

玉米生长和光合作用对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响

杨兰芳^{1,2,3}, 蔡祖聪², 祁士华¹

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点试验室, 南京 20008; 3. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062)

摘要 在玉米盆栽试验期间, 运用碱吸收法采集土壤呼吸样品, 转化成碳酸钡后, 运用质谱法测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 以研究玉米生长和光合作用对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响。结果表明, 在玉米生长下, 土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随玉米生长时期而变化, 变化在 -14.57‰ ~ -12.30‰ 之间, 呈喇叭期 > 成熟期 > 开花期, 而在裸土下, 土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -19.34‰ ~ -19.13‰ 之间, 不随时间发生显著变化。开花期土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低的主要原因是光合产物土壤输入的下降和根系活性的降低, 成熟期玉米土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加主要是由于衰老死亡根系的分解腐烂。玉米生长下, 无论开花期还是成熟期, 白天土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著大于夜间; 玉米植株遮光处理后, 土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著降低。该试验结果证明玉米生长和光合作用显著影响土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 在玉米生长期间, 土壤呼吸主要来自于新近合成的光合产物。

关键词 玉米生长; 光合作用; 土壤呼吸; $\delta^{13}\text{C}$ 值。

文章编号: 1000-0933 (2007) 03-1071-07 中图分类号: Q143, Q938 文献标识码: A

Effects of maize growth and photosynthesis on $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration

YANG Lan-Fang^{1,2,3}, CAI Zu-Cong², QI Shi-Hua¹

1 School of Environmental Studeis, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of soil science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

3 School of Resource and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 1071 ~ 1078.

Abstract : As a safe, stable and practical labelling method, the natural abundance of ^{13}C has being widely used in the carbon cycle in soil-plant system. In order to investigate the effects of maize growth and photosynthesis on the value of $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration, the value of $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration was determined by mass spectrum after being trapped in a NaOH solution under a closed static chamber and then turned into barium carbonate in a pot experiment. The results showed that maize growth and photosynthesis significantly affected the value of $\delta^{13}\text{C}$ in the soil respiration. In maize-planted soil, the value of $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration had a clear seasonal variation. It changed with maize growth in the range of -14.57‰ to -12.30‰ and decreased during the period of trumpeting > ripening > flowering stages. The difference of $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration during various maize growth stages added up to about 2.3‰. However, in bare soil, $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX1-SW-01-05); 国家杰出青年基金资助项目 (40125004); 中国博士后科学基金资助项目

收稿日期: 2006-02-18; 修订日期: 2006-10-12

作者简介: 杨兰芳 (1964 ~), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤圈物质循环、土壤温室气体排放和土壤污染对植物影响研究。E-mail: lfyang@hubu.edu.cn

Foundation item : The project was financially supported by National Distinguished Young Scholar (No. 40125004) Awarded by National Nature Science Foundation of China and Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-05), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2005038220).

Received date 2006-02-18; **Accepted date** 2006-10-12

Biography : YANG Lan-Fang, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in material cycling in pedosphere, greenhouse gas emissions from soil and the effects of soil pollution on plants. E-mail: lfyang@hubu.edu.cn

ranged from -19.34‰ to -19.13‰ and did not change significantly over time. The $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration in maize-planted soil was lowest at flowering stage. This was mainly due to the decline of the input in assimilates into soil and the decrease in root activity. However, the $\delta^{13}\text{C}$ increased at ripening stage, due to the decomposition and ingestion of senescent and died roots by soil microorganisms. In planted soil, $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration was significantly higher during daytime than at nighttime at flowering and ripening stage. The difference of $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration between day and night periods added up to about 1.4‰ and 2.1‰ during flowering and ripening stage, respectively. Shading maize plants at the trumpeting stage decreased the value of $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration significantly. The difference of $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration between the treatment of non-shading and shading plants added up to 2.85‰ . It was conclude that $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration was remarkably controlled by maize growth and photosynthesis in planted soil. Soil respiration was mainly derived from the recent assimilates during maize growth.

