

文章编号:1001-4810(2011)04-0383-08

喀斯特石漠化综合治理区表层土壤 有机碳时空动态特征与趋势探讨

熊康宁^{1,2},周文龙^{1,2},龙健²,罗井升^{1,2}

(1. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院,贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地,贵州 贵阳 550001)

摘要:以中国南方喀斯特地区具有代表性的贵州为例,选取三个典型石漠化综合治理示范区,以2006年4月野外监测和2009年4月重复采样的数据为基础,分析喀斯特脆弱生态区实施石漠化综合治理工程的土壤有机碳时空动态特征和发展趋势。结果表明:经过3年的石漠化综合治理,不同等级石漠化样地表层土壤有机碳密度增幅不一,其中轻、中度石漠化样地提升幅度最大,无、潜在石漠化样地次之,强度石漠化样地最小;不同工程措施下表层土壤有机碳密度特征表现为:封山育林育草>退耕还林还草>坡改梯;增幅表现为:退耕还林还草>封山育林育草>坡改梯。石漠化治理过程中,随着轻度以上石漠化土地面积的减少,表土碳储量进一步增大,而且表层土壤有机碳多分布于潜在和无石漠化区。随着石漠化综合治理进程的推进,表土有机碳密度可能呈S型曲线增长,但由于潜在、无石漠化区多为基本农田,土壤有机碳密度将在较长时间内保持相对平稳的状态。而轻、中度石漠化样地在治理初期其表土有机碳密度增幅将最快。因此,采取有效的土地利用方式与加强可持续管理对提高表层土壤的固碳潜力具有非常重要的意义。

关键词:土壤有机碳;密度;碳储量;喀斯特石漠化

中图分类号:S153.6⁺2;S154.1 **文献标识码:**A

0 引言

喀斯特石漠化治理和碳汇,都是目前的世界性难题。喀斯特在世界上分布广泛,全球因碳酸盐岩的溶蚀而从大气回收碳的量约占遗漏汇的1/3,这与全球变化和碳循环关系密切^[1-4],受到各国政府、组织和学术界的高度重视。目前碳汇研究中的一个关键问题是已知的碳汇不能平衡已知的碳源,即存在一个很大的“未知汇”^[5]。当前对“未知汇”的探索集中于“未知汇”在陆地上的空间分布、吸收强度以及影响陆地碳汇的因素。许多学者认为“未知汇”存在于陆地生态系统中并认为土壤和植被是可能的汇^[6-8]。土壤

有机碳是陆地生态系统的重要碳库之一,增加土壤中碳的储量对于减缓全球变暖的趋势具有重要意义。土壤表层对气候变化最为敏感,也是受土地利用方式和利用程度影响最深的层次,加强表层土壤的可持续管理对提高土壤肥力和固碳潜力具有非常重要的意义。同时喀斯特地区生态环境脆弱,土壤侵蚀严重,广大的水土流失地生态恢复后将成为中国未来一个极为重要的“碳汇”。随着国家对西部建设力度的加大,西部生态环境的重建工作越来越被重视。在中国南方喀斯特地区正在实施的喀斯特石漠化综合治理生态修复工程,就是一种通过人为干预手段恢复植被,减少土壤侵蚀,促进碳汇的过程^[9]。

基金项目:贵州省科技计划课题“贵州喀斯特石漠化生态系统综合整治技术与模式的研究与示范”(黔科合S字[2007]1061号)、国家自然科学基金“喀斯特地区石漠化过程土壤微生物生态特征及响应机制”(40971160)

第一作者简介:熊康宁(1958-),男,硕士,教授,主要从事喀斯特地貌与洞穴、生态环境治理、旅游资源评价与开发等方面的研究。E-mail: xiongkn@163.com。

收稿日期:2011-10-19

贵州喀斯特分布面积占全省国土总面积的 73%，高原、山地占 87%，地势西部高，向北、东、南三面逐级降低，具明显的三级阶梯。水系顺应地形大势由西、中部呈帚状向北、东、南三面分流，六大水系侵蚀切割着高原主体，区域地貌及地貌结构也随之不同，表现出有规律的分布。受地质构造与河流强烈的侵蚀切割双重作用影响，除上游分水岭地区未受溯源侵蚀而使高原地貌保存较好之外，中下游地区大多河谷深切，高原与峡谷形成明显的地势反差。石漠化综合治理，既要充分考虑喀斯特地貌结构特点，同时也要兼顾石漠化等级^[14]和气候环境要素等。整体上，毕节鸭池示范区代表温凉春干夏湿喀斯特高原山地潜在一轻度石漠化区；清镇红枫湖示范区代表温和春半干夏湿喀斯特高原盆地轻—中度石漠化区；关岭—贞丰花江示范区代表干热喀斯特高原峡谷中—强度

