

间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响

张道勇¹, 李会科^{1,2}, 郭宏¹, 杜毅飞¹, 王海涛¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物与肥料及农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以渭北黄土高原苹果园土壤为研究对象, 设置传统苹果 (*Malus domestica* Borkh.) 园清耕及间作白三叶 (*Trifolium repens* L.) 两个处理, 测定和分析了不同土层 (0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm 及 20—40 cm) 的土壤微生物量碳 (SMBC)、氮 (SMBN)、4 种土壤酶活性、有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 等指标, 从土壤微生物碳、氮及酶活性的角度探讨间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤的影响。结果表明: 间作白三叶能够显著提高土壤微生物量碳、氮的含量和土壤酶活性, 提高土壤微生物对有机碳和全氮的利用效率, 其作用随着土层深度的增加而降低, 在表层土壤效果更为显著。土壤微生物量碳、氮及土壤酶活性与土壤有机碳、全氮呈极显著相关或显著性相关。苹果园土壤微生物量碳、氮及土壤酶活性能敏感响应生草间作, 可以作为评价果园生草对果园土壤影响的良好指标。

关键词: 果园生草; 土壤微生物量碳; 土壤微生物量氮; 土壤酶活性

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0039-07

Effects of Growing White Clover on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Soil Enzyme Activity in Apple-White Clover Intercropping System

ZHANG Daoyong¹, LI Huike^{1,2}, GUO Hong¹, DU Yifei¹, WANG Haitao¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Intercropping cover crops in orchards is one of soil managements for the sustainability of orchards. We examined dynamics of soil microbial biomass carbon (MBC), soil microbial biomass nitrogen (MBN), soil organic carbon (SOC), soil total nitrogen (TN) and soil enzyme activity in an apple-white clover system in Weibei of the Loess Plateau from 2005 to 2013. Soil samples were collected at depths of 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm and 20—40 cm in clear tillage and white clover-intercropping orchards. MBC, MBN, SOC, TN, ratio of MBC to SOC (q_{SMBC}), ratio of SMBN to soil total nitrogen (q_{SMBN}) and soil enzyme activity in apple-white clover intercropping system significantly increased in comparison with the clear tillage orchard. The increments, however, decreased rapidly with soil depth. MBC, MBN, q_{SMBC} , q_{SMBN} and soil enzyme activity were correlated or significantly correlated with SOC and soil TN. MBC, MBN and soil enzyme activities of apple orchard grass cultivation were sensitive to intercropping. Intercropping white clover has the positive impact on MBC, MBN and soil enzyme activity in apple orchard, the main effect concentrated in the 0—20 cm soil layer compared with clean tillage orchard.

Keywords: growing herbage in orchard; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; soil enzymatic activity

果园生草栽培是欧美、日本等果树生产比较发达, 国家普遍采用的果园可持续发展的土壤管理模式^[1]。1998年, 我国将其作为绿色果品生产的主要

技术措施开始在全国推广^[2], 所谓果园生草是指在果树行间或全园 (树盘除外) 种植牧草作为覆盖的一种土壤管理模式, 是人工构建的具有多物种、多层次、多

时序的复合系统^[3]。其目的在于强化各组分之间的相互作用,尤其牧草组分对果园土壤养分的吸收利用及土壤的反馈作用,往往是限制果园生草复合系统能否实现高效持续经营的重要因素,也是果园生草复合系统果树组分与牧草组分间相互的主要驱动机制与驱动力^[4]。目前,有关果园生草栽培方面的研究主要集中在果园生草微气候效应、土壤效应及生草对果树产量与品质影响等效益研究方面,基本上是针对果园生草现状及互作效果进行评价,而对产生互作效应机制方面的研究则鲜有报道^[5-8]。

土壤微生物是土壤中物质转化和养分循环的驱动者,微生物量碳、氮被认为是土壤活性养分的储存库,植物生长可利用养分的重要来源^[9]。土壤酶主要来源于土壤微生物,很大程度上可以反映土壤微生物的活性,其活性代表了土壤中物质代谢的旺盛程度。土壤酶参与土壤中一切生物化学过程,是土壤生态系统中物质循环和能量流动中最为活跃的生物活性物质,可反映植物对养分的吸收利用与生长发育状况,是土壤肥力的重要指标^[10-12]。总之,土壤微生物和土壤酶是土壤养分变化的直接参与者,是土壤稳定态养分转变为有效态养分的催化剂,是“植物—土壤微生物—土壤养分”系统的联系纽带,可敏感地反映土壤养分转化速率与驱动力。因此,揭示生草栽培条件下,果园土壤微生物碳氮及土壤酶活性演变特征对于揭示果园土壤养分对生草栽培的响应及其反馈作用具有重要意义。

