

喀斯特高原典型小流域土壤有机碳及其组分的分布特征

邱虎森^{1,2,3}, 苏以荣^{1,3*}, 陈香碧^{1,3}, 黎 蕾^{1,3}, 李 杨^{1,3}, 何寻阳^{1,3}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘 要:以贵州省清镇王家寨为喀斯特高原典型样区,采用网格布点法,调查研究了土壤总有机碳(SOC)、可溶性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)的分布特征。研究表明:灌木林地表层土壤 SOC、DOC 和 MBC 含量分别为 56.86、68.74 mg·kg⁻¹ 和 264.12 mg·kg⁻¹,均显著高于旱地与水田($P<0.05$);各土地利用方式表层土壤微生物熵(MBC/SOC)值处于 0.45%~0.55%之间,土地利用方式对土壤 SOC 及其组分均有显著影响。协方差分析表明,土壤 MBC 受土地利用方式和 pH 的影响较大,土壤 SOC 和 DOC 受海拔高度的影响较大。不同土地利用方式下土壤 SOC 与 MBC 无相关性,而 DOC 与 MBC 的相关性正负各异。3 种土地利用方式剖面土壤中,灌木林地 0~30 cm 各土层 MBC 含量差异显著($P<0.05$),水田 20~30 cm 土层 DOC 含量显著低于 0~20 cm 各土层。表层(0~10 cm)土壤 SOC 密度以灌木林地最大,但旱地(155.97 t·hm⁻²)和水田(107.92 t·hm⁻²)1 m 以内土体的有机碳密度显著高于($P<0.05$)灌木林地(76.14 t·hm⁻²),结合土层厚度,水田与旱地有机碳储量高于灌木林地。研究表明加强保护灌木林地,对农耕地实行秸秆还田,将有利于区域土壤有机碳的积累和区域生态的恢复,维持区域的可持续发展。

关键词:喀斯特高原区;土壤有机碳;微生物生物量碳;可溶性有机碳;分布特征

中图分类号:X153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-1956-09

Characteristics of the Distributions of Soil Organic Carbon and Main Components in a Typical Catchment in the Karst Plateau

QIU Hu-sen^{1,2,3}, SU Yi-rong^{1,3*}, CHEN Xiang-bi^{1,3}, LI Lei^{1,3}, LI Yang^{1,3}, HE Xun-yang^{1,3}

(1.Key Laboratory for Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2.College of Resource Environment Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3.Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China)

Abstract: Understanding the distributions of soil organic carbon(SOC) and its main fractions in a typical Karst catchment is a fundamental issue for restoring and reconstructing the degraded Karst ecosystems in Southwest China. 248 regular grid designed soil samples were collected at the Wangjiazhai Village of Qingzhen County in Guizhou Province(a typical Karst plateau) in Jan. 2010, and their SOC, dissolved organic carbon(DOC), and microbial biomass carbon(MBC) were determined. The results showed that the contents of SOC, DOC and MBC in the topsoils(0~20 cm) of shrub land were 56.86 g·kg⁻¹, 68.74 mg·kg⁻¹ and 264.12 mg·kg⁻¹, respectively and they were significantly higher than those in the topsoils of upland and paddy field($P<0.05$). The ratios of SOC/MBC ranged from 0.45% to 0.55% in the topsoils under different land use types. SOC and its main fractions were significantly influenced by the land use types. Covariance analysis showed that MBC was apparently influenced by land use type and pH, while SOC and DOC were influenced by geographic latitude. No significant correlation was found between SOC and MBC, but the correlations between DOC and MBC were variable under different land use types. The MBC contents were significantly decreased with the increase of soil depths within 0~30 cm for shrub land($P<0.05$). The contents of DOC for paddy field in the 20~30 cm soil were significantly lower than those in the 0~20 cm soil($P<0.05$). The SOC density in the very topsoils(0~10 cm) in shrub land was higher than those in other land use types, but in the 1 m soil profile, the SOC densities in upland(155.97 t·hm⁻²) and paddy(107.92 t·hm⁻²) were significantly higher than that in shrub land(76.14 t·hm⁻²)($P<0.05$). Therefore, the upland and paddy field seem favor for the

收稿日期:2012-03-29

基金项目:中国科学院知识创新重要方向项目(KSCX2-YW-436);中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070403);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10);国家基金项目(41171246)

作者简介:邱虎森(1987—),男,汉族,河南项城人,在读硕士研究生,目前主要从事土壤养分循环及其调控研究。E-mail:qiuhusen2008@163.com

* 通信作者:苏以荣 E-mail:yrsu@isa.ac.cn

SOC accumulation in soils, compared with the shrub land. However, in a comprehensive manner, the protection of shrub land and the deployment of straw return practice in the agricultural fields are eventually helpful for the SOC accumulation, the restoration of the regional ecological environment and the regional sustainable development.

Keywords: Karst plateau; soil organic carbon; microbial biomass carbon; dissolved organic carbon; distribution

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]。而作为土壤有机碳重要组分的土壤微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC),前者被视为土壤肥力变化的重要指标之一^[2],后者的存在形态以及含量高低对土壤微生物的利用活性影响较大,并对研究碳循环与环境评价有重要意义^[3-5]。不同尺度下影响土壤理化性状的主要因素不同,一般认为在小流域尺度上,土地利用方式的变化对土壤理化性质的研究较为显著^[6]。目前对喀斯特高原区多集中于石漠化方面的研究,而土壤 SOC 及其组分之间的相互关系、空间分布及不同土地利用方式对其组分的影响方面的研究文献相对较少。我国喀斯特分布以西南地区最为集中,其生态脆弱性表现在环境容量小、抗干扰能力弱、稳定性低和自我调节能力差。西南喀斯特地区根据地貌可分为峰丛洼地、峰林平原、高原、峡谷、槽谷和断陷盆地 6 种类型,地貌类型、人类活动及气候条件的差异,会影响区域土壤形成及土地的利用方式,进而影响土壤有机碳及其组分的分布。因此,要因地制宜地制订喀斯特退化生态系统的恢复重建措施,就需要对不同地区不同地貌类型进行系统的研究。

