

中亚热带4种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征

辜翔¹ 张仕吉² 项文化^{1,3,4} 李雷达¹ 刘兆丹¹ 孙伟军¹ 方晰^{1,3,4*}

¹中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; ²中南林业科技大学材料科学与工程学院, 长沙 410004; ³南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004; ⁴湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南会同 438107

摘要 2011年12月至2012年9月, 在湘中丘陵区杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、马尾松(*Pinus massoniana*)-石栎(*Lithocarpus glaber*)针阔混交林、南酸枣(*Choerospondias axillaries*)落叶阔叶林、石栎(*Lithocarpus glaber*)-青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)常绿阔叶林1 hm²的长期定位观测样地, 采集0–15 cm、15–30 cm土层土壤样品, 测定土壤微生物生物量碳(MBC)、矿化有机碳(MOC)、易氧化有机碳(ROC)、水溶性有机碳(DOC)含量, 分析4种森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量的季节变化特征, 为揭示天然林保护与恢复对土壤有机碳(SOC)库的影响机理过程提供基础数据。结果表明: 森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量具有明显的季节动态, 且不同森林同一土壤活性有机碳组分的季节变化节律基本一致, MBC、MOC、ROC含量表现为夏、秋季较高, 春、冬季较低; DOC含量表现为春、夏、冬季较高, 秋季最低; 同一森林不同土壤活性有机碳组分含量的季节变化节律不同; 土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量与土壤自然含水率、SOC、全N、水解N、全P(除杉木人工林土壤MBC、MOC、ROC外)、速效P含量显著或极显著正相关, 与土壤pH值、全K、速效K含量相关性不显著, 表明不同森林类型外源碳库投入和土壤理化性质的差异是导致不同森林类型土壤活性有机碳含量差异显著的主要原因, 该区域森林土壤活性有机碳各组分含量的季节变化与各森林类型组成树种生长节律及其土壤水分含量和SOC、N、P的可利用性, 以及土壤活性有机碳各组分的来源有关, 森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量可作为衡量森林土壤C、N、P动态变化的敏感性指标。

关键词 湘中丘陵区; 次生林; 杉木人工林; 土壤活性有机碳; 季节变化

引用格式: 辜翔, 张仕吉, 项文化, 李雷达, 刘兆丹, 孙伟军, 方晰 (2016). 中亚热带4种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征. 植物生态学报, 40, 1064–1076. doi: 10.17521/cjpe.2015.0412

Seasonal dynamics of active soil organic carbon in four subtropical forests in Southern China

GU Xiang¹, ZHANG Shi-Ji², XIANG Wen-Hua^{1,3,4}, LI Lei-Da¹, LIU Zhao-Dan¹, SUN Wei-Jun¹, and FANG Xi^{1,3,4*}

¹School of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; ²School of Material Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; ³National Engineering Laboratory of South China Forestry Ecology Applicable Technologies, Changsha 410004, China; and ⁴Huitong National Field Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong, Hunan 438107, China

Abstract

Aims The objective of this paper was to quantify the seasonal variation of active soil organic carbon in the subtropical forests for better understanding of the underline mechanisms in controlling soil organic carbon storage and dynamics in natural and restored forests in the region.

Methods The study was conducted in a one-hectare permanent plot at Dashanchong Forest Park in Changsha County, Hunan Province, China. Four types of subtropical forests were selected as our study sites: (1) *Cunninghamia lanceolata* plantation, (2) *Pinus massoniana*-*Lithocarpus glaber* mixed forest, (3) *Choerospondias axillaries* deciduous broad-leaved forest, and (4) *L. glaber*-*Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest. The soil samples were taken from 0–15 cm and 15–30 cm depths within each of the forests from December 2011 to September 2012. Soil microbial biomass carbon (MBC), mineralized organic carbon (MOC), readily oxidized carbon (ROC), and dissolved organic carbon (DOC) were analyzed for their seasonal changes.

Important findings There existed a considerable seasonal variations of soil MBC, MOC, ROC, DOC among the forests, with a similar patterns of active organic carbon fraction. Soil MBC, MOC and ROC were significantly

收稿日期Received: 2015-11-21 接受日期Accepted: 2016-07-23

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: fangxizhang@sina.com)

higher in the summer and the autumn than those in the spring and winter, while soil DOC was higher in the spring, summer and winter than that in the autumn. The seasonal variations of different active organic carbon fractions appeared different within the same forest type. Significantly-positive correlations were found between soil MBC, MOC, ROC, DOC and soil moisture content, soil organic carbon (SOC), total N, hydrolysis N, total P (except for MBC, MOC and ROC in *Cunninghamia lanceolata* plantation), available P, but not between soil MBC, MOC, ROC, DOC concentrations and soil pH, total K and available K. The results indicated that the differences of exogenous carbon devotion, physicochemical properties were responsible for the significant differences of soil active organic carbon, and the growth rhythm of tree species, soil moisture content, the availability of nutrient (SOC, N and P), and the sources of soil active organic carbon fractions made a major contribution to seasonal variations of soil active organic carbon. Soil MBC, MOC, ROC, and DOC could be used as sensitivity indexes to assess the dynamics of soil C, N and P.

Key words hilly area of Hunan Province; secondary forests; *Cunninghamia lanceolata* plantation; soil active organic carbon; seasonal variations

Citation: Gu X, Zhang SJ, Xiang WH, Li LD, Liu ZD, Sun WJ, Fang X (2016). Seasonal dynamics of active soil organic carbon in four subtropical forests in Southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1064–1076. doi: 10.17521/cjpe.2015.0412

土壤活性有机碳是指在土壤中具有一定溶解性、易氧化、易矿化、易分解、不稳定、形态和空间位置对植物和微生物活性较高的有机碳(沈宏等, 1999)。其中, 微生物生物量碳(MBC)、可矿化有机碳(MOC)、易氧化有机碳(ROC)、水溶性有机碳(DOC)是表征土壤活性有机碳库的主要指标(沈宏等, 1999)。土壤活性有机碳仅占土壤有机碳(SOC)极小的比例, 却直接参与土壤物质循环、能量转化等生态功能过程, 影响着陆地生态系统C、N、P等养分的循环过程(Taylor *et al.*, 2007), 而且能在SOC变化之前反映出因管理措施或环境变化所引起的SOC库的微小变化(沈宏等, 1999)。因此, 常被用作土壤潜在生产力和SOC库变化的早期敏感性指标, 对维持土壤肥力和碳库平衡有重要作用(Haynes, 2005)。森林土壤活性有机碳的动态变化是森林SOC库动态及其调控机理研究的重要方面。

土壤活性有机碳对气候、土壤、植被变化的响应极为敏感, 并有明显的季节变化, 但由于多种生态因子复杂的综合作用以及关键因子的主导地位不同, 即使同一气候条件、土壤类型下, 不同植被同一土壤活性有机碳组分或同一植被不同土壤活性有机碳组分含量的季节变化模式也不尽相同(Singh *et al.*, 2010; 谢涛等, 2012)。森林土壤MBC含量的季节变化可呈现出3种模式: 夏高冬低型、夏低冬高型和干-湿季节交替循环型(王国兵等, 2009)。土壤DOC含量也呈现出多种变化模式: 春、夏季较高, 冬季较低(Tipping *et al.*, 1999; Kawahigashi *et al.*, 2003); 冬季高, 夏季低(汪伟等, 2008; 刘荣杰

等, 2013); 秋季最高(Zhou *et al.*, 2006); 季节变化不明显(Dosskey & Bertsch, 1997)。苏北沿海地区4种土地利用方式土壤ROC含量夏季最高, 冬季次之, 春季最低(王国兵等, 2013)。中亚热带不同演替阶段常绿阔叶林土壤MBC和DOC含量季节变化显著, 秋季出现最低值, 最高值随演替进程由冬季逐步转向夏季(范跃新等, 2013)。至今, 同一地区不同森林植被多种土壤活性有机碳组分含量的季节动态仍少见报道。