Key Words :maize growth ; photosynthesis ; soil respiration ; $\delta^{13}\text{C}$

土壤呼吸是地球碳循环的重要组成部分,是植物固定的碳返回到大气的主要途径,全球土壤呼吸估计量大约为每年 $75\text{ Pg C}^{[1]}$ 。在植物-土壤系统中,土壤呼吸有 3 个来源:根系呼吸、微生物利用根际沉积物质和微生物分解原土壤有机质^[2~4],把根系呼吸和微生物对根际沉积物质的呼吸之和称为根际呼吸^[4]。 $\delta^{13}\text{C}$ 值就是样品中的碳同位素比率 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 与标准物质中碳同位素比率 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 之差,与标准物质中碳同位素比率 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值的千分数^[5,6],即 $\delta^{13}\text{C} = \frac{R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}}{R_{\text{标准}}} \times 1000$, $R = \frac{C^{13}}{C^{12}}$ 。大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -7‰ ^[7],由于同化 ^{13}C 比同化 ^{12}C 需要更多的能量,因此光合作用对 ^{13}C 具有歧视作用。不同光合途径的植物在同化过程中对 ^{13}C 的歧视程度不同, C_3 途径比 C_4 途径的歧视作用强,因此 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于 C_3 植物,其差异一般在 14‰ ^[8]。 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -12‰ , C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -27‰ ^[4,7]。由于植物光合产物输入土壤是土壤有机质的主要来源^[9,10],因此长期生长 C_4 植物的土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 就接近 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,可以称为 C_4 土壤,而长期生长 C_3 植物的土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 也就接近于 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,可以称为 C_3 土壤。如果在 C_3 土壤种植 C_4 植物或者在 C_4 土壤种植 C_3 植物,就相当于对作物和土壤同时进行 ^{13}C 同位素标记。通过测定植物生长期间土壤呼吸中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,可以反映植物生长和光合作用对土壤呼吸的影响。本试验运用 C_3 土壤种植 C_4 植物玉米,通过测定玉米不同生长时期土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和植株遮光后土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值,研究植物生长和光合作用对土壤呼吸的影响,为认识植物生长对土壤碳循环的影响和自然丰度 ^{13}C 法在碳循环研究中的应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

所用植物为玉米 (*Zea mays* L.) 品种为掖单 13 号。所用土壤为淋溶土,土壤有机碳和总氮含量为 4.9 g kg^{-1} 和 0.6 g kg^{-1} , 土壤 pH (水提 2.5:1) 为 5.80, 土壤砂粒 ($20 \sim 200\mu\text{m}$)、粉粒 ($2 \sim 20\mu\text{m}$) 和粘粒 ($<2\mu\text{m}$) 含量分别为 325 g kg^{-1} 、 462 g kg^{-1} 和 213 g kg^{-1} 。

1.2 方法

1.2.1 盆栽试验

采用 PVC 材料制成的圆柱形盆钵进行土壤盆栽试验。盆钵高 20 cm,直径 15 cm。盆钵外缘装有供采样密封用的高 5 cm、长和宽均为 25 cm 的水槽。为了采样方便,每个盆栽盆中间安装 1 根小 PVC 管,管内径 2.5 cm,长 6 cm,露出盆口 2.5 cm,播种时,将种子播种在管内约 2 cm 深的土壤中,这样采集的土壤呼吸就只有地下呼吸,而不包含植物地上部分的呼吸。盆栽试验在盆栽网室中进行,共使用 9 个盆钵,每盆装过 5 mm 筛的风干土 4.0 kg ,每 kg 土施用 150 mg N、75 mg P 和 150 mg K 作底肥,分别以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KH_2PO_4 和 K_2SO_4 为肥

源。留 3 盆不种植物作对照,其余 6 盆于 2003 年 4 月 30 日每盆播种玉米种子 2 颗,5 月 5 日出苗,出苗后每盆保留长势一致的苗 1 株。为了使各盆水分一致,在盆底边缘开了直径 2cm 的圆孔,塞上海绵,将栽培盆放在内径 19cm,高 5cm 的陶瓷盆中,然后将陶土盆中装满水,这样通过毛管作用,使得每盆能够维持一致的土壤含水量。试验盆钵及土壤呼吸采样装置见图 1。试验盆钵放在可移动的试验车上,雨天推进玻璃房中防止雨水影响,非雨天则放在露天网室下自然生长。

