

# 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献

蔡 艳<sup>1,2</sup>, 丁维新<sup>1,\*</sup>, 蔡祖聪<sup>1</sup>

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**用特殊设计的气体采集箱法对玉米生长期间潮土呼吸强度进行了测定。结果表明, 施用 150 kg N hm<sup>-2</sup> 的裸地土壤 CO<sub>2</sub> 累积排放量是 294 g C m<sup>-2</sup>, 约为种植玉米土壤的一半。用根去除法测得的玉米对土壤呼吸的贡献率, 苗期小于 20%, 拔节到收获期波动在 30% ~ 70% 之间, 全生长期平均为 46%。玉米生长期因土壤有机碳分解而释放出的 CO<sub>2</sub> 总量为 2.94 Mg C hm<sup>-2</sup>, 大约是 0 ~ 40cm 土层中土壤有机碳总储存量的 8%, 因此需要输入 7.35Mg hm<sup>-2</sup> 的碳含量 40% 的作物残留物才能平衡土壤中有机碳的损失, 约为玉米收获时残留于土壤中根量的一倍, 但与残留根量及玉米生长期间根系分泌到土壤的有机物量的总和相当, 因此土壤中有机碳总体处于平衡状态。在玉米生长期间, 施用氮肥可使土壤 CO<sub>2</sub> 排放量降低 10%。土壤排放 CO<sub>2</sub> 主要受土壤温度的影响, 温度效应  $Q_{10}$  为 1.90 ~ 2.88。

**关键词:**土壤呼吸; 根际呼吸; 温度; 玉米; 贡献率

文章编号: 1000-0933(2006)12-4273-08 中图分类号: S154,X16 文献标识码: A

## Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration

CAI Yan<sup>1,2</sup>, DING Wei-Xin<sup>1,\*</sup>, CAI Zuci Cong<sup>1</sup> (1. State Key laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (12): 4273 ~ 4280.

**Abstract:** To evaluate soil CO<sub>2</sub> emission and relative contribution of rhizospheric and soil respiration during the maize growing season, a field experiment was carried out in Fengqiu State Key Agro-Ecological Experimental Station, Henan Province, China in 2004. The experiment included four treatments: bare soil fertilized with 150 kg N hm<sup>-2</sup> and maize-cropped soil amended with 0, 150, and 250 kg N hm<sup>-2</sup>. The cumulative amount of CO<sub>2</sub> emission in the bare soil fertilized with 150 kg N hm<sup>-2</sup> was 294 g C m<sup>-2</sup>, about half of that from the soil fertilized with 150 kg N hm<sup>-2</sup> and planted. The mean ratio of rhizospheric respiration to total soil CO<sub>2</sub> emission measured by root exclusion method was 46%, but was below 20% at the seedling stage and fluctuated between 30% and 70% at the other stages. Total amount of CO<sub>2</sub> released from soil organic matter during the maize growing season reached 2.94 Mg C hm<sup>-2</sup>, equivalent to 8% of the total carbon content in surface soil (0 ~ 40 cm). Our estimates indicated that 7.35 Mg hm<sup>-2</sup> plant residue with 40% carbon content was needed to supplement carbon loss as CO<sub>2</sub>, which was twice the magnitude of maize root biomass left in soil after harvest, but equaled to the amount of maize root biomass and root exudates. The application magnitude of N fertilizer did not affect soil CO<sub>2</sub> emission. However, N addition strongly reduced soil CO<sub>2</sub> emission in tested soil compared to treatments without N application. Soil CO<sub>2</sub> emission was mainly affected by soil temperature rather than soil moisture with  $Q_{10}$  of 1.90 ~ 2.88.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(40331014);国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2005CB121101);中国科学院百人计划资助项目

**收稿日期:**2005-08-20; **修订日期:**2006-03-16

**作者简介:**蔡艳(1982~), 女, 江苏盐城人, 硕士生, 主要从事农田土壤 C、N 等元素循环研究. E-mail: ycai@issas.ac.cn

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxding@mail.issas.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40331014), National Key Basic Research Development Foundation of China (No. 2005CB121101) and Hundred Talents Program of CAS

**Received date:** 2005-08-20; **Accepted date:** 2006-03-16

**Biography:** CAI Yan, Master candidate, mainly engaged in C and N cycling of agricultural soil. E-mail: ycai@issas.ac.cn

**Key words:** soil respiration; rhizospheric respiration; temperature; soil moisture; maize; the ratio of rhizospheric respiration to soil respiration

