

用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤 有机质数量动态变化*

窦 森 张晋京

(吉林农业大学腐殖物质研究室, 长春 130118)

Lichtfouse E.

(Soil-Water Geochemistry and Microbiology Laboratories, Earth Sciences-CST, University of Burgundy-INRA, 6,
Boulevard Gabriel, F21000 Dijon, France)

曹 亚 澄

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 通过室内培养实验,应用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究了玉米秸秆分解期间,土壤中胡敏酸(HA)和富里酸(FA)数量的动态变化。结果表明:培养期间,新加入的玉米秸秆以及原土有机 C 都减少,但后者分解速度较慢。培养初期,FA 的形成速度大于 HA;随培养时间延长,FA 转化为 HA 或相互转化。原土有机质中,HA、FA 也发生了相互转化,但与新形成的 HA、FA 相比转化速度较慢。用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究短期培养(几个月~几年)条件下新加入有机质在土壤中的分解动力学是可行的。

关键词 $\delta^{13}\text{C}$ 值,暗棕壤,胡敏酸,富里酸,动态变化
中图分类号 S154.2

自然界中,C 的稳定性同位素有二种,即 ^{12}C 和 ^{13}C ,它们分别占全 C 的 98.89%和 1.11%,而且在不同来源化合物中有一定分异。 $\delta^{13}\text{C}$ 值就是描述样品与标准化合物相比较 ^{13}C 天然丰度变异程度的指标。 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围从 -40‰~-23‰,平均为 -27‰; C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围从 -19‰~-9‰,平均为 -12‰^[1]。

自 Cerri 等^[2]首次应用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究土壤有机质周转以来,该方法已经在这一领域研究中获得了极大的成功。与其它研究土壤有机质动态变化的方法相比, $\delta^{13}\text{C}$ 方法的一个独特优点是能够直接计算出土壤或其组分中不同植物来源有机 C 的比例和数量。这样,既能了解新加入植物物料(新有机质)的分解规律,又能获知原土中固有有机质(老有机质)的转化过程。但目前 $\delta^{13}\text{C}$ 方法主要用于研究长期条件下土壤有机质的周转,而很少用于短期培养条件下土壤有机质动态变化的研究,用于植物物料分解期间 HA、FA 等腐殖物质组形成转化过程的研究尚未见报道。本文应用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究了特定培养条件下,玉米秸秆分解期间土壤中胡敏酸(HA)和富里酸(FA)数量随时间的动态变化规律。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试土壤为暗棕壤。采自黑龙江省农业科学院黑河市农业科学研究所试验田,采样时间为 1996 年 8 月,该土壤已种植小麦或大豆(C_3 作物)10 年以上,土壤的 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 为 6.7,吸湿水含量为 52.0 g kg^{-1} ,有机 C 22.9 g kg^{-1} ,全 N 2.19 g kg^{-1} ,速效 N 220.6 mg kg^{-1} ,速效 P 24.3 mg kg^{-1} ,C/N 为 10.5。

* 国家自然科学基金(49971052)、吉林省杰出青年基金(1999-48-17;963504-2)和中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放研究实验室资助项目

收稿日期:2001-09-04;收到修改稿日期:2002-05-09

供试植物物料为玉米 (C_4 作物) 秸秆。该玉米秸秆含有机 C 432.3 g kg^{-1} , 全 N 4.8 g kg^{-1} , 全 P 3.34 g kg^{-1} , 全 K 3.49 g kg^{-1} , C/N 为 90.0。

1.2 方法

1.2.1 培养实验的设计 玉米秸秆用量为 12% (植物物料风干重占风干土重的百分数), 加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 使 C/N 约为 20, 调至田间持水量的 60%, 装入烧杯中, 用可透气的塑料薄膜封口, 在 $30 (\pm 2)^\circ\text{C}$ 培养, 定期称重加水。动态取样时间分别为 1 h、15 d、30 d、60 d、120 d、240 d、360 d、540 d 和 720 d。每一处理重复 3 次。

