

浙西北丘陵地区次生林与杉木林土壤水溶性有机碳季节动态*

刘荣杰 李正才** 王斌 吴亚丛 程彩芳 马少杰 格日乐图

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

摘要 为了解浙江省西北部丘陵地区森林土壤水溶性有机碳含量及动态规律,以达成熟林状态的次生林和杉木林为对象,分别对其春、夏、秋、冬4个季节的0~10、10~20 cm 土层水溶性有机碳含量进行了研究。结果表明:1)0~10和10~20 cm 土层,次生林与杉木林水溶性有机碳含量没有显著差异;2)次生林和杉木林土壤水溶性有机碳含量季节动态基本一致,均表现为冬季>春季>秋季>夏季;3)0~10和10~20 cm 土层次生林与杉木林水溶性有机碳含量与土壤温度、降水量均呈显著负相关,与土壤湿度相关性不显著,与凋落物量呈正相关,且在0~10 cm 土层显著。

关键词 水溶性有机碳; 季节动态; 生态因子

中图分类号 S714 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)6-1385-06

Seasonal dynamics of soil water-soluble organic carbon in secondary forests and Chinese fir plantations in hilly region of northwest Zhejiang Province, East China. LIU Rong-jie, LI Zheng-cai **, WANG Bin, WU Ya-cong, CHENG Cai-fang, MA Shao-jie, GERI Le-tu (*Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1385-1390.

Abstract: In order to understand the content and seasonal dynamics of forest soil water-soluble organic carbon (WSOC) in the hilly region of northwest Zhejiang Province, the secondary forests and Chinese fir plantations were chosen as the test objects to study the WSOC content in 0-10 cm and 10-20 cm soil layers in four seasons. No significant differences were observed in the WSOC content in 0-10 cm and 10-20 cm soil layers between the secondary forests and Chinese fir plantations. The seasonal dynamics of soil WSOC in the secondary forests and Chinese fir plantations had the same trend, and followed the order of winter > spring > autumn > summer. The WSOC content in 0-10 cm and 10-20 cm soil layers in the secondary forests and Chinese fir plantations had significant negative correlations with soil temperature and precipitation, less correlation with soil moisture content, and positive correlation with litter biomass (especially for the WSOC content in 0-10 cm soil layer).

Key words: water-soluble organic carbon; seasonal dynamics; ecological factor.

土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分,其微小的变化都将可能导致大气圈 CO₂ 的浓度发生重大变化 (Eswarran *et al.*, 1993), 从而影响全球气候变化。土壤活性有机碳是指在一定条件下,具有一定溶解性,不稳定,易氧化、分解,易矿化,并

且其形态和空间位置对植物、微生物来说活性比较高的那一部分土壤碳素 (沈宏等, 1999)。虽然土壤活性有机碳只占土壤总有机碳的较小部分,但它能够在土壤全碳变化之前反映人为管理措施和环境变化所引起的土壤的微小变化 (Blair *et al.*, 1995), 对土壤碳库平衡和土壤肥力保持具有重要意义,因此,土壤活性有机碳的季节动态成为当前气候变化研究中的一个热点问题 (Watson *et al.*, 2000)。

水溶性有机碳 (WSOC) 指通过 0.45 μm 筛孔且

* 中国林科院亚热带林业研究所基本科研业务费重点项目 (RISF6152)、浙江省重点科技创新团队项目 (2010R50030) 和浙江省自然科学基金项目 (LY12C03012) 资助。

