

间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤总有机碳及轻组有机碳的影响

张玉岱¹, 李同川¹, 张道勇¹, 贾曼莉¹, 郭宏¹, 李会科^{1,2*}, 曹卫东³

(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; 3.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:以渭北黄土高原苹果园为对象, 设置传统的果园清耕与间作白三叶(*Trifolium repens* L.)两处理, 分别采集 0~5、5~10、10~20 cm 及 20~40 cm 土层土样, 探讨了间作白三叶对苹果/白三叶复合系统总土壤有机碳(TOC)、轻组有机碳(LOCF)、重组有机碳(HOCF)的影响。结果表明:与果园清耕相比, TOC 含量及土壤有机碳密度(SOCD)显著增加, 增幅随土壤深度的增加而迅速降低; 0~5、5~10、10~20 cm 土层 LOCF 含量分别比清耕处理增加了 7.02、4.57 倍和 2.49 倍, LOCF 分配比例(LOCF/SOC)比清耕处理提高了 7.01、4.57 倍和 2.51 倍, 说明间作白三叶较好地改善了果园 SOC 质量; 与 LOCF 及 SOC 含量的增幅相比, HOCF 含量增幅较低, 说明 HOCF 受间作白三叶影响较小。LOCF 对间作白三叶敏感, 是指示果园生草土壤有机碳变化的良好指标。

关键词:果园生草; 土壤有机碳; 土壤轻组有机碳

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)04-0810-09 doi:10.11654/jaes.2014.04.028

Effects of Interplanting White Clover on Soil Total Organic Carbon and Light Organic Carbon Fraction in Apple Orchard

ZHANG Yu-dai¹, LI Tong-chuan¹, ZHANG Dao-yong¹, JIA Man-li¹, GUO Hong¹, LI Hui-ke^{1,2*}, CAO Wei-dong³

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Interplanting cover crops in orchards is one of soil managements for the sustainability of orchards. Herein, we examined dynamics of soil total organic carbon (TOC) and light organic carbon fraction (LOCF) in an apple-white clover system in Weibei Loess Plateau from 2005 to 2011. 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-interplanting orchards. Total organic carbon and soil organic carbon density (SOCD) in apple-white clover intercropping system were significantly increased in comparison with the clear tillage orchard. The increments, however, decreased rapidly with soil depth. Compared to the clear tillage apple orchard, the LOCF and the ratios of LOCF to TOC increased by 7.02, 4.57 times, and 2.49 times and 7.01, 4.57 times and 2.51 times at 0~5 cm, 5~10 cm, and 10~20 cm soil layer, respectively. This suggests that interplanting white clover in apple orchard could improve the quality of soil organic carbon.

Keywords: interplanting grasses in orchard; soil organic carbon; light organic carbon fraction

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103005-9); 国家科技支撑计划(2014BAD16B06, 2014BAD16B02); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-28); 陕西省科技攻关项目(2010K01-04-2); 陕西省科技统筹创新工程计划(2011KTZB02-02-05); 西北农林科技大学推广专项资助(Z222021211); 陕西省农业专项(K332021313)

作者简介: 张玉岱(1987—)男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事生态环境工程方面研究。

* 通信作者: 李会科 E-mail: lihuike@nwsuaf.edu.cn

果园生草栽培是欧美果树生产发达国家普遍采用的果园可持续发展的土壤管理模式^[1],我国于1998年将果园生草栽培作为绿色果品生产主要技术措施在全国推广^[2],但实践中清耕果园面积占果园总面积90%以上,果园生草在我国尚处于试验与小面积应用阶段^[3]。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^[4]。在多物种共存的果园生草复合系统中,果树与牧草组分通过对光、热、水、养分等资源的吸收利用而产生种间互作效应,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,因此,揭示生草栽培条件下,果园土壤养分对生草栽培响应及其反馈作用不仅可为果园生草复合系统功能评价及系统的优化配置提供依据,而且对进一步探讨果园生草复合生态系统果树与牧草组分间的互作机制、建立科学的果园生草技术具有重要作用。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^[5-9]。

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)不仅是土壤养分转化的重要参与者,而且是土壤环境质量演变的核心^[10],其数量与质量直接影响土壤各种物理、化学和生物过程。轻组有机碳(Light fraction organic carbon, LOCF)是土壤有机碳的重要组成部分,由可识别的处于不同分解阶段的植物残体,真菌的菌丝和孢子、种子、动物残体、微生物残骸以及一些吸附在有机碎屑上的矿质颗粒组成,其腐殖化程度低,与土壤粘粒结合松散,主要分散在团粒结构外部或团粒之间,不受粘粒矿物或其他机制保护,极易被土壤微生物利用,直接参与土壤微生物化学转化过程,同时,也是土壤微生物活动能源和土壤养分的驱动力,对调节土壤养分流有较大影响,是土壤有机碳的活跃或活性较强的部分^[11],可敏感地反映土壤有机碳微小变化、土壤养分转化速率与驱动力^[12]。因此,揭示生草栽培条件下,果园土壤有机碳及轻组有机碳含量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作用。Haynes^[13]研究指出,生草导致果园土壤腐殖质逐渐积累,生草3 a 0~20 cm 土层 SOC 含量较