石漠化区^[9]。

2 材料与方法

在毕节鸭池、清镇红枫湖和关岭贞丰花江三个示范区以小流域为单元进行石漠化综合治理，以鸭池石桥、红枫湖王家寨和羊昌洞以及花江顶坛 4 个小流域(图 2)作为监测单元。在小流域内选取能够全面反映整个示范区整体情况的典型样地和固定样地 45 块(表 1)，结合遥感与地面定位监测，于每年 4 月(本文选取 2006 年和 2009 年作为治理起始年和结束年)采集环刀土和混合土样，带回实验室进行理化性质测定，包括以下指标：土壤有机质(重铬酸钾—外加热法)、土壤容重(环刀法)、土壤全氮(半微量凯氏法)等^[15-16]，>2 mm 砾石体积百分比含量(排水法)等，

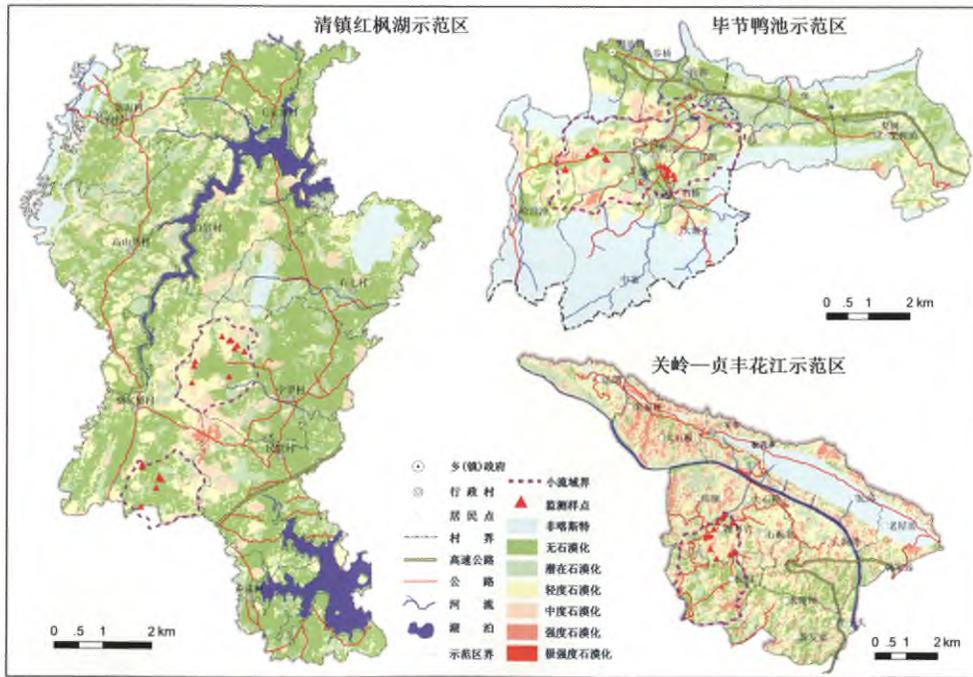


图 2 示范区 2006 年石漠化及核心小流域监测样点分布

Fig. 2 Distribution of the monitoring plots at the core drainages of the demonstration areas in 2006

样地岩石裸露率则在野外采用地膜格网制图估算。土壤有机碳密度公式如下^[9]：

$$D_{soc} = \theta \times \rho \times (1 - \sigma) \times (1 - \delta) \times T \times \alpha \quad (1)$$

式中： D_{soc} 为土壤碳密度 (kg/m^2)； θ 为土壤有机质含量 (g/kg)； ρ 为土壤容重 (g/cm^3)； σ 为岩石裸露率 (%)， $1 - \sigma$ 为土被覆盖率； δ 为土被中 > 2 mm 砾石体积百分比含量 (%)； T 为土壤厚度 (m)，因喀斯特地区土层较薄，本文统一取表层土 (0~20 cm) 来计算； α 为有机碳换算系数，采用 Blemmeln 系数 (0.58)。

