

# 粤北亚热带山地森林土壤有机碳沿海拔梯度的变化

柯娴氩, 张 璐, 苏志尧<sup>①</sup> (华南农业大学林学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 选择位于南岭国家级自然保护区的广东第一峰——石坑崆, 从海拔 300 m 起到山顶部 1 900 m 范围, 每隔 100 m 高程设置 1 条 10 m × 120 m 的样带, 共 17 条样带, 研究土壤有机碳含量沿海拔梯度的变化规律及其与植被类型和凋落物层厚度的关系。结果表明, 0 ~ 20 cm 和 > 20 ~ 40 cm 土层有机碳含量均随海拔梯度变化呈极显著差异 ( $P < 0.001$ ), 并随林分类型不同而呈高度显著差异 ( $P < 0.01$ ), 土壤有机碳含量总体上呈随海拔上升而升高的变化趋势。凋落物层厚度仅对 0 ~ 20 cm 土层有机碳含量有显著影响 ( $P < 0.05$ )。可见, 海拔梯度变化是影响土壤有机碳含量的综合和主导因素, 而最表层土壤有机碳含量还易受林分因子的影响, 这些因子反映了土地利用变化及自然保护历史。该研究结果提示, 减少人类活动的干扰和保持林地适合的凋落物层厚度有助于增加森林生态系统的碳储量。

**关键词:** 土壤; 有机碳; 山地森林; 海拔梯度; 凋落物层厚度

**中图分类号:** S714; S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673 - 4831(2012)02 - 0151 - 06

**Variation of Soil Organic Carbon Content Along Altitudinal Gradient in Subtropical Montane Forest in North Guangdong.** KE Xian-dong, ZHANG Lu, SU Zhi-yao (College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** To explore distribution pattern of soil organic carbon (SOC) contents along altitudinal gradient and its relationships with vegetation type and litter thickness, 17 transects (10 m × 120 m each) were set up, one in every 100 m in altitude from 300 m to 1 900 m along a slope of the Shikengkong Mountain, the highest peak of Guangdong in the Nanling National Nature Reserve and soil litter samples collected in all the transects for analysis. Results show that SOC contents in the 0 - 20 cm and > 20 - 40 cm soil layers varied sharply ( $P < 0.001$ ) along the altitudinal gradient and between the four types of forest stands ( $P < 0.01$ ). Generally SOC content increased with elevation, and thickness of the litter layer showed significant effect only on the SOC content in the 0 - 20 cm soil layer. Obviously elevation is the leading factor that determines distribution of SOC contents, and type of the forest stand is another that affects organic carbon content in the topsoil. All these factors reflect changes in the land use and history of the nature conservation. All the findings suggest that reducing anthropogenic interference and maintaining a litter layer proper in thickness may help increase the carbon pool in the forest ecosystem.

**Key words:** soil; organic carbon; montane forest; altitudinal gradient; litter thickness

近年来, 由于土壤碳库强大的固碳潜力及其在清除大气 CO<sub>2</sub>、减缓温室效应上的重要地位, 各国学者围绕土壤有机碳和气候条件、地形因子、土壤状况、地表及植被状况以及干扰状况展开了大量研究<sup>[1-4]</sup>。研究表明, 土壤有机碳含量普遍随温度升高而减少<sup>[5-7]</sup>。但近年来另一种观点认为, 土壤有机碳的分解对气候变暖具有适应性, 随着温度的持续上升, 土壤呼吸对温度的敏感性下降, 温度升高并没有增强微生物的分解作用, 土壤有机碳并没有增加<sup>[8]</sup>。另一方面, 在一定范围内, 降水增加会增强土壤微生物活性<sup>[9]</sup>, 加速土壤有机碳分解, 使土壤有机碳含量增加<sup>[10]</sup>。但更多学者认为土壤有机碳库的大小是温度和降水综合作用的结果<sup>[11]</sup>。而在中小尺度范围内, 不同植被条件下土壤有机碳含

量也有很大变化, 这不仅与不同植被的生物量有关, 还与不同植被类型之间光合产物的分配模式、植被有机质进入土壤的方式有关。植被的物种组成在某种程度上决定了凋落物组分构成, 从而控制着土壤有机碳的分解速度。研究表明, 土壤有机碳的分解速率随植物凋落物中木质素含量的增加而呈下降趋势<sup>[12-13]</sup>。坡度、坡向和坡形等立地条件通过控制土壤水分平衡、土壤侵蚀和地质沉积等过程来影响土壤有机碳库的变化<sup>[14]</sup>。