当玉米生长至喇叭期时(6 月 21 日,出苗后 47d)将其中 3 盆玉米植株用套有双层黑布的圆柱形铁丝架进行连续 3 昼夜的遮光处理,然后分别对遮光和不遮光的处理用碱吸收法采集土壤呼吸样,并测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 值。采完土壤呼吸样品后,将遮光处理的玉米收获,按地上和地下部分分开。

在玉米开花期(7 月 2 日,出苗后 59d)和成熟期(7 月 23 日,出苗后 80d),分别用碱吸收法采集昼夜土壤呼吸、白天土壤呼吸、夜间土壤呼吸样品,并测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

1.2.2 样品制备

在 30 ml 玻璃采样皿中加入 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 15 ml,放入盆钵中的土壤表面后,立即盖上采样箱。采样箱为高 6 cm、长和宽均为 20.5 cm 下端开口的长方体,水槽中加水,隔离管与采样箱的交接处用硅胶密封(图 1)。一昼夜后揭开箱子,取出采样皿,盖上盖子带回室内,加入 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ BaCl}_2$ 溶液,转移入离心管中离心后倒掉上清液,再加入无气水摇匀离心,如此反复洗涤 3~4 次后,将离心管中沉淀在 50~60℃ 烘箱中烘干,冷却后将沉淀用玻璃棒碾细,转移于小玻璃瓶中,放进烘箱在 105℃ 下烘干 6h,在干燥器中冷却后将玻璃瓶密封盖紧,保存于干燥器备用。白天和晚上分开的采样则采集 2 昼夜,将 2 个晚上和 2 个白天的吸收液分别合在一起,然后用氯化钡沉淀、离心、洗涤、烘干等。

1.2.3 样品分析方法

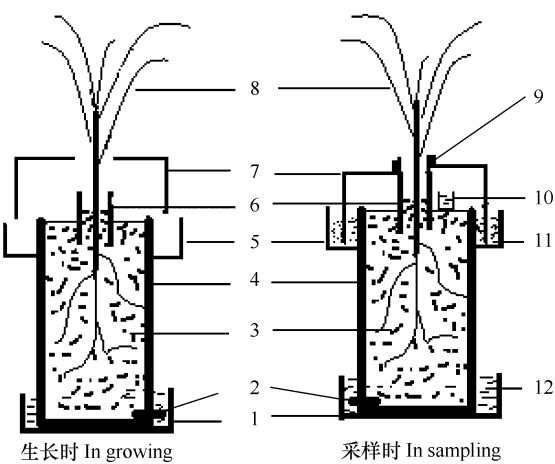
土壤碳、氮含量用美国 PE 公司的 PIE2400-II 碳氢氮氧硫分析仪测定,土壤颗粒组成用 LS-230 激光粒度仪测定,土壤 pH 用精密酸度计测定。

$\delta^{13}\text{C}$ 值用美国生产的 Delta Plus MAT253 型同位素质谱仪测定,土壤呼吸样品用优级纯无水磷酸反应产生 CO_2 ,将产生的 CO_2 用液氮冷却系统转移到仪器专用的气体收集瓶中,然后在质谱仪上测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

2 结果与分析

2.1 玉米生长时期对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

由图 2 可见,种植玉米土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著大于裸土的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。在玉米生长下,土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 随玉米生长时期而变化,不同时期土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -14.57‰ ~ -12.30‰ 之间,而在裸土中,土壤呼吸的



- 1 陶瓷钵 Pottery pot
- 2 孔及海绵 The hole and the sponge
- 3 土壤 Soil
- 4 试验盆钵 Experimental pot
- 5 水槽 Trough
- 6 隔离管 Tube for isolating plant and soil
- 7 采样箱 Sampling chamber
- 8 玉米植株 Maize plant
- 9 硅胶 Silicone gel to seal the joint
- 10 玻璃采样皿及减液 Glass utensil and the solution of NaOH
- 11 密封水 Water for sealing
- 12 供应给土壤和植物的水 Water supplying for soil and plant

