

# 中国西南喀斯特森林土壤 有机碳空间变化及影响因素

黄一敏<sup>1,2</sup> 李心清<sup>1,\*</sup> 杨放<sup>1,2</sup> 黄代宽<sup>3</sup> 邢英<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学 北京 100049;  
3. 贵州省环境科学研究所 贵阳 550001; 4. 贵州师范大学 贵阳 550000)

**摘要:** 喀斯特地区土壤碳储量及其影响因素的认识是评估我国陆地土壤生态系统碳汇能力不可或缺的内容。本文通过对中国西南北起秦岭北坡南至中越边境一条剖面上土壤有机碳的分析,研究了喀斯特森林0~10 cm土壤有机碳空间变化及其控制因素。研究发现西南地区土壤有机碳含量和碳密度平均为32.3 g/kg和33.1 t/hm<sup>2</sup>。无论是在整个西南区还是其省市范围内,二者均低于非喀斯特森林土壤。通径分析表明,影响喀斯特表层土壤碳含量和密度的主要因素有土壤容重、地形海拔和有机质C/N;粘粒含量和年平均气温的影响很小,而降水量仅在地处最北部的陕西省构成了土壤碳密度的影响因素。此现象与世界许多地区特别是高纬度地区形成鲜明对比。本研究表明,不同区域/气候带土壤碳库的主要影响因素会存在很大差异,这对认识气候变化背景下土壤碳库的反馈作用具有重要意义。

**关键词:** 土壤碳库; 气候变化; 碳储量; 喀斯特; 碳酸盐岩; 石漠化

中图分类号: S153 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2016)01-0001-10 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.01.001

陆地生态系统是全球最大的碳库,总碳储量约为2500 Pg,其中土壤有机碳储量约为1550 Pg,占陆地生态系统的2/3<sup>[1]</sup>,该碳库微小的变化都会对全球气候产生很大的影响。因此认识土壤碳储量及其影响因素对提高陆地生态系统碳汇能力、应对气候变化具有重大意义。作为一种独特的生态系统,喀斯特地区的地形和地貌条件、水热条件、植被的立地条件以及土壤的发育条件等都不同于非喀斯特地区<sup>[2-5]</sup>,因而具有不同的土壤碳循环特征<sup>[6-10]</sup>。中国是世界上喀斯特大面积发育的国家之一。因此认识喀斯特地区土壤碳储量及其影响因素是评估我国陆地土壤生态系统碳汇能力不可或缺的内容<sup>[11-12]</sup>。正因为如此,在最近启动的中国科学院战略性先导科技专项项目“典型石漠化地区植被恢复和增汇技术的试验示范”以及国家重大科学研究计划“基于水-岩-土-气-生相互作用的喀斯特地区碳循环模式及调控机理”等项目中,喀斯特地区土壤碳循环的认识都被列为重要的研究内容。

地处中国西南的云南、贵州、四川和重庆等五省市喀斯特分布面积达90.7万km<sup>2</sup><sup>[11,13]</sup>,分布集中连片,为研究喀斯特地区土壤碳循环提供了理想场所。近年来,许多学者对喀斯特地区森林坡地有机碳特征、小生境有机碳估算、不同阶段的人工林恢复与土壤碳含量变化关系、石漠化与碳循环等开展了研究<sup>[14-35]</sup>。但目前研究所涉及的空间尺度较小、时间范围较短。由于短时间尺度上土壤碳库的环境条件波动较大,而土壤碳储量变化相应缓慢,二者不能匹配,由此而难以确定碳储量与环境因素之间的关系。长时间尺度上环境因素的平均变化与土壤碳含量变化同步,似乎为解决短时间范围研究面临的问题提供了一条途径。然而该途径却往往因缺乏土壤碳含量变化的长期观测记录而缺乏可行性。有鉴于此,本研究从大空间尺度着手,研究土壤碳储量的空间变化及其与相应环境因素变化之间的关系。这种以空间换时间的研究方法有两个有利之处,其一是大空间尺度上土壤碳含量和

收稿日期: 2015-03-29; 改回日期: 2015-08-19

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项重大课题(XDA05070400); 国家重大科学研究计划项目(2013CB956700-2); 中国科学院地球化学研究所135项目。

第一作者简介: 黄一敏(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为喀斯特土壤有机碳研究。E-mail: huangyimin@126.com。

\* 通讯作者: 李心清(1965-),男,博士,研究员,从事环境地球化学研究。E-mail: lee@mail.gyig.ac.cn。

环境条件往往具有显著的变化而且具有时间上的同步性,其二是大空间尺度上环境条件的显著变化能够弱化众多局地或次要因素的影响,从而便于对土壤碳库变化主要影响因素的认识。据此,本研究以滇、黔、渝、鄂、陕等五省市喀斯特地区为研究区域,对该区域内南西-北东向展布的一条断面上土壤碳含量的空间变化进行了分析,并利用逐步回归方法和通径分析理论对若干可能的土壤碳储量影响因素进行了识别。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于中国西南滇、黔、渝、鄂、陕五省市典型喀斯特地区(图1),其范围为 $22^{\circ}00' \sim 39^{\circ}35'N$ , $97^{\circ}20' \sim 111^{\circ}15'E$ ,总面积约84万 $km^2$ ,是中国面积最大、最集中连片的喀斯特区域。该区域地形复杂,海拔变化为200~6000 m。自南向北依次穿越了热带、亚热带、温带三个气候带,从西南向东北方向呈现出温暖湿润逐步向寒冷少雨过渡的特点,年均温度跨度为 $5 \sim 24^{\circ}C$ ,年降雨量为600~1600 mm。代表性植被类型自南向北依次为热带雨林、亚热带常绿阔叶林和温带落叶阔叶林。土壤的水平地带性变化显著,自南向北依次为红壤、黄壤、黄棕壤、棕壤和暗棕壤。

### 1.2 采样路线

采样路线位于中国二级台地东部,为北东-南西向展布。东北方向起自中国南北分水岭的秦岭北坡,向西南翻越秦岭穿过汉中盆地、大巴山、巫山到云贵高原至中越边境屏边县白云乡。沿途横穿我国东西向展布的几大河谷。高差变化1000 m左右。除秦岭地区穿越了大面积的古老变质岩外,其余路段均为碳酸盐岩为主的地区。

