

退耕弃荒洼地土壤有机碳在生态系统转化过程中的动态变化

涂成龙^{1,2}, 刘丛强¹, 武永锋^{1,2}

(1. 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, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:在贵州喀斯特区域一块典型的退耕弃荒洼地中央和周边坡面采集了 4 个土壤剖面, 研究土壤有机碳(SOC)含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的变化. 结果表明, 坡面不同土壤层次 SOC 的变化范围为 $6.0 \sim 92.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并沿着土壤层次的加深迅速降低, 变化幅度远远大于洼地土壤剖面($6.3 \sim 26.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 坡面土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 介于 -25.103‰ 和 -23.666‰ 之间, 但各剖面土层内部 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化趋势不一致. 洼地土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 介于 -23.495‰ 和 -20.809‰ 之间, 并随着土壤层次的加深 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 逐渐增加. 洼地土壤剖面层次内 $\text{C}_4\text{-C}$ 占 SOC 的比例随土壤层次的加深逐渐增加, 与林-农生态系统转变过程中的变化趋势相反; 土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 $\text{C}_3\text{-C}$ 之间呈显著相关性($R^2 = 0.7806$, $n = 7$), 对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 起到主要影响作用的是退耕弃荒后新加入的 $\text{C}_3\text{-C}$.

关键词:退耕弃荒; 洼地; 有机碳; 来源; $\delta^{13}\text{C}$

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)09-1912-06

Soil Organic Carbon Variation of De-farming and Wasteland During Alteration of Ecosystem in Billabong

TU Cheng-long^{1,2}, LIU Cong-qiang¹, WU Yong-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Four soil profile samples were collected in the middle of de-farming and wasteland billabong and around slopes, located at typical karst district of Guizhou province. Soil organic matter (SOC) content and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ were determined. SOC content ranged from $6.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $92.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and decreased with depth at slope soil profiles. The range of value was bigger than that at billabong soil profile ($6.3 \sim 26.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The value of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ at slope profiles was between -25.103‰ and -23.666‰ , but variation direction of three slope soil profiles was different. The value of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in billabong soil profile was between -23.495‰ and -20.809‰ , and increased with depth. The percentage of $\text{C}_4\text{-C}$ increased with depth in billabong soil profile. The correlation between $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\text{C}_4\text{-C}$, $\text{C}_3\text{-C}$ was significant ($R = 0.884$, $n = 7$), influenced by new $\text{C}_3\text{-C}$.

Key words: de-farming and wasteland; billabong; organic carbon; origin; $\delta^{13}\text{C}$

在自然生态系统中, 土壤有机碳(SOC)主要来源于表生植物的残体, 土壤天然 ^{13}C 丰度与植物 ^{13}C 丰度密切相关^[1]. 在林-农生态系统转换过程中, 地表植被从 C_3 (Calvin 循环) 类型转化为 C_4 (Hatch and Slack 循环) 类型, 使得进入土壤的植物残体类型发生改变. 而 C_3 和 C_4 植物的碳同位素组成值差异较大, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围分别在 $-38\text{‰} \sim -23\text{‰}$ 和 $-14\text{‰} \sim -12\text{‰}$ 之间^[2], 这必然导致土壤原有 $\delta^{13}\text{C}$ 产生变化. 因此, 应用 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化可以识别林-农生态系统在相互转化过程中 SOC 的来源、比例和周转速率^[3~7]. 但大多数研究主要集中在小区域林-农生态系统转换过程中表生植被类型变化对 SOC 含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响, 却忽略了区域性地形条件下发生的土壤侵蚀和堆积对它们产生的影响, 从而不能客观准确地反映林-农生态系统转换过程中 SOC 含量和

$\delta^{13}\text{C}$ 的变化情况. 其次, 多数学者的研究集中在单一的林-农生态系统转换过程中 SOC 含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化, 而对于自然生态系统经过开垦转换为农业生态系统, 再经过退耕转换为自然生态系统, 这一复杂的生态系统转换过程中 SOC 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化, 则鲜见报道.