1.2.2 HA、FA 的提取和分离 参照文启孝等介绍的方法。具体步骤为: 将过 0.25mm 筛的风干土样按土:水 = 1:5 加入蒸馏水, 待土粒沉降后, 吸出上层清液及浮根。重复上述处理 2~3 次。按土:水 = 1:10 加入 0.1 mol L^{-1} NaOH 溶液, 提取至碱提取液颜色很淡为止。将得到的 HA 反复溶解沉淀 3~4 次, 高速离心 (8000 r min^{-1} , 1h), 真空干燥。将沉淀出 HA 后的酸性溶液通过铺于瓷漏斗上的活性炭层, 洗脱出的 FA 电渗析至电流很小并检查阴极室无酚酞反应时为止, 冷冻干燥。

1.2.3 土壤及其组分 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值用 Finnigan MAT-251 Mass Spectrometer 质谱仪测定。

1.2.4 土壤及其组分中不同植物来源有机 C 数量的计算 某一时间 t 时来源于 C_4 植物和 C_3 植物的有机 C 比例分别为:

$$C_{4t}/C \text{ 或 } f = (\delta - \delta_{C_3}) / (\delta_{C_4} - \delta_{C_3}) \quad (1)$$

$$C_{3t}/C \text{ 或 } 1-f = (\delta_{C_4} - \delta) / (\delta_{C_4} - \delta_{C_3}) \quad (2)$$

式中, δ 为 C_3 和 C_4 植物共同存在时土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_{C_3} 为加入 C_4 植物之前土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, δ_{C_4} 为 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

若土壤的有机 C 总量 (C) 已知, 那么来自 C_4 植物和 C_3 植物的有机 C 数量分别为:

$$C_{4t} = fC \quad (3)$$

$$C_{3t} = (1-f)C \quad (4)$$

1.2.5 其余项目 用常规方法测定^[3]。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机 C 数量

2.1.1 土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 由表 1 可见, 加入玉米秸秆 ($\delta^{13}\text{C}$ 值为 -12.28‰) 后, $\delta^{13}\text{C}$ 值较原土明显增加。1 h 时, $\delta^{13}\text{C}$ 值增加了 8.74%, 增加幅度为 35.2%; 随培养时间延长, $\delta^{13}\text{C}$ 值下降, 但在培养结束 (720 d) 时的 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍高于未加玉米秸秆的原土。目前, 一般的观点认为, 土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随土壤深度的变化可以近似地代表有机质的分解过程, 在种植玉米土壤中, $\delta^{13}\text{C}$ 值则随土壤深度的增加而减小^[4]。这与本研究中 $\delta^{13}\text{C}$ 值随培养时间延长而减少的结论是一致的。Nadlhofer 等^[5] 的研究表明, 一森林土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表层 (0~10cm) 为 -25.2‰ , 心土层 (10~20cm) 为 -23.6‰ , 当一次性加入 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -27‰ ~ -28‰ 之间的森林落叶或细根时, 使土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降, 但随以后分解过程的进行 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加。这从另一个变化方向上表明与本研究结果一致。

玉米秸秆分解期间, 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降的原因可以有如下几种解释: (1) 新加入玉米秸秆的净残留 C (但主要是玉米秸秆来源的 C) 量逐渐减少。下面的相关分析说明了这一点。(2) 不同有机化合物选择性保持的结果。加入玉米秸秆后 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加的原因是由于植物物料中较多的高 ^{13}C 化合物 (如水溶性组分、碳水化合物和纤维素等) 进入了土壤, 而随后 $\delta^{13}\text{C}$ 值的下降则是由于高 ^{13}C 化合物的迅速矿化和低 ^{13}C 化合物 (如木质素) 相对增多的结果。(3) 不同有机化合物转化的结果。随培养时间延长, 玉米秸秆中的高 ^{13}C 化合物逐渐转变为低 ^{13}C 化合物, 如碳水化合物或含碳水化合物较多的 FA 转化为脂类或含脂类较多的 HA (但也可能包括 HA 向 FA 的转化)。