本研究拟在前期对峰丛洼地和峰林平原研究的基础上,采用野外调查和室内分析相结合的方法,利用 1:10 000 大比例尺土壤图,选择贵州省清镇王家寨为喀斯特高原典型小流域,通过网格布点密集采样,从含量的频率分布、剖面分布和空间分布 3 个层面更准确地研究了不同土地利用方式(旱地、水田和灌木林地)土壤 SOC、DOC、MBC 的分布特征及有机碳密度的变化情况,旨在与以往喀斯特地区不同地貌类型的相关研究进行对比,了解喀斯特高原典型小流域土壤 SOC 及其组分的分布状况、相关性及其土地利用方式对其组分的影响,为该区退化生态系统恢复重建、土地的合理开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样区概况

王家寨小流域位于喀斯特高原区的清镇市簸箕

村、贵州省最大的人工湖——红枫湖北湖上游麦翁河东侧,北纬 26°31'45"~26°30'27",东经 106°20'5"~106°21'8",面积约 2.4 km²,海拔最高点 1 451.1 m,最低点 1 275 m。区内出露地层均一,为一套下三叠统关岭组(T_{2g})灰质白云岩。地貌为典型喀斯特峰丛谷地,峰丛与谷底的面积比约为 1.65:1,属亚热带季风湿润气候,多年平均降水量 1 200 mm,主要集中在 5—9 月。洼地以耕地为主,种植有水稻、玉米、西红柿、油菜等农作物;灌木树种主要有火棘(*Pyracantha floruniana*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、月月青(*Itea ilicifolia*)、悬钩子(*Rubus* sp.)和顶坛花椒(*Zanthoxylum lanispinum* var. *dingtanensis*),草本植物主要有庐山楼梯草(*Elatostema stewardi*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、狗芽根(*Cynodon dactylon*)和莎草(*Cyperus* sp.),乔木主要为村寨风水林。洼地中以耕地为主,旱地土壤类型为黄壤(常湿润铁铝土),水田土壤类型为水稻土(水耕人为土);峰丛以灌木林为主,土壤类型以石灰岩土(常湿润铁硅铝土)为主。

1.2 样品采集与测定

于 2010 年 1 月在研究区采用网格布点法采集表层(0~15 cm)土壤样品共 248 个(图 1),并测定土层深度。同时选择旱地、水田和灌木林地挖取典型土壤剖面,其中旱地 10 个剖面、水田 3 个剖面、灌木林地 9 个剖面。剖面深度为 1 m(不足 1 m 以实际深度为准),10 cm 厚度分层取样,用环刀测定各层容重^[4],取剖面样 22 个。拣出新鲜土壤样品中的动植物残体等,然后充分混匀,按照四分法取出一部分放入 4℃冰箱保存用于培养实验,剩余土壤充分混匀风干过 2 mm 筛,对于未过筛的砾石称重记录,用于有机碳密度的计算,将过 2 mm 筛的风干土样按四分法取出一部分,过 100 目筛。

土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法。土壤全氮含量先采用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法得到消煮液,转移至 100 mL 容量瓶定容,最后使用 FIA5000 流动注射分析仪测定。土壤 DOC 采用硫酸钾浸提-碳分析仪器法,土壤 MBC 的测定采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提-碳分析仪器法^[14]。简要操作步骤:取

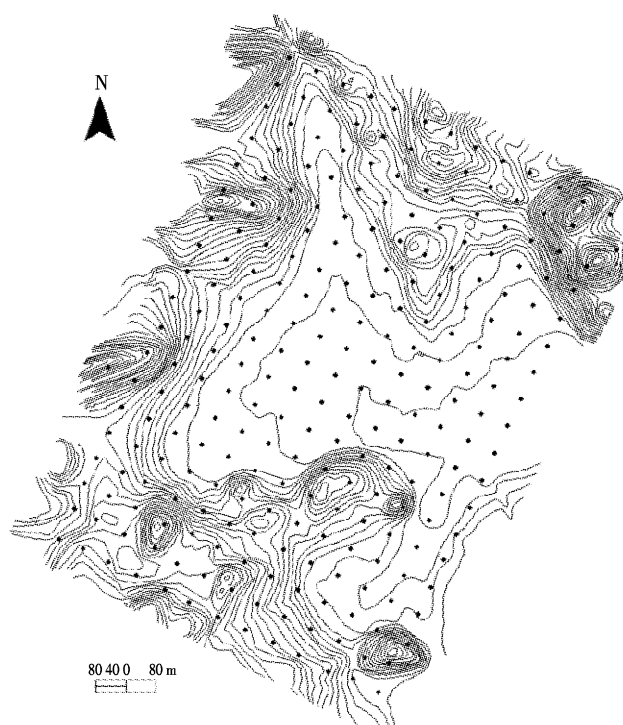


图1 贵州省王家寨土壤取样点分布图

Figure 1 Soil sampling location in Wangjiazhai catchment

经预培养的土壤4份,每份鲜土重25.00 g,其中两份用去乙醇氯仿熏蒸24 h,熏蒸与不熏蒸土样均加入80 mL 0.5 mol·L⁻¹硫酸钾浸提剂,振荡浸提30 min (300 r·min⁻¹)后过滤,浸提液中有机碳含量采用碳-自动分析仪测定。

1.3 土壤有机碳密度的计算

利用已求出的土壤容重及有机碳含量,计算土壤有机碳密度。计算公式为:

$$T_s = \sum_{i=1}^n 0.1 \times B_i \times SOC_i \times D_i \times (1 - S_i)$$

式中: T_s 为土壤有机碳密度,t·hm⁻²; B_i 为第*i*层土壤的容重,g·cm⁻³; D_i 为第*i*层土壤的厚度,cm; SOC_i 为第*i*层有机碳含量,g·kg⁻¹; S_i 为第*i*层>2 mm的石砾体积所占的百分比,%;0.1为单位换算系数。