前期研究表明, 同一地区不同森林类型随着阔叶树比例增大, 凋落物的数量和质量及其季节动态(郭婧等, 2015)、细根生物量和生产力及其化学组成(刘聪等, 2011; Liu *et al.*, 2014)、群落组成结构趋向复杂, 使得林内立地微环境明显改变, 土壤MBC、MOC、DOC、ROC含量差异显著(辜翔等, 2013; 孙伟军等, 2013)。而我国亚热带地区山高坡陡、土层薄、抗蚀性弱, 水土流失严重, 生态系统具有极大的潜在脆弱性, 而且该地区东亚季风盛行, 冬冷夏热、水热同季、季节变化明显, 在此环境下, 森林土壤碳库如何响应对估算该地区森林碳库潜力十分重要(杨玉盛等, 2007), 也将有助于阐明亚热带天然林保护与恢复、人工林经营对森林土壤碳库动态、土壤肥力演变的影响机制, 及其在该区域碳平衡中的作用, 但目前相关研究仍比较匮乏(Iqbal *et al.*, 2010; Luan *et al.*, 2010; Wang & Wang, 2011)。本研究以湘中丘陵区地域相邻、环境条件(母岩、土壤)基本一致的4种森林类型(马尾松(*Pinus massoniana*)-石栎(*Lithocarpus glaber*)针阔混交林、

南酸枣(*Choerospondias axillaris*)落叶阔叶林、石栎(*Lithocarpus glaber*)-青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)常绿阔叶林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林)为对象,比较研究不同森林类型土壤活性有机碳的季节变化特征,探寻同一地区不同森林类型同一土壤活性有机碳组分含量的季节动态是否一致,同一森林不同土壤活性有机碳组分的季节变化有何不同,以及中亚热带森林土壤活性有机碳库对森林类型、土壤理化性状变化的响应,为进一步揭示亚热带天然次生林保护与恢复、人工林经营对SOC积累、土壤肥力恢复的影响机理过程提供基础数据,也为亚热带森林可持续经营提供科学依据。

1 研究地概况

研究地设在湖南省长沙县大山冲林场(113.28°–113.32° E, 28.38°–28.40° N),地处于幕阜山余脉的西缘,是典型低山丘陵,海拔高度55–350 m,相对高度在100–150 m之间;属于亚热带湿润季风气候区,夏热冬冷,水热同季,季节变化明显,年平均气温17.0 °C,月平均气温最高为30.7 °C(7月)、最低为6.2 °C(1月),年降水量1 412–1 559 mm,主要集中在4–7月份。地带性植被为常绿阔叶林,由于人为干扰,原生地带性森林植被已被破坏,经过近50年的封山育林,现保存有杉木、马尾松、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)等人工林群落以及处于不同演替阶段的次生林群落,林场内次生林群落人为干扰少;土壤以板岩和页岩发育而成的酸性红壤为主。

2 研究方法

2.1 样地设置

2009年,在大山冲林场内,选择地域相邻,土壤、气候条件基本一致的4种森林:(1)1963–1964年,采伐天然林,1965年冬炼山、人工全垦整地,1966年春营造杉木人工林(CL),经营期间无施肥历史,每年秋冬季节修枝、砍杂和清除林下地被物层;(2)1960–1961年,天然林采伐后,自然恢复的马尾松-石栎针阔混交林(PM);(3)1962–1963年,按60%间伐强度对天然林择伐后,自然恢复的南酸枣落叶阔叶林(CA);(4)1962–1963年,按30%间伐强度对天然林择伐后,自然恢复的石栎-青冈常绿阔叶林(LG)。在4种森林的代表地段分别设置1块1 hm²(100

m × 100 m)的长期定位观测样地,每一样地又分为100个10 m × 10 m小样方,对固定样地内胸径≥1 cm的所有植物进行挂牌编号,记录植物种类,测定胸径、树高、枝下高和冠幅,用Shannon-Wiener多样性指数计算了4种森林类型的树种多样性。各样地林分基本特征及其树种组成详见Liu等(2014)的文献。

2.2 土壤样品的采集、处理和分析方法

在每一个长期定位观测样地内,沿着上坡、中坡、下坡各选择1块10 m × 10 m的小样地,每种森林构成3个重复,每个小样地随机设置3个采样点。2011年12月下旬(冬季)、2012年3月下旬(春季)、2012年6月下旬(夏季)和2012年9月下旬(秋季)在连续天晴1周后采集土壤样品。为保证土壤样品的一致性,每季采样在采样点附近重新挖土壤剖面,按0–15 cm、15–30 cm分层取样,装入无菌塑料袋密封,立即装入便携式冷藏箱,当天带回实验室置于0–4 °C低温储存。

在室内,将同一小样地3个采样点相同土层土壤等量混合成1个样品,去除植物根系、石块,每1个鲜土样分成2份:1份立即过2 mm土壤筛,置于0–4 °C低温保鲜储存,用于测定MBC、MOC、DOC和自然含水率。另1份自然风干后,再分成2份:1份过1 mm土壤筛,用于测定pH值、水解N、速效P、速效K,另1份过0.25 mm土壤筛,用于测定SOC、ROC、全N、全P、全K。

土壤MBC用氯仿熏蒸、K₂SO₄溶液(土液比为1:8)浸提法测定(孙伟军等, 2013);土壤MOC用短期(3天)室内培养,碱液吸收酸滴定法测定(辜翔等, 2013);土壤DOC用蒸馏水(水土比4:1)浸提法测定(孙伟军等, 2013);土壤自然含水率用105 °C烘干法测定;pH值按水土比2.5:1,用pH值计测定;水解N用碱解扩散法测定;速效P用盐酸-氟化铵比色法测定;速效K用醋酸铵浸提-火焰分光光度计法测定;SOC用重铬酸钾法测定(中国科学院南京土壤研究所, 1978);ROC用333 mmol·L⁻¹ KMnO₄氧化比色法测定(沈宏等, 1999);土壤全N用KN580全自动凯氏定氮仪测定;全P用碱熔-钼锑抗比色法测定;全K用火焰分光光度计法测定(中国科学院南京土壤研究所, 1978)。4种森林土壤基本性质如表1所示。

2.3 数据处理

用Excel 2003统计各项指标平均值、标准偏差和

制作季节变化图。用SPSS 16.0软件包中的重复测量设计的方差分析(Repeated-Measures ANOVA)比较不同季节各森林类型不同土层活性有机碳各组分含量的差异,用单因素方差分析的最小显著差数法(LSD)分析同一森林同一活性有机碳组分含量不同季节两两之间的差异显著性($p < 0.05$),用Pearson法进行相关性分析。

3 结果和分析

3.1 土壤活性有机碳各组分含量的季节动态

从表2可以看出,不同森林类型、不同季节、不同土层MBC、MOC、ROC、DOC含量差异极显著($p < 0.01$),表明森林类型、季节变化和土层深度对森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量的影响极其显著。森林类型和季节变化的交互作用对土壤MBC、ROC含量影响极显著($p < 0.01$),对土壤

MOC、DOC含量影响不显著($p > 0.05$),表明不同季节,森林类型之间土壤MBC、ROC含量差异性变化显著,而土壤MOC、DOC含量差异性变化不大(图1-4)。

3.1.1 土壤MBC含量的季节变化

如图1所示,4种森林两土层MBC含量均呈现出“单峰型”的季节动态节律,CL、PM、LG表现为“夏高冬低型”,即春、秋季较低,夏季最高,冬季最低,夏季与春、秋(除LG 0-15 cm土层外)、冬季之间差异显著($p < 0.05$),CL、PM春、秋、冬季之间差异不显著($p > 0.05$),LG春、秋季与冬季之间差异显著($p < 0.05$),春季与秋季之间差异不显著($p > 0.05$);而CA表现为“秋高春低型”,即春季最低,秋季最高,春季与秋季差异显著($p < 0.05$),夏、秋、冬季之间差异不显著($p > 0.05$)。土壤MBC峰值因森林类型不同而异,杉木人工林0-15 cm土层和15-30 cm土层

表1 不同森林土壤的基本性质(4个季节的平均值±标准偏差)

Table 1 Basic soil properties of different forest stands (average of the 4 seasons ± SD)