** 通讯作者 E-mail: lizccaf@126.com

收稿日期: 2012-12-18 接受日期: 2013-03-05

能溶解于水的不同大小和结构的有机分子混合物 (Flessa *et al.*, 2000), 作为表征土壤活性有机碳的指标之一, 水溶性有机碳是土壤有机碳最活跃的重要组成部分。近年来, 国内外一些学者对水溶性有机碳的季节动态进行了一些研究, 但由于土壤活性有机碳库组成的复杂性及影响因素的多样性, 研究结论不尽一致, 王连峰等 (2002)、Zhang 等 (2005) 和汪伟等 (2008) 研究发现, 水溶性有机碳冬季含量最高, 秋季次之, 春夏最低, 而 Campbell 等 (1999) 研究表明, 水溶性有机碳含量季节动态表现为春夏季节高于秋冬季节。目前, 关于土壤活性碳库的各种形态、动态过程及调控机理等研究仍十分薄弱 (Haynes *et al.*, 2000)。本文以浙江省西北部丘陵地区达到成熟林状态的次生林和杉木林为研究对象, 通过对水溶性有机碳含量、季节动态及控制因子的分析, 为该地区土壤活性有机碳含量及季节动态变化规律的研究提供科学依据。全面理解土壤活性有机碳的动态过程及其关键控制因子, 对于正确评估土壤有机碳的变化方向和速率以及正确评估全球碳循环, 从而准确地预测气候变化以及制定应对气候变化的策略和措施具有重要的意义 (周莉等, 2005)。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于浙江省富阳市 (119°56'E—120°02'E, 30°03'N—30°06'N), 该区属北亚热带季风气候, 雨量充沛, 气候温和, 年均气温 16.2 °C, 年均降水量 1464 mm, 无霜期 237 d。土壤为发育于石英、长石砂岩的微酸性红壤。该地区历史上为森林地带, 顶级群落是北亚热带常绿-落叶阔叶林, 由于过去对木材、薪炭需求量的增加以及农业活动的发展, 本地区天然原始林大多已遭到破坏, 森林被砍伐转化为次生林、农业用地和人工林等, 现存次生林主要以壳斗科 (Fagaceae)、樟科 (Lauraceae) 植物为主, 人工主要栽培杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、毛竹 *Phyllostachys pubescens*、马尾松 (*Pinus massoniana*) 等。

表 1 次生林和杉木林基本情况及土壤部分理化性质

Table 1 Forest characteristics and soil properties of Chinese fir plantations and secondary forests

林分类型	林分特征					土壤 (0~10 cm) 理化性质				
	平均树高 (m)	平均胸径 (cm)	立木密度 (株·hm ⁻²)	郁闭度	林分年龄 (a)	年凋落物量 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总有机碳 (g·kg ⁻¹)	全氮 (g·kg ⁻¹)	有效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)
次生林	15.5	13.4	510	0.8	44	3.20	43.44	2.63	2.05	87.62
杉木林	16.0	16.2	1560	0.9	33	3.05	31.98	2.13	1.76	75.20

试验样地杉木林是通过皆伐次生林改造而来, 人工造林时间为 1980 年冬, 初植密度为 2 m×2 m, 2 种林分类型均已达到成熟林状态。样地基本情况及表层土壤基本理化性质见表 1。

1.2 研究方法

在研究区内确定杉木林样地 5 个, 同时选取与之立地条件基本相似、有可比性的次生林样地 5 个 (次生林的海拔、坡向、坡度、成土母质和环境因子与杉木林基本一致), 每块样地面积为 20 m×20 m。取样时间分别为 2011 年 8 月 (夏)、2011 年 11 月 (秋)、2012 年 1 月 (冬)、2012 年 4 月 (春)。研究地区 2011 年 6 月至 2012 年 5 月月平均气温和降雨量的动态变化见图 1。具体采样方法为: 每次取样在每个样地上, 采用“S”形布设方法, 布设 5 个点, 除去枯枝落叶层后, 用 5 cm 内径的土钻分按 0~10、10~20 cm 2 个层次采集土壤样品, 然后将每个样地内同一层次的土样进行混合, 按四分法取土带回实验室, 去杂、过 2 mm 筛后鲜样用自封袋密封放入 4 °C 下保存。