果园清耕增加2%。对渭北黄土高原苹果园生草栽培研究发现^[14],间作白三叶7 a后,较大幅度提高了果园0~20 cm 土层中0.25 mm 以上水稳性团聚体 SOC 含量,桃园生草栽培3 a后增加了果园 SOC 含量及有机碳密度(Soil organic carbon density, SOCD),增幅随土层增加而降低^[15],杨梅园生草栽培3 a后,0~20 cm 土层 SOC 含量增加了25.2%^[16],太行山区苹果-沙打旺复合系统中0~50 cm 土层 SOC 含量较清耕提高30.0%^[17]。然而已有的一些研究多集中于生草后果园土壤总 SOC 的变化,而对 LOCF 关注甚少,未能较好地揭示 SOC 数量与质量对生草栽培的响应及其演变特征。白三叶(*Trifolium repens* L.)为多年生豆科优质牧草,由于其易管理、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。本研究以苹果、白三叶为试材,通过间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤总 SOC 及 LOCF 碳含量演变及其分布格局进行研究,探讨果园 SOC 及 LOCF 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',属暖温带大陆性季风气候,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,为13 a生乔化红富士(富士/新疆野苹果)果园,栽植间距3 m×8 m。

1.2 实验设计

采用单因素随机区组试验设计,设置苹果清耕单作和苹果/白三叶间作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7 a,播前深翻整地,开沟条播,供试草种为白三叶(*Trifolium repens* L.),品种为海法(HaiFa),播种密度为0.75 g·m⁻²,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

2011年10月,在各处理区随机布设5个采样点,每个采样点随即设置3个1 m×1 m样方,用剪除去地上生物量之后,除去枯枝落叶层,挖取长约80 cm,宽

约60 cm,深约 80 cm 的土壤剖面,采集 0~5、5~10、10~20 cm 和 20~40 cm 土层土样,同时用环刀(100 cm³)测定土壤容重。同一采样点同一层次土壤混匀作为一个样品,共 40 个样品,样品去除根系,于室内风干过 2 mm 筛贮存备用。

土壤有机碳(SOC)采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定^[18]。轻组有机碳(LOCF)的分组测定:称取过 2 mm 筛的土样 10 g 于 100 mL 离心管中,加入密度为 1.70 g·cm⁻³ 的 NaI 溶液 50 mL,于 200 r·min⁻¹ 条件下振荡 1 h,然后在 4200 r·min⁻¹ 条件下离心 10 min,将浮在 NaI 表面的轻组(LF)倾倒入装有 0.45 μm 尼龙滤纸的滤斗中抽气过滤,留在滤纸上的部分即为轻组土壤(LF),滤液(NaI)收集后可重复利用。轻组先用 75 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 洗涤,直至无 Cl⁻反应(用 AgNO₃ 溶液检验),再用至少 75 mL 蒸馏水洗涤,然后将滤纸上的轻组转移(水洗)至蒸发皿中,先在水浴锅上蒸干,再在 60 ℃下烘干 12 h 后称重。烘干后的轻组部分用玛瑙研钵研细过 0.19 mm 筛后,在岛津 TOC-SSM-5000A 碳分析仪上测定其含碳量(LOCF)。重组有机碳(HOCF)含量用差值法获得^[19]。

1.4 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度(SOCD)是指单位面积一定厚度的土层中有机碳的质量,可以指示土壤的有机碳储量。一般对于分层的土壤剖面而言,土壤有机碳密度计算公式为:

$$SOCD_i = \frac{(1-\theta_i\%) \times C_i \times D_i \times \rho_i}{100}$$

如果某一土壤剖面由 m 层组成,那么该剖面的有机碳密度(DSOC, kg·m⁻²)为:

$$DSOC = \sum_{i=1}^m DSOC_i = \sum_{i=1}^m \frac{(1-\theta_i\%) \times C_i \times D_i \times \rho_i}{100}$$

式中: $SOCD_i$ 为第 i 层土壤有机碳密度, kg·m⁻²; θ_i 为第 i 层 >2 mm 砾石含量(体积百分含量,鉴于黄土高原土壤特性,几乎没有粒径 >2 mm 的砾石,故取值 0.5%^[20]); C_i 为第 i 层土壤有机碳浓度, g·kg⁻¹; D_i 为

第 i 层土层厚度, cm; ρ_i 为第 i 层土壤容重, g·cm⁻³; $DSOC$ 为整个 m 层的土壤有机碳密度。

1.5 数据处理

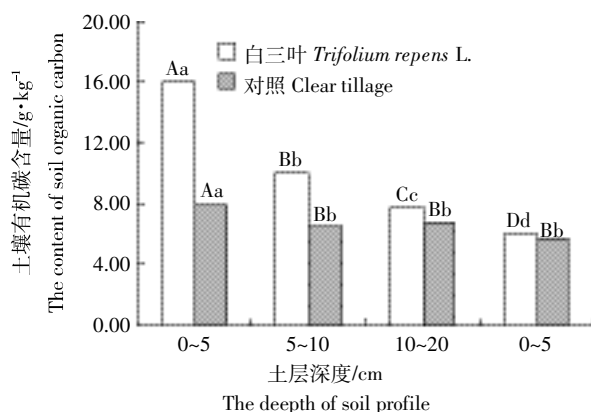
采用 LSD 法和 T 检验进行差异显著性分析,同时分析 SOC、LOCF、HOCF、LOCF/SOC 之间的相关性,所有统计分析利用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 完成。