森林类型 Forest types	土层 Soil layer (cm)	含水量 Moisture content (%)	pH	有机碳 Soil organic carbon ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全N Total N ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水解N Hydrolysis N ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全P Total P ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效P Available P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全K Total K ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效K Available K ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CL	0-15	26.62 ± 5.63	4.57 ± 0.20	19.72 ± 3.61	1.12 ± 0.23	58.21 ± 10.16	0.21 ± 0.05	1.96 ± 0.49	4.98 ± 1.41	52.55 ± 10.67
	15-30	26.16 ± 3.37	4.65 ± 0.34	15.00 ± 3.22	0.96 ± 0.22	44.46 ± 6.20	0.20 ± 0.04	1.35 ± 0.37	5.08 ± 1.53	42.13 ± 7.63
PM	0-15	20.27 ± 4.35	4.55 ± 0.20	23.57 ± 6.82	1.37 ± 0.29	54.39 ± 14.03	0.25 ± 0.06	2.43 ± 0.55	5.82 ± 1.23	53.01 ± 10.65
	15-30	18.33 ± 3.18	4.62 ± 0.18	17.76 ± 4.19	1.02 ± 0.22	37.95 ± 8.60	0.22 ± 0.05	1.99 ± 0.48	5.45 ± 1.55	49.55 ± 11.93
CA	0-15	25.53 ± 7.67	4.67 ± 0.19	24.08 ± 6.99	1.65 ± 0.44	77.93 ± 24.03	0.29 ± 0.07	2.73 ± 0.88	5.74 ± 1.55	69.30 ± 17.94
	15-30	22.26 ± 5.76	4.69 ± 0.24	18.40 ± 4.62	1.33 ± 0.44	64.36 ± 19.18	0.27 ± 0.06	2.15 ± 0.74	5.76 ± 1.59	57.75 ± 16.84
LG	0-15	22.53 ± 2.33	4.63 ± 0.24	25.79 ± 6.30	1.44 ± 0.36	66.44 ± 15.53	0.20 ± 0.04	2.35 ± 0.43	4.91 ± 1.64	56.75 ± 12.83
	15-30	21.61 ± 2.26	4.64 ± 0.20	18.48 ± 4.08	1.12 ± 0.37	50.28 ± 15.09	0.19 ± 0.04	2.03 ± 0.57	4.66 ± 1.36	45.56 ± 10.61

CA, 南酸枣落叶阔叶林; CL, 杉木人工林; LG, 石栎+青冈常绿阔叶林; PM, 马尾松+石栎针阔混交林。

CA, *Choerospondias axillaris* deciduous broad-leaved forest; CL, *Cunninghamia lanceolata* plantation; LG, *Lithocarpus glaber*-*Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest; PM, *Pinus massoniana*-*Lithocarpus glaber* mixed forest.

表2 土壤微生物生物量碳(MBC)、可矿化有机碳(MOC)、易氧化有机碳(ROC)和水溶性有机碳(DOC)含量变化的重复测量设计的方差分析

Table 2 Repeated-Measures ANOVA on the change of soil microbial biomass carbon, mineralized organic carbon, readily oxidized carbon and dissolved organic carbon

因子 Factor	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon			可矿化有机碳 Mineralized organic carbon			易氧化有机碳 Readily oxidized carbon			水溶性有机碳 Dissolved organic carbon		
	df	F	p	df	F	p	df	F	Sig	df	F	p
A	3	7.37	0.003	3	43.06	0.000	3	41.24	0.000	3	7.24	0.003
B	3	32.21	0.000	3	21.81	0.000	3	28.25	0.000	3	63.22	0.000
C	1	18.05	0.001	1	74.13	0.000	1	95.48	0.000	1	33.30	0.000
A × B	9	5.97	0.000	9	1.42	0.206	9	3.63	0.002	9	1.40	0.215
A × C	3	0.13	0.941	3	1.89	0.173	3	2.34	0.112	3	0.78	0.524
B × C	3	0.423	0.736	3	1.91	0.141	3	1.20	0.320	3	3.74	0.017
A × B × C	9	0.77	0.645	9	0.12	0.999	9	0.27	0.979	9	0.28	0.977

A、B、C分别代表森林类型、季节变化、土层深度, A × B、A × C、B × C和A × B × C则表示它们间的交互作用。

The A, B and C represent forest type, seasonal variations and soil depth, the A × B, A × C, B × C and A × B × C represent interactions of forest type, seasonal variations and soil depth.

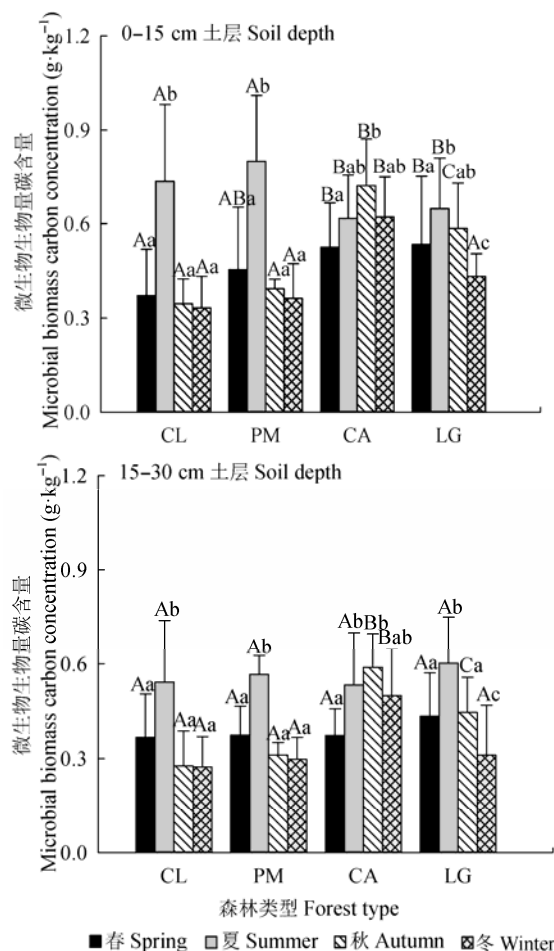


图1 不同森林土壤微生物生物量碳含量的季节变化(平均值±标准误差)。不同大写字母表示同一季节不同森林类型之间差异显著($p < 0.05$), 不同小写字母表示同种森林不同季节之间差异显著($p < 0.05$); CA, 南酸枣落叶阔叶林; CL, 杉木人工林; LG, 石栎+青冈常绿阔叶林; PM, 马尾松+石栎针阔混交林。

Fig. 1 Seasonal variations of soil microbial biomass carbon concentrations in different forests (mean \pm SE). Capital letters indicate significant differences among the forests in the same season ($p < 0.05$), while lowercase letters indicate significant differences among seasons of the same forest ($p < 0.05$); CA, *Choerospondias axillaris* deciduous broad leaved-forest; CL, *Cunninghamia lanceolata* plantation; LG, *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest; PM, *Pinus massoniana-Lithocarpus glaber* mixed forest.

MBC的最高值分别为0.73、0.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, PM为0.80、0.57 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, CA为0.72、0.59 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, LG为0.65、0.60 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与CA、LG相比, CL、PM土壤MBC含量的季节波动幅度较大; CL、PM的0–15 cm土层MBC的季节波动幅度较15–30 cm土层大, 而CA、LG两土层MBC的季节波动幅度差异不明显。不同森林类型之间的差异秋季最大(变异系数为33.9%), 夏季最小(变异系数为12.0%), 除夏季PM、CL显著高于

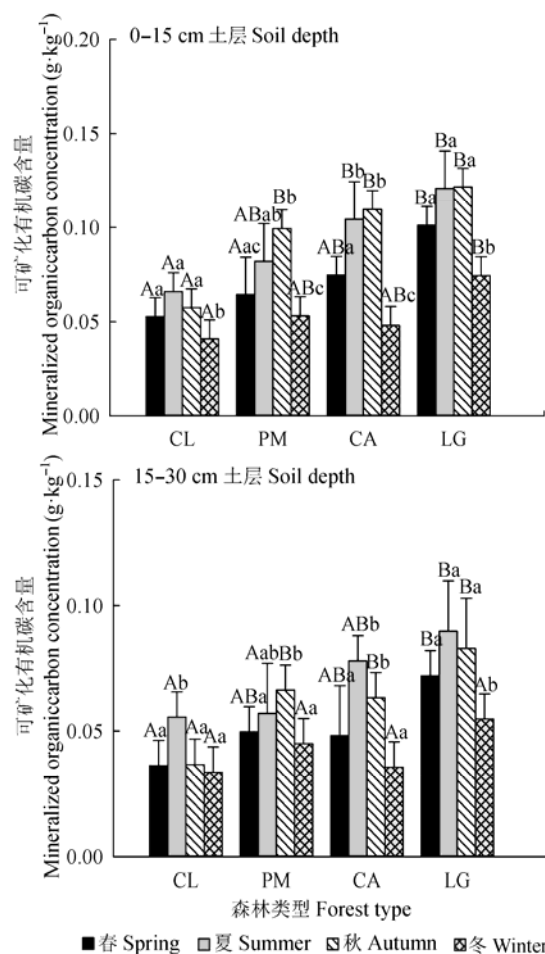


图2 不同森林土壤可矿化有机碳含量的季节变化(平均值±标准误差)。不同大写字母表示同一季节不同森林类型之间差异显著($p < 0.05$), 不同小写字母表示同种森林不同季节之间差异显著($p < 0.05$); CA, 南酸枣落叶阔叶林; CL, 杉木人工林; LG, 石栎+青冈常绿阔叶林; PM, 马尾松+石栎针阔混交林。

Fig. 2 Seasonal variations of soil mineralized organic carbon in different forests (mean \pm SE). Capital letters indicate significant differences among the forests in the same season ($p < 0.05$), while lowercase letters indicate significant differences among seasons in the same forest ($p < 0.05$); CA, *Choerospondias axillaris* deciduous broad leaved-forest; CL, *Cunninghamia lanceolata* plantation; LG, *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest; PM, *Pinus massoniana-Lithocarpus glaber* mixed forest.

