



HAL
open science

Study on dynamic change of soil organic matter during corn stalk decomposition by $\delta^{13}\text{C}$ method

Dou Sen, Zhang Jin-Jing, Eric Lichtfouse, Cao Ya-Cheng

► **To cite this version:**

Dou Sen, Zhang Jin-Jing, Eric Lichtfouse, Cao Ya-Cheng. Study on dynamic change of soil organic matter during corn stalk decomposition by $\delta^{13}\text{C}$ method. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40, pp.328-334. hal-00264085

HAL Id: hal-00264085

<https://hal.science/hal-00264085v1>

Submitted on 14 Mar 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Revised version

Study on dynamic change of soil organic matter during corn stalk decomposition by ^{13}C method

Dou Sen, Zhang Jin-jing, Eric Lichtfouse, Cao Ya-cheng

Acta Pedologica Sinica 40, 328-334, 2003.

Dou sen, Ph.D., Professor, Associate Dean, College of Natural Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University.

Add : 2888 Av Xincheng, Changchun, Jilin Prov., CHINA P.C. : 130118

Email : dousen1959@126.com; dousen@public.cc.ji.cn; dousen@tom.com

Dr. Eric Lichtfouse, Editor-in-Chief, Agronomy for Sustainable Development, <http://www.agronomy-journal.org>

Editor-in-Chief, Environmental Chemistry Letters, <http://www.springerlink.com/content/110367>

INRA-CMSE-PME, BP 86510, 21065 Dijon Cedex, France

Eric.Lichtfouse@dijon.inra.fr

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)

E.Lichtfouse

(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)

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

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)

E.Lichtfouse

(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的稳定性同位素有两种, 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(1985)^[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等腐殖物质组分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。采自黑龙江省农科院黑河市农科所试验田, 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pH(H_2O)为6.7, 吸湿水含量为 52.0g kg^{-1} , 有机C 22.9g kg^{-1} ,

*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:

全N 2.19g kg⁻¹, 速效N 220.6mg kg⁻¹, 速效P 24.3mg kg⁻¹, C/N为10.5。

供试植物物料为玉米(C₄作物)秸秆。该玉米秸秆含有机C 432.3 g kg⁻¹, 全N 4.8g kg⁻¹, 全P 3.34g kg⁻¹, 全K 3.49g 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(NH₄)₂SO₄使C/N约为20:1, 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±2℃培养, 定期称重加水。动态取样时间分别为1小时(h)、15天(d)、30d、60d、120d、240d、360d、540d和720d。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(1984)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0.1mol L⁻¹NaOH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(8000r/min, 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 δ¹³C值的测定 δ¹³C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C₄植物和C₃植物的有机C比例分别为:

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

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

式中, δ 为C₃和C₄植物共同存在时土壤有机质的 δ¹³C值, δ_{C₃}为加入C₄植物之前土壤有机质的 δ¹³C值, δ_{C₄}为C₄植物的 δ¹³C值。

若土壤的有机C总量(C)已知, 那么来自C₄植物和C₃植物的有机C数量分别为:

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

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

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 δ¹³C值 由表1可见, 加入玉米秸秆(δ¹³C值为-12.28‰)后, δ¹³C值较原土明显增加。1h时, δ¹³C值增加了8.74‰, 增加幅度为35.2%; 随培养时间延长, δ¹³C值下降, 但在培养结束(720d)时的 δ¹³C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 δ¹³C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, δ¹³C值则随土壤深度的增加而减小^[4]。这与本研究中 δ¹³C值随培养时间延长而减少的结论是一致的。Nadlhofer等(1988)的研究表明, 一森林土壤的 δ¹³C

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^[5]。这从另一个变化方向上表明与我们的研究结果一致。

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）。

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 $\text{C}_3\text{-C}$, $\text{C}_4\text{-C}$ of soil during corn stalk decomposition

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

注：C₃-C为来自作物（小麦或大豆）的碳；C₄-C为来自玉米秸的碳(下同)

note: C₃-C—from crop (wheat or bean), C₄-C—form corn stalk (same in the following)

