

滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究

张勇^{1,2}, 史学正^{1,2*}, 赵永存¹, 于东升¹, 王洪杰¹, 孙维侠¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 土壤有机碳(SOC)库在陆地生态系统中具有重要作用. 由于土壤剖面数量和采用的土壤图比例尺等的限制, 目前土壤有机碳库估算尚存在很大不确定性. 为了提高 SOC 库估算的精确性, 利用 798 个土壤剖面及 1:50 万土壤图估算了滇黔桂地区(云南省、贵州省和广西壮族自治区)的 SOC 储量, 并采用逐步回归分析和通径分析方法分析了影响 SOC 密度的主要因子. 结果表明, 滇黔桂地区表土层(0~20 cm)和土壤剖面(0~100 cm)的 SOC 储量分别为 4.39 Pg 和 10.91 Pg; SOC 密度分别为 56.2 Mg·hm⁻² 和 139.8 Mg·hm⁻², 高于全国平均水平. 环境因子(海拔、经度、纬度、气温和降雨)、成土母质和土地利用方式对表土层和土壤剖面 SOC 密度变异性的解释度分别为 37.9% 和 30.7%; 环境因子为影响 SOC 密度的主要因子. 环境因子中, 气温对 SOC 密度的影响大于降雨, 其中气温和降雨的变化分别主要由海拔和纬度的变化引起的. 除气温和降雨外, 还有其它随海拔或经纬度而变化的因子也对 SOC 密度产生显著影响, 这种影响要大于降雨的影响.

关键词: 土壤有机碳; 碳储量; 碳密度分布图; 影响因子

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2314-06

Estimates and Affecting Factors of Soil Organic Carbon Storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi Region of China

ZHANG Yong^{1,2}, SHI Xue-zheng^{1,2}, ZHAO Yong-cun¹, YU Dong-sheng¹, WANG Hong-jie¹, SUN Wei-xia¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) plays a key role in the terrestrial eco-systems. However, there is a large variation in SOC estimates at regional and global scales. In order to improve the accuracy of SOC estimates, the SOC storage in Yunnan-Guizhou-Guangxi Region of China (include Yunnan Province, Guizhou Province and Guangxi Zhuang Municipality) was estimated using 798 soil profiles and 1:500 000 digitized soil map, and the dominant affecting factors on SOC density were also discussed employing stepwise regression and path analysis. Results showed that the SOC storages estimated in the 0-20 cm and 0-100 cm layers are 4.39 Pg and 10.91 Pg, respectively; and the corresponding SOC density are 56.2 Mg·hm⁻² and 139.8 Mg·hm⁻², respectively. The mean SOC density of Yunnan-Guizhou-Guangxi Region is higher than that of China. The environmental factors (including altitude, longitude, latitude, annual mean precipitation and annual mean temperature), soil parent materials and land use could explain 37.9% and 30.7% of the variability of SOC density to the upper 20 cm and 100 cm, respectively. The environmental factors are the dominant affecting factors of SOC density. The effect of temperature is more important than that of precipitation, and the temperature and precipitation mainly vary with altitude and latitude, respectively. Except for temperature and precipitation, there are also other factors varying with altitude, longitude and latitude significantly affect SOC density. And the effects of other factors are more important than that of precipitation.

Key words: soil organic carbon (SOC); carbon storage; map of carbon density; affecting factors

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)作为农田系统中土壤肥力的重要组成部分,在土壤质量提高、作物产量维持与质量保证和水质净化方面都起到重要作用^[1],同时 SOC 库也是陆地碳库的主要部分,在全球碳循环中扮演着重要角色. SOC 库是陆地植被碳库的近 3 倍^[2],是全球大气碳库的近 2 倍^[3]. 由于 SOC 的巨大库容,其较小幅度的变化就可能影响全球气候变化. 因此,准确估算 SOC 储量对于定量碳截存和碳通量变化具有重要的理论和现实意义.