2 结果与分析

2.1 间作白三叶对果园土壤总有机碳的影响

2.1.1 间作白三叶对苹果园土壤有机碳(SOC)含量与分布的影响

由 SOC 分析结果可看出(图 1),间作白三叶对果园 SOC 含量产生了积极影响,与清耕处理相比,间作白三叶处理 0~5、5~10、10~20、20~40 cm 土层 SOC 含量分别较清耕处理增加 103%、56%、14%和 3.32%,增幅随土壤深度的增加呈降低的趋势,说明生草对 SOC 含量影响随土层深度的增加而逐渐减弱, T 检验结果显示(表 1),间作白三叶处理 0~20 cm 各土层 SOC 含



不同小写字母表示同一处理不同土层间差异达显著水平($P < 0.05$),不同大写字母表示同一处理不同土层间差异达极显著水平($P < 0.01$)

Different small letters within the same system mean significant difference between different soil layers at the 0.05 level;

Different capital letters within the same system mean significant difference between different soil layers at the 0.01 level

图 1 对土壤有机碳(SOC)含量的影响

Figure 1 Soil organic carbon contents under two different systems

表 1 不同处理土壤轻组有机碳及有机碳密度 T 检验结果

Table 1 T -test results of light organic carbon fraction and organic carbon density under two different systems

土层深度 Depth/cm	白三叶 <i>Trifolium repens</i> L.		清耕 Clear tillage		均值差值 Mean difference		T 值 T -value		Sig.(双侧) Sig.(2-tailed)	
	SOC	SOCD	SOC	SOCD	SOC	SOCD	SOC	SOCD	SOC	SOCD
0~5	16.04	1.11	6.37	0.64	8.12	0.47	6.96	49.49	0.00	0.00
5~10	10.09	0.79	6.02	0.52	3.78	0.29	2.09	10.97	0.00	0.00
10~20	7.73	1.20	5.84	1.02	0.96	0.18	-1.47	21.33	0.00	0.00
20~40	5.94	1.92	5.76	1.93	0.45	0.01	-2.34	0.11	0.08	0.92
0~40		5.26		4.3		0.96		16.35		0.00

量与清耕处理相应土层达极显著性差异水平 ($P < 0.01$),而在 20~40 cm 土层,两处理 SOC 含量无显著性差异 ($P > 0.05$),表明间作白三叶对果园 SOC 的影响主要集中在 0~20 cm 土层,较大幅度地增加了 0~20 cm 土层 SOC 含量,而对果园 20 cm 以下土层 SOC 影响较小。

在不同层次剖面的分布中,两处理 SOC 均以 0~5 cm 土层含量最高,20~40 cm 土层含量最低,随土层增加而逐层减少,说明间作白三叶未对果园 SOC 含量分布格局产生影响。进一步比较 SOC 含量剖面分布发现,两处理 SOC 含量虽分布格局一致,但其在剖面层次中的分布趋势不同。在 0~40 cm 各土层内,间作白三叶处理 SOC 含量随土层加深而降低的幅度较大(图 1),变幅介于 $1.79 \sim 5.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,而清耕处理 SOC 含量随土层增加则降低幅度较小,变幅介于 $0.08 \sim 0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。方差分析结果显示(图 1),间作白三叶处理各土层间 SOC 含量达极显著性差异水平 ($P < 0.01$),而清耕处理除 0~5 cm 土层与 5~10、10~20、20~40 cm 土层 SOC 含量差异极显著外 ($P < 0.01$),5~10、10~20、20~40 cm 各土层间则无显著差异 ($P > 0.05$)。这一结果表明生草导致不同层次 SOC 含量分异明显,且随土层加深 SOC 含量降低迅速,呈层次化分布趋势。

2.1.2 间作白三叶对果园土壤有机碳密度(SOCD)与分布的影响

土壤有机碳密度(SOCD)指单位体积土壤中有有机碳质量,其大小决定于 SOC 含量和土壤容重的大小,可表征 SOC 的贮量。间作白三叶处理 0~40 cm 土壤深度范围内 SOCD 为 $5.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,而清耕处理为 $4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,SOCD 相比清耕处理增加 22.3%(图 2),且二

者 SOCD 差异极显著(表 1, $P < 0.01$),说明间作白三叶对果园整个 40 cm 深 SOCD 影响较大,显著地提升了该土层 SOC 的贮量。由于两处理 SOC 含量和土壤容重大小的差异,不同土层,二者 SOCD 差异大小亦不同,两处理 SOCD 的差异主要表现在 0~20 cm 各土层(图 2),在 0~5、5~10、10~20 cm 土层,间作白三叶处理 SOCD 分别比清耕处理提高 73%、54%和 18%,而在 20~40 cm 土层则与清耕处理趋于一致。统计分析结果显示(表 1),0~5、5~10 cm 土层 SOCD 与清耕处理差异均呈极显著 ($P < 0.01$),10~20 cm 土层与清耕处理差异显著 ($P < 0.05$),说明生草不仅提升了果园 SOCD,而且改变了 SOCD 在不同层次中的分布状况,导致不同层次 SOCD 发生了显著变化,SOC 的蓄持有向表层土壤富集的趋势。这与前人对草地 SOCD 的研究结果一致^[21]。

