

岩溶山区土壤溶解性有机碳对土地利用方式的响应及其与土壤养分的关系

蓝家程, 傅瓦利, 段正峰, 袁波, 彭景涛, 张婷

(西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要:对重庆中梁山不同土地利用方式下的表层(0—30 cm)土壤溶解性有机碳(DOC)含量和分布及其影响因素进行了研究。结果表明:土地利用方式明显影响了土壤 DOC 的含量和分布。不同土地利用方式下土壤 DOC 含量大小顺序为:橘林地(425.77 mg/kg) > 菜地(342.97 mg/kg) > 耕地(243.25 mg/kg) > 灌丛(177.74 mg/kg) > 草地(145.06 mg/kg), 土壤 DOC 占土壤有机碳(SOC)的比例为:橘林地 > 耕地 > 菜地 > 灌丛 > 草地。土壤 DOC 垂直分布规律性明显,除橘林地外,其它方式都是随着土层深度的增加而减小。相关分析表明,除了橘林地外,其余利用方式下土壤 DOC 均与土壤有机碳呈正相关;草地土壤微生物量碳对土壤 DOC 有很大的贡献,相关性达到极显著水平,其余利用方式均呈负相关。土壤 DOC 与土壤全氮、水解氮和速效钾相关水平达到极显著,与全磷呈显著正相关,相关系数分别为 0.421, 0.375, 0.576, 0.274, 可以作为土壤肥力的变化指标。

关键词:岩溶区; 土地利用方式; 土壤溶解性有机碳; 土壤养分

中图分类号:F301.24; S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0076-05

Response of Soil Dissolved Organic Carbon to the Land Use and the Relations With Soil Nutrients in Karst Area

LAN Jia-cheng, FU Wa-li, DUAN Zheng-feng, YUAN Bo, PENG Jing-tao, ZHANG Ting

(School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Soil samples (from the surface to 30 cm) of different land use type were collected to study the content, distribution of soil dissolved organic carbon (DOC) and its influence factors in Zhongliang Mountain, Chongqing. The results revealed that: land use type significantly affected the content and distribution of the soil DOC. The content of the soil DOC in different types of land use were orange land (425.77 mg/kg) > vegetable land (342.97 mg/kg) > slopping field (243.25 mg/kg) > shrub land (177.74 mg/kg) > grassland (145.06 mg/kg), the ratio of soil DOC in soil SOC were orange land > slopping field > vegetable land > shrub land > grassland. Regularities of the vertical distribution of soil DOC were obvious, in addition to orange land, soil DOC in the other types decreased with the increase in soil depth. Land use can change the soil properties, thereby affect the content and distribution of soil DOC. Correlation analysis showed that, in addition to orange land, soil DOC of the rest were positively correlated with soil organic carbon; the correlation between soil microbial biomass carbon and soil DOC was very significant in grassland, it meant that soil microbial biomass carbon had a great contribution to soil DOC, but the correlation of them in the other land use types was negative. Soil DOC and soil total N, hydrolysable N and available K were extremely significant. Correlation with total P was a significant positive, and their correlations were found with the coefficients of 0.421, 0.375, 0.576, 0.274, so the soil DOC can be used as an important indicator of changes in soil fertility.

Key words: karst area; land use type; soil carbon; soil dissolved organic carbon; soil nutrient

收稿日期:2010-12-26

修回日期:2011-01-16

资助项目:重庆市移民局课题(200909);国家自然科学基金(40701179)

作者简介:蓝家程(1986—),男(壮族),广西都安人,硕士研究生,研究方向为土地利用与土壤环境。E-mail:lanjc@swu.edu.cn

通信作者:傅瓦利(1954—),女,重庆人,博士,教授,主要从事土壤地理和土地利用研究。E-mail:fuwali@swu.edu.cn

土壤溶解性有机碳(DOC)属于土壤活性有机碳的一部分,是土壤有机碳中受植物和微生物影响强烈,具有一定溶解性,在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化、易分解、易矿化,其形态、空间位置对植物、微生物来说活性比较高的那一部分土壤碳素。已有的研究表明土壤 DOC 是土壤圈与其它相关圈层发生物质交换的重要形式,由于它的活泼性及在陆地生态过程中的作用,土壤 DOC 成为陆地生态系统中碳迁移研究中的热点^[1-2]。同时土壤 DOC 的淋失是土壤有机质分解损失的重要途径之一,对土壤中营养元素的迁移起重要的作用。土地利用变化导致覆被类型的变化,耕作和种植制度的改变,不仅直接影响土壤有机碳的含量和分布,还通过影响土壤有机碳形成、转化的因子而间接影响土壤有机碳^[3]。因此,与土壤有机碳相比,土壤 DOC 对土壤质量变化、环境因素以及土地利用变化更为敏感,对研究全球碳循环与环境有重要的意义。基于土壤活性有机碳组分活跃的性质和重要作用,确定其对土地利用变化的响应规律成为当前土壤碳和养分循环方面研究的一个热点^[4]。

