

干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征

唐国勇, 李昆*, 孙永玉, 张春华

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位观测站, 昆明 650224)

摘要: 对比研究了干热河谷新银合欢林地、大叶相思林地、旱耕地和荒地土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)、微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)含量及其分配比例。结果表明, 4类利用方式下SOC含量在 $4.22 \sim 5.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 其差异不显著。新银合欢($2.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和大叶相思林地ROC含量($2.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于旱耕地($1.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和荒地($1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。4类利用方式下, 旱耕地MBC和DOC含量均最高, 荒地最低。林地ROC分配比例是荒地和旱耕地的1.3~1.6倍; 旱耕地MBC和DOC的分配比例均高于其他3类利用方式, 林地和荒地MBC、DOC分配比例接近。植被凋落量和管理措施是不同利用方式下ROC含量差异的主要原因, 而土壤含水量和植被凋落性质是4类利用方式下MBC、DOC含量变异的主要影响因素。干热河谷ROC含量变化可以敏感地指示SOC动态, 但MBC、DOC含量变化则不能反映SOC动态。

关键词: 干热河谷; 利用方式; 土壤有机碳; 活性有机碳; 分配比例

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1365-07

Soil Labile Organic Carbon Contents and Their Allocation Characteristics Under Different Land Uses at Dry-hot Valley

TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, ZHANG Chun-hua

(Yuanmou Desertification Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Research Institute of Insect Resources, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China)

Abstract: Soil organic carbon(SOC), readily oxidation organic carbon(ROC), microbial biomass carbon(MBC) and dissolved organic carbon(DOC) contents and their allocation ratios were comparatively investigated under *Leucaena leucocephala* woodland, *Acacia auriculiformis* woodland, dry cropland and wasteland in dry-hot valley. Results showed that SOC contents were not significant differences among the four land uses with the range of $4.22 \sim 5.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. ROC contents under *L. leucocephala* ($2.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and *A. auriculiformis* woodland ($2.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) were both significantly higher than those under dry cropland ($1.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and wasteland ($1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The highest MBC and DOC contents both presented under dry cropland among the four land uses, whereas the lowest occurred under wasteland. ROC allocation ratios under woodlands were 1.3 to 1.6 times to those under dry cropland and wasteland. MBC and DOC allocation ratios under cropland were higher than those under other three land uses, and the ratios were closely among woodlands and wasteland. Plant residue amounts and management were primarily determined ROC contents, and soil water content and plant residue quantity were mainly affected the variation of MBC and DOC contents under the four land uses. The change of ROC contents could sensitively indicate SOC dynamics in dry-hot valley, but the change of MBC or DOC could not.

Key words: dry-hot valley; land use; soil organic carbon(SOC); labile organic carbon; allocation ratios

土壤有机碳(SOC)是土壤肥力的物质基础, 其含量水平在一定程度上决定土壤肥力状况。然而土壤有机碳背景值较高, 变化趋势在短期内难以监测。SOC数量和质量动态最初主要还是通过其活性部分的变化表现出来, 而且活性有机碳的变化易于监测和测定^[1~4]。因此, 不少研究者用土壤活性有机碳的变化来指示SOC库的动态特征^[5~8]。土壤活性有机碳是指土壤中移动快、稳定性差、易分解和矿化, 并具有较高植物和土壤微生物活性的那部分有机碳^[1, 3, 5], 包括易氧化有机碳(ROC)、微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)等组分。研究表明利用方式对土壤有机碳及其活性组分分配比例有

明显的影响^[3, 5, 8~11]。已有研究探讨了干热河谷不同利用方式下SOC含量状况^[12, 13], 但未涉及不同利用方式下活性有机碳含量及其分配特征。探究土壤活性有机碳含量及其分配特征对于理解干热河谷土壤固碳机制及其对生态恢复的响应具有重要意义。基于此, 本研究以国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位观测站为基地, 对比分析了林地、旱耕地和

收稿日期: 2009-07-23; 修订日期: 2009-09-04

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A0304, 2006BAD03A01)

作者简介: 唐国勇(1980~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为干热河谷生态恢复与土壤养分循环, E-mail: tangguoyong1980@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: caflikun@163.com

荒地 SOC、ROC、MBC 和 DOC 含量及其分配比例,以期为合理利用干热河谷土地资源和阐明土壤固碳机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