2.2 间作白三叶对果园土壤轻组有机碳的影响

2.2.1 间作白三叶对果园土壤轻组有机碳(LOCF)含量与分布的影响

间作白三叶与清耕两处理 LOCF 含量具有明显的垂直分布特征(表 2),即随着土壤深度的增加,LOCF 含量呈现垂直递减规律性。尽管两处理 LOCF 含量分布格局一致,但两处理 LOCF 含量在剖面分布中的变化幅度表现出明显差异。清耕处理 LOCF 含量自上而下的变化比较平稳,从 0~5 cm 至 20~40 cm 土层 LOCF 含量变化幅度介于 $0.10 \sim 0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,而间作白三叶处理变幅较大,从 0~5 cm 土层至 5~10 cm 土层迅速减少了 $4.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而清耕处理仅降低了 $0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,呈现出明显的表层富集现象,从 0~5 cm 至 20~40 cm 土层 LOCF 含量变化幅度介于 $1.34 \sim$

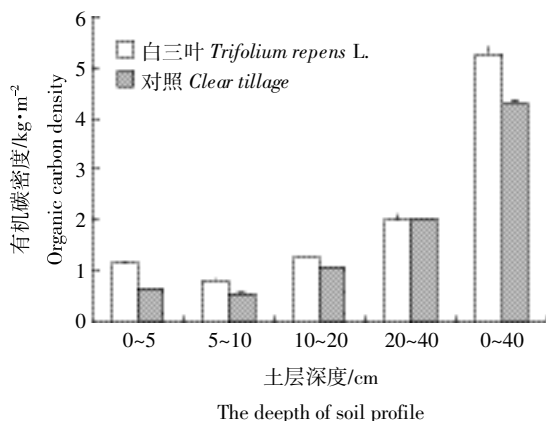


图 2 对土壤有机碳密度(SOCD)的影响

Figure 2 Soil organic carbon density under two different systems

表 2 对土壤轻重组有机碳含量的影响($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Contents of light and heavy organic carbon fractions under two different systems($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土层/cm	间作白三叶		清耕对照	
	LOCF	HOCF	LOCF	HOCF
0~5	8.34Aa	7.70	1.19Aa	6.37
5~10	3.98Bb	6.51	0.87Bb	5.84
10~20	1.86Cc	5.87	0.74Bb	6.02
20~40	0.52Dd	5.41	0.64Bb	5.76

注:同列不同小写字母表示含量差异达显著水平 ($P < 0.05$),同列不同大写字母表示含量差异达极显著水平 ($P < 0.01$),下同。

Note: Different small letters within same column mean significant difference at the 0.05 level; Different capital letters within same column mean significant difference at the 0.01 level. The same as below.

4.36 g·kg⁻¹ 之间。方差分析结果显示(表 2),间作白三叶处理各土层间 LOCF 含量达极显著差异($P<0.01$),而清耕处理除 0~5 cm 土层 LOCF 含量与 5~10、10~20、20~40 cm 极显著差异外($P<0.01$),5~10、10~20、20~40 cm 各土层间则无显著差异($P>0.05$),说明间作白三叶导致不同层次 LOCF 含量变化剧烈,与 SOC 含量演变趋势一致。不同土层,由于间作白三叶与清耕两处理输入土壤有机物数量与质量、土壤生物活动、人工扰动等不同,二者 LOCF 含量差异大小在不同土层中表现出明显差异。比较两处理不同土层 LOCF 含量差异大小发现,LOCF 含量差异主要表现在 0~20 cm 各土层,在 0~5、5~10、10~20 cm 土层,间作白三叶处理 LOCF 含量分别比清耕处理增加 7.02、4.57 倍和 2.49 倍,其增幅显著高于相应土层 SOC 含量的增幅(图 1),说明 LOCF 对生草栽培的响应敏感性更高,LOCF 积累和分布对 SOC 具有重要影响,0~20 cm 土层具有良好的响应。在 20~40 cm 土层,两处理 LOCF 含量则无显著差异(表 2),同一土层间作白三叶与清耕两处理 LOCF 含量的差异大小为 0~5 cm>5~10 cm>10~20 cm>20~40 cm 土层,说明生草对 LOCF 含量影响随土层深度的增加而逐渐减弱。

从 0~5 cm 至 20~40 cm 土层,间作白三叶处理土壤重组有机碳(Heavy organic carbon, HOCF)含量依次减小,而清耕处理则随土层深度增加呈现“降低-增加-降低”的趋势(表 2),二者的分布格局不同,说明生草对 HOCF 含量分布格局产生了影响。在 0~40 cm 土层内,间作白三叶处理 HOCF 含量在 0~10 cm 土层均高于清耕处理,该土层 HOCF 含量比清耕处理增加 11%~14%。显著性分析表明,HOCF 含量在 0~5 cm 土层与清耕处理差异显著($P<0.05$),而在 5 cm 以下土层与清耕处理差异不显著(表 3),说明间作白三叶对 0~5 cm 土层 HOCF 含量产生了显著影响。但与 LOCF 及 SOC 含量的增幅相比,HOCF 含量增幅显著低于 LOCF 含量与 SOC 含量的增幅,说明