另一方面, 贵州喀斯特区域面积占全省土地总面积的 72%. 受自身的地质背景和气候条件的影响, 这一区域切割强烈, 洼地分布面积所占比重较大^[8]. 洼地深陷封闭, 具有多边形特征, 为圆筒状、漏斗状或盆状, 大小不一. 这一地形形状有利于周边坡面物质向下侵蚀堆积, 形成深厚的土层和富足的植

收稿日期: 2006-11-06; 修订日期: 2007-02-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403200)

作者简介: 涂成龙(1978~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: chenglongtu@163.com

被养分库,具有一定的农业生产价值;但排水不畅,亦给农业生产带来了很大的不便.在过去几年里,由于部分洼地分布于相对高程较大的区域,面积狭小,易耕性较差.同时国家在西部地区开发建设过程中鼓励农民对易耕性差的区域进行退耕还林还草和外出务工劳动力的大量转移,使得相当一部分洼地土壤退耕抛荒.在这些区域,受地质背景的限制,生态环境非常脆弱,但该区域大部分地区水热条件充足,洼地土壤营养物质库容较大,并蕴含了丰富的种质资源,为次生植被的生长提供了条件.次生植被的生长,改变了退耕前土壤碳素循环的过程,但其如何影响则鲜见报道.基于上述背景,本研究应用 $\delta^{13}\text{C}$ 示踪技术和有机质降解理论,探讨喀斯特区域洼地周边坡面土壤对洼地 SOC 的影响,以及洼地土壤在退耕弃荒后 SOC 的来源和所处的状态,以期对喀斯特地区土壤生态系统的恢复与重建提供一定的理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于贵州省贵阳市花溪区,海拔在 1 000~1 400 m 之间,碳酸盐类岩层广泛分布,地貌以低中山丘陵为主.气候属亚热带湿润气候,年均气温 15℃,年均降雨量 1 178.1 mm,年均日照 1 354 h,全年无霜期 270 d 左右,冬暖夏凉,春秋气候多变,光、热、水同季.研究洼地平面面积约为 1 000 m²,周边由东、西、南坡组成,洼地平面低于北面隘口,见图 1.坡面岩石裸露率较高,多数土壤稀薄,较厚土层的土壤多依附于石旮旯间,或植物根系旁.洼地周围坡面植被繁茂,其原始优势种为苔草、金银花、火棘、毛黄栌、合欢、小果蔷薇、全缘火棘、白栎等,均为 C₃ 型植被,主要植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -28.3‰ 和 -25.4‰ 之间.洼地主要植被为牛尾蒿,其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -25.4‰^[9].据了解,洼地在开垦前,其植被类型与坡面植被类型相似.在耕种期间主要农作物为玉米,是典型的 C₄ 植物.估计种植玉米 15~20 a,退耕时间为 8~10 a(土地使用者无法给出详细的时间).退耕期间,除偶尔有放牛食草外,无其它人为干扰现象.

1.2 土壤样品采集与分析

分别在如图 1(图中 X 表示采样点位置)所示的东坡、西坡和南坡的腰部,以及洼地中间采集 4 个土壤剖面,无重复.其中,东坡、西坡和南坡土壤剖面,选择地势较为平坦的地方,挖掘至基岩位置.洼地土壤剖面由于过于深厚,本研究仅挖掘到 120 cm(剖面

深度 > 120 cm)处,采集了 0~80 cm 土层的样品供进行室内分析.土壤样品采集情况和基本理化性质见表 1.