地处 $101^{\circ}35' \sim 102^{\circ}06'E$ 、 $25^{\circ}23' \sim 26^{\circ}06'N$ 的云南元谋县,属于南亚热带季风干热气候区,是干热河谷的典型代表。该县气候炎热干燥,光热资源丰富,干湿季分明,年均温为 $21.9^{\circ}C$,年降水量 630.7 mm,雨季(6~10月)降水量占全年降水量的 90% 以上,年蒸发量约为 3 426.3 mm,年干燥度高达 4.4。地貌类型齐全,中部为盆地,东、西、南、北部均为山地。1 350 m 以下地区(干热河谷)土壤类型主要为燥红土,有少量的水稻土和紫色土,其中燥红土呈现严重的变性化。干热河谷水土流失严重,土林林立,山崩、塌方、滑坡等自然灾害发生频繁,生态环境恶劣。植被稀疏,以车桑子 [*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.]、余甘子 (*Phyllanthus emblica* L.)、苦刺 (*Sophora viciifolia* Hance)、扭黄茅 [*Heteropogon contortus* (L.) Beauv.]、三芒草 (*Aristida adscensionis* Linn.) 等为主的“河谷型半萨王纳”植被。

在国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位观测站($101^{\circ}46'E$ 、 $25^{\circ}39'N$)选取面积约 2.2 hm^2 的严重退化区域,该区域立地条件相对一致,最大相对高差 25 m,坡度在 $12^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 之间,以阳坡为主,土壤类

型主要为普通燥红土和变性燥红土。于 2001 年 5 月(雨季初期)选择新银合欢 [*Leucaena leucocephala* (Lam.) dewit] 和大叶相思 (*Acacia auriculiformis* A. Cunn.) 等速生生态树种,撩壕整地、容器苗造林,采取封禁管理措施。同时,选取植被状况相对较好的样区进行自然恢复(荒地),开垦土表相对平整的样区进行旱耕作(旱耕地)。参照当地习惯,旱耕地一年三熟,主要种植玉米和蔬菜(西红柿、辣椒、豆角等)。生态恢复前测定了各样地土壤主要理化性质。生态恢复 8a 后(2009 年)荒地植被主要为扭黄茅,植被盖度由 0% (即“光板地”)到 80%。

1.2 样品采集与野外调查

2009 年 4 月在新银合欢林地、大叶相思林地、旱耕地和荒地采集土壤表层样(0~20 cm),采样方法参考文献[14]。具体方法为:在 4 类利用方式的研究样区内分别随机设置一定数量的 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 样方,样方密度为每公顷 10~13 个,在每个样方内按“S”形多点(不少于 7 个)采集表层土样(0~20 cm),采样时除去土表凋落物,样方内土样混合形成一个混合样。共采集土壤混合样 24 个,具体采样数见表 1。取样时旱耕地种植玉米(2009 年 3 月中旬种植)。同时用环刀法测定土壤容重。

2009 年 4 月测定了林地郁闭度和荒地植被盖度。由于旱耕地作物生长周期短、种植密度各异等原因,未测定旱耕地郁闭度或植被盖度。

在干热河谷,新银合欢是旱季落叶植物,每年

表 1 研究样区基本情况

Table 1 Basic information about the studying area

利用方式	面积 /hm ²	采样数	pH	土壤有机碳 /g · kg ⁻¹	土壤容重 /g · cm ⁻³	郁闭度 ¹⁾ /%	植被凋落量 ²⁾ / t · hm ⁻²	土壤含水量/%	
								旱季初期	旱季末期
新银合欢林地	1.0	10	6.26	3.22	1.52	71	0.74	10.2	9.0
大叶相思林地	0.3	4	6.35	3.16	1.53	78	2.09	9.7	8.9
旱耕地	0.3	3	5.56	3.30	1.38	—	2.80	37.4	36.1
荒地	0.6	7	5.98	3.27	1.64	32	0.05	8.3	7.8

1) 旱耕地郁闭度未测,郁闭度一栏中荒地数值为植被盖度;2) 旱耕地植被凋落量极少,数据为作物根茬残留量

11 月底开始落叶,翌年 1 月底应该落的叶基本落光。大叶相思属旱季换叶植物,每年 11 月中旬至翌年 3 月换叶量占全年的 80% 以上。2008 年 10 月~2009 年 4 月在林地和荒地样区内分别随机设置 3~4 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方,每 3~5 d 收集样方内植被凋落物,除去杂质后风干称重取其平均值。旱耕地作物凋落量极低,本研究根据作物经济学产量、经济系数、根茎比、根茬返还比例等估算根茬残留量。

