

DOI: 10.11766/trxb201301090018

# 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征\*

周晨霓 马和平<sup>†</sup>

(西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏林芝 860000)

## DISTRIBUTION OF LABILE ORGANIC CARBON IN SOIL AS AFFECTED BY VEGETATION TYPICAL OF SYGERA MOUNTAINS, TIBET, CHINA

Zhou Chenni Ma Heping<sup>†</sup>

(Research Institute of Plateau Ecology, Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 860000, China)

关键词 活性有机碳; 颗粒有机碳; 易氧化有机碳; 西藏

中图分类号 S153.6 文献标识码 A

土壤有机碳库特别是森林土壤有机碳库贮量的微小变化, 均可引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的显著改变<sup>[1]</sup>。土壤活性碳指受植物、动物、微生物影响强烈, 具有一定溶解性, 在土壤中移动快、稳定性差、易氧化、矿化, 并具有较高植物和土壤微生物活性的那部分有机碳<sup>[2]</sup>, 研究发现, 土壤碳库的变化主要发生在活性碳库里<sup>[3-6]</sup>, 活性有机质较非活性有机质敏感得多, 又直接参与土壤生物化学转化过程, 同时也是土壤微生物活动的能源和土壤养分的驱动力<sup>[7-8]</sup>, 对于土壤活性有机碳的研究是森林土壤碳库动态及调控机理研究的重要方面。

青藏高原因海拔高、气候寒冷, 称为世界第三极, 被认为是气候变化的敏感区和脆弱区<sup>[9]</sup>。高原四周存在对比强烈的气候和植被地带<sup>[10]</sup>。而位于西藏东南部林芝县境内的色季拉山是念青唐古拉山余脉与喜马拉雅山东部向北发展的山系结合部。近十年来, 我国对土壤有机碳的研究日益增多, 但是对西藏色季拉山的土壤有机碳的研究甚少。而研究该地区不同海拔梯度典型生态系统下土壤活性碳含量与分配比例对于揭示该地区森林植被对土壤碳库的调控及影响具有重要意义。本文选定西藏色季拉山(西坡)不同植被类型(高山灌丛、杜

鹃林、冷杉林和林芝云杉林)生态系统中土壤(海拔 3 600 ~ 4 360 m)为对象, 测定分析了不同生态系统中土壤活性有机碳, 旨在揭示亚高山寒温带地区不同海拔梯度上不同植被类型土壤有机碳及其活性组分的分布变化特征, 为系统认识亚高山寒温带不同生态系统森林土壤碳汇提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西藏色季拉山位于西藏东南部林芝县境内, 位于 29°10' ~ 30°15'N, 93°12' ~ 95°35'E, 是念青唐古拉山余脉与喜马拉雅山东部向北发展的山系结合部, 处于半湿润区与湿润区的过渡地带, 海拔 2 200 ~ 5 300 m, 面积约 2 300 km<sup>2</sup>。本研究位于色季拉山西坡, 约在 29°38'N, 94°43'E, 海拔 3 600 ~ 4 400 m 地带, 平均坡度 35°左右。由于雅鲁藏布江的水气通道作用, 该区域受印度洋暖湿季风的影响, 为亚高山寒温带半湿润区, 年均温 - 0.73℃, 最暖月(7月)平均气温为 9.8℃, 最冷月(1月)平均气温为 - 13.8℃; 年均降水量 1 134 mm; 蒸发量 554 mm; 年平均相对湿度 78%。区内以山地棕壤和酸性棕

\* 国家自然科学基金项目(41061033)、国家林业局林芝森林生态系统定位研究项目资助

<sup>†</sup> 通讯作者: 马和平(1977—), 男, 甘肃陇西人, 硕士, 主要从西藏高原生态和碳循环研究

作者简介: 周晨霓(1984—), 女, 四川崇州人, 硕士, 主要从事西藏高原土壤生态研究。Tel: 13989045725, E-mail: 106732825@qq.com

收稿日期: 2013-01-09; 收到修改稿日期: 2013-05-12

壤为主,根据土壤形成环境与土壤性状及两者相互作用的综合特点,区域内的土壤可划分为以下几种类型:海拔 4 800m 以上的高山寒漠土、林线以上的高山草甸土、高山灌丛下的亚高山灌丛草甸土、高海拔冷杉林下的山地漂灰土、针阔混交林下的山地暗棕壤,土层平均厚度 60 cm,母岩以花岗岩为主。

