

果园土壤有机碳及呼吸速率对豆科和禾本科草类的差异反应

李萍, 荀咪, 岳松青, 曹辉, 冯丰, 范伟国, 杨洪强

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 在行间长期(连续6年)种植豆科植物毛苕子和禾本科植物黑麦草的苹果园, 调查土壤不同深度的有机碳组分和表层土壤呼吸速率日变化。结果表明: 间作2种植物后, 行间土壤0—20, 20—40 cm土层总有机碳(TOC)、轻质有机碳(LFOC)、可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(ROC)和微生物生物量碳(MBC)含量均显著提高; 在40—60 cm土层, 仅DOC含量明显提高; 0—20 cm土层的TOC和全部有机碳组分及20—40 cm土层的TOC、DOC、POC和ROC的含量在种植毛苕子后均明显高于种植黑麦草。TOC与LFOC、TOC与POC、DOC与LFOC、DOC与MBC、DOC与ROC、MBC与ROC、ROC与POC、LFOC与ROC之间均呈显著正相关, 土壤呼吸速率与LFOC、DOC、MBC和ROC之间也呈显著正相关。种植2种草类均显著提高土壤呼吸速率, 并使呼吸速率日变化峰型更突出, 其中毛苕子的作用效果比黑麦草更显著。

关键词: 果园; 土壤; 有机碳组分; 呼吸速率; 毛苕子; 黑麦草

中图分类号: S154.1; S567.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0327-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.047

Responses of Soil Organic Carbon and Respiration Rates to Legumes and Gramineous Grasses in Orchards

LI Ping, XUN Mi, YUE Songqing, CAO Hui, FENG Feng, FAN Weiguo, YANG Hongqiang

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: The gramineous *Lolium perenne* L. and leguminous *Vicia villosa* Roth had been intercropped in apple orchard for 6 years. The organic carbon fractions in different depth of soil and the daily variation of the respiration rate in surface soil were investigated in the orchard. The results showed that the *L. perenne* and *V. villosa* intercropped significantly increased the content of total organic carbon (TOC) and the content of organic carbon components, such as light organic carbon (LFOC), dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC), readily oxidation of organic carbon (ROC) and microbial biomass carbon (MBC), in 0—20 cm and 20—40 cm soil layer in apple orchard, and the increase degree caused by *V. villosa* both was higher than that by *L. perenne*. In 40—60 cm soil layer, only soil DOC content was increased by intercropping. The content of all organic carbon fractions in 0—20 cm layer soil and TOC, DOC, POC and ROC in 20—40 cm layer soil in the orchard intercropped *V. villosa* were significantly higher than that in the orchard intercropped *L. perenne*. There were positive relationships between TOC and LFOC, TOC and POC, DOC and LFOC, DOC and MBC, DOC and ROC, MBC and ROC, ROC and POC, and between LFOC and ROC. The rate of soil respiration had the positive relationships with LFOC, DOC, MBC, and ROC. The rate of soil respiration was increased significantly by intercropping *L. perenne* and *V. villosa*; the characteristics of the peak type were more obvious under the intercropping condition during the day, while the effect of intercropping *V. villosa* was better than that of *L. perenne*.

Keywords: orchard; soil; organic carbon fractions; respiration rate; *Vicia villosa* Roth; *Lolium perenne* L.