从表 1 可见, 玉米秸秆分解期间, $\delta^{13}\text{C}$ 值下降幅度最大的时期是 1 h~15 d, 这期间 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降了 2.11%, 下降幅度为 13.1%; 15 d 之后, $\delta^{13}\text{C}$ 值下降的速度减慢, 第 720 d 时的 $\delta^{13}\text{C}$ 值仅比第 15 d 时下降了 1.82%, 下降幅度为 10.0%。这说明, 玉米秸秆在土壤中分解最快的时期是加入后的前期

表 1 玉米秸秆分解过程中土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及不同植物来源有机 C 的数量Table 1 $\delta^{13}\text{C}$ values and $C_3\text{C}$, $C_4\text{C}$ of soil during com stalk decomposition

培养时间 Time	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	C (g kg^{-1})	f (%)	$1-f$ (%)	$C_{4\text{t}}$ (g kg^{-1})	$C_{3\text{t}}$ (g kg^{-1})	$C_{4\text{t}}/C_{4-1\text{h}}$ (%)	$C_{3\text{t}}/C_{3-\text{CK}}$ (%)
CK	-24.85	22.9	0.00	100	0.00	22.9	0.00	100
1 h	-16.11	66.0	69.5	30.5	45.9	20.1	100	87.8
15 d	-18.22	48.9	52.7	47.3	25.8	23.1	56.2	101
30 d	-18.30	45.1	52.1	47.9	23.5	21.6	51.2	94.3
60 d	-18.78	43.1	48.3	51.7	20.8	22.3	45.4	97.3
120 d	-18.85	40.9	47.7	52.3	19.5	21.4	42.5	93.4
180 d	-19.10	40.0	45.7	54.3	18.3	21.7	39.9	94.8
360 d	-19.36	37.6	43.7	56.3	16.4	21.2	35.8	92.5
540 d	-19.69	35.2	41.1	58.9	14.4	20.8	31.5	90.6
720 d	-20.04	28.2	38.3	61.7	10.8	17.4	23.5	76.0

注: $C_3\text{C}$ 为来自作物(小麦或大豆)的碳; $C_4\text{C}$ 为来自玉米秸秆的碳(下同)

(15 d 之前)。培养结束(720 d)时, $\delta^{13}\text{C}$ 值比开始(1 h)时下降了 3.93‰, 下降幅度为 24.4%, 小于刚加入玉米秸秆(1 h)时 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加幅度(35.2‰)。这表明, $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化主要是由于加入 C_4 植物物料的结果, 而矿化和腐殖化过程所引起的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化相对较小。看来, 在 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降原因的几种解释中, 以新加入的玉米秸秆残留 C 的减少为主要原因。

目前, $\delta^{13}\text{C}$ 方法主要用于研究长期条件下土壤有机质的周转, 而很少用于短期培养条件下土壤有机质动态过程的研究。主要原因是一般认为植物类型发生更替后(意味着每年持续加入新鲜有机物), 短期内 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较小, 只有在较长时期内, 才能观察到 $\delta^{13}\text{C}$ 值有比较明显的变化, 并且更替的时间越长, 标记的效果就会越好^[6]。该条件对于研究田间 C_4 或 C_3 作物改种 C_3 或 C_4 作物后土壤有机质的更新情况是必要的。如奚森等^[7]的研究表明, C_3 小麦改种 C_4 玉米后, 随种植玉米时间延长, 土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加, 0、0.42、1、1.42、1.75、2.42、3.42、4、4.33 与 23 年时的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -26.27、-25.87、-26.13、-25.92、-25.98、-25.66、-25.10、-24.87、-24.96 和 -20.33‰, 即时间越长总的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化越明显。但若欲研究新加入植物物料的分解规律时(一次性加入), 那么上述条件就不必要了。我们知道, 植物物料在土壤中分解很快, 培养实验 1 个月就能分解 50% 左右, 同时有一部分形成腐殖物质, 因此 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度最大的时期是在加入植物物料后的 1 个月左右。由表 1 可见, $\delta^{13}\text{C}$ 值在 1 个月内下降了约 2‰, 以后下降的速度减慢。因此, $\delta^{13}\text{C}$ 方法不仅能用于研究土壤有机质的长期(几年~几十年)周转, 而且对于短期(几个月~几年)培养条件下土壤有机质分解动力学的研究也是可行的。