HOCF 含量受生草栽培影响较小,与多数研究者的结论一致^[19,22]。

2.2.2 间作白三叶对果园土壤 LOCF 分配比例的影响

表 4 为间作白三叶与清耕两处理 LOCF 与 HOCF 组分有机碳分配比例随土壤深度的变化。从有机碳在 LOCF 与 HOCF 组分的分布可以看出,在 0~40 cm 土壤深度范围内,间作白三叶与清耕两处理 LOCF 的平均分配比例分别为 30.75% 和 12.25%,HOCF 的分配比例分别为 69.25% 和 87.75%,两处理 HOCF 的分配比例均显著高于 LOCF 的分配比例,说明果园 SOC 主要存在于重组分中。但与清耕处理相比,间作白三叶处理 LOCF 平均分配比例显著高于清耕处理,为清耕处理的 2.51 倍,说明生草有效地提升了果园有机碳库质量。

表 4 对土壤轻重重组有机碳分配比例的影响(%)

Table 4 Ratios of light and heavy organic carbon fractions to soil organic carbon under two different systems(%)

土层/cm	间作白三叶		清耕对照	
	LOCF/SOC	HOCF/SOC	LOCF/SOC	HOCF/SOC
0~5	52Aa	48	15Aa	85
5~10	38Bb	62	13Ab	87
10~20	24Cc	76	11Ab	89
20~40	9Dd	91	10Ab	90
平均	30.75	69.25	12.25	87.75

从土壤深度分布可以看出,随土壤深度增加,间作白三叶处理 LOCF 分配比例迅速下降,由 0~5 cm 土层的 52% 下降到 20~40 cm 土层的 9%,HOCF 分配比例则迅速增大,由 0~5 cm 土层的 48% 升高到 20~40 cm 土层的 91%,而清耕处理随土壤深度增加 LOCF 及 HOCF 分配比例的变化幅度较小,从 0~5 cm 至 20~40 cm 土层 LOCF 分配比例自上而下降低幅度介于 10%~15%,HOCF 分配比例自上而下介于 85%~90%。由于 LOCF 与 HOCF 组分受到生草栽培影响程度不同,对 LOCF 与 HOCF 组分在不同土层中的分配比例产生明显的差异。如表 4 所示,在 0~5、5~10、10~

表 3 土壤轻重重组有机碳含量 T 检验

Table 3 T -test results of light and heavy organic carbon fractions under two different systems

土层深度	白三叶 <i>Trifolium repens</i> L./g·kg ⁻¹		清耕 Clear tillage/g·kg ⁻¹		均值差值 Mean difference		T 值 T -value		Sig.(双侧)Sig.(2-tailed)	
Depth/cm	LOCF	HOCF	LOCF	HOCF	LOCF	HOCF	LOCF	HOCF	LOCF	HOCF
0~5	8.34	7.70	1.19	6.73	7.15	0.97	55.61	6.96	0.00	0.02
5~10	3.99	6.51	0.87	5.84	3.12	0.67	34.18	2.09	0.00	0.10
10~20	1.85	5.87	0.74	6.02	1.11	-0.15	12.90	-1.47	0.00	0.22
20~40	0.53	5.41	0.64	5.76	-0.10	-0.35	-1.71	-2.34	0.16	0.08

20 cm 各土层间作白三叶处理 LOCF 分配比例分别为清耕处理的 7.01、4.57 倍和 2.51 倍,而 HOCF 分配比例比清耕处理分别降低了 37%、25%和 13%,在 20~40 cm 土层两处理 LOCF 与 HOCF 有机碳分配比例则趋于一致,可见生草对 LOCF 与 HOCF 分配的影响主要表现在 0~20 cm 土层。

2.3 土壤 SOC、LOCF、HOCF、LOCF/SOC 相关分析

SOC 与 LOCF、HOCF 极显著正相关($P<0.01$),说明 SOC 与 LOCF、HOCF 组分之间存在着动态依存关系,并受相同因素的影响,反映果园生草栽培中 SOC 的变化受到 LOCF 和 HOCF 组分中碳变化的影响。这与 Haynes 的研究结果一致^[13],其中 SOC 与 LOCF 相关系数高于 SOC 与 HOCF 相关系数,说明 SOC 的积累与分布受到 LOCF 变化的影响强烈,因而 LOCF 变化可作为指示果园生草栽培 SOC 动态变化指标。LOCF 与 HOCF 极显著正相关($P<0.01$),反映 LOCF 分解的腐殖质化过程对 LOCF 含量变化是 LOCF 分配比例改变的重要原因(表 5)。

表 5 土壤 SOC、LOCF、HOCF、LOCF/SOC 间的关系

Table 5 Correlations between SOC, LOCF, HOCF and LOCF/SOC

	SOC	LOCF	HOCF	LOCF/SOC
SOC	1			
LOCF	0.99**	1		
HOCF	0.90**	0.84**	1	
LOCF/SOC	0.66**	0.60**	0.81**	1

注: ** 表示 0.01 水平下极显著相关。

Note: ** indicates significant correlation at the 0.01 level.