收稿日期: 2018-05-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(31772251); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD16B02); 山东省重点研发计划项目(2016ZDJS10A01)

第一作者: 李萍(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事果树生理研究。E-mail: sdnjliping@163.com

通信作者: 杨洪强(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事果树生理生态和果园土壤研究。E-mail: hqyang@sdau.edu.cn

土壤有机碳是全球碳素循环的重要组成部分,也是影响和评判土壤质量和土壤肥力水平的重要因素^[1]。土壤总有机碳(total organic carbon, TOC)包含多个组分,其中轻质有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)是土壤有机质周转和植物有效养分的暂时存储库,可反映早期土壤质量变化;易氧化有机碳(readily oxidized organic carbon, ROC)是土壤有机碳中周转最快的组分,也是促使土壤有机质短暂波动的主要原因,常用作表征土壤肥力变化的重要指标;颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)对土壤团聚体的形成与稳定起着重要作用;可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是土壤微生物的主要能量和物质来源,与微生物生物量密切相关;微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)不仅可以反映土壤环境的微小变化,也直接参与土壤生物及化学转化过程^[1-4]。这些组分在土壤中周转快、易分解、易被生物利用,也更易受地面覆盖、施肥和生草等农事管理措施的影响^[2-4]。据报道^[4],长期种植黑麦草(*Lolium perenne* L.)能够有效提高土壤有机碳储量,种植白三叶(*Trifolium repens* L.)可明显提高表层土壤 TOC、DOC 和 MBC 等含量^[5];而且大量草根死后还能在土壤中留下许多空隙,增加土壤通透性,提高土壤微生物活性^[5-6],并进一步影响土壤呼吸速率,Tufekcioglu 等^[7]发现,生草果园土壤呼吸速率明显高于杨树林地和草地;张义等^[8]报道,生草后土壤 CO₂ 释放速率显著提高。

生草栽培可改善果园生态环境,果园生草常用毛苕子(*Vicia villosa* Roth)、白三叶、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和紫云英(*Astragalus sinicus* L.)等豆科植物以及黑麦草、早熟禾(*Poa annua* L.)、燕麦草(*Arrhenatherum elatius* L.)、百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)等禾本科植物^[9],但在不同地区生草后,果园土壤有机碳变化有较大差异,甚至存在矛盾。陕西苹果园行间连续种植 3 年毛苕子和白三叶,表层土壤 TOC、DOC 和 MBC 含量提高,并明显高于种植黑麦草和早熟禾的^[5];浙江桃园间作 1 年草黑麦草,表层土壤 TOC、MBC 和 DOC 含量提高,而间作毛苕子对有机碳含量没有明显影响^[10];浙江山核桃林地间作 4 年油菜(*Brassica napus* L.)、黑麦草和紫云英均提高表层土壤 TOC、MBC 和 DOC 含量,但 3 种草的作用效果并没有明显差异^[11]。已报道^[5-11]的生草土壤有机碳数据主要来自土壤表层或浅层,而且生草的时间比较短;生草果园土壤呼吸也少见报道。本研究选择行间连续种植 6 年毛苕子和黑麦草的苹果园,调查不同深度的土壤总有机碳及活性有机碳组分,分析土壤呼吸速率日变化,比较间作豆科和禾本

科草类对土壤有机碳和呼吸速率的差异影响,以期为果园土壤管理和生草栽培提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与研究区概况

试验地位于泰安市泰山区山东农业大学南校区(36°09'N, 117°09'E),海拔 128 m,年均降水量 700~750 mm。试验区内按照 2.5 m 的株距和 4.0 m 的行距栽植 8 年生红富士苹果(*Malus domestica* cv. Fuji),苹果园土壤为褐土, pH 7.1,有机质含量 13.8 g/kg,全氮含量 1.6 g/kg,速效磷含量 28.5 mg/kg,速效钾含量 102.5 mg/kg。

2011 年 9 月在果树行间分别播种毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth)和黑麦草(*Lolium perenne* L.)及保持清耕(对照, CK),种草和清耕区均不少于 5 行,每行为 1 个试验小区。种草区域每年适时补种和刈割;每年刈割 2 次,刈割下来的草就地撒放在行间,全部还田;对照区每年除草 3~4 次,使之长期保持清耕;处理和对照均在每年 3、6 月穴施氮磷钾复合肥,10 月穴施添加部分中微量元素的有机肥,施肥位置在树冠下向内 40 cm 处,每次施肥后在树冠下充足灌水,11 月全园浇灌 1 次封冻水。