### 1.3 土壤样品采集

野外工作于2013年10~11月完成。沿采样线每隔 $5^{\circ}$ 纬度安排一个采样点,全线共有采样点141个。其中,123个采样点位于喀斯特森林土壤中,其余18个采样点位于砂岩或变质岩风化形成的森林土壤中。土壤样品用环刀法采集,具体方法为在1米的直线距离上布设3个采样点,采样深度10 cm。在室内分析时,将3个土样混合均匀,代表此采样点的土壤。

### 1.4 实验方法

土壤总碳含量、无机碳含量、粒度分布分别采用元素分析仪(Vario MACRO cube),气量法、激光粒度分析仪(LS 13320)测定。土壤容重用环刀法测定。

### 1.5 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度采用 Ahmed Y A R 的计算

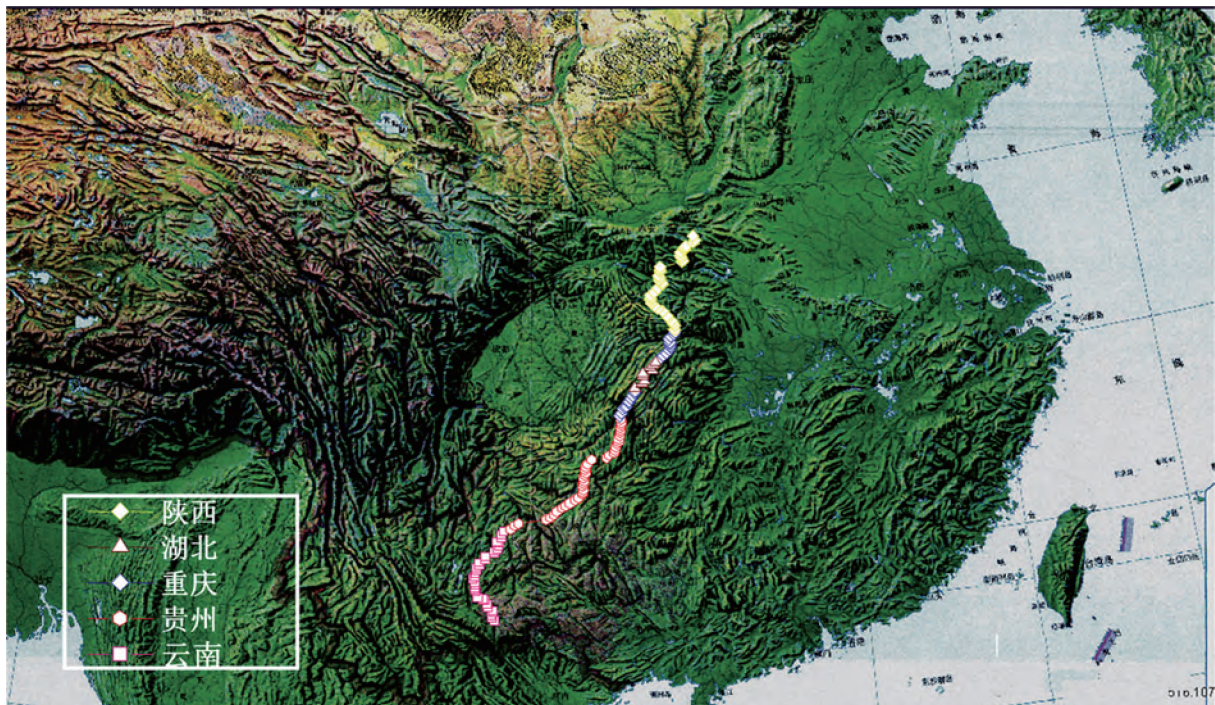


图1 采样路线及采样点分布

Fig.1 Sampling route and sampling point distribution

方法<sup>[36]</sup>:

$$SOCD = SOC \times D \times BD \times (1 - F) \times 10^{-1}$$

式中,  $SOCD$  为有机碳密度( $t/hm^2$ );  $SOC$  为有机碳含量( $g/kg$ );  $BD$  为土种平均容重( $g/cm^3$ );  $D$  为土层厚度( $cm$ );  $F$  为砾石比例( $\%$ )。

### 1.6 资料来源

采样路线的制定基于 1:25 万地质图。图件来自中科院地球化学研究所图书馆。沿线多年年平均气温和多年年平均降雨量等气象数据来自 New\_LocClim\_1.10 ([ftp://ext-ftp.fao.org/SD/SDR/Agromet/New\\_LocClim/](http://ext-ftp.fao.org/SD/SDR/Agromet/New_LocClim/))。

### 1.7 数据处理及分析

数据的统计分析用 EXCEL 完成; 土壤有机碳及其影响因子的变化趋势图由 Origin8.0 软件完成; 相关分析、逐步回归和通径分析用 SPSS17.0 完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤有机碳含量变化及其影响因素

#### 2.1.1 有机碳含量变化

表 1 列出了中国西南及其省市级喀斯特森林表层 10 cm 土壤有机碳含量的统计特征。从中可以看出, 整个西南地区森林  $SOC$  的均值约为  $32 g/kg$ 。全国森林表层土壤 0~20 cm 平均有机碳含量为  $88 \sim 267 g/kg$ <sup>[37]</sup>。由于土壤剖面自上而下碳含量逐渐降低, 其 0~10 cm 深度上平均碳含量一定高于 0~20 cm 深度碳含量的一半。由此可知西南喀斯特地区森林土壤 0~10 cm 深度  $SOC$  的均值低于全国森林同深度土壤。在省市区域上, 表层  $SOC$  表现出了自南向北降低的趋势, 即云南省>贵州省>重庆市

