

# 湘中丘陵区毛竹林土壤热水浸提有机碳的垂直分布与季节动态

漆良华<sup>1</sup> 艾文胜<sup>2</sup> 范少辉<sup>1</sup> 毛超<sup>1</sup> 孟勇<sup>2</sup> 杨明<sup>2</sup>

1. 国际竹藤中心, 北京 100102; 2. 湖南省林业科学院, 长沙 410004

**摘要** 以湘中丘陵区笋用(I)、笋材兼用(II)、材用(III)3种不同经营类型的毛竹林为研究对象,考察土壤热水浸提有机碳(hot water-extractable carbon, HWC)含量和储量的垂直分布、季节动态及其与土壤温度、湿度的关系。结果表明:笋用、笋材兼用和材用毛竹林0~20、20~40、40~60 cm土层土壤平均HWC含量分别为21.59~84.54、21.41~58.95、24.70~61.58 mg/kg,储量分别为0.14~0.53、0.14~0.41、0.15~0.37 t/hm<sup>2</sup>;在垂直分布上,不同类型毛竹林碳含量、碳储量随土壤深度增加而下降,0~20 cm土层是HWC的主要分布区;在季节动态上,不同类型毛竹林碳含量、碳储量均以1月最高,10月最低;在一定范围内,土壤温度上升、湿度增加将加速HWC的分解和矿化进程,HWC含量与土壤温度、湿度均呈现显著负相关性。土壤温度对HWC的影响符合三次多项式,湿度与HWC的回归关系符合生长模型。

**关键词** 毛竹; 土壤热水浸提有机碳; 垂直分布; 季节动态; 土壤温度; 土壤湿度

**中图分类号** Q 948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2013)06-0038-05

毛竹(*Phyllostachy edulis*)林合理经营不仅可以增加经济收益,也可促进固碳增汇,对适应全球气候变化具有重要贡献<sup>[1-3]</sup>。近年来,一些学者开展了毛竹林固碳能力、碳储量分配以及土壤有机碳库特征、变化等方面的研究<sup>[4-7]</sup>。土壤有机碳库作为毛竹林生态系统碳库的主体,其时空分布、动态变化及储量估算成为研究热点<sup>[8-9]</sup>。土壤热水浸提有机碳(hot water-extractable carbon, HWC)主要包括微生物、碳水化合物以及构成土壤其他活性有机碳的简单化合物,是土壤有机碳库中的活跃部分,可以作为森林土壤有机碳库变化的敏感指标<sup>[10]</sup>。湘中丘陵区是我国毛竹林集中分布的中心区域之一,有关其土壤碳库尤其是土壤热水浸提有机碳库的研究鲜见报道。笔者以该区域笋用、笋材兼用和材用毛竹林为研究对象,考察其土壤热水浸提有机碳含量和储量的垂直分布格局及季节动态变化规律,以期为区域毛竹林土壤有机碳库积累、演变以及调控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验点位于湖南省益阳市赫山区泥江口镇、新

市渡镇,地理位置112°30'E~112°43'E, 28°16'N~28°29'N。研究区多为丘陵地貌,海拔低于300 m,坡度5°~35°,属于雪峰山余脉。母岩主要以板岩为主,土壤为红壤,气候属中亚热带季风湿润气候,非常适宜毛竹林生长。

### 1.2 研究方法

1) 样地设置与调查。毛竹林经营根据立地条件、交通状况等差异设置不同经营目标,立地条件好的毛竹林以笋用经营为主,立地条件较差但交通相对方便的毛竹林以材用为主,笋材兼用毛竹林则介于两者之间。2009年10月选择具有典型性、代表性的笋用(I)、笋材兼用(II)和材用(III)毛竹林,各设置固定样地3个,共9个,样地面积为600 m<sup>2</sup>。在每个样地内开展每竹检尺和立地因子调查,样地基本情况见表1。

2) 土样采集与分析。分3层(0~20、20~40、40~60 cm)采集土壤样品,取各层混合土样1 kg左右,以测定土壤养分含量与土壤酶活性;环刀取原状土以测定土壤密度、孔隙度等物理水分特性;采集新鲜土样,置于4℃冰箱中保存,以测定土壤中真菌、

收稿日期: 2013-03-29

基金项目: “十二五”科技支撑项目(2012BAD23B04)和国际竹藤中心基本业务重点专项(1632008005)