海拔梯度是对大尺度环境下水热条件的再分

收稿日期: 2011 - 11 - 18

基金项目: 广东省林业科技创新专项(2010KJJCX012 - 02); 广东省自然科学基金(9451064201003716)

① 通信作者 E-mail: zysu@scau.edu.cn

配,它包含了温度、湿度和光照等各种环境因子<sup>[5,15]</sup>。而山地生态系统往往在垂直梯度上涵盖了跨越多个纬度地带的环境特征,为研究植被群落在较为统一的大尺度气候条件下沿山地海拔梯度的植物分布格局提供了良好的基础<sup>[16-17]</sup>。目前,国内外开展得较多的是山地植被分布模式与气候、地形因子、土壤状况和干扰关系的研究,但关于土壤有机碳在山地分布研究则鲜见<sup>[18]</sup>。已有研究表明随着海拔的增加,山地温度逐渐降低,从而影响了土壤中微生物的活性,使微生物对凋落物的分解效率下降,导致土壤有机碳累积增加<sup>[19]</sup>。此外,土壤有机碳含量和稳定性还受植被的影响<sup>[20]</sup>。然而,关于土壤有机碳与凋落物层厚度的相关性研究也不多。作为广东省第一高峰,位于南岭国家级自然保护区的石坑崆因其垂直梯度较大,在反映土壤有机碳随环境因子的变化中有一定代表性,是土壤有机碳分布随山地海拔梯度变化的良好研究对象。

因此,在全球变化背景下,笔者对广东第一峰——石坑崆的土壤有机碳含量沿海拔梯度的变化进行研究,并分析凋落物层厚度和人为干扰对土壤有机碳含量的影响机制,探讨如何通过森林保育和改善森林经营管理提高森林生态系统的固碳能力。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于南岭山地中部的广东南岭国家级自然保护区(24°37'~24°57' N,112°30'~113°04' E)的主峰石坑崆。南岭国家级自然保护区地貌以中山山地为主,山脉多为西北—东南走向,主要由花岗岩、变质岩和砂岩组成,海拔 1 000 m 以上的山峰有 30 多座,最高峰为石坑崆。石坑崆海拔 1 902 m,为广东第一峰。该区属亚热带季风气候区,年平均气温 11.3 °C,最冷月(1 月)平均气温 4.4 °C,最热月(7 月)平均气温 16.6 °C,极端最高气温 24.5 °C(1981-07-19),极端最低气温 -11.5 °C(1983-12-01),年均降水量 2 746 mm<sup>[21]</sup>,水平地带性土壤为红壤,土壤类型随海拔高度不同而异<sup>[22]</sup>。海拔 900 m 以下主要为山地红壤,土层深厚;海拔 900~1 800 m 处分布有山地黄壤,是保护区主要的土壤类型;海拔 1 800 m 以上至山顶,局部形成山地灌丛草甸土,土层浅薄。保护区森林覆盖率达 97%,保存着大面积原生林和原生性较强的天然常绿阔叶林,是广东省目前保存较好、面积较大的自然生态系统和物种宝库<sup>[23]</sup>。

### 1.2 样地设置与植被调查

在海拔 300~1 900 m 之间,每升高 100 m 设置 1 条水平样带,共 17 条样带。样带长 120 m,宽 10 m,分为 12 个 10 m×10 m 的样方单元。调查面积共计 20 400 m<sup>2</sup>。在每个 10 m×10 m 样方单元内进行每木调查,测定胸径( $D_{b,h}$ )≥3 cm 的所有立木,记录种名、胸径、树高、冠幅和枝下高。同时,分别用手持式 GPS、气压式海拔表、坡度计、郁闭度测定仪等仪器实测样方的地理坐标、海拔、坡度、坡向、林冠郁闭度和凋落物层厚度等环境因子。凋落物层厚度按照实测值的中位数共分 4 级:0.5~2、>2~4、>4~6 和 4、>6 cm。

### 1.3 土壤采集与分析

在每个调查样带采集 3 个混合土壤样本,每个土壤样本分别采集于 4 个样方单元,由下而上分层采集 >20~40 和 0~20 cm 混合土样各 1 kg 装入干净采样袋并作好标记,待分析。土壤有机碳含量采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定<sup>[24]</sup>,每样带对应土层的土壤有机碳含量为 3 个样本测定值的平均值。野外调查和取样于 2010 年 8 月完成。