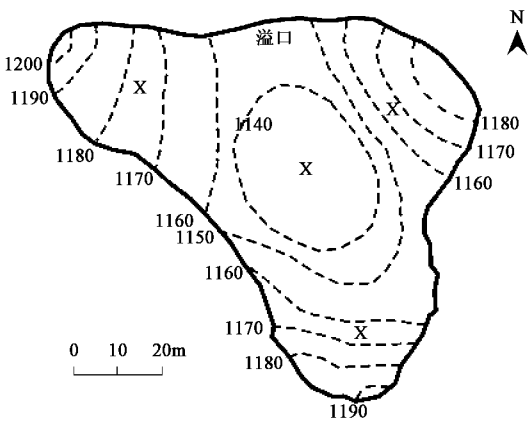


图 1 采样点分布
Fig. 1 Distribution of sampling points

土壤自然含水量采用烘干法测定;土壤颗粒组成采用简易比重计法测定;土壤颜色(干色)应用门氏比色卡进行比较.pH 值用电位法测定;土壤有机碳含量,由土壤经自然风干,过 100 目筛,用 12 mol/L 的盐酸熏蒸,去出无机碳,用元素分析仪(PE 2400-II)测定. $\delta^{13}\text{C}$ 值采用熏蒸后的土壤于石英管中,加入氧化铜,在真空条件 850℃ 下燃烧,石英管中所产生的二氧化碳气体用低温蒸馏分开,并收集到可破碎的熔封管中,在 MAT252 型质谱仪上测定稳定碳同位素比值,并与国际 PDB(international peedee formation belemnite carbonate standard)标准相对应.

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}\text{‰} = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 1\,000 \quad (1)$$

林-农生态系统转化是 C₃ 植物与 C₄ 植物相互转化的过程,使得土壤有机碳的物源既有来自 C₃ 植物的残体(SOC₃),也有来自 C₄ 植物的残体(SOC₄),其实测 $\delta^{13}\text{C}$ 值受二者共同影响.在已知 SOC₃ 和 SOC₄ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值条件下,可以通过公式(2)求出 SOC₃ 和 SOC₄ 对现有土壤有机碳的贡献率:

$$f = (\delta_{\text{t}} - \delta_{\text{A}})/(\delta_{\text{B}} - \delta_{\text{A}}) \quad (2)$$

式中, f 为 SOC₄ 所占的比例, δ_{t} 为实测土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_{A} 为 SOC₃ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_{B} 为 SOC₄ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值.本研究中 δ_{A} 取坡面表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的平均值 -24.24‰, δ_{B} 取玉米秸秆残体的实测 $\delta^{13}\text{C}$ 值 -11.41‰.

表 1 土壤样品采集情况及基本理化性质

Table 1 Descriptions of sampling sites and basic physical-chemical property of soil in experiment

位置	海拔/m	土壤层次/cm	pH (H ₂ O)	颜色 (干色)	颗粒分级/%					土壤自然 含水量/%
					1~0.25/mm	0.01~ 0.05/mm	0.005~ 0.01/mm	0.001~ 0.005/mm	<0.001/mm	
东坡	1 163	0~5	5.76	黑棕	41.0	16.4	2.8	16.4	23.4	28.3
		5~10	5.88	灰黄棕	35.6	20.3	10.2	18.3	15.6	28.6
		10~20	5.78	暗灰黄	30.2	29.8	15.3	8.1	16.6	30.1
		20~30	6.01	淡棕黄	28.6	39.8	18.8	7.6	25.0	29.3
		30~40	6.33	淡黄棕	28.6	16.3	11.2	17.6	26.3	28.6
		40~65	6.49	淡黄棕	28.5	18.0	10.8	18.0	26.7	28.9
南坡	1 168	0~5	5.90	暗棕	39.8	18.8	7.6	14.4	19.4	26.7
		5~10	5.86	灰黄棕	36.1	16.8	15.5	13.2	21.4	26.8
		10~20	5.92	暗灰黄	29.8	13.7	17.6	15.0	23.9	29.1
		20~30	5.63	淡棕黄	33.4	20.3	10.6	13.6	22.1	30.0
		30~40	6.02	淡黄棕	22.9	17.3	17.3	22.0	20.5	30.2
西坡	1 175	0~5	6.01	黑棕	60.3	9.3	5.9	9.3	15.2	20.3
		5~10	5.98	淡黄棕	56.3	10.1	9.3	11.3	13.0	21.9
		10~20	6.20	棕灰	40.3	6.1	19.3	18.5	15.8	22.6
		20~30	6.33	淡黄棕	30.9	20.1	6.3	19.7	23.0	24.3
洼地	1 140	0~5	5.78	黄棕	61.4	4.2	8.3	16.8	21.0	13.6
		5~10	5.67	黄棕	43.4	8.9	9.6	16.4	22.6	12.9
		10~20	5.76	淡黄棕	28.6	39.8	18.8	7.6	25.0	15.1
		20~30	6.11	淡黄棕	28.6	16.3	11.2	17.6	26.3	16.0
		30~40	6.57	黄棕	28.5	18.0	10.8	18.0	26.7	16.8
		40~60	6.60	黄棕	23.6	20.0	10.0	19.2	27.1	17.8
		60~80	6.73	暗黄棕	24.5	16.4	9.2	21.6	28.3	21.7