土壤是一个巨大的碳库,总储存量达到 $1394 \text{ Pg C}$ ( $1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$ )<sup>[1, 2]</sup>,大约是大气中碳总量( $750 \text{ Pg C}$ )的两倍,陆地生物碳总储量( $560 \text{ Pg C}$ )的3倍<sup>[3, 4]</sup>。其中森林土壤中的碳贮量占全球土壤碳库的73%<sup>[4]</sup>,在全球14亿hm<sup>2</sup>农田中,地上生物体中碳的储存总量不足地球生态系统碳总量的1%<sup>[5]</sup>,而农业土壤中碳的储量则达到 $142 \text{ Pg C}$ <sup>[6]</sup>。全球每年从土壤中释放出来的CO<sub>2</sub>为 $68 \text{ Pg C}$ ,仅次于全球植物总初级生产力(GPP: $100 \sim 120 \text{ Pg C a}^{-1}$ ),略高于全球陆地生态系统净初级生产力(NPP: $50 \sim 60 \text{ Pg C a}^{-1}$ )<sup>[7]</sup>,远远高于每年因燃料燃烧而释放进入大气的CO<sub>2</sub>量( $5.2 \text{ PgC}$ )<sup>[8]</sup>。显然,土壤呼吸是大气CO<sub>2</sub>的主要贡献者之一,也是陆地生态系统固定碳返回大气的主要形式之一<sup>[9, 10]</sup>。调控土壤有机碳以CO<sub>2</sub>的方式进入大气的数量,不仅可以减缓大气中CO<sub>2</sub>浓度升高,而且可以改善土壤肥力。因此,精确测定陆地生态系统土壤呼吸及其组分对土壤呼吸的贡献率,对于揭示大气“失踪的碳”产生的原因以及寻找减缓土壤有机碳分解的对策和措施具有重要的指导意义。

已有研究表明,根际呼吸(包括根系呼吸和根系分泌物进入土壤后诱发的微生物呼吸)占植物光合作用同化碳量的10%~40%<sup>[11]</sup>,而根际呼吸并不是土壤本身碳的损失,在研究碳平衡时必须将它从土壤总的CO<sub>2</sub>排放量中扣除<sup>[12]</sup>。植物光合作用固定的碳中,20%以根沉析的形态进入根际,其中又有25%~50%以CO<sub>2</sub>的形式直接返回大气<sup>[13]</sup>。对世界范围内各种陆地植物群落的研究表明,根系呼吸量占土壤总呼吸量的比例一般在30%~70%之间<sup>[7, 14]</sup>。

近年来,对土壤-植物系统中土壤呼吸的研究更多见于森林和草原生态系统,而农田生态系统CO<sub>2</sub>排放的研究则鲜见报道<sup>[15]</sup>。主要是因为无法有效地区分根系呼吸和土壤微生物呼吸。目前,区分土壤根系呼吸与微生物呼吸的方法尚处于探索阶段,最常用的方法是同位素示踪法和根去除法。从现有研究结果来看,两种方法具有很强的可比性<sup>[16]</sup>。为此,用根去除法对玉米生长期土壤呼吸作用进行了田间原位测定,期望初步了解农田生态系统土壤呼吸强度、各组分的相对贡献率以及土壤有机碳的平衡状况。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

田间试验位于河南省封丘县的中国科学院封丘农业生态实验站,采用夏玉米-冬小麦轮作的旱作形式。该区域位于北纬35°00',东经114°24',是华北平原的典型代表区,属于半干旱半湿润的暖温带季风气候。30a的年均气温为13.9℃,月均最低温度出现在1月份,为-1.0℃,最高气温则是27.2℃,出现在7月份。年均降水量615mm,其中2/3集中在夏季的6~9月份。供试土壤为黄河冲积物发育而成的潮土,土壤质地为砂壤土。2004年6月试验开始前土壤的基本理化性质为:有机碳 $7.28 \text{ g C kg}^{-1}$ 、全N $0.57 \text{ g N kg}^{-1}$ 、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> $10.27 \text{ mg N kg}^{-1}$ 、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> $0.81 \text{ mg N kg}^{-1}$ 和pH8.65。

### 1.2 试验设计

试验设4个处理:不种植玉米但施用氮肥 $150 \text{ kg N hm}^{-2}$ 的对照(CK);种植玉米同时施用氮肥量分别为0(N0)、 $150 \text{ (N150)}$ 和 $250 \text{ kg N hm}^{-2}$ (N250),每个处理重复3次。小区面积为 $4 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ ,随机区组排列。尿素分两次施入,基肥和追肥的比例为4:6。磷肥( $75 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ hm}^{-2}$ )和钾肥( $150 \text{ kg K}_2\text{O} \text{ hm}^{-2}$ )用作基肥于2004年6月7日全部施入,然后翻耕土壤。追肥于7月27日施用,为减少碱性土壤的氨挥发损失,追肥后立即灌水,把氮肥带入土壤。2004年6月8日点播玉米,品种为郑单958,行距和株距分别为70cm和30cm。在采样区域,先根据玉米行株距埋设带U水槽的气体采集箱底座(长70cm,宽30cm,高10cm),埋没深度为5cm。然后在底座的中心把高为10cm、下半部外径10cm和上半部内径10cm的圆柱形PVC(polyvinyl chloride)筒插入土壤5cm,为减少插入阻力,PVC筒底部边缘削成斜面。把3粒玉米种子放入PVC筒中,覆盖土壤。播种后均匀喷洒除草剂,并在玉米生长期,及时拔除杂草。14d后苗,在PVC筒中保留一株玉米,每公顷玉米种植密度约为48000株。2004年9月20日收获玉米。