3 讨论

SOC 的数量和质量影响着土壤性质和过程,在维持和改善土壤孔隙状况、离子交换与持水能力,增强碳、氮等营养对果树有效性方面起着重要作用,而农业土壤 SOC 数量和质量在很大程度上受到覆盖、耕作、免耕、施肥等农业生产措施的影响^[23-24]。本研究,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,尤其白三叶地被凋落物和根系及其分泌物为 SOC 提供了稳定而丰富的来源,因此显著增加了果园土壤 SOC 含量,与葡萄园、桃园等果园生草栽培的研究结果一致^[15,25-27]。同时本研究发现,间作白三叶导致不同土层 SOC 含量变化剧烈,随土层深度的增加 SOC 含量迅速降低,这与间作白三叶输入果园土壤的有机物质在土壤剖面中的分布有关。在苹果/白三叶复合系统中,0~5 cm 土

层不仅承担了全部的凋落物,而且浅表层白三叶根系生物量大^[28],积累的有机物质较多,因而 SOC 含量增幅最大(达 103%),显著高于下层增幅(56%、14%和 3.32%),5 cm 土层深度以下,凋落物影响减弱,根系和根系脱落物成为 SOC 主要来源^[29],随土层深度增加,白三叶根系急剧减少^[28],其对 SOC 含量的影响程度下降,故而 SOC 含量呈现出随土层深度的增加而降低迅速。由于生草改变了果园 SOC 含量及土壤容重^[5],对 SOCD 也产生了显著的影响,本研究显示,SOCD 与 SOC 含量演变趋势一致,即间作白三叶显著提升了 0~20 cm 土层 SOC 含量及 SOCD,改变了 SOC 含量及 SOCD 在不同层次中的分布。但间作白三叶对 SOC 含量及 SOCD 的影响程度不同,SOC 含量的增加幅度明显高于 SOCD 增幅,这主要是由于生草对 SOC 含量及土壤容重影响的差异所致。研究表明^[30],土壤有机碳含量降低,土壤容重可能增加,生草在提高 SOC 含量的同时而降低土壤容重^[9],由于 SOCD 的大小决定于 SOC 含量和土壤容重的大小,这意味着生草后 SOC 含量与土壤容重相反变化的差异导致了 SOCD 增幅低于 SOC 含量增幅,与 Murty 等^[31]研究结果一致。

LOCF 是介于动植物残体与腐殖质之间的一个中间碳库,主要由不同分解阶段的植物残体组成。本研究中,间作白三叶增加了果园生物多样性,输入土壤的有机物质除苹果凋落物外,白三叶茎叶及根系为 LOCF 提供了大量的有机物质来源,因而十分显著地增加了果园土壤 LOCF 含量,与国内外的许多研究结果相吻合^[22,24,31-32]。传统的果园清耕,不仅土壤有机物质输入量少,而且清耕破坏了团聚体对 LOCF 的保护作用,导致 LOCF 矿化速率增加^[12],同时清耕改变了土壤温度、湿度、孔隙状况和土壤微生物的环境,使土壤变得疏松,微生物活性增强,从而加快 LOCF 分解而使其含量降低,这也是两处理 LOCF 含量差异较大的重要原因。由于间作白三叶与清耕处理输入不同土层有机物数量和质量的差异,两处理 LOCF 在土壤剖面分布中表现出明显不同,与清耕处理相比,间作白三叶改变了 LOCF 在不同土层中的分布趋势,导致不同土层间 LOCF 含量差异较大,层次性分布明显,表现出明显的表层富集现象,而清耕处理不同土层间 LOCF 含量差异小,剖面分布变化比较平稳。对比 LOCF 与 SOC 含量发现,生草对 LOCF 与 SOC 含量影响程度存在明显的差异,与 SOC 增幅相比,LOCF 增幅显著高于 SOC 增幅,说明生草引起的 SOC 变化中,

以 LOCF 所起的作用较大,另一方面也反映 LOCF 对生草栽培的响应敏感。相关分析结果也表明,LOCF 与 SOC 表现出极显著($P<0.01$)的正相关关系,反映 SOC 与 LOCF 之间存在着动态依存关系,SOC 的增长受 LOCF 增长的影响明显,可作为指示 SOC 含量动态变化的良好指标。

HOCF 是由 LOCF 经彻底分解后残留的或重新合成的、以芳香族物质为主体的有机物质(主要是腐殖质)组成,是存在于有机-无机复合体中的有机质态碳,其主要成分是矿质颗粒,结构稳定^[33]。本研究结果表明,间作白三叶提高了果园 0~10 cm 土层 HOCF 含量,可能是因为 LOCF 分解转化的腐殖化过程中,形成了较多与粘粒结合较紧密的腐殖质,促进了该部分 SOC 与土壤粘粒的结合,增加了果园土壤有机-无机腐殖质结合态碳,但与 LOCF 含量增幅相比,HOCF 增幅远低 LOCF 增幅,说明 HOCF 受生草栽培影响较小,这可能与不同碳组分的形成与积累速率有关。Freibauer 等^[34]认为 SOC 的积累是非线性的,早期阶段积累速率更快,但持续时间短(几年或几十年),主要是易变化的 LOCF 积累,而惰性碳的 HOCF 积累缓慢,当然,对此问题有待进一步探讨。在 HOCF 剖面分布上,间作白三叶与清耕两处理 HOCF 垂直分布格局不同,可能与间作白三叶与清耕对果园土壤干扰强弱不同有关。研究表明^[35],农业生产措施可以从诸多方面对 SOC 分布及稳定性产生影响,耕作是最突出的一个方面,耕作时土壤原有的层次结构被打破,将表层富含 SOC 的表层土壤带入亚表层土壤中,这可能导致 HOCF 含量在一定土壤深度上表现出上升趋势。可见,清耕处理 HOCF 含量呈现“降低—增加—降低”的紊乱垂直分布格局与其受清耕干扰有关,而土壤扰动弱的间作白三叶处理 HOCF 含量则随土层深度的增加依次减小,刘梦云等^[22]在黄土台塬区研究也发现了相似的结果。