表 1 不同空间尺度上森林表层土壤  $SOC$  含量统计特征

区域	样点数 / 个	最小值	最大值	平均值 (标准差)	非喀斯特均值	
西南区	西南区	141	7.3	103	32.3(19.5)	88~267(1)
省市级	云南省	33	11.4	103	51.5(21.6)	122(2)
	贵州省	40	11.2	86.9	32.8(17.1)	55~74(3)
	重庆市	25	9.2	51.5	26.8(108.5)	31~77(4)
	湖北省	10	13.5	42.9	28.0(112.0)	
	陕西省	33	7.3	48.1	17.9(10.0)	28~37(5)

注: (1) 全国非喀斯特森林表层土壤 0~20 cm 平均有机碳含量<sup>[37]</sup>; (2) 云南哀牢山非喀斯特表层土壤 0~10 cm 平均有机碳含量<sup>[38]</sup>; (3) 贵州省非喀斯特地区表层土壤 0~10 cm 平均有机碳含量<sup>[39]</sup>; (4) 重庆市非喀斯特森林土壤 0~20 cm 平均有机碳含量<sup>[40]</sup>; (5) 陕西省子午岭非喀斯特森林土壤 0~10 cm 平均有机碳含量<sup>[41]</sup>。

~湖北省>陕西省。由于湖北省的采样点非常接近重庆市, 所以两个省市的平均碳含量近似。与各省市非喀斯特森林表层土壤  $SOC$  相比, 喀斯特表层土  $SOC$  含量均值也处于较低水平。

上述对比分析表明, 无论是整个西南地区还是省市区域范围内, 喀斯特森林地区表层土壤有机碳含量均不及同区域非喀斯特地区森林表层土壤的有机碳含量。

土壤有机碳含量的空间变化如图 2 所示。自南向北  $SOC$  整体上有两次较大幅度的降低。第一次出现在北纬  $26^\circ$ , 对应贵州第二高峰牛棚梁子主峰(海拔 2857 m)。沿采样线自西南向东北跨越该山峰后平均海拔突降千米左右, 从而造成有机碳大幅度的降低。第二次出现在北纬  $31^\circ$  的重庆市奉节县。在这里, 采样路线进入大巴山区, 该地区基岩为坚硬的结晶灰岩, 喀斯特地貌发育。山体长期受河流强烈切割, 峡谷众多, 谷坡陡峭, 基岩裸露度高, 土层瘠薄, 土壤容重大, 植被多为石山灌木。再向北进入秦岭南坡低山地带, 人为因素的干扰和破坏较大, 原始森林资源基本被砍伐殆尽, 植被多为人工林或稀疏灌木,  $SOC$  保持较低的水平。

#### 2.1.2 有机碳含量与土壤和环境因素相关性

土壤有机碳变化受众多环境因素的影响。为认识造成上述  $SOC$  空间变化的主要影响因素, 我们首先开展了土壤有机碳含量与地形高度、气温、降水、土壤结构(黏土矿物含量)、有机质  $C/N$ 、土壤容重等环境和土壤理化性质等因素之间的相关分析(表 2)。

表 2 不同空间尺度上森林  $SOC$  与影响因子的相关分析结果

Table 2 Correlation of soil organic carbon with influencing factors in different spatial scales

空间尺度	样点数 / 个	$BD$	$CNR$	$CC$	$EL$	$MAT$	$MAP$
西南区	西南区	141	-0.705**	0.391**	0.450**	0.522**	0.179* 0.166*
	云南	33	-0.647**	0.350*	0.578**	0.083	-0.001 0.16
省市级	贵州	40	-0.389*	0.551**	-0.128	0.281	0.108 0.189
	重庆	25	-0.691**	0.490*	0.631*	-0.017	-0.233 -0.052
	湖北	10	-0.930**	0.559	-0.519	-0.003	-0.089 0.395
	陕西	33	-0.296	0.660**	0.24*	0.09	-0.051 0.033

注: \*, \*\* 分别表示  $P < 0.05$   $P < 0.01$  的显著水平。 $BD$  为土壤容重;  $CNR$  为碳氮比;  $CC$  为粘粒含量;  $EL$  为海拔;  $MAT$  为年平均温度;  $MAP$  为年降雨量。

