

王明亮, 刘惠芬, 王丽丽, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3):332-339.

WANG Ming-liang, LIU Hui-fen, WANG Li-li, et al. Effects of different cropping patterns on soil microbial community functional diversity in tea gardens[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3):332-339.



开放科学 OSID

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^{1,2}, 刘惠芬^{1*}, 王丽丽^{2*}, 杨殿林², 林艳艳², 修伟明², 王慧², 黄进³, 张小福⁴

(1. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 十堰市农业科学院果茶研究所, 湖北 十堰 442000; 4. 十堰市经济作物研究所, 湖北 十堰 442714)

摘要:为探讨覆盖作物对土壤微生物群落功能多样性的影响,选择湖北省十堰市郧阳区谭家湾镇圩坪寺村茶园为研究对象,以自然留养杂草为对照(CK),设置黑麦草+白三叶2种作物混播(EZ)、黑麦草+白三叶+早熟禾+红三叶4种作物混播(SZ)、黑麦草+白三叶+早熟禾+红三叶+紫羊茅+毛苕子+波斯菊+百日草8种作物混播(BZ)三种覆盖作物模式,研究了不同覆盖作物模式对茶园0~15、15~30 cm两个土层土壤微生物群落功能多样性的影响。结果表明:SZ处理0~15 cm土层的土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性均高于其他处理,15~30 cm土层土壤脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性均高于其他处理,而蔗糖酶活性低于其他覆盖作物处理。与CK处理相比,覆盖作物增加了0~15 cm土层土壤微生物群落碳源平均颜色变化率(AWCD),且覆盖作物可改善0~15 cm土层土壤微生物丰富度指数、均匀度指数和优势度指数,而对15~30 cm土层影响较小。研究表明,覆盖作物可提升茶园土壤微生物群落功能多样性,且4种作物混播处理0~15 cm土层效果最优。

关键词:茶园;覆盖模式;不同土层;群落功能多样性

中图分类号:S571.1;Q145

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)03-0332-08

doi:10.13254/j.jare.2020.0028

Effects of different cropping patterns on soil microbial community functional diversity in tea gardens

WANG Ming-liang^{1,2}, LIU Hui-fen^{1*}, WANG Li-li^{2*}, YANG Dian-lin², LIN Yan-yan², XIU Wei-ming², WANG Hui², HUANG Jin³, ZHANG Xiao-fu⁴

(1. College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, 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: This study was performed in a tea garden in Xupingsi Village, Tanjiawan Town, Yunyang District, Shiyan City, Hubei Province, to evaluate the effects of different mulching crop patterns on soil microbial community functions in 0~15 and 15~30 cm soil layers of the tea garden. Four treatments were selected: Natural grasses (CK), ryegrass+white clover (EZ), ryegrass+white clover+bluegrass+red clover (SZ), and ryegrass+white clover+bluegrass+red clover+purple fescue+hairy raccoon+cosmos+zinnia (BZ). The results showed that the activities of urease, invertase, catalase, and phosphatase in the 0~15 cm soil layer treated with SZ were higher than those in the other treatments; The

收稿日期:2020-01-17 录用日期:2020-03-24

作者简介:王明亮(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为作物生长环境。E-mail:w837035936@163.com

*通信作者:刘惠芬 E-mail:paula913@126.com;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);中央牛顿基金项目(BB/013484/1);公益性行业(农业)科研专项经费项目(2015-3121-04)

Project supported: Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS (CAAS-XTCX2016015); Central Newton Fund Project (BB/013484/1); Special Fund Project for Scientific Research of Public Welfare Industry (Agriculture) (2015-3121-04)

<http://www.aed.org.cn>

activities of urease, catalase, and phosphatase in the 15~30 cm soil layer treated with SZ were higher than those in the other treatments, whereas the activity of invertase was lower than that in the other mulching treatments. The mulching crops increased the average well color development(AWCD) of microbial communities in the 0~15 cm soil layer; AWCD was the highest in the SZ treatment, indicating the highest utilization efficiency of the carbon source. The mulching crops improved the soil microbial richness index, evenness index, and dominance index in the 0~15 cm soil layer, but had few effects on these parameters in the 15~30 cm soil layer. The results indicate that the mulching crops can improve soil enzyme activity and microbial community functional diversity, and SZ treatment had the best effect on the 0~15 cm soil layer. The findings of this study would be able to provide a theoretical basis for analyzing the effects of different mulching crop patterns on soil functional diversity of microbial communities in tea plantations in the future.