1.2 样品采集与保存

2017 年 9 月中旬,按 5 点采样法用土钻在各小区分别采集 0—20, 20—40, 40—60 cm 土层的土壤,同一小区的同层土样均匀混合后作为 1 个土壤样品,剔除石块、植物残根等杂物后装入塑封袋中,保存于冰盒带回实验室,过 2 mm 筛后放置冰箱在 4 ℃ 保存。

1.3 指标测定方法

1.3.1 土壤有机碳 土壤总有机碳(TOC)含量是将风干土样过 0.15 mm 筛后,采用苏州埃兰公司生产的 Elab-TOC 有机碳分析仪测定;土壤轻质有机碳(LFOC)和土壤颗粒有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)测定均参照文献[12-13];测定 LFOC 时,称取风干土样,加入 1.7 g/cm³的 NaI 溶液,振荡、离心 20 min 后,取浮在 NaI 表层的轻质部分过 0.45 μm 纤维滤膜,取滤膜表面附着物移至烧杯,冲洗后烘干研细,过筛后用 Elab-TOC 分析仪测定;测定 POC 时,取风干土样过筛后加入 5 g/L 的(NaPO₃)₆ 溶液振荡 18 h,过 53 μm 筛,取筛上物质,烘至恒重,用 Elab-TOC 分析仪测定;可溶性有机碳(DOC)采用蒸馏水浸提法测定;微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定;易氧化有机碳(ROC)参照 Blair 等^[13]的方法进行测定。

1.3.2 土壤呼吸速率 土壤呼吸速率采用 PP System

公司生产的 CIRAS-2 便携式光合仪所连接的 SRC-1 土壤呼吸室测定。测定前在各小区分别选出 3 个直径 20 cm 的样圆,将圆内绿色植物齐地剪除,去除地表凋落物,然后将土壤呼吸室插入土壤 3 cm 深,在读数基本保持不变时开始记录。

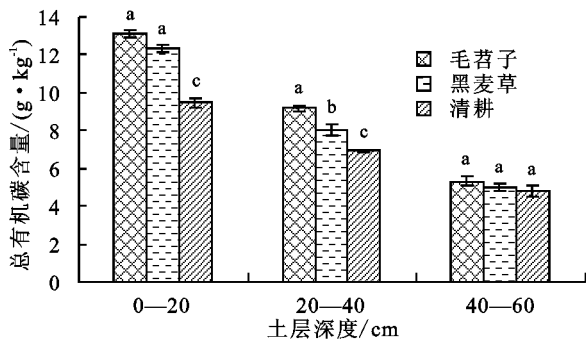
1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 统计软件对试验数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 毛苕子和黑麦草对土壤总有机碳含量的影响

从图 1 可以看出,苹果园间作毛苕子和黑麦草显著提高 0—20, 20—40 cm 土层土壤 TOC 含量,而对 40—60 cm 土层的 TOC 含量没有明显影响。其中,在 0—20 cm 土层,间作毛苕子和黑麦草分别使土壤 TOC 含量比清耕提高 3.7, 2.9 g/kg, 提高幅度为 38.9% 和 30.3%;在 20—40 cm 土层,间作毛苕子和黑麦草则分别使土壤 TOC 含量提高 2.3, 1.1 g/kg, 提高 32.9% 和 16.5%。不论在 0—20 cm 土层还是在 20—40 cm 土层,间作毛苕子对土壤 TOC 含量提高数值和提高幅度均明显高于间作黑麦草。此外,不论间作毛苕子和黑麦草还是土层保持清耕,总有机碳含量均随着土层深度增加而降低,土层越深间作物的影响越小。