我国岩溶区面积(344 km²)约占国土面积的1/3,其中西南连片裸露的岩溶区面积达54万km²^[4-5]。岩溶区属于生态脆弱区,目前土壤碳循环在岩溶区已得到相当的重视,但石灰土的富钙、偏碱性^[6-7]以及CO₂含量高的土壤环境是岩溶发育最为活跃的部位^[8],土壤碳的动态变化与循环特征受到高钙环境胁迫的影响,碳的转移有其自身的规律^[9]。土壤 DOC 是土壤碳转移的主要方式,在岩溶生态系统中发挥重要的作用。关于土壤 DOC 在岩溶生态系统碳流通和转移中的作用目前尚未十分清楚,因此本文选择西南地区典型岩溶地区重庆中梁山为例,通过分析土壤 DOC 对不同利用方式的响应及其影响因素,希望能够为岩溶区土壤碳循环与土壤质量的深入研究以及选择合理的土地利用方式提供参考。

1 研究区概况

重庆市中梁山位于东经106°18′14″—106°56′53″,北纬29°39′10″—30°3′53″,属于重庆市郊区。中梁山在地质构造上为西南地台、川东南拗陷带、华蓥山阻挡式复背斜扫帚状弧形构造区重庆弧的一部分。研究区由于岩溶作用后形成岩溶槽谷,组成“一山两槽三岭”的构造地貌格局,海拔400~700 m。区内年内气温3.1~43℃,年均气温18℃,多年平均降水量1 000 mm左右,属于中亚热带季风性湿润气候。研究区主要岩性为灰岩、页岩、砂岩、泥岩。土壤发育的地质背景是三叠纪嘉陵江组的岩溶角粒状白云质灰

岩,以化学结构为主,主要矿物成分是方解石和白云石,化学成分以Ca、Mg氧化物为主,Si、Al、Fe的氧化物含量很少。土壤类型属于黄色石灰土,土层厚0.15~1.0 m。研究区地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,受岩性、土壤和人类活动的影响,岩溶槽谷已经没有典型的常绿阔叶林地,现有植被为人工次生林。该区目前的主要土地利用类型是灌丛、草地、坡耕地和菜地。

2 研究方法

2.1 采样方法

在中梁山岩溶槽谷中选取5种具有代表性的土地利用方式。根据利用方式的不同及样方的大小,分别在灌丛和菜地中各取2个样点,在橘林地、草地和坡耕地中各取3个样点。在不同的土地利用方式下挖掘30 cm深的土壤剖面,分4层:0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm和20—30 cm进行取样。将所取的土样马上带回实验室分成两份,一份作为新鲜样品用于测定土壤溶解性有机碳和微生物量碳,如不能立即实验,用自封袋密封贮藏于4℃冰箱内,并尽快测定;另一份风干用于测定土壤养分。

2.2 土壤养分的测定

土壤全氮用凯氏法测定,水解氮用碱解法测定,全磷、速效磷、全钾和速效钾含量用常规法测定^[10]。

2.3 土壤有机碳及其组分的测定

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定。土壤溶解性有机碳(DOC—K₂SO₄)的测定方法^[11]:称取新鲜土样30 g,250 ml三角瓶中加入80 ml 0.5 mol/L的K₂SO₄,重复三次,在25℃振荡30 min(185 r/min)。中速滤纸过滤,吸取滤液10 ml于150 ml硬质试管中,加入0.1 mol/L的K₂Cr₂O₇—H₂SO₄10 ml加热至170~180℃,消煮30 min。冷却后全部移入三角瓶,加邻啡罗啉指示剂3滴,用0.05 mol/L的FeSO₄滴定,同时做试剂空白。土壤微生物量碳(MBC)的测定采用氯仿熏蒸培养法测定^[12],土壤微生物量碳系数为2.64。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用方式下土壤 DOC 含量