白三叶(*Trifolium repens* L.)为多年生豆科优质牧草,由于其易于管理、生长快、固氮能力强等优点,与农作物及经济作物间、套、复种方式的生产日渐增多,尤其在果园中广泛种植。本研究通过间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤微生物碳氮及土壤酶活性演变及其分布格局的研究,探讨果园土壤微生物碳氮及土壤酶活性对生草栽培的响应及其反馈作用,为进一步探讨果园生草复合系统组分间的互作机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于渭北黄土高原苹果代表产区白水縣,地处东经 109°16′—109°45′,北纬 35°4′—35°27′,属于暖温带大陆性季风气候区,平均海拔 850 m 左右。土壤为黄绵土,土层深厚,剖面质地均匀,多年平均气温 11.4℃,多年平均降水量 577.8 mm,降水年际变化大,年内分配不均,日照充足,光热资源丰富,无霜期 207 d,试验位于白水縣中部杜康鎮塬面西北农林科技大学

苹果试验站果园,供试苹果为 13 a 生乔化红富士(富士/新疆野苹果)果园,栽植密度 3 m×8 m。

1.2 试验设计

采用单因素随机区组试验设计,设置苹果清耕单作和苹果/白三叶 2 个处理,每个处理 3 次重复,共 6 个小区,每小区面积为 30 m²。2005 年 3 月行间生草播种,现已持续生草 8 a,播前深翻整地,开沟条播,供试草种为白三叶(*Trifolium repens* L.),播种密度为 0.75 g/m²,各处理的生态条件及苹果的田间管理措施一致。

1.3 采样与测定

2013 年 7 月在各处理区随机布设 3 个采样点,清除表层凋落物,用土钻分别采集 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层土样,将土样去除根系后分成两部分,一部分鲜土过 2 mm 筛后放入 4℃ 的冰箱保存用于土壤微生物生物量 C、N 的测定,将另一部分的土壤样品去杂后风干,磨细,过筛,装入塑封袋中,用于土壤有机碳、全氮和酶活性的测定。土壤有机碳(SOC)采用浓硫酸—重铬酸钾外加热法测定。土壤全氮采用凯氏法消解—全自动定氮仪测定。土壤蔗糖酶和纤维素酶用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定;过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法;土壤脲酶用靛酚比色法测定^[13-14]。土壤微生物量碳用氯仿熏蒸、浸提—TOC 自动分析仪测定,土壤微生物量氮用氯仿熏蒸、浸提—紫外分光光度法测定。微生物量碳(BC)的计算公式为:BC=EC/KEC,式中,EC 为熏蒸与未熏蒸土样全碳的差值(mg/kg),KEC 为熏蒸杀死的微生物中被 K₂SO₄ 所提取的比例,取 0.45^[15]。微生物量碳(BN)的计算公式为:BN=EN/KEN,式中,EN 为熏蒸与未熏蒸土样全氮的差值(mg/kg),KEN 为熏蒸杀死的微生物中被 K₂SO₄ 所提取的比例,取 0.54^[16]。土壤有机碳(SOC)与全氮(TN)含量见表 1。

表 1 不同处理土壤有机碳和全氮含量

土层/cm	处理	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)
0—5	白三叶	13.88	1.326
	清耕	8.46	0.972
5—10	白三叶	9.18	0.959
	清耕	6.74	0.629
10—20	白三叶	6.98	0.661
	清耕	5.92	0.524
20—40	白三叶	5.35	0.491
	清耕	4.55	0.466