漆良华, 博士, 副研究员。研究方向: 森林培育与森林生态学。E-mail: qilianghua2008@aliyun.com

通讯作者: 范少辉, 博士, 研究员。研究方向: 森林培育。E-mail: fansh@icbr.ac.cn

表 1 样地基本情况<sup>1)</sup>

Table 1 Basic information of sampling plots

类型 Type	坡位 Slope position	坡向 Slope exposure	坡度/ <sup>o</sup> Slope degree	海拔/m Elevation	郁闭度 Canopy density	立竹 度/株 Density	平均 胸径/cm DBH	总盖度/% Total coverage	乔层盖度/% Arbor layer coverage	灌层盖度/% Shrub layer coverage	草层盖度/% herbaceous layer coverage
I	下 Down slope	西北 Northwest	20	153	0.65	1 900	9.95	85	65	70	40
I	中 Middle slope	西 West	20	162	0.80	3 383	9.87	90	80	50	10
I	下 Down slope	东 East	24	160	0.60	2 150	8.16	70	60	80	10
II	下 Down slope	南 South	10	140	0.50	2 450	8.98	75	50	5	30
II	下 Down slope	东 East	25	126	0.80	2 650	9.16	95	80	60	10
II	下 Down slope	西 West	25	182	0.75	2 683	8.82	95	80	60	10
III	下 Down slope	西北 Northwest	30	175	0.70	1 983	8.76	85	70	65	35
III	中 Middle slope	东南 Southeast	25	135	0.80	3 067	9.61	85	80	15	5
III	中 Middle slope	东北 Northeast	35	150	0.60	2 150	8.72	80	60	60	10

1) I, II, III 分别表示毛竹笋用林、笋材兼用林、材用林。I, II, III means *Phyllostachy edulis* shoot utilizing stands, shoot and timber utilizing stands and timber utilizing, respectively.

细菌和放线菌的数量与生物量。土壤物理性质、养分含量及生物学特性测定结果参见文献[3,11-12]。

2009 年 10 月和 2010 年 1 月、4 月、7 月,分别采集不同季度土样,带回实验室分析测试不同经营类型毛竹林土壤热水浸提有机碳的含量。采集土壤同时,用土壤温湿度仪测定记载温度、湿度等土壤环境因子。土样用 100 °C 蒸馏水浸提,水土质量比为 2:1,恒温振荡 30 min(250 次/min)后,10 000 r/min 离心 10 min,再用 0.45 μm 滤膜抽滤,其滤液直接在岛津 TO-CVcpH 有机碳分析仪上测定土壤热水浸提有机碳(HWC)含量<sup>[13-14]</sup>。土壤热水浸提有机碳储量为土壤容重、土层厚度、采样面积与土壤热水浸提有机碳含量之积<sup>[5]</sup>。

3) 统计分析。进行方差分析(ANOVA)、LSD 多重比较、Pearson 相关性分析。选择线性模型、二次多项式、三次多项式、复合模型、对数模型、生长模型、“S”形曲线、指数模型、双曲线、幂指数模型以及 Logistic 模型等进行土壤热水浸提有机碳与土壤温湿度的曲线回归估计和多元线性回归,应用 SPSS、Excel 中的相关程序进行计算和分析。曲线回归估计和多元线性回归根据相关系数及显著性水平确定土壤热水浸提有机碳与土壤温湿度的最优方程。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤热水浸提有机碳含量

毛竹笋用林、笋材兼用林、材用林 0~60 cm 土层土壤 HWC 含量不同季节间变化范围为 10.68~160.99 mg/kg,0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤 HWC 平均含量分别为 21.59~84.54、21.41~58.95、24.70~61.58 mg/kg(表 2),且均以 1 月最高,10 月最低。0~20 cm 土层笋用林和材用林、20~40 cm 土层材用林、40~60 cm 土层笋材兼用林 1 月土壤 HWC 与其他季节的含量差异达显著水平( $P<0.1$ )。

随着土层剖面深度的下降,毛竹笋用林、笋材兼用林、材用林土壤 HWC 含量也随之下落,0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤 HWC 含量分别为 27.66~160.99、16.42~62.41、10.68~41.79 mg/kg,且毛竹林 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤 HWC 年均含量以笋用林最高,材用林次之,笋材兼用林最低,分别为 42.81、41.39、35.78 mg/kg,但差异未达显著水平( $P>0.1$ )。原因主要是毛竹笋用林采伐输出少,外源有机质输入和根系分泌物增加,直接导致溶解有机质来源的增加,使土壤中 HWC 含量升高。

表 2 土壤热水浸提有机碳含量、方差分析与多重比较<sup>1)</sup>Table 2 ANOVA and ANOVA-LSD of soil hot water-extractable carbon concentration in different *Phyllostachy edulis* forests

