

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2016.01.005

# 川西亚高山云杉低效林林窗改造下土壤水溶性 有机碳的季节动态\*

潘业田<sup>1</sup>, 郝凯婕<sup>2</sup>, 张翠翠<sup>1</sup>, 李贤伟<sup>3</sup>, 王晓虹<sup>3</sup>, 范贇<sup>3</sup>

(1. 四川省林业调查规划院, 四川 成都 610081; 2. 山西省林业科学研究院, 山西 太原 030012;

3. 四川农业大学林学院, 四川 成都 611130)

**摘要:**本文分析了川西亚高山米亚罗林区典型云杉低效林经不同面积的林窗(50 m<sup>2</sup>, L1; 100 m<sup>2</sup>, L2; 150 m<sup>2</sup>, L3; 对照样地, CK)改造后土壤总有机碳和水溶性有机碳含量的变化。对4个样地的不同土层(分0~15 cm, 15 cm~30 cm两层)的土壤总有机碳和水溶性有机碳的变化进行了动态监测,并分析了土壤总有机碳和水溶性有机碳的季节变化及与其他活性碳和土壤温度的关系。结果表明:土壤总有机碳和水溶性有机碳的含量均是L2>L3>L1>CK,且土壤上层高于下层;在观测的四个季节内,上、下层土壤水溶性有机碳含量均是夏季最低,以后逐渐升高,100 m<sup>2</sup>林窗的碳含量最高。

**关键词:**亚高山地区;林窗;云杉人工林;土壤水溶性有机碳

中图分类号:S714 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2016)01-0027-06

## Seasonal Dynamics of Soil Water Soluble Organic Carbon in Forest Gaps of the Low Efficiency Spruce Plantation in the Subalpine Region of Western Sichuan

PAN Ye-tian<sup>1</sup> HAO Kai-jie<sup>2</sup> ZHANG Cui-cui<sup>1</sup> LI Xian-wei<sup>3</sup>  
WANG Xiao-hong<sup>3</sup> FAN Yun<sup>3</sup>

(1. Sichuan Forest Inventory and Plan Institute, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Shanxi Academy of Forestry Science, Taiyuan 030012, Shanxi, China;

3. Forestry College of Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

**Abstract:** In this paper, analysis was made of the content changes of the soil organic carbon and water soluble organic carbon through different gaps (50 square meters, L1; 100 square meters, L2; 150 square meters, L3; control plot, CK) in typical low-efficiency spruce forest gaps of Miyaluo forest area in Western Sichuan. Dynamic monitoring was conducted on changes in soil organic carbon and water soluble organic carbon in four plots in different soil layers (0~15 cm and 15 cm~30 cm layers), and analysis was made of seasonal variation of soil organic carbon and water soluble organic carbon and their relationship with other activated carbon and soil temperature. The results showed that total organic carbon and dissolved organic carbon content of the soil were L2>L3>L1>CK, and those of the upper layer of soil were higher than those of the lower layer. In four seasons observations, water-soluble organic carbon content in the upper and lower layer soil was the lowest in summer, then gradually increased, and the carbon content of 100 square meters of forest gap was the highest.

**Key words:** Subalpine region, Forest gap, Spruce plantation, Soil water soluble organic carbon

收稿日期:2015-10-13

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC09B05);四川省科技支撑计划重点项目(2010NZ0049)。

作者简介:潘业田(1987-),男,四川资中人,硕士学位,从事森林培育研究,四川林业勘察设计研究院,E-mail:284032169@qq.com。

土壤活性有机碳是土壤的重要组成部分,是表征土壤肥力的一个重要参数,其指标已经被用来评价退化生态系统中的恢复效果<sup>[1]</sup>。土壤中水溶性有机碳(Water-soluble Organic Carbon, WSOC)作为活性有机碳是土壤微生物可直接利用的有机物质,但只占土壤有机碳的很少部分,一般含量不超过 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[2]</sup>。土壤水溶性有机碳容易被土壤微生物分解<sup>[3]</sup>,它参与了土壤生物化学转化过程,又是土壤微生物生命活动的能源,对土壤养分的有效化也有着十分重要的作用<sup>[4~5]</sup>。因此研究土壤水溶性有机碳含量及其季节变化对评价森林土壤质量、土壤肥力和土壤碳库平衡具有重要意义。