## 1.2 研究方法

本研究区域位于色季拉山西坡,从海拔 3 600 ~

4 360 m 选择高山灌丛(Alpine shrub,简称 AS)、杜鹃林(Rhododendron forest,简称 RF)、急尖长苞冷杉林(*Abies georgei* var. *smithii* forest,简称 AGSF)和林芝云杉林(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis* forest,简称 PLLF)4 种典型森林生态系统为研究对象,在每种生态系统类型中设置了 3 个 20 m × 30 m 的固定样地进行研究。典型样地的立地状况和植被具体情况见表 1。

表 1 样地立地状况和土壤植被组成

生态系统类型	坡度(°)	坡向	海拔(m)	植被组成	
				乔木层	下木层
高山灌丛(AS)	32	西北	4 367	薄毛海绵杜鹃、红点杜鹃	岩白菜、直立悬钩子
杜鹃林(RF)	29	西北	4 298	薄毛海绵杜鹃、急尖长苞冷杉	岩白菜、直立悬钩子
急尖长苞冷杉林(AGSF)	44	东北	3 980	急尖长苞冷杉、硬毛杜鹃、杯萼忍冬、西南铁线莲、西南花楸、冰川茶藨子、锈毛西南花楸、西南铁线莲	香根芹、宽叶苔草、光蔓茎堇菜、翅柄蓼、长柱鹿药、小蓼、卷叶黄精、鹅肠菜、直立悬钩子
林芝云杉林(PLLF)	38	西北	3 613	急尖长苞冷杉、林芝云杉、杯萼忍冬、柳叶忍冬、峨眉蔷薇、越桔忍冬、川滇高山栎、小舌紫菀、绒楚卫矛、长芽绣线菊	宽叶苔草、凉山悬钩子、翅柄蓼、光蔓茎堇菜、腋花扭柄花、水栒子、总梗委陵菜、贡山肋毛蕨、五裂蟹甲草、无翅兔耳风、香根芹、卷叶黄精、葇叶獐芽菜

## 1.3 样品采集与分析

2011 年 7 月,在每块标准地有代表性的部位,分别挖取 3 个土壤剖面。观察剖面特征后,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀测定土壤容重,按 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 深度采集土壤约 200 g,分别装入自封袋中并做好标记。高山灌丛样地内土样按土层每 4 个点混合为 1 份,山地森林中土样按土层每 5 个点混合为 1 份,均为 3 次重复。拣除石块等杂物后,每份土样又均匀分成两部分,一部分放入冰箱(温度 4℃)用于测定土壤微生物和活性;另一部分装在土样袋中,运回实验室自然风干用于测定土壤有机碳和全氮。

土壤总有机碳的测定采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,土壤颗粒有机碳的测定参考 Garten 等<sup>[11]</sup>的测定方法,土壤易氧化碳的测定采用徐明岗等<sup>[12]</sup>的测定方法。土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸法<sup>[15]</sup>,操作过程在新鲜土壤采样后 48 h 内完成。

## 1.4 数据处理

利用 Excel 和 SPSS16.0 For windows 统计软件对测定结果进行统计分析。

## 2 结果

### 2.1 不同植被类型土壤性质特征

由表 2 可以看出,从不同土壤层次来看,每一种

植被类型土壤 pH 和容重均呈现随出随土壤深度增加而增加的趋势。随着海拔高度降低,土壤 pH 逐渐增高。土壤容重从表层至底层逐渐增大。但不同层次之间变化和大小关系并不一致。从不同海拔梯度来看,土壤容重在不同植被类型间呈现的变化趋势为:PLLF > RF > AGSF > AS,经过 LSD 检验,土壤容重在各种植被类型间差异并不显著( $p > 0.05$ )。

