

不同生长时期丝栗栲林下土壤有机碳含量及矿化特征

巩晟萱¹, 王丹², 戴伟¹, 安晓娟³, 刘浩宇¹

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 北京松山国家级自然保护区管理处, 北京 102115; 3. 内蒙古乌海市农业产业化指导服务中心, 内蒙古 乌海 016012)

摘要: [目的] 分析土壤活性碳含量变化以及土壤有机碳的矿化特征, 为今后深入了解掌握丝栗栲林下土壤有机碳的分解转化过程及其固碳潜力提供理论依据。[方法] 基于野外取样调查以及室内分析得出的有机碳数据, 利用双指数模型法, 在 Origin 8.6 软件支持下拟合出活性碳含量以及有机碳矿化过程及强度的时空变化特征。[结果] 土壤有机碳含量和活性碳含量均呈现明显的表层富集现象以及 4 月较低, 8 月最高, 之后逐月降低的时间变化特点。土壤有机碳矿化强度虽然表现出与土壤有机碳和活性碳含量相同的垂直剖面特征和时间变化趋势, 但其时间变化特征与土壤活性碳含量变化更为一致, 只有 0—20 cm 表层土壤表现出显著性变化。[结论] 土壤有机碳矿化强度与微生物、温度和活性碳含量均达到极显著相关水平, 但其时间变化特征与土壤活性碳含量变化更为一致, 二者的关系更密切。

关键词: 丝栗栲林; 土壤有机碳; 土壤有机活性碳; 矿化过程; 双指数模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0059-05

中图分类号: S714.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.077

Content and Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon Under *Castanopsis Fargesii* Forests in Different Growth Periods

GONG Shengxuan¹, WANG Dan², DAI Wei¹, AN Xiaojuan³, LIU Haoyu¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083,

China; 2. Beijing Songshan National Nature Reserve, Beijing 102115, China;

3. Inner Mongolia Wuhai Agriculture Industrialization Guidance And Service Center, Wuhai, Hubei 016012, China)

Abstract: [Objective] To analyze mineralization features and content of soil organic carbon in order to provide theoretical basis for future research on decomposition process and carbon sequestration capacity of soil under *Castanopsis fargesii* forests. [Methods] We obtained soil organic carbon data based on field investigation and laboratory analysis. The Origin 8.6 software was employed in the study. A double exponential model was used to investigate the spatial and temporal variation in activated carbon content and organic carbon mineralization intensity. [Results] Both of the soil organic carbon and activated carbon showed obvious surface enrichment, and this surface enrichment increased from the relative low in April to the highest in August, and then decreased gradually. The characteristics of vertical section and temporal variation in soil organic carbon mineralization intensity were similar to that in soil organic carbon and active carbon, and significant changes only occurred on topsoil at 0—20 cm. [Conclusion] Soil organic carbon mineralization intensity is significantly influenced by microbe, temperature and carbon content, and this influence is more significant in soil carbon content.

Keywords: *Castanopsis fargesii* forests; soil organic carbon; active carbon; mineralization process; double exponential equation

随着全球气温的持续上升,碳源和碳汇逐渐成为人们日渐关注的重点,森林土壤作为陆地生态系统中重要的碳库,在调节碳平衡、减缓大气中二氧化碳等温室气体浓度上升方面具有不可替代的作用^[1]。

矿化过程是分析土壤有机碳变化的有效方法之一,国内外很多学者以此为基础展开了一系列的相关研究^[2-15]。如 Jones^[10] 通过研究分析了土壤活性有机碳含量及变化特征;Giardina 等^[11],Fang 等^[12] 研

收稿日期:2014-12-09

修回日期:2014-12-18

资助项目:科技部林业公益性行为科研专项项目“江西大岗山森林生态系统健康维护与经营技术研究”(200804022E);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A0702);国家自然科学基金资助项目(30590381);江西大岗山国家级森林生态站项目

第一作者:巩晟萱(1990—),女(汉族),山西省榆次市人,硕士,研究方向为资源再利用。E-mail:13020014386@163.com。

通信作者:戴伟(1964—),男(汉族),北京市,博士,副教授,硕士生导师,主要从事森林土壤研究。E-mail:daiw163@163.com。

究了温度变化对土壤有机碳矿化的影响。Hopkins 等^[13]研究了土壤有机碳含量对矿化强度的作用。

为了进一步研究土壤有机碳的动态过程, Lixia YANG 等^[14]利用双指数方程有效的拟合预测了中国不同森林带土壤有机碳矿化的变化规律。庞欢等^[15]也利用双指数方程比较了中国亚热带地区不同马尾松林分类型下土壤有机碳的矿化特点, 并从根系、地表凋落物和土壤微生物等角度分析了矿化过程的差异。

丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)林是中国亚热带地区天然林的主要建群种之一, 也是影响该地区森林土壤碳循环的重要因素。但迄今为止, 针对该林型土壤有机碳含量及其矿化过程的研究还十分缺乏。

为此, 本文以中国江西大岗山天然丝栗栲林土壤为研究对象, 在比较不同生长时期林下土壤有机碳含量变化的基础上, 利用双指数方程拟合, 探讨土壤活性碳含量变化以及土壤有机碳的矿化特征, 以期为今后深入了解掌握丝栗栲林下土壤有机碳的分解转化

过程及其固碳潜力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究区位于江西省大岗山国家级森林生态站, 地理位置 $114^{\circ}30'—114^{\circ}45'E$, $27^{\circ}30'—27^{\circ}50'N$, 属亚热带季风气候, 气候特征高温多雨, 年平均降水量 $1\ 076—1\ 472\text{ mm}$, 成土母质主要为残积形母质和坡积形母质, 土壤类型为高岭弱发育湿润老成土, 土壤湿度大, 土质疏松, 凋落物来源丰富, 腐殖质层深度较厚。样地概况见表 1。其他树种和林下植被主要包括: 赤楠(*Syzygium buxifolium*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、绒楠(*Machilus velutina*)、鼠刺(*Itea chinensis*)、荚蒾(*Viburnum dilatatum*)、大青叶(*Elatostema macintyreii*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、苔草(*Carex tristachya*)、肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)等。

表 1 研究样地概况

| 森林类型 | 平均海拔/m | 优势树种 | 平均林龄/a | 平均树高/m | 平均胸径/cm | 郁闭度/% |
|------|--------|------|--------|--------|---------|-------|
| 丝栗栲林 | 275 | 丝栗栲 | 45 | 23 | 25 | 80 |

1.2 样地布设与土壤样品采集

研究区内共设 3 块样地, 每块样地内另设 3 块 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准地, 分别于 2012 年 4, 6, 8, 10 和 12 月利用“S”形采样法, 分层定点采集 0—10, 10—20, 20—40, 40—60 和 60—100 cm 的土壤混合样品, 根据《森林土壤分析方法》风干处理后, 备用。

1.3 测定方法

土壤有机碳含量: 重铬酸钾容量法—外加热法; 土壤微生物含量: 磷脂脂肪酸 (PLFA) 生物标记法^[16]; 土壤有机碳矿化过程中 CO_2 累积释放量: 室内恒温培养、碱液吸收法^[24], 具体操作步骤为称取过 2mm 的风干土 100 g 放于培养瓶底部, 调节土壤含水量为田间持水量的 60%, 在 2°C 条件下避光预培养一周后, 将盛有 25 mL, 0.4 mol/L 的 NaOH 的吸收瓶置于培养瓶内用于吸收土壤呼吸产生的 CO_2 , 同时设置空白对照, 在 28°C 条件下避光培养, 分别在培养后的第 1, 4, 6, 8, 12, 14, 24, 34, 44, 54, 65, 75, 86 和 96 d 用 0.4 mol/L 的 HCl 滴定, 测定 CO_2 释放量; 温度的测定: 分别在土层 25, 35, 50, 80 cm 处布设自动测温仪(U22—001), 测定土壤温度的时间变化。土壤活性碳含量: Boylehe Paul 双指数方程^[17]拟合获得。

1.4 数据处理

数据利用 SPSS 17.0 进行方差分析, 并用 F 检验 ($p < 0.05$) 分析数据的差异性; 土壤有机碳矿化过程的拟合采用 Origin 8.6 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同时期土壤有机碳含量特征

各时期土壤有机碳含量都表现出随土壤深度的增加而降低的变化特征, 0—10 cm 含量变化范围为 $15.32—24.81\text{ g/kg}$, 与下层土壤达到显著差异 ($p < 0.05$), 呈现出明显的表聚现象, 但其下各层变化不明显, 表现出逐层过渡的层间变化(表 2)。

不同时期同层土壤比较发现(表 2), 各层土壤有机碳含量变化趋势相同, 都表现出 4 月最低, 8 月最高, 10 和 12 月又降低, 全年呈现出先升高后降低的总体变化趋势, 但不同时期同层土壤有机碳含量间的差异性并没有达到显著水平。