Keywords: tea plantation; cover pattern; different soil layers; community functional diversity

茶树(*Camellia sinensis* (L.) O.Kuntze)是我国重要的经济作物之一,具有耐阴、喜酸性土和畏寒等特性。茶园一般采取免耕模式,易造成土壤板结和土壤微生态环境改变^[1-4]。覆盖作物(目标作物以外、人为种植的牧草或其他植物)作为一种土壤调控技术,不仅能提高水分利用效率,而且能改善土壤微生物生境等^[5-6]。覆盖豆科类作物,可为土壤提供氮素、抑制杂草和减少病虫害等^[7]。此外,覆盖作物形成的凋落物能增加土壤中微生物群体的数量和多样性^[8]。研究表明,耕作方式和种植作物在调节土壤微生物群落功能多样性和土壤酶活性过程中起到至关重要的作用^[9]。在陇东地区,种植苜蓿较种植冬小麦能显著增加土壤碳、氮量,且与冬小麦覆盖相比,苜蓿覆盖下的土壤酶活性有所提高^[10]。在华北平原,与冬闲田土壤相比,毛叶苕子覆盖下的土壤酶活性得到提高^[11]。

作物多样性是作物及其与环境形成的生态复合体,以及与此相关的各种生态过程的总和^[12]。不同种类作物之间存在着相互促进、相互利用的密切关系,作物的某些品质特性只有在种植多种作物时才能表现出来^[13]。与单播相比,混播不仅在提高产量、品质方面具有优势^[14-15],还在改善土壤肥力方面具有明显作用。同时,混播能形成合理冠层结构,改变近地小气候,使种植区地表形成更适宜植物生长的微环境^[16]。豆+禾混播处理中豆科牧草具有强大的生物固氮作用^[17],而且覆盖作物的凋落物以及根系残留等,也使土壤肥力得到显著改善。

因此,在茶园生态系统的可持续发展中研究覆盖作物条件下土壤微生物群落功能多样性及酶活性的变化特征具有重要意义。但关于不同覆盖作物模式对土壤微生物群落功能多样性及酶活性的影响研究较为鲜见。因此,本研究以茶园不同覆盖作物模式为研究对象,分析其对土壤微生物群落功能多样性和酶活性的影响,旨在筛选出有助于改善土壤微生物群落

功能多样性和酶活性的适宜覆盖模式,以期为茶园不同覆盖作物模式提供数据参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验选取湖北省十堰市郧阳区谭家湾镇圩坪寺村茶园,试验地位于北纬32°55',东经110°52',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,年平均气温16℃,pH值6.3~6.8。土壤以泥质岩黄棕壤为主,土壤基础肥力相对均匀。

1.2 试验材料

研究以不同作物为试材,其中禾本科3种,分别为黑麦草(*Lolium perenne* L)、早熟禾(*Poa annua* L)、紫羊茅(*Festuca rubra* L);豆科3种,分别为白三叶(*Trifolium repens* L)、红三叶(*Trifolium pratense*)、毛苕子(*Licia villosa* Roth);菊科2种,分别为波斯菊(*Cosmos bipinnata* Cav)、百日草(*Zinnia elegans* Jacq)。茶树品种为“鄂茶10号”。

1.3 试验方法

本试验每年3月份开始种植覆盖作物。试验共设4个处理,分别为:自然留养杂草(CK)、黑麦草+白三叶2种作物混播(EZ)、黑麦草+白三叶+早熟禾+红三叶4种作物混播(SZ)、黑麦草+白三叶+早熟禾+红三叶+紫羊茅+毛苕子+波斯菊+百日草8种作物混播(BZ)。每个处理3次重复,采用随机区组设计。不同作物种子等量混合,撒播于茶树行间,种植密度为16.7 kg·km⁻²,小区面积400 m²,不同处理间未设置间隔。于2018年8月采集土壤样品,采用“S”形五点采样法采集茶园0~15、15~30 cm土层土壤样品,然后将同一个土层的5个土样混合成一个混合样,装入密封袋,作好标签记录,带回实验室,直接放于冰箱4℃保存,用于测定土壤酶活性及微生物群落功能多样性等

生物学参数。

1.4 测定指标

土壤酶活性的测定参考关松荫^[18]的方法:脲酶采用苯酚钠比色法;蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法;磷酸酶采用苯磷酸二钠比色法;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定容量法。

土壤有效氮(铵态氮和硝态氮)经 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液浸提后用流动分析仪测定。

微生物的测定采用 Biolog-ECO 微平板法(96孔)。称取相当于 10 g 烘干质量的新鲜土样放入无菌三角瓶(250 mL),加入 90 mL 已灭菌的磷酸缓冲液($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 体积比为 0.1%),然后将三角瓶置于摇床, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 60 min,静置 15 min;取 30 mL 上清液到灭菌的离心管, $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,过滤,滤液于 $8500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 再离心 10 min;取悬浮液稀释(1:10 000)。用微量移液器取 150 μL 提取液于 Biolog-Eco 微孔板上, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中培养,每 24 h 读取 OD 值($\lambda=590 \text{ nm}$),直至 168 h 试验结束。