分析结果显示, 西南地区年降雨量与  $SOC$  显著正相关, 这与非喀斯特地区土壤有机碳研究结果一



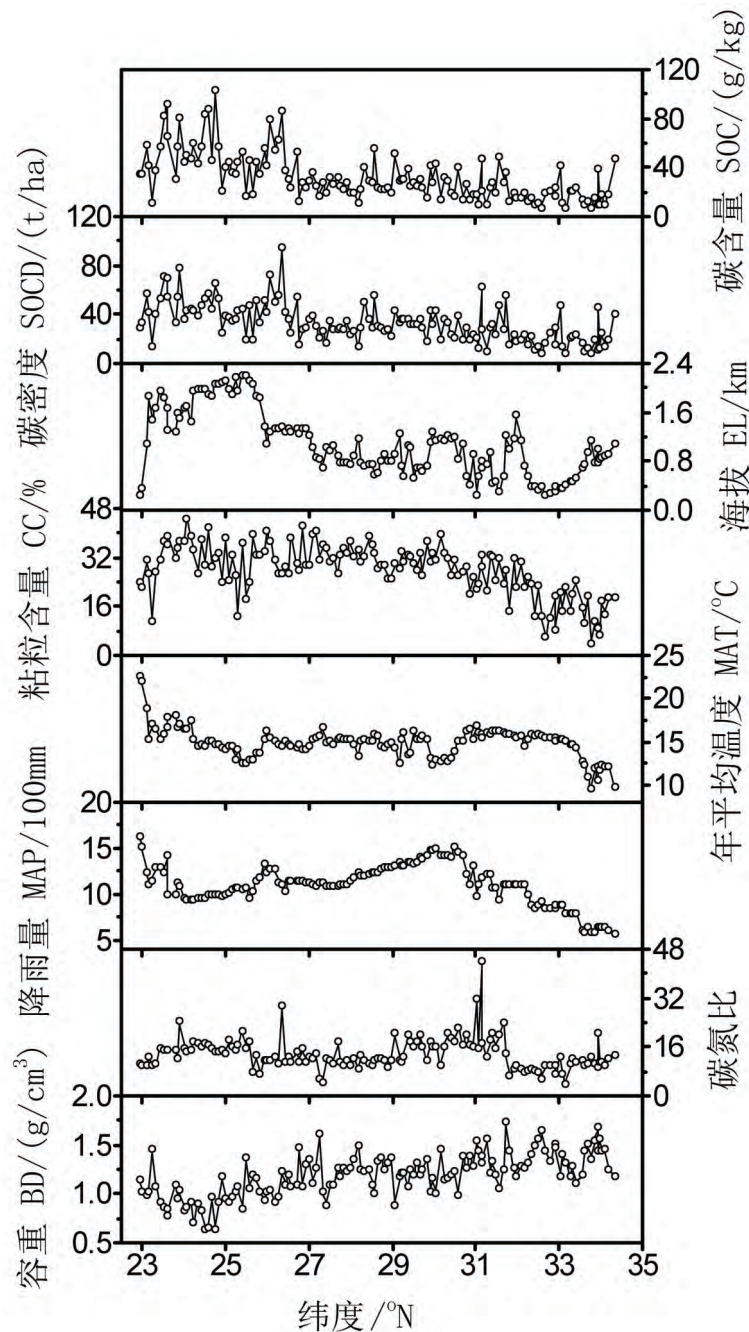


图2 西南喀斯特地区表层土壤有机碳含量和碳密度及其相应环境因素空间变化特征

Fig.2 Space variation characteristics of surface soil organic carbon in southwestern Karst area and its corresponding environmental factors

致<sup>[42-43]</sup>。但在不同省市范围内,二者的相关性与整个西南区有很大的差异且相关性不显著。年平均温度与SOC在西南地区也表现出显著正相关,此结果与我国其他地区森林土壤研究结果不尽相同。中国东部<sup>[44]</sup>和东北样带<sup>[42]</sup>森林土壤SOC均与MAT负相关。这种差异可能是由于不同气候带条件下SOC与MAT的关系存在显著差异所致。在MAT小

于10℃时,SOC与MAT呈负相关,在10~20℃,SOC与MAT弱负相关<sup>[43]</sup>或正相关<sup>[45]</sup>。本研究中的西南地区年平均气温变化范围是10~22℃,均值为14℃,因而MAT与SOC呈正相关。在省市区域内,MAT与SOC相关性也不显著。西南大区 and 省市空间级别上MAT、MAP与SOC相关性的差异是因为省市空间级别上采样点数量不足,不能在众多因素

中突出 *MAT* 或 *MAP* 的影响,这一现象表明了拉大采样空间、增加土壤采样点的重要性。

西南地区 *SOC* 与海拔呈极显著正相关。而在省市空间范围内海拔高度与 *SOC* 相关性不显著。西南地区 *SOC* 与土壤容重呈极显著负相关关系。而省市空间幅度上也与表现出程度不同的负相关性。此结果与非喀斯特地区一致<sup>[46]</sup>。西南地区 *SOC* 与土壤粘粒含量显著正相关。但不同省市二者关系变化较大。云南、重庆和陕西 *SOC* 与土壤粘粒为不同程度的正相关,而贵州和湖北两省表现为不显著的负相关关系。省市空间级别上 *SOC* 与土壤粘粒含量关系的上述变化再次表明了采样点数量的重要性。西南地区 *SOC* 与 *C/N* 极显著正相关,省市范围内也表现出不同程度的正相关性,与非喀斯特地区的研究结果一致<sup>[40,47]</sup>。

### 2.1.3 影响土壤有机碳含量的主控因素

上述相关分析的众多因素中,一些因素与 *SOC* 之间可能是纯粹的相关关系,而另一些则可能是因果关系,它们直接或间接地造成 *SOC* 的变化。为区分这两种关系,我们开展了逐步回归和途径分析<sup>[48]</sup>。

在检验了数据正态性分布后,我们首先进行逐步线性回归分析,依据方差分析结果选择与 *SOC* 相关程度最高的因素列入回归方程,直至所有符合判断的因素都进入模型为止,没能进入模型的因素与 *SOC* 不存在因果关系<sup>[49]</sup>。如此得到表3的结果。

表3 不同空间尺度上森林土壤 *SOC* 与影响因子的逐步回归分析结果

幅度	判定系数	回归方程
大区级	西南区 0.605	$Y = 2.448 - 3.175BD + 0.019CNR + 0.001EL + 0.194MAT$
	云南 0.665	$Y = 14.38 - 9.665BD$
	贵州 0.390	$Y = 2.894 - 1.881BD + 0.226CNR$
省级	重庆 0.832	$Y = 8.119 - 5.669BD + 0.095CNR$
	湖北 0.954	$Y = 9.875 - 9.426BD + 0.124CC$
	陕西 0.557	$Y = -1.512 + 0.241CNR + 0.049CC$

分析结果表明,西南地区土壤容重、*C/N*、地形高度、年均气温等都直接或间接地影响 *SOC*。但四项因素与 *SOC* 的回归分析  $R^2 = 0.605$ ,不足 1.0,说明除此四项因素外,还受其他未检测因素的影响。不同省市区域内主要影响因素存在差异。逐步回

归分析虽然可以遴选影响因子,却不能识别直接影响与间接影响的大小。为此我们在回归分析基础上进一步进行了途径分析。途径分析将相关系数分解为直接途径系数和间接途径系数,二者分别表示某一自变量对因变量的直接作用和间接作用<sup>[50]</sup>。

分析结果如表4所示。西南地区土壤容重是 *SOC* 的最主要的影响因素,其直接作用系数为-0.477,绝对值居各途径系数之首。其间接作用系数为-0.228,绝对值仅次于海拔的间接途径系数。其间接作用中通过海拔的影响最大,间接途径系数达到了-0.147,其次是通过 *C/N* 和 *MAT* 的间接作用,分别为-0.055 和 -0.025。直接作用和间接作用均为负,表明容重升高会造成 *SOC* 的降低。较大的直接和间接作用系数决定了较高的相关系数-0.705。

海拔是仅次于土壤容重的影响因素,其直接和间接途径系数分别为 0.275 和 0.248,其中通过土壤容重的间接影响达到了 0.256,表明海拔的增加通过土壤容重的间接作用进而提高 *SOC*。海拔通过年均温度的间接作用为-0.043,即海拔增加降低 *MAT*,从而降低 *SOC*。