CA、LG外, 其他季节均表现为: CA、LG显著高于PM、CL, 四个季节PM略高于CL, 但差异均不显著。表明森林类型对土壤MBC含量及其季节变化节律产生了一定的影响。

3.1.2 土壤MOC含量的季节动态

如图2所示, 4种森林两土层MOC含量均呈现出“单峰型”的季节变化节律, 但与其土壤MBC含量的季节变化节律略有不同。CL为夏季最高, 春、秋季

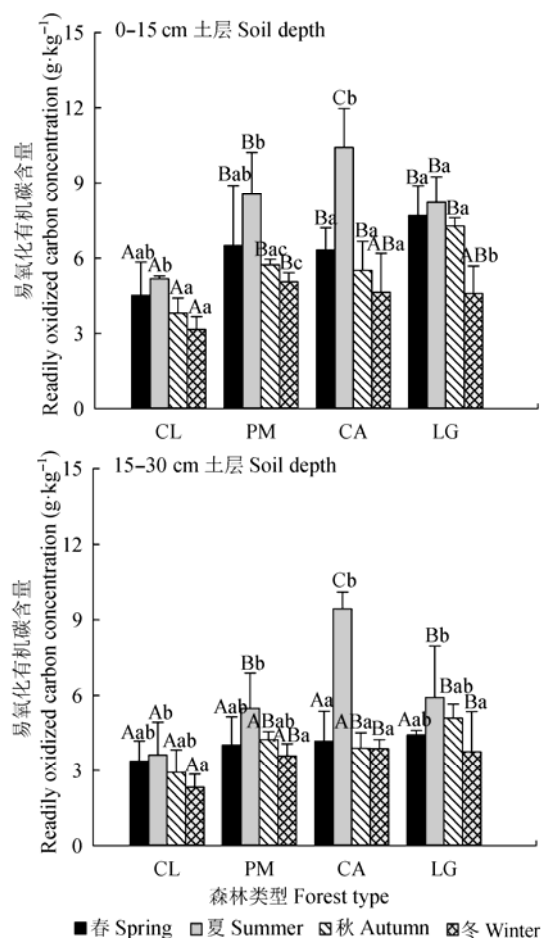


图3 不同森林土壤易氧化有机碳含量的季节变化(平均值±标准误差)。不同大写字母表示同一季节不同森林类型之间差异显著($p < 0.05$), 不同小写字母表示同种森林不同季节之间差异显著($p < 0.05$); CA, 南酸枣落叶阔叶林; CL, 杉木人工林; LG, 石栎+青冈常绿阔叶林; PM, 马尾松+石栎针阔混交林。

Fig. 3 Seasonal variations of soil readily oxidized carbon concentrations in different forests (mean \pm SE). Capital letters indicate significant differences among the forests in the same season ($p < 0.05$), while lowercase letters indicate significant differences among different seasons in the same forest ($p < 0.05$); CA, *Choerospondias axillaris* deciduous broad-leaved forest; CL, *Cunninghamia lanceolata* plantation; LG, *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest; PM, *Pinus massoniana-Lithocarpus glaber* mixed forest.

次之, 冬季最低; PM、CA、LG从春季到秋季逐渐增高, 秋季(除CA、LG 15–30 cm土层外)最高, 冬季下降, 为一年中最小值。单因素方差分析表明, CL 0–15 cm土层, 春、夏、秋季与冬季差异显著($p < 0.05$), 春、夏、秋季两两之间差异不显著($p > 0.05$), 15–30 cm土层, 春、秋、冬季与夏季差异显著($p < 0.05$), 春、秋、冬季之间差异不显著($p > 0.05$); PM、CA、LG秋季与春(除LG外)、冬季差异显著($p < 0.05$),

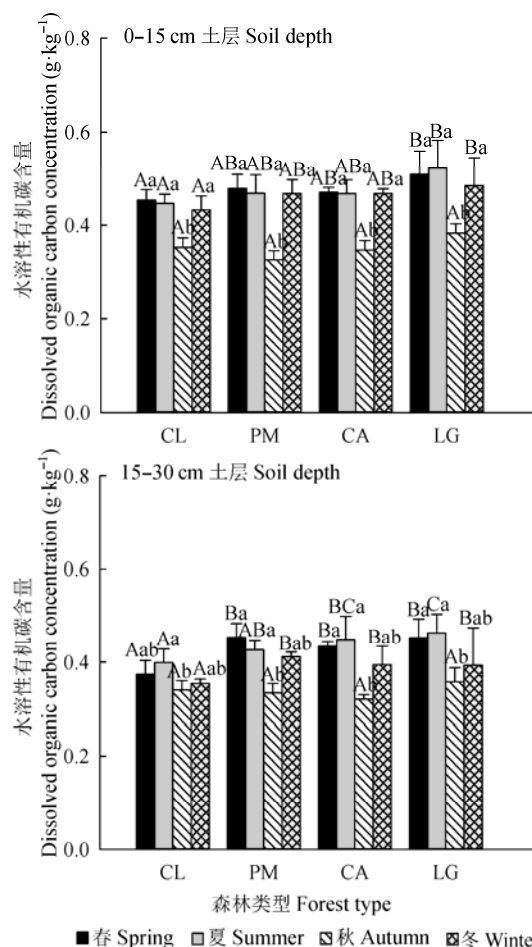


图4 不同森林土壤水溶性有机碳含量的季节变化(平均值±标准误差)。不同大写字母表示同一季节不同森林类型之间差异显著($p < 0.05$), 不同小写字母表示同种森林不同季节之间差异显著($p < 0.05$); CA, 南酸枣落叶阔叶林; CL, 杉木人工林; LG, 石栎+青冈常绿阔叶林; PM, 马尾松+石栎针阔混交林。

Fig. 4 Seasonal variations of soil dissolved organic carbon concentrations in different forests (mean \pm SE). Capital letters indicate significant differences among the forests in the same season ($p < 0.05$), while lowercase letters indicate significant differences among different seasons in the same forest ($p < 0.05$); CA, *Choerospondias axillaris* deciduous broad-leaved forest; CL, *Cunninghamia lanceolata* plantation; LG, *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest; PM, *Pinus massoniana-Lithocarpus glaber* mixed forest.

春季与冬季(除PM外)差异显著($p < 0.05$), 夏季与春(除CA外)、秋季差异不显著($p > 0.05$)。与CL相比, PM、CA、LG两土层MOC含量季节波动较大; 与15–30 cm土层相比, 0–15 cm土层MOC季节波动幅度也较大。在不同季节, 森林类型之间的差异变化不大(变异系数为23.0%–30.7%), 从高至低排序基本为: LG>CA>PM>CL, 且LG与CL差异显著, 与PM、CA不显著。表明森林类型对土壤MOC含量及

其季节变化节律有较明显的影响。

3.1.3 土壤ROC含量的季节变化

从图3可知, 4种森林0–15、15–30 cm土层ROC含量的季节变化模式均表现为“单峰型”节律, 即夏季最高, 冬季最低, 与其土壤MBC含量的季节变化节律相似, 但不完全一致。0–15 cm土层, 夏季与秋季(除LG外)、冬季差异显著($p < 0.05$), 与春季(除CA外)差异不显著($p > 0.05$), 春、秋、冬(除PM、LG外)季之间差异不显著($p > 0.05$); 15–30 cm土层, 仅夏季与冬季差异显著($p < 0.05$), 夏季与春、秋(除CA外)季之间, 春、秋、冬季之间差异均不显著($p > 0.05$)。CA两土层ROC含量的季节波动幅度最大, PM次之, CL最小; 0–15 cm土层的季节波动幅度较15–30 cm土层大。不同森林类型之间的差异夏季最大(变异系数为39.8%), 冬季或春季最小(变异系数为11.4%), 春、秋季从高至低表现为: LG>PM>CA>CL或LG>CA>PM>CL, 夏、冬季基本为: CA>PM>LG>CL。表明森林类型对土壤ROC含量影响明显, 但对其季节变化节律影响不大。