川西米亚罗林区是长江上游森林的主体、长江流域重要的生态屏障、是全球气候变化的晴雨表,对维持区域小气候、涵养水源和水土保持等具有十分重要的意义。由于现有林分初植密度过大和抚育工作滞后,林分普遍长势衰弱,并且由单一的树种组成,层次结构单一,物种多样性低,土壤肥力退化,成了影响森林生态效益的发挥和阻碍森林生态系统向健康方向演替的瓶颈之一,这种结构不合理的林分极大地削弱了森林的生态功能。如何提高低效林的生态服务功能是全球性的生态问题,开展川西低效林改造,是提高川西地区的生态服务功能的关键,也是四川建设“长江上游生态屏障”的重要组成部分。

本文分析了川西米亚罗林区典型低效林经不同林窗改造后,土壤中的总有机碳和水溶性有机碳的季节变化,为衡量低效林改造的效益评价作一些初

步的探讨,为云杉人工林的合理经营提供理论依据。

## 1 研究区域概况

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省西部阿坝藏族、羌族自治州理县米亚罗林区,东经 $102^{\circ}48' \sim 103^{\circ}02'$ ,北纬 $31^{\circ}43' \sim 31^{\circ}47'$ ,属于青藏高原东南边缘的邓峡山脉东坡高山峡谷地带,处于岷江上游支流杂古脑河上游。研究区海拔 $2\ 400 \text{ m} \sim 4\ 400 \text{ m}$ ,地面坡度多在 $35^{\circ}$ 以上。气候受高原地形的决定性影响,属高山气候,年均温 $6^{\circ}\text{C} \sim 12^{\circ}\text{C}$ ,极端高温 $32^{\circ}\text{C}$ ,极端低温 $-16^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $1\ 200^{\circ}\text{C} \sim 1\ 400^{\circ}\text{C}$ ,常年无霜期 $200 \text{ d}$ 。总之,该区气候特点是气温年变幅不大,夏季湿润多雨,冬季寒冷干燥,属季风性山地气候。本研究区大致处于暗棕壤地带。

### 1.2 试验地简况

试验地选在川西亚高山米亚罗林区川西林业局 $283 \text{ km}$ 处,共 $12$ 小班,小班面积均为 $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。在实施林窗改造前,林分密度 $3\ 500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2} \sim 4\ 500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,郁闭度为 $0.9$ ,平均直径 $17 \text{ cm}$ ,平均树高 $10 \text{ m}$ ,林木生长不良,卫生状况极差,林下仅有少量草本植物生长,几乎无灌木,其生态功能处于退化状态,生产功能处于极低效状态。2005年,在试验地实施人工促进近自然林经营,每个林窗处理都做 $3$ 个重复,2009年对样地进行了调查,样地基本特征见表1,样地的基本理化性质见表2。

表1 样地基本特征

Tab. 1 General characteristic of the sampling plots

样地编号 No. of Sampling spot number	处理 Treatment	平均树高 Average height (m)	平均胸径 Average DBH (cm)	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Type of soil	土层厚 Thickness of soil (cm)
对照样地(CK)	不砍伐	12.54	19.00	3 190 ~ 3 210	暗棕壤	30 ~ 40
林窗1(L1)	$50 \text{ m}^2$ 林窗并补植桦木和新疆杨	13.28	21.60	3 190 ~ 3 210	暗棕壤	30 ~ 40
林窗2(L2)	$100 \text{ m}^2$ 林窗并补植桦木和新疆杨	13.76	20.41	3 190 ~ 3 210	暗棕壤	30 ~ 40
林窗3(L3)	$150 \text{ m}^2$ 林窗并补植桦木和新疆杨	13.45	21.43	3 190 ~ 3 210	暗棕壤	30 ~ 40