微平板平均颜色变化率(AWCD)计算方法:

$$\text{AWCD} = \sum (C_i - R) / n$$

式中: C_i 为每个培养基孔的光密度值; R 为对照孔的光密度值; n 为 Biolog-Eco 微平板上供试碳源的种类数, $n=31$,重复 3 次。

1.5 数据分析

采用 Excel 2003 软件对数据进行整理、作图,采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析,用 Duncan 法进行平均值差异显著性检验。

2 结果与分析

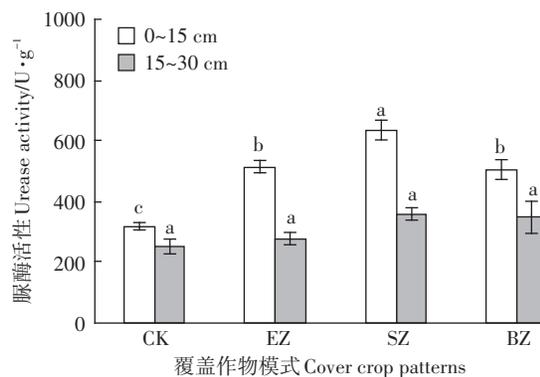
2.1 不同覆盖作物模式对茶园土壤酶活性的影响

2.1.1 对茶园土壤脲酶活性的影响

不同覆盖作物对茶园土壤脲酶活性的影响见图 1。在 0~15 cm 土层,各处理土壤脲酶活性表现为 $\text{CK} < \text{BZ} < \text{EZ} < \text{SZ}$ 。其中, SZ 处理土壤脲酶活性为 $635.27 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,分别较 CK 、 EZ 和 BZ 处理提高 97.89%、23.22% 和 25.60%,且处理间差异显著($P < 0.05$)。在 15~30 cm 土层,各处理土壤脲酶活性表现为 $\text{CK} < \text{EZ} < \text{BZ} < \text{SZ}$ 。其中, SZ 处理土壤脲酶活性为 $358.29 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。与 CK 处理相比, EZ 、 SZ 和 BZ 处理 15~30 cm 土层土壤脲酶活性均无显著差异($P > 0.05$)。

2.1.2 对茶园土壤蔗糖酶活性的影响

不同覆盖作物对茶园土壤蔗糖酶活性的影响见图 2。在 0~15 cm 土层,各处理土壤蔗糖酶活性表现



同一土层不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters in the same soil layer indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1 不同覆盖作物对茶园土壤脲酶活性的影响
Figure 1 Effects of different cover crops on urease activity in tea garden soil

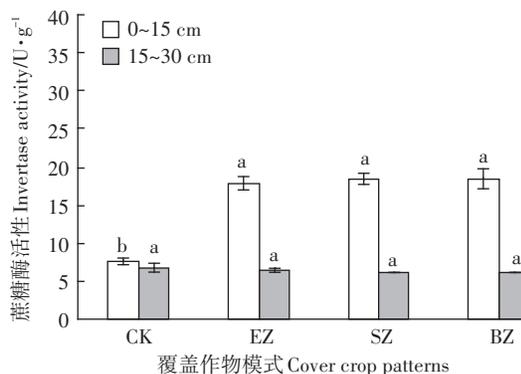


图 2 不同覆盖作物对茶园土壤蔗糖酶活性的影响
Figure 2 Effect of different cover crops on invertase activity in tea garden soil

为 $\text{CK} < \text{EZ} < \text{BZ} < \text{SZ}$ 。与 CK 相比, SZ 处理 0~15 cm 土层的土壤蔗糖酶活性显著提高 148.32% ($P < 0.05$); BZ 处理显著提高 145.50% ($P < 0.05$); EZ 处理显著提高 139.86% ($P < 0.05$)。 SZ 处理 0~15 cm 土层的土壤蔗糖酶活性与 EZ 、 BZ 处理相比均无显著差异($P > 0.05$)。在 15~30 cm 土层,各处理土壤蔗糖酶活性表现为 $\text{SZ} < \text{BZ} < \text{EZ} < \text{CK}$ 。与 CK 处理相比, EZ 、 BZ 和 SZ 处理 15~30 cm 土层的土壤蔗糖酶活性均无显著差异($P > 0.05$)。

2.1.3 对茶园土壤磷酸酶活性的影响

不同覆盖作物对茶园土壤磷酸酶活性的影响见图 3。在 0~15 cm 土层,各处理土壤磷酸酶活性表现为 $\text{CK} < \text{BZ} < \text{EZ} < \text{SZ}$ 。与 CK 处理相比, SZ 处理 0~15 cm 土层的土壤磷酸酶活性显著提高了 161.66% ($P < 0.05$),而 SZ 处理 0~15 cm 土层的土壤磷酸酶活性与