*C/N* 是土壤有机质成熟度或质量的一种表征,也是衡量土壤氮素供应能力的指标,它影响土壤有机质积累和分解作用的相对强度。*C/N* 较低的有机质有利于提高土壤微生物的活性,加速土壤有机质的分解,最终降低 *SOC* 的含量<sup>[40]</sup>。表5中的结果表明,*C/N* 的直接作用系数为 0.239,*C/N* 升高有助于提高 *SOC*,此结果与既往认识一致。*C/N* 的间接作用主要通过影响土壤容重实现。

年均气温对 *SOC* 变化的直接影响较小,间接作用更小。这与世界其他地区<sup>[51-54]</sup>特别是高纬度地区<sup>[55-56]</sup>的研究结果不同。由于研究区域主要位于亚热带地区,较高的年均气温弱化了其对土壤 *SOC* 的限制作用,从而突出了土壤容重、*C/N* 和海拔等土壤和地形因素对 *SOC* 变化的影响。

在省市空间尺度上,*SOC* 的主控因子表现出很大的差异。云南和湖北两省的 *SOC* 的主控因子是土壤容重,而贵州和陕西两省的主控因子是 *C/N*。重庆市的主控因子是土壤容重和 *C/N*。

无论是在整个西南地区还是其中的省市范围内,降雨量都没有构成 *SOC* 的影响因素。这是因为研究地区多年平均降水量集中在 1000 ~ 1300 mm,个别区域达到 1400 ~ 1600 mm,仅少数地区小于 1000 mm。丰沛的降水决定了 *MAP* 不是土壤 *SOC*

表4 不同空间尺度上森林土壤SOC与影响因子的通径分析结果

Table 4 Path analysis for soil organic carbon and influencing factors in different spatial scales

地区	性状	相关系数 $r_{jo}$	直接作用 $P_{oj}$	间接作用					
				总的	其中通过 $CC$	$BD$	$CNR$	$MAT$	$EL$
西南地区	$BD$	-0.705	-0.477	-0.228			-0.055	-0.025	-0.147
	$CNR$	0.391	0.239	0.151		0.110		0.001	0.040
	$MAT$	0.179	0.176	0.003		0.068	0.002		-0.067
	$EL$	0.522	0.275	0.248		0.256	0.035		-0.043
云南省	$BD$	-0.816	-0.816	0.000					
贵州省	$BD$	-0.389	-0.298	-0.090			-0.090		
	$CNR$	0.551	0.496	0.054		0.054			
重庆市	$BD$	-0.691	-0.778	0.087			0.087		
	$CNR$	0.490	0.601	-0.112		-0.112			
湖北省	$CC$	-0.519	0.464	-0.983			-0.983		
	$BD$	-0.930	-1.285	0.355	0.355				
陕西省	$CC$	0.240	0.354	-0.113			-0.113		
	$CNR$	0.660	0.716	-0.056	-0.056				

注:  $CC$  为粘粒含量;  $BD$  为土壤容重;  $CNR$  为碳氮比;  $MAT$  为年平均温度;  $MAP$  为年降雨量;  $EL$  为海拔。

表5 不同空间尺度上森林SOCD统计特征参数

Table 5 Characteristics of soil organic carbon density of southwestern forest soil in different spatial scales

幅度	样点数 / 个	最小值	最大值	平均值	标准差	
						$C/(t/hm^2)$
大区级	西南区	141	8.5	94.3	33.1	15.7
	云南省	33	14.3	78.7	44.9	14.2
	贵州省	40	14.0	94.3	35.8	15.9
省级	重庆市	25	10.4	62.2	30.2	10.8
	湖北省	10	17.6	43.1	30.9	9.9
	陕西省	33	8.5	55.8	20.9	11.5

的限制因素。

## 2.2 土壤有机碳密度

西南地区森林0~10 cm有机碳密度SOCD平均值为33.1 t/hm<sup>2</sup>(表5),不及西南区非喀斯特森林土壤0~20 cm深度平均SOCD的一半,后者为77.6 t/hm<sup>2</sup>[57]。在省市范围内,表层土壤SOCD也表现出了自南向北降低的趋势,即云南省>贵州省>重庆市≈湖北省>陕西省。云南省非喀斯特森林0~20 cm土壤SOCD平均为87.4 t/hm<sup>2</sup>[57],贵州省和重庆市同深度SOCD范围分别为76.7~99.9 t/hm<sup>2</sup>[39]和50.3~152.7 t/hm<sup>2</sup>[40]。这些省市喀斯特森林0~10 cm深度土壤SOCD均不及其非喀斯特0~20 cm土壤SOCD均值的一半。陕西省子午岭0~10 cm土壤SOCD为25.7~35.3 t/hm<sup>2</sup>[41],

与该非喀斯特表层土壤值相比,该省喀斯特0~10 cm土壤SOCD也处于较低水平。

相关分析表明,在西南区范围内,包括MAP在内的所有因子均与SOCD存在着极显著正相关关系,但在省市范围内,MAP、MAT、主海拔等与SOCD的相关性均不显著(表6)。

SOC D与各影响因子的回归分析结果如表7所示。该结果与SOC的相关性分析结果相近,差别仅表现在西南区粘粒含量也进入了SOCD的回归方程。在省市范围内也表现出了程度不同的差异。

通径分析结果(表8)显示,整个西南地区、贵州省、重庆市、陕西省的SOC D主控因素是C/N,云南省、湖北省的SOC D主控因素是土壤容重。但与SOC明显不同的是陕西省的影响因素中出现了年降雨量的影响。陕西省是研究区域内降水量最低的省份,较低的降水量使其成为土壤SOCD的一个限制因子。

## 3 讨论

影响喀斯特森林土壤有机碳的因素中降水量则没有构成土壤有机碳的影响因素,而气温的升高促进了土壤有机碳的增加的这一研究结果与高纬度地区形成了鲜明的对比。

气候与土壤的关系是十分复杂的,因此,气候变化对土壤的影响和土壤对气候变化的反馈作用

表 6 不同空间尺度上 *SOCD* 与影响因子的相关分析结果

Table 6 Correlation of soil organic carbon density with influencing factors in different spatial scales