同一等级石漠化土地有不同的采样点，而这些斑块因空间分布的差异，其有机碳含量差异也较大，为了消除这种地域性的差异，采用斑块面积加权平均法^[17]，计算同一等级石漠化土地的土壤平均有机碳密度，其计算公式为：

$$D_{soc} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{soc_i} S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (2)$$

式中： D_{soc} 为土壤平均有机碳密度 (kg/m^2)； S_i 为

表1 示范区固定样地2006年和2009年表层土壤有机碳密度

Tab.1 Organic carbon density of topsoil in permanent plots of the demonstration areas in 2006 and 2009

示范区	石漠化等级	样地号	样地面积/m ²	σ /%	δ /%	2006年				2009年			
						ρ_l /g/cm ³	θ_l /g/kg	l_{soc} /kg/m ³	D_{soc} /kg/m ²	ρ_l /g/cm ³	θ_l /g/kg	D_{soc} /kg/m ²	D_{soc} /kg/m ²
毕节鸭池示范区 (石桥小流域)	强度石漠化	WJW 径 5-6	200	38	0	1.34	56.24	7.00		1.34	56.24	7.00	
		WJW 径 7-8	200	40	0	1.29	46.55	5.57	6.22	1.29	46.55	5.57	6.24
		0151	50	30	0	1.05	67.80	5.76		1.07	68.22	5.92	
	中度石漠化	0141(径12)a	200	8	15	1.35	32.60	4.17		1.29	46.68	5.73	
		0142	100	35	2	0.95	37.60	2.64	3.87	1.21	40.48	3.62	5.31
	轻度石漠化	0131(径21)b	100	0	2	1.04	18.30	2.16	2.16	1.21	24.13	3.33	3.33
	潜在石漠化	0121(径13-17)	188	0	0	1.26	18.30	2.67		1.22	21.26	3.02	
		0122(径18)	100	5	0	1.27	25.40	3.57	3.50	1.16	44.01	5.61	4.97
		径4	100	5	0	1.39	32.57	4.98		1.34	54.06	7.98	
	无石漠化	0111(径1)	100	0	0	1.27	23.20	3.41		1.21	35.64	4.99	
		0112(径2)bc	200	5	0	1.34	54.70	8.06		1.32	54.07	7.84	
		WJW 径 1-2	200	0	0	1.32	40.48	6.19		1.32	40.48	6.19	
		WJW 径 3-4	200	1	0	1.22	34.93	4.89	5.79	1.22	34.93	4.89	6.01
		0113(径5-7)	300	0	0	1.26	27.54	4.02		1.20	27.54	3.83	
		0001a	100	5	4	0.92	106.50	10.62		0.88	127.59	11.94	
	中度石漠化	0002a	100	7	3	1.04	56.34	6.19		1.08	51.41	5.82	
		径4a	50	62	7	1.09	39.77	1.20		1.26	54.06	2.80	
		0141a	100	60	9	0.89	64.36	1.59	1.73	1.36	72.21	4.14	3.82
轻度石漠化	径5b	50	55	4	1.13	68.60	2.54		1.31	64.05	4.19		
	0131bc	100	53	1	1.22	36.85	1.80	2.10	1.31	38.21	2.69	4.52	
潜在石漠化	径3a	50	23	15	0.83	94.17	2.70		1.09	98.51	8.18		
	径6	100	10	0	1.18	29.24	3.60		1.14	30.17	3.59		
	0121c	50	15	3	1.33	38.10	4.83	5.33	1.56	64.05	9.53	6.68	
	0122	100	8	1	1.16	51.15	6.25		1.15	63.43	7.71		
无石漠化	0123bc	100	10	0	1.31	46.82	6.40		1.35	51.83	7.30		
	0111a	50	10	3	1.16	40.98	4.73		1.20	92.44	11.27		
	0112b	100	15	2	1.29	51.91	6.33		1.36	61.83	8.12		
	0113b	100	0	0	1.09	28.92	3.67	5.07	1.18	58.08	7.97	7.22	
	0114c	100	0	0	1.06	43.94	5.41		1.15	48.89	6.52		
	0115	100	0	0	1.09	36.16	4.56		1.33	44.93	6.93		
非喀斯特	径1c	100	2	0	1.41	34.63	5.55		1.35	31.33	4.80		
	0001(王家寨)	100	0	0	1.19	40.34	5.57	5.81	1.20	45.32	6.29	6.40	
强度石漠化	0002(羊昌洞)	100	0	0	1.26	40.56	5.93		1.32	42.15	6.46		
	027	100	85	3	1.06	39.50	0.71		1.12	43.75	0.83		
	019	100	88	0	1.11	30.30	0.47	0.86	1.16	39.51	0.64	0.88	
中度石漠化	009	100	82	2	1.21	56.30	1.39		1.07	53.93	1.18		
	010	50	72	5	1.03	41.20	1.31	1.06	1.08	51.86	1.72	1.37	
轻度石漠化	004	100	70	30	1.08	35.60	0.93		1.24	39.74	1.20		
	023	100	65	23	1.16	31.40	1.90		1.22	56.07	2.14		
	003	100	62	10	1.19	37.60	1.48	1.69	1.26	33.93	1.70	2.07	
潜在石漠化	025	50	65	5	1.09	28.80	1.58		1.11	50.89	2.18		
	014	100	40	0	1.12	28.80	2.25		1.25	31.06	2.71		
	012	200	50	8	1.50	29.70	2.38	2.57	1.31	38.05	2.66	2.96	
无石漠化	026	100	40	2	1.23	35.80	3.00		1.36	36.17	3.37		
	005a	200	30	25	0.87	84.10	4.45	4.45	0.86	96.54	5.08	5.08	