LOCF 分配比例反映土壤有机碳库的质量高低,其更能反映出不同农业生产措施对土壤碳行为的影响,LOCF 分配比例越高,土壤有机碳的活性越强^[36]。与清耕处理相比,间作白三叶较大幅提高了 LOCF 分配比例,表明生草有效地改善了果园碳库质量,这对增强果园土壤生物调节过程具有重要作用。同时本研究结果显示,间作白三叶处理 LOCF 分配比例剖面分布变化幅度大,随土层深度增加急剧下降,与 Sollins 等^[37]、杨玉盛等^[38]及徐尚起等^[24]的研究结果较为一致,主要与间作白三叶导致不同土层 LOCF 含量

不同有关,相关分析也说明了这一点(表 5)。而清耕处理由于整个生产过程中输入土壤的有机物较少,LOCF 含量低,整个剖面 LOCF 分配比例变化幅度较小。

本研究中,HOCF 分配比例随土层的增加均呈上升趋势,其变化范围为 48%~91%,与 Whalen 等^[39]研究结果基本一致,即 HOCF 分配比例介于 50%~90% 之间。在 0~40 cm 土层中,间作白三叶与清耕 HOCF 分配比例差异主要表现在 0~20 cm 土层,在该土层间作白三叶处理 HOCF 分配比例比清耕处理分别降低 37%、25%和 13%,这与间作白三叶改变了果园 SOC 组分结构有关。据此对照 LOCF 分配比例剖面分布趋势,并结合 SOC、LOCF、HOCF 相关分析结果(表 5),可以认为,在果园生草复合系统中,对于生草引起的 SOC 积累来说,LOCF 及 HOCF 组分中的有机碳增加均是总 SOC 积累的重要来源,而且随着土壤深度的增加,LOCF 组分的作用逐渐减弱,而 HOCF 组分的作用逐渐增强。

综上所述,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改变了输入土壤的有机物质,引起土壤有机碳库数量与质量发生明显变化,而土壤有机碳库数量与质量的改变直接影响土壤各种物理、化学和生物过程,导致土壤中的物理生物化学过程也随之发生变化,从而改变复合系统“土壤”界面的物理生物化学环境。由此认为,牧草组分通过改变与其相邻果树组分的“土壤”界面的性质,而对其生长发育产生影响。至于生草栽培条件下,果园土壤有机碳库数量与质量的变化与土壤物理生物化学转化过程的互动关系,以及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的研究有待进一步探讨。

4 结论

(1)与传统的果园清耕相比,间作白三叶对果园 SOC 含量及 SOCD 产生了积极影响,其影响主要表现在 0~20 cm 土层,显著地增加了该土层 SOC 含量与 SOCD,改变了 SOC 含量与 SOCD 在不同土层中的分布状况,SOC 含量随土层加深而迅速降低,SOC 的蓄持有向表层土壤富集的趋势。

(2)间作白三叶极显著地提高了 0~20 cm 土层 LOCF 含量与 LOCF 分配比例,提升了有机碳库质量,导致不同层次 LOCF 含量与 LOCF 分配比例变化剧烈,LOCF 呈现出明显的表层富集,但间作白三叶对果园土壤 HOCF 含量影响较小。

(3)LOCF 对生草栽培的响应敏感,强烈影响

SOC的变化与分布,是指示果园生草栽培SOC动态变化的良好指标。

参考文献:

