

文章编号: 1008-0244(2001)-01-32-04

应用 $\delta^{13}\text{C}$ 值探讨土壤中有有机碳的迁移规律

刘启明 朴河春 郭景恒

(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)

魏鲁明 余登利

(茂兰国家自然保护区管理处, 荔波, 558400)

摘要 C_3 植物与 C_4 植物具明显的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异, 利用这种特性, 选取荔波茂兰喀斯特森林边缘处这个 C_3 植物— C_4 植物转换生长的地点, 分别采集森林与农田各三个剖面的土壤样品, 根据测定其土壤总有机碳、不同粒径及不同比重组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值间的相互关系来推导土壤有机碳的若干迁移规律。

关键词 土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值 SOC_3 SOC_4

中图分类号 S153.6⁺2

文献标识码 A

在全球生态、能量循环中, 土壤有机质起着很重要的作用。然而, 直接观测土壤有机质的转换、迁移, 无论是在理论还是技术上目前尚无可行、成熟的报道。在国内外, 对于土壤有机质的转换、迁移规律的探索, 大致有三条途径: 其一, 从土壤中多糖(木糖、葡萄糖、半乳糖……等)的相互关系入手, 寻求土壤有机质的转换、迁移规律^[1]; 其二, 根据土壤中微生物量的变化来指示土壤中能量物质的流动机制, 从而推导出土壤有机质的转换、迁移规律^[2]; 第三种即是本文所论述的利用 C_3 植物与 C_4 植物间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异, 选取毁林造田或退耕还林等特殊地点, 通过测量土壤有机质中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值来示踪土壤有机质中碳元素的转换、迁移规律^[3-5]。

1 原理

因光合作用的途径不同, C_3 植物与 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具明显差异性(C_3 : $-27\text{‰} \sim -40\text{‰}$, C_4 : $-8\text{‰} \sim -19\text{‰}$)。土壤有机质的源物质绝大部分来自其地表生长的植物, 因此不同来源的土壤有机质亦具明显的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异(源于 C_3 植物: $-24.2\text{‰} \sim -29.1\text{‰}$; 源于 C_4 植物: $-9.3\text{‰} \sim -15.2\text{‰}$)^[6]。对于毁林造田或退耕还林等农林

生态系统发生转变的特殊地点, 土壤有机质的源物质产生了 C_3 植物(森林)与 C_4 植物(农作物)的转变, 故可根据所测土壤样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 依公式(1)算出土壤有机质中源于 C_3 植物的土壤有机碳(SOC_3)和源于 C_4 植物的土壤有机碳(SOC_4)各占的比例(设为在森林基础上改种农作物):

$$\delta = \delta_1 \cdot f + (1-f) \cdot \delta_0 \quad (1)$$

δ 为所测土壤样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_0 为作对比的森林土壤样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_1 为 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(δ_1 在不同深度土层应取不同修正值^[5]: $-8.52\text{‰} \sim -14.52\text{‰}$), f 即为 SOC_4 所占比例, 其值可写为: $f = (\delta - \delta_0) / (\delta_1 - \delta_0)$ 。

以此为理论依据, 对比土壤不同深度处 SOC_3 、 SOC_4 的比例变化关系和总碳量的变化趋势, 以及同一深度不同粒径、比重组分中 SOC_3 与 SOC_4 各占比例, 即可推导出土壤有机碳的一些迁移规律。

2 材料与方 法

选取荔波茂兰喀斯特原始森林边缘处为采样区, 此区曾长期生长大片 C_3 植物——常绿落叶、阔叶混叶林木, 近几十年, 部分森林被砍伐, 并大量种植 C_4 植物——玉米, 从而土壤有机质的源物质也随之产生从 C_3 植物到 C_4 植物的转变^[7]。在此区, 选择六个采样点(三个为森林, 三个为农田), 分别取 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70cm 各层次土样, 经风干、碾磨、去除无机碳等处理后, 对部分

收稿日期: 2000-06-12; 修回日期: 2000-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 49772175)。