1.4 统计分析

所有数据均采用 Excel 2007 处理,利用 SPSS 18.0 软件进行相关分析。

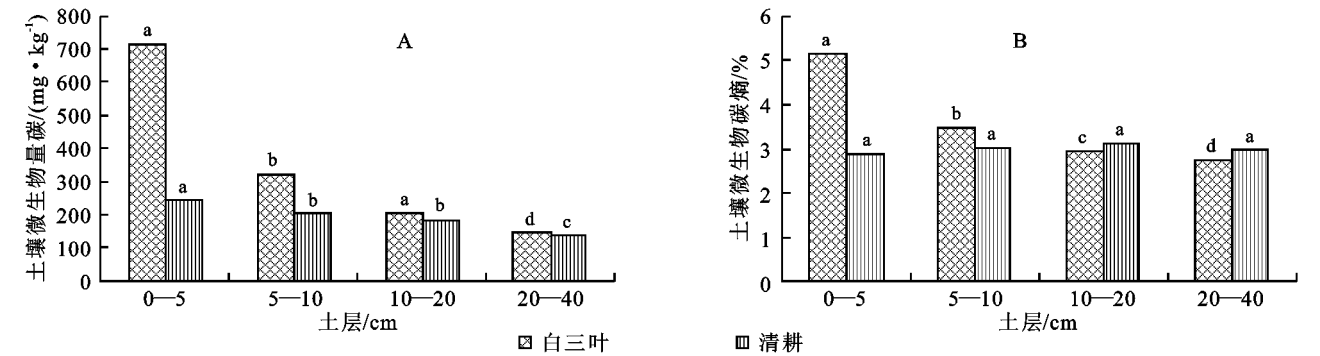
2 结果与分析

2.1 间作白三叶对果园 SMBC 和 q_{SMBC} 的影响

由图 1A 可以看出,随着土层加深,两处理 SMBC 含量均呈现下降趋势,其中,间作白三叶处理变幅为 715.02~145.43 mg/kg,0—5 cm 土层 SMBC 含量是 20—40 cm 土层的 4.92 倍。清耕处理变幅则为 242.93~136.62 mg/kg,0—5 cm 土层 SMBC 含量是 20—40 cm 土层的 1.78 倍,表明间作白三叶处理比传统清耕处理果园土壤 SMBC 下降剧烈,且随土层加深,SMBC 含量迅速降低,但未对果园 SMBC 含量分布格局产生影响。方差分析结果显示,间作白三叶处理各土层间 SMBC 含量达显著性差异水平($p<0.05$),而清耕处理除 5—10 cm 与 10—20 cm 土层外,其他土层间 SMBC 含量差异显著($p<0.05$),这一结果表明生草导致不同层次 SMBC 含量分异明显。与清耕处理相比,间作白三叶不同程度增加了 0—40 cm 各土层 SMBC 含量,增幅随土层深度的增加呈降低趋势,说明生草对 SMBC 含量的影响随土层深度的增加而逐渐减弱。 T 检验结果显示(表 2),间作白三叶处理 0—5 cm,5—10 cm 土层 SMBC 含量与清耕处理相应土层达极显著性差异水

平($p<0.01$),而在 10—20 cm,20—40 cm 土层,两处理 SMBC 含量无显著性差异($p>0.05$),表明间作白三叶对果园 SMBC 的影响主要集中在 0—10 cm 土层,较大幅度地增加了 0—10 cm 土层 SMBC 含量,而对果园 10 cm 以下土层 SMBC 影响较小。

土壤微生物量碳(SMBC)与土壤有机碳(SOC)的比值称为微生物碳熵(q_{SMBC})。微生物碳熵(q_{SMBC})可以作为土壤中有机碳向微生物量碳转化速率快慢的一个指标^[17]。从图 1B 可以看出,白三叶处理土壤微生物碳熵均随土层深度的增加而降低,方差分析结果显示(图 1B),间作白三叶处理各土层间 q_{SMBC} 达显著性差异水平($p<0.05$),这与 SMBC 含量演变趋势一致。而在清耕处理中,各土层间 q_{SMBC} 无显著性差异($p>0.05$)。如图 1B 所示,0—5 cm,5—10 cm 土层间作白三叶处理 q_{SMBC} 高于清耕处理,而在 10—20 cm,20—40 cm 土层,间作白三叶处理 q_{SMBC} 约低于清耕处理。 T 检验结果显示(表 2),0—5 cm,5—10 cm 土层白三叶处理 q_{SMBC} 与清耕处理差异极显著($p<0.01$),10—20 cm,20—40 cm 土层清耕处理 q_{SMBC} 与白三叶处理无显著性差异($p>0.05$),说明生草导致表层土壤中的有机碳分解速率较快,土壤微生物在分解有机碳的同时,逐渐累积微生物生物量碳。



注:不同小写字母表示同一处理不同土层间差异达到显著水平($p<0.05$)。下图同。

图 1 不同处理对微生物量碳和微生物碳熵的影响

表 2 不同处理土壤微生物量碳和微生物碳熵 T 检验结果

土层 深度/cm	白三叶		清耕		均值差值		T 值		Sig. (双侧)	
	SMBC	q_{SMBC}	SMBC	q_{SMBC}	SMBC	q_{SMBC}	SMBC	q_{SMBC}	SMBC	q_{SMBC}
0—5	715.05	5.15	242.93	2.87	472.12	2.28	52.59	52.77	0	0
5—10	320.53	3.49	204.27	3.03	116.26	0.46	10.54	7.21	0	0
10—20	205.87	2.95	184.27	3.11	21.58	−0.16	2.67	−1.28	0.56	0.27
20—40	145.43	2.72	136.62	3.00	8.81	−0.44	1.19	−6.31	0.3	0.12