表2 样地基本理化性质

Tab. 2 Chemical and physical properties of soils in the sampling plots

样地编号 No. of Sampling spot	总有机碳 TOC ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	水溶性碳 WSOC ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	微生物量碳 SMBC ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	易氧化碳 ROC ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	颗粒碳 POC ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤温度 Soil temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH 值
对照样地(CK)	37.55	106.09	889.51	6.13	10.76	8.54	5.82
林窗1(L1)	41.92	119.64	958.51	7.11	8.55	7.38	6.17
林窗2(L2)	51.52	140.07	1093.53	8.86	15.64	7.79	5.86
林窗3(L3)	44.36	131.39	1012.07	10.26	12.72	8.29	5.48

注:样地理化性质为全年平均值。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与测试

在各个小班内,分别按蛇形选择 3 个有代表性地段设立采样区,采样区选好后,在每个采样区内进行分层采样(0~15 cm,15 cm~30 cm),采集 0~30 cm 土壤,因为几个样地土层深度不足 40 cm,因此,统一取样深度为 30 cm。土壤样品的收集采用挖土壤剖面法,每次取样是在每个样地相同的采样区进行的,即在前一个样点附近取样,尽量保持土壤的均匀性。最后将 3 个采样区采集到的同一土层土样混合作为一个样品带回室内。土壤带回实验室,分成两份,1 份鲜样去杂、过 2 mm 钢筛后贮藏于 4℃ 的冰箱内,用于测定水溶性有机碳、微生物生物量碳;另一份自然风干、去杂、过 0.15 mm 筛,用于测定总有机碳;每个指标的测定都做 3 个重复。

从 2009 年 4 月到 2009 年 12 月(整个生长季节)4 月(代表春季)、7 月(代表夏季)、9 月(代表秋季)、12 月(代表冬季)每月下旬各采 1 次样,一年共采样 4 次。

土壤总有机碳(Soil Total Organic Carbon, TOC)的测定采用重铬酸钾外加热法<sup>[6]</sup>;土壤水溶性有机碳(WSOC)的测定采用水提取法<sup>[7]</sup>;土壤微生物量碳(Soil Microbial Biomass Carbon, SMBC)的测定采用氯仿熏蒸 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取法<sup>[8]</sup>;土壤易氧化碳(Readily Oxidizable Carbon, ROC)采用 0.333 mmol·L<sup>-1</sup>的高锰酸钾氧化法<sup>[9]</sup>,土壤颗粒碳(Particulate Organic Carbon, POC)采用 5 g·L<sup>-1</sup>六偏磷酸钠分散法<sup>[10]</sup>;pH 值采用 pH 计测定。

在设置样地的同时,在各个样地地下 5 cm 处,埋设纽扣式温度计,由仪器自动记录土壤温度,在每次采样时读取温度数据。

### 2.2 数据处理与统计分析

试验数据分析采用 Office Excel 2003 和 SPSS16.0 统计软件,进行相关性(Pearson)分析和单因素方差(One - Way ANOVA)分析,不同处理之间多重比较采用 Duncan 新复极差法。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤总有机碳含量随季节的变化

