

喀斯特石漠化过程对土壤活性有机碳的影响

卢红梅¹, 王世杰²

(1. 贵州省发酵工程与生物制药重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

2. 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, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 以贵州省花江峡谷区典型喀斯特石漠化小流域为研究区域, 对潜在、轻度、中度、强度石漠化等级样地代表性土壤活性有机碳进行了测试分析。分析结果表明, 随着石漠化程度的增加, 土壤微生物生物量碳(SMBC)、轻组有机碳(LFOC)、可矿化碳(MC)、微生物商(q_{SMBC})呈下降趋势, 微生物呼吸商(q_{CO_2})呈上升趋势, 与石漠化过程有一致性, 能较好地体现石漠化过程中土壤退化的本质。开垦序列土壤活性有机碳库的周转速率和土壤微生物碳库的下降速率大于樵采序列, 使得开垦序列土壤即使在高的生物归还量下, 形成土壤有机碳的比例相对较小。土壤 SMBC、LFOC、MC、易氧化有机碳(LOC)、 q_{SMBC} 、 q_{CO_2} 等生物学性质除了与人为干扰方式有关外, 还与植被生物量有关, 可以体现土壤质量发展的方向, 是石漠化过程土壤退化及恢复评价的敏感指标。

关键词: 喀斯特石漠化; 土壤活性有机碳; 土壤微生物生物量碳; 花江

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)01-0012-06

中图分类号: S154.2

Effects of Active Soil Organic Carbon on the Processes of Karst Rocky Desertification

LU Hong-mei¹, WANG Shi-jie²

(1. The Provincial Key Laboratory Engineering and Bio-Pharmaceutical, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: The research area is a typical karst catchment subject to rocky desertification in Huajiang Gorge, Guizhou Province. One representative soil sample was collected in each plot of strong, medium, slight, or latent desertification grade. The research focused on active soil organic carbon (ASOC) in the processes of rocky desertification. Results elucidated that the characteristics such as soil microbial biomass carbon (SMBC), light fraction organic carbon (LFOC), mineralizable carbon (MC), and microbial quotient (q_{SMBC}) had a decreasing trend, while microbial metabolic quotient (q_{CO_2}) had an increasing trend, which acted in accord with the direction of rocky desertification. The above biological characteristics could embody the essence of soil degradation in the processes of rocky desertification. The turn over speed of active SOC in reclamation sequence was higher than that in wood chopping sequence, while the decreased speed of SMBC in reclamation sequence was faster than that in wood chopping sequence. With the long period of accumulation, the wood chopping sequence kept higher SOC content than the reclamation sequence even with high amount of biological return. The biological characteristics such as SMBC, LFOC, MC, labile organic carbon (LOC), q_{SMBC} , and q_{CO_2} were influenced both by anthropogenic disturbing ways and by the vegetation productivity and could embody the development direction of soil quality. Meanwhile, they were sensitive indexes of estimating soil quality degradation and restoration in the processes of karst rocky desertification.

Keywords: karst rocky desertification; active soil organic carbon; microbial biomass carbon; Huajiang Gorge

虽然活性有机碳只占土壤有机碳总量的较小部分, 但由于它具有较高的活性使其可以在土壤全碳变化之前反映土壤微小的变化, 又直接参与土壤生物化

学转化过程, 同时, 也是土壤微生物活动能源和土壤养分的驱动力^[1-2], 因而它对土壤碳库平衡和土壤化学、生物化学肥力保持具有重要意义。在特定的生

收稿日期: 2008-05-22

修回日期: 2008-09-25

资助项目: 贵州大学博士基金(X065010); 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划; 中国科学院科技支黔工程项目; 中国科学院知识创新前沿领域项目

作者简介: 卢红梅(1967—), 女(汉族), 重庆市忠县人, 博士, 教授, 主要从事工业微生物和生物地球化学研究。E-mail: hongmeilu0826@126.com。