表 2 样地土壤基本性质

植被类型	土壤类型	土层深度(cm)	pH	容重(g cm <sup>-3</sup> )
高山灌丛(AS)	高寒草甸土	0 ~ 10	4.57	0.12
		10 ~ 20	4.82	0.69
		20 ~ 40	4.95	0.82
杜鹃林(RF)	灰色森林土	0 ~ 10	4.92	0.67
		10 ~ 20	5.23	0.69
		20 ~ 40	5.46	0.86
急尖长苞冷杉林(AGSF)	山地漂灰土	0 ~ 10	5.13	0.52
		10 ~ 20	5.54	0.70
		20 ~ 40	5.73	0.90
林芝云杉林(PLLF)	山地暗棕壤	0 ~ 10	5.40	0.59
		10 ~ 20	5.70	0.71
		20 ~ 40	5.74	0.94

## 2.2 不同植被类型土壤总有机碳和全氮含量分布特征

由表 3 可以得知,在剖面垂直分布上,不同植被类型土壤 TOC 含量呈现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势,表层土壤 TOC 含量高。而在不同植被类型间土壤总有机碳含量呈现出高海拔梯度植被类型高于低海拔植被类型的趋势。在不同土壤层次,土壤总有机碳表现在 0~10 cm 均差异显著;在 10~20 cmAS 与 RF 差异显著,而 AGSF 与 PLLF 差

异不显著;在 20~40 cmAS 与 RF 差异不显著,而 AGSF 与 PLLF 差异显著( $p < 0.05$ )。土壤全氮表现在 0~10 cmAS 均差异显著,而 RF、AGSF 和 PLLF 差异不显著;在 10~20 cmAS、RF、AGSF 与 PLLF 均差异显著;在 20~40 cmAS、RF、AGSF 与 PLLF 均差异不显著。土壤总有机碳含量与全氮含量之间存在较为明显的线性关系: $N = 0.017C + 0.299$  ( $R^2 = 0.48$ ,  $n = 12$ ,  $p < 0.01$ )。土壤碳氮比均表现为:AS、RF 显著大于 AGSF、PLLF,且 AGSF 和 PLLF 差异不显著。

表 3 不同植被类型土壤总有机碳和全氮分布

植被类型	土层深度 (cm)	总有机碳 (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 (g kg <sup>-1</sup> )	碳氮比 C/N
高山灌丛(AS)	0~10	78.17 ± 27.45a	1.86 ± 2.76a	42.04 ± 0.99a
	10~20	55.47 ± 19.87b	1.38 ± 1.97b	33.40 ± 0.81b
	20~40	40.95 ± 9.98c	1.00 ± 1.04c	40.37 ± 1.12a
杜鹃林(RF)	0~10	67.70 ± 23.61b	1.37 ± 1.75b	49.66 ± 0.79a
	10~20	55.40 ± 20.47a	1.36 ± 0.85a	40.17 ± 1.34a
	20~40	44.64 ± 8.75c	0.10 ± 0.24c	44.81 ± 0.17a
急尖长苞冷杉林(AGSF)	0~10	57.05 ± 13.56c	1.23 ± 2.76c	46.93 ± 0.46a
	10~20	31.82 ± 12.31a	1.01 ± 1.17d	31.92 ± 0.39b
	20~40	28.48 ± 9.78b	0.78 ± 0.73c	36.73 ± 0.78b
林芝云杉林(PLLF)	0~10	35.74 ± 14.66d	1.05 ± 1.28d	34.19 ± 0.51b
	10~20	29.17 ± 11.32a	0.84 ± 0.055c	34.96 ± 0.29b
	20~40	16.90 ± 4.56c	0.75 ± 0.043c	22.46 ± 0.33c

## 2.3 不同植被类型土壤活性有机碳含量特征

本研究表明,各活性碳组分含量据呈现出随着土层深度增加而减少、高海拔植被类型高于低海拔植被类型的趋势(表 4);且土壤微生物生物量碳含

量、颗粒有机碳含量、易氧化有机碳含量与土壤总有机碳含量关系密切,呈显著的正相关( $y = 0.117x + 13.036$ ,  $p < 0.01$ ;  $y = 2.256x + 28.542$ ,  $p < 0.01$ ;  $y = 1.374x + 27.224$ ,  $p < 0.01$ )。