经相关分析发现, 玉米秸秆分解期间, 土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与全土有机 C 量之间呈极显著的正相关($r=0.991^{**}$, $n=9$)。这说明, $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化能反映土壤有机 C 数量的变化。

2.1.2 土壤有机 C 数量 由表 1 可见, 玉米秸秆分解期间, $C_4\text{C}$ 比例(f)与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化规律相同, 而 $C_3\text{C}$ 比例($1-f$)则与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈相反的变化。随培养时间延长, $C_4\text{C}$ 的数量($C_{4\text{t}}$)逐渐下降, $C_3\text{C}$ 的数量($C_{3\text{t}}$)也下降。这说明, 不仅新加入的玉米秸秆, 而且原来土壤中固有的有机 C 也随培养时间延长而分解。这里值得注意的是, 表 1 中的 $C_{4\text{t}}$ 和 $C_{3\text{t}}$ 均为占(土重+玉米秸秆重)的 C 量。由于没有进行预培养, 玉米秸秆在 1 h 内的分解量很小, 因此 1 h 时计算出的 $C_{3\text{t}}$ (20.1 g kg^{-1})数值偏低。当表示为占土重的 C 量时, 则 1 h 时的 $C_{3\text{t}}$ 为 $20.1/0.88=22.8\text{ g kg}^{-1}$ (这里的 0.88 是土重的比例, 因为玉米秸秆用量为 12%), 与原土的含 C 量 22.9 g kg^{-1} 相当, 即此时 $C_{3\text{t}}$ 的残留率仍约为 100%。

由于 1 h 时的 C_{4t} 可近似认为与玉米秸秆还未分解时的 C_{4t} 相等, 因此我们就能分别计算出土壤中老有机质和新有机质的残留率。由表 1 可见, 玉米秸秆分解 360 d 时的残留率为 35.8%, 720 d 时为 23.5%。这与以前用非标记及常规方法测定的结果是基本一致的^[8]。另一方面, 360 d 时原土中固有有机质的残留率在 90% 以上, 720 d 时约为 76%。可见随培养时间延长, 老有机质的残留率也下降, 但下降速度要慢得多。

经相关分析表明(图 1), 玉米秸秆分解期间, 土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C_{4t} 之间呈极显著的正相关($r=0.995^{**}$, $n=9$), 而与 C_{3t} 之间则不呈显著的相关。这说明, $\delta^{13}\text{C}$ 值的下降主要是新有机质分解的结果, 而老有机质的贡献相对较小。

2.2 腐殖物质数量及组成

2.2.1 HA、FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 由表 2 可见, 原土中, HA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于 FA; HA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也低于全土有机质, 而 FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比全土有机质高。

表 2 玉米秸秆分解过程中土壤 HA、FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及其中不同植物来源有机 C 的数量

Table 2 $\delta^{13}\text{C}$ values and $C_5\text{-C}$, $C_4\text{-C}$ of HA, FA in soil during com stalk decomposition

腐殖物质 Humic substances	培养时间 Time	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	C (g kg^{-1})	f (%)	$1-f$ (%)	C_4 (g kg^{-1})	C_{3t} (g kg^{-1})
HA	CK	-25.14	3.52	0.00	100	0.00	3.52
	1 h	-21.08	4.38	31.6	68.4	1.38	3.00
	15 d	-20.56	5.91	35.6	64.4	2.10	3.81
	30 d	-20.97	5.63	32.4	67.6	1.83	3.80
	60 d	-20.69	5.54	34.6	65.4	1.92	3.62
	120 d	-21.01	5.55	32.1	67.9	1.78	3.77
	180 d	-21.39	5.15	29.2	70.8	1.50	3.65
	360 d	-21.16	5.10	30.9	69.1	1.58	3.52
FA	CK	-24.46	3.22	0.00	100	0.00	3.22
	1 h	-20.99	4.19	28.5	71.5	1.19	3.00
	15 d	-21.35	4.23	25.5	74.5	1.08	3.15
	30 d	-21.52	4.12	24.1	75.9	0.99	3.13
	60 d	-21.14	4.31	27.3	72.7	1.17	3.14
	120 d	-21.57	4.24	23.7	76.3	1.01	3.23
	180 d	-21.74	4.11	22.3	77.7	0.92	3.19
	360 d	-21.67	4.07	22.9	77.1	0.93	3.14