### 1.4 数据分析

利用 Statistica 统计软件(Version 8.0,美国 Statsoft 公司)对各海拔梯度土壤有机碳含量进行单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA),并分析土壤有机碳含量与海拔梯度之间的相关性。应用 PC-ORD 软件(Version 6.0)中双向指示种分析(two-way indicator species analysis, TWINSpan)法对石坑崆各样带森林群落进行聚类分析,并根据群落类型划分结果比较不同植被类型和凋落物层厚度等级土壤有机碳含量间的差异(单因素方差分析, KW-H 检验法),探讨海拔梯度、植被类型、凋落物层厚度等因子对土壤有机碳含量分布的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量随海拔梯度的变化

石坑崆森林 0~40 cm 土壤有机碳含量在海拔梯度上存在较大的变异性,最大值为 74.88 g·kg<sup>-1</sup>,出现在样带 13(海拔 1 500 m),最小值为 9.77 g·kg<sup>-1</sup>,出现在样带 1(海拔 300 m),变异系数在 3.71%~128.94% 之间(表 1)。

石坑崆 0~20 和 >20~40 cm 土壤有机碳含量随海拔梯度的变化趋势基本一致,皆表现为在样带 1(海拔 300 m)出现谷值,其土壤有机碳含量在各海拔梯度中最低,并在样带 2(海拔 400 m)和样带 9(海拔 1 100 m)出现较低值(图 1)。

表1 样地概况及各样带土壤有机碳含量分布

Table 1 General information of and distribution of SOC contents (0-40 cm) in the transects along an altitudinal gradient

样带	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	林冠 郁闭度	林分物种 丰富度	土壤有机碳含量		
						平均值/(g · kg <sup>-1</sup> )	标准误/(g · kg <sup>-1</sup> )	变异系数/%
1	300	58	N	0.76	50	9.77	0.34	5.95
2	400	32	NE	0.69	21	13.33	4.33	56.30
3	500	17	NE	0.59	38	41.03	12.21	51.54
4	600	32	E	0.72	42	15.28	2.64	29.93
5	700	56	N	0.52	39	43.84	19.91	78.67
6	800	45	SW	0.81	57	32.23	1.40	7.50
7	900	33	NW	0.87	53	29.46	16.92	99.47
8	1 000	42	NE	0.79	51	54.67	6.87	21.78
9	1 100	78	SW	0.76	40	18.50	13.77	128.94
10	1 200	38	NW	0.85	50	25.19	3.85	26.44
11	1 300	33	E	0.80	49	37.91	4.72	21.57
12	1 400	41	W	0.94	45	31.83	2.86	15.55
13	1 500	51	NW	0.77	34	74.88	6.73	15.57
14	1 600	57	SW	0.85	24	34.05	5.02	25.56
15	1 700	30	NE	0.73	22	58.03	5.74	17.13
16	1 800	34	SW	0.45	27	45.99	2.05	7.73
17	1 900	33	N	0	8	44.39	0.95	3.71