2.2 间作白三叶对果园 SMBN 和 q_{SMBN} 的影响

由图 2A 可以看出,SMBN 含量的变化与 SMBC 相似,随着土层加深,两处理 SMBN 含量均呈现下降趋势。其中,间作白三叶处理变幅为 80.44~28.27 mg/kg,0—5 cm 土层 SMBC 含量是 20—40 cm 土层的 2.85 倍。清耕处理变幅则为 53.73~17.24

mg/kg,0—5 cm 土层 SMBC 含量是 20—40 cm 土层的 3.12 倍,表明间作白三叶处理未对果园 SMBN 含量分布格局产生影响。方差分析结果显示(图 2A),间作白三叶处理各土层间 SMBN 含量达显著性差异水平($p<0.05$),清耕处理除 10—20 cm 与 20—40

cm 土层外,其他土层间 SMBN 含量差异显著 ($p < 0.05$),这一结果表明生草导致不同层次 SMBN 含量差异明显。与清耕处理相比,间作白三叶对果园 SMBN 含量产生了积极影响,0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层 SMBN 含量分别较清耕处理增加 49.71%,73.16%,94.11% 和 63.93%。在 0—20 cm 土层,增幅随土壤深度的增加呈增加的趋势,说明生草对 SMBC 含量影响随土层深度的增加而逐渐增强,但在 20—40 cm 土层趋势减弱。 T 检验结果表明(表 2),间作白三叶处理 0—40 cm 各土层 SMBN 含量均与清耕处理相应土层达极显著性差异水平 ($p < 0.01$),表明间作白三叶对果园 SMBN 含量在 0—40 cm 中 4 个土层都产生影响,显著增加了 0—40 cm 土层 SMBN 的含量。

土壤微生物量氮(SMBN)与土壤全氮(TN)的比值称为微生物氮熵(q_{SMBN})。土壤微生物氮熵(q_{SMBN})

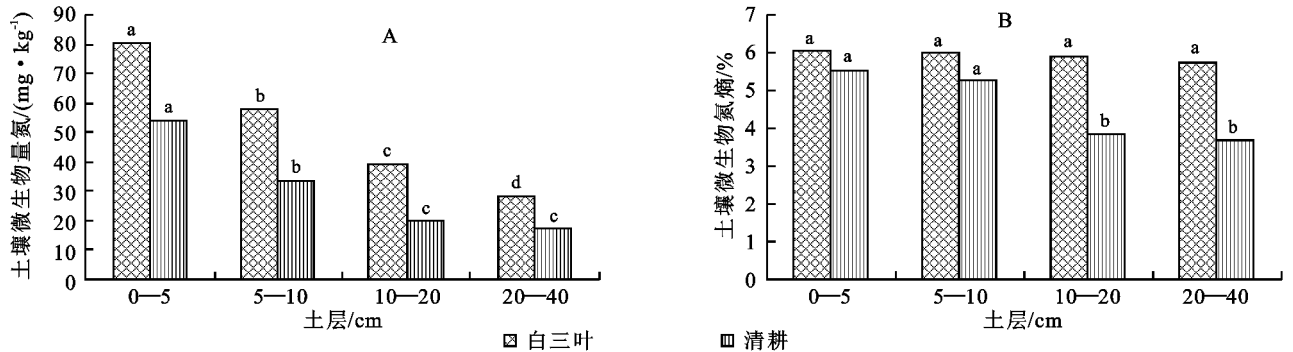


图 2 不同处理对微生物量氮和微生物氮熵的影响

表 3 不同处理微生物量氮和微生物氮熵 T 检验结果

土层 深度/cm	白三叶		清耕		均值差值		T 值		Sig. (双侧)	
	SMBC	q_{SMBN}	SMBC	q_{SMBN}	SMBC	q_{SMBN}	SMBC	q_{SMBN}	SMBC	q_{SMBN}
0—5	80.44	6.07	53.73	5.53	26.71	0.54	17.52	12.50	0	0
5—10	57.74	6.02	33.34	5.30	24.4	0.72	11.37	11.20	0	0
10—20	39.13	5.92	20.16	3.85	18.97	2.07	13.01	38.01	0	0
20—40	28.27	5.76	17.24	3.70	11.03	2.06	7.10	52.61	0	0