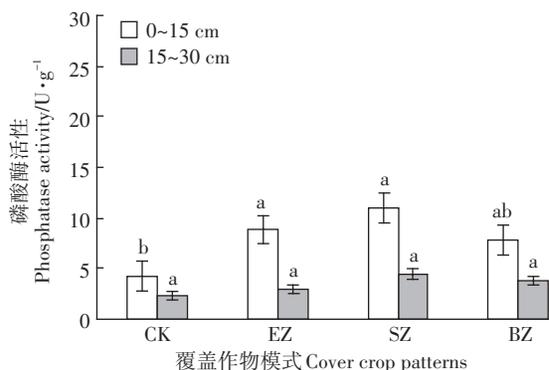


图3 不同覆盖作物对茶园土壤磷酸酶活性的影响

Figure 3 Effects of different cover crops on phosphatase activity in tea garden soil

EZ和BZ处理相比无显著差异($P>0.05$)。在15~30 cm土层,各处理土壤磷酸酶活性表现为CK<EZ<BZ<SZ。与CK处理相比,EZ、SZ和BZ处理15~30 cm土层的土壤磷酸酶活性均无显著差异($P>0.05$)。

2.1.4 对茶园土壤过氧化氢酶活性的影响

不同覆盖作物对茶园土壤过氧化氢酶活性的影响见图4。在0~15 cm土层,各处理土壤过氧化氢酶活性表现为CK<EZ<BZ<SZ。与CK处理相比,EZ、SZ、BZ处理0~15 cm土层的土壤过氧化氢酶活性均具有显著差异($P<0.05$)。SZ处理0~15 cm土层的土壤过氧化氢酶活性较CK处理显著提高了208.91%($P<0.05$),较EZ、BZ处理显著提高了103.34%、55.63%($P<0.05$)。在15~30 cm土层,各处理土壤过氧化氢酶活性表现为CK<EZ<BZ<SZ。与CK处理相比,EZ、SZ和BZ处理15~30 cm土层的土壤过氧化氢酶活性均具有显著差异($P<0.05$),SZ处理15~30 cm土层的土壤过氧化氢酶活性与BZ处理相比无显著差异($P>0.05$),而与EZ处理相比差异显著($P<0.05$)。

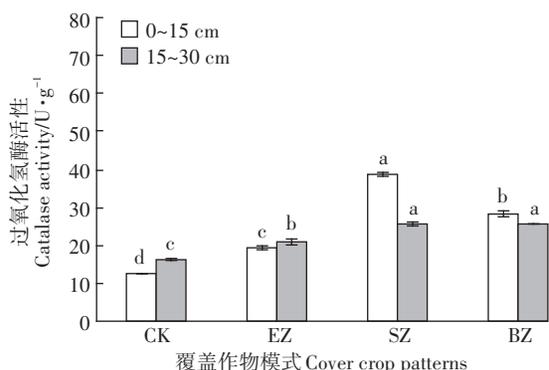


图4 不同覆盖作物对茶园土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 4 Effect of different cover crops on catalase activity in tea garden soil

2.2 不同覆盖作物模式对茶园土壤有效氮含量的影响

不同覆盖作物处理下茶园土壤硝态氮、铵态氮含量变化见表1。与CK处理相比,EZ、SZ和BZ处理0~15、15~30 cm土层的土壤铵态氮含量均无显著差异($P>0.05$)。与CK处理相比,EZ和BZ处理0~15、15~30 cm土层的土壤硝态氮含量均无显著差异($P>0.05$)。与CK处理相比,SZ处理显著降低0~15 cm土层的土壤硝态氮含量($P<0.05$);与EZ处理相比,SZ处理显著降低0~15 cm土层的土壤硝态氮含量($P<0.05$),而BZ处理与其无显著差异($P>0.05$)。

表1 不同覆盖作物对茶园土壤有效氮含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Effects of different cover crops on available nitrogen in tea garden soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	0~15 cm		15~30 cm	
	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen
CK	5.71±3.23a	7.98±2.84a	6.32±2.29a	3.98±1.92a
EZ	5.15±1.11a	8.21±3.74a	8.09±0.42a	6.30±5.34a
SZ	4.79±0.69a	2.59±0.06b	7.39±0.74a	2.15±0.35a
BZ	5.15±1.13a	4.44±0.96ab	4.39±2.89a	2.70±0.87a

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference($P<0.05$).