注:不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 苹果园间作毛苕子和黑麦草对土壤总有机碳的影响

2.2 毛苕子和黑麦草对土壤轻质和可溶性有机碳含量的影响

2.2.1 土壤轻质有机碳 由图 2 可知,苹果园间作毛苕子和黑麦草 6 年后,0—20, 20—40 cm 土层的土壤 LFOC 含量均明显提高,间作毛苕子的提高幅度更大,可使这 2 个土层的 LFOC 含量分别提高 42.5% 和 26.3%,黑麦草也使其分别提高 29.8% 和 22.8%。在 0—20 cm 土层,间作毛苕子的土壤 LFOC 显著高于间作黑麦草;在 40—60 cm 土层,不论间作毛苕子和黑麦草还是清耕,土壤 LFOC 含量均没有明显差异,间作对土壤 LFOC 含量的影响随着土层的加深而减小以至消失。

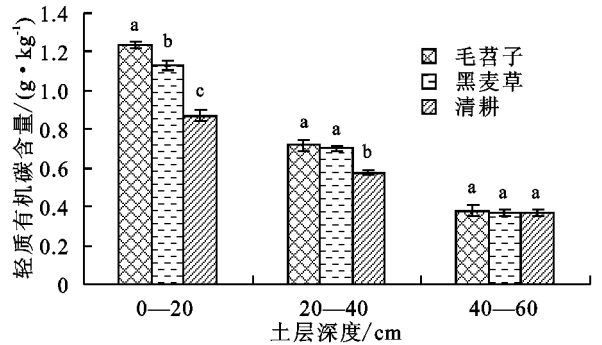


图 2 苹果园间作毛苕子和黑麦草对土壤轻质有机碳的影响

2.2.2 土壤可溶性有机碳 由图 3 可以看出,苹果园间作毛苕子和黑麦草明显提高 0—20, 20—40, 40—60 cm 土层的土壤 DOC 含量,两者分别使 0—20 cm 土层的 DOC 含量提高 27.6% 和 17.1%,使 20—40 cm 土层的 DOC 含量提高 24.8% 和 13.9%,使 40—60 cm 土层的 DOC 含量提高 12.4% 和 12.0%。在 0—40 cm 土层间作毛苕子对土壤 DOC 的作用效果比间作黑麦草显著,土壤 DOC 含量及间作的影响也随着土层的加深而减小。

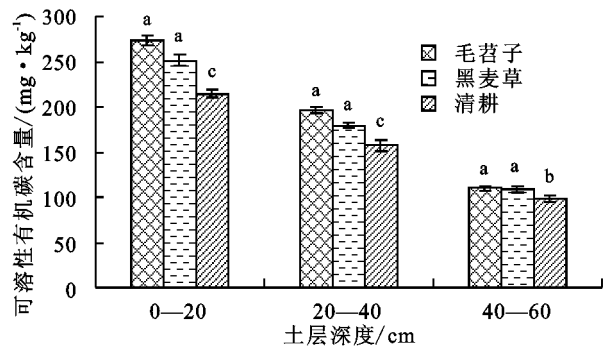


图 3 苹果园间作毛苕子和黑麦草对土壤可溶性有机碳的影响

2.3 毛苕子和黑麦草对土壤颗粒有机碳含量的影响

从图 4 可以看出,苹果园间作毛苕子和黑麦草均显著增加土壤 0—20, 20—40 cm 土层的 POC 含量。在 0—20 cm 的土层,间作毛苕子的土壤 POC 含量达 1.5 g/kg,明显高于间作黑麦草;在 20—40 cm 土层,间作毛苕子的土壤 POC 也显著高于间作黑麦草;在 40—60 cm 的土层,各处理及与对照间的 POC 含量无明显差异。由此可见,苹果园间作毛苕子更有利于提高 0—20, 20—40 cm 的土壤 POC 含量。