土壤本身是一个复杂的不均匀三维结构体,在空间上呈现复杂的镶嵌性,并与气候及陆地生物发

生复杂的相互作用, SOC 分布存在极大的空间变异性. 目前 SOC 储量的估算方法主要有土壤类型法、生命带法(模型法)和植被类型法,其中土壤类型法应用最为广泛^[4~6]. SOC 的估算存在很大的差异,比如对全球 SOC 库的估算结果从 710~3 000 Pg^[5, 6],对中国 SOC 库的估算结果从 50~185.7 Pg^[7~9],相

收稿日期: 2007-08-13; 修订日期: 2007-10-16

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(40621001); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB407206); 国家科技基础条件平台项目(2006DKA32300-15)

作者简介: 张勇(1977~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为地理信息系统和土壤资源管理, E-mail: zhangyongjieff@163.com
* 通讯联系人, E-mail: xzshi@issas.ac.cn

差3倍多.SOC估算的差异主要是由于估算方法、土壤剖面数目和图件比例尺不同而引起的.

森林作为陆地生态系统的主体,是地球生物圈的重要组成部分.虽然全球森林面积仅占陆地面积的27%,但森林土壤碳库却储存了全球土壤碳储量的40%左右^[10].西南地区,包括云南省、贵州省、四川省、西藏自治区和重庆市,作为中国第二大林区,拥有中国28%的森林^[11].就地区SOC密度而言,西南地区是中国SOC密度最高的地区之一^[12,13].西南地区山地广布,地形复杂,土壤类型即有水平地带性,又有垂直地带性,SOC的估算具有很大的不确定性.但目前对西南地区的SOC储量估算大多基于较小比例尺图件(1:400万或1:100万)^[7,13,14],更加详细的估算还鲜见报道.因此,利用较大比例尺图件对西南地区的SOC进行准确估算是非常必要的.本研究目的在于利用1:50万土壤图对中国西南地区的云南省和贵州省及与之相邻的广西壮族自治区(简称滇黔桂地区)表土层(0~20 cm)和土壤剖面(0~100 cm)的SOC密度及储量进行估算,并分析SOC的空间分布特征及主要控制因子,旨在为我国土壤碳库和碳平衡研究提供理论和参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域为滇黔桂地区(图1),包括云南省、贵州省和广西壮族自治区,位于20°53′48″~29°15′00″N和97°31′52″~112°03′25″E之间,面积为80.6万km²,约占中国陆地面积的8.4%.该区地势西北高,东南低,山地面积约占78%,最高点为位于云南省的梅里雪山主峰,海拔6740 m.包括横断山纵谷区、云南高原、贵州高原和广西盆地,具有世界闻名的喀斯特地貌.其中横断山纵谷区和云南高原位于云南省,以元江谷地、洱海和金沙江南部一段为界.该区处于亚热带季风气候区,处于低纬度,海拔变化悬殊,气候类型多样,气候的区域差异和垂直变化十分明显.植物资源丰富,森林覆盖率较高,为中国的主要林区之一.该区土壤具有明显的水平地带性和垂直地带性.水平地带性表现为从南向北的砖红壤、赤红壤、红壤的依次更替,垂直地带性表现为从燥红土、红壤、黄壤、黄棕壤、棕壤、暗棕壤、棕色针叶林土、亚高山草甸土和高山寒漠土的依次更替,另外还有大面积的石灰岩土、紫色土和水稻土分布.

1.2 数据来源

土壤剖面数据来源于文献[15~17]中记载的共

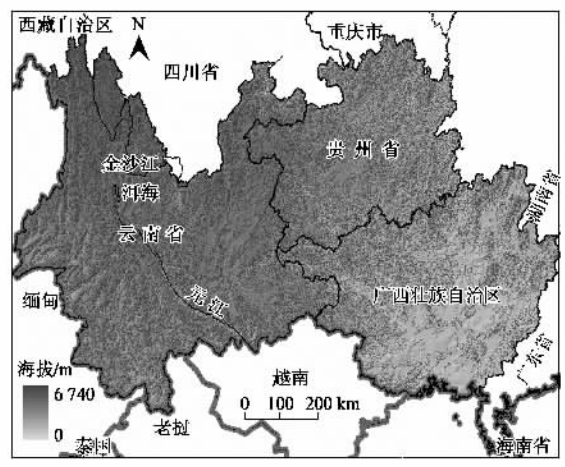


图1 滇黔桂地区(云南省、贵州省和广西壮族自治区)地理位置及地貌
Fig.1 Geographic location and landform of Yunnan-Guizhou-Guangxi Region of China