2 结果与分析

2.1 SOC与δ¹³C的剖面变化

在图 2 中,各个土壤剖面 SOC 的含量均随着土壤剖面层次的加深而下降.在坡面土体中,SOC 的变化范围为 6.0~92.3 mg•kg⁻¹,变化幅度远远大于洼地土壤剖面(6.3~26.7 mg•kg⁻¹).比较东、南、西坡土壤剖面和洼地土壤剖面 SOC 的变异系数:0.77、0.54、0.78 和 0.49,可以看出东、南、西坡土壤剖面虽然土壤层次较薄,但变异程度较高.主要是由于坡面土体表层 SOC 多为上坡向下侵蚀堆积的 SOC,以及部分较为新鲜的原地植被残体,它处于不断补充和向下迁移的动态过程,使得坡面表层 SOC 维持在较高的水平上.但坡面表层土壤 SOC 剧烈的动态变化,以致进入土体内部的 SOC 相对较小.加之坡面土体内部土壤多为利用地形条件堆积年限较长的土壤,在相当长的一段时间里,土表 SOC 的迁入是其主要的来源,但这难以补偿受微生物分解损失的那部分 SOC,从而表现出较低的含量,并使得土壤剖面 SOC 的变异程度大.其次,洼地表层土壤 SOC 含量明显低于坡面表层土壤 SOC 含量,其 SOC 含量仅为东、西、南坡土壤表层 SOC 含量的 47.0%、28.9%和

61.3%.可能是洼地土壤在原有林-农生态系统转化过程中,加速了洼地土壤 SOC 的转化^[4],降低了 SOC 的含量.而在退耕弃荒后短暂的时间里,虽然有草本植被的快速生长,但仍然没有促使洼地土壤恢复到原始状态^[10].在洼地土壤剖面中,土壤发育层次较厚,但 SOC 的变异程度较坡面土壤小,其主要原因是洼地区域排水不畅,雨水易在洼地中蓄积,使土壤表层溶解性有机碳易随水分向土体下部迁移,或 SOC 在水动力的驱动下,吸附于土壤粘粒表面,向下迁移.另外,由于洼地土壤过于粘重(表 1),土壤孔隙度小,微生物在厌氧条件下难以彻底对 SOC 进行降解.因此,洼地土壤剖面有机碳含量下降趋于缓和.

大多数学者研究表明,随着土壤深度的加深,δ¹³C值会有所增加^[11~13].在本研究中,虽然洼地周围坡面土体的总体趋势表现为随着土壤深度的加深,δ¹³C值有所增加,但在土体表层土壤 0~20 cm 范围内δ¹³C的变化趋势出现了差异:5~10 cm 与 0~5 cm 处的 δ¹³C相比较,南坡土壤剖面增加了 0.69‰,东坡土壤剖面则下降了 0.17‰,西坡土壤剖面下降了 0.40‰;而 5~10 cm 处与 10~20 cm 处的 δ¹³C相比较,南坡土壤剖面下降了 0.28‰,东坡土壤剖面增加了 0.23‰,西坡土壤剖面增加了 0.43‰.

通过观察坡面地表枯枝落叶的迁移状况,本研究认为坡面土体表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 不完全是由于地表上覆植被所引起的.在该区域,强降雨时段,地表物质(地表枯枝落叶和表层土壤)在雨水的作用下将发生向下、侧面或向土体内部迁移,部分迁移物质在破碎地表石旮旯中得以稳定,部分物质则有可能在下一次的强降雨过程中继续发生迁移,从而使得坡面土体的

发生过程产生差异,土体内部物质长幼混杂,缺失明显的土壤诊断层次特征.因此,在坡面土体表层土壤(0~20 cm)中, $\delta^{13}\text{C}$ 值发生了与土壤剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 整体变异趋势相违背的现象.其次,南、东、西坡 $\delta^{13}\text{C}$ 的极差是0.50‰、0.84‰和0.43‰,变异系数为1.0%、1.6%和0.8%.显然,西坡土体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变异程度最小,这与土壤剖面中SOC的变异程度不同.