2008 年 10 月(旱季初期)和 2009 年 4 月(旱季末期)用 TDR 水分仪(Field Scout TDR 200 Probe,美

国)测定 0~20 cm 土层土壤含水量。测定前 3 d 旱耕地未灌溉。

1.3 样品分析与数据处理

土样采回后,用手选法除去活体根系和可见植物残体,碾碎过 10 目筛,混匀,调节含水量至最大持水量的 40%,用于测定土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳。取部分样品在室内风干、磨细过 100 目筛,用于测定其他理化性质。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,土壤易氧化有机碳含量采用重铬酸钾氧化-稀

释热法测定^[14],微生物生物量碳含量采用熏蒸提取-容量分析法测定^[15],土壤可溶性有机碳含量的测定方法为:称取 20 g 新鲜土样加入 50 mL 蒸馏水,振荡 30 min,在 4 000 r·min⁻¹ 的条件下离心 10 min,上清液用孔径为 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤,滤液中有有机碳用容量分析法测定^[15].

通过单因素方差分析(LSD 法)比较不同利用方式之间土壤有机碳活性组分、分配比例差异的显著性;通过一元线性回归分析不同土地利用方式下

土壤活性有机碳组分之间的关系.以上分析在 SPSS11.0 软件上完成.

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳和活性有机碳含量

金沙江干热河谷土壤有机碳(SOC)平均含量为 4.78 g·kg⁻¹,4 类利用方式下 SOC 变化范围在 4.22~5.19 g·kg⁻¹之间(表 2).方差分析表明利用方式之间 SOC 含量差异均未达到 95% 显著水平.

表 2 4 类利用方式下土壤有机碳及其活性组分含量

Table 2 Soil organic C and their labile components under four land uses

利用方式	土壤有机碳/g·kg ⁻¹	易氧化有机碳/g·kg ⁻¹	微生物生物量碳/mg·kg ⁻¹	可溶性有机碳/mg·kg ⁻¹
新银合欢林地	5.19(1.29) a ¹⁾	2.14(0.55) a	45.63(21.28) ab	46.98(19.87) ab
大叶相思林地	4.58(0.48) a	2.03(0.22) a	41.65(16.40) ab	39.43(15.33) b
旱耕地	5.01(0.28) a	1.38(0.24) b	50.07(4.75) a	65.27(8.34) a
荒地	4.22(2.01) a	1.34(0.64) b	33.14(8.58) b	32.01(9.65) b
总体	4.78(1.39)	1.79(0.62)	41.88(16.42)	43.64(18.04)

1) 各列中字母不同表示均值差异达 95% 显著水平,括号内数字为标准差

干热河谷土壤易氧化有机碳(ROC)平均含量为 1.79 g·kg⁻¹(表 2).4 类利用方式下 ROC 含量大小顺序为:新银合欢林地(2.14 g·kg⁻¹)>大叶相思林地(2.03 g·kg⁻¹)>旱耕地(1.38 g·kg⁻¹)>荒地(1.34 g·kg⁻¹),荒地 ROC 含量不足新银合欢和大叶相思林地的 70%.新银合欢和大叶相思林地 ROC 含量差异未达到显著水平,但均显著高于其他两类利用方式,旱耕地和荒地 ROC 差异不显著.

研究区土壤微生物生物量碳(MBC)平均含量为 41.88 mg·kg⁻¹(表 2).旱耕地 MBC 含量最高(50.07 mg·kg⁻¹),其次为新银合欢(45.63 mg·kg⁻¹)和大叶相思林地(41.65 mg·kg⁻¹),而荒地 MBC 含量最低(33.14 mg·kg⁻¹),是其他利用方式的 55%~80%.统计结果表明除旱耕地 MBC 含量显著高于荒地外,其他利用方式之间 MBC 含量差异不显著.

本研究中土壤可溶性有机碳(DOC)平均含量为 43.64 mg·kg⁻¹,各利用方式之间 DOC 含量变化范围在 32.01~65.27 mg·kg⁻¹,其含量大小顺序与 MBC 含量顺序极为一致(表 2).旱耕地 DOC 含量(65.27 mg·kg⁻¹)显著高于大叶相思林地(39.43 mg·kg⁻¹)和荒地(32.01 mg·kg⁻¹),其他利用方式间 DOC 含量差异不显著.