1.4 数据分析

不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分含量的影响,各组分含量的比较,以及各组分及影响因素的相关性分析均在SPSS 16.0软件中完成,作图在Excel 2003以及ArcGIS系统中完成。

2 结果与分析

2.1 表层土壤SOC、DOC及MBC含量分布

土壤SOC含量主要决定于植被每年的归还量和

分解速率,归还量大、分解速率缓慢会造成土壤积累较多的有机碳^[7],土地利用方式的改变影响着土壤SOC含量^[8]。经正态检验,不同土地利用方式下旱地与水田SOC服从正态分布,而灌木林地SOC经对数转换后服从正态分布。由图2a可以看出不同土地利用方式土壤SOC含量变幅不同,旱地SOC含量主要分布在7~39 g·kg⁻¹之间,其中72.2%在19~29 g·kg⁻¹范围内,水田SOC含量高峰值主要集中在7~19 g·kg⁻¹范围内,其间分布频率达到57.9%,而灌木林地变幅较大,在19~119 g·kg⁻¹范围内的累积分布频率达到90.2%。经正态检验,仅有水田土壤DOC含量服从正态分布,而旱地与水田DOC含量经对数转换后均服从正态检验。DOC的来源主要分为土壤自身含有及外部进入土壤的。对不同土壤及环境条件下DOC的来源和变化仍然存在很多争论,但大部分研究表明,主要与输入土壤中的有机质相关,并且土壤中DOC主要来源于近期的植物枯枝落叶和土壤有机质的腐殖质^[5,9-10]。研究发现不同土地利用方式土壤DOC含量所处含量变化区间旱地与水田较一致,高峰值均处在27~47 mg·kg⁻¹区间内,其分布频率分别为58.8%和52.6%,在7~87 mg·kg⁻¹区间内的累计频率分别达到96.9%和100%,其含量分布较为集中。可以看出旱地DOC在67~107 mg·kg⁻¹区间的累计频率明显高于水田,这与旱地SOC含量在较高区间累计频率高于水田的结果较一致;而灌木林地的DOC含量变化区间为13.46~242.19 mg·kg⁻¹,频率分布较分散,在27~107 mg·kg⁻¹之间的累计频率为90.2%。

研究区不同土地利用方式土壤MBC含量均服从正态分布,旱地与水田土壤MBC含量集中分布区间较一致,主要集中在50~210 mg·kg⁻¹之间,分布频率分别为94.9%和78.9%;而在210~310 mg·kg⁻¹区间内,分布频率分别为4.1%和21.1%,这说明与旱地相比,水田MBC的含量有向较高水平集中的趋势。由于样点所处的海拔高度及周围微环境的差异导致灌木林地土壤MBC的变化幅度较大,频率分布曲线较分散,其高峰值位于210~310 mg·kg⁻¹之间,分布频率仅为34.1%。方差分析表明,灌木林地的土壤MBC均值含量[(264.12±123.20)mg·kg⁻¹]显著高于旱地[(129.25±47.72)mg·kg⁻¹]与水田[(151.90±71.51)mg·kg⁻¹],旱地与水田虽无差异,但水田MBC含量要高于旱地。总体上处于何振立等^[11]报道的中国土壤MBC的含量范围42~2064 mg·kg⁻¹的低值区,研究区内水田与旱地的结果处于朴河春等^[12]报道的贵州山区梯

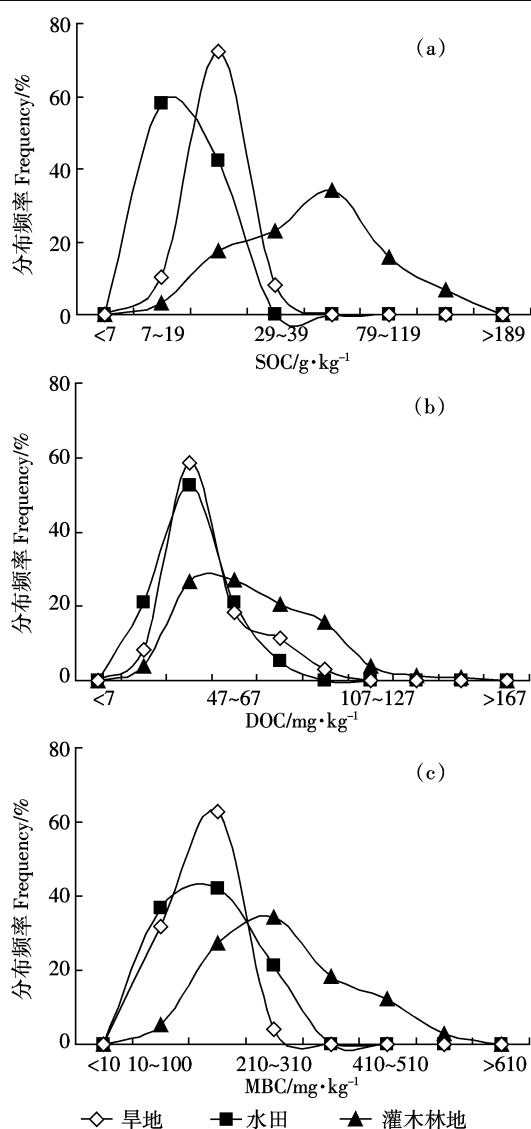


图 2 不同土地利用方式土壤 SOC(a)、DOC(b) 及 MBC(c) 分布特征

Figure 2 Distribution of SOC(a), DOC(b) and MBC(c) under different land use

田土壤 MBC [$(160 \pm 38) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 的含量范围内。灌木林地 MBC 含量处于任京辰等^[13]研究的供试岩溶土壤 MBC 的含量范围 ($179 \sim 844 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 内。