2.3 间作白三叶对果园土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤中生物活动的产物,主要来自于土壤微生物和植物根系,其活性强弱可表征土壤生化反应的强度^[19]。由表 4 可见,随着土层深度的增加,过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶和纤维素酶活性在不同处理中均呈现出逐渐降低的趋势。除脲酶以外,其他三种酶在间作白三叶处理中各土层间存在显著性差异。间作白三叶处理 4 种土壤酶活性在 4 个土层中均高于清耕处理,0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层中,过氧化氢酶活性(0.652—0.428 ml/g)分别是清耕(0.433—0.254 ml/g)的 1.51 倍、1.82 倍、1.78 倍和 1.69 倍;蔗糖酶活性(20.521—12.583 mg/g)分别是清耕(9.171—4.699 mg/g)的 2.24 倍、2.13 倍、2.15 倍

反映微生物对全氮(TN)的利用效率^[18]。从图 2B 可以看出,白三叶处理土壤微生物氮熵均随土层深度的增加无明显变化,方差分析结果显示(图 2B),间作白三叶处理各土层间 q_{SMBN} 无显著性差异 ($p > 0.05$)。而在清耕处理中,0—5 cm 与 5—10 cm 土层以及 10—20 cm 与 20—40 cm 土层间 q_{SMBN} 无显著性差异 ($p > 0.05$),但 0—5 cm,5—10 cm 土层分别与 10—20 cm 和 20—40 cm 土层存在显著性差异 ($p < 0.05$)。如图 2B 所示,0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层间作白三叶处理 q_{SMBN} 均高于清耕处理,清耕处理中 0—10 cm 的 q_{SMBN} 显著高于 10—40 cm 土层。 T 检验结果显示(表 3),0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm,20—40 cm 土层白三叶处理 q_{SMBN} 与清耕处理差异均达极显著水平 ($p < 0.01$),说明生草导致土壤中的全氮分解速率较快,提高了土壤微生物对全氮的利用效率。

和 2.68 倍;脲酶活性(2.555—1.183 mg/g)分别是清耕(0.969—0.341 mg/g)的 2.64 倍、3.05 倍、4.13 倍和 3.47 倍;纤维素酶活性(2.328—0.900 mg/g)分别是清耕(0.891—0.426 mg/g)的 2.61 倍、2.34 倍、2.14 倍和 2.11 倍。说明间作白三叶能够增加苹果/白三叶复合系统土壤酶的活性。这种作用尤其是对提高蔗糖酶、脲酶和纤维素酶三种酶更为明显。近表层土壤是动、植物残体和微生物密集的区域,生草处理后,由于该区域酶的作用底物被加强,从而使酶活性增大。

2.4 土壤微生物量碳、氮与土壤理化性质和土壤酶活性的关系

土壤微生物量碳是土壤活性有机质库的活跃部分,反映了微生物与环境之间的相互作用,微生物量

氮是有机氮库中的活跃部分,对土壤氮素循环和利用具有重要意义。此外,土壤中各种生化反应除受微生物本身活动的影响外,也在各种相应的酶的参与下完成,酶活性与土壤中动、植物残体和微生物密集的区域密切相关,酶活性的高低直接影响一些有机物质的循环和转化^[20-21]。如表 5 所示,SMBC 与 SMBN、SOC、TN、 q_{SMBC} 、蔗糖酶、脲酶、纤维素酶极显著正相关($p<0.01$),与 q_{SMBN} 显著正相关($p<0.05$),与过氧化氢酶正相关,但未达到显著水平($p>0.05$),说明 SMBC 与 SMBN、SOC、TN、 q_{SMBC} 、蔗糖酶、脲酶、纤维素酶之间存在着动态依存关系,反映果园生草栽培中 SMBC 的变化受到 SMBN、SOC、TN、 q_{SMBC} 、蔗糖酶、脲酶、纤维素酶的影响,其中 SMBC 与 SMBN、

SOC、TN、 q_{SMBC} 、纤维素酶相关系数高(0.963,0.981,0.966,0.953),且高于 SMBC 与蔗糖酶、脲酶相关系数,说明 SMBC 的含量与分布受到 SMBN、SOC、TN、 q_{SMBC} 、纤维素酶变化的影响强烈。SMBN 与 SOC、TN、 q_{SMBC} 、 q_{SMBN} 、纤维素酶、蔗糖酶和脲酶极显著相关($p<0.01$),与过氧化氢酶呈正相关,但未达到显著水平($p>0.05$),表明 SOC、TN、 q_{SMBC} 、 q_{SMBN} 、纤维素酶、蔗糖酶和脲酶具有重要的作用,直接影响着 SMBN 变化。过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、纤维素酶之间极显著正相关($p<0.01$)或显著正相关($p<0.05$),土壤酶活性彼此之间存在着相互制约相互促进的复杂关系。表明 SMBC、SMBN、 q_{SMBC} 、 q_{SMBN} 、SOC、TN 以及土壤酶活性之间联系紧密。