798个典型土壤剖面,其中有265个土壤剖面被《中国土种志》收录.根据中国土壤发生分类系统(genetic soil classification of China, GSCC),798个土种分别归属于304个土属,60个亚类和26个土类.基于剖面数据,建立了土壤剖面数据库,其中包括土壤类型、土壤理化性质和采样点位置(经纬度)等信息,其中698个还包括成土母质和土地利用方式信息.空间数据来自广西壮族自治区1:50万土壤图(1990)、贵州省1:50万土壤图(1992)和云南省1:50万土壤图(1992).土壤图的制图单元系统也是基于GSCC,最小分类单元为土属.

DEM数据来自国家基础地理信息系统全国1:25万数据库(1995),栅格大小为100 m×100 m.年平均气温、年平均降雨量数据来自中国农业科学院农业自然资源与农业区划研究所中国生态环境背景层面建设项目完成的1000 m×1000 m栅格数据(2004),为1980~1999年的年平均值.利用ArcGIS9.0软件的空间分析模块从DEM栅格数据中获取各剖面点的海拔数据,从年平均气温、年平均降雨量数据中分别获取各剖面点的年平均气温和年平均降雨量.

1.3 SOC储量估算及密度分布表达

首先按文献[14]的公式计算每个土壤剖面的碳密度,表土层为0~20 cm,土壤剖面为0~100 cm,对于没有容重记载的剖面,采用同一土属的其它剖面相应土层的平均容重代替.然后利用基于土壤学专业知识(pedological professional knowledge-based, PKB)的方法^[18,19]将土壤剖面数据库与数字化土壤图连

接,建成基于土壤学专业知识的土壤数据库.该数据库即可实现 SOC 密度的空间表达,并被用来估算 SOC 储量和面积加权 SOC 密度.基于 GSCC,从土属到土类,以土壤图上各图斑所代表的土壤面积为面积来源计算各土壤类型和全区面积加权 SOC 密度和储量.

1.4 统计分析

利用统计软件 SPSS13.0,采用逐步回归方法和通径分析方法,对具有成土母质和土地利用方式信息的 698 个土壤剖面进行分析.所采用的自变量有海拔(m)、年平均气温(℃)、年平均降雨量(mm)、经度(°)、纬度(°)、成土母质和土地利用方式.其中成土母质和土地利用方式为分类变量,采用哑变量为其赋值.根据剖面点的数量选择主要成土母质和土地利用方式进行回归分析,共有 12 种成土母质和 9 种土地利用方式.以上分析要求因变量呈正态分布.剖面点 SOC 密度呈正偏态分布,经对数变化后,近于正态分布.

2 结果与讨论

2.1 土壤有机碳密度及储量

利用 1:50 万土壤图统计的滇黔桂地区土壤分布面积为 $78.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占三省区总国土面积($80.64 \times 10^6 \text{ hm}^2$)的 97%.表土层和土壤剖面 SOC 总储量分别为 4.39 ~ 10.91 Pg,面积加权平均 SOC 密度分别为 $56.2 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $139.8 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$;表土层 SOC 储量占土壤剖面的 40.2%(表 1).与文献[13]利用 1:100 万全国土壤图估算的结果相比较,该地区土壤面积约占全国总土壤面积的 8.4%,土壤剖面 SOC 储量占全国 SOC 储量的 12.2%,SOC 密度比全国的平均值($96.0 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)高 45.6%;从区域水平上来看,该研究区域 SOC 密度仅次于东北地区的平均值($189.0 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$),位居全国第二.