图 1 试验盆钵与采样装置图

Fig. 1 The scheme of pot and sampling

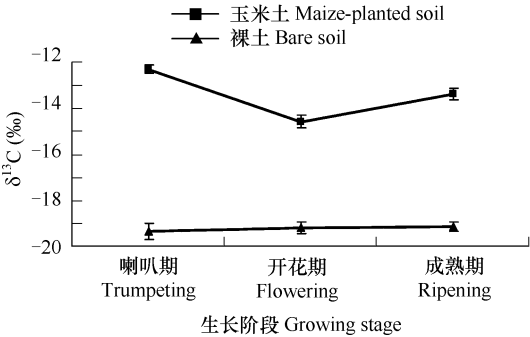


图 2 生长时期对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

Fig. 2 The effects of growth periods on $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration

$\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-19.34\text{‰} \sim -19.13\text{‰}$ 之间。

图2还表明,在种植玉米条件下,玉米生长时期显著影响土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,在所测定的3个生长时期里,喇叭期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高,成熟期次之,开花期最小,不同生长时期之间的差异可达 2.3‰ 。在不种植物的条件下,不同时间采样的土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著。

2.2 植物光合作用对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

为了认识光合作用对土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响,在喇叭期对玉米植株进行了3昼夜遮光处理,然后进行了土壤呼吸采样,在开花期和成熟期分别进行了白天(7:00~19:00)和夜间(19:00~7:00)分开土壤呼吸的采样。

图3可见,玉米植株遮光处理后,土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著下降,遮光与不遮光处理的土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值之差达到 2.85‰ 。

图4表明,无论是开花期还是成熟期,土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都是白天显著高于夜间。在开花期土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的昼夜之差达 1.36‰ ,在成熟期为 2.11‰ 。白天土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为成熟期大于开花期,而两个时期夜间的土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不显著。

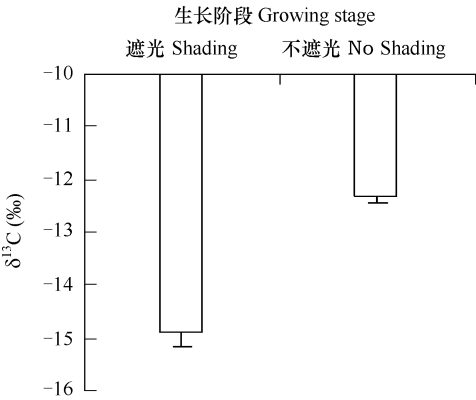


图3 植株遮光对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

Fig. 3 The effect of shading plant on $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration

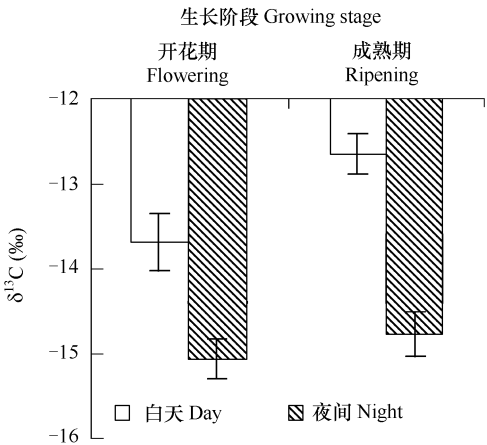


图4 白天和夜间土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Fig. 4 $\delta^{13}\text{C}$ in soil respiration during day-time and night-time

3 讨论

$\delta^{13}\text{C}$ 法相当于一种自然而均匀的同位素标记方法,因其无放射性危害,并能进行长期标记,能够用于研究不同植物来源的土壤有机质的比例,既能研究土壤有机质总体的动态状况,也可以研究不同颗粒大小或密度部分有机质的动态变化,还可以研究不同农业措施以及不同环境条件对土壤有机质动态的影响,所以近年来得到越来越广泛的应用^[11]。本试验通过测定植物生长中土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化来研究玉米生长和光合作用对土壤呼吸的影响。

3.1 植物生长对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

玉米生长下的土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于裸土土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,说明玉米生长显著影响着土壤呼吸,在植物生长期间,土壤呼吸由植物生长控制。在植物-土壤系统中,土壤呼吸实际上由植物输入地下光合产物的呼吸和土壤原有机质的呼吸两部分构成,因此植物生长中土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化来自于植物输入土壤光合产物的呼吸。在种植玉米下,喇叭期土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高,开花期最低,成熟期介于喇叭期和开花期之间,表明在植物生长期间土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有季节变化,这种变化趋势与Fu等^[12]的盆栽试验和有关田间试验结果^[13,14]基本一致。这说明运用 $\delta^{13}\text{C}$ 法研究植物生长的土壤呼吸动态是有效可行的。喇叭期是玉米营养生长的最旺盛期,植物生长旺盛,为了从土壤获取营养物质和水分,根系呼吸也强。因为植物根系吸收养分