### 1.3 CO<sub>2</sub> 采集和测定

土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量采用静态箱法测定。把 PVC 圆管(高 35 cm,外径 10 cm)插入先前埋设的 PVC 圆筒,两者之间的接触界面涂上硅胶以防漏气,同时在 PVC 圆管上部与采样箱接触处贴上橡胶封垫,增强采样箱的密封度,再把不锈钢采样箱放入装有水的采集箱底座(图 1)。顶箱由两个通过铰链粘合的半箱组成,两半箱接口之间粘有橡胶封垫。箱体外部覆盖泡沫塑料,降低太阳辐射对箱内温度的影响。箱内配置一个蓄电池驱动的电扇,以保持采集气体的均一性。箱顶开有两孔,一个插入水银温度计,测量箱内温度,另一个用于气体采集。当气体采集箱密闭后,立即用注射器通过采气孔采集气体,并注入预先抽真空的真空瓶,然后在 30min 内每隔 10min 采气一次,共获得 4 个样品,气体采集完毕后移去采气箱和 PVC 圆管,以免影响玉米生长和采样区域气体流通。但当玉米高度达到 45cm 左右时,用胶把 PVC 圆管与 PVC 圆筒固定,以减少采样箱布设时间。

土壤中水分含量用 TDR (time domain reflectometry) 直接测定,并用下列公式换算成 WFPS(water-filled pore space) :

$$\text{WFPS} (\%) = [(\text{重量含水量} (\%) \times \text{土壤容重} (\text{g cm}^{-3})) / \text{土壤孔隙度} (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})] \times 100$$

$$\text{土壤孔隙度} = [1 - (\text{土壤容重} (\text{g cm}^{-3}) / 2.65 (\text{g cm}^{-3}))] \text{ (假定土壤颗粒密度为 2.65)}$$

土壤 5、10cm 和 15cm 的温度用电子数字温度计(Model 2455, Yokogawa, 日本产)直接测定。气体采样频率为每星期两次,降雨或农事后增加测定次数。采样时间固定在 9:00~12:00,并分区组进行,以减少土壤呼吸日变化的影响。

气体样品中 CO<sub>2</sub> 浓度用带热导检测器(TCD)的岛津气相色谱分析仪(Shimadzu GC-14B)测定,高纯氢(99.999%)做载气,通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体中 CO<sub>2</sub> 的浓度。CO<sub>2</sub> 排放通量的计算公式为:

$$F = \times V/A \times C/t \times 273/(273 + T)$$

式中, F 为 CO<sub>2</sub> 排放通量 (mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), 为标准状态下 CO<sub>2</sub>-C 密度 (0.536 kg m<sup>-3</sup>) ; V 是采集箱内有效空间体积 (m<sup>3</sup>) ; A 为采集箱覆盖的土壤面积 (m<sup>2</sup>) ; C 为气体浓度差; t 为采样间隔时间 (h) ; T 为测定时箱内温度 ( )。

土壤累积 CO<sub>2</sub> 量的计算:

$$M = [(F_{i+1} + F_i)/2(t_{i+1} - t_i) \times 24]$$

式中, M 为土壤累积 CO<sub>2</sub> 量, F 是 CO<sub>2</sub> 排放通量, i 代表采样次数, t 为采样时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 CO<sub>2</sub> 排放通量的动态变化

玉米生长期不同处理 CO<sub>2</sub> 排放通量的动态变化如图 2。不种玉米的对照处理 CO<sub>2</sub> 排放通量在整个试验过程中呈波动式递减,这是由于翻耕对土壤产生强烈扰动,促进了土壤有机质的分解,在前期释放较多的 CO<sub>2</sub>,但随着时间的推移,可供分解的土壤活性有机碳不断减少,导致 CO<sub>2</sub> 排放通量逐步降低<sup>[17, 18]</sup>。相反,在玉米存在的情况下,土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量随着玉米地上部分生物量增加而提高,在拔节-灌浆期达到最大值,然

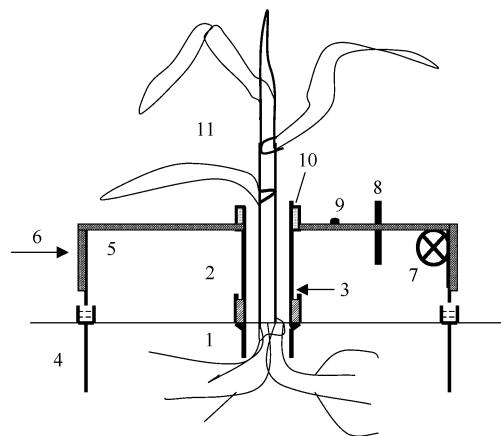


图 1 玉米生长期间 CO<sub>2</sub> 气体采集装置(70cm ×30cm ×30cm)

Fig. 1 Schematic diagram of gas sampling chamber

1. PVC 圆筒 PVC tube ;2. PVC 圆管 PVC pipe ;3. 硅胶 Silicon grease ;4. 不锈钢底座 Stainless steel chamber base ;5. 不锈钢采样箱 Stainless steel chamber ;6. 泡沫塑料 Plastic foam ;7. 风扇 Fan ;8. 温度计 Mercury thermometer ;9. 硅橡胶塞 Silicon septum ;10. 橡胶封垫 Rubber seal ;11. 玉米 Maize