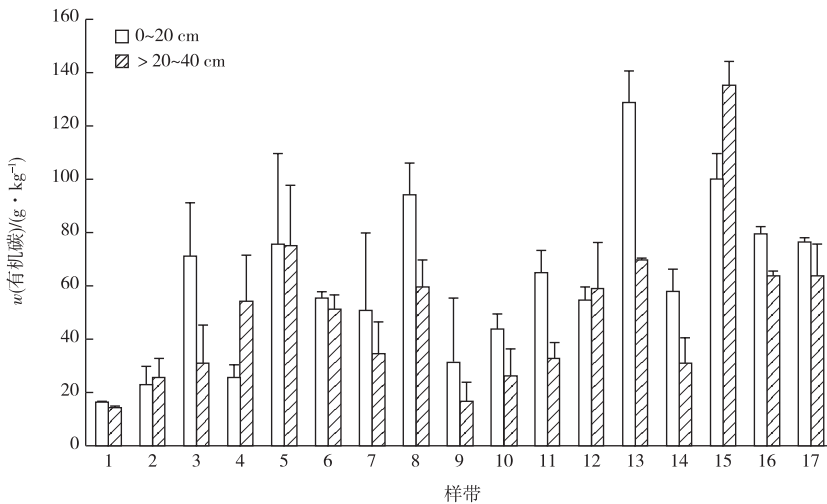


图1 石坑崃林区不同土层土壤有机碳含量随海拔梯度的变化

Fig.1 Variation of SOC contents in soil layers with the altitude gradient

这可能与样带1和样带2位于南岭国家级自然保护区的试验区,而样带9靠近林区公路旁,受人为干扰较多有关。其他样带都位于南岭国家级自然保护区核心地带,目前的保护现状较好,受人为因素的影响也较少。样带1中森林群落的平均胸径和平均树高分别只有6.69 cm和6.38 m。而石坑崃0~20和>20~40 cm土壤有机碳含量分别在样带13(海拔1 500 m)和样带15(海拔1 700 m)出现峰值。尤其是样带13位于保护区核心区小黄山,平均胸径(53.37 cm)和平均树高(11.66 m)都较大,森林群落长势良好。另外,林冠郁闭度、坡形、腐殖质层厚度和凋落物层厚度等环境因子在一定程度上

弱化了海拔对石坑崃森林群落物种丰富度的影响,使物种丰富度沿海拔梯度的变化特征在某些样带不明显或不太符合规律。

17条样带土壤有机碳的方差分析结果显示,各样带0~20和>20~40 cm土壤有机碳含量随海拔梯度变化呈极显著差异( $P < 0.001$ )。

石坑崃森林土壤有机碳含量( $y$ )与海拔( $x$ )对数转换的相关性分析表明,0~20 cm土壤有机碳含量与海拔间呈显著线性正相关关系,回归方程为  $\lg y = -0.7879 + 0.7504 \lg x$  ( $r = 0.5203$ ,  $P < 0.0001$ ), >20~40 cm土壤有机碳含量与海拔间也呈显著线性正相关关系,回归方程为  $\lg y =$

$-0.3801 + 0.5804 \lg x$  ( $r = 0.4088$ ,  $P < 0.01$ ), 石坑崮森林土壤有机碳含量整体表现为随海拔增

加而增加趋势(图2)。

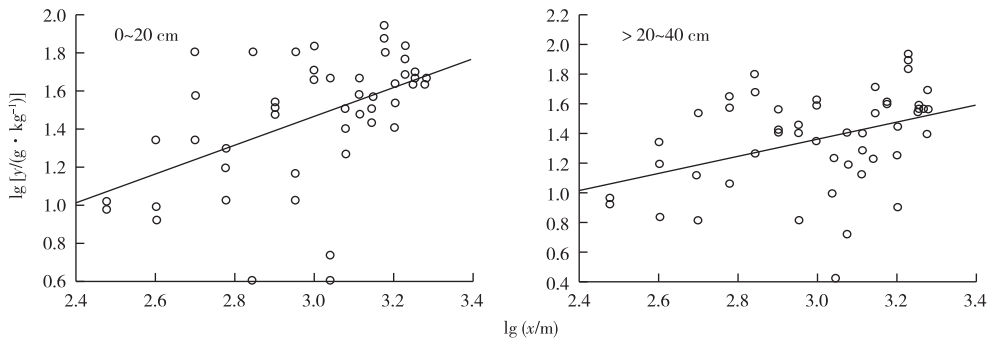


图2 石坑崮林区土壤有机碳含量(y)与海拔高度(x)之间的相关性分析  
Fig.2 Correlation analysis of SOC contents in the soil with elevation