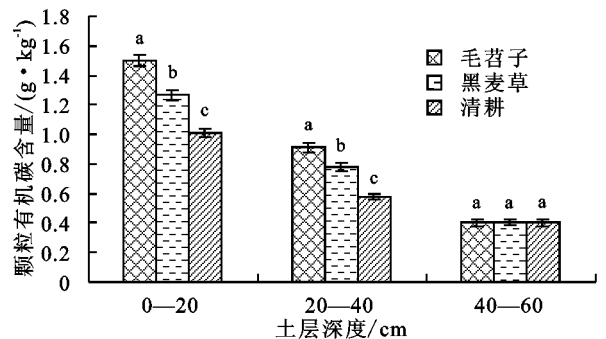


图 4 苹果园间作毛苕子和黑麦草对土壤颗粒有机碳的影响

2.4 毛苕子和黑麦草对土壤微生物量碳和易氧化有机碳含量的影响

2.4.1 土壤微生物量碳 由图 5 可知,间作毛苕子和黑麦草明显提高 0—20, 20—40 cm 土层的土壤 MBC 含量,两者分别使 0—20 cm 土层的 MBC 含量提高 74.9%和 34.5%,使 20—40 cm 土层的 MBC 含量提高 43.1%和 31.2%。间作毛苕子的土壤 MBC 含量在 0—20 cm 土层显著高于间作黑麦草,在 20—40 cm 土层两者没有明显差异;在 40—60 cm 土层中,间作毛苕子、间作黑麦草和清耕之间的土壤 MBC 含量均没有明显差异。

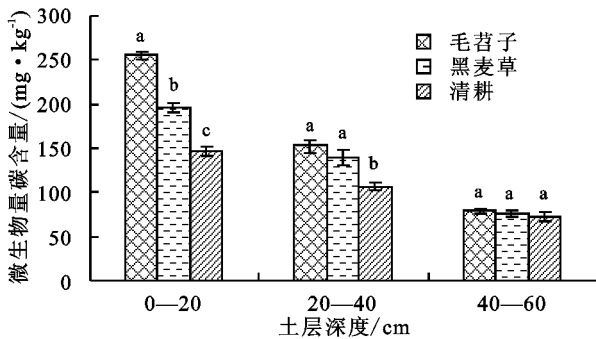


图 5 苹果园间作毛苕子和黑麦草对土壤微生物量碳的影响

2.4.2 土壤易氧化有机碳 由图 6 可以看出,土壤 ROC 含量变化与前 4 种有机碳性组分的变化类似,间作对 ROC 含量的影响随土层深度的增加而降低,在 0—20, 20—40 cm 土层,间作毛苕子和黑麦草明显使土壤 ROC 含量增加,而对 40—60 cm 土层的 ROC 没有明显影响。在 0—20, 20—40 cm 土层,间作毛苕子的土壤 ROC 含量明显高于间作黑麦草,在这 2 层土壤 ROC 含量从高到低依次为毛苕子>黑麦草>清耕,与前面 POC 和 DOC 的情况类似。

2.5 毛苕子和黑麦草对土壤呼吸速率日变化的影响

由图 7 可知,处理和对照的土壤呼吸速率(SR)日变化均呈单峰型曲线,最大值均出现在 13:00。间作毛苕子和黑麦草均显著提高 SR,并分别使 SR 变幅在 3.4~5.9, 2.4~5.1 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而清耕的 SR 仅在

1.1~2.4 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$,间作使 SR 日变化峰型更突出。土壤呼吸速率在一天同一时刻的数值均呈现毛苕子>黑麦草>清耕。