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1h~15d，这期间 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降了2.11‰，下降幅度为13.1%；15d之后， $\delta^{13}\text{C}$ 值下降的速度减慢，第720d时的 $\delta^{13}\text{C}$ 值仅比第15d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（15d之前）。培养结束（720d）时， $\delta^{13}\text{C}$ 值比开始（1h）时下降了3.93‰，下降幅度为24.4%，小于刚加入玉米秸秆（1h）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C₄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C₄或C₃作物改种C₃或C₄作物后土壤有机质的更新情况是必要的。如窦森等（1995）^[7]的研究表明，C₃小麦改种C₄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， $\text{C}_4\text{-C}$ 比例 (f) 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化规律相同，而 $\text{C}_3\text{-C}$ 比例 ($1-f$) 则与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈相反的变化。随培养时间延长， $\text{C}_4\text{-C}$ 的数量 (C_{4t}) 逐渐下降， $\text{C}_3\text{-C}$ 的数量 (C_{3t}) 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_{4t} 和 C_{3t} 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1h内的分解量很小，因此1h时计算出的 C_{3t} (20.1g kg^{-1}) 数值偏低。当表示为占土重的C量时，则1h时的 C_{3t} 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 22.9g kg^{-1} 相当，即此时 C_{3t} 的残留率仍约为100%。

由于1h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360d时的残留率为35.8%，720d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，360d时原土中固有有机质的残留率在90%以上，720d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。

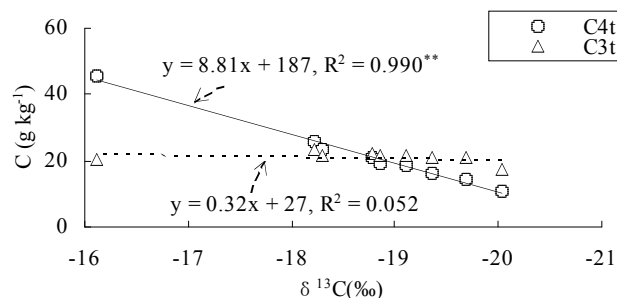


图1 玉米秸秆分解过程中土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C_{4t} 和 C_{3t} 的相关性

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

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。

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

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 $\text{C}_3\text{-C}$, $\text{C}_4\text{-C}$ of HA, FA in soil during corn stalk decomposition

培养时间 Time		CK	1h	15d	30d	60d	120d	180d	360d
HA	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	-25.14	-21.08	-20.56	-20.97	-20.69	-21.01	-21.39	-21.16
	$\text{C}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.52	4.38	5.91	5.63	5.54	5.55	5.15	5.10
	f (%)	0.00	31.6	35.6	32.4	34.6	32.1	29.2	30.9
	1-f (%)	100	68.4	64.4	67.6	65.4	67.9	70.8	69.1
	$\text{C}_{4t}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.00	1.38	2.10	1.83	1.92	1.78	1.50	1.58
	$\text{C}_{3t}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.52	3.00	3.81	3.80	3.62	3.77	3.65	3.52
FA	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	-24.46	-20.99	-21.35	-21.52	-21.14	-21.57	-21.74	-21.67
	$\text{C}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.22	4.19	4.23	4.12	4.31	4.24	4.11	4.07
	f (%)	0.00	28.5	25.5	24.1	27.3	23.7	22.3	22.9
	1-f (%)	100	71.5	74.5	75.9	72.7	76.3	77.7	77.1
	$\text{C}_{4t}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.00	1.19	1.08	0.99	1.17	1.01	0.92	0.93
	$\text{C}_{3t}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.22	3.00	3.15	3.13	3.14	3.23	3.19	3.14

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值应高于HA。Nissenbaum等（1972, 1974）^[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（1995）^[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（1972）^[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（1995）^[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。

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1h处理后，即15d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1h（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15d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_{4t}与δ¹³C值呈显著或极显著相关，而C_{3t}与δ¹³C值不呈显著或极显著相关。说明δ¹³C值的变化主要是反映了新有机C（即C₄-C）数量的变化。这与在全土有机质中得出的结论一致。