表 4 不同处理对土壤酶活性的影响

土层/cm	处理	过氧化氢酶/(ml·g ⁻¹)	蔗糖酶/(mg·g ⁻¹)	脲酶/(mg·g ⁻¹)	纤维素酶/(mg·g ⁻¹)
0—5	白三叶	0.652a	20.521a	2.555a	2.328a
	清 耕	0.433a	9.171a	0.969a	0.891a
5—10	白三叶	0.596b	17.337b	2.135ab	1.729b
	清 耕	0.327b	8.131ab	0.699b	0.739ab
10—20	白三叶	0.517c	14.620c	1.855bc	1.270c
	清 耕	0.291bc	6.789b	0.449c	0.593bc
20—40	白三叶	0.428d	12.583d	1.183d	0.900d
	清 耕	0.254c	4.699c	0.341c	0.426c

注:不同小写字母表示同一处理不同土层间差异达到显著水平($p<0.05$)。

表 5 土壤微生物量碳、氮与有机碳、全氮和土壤酶活性的相关性

指标	SMBC	SMBN	SOC	TN	q_{SMBC}	q_{SMBN}	过氧化氢酶	蔗糖酶	脲酶	纤维素酶
SMBC	1	0.963**	0.981**	0.966**	0.985**	0.716*	0.628	0.886**	0.832**	0.953**
SMBN		1	0.976**	0.987**	0.868**	0.889**	0.662	0.922**	0.860**	0.962**
SOC			1	0.983**	0.990**	0.769*	0.631	0.894**	0.828**	0.974**
TN				1	0.967**	0.809**	0.647	0.922**	0.839**	0.969**
q_{SMBC}					1	0.735*	0.654	0.891**	0.851**	0.949**
q_{SMBN}						1	0.721*	0.713*	0.700*	0.683*
过氧化氢酶							1	0.827**	0.677*	0.684*
蔗糖酶								1	0.809**	0.905**
脲酶									1	0.766*
纤维素酶										1

注:*表示存在显著相关($p<0.05$),**表示存在极显著相关($p<0.01$), $n=12$;SMBC:土壤微生物量碳;SMBN:土壤微生物量氮;SOC:土壤有机碳;TN:土壤全氮; q_{SMBC} :微生物碳熵; q_{SMBN} :微生物氮熵。

3 讨论

土壤微生物量只占土壤有机质的 3%左右,却是植物养分转化和循环的驱动力,在土壤肥力和生态系统评价中起着重要作用。研究土壤微生物量碳氮对了解土壤肥力、土壤养分的转化和循环具有重要意义^[22]。本研究中,SMBC 与 SMBN 的含量随土层深度的增加而减少,苹果园生草白三叶可以显著提高 SMBC 与 SMBN 的含量,生草改善了土壤的理化性质,牧草枯落物生物量,增加了土壤有机—无机体的转化,

促进了土壤微生物生长繁育,从而明显增加了土壤微生物量,有利于土壤碳氮的积累,这与龙妍^[23]、岳泰新^[24]、惠竹梅^[25]等在葡萄园生草白三叶研究结果一致,吕德国等^[26]也认为在苹果园覆草可提高表层土壤微生物量。这与微生物利用底物的量直接相关,研究表明 SMBC 的高低主要受土壤中有机碳源的制约,并与随土壤剖面的加深土壤活性碳库的减少有关^[27],地上部分生物量的差异使输入到土壤中的有机碳量明显不同,造成进入土壤的微生物可利用底物的质和量的变化,从而影响土壤微生物量的变化^[28]。

土壤微生物量与土壤养分的比值可以用来反映土壤养分向微生物量的转化效率、土壤养分损失和土壤矿物对有机质的固定,并且其在标记土壤过程或土壤健康变化时要比单独使用微生物量或土壤养分的值更有效^[29]。土壤微生物碳熵(q_{SMBC})的变化可以反映土壤有机碳的变化。 q_{SMBC} 在白三叶处理中随土层加深明显下降,且表层(0—5 cm 和 5—10 cm)的 q_{SMBC} 高于清耕处理,在清耕处理中, q_{SMBC} 值基本保持一致。说明间作白三叶提高 0—10 cm 土层土壤微生物对有机碳的利用效率。在各个土层中,间作白三叶处理的 q_{SMBN} 高于清耕处理,其随土层加深变化不明显,说明间作白三叶也提高了土壤微生物对全氮碳的利用效率。