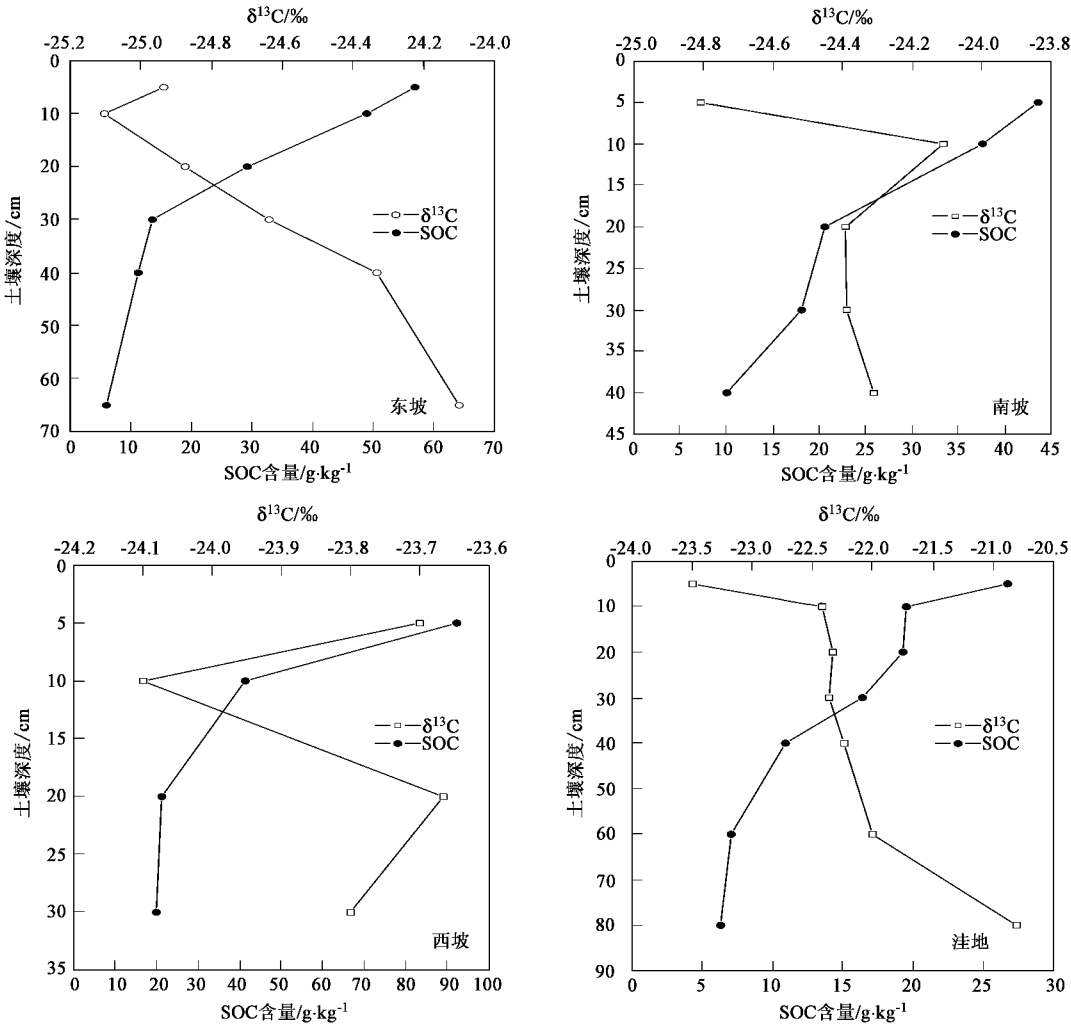


图 2 SOC、 $\delta^{13}\text{C}$ 值在土壤剖面中的变化趋势

Fig.2 Variation of SOC, $\delta^{13}\text{C}$ in the soil profiles

在洼地中,由于碳酸盐岩成土速率极慢^[14~16],加上地形的影响,原始成土物质不再发生距离迁移,而深埋于洼地土壤剖面底部.因此可以认为本研究所选择的0~80 cm土层主要为四周坡面物质向下迁移堆积而成,它的原始物质应主要是坡面土壤的表层物质和洼地上覆植被的枯枝落叶所组成,所以其 $\delta^{13}\text{C}$ 值应与坡面土壤的表层物质和洼地上覆植