第一作者简介: 刘启明(1973-) 男, 博士研究生, 从事环境地球化学研究工作

上层土样(0~20cm)进一步分为粗砂(200~2000 μm)、细砂(53~200 μm)、粉砂(2~53 μm)、粘土(<2 μm)四个粒径组分及重组分(>1.7g/mm³)、轻组分(<1.7g/mm³)两个比重组分。土壤中有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测量以 Pt 丝为催化剂,将土样(0.03~0.08g)与 CuO 以 1:50 的比例装入石英管,在 850 $^{\circ}\text{C}$ 条件下充分反应,土壤中有机碳全部转化为 CO_2 ,经纯化处理后用 MAT252 型质谱仪测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 值。采用 PDB 标准,测定误差 $\pm 0.1\%$, $\delta^{13}\text{C}$ 值由国际通用标准形式给出:

$$\delta^{13}\text{C} = (\text{R}_{\text{样}} - \text{R}_{\text{标}}) / \text{R}_{\text{标}} \times 1000\text{‰} \quad (\text{R} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}) \quad (2)$$

3 分析与讨论

(1) 在森林地区,对于源于 C_3 植物的土壤有机碳,随着时间的推移不断分解,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值渐趋于正,总体表现为随土壤深度的增加 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正(图 1)。如森林 1 从地表处的 -27.116‰ 增至底部的 -23.858‰;森林 2 从地表处的 -26.981‰ 增至底部的 -24.978‰;森林 3 从地表处的 -26.966‰ 增至底部的 -24.865‰。

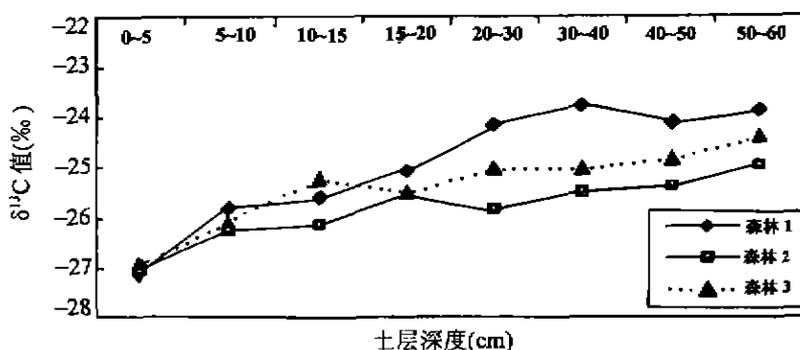


图 1 森林点不同深度土壤的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Fig. 1. The $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon in forest land at different depths.

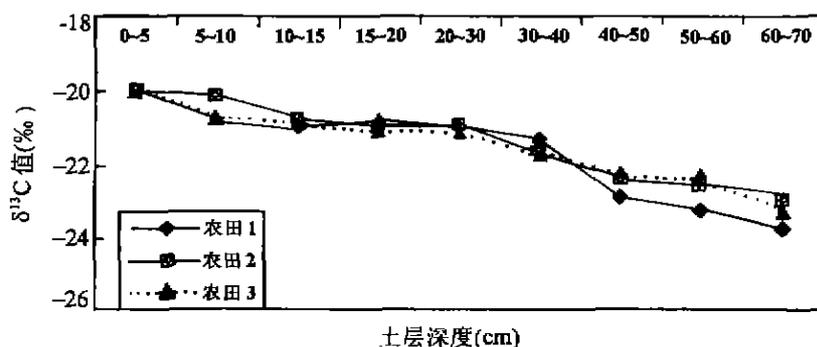


图 2 农田点不同深度土壤的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Fig. 2. The $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon in farm land at different depths.