该研究区域的 26 个土类中,15 个分布面积较大,占总土壤面积的 99.2%,其分布面积和 SOC 密度及储量见表 1.红壤 SOC 储量所占比例最大,占全区总储量的 21%以上,但 SOC 密度比全区平均水平低 9% ~ 15%;其次为石灰岩土,储量占全区的 15%,SOC 密度比全区平均水平高 26%;黄棕壤、赤红壤和黄壤各占 10%左右,黄棕壤 SOC 密度为全区平均水平的 1.5 倍,而赤红壤和黄壤稍低于全区平均水平.水稻土的 SOC 储量约占全区总储量的 8%,土壤剖面 SOC 密度比全区平均水平高 17%,而表土层却比全区平均水平低 8%.紫色土面积虽占全区土壤总面积的 9%,但由

于 SOC 密度仅为全区平均水平的 50%左右,其 SOC 储量不足全区总储量的 4.6%.

对滇黔桂地区各土类 SOC 密度的估算结果与文献[12, 13]估算的全国平均值之间有一定的差异(表 1),如对赤红壤、砖红壤、黄壤和紫色土 SOC 密度的估算结果与文献[12, 13]估算的全国平均值比较接近;而对棕色针叶林土、暗棕壤和棕壤的估算结果则远高于文献[12, 13]估算的全国平均值,为全国平均值的 2 倍以上或近 2 倍;对粗骨土的估算结果远低于文献[12, 13]估算的结果.这与土壤的分布有关.赤红壤、砖红壤、黄壤和紫色土,在本研究区内的分布面积占全国相应土类的比例较大,为 26.4% ~ 52.9%,SOC 密度的估算结果与全国平均水平相差不大;而棕色针叶林土、暗棕壤、棕壤和粗骨土在本研究区内的分布面积占全国相应土类的比例较小,低于 10.5%,SOC 密度的估算结果与全国平均水平相差较大.

2.2 土壤有机碳密度分布

表土层和土壤剖面的 SOC 密度空间分布特征基本相似,均具有明显的区域性特征.土壤剖面 SOC 密度空间分布见图 2.云南省西部横断山区 SOC 密度比其它地区总体较高,呈北高南低,横断山区中部的部分地区及北部部分山谷 SOC 密度最低.云南省东部的云南高原 SOC 密度普遍偏低,除北部部分地区 SOC 密度较高外,其它地区大多在全区平均水平以下.贵州高原 SOC 密度高值与低值呈现离散型相间分布,其中北部小部分地区(遵义市赤水县和习水县部分地区)SOC 密度分布较为均匀.广西盆地 SOC 密度由西北到东南呈现两边低中间高的趋势,中部自西南至北部一带 SOC 密度最高.

2.3 环境因子、成土母质和土地利用对土壤有机碳密度的影响

利用逐步回归和通径分析方法,对该研究区域 698 个具有成土母质和土地利用方式信息的土壤剖面进行分析,探讨影响 SOC 密度的主要因子.由于海拔、经度、纬度、年平均气温和年平均降雨量之间存在较强的相关性(表 2),在进行回归分析时可能出现共线性现象,采用逐步回归分析不能体现各影响因子对 SOC 密度的贡献大小,因此,首先采用逐步回归分析比较 5 个环境因子与成土母质和土地利用方式对 SOC 密度的影响大小,再采用通径分析方法对各环境因子的贡献大小进行比较.