表 2 2012 年不同时期土壤有机碳含量特征 g/kg

| 土层深度/cm | 4 月 | 6 月 | 8 月 | 10 月 | 12 月 |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0—10 | 15.32 ^{Aa} | 23.93 ^{Aa} | 24.81 ^{Aa} | 20.71 ^{Aab} | 19.86 ^{Aab} |
| 10—20 | 10.93 ^{Ba} | 11.39 ^{Ba} | 13.96 ^{Ba} | 9.80 ^{Bab} | 10.27 ^{Ba} |
| 20—40 | 8.01 ^{Ca} | 7.04 ^{BCa} | 10.80 ^{BCa} | 7.80 ^{Ba} | 8.06 ^{BCa} |
| 40—60 | 6.18 ^{Ca} | 5.78 ^{Ca} | 7.67 ^{CDa} | 6.01 ^{Ba} | 4.85 ^{CDa} |
| 60—100 | 4.66 ^{Ca} | 4.62 ^{Ca} | 4.83 ^{Da} | 4.24 ^{Bb} | 3.60 ^{De} |

注: a, b, c 表示同一土层不同月份有机碳含量差异水平 ($p < 0.05$); A, B, C 表示同一月份不同土层有机碳含量差异水平 ($p < 0.05$)。

2.2 土壤有机碳矿化特征

利用双指数方程对土壤有机碳矿化过程中 CO_2 的累计释放量拟合结果可以发现, 实测值和拟合值间

的相关系数(R^2)达到 0.94~0.98(表 3),表现出很好的拟合效果(图 1)。

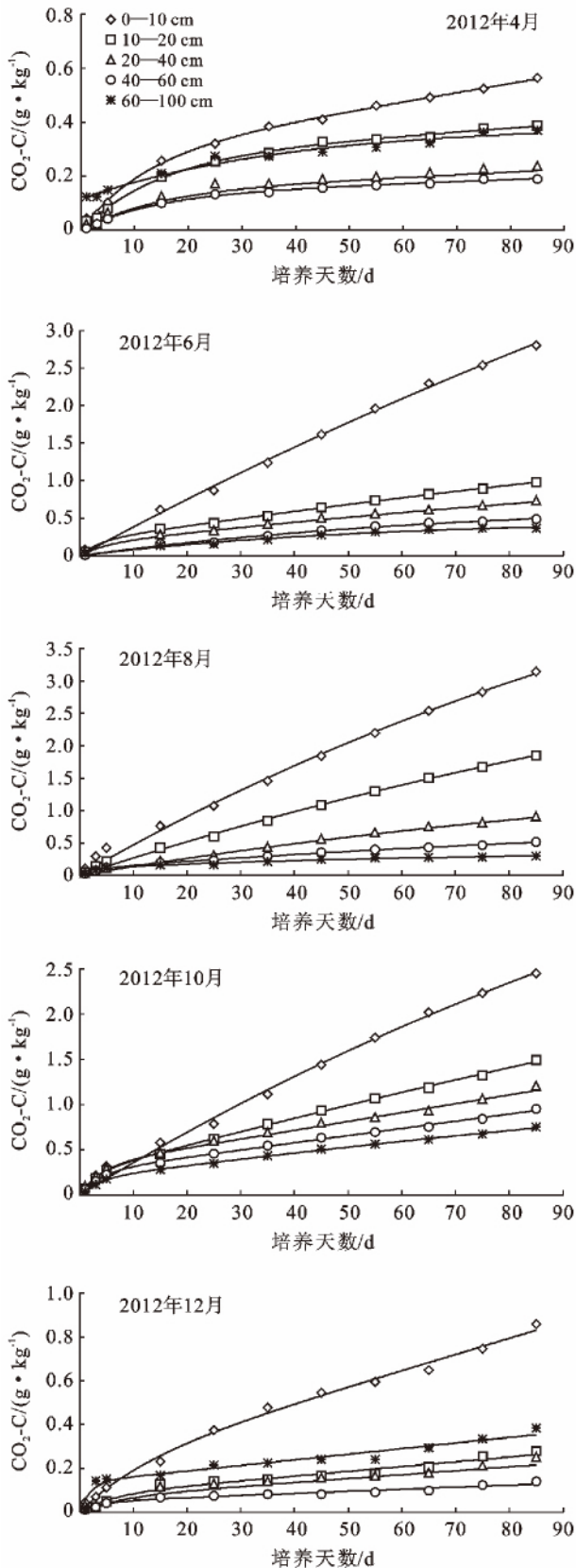


图 1 土壤剖面各层有机碳矿化过程双指数方程拟合曲线

土壤有机碳矿化强度表现出与有机碳含量相同的剖面垂直变化趋势,即,0—10 cm 土层中矿化累积量最高,变化范围为 0.59~3.11g/kg,8 月份土壤的矿化强度表现尤为明显,与各层土壤都达到显著性差异水平。