这种变化主要源于两个因素的影响:a.在不同深度的土层所含粘土的百分比不同,而粘土组分中 ^{13}C 的含量较高,从而导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高;b.在大量化石燃料的使用及毁林等人为因素影响下,大气中以 ^{13}C 为成分的 CO_2 的百分含量近百年来已下降了 1.2‰,进行光合作用的植物必然会反映这一变化^[4]。

(2) 土壤中有机质是个逐渐积累、分解的过程,在森林(C_3 植物)基础上种植玉米(C_4 植物)发

生了土壤有机质源物质的变化,反映在 $\delta^{13}\text{C}$ 值上有如图 2 所示关系:自地表向下 $\delta^{13}\text{C}$ 值渐减。如农田 1 从地表处 -20.017‰ 减至底部的 -23.775‰;农田 2 从地表处的 -20.012‰ 减至底部的 -22.609‰;农田 3 从地表处的 -20.752‰ 减至底部的 -22.961‰。这一趋势与图 1 的不同之处在于,森林点土壤有机质的源物质均为 C_3 植物,因此,在土壤不同深度因有机质的分解而产生 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化幅度($\pm 4\%$)小于图

2 中因 C_3 植物与 C_4 植物自身 $\delta^{13}C$ 值的显著差异 ($>15\%$) 产生的 $\delta^{13}C$ 值的变化幅度。

选取典型的农田点 1 进行土壤不同粒径、比重组分的碳稳定同位素分析。①对于同一深度土壤的不同粒径组分, $\delta^{13}C$ 值越大依公式(1)算出此组分保持的 SOC_3 比例越少, 土壤有机质的分解更为迅速完全, 通过分析数据可知: $\delta^{13}C_{粘土} <$

$\delta^{13}C_{粉砂} < \delta^{13}C_{细砂} < \delta^{13}C_{粗砂}$, 由此说明土壤有机质从土壤大粒径组分逐渐向小粒径组分迁移的过程反映了土壤有机质分解、转化的过程。②对土壤不同比重组分的分析结果 ($\delta^{13}C_{轻} > \delta^{13}C_{重}$) 亦表明: 土壤有机质从土壤轻组分逐渐向土壤重组分迁移的过程, 同样反映了土壤有机质分解、转化的过程。表 1 的数据很好地阐述了这两种趋势。

表 1 农田点 1 不同深度土壤的不同粒径、比重组分 $\delta^{13}C$ 值及 SOC_3 、 SOC_4 各占百分比 (%)

Table 1. The $\delta^{13}C$ values of different size and density fractions of soil and percentages of SOC_3 and SOC_4 in farm land No. 1 at different depths

深度 (cm)	2000~200 μ m			200~53 μ m			53~2 μ m			<2 μ m			重部分			轻部分		
	$\delta^{13}C$	SOC_4	SOC_3	$\delta^{13}C$	SOC_4	SOC_3	$\delta^{13}C$	SOC_4	SOC_3	$\delta^{13}C$	SOC_4	SOC_3	$\delta^{13}C$	SOC_4	SOC_3	$\delta^{13}C$	SOC_4	SOC_3
0~5	-20.18	39	61	-20.70	32	68	-20.87	31	69	-21.24	28	72	-21.01	29	71	-20.36	37	63
5~10	-20.74	32	68	-21.72	27	73	-21.82	26	74	-22.19	25	75	-21.82	26	74	-21.22	28	72
10~15	-20.78	31	69	-21.79	27	73	-21.16	29	71	-22.45	22	78	-22.01	25	75	-21.38	27	73
15~20	-21.05	29	71	-22.94	18	82	-23.07	15	85	-25.59	8	92	-22.72	20	80	-22.04	25	75

注: 表中 SOC_4 、 SOC_3 栏下数值分别为各自所占百分比 (%)。

(3) 分别测定森林与农田土壤中的有机质含量, 发现二者间存在显著差异性。对于相邻的农田、森林采样点, 土壤中有有机碳含量, 森林点明显高于农田点; 森林点土壤中有有机碳百分含量最高达

16%, 最低值也为 1.36%, 而农田点土壤有机碳的百分含量变化幅度仅 0.41%~2.22% (表 2)。

根据 E. G. Gregorich 等 (1995)^[4] 的经验公式:

表 2 相邻森林、农田点不同深度土壤中有有机碳百分含量 (%)

Table 2. The percentage of soil organic carbon in near forest and farm lands at different depths