水溶性有机碳的测定方法 (Liang *et al.*, 1997): 称鲜土 8 g, 水土比为 5:1, 25 °C 下用蒸馏水浸提 30 min, 离心 10 min (6000 r·min⁻¹), 上清液用 0.45 μm 滤膜抽滤, 滤液用岛津 TOC-Vcph 有机碳分析仪

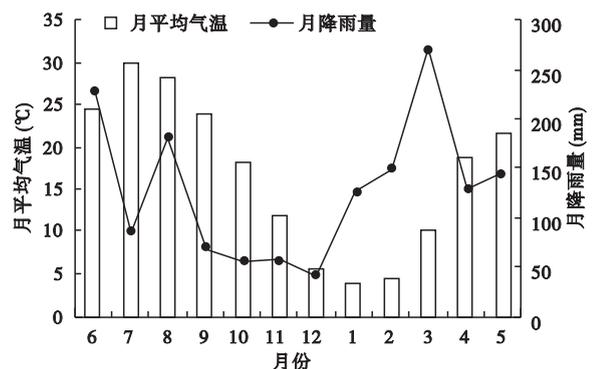


图 1 研究地区 2011 年 6 月至 2012 年 5 月月平均气温和总降雨量的动态变化

Fig. 1 Monthly changes of air temperature and rainfall in the studied sites from June 2011 to May 2012

直接测定。土壤温度和湿度采用 ECH₂O 探头 (Decagon Device, USA), 测定观测点土层 5 cm 处的温度和含水量, 每半小时测定一次数据。

1.3 分析方法

应用 EXCEL 和 SPSS 16.0 软件对实验数据进行处理分析, 采用 *T* 检验方法进行两样本均数的比较, 相关性分析采用双尾检验。

2 结果与分析

2.1 次生林和杉木林土壤水溶性有机碳含量

结果表明(表 2), 在 0~10 和 10~20 cm 土层, 次生林与杉木林土壤水溶性有机碳含量差异均不显著。同一林分类型 0~10 与 10~20 cm 土层水溶性有机碳含量没有显著差异。

2.2 水溶性有机碳季节动态

从图 2 可以看出, 在 0~10 cm 土层, 次生林水

表 2 次生林和杉木林不同土层水溶性有机碳年平均含量 (mg · kg⁻¹)

Table 2 Annual average concentration of WSOC in different soil layers of Chinese fir plantations and secondary forests

土层厚度 (cm)	次生林	杉木林
0~10	76.46±5.82	69.93±3.96
10~20	69.90±4.41	64.51±3.63

数值为平均值±标准差。

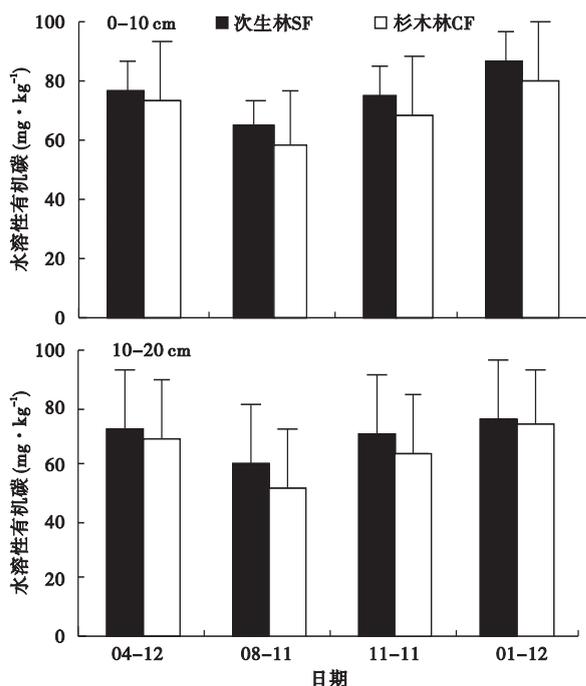


图 2 次生林和杉木林不同土层水溶性有机碳季节动态
Fig. 2 Seasonal changes of WSOC in different soil layers of Chinese fir plantations and secondary forests