土壤微生物的数量和活跃程度与土壤中有机碳的来源紧密相关。清耕土壤有机碳含量偏低,不利于土壤微生物的生长繁殖,其土壤微生物的储量和活性均很低。间作白三叶可显著提高土壤有机碳含量,根际产物(分泌物、脱落细胞等)释放量增加,土壤微生物获得较多的碳源,导致土壤微生物量碳、氮增加。土壤质量得到改善,有利于土壤微生物的繁殖及相互作用,由于根系活动对微生物的生长有促进作用,随着土层深度的增加,其影响效果逐渐减小。植物根系分泌的大量低分子量的根系分泌物也加剧了土壤微生物的繁衍,使其生命活动旺盛,从而导致土壤微生物量碳、氮含量增加,并提高了微生物碳熵和微生物氮熵^[30-32]。

土壤酶主要来自于土壤微生物代谢过程,此外也能由土壤动物、植物产生残体分解。土壤酶是土壤中的生物催化剂,参与土壤的发生、发育及土壤肥力形成和演变。土壤中一切生化反应都是在土壤酶的参与下完成的,对土壤有机碳的分解和转化起着重要作用,土壤酶活性的高低能反映土壤生物活性和土壤生化反应强度^[33]。间作白三叶后,土壤 4 种土壤酶活性都有明显提高,且随着土层深度增加而降低,这与前人研究结果相一致^[23-34]。植物的根系在生长发育过程中的分泌物、死亡根茬的矿化分解会影响土壤酶活性,生草提高土壤有机碳和全氮的含量,增强牧草根系新陈代谢作用的结果,同时生草改善了土壤的结构与通气性,从而提高了土壤酶的活性。李发林等^[35]多年定位研究结果表明:果园生草、套种绿肥可以改善土壤酶活性。林桂志等^[36]报道,幼龄荔枝园种植百喜草后,土壤转化酶、蛋白酶、脲酶、过氧化物酶活性均明显增加。

相关性分析表明 SMBC, SMBN, q_{SMBC} , q_{SMBN} , SOC, TN 间存在着极显著或显著性相关。除去过氧化氢酶外,其他三种土壤酶活性与 SMBC、生草葡萄

园土壤酶活性与 SMBC, SMBN, q_{SMBC} , q_{SMBN} 、有机碳和全氮间存在着极显著或显著性相关。土壤酶活性的强度直接影响着 SMBC, SMBN 和土壤养分的变化。SMBC, SMBN 及土壤酶活性与 SOC 和 TN 之间联系紧密,SMBC, SMBN 和土壤酶活性可以作为判断土壤肥力状况的生物学指标,同时也可提高土壤肥力水平。

综上所述,由于间作白三叶增加了果园活地被物,形成的果园复层结构有利于增加 SOC 的输入,白三叶地被凋落物和根系及其分泌物为土壤微生物提供了稳定而丰富的碳源,因此显著增加了果园土壤 SMBCN 和 SMBN 含量,提高了土壤微生物对 SOC 和 TN 的利用效率,同时增强了土壤酶活性。Vepsäläinen 等^[37]研究表明,根系残体和根系分泌物有利于微生物生长繁殖,促进微生物活性提高,而微生物量的提高反过来影响土壤活性有机碳的含量的升高。在果园生草栽培复合系统中,牧草组分通过自身的生命活动对土壤各种物理、化学和生物过程产生影响,至于果园土壤物理生物化学环境变化与果树生长发育互动关系以及对果实品质的影响的研究有待进一步探讨。

4 结论

(1) 土壤微生物量碳、氮含量和土壤酶活性均随着土层深度的增加呈现降低趋势。与清耕相比,间作白三叶可显著提高土壤微生物量碳、氮含量和土壤微生物熵和土壤微生物氮熵,提高土壤微生物对有机碳和全氮的利用效率,显著提高土壤酶活性。

(2) 土壤微生物量碳、氮、土壤微生物碳熵、土壤微生物氮熵、土壤酶活性与土壤有机碳、全氮呈极显著相关或显著性相关,表明土壤微生物量碳、氮和土壤酶活性和土壤养分间关系密切,可以作为判断土壤肥力状况的生物学指标,同时也可以作为提高土壤肥力提供依据。

(3) 土壤微生物量碳、氮及土壤酶活性对苹果园生草栽培响应敏感,间作白三叶对苹果园土壤微生物量碳、氮及土壤酶活性产生了积极影响,其影响主要集中在表层土壤。

参考文献:

- [1] Bill Luce. Five most important developments[J]. West Fruit Grower, 2004, 124(10): 13.
- [2] 徐雄, 张健, 廖尔华. 四种土壤管理方式对梨园土壤微生物和土壤酶的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 901-905.
- [3] 李会科, 李金玲, 王雷存, 等. 种间互作对苹果/白三叶复合系统根系生长及分布的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 961-967.