后下降。

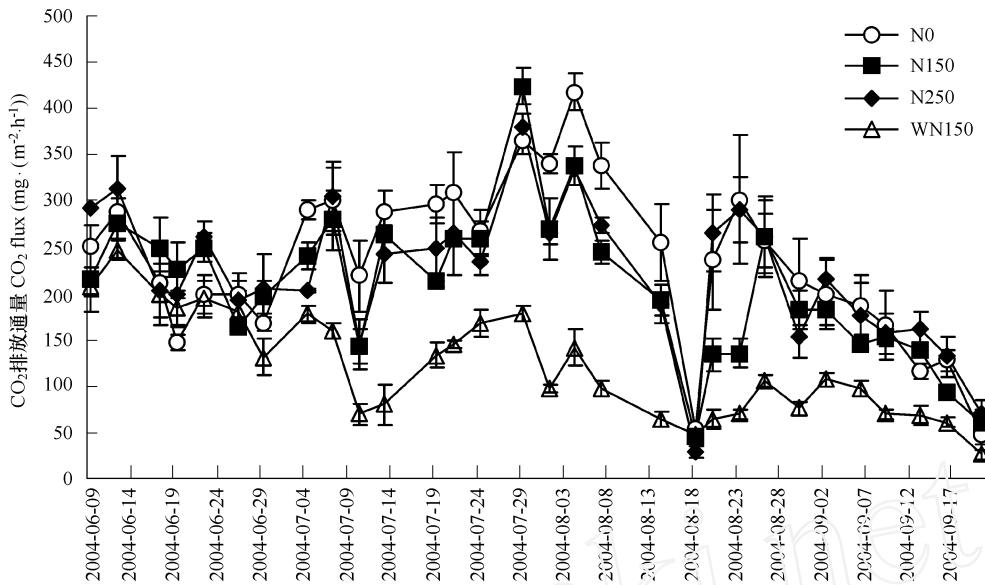


图2 玉米生长期间CO<sub>2</sub>排放的季节性变化

Fig. 2 Temporal variation of CO<sub>2</sub> flux during the maize growing season

CK处理CO<sub>2</sub>排放通量平均仅为106 mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,显著低于其它处理(图3),这种显著差异主要是由拔节到收获期的CO<sub>2</sub>平均排放通量的显著不同而引起,播种-拔节期各处理之间差异不明显。可见,作物根系的存在极大地提高了土壤CO<sub>2</sub>排放强度。用两次间隔测定的CO<sub>2</sub>排放通量平均值与间隔时间相乘获得的累计CO<sub>2</sub>排放量,CK、N0、N150和N250处理分别为294、598、541、539 g C hm<sup>-2</sup>(表1)。很显然,氮肥用量不同未对土壤CO<sub>2</sub>排放总量产生明显的影响。相反,不施氮肥的N0处理累计CO<sub>2</sub>排放量与施用氮肥的处理相比,则提高了10%左右,表明氮肥施用在供试土壤上可以降低CO<sub>2</sub>排放。表2的结果表明,不施用氮肥稍微而非显著地降低玉米地上部分的生物量,但强烈地影响籽粒的形成,同时显著地降低了地上部分生物体中氮的含量。因此推测CO<sub>2</sub>排放的差异可能是由于当土壤有效态氮供应不足时,植物就会转移更多的光合作用产物到地下用于(1)形成更多的根系特别是细根,增加根系与土壤的接触面积,以获取更多的氮素<sup>[19, 20]</sup>,从而提高了根量和根际呼吸量;(2)促进土壤微生物生长和繁殖,用于分解更多的土壤有机质,释放更多土壤氮供植物吸收利用<sup>[21]</sup>,从而增加了土壤有机质中碳的分解和释放;(3)根系吸收养分的消耗,因为土壤吸收养分是一个主动的过程<sup>[18]</sup>,而在胁迫条件下,植物需要花费更多的能量用于养分的吸收,从而加大了根系呼吸强度<sup>[22]</sup>。

## 2.2 水分和温度对CO<sub>2</sub>排放的影响

土壤呼吸与水分和温度密切相关。Linn和Doran<sup>[23]</sup>发现土壤水分含量60%WFPS时,呼吸作用最强。本研究田间测定的土壤含水量变动在20%~74%。

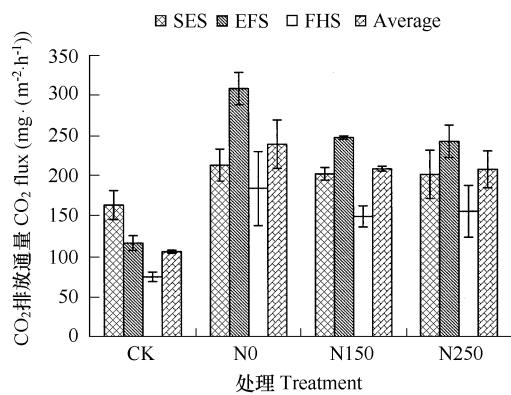


图3 不同生育期和整个玉米生长期各处理的平均CO<sub>2</sub>排放通量

Fig. 3 Mean CO<sub>2</sub> flux at the different stages and during the whole growing season

SES:播种—拔节开始(From June 9 to July 13) The period from the sowing to the beginning of the elongation stage; EFS:拔节—灌浆开始(From July 13 to August 18) The period from the elongation stage to the beginning of the filling stage; FHS:灌浆—收获(From August 18 to September 20) The period from the filling stage to the harvest; Average:全生育期 The whole growing season. 图中误差线为标准误 Bars are standard error