CK、L1、L2、L3 4 个样地的上下层土壤总有机碳的季节变化趋势基本一致(图 1),均表现为夏季 >

春季 > 冬季 > 秋季;都是在夏季土壤总有机碳含量达到最高,秋季降到最低;而且土壤总有机碳含量随季节变化幅度比较大。

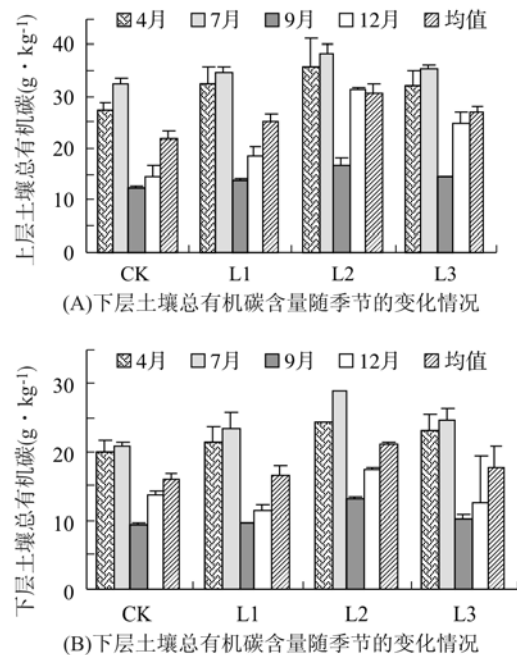


图 1 不同土层土壤总有机碳含量随季节的变化

Fig. 1 The TOC content change in different-depth soil along with the season

方差分析表明除了 L1 与 L3 之间在春、夏、秋 3 个季度差异不显著( $p > 0.05$ ),其余几个季度各个样地之间均是差异显著或极显著。L2 的总有机碳变幅最大,为  $29.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 67.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;其次是 L3,为  $24.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 59.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;L1,为  $23.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 58.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;CK 的总有机碳变幅最小,为  $21.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 53.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。整个生长季内,总有机碳的上下层总和是  $L2 > L3 > L1 > CK$ ,其中 L2 的总有机碳含量是 CK 的 1.37 倍。

### 3.2 土壤水溶性有机碳含量的季节变化

CK、L1、L2、L3 4 个样地的上下层土壤水溶性有机碳也均有明显的季节性变化,并且变化趋势是相似的(如图 2),夏秋季土壤水溶性有机碳含量较低,冬春季的土壤水溶性有机碳含量较高,即春季开始,水溶性有机碳含量逐渐降低,到夏季时降至最低,随后不断升高。

方差分析表明:土壤水溶性有机碳含量在春季:L1 与 L3 之间差异不显著( $p > 0.05$ ),L2 与 L3 差异显著( $p < 0.05$ ),其余各个季度 CK、L1、L2、L3 之间两两差异均极显著( $p < 0.01$ )。而且在各个季节土壤水溶性有机碳含量均表现为  $L2 > L3 > L1 > CK$ 。

其中 CK 的土壤水溶性有机碳含量的变幅最大,为  $66.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 152.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;其次是 L1,为  $82.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 162.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;L3 为  $91.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 163.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;L2 的变幅最小,为  $105.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 169.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而且在整个生长季内,土壤水溶性有机碳含量的上下层总和表现为  $L2 > L3 > L1 > CK$ 。其中 L2 的土壤水溶性有机碳含量是 CK 的 1.32 倍。

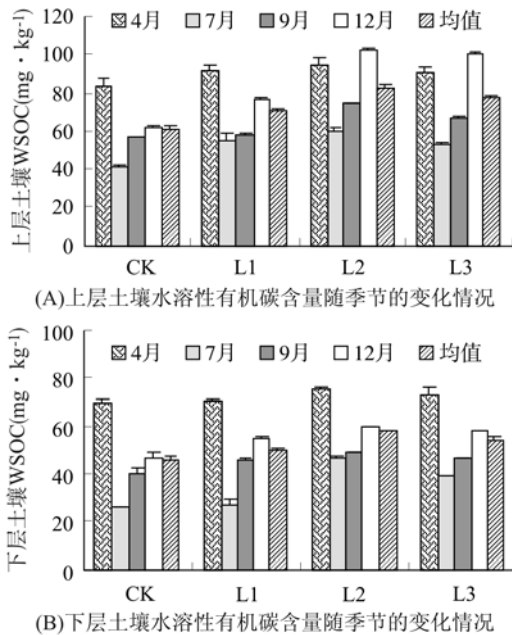


图2 不同土层土壤水溶性有机碳含量随季节的变化  
Fig. 2 The WSOC content change in different-depth soil along with the season

### 3.3 土壤水溶性有机碳占总有机碳的比例随季节的变化

土壤水溶性有机碳占总有机碳的比率比水溶性有机碳总量更能反映林窗改造对碳行为的影响结果。从图3可以看出,CK、L1、L2、L3等4个样地的上下层土壤水溶性有机碳占总有机碳的比率的季节变化均表现出相同的规律,春季开始,水溶性有机碳占总有机碳的比率逐渐降低,到夏季时降至最低,随