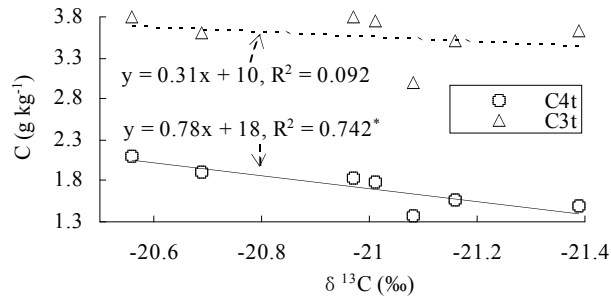


图2 玉米秸秆分解过程中HA的δ¹³C值与C_{4t}和C_{3t}的相关性

Fig.2 Interrelation between δ¹³C values and C_{4t}, C_{3t} of HA in soil during corn stalk decomposition

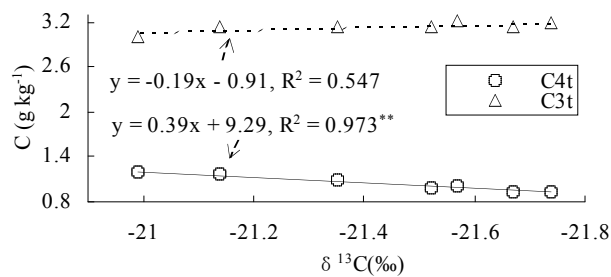


图3 玉米秸秆分解过程中FA的δ¹³C值与C_{4t}和C_{3t}的相关性

Fig.3 Interrelation between δ¹³C values and C_{4t}, C_{3t} of FA in soil during corn stalk decomposition

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。与用非标记及常规方法测定HA/FA比值相比，应用δ¹³C方法可以计算出新形成腐殖物质的HA/FA（C₄-HA/C₄-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（C₃-HA/C₃-FA）比值的变化。

由图4可见，与C₃-HA/C₃-FA比值相比，C₄-HA/C₄-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比对原土FA的影响大。

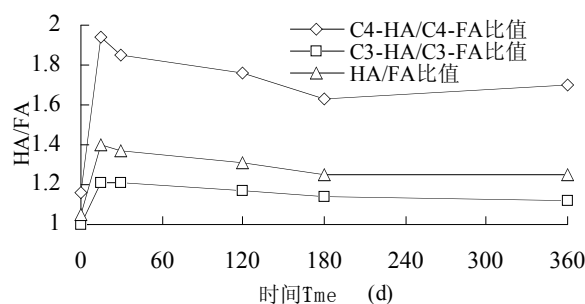


图4 玉米秸秆分解过程中的C₄-HA/C₄-FA、C₃-HA/C₃-FA及HA/FA比值

Fig.4 The ratios of C₄-HA/C₄-FA, C₃-HA/C₃-FA and HA/FA in soil during corn stalk decomposition

玉米秸秆分解期间，C₄-HA/C₄-FA比值在1h时最低，表明最初FA的形成速度大于HA；第15d时比值增加，说明部分FA转化成了HA，使HA的形成速度增加；15d之后，由于HA转化为FA，使FA的形成速度又增加；360d之后，HA、FA的形成速度有达到动态平衡的趋势。从C₃-HA/C₃-FA比值来看，与C₄-HA/C₄-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15d之前仍是以FA向HA的转化为主。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C₄-HA/C₄-FA比值和C₃-HA/C₃-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 小结

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 黑龙江省农科院土肥所吴英研究员，黑河市农科所郭儒东、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、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

- [1] Smith, B. N. and Epstein, S., Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 1971,47(3): 380~384
- [2] 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
- [3] 劳家桢, 土壤农化分析手册, 农业出版社, 1988, 203~457
- [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. *Can. J. Soil Sci.*, 1995,75(2): 161~167
- [5] Nadelhoffer, K. J. and 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
- [6] Balesdent, J., Mariotti, A. and Guillet, B., Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Bio. Biochem.*, 1987,19 (1): 25~30
- [7] 窦森, Litchfouse, E., Mariotti, A., 1995: 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, 东北大学出版社, 沈阳, 116~119
- [8] 张晋京, 窦森, 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

- [9] 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
- [10] Smith, B. N., Natural abundance of the stable isotopes of carbon in biological systems. *Biosci.*, 1972,22: 226~231
- [11] Benner, 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
- [12] Nissenbaum, A. and Kaplan, I. R., Chemical and isotope evidence for the in situ origin of marine humic substances. *Limnology and Oceanography*, 1972,17(4): 570~582
- [13] Nissenbaum, A. and 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