不同时期同层土壤有机碳矿化强度比较发现(图 1,表 3),4 月份各层土壤矿化强度处于全年最低水平,CO₂ 累积释放量仅为 0.59~0.15 g/kg,6 月份 0—100 cm 范围内土壤有机碳矿化强度显著增加。8 月份各层土壤矿化强度虽然表现出继续增加的趋势,达到全年最高,但与 6 月同层土壤相比,只有 0—20 cm 土壤矿化强度达到显著水平,而 20—100 cm 土壤增幅不大。10 月份各层土壤有机碳矿化强度与 8 月同层相比出现不同幅度降低,其中,0—20 cm 达到显著水平,但 20 cm 以下土壤降幅不大,差异不显著。进入 12 月后,土壤有机碳矿化强度继续降低,同样表现出 0—20 cm 降幅显著,而其下各层土壤差异不显著的变化特点。

表 3 土壤有机碳矿化特征

| 生长月份 | 深度/cm | C/(g·kg ⁻¹) | C ₀ /(g·kg ⁻¹) | R ² |
|------|--------|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 4 月 | 0—10 | 0.59 ^{Ad} | 2.47 ^{Ac} | 0.96 |
| | 10—20 | 0.42 ^{ABc} | 1.64 ^{Ac} | 0.97 |
| | 20—40 | 0.33 ^{BCb} | 1.04 ^{Bc} | 0.96 |
| | 40—60 | 0.28 ^{BCb} | 0.73 ^{Bb} | 0.97 |
| | 60—100 | 0.15 ^{Cb} | 0.36 ^{Bb} | 0.98 |
| 6 月 | 0—10 | 2.87 ^{Ab} | 13.13 ^{Ab} | 0.98 |
| | 10—20 | 1.39 ^{Bb} | 7.31 ^{Bb} | 0.95 |
| | 20—40 | 1.02 ^{BCa} | 4.36 ^{Ca} | 0.95 |
| | 40—60 | 0.83 ^{CDa} | 1.97 ^{Ca} | 0.96 |
| | 60—100 | 0.44 ^{Da} | 1.09 ^{Ca} | 0.97 |
| 8 月 | 0—10 | 3.11 ^{Aa} | 14.22 ^{Aa} | 0.98 |
| | 10—20 | 1.79 ^{Ba} | 11.26 ^{Ba} | 0.96 |
| | 20—40 | 0.98 ^{Ca} | 6.26 ^{Ca} | 0.97 |
| | 40—60 | 0.63 ^{Dab} | 2.15 ^{Ca} | 0.96 |
| | 60—100 | 0.22 ^{Eab} | 1.43 ^{Ca} | 0.95 |
| 10 月 | 0—10 | 1.83 ^{Ab} | 4.56 ^{Ac} | 0.95 |
| | 10—20 | 1.16 ^{Bb} | 3.99 ^{Ac} | 0.96 |
| | 20—40 | 0.90 ^{BCa} | 3.85 ^{Anb} | 0.97 |
| | 40—60 | 0.55 ^{CDab} | 1.02 ^{Bab} | 0.96 |
| | 60—100 | 0.31 ^{Dab} | 0.81 ^{Bab} | 0.98 |
| 12 月 | 0—10 | 1.26 ^{Ac} | 2.66 ^{Ac} | 0.96 |
| | 10—20 | 0.54 ^{Bc} | 2.37 ^{Ac} | 0.97 |
| | 20—40 | 0.35 ^{Bb} | 1.72 ^{Ac} | 0.96 |
| | 40—60 | 0.41 ^{Bb} | 0.82 ^{Bb} | 0.95 |
| | 60—100 | 0.29 ^{Bab} | 0.58 ^{Bb} | 0.94 |

注:C表示矿化 96 d 时 CO₂-C 累积释放量;C₀表示土壤活性碳含量;R²:拟合曲线相关系数;a, b, c 表示同一土层不同月份 C, C₀ 差异水平($p < 0.05$);A, B, C 表示同一月份不同土层 C, C₀ 差异水平($p < 0.05$)。