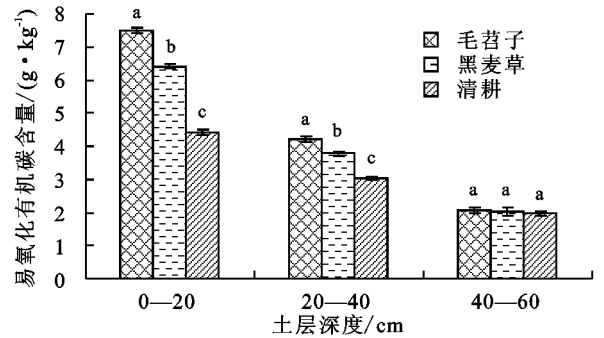


图 6 苹果园间作毛苕子和黑麦草对土壤易氧化有机碳的影响

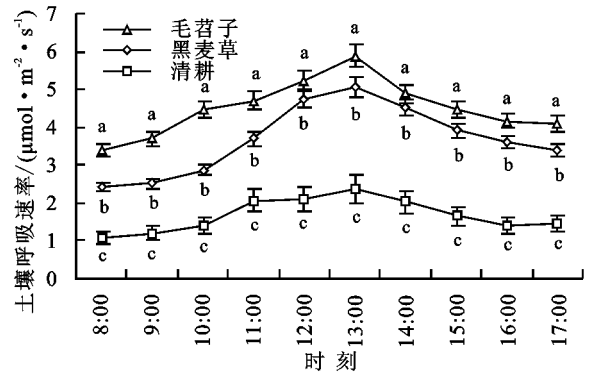


图 7 苹果园间作毛苕子和黑麦草对土壤呼吸速率的影响

2.6 土壤总有机碳含量、土壤有机碳组分及土壤呼吸速率之间的相关关系

对所测土壤总有机碳含量、土壤有机碳各组分的含量以及土壤呼吸速率进行相关性分析(表 1),结果表明,TOC、DOC、LFOC、MBC、ROC 和 POC 之间及其与土壤呼吸速率均存在正相关关系,其中 TOC 与 LFOC、TOC 与 POC、DOC 与 LFOC、DOC 与 MBC、DOC 与 ROC、ROC 与 POC 之间均呈显著正相关,相关系数在 0.962~0.983; LFOC 与 ROC、MBC 与 ROC 极显著正相关,相关系数为 0.99 以上。土壤呼吸速率与 LFOC 显著正相关,与 DOC、MBC 和 ROC 极显著正相关,相关系数均在 0.99 以上。

表 1 土壤总有机碳、有机碳组分及土壤呼吸速率之间的相关分析

参数	TOC	DOC	LFOC	MBC	ROC	POC	呼吸速率
TOC	1						
DOC	0.728	1					
LFOC	0.980*	0.972*	1				
MBC	0.793	0.954*	0.960	1			
ROC	0.889	0.962*	0.992**	0.994**	1		
POC	0.981*	0.694	0.978	0.896	0.983*	1	
呼吸速率	0.797	0.991**	0.990*	0.996**	0.997**	0.799	1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上极显著相关。

3 讨论

果园间作给果树行间增加了植物种类,提高了行间生物量积存。这些生物量是土壤有机碳的主要来源,已有研究^[10]表明,果园生草可明显提高土壤总有机碳和活性有机碳含量,本研究进一步证实了这一点。不仅如此,本研究还发现,土壤有机碳的主体成分 POC 和 ROC 的含量,在 0—20, 20—40 cm 土层均是间作毛苕子的显著高于间作黑麦草的。土壤有机碳直接来自植物根系,根系生物量越大,它向土壤提供的有机碳也越多;豆科植物是直根系,禾本科植物是须根系,豆科植物根系更发达,它比禾本科牧草具有更高的根/冠比^[14]。因此,长期间作豆科植物毛苕子对土壤 POC 和 ROC 的贡献比间作禾本科黑麦草的更大(图 4 和图 6)。

由于果园间作的草类根系主要分布在 0—20 cm 土层^[15],因此苹果园间作毛苕子和黑麦草后,有更多的有机碳组分在 0—20 cm 土层积累;另外,土壤上层的物质会在重力和灌溉的影响下下移,以至在 20—40 cm 土层也有多种有机碳组分的含量提高。有研究^[16]表明,土壤中可溶性有机碳(DOC)运动到 40 cm 以下受不同覆盖的影响。因此,相比清耕,间作毛苕子和黑麦草后,DOC 含量即使在 40—60 cm 土层也明显提高,这说明间作可提高深层土壤中的 DOC 含量。