3.1.4 土壤DOC含量的季节动态

如图4所示, 4种森林两土层DOC含量均呈现出春、夏、冬季较高, 秋季最低的季节变化节律, 与其土壤MBC、MOC、ROC含量的季节动态节律不同。0–15 cm土层, 春、夏、冬季与秋季差异显著($p < 0.05$), 春、夏、冬季之间差异不显著($p > 0.05$); 15–30 cm土层, 春(除CL外)、夏季与秋季差异显著($p < 0.05$), 但秋、冬两季之间, 春、夏、冬季之间差异不显著($p > 0.05$)。与CL相比, PM、CA、LG土壤DOC含量的季节波动幅度较大, 0–15 cm土层DOC含量的季节波动幅度较15–30 cm土层大。4种森林秋季两土层之间差异最小, PM、CA、LG冬季两土层之间差异最大, CL春季最大。不同森林类型之间的差异夏季最大, 秋季或冬季最小。在不同季节, 不同森林类型之间的差异变化不大(变异系数为4.6%–8.8%之间), LG显著高于CL (除秋季不显著外), 也高于PM、CA, 但差异不显著。表明森林类型对土壤DOC含量影响明显, 但对其季节变化节律影响不大。

3.2 土壤有机碳各组分含量与土壤自然含水率的相关性

相关分析(表3)表明, 无论是整个研究区森林还是不同森林土壤SOC、MBC、MOC、ROC、DOC

与土壤自然含水率均呈显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)的线性正相关关系, 其中除CA外, 森林土壤MBC含量与土壤自然含水率的相关系数最高。表明土壤自然含水率的变化显著影响森林土壤活性有机碳转化和积累, 特别是对土壤MBC含量的影响, 不同森林类型土壤自然含水率的差异及其季节变化可能是导致各森林土壤活性有机碳各组分含量的差异及其季节变化的主要原因。

3.3 土壤活性有机碳各组分含量与土壤养分(C、N、P)含量、pH值的相关性

从表4可以看出, 无论是整个研究区森林土壤还是不同森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量与土壤SOC、全N、水解N、全P(除CL的MBC、ROC、MOC外)、速效P含量之间均呈显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)的正相关关系, 与全K、速效K之间不存在显著相关($p > 0.05$), 其中PM、CA、LG土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量与土壤SOC、全N、全P含量的相关系数均高于与CL的相关系数。表明不同森林类型土壤SOC、N、P含量及其供应状况的差异显著影响土壤活性有机碳各组分转化和积累, 土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量均可作为衡量森林土壤SOC、N、P含量变化的敏感性指标。森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量与土壤pH值均不存在显著相关($p > 0.05$)。表明不同森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量的差异及其季节变化不是土壤pH值所致。

4 讨论

4.1 森林类型对土壤活性有机碳含量的影响

研究表明, 不同森林因树种组成不同, 凋落物数量和组成及其分解行为不同, 显著地改变碳源输入的数量和质量, 影响土壤微生物的功能类群及其数量, 进而显著影响土壤活性有机碳的含量(Quideau *et al.*, 2001; 姜培坤, 2005; 王清奎等, 2005)。土壤活性有机碳来源于SOC, 容易受到生物残体分解和利用的影响(刘荣杰等, 2012), 其变化受到SOC变化的制约(耿玉清等, 2009)。本研究中, 从杉木人工林到石栎-青冈常绿阔叶林的4种森林类型, 树种逐渐增多, 阔叶树种比例增大(Liu *et al.*, 2014), 细根生物量和生产力呈增加趋势(刘聪等, 2011; Liu *et al.*, 2014), 年凋落物量明显增多(郭婧等, 2015), 且阔叶树凋落物易分解, 地表凋落物现

表3 森林土壤有机碳各组分含量与土壤自然含水率的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil organic carbon fractions and soil moisture content in four subtropical forests

森林类型 Forest type	土壤有机碳 Soil organic carbon	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	可矿化有机碳 Mineralized organic carbon	易氧化有机碳 Readily oxidized carbon	水溶性有机碳 Dissolved organic carbon
CL (n = 24)	0.510 3*	0.772 3**	0.559 1**	0.408 9*	0.436 6*
PM (n = 24)	0.596 9**	0.806 7**	0.532 6**	0.796 0**	0.414 4*
CA (n = 24)	0.530 7**	0.422 3*	0.506 2*	0.638 5**	0.501 0*
LG (n = 24)	0.516 2*	0.776 5**	0.545 0**	0.529 6**	0.409 8*
研究区 Research area (n = 96)	0.344 5**	0.497 2**	0.246 5**	0.319 2**	0.267 1**

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; CA, 南酸枣落叶阔叶林; CL, 杉木人工林; LG, 石栎+青冈常绿阔叶林; PM, 马尾松+石栎针阔混交林。

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; CA, *Choerospondias axillaris* deciduous broad-leaved forest; CL, *Cunninghamia lanceolata* plantation; LG, *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest; PM, *Pinus massoniana-Lithocarpus glaber* mixed forest.

表4 森林土壤活性有机碳各组分与土壤有机碳、养分、pH值的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil active organic carbon fractions and soil organic carbon, nutrients, pH value in four tropical forests

森林类型 Forest type	项目 Item	土壤有机碳 Soil organic carbon	全N Total N	全P Total P	全K Total K	水解N Hydrolysis N	速效P Available P	速效K Available K	pH
CL (n = 24)	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	0.631 7**	0.481 0*	0.205 4	-0.156 3	0.533 4**	0.473 8*	-0.108 3	-0.064 6
	可矿化有机碳 Mineralized organic carbon	0.459 3*	0.403 8*	-0.050 8	0.244 4	0.539 6**	0.418 1*	0.540 3**	-0.279 8
	易氧化有机碳 Readily oxidized carbon	0.712 1**	0.455 1*	-0.021 1	0.037 1	0.600 8**	0.559 9**	0.076 8	-0.380 6
	水溶性有机碳 Dissolved organic carbon	0.947 3**	0.708 1**	0.455 6*	-0.066 9	0.645 8**	0.598 4**	0.056 8	0.060 9
	PM (n = 24)	0.568 3**	0.570 3**	0.473 6*	-0.071 8	0.420 6*	0.488 8*	0.051 4	-0.391 4
PM (n = 24)	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	0.536 0**	0.579 1**	0.583 3**	-0.332 0	0.657 9**	0.491 0*	0.050 6	0.251 8
	可矿化有机碳 Mineralized organic carbon	0.709 3**	0.638 2**	0.523 3**	-0.064 5	0.554 8**	0.545 6*	0.013 1	-0.270 1
	易氧化有机碳 Readily oxidized carbon	0.972 7**	0.656 1**	0.702 1**	-0.100 6	0.652 1**	0.479 9*	-0.158 1	-0.005 8
	水溶性有机碳 Dissolved organic carbon	0.533 9**	0.511 3*	0.678 1**	-0.318 4	0.451 7*	0.459 5*	0.138 6	0.147 8
	CA (n = 24)	0.639 0**	0.559 3**	0.421 7*	0.078 3	0.613 7**	0.507 6*	-0.288 2	-0.265 9
CA (n = 24)	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	0.743 4**	0.722 3**	0.514 9*	-0.094 1	0.470 3*	0.659 4**	0.038 7	0.002 8
	可矿化有机碳 Mineralized organic carbon	0.987 8**	0.703 3**	0.507 9*	0.267 8	0.584 6**	0.545 5**	0.109 7	-0.303 9
	易氧化有机碳 Readily oxidized carbon	0.724 7**	0.827 7**	0.487 8*	-0.200 1	0.510 3*	0.585 8**	-0.273 3	-0.127 1
	水溶性有机碳 Dissolved organic carbon	0.637 1**	0.603 9**	0.439 3*	0.115 4	0.516 3**	0.471 7*	0.267 8	-0.265 4
	LG (n = 24)	0.715 6**	0.562 8**	0.458 5*	-0.088 1	0.559 3**	0.412 1*	0.126 4	-0.052 6
LG (n = 24)	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	0.601 2**	0.584 7**	0.409 6*	-0.168 6	0.659 4**	0.728 6**	-0.009 5	-0.237 4
	可矿化有机碳 Mineralized organic carbon	0.616 5**	0.634 4**	0.451 2**	-0.124 7	0.519 2**	0.524 5**	0.071 6	-0.059 3
	易氧化有机碳 Readily oxidized carbon	0.619 9**	0.537 2**	0.262 1**	0.002 2	0.507 3**	0.481 1**	0.093 8	-0.128 0
	水溶性有机碳 Dissolved organic carbon	0.730 7**	0.671 3**	0.409 8**	-0.003 5	0.532 5**	0.633 1**	0.183 2	-0.086 2
	研究区 Research area (n = 96)	0.808 9**	0.634 4**	0.326 0**	-0.022 3	0.557 4**	0.586 4**	0.079 0	-0.087 1

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。CA, 南酸枣落叶阔叶林; CL, 杉木人工林; LG, 石栎+青冈常绿阔叶林; PM, 马尾松+石栎针阔混交林。

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。CA, *Choerospondias axillaris* deciduous broad-leaved forest; CL, *Cunninghamia lanceolata* plantation; LG, *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest; PM, *Pinus massoniana-Lithocarpus glaber* mixed forest.