采用逐步回归分析,利用判定系数比较 5 个环境因子、成土母质和土地利用方式对 SOC 密度的影响大

表 1 滇黔桂地区土壤有机碳(SOC)储量和密度

Table 1 Soil organic carbon (SOC) storage and density in Yunnan-Guizhou-Guangxi Region of China										
土纲	土类	滇黔桂地区						全国土壤剖面		滇黔桂地区
		面积 × 10 ⁶ /hm ²	表土层(0 ~ 20 cm)		土壤剖面(0 ~ 100 cm)		(0 ~ 100 cm)		占文献[13]全国	
			SOC 储量 /Pg	SOC 密度 /Mg•hm ⁻²	SOC 储量 /Pg	SOC 密度 /Mg•hm ⁻²	SOC 密度/Mg•hm ⁻²		同一土类面积的 百分比/%	
							文献[12]	文献[13]		
淋溶土	棕色针叶林土	0.71	0.16	230.1	0.48	681.8	—	247.4	6.7	
	暗棕壤	0.95	0.22	234.6	0.44	468.8	151.2	187.6	2.5	
	棕壤	2.38	0.27	113.5	0.70	295.7	84.6	128.1	9.4	
	黄棕壤	5.20	0.44	84.1	1.15	220.2	112.2	131.2	23.7	
高山土	亚高山草甸土	0.36	0.04	98.5	0.11	308.6	—	—	—	
	山地草甸土	0.26	0.03	106.9	0.04	162.9	—	269.1	69.1	
人为土	水稻土	6.06	0.31	51.8	0.99	163.0	97.9	111.4	13.3	
	红壤	19.42	1.00	51.3	2.32	119.4	82.5	95.8	30.9	
铁铝土	赤红壤	10.93	0.44	39.9	1.16	106.5	94.7	91.5	52.9	
	砖红壤	1.11	0.02	22.1	0.09	84.4	88.5	92.3	26.4	
	黄壤	11.37	0.52	45.8	1.12	98.6	102.5	105.1	46.3	
	紫色土	6.96	0.20	29.2	0.46	66.5	66.8	55.4	30.7	
初育土	粗骨土	1.71	0.02	14.5	0.04	26.0	49.3	51.5	10.5	
	石灰岩土	9.50	0.67	71.0	1.67	176.0	—	130.5	59.4	
半淋溶土	燥红土	0.48	0.01	26.5	0.05	98.7	49.1	92.0	66.3	
其它		0.65	0.02	35.3	0.07	103.1	—	—	—	
合计		78.04	4.39	56.2	10.91	139.8	91.3	96.0	8.4	

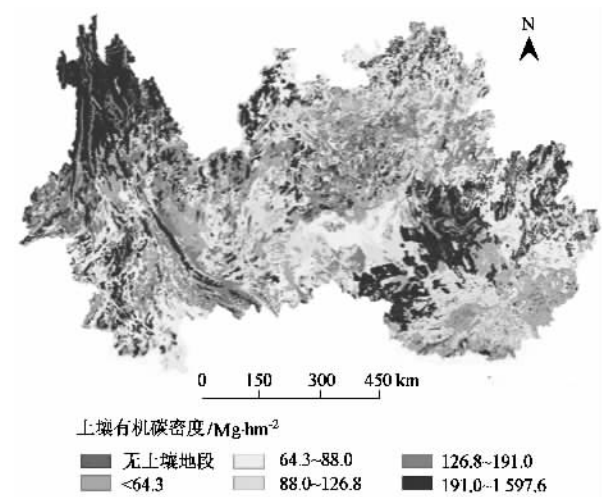


图 2 滇黔桂地区土壤剖面土壤有机碳(SOC)密度

小,结果见表 3. ΔR^2 为在其它变量的基础上增加该变量时,回归方程判定系数的增量, ΔR^2 越大,说明该变量在回归方程中越重要; $R^2_{\text{偏}}$ 为偏确定系数,是指新加入回归方程的变量所解释部分占缺少该变量的回归方程未能解释部分的比例大小,也是判断自变量重要性的指标之一; R^2_{adj} 是调整确定系数,指回归方程中的自变量对因变量变异性的解释能力.

从表 3 可以看出,海拔、经度、纬度、年平均气温与年平均降雨量 5 个环境因子和成土母质、土地利用方式对 SOC 密度变异性的解释能力不同,对表土层 SOC 密度变异性的解释能力大于对土壤剖面的解释能力.5 个环境因子、成土母质和土地利用方式对 SOC 密度变异性的解释能力为 37.9%(表土层)和 30.7%(土壤剖面).对 2 个土层 SOC 密度解释能力的差异表明表土层 SOC 密度对环境因子、成土母