### 2.2 林分类型对土壤有机碳含量的影响

采用 TWINSPLAN 法划分的4种林分类型(表2)大体上随海拔梯度从低到高分布,基本反映了石坑崮植物群落随海拔梯度的分布特征。虽然 TWINS-

PAN 分类是依据17条样带的植物群落矩阵信息进行的,但由于特定样方的植物群落物种组成与特定的生境类型相对应,因此,植物群落分类结果能反映海拔梯度。

表2 基于 TWINSPLAN 法划分的4种林分类型特征

Table 2 Characteristics of the four forest stands classified with TWINSPLAN

林分类型	样带	林分立地情况	优势树种	胸径/cm	树高/m
1	1~2,5	属保护区的试验区,海拔较低,人为干扰较大	黎蒴( <i>Castanopsis fissa</i> ),桂花( <i>Osmanthus fragrans</i> ),野漆树( <i>Toxicodendron sylvestris</i> )	13.40 ± 2.04	7.86 ± 0.50
2	3~4,6~7,9	属保护区的缓冲区,有一定的人为干扰	榿木( <i>Loropetalum chinense</i> ),拟赤杨( <i>Alniphyllum fortunei</i> ),大果马蹄荷( <i>Exbucklandia tonkinensis</i> )	43.70 ± 7.63	10.90 ± 0.70
3	8,10~14	属保护区的核心地带,海拔较高,人为干扰少	华南五针松( <i>Pinus kwangtungensis</i> ),五列木( <i>Pentaphylax euryoides</i> ),白锥( <i>Castanopsis fabri</i> )	41.31 ± 6.04	7.35 ± 0.42
4	15~17	接近石坑崮山顶,为保护区的旅游开放带,受人为干扰严重	野鸦椿( <i>Euscaphis japonica</i> ),圆锥绣球( <i>Hydrangea paniculata</i> )	1.02 ± 0.27	1.93 ± 0.34

4种林分类型0~20cm土壤有机碳含量与>20~40cm土层也较一致,均随海拔梯度变化呈高度显著差异( $P < 0.01$ ),表明0~20和>20~40

cm土壤有机碳含量均受植被类型影响,并呈现海拔梯度分布的特性(图3)。

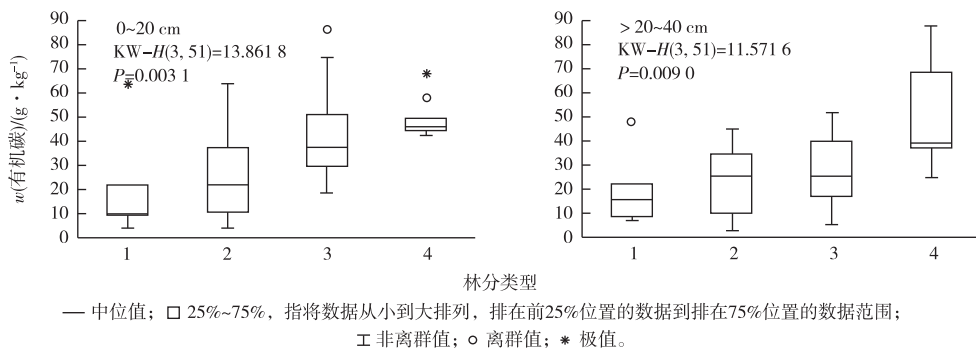


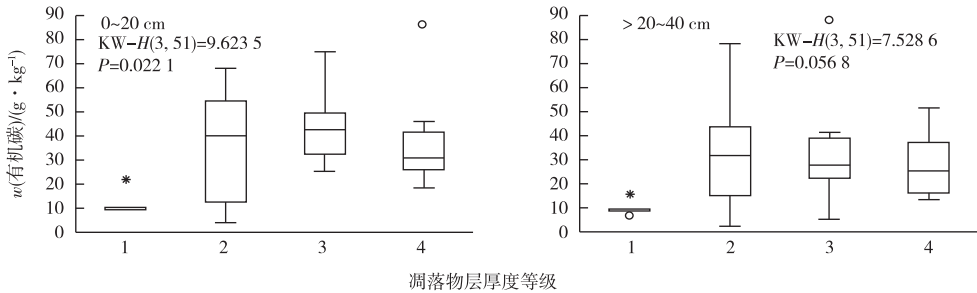
图3 林分类型对土壤有机碳含量的影响

Fig.3 Effect of type of the forest stands on SOC contents in the soil

— 中位值; □ 25%~75%, 指将数据从小到大排列, 排在前25%位置的数据到排在75%位置的数据范围;  
工 非离群值; ○ 离群值; \* 极值。

### 2.3 凋落物层厚度对土壤有机碳含量的影响

依据凋落物层厚度等级划分的4种类型样方单元,其0~20 cm土壤有机碳含量与>20~40 cm土层不太一致。其中,不同厚度凋落物层样带0~20 cm土壤有机碳含量存在显著差异( $P < 0.05$ ),而



— 中位值; □ 25%~75%, 指将数据从小到大排列, 排在25%位置的数据到排在75%位置的数据范围;  
工 非离群值; ○ 离群值; \* 极值。1~4级指凋落物层厚度分别为0.5~2、>2~4、>4~6和>6 cm。