后不断升高(如图3)。

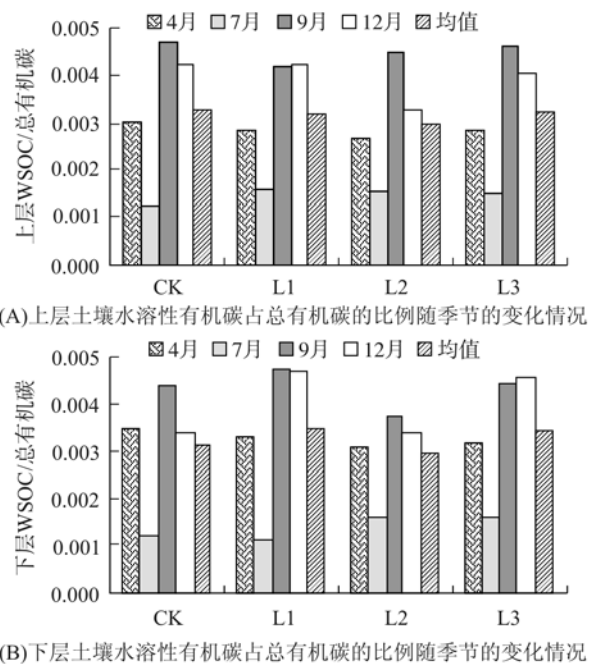


图3 不同土层土壤水溶性有机碳占总有机碳的比例随季节的变化

Fig. 3 The WSOC/TOC change in different-depth soil along with the season

方差分析表明,在整个生长季节内 CK、L1、L2、L3 的土壤水溶性有机碳占总有机碳的比率两两之间差异均是极显著 ( $p < 0.01$ )。其中 CK 的变幅最大,为  $0.0025 \sim 0.0090$ ;其次是 L1,变幅为  $0.0027 \sim 0.0089$ ;L3 的变幅为  $0.0031 \sim 0.0090$ ;L2 的变幅最小,为  $0.0031 \sim 0.0090$ 。而且在整个生长季节内,土壤水溶性有机碳占总有机碳的比率四个季节的平均值为  $L1 > L3 > CK > L2$ 。

### 3.4 云杉人工林土壤 TOC、WSOC、MBC、林窗面积、土壤温度之间的关系

如表3所示,林窗面积与土壤总有机碳含量是在 0.05 水平上相关,与土壤水溶性有机碳含量是极相关 ( $p < 0.01$ );温度与总有机碳、水溶性有机碳均是负的极相关 ( $p < 0.01$ )。

表3 总有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、颗粒碳、林窗面积及土壤 pH 值、温度之间的相关系数  
Tab. 3 Correlation coefficient among TOC、MBC、WSOC、Forest gaps' area and Soil temperatures

	总有机碳 TOC	水溶性有机碳 WSOC	微生物量碳 SMBC	易氧化碳 ROC	颗粒碳 POC	林窗面积 Forest gaps'area	土壤温度 Soil temperature
总有机碳	1	0.944 **	0.975 **	0.647 *	0.797 **	0.652 *	-0.827 **
水溶性碳		1	0.985 **	0.832 **	0.759 **	0.842 **	-0.750 **

\* Correlation is significant at the 0.05 level ( $p < 0.05$ ); \*\* Correlation is significant at the 0.01 level ( $p < 0.01$ )。

总有机碳与水溶性有机碳(WSOC)、微生物量碳(SMBC)、颗粒有机碳均极相关 ( $p < 0.01$ ),与易

氧化碳是 0.05 水平相关;水溶性有机碳(WSOC)与微生物量碳(SMBC)、易氧化碳、颗粒有机碳均是极

相关( $p < 0.01$ )。

#### 4 结论与讨论

在本研究中,整个生长季内,CK、L1、L2、L3 4个样地的土壤总有机碳、水溶性有机碳含量均是上层高于下层。不同土层总有机碳含量高低各不相同,这与何功秀等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。分析原因一方面可能是由于枯枝落叶在表层的积累和转化,促进了表土层有机质的积累,从而使上层土壤有机碳含量较下层高;随着土层深度的增加,土壤中空气含量、水分含量及土壤温度均降低,进而导致土壤微生物含量降低且微生物的新陈代谢活动减弱<sup>[12]</sup>,有机质消耗减少;另一方面有研究表明随着土层深度的增加,植物根系尤其是草本植物的根系分布减少<sup>[13~14]</sup>,而草本植物根系的残体是土壤有机质来源之一。这与姜培坤<sup>[15]</sup>以及张洁、姚宇卿<sup>[16]</sup>研究结果一致。