表 2 滇黔桂地区各环境因子和土壤有机碳(SOC)密度间的相关性¹⁾

Table 2 Correlation coefficients among altitude, longitude, latitude, annual mean precipitation, annual mean temperature and soil organic carbon (SOC) density in Yunnan-Guizhou-Guangxi Region of China							
	海拔	年平均降雨量	年平均气温	经度	纬度	SOC 密度 _{0~20 cm}	SOC 密度 _{0~100 cm}
海拔	1.00						
年平均降雨量	-0.64**	1.00					
年平均气温	-0.91**	0.58**	1.00				
经度	-0.72**	0.54**	0.47**	1.00			
纬度	0.53**	-0.57**	-0.74**	-0.21**	1.00		
SOC 密度 _{0~20 cm}	0.48**	-0.16**	-0.50**	-0.26**	0.26**	1.00	
SOC 密度 _{0~100 cm}	0.39**	-0.07	-0.36**	-0.28**	0.11**	0.87**	1.00

1) ** 表示在显著水平为 0.01

质和土地利用方式的影响更为敏感。

环境因子、成土母质和土地利用方式影响 SOC 密度的重要性不同,环境因子对 SOC 密度的影响最大, ΔR^2 和 $R^2_{\text{偏}}$ 均远大于成土母质和土地利用方式,环境因子对 SOC 密度的变异性解释能力大于 20%,成土母质的大于 10%,而土地利用方式的小于 5%。由于地形、气候、植被、成土母质、土壤本身的性质及人为活动和大气 CO_2 浓度等诸多因子都会对 SOC 密度产生影响^[20~23],因此如果将 ΔR^2 大于 10% 的因子作为影响 SOC 密度的主要因子,环境因子则为影响表土层和土壤剖面 SOC 密度主要因子。

表 3 滇黔桂地区土壤有机碳密度影响因子逐步回归分析结果
Table 3 Results of stepwise regression analysis of environmental factors, parent materials, and land use contributing to the variability of soil organic carbon density in Yunnan-Guizhou-Guangxi Region of China

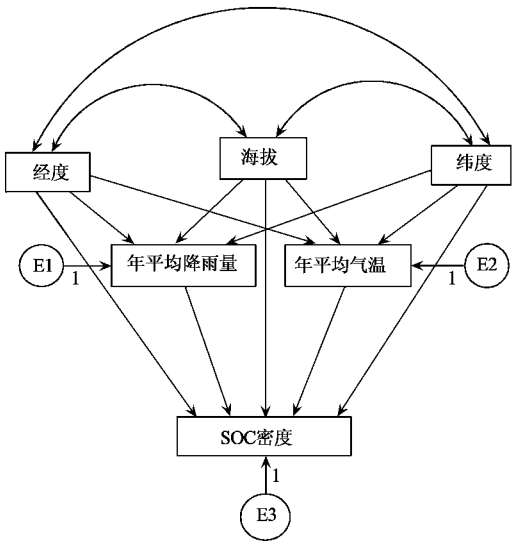
影响因子	表土层(0~20 cm)			土壤剖面(0~100 cm)		
	ΔR^2	$R^2_{\text{偏}}$	R^2_{adj}	ΔR^2	$R^2_{\text{偏}}$	R^2_{adj}
全部因子			0.379			0.307
成土母质	0.061	0.093	0.127	0.072	0.097	0.106
环境因子 ¹⁾	0.219	0.267	0.285	0.179	0.210	0.205
土地利用方式	0.052	0.080	0.045	0.050	0.070	0.013

1) 环境因子包括海拔、经度、纬度、年平均降雨量和年平均气温

2.4 各环境因子对土壤有机碳密度影响大小的比较

在 5 个环境因子中,海拔、经度和纬度是通过气温和降雨等因子影响 SOC 密度的,在滇黔桂地区,西北高、东南低的地势特点决定了海拔与经度和纬度之间具有较强的相关性,采样点的分布特点也使经度和纬度之间也具有一定的相关性,因此可建立图 3 通径模型,E1、E2 和 E3 分别表示年平均降雨量、年平均气温和 SOC 密度的误差项,除气温和降雨外,海拔、经度和纬度通过其它因素影响 SOC 密度的作用在通径模型中被视为海拔、经度和纬度对 SOC 密度的直接效应。