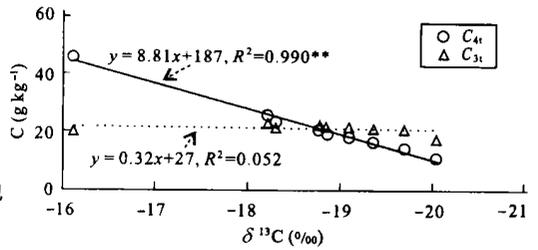


图 1 玉米秸秆分解过程中土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C_{4t} 和 C_{3t} 的相关性

Fig. 1 Interrelation between $\delta^{13}\text{C}$ values and C_{4t} , C_{3t} in soil during corn stalk decomposition

一般认为,脂类化合物、木质素等的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,而碳水化合物、羧基等的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高^[9-11]。通常的研究表明,HA 的脂族链烃含量和芳化度较 FA 高,而碳水化合物和羧基含量则低于 FA。由此推断,FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值应高于 HA。Nissenbaum 等^[12,13]对一些水域和土壤 HA、FA 的研究表明,与来自同一水域或土壤的 HA 相比,其 FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均较高(其中在水域中约高 3.8%,而在土壤中约高 0.9%)。窦森等^[7]对法国爱松省一种弱淋溶土(种植小麦或玉米)的研究也表明,FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于 HA,HA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般较相应的全土有机质低。这些都与本文的结果一致。

但也有例外的情形。如 Nissenbaum 等^[11]的研究表明,在夏威夷的一个甘蔗(C_4 作物, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -14.0%)田中,HA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-14.8%)比 FA (-18.2%)高。另外,窦森等^[7]在棕壤及黑土上的研究也表明,HA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般高于 FA,HA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般也高于相应的全土有机质。

由此可见,对于腐殖物质组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与构成该组分的各种化合物或官能团之间的关系还需做进一步研究。但现有的结果似乎已表明,某一组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是其各种结构单元共同作用的结果,而并不只是取决于某个或某几个结构单元的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。由于腐殖物质本身的结构和组成极为复杂,这就决定了在不同条件下它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也不同。

玉米秸秆分解期间,与土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化类似,加入玉米秸秆后,HA、FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均显著增加;随培养时间延长, $\delta^{13}\text{C}$ 值增加的幅度减小,并且在一定时期后开始下降或呈现下降的趋势,但在培养结束时的 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍高于未加玉米秸秆的原土 HA 或 FA。

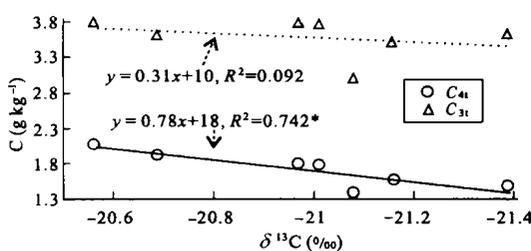


图2 玉米秸秆分解过程中 HA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C_{44} 和 C_{33} 的相关性

Fig. 2 Interrelation between $\delta^{13}\text{C}$ values and C_{44} , C_{33} of HA in soil during corn stalk decomposition

而 C_{31} 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值不呈显著或极显著相关。说明 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化主要是反映了新有机 C (即 $C_{\neq C}$) 数量的变化。这与在全土有机质中得出的结论一致。

2.2.3 HA/FA 比值 根据土壤的腐殖质组成状况,可以了解特定条件下 HA、FA 形成的相对速度及其相互转化关系。用非标记及常规方法测定 HA/FA 比值相比,应用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法可以计算出新形成腐殖物质的 HA/FA ($C_{\neq}\text{HA}/C_{\neq}\text{FA}$) 比值,这对于反映植物物料分解期间 HA、FA 形成速度的相对大小更有意义,同时我们也能了解老有机质中 HA/FA ($C_{\neq}\text{HA}/C_{\neq}\text{FA}$) 比值的变化的。