土壤活性有机碳的季节性动态变化是一个复杂过程,不同森林生态系统土壤活性有机碳的季节变化不同<sup>[17]</sup>。同一生态系统,即使气候条件相同,不同植被下土壤活性有机碳的季节变化也不相同<sup>[18]</sup>。土壤有机碳的形成和积累是个复杂的过程,受很多因素的影响,根系生物量和植物残体以及微生物为土壤有机碳的形成提供了物质来源,但不是唯一的来源<sup>[19]</sup>。同时,林地的土壤状况(土壤温湿度、土壤微生物、土壤养分、土壤结构等)也影响土壤有机质的分解,从而影响土壤有机碳含量。

春季到夏季,植物生长逐渐旺盛,云杉和林下植物的根系发育固定了更多的有机碳,使有机碳大量积累,所以春季和夏季土壤有机碳的含量较高;气温逐渐升高,降雨增加,适宜的水热条件,使得土壤微生物活性增加,处于活跃的新陈代谢状态,土壤微生物的周转速率提高,能耗加快,同时增加水溶性有机碳的生物降解和矿化量,大量的土壤微生物消耗水溶性有机碳,导致土壤水溶性有机碳含量下降<sup>[20]</sup>。

夏季到秋季,土壤的温度一直很高,土壤微生物活性持续增加,导致土壤有机质分解加速,且碳的消耗量增加<sup>[21]</sup>,所以土壤有机碳含量下降。到秋季微生物消耗水溶性碳的同时,林下枯落物和死亡草本增加,根系分泌物增加,又使得土壤水溶性有机碳含量增加<sup>[22]</sup>,此时土壤水溶性有机碳产生量大于消耗量,所以到秋季水溶性碳含量升高。

秋季到冬季,温度持续下降,植物生长停滞、林

下草本死亡、凋落物增多,促进了总有机碳和水溶性有机碳的积累,而且温度持续下降,微生物活性降低,使得水溶性有机碳的消耗减少,冬季土壤中积累的大量易利用组分,使得冬春季水溶性有机碳生物可利用性明显高于夏秋季<sup>[23~24]</sup>,所以总有机碳和水溶性有机碳含量升高。

本研究表明,整个生长季内,CK、L1、L2、L3 4个样地,温度与总有机碳、水溶性碳均相关( $p < 0.05$ ),说明温度对土壤有机碳的积累有显著的影响。

由于林窗面积不同使得不同的小班在根系生物量、凋落物、土壤生物、土壤温湿度等方面存在的空间差异,导致了土壤有机碳的含量产生了一定的差异。本研究中,土壤总有机碳、水溶性有机碳含量均与林窗面积相关( $p < 0.01$ )。整个生长季内均表现为,总有机碳的平均含量是  $L2 > L3 > L1 > CK$ ,说明林窗面积对土壤碳含量的影响比较大,而且面积是  $100 \text{ m}^2$  的林窗更有利于土壤有机碳的固存,在森林经营管理过程中优先借鉴和采用。

因此,可以看出,在气候和土壤等自然条件基本相同的情况下,林窗面积、土层深度、及土壤温度都会对土壤有机碳的含量产生影响。

#### 参考文献:

- [1] 周国模,姜培坤. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6):68~70.
- [2] MCGILL W B, HUNT H W, PHOENIX, et al. A model of the, dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils[C]. In: Clark FE and Ross wall T. eds., Terrestrial nitrogen eyeeksAI. Ecol Bull, Stoe khoum, 1981,33:49~115.
- [3] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic mater with cropping as measured by organic C fractions and  $^{13}\text{C}$  natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 156:399~402.
- [4] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fraction[J]. Soil Sci. Am. J., 1994, 58:1130~1139.
- [5] 徐秋芳,徐建明,姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):15~17.
- [6] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999:146~226.
- [7] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils; a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. Soil Biol Biochem, 2003, 35:1231~1243.
- [8] Li G, Zhang B, Li B. Effect of straw pretreatment on soil microbial biomass and respiration activity, Chin Jappcol, 2003, 14(12):2225~2228.
- [9] Blair G J, Lefroy RDB, Lisle L. Labile soil carbon fractions based