被残体的 $\delta^{13}\text{C}$ 有必然的联系.然而,在洼地土壤剖面中,表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值比坡面表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 高出了1.0‰~3.7‰,这主要是由于洼地曾作为玉米地($\text{C}_4\text{-C}$)所造成的.洼地土壤剖面中,5~10 cm处 $\delta^{13}\text{C}$ 比0~5 cm处增加了1.07‰,而10~60 cm处 $\delta^{13}\text{C}$ 仅增加了0.42‰.显然,洼地表层土壤在退耕弃荒后,由于 C_3 植物重新起到主导地位,成为土壤有机碳的

主要来源,原有玉米残体对土壤有机碳的贡献,随着时间的推移,逐渐减弱,从而使表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值迅速降低.而土体内部新鲜有机碳的增加主要是依靠微生物残体,或通过溶解性有机碳随水向下迁移,或吸附于土壤粘粒表面随土壤粘粒向下迁移^[13,17].

2.2 SOC 的来源与组成变化

在研究林-农生态系统转化过程中,决大多数结论都认为土壤从森林生态系统转化为农业生态系统几十年后,土壤中原有 $\text{C}_3\text{-C}$ 仍占 SOC 的 60% ~ 80%,而源于 $\text{C}_4\text{-C}$ 仅占 SOC 的 20% ~ 40%,并沿着土壤剖面的加深, $\text{C}_4\text{-C}$ 所占 SOC 的比例逐渐下降^[4,6,7,10,12,18]. 在本研究的洼地土壤剖面中,源于 $\text{C}_4\text{-C}$ 仅占 SOC 的 5.77% ~ 26.76%,并随着土壤层次的加深, $\text{C}_4\text{-C}$ 所占 SOC 的比例逐渐上升(见表 2). 显然,这与森林生态系统向农业生态系统转化过程中, $\text{C}_4\text{-C}$ 在土体内的变化趋势截然相反. 另据研究表明,植物残体进入土体的前期,分解速度较快,其后数年内处于相对稳定的状态. Boutton 等^[19]在研究植被演替过程中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化时提出把 SOC 分为轻组和重组,新形成的 SOC 大多为轻组部分,该部分易于降解,在土体内容易发生迁移.而重组部分则相

对稳定,不容易发生迁移.洼地土壤在退耕数年后,其原有的 $\text{C}_4\text{-C}$ 、 $\text{C}_3\text{-C}$ 应处于相对稳定状态,新加入的 $\text{C}_3\text{-C}$ 只有在数量上呈梯度增加 SOC 含量,才能降低 $\text{C}_4\text{-C}$ 占 SOC 的比例,从而改变 $\text{C}_4\text{-C}$ 在土壤剖面中占 SOC 的比例变化趋势.因此,本研究认为洼地土壤在退耕后数年内,土壤 SOC 可能处于累积大于损失的状态,这有利于洼地土壤肥力的自然恢复.

在表 2 中,洼地表层土壤 0 ~ 5 cm 间 $\text{C}_4\text{-C}$ 仅占 5.77%, 5 ~ 60 cm 间为 14.16% ~ 17.41%, 60 cm 以下则升到 26.76%. 其主要原因是洼地表层土壤(0 ~ 5 cm)为新生植被根系的主要分布区域,亦是坡面侵蚀堆积的主要层面,退耕后 $\text{C}_3\text{-C}$ 的增加幅度最大, $\text{C}_4\text{-C}$ 占 SOC 的比例下降得最快.而在 5 ~ 60 cm 间,由于洼地地形的影响,水分易在洼地中聚集,且土体中粘化作用强烈,粘粒分布较为集中,导致土体内部容重增大,孔隙度减小,退耕后所形成的 SOC_3 难以向下迁移.另据研究表明,土壤粘粒部分富含 ^{13}C ^[13,17].因此,底层土壤 $\text{C}_4\text{-C}$ 占 SOC 的比重显著高于洼地土壤表层.而 60 cm 以下, SOC 在短期内难以得到补充,而接近退耕前土壤 SOC 的组成特征.