图4 凋落物层厚度对土壤有机碳含量的影响

Fig. 4 Effect of thickness of the litter layer on SOC contents in the soil

### 3 讨论

研究表明,石坑崮土壤有机碳含量整体呈随海拔升高而增加的趋势,与祁连山青海云杉林表层土壤有机碳<sup>[25]</sup>和庐山北坡土壤有机碳<sup>[26]</sup>的分布规律一致。这可能是因为随着海拔升高,山地土壤水热条件的变化导致土壤呼吸作用速率逐渐减慢<sup>[27-30]</sup>,土壤有机碳含量总体上也表现出依次增加分布特点。0~20和>20~40 cm土壤成分分析结果进一步显示,4种植被类型0~20和>20~40 cm土壤有机碳含量均表现为不同海拔高度间差异显著,反映影响石坑崮土壤有机碳含量分布变化的主导因子是海拔高度,并同时受植被状况和人为干扰因素的影响。人为干扰会破坏土壤的团聚体结构,增加土壤孔隙度,改善湿度和温度条件,从而增强微生物活性,使微生物呼吸作用及其对有机质的矿化作用增强,并最终导致土壤有机碳以CO<sub>2</sub>的形式重新进入大气中<sup>[19]</sup>,从而减少土壤有机碳的积累。此外,人为干扰还会使土壤失去植被的保护,造成水土流失,使进入土壤的腐殖质减少。

此外,研究还发现,0~20 cm土壤有机碳含量在4个凋落物层厚度等级间差异显著,并且在3级厚度凋落物层达最大值。这可能是因为过薄的凋落物层无法有效防止土壤水分蒸发,也无法阻挡降水对地表微生物群落的冲刷;而过厚的凋落物层虽然能有效保持土壤水分和减少降水对地表微生物群落的直接冲刷,但会阻挡太阳热能的进入,致使

>20~40 cm土壤有机碳含量差异不显著( $P = 0.0568$ ) (图4),表明作为土壤腐殖质和土壤有机碳主要来源的枯枝落叶对0~20 cm土壤有机碳含量影响更大,并在3级厚度凋落物层达最大值,在1级厚度凋落物层达最小值。

土壤温度过低<sup>[12,31-34]</sup>。因此,凋落物层过薄或过厚都容易导致土壤微生物群落种类和数量较少,阻碍枯枝落叶的分解和土壤有机碳的归还。而适当厚度的凋落物层既能有效防止降水冲刷,又能为土壤微生物群落的生活和繁殖提供合适的水热条件,更有利于微生物的呼吸作用,促进枯枝落叶的分解<sup>[12,35-36]</sup>,从而使土壤有机碳含量增加。

在全球气候变化背景下,碳的封存和清除一直是各国政府和科学界关注的焦点。作为陆地生态系统最大的碳库,森林土壤碳含量的增加不仅为植被生长提供碳源,维持良好的土壤结构,而且有利于降低大气CO<sub>2</sub>水平,减缓气候变化。因此,在经营管理森林资源时,应充分考虑采取保护措施,减少人为干扰对森林植被和土壤的影响;同时,在不引起森林火灾的情况下,维持合理的林下凋落物和粗木质残体水平,更有利于促进土壤微生物的分解作用,为土壤有机碳的形成提供稳定的保障,从而促进土壤有机碳含量的增加。

#### 参考文献:

- [1] 高晟,吴永波,薛建辉,等. 贵州省溶岩区植被类型对凋落物量、土壤有机碳及速效养分的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(5):7-12.
- [2] 刘姝媛,刘月秀,叶金盛,等. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J]. 应用生态学报,2010,21(8):1981-1985.
- [3] 李正才,徐德应,傅懋毅,等. 北亚热带土地利用变化对土壤有机碳垂直分布特征及储量的影响[J]. 林业科学研究,2007,20(6):744-749.
- [4] 李龙波,涂成龙,赵志琦,等. 黄土高原不同植被覆盖下土壤有