- on the degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Aus. J. Agric. Res. Ecol.*, 1995, 46: 1459 ~ 1466.
- [10] Cambardella CA, Elliott ET. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777 ~ 783.
- [11] 何功秀, 蔡洁, 胡孔飞. 桉木人工林根系——土壤复合系统养分含量的变化规律[J]. *浙江林业科技*, 2009, 29(2): 15 ~ 18.
- [12] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 35 ~ 38.
- [13] 李贤伟, 张健, 陈文德, 等. 三倍体毛白杨—黑麦草复合模式细根和草根分布与生长特征[J]. *草业科学*, 2005, 14(6): 73 ~ 78.
- [14] 王巧, 李贤伟, 杨渺, 等. 光皮桦木——扁穗牛鞭草复合模式细根草根生物量及空间分布[J]. *四川农业大学学报*, 2007, 25(3): 430 ~ 431.
- [15] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. *林业科学*, 2005, 41(10): 10 ~ 13.
- [16] 张洁, 姚宇卿, 金轲. 保护性耕作对坡耕地土壤微生物碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 127 ~ 129.
- [17] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G P, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2843 ~ 2851.
- [18] Liu M Q, Hu F, He Y Q, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 937 ~ 944.
- [19] 季志平, 苏印泉, 贺亮, 等. 秦岭北坡几种人工林根系及土壤有机碳剖面分布特征的研究[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(10): 2155 ~ 2158.
- [20] Kalbitz K, David S, Juliane S. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation[J]. *Soil Biol and Biochem*, 2003, 35: 1129 ~ 1142.
- [21] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 小叶樟湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(10): 1397 ~ 1402.
- [22] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils[J]. *Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 1061 ~ 1066.
- [23] Kaiser K, Guggenberger G, Haumaier L, et al. Seasonal variations in the chemical composition of dissolved organic matter in organic forest floor layer leachates of old-growth Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in north-eastern Bavaria, Germany[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 55: 103 ~ 143.
- [24] Hongve D. Production of dissolved organic carbon in forested catchments[J]. *J Hydrol*, 1999, 224: 91 ~ 99.

(上接第 69 页)

(2) 在播种时间上, 种子采收后从 8 月到 11 月播种的种子都能很好萌发, 其萌芽时间和萌芽率差异不大。推迟播种会丧失幼根生长的最佳温度时期, 从而不能为冬季低温解除上胚轴休眠创造条件, 不能正常出苗。

(3) 凤丹种子的生长喜欢疏松、肥沃土壤, 由试验可知, 在透水透气良好的沙土混合基质中, 种子发芽率和根的生长量明显高于原土和纯沙。在纯沙中, 由于土壤养分不足, 子叶能满足根的快速生长, 但芽的萌发较慢, 发芽率低。

(4) 凤丹种子用 40℃ 温水浸泡或用 200 mg · L<sup>-1</sup> 的 GA<sub>3</sub> 浸泡处理对发芽率影响的差异不显著。

#### 参考文献:

- [1] 喻衡. 牡丹[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999.
- [2] 李嘉珏, 张西方, 赵孝庆, 等. 中国牡丹[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2011.
- [3] 王雁. 牡丹生产栽培实用技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [4] 吴诗华, 江守和. 牡丹 芍药[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1997.
- [5] 李秀珍, 等. 不同处理对牡丹和芍药种子发根及发芽的影响[J]. *种子*, 2004, 23(3): 59 ~ 60.
- [6] 覃逸明, 等. 不同处理对凤丹种子萌发的影响[J]. *中国林业*, 2009, 1.
- [7] 成仿云. 低温与赤霉素处理对“凤丹”牡丹种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *园艺学报*, 2008, 35(4): 553 ~ 558.