2.3 $\delta^{13}\text{C}$ 值与不同碳源的相关性

表 2 退耕弃荒洼地土壤剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 值及不同来源有机碳的数量¹⁾
Table 2 $\delta^{13}\text{C}$ and the percentage of $\text{C}_3\text{-C}$ and $\text{C}_4\text{-C}$ in the soil profile

土壤层次 /cm	$\delta^{13}\text{C}$ /‰	SOC / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$f/\%$	$\text{C}_4\text{-C}$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$1-f/\%$	$\text{C}_3\text{-C}$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(\text{C}_4\text{-C})/(\text{C}_3\text{-C})$ /‰
0 ~ 5	-23.50	26.71	5.77	1.54	94.23	25.17	6.13
5 ~ 10	-22.42	19.51	14.16	2.76	85.84	16.75	16.50
10 ~ 20	-22.33	19.26	14.85	2.86	85.15	16.40	17.44
20 ~ 30	-22.36	16.38	14.61	2.39	85.39	13.99	17.11
30 ~ 40	-22.23	10.91	15.58	1.70	84.42	9.21	18.46
40 ~ 60	-22.01	7.06	17.41	1.23	82.59	5.83	21.08
60 ~ 80	-20.81	6.30	26.76	1.68	73.24	4.61	36.53

1) $\text{C}_3\text{-C}$ 为来自自然植被的碳; $\text{C}_4\text{-C}$ 为来自玉米等农业植被的碳

窦森等^[20]通过培养试验研究玉米秸秆分解期间 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\text{C}_4\text{-C}$ 和 $\text{C}_3\text{-C}$ 之间的关系,认为 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $\text{C}_4\text{-C}$ 呈显著相关关系,与 $\text{C}_3\text{-C}$ 相关性不显著.而本研究的分析表明(图 3),洼地土壤在退耕弃荒一段时间后,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\text{C}_3\text{-C}$ 之间呈显著相关性($R^2 = 0.7806$, $n = 7$),与 $\text{C}_4\text{-C}$ 之间呈不显著相关性.由于退耕弃荒一段时间后,原有 $\text{C}_4\text{-C}$ 和 $\text{C}_3\text{-C}$ 处于较为稳定的状态,对 $\delta^{13}\text{C}$ 起到主要影响作用的是退耕弃荒后新加入的 $\text{C}_3\text{-C}$,这说明 $\delta^{13}\text{C}$ 值与不同碳源相关

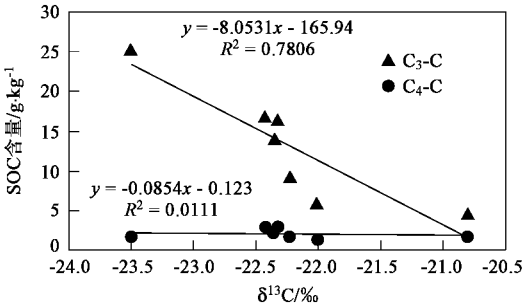


图 3 不同来源土壤 SOC 含量与土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关性
Fig.3 Relationship between SOC and $\delta^{13}\text{C}$

性的变化主要是由于新加入的 C₃-C 所引起,而老 C₃-C 的贡献相对较小.

3 结论

(1) 洼地周边坡面不同土壤层次 SOC 的变化范围为 6.0~92.3 mg•kg⁻¹,并沿着土壤层次的加深迅速降低,变化幅度远远大于洼地土壤剖面(6.3~26.7 mg•kg⁻¹).