物、气候带中,随着森林的生长,土壤碳库及碳形态将会达到稳定状态,因而,土壤碳素状况常可作为生态功能的标志或控制器^[3]。石漠化过程中植被群落退化和覆盖度的降低导致植被生产力的衰退甚至丧失,不同植被生物量下土壤由于承接凋落物和根系分泌物数量和类型不同,因而形成的土壤碳库特别是活性碳库状况存在差别。花江峡谷区石漠化形成的主要人为因素是由于陡坡开垦和采伐导致的^[4]。对小流域石漠化过程土壤有机碳、全氮等养分含量变化的研究表明,不同人为干扰方式影响程度的差异很大,土壤养分指标将樵采和开垦石漠化截然分开,难以体现

开垦石漠化特别是潜在、轻度等级区受植被较大生物量的影响,这是由于土壤有机碳氮是长期积累的结果。所以,研究小流域石漠化形成过程的土壤活性碳含量与分布,可揭示石漠化过程植被生物量与土壤有机质共同作用下对不同形态土壤活性碳库的影响,从机理上揭示石漠化过程中土壤退化的本质。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况和样地基本概况

研究区自然概况、样地调查和样地分布见文献[5],樵采和开垦序列样地基本概况见表 1。

表 1 研究样地的基本概况

石漠化强度	最大土壤厚度/cm	植被类型 ^[6]	植被盖度/%
潜在石漠化(0531,0051 为樵采样地;028,053,005 为开垦样地)	60~80	以香叶树(<i>Lindera communis</i>)、清香木(<i>Pistacia weinmannifolia</i>)、毛椿(<i>Toona sinensis</i> var. <i>sichuanensis</i>)、毛麻楝(<i>Chukrasia tabularis</i> var. <i>velutina</i>)、齿叶黄皮(<i>Clausena dunniana</i>)、圆叶乌桕(<i>S. rotundifolm</i>)等乔木为主的中幼林	70
轻度石漠化(042,062 为樵采样地;032,051 为开垦样地)	50~80	以野桐(<i>Mallotus japonicus</i> var. <i>floccosus</i>)、羊蹄甲(<i>Bauhinia</i> sp.)、灰毛浆果楝(<i>Cipadessa cinerascens</i>)、乌桕(<i>Sapium sebiferum</i>)、毛麻楝(<i>Chukrasia tabularis</i> var. <i>velutina</i>)、粗糠柴(<i>Mallotus philippinensis</i>)、清香木(<i>Pistacia weinmannifolia</i>)、广西密花树(<i>Rapanea kwangsiensis</i>)、悬钩子、五节芒(<i>Miscanthus floridulus</i>)、紫茎泽兰(<i>Eupatorium adenophorum</i>)等为主的灌丛	50~70
中度石漠化(040,061 为樵采样地;031,050 为开垦样地)	30~40	以构(<i>Broussonetia papyrifera</i>)、悬钩子、红背山麻杆(<i>Alchornea trewioides</i>)、牡荊、八角枫、苦楝(<i>Melia azedarach</i>)、一年蓬(<i>Eriogon annuus</i>)为主的灌草丛	30~50
强度石漠化(041,060 为樵采样地;030,052 为开垦样地)	15~30	以八角枫(<i>Alangium chinense</i>)、粗糠柴(<i>Mallotus philippinensis</i>)、构、香椿(<i>T. sinensis</i>)、红背山麻杆、野桐(<i>Mallotus japonicus</i> var. <i>floccosus</i>)、仙人掌(<i>Opuntia dillenii</i>)、一年蓬、萆草(<i>Arthraxon hispidus</i>)为主的稀疏灌草丛	30

1.2 样品采集和测定方法

1.2.1 采样方法 对花江查耳岩小流域内 17 个样地采小生境土壤面积权重样,采样前先对设置样地划分小生境类型,由面积权重确定各类小生境土样量,而各类小生境土样由以面积权重确定的同类小生境样品量的混合,小生境土样则由多点混合样组成,一般每个小生境土样为 3~5 点表层土(0—15 cm)的混合样,面积和异质性大的小生境应为 5~8 点的混合。土样采集前,先除去未腐解和半腐解的枯落物。

