

# 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析

李 虎, 邱建军\*, 王立刚

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 采用静态箱法研究了黄淮海平原典型农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的日变化、季节变化特征, 分析了土壤温度、水分对土壤呼吸的影响; 并利用反硝化一分解 (DNDC) 模型量化研究了根呼吸对土壤总呼吸的贡献。结果表明, 在作物生长季节内棉花地、休闲地和冬小麦/夏玉米地土壤 CO<sub>2</sub> 排放均表现出明显的季节变化规律。土壤 CO<sub>2</sub> 排放季节变化的总体趋势是夏季高、其他季节低, 与对应气温的动态变化基本一致。冬小麦/夏玉米地土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量高峰值为 2324 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, 棉花地为 1111.9 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, 休闲地为 436.07 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>。土壤 CO<sub>2</sub> 季节性排放受温度的影响最大, 其中与 5 cm 地温的相关性最好, 与土壤湿度的相关性不太明显。同一种种植模式施氮量高的处理 CO<sub>2</sub> 平均排放通量大于低的处理。同时根据 DNDC 模型估算, 玉米根际呼吸对土壤呼吸的贡献最大, 为 91%~95%, 棉花和冬小麦根际呼吸比例分别约为 70% 和 80%。施氮不仅影响土壤微生物的呼吸而且还影响到根系呼吸。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; 黄淮海平原; 农田土壤; 根系呼吸; 土壤微生物呼吸

**中图分类号:** S154.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-4-0014-07

李 虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 14-20.

Li Hu, Qiu Jianjun, Wang Ligang. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 14-20. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

农业土壤是陆地碳循环中最大的碳库, 具有巨大的碳截获潜力<sup>[1, 2]</sup>。土壤呼吸是陆地植物固定 CO<sub>2</sub> 后又释放 CO<sub>2</sub> 返回大气的主要途径, 是大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的关键生态学过程。土壤呼吸的微小变动, 就能导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度的剧烈变化。因此, 土壤呼吸在陆地生态系统碳循环研究中的地位日益突出, 尤其在全球气候变暖的今天, 备受人们关注。土壤呼吸包括根系呼吸和微生物呼吸两个部分<sup>[3]</sup>。许多研究表明, 农田土壤呼吸有明显的日变化和季节变化规律, 土壤温度、水分和有机质的变化是造成上述变化的重要原因<sup>[4, 5]</sup>。此外, 作物类型、农业管理措施等也对土壤呼吸及其季节分布产生影响。虽然很多研究者在此方面做了大量工作, 但各因素综合作用对土壤呼吸的影响机理和作用大小尚不明确, 不同环境影响因子所起的作用也不一样。而且植物根系对土壤呼吸的贡献至关重要, 无法有效地区分纯根呼吸和根际微生物呼吸仍是一个最大的难点, 并且不同研究方法间的比较研究较少, 仍处于探索阶段。因此, 精确测定农田生态

系统土壤呼吸, 确定不同作物类型 CO<sub>2</sub> 排放速率的控制因子, 量化根系呼吸占土壤呼吸的比例, 不仅对于评估农田生态系统碳收支非常关键, 而且对更好地研究土壤碳获取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。本研究的目标包括: 1) 通过对黄淮海平原典型农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的系统观测, 研究分析温度、水分、施肥管理对土壤呼吸的影响; 2) 利用反硝化一分解 (DNDC) 模型来区分量化各种作物生态系统土壤呼吸中根系呼吸贡献率。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地点