注: ①毕节石桥小流域内样地 WJW(径1-8)的设置时间为2008年12月, 此4个样地2006年的初始值为空值, 为加强整体可比性, 故用2009年实测值来代替;

②“a”代表封山育林育草; “b”代表退耕还林; “c”代表退耕还草; “d”代表坡改梯。

某类土壤在第 i 分区的斑块面积; D_{soc_i} 为对应 S_i 斑块的有机碳密度; n 为该类土壤在研究区内的斑块数。

在取得 $\overline{D_{soc}}$ 之后,即可计算出土壤的碳储量,即:

$$P_{soc} = \overline{D_{soc}} \times S \quad (3)$$

式中: P_{soc} 为土壤碳储量 ($10^3 t$); S 为示范区不同等级石漠化土地面积 (km^2)。

表 2 示范区 2006 年和 2009 年表层土壤有机碳密度的统计值

Tab. 2 Statistics of topsoil organic carbon density in the demonstration areas in 2006 and 2009

年份	最小值/ kg/m ²	最大值/ kg/m ²	均值/ kg/m ²	标准差	变异 系数	最小值* / kg/m ²	最大值* / kg/m ²	均值* / kg/m ²	标准差*	变异系数*
2006	0.47	10.62	3.92	2.21	56.35	0.86	6.22	3.48	1.87	53.64
2009	0.64	11.94	5.05	2.71	53.78	0.88	7.22	4.46	1.99	44.57

注:“*”为加权平均值。

化表层土壤有机碳密度的面积加权平均值来看,土壤有机碳密度变异系数均超过 40%,且变幅大于 5 kg/m²。

3.2 表层土壤有机碳密度时空动态特征

3.2.1 示范区内表层土壤有机碳密度变化特征

影响年际表层土壤有机碳密度估算的两个最主要的因子为土壤有机质和土壤容重,经过 3 年的石漠化综合治理,治理效果初见成效,土壤有机质和土壤容重变化上整体呈现上升的趋势,因此土壤有机碳密度整体上也逐年递增(表 2)。在不同等级石漠化样地中,轻、中度石漠化样地表层土壤有机碳密度提升幅度最大,无、潜在石漠化样地增幅次之,强度石漠化样地变幅最小。其中红枫湖示范区轻、中度石漠化样地增幅均超过 120%(图 3)。