1.2.2 土壤样品处理 新鲜土样带回实验室后,分成两份,一份去杂、过 2 mm 筛后贮藏于 4 ℃ 的冰箱内,进行土壤水溶性有机碳(WSOC)、可矿化碳(MC)和微生物生物量碳(SMBC)的测定;另一份土壤样品风干后,用四分法取一定量样品,捡出石砾和可见的植物根或碎片,经研磨制备 2,1,0.5,0.25

mm 的土样,研磨过程中植物碎片太小时用塑料棒的摩擦静电法去除;元素分析法测有机碳、全氮的样品取过 0.25 mm 筛的土样,用 10% 的盐酸除去碳酸盐,烘干后再研磨过 0.25 mm 筛孔。

1.2.3 测定方法 (1) 水溶性有机碳(WSOC):称鲜土 20 g,水土=2:1,用蒸馏水浸提,在 25 ℃ 恒温振荡器中振荡 0.5 h,离心 10 min(3 500 r/min),后用 0.45 μm 滤膜抽滤,滤液放入 -18 ℃ 下冻藏,然后在总有机碳测定仪(TOC 仪)上测定^[7]; (2) 可矿化碳:直接用新鲜土测定(采样前 48 h 下过大雨),取 3 份 60 g 新鲜土样各放入 500 ml 三角瓶内,均匀铺于瓶底,50 ml 塑料离心管内吸入 0.2 mol/L NaOH 10 ml,将离心管放入三角瓶内,用橡皮塞塞紧三角瓶口,37 ℃ 培养 3 d,取出离心管,加入 1.5 mol/L BaCl₂ 溶液 1~2 ml,用 0.2 mol/L HCl 滴定残留的 NaOH,所吸收的

CO₂ 释放量即为可矿化碳量^[8]; (3) 微生物量碳: 用氯仿熏蒸—提取法测定, 取新鲜采集的土壤样品 35 g (干土计 25 g 左右) 3 份, 氯仿蒸汽熏蒸 24 h, 用真空泵抽尽氯仿, 土壤样品用 0.5 M K₂SO₄ 溶液浸提 0.5 h, 同时浸提未熏蒸的土壤样品; K₂SO₄ 浸提液中的有机碳经适当稀释后在总有机碳测定仪 (TOC 仪) 上测定, 将熏蒸土壤与未熏蒸土壤的有机碳之差除以转换系数 K_c (K_c = 0.45), 即得土壤微生物生物量碳^[9]; (4) 易氧化态碳: 取 3 份含有 15 ~ 30 mg 碳过 1 mm 筛的土壤样品, 装入 100 ml 塑料瓶内, 加 333 mmol/L 的高锰酸钾溶液 25 ml, 密封瓶口, 以 25 r/min 振荡 1 h, 空白和土壤样品一样; 振荡后的样品以 4 000 r/min 离心 5 min, 然后取上清液用去离子水按 1 : 250 稀释; 上述稀释液在 565 nm 的分光光度计上比色, 其标准液的浓度范围一定要包括 1 mg 碳, 根据高锰酸钾的消耗量, 可求出易氧化土壤样品的含碳量^[10]。

1.3 数据处理

数据处理用 Excel、多重比较 (LSD)、相关分析 (CORR)、多元线性回归 (REG) 和主成分分析 (PRINCOMP) 等方法, 均采用 SPSS 11.5 软件进行统计分析。

2 结果分析

2.1 物理活性有机碳——轻组有机碳

轻组有机碳 (light fraction organic carbon, 缩写 LFOC) 在樵采和开垦序列的变化如图 1, LFOC 含量的降低与石漠化过程具有一致性, 与土壤有机碳氮不同的是, 有的潜在开垦 (005 样地) 高于中度樵采 061 样地和强度樵采 041 样地、060 样地, 体现 LFOC 不但与有机碳密切相关, 还与植被生物量有关。