表 4 不同植被类型土壤活性有机碳含量

植被类型	土层深度 (cm)	微生物生物量碳 SMBC(mg kg <sup>-1</sup> )	微生物生物量氮 SMBN(mg kg <sup>-1</sup> )	颗粒有机碳 POC(g kg <sup>-1</sup> )	易氧化有机碳 ROC(g kg <sup>-1</sup> )
高山灌丛(AS)	0~10	485.8 ± 36.5a	211.9 ± 7.9a	44.4 ± 3.8b	24.9 ± 3.1c
	10~20	384.2 ± 27.3b	160.0 ± 13.3b	10.5 ± 1.9a	5.7 ± 2.7a
	20~40	363.7 ± 14.0c	105.0 ± 17.3d	8.3 ± 2.8a	4.3 ± 4.0a
杜鹃林(RF)	0~10	380.8 ± 21.3b	174.5 ± 21.9b	18.3 ± 3.5b	15.4 ± 2.8b
	10~20	178.2 ± 14.3c	122.9 ± 7.7c	13.4 ± 4.4c	5.6 ± 3.7c
	20~40	256.7 ± 16.5a	86.5 ± 6.5d	9.0 ± 3.2a	3.8 ± 2.6a
急尖长苞冷杉林(AGSF)	0~10	365.6 ± 10.9b	117.9 ± 10.6c	17.9 ± 2.1b	12.2 ± 2.9b
	10~20	146.9 ± 21.2c	46.1 ± 9.3d	8.7 ± 4.8a	3.0 ± 3.6a
	20~40	135.5 ± 17.7a	43.3 ± 10.3a	3.9 ± 3.2a	2.8 ± 2.9a
林芝云杉林(PLLF)	0~10	330.5 ± 9.8c	95.6 ± 13.2c	10.9 ± 1.7b	7.1 ± 1.5b
	10~20	142.7 ± 15.7d	76.0 ± 12.5a	8.0 ± 3.5b	2.3 ± 1.0c
	20~40	130.9 ± 4.3a	53.5 ± 8.8b	2.9 ± 2.8c	1.1 ± 3.7c

## 2.4 不同植被类型土壤活性有机碳分配比例

土壤活性有机碳占总有机碳的比例较活性有机碳总量更能反映森林植被对土壤行为的影响结果<sup>[14]</sup>。从图1、图2可以看出,土壤颗粒有机碳和易氧化有机碳的分配比例随土壤深度的增加而降低,且颗粒有机碳表现地更为明显。在 AS 的 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层,POC 占 TOC 比例分别为 56.77%、23.01%、20.16%,ROC 占 TOC 比例分别为 31.80%、12.61%、10.54%。同理,在 RF 的 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层中,POC 占 TOC 比例分别为 12.28%、24.23%、20.29%,ROC 占 TOC 比例分别为 22.68%、10.64%、8.43%。在 AGSF 的 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层中,POC 占 TOC 比例分别为 31.31%、27.23%、13.87%,ROC 占 TOC 比例分别为 21.32%、9.70%、7.00%。在 PLLF 的 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层中,POC 占 TOC 比例分别为 30.59%、27.47%、17.34%,ROC 占 TOC 比例分别为 19.90%、7.9%、6.7%。