土层/cm Layer	类型 Type	HWC 含量/(mg/kg) HWC concentration				F	P
		1月 January	4月 April	7月 July	10月 October		
0~20	I	160.99 aA	27.66 bA	57.15 bA	34.55 bA	11.045 1	0.003 2***
	II	74.82 aA	41.87 aA	54.94 aA	37.11 aA	1.325 4	0.332 2
	III	95.61 aA	53.71 bA	66.77 bA	37.31 bA	3.629 3	0.064 3*
	F	2.938 9	2.308 9	0.241 3	0.051 2		
	P	0.128 9	0.180 4	0.792 9	0.950 5		
20~40	I	53.43 aA	23.90 aA	39.63 aA	19.23 aA	1.971 5	0.196 9
	II	50.24 aA	34.45 aA	31.26 aA	16.42 aA	1.254 3	0.353 1
	III	62.41 aA	28.36 bA	38.36 bA	21.15 bA	5.073 8	0.029 5**
	F	0.112 0	2.417 8	0.241 0	0.729 3		
	P	0.895 9	0.169 8	0.793 1	0.520 6		
40~60	I	39.19 aA	20.05 aA	26.91 aA	10.97 aA	2.174 0	0.169 0
	II	41.79 aA	12.38 bA	23.35 bA	10.68 bA	3.376 5	0.074 9*
	III	26.74 aA	14.34 aA	36.34 aA	15.63 aA	1.923 1	0.204 4
	F	0.995 8	2.365 4	0.611 0	1.210 3		
	P	0.423 2	0.174 8	0.573 4	0.361 8		

1) 同行不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 同行不同大写字母表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )。\*,  $P < 0.1$ ; \*\*,  $P < 0.05$ ; \*\*\*,  $P < 0.01$ , 下同。Different small or capital letters in the same row meant significant difference at 0.05 or 0.01 level, respectively. \*,  $P < 0.1$ ; \*\*,  $P < 0.05$ ; \*\*\*,  $P < 0.01$ . The same as below.

毛竹笋用林、笋材兼用林、材用林在不同季节土壤中(0~60 cm)HWC 平均含量占表土层(0~20 cm)的比例为 53%~86%, 表明不同经营目标毛竹林土壤 HWC 都存在明显表层富集现象, 植物根系的分布直接影响土壤中有机碳的垂直分布, 因为大量死根的腐解归还为土壤提供了丰富的碳源, 同时大量的地表枯落物也是表层土壤有机碳重要的碳源物质。

## 2.2 土壤热水浸提有机碳储量

由表 3 可知, 毛竹笋用林、笋材兼用林和材用林

在 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤 HWC 储量的季节动态变化范围分别为 0.14~0.53、0.14~0.41、0.15~0.37 t/hm<sup>2</sup>, 在 1 月份最高, 10 月最低, 储量排序为 1 月 > 7 月 > 4 月 > 10 月。毛竹笋用林、笋材兼用林和材用林 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤 HWC 年平均储量相差不大, 分别为 0.27、0.25、0.25 t/hm<sup>2</sup>。然而, 0~20 cm 土层 HWC 平均储量所占比例最大, 毛竹笋用林、笋材兼用林和材用林分别达 51.85%、44.00%、48.00%。

表 3 土壤热水浸提有机碳储量季节动态

Table 3 Storages of soil hot water-extractable carbon in different seasons

类型 Type	土层/cm Layers	1月 January		4月 April		7月 July		10月 October		平均碳储量/ (t/hm <sup>2</sup> ) Average storages
		碳储量/ (t/hm <sup>2</sup> ) Storages	比例/% Proportion	碳储量/ (t/hm <sup>2</sup> ) Storages	比例/% Proportion	碳储量/ (t/hm <sup>2</sup> ) Storages	比例/% Proportion	碳储量/ (t/hm <sup>2</sup> ) Storages	比例/% Proportion	
I	0~20	0.33	62.26	0.06	33.33	0.12	46.15	0.07	50.00	0.14
	20~40	0.11	20.76	0.05	27.78	0.08	30.77	0.04	28.57	0.07
	40~60	0.09	16.98	0.07	38.89	0.06	23.08	0.03	21.43	0.06
	合计 Total	0.53	100.00	0.18	100.00	0.26	100.00	0.14	100.00	0.27
II	0~20	0.15	36.59	0.09	45.00	0.11	44.00	0.07	50.00	0.11
	20~40	0.12	29.27	0.08	40.00	0.08	32.00	0.04	28.57	0.08
	40~60	0.14	34.14	0.03	15.00	0.06	24.00	0.03	21.43	0.06
	合计 Total	0.41	100.00	0.20	100.00	0.25	100.00	0.14	100.00	0.25
III	0~20	0.19	51.35	0.10	52.63	0.13	46.43	0.07	46.67	0.12
	20~40	0.12	32.43	0.03	15.79	0.08	28.57	0.05	33.33	0.07
	40~60	0.06	16.22	0.06	31.58	0.07	25.00	0.03	20.00	0.06
	合计 Total	0.37	100.00	0.19	100.00	0.28	100.00	0.15	100.00	0.25