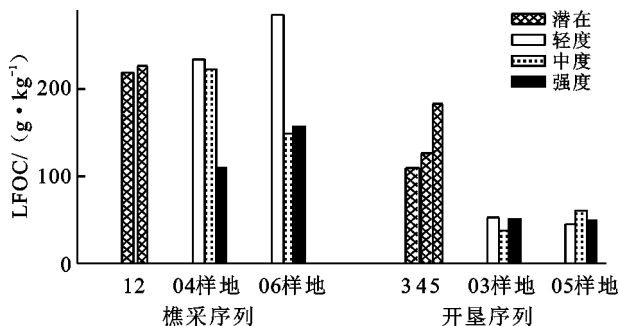


图 1 石漠化过程中土壤轻组有机碳 (LFOC) 含量的变化

注: 图中数字 1, 2, 3, 4, 5 分别表示潜在在样地

0531, 0051, 028, 053, 005; 下同

2.2 化学活性有机碳——易氧化有机碳

Blair 等人^[10] (1995) 认为土壤碳库的变化主要发生在易氧化碳 (labile organic carbon, 缩写 LOC)

库里。由图 2 可以看出, 樵采石漠化过程土壤 LOC 含量随潜在、轻度、中度、强度逐步降低, 与石漠化过程有方向的一致性和等级的同步性; 开垦石漠化过程中 LOC 含量的降低主要在潜在与其它石漠化等级间, 与石漠化过程仅有方向的一致性, 却无等级的同步性; LOC 含量在樵采石漠化中明显高于开垦石漠化, 与土壤有机碳 (SOC) 含量在樵采和开垦石漠化间存在明显差别一致。

2.3 生物活性有机碳

水溶性有机碳 (water soluble organic carbon, 缩写 WSOC, 也有资料用 dissolve organic carbon DOC 表示) 虽然只占土壤有机碳的很少部分, 但它却是土壤微生物和植物可直接利用碳源, 具有很高的生物活性^[11]。小流域内 WSOC 含量范围在 252.0 ~ 539.1 mg/kg, 石漠化过程中 WSOC 含量的变化没有规律性, 在樵采序列的等级间变化大, 在开垦序列中潜在开垦 028 明显低于其余样地, 03, 05 样地组内不同石漠化等级样地的 WSOC 含量变化较小。图 2 中 WSOC 含量在樵采和开垦石漠化间接近, 其变化一定程度上体现了“土壤水溶性有机碳的数量和地被物多少有关”^[12]的结论。

可矿化碳 (mineralizable carbon 缩写 MC) 反映了微生物对土壤有机质转化速度, 可广泛用于评估土壤微生物活性^[13]。由图 2 可以看出, 在樵采序列中潜在樵采土壤 MC 明显高于 04, 06 样地组, 04 样地组石漠化等级的增加与 MC 的降低有一致性; 开垦序列中潜在样地的 MC 值都明显高于样地组的不同石漠化等级样地 (除样地 032 外); 潜在开垦 005 的 MC 值高于 04, 06 样地组的大部分样地; 轻度开垦样地 032 的 MC 值与轻度樵采 042, 062 样地接近, 明显高于中度樵采 040, 061 和强度樵采 041, 说明土壤呼吸速率与植被生物量的关系更密切一些。

土壤微生物生物量碳 (soil microbial biomass carbon 缩写 SMBC) 在土壤中的含量较大程度上代表着土壤生物活性有机碳的储量, SMBC 也已作为土壤质量变化的敏感指标^[14]。由图 2 可以看出, 潜在樵采和开垦都明显高于对应的样地组, 樵采序列中 04 样地组土壤 SMBC 的降低与石漠化等级的增加有同步性, 06 样地组的退化主要在轻度与中度、强度等级间; 开垦序列中土壤 SMBC 的退化体现在潜在与其它等级间, 而样地组内土壤 SMBC 都表现为轻度 > 强度 > 中度的趋势; 潜在开垦样地 (005) 的土壤 SMBC 与轻度樵采接近, 明显高于中度、强度樵采样地, 体现了潜在开垦石漠化高植被生物量对土壤 SMBC 含量有较大影响。