2.3 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

2.3.1 土壤微生物群落代谢多样性变化

茶园的土壤丰富度指数、均匀度指数和优势度指数可反映土壤微生物物种的丰富度以及群落物种的均匀度。不同覆盖作物处理下土壤微生物群落代谢多样性变化见图5。与CK处理相比,EZ、SZ和BZ处理0~15 cm土层的土壤微生物物种丰富度指数、优势度指数和均匀度指数均显著提高($P<0.05$),其大小顺序分别表现为SZ>BZ>EZ>CK、SZ>EZ>BZ>CK和SZ>EZ>BZ>CK。与CK处理相比,EZ、SZ和BZ处理15~30 cm土层的土壤微生物物种丰富度指数、均匀度指数和优势度指数均无显著差异($P>0.05$);与EZ、BZ处理相比,SZ处理15~30 cm土层的土壤微生物物种均匀度指数均具有显著差异($P<0.05$),其中SZ处理的均匀度指数最高,表明4种覆盖作物处理下土壤微生物物种均匀度最高。

2.3.2 板孔平均颜色变化率

AWCD是表示土壤微生物群落利用单一碳源的指标^[19]。从培养开始后,每隔24 h测定AWCD,得到

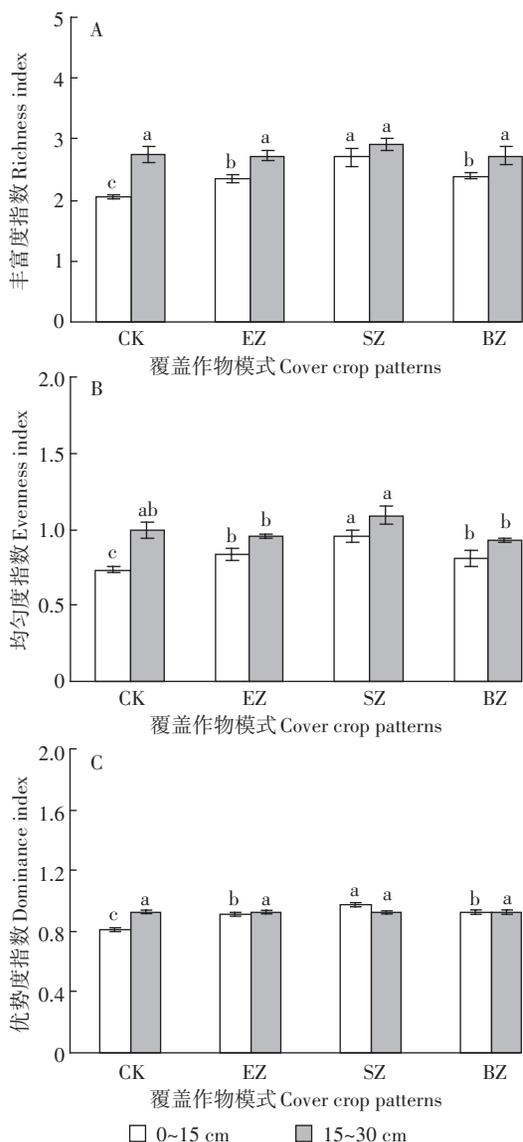


图5 不同覆盖作物模式下不同土层土壤微生物群落多样性指数变化

Figure 5 The diversity indexes of soil microbial community in different soil layers under different cover modes

其随时间变化的动态图(图6)。如图6A所示,在0~15 cm土层,随着时间变化,微生物对碳源的利用量增加。四种不同处理AWCD均在24~72 h内急剧升高,在72 h后微生物群落对碳源利用能力呈减弱趋势。其中SZ处理的AWCD一直处于最高,说明其土壤微生物群落利用碳源能力最强。如图6B所示,在15~30 cm土层,四种不同处理AWCD均在24~96 h内急剧升高,在96 h后微生物群落对碳源利用能力呈减弱趋势。