存量也呈增加趋势,而未分解现存量占地表凋落物现存量的百分比呈下降趋势(路翔等,2012),土壤理化性质明显改善,各土层SOC、N、P含量逐渐提高

(表1)。分析也表明,4种森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量与土壤自然含水率、SOC、N、P含量呈极显著正相关关系(表4),表明不同森林类型外源碳库

输入和土壤理化性质的差异,是导致不同森林类型土壤活性有机碳含量差异显著的主要原因。

4.2 不同森林同一土壤活性有机碳组分的季节动态特征

土壤活性有机碳含量的季节变化是多个因子交互影响的复杂过程。不同森林类型,因其树种组成、树种生长节律、凋落物数量和质量及其季节动态、土壤微生物类群组成、林地土壤水分、温度和土壤有机质、养分输入量不同,导致不同森林同一土壤活性有机碳组分含量及其季节变化的差异。研究表明,土壤温、湿度的季节变化是影响土壤活性有机碳季节波动的主要因子(王国兵等, 2009)。土壤温、湿度一方面影响SOC的输入量,另一方面还通过影响土壤微生物和酶活性的数量及其组成,进而影响土壤活性有机碳的积累、分解和转化(黄黎英等, 2007; 谢涛等, 2012)。尽管土壤活性有机碳与土壤水分关系的研究报道较多,但至今仍无确定性结论(Barbhuiya *et al.*, 2004; Ruan *et al.*, 2004; Fang *et al.*, 2005; 汪伟等, 2008; 徐侠等, 2008; 吴艳等, 2012; 谢涛等, 2012; 王丹等, 2013; 刘纯等, 2014)。本研究中,森林土壤活性有机碳各组分含量均具有明显的季节动态,4种森林土壤MBC、MOC、ROC基本表现为:夏、秋季较高,冬季较低,DOC表现为春、夏、冬季较高,秋季最低。究其原因可能是:研究区夏、秋季温度高,降水多,植物和微生物进入了生长旺季,植物光合、代谢速率快,根系分泌物多,土壤微生物活性高,林地凋落物分解快, SOC含量增加,促进土壤活性有机碳转化和积累(张仕吉等, 2014),即使植物、微生物生长过程消耗量较大,但总量仍表现为增加。4种森林SOC、MBC、MOC、ROC、DOC含量与土壤自然含水率相关性分析结果(表3)显示,森林土壤自然含水率的变化显著影响本研究区森林SOC含量和土壤MBC、MOC、ROC、DOC的转化和积累。同样,土壤活性有机碳含量与土壤温度之间的关系,至今也仍没有统一的结论。通常认为,土壤温度升高可增强土壤微生物活性,促进土壤有机物质的分解转化。研究表明,石灰土、酸性土DOC含量季节变化与土壤温度的变化基本一致(黄黎英等, 2007),随着温度增高,土壤DOC日产量增加40% (Bengtson & Bengtson, 2007)。但也有研究发现,较低温度有利于土壤ROC积累(徐侠等, 2008),土壤温度与土壤DOC呈显著负相

关关系(刘荣杰等, 2013)。本研究在研究期间对各森林土壤温度没有进行观测,因此土壤温度是否显著影响本研究区森林土壤活性有机碳各组分含量及其季节变化,仍有待进一步研究。

研究表明,植被类型的差异是导致不同森林土壤MBC大小及季节波动模式不同的主要原因(王国兵等, 2009),即使同一气候条件下,不同森林土壤MBC含量的季节变化模式也不尽相同(Devi & Yadava, 2006; Edwards *et al.*, 2006)、DOC(刘荣杰等, 2013)。本研究中,尽管4种森林同一组分活性有机碳的季节变化模式基本一致,但不同森林之间仍存在一定的差异,如CL土壤MOC含量的季节变化与PM、CA、LG有所不同。与CL相比,可能是由于PM、CA、LG树种较多,林分密度较大(Liu *et al.*, 2014),年凋落物量较高(郭婧等, 2015),细根生物量较高(Liu *et al.*, 2014), SOC输入量较高,可矿化的SOC含量较高(辜翔等, 2013);而CL树种组成单一,林分密度低,年凋落物量、细根生物量、SOC含量低,可矿化的SOC含量较低(辜翔等, 2013)。此外,CL人为经营干扰强度较大,每年秋、冬季定期清理林下植物、地表枯落物层和人工整枝等,秋冬两季SOC输入量减少,导致土壤MOC含量从夏季到秋季下降,冬季最低。同样,CL、PM、LG土壤MBC含量的季节变化与CA也不同。可能是由于春、夏季(3–5月),CL、PM、LG林木新叶萌发,老叶脱落,凋落物量增多(郭婧等, 2015),土壤碳、养分得到充分补给,促进土壤微生物生长和繁殖;而CA落叶阔叶树春季(3–4月)新叶萌发,凋落物量少,直到8月凋落物量才逐渐增多,秋季(9–12月)凋落物量最高(郭婧等, 2015),土壤碳、养分得到补给,为土壤微生物生长和繁殖提供了丰富的底物,土壤MBC含量最高,即使冬季温度下降,植物、微生物代谢减弱,仍能维持相对较高的MBC含量,因而CA土壤MBC含量的季节变化表现为“秋高春低型”。

不同森林类型与环境因子长期共同作用,导致SOC、养分(N、P)库的差异,也是不同森林土壤活性有机碳各组分含量及其季节变化节律产生差异的原因之一。研究表明,土壤活性有机碳各组分来源于SOC,土壤活性有机碳含量的高低在很大程度上取决于SOC的含量(谢涛等, 2012; 孙伟军等, 2013; 王国兵等, 2013),与SOC相关性较好的活性有机碳组分,与土壤全N含量相关性也较好(周焱

等, 2009), 土壤MBC、ROC、DOC含量与土壤全P、速效P含量呈极显著正相关关系(Santos *et al.*, 2012)。本研究的相关分析(表4)显示, 无论是整个研究区森林土壤, 还是4种森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC与森林土壤SOC、全N、水解N、全P(除CL的MBC、ROC、MOC外)、速效P含量密切相关, 表明森林土壤SOC、N、P含量增加及其可利用性提高, 土壤微生物数量、活性提高, 促进SOC的分解和转化, 进而影响土壤活性有机碳各组分的含量及其季节变化。

以上分析表明, 森林土壤有机碳库的动态变化受到多种因素交互影响, 精确评价亚热带次生林保护与恢复以及人工林经营对土壤有机碳库的影响仍需要针对各种因素开展更为深入的研究。此外, 在同一区域内, 由于缺乏在同一地区内地域相邻, 环境(母岩、土壤)条件基本一致的、类似重复的4种森林样地, 因此本研究是在4种森林类型的1 hm²长期定位观测的样地中, 沿上坡、中坡、下坡分别设置1块10 m × 10 m的小样地, 在每一小样地随机设置3个固定采样点采集样品, 代表不同立地条件下的采样样地, 虽然缺乏一定的重复性, 但仍然能比较真实地反映出在同一气候条件下不同森林类型土壤活性有机碳各组分含量的差异及其季节变化基本特征。