试验地点位于河北省邯郸市曲周县中国农业大学曲周实验站 (36.52° N, 115.01° E, 海拔 40 m), 属暖温带半湿润季风气候区。光热水等气候资源比较丰富, 但受季风的影响, 冬春寒冷干燥, 夏季温暖多雨, 蒸发强烈, 春旱尤为严重, 可一年两熟。其年平均气温为 13.2℃, 平均年日照时数为 2332.3 h, 平均年总降水量为 514.3 mm。其农业生产情况在黄淮海平原具有典型的代表性, 选取当地主要的种植模式 (棉花、冬小麦/夏玉米) 进行试验。各处理地管理措施冬小麦/夏玉米轮作地为 CK、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>, 其中 CK 表示对照, 不施肥; N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 分别表示施用 N 肥 135、270 kg/hm<sup>2</sup>, 能够代表当地典型施肥量。测量时间从 2004 年 10 月 9 日 (小麦播前整地) - 2005 年 6 月 10 日 (小麦收割), 2005 年 6 月 14 日 (玉米播种)

收稿日期: 2007-08-02 修订日期: 2008-01-16

基金项目: 公益性科研院所基金科研业务专项课题 (2007-1); 支撑计划课题 (2006BAD17B09-05)

作者简介: 李 虎 (1981-), 男, 博士生, 主要从事生态系统模拟的研究。北京 中国农科院资源区划所, 100081。Email: lihu0728@sina.com

※通讯作者: 邱建军 (1968-), 研究员, 博士, 研究方向为农业生态系统模拟。北京 中国农科院资源区划所, 100081。Email: qiuji@caas.net.cn

—2005年10月7日（玉米收割）。棉花地分为南棉花地（Nm）和北棉花地（Bm），施用N肥量按当地农户常规操作进行，分别为265.5、213 kg/hm<sup>2</sup>，测量时间2004年10月—2005年10月。其中2004年10月—2005年4月为休闲期，2005年4月18日—2005年9月30日为棉花生长期。休闲地无人为干扰，北休闲地（Bx）试验于2004年10月—2005年10月进行。南休闲地（Nx）试验于2004年10月—2005年6月进行（6月以后南休闲地被开发作为菜地，之后没有进行观测）。开始试验前各处理0~20 cm土壤理化性状如表1。

表1 土壤基本理化性状分析结果

Table 1 Results of basic physical and chemical properties of soil

处理	pH 值	碱解氮 /mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾 /mg·kg <sup>-1</sup>	全氮 /g·kg <sup>-1</sup>	土壤有机质 /g·kg <sup>-1</sup>
Bm	8.14	17.57	160.19	0.85	7.1
Nm	8.19	41.74	50.35	0.38	10.8
Bx	8.12	7.33	30.49	0.14	2.9
Nx	7.92	40.27	160.15	0.57	10.4
N <sub>1</sub>	7.84	55.19	55.15	0.91	10.1
N <sub>2</sub>	7.83	54.43	70.10	0.87	10.6
CK	7.97	50.65	65.13	0.62	9.9

## 1.2 试验方法

观测方法采用密闭箱技术。密闭箱由有机玻璃制成，呈长方体形，分箱体和底座两部分。箱体尺寸为30 cm×30 cm×60 cm，底座尺寸为35 cm×35 cm×10 cm。箱体内装有搅拌空气的小风扇，箱体底面开口，连接带有凹槽的底座。测量时将底座封闭嵌入土中10 cm，每个取样点固定一底座，然后将箱体置于底座凹槽内，凹槽内在用水密封，使箱内空气不与外界空气交换或循环。观测时间主要选择在作物生长的主要生育期，并且在降水或施肥时增加取气频率，尽可能捕捉到气体释放高峰，冬季视温度适当减少通量观测次数，每次气体取样均在13:00~15:00进行，每处理地各2次重复，重复间采用两箱体平行采样。日变化测定在当天7:00至次日5:00进行，每2 h测定一次。预试验的结果表明，短时间（如20 min）内土壤CO<sub>2</sub>排放速率随时间呈线性变化（相关系数通过0.001置信度检验），因此每个静态箱每次测定持续20 min，每隔5 min测量一次箱内气体的浓度，分别在0、5、10、15、20 min用50 mL注射器采集气体于气袋中（化工部大连光明化工研究所生产的铝膜气样袋200 mL）。用温湿度计同步测量箱内气温、空气湿度；地表温度、地下5 cm、10 cm土温由便携式地温表测定，并取土样于土盒中用烘干法测定土壤含水率。气样袋寄回北京实验室用气相色谱（HP6890）分析，在3 d内完成浓度测量。气体通量的计算是通过气体浓度随时