2.2 土壤活性有机碳分配关系

对 SOC 含量及其活性组分进行线性回归,结果表明 ROC 与 SOC、DOC 与 MBC 之间具有极显著

(*p*<0.01)的线性相关关系,相关系数(*R*²)分别为 0.678 和 0.658,而其他组分间的相关关系不明确,相关系数低(图 1).

干热河谷 4 类利用方式下土壤活性有机碳分配比例见表 3,其中 ROC 与 SOC 的比值(ROC 分配比例)范围在 27.7%~44.4%之间,平均值为 37.3%,2 类林地 ROC 分配比例较大,均超过 40%,旱耕地 ROC 分配比例最低,为 27.7%,稍低于荒地(31.3%).本研究 4 类利用方式下 MBC 与 SOC 的比值(MBC 分配比例)相对接近(0.92%~1.00%),平均值为 0.94%,旱耕地 MBC 分配比例稍高于其他利用方式.DOC 与 SOC 之比(DOC 分配比例)的平均值为 1.00%,旱耕地 DOC 分配比例最大(1.30%),是其他利用方式的 1.3~1.5 倍.

3 讨论

3.1 利用方式对土壤有机碳及其活性组分的影响

研究区内 4 类利用方式之间 SOC 含量差异均不显著(表 2),这可能与生态恢复时间不长(8 a)、土壤理化性质接近和凋落物特性有关.除旱耕地外,其他利用方式之间 SOC 起始值、pH 值、容重和含水量等土壤理化因子相对接近(表 1),这在一定程度上导致了利用方式间 SOC 含量的均一性.大叶相思林植被凋落量是新银合欢林的 3 倍左右(表 1),但大叶相思林 SOC 含量反而稍低于后者(两者差异不显著),这可能由于大叶相思叶片厚而大、纤维含量高,叶片落地后不易分解,易被河谷风吹出林地或于

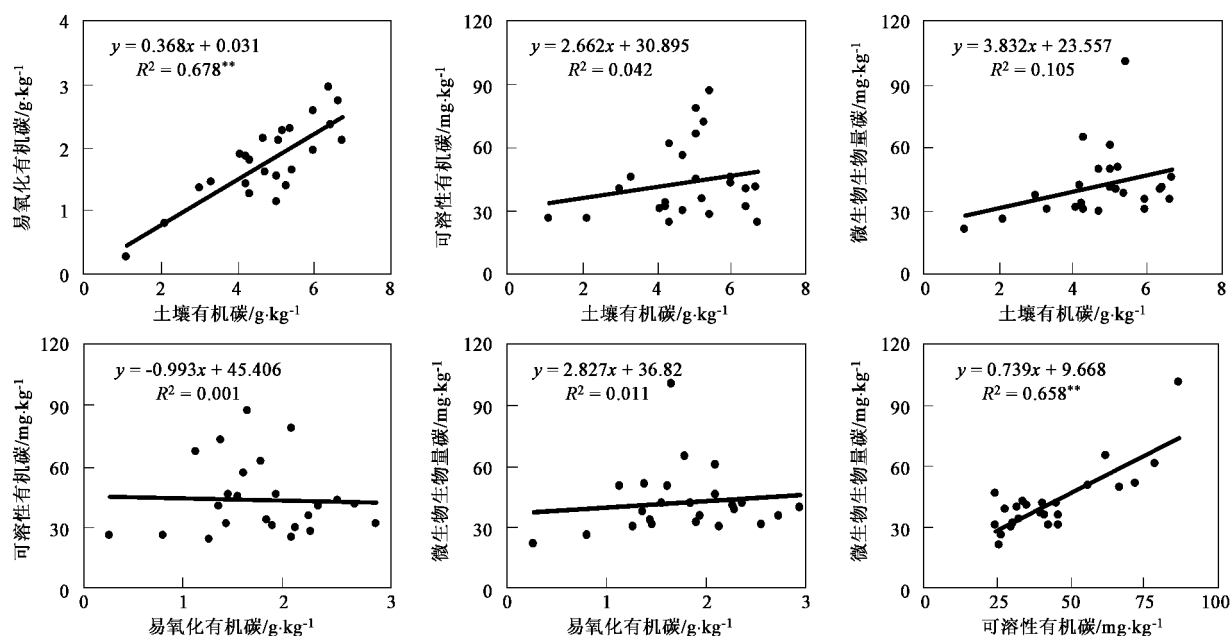


图1 土壤活性有机碳各组分之间关系

Fig. 1 Relationships between each two fractions of labile soil organic carbon

表3 4类利用方式下土壤活性有机碳分配比例

Table 3 Allocation ratios of labile organic carbon to soil organic carbon under four land uses