表 3 水溶性有机碳季节变化与主要生态因子之间的相关关系

Table 3 Correlations between seasonal changes and main ecological factors of WSOC

土层 (cm)	指标	土壤温度	土壤湿度	降雨量	凋落物量
0~10	水溶性有机碳	-0.366 *	-0.360	-0.667 *	0.352 *
10~20	水溶性有机碳	-0.407 *	-0.311	-0.585 *	0.183

* *P*<0.05。

溶性有机碳含量在冬季达到最大值, 为 85.78 mg · kg⁻¹, 夏季最低, 含量为 64.99 mg · kg⁻¹, 具体表现为冬季>春季>秋季>夏季。夏季与其他季节水溶性有机碳含量的差异均达到显著或者极显著水平, 春季和秋季差异不显著; 杉木林在 0~10 cm 土层水溶性有机碳的季节动态变化规律与次生林保持一致, 为冬季>春季>秋季>夏季, 冬季和春季水溶性有机碳含量显著高于秋季和夏季, 夏季水溶性有机碳含量最低, 且显著低于其他季节。在 10~20 cm 土层, 次生林和杉木林水溶性有机碳含量季节动态均表现出与 0~10 cm 土层一样的变化规律, 均为冬季>春季>秋季>夏季, 除夏季与其他 3 个季节水溶性有机碳含量差异达到极显著外, 2 个林分间其他各个季节水溶性有机碳含量相互间差异均不显著, 同一林分土壤随着土层的加深, 微生物活动减弱, 水溶性有机碳的季节波动幅度减小。

2.3 水溶性有机碳季节变化与土壤温度等主要生态因子的相关关系

从表 3 可以看出, 在 0~10、10~20 cm 土层水溶性有机碳含量与土壤温度和降雨量均显著负相关, 与土壤湿度相关性不显著。在 0~10 cm 土层, 水溶性有机碳含量与凋落物量呈显著正相关; 在 10~20 cm 土层, 水溶性有机碳含量与凋落物量相关性不显著。

3 讨论

3.1 次生林和杉木林水溶性有机碳含量比较

在 0~10 cm 土层, 次生林水溶性有机碳含量高于杉木林。这是因为土地利用方式发生变化后, 森林植被类型随之改变, 从而导致土壤有机碳库的差异。一方面炼山、皆伐等人为干扰导致杉木林土壤有机质大量减少 (闫恩荣等, 2007); 另一方面, 土地利用变化引起凋落物种类、数量减少 (本研究次生林与杉木林年凋落物数量差异不显著, 而样地调查时, 次生林林地地表现存凋落物数量为 5.59 t · hm⁻², 远高于杉木林林分地表凋落物数量 3.3

$t \cdot \text{hm}^{-2}$,且差异显著),质量下降以及林地生物多样性降低(张剑等,2009)。在10~20 cm土层,次生林和杉木林土壤水溶性有机碳含量差异不显著,这主要与动植物残体在土壤中的分布有关(贾宇平等,2004)。同一林分类型,0~10 cm土层水溶性有机碳的含量均高于10~20 cm土层,这是因为林分的枯枝落叶层每年通过淋失、分解等过程向矿质土壤层提供大量有机碳和养分,林分表层土壤有相对较多的根系分布,并能吸收部分的植物凋落物的分解物,成为土壤水溶性有机碳的重要来源(徐侠等,2009),而底层土壤有机碳得不到充分的补充,因此,随着土层深度的增加,土壤总有机碳含量降低,水溶性有机碳含量下降,土壤活性有机碳含量趋向处于一个稳定的状态(Six *et al.*,1999)。