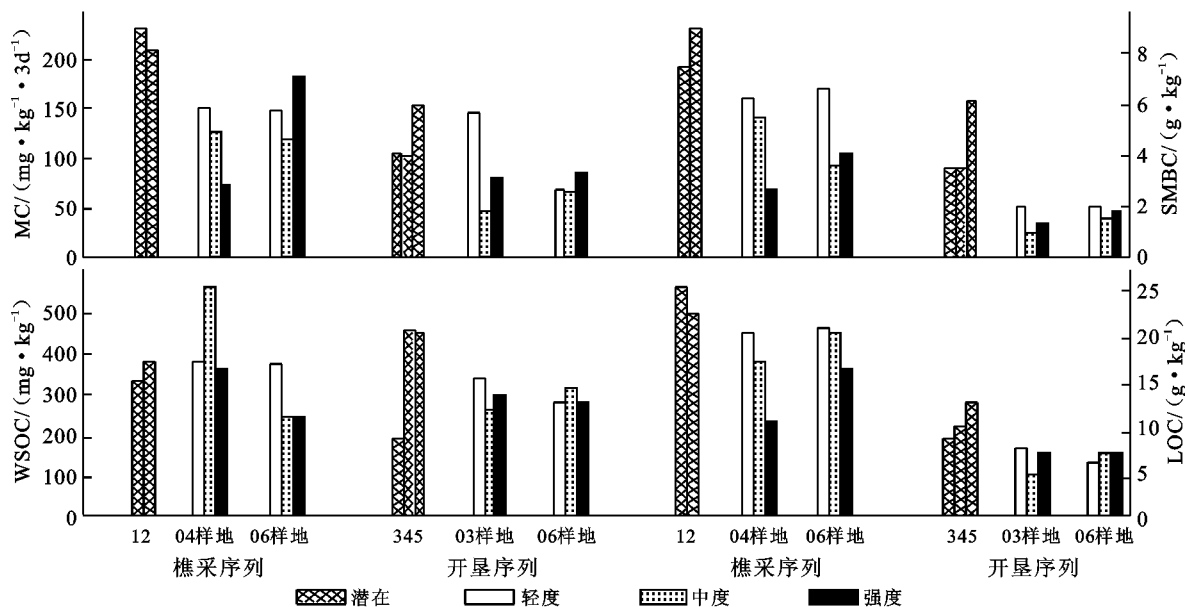


图 2 石漠化过程中土壤化学、生物活性碳含量的变化

2.4 土壤活性碳库占总有机碳的比率

土壤碳库平衡是土壤肥力保持的重要内容^[15], 土壤中活性有机碳占总有机碳的百分比可以用来反映土壤有机质的质量, 该比值能够避免在使用绝对量或对不同有机质含量的土壤进行比较时出现的一些问题^[16]。活性有机碳所占的百分比越大, 表示有机质越易被微生物分解, 质量越高, 该比值比活性碳含量更能反映森林植被对土壤碳行为的影响。因此用

活性有机碳所占的百分比作为土壤环境质量的生物学指标比活性有机碳更可靠。图 3 为石漠化过程不同形态活性有机碳与 SOC 或 SMBC 的比值图。从中可以看出, WSOC, MC, SMBC, LOC, LFOC 与 SOC 的比值从 MC/SOC 的约 0.10% 到 LFOC/SOC 的 58.41%, 相差几倍到几百倍, 说明不同提取或测定方法的活性有机碳含量间差别很大。各类型活性有机碳与总有机碳之比在石漠化过程中的变化不一。