2.3 不同时期土壤活性有机碳含量变化特征

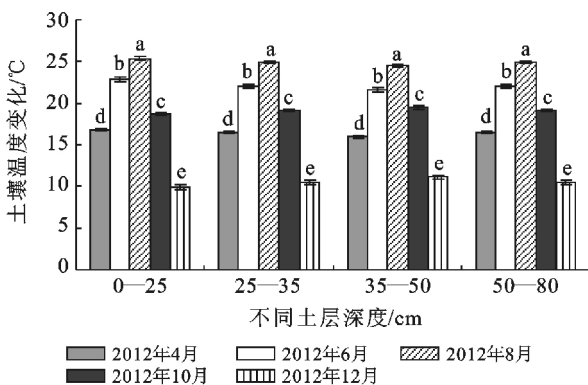
拟合获得的土壤活性碳含量比较发现,土壤活性碳含量表现出与有机碳含量相同的剖面垂直变化趋势,即,0—10 cm 土层中活性碳含量最高,变化范围为 2.47~14.22 g/kg,与下层土壤达到显著性差异水平,而 20 cm 以下逐层降低,变化不明显。不同时期同层土壤活性碳含量也呈现出 4 月份含量低,6 月份增加,8 月份达到全年最高值,之后逐月降低的时间变化特点(表 2—3)。进一步比较发现,土壤矿化强度(C)和土壤活性碳含量(C_o)在剖面垂直变化和时间的变化上都表现出极为相似的含量变化趋势和差异特征(表 3)。

3 结果

3.1 土壤有机碳和活性碳含量的变化特征

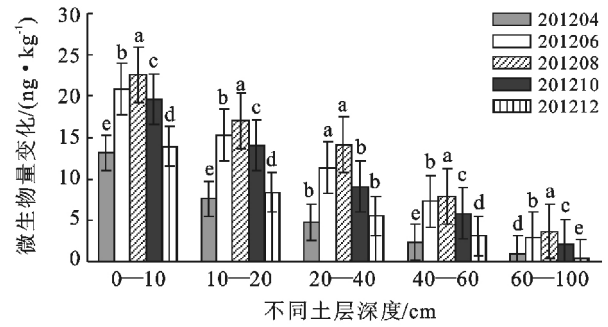
凋落物分解、腐殖化过程以及微生物活动大多发生在土壤表层区域,其活动强度以及碳源输入数量随着土层深度的增加而减弱,因此导致土壤有机碳含量和活性碳含量均明显呈现出表层富集现象。

丝栗栲属亚热带常绿阔叶林,凋落物量较少,加之研究地区年均温较高(图 2),微生物对凋落物的分解强烈,不利于土壤有机碳的积累,虽然不同时期各层土壤有机碳含量表现出一定规律性的增、减变化,但差异并不明显。与土壤有机碳相比,活性碳具有稳定性差、易氧化和易矿化等特征,陆昕等人也指出,土壤活性碳对温度具有高度敏感性,具有明显的季节差异^[18]。因此表现出对温度和微生物活动变化更为强烈的敏感性。在 4—8 和 8—12 月两个时期,随着温度的上升和降低,微生物活动的增强和减弱(图 2—3),各层土壤活性碳含量都出现不同幅度的变化,但由于凋落物数量、微生物的主要活动区域以及碳源向下层输入数量等方面的限制,形成 0—20 cm 表层土壤中活性碳数量出现明显的时间差异,而 20—100 cm 土壤差异并不明显的总体变化特点。



注:a, b, c 代表同一土层不同月份间温度的差异水平($p < 0.05$)

图 2 不同时期各层土壤温度变化(°C)



注:a, b, c 代表同一土层不同月份间土壤微生物量的差异水平($p < 0.05$)

图 3 不同时期各层土壤微生物量变化(ng/g)