4.3 同一森林不同土壤活性有机碳组分季节动态的差异

土壤活性有机碳对环境变化具有高度敏感性, 但由于土壤活性有机碳不同组分的来源不同, 导致其对土壤环境、养分、凋落物及根系分布等因素变化的响应敏感性不同(柳敏等, 2006), 即使同一森林, 土壤活性有机碳不同组分的季节变化趋势也不完全一致。研究发现, 竹林土壤MBC含量春季最高, 夏季最低, 而DOC含量夏季最高, 冬季或春季最低(Zhou *et al.*, 2006)。人工林土壤MBC、DOC和ROC的季节变化均呈夏、秋季高, 春、冬季低的趋势, 但峰值出现的季节不同, MBC和DOC的峰值出现在秋季, ROC在夏季, 主要原因是降水淋溶、土壤腐殖质的差异(谭桂霞等, 2014)。不同演替阶段森林土壤MBC含量秋季最低, 随着演替进程, 森林土壤MBC含量最高值由冬季逐步转到夏季, 而DOC则春、夏两季最高, 冬季次之, 秋季最低, 主要原因之一可能是不同土壤活性有机碳组分来源的差异(范

跃新等, 2013)。本研究中, 同一森林类型4种土壤活性有机碳组分的季节变化规律不完全一致, 土壤MBC、MOC、ROC均呈夏、秋季较高, 冬、春季较低, DOC含量在春、夏、冬季较高, 秋季最低。可能与土壤活性有机碳各组分的来源、转化和积累有关。土壤MBC不仅取决于SOC总量, 还取决于林地光照、土壤通气状况, 特别是凋落物、根系分解过程中形成的微生物区系(王丹等, 2013)。土壤MOC主要来源于土壤微生物对土壤SOC的分解和转化(Taggart *et al.*, 2012), 受土壤温度、水分的交互影响(Fang *et al.*, 2005); ROC是土壤中易被氧化分解、活性组分较高的有机碳(Shrestha *et al.*, 2006), 主要来源于凋落物分解及根系分泌物(Yang *et al.*, 2011); 土壤DOC不同于土壤MBC、MOC、ROC, 除来源于动、植物残体的分解和积累外, 降水淋溶和土壤有机质腐殖化也是其主要来源(Kawahigashi *et al.*, 2003; Fang *et al.*, 2005; 王国兵等, 2013)。本研究中, 4种森林土壤DOC含量在春、夏、冬季较高, 秋季最低, 可能与本研究区降水量主要集中在春、夏两季, 冬季多为阴雨天气, 而秋季气温较高, 降水量明显减少有关。此外, 同一森林不同土壤活性有机碳组分的季节变化节律不同, 可能还与其化学组成、结构等方面有关, 有待于进一步研究。

5 结论

森林类型对土壤活性有机碳组分含量影响显著, 对MBC、MOC含量季节变化节律产生了一定的影响, 对ROC、DOC含量季节变化节律的影响不明显。中亚热带不同森林类型同一土壤活性有机碳组分含量的季节动态节律基本一致, 同一森林类型不同土壤活性有机碳组分的季节变化不完全一致, 土壤MBC、MOC、ROC含量呈现出“单峰型”的季节动态节律: 夏或秋季较高, 春、冬季较低, DOC含量均表现为: 春、夏、冬季较高, 秋季最低。不同森林类型外源碳库投入和土壤理化性质(自然含水率、SOC、N、P含量)的差异性导致不同森林类型土壤活性有机碳各组分含量差异显著, 森林土壤活性有机碳各组分含量的季节变化是一个多种因素综合影响的复杂过程, 与各森林类型组成树种的生长节律及其土壤水分状况和SOC、N、P的可利用性, 以及土壤活性有机碳各组分的来源有关。森林土壤MBC、MOC、ROC、DOC含量可作为衡量森林土

壤C、N、P动态变化的敏感性指标。

基金项目 国家林业公益性行业科研专项(2015-04411)和国家自然科学基金(30771720和31170426)。

致谢 感谢美国Governors State University、湖南省“百人计划”湛小勇教授在论文修改过程中的帮助。感谢中南林业科技大学引进高层次人才科研启动基金项目(2014YJ019)和中南林业科技大学研究生科技创新基金项目(CX2015A06)的支持。

参考文献

- Barbhuiya AR, Arunachalam A, Pandey HN, Arunachalam K, Khan ML, Nath PC (2004). Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest. *European Journal of Soil Biology*, 40, 113–121.
- Bengtson P, Bengtsson G (2007). Rapid turnover of DOC in temperate forests accounts for increased CO₂ production at elevated temperatures. *Ecology Letters*, 10, 783–790.
- Devi NB, Yadava PS (2006). Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Applied Soil Ecology*, 31, 220–227.
- Dosskey MG, Bertsch PM (1997). Transport of dissolved organic matter through a sandy forest soil. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 920–927.
- Edwards KA, McCulloch J, Kershaw GP (2006). Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 2843–2851.
- Fan YX, Yang YS, Yang ZJ, Xie JS, Chen GS, Zhong XJ, Guo JF (2013). Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 5751–5759. (in Chinese with English abstract) [范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 谢锦升, 陈光水, 钟小剑, 郭剑芬 (2013). 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态. *生态学报*, 31, 5751–5759.]
- Fang C, Smith P, Moncrieff JB, Smith JU (2005). Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 433, 57–59.
- Geng YQ, Yu XX, Yue YJ, Li JH, Zhang GZ, Liu S (2009). Soil active organic carbon pool of coniferous and broad-leaved forests in the mountainous area of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 31(5), 192–224. (in Chinese with English abstract) [耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 李金海, 张国桢, 刘松 (2009). 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究. *北京林业大学学报*, 31(5), 192–224.]
- Gu X, Fang X, Xiang WH, Li SL, Sun WJ (2013). Soil organic carbon and mineralizable organic carbon in four subtropical forests in hilly region of central Hunan Province, China. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 2687–2694. (in Chinese with English abstract) [辜翔, 方晰, 项文化, 李胜蓝, 孙伟军 (2013). 湘中丘陵区4种森林类型土壤有机碳和可矿化有机碳的比较. *生态学杂志*, 32, 2687–2689.]
- Guo J, Yu LH, Fang X, Xiang WH, Deng XW, Lu X (2015). Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4668–4677. (in Chinese with English abstract) [郭婧, 喻林华, 方晰, 项文化, 邓湘雯, 路翔 (2015). 中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周转期. *生态学报*, 35, 4668–4677.]
- Haynes RJ (2005). Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy*, 85, 221–268.
- Huang LY, Cao JH, Zhou L, Xu XJ, Mo B, Zhang P (2007). Seasonal change and the influence factors of soil dissolved organic carbon at different geological background. *Ecology and Environment*, 16, 1282–1288. (in Chinese with English abstract) [黄黎英, 曹建华, 周莉, 徐祥明, 莫彬, 张佩 (2007). 不同地质背景下土壤溶解有机碳含量的季节动态及其影响因子. *生态环境*, 16, 1282–1288.]
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (1978). Physical and chemical analysis on soil. Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai. (in Chinese) [中国科学院南京土壤研究所 (1978). 土壤理化分析. 上海科学技术出版社, 上海.]
- Iqbal J, Hu RG, Feng ML, Shan L, Malghan S, Ali IM (2010). Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: A case study at Three Gorges Reservoir Area, South China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137, 294–307.
- Jiang PK (2005). Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(1), 10–14. (in Chinese with English abstract) [姜培坤 (2005). 不同林分下土壤活性有机碳库研究. *林业科学*, 41(1), 10–13.]
- Kawahigashi M, Hiroaki S, Kazuhiko Y (2003). Seasonal changes in organic compounds in soil solutions obtained from volcanic ash soils under different land uses. *Geoderma*, 113, 381–396.
- Liu C, Liu YK, Jin GZ (2014). Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 451–459. (in Chinese with English abstract) [刘纯, 刘延坤, 金光泽 (2014). 小兴安岭6种森林类型土壤微生物量的季节变化特征. *生态学报*, 34, 451–459.]
- Liu C, Xiang WH, Lei PF, Deng XW, Tian DL, Fang X, Peng CH (2014). Standing fine root mass and production in four Chinese subtropical forests along a succession and species