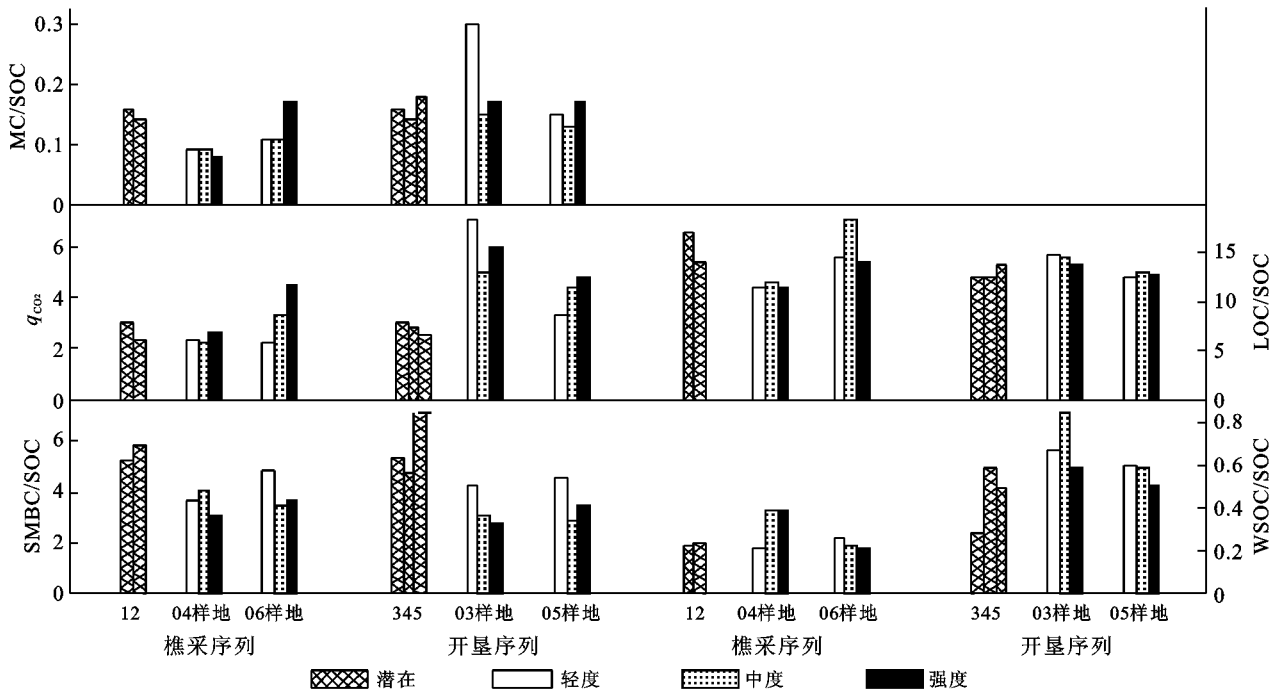


图 3 石漠化过程不同形态活性有机碳与 SOC 或 SMBC 的比值

(1) LOC/SOC: 石漠化过程中不同形态活性碳与总碳的比值变化最小的是 LOC/SOC 值, 在石漠化

过程中的变化没有规律性, LOC/SOC 在樵采和开垦序列间的差异也很小, 这可能与岩溶区土壤的形成、

演化方式有关,使得有机碳含量相差很大的土壤,其中能被 333 mmol/L KMnO_4 氧化的活性有机碳与土壤有机碳呈接近的比例。

(2) WSOC/SOC :该值越大表示有机质越易被微生物分解, WSOC/SOC 被用作土壤生物活性有机碳库周转的较好指标^[17],图 3 中小流域土壤 WSOC/SOC 值在 0.21 ~ 0.84,都小于 1%,与 Burford 和 Bremner^[24]报道的结果一致。 WSOC/SOC 值在樵采和开垦石漠化过程中随石漠化程度的增加而变化的规律性不强,但开垦石序列土壤的 WSOC/SOC 值几乎都高于樵采序列,潜在樵采和开垦与对应样地组不同等级石漠化样地相比,都有减少的趋势。 WSOC/SOC 值与 SOC 的相关系数为 -0.831,呈极显著负相关,说明随着土壤有机碳含量的降低,土壤活性有机碳库的周转速率增加,在相同的生物归还量下,土壤有机碳的增加速率减缓。因而,在石漠化过程中,土壤生物活性有机碳库的周转速率增加,且开垦石漠化的土壤有机碳库的周转速率大于樵采石漠化。

(3) MC/SOC :该值在樵采和开垦石漠化过程中都未呈现有规律的变化,但开垦序列的 MC/SOC 值大都高于樵采序列的对应等级,即土壤中能被微生物迅速消耗的碳相对于 SOC 含量在开垦石漠化中有高于樵采石漠化的趋势,说明开垦序列相对于 SOC 碳消耗速率偏高,与开垦石漠化的 WSOC/SOC 值大于樵采石漠化的结果有对应关系。