之间(图4),但没有发现与CO<sub>2</sub>排放之间存在显著关系(表3),与Miernick和Dugas<sup>[24]</sup>和Rochette等<sup>[25]</sup>的研究结果相似。Hall等<sup>[26]</sup>发现,只有土壤水分含量处于胁迫状态时才抑制土壤呼吸,因此可能的解释是在玉米生长期,土壤水分含量多数时间接近土壤呼吸的最佳状态<sup>[25]</sup>,水分对土壤呼吸的影响未能充分表现出来。与水分的作用相反,发现土壤温度强烈地影响着CO<sub>2</sub>的排放,两者存在着显著的指数关系,与Hall等<sup>[26]</sup>的观察结果相同,温度可以解释20%~36%的CO<sub>2</sub>排放通量的季节变化(表3)。依据CO<sub>2</sub>排放通量和温度之间的关系方程,计算获得的温度效应系数Q<sub>10</sub>为1.90~2.88,与Raich和Schlesinger<sup>[7]</sup>及Davidson等<sup>[27]</sup>的测定值2.0~3.9相一致。

表1 玉米不同生育期和全生长期CO<sub>2</sub>累积排放量(g C m<sup>-2</sup>)Table 1 Amount of cumulative CO<sub>2</sub>(g C m<sup>-2</sup>) at the different growth stage and during the whole growth season

生育期 Period	SES	EFS	FHS	WGS	增加 Increase (%)
CK	130 ±14bA	106 ±7bA	59 ±5aA	294 ±27A	
N0	173 ±13aA	283 ±30bC	142 ±33aB	598 ±73B	—
N150	183 ±5bA	245 ±10cB	114 ±9aB	541 ±12B	- 10
N250	172 ±25aA	226 ±21bB	141 ±23aB	539 ±58B	- 10

SES:播种—拔节开始(From June 9 to July 13) From sowing to the beginning of the elongation stage; EFS:拔节—灌浆开始(From July 13 to August 18) From the elongation stage to the beginning of the filling stage; FHS:灌浆—收获(From August 18 to September 20) From the filling stage to the harvest; WGS:全生育期 The whole growth season; 表中数据为平均值±标准误(不同生长期n=10,全生育期n=30);同一行中不同小写字母或同一列中不同大写字母,表示数值之间的差异达到5%的显著水平;Data were mean ±standard error (n = 10 for the different stages and 30 for the whole growth season). Means in a row followed by the letters a, b and c and within a column followed by the letters A,B and C were significantly different at p < 0.05

表2 氮肥对玉米生物量和氮含量的影响

Table 2 Maize biomass and its nutrient contents as affected by nitrogen fertilization in an intensively cultivated soil

处理 Treatment	生物量 Biomass (kg hm <sup>-2</sup> )			N含量 N content (mg g <sup>-1</sup> )	
	籽粒 Grain	秸秆 Straw	总计 Total	籽粒 Grain	秸秆 Straw
N0	6548 ±487a	8437 ±1196a	14985 ±1378a	10.63 ±0.75a	5.39 ±0.22a
N150	8227 ±129b	9331 ±1947a	17558 ±2027a	12.45 ±0.30b	7.65 ±0.33b
N250	8420 ±93b	9136 ±2173a	17556 ±2230a	12.82 ±0.36b	8.40 ±0.50b

表中数据为平均值±标准误 Data were mean ±standard error; 同一列中不同字母,表示数值之间的差异达到5%的显著水平 Means in a column followed by the letters a, b and c were significantly different at p < 0.05

### 2.3 土壤微生物异养呼吸和根系自养呼吸对土壤呼吸的贡献及土壤碳平衡状况

土壤呼吸( $R_t$ )可以分为根系的自养呼吸( $R_{rh}$ )和土壤微生物的异养呼吸( $R_s$ )。在作物-土壤系统中,土壤呼吸( $R_t$ )主要由根际呼吸和微生物分解土壤有机质的异养呼吸组成。事实上,根际呼吸包括根系自身的呼吸和土壤中的微生物对植物来源的物质如根系分泌物和根系脱落物等分解而产生的呼吸。根际呼吸由植物光合产物控制,异养呼吸则由土壤有机质控制<sup>[28]</sup>。它们各自呼吸所利用的碳源不同,对土壤呼吸的贡献也有差异,对全球变化的作用也不同。严格意义上讲,根系呼吸属于自养呼吸,但实际研究中很难将根系呼吸与根际微生物呼吸分开,即很难将根系呼吸从根际呼吸中分离出来。只有了解土壤各组分呼吸在土壤总呼吸中的比例,才能精确了解土壤呼吸的实质。

在农田条件下,常用同位素示踪法和根去除法来研究土壤呼吸并区分根际呼吸( $R_{rh}$ )和土壤微生物的异养呼吸( $R_s$ )。这两种方法不仅可以估算出 $R_{rh}$ 和 $R_s$ 的值,还可以计算出各组分占土壤呼吸的比率。根去除法计算 $R_{rh}$ 时,通常先测定在植物根系存在下的土壤呼吸( $R_t$ )和去除根后的土壤呼吸( $R_s$ ),然后计算两者的差值。Hall等<sup>[26]</sup>用此方法研究了向日葵灌浆期间土壤水分变化对根际呼吸和土壤呼吸的影响,发现根际呼吸占到土壤总呼吸的60%~70%。总体而言,根去除法一般多用于森林生态系统<sup>[15]</sup>,因为农田系统中作物例如小麦的存在严重妨碍对CO<sub>2</sub>排放的测定,只有高秆作物如玉米、向日葵等才易于实施。Rochette等<sup>[25]</sup>发现用