	0~5cm	5~10cm	10~15cm	15~20cm	20~30cm	30~40cm	40~50cm	50~60cm	60~70cm
森林 1	5.24	3.42	2.68	2.34	2.27	2.01	1.92	1.71	1.48
农田 1	1.09	1.14	1.14	1.05	1.05	0.65	0.52	0.59	0.52
森林 2	16.0	9.03	7.84	7.86	6.30	6.72	3.61	3.49	
农田 2	2.08	2.22	2.17	2.01	2.08	1.77	1.34	0.89	0.68
森林 3	7.37	4.66	3.59	2.96	1.72	1.56	1.36	1.61	
农田 3	1.56	1.39	1.44	1.59	1.25	0.70	0.52	0.41	0.43

$A_t = A_0 e^{-kt}$ (A_t : 土壤有机碳含量, A_0 : 土壤初始状态有机碳含量, k : 有机碳变为无机碳的衰减系数, t : 经历时间) 在亚热带地区, 森林中土壤有机碳的 k 值为 $0.052a^{-1}$, 即 SOC_3 的半衰期为 24 年, 而 SOC_4 的半衰期仅为 13 年。对于本实验, 即使扣除农作物地表被收割走这一部分, 仍可说明毁林造田后, 土壤中有有机质的分解速度加快了。

4 总 结

土壤中有有机质的分解, 有的成分短短几小时即已完成, 有的成分却可长达几个世纪^[8], 具极不

均匀性, 从这个角度来看, 以有机质的具体组成、结构为研究对象来探讨土壤有机质总量的变化规律, 难度一定较大。本文正是基于这一前提, 希望将土壤中的有机质作为一个总体对待, 显然, 相对于“土壤对大气 CO_2 的贡献”等问题, 这样做会比前者更有意义。

土壤中有有机质的含量对作物的生长影响甚大, 我国农业耕作普遍不重视麦秸等收割弃留物的充分利用, 而是简单的焚烧处理, 图 2 说明, 应该重视通过保留田间收割弃留物来恢复土壤肥力, 进而改善农业生态环境的做法。

参 考 文 献

- [1] Cheshire M. V., Christensen B. T. and Sorensen L. H., Labelled and native sugars in particle — size fractions from soils incubated with ^{14}C straw for 6 to 18 years. *Journal of Soil Science*, 1990, 41: 29~39.
- [2] Sparling G. P., Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30: 195~207.
- [3] Balesdent J., Mariotti A. and Boisgontier D., Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ^{13}C abundance in maize fields. *Journal of Soil Science*, 1990, 41: 587~596.
- [4] Gregorich E. G., Ellert B. H. and Monreal C. M., Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ^{13}C abundance. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75: 161~167.
- [5] Michael A., Bashkin and Dan Binkley, Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii. *Ecology*, 1998, 79: 828~833.
- [6] Smith B. N. and Epstein S., Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 1971, 47: 380~384.
- [7] 周政贤主编, 茂兰喀斯特森林科学考察集。贵阳: 贵州人民出版社, 1987。
- [8] Campbell C. A., Paul E. A. and Rennie D. A. et al., Applicability of the carbon — dating method of analysis to soil humus studies. *Soil Science*, 1967, 104: 217~224.

INVESTIGATION INTO THE RULES OF TRANSPORT OF SOIL ORGANIC CARBON BY USING $\Delta^{13}\text{C}$ VALUES

Liu Qiming Piao Hechun Guo Jingheng

(State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy
of Sciences, Guiyang 550002)

Wei Luming Yu Dengli

(Administration Bureau of Maolan State Natural Reserved Area, Libo 558400)

Abstract

Significant differences are noticed in $\delta^{13}\text{C}$ value between C_3 plants and C_4 plants. According to this feature, soil samples were collected from three profiles on farms and forest lands near the Maolan karst forest where C_3 plants and C_4 plants are growing now. Some rules of transport of soil organic carbon can be deduced in terms of the measured $\delta^{13}\text{C}$ values of total organic carbon and different size—density fractions.

Key words: soil organic carbon; $\delta^{13}\text{C}$ value; SOC_3 ; SOC_4