土壤 DOC 是土壤中活性最高的有机碳组分, 虽然所占有有机碳总量的比例一般不超过 2%^[14-15], 但它对土壤有机质和氮、磷、硫等养分的迁移和转化及其有效性起着重要的作用。土壤 MBC 在土壤 C 库中所占比例很小, 一般只占有有机碳总量的 4% 以下, 但对土壤有效养分而言, 却是一个很大的供给源和库存^[16], 土壤 MBC 被视为土壤肥力变化的重要指标之一^[17]。由表 1 可以看出不同土地利用方式下, 土壤 MBC/SOC 值不存在显著性差异, 比值均小于 1%, 但以旱地 MBC/SOC 值

表 1 不同土地利用方式表层土壤 DOC/SOC、MBC/SOC 值分析 (%)

Table 1 Analysis of DOC/SOC, MBC/SOC under different land use (%)

项目	旱地 Upland	水田 Paddy	灌木林地 Shrub land
DOC/SOC	$0.21 \pm 0.10a$	$0.22 \pm 0.09a$	$0.14 \pm 0.10b$
MBC/SOC	$0.55 \pm 0.25a$	$0.45 \pm 0.33a$	$0.46 \pm 0.22a$

注: 表中不同小写字母表示同行差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: The same letters within each row column represented statistical significant at 0.05 level.

为最高, 水田与灌木林地近似相等; 旱地和水田之间的 DOC/SOC 值无显著性差异, 而与灌木林地的 DOC/SOC 值差异显著, 并以水田 DOC/SOC 值最高。

为了能更直观地反映研究区内土壤 SOC 及其组分的空间分布状况, 本文结合地统计学原理和 GIS, 利用协同克里格法绘制了其空间分布图 (图 3)。可以看出周围峰丛坡地 SOC 与 DOC 含量要高于中间洼地农田的含量, 结合土地利用方式图可以看出农耕地中颜色较浅的斑块主要为水田的分布区域, 其周围为旱地分布区域; MBC 含量仍是以周围灌木林地大于中间洼地, 旱地 MBC 含量低于水田, 并在长轴方向上呈条带状分布, 并有大小斑块交错分布, 而这一分布特征可能是由于研究区内土地利用类型复杂, 耕作措施、施肥以及种植作物等因素引起的。这也体现出土地利用方式的不同造成了其养分含量的空间分布上的差异。研究发现土壤 SOC 及其组分的分布均属于中等程度空间自相关, 这表明在受人为因素如土地利用方式等影响的同时, 还受到土壤质地、类型等非区域因素的影响。

2.2 表层土壤 SOC、DOC 及 MBC 相关性及其影响因素分析

由表 2 可以看出与以往很多结论不同, 本研究中不同土地利用方式下土壤 SOC 与 MBC 之间不存在相关性。旱地土壤 MBC 与 DOC 呈极显著负相关, 相关系数为 -0.375 ; 水田土壤 SOC 及其各组分之间没有表现出明显的相关性; 而灌木林地土壤 SOC 与 DOC 呈现极显著正相关, 相关系数为 0.432 , DOC 与 MBC 呈现极显著正相关, 相关系数为 0.286 。

结合表 3 的分析结果, 研究小流域内土地利用方式对土壤 SOC 及其组分的影响均达到显著水平, 根据 F 值, 土地利用方式对 MBC 的影响程度最大, 其次是对 SOC, 对 DOC 的影响程度最小。