利用方式	易氧化有机碳/土壤有机碳/%	微生物生物量碳/土壤有机碳/%	可溶性有机碳/土壤有机碳/%
新银合欢林地	41.48	0.92	0.96
大叶相思林地	44.40	0.92	0.87
旱耕地	27.67	1.00	1.30
荒地	31.28	0.95	0.99
总体	37.27	0.94	1.00

某一低凹处堆积;新银合欢小型叶片落地后更紧贴地表,不易被风搬运并且容易分解^[16]。尽管旱耕地作物根系残留量和施肥量大(表1),但旱耕地土壤含水量较高、作物秸秆和根茬就地焚烧、无机肥使用比例高、耕作和灌溉频繁等不利因素限制了旱耕地SOC含量的提高幅度。荒地SOC含量较低可能是由于荒地植被盖度较低(32%),裸露荒地中的土壤有机碳在干热河谷高温条件下处于耗竭状况,但旱季枯死的扭黄茅对SOC含量也起到一定的维持和提高作用。陈奇伯等^[12]研究发现金沙江干热河谷水土保持重点区域内,盖度为30%的稀疏扭黄茅荒地土壤有机质含量为0.85%(换算成SOC约为4.93 g·kg⁻¹),略高于本研究荒地SOC含量。郭玉红等^[13]对金沙江干热河谷封禁10 a的地区进行研究,得出盖度为98%的草地(植被以扭黄茅等为主)0~15 cm土层中有机质范围为0.689%~2.065%,

光板地0~15 cm土层中有机质含量范围为0.109%~0.586%,其草地SOC含量高于本研究的荒地,而光板地则低于本研究的荒地。结合本研究荒地SOC含量可以推断植被盖度对荒地SOC含量有明显影响,SOC呈现随植被盖度增加而增加的趋势。这也显示了干热河谷生态脆弱区尽可能维护荒地植被对SOC含量维持或提高的重要性。唐国勇等^[17]研究显示植被恢复4 a后新银合欢林和大叶相思林SOC含量分别为3.60 g·kg⁻¹和3.52 g·kg⁻¹,明显低于本研究(恢复8 a)的结果,甚至略低于本研究中的荒地(自然恢复)。表明恢复时间对SOC含量有明显的影 响,恢复时间越长越有利于SOC的积累。此外,整地方式也可能是导致这一现象的主要原因之一。本研究荒地(自然恢复)是在原有植被相对较好的样地上进行封禁管理,没采取任何整地措施;而唐国勇等^[17]的研究中林地是在去除扭黄茅植被、撩壕整地等措施后进行容器苗育林,这些整地措施可能导致生态恢复初期SOC含量相对丰富的表土流失。张晓林等^[18]研究发现干热河谷缓坡耕地(基本农田)土壤有机质含量为21.1 g·kg⁻¹(换算成SOC为12.2 g·kg⁻¹),是本研究旱耕地SOC的3倍。其原因可能是本研究旱耕地由严重退化的荒地开垦而成,土壤耕作熟化时间不长(少于10 a)。

ROC是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解利用、对植物养分供应有最直接作用的那部分有

机碳^[2, 7]. 本研究 4 类利用方式下 ROC 含量差异可能与植被凋落量和管理措施有关. 林地植被凋落量较高, 凋落物分解可补充 ROC 的消耗^[8]. 荒地 ROC 含量低则可能是由于植物残体输入量有限, ROC 分解矿化后缺乏补充所致. 旱耕地利用强度大(一年三熟)、翻耕和灌溉频繁等耕作措施改变了土壤温度、湿度、孔隙状况和土壤微生物活性, 相对林地和荒地而言旱耕地土壤湿润、疏松(表 1), 更适合微生物活动, 加速了 SOC 的分解, 尤其是易氧化的那部分有机碳. 林地 ROC 含量显著高于旱耕地和荒地, 这与他人的研究结果类似^[5, 9]. 如王清奎等^[5]研究发现南方红壤丘陵地区阔叶林土壤活性有机质含量最高, 杉木人工林其次, 竹林和水田最低. 吴建国等^[9]得出西北半湿润半干旱灰褐土地区人工林 ROC 含量最高, 天然次生林其次, 草地和农田 ROC 最低.