(4) q_{SMBC} :是土壤微生物量碳与土壤有机碳的比值,又称为微生物商; q_{SMBC} 可以作为有机碳生物有效性指标^[18],可以指示土壤质量的变化和土壤健康状况,还可以作为指示土壤质量或土壤肥力的指标。在同一地区 q_{SMBC} 可以作为反映因土壤管理措施变化而造成有机质变化的一个指标,能预测土壤有机质长期变化或监测土地退化及恢复状况^[19]。图 3 中 q_{SMBC} 值在 2.81% ~ 7.06% 之间,在资料报道的 < 10% 的范围内^[20]。石漠化过程中 q_{SMBC} 值有降低的趋势,潜在樵采和开垦的 SMBC 值相当,都大于对应样地组不同等级的石漠化样地;石漠化过程中,开垦序列样地土壤 SMBC 的退化比樵采序列明显,由开垦潜在、轻度等级的 q_{SMBC} 值高于樵采中度、强度等级,说明 q_{SMBC} 值受植被生物量的影响很大。

(5) q_{CO_2} :称为代谢呼吸率,又称为专性呼吸率,是微生物可矿化碳与微生物生物量碳的比率,被称之为生理生态指数,它将微生物可矿化碳与微生物生物量有机地结合起来,是反映环境因素、管理措施等变化对微生物碳库影响的一个敏感性指标^[8]。图 3 中 q_{CO_2} 在石漠化过程中有增加的趋势,与 Grego 和

Kennedy 的研究结论“土壤质量降低, q_{CO_2} 值有增大的趋势”一致;潜在樵采和开垦的 q_{CO_2} 值相当,樵采序列不同样地组的 q_{CO_2} 值大多高于或接近潜在樵采,开垦序列样地组的 q_{CO_2} 值明显高于潜在开垦;05,06 样地组土壤 q_{CO_2} 值随石漠化等级的增加而增加,与石漠化等级有同步性,03,04 样地组土壤的与石漠化过程没有一致性。由强度樵采(060)和轻度、中度、强度开垦等级土壤 q_{CO_2} 值明显较高,说明其土壤微生物碳库以较快速率下降,引起土壤有机碳和微生物商的下降,最终造成土壤明显的退化^[21]。 q_{CO_2} 与 WSOC/SOC 的相关系数为 0.592,具有显著正相关关系,说明土壤活性有机碳库的周转速率的增加与土壤微生物碳库以较快的速率下降密切相关。

3 结论

(1) 开垦序列的土壤 SOC 含量都低于樵采序列,由于活性有机碳对植被生物量影响的敏感性,开垦序列某些样地土壤的 MC , LFOC , WSOC 和 SMBC 含量高于樵采序列的部分样地。 SMBC 含量的增加和 SOC 的下降使得潜在开垦 005 的 q_{SMBC} 值甚至高于樵采序列的所有等级(图 3),显示出土壤有机碳高的生物有效性。同样,轻度开垦的 q_{SMBC} 值甚至高于中度、强度的樵采等级。在开垦序列中,强度等级的土壤 SOC 含量高于或接近中度、轻度等级,对于土壤的 SMBC , q_{SMBC} 值而言,强度等级都高于中度等级,但都低于轻度等级。综合土壤 SOC 和土壤微生物生物量、微生物活性、有机碳的生物有效性指标,强度开垦石漠化的土壤质量较中度开垦石漠化高。因此,仅以 SOC 含量为核心的土壤理化指标评价石漠化过程中的土壤质量不能反映生态系统的真实情况,应考虑土壤的生物学特性。

(2) 开垦序列土壤活性有机碳库的周转速率和土壤微生物碳库的下降速率有比樵采序列快的趋势,同时开垦序列 SMBC 的呼吸消耗比例大于樵采序列,而形成土壤有机碳的比例相对较小,使得开垦石漠化处在较樵采石漠化更高的 SMBC 呼吸消耗平衡、较快的有机碳周转速率,长期积累的结果导致樵采石漠化维持在较高的土壤有机碳含量而开垦石漠化的土壤有机碳含量较低,即使在高的生物归还量下,开垦石漠化土壤质量的提高也是一个漫长的过程;同一干扰方式下,随石漠化程度增加,除上述原因对土壤的影响外,还与生物归还量降低及植被覆盖度降低时雨水或流水侵蚀的增加有关,导致土壤质量在石漠化过程中呈下降趋势,但缺乏与石漠化等级的同步性。