3.2 水溶性有机碳季节动态变化

次生林和杉木林土壤水溶性有机碳含量季节动态基本一致,冬季水溶性有机碳含量显著高于夏、春、秋3个季节,夏季水溶性有机碳含量最低,与其他各个季节的差异性均达到显著水平,具体表现为冬季>春季>秋季>夏季。土壤水溶性有机碳是由相对较简单的有机化合物组成,冬季植物生长减缓或停止,微生物活动减弱,水溶性有机碳矿化作用减弱,水溶性有机碳的消耗量降低,同时,冬季林分内大量凋落物微生物分解不彻底,土壤中简单积累有机物较多。Schimel和Clein(2006)研究表明,冬季死亡的微生物残体能释放出大量的水溶性有机碳。夏季适宜的水热条件导致微生物对水溶性有机碳的消耗增加,同时矿化作用加强(王清奎等,2007),另外,夏季降雨丰富,降水量的增加造成表土水溶性有机碳大量淋溶、迁移(Qualls *et al.*,2000),因此水溶性有机碳含量值处于较低的水平。春季和秋季水溶性有机碳含量差异不显著,这可能与春季和秋季土壤温湿度相对接近从而导致水溶性有机碳的产生和消耗差异不显著有一定关系。土壤水溶性有机碳含量的季节变化常表现为不同的模式,Evans等(1996)研究认为,水溶性有机碳含量的高峰在全年都可以产生。本研究中,水溶性有机碳含量呈冬高夏低型,且含量差异显著,与徐秋芳(2003)研究结论基本一致。张剑(2009)、Tipping(1999)和Guggenberger等(1994)研究认为,夏季水溶性有机碳含量高于冬季;Zhou等(2006)发现水溶性有机碳含量在秋季最高,而Dosskey和Petersch(1997)却未发现土壤水溶性有机碳含量的季节变化。总之,由

于气候条件、立地条件及土壤理化性质等的差异,水溶性有机碳含量呈现多种季节变化模式。

3.3 水溶性有机碳含量与主要生态因子的相关关系

在土壤有机碳的累积过程中,气候因子(如气温、降水等)起主导作用,一方面影响输入土壤的有机碳量,另一方面,影响土壤微生物对有机碳的分解和转化(Davidson *et al.*,2000)。水溶性有机碳含量与土壤温度呈显著负相关,与土壤湿度呈负相关(相关性不显著)。Hishia等(2004)认为,土壤温度和湿度主要通过影响土壤微生物活性影响水溶性有机碳的含量,Chen等(2005)认为,土壤湿度和温度对土壤微生物量的季节波动均有一定影响。随着土壤温度的升高,土壤微生物活性加强,能直接作为土壤微生物碳源的水溶性有机碳被大量消耗,同时矿化作用加强,水溶性有机碳的产生量小于消耗量(陈珊等,1995)。各季节土壤湿度的不同造成土壤微生物活性的差异,从而土壤微生物对水溶性有机碳的消耗也不一样,导致水溶性有机碳含量出现季节变化。水溶性有机碳与土壤湿度的相关性不显著可能与部分水溶性有机碳随下渗水的迁移以及土壤吸附作用有关。Zhang等(2005)研究发现,水溶性有机碳动态变化受干湿度、温度、特殊的立地条件等因素的影响,另外,这些环境生态因子也可能同时起作用,作用机理较为复杂,这可能是水溶性有机碳与土壤温度、湿度相关系数较低的原因之一。土壤水溶性有机碳含量与降水量呈显著负相关,这是因为降雨量的增加,导致水溶性有机碳淋溶、淋失作用加强,从而水溶性有机碳含量较低。在0~10 cm土层,林分凋落物量与水溶性有机碳呈显著正相关。森林的枯枝落叶层使表层土壤具有较高的养分浓度和较好的水分条件,为植物细根向表土层聚集提供了良好的条件(Hendrick & Pregitzer,1996),而凋落物和根系分泌物经微生物的分解,成为土壤活性有机碳的重要来源。