- [1] Bill Luce. Five most important developments[J]. *West Fruit Grower*, 2004, 124(10):13.
- [2] 何庆. 推广全国彩色食品果园生草技术[J]. *中国食物与营养*, 1998(6):40.
HE Qing, The promotion of the orchard grass technology on the national color food[J]. *Food and Nutrition in China*, 1998(6):40.
- [3] 李会科, 赵政阳, 张广军. 果园生草的理论与实践:以黄土高原南部苹果园生草实践为例[J]. *草业科学*, 2005, 22(8):32-37.
LI Hui-ke, ZHAO Zheng-yang, ZHANG Guang-jun. The theory and practice of grass interplanting in orchards[J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(8):32-37.
- [4] 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.
LI Hui-ke, LI Jin-ling, WANG Lei-cun, et al. Effects of site-specific interaction on the growth and distribution of roots in apple-white clover intercropping system[J]. *Journal of Grassland*, 2011, 19(6):961-967.
- [5] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(7):2070-2076.
LI Hui-ke, ZHANG Guang-jun, ZHAO Zhen-yang, et al. Effects of different herbage on soil quality characteristics of non-irrigated apple orchard in Weibei Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7):2070-2076.
- [6] María E R, Emilio B, Pedro A G, et al. Cover crops under different managements vs. frequent tillage in almond orchards in semiarid conditions: Effects on soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44:6-14.
- [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.
LI Hui-ke, MEI Li-xin, GAO Hua. Effect of grass planting on the microclimate of apple orchard in the dryland area of Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(5):615-620.
- [8] 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.
LI Hui-ke, ZHANG Guang-jun, ZHAO Zheng-yang, et al. Effects of interplanting of herbage on soil nutrient of non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(2):477-480.
- [9] Jose A Go mez, Teodorico A Sobrinho b, Juan V Gira ldez. El as fereres soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 102:5-13.
- [10] Mondini C, Sequi P. Implication of soil C sequestration on sustainable agriculture and environment[J]. *Waste Management*, 2008, 28:678-684.
- [11] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件沼泽湿地土壤轻组有机碳与微生物活性动态[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1):113-119.
HOU Cui-cui, SONG Chang-chun, LI Ying-chen, et al. Light fractions of soil organic carbon and microbial activity dynamics in marshes under different water conditions[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(1):113-119.
- [12] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(14):4379-4387.
ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, et al. Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14):4379-4387.
- [13] 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*, 2001, 32(2):211-219.
- [14] 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.
WANG Ying-jun, LI Tong-chuan, ZHANG Dao-yong, et al. Effects of intercropping white clover on soil aggregates and soil organic carbon of aggregates in apple-white clover intercropping system[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(3):485-493.
- [15] 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌, 等. 不同垦殖方式下果园土壤有机碳的空间分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12):2511-2517.
WANG Yi-xiang, WENG Bo-qi, HUANG Yi-bin, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in orchards under different reclamation modes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2511-2517.
- [16] 颜晓捷, 黄坚钦, 邱智敏, 等. 生草栽培对杨梅果园土壤理化性质和果实品质的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 28(6):850-854.
YAN Xiao-jie, HUANG Jian-qin, QIU Zhi-min, et al. Soil physical and chemical properties and fruit quality with grass cover in a *Myrica rubra* orchard[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2012, 28(6):850-854.
- [17] 孟平, 张劲松. 太行山低山丘陵地区果-草复合系统生态经济效益研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2):12-15.
MENG Ping, ZHANG Jin-song. Effects of silvopastoral system on ecology and economics in the hilly land of Taihang Mountain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3):12-15.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:30-34.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000:30-34.
- [19] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤剖面有机碳物理组分分布特征[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11):1890-1899.
DANG Ya-ai, WANG Guo-dong, LI Shi-qing. Distribution characteristics of soil organic carbon fractions of the typical soil types on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11):1890-1899.
- [20] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1):68-76.
LIU Wei, CHENG Ji-min, GAO Yang, et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors[J]. 2012, 49(1):68-76.
- [21] Fu X L, Shao M G, Wei X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010, 155:31-35.
- [22] 刘梦云, 常庆瑞, 杨香云. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤碳组分的差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6):1418-1425.

- LIU Meng-yun, CHANG Qing-rui, YANG Xiang-yun. Soil carbon fractions under different land use types in the tablelands of the Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1418-1425.
- [23] Kenneth R. Olson soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in U. S. croplands; Issues paper for protocol development[J]. *Geoderma*, 2013, 195-196:201-206.
- [24] 徐尚起, 崔思远, 陈 阜, 等. 耕作方式对稻田土壤有机碳组含量及其分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):127-132.
- XU Shang-qi, CUI Si-yuan, CHEN Fu, et al. Effect of tillage on content of desity fractions of paddy soil orgnaic carbon and its spatial distribution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):127-132.
- [25] Haynes R J, Goh K M. Some effects of orchard soil management on sward composition, levels of available nutrients in the soil, and leaf nutrient content of mature 'Golden Delicious' apple trees[J]. *Hortic Sci*, 1980, 13:15-25.
- [26] Mikulas J. Controlled natural green cover in vineyard on sandy[J]. *Obstbau Weinbau*, 1996, 33(7/8):205-206.
- [27] Goode J E, White G C. Soil management effects on number of properties and their possible influence on fruit crops[J]. *Annu Rep Malling Res, Sta*, 1988:155-158.
- [28] 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.
- LI Hui-ke, ZHENG Qiu-ling, ZHAO Zheng-yang, et al. Study on the root system distribution characteristics of several herbage species growing in apple orchard in Loess Plateau[J]. *Acta Prataculrurae Sinica*, 2008, 17(2):92-96.
- [29] Boone R D. Light fraction soil organic matter; Origin and contribution to net nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26:1459-1468.
- [30] Nepstad D C, de Carvalho C R, Davi dson E A, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures[J]. *Nature*, 1994, 372:666-669.
- [31] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, et al. Dose conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen are view of the literature[J]. *Global Change Biol*, 2002, 8:105-123.
- [32] Richard D Boone. Light-fraction soil organic matter; Origin and contribution to net nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11):1459-1468.
- [33] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates[J]. *Advances in Soil Science*, 1992, 20:1-90.
- [34] Freibauer A, Mark D, Rounsevell A. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. *Geoderma*, 2004, 122:1-23.
- [35] Chan K Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management[J]. *Soil Use and Management*, 2001, 17(4):217-221.
- [36] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4):523-526.
- ZHU Zhi-jian, JIANG Pei-kun, XU Qiu-fang. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation[J]. *Forest Research*, 2006, 19(4):523-526.
- [37] Sollins P, Spycher G, Glassman C A. Net nitrogen mineralization from light and heavy-fraction forest soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1984, 16:31-37.
- [38] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机碳研究[J]. 生态学报, 2004, 24(1):1-8.
- YANG Yu-sheng, LIU Yan-li, CHEN Guang-shui, et, al. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1):1-8.
- [39] Whalen J K, Bottomley P J, Myrold D D. Carbon and nitrogen mineralization from light and heavy fraction addition to soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:1345-1352.