同位素法和用根去除法测得的  $R_{rh}$  值都在 45% 左右, 没有明显差异。因此, 采用根除去法通过测定有玉米生长的土壤和裸地土壤  $\text{CO}_2$  排放通量, 了解玉米对土壤排放  $\text{CO}_2$  的影响。这种方法并没有考虑根系分泌物对土壤有机碳分解可能存在的激发效应。

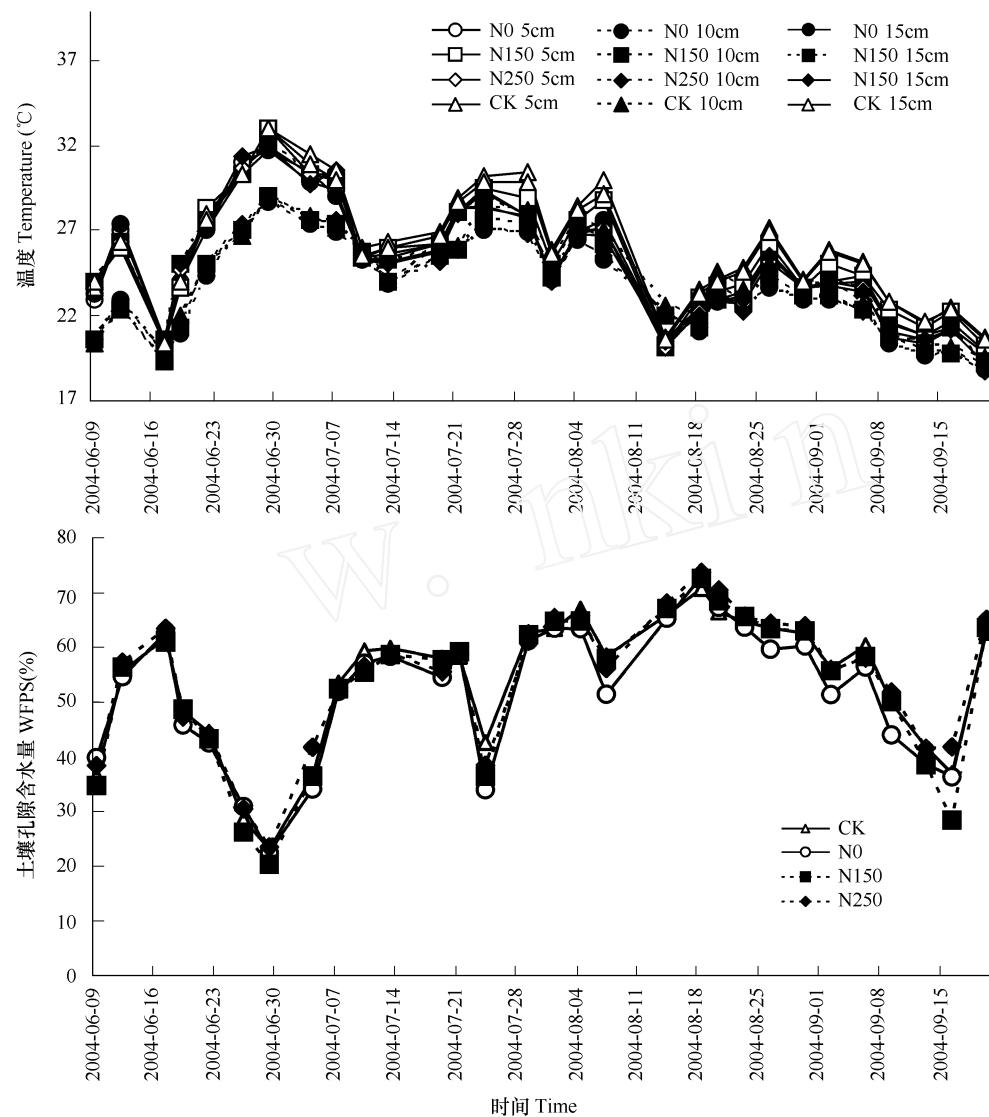


图 4 玉米生长期间土壤水分和温度的动态变化

Fig. 4 Temporal variation of soil moisture (WFPS) and temperature during the maize growth season

表 3 土壤呼吸与土壤温度和水分的关系

Table 3 Relationships between soil  $\text{CO}_2$  flux and soil temperature ( ) and soil moisture as grouped according to treatments

处理 Treatment	5cm		10cm		15cm		水分 WFPS
	$R^2$	$Q_{10}$	$R^2$	$Q_{10}$	$R^2$	$Q_{10}$	
CK	0.36 **	2.37	0.36 **	2.18	0.26 **	2.52	0.03
N0	0.24 **	2.12	0.34 **	2.88	0.25 **	2.18	0.03
N150	0.26 **	2.08	0.28 **	2.42	0.30 **	2.16	0.06
N250	0.20 *	1.90	0.21 *	2.26	0.21 *	1.93	0.08