### 2.3 土壤热水浸提有机碳与土壤温湿度的关系

不同类型毛竹林在 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤温度均以 7 月最高,4 月其次,10 月次之,1 月最低。土壤年平均温度为 18.0 °C,1 月平均温度最低,为 8.1 °C,7 月平均温度最高,为 28.1 °C,4 月、10 月平均温度分别为 19.3、16.6 °C。土壤湿度变化范围为 17.1%~26.2%,年平均湿度为 21.8%,全年土壤湿度变化幅度较小,4 月平均湿度最高,为 24.3%,1 月平均湿度最低,为 17.1%,7 月、10 月平均湿度分别为 21.6%、21.5%。

以热水浸提有机碳 HWC(y)为因变量,以土壤温度(T)、土壤湿度(H)为自变量,在相关性分析达

显著水平的基础上,构建土壤热水浸提有机碳与土壤温湿度的回归方程。热水浸提有机碳与土壤温度、土壤湿度均为负相关(表 4),相关系数分别为 0.215 1、0.230 3,经显著性检验,其相关性达较显著水平( $P < 0.1$ ),说明在一定范围内,土壤温度上升、湿度增加将加速 HWC 的分解和矿化进程,不利于土壤碳库的稳定性。

土壤湿度与土壤有机碳的回归方程拟合结果表明,温度与 HWC 的关系可用三次多项式进行拟合,湿度对 HWC 的影响可用生长模型模拟,而土壤温度、湿度两者的耦合作用对 HWC 的影响比较复杂,是非线性的。

表 4 热水浸提有机碳与土壤温度、湿度的回归关系

Table 4 Pearson correlation coefficients and regression equations between soil temperatures, humidities and soil microbial biomass carbons

土壤温湿度	回归方程	F	P	相关系数
Soil temperature and humidity	Regression equations			Correlation coefficients
温度 Temperature	$y = 181.599 0 - 22.956 8x + 1.055 4x^2 - 0.014 8x^3$	9.580 7	0.000 0	-0.215 1*
湿度 Humidity	$y = e^{4.763 7 - 0.060 4x}$	3.527 9	0.065 4	-0.230 3*

## 3 讨论

土壤热水浸提有机碳是土壤有机碳库稳定性的重要表征参数,其空间分布及动态变化与土壤环境因子密切相关,地上植被类型及干扰被认为是影响土壤热水浸提有机碳的重要因子<sup>[15-16]</sup>。湘中丘陵区 3 种不同经营类型毛竹林因经营目标的差异,土壤热水浸提有机碳含量、碳储量垂直分布与季节动态也存在较大差异。

在垂直分布上,毛竹林土壤热水浸提有机碳含量、碳储量均表现出随土壤深度增加而下降的规律,这主要是随着土层加深,土层温度降低和营养物质供给减少的影响,这与杜满义等<sup>[8]</sup>、朱志建等<sup>[17]</sup>研究结果相似,表明浅层土壤是毛竹林土壤热水浸提有机碳的主要分布区。在季节动态上,毛竹林土壤热水浸提有机碳含量和碳储量均以 1 月最高,10 月最低,这主要是由于热水浸提有机碳含量主要来源于光合产物(枯枝落叶、根系分泌物、腐烂的根)、表层有机物质的淋溶或分解和土壤有机质的微生物过程产生的溶解有机质,1 月土壤温湿度较低,不利于有机质的溶解转化。

土壤温度、湿度是影响土壤有机碳库的重要环境因子之一<sup>[18]</sup>。土壤温度上升,湿度增加,将加速土壤热水浸提有机碳这一活性碳库的分解和矿化、含量及储量降低,湘中丘陵区毛竹林土壤温度、湿度