利用通径分析方法分析 5 个环境因子对表土层和土壤剖面 SOC 密度的影响,并进行效应分解,结果见表 4。表中效应的绝对值大小表示对 SOC 密度的影响大小,正负号表示影响因子与 SOC 密度间的关系,如负号表示影响因子值越大, SOC 密度越低。在滇黔桂地区, SOC 密度随气温的升高而降低,随降雨量的增加而升高,这与前人研究结果一致^[24~26]。气温对 SOC 密度的影响大于降雨,气温的作用效应为降雨的 2~3 倍,其中气温的变化主要是由于海拔的变化引起的,降雨的变化主要是由纬度的变化引起的,气温随海拔的升高而降低,降雨随纬度的升高而降低。通过气温对 SOC 密度的影响效应最大的为



E1、E2 和 E3 分别表示年平均降雨量、年平均气温和 SOC 密度的测量误差项
图 3 海拔、经度、纬度、年平均气温和年平均降雨量影响土壤有机碳(SOC)密度的通径模型
Fig.3 Path diagram of the effects of altitude, longitude, latitude, annual mean precipitation and annual mean temperature on soil organic carbon (SOC) density

海拔高度,海拔通过气温对 SOC 密度的影响效应值大于 0.57,而经纬度的小于 0.22。由于研究区处在低纬度区,海拔的变异性对气温变化的影响最为显著,海拔的剧烈变化,使海拔对气温的影响非常突出。由于海拔的变化而引起的气温变化均使 SOC 密度随海拔的升高而增加。通过降雨对 SOC 密度的影响效应最大的为纬度,纬度的这种效应比经度和海拔的高 30% 以上。降雨主要是由印度洋西南季风和太平洋东南季风由南方海洋带来的,随纬度的增加,降雨量逐渐减少。另外经度对气温和降雨也有一定的影响,这主要是因为滇黔桂地区西部主要受印度洋西南季风影响,而东部主要受太平洋东南季风控制,使气温和降雨随经度不同而呈现规律性的变化,气温由西向东降低而降雨增加。随经纬度变化的气温和降雨以外的其它因素对 SOC 密度的影响也较大,作用效应值达到 0.41,这种影响远大于降雨的影响,降雨的最大总效应值为 0.24。这种影响的效应使 SOC 密度随经纬度的增加而降低,部分或全部抵消了随经纬度变化的气温对 SOC 密度的影响,特别是对土壤剖面的 SOC 密度的影响作用更为明显,从而使 SOC 密度最终表现为自南向北、自东向西而逐渐降低,因此有必要增加相关因子探讨 SOC 密度的影响因子。

表4 滇黔桂地区环境因子(海拔、经度、纬度、年平均气温和年平均降雨量)对土壤有机碳密度影响的效应分解结果¹⁾

Table 4 Decomposition of total effects of altitude, longitude, latitude, annual mean precipitation and annual mean temperature on soil organic carbon density in Yunnan-Guizhou-Guangxi Region of China

自变量类型	环境因子	表土层(0~20 cm)效应分解				土壤剖面(0~100 cm)效应分解			
		气温	降雨	其它	总效应	气温	降雨	其它	总效应
外生变量	海拔	0.71	-0.03	\	0.67	0.57	-0.05	\	0.51
	纬度	0.22	-0.06	-0.20	-0.04	0.18	-0.09	-0.23	-0.15
	经度	0.21	0.04	\	0.26	0.17	0.07	-0.18	0.06
内生变量	气温				-0.74				-0.59
	降雨				0.15				0.24

1) \ 表示效应不显著($p>0.05$)

3 结论

(1)滇黔桂地区 SOC 密度较高,高于全国平均水平.全区土壤剖面 SOC 密度为 139.8 Mg•hm⁻²,表土层为 56.2 Mg•hm⁻²;表土层和土壤剖面 SOC 总储量分别为 4.39~10.91 Pg.红壤 SOC 储量占全区总储量的 21% 以上;其次为石灰岩土,占 15%,黄棕壤、赤红壤和黄壤各占 10% 左右.水稻土的 SOC 储量约占全区总储量的 8%.