有研究表明, 海拔高度的变化对土壤养分、微生物活性等有一定的影响^[18], 而土壤 pH 通过影响微生物

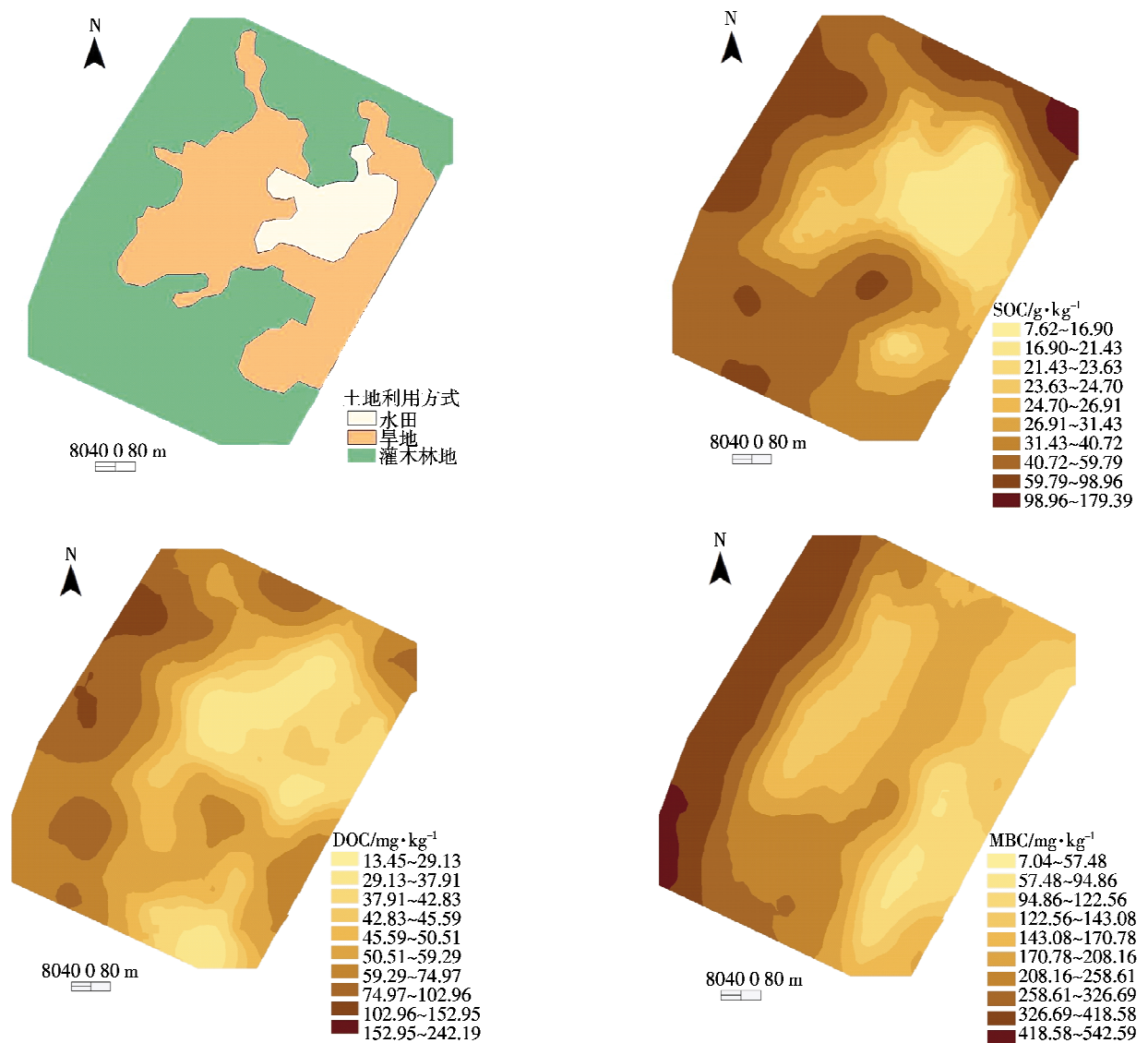


图 3 研究区表层土壤土地利用类型以及 SOC、DOC、MBC 空间分布图
Figure 3 Spatial distribution of land use type, SOC, DOC and MBC

表 2 不同土地利用方式表层土壤 SOC 及其组分相关系数

项目	旱地 Upland			水田 Paddy			灌木林地 Shrub land		
	SOC	DOC	MBC	SOC	DOC	MBC	SOC	DOC	MBC
SOC	1	-0.134	0.117	1	0.064	-0.319	1	0.432**	0.139
DOC		1	-0.375**		1	-0.340		1	0.286**
MBC			1			1			1

注:** 表示相关统计量检验达到极显著水平($P<0.01$)。 ** means correlation is significant($P<0.01$)。

表 3 不同土地利用方式对土壤 SOC 及其组分的影响

土地利用方式 Land use	SOC	DOC	MBC
<i>F</i> value	52.641*	22.590*	65.379*

注:* 表示相关统计量检验达到显著水平($P<0.05$)。 * means correlation is significant($P<0.05$)。

的活性而影响有机质的降解。结合前人研究及样区调查结果,本文选取土壤 pH 和海拔高度作为该流域影响土壤 SOC 及其组分分布的协同变量进行分析。协方差分析可以排除协同变量的影响,实现控制变量对观测变量作用效果的准确估计。由表 4 可以看出,排除土壤 pH 及海拔高度的影响,土地利用方式仅对

表 4 各影响因子对土壤 SOC 及其组分的方差贡献率

Table 4 Variance ratio analysis of different factors on SOC and its fractions

项目	SOC	DOC	MBC
土地利用方式 Land use	1.449	1.924	14.657*
pH	4.846*	1.347	16.018*
海拔高度 Latitude	53.946*	12.203*	4.540*
随机误差 Error	552.784	492.685	7 582.578

注：* 表示相关统计量检验达到显著水平 ($P<0.05$)。*means correlation is significant ($P<0.05$)。

MBC 的影响较为显著，排除土地利用方式和海拔高度的影响，土壤 pH 对 SOC 和 MBC 的影响较为显著，而海拔高度对 SOC 及其组分均有显著性影响。从整体上看，土壤 MBC 受土地利用方式和 pH 的影响较大，土壤 SOC 和 DOC 受海拔高度的影响较大。

2.3 土壤 SOC 及其密度、DOC 及 MBC 含量的剖面分布

由图 4 可以看出，随着土层深度的增加，各土地利用类型下土壤 SOC 的含量均呈递减趋势。地表的枯枝落物和植物根系分解形成的 SOC 首先进入土壤表层，从而使得表层土壤的 SOC 含量明显高于深层土壤。由于灌木林地土层厚度一般仅 20~30 cm，对于灌木林地的剖面深度以 30 cm 进行研究。在不同土地利用方式下，0~10 cm 土壤 SOC 含量以灌木林地最高为 $(40.62\pm14.10)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其次是旱地 $(25.38\pm5.10)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最低值为水田 $(18.11\pm1.96)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。单因素方差分析表明 0~10 cm 土层灌木林地 SOC 含量显著高于旱地和水田 SOC 含量 ($P<0.05$)，而旱地与水田之间差异不显著。

由图 5 可以看出，土壤有机碳密度取决于土壤 SOC 含量、土壤容重以及砾石含量，因此不同土地利用方式下土壤有机碳密度存在差异。旱地与灌木林地均以表层 0~10 cm 的土壤有机碳密度最大，并且以灌

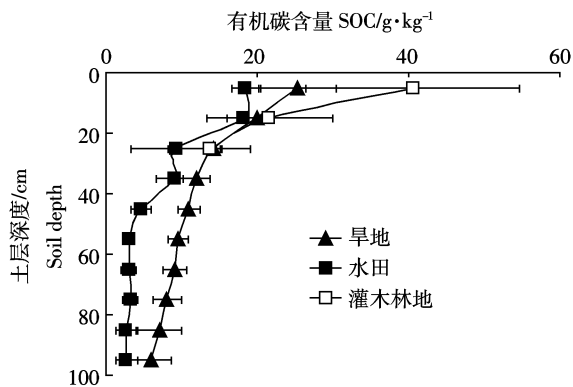


图 4 土壤有机碳含量层次变化
Figure 4 Dynamics of soil organic carbon density by depth interval

