadow soil[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(5):666-675.
- [48] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2):211-219.
- [49] Frasier I, Quiroga A, Noellemeyer F. Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562:628-639.
- [50] 罗博仁, 李聪聪, 朱悦蕊, 等. 3种绿肥对茶园土壤pH值和交换性阳离子含量的影响[J]. 亚热带农业研究, 2019, 15(2):121-126.
LUO Bo-ren, LI Cong-cong, ZHU Yue-rui, et al. Effects of three green manures on soil pH and exchangeable cation content in tea garden[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2019, 15(2):121-126.
- [51] 贾曼莉, 郭 宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(7):2777-2784.
JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke. Mineralization of soil organic carbon and its relationship with soil enzyme activities in apple orchard in Weibei [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7):2777-2784.
- [52] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [53] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(6):1832-1837.
SHI Xue-jun, PAN Jian-jun, CHEN Jin-ying, et al. Effects of different types of litters on soil organic carbon mineralization[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(6):1832-1837.
- [54] 沈 宏, 曹志洪, 徐本生. 玉米生长期土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4):88-91.
SHEN Hong, CAO Zhi-hong, XU Ben-sheng. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity and their relationships during maize growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(4):88-91.
- [55] 肖海兵. 黄土高原侵蚀与植被恢复驱动下土壤有机碳矿化与固定特征及其微生物作用机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
XIAO Hai-bing. Soil organic carbon mineralization and sequestration and its microbial influencing mechanisms under the driving of water erosion and vegetation restoration on the Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [56] 高雅晓玲, 苗淑杰, 乔云发, 等. 干湿循环促进风沙土土壤有机碳矿化[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1):140-147.
GAO Ya-xiao-ling, MIAO Shu-jie, QIAO Yun-fa, et al. Dry-wet cycles promote soil organic carbon mineralization in aeolian sandy soil [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(1):140-147.
- [57] Orwin K H, Dickie I A, Holdaway R, et al. A comparison of the ability of PLFA and 16S rRNA gene metabarcoding to resolve soil community change and predict ecosystem functions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117:27-35.
- [58] Herrera I, Ferrer-Paris J R, Benzo D, et al. An invasive succulent plant (*Kalanchoe daigremontiana*) influences soil carbon and nitrogen mineralization in a neotropical semiarid zone[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(4):632-643.