由图 4 可见,与 $C_{\neq}\text{HA}/C_{\neq}\text{FA}$ 比值相比, $C_{\neq}\text{HA}/C_{\neq}\text{FA}$ 比值较高,这说明:(1)新形成 FA 比原有 FA 的分解速度快。(2)新形成 FA 向 HA 转化的速度比原有 FA 快。(3)纯化过程对新形成 FA 比原土 FA

经相关分析表明,玉米秸秆分解期间,HA、FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其含 C 量之间不呈显著的相关。但除去 1 h 处理后,即 15 d 之后,HA、FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其含 C 量呈现显著的相关 ($r_{\text{HA}} = 0.863^*$; $r_{\text{FA}} = 0.842^*$, $n = 6$),这说明,纯化过程对 1 h (刚加入玉米秸秆)时 HA、FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响较大。

2.2.2 HA、FA 数量 由表 2 可见,HA、FA 中 f 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化规律相同,而 $1-f$ 则与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化相反。一般来看,无论新形成的还是原土中固有的腐殖物质,随培养时间延长,HA 的数量都以 15 d 为转折点先增加后下降,而 FA 的数量下降。

相关分析表明(图 2,图 3),玉米秸秆分解期间,HA、FA 中 C_{44} 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著或极显著相关,

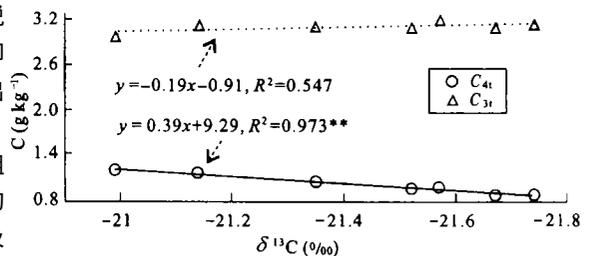


图3 玉米秸秆分解过程中 FA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C_{44} 和 C_{33} 的相关性

Fig. 3 Interrelation between $\delta^{13}\text{C}$ values and C_{44} , C_{33} of FA in soil during corn stalk decomposition

的影响大。

玉米秸秆分解期间, $C_4\text{-HA}/C_4\text{-FA}$ 比值在 1 h 时最低, 表明最初 FA 的形成速度大于 HA; 第 15 d 时比值增加, 说明部分 FA 转化成了 HA, 使 HA 的形成速度增加; 15 d 之后, 由于 HA 转化为 FA, 使 FA 的形成速度又增加; 360 d 之后, HA、FA 的形成速度有达到动态平衡的趋势。从 $C_3\text{-HA}/C_3\text{-FA}$ 比值来看, 与 $C_4\text{-HA}/C_4\text{-FA}$ 比值的变化相似, 说明即使在原土有机质中, HA、FA 也发生了相互转化, 并且 15 d 之前仍是以 FA 向 HA 的转化为为主。但与新形成 HA、FA 的转化速度相比, 老 HA、FA 的转化速度相对较慢 (表现为 HA/FA 比值的变化幅度较小)。用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法计算的 $C_4\text{-HA}/C_4\text{-FA}$ 比值和 $C_3\text{-HA}/C_3\text{-FA}$ 比值与用常规方法测定的总的 HA/FA 比值的变化规律是一致的。

3 结 论

培养期间, 新加入的玉米秸秆以及原土有机 C 数量都减少, 但后者分解速度相对较慢。培养初期, FA 的形成速度大于 HA, 随培养时间延长, FA 转化为 HA 或相互转化; 原土有机质中, HA、FA 也发生了相互转化, 但转化速度相对较慢。用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究短期培养(几个月~几年)条件下新加入有机质在土壤中的分解动力学是可行的。

致 谢 黑龙江省农业科学院土壤肥料研究所吴英研究员, 黑河市农业科学研究所郭儒东、唐忠信同志为本研究提供了暗棕壤样品。中国科学院南京土壤研究所施卫明研究员、蔡祖聪研究员和朱莉莉同志在测试条件上提供了帮助。