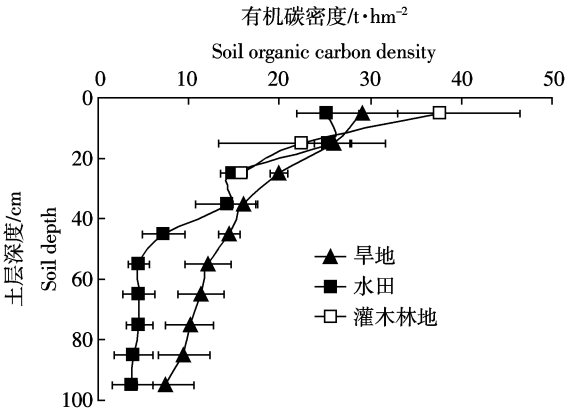


图 5 土壤有机碳密度层次变化
Figure 5 Dynamics of SOC content by depth interval

木林地 0~10 cm 土层有机碳密度最大，而 10~20 cm 灌木林地有机碳密度就明显低于水田与旱地，这也与灌木林地土层较薄，有机碳分布主要集中于表层有关。随着土层深度的增加，各土地利用方式下有机碳密度大小趋于平稳，但仍可看出水田整个剖面土壤有机碳密度都低于旱地。整体而言，不同土地利用方式下，土壤剖面有机碳密度为：旱地 $(155.97\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})>$ 水田 $(107.92\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})>$ 灌木林地 $(76.14\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$ 。方差分析表明：旱地和水田有机碳密度显著高于 ($P<0.05$) 灌木林地。

由于研究区灌木林地剖面样所取位置不同，土层深度各异，为便于对比分析，3 种土地利用方式均取 0~30 cm 土层进行分析。由表 5 可以看出，各土地利用方式下，0~30 cm 土层中 DOC 与 MBC 的含量均随土层深度的增加呈现递减趋势，土壤 DOC 在剖面上的分布主要与 DOC 的生物降解或吸附因素等有关。其中除水田 20~30 cm 与 0~20 cm 各层土壤 DOC 含量呈显著性差异，旱地与灌木林地各土层 DOC 含量无显著性差异。0~10 cm 土壤 DOC 含量以灌木林地最高为 $(49.59\pm9.37)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其次是水田 $(47.15\pm3.18)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最低值为旱地 $(36.84\pm16.06)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。3 种土地利用方式 0~30 cm 土层中，随着土层深度的增加，MBC 的含量均表现出递减趋势，仅有灌木林地各土层 MBC 含量呈显著性差异 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 表层土壤 SOC、DOC 及 MBC 分布特征

表层土壤 SOC 含量的影响因素很多，其中土地利用/覆被是一个重要因素^[19]，有研究表明，不同植被下表层土壤 SOC 含量变异明显^[20-21]。分析结果表明，不同土地利用方式下表层土壤 SOC 含量存在一定的

表 5 不同土地利用方式土壤剖面 DOC 及 MBC 含量层次变化($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 5 Dynamics of DOC and MBC content by depth interval under different land use($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土地利用方式 Landuse	0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm	
	DOC	MBC	DOC	MBC	DOC	MBC
旱地 Upland	36.84±16.06aA	158.20±84.93aA	32.75±14.97aA	108.90±37.57aA	25.08±11.42bA	40.90±1.22aA
水田 Paddy	47.15±3.18aA	205.85±24.68aA	43.63±3.76aA	192.65±24.19aA	25.49±6.59bB	115.46±37.68aA
灌木林地 Shrub land	49.59±9.37aA	142.46±25.65aA	42.63±11.96aA	98.96±22.55bB	43.89±20.02aA	75.28±20.84aA

注:表中不同小写字母表示同列差异达到显著水平($P<0.05$),不同大写字母表示同一指标不同土层差异达到显著水平($P<0.05$)。

Note: The small letters within each vertical column represented statistical significant at 0.05 level. The large letters represented statistical significant at 0.05 level under the different layers of the same index.

差异,表层土壤 SOC 均值含量由大到小依次是灌木林地($56.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>旱地($23.52\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>水田($19.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。灌木林地每年都有较多的枯枝落物的积累,从而为土壤 SOC 的积累提供来源,同时该区灌木林地的植被覆盖率相对较高,减小了石漠化进程和水土流失,有利于土壤养分的积累。喀斯特地区独特的岩溶作用使许多岩石表面因溶蚀而凹陷成槽,土壤就积累其中,土壤表面低于围绕的岩石,土壤侵蚀强度小,有利于有机碳的积累^[22]。旱地和水田有机碳含量相对较低,可能是由于长期的开垦和耕作,破坏了土壤原有的结构,有机质分解增强,导致土壤碳素大量流失^[23],同时作物残留很少,不利于土壤 SOC 的积累。旱地 SOC 含量高于水田可能是由于研究区内水田常年水旱轮作,且在采样期间种植有油菜,加速了土壤 SOC 的矿化速率,从而降低了土壤 SOC 含量;而大多数旱地为秸秆还田休耕地,有利于 SOC 的积累。

土壤 DOC 作为有机碳库的一个重要组成部分,土壤有机质的损失途径主要是 DOC 的淋失,研究表明,DOC 淋溶量与土壤 SOC 含量密切相关,SOC 水平高的土壤,其 DOC 的淋溶生成量也相对较高^[24]。本研究不同土地利用方式下 SOC 含量与 DOC 含量变化一致,并以灌木林地有机碳和 DOC 含量最高,其值为 $68.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。灌木林地土壤有机碳含量与 DOC 以及砾石含量之间均达到显著相关,相关系数分别为 0.432 和 0.259,说明灌木林地土壤砾石与 DOC 的含量影响了土壤有机碳含量的大小,而旱地与水田均没有表现出明显的相关性,这可能由于作为耕作用地,水田与旱地土壤水分含量、pH、耕种制度、施肥情况等都会影响输入土壤中的有机物数量与种类,并且影响土壤结构的稳定性,从而导致影响土壤 SOC 含量的各因素的相互作用,复杂的相互作用导致土壤 SOC 含量的变化,削弱了砾石和 DOC 对 SOC 的影响作用。由于水田与旱地受人为因素影响较大,如施用有