和水分所需要的能量由根系呼吸提供。植物分配到地下的碳,有 10% ~ 15% 被根呼吸产生代谢能量用于生长、营养获取与运输过程^[9]。开花期是营养生长向生殖生长转移的时期,土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低,一方面是由于输入土壤的光合产物的减少,从而使根际呼吸下降。一般来说,植物营养生长期的同化产物输入土壤较多,而生殖生长期输入土壤的同化产物较少。Gregory 和 Atwell^[15]研究表明,小麦和大麦分蘖期输入土壤的同化产物占植物净同化产物的 33% ~ 55%,而鼓粒期输入土壤的同化产物不到净同化产物的 10%。Meharg 和 Killham^[16]对实验室和田间生长的黑麦草进行¹⁴C 示踪研究发现,在实验室条件下,黑麦草播种后 23 ~ 51d 内输入地下碳的比例为净同化碳的 20% ~ 28%,而在播种后 65d 则为 8.1%;田间生长条件下,播种后 4、16、24 周,输入地下碳的比例分别为净同化碳的 67.1%、37.7%、13.8%。另一方面则是根系活性下降会导致根系呼吸降低所致。因为植物根系生长也具有生长大周期,经历停滞期、对数生长期、直线生长期和衰老期^[17]。根系呼吸是根系活性的反映,对黑云杉研究表明,在生长季节,根系对土壤呼吸的贡献先随生长增加,到一定时期达到最高,然后又下降,到生长末期最低^[18]。玉米根系生长快于地上部分生长,到拔节期时,根系就基本形成^[19],有研究表明,玉米根系在出苗后约 50d 左右就开始衰老^[20],衰老的根系必然会导致根系活性的下降。本试验开花期采样是在玉米出苗后 59d,正处于玉米根系活性下降的时期。根系呼吸占土壤呼吸很大的比例^[21],而且变化范围大,随生态系统、测定方法和生长阶段的不同而异。如苔原生态系统中为 50% ~ 93%,温带森林为 40% ~ 50%,草地为 17% ~ 60%^[22]。用成分综合法测定的根系呼吸占土壤呼吸的比例变化范围为 20% ~ 80%,用根去除法测定的大多在 40% ~ 70%^[23],用同位素标记法测得的农田生态系统为 75% ~ 90%^[24]。在寒温带落叶林下,根系呼吸占土壤呼吸的比例随生长季节的变化范围为 27% ~ 71%^[25]。因此根系活性的下降就会使土壤呼吸下降,进而导致土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降。成熟期土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加,主要是部分衰老死亡的根系开始腐烂分解而造成的。成熟期采样是在玉米出苗后 80d,自然会有部分衰老的根系脱落死亡而腐烂分解,如大豆生长后期土壤 N_2O 排放显著增加的主要原因就是根系的腐烂分解^[26]。衰老根系的腐烂分解释放出 CO_2 ,使得根际呼吸所占的比例相对增加,从而导致成熟期土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加。