- [4] 王英俊,李同川,张道勇,等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. 草地学报,2013,21(3):485-493.
- [5] 耿增超,张立新,张朝阳,等. 旱地果园水肥管理模式研究进展[J]. 水土保持研究,2004,11(1):101-105.
- [6] 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.
- [7] 李会科,梅立新,高华. 黄土高原旱地苹果园生草对果园小气候的影响[J]. 草地学报,2009,17(5):615-620.
- [8] 李同川,李会科,郭宏,等. 渭北黄土高原果园生草地旱季土壤水分特征研究[J]. 水土保持研究,2014,21(1):29-33.
- [9] 薛菁芳,高艳梅,汪景宽,等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. 土壤通报,2007,38(2):247-250.
- [10] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社,1989.
- [11] 孙建,刘苗,李立军,等. 免耕与留茬对土壤微生物量C、N及酶活性的影响[J]. 生态学报,2009,29(10):5508-5515.
- [12] 张勇,杜华栋,张振国,等. 黄土丘陵区自然植被恢复下土壤微生物学质量演变特征[J]. 水土保持研究,2014,21(1):6-11.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 中国农业出版社,2000.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [15] Wu J, Brookes P C. The proportional mineralisation of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37:507-515.
- [16] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass. Soil Biology and Biochemistry, 1984,16((2)):169-175.
- [17] Guo M J, Cao J, Wang C Y, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwuling, northwest China [J]. Forest Ecology and Management, 2005,217:117-125.
- [18] 冯书珍,苏以荣,秦新民,等. 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应[J]. 生态学报,2013,33(10):3148-3157.
- [19] 文都日乐,张静妮,李刚,等. 放牧干扰对贝加尔针茅草原土壤微生物与土壤酶活性的影响[J]. 草地学报,2010,18(4):517-522.
- [20] 吕德国,秦嗣军,杜国栋,等. 果园生草的生理生态效应研究与应用[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(2):131-136.
- [21] Fan J, Hao M D. Effects of long-term rotation and fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. Res. Soil Water Cons., 2003,10(10):85-87.
- [22] Kandeler E, Tscherko D, Spiegel H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 28(4):343-351.
- [23] 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.
- [24] 岳泰新,惠竹梅,孙莹,等. 行间生草对葡萄园土壤微生物学特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(9):100-104.
- [25] 惠竹梅,岳泰新,张振文,等. 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.
- [26] 吕德国,赵新阳,马怀宇,等. 覆草对苹果园土壤养分和微生物的影响[J]. 贵州农业科学,2010,38(6):104-106.
- [27] Agnelli A, Ascher J, Corti G, et al. Distribution of microbial communities in a forest soil profile investigated by microbial biomass, soil respiration and DGGE of total and extracellular DNA[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004,36(5):859-868.
- [28] 徐华勤,章家恩,冯丽芳,等. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 生态学报,2009,29(8):4112-4118.
- [29] 赵彤,闫浩,蒋跃利,等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 生态学报,2013,33(18):5615-5622.
- [30] 焦蕊,赵同生,贺丽敏,等. 自然生草和有机物覆盖对苹果园土壤微生物和有机质含量的影响[J]. 河北农业科学,2008,12(12):29-30.
- [31] 温晓霞,殷瑞敬,高茂盛,等. 不同覆盖模式下旱作苹果园土壤酶活性和微生物数量时空动态研究[J]. 西北农业学报,2011,20(11):82-88.
- [32] 孙霞,陈新燕,柴仲平,等. 不同土壤管理措施下南疆果园土壤微生物及酶活性特征[J]. 草业科学,2012,29(7):1023-1027.
- [33] 李会科. 渭北旱地苹果园生草的生态环境效应及综合技术体系构建[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [34] 张成娥,杜社妮,白岗栓,等. 黄土塬区果园套种对土壤微生物及酶活性的影响[J]. 土壤与环境,2001,10(2):121-123.
- [35] 李发林,黄炎和,刘长全,等. 土壤管理模式对幼龄果园根际土壤养分和酶活性的影响[J]. 福建农业学报,2002,17(2):112-115.
- [36] 林桂志,丁光敏,许木土,等. 幼龄荔枝园种植百喜草改良土壤效果的研究[J]. 亚热带水土保持,2006,18(4):4-8.
- [37] Vepsäläinen M, Erkomaa K, Kukkonen S, et al. The impact of crop plant cultivation and peat amendment on soil microbial activity and structure[J]. Plant Soil, 2004,264:273-286.