3 讨论

土壤酶活性可一定程度上反映土壤熟化程度和

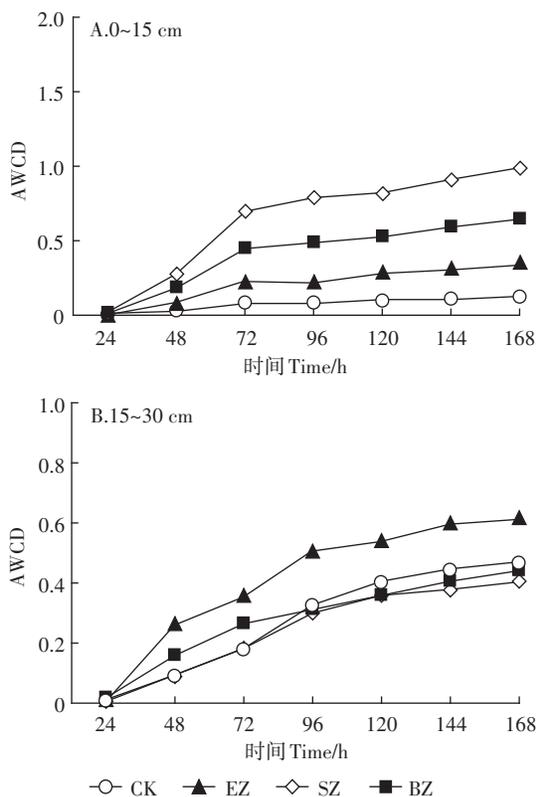


图6 不同覆盖作物模式下不同土层土壤微生物群落平均颜色变化率(AWCD)动态变化

Figure 6 Dynamic of average well color development(AWCD) of soil microbial communities in different soil layers under different cover modes

肥力水平,且可作为评价土壤肥力的重要指标^[20]。土壤脲酶是催化尿素水解的酶,是土壤中决定氮转化的关键酶,其活性高低可反映土壤无效态氮向有效态氮转化及供应无机态氮的能力^[21];磷酸酶在土壤中发生的实际化学反应是将有机大分子元素中的磷通过化学反应分解出来,成为无机磷元素,从而更好地被植物吸收^[20];土壤蔗糖酶是参与土壤有机碳循环的酶,其活性反映了土壤的熟化程度和肥力水平,对增加土壤中易溶性营养物质起到非常重要的作用^[22];土壤过氧化氢酶是微生物或植物产生的一类氧化还原酶,是土壤中的重要酶类,能催化很多反应,以过氧化氢为底物可快速将土壤代谢产生的废物转化为无害或毒性较小的物质,同时释放出氧气^[23]。因此,土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶及蔗糖酶活性是评价土壤肥力的重要指标^[24]。本研究表明,茶园采用不同覆盖作物模式对不同土层土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性的影响不同,总体而言,覆盖作物可以增加土壤酶的活性。这与关松荫^[18]研究结果基本一致,孙计平等^[25]研究发现,在梨园中随着黑麦草种植年限的增

加,表层土壤酶活性均显著高于对照。其原因一方面可能与不同覆盖作物改善土壤的温度、水分和土壤有机质的状况有关^[26-28];另一方面可能是由于不同覆盖作物的养分含量及分解速度不同^[29]。另外,本研究发现不同覆盖作物模式对土壤酶活性的影响不同,4种作物混播模式(SZ处理)土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性均优于其他三种模式,与研究中土壤硝态氮的表现相似,这可能是由于4种作物混播模式下根系的氮代谢增强,因而土壤酶活性也较高;另一方面可能是随着作物多样性的增加,作物之间的互补效应大于竞争效应,土壤根系增多,提高土壤的氧气利用率,为微生物提供更好的条件,使得酶活性提高。但随着作物多样性进一步增加,作物间的竞争效应大于互补效应,土壤的养分、水热条件变差,土壤酶活性开始下降。

土壤微生物不仅参与土壤中矿质元素的矿化,而且对土壤团聚体的形成和稳定发挥重要作用^[30-32]。研究表明,土壤微生物对碳源利用能力和代谢活性的大小可用AWCD大小表示^[33]。在本研究中不同覆盖作物模式对茶园土壤微生物群落碳源利用能力具有明显影响。在0~15 cm土层,不同覆盖作物模式与自然留养杂草相比均使AWCD增加,这表明覆盖作物有利于维持土壤微生物的碳源利用能力,这与Six等^[8]研究结果基本一致。其原因可能是由于覆盖作物中含有丰富的碳和营养物质,凋落物提供的碳源和营养物质被土壤微生物利用,活性增加^[34]。在0~15 cm土层,四种覆盖作物模式中SZ处理增加AWCD效果最佳,其原因可能是4种作物混播较明显改善了土壤微生物的优势种群,增加了碳源利用率。

茶园覆盖作物后,凋落物及根系分泌物为茶园土壤微生物提供了丰富的营养物质和生存空间,因而会引起土壤微生物优势种群和数量的巨大变化。龙妍等^[35]研究表明,葡萄园种植植物会增加土壤微生物数量,与本研究的结果基本一致,茶园覆盖作物后提高了0~15 cm土层中微生物的数量,而对15~30 cm土层影响较小,各处理对土壤微生物数量的影响差别较大。另外,与自然留养杂草相比,四种覆盖作物模式中SZ处理最有利于提高土壤微生物群落功能多样性,这可能是由于4种覆盖作物形成的凋落物及根系分泌物更有利于土壤微生物群落功能发挥。