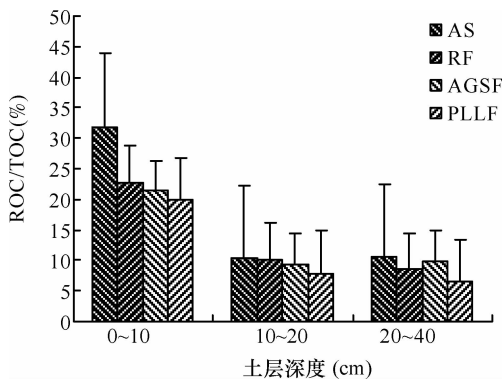


图1 易氧化有机碳占总有机碳的百分比

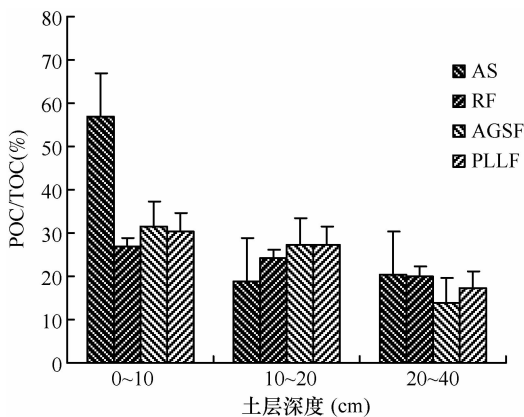


图2 颗粒有机碳占总有机碳的百分比

## 3 讨论

### 3.1 不同植被类型土壤总有机碳含量与土壤性质的关系

在本研究中,随着土层深度的加深,土壤总有机碳含量逐渐减小,而 pH 逐渐增大。可见土壤深度对有机碳含量有显著影响,这与之前的同类研究结果相符<sup>[16]</sup>。原因在于,由于植物的枝叶残体和根系大部分分布于表层土壤中,分解后形成的腐殖质在表层土壤中积累,土壤有机碳含量具有典型的表聚性。随着海拔高度的降低,有机碳含量逐渐降低,同时 pH 也逐渐增高,这是因为土壤 pH 可以影响微生物的生长和活动,在酸性土壤中,微生物种类受到限制,以真菌存在为主,从而减缓了有机质的分解;随着土壤 pH 的升高,有机质的溶解、分散和化学水解作用会增大,可以提高微生物对有机质的利用率<sup>[17]</sup>。此外,森林土壤有机碳含量取决于植被动态和凋落物的输入和分解,同时也取决于植被每年的归还量和分解速率,而植被类型、气候特点以及土壤性质的差异,均会导致土层内有机碳含量的分布差异<sup>[18]</sup>。

土壤总有机碳含量与容重呈现极显著负相关关系( $y = -4.942x + 7.503, p < 0.01$ )。而对于全氮含量而言,从土壤表层至底层呈现下降的趋势,平均值以 AS 最高。TOC 与 TN 之间存在明显的线性相关关系。这是由于影响微生物活动的因素对土壤全氮含量具有较大的影响,而有机碳含量是微生物活动的主要能源,从而有机碳含量通过微生物活动影响全氮含量<sup>[19]</sup>。

### 3.2 不同植被类型土壤活性有机碳分布特征

本研究中,土壤总有机碳、总氮和各活性碳组分含量均表现为高海拔植被类型高于低海拔植被类型,这可能是由于 PLLF 处在较低海拔,温度相对较高,但降水量低而土壤可能较干旱,使土壤微生物活动受到限制;而 AS 土壤湿度虽然较大,但地处较高海拔而温度较低也不利于微生物的活动;RF 和 AGSF 森林中温湿度都较为适宜,所以有利于有机质积累。

森林土壤颗粒有机碳和易氧化有机碳在土壤剖面上分布的差异主要与不同层次植被根系分布、生物活动、人为干扰等有关<sup>[20]</sup>。各植被类型土壤颗粒有机碳含量和分配比例均明显随土层深度的增加而降低,与前人的研究结果一致<sup>[19-22]</sup>。这主要是

因为一方面土壤活性有机碳在很大程度上取决于土壤总有机碳含量(表 3),土壤总有机碳随土层深度的增加而减少;另一方面,森林枯枝落叶层不但为土壤提供大量的有机碳,而且使表层土壤具有较高的养分浓度和较好的水分条件,从而为植物细根向表土层聚集提供了良好的条件<sup>[23]</sup>,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<sup>[24]</sup>。

从各活性有机碳组分的分配比例来看,易氧化有机碳含量分配比例随土层深度增加保持相对稳定,不同于颗粒有机碳分配比例表现出随土层深度增加而明显降低的趋势。这可能存在两方面的原因,一是由于易氧化有机碳和颗粒有机碳本身起源的差异造成,土壤非保护有机碳(颗粒有机碳)主要是由新近凋落的、部分分解的、与土壤矿质结合不紧的植物残体组成<sup>[21]</sup>;而另一方面可能由于易氧化有机碳测定方法造成的,因为一方面化学氧化法也会攻击一些不能被微生物利用的矿质组分颗粒有机质表面,同时,由于化学氧化主要是靠攻击颗粒表面,一些大颗粒有机质内部的活性成分不能被氧化<sup>[25]</sup>。