与 HWC 之间的负相关性也印证了这一点。土壤温度与 HWC 的关系可用三次多项式进行拟合,湿度对 HWC 的影响可用生长模型模拟,而土壤温度、湿度两者的耦合作用对 HWC 的影响为非线性的,其影响过程与机制有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] PRENTICE I C, FARQUHAR G D, FASHAM M J R, et al. The carbon cycle and atmospheric CO<sub>2</sub>[M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [2] PODWOJEWski P, POULENARD J, NGUYET M L, et al. Climate and vegetation determine soil organic matter status in an alpine inner-tropical soil catena in the Fan Si Pan Mountain, Vietnam [J]. Catena, 2011, 87(2): 226-239.
- [3] 漆良华, 孟勇, 岳祥华, 等. 湘中丘陵区不同经营目标对毛竹林土壤养分库的影响[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(5): 584-588.
- [4] 王兵, 魏文俊, 邢兆凯, 等. 中国竹林生态系统的碳储量[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1680-1684.
- [5] 漆良华, 刘广路, 范少辉, 等. 不同抚育措施对闽西毛竹林碳密度、碳储量与碳格局的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1482-1488.
- [6] 李正才, 杨校生, 蔡晓郡, 等. 竹林培育对生态系统碳储量的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 24-28.
- [7] 周国模, 姜培坤, 徐秋芳. 竹林生态系统中碳的固定与转化[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [8] 杜满义, 范少辉, 漆良华, 等. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 198-202.

- [9] 漆良华,杜满义,范少辉,等.湘中丘陵区毛竹纯林、竹杉混交林土壤有机碳库动态[J].生态学杂志,2012,31(12):3038-3043.
- [10] 周国模,徐建明,吴家森,等.毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库的演变[J].林业科学,2006,42(6):124-128.
- [11] 孟勇,漆良华,艾文胜,等.湘中丘陵区不同经营目标下毛竹林土壤物理性质及健康评价[J].东北林业大学学报,2013,41(2):60-64.
- [12] 漆良华,杜满义,范少辉,等.湘中丘陵区不同经营目标毛竹林土壤微生物数量与酶活性[J].华中农业大学学报,2013,32(2):25-29.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978.
- [14] 中华人民共和国林业行业标准.森林土壤分析方法[Z].北京:国家林业局,1999.
- [15] MCGILL W B, CANNON K R, ROBERTSON J A, et al. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton after 50 years of cropping to two rotations[J]. Canada Journal of Soil Science, 1986, 66(1): 1-19.
- [16] LIU J, JIANG P K, WANG H L, et al. Seasonal soil CO<sub>2</sub> efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(6): 1131-1137.
- [17] 朱志建,姜培坤,徐秋芳.不同森林植被下土壤热水浸提有机碳和易氧化碳的比较[J].林业科学研究,2006,19(4):523-526.
- [18] KUZYAKOV Y, SCHNECKENBERGER K. Review of estimation of plant rhizodeposition and their contribution to soil organic matter formation[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2004, 50(1): 115-132.

## Vertical distribution and seasonal dynamics of soil hot water-extractable carbon of *Phyllostachy edulis* forests under different managing patterns in the hilly region of central Hunan, southern China

QI Liang-hua<sup>1</sup> AI Wen-sheng<sup>2</sup> FAN Shao-hui<sup>1</sup> MAO Chao<sup>1</sup> MENG Yong<sup>2</sup> YANG Ming<sup>2</sup>

1. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China;

2. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China

**Abstract** Based on plot data of shoot utilizing (I), shoot and timber utilizing (II) and timber utilizing (III) of *Phyllostachy edulis* forests located at the hilly region in central Hunan, studies were carried out to investigate the vertical distribution, seasonal dynamics of soil hot water-extractable carbon (HWC) concentrations and storages in these three typical managing target patterns and its relationship with soil temperature and moisture. The results showed that the average HWC concentrations of type I, II and III were 21.59-84.54, 21.41-58.95 and 24.70-61.58 mg/kg, respectively. The average HWC storages were 0.14-0.53, 0.14-0.41 and 0.15-0.37 t/hm<sup>2</sup>, respectively. HWC concentrations and storages decreased with the increase of soil depth in three forests, moreover, the soil layers of 0-20 cm were the main distribution of HWC. For seasonal dynamics, HWC concentrations and storages were the highest in January and the lowest in October. HWC was negatively correlated with the soil temperature and moisture. The relationship could be described well by cubic polynomial and growth curve. It was obvious to some extent for HWC decomposition and mineralization aggravating with the rise of soil temperature and moisture.

**Key words** *Phyllostachy edulis*; soil hot water-extractable carbon; vertical distribution; seasonal dynamics; soil temperature; soil moisture

(责任编辑:陆文昌)