土壤轻质有机碳 LFOC 来源于土壤中动植物的残体,是微生物碳和能源的重要来源,极易被土壤微生物利用,参与土壤碳氮循环^[17]。土壤 MBC 的含量主要受土壤微生物活性影响,间作对土壤 LFOC 与土壤 MBC 含量的影响相似。间作毛苕子和黑麦草为微生物提供了碳源,增加了微生物活性,但豆科草类的固氮作用还增加了土壤氮素积累,提高了 N/C,而土壤氮素和 N/C 对于微生物活动及微生物生物量碳有直接影响^[18-19];禾本科牧草土壤有效磷含量显著高于豆科牧草,偏高的有效磷/碱解氮比例对微生物生长不利^[20-21],这些均应是间作禾本科黑麦草的土壤 MBC 显著低于间作豆科毛苕子的重要原因。由于微生物主要集中在土壤表层,所以在 0—20 cm 土层间作毛苕子与间作黑麦草差异显著,在 20—40, 40—60 cm 间作毛苕子和黑麦草则无显著差异。

土壤总有机碳及其各组分含量均受土壤环境和土地利用方式等多方面影响^[22],它们之间存在正相关关系,不仅说明土壤活性有机碳较大程度上依赖土壤有机碳总贮量,同时也说明各土壤活性有机碳组分之间关系密切。间作毛苕子和黑麦草后,果园土壤

LFOC 与 POC 随着土层加深而呈现相似的变化,这主要在于轻质有机碳和颗粒有机碳都来自于植物残体,对土壤生草更为敏感。MBC 是土壤有机碳中最活跃和最容易氧化的部分,MBC 含量增加主要由于土壤微生物数量增加;土壤生草可保持较多的水分,利于微生物繁衍,必然会使 MBC 含量提高。土壤 MBC 含量与 ROC 含量变化趋势相近^[23],而且 MBC 与 ROC 之间呈现极显著正相关关系(表 1),因而 MBC 含量的提高会促进 ROC 含量的增加。

土壤呼吸源于土壤动植物和微生物的生命活动,土壤 MBC、ROC、DOC 等活性有机碳更易被分解和被生物利用,它们与土壤 CO₂ 的释放量显著相关,表 1 也显示出土壤呼吸速率与它们之间存在极显著的正相关性。有研究^[24-25]指出,土壤呼吸的 80% 归功于土壤活性有机碳组分,其中 MBC 对土壤呼吸贡献最大。行间种植毛苕子和黑麦草必然增加行间根系生物量,根系生物量的增加除直接向土壤输入有机碳外,也可通过促进土壤动物和微生物的代谢和繁衍而补充更多的活性有机碳,因而会提高土壤呼吸速率。土壤呼吸受土壤温度影响,在一定范围内温度越高,呼吸速率也越高,13:00 是一天温度最高的时间。因此,土壤呼吸速率也在此时出现高峰。9 月水热条件最优,果园生草后土壤呼吸强度急剧增大^[26],因而使呼吸高峰更突出。与间作黑麦草相比,间作毛苕子可更大幅度地提高土壤呼吸速率,这可能在于豆科植物毛苕子比禾本科植物含氮量高,植株 C/N 较低,更易被微生物分解利用,也更促进微生物的代谢活动,并进而使整个土壤表层土壤呼吸速率提高。

4 结论

(1) 果园长期(连续 6 年)间作毛苕子和黑麦草,0—20, 20—40 cm 土层的土壤总有机碳及其各有机碳组分的含量均明显提高,间作毛苕子的提高程度高于间作黑麦草。