3.2 光合作用对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

在玉米生长土壤中,白天土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于夜间,植株遮光处理后,土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著降低都说明了光合作用与土壤呼吸有直接的联系。由于开花期和成熟期夜间土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著差异,而白天的土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著,说明白天光合强度的差异是玉米不同生长时期土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生差异的主要原因,同时也表明根际呼吸主要受植物新近合成同化产物所控制。用¹⁴C 同位素标记法研究收割黑麦草对碳分配的影响表明,收割后根际呼吸释放的 CO_2 有 80% 来源于黑麦草在收割后所同化的产物^[27]。Craine 等^[28]等研究发现,草地遮光 2d,土壤 CO_2 排放减少 40%,Kuzakov 和 Cheng^[29]将夜间长度延长到 36h 和 84h,土壤总呼吸减少 39% 和 68%,在 12、36h 和 84h 的夜间长度下,根际呼吸对土壤呼吸的贡献分别为 82%、68% 和 56%。Johansson^[30]也表明光合作用阻断后,土壤呼吸迅速下降,Werenbourg 和 Eaterlich^[31]证实植物新近同化产物可以迅速被根系和微生物利用,Illeris 等^[32]表明大部分地下呼吸来自于新近同化产物的转化,Ekblad and Högborg^[33]计算得到新近光合产物至少占总土壤呼吸的 65%。用¹⁴C 标记黑麦草后 1h 内就能检测到土壤开始排放¹⁴ CO_2 ^[34],对冬小麦和黑麦草的标记试验发现,在标记后 30min 内土壤就开始排放¹⁴ CO_2 ^[35],标记 4h 后,苔原植物在所有碳汇中都发现有显著数量的¹⁴C^[36],这些结果充分证明植物对 CO_2 的同化和同化产物的向下输送是一个非常迅速的过程,同化产物向根系的输送的速度大约为 100 cm/h^[37]。

总之,玉米生长改变了土壤呼吸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,在玉米生长下,土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值随玉米生长时期不同而不同;光合作用对土壤呼吸 $\delta^{13}\text{C}$ 值的显著影响反映了根际呼吸主要来源于植物新近的同化产物。

References :

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48 : 7 - 20.
- [2] Domanski G, Kuzakov Y, Siniakina S V, et al. Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*). *J Plant Nutr Soil Sci*, 2001, 164 :

381—387.

- [3] Cheng W, Coleman D C, Carroll C R, *et al.* Investigating short-term carbon flows the rhizospheres of different plant species, using isotopic tracing. *Agron J*, 1994, 86 :782—788.
- [4] Cheng W. Measurement of rhizosphere respiration and organic matter decomposition using natural ^{13}C . *Plant and Soil*, 1996, 183 :263—268.
- [5] Andrews J A, Matamala R, Westover K M, *et al.* Temperature effects on the diversity of soil heterotrophs and the $\delta^{13}\text{C}$ of soil-respired CO_2 . *Soil Biol & Biochem*, 2000, 32 :699—706.
- [6] Kristiansen S M, Brandt M, Hansen E M, *et al.*, Christensen B T. ^{13}C signature of CO_2 evolved from incubated maize-derived sheep faces. *Soil Biol & Biochem*, 2004, 36 :99—105.
- [7] Balesdent J, Mariotti A, Guillet B. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol & Biochem*, 1987, 19 :25—30.
- [8] Nyberg G, Ekblad A, Buresh R, *et al.* Respiration from C_3 plant green manure added to a C_4 carbon dominated soil. *Plant and Soil*, 2000, 218 :83—89.
- [9] Kuzyakov Y. Review :Factors affecting rhizosphere priming effects. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2002, 165 :382—396.
- [10] Saggat S, Hedley C, Mackay A D. Partitioning and translocation of photosynthetically fixed ^{14}C in grazed hill pastures. *Biol Fertil Soils*, 1997, 25 :152—158.
- [11] Dou S, Zhang J J. Introduction of a method for studying turnover of soil organic matter. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2001, 23 (2) :64—67.
- [12] Fu S, Cheng W, Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology :A greenhouse pot experiment. *Plant and Soil*, 2002, 239 :133—140.
- [13] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, 61 :466—474.
- [14] Rochette P, Flanagan L B, Gregorich E G. Separating soil respiration into plant and soil components using analyses of the natural abundance of carbon-13. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63 :1207—1213.
- [15] Gregory P J, Atwell B J. The fate of carbon in pulse-labelled crops of barley and wheat. *Plant and Soil*, 1991, 136 :205—213.
- [16] Meharg A A, Killham K. Carbon distribution within the plant and rhizosphere in laboratory and field-grown *Lolium perenne* at different stages of development. *Soil Biol & Biochem*, 1990, 22 :471—477.
- [17] Pan R C. *Plant Physiology* (Fifth edition). Beijing :Higher Education Press, 2004. 229—230.
- [18] Bond-Lamberty B, Wang C, Gower S T. Contribution of root respiration to soil surface CO_2 flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiology*, 2004, 24 :1387—1395.
- [19] Wang W J. *Crop Cultivation*. Beijing :Scientific Technology and Literature Press, 1998. 165.
- [20] Chen X L, Zhang J H. The investigation on senescences of leaves and roots in maize. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 1994, 11 (1) :17—20.
- [21] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Biol & Biochem*, 1998, 30 :961—968.
- [22] Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration. *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (7) :778—785.
- [23] Cheng S Y, Zhang X Z. A review on differential methods for root and soil microbial contributions to total soil respiration. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18 (4) :597—602.
- [24] Swinnen J, Van Veen J A, Merckx R. ^{14}C pulse-labelling of field-grown spring wheat : An evaluation of its use in rhizosphere carbon budget estimations. *Soil Biol & Biochem*, 1994, 26 :161—170.
- [25] Lee M, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil*, 2003, 255 :311—318.
- [26] Yang L, Cai Z. The effect of growing soybean (*Glycine max.* L.) on N_2O emission from soil. *Soil Biol & Biochem*, 2005, 37 :1205—1209.
- [27] Kuzyakov Y, Biryukova O V, Kuznetzava T V, *et al.* Carbon partitioning in plant and soil, carbon dioxide fluxes and enzyme activities as affected by cutting ryegrass, *Biol Fertil Soils*, 2002, 35 :348—358.
- [28] Craine J M, Wedin D A, Chapin F S. Predominance of ecophysiological controls on soil CO_2 flux in a Minnesota grassland. *Plant and Soil*, 1999, 207 :77—86.
- [29] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of CO_2 efflux from maize rhizosphere. *Plant and Soil*, 2004, 263 :85—99.
- [30] Johansson G. Carbon distribution in grass (*Festuca pratensis* L.) during regrowth after cutting-utilization of stored and newly assimilated carbon. *Plant and Soil*, 1993, 151 :11—20.