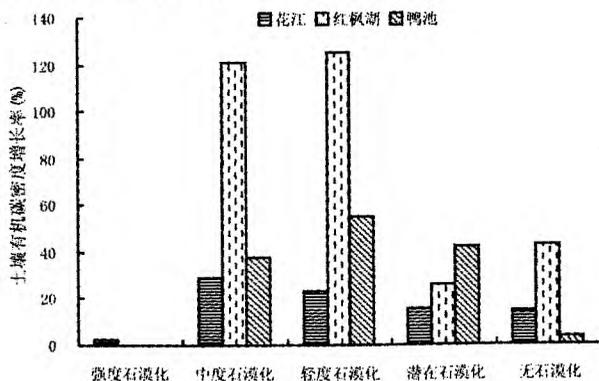


图 3 示范区不同等级石漠化样地表层土壤有机碳密度增长率

Fig. 3 Growth rate of topsoil organic carbon density at different desertification grades in the demonstration areas

3.2.2 示范区之间表层土壤有机碳密度区域差异

花江示范区虽有机质含量整体有小幅提升,但岩

3 结果与分析

3.1 不同年份土壤有机碳密度的一般统计特征

从三个典型示范区 45 个样点的统计分析来看(表 2),2009 年的土壤有机碳密度均大于 2006 年,但不同示范区之间土壤有机碳密度变异性较大。2006 年和 2009 年的土壤有机碳密度变异系数均超过 50%,且变幅大于 10 kg/m²;从样区不同等级石漠

石裸露率和土壤中 >2 mm 砾石含量高,且土壤结构出现粗骨化,土壤容重较低,因此土壤有机碳密度呈现较低值;红枫湖示范区中、轻度石漠化岩石裸露率较高,但因采取封山育林、退耕还林还草等措施后,土壤容重变大,土壤有机质含量有所提高;鸭池示范区土层较厚,岩石裸露率整体较低,但人为耕作强度大,翻耕作用明显,有机质含量与土壤容重也较清镇低。因此表层土壤平均碳密度整体上表现为红枫湖示范区 > 鸭池示范区 > 花江示范区(表 3)。

地形条件支配着水、热资源的分配,影响着土壤的发育程度。水、热资源的分配直接左右着土壤中有机物质的矿化和腐殖化过程,从而支配着不同地形条件下土壤有机碳的分布。不同地形条件下土壤有机碳含量有着显著差异^[18]。鸭池示范区属于高原山地,虽土层较厚,但示范区内人口密度大,土壤垦殖率高,且多为传统耕作方式,大于 25°坡地占 24.80%,水土流失严重,不利于土壤有机碳的积累;清镇属高原盆地,大于 25°坡地仅占 9.40%,水土流失相对较轻,有利于土壤有机碳的积累;花江峡谷深切,大于 25°坡地占 41.45%,基本无土可流^[9],且土壤有机碳密度一般随温度的升高而降低^[19-21],花江示范区具干热河谷气候特征,不利于土壤有机碳的积累。

3.3 石漠化治理工程措施对表层土壤有机碳密度的影响

结合石漠化综合治理工程,轻、中度石漠化治理措施多采取退耕还林还草或坡改梯(保护性耕作),林草植被建设与传统耕作方式相比,少免耕使土壤不稳定碳输入增加,流失减少,意味着土壤汇集碳增加,而损失到大气中的 CO₂ 减少。同时,降低风雨对土壤的侵蚀,起到减少土壤有机质流失的作用^[22]。坡改

梯虽有利于减少土壤侵蚀,但是在传统的耕作方式下,对于提高土壤有机碳含量的作用还不是很明显。潜在或无石漠化样地多作为基本农田,虽采取保护性耕作,土壤有机碳密度也得以恢复,但效果始终不及免耕。强度石漠化区一般采取封山育林育草,减少了因耕作而带来的对土壤的翻动,因而深层土壤接触空气的机会减少,土壤原有有机质的氧化和矿化减弱,土壤水分蒸发也减少,土壤容重得以增加,而且残留于表土之上的有机物料的降解也使归还回土壤的有机碳数量增多,但强度石漠化样地岩石裸露率高,土被覆盖较少,且强度石漠化样地多分布于上坡位,各示范区内土壤有机质含量初始值整体较其它石漠化样地高^[23-24],提升空间较小。坡改梯虽有利于减少土壤侵蚀,但是在传统的耕作方式下,对于提高土壤有机碳含量的作用不是很明显。

综上所述,不同工程措施下表层土壤有机碳密度特征表现为:封山育林育草>退耕还林还草>坡改梯;增幅表现为:退耕还林还草>封山育林育草>坡改梯。

3.4 石漠化演变对土壤有机碳储量的影响

典型示范区表层土壤有机碳密度整体表现为红枫湖示范区最长大,鸭池示范区次之,花江示范区(最小),表层土壤碳密度的这种空间特征与各流域中潜在石漠化、无石漠化的面积比例大小具有高度的一致性。