土壤溶解性有机碳(DOC)占土壤有机碳很小的一部分,但却能敏感的反映土壤环境变化,在陆地生态系统碳循环中起重要作用。不同土地利用方式下土壤 DOC 含量见表1,不同土地利用方式土壤 DOC 含量大小顺序为:橘林地(425.77 mg/kg) > 菜地(342.97 mg/kg) > 耕地(243.25 mg/kg) > 灌丛

(177.74 mg/kg) > 草地 (145.06 mg/kg), 菜地、耕地、灌丛、草地分别占到橘林地 80.55%, 57.13%, 41.75%, 34.07%, 表明不同土地利用方式下, 人类活动明显的影响了土壤 DOC 含量。

表 1 不同土地利用方式下土壤活性碳及其分配比例

利用方式	土层深度/cm	土壤 SOC/(g · kg ⁻¹)	土壤 MBC/(mg · kg ⁻¹)	土壤 DOC/(mg · kg ⁻¹)	DOC/SOC (%)
橘林地	0—5	17.40	556.98	106.20	0.61
	5—10	15.33	332.38	106.36	0.69
	10—20	12.07	222.04	86.84	0.72
	20—30	7.07	178.01	126.37	1.79
草地	0—5	21.28	317.28	50.83	0.24
	5—10	14.86	294.36	40.93	0.28
	10—20	14.82	164.52	29.43	0.20
	20—30	11.60	125.64	23.87	0.21
菜地	0—5	16.29	349.83	110.94	0.68
	5—10	14.81	492.13	103.16	0.70
	10—20	17.14	381.15	74.11	0.43
	20—30	12.44	495.33	54.76	0.44
灌丛	0—5	16.82	49.89	73.18	0.44
	5—10	11.94	48.85	49.64	0.42
	10—20	10.05	138.09	36.68	0.36
	20—30	9.88	246.44	18.24	0.18
耕地	0—5	9.32	98.78	95.75	1.03
	5—10	8.24	115.12	68.39	0.83
	10—20	7.24	82.77	44.21	0.61
	20—30	5.41	149.91	34.90	0.65

注: 数据主要来源于段正峰^[11]。

不同土地利用方式不同土层土壤 DOC 含量平均值为 18.24~126.37 mg/kg, 其中最高值出现在橘林地, 草地最小。相同土层不同土地利用方式土壤 DOC 含量差异最大的是 20—30 cm 层, 其中最大的橘林地是最小的灌丛的 6.93 倍; 差异最小的是 0—5 cm 层, 最小的草地占到最大菜地的 45.82%, 表明土地利用方式能够明显影响到土壤 DOC 含量的差异。

土壤 DOC 含量的垂直分布也受土地利用方式影响。不同土地利用方式除橘林地外, 其它方式都是随着土层深度的增加, 土壤 DOC 含量逐渐减小, 其中菜地和耕地在 0—30 cm 范围内基本上呈线性变化, 表明耕作方式和种植制度对土壤 DOC 含量分布产生影响, 也表明土壤 DOC 含量很大程度上依赖于土壤有机碳含量。草地和灌丛可能是随着土层深度的增加, 土壤细根生物量减少, 土壤有机质也减少, 微生物数量也降低, 因而土壤 DOC 含量逐渐减小。橘林地土壤 DOC 含量随深度增加先减小后增大, 可能是表层凋落物在雨水的浸泡下, 凋落物中大量的土壤 DOC 淋溶迁移到下层的结果。