Qualls等(2000)在对落叶林水溶性有机碳的研究认为,土壤活性有机碳最大净增加发生于枯枝落叶层,新的凋落物对土壤活性有机碳的含量及动态具有显著影响(张金波等,2005)。Park等(2002)研究认为,凋落物的淋洗是产生土壤水溶性有机质的主要途径。Delprat等(1997)研究表明,土壤的大部分水溶性有机质主要来源于老的土壤腐殖质,而Currie和Aber(1997)对土壤活性有机碳的淋溶过程

的模拟研究表明,土壤腐殖质对淋溶液中土壤活性有机碳的通量没有贡献。汪伟等(2008)研究认为,水溶性有机碳的分解是其季节变化的主要原因。Moore(1998)发现,由于土壤对 DOM 的吸附使土壤 DOM 免受降解、淋失,土壤粘粒含量高的土壤其水溶性有机碳的吸附量也高。此外,土壤 pH、C/N 等可能通过影响土壤微生物的活性而影响水溶性有机碳的含量及季节动态(Godde *et al.*, 1996; Kaiser *et al.*, 1996)。因此,水溶性有机碳含量及季节动态除了与土壤温度、湿度、降雨量及凋落物等生态因子有关,可能还受土壤理化性质等其他因子的影响。由于土壤碳库组成的复杂性及水溶性有机碳影响因子的多样性,水溶性有机碳库动态过程及调控机理还有待于进一步研究。

参考文献

陈 珊, 张常钟, 刘东波, 等. 1995. 东北羊草草原土壤微生物生物量的季节变化及其与土壤生境的关系. *生态学报*, **15**(1): 91-94.

贾宇平, 苏志珠, 段建南. 2004. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异. *水土保持学报*, **18**(1): 31-34.

汪 伟, 杨玉盛, 陈光水, 等. 2008. 林土壤可溶性有机碳的剖面分布及季节变化. *生态学杂志*, **7**(6): 924-928.

沈 宏, 曹志洪, 胡正义. 1999. 土壤活性碳的表征及其生态意义. *生态学杂志*, **18**(3): 32-38.

王连峰, 潘根兴, 石盛莉, 等. 2002. 酸沉降影响下庐山森林生态系统土壤溶液溶解有机碳分布. *植物营养与肥料学报*, **8**(1): 29-34.

王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 2007. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响. *生态学杂志*, **26**(12): 1918-1923.

汪 伟, 杨玉盛, 陈光水, 等. 2008. 罗浮栲天然林土壤可溶性有机碳的剖面分布及季节变化. *生态学杂志*, **27**(6): 924-928.

徐 侠, 权 伟, 汪家社, 等. 2009. 武夷山不同海拔植被带土壤活性有机碳的季节变化. *南京林业大学学报(自然科学版)*, **33**(3): 55-59.

徐秋芳. 2003. 植被土壤活性有机碳库的研究(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.

闫恩荣, 王希华, 陈小勇. 2007. 浙江天童地区常绿阔叶林退化对土壤养分库和碳库的影响. *生态学报*, **27**(4): 1646-1655.

张 剑, 汪思龙, 王清奎. 2009. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化. *中国生态农业学报*, **17**(1): 41-47.

周 莉, 李保国, 周广胜. 2005. 土壤有机碳的主导影响因素及其研究进展. *地球科学进展*, **20**(1): 99-105.

张金波, 宋长春, 杨文燕. 2005. 小叶章湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析. *环境科学学报*, **25**(10): 1397-1402.

Blair GJ, Lefroyr DB, Lisle L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, **46**: 1459-1466.

Campbell CA, Biederbeck VO, Wen G, *et al.* 1999. Seasonal trends in selected soil biochemical attributes: Effects of crop rotation in the semiarid prairie. *Canadian Journal of Soil Science*, **79**: 73-84.