幅度	样点数	容重	C/N	粘粒	海拔	年均温度	年降雨量	
大区级	西南区	141	-0.586**	0.451**	0.478**	0.443**	0.192**	0.249**
	云南省	33	-0.647**	0.35*	0.578**	0.083	-0.001	0.016
省级	贵州省	40	-0.309*	0.599**	-0.163	0.212	0.132	0.173
	重庆市	25	-0.562**	0.531**	0.746**	0.39	-0.22	0.072
	湖北省	10	-0.908**	0.556	-0.485	0.126	-0.22	0.356
	陕西省	33	-0.112	0.659**	0.323	0.123	0.069	0.152

注: \* ,\*\* 分别表示  $P < 0.05$   $P < 0.01$  显著水平。

表 7 不同空间尺度上 *SOCD* 与影响因子的逐步回归分析结果

Table 7 Stepwise regression analysis for soil organic carbon density and influencing factors in different spatial scales

空间范围	判定系数	回归方程
西南区	0.5220	$Y = 4.992 - 18.19BD + 0.976CNR + 0.007EL + 1.4271MAT$
云南省	0.419	$Y = 93.047 - 50.388BD$
贵州省	0.359	$Y = 5.846 + 2.531CNR$
重庆市	0.829	$Y = 15.397 - 26.762BD + 0.82CNR + 1.182CC$
湖北省	0.93	$Y = 91.088 - 84.052BD + 1.193CC$
陕西省	0.649	$Y = -39.357 + 3.373CNR + 0.032MAP$

也是十分复杂的。气温和降雨量的升高能提高植物的光合作用和水分利用率而提高植物的净第一生产力和碳的固定能力,进而提高输入土壤的植物残体量,增加输入土壤中的有机碳,但气温和降雨量的升高也会加剧土壤微生物和土壤动物活动,提

高土壤呼吸速率,加速土壤有机碳的分解<sup>[58]</sup>。因此,气温和降雨量的升高并不一定意味着土壤有机碳的增加。

当气温和降雨量升高所引起的土壤有机碳的输入超过土壤有机碳的分解时,土壤有机碳储量增加;当气温和降雨量升高引起的土壤呼吸量大于土壤有机碳的输入量时,土壤有机碳储量减少;当气温与降雨量升高引起土壤有机碳的输入量与土壤呼吸引起的有机碳分解量相互抵消时,土壤有机碳储量保持不变<sup>[59]</sup>,表现出气温和降雨并不是土壤有机碳储量的影响因素。

有研究者对土壤有机碳分解的温度敏感性  $Q_{10}$  进行了研究,即温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$  土壤呼吸速率的变化比率。研究结果表明在低纬度地区,土壤有机碳分解的温度敏感性指数较低,而在寒冷的高纬度地区则较高<sup>[59]</sup>,随纬度的增加, $Q_{10}$  值逐渐增加<sup>[60]</sup>。

表 8 不同空间尺度上 *SOCD* 影响因子的通径分析结果

Table 8 Path analysis for soil organic carbon density and influencing factors in different spatial scales

地区	性状	相关系数 $r_{jo}$	直接作用 $P_{oj}$	间接作用						
				总的	其中通过 $CC$	$BD$	$CNR$	$MAT$	$MAP$	$EL$
西南地区	$CC$	0.478	0.157	0.320		0.142	0.057	0.042		0.079
	$BD$	-0.586	-0.292	-0.294	-0.077		-0.074	-0.023		-0.120
	$CNR$	0.451	0.322	0.129	0.028	0.067		0.001		0.032
	$MAT$	0.192	0.162	0.030	0.041	0.041	0.002			-0.054
	$EL$	0.443	0.224	0.219	0.055	0.157	0.047	-0.039		
云南省	$BD$	-0.647	-0.647	0.000						
贵州省	$CNR$	0.599	0.599	0.000						
重庆市	$CC$	0.746	0.463	0.284		0.214	0.070			
	$BD$	-0.562	-0.367	-0.194	-0.269		0.075			
湖北省	$CNR$	0.531	0.522	0.009	0.062	-0.053				
	$CC$	-0.485	0.506	-0.991		-0.991				
陕西省	$BD$	-0.908	-1.295	0.387	0.387					
	$CNR$	0.659	0.868	-0.210						-0.210
	$MAP$	0.152	0.509	-0.358			-0.358			

注:  $CC$  为粘粒含量;  $BD$  为土壤容重;  $CNR$  为碳氮比;  $MAT$  为年平均温度;  $MAP$  为年降雨量;  $EL$  为海拔。

本研究区域处于中低纬度地区,按上述的结果可推断,在中低纬度地区,温度升高时促进了植物的光合作用,增加了输入土壤中的凋落物的量,使得输入土壤中的有机碳增加。而较低的温度敏感性使得土壤中的呼吸速率也较低,土壤有机碳分解的速率增加缓慢。因此随着温度的升高,该地区土壤有机质分解量小于植物生长及凋落物所引起的土壤有机碳的输入量,表现出了随着温度的升高,土壤有机碳量增加的趋势,与高纬度地区形成了鲜明的对比。

土壤有机碳储量受到气温和降水共同作用的影响,而气温和降水对土壤的影响包括改变土壤有机碳输入和有机碳分解两个方面。它对土壤的影响作用还与该地区的地理位置、地势、母岩、植被类型等紧密相关<sup>[61-62]</sup>,不同的温度及降雨量的组合对不同地区土壤的影响结果不一致<sup>[37,57-58,63-64]</sup>。而土壤对气候变化的反馈作用也十分复杂,研究中很难区分气温和降雨对土壤的具体影响机制,只能通过随气温及降雨量升高或降低,土壤有机碳储量的变化情况来判断。通径分析结果中,降雨量并不是喀斯特森林土壤有机碳的影响因素,而气温升高虽然促进了土壤有机碳增加,但影响较小。这应该是