研究区 4 类利用方式下 MBC 含量不高, 平均值仅为 $41.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显低于全国其他地区 MBC 含量^[6, 19, 20], 这可能与干热河谷特殊的气候环境有关. 干热河谷总体气候特点是: 气候干热、年干燥度高达 4.4; 旱季长达 6~7 个月、期间降雨量不足全年的 10%; 土壤含水量在旱季常处于凋萎含水量以下, 而同期的土壤温度却远超过活动温度, 土壤水热矛盾突出^[21], 严重影响了土壤微生物的生长和群落的形成^[22], 甚至在施肥条件下土壤微生物数量也没有显著的增加^[23], 这必然会降低 MBC 含量. 因此, 干热河谷突出的水热矛盾可能是本研究土壤 MBC 含量低的主要原因. 旱耕地 MBC 含量是其他 3 类利用方式的 1.1~1.5 倍, 显著高于荒地(表 2), 这可能与土壤含水量和植物根系残体(根系分泌物)性质等有关. 旱耕地灌溉量大, 土壤经常处于湿润状况, 土壤含水量明显高于其他利用方式, 是林地和荒地的 3.6~4.6 倍(表 1). 在干热河谷特殊气候条件下, 含水量较高的旱耕地更有利于土壤微生物的生长和群落的形成. 旱耕地根茬残留量明显高于林地和荒地植被凋落量, 而且旱耕地频繁翻耕, 植物残体、根茬和根系分泌物与土粒接触面积大, 加之土壤含水量高, 激发了土壤微生物的生长. 根系残留物和根分泌物中低分子生物聚合物含量高, 木质素等微生物难以利用的成分含量低, 腐质化程度低而易被微生物分解利用^[24, 25]. 微生物对根系分泌物的利用率远高于对土壤原有有机质或植被凋落物^[26]. 植被凋落量较高可能是林地 MBC 含量高于荒地的主要原因.

土壤 DOC 具有一定的溶解性, 在土壤中移动较快, 易分解矿化, 因而极易流失, 是 SOC 损失的重要途径之一^[27]. DOC 形态和空间位置对植物和微生物来说活性比较高, 在提供土壤养分方面起到重要作用^[28, 29]. 本研究中旱耕地 DOC 含量显著高于大叶相思林地和荒地, 是其他 3 类样地 DOC 含量的 1.4~2.0 倍, 这与他人的研究结果不一致. 如李玲等^[10]研究发现红壤丘陵和红壤低山景观单元内林地 DOC 含量分别是旱地的 1.1 倍和 1.3 倍. 干热河谷土壤干化严重, 旱季土壤含水量极低(表 1), 这可能限制了 SOC 的溶解和团聚体的分散, 导致该地区 DOC 含量相对偏低. 在一定程度上, 增加土壤含水量能提高 SOC 的溶出、导致团聚体的分散, 进而增加 DOC 含量^[29~31]. DOC 主要来源于植物残体分解产物和土壤微生物代谢产物^[28], 而本研究区土壤 MBC 含量低, 这将影响植物残体的分解和微生物自身的周转, 限制了 DOC 含量. 在干热河谷土壤干化、MBC 含量低的状况下, 旱耕地土壤含水量和 MBC 含量相对较高, 这可能是旱耕地土壤 DOC 含量相对较高的主要原因.