(2)环境因子(海拔、经度、纬度、气温和降雨)、成土母质和土地利用方式对表土层和土壤剖面 SOC 密度变异性的解释度分别为 37.9% 和 30.7%.环境因子为影响滇黔桂地区 SOC 密度的主要因子,其影响大于成土母质和土地利用方式,其中土地利用方式的影响最小.环境因子中,气温对 SOC 密度的影响大于降雨,其中气温的变化主要是由于海拔的变化引起的,降雨的变化主要是由纬度的变化引起的.另外,还有其它随海拔或经纬度而变化的因子也对 SOC 密度产生显著影响.

参考文献:

[1] Singh S K, Singh A K, Sharma B K, *et al.* Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, **68**(3): 408-421.

[2] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990, **348**(15): 232-234.

[3] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004, **123**(1-2): 1-22.

[4] Batjes N H. Soil carbon stocks of Jordan and projected changes upon improved management of croplands [J]. *Geoderma*, 2006, **132**(3-4): 361-371.

[5] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, **40**: 468-470.

[6] Bolin B. Change of land biota and their importance for the carbon cycle [J]. *Science*, 1977, **196**: 613-615.

[7] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳循环及其全球意义[A]. 见:王庚辰,温璞玉. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[C]. 北京:中国环境科学出版社,1996. 129-139.

[8] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. *科技通报*, 1999, **15**(5): 330-332.

[9] Li Z P, Han F X, Su Y. *et al.* Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China [J]. *Geoderma*, 2007, **138**(1-2): 119-126.

[10] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* Climate Change 2001: The Scientific Basis [A]. In: Farquhar G D, Fasham M J R, Goulden M L, *et al.* The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 192.

[11] 《中国森林》编辑委员会. 中国森林[M]. 北京:中国农业出版社,1997. 228.

[12] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*,2004, **41**(1):35-43.

[13] 于东升,史学正,孙维侠,等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. *应用生态学报*,2005, **16**(12):2279-2283.

[14] Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, *et al.* Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s-1980s [J]. *Tellus B*, 2003, **55**(2): 416-427.

[15] 广西土壤肥料工作站. 广西土种志[M]. 南宁:广西科学技术出版社,1993.

[16] 贵州省土壤普查办公室. 贵州土种志[M]. 贵阳:贵州科技出版社,1994.

[17] 云南省土壤普查办公室. 云南土种志[M]. 昆明:云南科技出版社,1994.

[18] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, *et al.* Soil database of 1:1 000 000 digital soil survey and reference system of the Chinese genetic soil classification system [J]. *Soil Survey Horizon*, 2004, **45**(4): 129-136.

[19] Zhao Y C, Shi X Z, Weindorf D C, *et al.* Map Scale Effects on Soil Organic Carbon Stock Estimation in North China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(4): 1377-1386.

[20] Sollins P, Homann P, Caldwell B. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls [J]. *Geoderma*, 1996, **74**: 65-105.

[21] 彭佩钦,刘强,黄道友,等. 湖南典型农田土壤有机碳含量及其演变趋势[J]. *环境科学*,2006, **27**(7):1319-1322.

[22] 苏永中. 黑河中游边缘绿洲农田退耕还草的土壤碳、氮固存效应[J]. *环境科学*,2006, **27**(7):1312-1318.

[23] 张文菊,童成立,吴金水,等. 典型湿地生态系统碳循环模拟与预测[J]. *环境科学*,2007, **28**(9):1905-1911.

[24] Burke I C, Yonker C M, Parton W J, *et al.* Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in US grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**: 800-805.

[25] Post W M, Emanuel W R, Zinke P. Soil carbon pools and world life zone [J]. *Nature*, 1982, **298**: 156-159.

[26] Dai W, Huang Y. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China [J]. *Catena*, 2006, **65**(1): 87-94.