\* 和 \*\* 分别表示相关性达到显著( $p < 0.05$ )和极显著( $p < 0.01$ )水平 Significant at  $p < 0.05$ , significant at  $p < 0.01$

用  $R_t$  减去  $R_s$  估算获得的根际呼吸 ( $R_{rh}$ ) 结果表明,在施用  $150 \text{ kg N hm}^{-2}$  的土壤中,玉米对土壤  $\text{CO}_2$  排放的贡献率在播种后的 27d 内低于 20% (图 5)。但随着玉米地上部分生物量开始以指数级增加(图 6)而不断提高,波动在 30% ~ 70% 之间。整个生长期平均为 46%,与用  $^{14}\text{C}$  示踪法测定的 15% ~ 60%、平均 46% 一致<sup>[29]</sup>。

用土壤呼吸强度 ( $R_s$ ) 计算获得的玉米生长期间土壤有机碳的损失量总计为  $2.94 \text{ Mg C hm}^{-2}$  ( $1 \text{ Mg} = 106 \text{ g}$ ), 占  $0 \sim 40\text{cm}$  土层中有机碳总量 ( $36.4 \text{ Mg C hm}^{-2}$ ) 的 8%, 略少于在德国测定的温带地区土壤有机碳的损失量  $3.15 \sim 3.80 \text{ Mg C hm}^{-2}$ <sup>[30]</sup>, 但与 Rochette 等<sup>[25]</sup>测定的土壤有机碳周转率 6% 十分接近。因此,在玉米生长期问需要归还碳含量 40% 的植物残留物  $7.35 \text{ Mg hm}^{-2}$  才能弥补上述土壤有机碳的损失,确保平衡。这大约为玉米留在田间根茬总生物量 ( $3.93 \text{ Mg hm}^{-2}$ ) 的两倍,这一估算数值与 Hall 等<sup>[26]</sup>获得的土壤根际呼吸损失的碳大约是根量中碳的 210% 相近。Bolinder 等<sup>[31]</sup>认为,在作物生长期问通过根系分泌进入土壤的有机物中碳的数量相当于收获时作物残留于土壤中根的总碳,由此获得在玉米生长期问土壤有机碳的分解量大体相当于玉米根茬总生物量加上玉米生长期问由根系释放到土壤的有机物量,因此土壤中有机碳总量在玉米生长期问基本处于动态平衡。

由  $R_{rh}$  计算获得的根际呼吸损失的碳量累计为  $2.47 \text{ Mg C hm}^{-2}$ , 相当于玉米地上部分生物净同化碳量 ( $7.85 \text{ Mg C hm}^{-2}$ ) 的 26%, 这一数值在 Rochette 和 Flanagan<sup>[32]</sup>报道的 10% ~ 35% 范围内。但是,与用  $^{13}\text{C}$  同位素示踪法<sup>[25]</sup>测定结果相比,本研究获得的  $R_s$  值略低(分别为  $2.94$  对  $3.92 \text{ Mg C hm}^{-2}$ )。可能原因是供试土壤有机碳含量较低(土壤粘粒含量少)之故。

#### References:

- [1] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of  $\text{CO}_2$  emission from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351:304 ~ 306.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil pool and world life zones. *Nature*, 1982, 298:156 ~ 159.
- [3] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Control on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48:1 ~ 6.
- [4] Zhang X P, Fang H J. Importance of agriculture soil sequestering carbon to offsetting global warming. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(3):101 ~ 106.
- [5] Guo L P, Lin E D. Research advances on mitigating global warming and greenhouse gas sequestration. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14:384 ~ 389.
- [6] Buringh P. Organic carbon in soils of the world. In: woodwell GM, ed. *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle (SCOPE 23)*. London: Mid-Country Press, 1984. 91 ~ 127.
- [7] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climates. *Tellus*, 1992, 44B:81 ~ 99.
- [8] Fernandez I J, Son Y, Kraske C R, et al. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57:1115 ~ 1121.

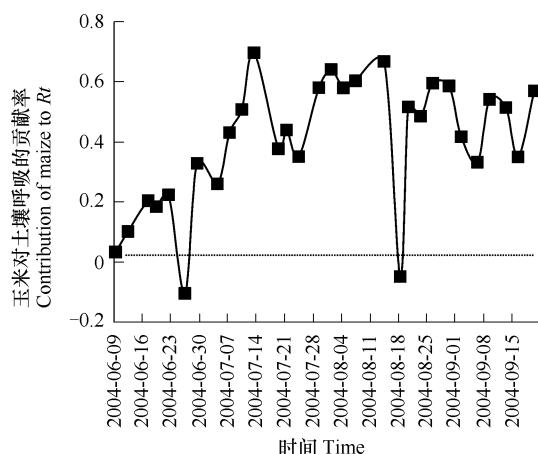


图 5 根去除法测得玉米生长期问根际呼吸对土壤呼吸贡献的动态变化

Fig. 5 Contribution of maize rhizosphere respiration ( $R_{rh}$ ) to total soil respiration ( $R$ ) during the maize growth season measured by root-exclusion method