参考文献

- Smith B N, Epstein S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 1971, 47(3): 380~ 384
- Cerri C, Feller C, Balesdent J, *et al.* Application du tracement isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 1985, 300(9): 423~ 428
- 劳家桢. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1988. 203~ 457
- Gregorich E G, Ellert B H, Monreal C M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ^{13}C abundance. *Can. J. Soil Sci.*, 1995, 75(2): 161~ 167
- Nadelhoffer K J, Fry B. Controls on natural nitrogen-15 and carbon-13 abundance in forest soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, 52(6): 1633~ 1640
- Balesdent J, Mariotti A, Guillet B. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Bio. Biochem.*, 1987, 19(1): 25~ 30
- 奚森, Lichfouse E, Mariotti A. 土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 研究. 农业持续发展的土壤培肥研究. 沈阳: 东北大学出版社, 1995. 116~ 119
- 张晋京, 奚森, 江源, 等. 玉米秸秆分解期间土壤中有机碳数量的动态变化研究. *吉林农业大学学报*, 2000, 22(3): 67~ 72
- Bender M M. Variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation. *Phytochemistry*, 1971, 10: 1239~ 1244
- Smith B N. Natural abundance of the stable isotopes of carbon in biological systems. *Biosci.*, 1972, 22: 226~ 231
- Berner R, Fogel M L, Sprague K, *et al.* Depletion of ^{13}C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies. *Nature*, 1987, 329(22): 708~ 710
- Nissenbaum A, Kaplan I R. Chemical and isotope evidence for the in situ origin of marine humic substances. *Limnology and*

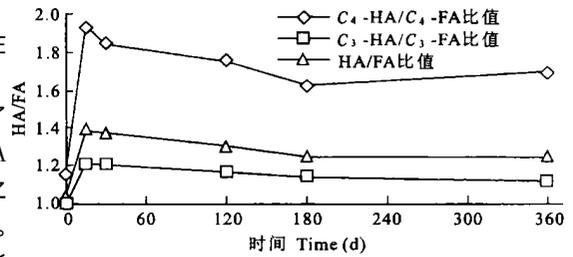


图 4 玉米秸秆分解过程中的 $C_4\text{-HA}/C_4\text{-FA}$ 、 $C_3\text{-HA}/C_3\text{-FA}$ 及 HA/FA 比值

Fig. 4 The ratios of $C_4\text{-HA}/C_4\text{-FA}$, $C_3\text{-HA}/C_3\text{-FA}$ and HA/FA in soil during corn stalk decomposition

Oceanography, 1972, 17(4): 570~ 582

13. Nissenbaum A, Shallinger K M. The distribution of the stable carbon isotope ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in fractions of soil organic matter. *Geoderma*, 1974, 11(2): 137~ 145

STUDY ON DYNAMIC CHANGE OF SOIL ORGANIC MATTER DURING CORN STALK DECOMPOSITION BY $\delta^{13}\text{C}$ METHOD

Dou Sen Zhang Jin-jing

(*Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China*)

Lichtfouse E

(*Soil-Water Geochemistry and Microbiology Laboratories, Earth Sciences-CST, University of Burgundy-INRA, 6 Boulevard Gabriel, F21000 Dijon, France*)

Cao Ya-cheng

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Summary

In an incubation experiment, dynamic change in amounts of soil organic matter (SOM), HA and FA were studied during corn stalk (CS) decomposition in dark-brown soil by $\delta^{13}\text{C}$ method. The results showed that organic carbon from both new added CS and original soil decreased, but decomposition rate of the latter was slower than that of the former during incubation periods. The residual rate of CS was about 36% at 360th day and 24% at 720th day, whereas that of original SOM was above 90% at 360th day and about 76% at 720th day. In the initial stage of incubation (1hour), the formed rate of FA was faster than that of HA. Then, FA transformed into HA. After 15th day, HA transformed into FA again. HA and FA from original SOM also transformed each other, and it was still the same trend that FA transformed into HA before 15th day. But the transformed rate in original SOM was relatively slower than that in new-formed SOM. $\delta^{13}\text{C}$ method can be used to study decomposition dynamics of SOM in short-term incubation experiment (several months~ several years).

Key words $\delta^{13}\text{C}$ value, Dark brown soil, Humic acid, Fulvic acid, Dynamic change