- 机碳的分布特征及其同位素组成研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 441 - 449.
- [5] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 土壤, 2011, 43(4): 515 - 524.
- [6] 潘新丽, 林波, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1637 - 1643.
- [7] FISSORE C, GIARDINA C P, KOLKA R K, *et al.* Temperature and Vegetation Effects on Soil Organic Carbon Quality Along a Forested Mean Annual Temperature Gradient in North America [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(1): 193 - 205.
- [8] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301 - 2311.
- [9] 刘洪升, 刘华杰, 王智平, 等. 土壤呼吸的温度敏感性[J]. 地理科学研究, 2008, 27(4): 51 - 60.
- [10] MEERSMANS J, VAN WESEMAEL B, GOIDTS E, *et al.* Spatial Analysis of Soil Organic Carbon Evolution in Belgian Croplands and Grasslands, 1960—2006 [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 466 - 479.
- [11] 张凡, 李长生. 气候变化影响的黄土高原农业土壤有机碳与碳排放[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 566 - 572.
- [12] 曾锋, 邱治军, 许秀玉. 森林凋落物分解研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 239 - 243.
- [13] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(6): 1832 - 1837.
- [14] TAN Z X, LAL R, SMECK N E, *et al.* Relationships Between Surface Soil Organic Carbon Pool and Site Variables [J]. *Geoderma*, 2004, 121(3/4): 187 - 195.
- [15] 毕珍, 石辉, 许五弟, 等. 四川盆地森林土壤的有机碳储量及其空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 83 - 87.
- [16] 安晓红, 吕厚远. 贡嘎山东坡表土植体组合的海拔分布及其与植被的关系[J]. 第四纪研究, 2010, 30(5): 934 - 945.
- [17] 刘亚兰, 郭汝清, 孙书存. 中国亚热带山地植被垂直带分布对气候季节性的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3912 - 3922.
- [18] SIX J, JASTROW J D. Organic Matter Turnover [M] // LAL R. *Encyclopedia of Soil Science*. New York: Marcel Dekker Inc, 2002: 936 - 942.
- [19] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 森林生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 释放随海拔梯度的变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4678 - 4685.
- [20] 吴建国, 艾丽, 田自强, 等. 祁连山中部土壤颗粒组分有机质碳含量及其与海拔和植被的关系[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2358 - 2365.
- [21] 黄少敏, 龙志强, 张金泉. 广东南岭自然保护区地貌 [M] // 庞雄飞. 广东南岭国家级自然保护区生物多样性研究. 广州: 广东科技出版社, 2003: 14 - 27.
- [22] 张金泉. 广东省自然保护区 [M]. 广州: 广东省旅游出版社, 1997: 255 - 258.
- [23] 广东省科学家南岭森林生态考察团. 广东南岭森林生态考察报告 [J]. 生态科学, 1993, 12(1): 3 - 13.
- [24] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1675 - 1681.
- [25] 何志斌, 赵文智, 刘鸽, 等. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2572 - 2577.
- [26] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1675 - 1681.
- [27] TOWNSEND A R, VITOUSEK P M, TRUMBORE S E. Soil Organic Matter Dynamics Along Gradients in Temperature and Land Use on the Island of Hawaii [J]. *Ecology*, 1995, 76(3): 721 - 733.
- [28] TRUMBORE S E, CHADWICK O A, AMUNDSON R. Rapid Exchange Between Soil Carbon and Atmospheric Carbon Dioxide Driven by Temperature Change [J]. *Science*, 1996, 272(5260): 393 - 396.
- [29] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 197 - 205.
- [30] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 348 - 354.
- [31] FACELLI J M, PICKETT S T A. Plant Litter: Its Dynamics and Effects on Plant Community Structure [J]. *The Botanical Review*, 1991, 57(1): 1 - 32.
- [32] FACELLI J M, PICKETT S T A. Plant Litter: Light Interception and Effects on an Old-Field Plant Community [J]. *Ecology*, 1991, 72(3): 1024 - 1031.
- [33] 崔建国, 谭娟. 辽西油松蒙古栎林下凋落物现存量及持水能力的研究 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 154 - 158.
- [34] XIONG S, NILSSON C. The Effects of Plant Litter on Vegetation: A Meta-Analysis [J]. *Journal of Ecology*, 1999, 87(6): 984 - 994.
- [35] ARUNACHALAM A, ARUNACHALAM K. Influence of Gap Size and Soil Properties on Microbial Biomass in a Subtropical Humid Forest of North-East India [J]. *Plant and Soil*, 2000, 223(1/2): 185 - 193.
- [36] SAYER E M. Using Experimental Manipulation to Assess the Roles of Leaf Litter in the Functioning of Forest Ecosystems [J]. *Biological Reviews*, 2006, 81(1): 1 - 31.

作者简介: 柯娴氩(1986—), 女, 广东珠海人, 博士生, 主要从事森林生态学和生物多样性方面的研究。E-mail: radon\_ke@126.com