前人研究表明,景观异质性可以显著地改变地下生物群落的结构,进而改变凋落物分解和土壤碳循环等生态过程<sup>[26]</sup>。本研究表明,不同森林植被类型的土壤总有机碳含量和活性有机碳含量随海拔升高而呈现出增加的趋势,可能是由于不同的植被类型的凋落物和根系分泌物、C/N 及根系分布均会影响到土壤活性有机碳含量<sup>[22-24]</sup>,高的 C/N 可以进一步抑制有机质的分解,从而进一步促进了有机质的积累。此外,林分不同导致的凋落物种类不同,会进一步影响微生物群体的数量,从而影响微生物量和碳利用效率<sup>[27]</sup>,并导致海拔梯度上活性有机碳的变化,这亦与前人相关研究结果一致<sup>[22-24]</sup>。

## 4 结 论

西藏色季拉山(西坡)沿海拔梯度典型植被类型土壤有机碳含量与土壤 pH 和容重呈显著负相关;从土壤剖面垂直分布来看,土壤总有机碳、总氮和各活性有机碳组分含量均表现出随土壤深度增加而逐渐降低的趋势,从海拔梯度垂直分布来看,土壤总有机碳、总氮和各活性有机碳组分含量均表现出高海拔地区高于低海拔地区的趋势;土壤微生物生物量碳含量与土壤总有机碳含量关系密切,呈

显著的正相关。土壤微生物生物量氮含量变化趋势与土壤微生物生物量碳含量变化一致。土壤颗粒有机碳含量和土壤易氧化有机碳含量与土壤总有机碳含量之间的相关性均达到了极显著水平。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317—327
- [ 2 ] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32—38
- [ 3 ] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light fraction organic matter in soils from long term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799—1806
- [ 4 ] Biederbeck B O, Zentner R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(12): 1647—1656
- [ 5 ] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4): 669—681
- [ 6 ] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. 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*, 1995, 46: 1459—1466
- [ 7 ] Wander M M, Traina S J, Stinner B R. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1130—1139
- [ 8 ] Coleman D C, Reid C P P, Cole C V. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 1—55
- [ 9 ] 汤苍,程国栋. 青藏高原近代气候变化及其对环境的影响. 广州:广东科学技术出版社, 1998: 13—17.
- [ 10 ] 孙鸿烈,郑度. 青藏高原形成、演化与发展. 广州:广东科学技术出版社, 1998: 22—28
- [ 11 ] Garter C T, Post W M, Hanson P J, et al. Forest soil carbon inventories and aspen and spruce dominated studies of the boreal mixedwood forest. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1735—1743
- [ 12 ] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723—729
- [ 13 ] 王海淇,郭爱雪,邸雪颖. 大兴安岭林火点烧对土壤有机碳和微生物量碳的即时影响. *东北林业大学学报*, 2011, 39(5): 72—75
- [ 14 ] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究. *林业科学*, 2005, 41(1): 10—13
- [ 15 ] 杨金艳,王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. *生态学报*, 2005, 25(11): 2875—2882
- [ 16 ] 田静,郭景恒,陈海清,等. 土地利用方式对土壤溶解性有机碳组成的影响. *土壤学报*, 2011, 48(3): 338—346

- [17] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较. 植物生态学报,2004,28(5): 657—664
- [18] 马和平,郭其强,刘合满,等. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳沿海拔梯度的变化. 水土保持学报,2012,26(4):163—166
- [19] 杨玉盛,刘艳丽,陈光水,等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机C含量及分配. 生态学报,2004,24(1):1—8
- [20] Wu J G,Zhang X Q,Wang Y H,et al. The effects of land changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 19—29
- [21] Six J,Conant R T,Paul EA, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155—176
- [22] 徐侠,陈月琴,汪家社,等. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化. 应用生态学报,2008,19(3): 539—544
- [23] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth related pattern s of fine root dynamics in northern hardwood forest. *Journal of Ecology*,1996,84(2):167—176
- [24] 徐侠,王丰,栾以玲,等. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志,2008,27(7):1115—1121
- [25] Vieira F C, Bayer B C, Zanatta J A, et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(6): 195—204
- [26] Zou X M,Ruan H H,Fu Y, et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation in cubation procedure. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(10): 1923—1928
- [27] Bauhus J,Pare D C,Cote L. Effects of tree species stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(8): 1077—1089

(责任编辑:卢 萍)