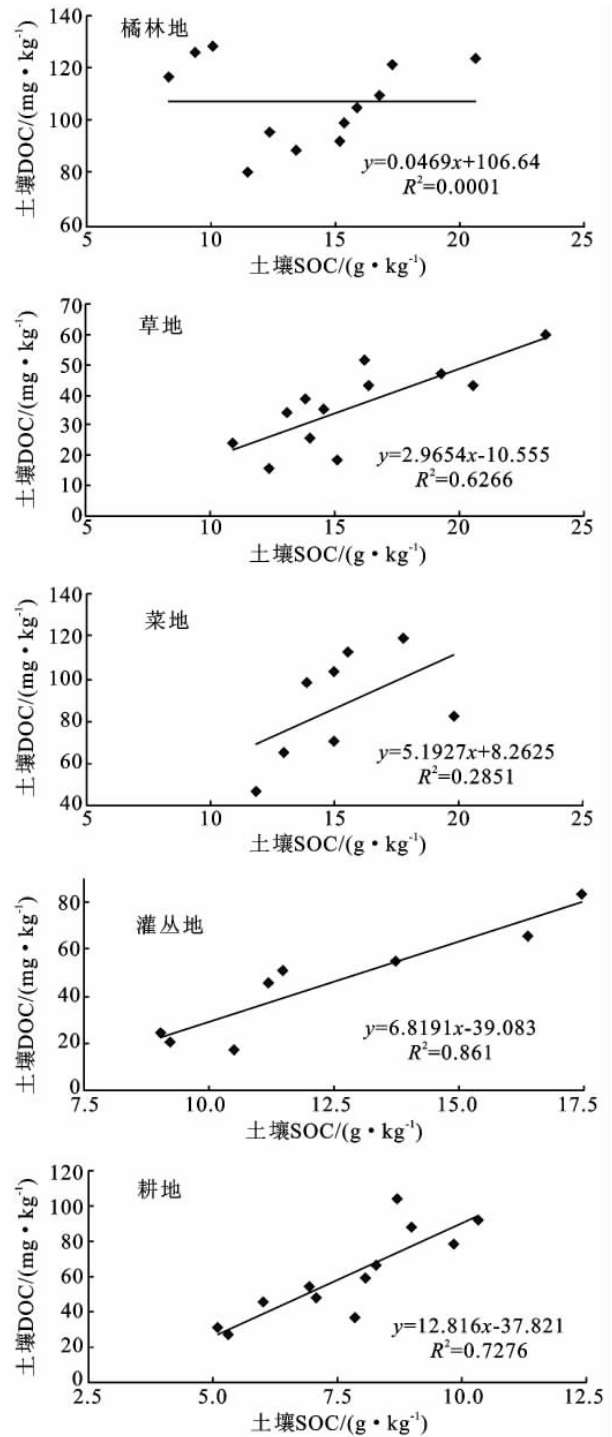


图 1 不同土地利用方式下土壤溶解性有机碳与土壤有机碳相关性

3.2 不同土地利用方式下土壤 DOC 占土壤 SOC 的比例组成

从土壤 DOC 占土壤 SOC 的比例来看, 橘林地 > 耕地 > 菜地 > 灌丛 > 草地, 这与土壤 DOC 含量在不同土地利用方式的分布基本符合。菜地、耕地、灌丛、草地分别占到橘林地的 68.86%, 98.09%, 44.47%, 28.25%, 这与土壤 DOC 含量在不同土地利用方式的分布有所差异。土壤溶液中 DOC 浓度和组成存在

明显的空间变异性。从不同层次土壤来看,橘林地各土层土壤 DOC 含量基本上较其它几种利用方式高,但从土壤 DOC 占土壤 SOC 的比例来看,橘林地各土层土壤 DOC 占土壤 SOC 的比例除了在 0—10 cm 范围内低于菜地和耕地外,都比其余几种利用方式高,其中,草地的比例基本上最小且各层比例差异不明显。5 种不同土地利用方式下土壤 DOC 占土壤 SOC 的比例除橘林地在土壤剖面中呈上升趋势外,其它土地利用方式均大体呈下降的趋势。这表明土地利用方式不仅对土壤 DOC 含量的剖面分布产生影响,而且对溶解有机碳的组成和结构也有较大影响。

3.3 土壤有机碳、微生物碳与土壤 DOC

全部样品分析表明,土壤 DOC 与土壤有机碳($R=0.189, P>0.05$)呈正相关,与土壤微生物碳($R=0.373, P>0.05$)呈正相关。5 种土地利用方式下土壤 DOC 与有机碳的关系见图 1,除了橘林地外,其余利用方式下土壤 DOC 均与有机碳呈正相关,其中草地、灌丛地、耕地达到极显著水平,说明土壤 DOC 依赖于土壤有机碳。橘林地土壤 DOC 与土壤有机碳没有明显的相关性,原因是 20—30 cm 层土壤 DOC 最