由于气候因素引起的土壤有机碳输入量与土壤有机碳的分解量相互抵消而产生的结果。

## 4 结 论

(1) 中国西南喀斯特森林 0~10 cm 有机碳含量和碳密度平均值分别为 32.3 g/kg、33 t/hm<sup>2</sup>,在省市范围内,云南省、贵州省、重庆市、湖北省及陕西省表现出了自南向北降低的趋势,与同区域的非喀斯特地区相比,研究区的 SOC 及 SOCD 都较低。

(2) 土壤有机碳含量、有机碳密度与各个影响因素的逐步回归分析表明,中国喀斯特森林 SOC 的影响因素为土壤 C/N、土壤容重、年平均气温和海拔。SOCD 的影响因素为土壤粘粒含量、土壤 C/N、土壤容重、年平均气温和海拔。

(3) 通径分析结果表明,云南、湖北的 SOCD 的主控因素为土壤容重,贵州省、陕西省的 SOCD 主控因素为 C/N,这与 SOC 的主控因素相一致。而整个大区级地区和重庆市的 SOCD 主控因素是 C/N,此外,还与 SOC 明显不同的是降水量仅在地处最北部的陕西省构成了土壤碳密度的影响因素。研究结果表明,气候变化对中国西南喀斯特地区土壤碳库变化的影响很小,与高纬度地区形成鲜明对比。

## 参 考 文 献

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Bautista F, Diaz-Garrido S, Castillo-Gonzalez M, et al. Spatial heterogeneity of the soil cover in the Yucatan karst: Comparison of Mayan, WRB, and numerical classifications[J]. *Eurasian Soil Science*, 2005, 38: S81-S88.
- [3] Lu X, Toda H, Ding F, et al. Effect of vegetation types on chemical and biological properties of soils of karst ecosystems[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 61: 49-57.
- [4] Heilman J L, Litvak M E, McInnes K J, et al. Water-storage capacity controls energy partitioning and water use in karst ecosystems on the Edwards Plateau, Texas[J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(1): 127-138.
- [5] Chen X B, Zheng H, Zhang W, et al. Effects of land cover on soil organic carbon stock in a karst landscape with discontinuous soil distribution[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(3): 774-781.
- [6] Liu T Z, Liu C Q, Lang Y C, et al. Dissolved organic carbon and its carbon isotope compositions in hill slope soils of the karst area of southwest China: Implications for carbon dynamics in limestone soil[J]. *Geochemical Journal*, 2014, 48(3): 277-285.
- [7] Li L, Wang D, Liu X, et al. Soil organic carbon fractions and microbial community and functions under changes in vegetation: a case of vegetation succession in karst forest[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(8): 3727-3735.
- [8] Khadka M B, Martin J B, Jin J. Transport of dissolved carbon and CO<sub>2</sub> degassing from a river system in a mixed silicate and carbonate catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 391-402.
- [9] Jin J, Zimmerman A R, Moore P J, et al. Organic and inorganic carbon dynamics in a karst aquifer: Santa Fe River Sink-Rise system, north Florida, USA[J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2014, 119(3): 340-357.
- [10] Hobbey E, Willgoose G R, Frisia S, et al. Stability and storage of soil organic carbon in a heavy-textured Karst soil from south-eastern Australia[J]. *Soil Research*, 2014, 52(5): 476-482.
- [11] Liu C, *Biogeochemical processes and cycling of nutrients in the earth's surface: cycling of nutrients in soil-plant systems of karstic environments*, Southwest China, Science Press, Beijing, China 2009.
- [12] Zhang Z H, Hu G, Zhu J D, et al. Spatial patterns and interspecific associations of dominant tree species in two old-growth karst forests, SW