(3) 石漠化过程中,随着石漠化程度的增加,土

壤的 SMBC, LFOC, MC, q_{SMBC} 呈下降趋势, q_{CO_2} 呈上升趋势, 与石漠化过程有一致性。因此, MC, SMBC, q_{SMBC} , LFOC, q_{CO_2} 与植被生物量和土壤有机碳密切相关, 能较好体现石漠化过程土壤退化本质, 与 Doran^[22] 认为“基本的土壤质量或健康生物指标应当包括 SMBC, MC, q_{SMBC} 等生物学指标”的结论一致。虽然 WSOC 含量变化与石漠化过程没有一致性, 但 WSOC/SOC 在揭示石漠化过程中植被生物量对土壤碳行为的影响和土壤退化机理方面很具实用价值。

[参 考 文 献]

- [1] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fractions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58 : 1130-1139.
- [2] Coleman D C, Reid C P P, Cole C V. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems [J]. Advances in Ecological Research, 1983, 13: 1-55.
- [3] Paul E A. Dynamics of soil organic matter [J]. Plant and Soil, 1984, 76: 275-285.
- [4] 卢彪, 杨明刚. 关岭县板贵乡喀斯特石漠化成因及防治成效[J]. 中国水土保持, 2008(3): 52-54.
- [5] 卢红梅, 王世杰. 花江小流域石漠化过程中的土壤有机碳氮的变化[J]. 地球与环境, 2006, 34(4): 41-46.
- [6] 容丽, 王世杰. 喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应: 以贵州花江峡谷区小流域为例[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1038-1043.
- [7] Zhou L X, Wong J W C. Microbial decomposition of dissolved organic matter derived from organic wastes and its control during sorption experiment [J]. Journal Environment Quality, 2000, 29(6): 1852-1856.
- [8] Powlson D S. The effects of biocidal treatment on metabolism in soil: Gamma irradiation, autoclaving, air-drying and fumigation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1976, 16: 459-464.
- [9] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biol & Biochem, 1987, 19: 703-707.
- [10] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural system [J]. Australian Journal Agriculture Research, 1995, 46: 1456-1466.
- [11] Burford J R, Bremner J M. Relationships between denitrification capacities of soils and total water soluble and readily decomposable soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975, 7: 389-394.
- [12] Hagedorn F, Kaiser R, Feyen H, et al. Effect of red-ox conditions and flow processes on the mobility of dissolved organic carbon and nitrogen in a forest soil [J]. Journal Environment Quality, 2000, 29: 288-297.
- [13] Dobbins D C. Methodology for assessing respiration and cellular incorporation of radiolabelled Substrates by soil microbial communities [J]. Microbial Ecology, 1988, 15: 257-276.
- [14] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, 30: 195-207.
- [15] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic C fractions and ¹³C natural isotope abundance [J]. Plant and Soil, 1993, 156: 399-402.
- [16] 任天志, Stefano G. 持续农业中的土壤生物指标[J]. 中国农业科学, 2000, 33(1): 68-75.
- [17] Burford J R, Bremner J M. Relationships between denitrification capacities of soils and total water soluble and readily decomposable soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975, 7: 389-394.
- [18] Wolters V, Joergensen R G. Microbial carbon turnover in beech forest soils at different stages of acidification [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23: 897-902.
- [19] Hart P B S, August J A, West A W. Long-term consequences of topsoil mining on select biological and physical characteristics of two New Zealand loessial soils under grazed pasture [J]. Land Degrad Rehab., 1989, 1: 77-88.
- [20] Insam H, Parkinson D, Domsch K H. Influence of macroclimate on soil microbial biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(2): 211-221.
- [21] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, 30: 195-207.
- [22] Doran J W. Defining soil quality for a sustainable environment [M]. Wisconsin Madison: Soil Society of America Special Publication, 1994: 3-234.