高,土壤有机碳却最低,这是土壤 DOC 迁移的结果。

土壤环境中的溶解性有机碳既是微生物分解有机质的代谢产物,又是微生物生长能量的来源^[13]。因此,土壤溶解性有机碳与土壤微生物活性密切相关。草地土壤 DOC 与土壤微生物碳($R=-0.916, P<0.01$)呈极显著正相关,表明土壤微生物碳对土壤 DOC 有很大的贡献;橘林地、菜地、灌丛地、耕地均呈负相关,相关系数分别为 $-0.140, -0.452, -0.762^*, -0.196$,表明微生物生长消耗了土壤 DOC。总之,土壤微生物碳和土壤 DOC 的关系众多因素的制约^[14]。不同土地利用方式下,土壤微生物数量和活性以及生长不同阶段影响了土壤 DOC 的含量和分布。

3.4 不同土地利用方式下土壤养分

岩溶区成土速度缓慢,水土易流失,大部分地区土层浅薄,富钙、偏碱和石生的地球化学环境限制了生物多样性,降低了土壤营养元素有效态,使供应的营养元素不平衡。因而,岩溶生态环境抵抗干扰能力较低,岩溶区属于生态脆弱的生态系统。研究区不同土地利用方式下土壤养分含量见表 2。

表 2 不同土地利用方式下土壤养分含量

利用方式	土层深度/ cm	全 N/ (g · kg ⁻¹)	水解 N/ (mg · kg ⁻¹)	全 P/ (g · kg ⁻¹)	速效 P/ (mg · kg ⁻¹)	全 K/ (g · kg ⁻¹)	速效 K/ (mg · kg ⁻¹)
橘林地	0—5	0.36	14.00	5.85	32.50	11.53	74.30
	5—10	0.47	11.50	5.40	36.90	10.77	68.90
	10—20	0.33	10.50	6.59	29.20	11.07	55.30
	20—30	0.37	8.90	2.83	85.50	10.66	43.40
草地	0—5	0.41	10.90	3.92	244.90	12.38	61.20
	5—10	0.34	11.10	3.53	244.70	11.04	39.70
	10—20	0.21	11.30	3.14	246.60	12.63	23.60
	20—30	0.28	9.00	2.96	161.40	11.78	17.80
菜地	0—5	0.26	13.30	4.69	38.20	10.86	44.20
	5—10	0.19	7.20	4.20	32.70	11.22	45.30
	10—20	0.23	6.40	5.65	28.70	10.47	17.90
	20—30	0.31	8.10	5.52	14.80	9.76	21.40
灌丛	0—5	0.41	14.30	3.74	242.80	9.31	19.50
	5—10	0.30	10.50	3.69	240.90	8.38	16.00
	10—20	0.26	10.10	3.67	241.70	8.08	17.90
	20—30	0.31	9.70	3.16	248.10	9.22	12.70
耕地	0—5	0.49	10.10	3.76	10.60	11.71	37.20
	5—10	0.44	9.40	3.76	6.10	11.35	23.60
	10—20	0.38	7.20	3.65	165.40	11.77	17.20
	20—30	0.48	5.90	3.15	240.50	12.98	17.40

注:数据主要来源于参考文献[11]。

从表 2 可以看出,不同土地利用方式明显地影响了土壤全 N 和水解 N 含量。不同土地利用方式下土壤全 N 含量大小依次为:耕地>橘林地>灌丛>草地>菜地;而水解 N 含量大小依次为:橘林地>灌丛>

草地>菜地>耕地。耕地中全 N 含量最高,而水解 N 却最低,这与耕作方式和种植制度等相关,菜地与耕地相比由于种植作物种类多,N 素的吸收利用率相对要高。在灌丛和草地中,全 N 含量并不高,但水解 N

含量比较高,说明退耕还林还草利于水解 N 的积累。全 N 在土壤剖面中变化趋势不明显,但在 20—30 cm 范围为内均统一表现为全 N 含量增高。水解 N 除草地外,其余 4 种利用方式下水解 N 含量基本随土层增加而降低。

土壤含 P 量的多少受成土母质的影响最大,其次气候、有机质与土壤 pH 对土壤 P 也有影响,土壤 P 含量还与施肥量密切相关。土地利用方式对土壤全 P 和速效 P 的含量影响比较明显(见表 2)。5 种土地利用方式下,全 P 含量大小依次为:橘林地>菜地>耕地>灌丛>草地;速效 P 含量大小依次为:灌丛>草地>耕地>菜地>橘林地。全 P 除菜地外,在各个剖面中均随土层深度的增加而降低,速效 P 在土壤剖面中没有明显的变化。