Chen TH, Chiu CY, Tian GL. 2005. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in coastal sand dune forest. *Pedobiologia*, **49**: 645-653.

Currie WS, Aber JD. 1997. Modeling leaching as a decomposition process in humid montane forests. *Ecology*, **78**: 1844-1860.

Davidson EA, Trumbore SE, Amundson R. 2000. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, **408**: 789-790.

Delprat L, Chassin P, Lineres M, *et al.* 1997. Characterization of dissolved organic carbon in cleared forest soils converted to maize cultivation. *European Journal of Agronomy*, **7**: 201-210.

Dosskey MG, Pertsch PM. 1997. Transport of dissolved organic matter through a sandy forest soil. *Soil Science Society of America Journal*, **61**: 920-927.

Eswarran H, Van Den Berg EV, Reich P. 1993. Organic carbon in soil of the world. *Soil Science Society of America Journal*, **57**: 192-194.

Evans CD, Davies TD, Wigington PJ, *et al.* 1996. Use of factor analysis to investigation processes controlling the chemical composition of four streams in the Adirondack Mountains. *Journal of Hydrology*, **185**: 297-316.

Flessa H, Ludwig G, Heil B, *et al.* 2000. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term maize experiment in Halle, Germany, determined by ¹³C natural abundance. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **163**: 157-163.

Godde M, David MB, Christ MJ, *et al.* 1996. Carbon mobilization from the forest floor under red spruce in the north-eastern USA. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**: 1181-1189.

Guggenberger G, Glaser B, Zech W. 1994. Heavy metal binding by hydrophobic and hydrophilic dissolved organic fractions in a Spodosol A and B horizon. *Water, Air, and Soil Pollution*, **72**: 111-127.

Haynes RJ. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**: 211-219.

Hendrick RL, Pregitzer KS. 1996. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forest. *Journal of Ecology*, **84**: 167-176.

Hishia T, Hirobeb M, Tatenoa R, *et al.* 2004. Spatial and temporal patterns of water-extractable organic carbon (WEOC) of surface mineral soil in a cool temperate forest ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 1731-1737.

Kaiser K, Guggenberger G, Zech W. 1996. Sorption of DOM

- and DOM fractions to forest soils. *Geoderma*, **74**: 281–303.
- Liang BC, Mackenzie AF, Schnitzer M, *et al.* 1997. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, **26**: 88–94.
- Moore TR. 1998. Dissolved Organic Carbon: Sources, Sinks, and Fluxes and Role in the Soil Carbon Cycle. Florida: CRC Press.
- Park JH, Kalbitz K, Matzner E. 2002. Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor. *Soil Biology and Biochemistry*, **34**: 813–822.
- Qualls RG, Haines BL, Swank WT, *et al.* 2000. Soluble organic and inorganic nutrient fluxes in clear cut and mature deciduous forests. *Soil Science Society of America Journal*, **64**: 1068–1077.
- Schimel JP, Clein JS. 1996. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**: 1061–1066.
- Six J, Elliott ET, Paustian K, *et al.* 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, **62**: 1367–1377.
- Tipping E, Woof C, Rigg E, *et al.* 1999. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. *Environment International*, **25**: 83–95.
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, *et al.* 2000. Land Use, Land Use Change, and Forestry: A Special Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zhou GM, Xu JM, Jiang PK. 2006. Effect of management practices on seasonal dynamics of organic carbon in soils under bamboo plantations. *Pedosphere*, **16**: 525–531.
- Zhang JS, Guo JF, Chen GS, *et al.* 2005. Concentrations and seasonal dynamics of dissolved organic carbon in forest floors of two plantations (*Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata*) in subtropical China. *Journal of Forestry Research*, **16**: 205–208.
-
- 作者简介 刘荣杰, 1987年生, 硕士研究生, 主要研究方向为森林生态系统结构与功能。E-mail: laurj1987@126.com
责任编辑 王伟
-