通过综合治理,三个典型示范区的石漠化情势都有了不同程度的缓解改善,主要表现在中、轻度以上石漠化土地面积持续减少,潜在、无石漠化面积不断增大(表3),而表3表明,表层土壤有机碳又多分布于潜在和无石漠化区,足见石漠化治理对增强表土的碳储量效果之显著。

表3 示范区不同年份表层土壤有机碳储量

Tab. 3 Organic carbon storage of topsoil in the demonstration areas in different years

示范区	石漠化等级	2006年				2009年			
		$\overline{D}_{soc}/$ kg/m ²	S/km^2	P_{soc} / $\times 10^3t$	平均碳密度/ kg/m ²	$\overline{D}_{soc}/$ kg/m ²	S/km^2	P_{soc} / $\times 10^3t$	平均碳密度/ kg/m ²
毕节 鸭池 示范区	强度石漠化	6.22	0.54	3.36	3.80	6.24	0.44	2.75	4.87
	中度石漠化	3.87	1.73	6.70					
	轻度石漠化	2.16	7.96	17.19					
	潜在石漠化	3.50	8.93	31.26					
	无石漠化	5.79	7.19	41.63					
清镇 红枫湖 示范区	中度石漠化	1.73	5.94	10.28	4.28	3.82	4.32	16.50	6.45
	轻度石漠化	2.01	9.24	18.57					
	潜在石漠化	5.33	9.91	52.82					
	无石漠化	5.07	32.36	164.07					
关岭 贞丰 花江 示范区	强度石漠化	0.86	6.63	5.70	2.13	0.88	6.28	5.53	2.55
	中度石漠化	1.06	6.40	6.78					
	轻度石漠化	1.69	15.20	25.69					
	潜在石漠化	2.57	9.51	24.44					
	无石漠化	4.45	7.65	34.04					

3.5 石漠化综合治理对表层土壤有机碳固碳效益的趋势探讨

石漠化综合治理工程的林草植被保护和建设、基本农田建设与水资源开发利用、农村能源建设等项目均会产生额外的固碳效益,对于表层土壤有机碳而言,封山育林育草、退耕还林还草、特色种植、坡改梯等少耕、免耕或保护性耕作措施减少了因耕作而带来的对土壤的翻动,因而深层土壤接触空气的机会减少,土壤原有有机质的氧化和矿化减弱,土壤水分蒸发也减少,而且残存于土壤之上的枯枝落叶等有机物料的降解也使归还回土壤的有机碳数量增多。与传统耕作方式相比,免耕少耕可显著提高土壤有机碳含量。有研究表明,长期采取保护性耕作措施将有利于土壤有机碳含

量的提高。然而,土壤有机碳增长可能呈S型曲线变化,保护性耕作技术开始实施的2~5年内,土壤有机碳含量几乎没有变化或变化甚微,5~10年变化较大。依赖于土壤特性、气候条件和管理,土壤有机碳含量的增长趋势会持续25~50年,但如果在持续很长一段时间的保护性耕作措施后,采取耕翻,则贮存的土壤有机碳在很短时间内就会分解^[22]。特别是对于喀斯特脆弱生态区,生态环境恢复后极易被破坏,土壤固碳稳定性差。石漠化综合治理的固碳效益也呈现阶段性,治理初期轻、中度石漠化样地增幅较快,随着治理周期的延伸,会逐渐向顶级群落演变,从而生态系统达到相对稳定的状态,增长幅度也会出现下降的趋势。强度石漠化样地多采取封山育林育草,土壤有机质含量较高,

但因土壤浅薄且土被较少,成土速率慢,表层土壤碳密度基本会稳定在一个相对较低的水平。潜在、无石漠化样地因多作为基本农田,还将在较长时间内保持传统的耕作方式,因此土壤有机碳密度将保持相对平稳的状态,如采取保护性耕作或免耕措施,还将有较大的提升空间,但是要解决好人地矛盾。