- China[J]. *Ecological research*, 2010 25(6): 1151–1160.
- [13] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. *Land degradation & development*, 2004 15(2): 115–121.
- [14] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. *中国岩溶*, 2002 21(2): 101–105.
- [15] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J]. *土壤学报*, 2005 42(3): 419–427.
- [16] 袁海伟, 苏以荣, 郑华, 等. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用类型土壤有机碳和氮素分布特征[J]. *生态学杂志*, 2007 26(10): 1579–1584.
- [17] 周文龙, 熊康宁, 龙健, 等. 喀斯特石漠化综合治理区表层土壤有机碳密度特征及区域差异[J]. *土壤通报*, 2011 42(5): 1131–1137.
- [18] 张伟, 王克林, 陈洪松, 等. 典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究[J]. *土壤学报*, 2012 49(3): 601–606.
- [19] 李新爱, 肖和艾, 吴金水, 等. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳, 全氮以及微生物量碳和氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2006 17(10): 1827–1831.
- [20] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化[J]. *土壤学报*, 2013 50(2): 84–92.
- [21] 宋希娟, 王克林, 刘淑娟, 等. 桂西北喀斯特地区不同土地利用方式土壤的有机碳含量及养分特征[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2013 39(6): 655–659.
- [22] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. *土壤学报*, 2008 45(6): 655–659.
- [23] 邓艳, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 典型岩溶区植被恢复对土壤养分的影响[J]. *地球与环境*, 2010 4(1): 31–35.
- [24] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 贵州喀斯特山区植物叶片碳同位素组成研究[J]. *地球与环境*, 2007 4(1): 33–38.
- [25] 苏孝良. 贵州喀斯特石漠化与生态环境治理[J]. *地球与环境*, 2005 4(4): 24–32.
- [26] 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 等. 贵州省碳酸盐岩地区土壤允许流失量的空间分布[J]. *地球与环境*, 2006 4(4): 36–40.
- [27] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区土壤水分的时空变异分析——以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. *地球与环境*, 2008 4(3): 193–201.
- [28] 张志才, 陈喜, 程勤波, 等. 喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析——以陈旗小流域为例[J]. *地球与环境*, 2011 4(1): 19–25.
- [29] 李阳兵, 王世杰, 谭秋, 等. 喀斯特石漠化的研究现状与存在的问题[J]. *地球与环境*, 2006 4(3): 9–14.
- [30] 周运超, 王世杰, 卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. *地球与环境*, 2010 4(1): 1–7.
- [31] 谢丽萍, 王世杰, 肖德安. 喀斯特小流域植被-土壤系统熵的协变关系研究[J]. *地球与环境*, 2007 4(1): 26–32.
- [32] 吕文强, 王世杰, 刘秀明. 喀斯特原生林土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. *地球与环境*, 2011 4(3): 313–317.
- [33] 俞国松, 王世杰, 容丽. 茂兰喀斯特森林演替阶段不同小生境的小气候特征[J]. *地球与环境*, 2011 4(4): 469–477.
- [34] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 等. 茂兰喀斯特植被演替中土壤微生物量碳氮研究[J]. *地球与环境*, 2011 4(2): 188–195.
- [35] 王明云, 陈波, 容丽. 普定喀斯特石漠化地区森林植被恢复示范研究[J]. *地球与环境*, 2010 4(2): 202–206.
- [36] Ahmed Y A R, Pichler V, Homolak M, *et al.* High organic carbon stock in a karstic soil of the Middle-European Forest Province persists after centuries-long agroforestry management[J]. *European Journal of Forest Research*, 2012 131(6): 1669–1680.
- [37] 李江. 中国主要森林群落林下土壤有机碳储量格局及其影响因子研究[D] 硕士, 四川农业大学, 2008.
- [38] 王斌, 杨校生. 4种典型地带性森林生态系统碳含量与碳密度比较[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2010 4(4): 464–469+473.
- [39] 丁访军, 高艳平, 周凤娇, 等. 贵州西部4种林型土壤有机碳及其剖面分布特征[J]. *生态环境学报*, 2012 21(1): 38–43.
- [40] 刘楠, 王玉杰, 王毅力, 等. 重庆缙云山典型林分土壤有机碳密度特征[J]. *生态环境学报*, 2009 18(4): 1492–1496.
- [41] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 黄土高原子午岭森林碳储量与碳密度研究[J]. *水土保持学报*, 2011 4(6): 123–126.
- [42] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北样带(NECT)土壤碳, 氮, 磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2002 26(5): 513–517.
- [43] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响[J]. *地理学报*, 2004 58(5): 727–734.
- [44] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J]. *资源科学*, 2006 28(2): 97–103.
- [45] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. *Nature*, 2000 404(6780): 858–861.
- [46] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 等. 黔中喀斯特地区3种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012 26(1): 161–164.
- [47] 苗摇娟. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014 25(3): 625–631.
- [48] 盖钧镒. 试验统计方法: “田间试验和统计方法”重编版[M]. 中国农业出版社, 2000.
- [49] 杨晓菲. 河南西平县杨树人工林碳储量及其与环境响应研究[D] 硕士, 北京林业大学, 2011.
- [50] 李齐. 森林火灾对寒温带冻土区土壤碳储量影响研究[D] 硕士, 内蒙古农业大学, 2011.
- [51] Cox P M, Betts R A, Jones C D, *et al.* Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2000 408(6809): 184–187.
- [52] 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(272): 393–396.
- [53] Knorr W, Prentice I C, House J I, *et al.* Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. *Nature*, 2005 433: 298–301.
- [54] Amelung W, Flach K W, Zech W. Climatic effects on soil organic matter composition in the great plains[J]. *Soil Science Society Of America*

- Journal, 1997 61( 1) : 115-123.
- [55] Davidson E A , Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature , 2006 440: 165-173.
- [56] Koven C D , Ringeval B , Friedlingstein P , *et al.* Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences , 2011 , 108( 36) : 14769-14774.
- [57] 缪琦, 史学正, 于东升, 等. 气候因子对森林土壤有机碳影响的幅度效应研究 [J]. 土壤学报, 2010 ( 2) : 270-278.
- [58] 陈仕栋. 湖南省土壤有机碳密度、储量的空间分布格局及其影响因子分析 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- [59] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2010 ( 7) : 1867-1874.
- [60] CHEN T H , Han Q. Does a general temperature dependent Q10 model of soil respiration exist at biome and global scale? [J]. Journal of Integrative Plant Biology , 2005 47( 11) : 1288-1302( 15) .
- [61] 高岩红. 普定县农田土壤有机碳库演变特征及影响因素研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [62] 程小琴. 山西太岳山油松人工林土壤碳特征对林分密度调控响应的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [63] 毕珍. 四川盆地森林土壤的有机碳氮存储及其空间分布特征 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [64] 阿米娜木·艾力. 天山森林土壤有机碳的空间分异规律及其影响因素 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014

## Spatial Variation of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Southwestern China and Its Affecting Factors

HUANG Yimin<sup>1 2</sup> , LEE Xinqing<sup>1</sup> , YANG Fang<sup>1 2</sup> , HUANG Daikuang<sup>3</sup> , XING Ying<sup>4</sup>

( 1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 3. Guizhou Academy of Environmental Science and Designing , Guiyang 550000 , China; 4. Guizhou Normal University , Guiyang 550000 , China)

**Abstract:** Knowledge of the soil carbon storage and its affecting factors to Karst area is indispensable for understanding the capacity of carbon sequestration by terrestrial ecosystems of China. Based on analysis of soil organic carbon in a continuous transect from the northern slope of the Qinling Mountains , the Central China , to the border of China to Vietnam , we studied spatial variation and its controlling factors of soil organic carbon to the top 10 cm of soil profile in Karst forests of the Southwestern China. We found that soil organic carbon content ( SOC) and soil organic carbon density ( SOCD) averaged 32.3 g/kg and 33.1 t/hm<sup>2</sup> , respectively. These values are both lower than that of the forest soil of non-Karst forests in either the Southwestern China or its provinces. Path analysis indicates that soil bulk density , topographic elevation and C/N of soil organic matter are major factors to the variations of SOC and SOCD while clay content and annual temperature exert little impact , and annual precipitation only affects SOCD of Shaanxi Province in the most northern part of the studying region , where semi-arid climate dominates. The trivial effect of climate to the soil organic carbon inventory contrasts sharply with many parts of the world , especially at high latitudes , suggesting that major factors to soil organic carbon may differ from region to region or climate to climate. The results are important for understanding the feedback of soil organic carbon stock to the current global warming.

**Key words:** soil carbon pool; climate change; carbon storage; karst; carbonate; rocky desertification