3.2 利用方式对土壤活性有机碳分配的影响

研究表明土壤活性有机碳含量变化可以敏感地指示 SOC 动态^[2, 6, 7, 32]. 本研究中 ROC 与 SOC 含量呈极显著的正线性相关关系, 而 MBC 与 SOC、DOC 与 SOC 的相关性差(相关系数分别为 0.042 和 0.105), 相关关系均未达到显著水平(图 1). 表明在干热河谷生态脆弱地区并不是所有 SOC 活性组分含量的变化都可以指示 SOC 动态, 只有 ROC 含量变化可以敏感地反映 SOC 动态. 从本质上来看, ROC 含量高低或分配比例大小表明土壤有机质的质量, 尤其是土壤有机质的潜在分解性质^[3]. 在干热河谷, MBC 和 DOC 含量受土壤干化的制约(表 1), 而受土壤原有有机碳含量的影响不明显. 在 SOC 活性组分之间, MBC 与 DOC 含量具有极显著的正线性相关关系, 而 MBC、DOC 与 ROC 含量之间的相关关系不明显(图 1). 有机物分解产物和微生物自身代谢产物是 DOC 主要来源^[28], 而 DOC 则是形态和空间位置上对微生物来说活性较高^[28, 29], 因此两者具有内在的较好的相关性, 本研究表明这一相关性亦适合于我国干热河谷.

用分配比例来表示土壤过程的变化, 比单独使用 SOC 或活性有机碳具有一定的优势, 因为分配比例能够避免在使用绝对量或 SOC 含量不同的土壤进行比较时出现的一些问题^[6, 9, 32]. ROC、MBC 和

DOC 虽然都是 SOC 的活性组分,但其在含量、来源和去向、影响因素等方面存在差异,是从不同角度反映有机碳的活性特征. ROC 分配比例 (ROC/SOC) 从 SOC 自身分解特征方面指示有机碳活性强度,比值越大说明 SOC 活度越强, SOC 被分解矿化的潜力大^[2, 7, 9]. 其局限是 ROC 分配比例只反映 SOC 自身的分解特性,不能反映 SOC 与外界环境的关系. 而事实上 SOC 分解矿化能力更主要的还是受外界环境条件的影响. 本研究中旱耕地 ROC 分配比例明显低于其他 3 类利用方式,不足林地的 70% (表 3),表明相对林地和荒地而言旱耕地 SOC 活度低, SOC 自身被分解矿化的潜力小. MBC 分配比例 (MBC/SOC) 主要从分解转化有机碳的能力方面指示 SOC 活性特征,该值大表明土壤微生物活性高,容易分解和利用 SOC^[6]. 表 3 显示旱耕地 MBC 分配比例稍高于其他利用方式,说明旱耕地土壤微生物活性高,微生物容易分解和利用 SOC. DOC 分配比例 (DOC/SOC) 显示 SOC 的溶解能力,反映 SOC 流失水平,与 SOC 的矿化量具有较好的正相关性^[10, 29, 30]. 研究区旱耕地 DOC 分配比例是其他利用方式的 1.3 ~ 1.5 倍,表明相对其他利用方式而言旱耕地 SOC 容易流失和矿化. MBC 和 DOC 分配比例不仅可以反映 SOC 自身被分解矿化的能力,还能综合反映外界环境条件对 SOC 分解矿化的影响. 综合以上分析可以得出本研究中旱耕地 SOC 自身分解矿化能力差,但灌溉、翻耕、土地利用强度大等外界环境条件有利于微生物活性和 DOC 含量的提高,反而导致旱耕地 SOC 容易分解矿化. 林地和荒地 SOC 自身分解矿化能力强这也为干热河谷土壤碳库管理提供了有益启示,即若由于人为活动或者气候变化等原因导致土壤环境变化,使土壤微生物数量和活性提高、DOC 含量增加,则可能导致林地和荒地 SOC 含量的迅速下降. 因此,在干热河谷生态环境脆弱地区应减少林地和荒地的人为干扰和破坏.

4 结论

(1) 干热河谷 4 类利用方式下 (新银合欢林地、大叶相思林地、旱耕地和荒地) SOC 含量差异均不显著,但利用方式对土壤活性有机碳含量有显著的影响. 植被凋落量和管理措施是不同利用方式下 ROC 含量差异的主要原因,而土壤含水量和植被凋落物性质是 4 类利用方式下 MBC、DOC 含量变异的主要影响因素.

(2) 干热河谷生态脆弱地区并不是所有 SOC 活

性组分含量变化都可以指示 SOC 动态,只有 ROC 含量变化可以敏感地反映 SOC 动态. 林地 SOC 自身分解矿化潜力大,但在干热河谷特殊条件下被分解矿化能力较差. 旱耕地 SOC 自身分解矿化能力不强,受耕作管理等的影响易分解矿化.