(2) 在 0—20 cm 土层,间作毛苕子使土壤 TOC、LFOC、DOC、POC、ROC 和 MBC 含量显著高于间作黑麦草;在 20—40 cm 土层,间作毛苕子使土壤 TOC、DOC、POC 和 ROC 含量显著高于间作黑麦草;在 40—60 cm 土层,间作毛苕子和黑麦草仅使土壤 DOC 含量明显提高,两者之间无明显差异。

(3) 果园长期间作毛苕子和黑麦草均显著提高日间土壤呼吸速率,使土壤呼吸速率日变化峰型特征更明显;间作毛苕子的效果比间作黑麦草更显著。

参考文献:

[1] Stewart C E, Paustian K, Conant T, et al. Soil carbon

- saturation: Linking concept and measurable carbon pools [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2008, 72(2): 379-392.
- [2] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26(2): 88-94.
- [3] 姬强, 孙汉印, 王勇, 等. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对 4 种耕作措施的影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 132-137.
- [4] Poeplau C, Aronsson H, Myrbeck A, et al. Effect of perennial ryegrass cover crop on soil organic carbon stocks in southern Sweden [J]. *Geoderma Regional*, 2015, 4: 126-133.
- [5] 刘富庭, 张林森, 李雪薇, 等. 生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 355-363.
- [6] 焦润安, 张舒涵, 李毅, 等. 生草影响果树生长发育及果园环境的研究进展 [J]. *果树学报*, 2017, 34(12): 1610-1623.
- [7] Tufekcioglu A, Ozbayram A K, Kucuk M. Soil respiration in apple orchards, poplar plantations and adjacent grasslands in Artvin, Turkey [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2010, 30(5): 815-820.
- [8] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 不同地表覆盖方式对苹果园土壤性状及果树生长和产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 279-286.
- [9] 杨洪强. 生态果园必读 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 136-140.
- [10] 王耀锋, 邵玲玲, 刘玉学, 等. 桃园生草对土壤有机碳及活性碳库组分的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 6002-6010.
- [11] 吴家森, 张金池, 钱进芳, 等. 生草提高山核桃林土壤有机碳含量及微生物功能多样性 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 111-117.
- [12] 张林森, 刘富庭, 张永旺, 等. 不同覆盖方式对黄土高原地区苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3180-3190.
- [13] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degrees of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [14] 徐俊华. 荒漠草原豆科与禾本科牧草光合特性及产量研究 [J]. *广东农业科学*, 2014, 41(13): 17-24.
- [15] 李会科, 郑秋玲, 赵政阳, 等. 黄土高原果园种植牧草根系特征的研究 [J]. *草业学报*, 2008, 17(2): 92-96.
- [16] 霍莉莉, 邹元春, 郭佳伟, 等. 垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响 [J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 283-287.
- [17] Alvarez C R, Alvarez R, Grigera M S, et al. Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(6): 767-773.
- [18] 齐雁冰, 黄标, 顾志权, 等. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(1): 50-56.
- [19] 惠竹梅, 岳泰新, 张振文. 行间生草葡萄园土壤微生物量与土壤养分的通径分析 [J]. *草地学报*, 2011, 19(6): 969-974.
- [20] 黎宁, 李华兴, 朱凤娇, 等. 菜园土壤微生物生态特征与土壤理化性质的关系 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(2): 285-290.
- [21] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤养分的影响 [J]. *园艺学报*, 2007, 34(2): 477-480.
- [22] 陈高起, 傅瓦利, 沈艳, 等. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 123-129.
- [23] 马和平, 郭其强, 刘合满, 等. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳沿海拔梯度的变化 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 163-166.
- [24] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils [J]. *Global Biogeochem Cycle*, 1994, 8(3): 279-293.
- [25] 周晨霓, 任德智, 马和平, 等. 西藏色季拉山两种典型天然林分土壤活性有机碳组分与土壤呼吸特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 557-563.
- [26] 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.