- diversity gradient. *Plant and Soil*, 376, 445–459.
- Liu C, Xiang WH, Tian DL, Fang X, Peng CH (2011). Overyielding of fine root biomass as increasing plant species richness in subtropical forests in central southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 539–550. (in Chinese with English abstract) [刘聪, 项文化, 田大伦, 方晰, 彭长辉 (2011). 中亚热带森林植物多样性增加导致细根生物量“超产”. *植物生态学报*, 35, 539–550.]
- Liu M, Yu WT, Jiang ZS, Ma Q (2006). A research review on soil active organic carbon. *Chinese Journal of Ecology*, 25, 1412–1417. (in Chinese with English abstract) [柳敏, 宇万太, 姜子绍, 马强 (2006). 土壤活性有机碳. *生态学杂志*, 25, 1412–1417.]
- Liu RJ, Liu ZC, Wang B, Wu YC, Cheng CF, Ma SJ, Geri LT (2013). Seasonal dynamics of soil water-soluble organic carbon in secondary forests and Chinese fir plantations in hilly region of northwest Zhejiang Province, East China. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 1385–1390. (in Chinese with English abstract) [刘荣杰, 李正才, 王斌, 吴亚丛, 程彩芳, 马少杰, 格日乐图 (2013). 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. *生态学杂志*, 32, 1385–1390.]
- Liu RJ, Wu YC, Zhang Y, Li ZC, Ma SJ, Wang B, Geri LT (2012). Comparison of soil labile organic carbon in Chinese fir plantations and natural secondary forests in north subtropical areas of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 431–437. (in Chinese with English abstract) [刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 李正才, 马少杰, 王斌, 格日乐图 (2012). 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较. *植物生态学报*, 36, 431–437.]
- Lu X, Xiang WH, Ren H, Peng CH (2012). Litter biomass and its carbon and nitrogen storage in four subtropical forests in central Southern China. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 2234–2240. (in Chinese with English abstract) [路翔, 项文化, 任辉, 彭长辉 (2012). 中亚热带四种森林凋落物及碳氮贮量比较. *生态学杂志*, 31, 2234–2240.]
- Luan JW, Xiang CH, Liu SR, Luo ZS, Gong YB, Zhu XL (2010). Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen mountain, Sichuan, China. *Geoderma*, 156, 228–236.
- Quideau SA, Chadwick OA, Trumbore SE, Johnson-Maynard JL, Graham RC, Anderson MA (2001). Vegetation control on soil organic matter dynamics. *Organic Geochemistry*, 32, 247–252.
- Ruan HH, Zou XM, Scatena FN, Zimmerman JK (2004). Asynchronous fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest. *Plant and Soil*, 260, 147–154.
- Santos VB, Araújo ASF, Leite LFC, Nunes LAPL, Melo WJ (2012). Soil microbial biomass and organic matter fractions during transition from conventional to organic farming systems. *Geoderma*, 170, 227–231.
- Shen H, Cao ZH, Hu ZY (1999). Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology*, 18(3), 32–38. (in Chinese with English abstract) [沈宏, 曹志洪, 胡正义 (1999). 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 18(3), 32–38.]
- Shrestha RK, Ladha JK, Gami SK (2006). Total and organic soil carbon in cropping systems of Nepal. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 75, 257–269.
- Singh JS, Singh DP, Kashyap AK (2010). Microbial biomass C, N and P in disturbed dry tropical forest soils, India. *Pedosphere*, 20, 780–788.
- Sun WJ, Fang X, Xiang WH, Zhang SJ, Li SL (2013). Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 7765–7773. (in Chinese with English abstract) [孙伟军, 方晰, 项文化, 张仕吉, 李胜蓝 (2013). 湘中丘陵区不同演替阶段森林活性有机碳库的特征. *生态学报*, 33, 7765–7773.]
- Taggart M, Heitman JL, Wei S, Vepraskas M (2012). Temperature and water content effects on carbon mineralization for sapric soil material. *Wetlands*, 32, 939–944.
- Tan GX, Liu YQ, Li LL, Liu W, Zan YT, Li XD, Huo BN, He MJ (2014). Content and seasonal change of soil labile organic carbon under four different plantations in degraded red soil region. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 36, 434–440. (in Chinese with English abstract) [谭桂霞, 刘苑秋, 李莲莲, 刘武, 咎玉亭, 李晓东, 霍炳南, 何木姣 (2014). 退化红壤区不同类型人工林土壤活性有机碳及其季节变化. *江西农业大学学报*, 36, 434–440.]
- Taylor AR, Wang JR, Chen HYH (2007). Carbon storage in a chronosequence of red spruce (*Picea rubens*) forests in central Nova Scotia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 2260–2269.
- Tipping E, Woof C, Rigg E, Harrison AF, Ineson P, Taylor K, Benham D, Poskitt J, Rowland AP, Bol R, Harkness DD (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.
- Wang D, Lü YL, Xu L, Zhang HX, Wang RM, He NP (2013). The effect of moisture and temperature on soil C mineralization in wetland and steppe of the Zoige region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 6436–6443. (in Chinese with English abstract) [王丹, 吕瑜良, 徐丽, 张洪轩, 王若梦, 何念鹏 (2013). 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响. *生态学报*, 33, 6436–6443.]

- Wang GB, Ruan HH, Tang FY, He Y (2009). A review on the dynamics of soil microbial biomass in forest ecosystems. *Journal of Anhui Agricultural University*, 15, 390–398. (in Chinese with English abstract) [王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 何容 (2009). 森林土壤微生物生物量动态变化研究进展. 安徽农业大学学报, 15, 390–398.]
- Wang GB, Zhao XL, Wang MH, Ruan HH, Xu CM, Xu YM (2013). Effects of land use change on soil readily oxidizable carbon in a coastal area of northern Jiangsu Province, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 921–926. (in Chinese with English abstract) [王国兵, 赵小龙, 王明慧, 阮宏华, 徐长柏, 徐亚明 (2013). 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化有机碳含量的影响. 应用生态学报, 24, 921–926.]
- Wang QK, Wang SL (2011). Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions. *Applied Soil Ecology*, 47, 210–216.
- Wang QK, Wang SL, Feng ZW, Huang Y (2005). Active soil organic matter and its relationship with soil quality. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 513–519. (in Chinese with English abstract) [王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇 (2005). 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报, 25, 513–519.]
- Wang W, Yang YS, Chen GS, Guo JF, Qian W (2008). Profile distribution and seasonal variation of soil dissolved organic carbon in natural *Castanopsis fabric* forest in subtropical China. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 924–928. (in Chinese with English abstract) [汪伟, 杨玉盛, 陈光水, 郭剑芬, 钱伟 (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, 924–928.]
- Wu Y, Jiang CS, Hao QJ (2012). Dynamics of soil active carbon pool in a purple paddy soil in Southwest China. *Environment Science*, 33, 2804–2809. (in Chinese with English abstract) [吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2012). 西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态. 环境科学, 33, 2804–2809.]
- Xie T, Zheng AB, Wang GB, Ruan HH, Xu CM, Xu YM, Ge ZW (2012). Seasonal variation patterns of soil labile organic carbon in poplar plantations with different ages in northern Jiangsu. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 1171–1178. (in Chinese with English abstract) [谢涛, 郑阿宝, 王国兵, 阮宏华, 徐亚明, 徐长柏, 葛之葳 (2012). 苏北不同林龄杨树林土壤活性碳的季节变化. 生态学杂志, 31, 1171–1178.]
- Xu X, Wang F, Luan YL, Wang JS, Fang YH, Ruan HH (2008). Soil readily oxidizable carbon along an elevation gradient of Wuyi Mountains in southeastern China. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 1115–1121. (in Chinese with English abstract) [徐侠, 王丰, 栾以玲, 汪家社, 方燕鸿, 阮宏华 (2008). 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志, 27, 1115–1121.]
- Yang H, Cao JH, Zhang LK, Huo YL, Mao LF (2011). Pool sizes and turnover of soil organic carbon of farmland soil in Karst area of Guilin. *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)*, 18, 39–45.
- Yang YS, Xie JS, Sheng H, Chen GS, Li X (2007). The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of southern China. *Acta Geographica Sinica*, 62, 1123–1131. (in Chinese with English abstract) [杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 陈光水, 李旭 (2007). 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响. 地理学报, 62, 1123–1131.]
- Zhang SJ, Xiang WH, Sun WJ, Fang X (2014). Soil dissolved organic carbon concentration under different land-use patterns in a hilly area of central Hunan Province, China. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 2065–2071. (in Chinese with English abstract) [张仕吉, 项文化, 孙伟军, 方晰 (2014). 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量. 生态学杂志, 33, 2065–2071.]
- 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.
- Zhou Y, Xu XG, Wang F, Ruan HH, Wang JS, Fang YH, Wu YY, Xu ZK (2009). Soil microbial biomass, respiration, and metabolic quotient along an altitudinal gradient in Wuyi Mountain of southeastern China. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 265–269. (in Chinese with English abstract) [周焱, 徐宪根, 王丰, 阮宏华, 汪家社, 方燕鸿, 吴焰玉, 徐自坤 (2009). 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(q_{MB} , Q_{CO_2}). 生态学杂志, 28, 265–269.]

特邀编委: 汪思龙 责任编辑: 王 葳



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览