4 结论

(1)与自然留养杂草相比,覆盖作物可以不同程

度改善0~15 cm土层土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性。

(2)与自然留养杂草相比,覆盖作物提高了茶园0~15 cm土层土壤微生物对碳源的利用程度,且提高了土壤微生物物种丰富度指数、均匀度指数和优势度指数。

(3)与自然留养杂草相比,覆盖作物对15~30 cm土层土壤微生物群落功能多样性亦有改善作用,但影响较小。

(4)黑麦草+白三叶+早熟禾+红三叶4种作物混播模式对十堰茶园表层土壤性质的改善能力最优。

参考文献:

- [1] 韩文炎,阮建云,林智,等. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列茶树专用肥的研制[J]. 茶叶科学, 2002, 22(1): 70-74.
HAN Wen-yan, RUAN Jian-yun, LIN Zhi, et al. The major nutritional limiting factors in tea soils and development of tea special fertilizer series[J]. *Journal of Tea Science*, 2002, 22(1): 70-74.
- [2] 李秀峰,李云. 茶树栽培中土壤酸碱度改良的研究进展[J]. 茶业通报, 2009, 31(4): 156-157.
LI Xiu-feng, LI Yun, Research progress on soil acidity and alkalinity improvement in tea cultivation[J]. *Journal of Tea Business*, 2009, 31(4): 156-157.
- [3] 王晟强,郑子成,李廷轩,等. 植茶年限对土壤团聚体中交换性盐基离子分布的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 1013-1020.
WANG Sheng-qiang, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan, et al. Effects of age of tea plantations on distribution of exchangeable base cations in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 1013-1020.
- [4] 罗长城. 中老龄低产茶园台刈改造与管理技术[J]. 汉中科技, 2010(3): 34-35.
LUO Chang-cheng. Reconstruction and management technology of middle-aged and low-yield tea garden[J]. *Hanzhong Science & Technology*, 2010(3): 34-35.
- [5] Bugg R L. Cover crops and control arthropod pests of agriculture[C]// Hargrove W L. Cover crops for clean water. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991: 157-162.
- [6] 刘晓冰,宋春雨,Stephen J,等. 覆盖作物的生态效应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 365-368.
LIU Xiao-bing, SONG Chun-yu, Stephen J, et al. Ecological effects of cover crops[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 365-368.
- [7] 王华. 冬闲田种植牧草的产量、品质及对稻田生态功能的影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2014.
WANG Hua. Study on the yield and quality of pasture grass in winter fallow field and its influence on biologic function to paddy field[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [8] Six J, Frey S D, Thiet R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agro-ecosystems[J]. *Soil Science Society of*