[31] Warembourg F R , Esterlrich H D. Plant phenology and soil fertility effects on below-ground carbon allocation for an annual (*Bromus madritensis*) and a perennial (*Bromus erectus*) grass species. *Soil Biol & Biochem* ,2001 ,33 :1291 — 1303.

[32] Illeris L , Michelsen A , Jonasson S. Soil plus root respiration and microbial biomass following water , nitrogen , and phosphorus application at a high arctic semi desert. *Biogeochemistry* ,2003 ,85 :15 — 29.

[33] Ekblad A , Högberb P. Nature abundance of ¹³C in CO₂ respired from forest soils reveals speed of link between tree photosynthesis and root respiration. *Oecologia* ,2001 ,127 :305 — 308.

[34] Kuzyakov Y , Kretschmar A , Stahr K. Contribution of *Lolium perenne* rhizodeposition to carbon turnover of pasture soil. *Plant and Soil* ,1999 ,213 :127 — 136.

[35] Cheng W , Coleman D C , Carroll C R , *et al.* In situ measurement of root respiration and soluble C concentrations in the rhizosphere. *Soil Biol & Biochem* ,1993 ,25 (9) :1189 — 1196.

[36] Olsrud M , Christensen T R. Carbon cycling in subarctic tundra ;seasonal variation in ecosystem partitioning based on in situ ¹⁴C pulse-labelling. *Soil Biol & Biochem* ,2004 ,36 :245 — 253.

[37] Kuzyakov Y , Ehrensberger H , Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Loliun perenne*. *Soil Biol & Biochem* ,2001 ,33 :61 — 67.

参考文献：

[11] 窦森,张晋京. 用 δ¹³值研究土壤有机质周转的方法及其评价, *吉林农业大学学报* ,2001 ,23 (2) :64 ~67.

[17] 潘瑞炽. 植物生理学 (第5版). 北京:高等教育出版社,2004. 229 ~230.

[19] 王维金. 作物栽培学. 北京:科学技术文献出版社,1998. 165.

[20] 陈学留,张建华. 玉米根系生长和叶片衰老的相关观察. *莱阳农学院学报* ,1994 ,11 (1) :17 ~20.

[22] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要因素的研究进展. *地球科学进展* ,2005 ,20 (7) :778 ~785.

[23] 程慎玉,张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用. *地球科学进展* ,2003 ,18 (4) :597 ~602.