3.2 土壤有机碳矿化强度的变化特征

不同时期各层土壤有机碳矿化强度都表现出随着土壤深度增加而降低的垂直剖面特征以及先升高后降低的时间变化趋势(图 1, 表 3)。由于土壤有机碳是微生物矿化的底物,而活性有机碳也是影响矿化强度的重要因素,因此,三者时空变化上都表现出一定的相似性,但显著性变化分析结果表明,土壤有机碳矿化强度和土壤活性碳含量的时空变化更为一致(表 2—3)。土壤凋落物量经过 2011 年秋季和 2012 年冬季的累积,在 2012 年 4 月达到全年的相对高值,4 月—8 月间由于季节性变化使各层土壤温度升高(图 2),导致土壤微生物及酶的活性增强,新陈代谢速率加快,促进了凋落物分解,土壤活性碳源得以不断补充,各层土壤矿化强度不断增加,其中 0—20 cm 土壤由于所受影响更为强烈,土壤活性碳数量和矿化强度增加尤为明显,但进入 10 月后,一方面随着温度下降,微生物活动明显减弱,同时经过 4—8 月的强烈分解,土壤活性碳含量减少,土壤有机碳矿化强度相应地也出现降低,这种变化同样在 0—20 cm 土壤中表现最为强烈。相关分析也表明,土壤矿化强度同土壤中活性碳含量、微生物量以及温度都具有很好的相关性(表 4),其中,与活性碳含量和微生物量的相关系数分别为 0.802, 0.861,表明在影响土壤矿化强度的众多因子中,微生物和活性碳含量的作用更重要。

表 4 土壤有机碳矿化和有机碳、活性碳、温度、微生物的相关性

| | 矿化碳 | 微生物 | 温度 | 活性碳 |
|-----|---------|---------|---------|-----|
| 矿化碳 | 1 | | | |
| 微生物 | 0.861** | 1 | | |
| 温度 | 0.320** | 0.397** | 1 | |
| 活性碳 | 0.802** | 0.837** | 0.494** | 1 |

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

4 结论

(1) 不同生长时期的土壤剖面有机碳和活性碳含量均表现出随土层加深而降低的趋势,0—10 cm 有机碳含量与下层均达到显著性差异($p < 0.05$),表现出明显的表层富集现象。

(2) 各层土壤有机碳和活性碳含量均表现为4月较低,之后开始增加,8月最高,随着生长时期变化又逐月降低的特点。

(3) 不同生长时期各土层有机碳具有相似的矿化特征。即矿化初期 $\text{CO}_2 - \text{C}$ 累积量增幅较大,而到了中、后期矿化曲线逐渐趋于平缓, $\text{CO}_2 - \text{C}$ 累积量增幅减小;垂直土壤剖面0—10 cm 土壤有机碳矿化强度明显高于下层,且都达到显著性差异($p < 0.05$)。

(4) 土壤有机碳矿化强度与微生物、温度和活性碳含量均达到极显著相关水平,但其时间变化特征与土壤活性碳含量变化更为一致,二者的关系更密切。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 冯朝阳,吕世海,高吉喜,等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J]. 北京林业大学学报,2008,30(2):20-26.
- [3] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究[J]. 北京林业大学学报,2009,31(5):19-24.
- [4] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报,2004,41(5):687-699.
- [5] 孙维侠,史学正,于东升,等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究[J]. 土壤学报,2004,41(2):298-300.
- [6] 王海燕,雷相东,张会儒,等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J]. 北京林业大学学报,2009,31(3):11-16.
- [7] 王清奎,汪思龙,冯宗炜. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较[J]. 北京林业大学学报,2006,28(5):1-6.
- [8] 徐秋芳,姜培坤,沈泉. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究[J]. 北京林业大学学报,2005,27(2):18-22.
- [9] 张伟,王克林,陈洪松,等. 典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究[J]. 土壤学报,2012,49(3):601-606.
- [10] Jones C A. Estimation of an active fraction of soil nitrogen [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1984,15(1):23-32.
- [11] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. Nature, 2000,404(6780):858-860.
- [12] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001,33(2):155-165.
- [13] Hopkins D W, Sparrow A D, Elberling B, et al. Carbon, nitrogen and temperature controls on microbial activity in soils from an Antarctic dry valley[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006,38(10):3130-3140.
- [14] Yang Lixia, Pan Jianjun, Yuan Shaofeng. Predicting dynamics of soil organic carbon mineralization with a double exponential model in different forest belts of China[J]. Journal of Forestry Research, 2006,17(1):39-43.
- [15] Pang Huan, Dai Wei, Wang Bing. Organic carbon content and mineralization characteristics of soil in a subtropical Pinus massoniana forest[J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 2013,5(12):1363-1369.
- [16] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Haggblom M. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil[J]. Ecology, 2002,83(11):3152-3166.
- [17] Boyle M, Paul E A. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage-sludge[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989,53(1):99-103.
- [18] 陆昕,孙龙,黄海清. 森林土壤活性有机碳影响因素[J]. 森林工程, 2013,29(1):9-14.