(2) 洼地周边坡面土壤δ¹³C_{org} 介于 -25.103‰和 -23.666‰之间,但由于洼地周边坡面物质的侵蚀-堆积-再侵蚀过程,使得各剖面内部土层δ¹³C_{org} 变化趋势不一致.洼地土壤δ¹³C_{org} 介于 -23.495‰和 -20.809‰之间,并随着土壤层次的加深δ¹³C_{org} 逐渐增加.

(3) 洼地退耕弃荒一段时间后,土壤剖面内 C₄-C 占 SOC 的比例随土壤层次的加深逐渐增加,这与林-农生态系统转变过程中的变化趋势相反.土壤δ¹³C_{org} 与 C₃-C 之间呈显著相关性($R^2 = 0.7806, n = 7$),说明退耕弃荒后新加入的 C₃-C 对土壤δ¹³C_{org} 值影响较大.

参考文献:

[1] Nissenbaum A, Schallinger K M. The distribution of the stable carbon isotope (¹³C/¹²C) in fractions of soil organic matter[J]. Geoderma, 1974, **11**: 137~145.

[2] 郑永飞,陈江峰.稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000.194~195.

[3] 朴河春,刘启明,余登利,等.用天然¹³C丰度法评估贵州茂兰喀斯特森林区玉米地土壤中有有机碳的来源[J].生态学报, 2001, **21**(3):434~439.

[4] 刘启明,王世杰,朴河春,等.稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的含量变化[J]. 环境科学, 2002, **23**(3):75~78.

[5] 刘启明,王世杰,朴河春,等.稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的迁移和赋存规律[J].环境科学, 2002, **23**(4):89~92.

[6] Bernoux M, Cerri C C, Neill C, *et al.* The use of stable carbon

isotopes for estimating soil organic matter turnover rates[J]. Geoderma, 1998, **82**:43~58.

[7] Balesdent J, Girardin C, Moriotti A. Soil organic matter in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, **52**:118~124.

[8] 贵州省区域地理信息项目领导小组.贵州省地理信息数据集[M].贵阳:贵州人民出版社,1996.

[9] 朱书法.贵州典型陆地生态系统土壤中有有机碳含量及碳同位素组成[D].中国科学院地球化学研究所,2006.

[10] 林昌虎,涂成龙,陆晓辉,等.贵州西部喀斯特石漠化地区退耕弃荒地土壤氮素变异特征[J].水土保持学报, 2005, **19**(4): 14~17.

[11] 方华军,杨学明,张晓平,等.坡耕地黑土剖面有机碳的分布和δ¹³C值研究[J].土壤学报, 2005, **42**(6):957~964.

[12] Gregorich E G. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ¹³C abundance[J]. Canada Journal of Soil Sciences, 1995, **75**:161~167.

[13] Powers J S, Schlesinger W H. Geographic and vertical patterns of stable carbon isotopes in tropical rain forest soils of Costa Rica[J]. Geoderma, 2002, **109**:141~160.

[14] Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, *et al.* Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock[J]. Science in China (Series D), 1999, **42**(6):572~581.

[15] 王世杰,孙承兴,周德全,等.贵州高原岩溶台地红色风化壳的物源辨析[J].第四纪研究, 2002, **22**(6):107.

[16] Ji H B, Wang S J, Ouyang Z Y, *et al.* Geochemistry for red residua underlying dolomites in Karst Terrains of Yunnan-Guizhou Plateau: I. The formation of the Pingba profile[J]. Chemical Geology, 2004, **203**(1/2):1~27.

[17] Desjardins T, Andreux F, Volkoff B, *et al.* Organic carbon and ¹³C contents in soils and soil size-fractions, and their changes due deforestation and pasture installation in eastern Amazonia[J]. Geoderma, 1994, **61**:103~118.

[18] Jolivet C, Arrouays D, Andreux F, *et al.* Soil organic carbon dynamics in cleared temperate forest spodosols converted to maize cropping[J]. Plant and Soil, 1997, **191**:222~231.

[19] Boutton T W, Archer S R, Midwood, *et al.* δ¹³C values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem[J]. Geoderma, 1998, **82**:5~41.

[20] 窦森,张普京,曹亚澄,等.用δ¹³C方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化[J].土壤学报, 2003, **40**(3):328~334.