机肥、翻耕等农事活动带入土壤更多的有机物质,使之成为 DOC 的重要来源,从而导致旱地与水田 DOC/SOC 值显著高于灌木林地。

土壤 MBC/SOC(土壤微生物熵)可以作为有机碳生物有效性指标,指示土壤质量变化和土壤健康状况或肥力,其值的变化可反应土壤中输入的有机质向微生物量碳的转化效率、土壤中碳损失以及土壤矿物对有机质的固定^[25]。不同土地利用方式下 MBC/SOC 值虽无显著性差异,但以旱地最高,而水田和灌木林地基本持平,并且均处于 0.45%~0.55%之间,这与以往喀斯特地区研究结果有一定差别^[26],结果偏小表明研究区内土壤微生物活性相对较低,分析其原因可能是土壤微生物群落受土壤 C 元素影响较大,随着土壤中可利用的 C 元素含量的减少,微生物数量降低,并导致微生物群落结构改变^[12],研究发现研究区不同土地利用方式下土壤 C/N 处于 10.28~10.82 之间,当 C/N 等于或小于 20:1 时,土壤微生物的生长受到 C 源限制,从而导致微生物数量降低,同时可能由于采样季节为冬季,较不适宜的水热条件、耕作制度、植被种类的变化等使对土壤及外界环境条件敏感的微生物种群消失,仅保留了抗逆性较强的少量微生物种群,而喀斯特高原生态环境的退化也会影响到微生物的分布。因此,要了解该区土壤微生物熵的数值范围及变化特征,有待于进一步做季节性变化及微生物基因和功能多样性的研究。

研究发现不同土地利用方式下,土壤 SOC 与 MBC 之间不存在相关性;旱地土壤 MBC 与 DOC 呈极显著负相关,而灌木林地土壤 DOC 与 MBC 则呈现极显著正相关。这可能是由于不同的土地利用方式所受的人为因素影响大小不同,以及植物种群和土壤性质的不同造成了截然不同的结果,具体原因有待于进一步研究与讨论。通过不同土地利用方式土壤 SOC 及其组分的均值比较可知,土地利用方式对其含量

均有显著影响($P<0.05$),其影响程度为 $MBC>SOC>DOC$, 这表明土壤微生物受外界环境因素的影响较为明显。协方差的分析结果表明,土壤 MBC 受土地利用方式和 pH 的影响较大,土壤 SOC 和 DOC 受海拔高度的影响较大。

3.2 土壤剖面 SOC、DOC、MBC 及有机碳密度分布特征

调查结果表明,该区不同土地利用方式下土壤剖面植物根系量随深度的增加而减少,表层 0~10 cm 土壤容重均较小,随土层深度增加土壤有机碳含量呈递减趋势。相对于灌木林地而言,旱地与水田耕作层受人为因素影响较大,作物的根茬、还田的秸秆均有利于土壤有机碳的积累。与灌木林地相比,旱地与水田土壤 0~30 cm 有机碳含量相对较低,灌木林地植被覆盖率高,而旱地与水田基本都是裸露的土壤,增强了风雨对土壤的侵蚀作用,强烈的淋溶作用导致土壤有机碳的释放和流失。仅在 0~10 cm 土层灌木林地有机碳密度高于旱地与水田,随土层深度增加,灌木林地有机碳密度急剧下降,甚至低于旱地与水田相应土层有机碳密度。由于调查区内灌木林地土层厚度在 30 cm 左右,而旱地与水田土层较深(均大于 1 m),灌木林地有机碳密度虽高,但受土层厚度的影响,有机碳储量却不高。结果表明,研究区内灌木林地受人为因素影响较小有利于土壤有机碳的累积,但结合土壤有机碳密度及土层深度等因素,旱地与水田有机碳储量却大于灌木林地,而旱地与水田中,旱地是最佳有机碳储存方式。因此,在重视封山育林、植树造林等生态恢复工作的同时,应该加强农田的管理措施,提倡对土地免耕、少耕、合理施肥、秸秆还田等,从而提高土壤有机碳的积累。

不同土地利用方式下,0~30 cm 土层 DOC 与 MBC 的含量均随土层深度增加呈现递减趋势,而这一变化趋势与土壤有机碳含量变化一致,土壤有机质含量越高,对 DOC 的吸附越弱,从而使溶液中 DOC 含量较高,这也是随土层深度增加土壤 DOC 含量降低的原因;随土层深度的增加,其土壤水分含量、温度、pH 以及土壤养分含量及其形态的改变都会影响土壤微生物的活性、种类和数量,而这一结果直接影响土壤微生物生物量碳的含量。

4 结论

土地利用方式对土壤 SOC 及其组分均有显著影响,不同土地利用方式下土壤 SOC 与 MBC 无相关性,但 DOC 与 MBC 的相关性正负各异。

不同土地利用方式下,表层土壤 SOC 含量存在差异,相对于旱地与水田,灌木林地更有利于土壤有机碳的积累;结合土层厚度调查结果,水田与旱地土层厚度远大于灌木林地,同时由于旱地与水田中有作物秸秆、有机肥等外源有机质的加入,有利于土壤 SOC 含量的升高。因此,在不考虑各土地利用方式所占面积的前提下,研究区内旱地与水田成为该区土壤有机碳储存潜力较大的土地利用方式。受人类活动的影响,土壤微生物熵均较低,说明研究区内土壤肥力相对较低,养分的缺乏影响着土壤微生物种群结构及活性,同时也是生态退化的一种体现。