岩溶区土壤 K 含量相对其它地区偏低。5 种土地利用方式下,全 K 含量大小依次为:草地>耕地>橘林地>菜地>灌丛;速效 K 含量大小依次为:橘林地>草地>菜地>耕地>灌丛。不同土地利用方式下,全 K 和速效 K 含量在各个剖面均随土层深度的增加而降低。

3.5 土壤养分与土壤 DOC

土壤溶解性有机碳是土壤活性有机质,容易被土壤微生物分解,在提供土壤养分方面起着重要的作用^[15]。土地利用方式的变化可以改变土壤的植被覆盖,同时也会引起土壤管理措施的改变,进而引起养分在土壤系统中的再分配,影响到土壤有机碳库的循环过程。本文研究表明,土壤 DOC 与土壤养分关系密切,其回归方程和相关系数见表 3。由表 3 可知,土壤 DOC 与土壤全氮、水解氮和速效钾相关水平达到极显著,相关系数为 0.421,0.375,0.576,与全磷呈显著正相关,相关系数为 0.274,与全钾呈正相关,但与速效磷呈负相关,研究结果与徐阳春^[16]、俞元春^[17]的研究基本一致。说明土壤 DOC 与土壤养分有较强的相互影响作用,其含量大小可以反映土壤养分循环和供应状况,可以作为岩溶区土壤肥力变化的指标,但不同地区土壤 DOC 与养分的关系有所差异。

表 3 土壤溶解性有机碳与土壤养分的关系

项目	相关系数	sig. (2-tailed)
土壤溶解性有机碳与全氮	0.421**	0.006
土壤溶解性有机碳与水解氮	0.375**	0.008
土壤溶解性有机碳与全钾	0.253	0.321
土壤溶解性有机碳与速效钾	0.576**	0.005
土壤溶解性有机碳与全磷	0.274*	0.042
土壤溶解性有机碳与速效磷	-0.262	0.301

**表示极显著相关, $P<0.01$; *表示显著相关, $P<0.05$ 。

4 结论

(1)不同土地利用方式下土壤 DOC 含量差异明显,总体表现为:橘林地>菜地>耕地>灌丛>草地。表明人类活动能够改变土地利用方式,进而影响到土壤 DOC 的含量。

(2)土地利用方式能够影响到土壤 DOC 的垂直分布,并且不同利用方式呈现一定的规律性,除橘林地外,其它方式都是随着土层深度的增加土壤 DOC 含量逐渐减小,其中菜地和耕地在 0—30 cm 范围内基本上呈线性变化。

(3)土地利用方式也能够影响到土壤 DOC 占土壤 SOC 的比例,不同土地利用方式土壤 DOC 占土壤 SOC 的比例同土壤 DOC 含量分布基本一致。比例是个相对值,同含量比起来更能准确反映不同土地利用方式土壤 DOC 的差异。

(4)土地利用方式通过土壤有机碳的输入与输出,进而影响到土壤 DOC 的含量及分布。土壤 DOC 依赖于土壤有机碳,除了橘林地外,其余利用方式下土壤 DOC 均与有机碳呈正相关;土壤 DOC 既是土壤微生物碳代谢产物又是微生物生长的能量来源,草地土壤微生物碳对土壤 DOC 有很大的贡献,相关性达到极显著水平,其余利用方式均呈负相关。

(5)相关分析表明,土壤 DOC 与土壤养分关系密切,可以作为土壤肥力变化的指标。

参考文献:

- [1] Lai R. World soils and the greenhouse effect global change[J]. Newsletter,1999,37:4-5.
- [2] 曹建华,潘根兴,袁道先,等. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应[J]. 生态环境,2005,14(2): 224-229.
- [3] Parton W J, Schimel D S, Cole C V. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands[J]. Soil Science Society of American Journal,1987,51:1173-1179.
- [4] 周广胜,王玉辉. 全球生态学[M]. 北京:气象出版社,2003:275-277.
- [5] 李大通,罗雁. 中国碳酸盐分布面积测量[J]. 中国岩溶,1983,2(2):147-150.
- [6] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展,2003,18(1):37-44.
- [7] 曹建华,袁道先. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京:地质出版社,2005:16-23.
- [8] 潘根兴,曹建华. 表层带岩溶作用:以土壤为媒介的地球表层生态系统过程:以桂林峰丛洼地岩溶系统为例[J]. 中国岩溶,1999,18(4):287-296.