现阶段全球气候变暖使气候呈现干旱化的趋势,干旱不利于有机碳的积累。较高的气温有利于土壤有机质的分解,使土壤有机碳的周转加快,积累量减少。但植被的恢复能在一定程度上缓解气候的胁迫作用。有植被覆盖的土壤温度较裸地温度低,在作物生长的早期阶段,免耕土壤温度要比传统耕作土壤温度至少低1℃^[25]。因此,石漠化综合治理的植被恢复措施对于缓解地温有一定的正面效应。同时,植被覆盖的提高增加了生态系统的初级生产量,大量的枯枝落叶归还地表,在地表形成了一个覆盖层,降低了雨水及地表径流的冲刷,对土壤有机碳的积累起到积极的作用;此外,由于喀斯特地区的高钙环境,土壤有机碳与钙容易结合形成有机无机复合体,有利于土壤富里酸逐步向胡敏酸过渡^[26],同时形成较稳定的富含有机碳的大团聚体。相反,在强度耕作条件下,土壤中富含碳的大团聚体破坏加剧,形成有机质含量较低的大量小团聚体和游离有机质颗粒,而游离的有机质颗粒稳定性较差,极易降解,从而引起土壤有机碳的损失^[27]。

石漠化演变会对表土有机碳储量造成一定的影响,贵州石漠化发展演变规律在一定程度上代表了中国南方石漠化发展演变趋势。通过分析研究生态治理工程实施下的典型示范区石漠化变化总态势和石漠化结构演变结果表明:石漠化面积呈现逐年减小的态势,土壤有机碳储量也不断增加。同时随着土地利用的规模和格局调整和优化,可望加速强度、极强度石漠化景观逐渐向无石漠化景观转变^[28],从而进一步增强表层土壤的碳储量。

4 结论与讨论

(1)研究区大部分坡地土层薄、地面土石相间,土壤分布于岩脊间的溶沟、溶槽内,对土壤有机碳密度的影响异质性强,在中国南方喀斯特地区土壤有机碳密度影响因素中具有一定的典型性。

(2)经过3年的生态恢复,示范区治理效果初见成效。不同等级石漠化样地表层土壤有机碳密度增幅整体上轻、中度石漠化样地提升最大,无、潜在石漠化样地次之,强度石漠化样地最小。轻、中度石漠化样地增幅最大,是因为该两样地多采取退耕还林还草措施,改

变了传统的种植方式;不同工程措施下表层土壤有机碳密度特征表现为:封山育林育草>退耕还林还草>坡改梯;增幅表现为:退耕还林还草>封山育林育草>坡改梯。

(3)喀斯特石漠化综合治理区表层土壤有机碳具有高度的空间变异性。示范区表层土壤平均碳密度整体表现为红枫湖示范区>鸭池示范区>花江示范区,而且表层土壤有机碳多分布于潜在和无石漠化区。在石漠化结构中,由于轻度以上石漠化逐渐向潜在、无石漠化转变,表层土壤碳储量也得到了进一步的提高。

(4)随着石漠化综合治理进程的推进,表土有机碳密度可能呈S型曲线增长,即增幅表现为初期慢、中期快、晚期达到稳定的状态。因此,加强表层土壤的可持续管理对提高土壤肥力和固碳潜力具有非常重要的意义,采取有效的土地利用管理措施增加土壤有机碳蓄积量是未来石漠化综合治理的关键。

(5)本文仅计算表层土壤有机碳储量,在表层土壤以下,还有较多的碳,加上土壤空间分布的复杂性以及人为活动的影响等,实际土壤有机碳的数字应比估算的大。同时,石漠化综合治理中的林草植被恢复及沼气池的利用,也是重要的“碳汇”,随着治理年限和林龄的增长,其固碳减排潜力是巨大。

参考文献

- [1] Yuan Daoxian. The carbon Cycle in karst[J]. Zeitschrift fir Geomorphologies Neue Folge, 1997, 108(Suppl-Bd): 91-102.
- [2] 袁道先. 地球系统的碳循环和资源环境效应[J]. 第四纪研究, 2001, 21(3): 223-232.
- [3] 袁道先. 喀斯特与全球变化研究[J]. 地球科学进展, 1995, 10(5): 471-474.
- [4] 翁金桃. 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用[J]. 地球科学进展, 1995, 10(2): 154-158.
- [5] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 77-87.
- [6] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. Nature, 2001, 414: 169-72.
- [7] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land- and atmosphere based U. S. carbon sink estimates[J]. Science, 2002, 292: 2316-23.
- [8] Myneni R B, Dong J, Tucker C J, et al. A large carbon sink in the woody biomass of northern forests. Proc [J]. Natl. Acad Sci. USA, 98(26): 14784-14789.
- [9] 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.
- [10] 陈伟杰, 任晓冬, 熊康宁. 喀斯特石漠化地区开展林业碳汇项目的可行性初探——以贵州喀斯特石漠化综合防治为例[J]. 安徽农业科学, 2010, 10(38): 5254-5258.
- [11] 唐晓红, 吕家格, 魏朝富, 等. 区域稻田土壤碳储量的空间分布特