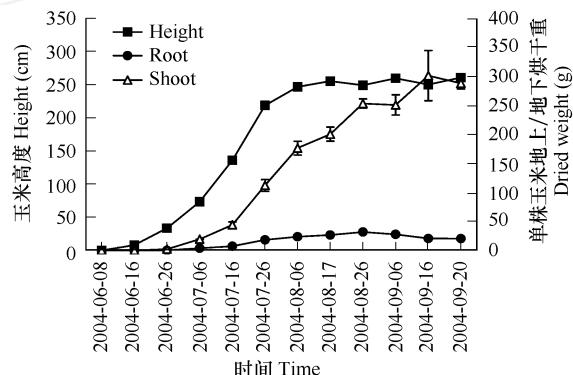


图 6 施用  $150 \text{ kg N hm}^{-2}$  条件下玉米生物量的动态变化

Fig. 6 Temporal variation of aboveground or belowground biomass of maize amended with  $150 \text{ kg N hm}^{-2}$

- [9] Schlesinger W H , Andrews J A . Soil respiration and the global cycle. *Biogeochemistry* , 2000 , 48 : 7 ~ 20.
- [10] Ding W X , Cai Z C . Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands. *Ecologica Sinica* , 2002 , 22 : 1672 ~ 1679.
- [11] Warembourg F R , Estelrich H D . Towards a better understanding of carbon flow in the rhizosphere : a time-dependent approach using carbon-14. *Biol. Fertil. Soils* , 2000 , 30 : 528 ~ 534.
- [12] Kuzyakov Y , Cheng W . Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biol. Biochem.* , 2001 , 33 : 1915 ~ 1925.
- [13] Luo Y , Field C B , Mooney H A . Partitioning of photosynthesis between shoot and root fraction to elevated CO<sub>2</sub> : interaction among carbon , nitrogen and growth. *Plant Cell Environ.* , 1994 , 17 : 1195 ~ 1204.
- [14] Runion GB , Curl E A , Rogers H H , et al . Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment on microbial populations in the rhizosphere and phosphorus of cotton. *Agr. Forest Meteorol.* , 1994 , 70 : 117 ~ 130.
- [15] Hanson P J , Edwards N T , Garten C T , et al . Separating root and soil microbial contributions to soil respiration : a review of methods and observations. *Biogeochemistry* , 2000 , 48 : 115 ~ 146.
- [16] Rochette P , Angers D A , Flanagan L B . Maize residue decomposition measurement using soil surface CO<sub>2</sub> fluxes and natural abundance of 13C. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 1999 , 63 : 1385 ~ 1396.
- [17] Rochette P , Desjardins R L , Patty E . Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural field. *Can. J. Soil Sci.* , 1991 , 71 : 189 ~ 196.
- [18] Cardon Z G , Hungate B A , Cambardella C A , et al . Contrasting effects of elevated CO<sub>2</sub> on old and new soil carbon pools. *Soil Biol. Biochem.* , 2001 , 33 : 365 ~ 373.
- [19] Anderson E L . Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization. *Agronomy J.* , 1987 , 79 : 544 ~ 549.
- [20] Liljerot E , Van Veen J A , Miller H J . Assimilate translocation to the rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations. *Soil Biol. Biochem.* , 1990 , 22 : 1015 ~ 1021.
- [21] Rillig M C , Allen M F , Kirov N M , et al . Plant species-specific changes in root-inhabiting fungi in a California annual grassland : responses to elevated CO<sub>2</sub> and nutrients. *Oecologia* , 1998 , 113 : 252 ~ 259.
- [22] Bloom A J , Sukrapanna S S , Warner R L . Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiol.* , 1992 , 99 : 1294 ~ 1301.
- [23] Linn D M , Doran J W . Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 1984 , 48 : 1267 ~ 1272.
- [24] Mielnick P C , Dugas W A . Soil CO<sub>2</sub> flux in a tallgrass prairie. *Soil Biol. Biochem.* , 2000 , 32 : 221 ~ 228.
- [25] 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.
- [26] Hall A J , Conner D J , Whitfield D M . Root respiration during grain filling in sunflower : the effects of water stress. *Plant Soil* , 1990 , 121 : 57 ~ 66.
- [27] Davidson E A , Belk E , Boone R D . Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biol.* , 1998 , 4 : 217 ~ 227.
- [28] Boone R D , Nadelhoffer K J , Canary J D , et al . Root exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* , 1998 , 396 : 570 ~ 572.
- [29] Kuzyakov Y , Ehrenberger H , Stahr K . Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne*. *Soil Biol. Biochem.* , 2001 , 33 : 61 ~ 74.
- [30] Dörr H , Münnich K O . Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperature zone. *Tellus* , 1987 , 39B : 114 ~ 121.
- [31] Bolinder M A , Angers D A , Grout M , et al . Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays L.*). *Plant Soil* , 1999 , 215 : 85 ~ 91.
- [32] Rochette P , Flanagan L B . Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 1998 , 61 : 466 ~ 474.

## 参考文献 :

- [3] 杨学明 , 张晓平 , 方华军 . 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义 . 地理科学 , 2003 , 23(3) : 101 ~ 106.
- [5] 郭李萍 , 林而达 . 减缓全球变暖与温室气体吸收汇研究进展 . 地球科学进展 , 1999 , 14(4) : 384 ~ 390.
- [10] 丁维新 , 蔡祖聪 . 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 . 生态学报 , 2002 , 22 : 1672 ~ 1679.