(下转第 86 页)

措施并经过长期的努力,逐步提高土壤肥力,以达到改善生态环境的目的。

小流域经过多年的治理,水土流失程度已经大大降低,各种治理措施的实施管理机制也日渐成熟。在前期的治理过程中,治理的目标都围绕在如何有效减少水土流失,如今水土流失程度已经得到有效控制,治理的目标也应转移到如何实现流域的有效管理,更好地培肥土壤,避免土壤的再次退化,以实现土壤的可持续利用。本研究在分析土壤肥力指标过程中,发现植被恢复较好的八十里河样地,存在土壤 pH 较低的情况;通过对不同年份治理的样地比较也可看出,2000 年治理的植被恢复效果较好的样地比 2006 年治理样地的 pH 值低,可见随着植被的恢复,土壤肥力提高,土壤存在着一定的酸化现象,在以后进一步的管理过程中应加以重视并有效改善。

参考文献:

- [1] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理与调控[M]. 北京:科学出版社,2002:41-45.
- [2] 王礼先. 流域管理学[M]. 北京:中国林业出版社,1999:1-10.
- [3] 陈志彪,朱鹤健. 不同水土流失治理模式下的土壤理化特征[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2006,22(4):5-11.
- [4] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 封禁管理对严重退化群落养分循环与能量的影响[J]. 山地学报,2002,20(3):325-330.
- [5] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 严重侵蚀红壤封禁管理后土壤性质的变化[J]. 福建林学院学报,2002,22(3):236-239.
- [6] 曾河水. 不同治理措施侵蚀地土壤物理性状变化的研究[J]. 福建水土保持,2002,14(1):50-60.
- [7] 刘洪生. 生态修复在长汀水土流失治理的几种应用模式分析[J]. 亚热带水土保持,2005,17(3):31-33.
- [8] 郑本暖,杨玉盛,谢锦升,等. 亚热带红壤严重退化生态系统封禁管理后生物多样性的恢复[J]. 水土保持研究,2002,9(4):57-63.
- [9] 于法展,李保杰,尤海梅,等. 多元统计分析方法在徐州城区公园绿地土壤肥力评价中的应用[J]. 水土保持研究,2007,14(4):159-161.
- [10] 孙波,张桃林,赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报,1995,32(4):362-369.
- [11] 徐建明,张甘霖,谢正苗,等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [12] 吕晓勇,陆允甫,王人潮. 土壤肥力综合评价初步研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,1999,25(4):378-383.
- [13] 陈丽慧. 基于多源信息的土壤侵蚀敏感性机器生态环境效应研究:以朱溪河小流域为例[D]. 福州:福建师范大学,2009.
- [14] 邹爱平. 红壤退化区侵蚀景观格局及其演变:以长汀县朱溪河小流域为例[D]. 福州:福建师范大学,2008.
- [15] 陈志彪. 花岗岩侵蚀山地生态重建及其生态环境效应[D]. 福州:福建师范大学,2005.
- [16] 岳辉,陈志彪. 朱溪河小流域水土流失治理与生态环境效应[J]. 福建地理,2003,18(1):6-8.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- [18] John J B, Thomas B M, Douglas L K. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plain[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000,64:2115-2124.
- [9] 潘根兴,曹建华,何师意,等. 土壤碳作为湿润亚热带表层岩溶作用的动力机制:系统碳库及碳转移特征[J]. 南京农业大学学报,1999,22(3):49-52.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤农业化学分析法[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [11] 段正锋,傅瓦利,甄晓君,等. 岩溶区土地利用方式对土壤有机碳组分及其分布特征的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(2):109-114.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学析[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [13] 曹建华. 岩溶土壤系统中生物作用及有机碳转移对于 $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系的调节与控制[D]. 南京:南京农业大学,2001.
- [14] 莫彬,曹建华,徐祥明,等. 岩溶山区不同土地利用方式对土壤活性有机碳动态的影响[J]. 生态环境,2006,15(6):1224-1230.
- [15] 柳敏,宇万太,姜子绍,等. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应[J]. 土壤通报,2007,38(4):758-762.
- [16] 徐阳春,沈其荣,冉炜. 长期免耕和施用有机肥对土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报,2002,39(1):89-96.
- [17] 俞元春,李淑芬. 江苏下蜀林区土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J]. 土壤,2003,35(5):424-428.

(上接第 80 页)