参考文献:

- [1] Blair G J, Lefroy R D. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems [J]. Aust J Agri Res, 1995, 46: 1459-1466.
- [2] 徐明岗,于荣,孙小凤,等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459-465.
- [3] Soon Y K, Arshad M A, Haq A, *et al.* The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil [J]. Soil Till Res, 2007, 95: 38-46.
- [4] Belay-Tedla A, Zhou X H, Su B, *et al.* Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping [J]. Soil Biol Biochem, 2009, 41: 110-116.
- [5] 王清奎,汪思龙,高洪,等. 土地利用方式对土壤有机质的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 360-363.
- [6] 唐国勇,黄道友,童成立,等. 红壤丘陵景观单元土壤有机碳和微生物生物量碳含量特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 429-433.
- [7] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等. 侵蚀环境坡耕地改造对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 17-21.
- [8] Laik R, Kumar K, Das D K, *et al.* Labile soil organic matter pools in a calciorient after 18 years of afforestation by different plantations [J]. Appl Soil Ecol, 2009, 42: 71-78.
- [9] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 657-664.
- [10] 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.
- [11] 唐国勇,吴金水,苏以荣,等. 亚热带典型景观单元土壤有机碳含量和密度特征[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 2047-2052.
- [12] 陈奇伯,王克勤,李艳梅,等. 金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 67-70, 113.
- [13] 郭玉红,郎南军,和丽萍,等. 元谋干热河谷 8 种植被类型的林地土壤特性研究[J]. 西部林业科学, 2007, 36(2): 56-64.
- [14] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统土壤观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. 160-162.
- [15] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006. 54-64.
- [16] 李昆,曾觉民. 元谋干热河谷地区不同造林树种对土壤的改良作用研究[J]. 西南林学院学报, 1999, 19(3): 161-164.

- [17] 唐国勇,李昆,张昌顺. 施肥对干热河谷生态恢复区林木生长和土壤碳氮含量的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(4):60-64.
- [18] 张晓林,王红华,潘艳华,等. 云南3个基本农田环境质量动态监测结果及分析[J]. 西南农业学报,2006,19(4):616-620.
- [19] Wang Y, Shen Q R, Yang Z M, *et al.* Size of microbial biomass in soils of China [J]. Pedosphere, 1996, 6(3): 265-272.
- [20] 贾国梅,方向文,刘秉儒,等. 黄土高原弃耕地自然恢复过程中微生物碳的大小和活性的动态[J]. 中国沙漠,2006,26(4):580-584.
- [21] 何毓蓉,黄成敏,杨忠,等. 云南省元谋干热河谷的土壤退化及旱地农业研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):57-61.
- [22] 赵之伟,任立成,李涛,等. 金沙江干热河谷(元谋段)的丛枝菌根[J]. 云南植物研究,2003,25(2):199-204.
- [23] 张彦东,孙志虎,沈有信. 施肥对金沙江干热河谷退化草地土壤微生物的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(2):88-91.
- [24] Dignac M F, Kögel-Knabner I, Michel K, *et al.* Chemistry of soil organic matter as related to C:N in Norway spruce forest floors and mineral soils [J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2002, 165: 281-289.
- [25] 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.
- [26] Thuries L, Pansu M, Larre-Larrouy M C, *et al.* Biochemical composition and mineralization kinetics of organic inputs in a sandy soil [J]. Soil Biol Biochem, 2002, 34: 239-250.
- [27] Maize N, Watanabe A, Kimura M. Chemical characteristics and potential source of fulvic acids leached from the plow layer of paddy soil [J]. Geoderma, 2004, 120: 309-323.
- [28] He Z L, Wu J, O'Donnell A G, *et al.* Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus, sulphur in soils under pasture [J]. Biol Fertil Soils, 1997, 24: 421-428.
- [29] Zhao M X, Zhou J B, Kalbitz K. Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soils of the south Loess Plateau in China [J]. Eur J Soil Biol, 2008, 44: 158-165.
- [30] 李忠佩,张桃林,陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报,2004,41(4):544-551.
- [31] Chow A T, Tanji K K, Gao S D, *et al.* Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils [J]. Soil Biol Biochem, 2006, 38: 477-488.
- [32] Muñoz C, Monreal C M, Schnitzer M, *et al.* Influence of *Acacia caven* (Mol) coverage on carbon distribution and its chemical composition in soil organic carbon fractions in a Mediterranean-type climate region [J]. Geoderma, 2008, 144: 352-360.