- 征[J]. 中国农学通报, 2009, 25(14):173-177.
- [12] 徐艳, 张凤荣, 段增强, 等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. 应用生态学报, 2005, 36(6):836-839.
- [13] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响——以北京市延庆盆地为例[J]. 生态学报, 2006, 26(10):3198-3203.
- [14] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究——以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社, 2002:23-28.
- [15] 中国标准出版社第二编辑室. 环境监测方法标准汇编(土壤环境与固体废物)[M]. 北京:中国标准出版社, 2007:327-440.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定方法[M]. 北京:上海科学技术出版社, 1978:11-148.
- [17] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. 土壤学报, 2007, 44(3):475-483.
- [18] 魏孝荣, 邵明安, 高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J]. 环境科学, 2008, 29(10):2879-2884.
- [19] Kern J S, Turner D P, Dodson R F. Special patterns in soil organic carbon pool size in the northwestern United States[J]. In: Lal R. Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1998:29-43.
- [20] 张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8):2314-2319.
- [21] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3):220-228.
- [22] 王燕, 王小彬, 刘爽, 等. 保护性耕作及其对土壤有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):776-771.
- [23] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):68-73.
- [24] 欧阳资文, 彭晓霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤有机质的空间变化及其对干扰的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6):1329-1336.
- [25] Fortin M C, Rochette P, Pattey E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60:1541-1547.
- [26] 罗海波, 刘方, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化[J]. 林业科学, 2009, 45(9):24-28.
- [27] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 等. 中国农业土壤固碳潜力与气候变化[M]. 北京:科学出版社, 2005:102-113.
- [28] 李阳兵, 王世杰, 罗光杰, 等. 喀斯特石漠化演变轨迹的典型案例分析——以贵州盘县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3):118-124.

Spatial-temporal dynamic features and tendency of the topsoil organic carbon in integrated rehabilitating karst rocky desert

XIONG Kang-ning^{1,2}, ZHOU Wen-long^{1,2}, LONG Jian², LUO Jing-sheng^{1,2}

(1. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: Taking the Guizhou Province, a representative karst area, for example, three typical demonstration areas for integrated rehabilitation to karst rocky desertification is chosen in the study. Based on the field monitored data in April 2006 and repeated sampling data in April 2009, the spatial-temporal dynamic characteristics of the topsoil in fragile environment under integrated rehabilitating is analyzed. The result proves the following items. After 3 years rehabilitation, the increase in topsoil organic carbon density at different plots of different desertification grades is different with each other. The amount of the increase in topsoil organic carbon density at mild and moderate rocky desertification plots is the largest, inconspicuous or potential rocky desertification plots is the second, and the serious rocky desertification is the smallest. Organic carbon density of the topsoil under different engineering measures manifests as: closed treatment > recovering farmland to forests and grassland > the project of transforming slope to terrace. While the growth manifests as: recovering farmland to forests and grassland > closed treatment > the project of transforming slope to terrace. Along with the decreases in land area of mild rocky desertification grade or more seriously desertification grade, the carbon storage of the topsoil increases further, and the carbon storage of the topsoil mainly exists in potential rocky desertification plot or not deserted region. The growth trend of topsoil organic carbon density perhaps presents the "S" pattern along with the rehabilitation, but the organic carbon density of topsoil in inconspicuous and potential rocky desertification plots will keep steady state in a long time for those lands are the basic farmland generally. At the mild and moderate rocky desertification plots, the increase in topsoil organic carbon density is the largest in early rehabilitation stage. So take effective methods of land use and strengthen sustainable management is of extremely vital significance in improving the carbon sequestration.

Key words: soil organic carbon; density; carbon storage; karst rocky desertification