- America Journal*, 2006, 70:555-569.
- [9] 梁晓慧. 中国农作物多样性及其保护现状[J]. 中国农业信息, 2009(4):10-12.
LIANG Xiao-hui. Crop diversity and protection status in China[J]. *China Agricultural Informatics*, 2009(4):10-12.
- [10] 刘成玉. 论作物多样性对农田生态系统稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 1990, 9(6):26-27, 37.
LIU Cheng-yu. On the impact of crop diversity on the stability of farmland ecosystem[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1990, 9(6):26-27, 37.
- [11] Berdahl J D, Karn J F, Hendrickson J R. Dry matter yields of cool-season grass monocultures and grass-alfalfa binary mixtures[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2):463-467.
- [12] Sheaffer C C, Miller D W, Marten G C. Grass dominance and mixture yield and quality in perennial grass-alfalfa mixtures[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1991, 3(4):480-485.
- [13] 杨恒山, 刘江, 张宏宇, 等. 不同播种方式下苜蓿与无芒雀麦人工草地的小气候特征分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2):175-179.
YANG Heng-shan, LIU Jiang, ZHANG Hong-yu, et al. Analysis of microclimate characteristics of man-made alfalfa and smooth brome grass grassland under different sowing patterns[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2):175-179.
- [14] Trannin W S, Urquiaga S, Guerra G, et al. Interspecies competition and N transfer in a tropical grass-legume mixture[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2000, 32(6):441-448.
- [15] Gaudin A C M, Tolhurst T N, Ker A P, et al. Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(2):e0113261.
- [16] 路怡青, 朱安宁, 张佳宝, 等. 免耕和秸秆还田对小麦生长期土壤酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3):329-334.
LU Yi-qing, ZHU An-ning, ZHANG Jia-bao, et al. Effects of no-tillage and straw incorporation on soil enzyme activity during wheat growth[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(3):329-334.
- [17] 李松. 陇东黄绵土多年生豆科牧草地和小麦地土壤酶活性的比较研究[J]. 中国草地, 1991(6):23-27.
LI Song. A comparative study on enzyme activities in the soft loess of wheat fields and perennial legume field in the east of Gansu[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 1991(6):23-27.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [19] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level-sole-carbon-source utilization[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57(8):2351-2359.
- [20] 崔荟萍, 赵桂琴, 刘欢. 除草剂对燕麦田土壤脲酶和碱性磷酸酶活性的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(1):37-43.
CUI Hui-ping, ZHAO Gui-qin, LIU Huan. Effects of herbicide on the activities of urease and alkaline phosphatase in oat field[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(1):37-43.
- [21] Burns R G. Soil enzymes[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [22] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1):105-109.
CAO Hui, SUN Hui, YANG Hao, et al. A review soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(1):105-109.
- [23] 贾继文, 聂俊华, 李絮花, 等. 蔬菜大棚土壤理化性状与土壤酶活性关系的研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2001, 32(4):427-432.
JIA Ji-wen, NIE Jun-hua, LI Xu-hua, et al. Study on the relationship between the soil physical-chemical properties and soil enzymatic activity of activity of plastic greenhouse[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science)*, 2001, 32(4):427-432.
- [24] 方晰, 田大伦, 秦国宣, 等. 杉木林采伐迹地连栽和撂荒对林地土壤养分与酶活性的影响[J]. 林业科学, 2009, 49(12):65-71.
FANG Xi, TIAN Da-lun, QIN Guo-xuan, et al. Nutrient contents and enzyme activities in the soil of *Cunninghamia lanceolata* forests of successive rotation and natural restoration with follow after clear-cutting[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 49(12):65-71.
- [25] 孙计平, 张玉星, 李英丽, 等. 生草对梨园土壤微生物、酶活性和腐殖质含量的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(增刊):129-135.
SUN Ji-ping, ZHANG Yu-xing, LI Ying-li, et al. Effect of sod culture on soil microbes, enzyme activities and humus composition of pear orchard[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(Suppl):129-135.
- [26] 季立声, 贾君永, 张圣武. 秸秆直接还田的土壤生物学效应[J]. 山东农业大学学报, 1992, 23(4):375-379.
JI Li-sheng, JIA Jun-yong, ZHANG Sheng-wu. Biological effects of straw direct application into soil[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1992, 23(4):375-379.
- [27] 王磊. 秸秆还田对土壤养分、微生物量与酶活性的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
WANG Lei. The effects of straw turnover on soil nutrition, microbial biomass and enzyme activity[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011.
- [28] 罗珠珠, 黄高宝, 李 Guang-di, 等. 保护性耕作对旱作农田耕层土壤肥力及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5):1085-1092.
LUO Zhu-zhu, HUANG Gao-bao, LI Guang-di, et al. Effects of conservation tillage on soil nutrients and enzyme activities in rainfed area[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5):1085-1092.
- [29] 彭娜, 王凯荣, 王开峰, 等. 不同水分条件下施用稻草对土壤有机酸和有效磷的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(2):347-351.
PENG Na, WANG Kai-rong, WANG Kai-feng, et al. Effect of rice straw incorporation on concentration of organic acids and available phosphorus in soil under different water regimes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2):347-351.
- [30] 高云超, 朱文棚, 陈文新. 土壤微生物生物量周转的估算[J]. 生态学杂志, 1993, 12(6):6-10.
GAO Yun-chao, ZHU Wen-shan, CHEN Wen-xin. Estimation for biomass and turnover of soil microorganisms[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, 12(6):6-10.

- Ecology*, 1993, 12(6):6-10.
- [31] Insam H, Mitchell C C, Dormaar J F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice crop yield of three ultisols[J]. *Soil Biol Biochem*, 1991, 23(5):459-464.
- [32] 朱海平, 姚槐应, 张勇勇, 等. 不同培肥管理措施对土壤微生物生态特征的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(2):140-142.
- ZHU Hai-ping, YAO Huai-ying, ZHANG Yong-yong, et al. Effect of fertilizer system on soil microbial ecology[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2):140-142.
- [33] Garland J L. Analysis and interpretation of community level physiological profiles in microbial ecology[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1997, 24(4):289-300.
- [34] 徐一兰, 唐海明, 程爱武, 等. 长期施肥对大麦-双季稻种植方式中大麦根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(2):144-150.
- XU Yi-lan, TANG Hai-ming, CHENG Ai-wu, et al. Effects of different long-term fertilization treatments on rhizosphere soil microbial community functional diversity of paddy field in barley-double cropping rice system[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(2):144-150.
- [35] 龙妍, 惠竹梅, 程建梅, 等. 生草葡萄园土壤微生物分布及土壤酶活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(6):99-103.
- LONG Yan, HUI Zhu-mei, CHENG Jian-mei, et al. Ecological distributing of soil microorganisms and activity of soil enzymes in vineyard green covering[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2007, 35(6):99-103.