喀斯特高原区有机碳主体上分布在土层厚度较大的耕地土壤中,从区域生态恢复与有机碳积累的角度,对灌木林地加强保护、减少人为干扰、实施封山育林,在提高植被覆盖率的同时减少水土流失,才有利于土壤有机碳的积累和生态恢复;而对农耕地,在合理安排耕作制度、合理施肥的前提下,实行秸秆还田才有利于土壤有机碳的积累,改善土壤微生物种群结构及活性,促进土壤肥力的提高,维持耕地土壤的可持续性。

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] 徐阳春,沈其荣,冉 炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1):89-96.
XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, RAN Wei. Effects of zero tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1):89-96.
- [3] 曹建华,潘根兴,袁道先,等. 不同植物凋落物对土壤有机碳淋失的影响及岩溶效应[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(4):151-155.
CAO Jian-hua, PAN Gen-xing, YUAN Dao-xian, et al. Influence of two litters on the soil organic carbon leachings and its karst effect[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4):151-155.
- [4] Cook B D, Allan D L. Dissolved organic carbon in old field soils: Compositional changes during the biodegradation of soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(6):595-600.
- [5] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soil: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4):277-304.
- [6] 张 伟,陈洪松,王克林,等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分布特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7):1459-1463.
ZHANG Wei, CHEN Hong-song, WANG Ke-lin, et al. Effects of planting pattern and bare rock ratio on spatial distribution of soil nutrients in Karst depression area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007,

- 18(7):1459-1463.
- [7] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4):151-171.
- XU Qiu-fang, XU Jian-ming, JIANG Pei-kun. Study on organic carbon pool of soil under intensive management bamboo forest[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4):151-171.
- [8] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):889-893.
- LIANG Qi-peng, YU Xin-xiao, PANG Zhuo, et al. Study on soil organic carbon density of different forest types[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):889-893.
- [9] McDowell W H, Likens G E. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley[J]. *Ecological Monographs*, 1988, 58(3):177-195.
- [10] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, et al. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen—synthesis for temperate forests[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52:173-205.
- [11] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境评价中的意义[J]. 土壤, 1997(2):61-69.
- HE Zhen-li. Significance of soil microbial biomass on its nutrient cycling and environmental evaluation[J]. *Soils*, 1997(2):61-69.
- [12] 朴河春, 洪业汤, 袁芷云. 贵州山区土壤微生物生物量是能源物质碳流动的源与汇[J]. 生态学杂志, 2001, 20(1):33-37.
- PIAO He-chun, HONG Ye-tang, YUAN Zhi-yun. Soil microbial biomass acts as source and sink of energy material C flow in mountainous soil of Guizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(1):33-37.
- [13] 任京辰, 张平究, 潘根兴, 等. 岩溶土壤的生态地球化学特征及其指标意义: 以贵州贞丰-关岭岩溶石山区为例[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5):504-512.
- REN Jing-chen, ZHANG Ping-jiu, PAN Gen-xing, et al. Indices of eco-geochemical characteristics in a degradation-reclamation sequence of soils in mountainous karst area: A case study in Guanling-Zhenfeng Region, Guizhou, China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5):504-512.
- [14] 李玲, 肖和艾, 苏以荣, 等. 土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解有机碳含量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1):122-128.
- LI Ling, XIAO He-ai, SU Yi-rong, et al. Effects of land use on the content of soil dissolved organic carbon in the typical landscape units in subtropical red earth region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1):122-128.
- [15] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, et al. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties[J]. *Geoderma*, 2003, 113:273-291.
- [16] Fan J, Hao M D. Effects of long-term rotation and fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Res Soil Water Cons*, 2003, 10(10):85-87.
- [17] 陈国潮, 何振立, 黄昌勇. 红壤微生物生物量 C 周转及其研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(2):152-160.
- CHEN Guo-chao, HE Zhen-li, HUANG Chang-yong. Turnover of microbial biomass C in red soils and its significance in soil fertility evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2):152-160.
- [18] 何容, 王国兵, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔高度植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3):394-399.
- HE Rong, WANG Guo-bing, WANG Jia-she, et al. Seasonal variation and its main affecting factors of soil microbial biomass under different vegetations along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3):394-399.
- [19] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6):709-714.
- HUANG Yao, LIU Shi-liang, SHEN Qi-rong, et al. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6):709-714.
- [20] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5):687-699.
- XIE Xian-li, SUN Bo, ZHOU Hui-zhen, et al. Soil carbon stock and their influencing factors under native vegetations in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):687-699.
- [21] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3):24-28.
- SHAO Yue-hong, PAN Jian-jun, SUN Bo. Study on characteristics of soil organic carbon decompositions and carbon pool under different vegetations[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3):24-28.
- [22] 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]. 生态学报, 2007, 26(10):1579-1584.
- YUAN Hai-wei, SU Yi-rong, ZHENG Hua, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and nitrogen in peak-cluster depression land use of Karst region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(10):1579-1584.
- [23] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2):53-60, 79.
- GAO Xue-song, DENG Liang-ji, ZHANG Shi-rong. Properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2):53-60, 79.
- [24] Turunen J, Moore T R. Controls on carbon accumulation and storage in the mineral subsoil beneath peat in Lakkasuo mire, central Finland[J]. *European Journal Soil Science*, 2003, 54(2):279-286.
- [25] 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.
- DUAN Zheng-feng, FU Wa-li, ZHEN Xiao-jun, et al. Effects of land use on soil organic carbon fractions and its distribution in karst[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2):109-114.
- [26] 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、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1827-1831.
- LI Xin-ai, XIAO He-ai, WU Jin-shui, et al. Effects of land use type on soil organic carbon, total nitrogen, and microbial biomass carbon and nitrogen contents in Karst region of South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10):1827-1831.