间的变化计算单位面积的气体排放，计算公式如下：

$$F=60 \times 10^{-2} \times [273/(273+T)] \times (P/P_0) \cdot \rho \cdot H \cdot (dc/dt)$$

式中  $F$ ——CO<sub>2</sub>的排放通量，mg·m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup>； $\rho$ ——标准大气压条件下的CO<sub>2</sub>密度，g·L<sup>-1</sup>； $H$ ——采样箱气室高度，cm； $dc/dt$ ——箱内CO<sub>2</sub>气体浓度的变化速率，10<sup>-6</sup>min<sup>-1</sup>； $P_0$ 、 $P$ ——标准状态下空气和采样箱内大气压，Pa； $T$ ——箱内平均气温，℃，试验地点的高程接近海平面，所以 $P/P_0 \approx 1$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸的日变化规律

经过测定不同处理的CO<sub>2</sub>排放日变化规律基本一致，选取具有代表性的冬小麦/夏玉米高氮（N<sub>2</sub>）处理在冬小麦的成熟期（2005-06-10）进行CO<sub>2</sub>排放的昼夜日变化观测，结果表明CO<sub>2</sub>排放存在明显的日变化规律（图1）。地温的日变化趋势与土壤呼吸速率基本一致，CO<sub>2</sub>总的排放规律是白天高、夜间低，凌晨1:00~4:00排放量最低，此时土壤生物和土壤根系呼吸作用最弱，排放CO<sub>2</sub>最少；随着温度的升高，CO<sub>2</sub>的排放通量逐渐增大，在13:00~15:00达到峰值。此时土壤生物和土壤根系呼吸作用强烈，CO<sub>2</sub>排放出现日变化中最高值。这与王立刚<sup>[6]</sup>在该地测得的变化趋势一致。

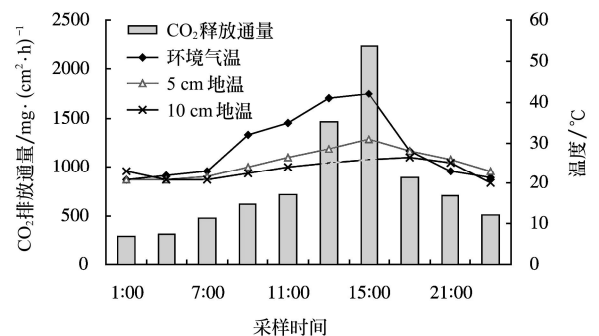


图1 N<sub>2</sub>处理CO<sub>2</sub>排放日变化规律

Fig.1 Daily variation of soil CO<sub>2</sub> emissions in N<sub>2</sub> treatment fields

### 2.2 土壤呼吸的季节变化

#### 2.2.1 棉花和休闲地土壤呼吸的季节变化规律

观测结果表明，不同处理的两棉花地土壤CO<sub>2</sub>排放的速率具有基本一致的波动规律，均随着气温呈现出明显、复杂的季节动态变化规律（图2）。秋季土壤呼吸速率总体呈下降趋势，12月中旬左右降到最低；随着春季气温的升高则呈总体上升趋势，夏季7月中旬达到最高。由此可见，土壤呼吸速率季节的动态变化与气温的季节动态变化是一致的。但是，本试验观测到2个处理地的动态曲线不完全相同，而且土壤呼吸季节动态变化较一般报道<sup>[5,6]</sup>的单峰型季节动态变化要复杂得多。这主要是因为试验地在4月中旬时由于翻耕、播种、灌溉引起土

壤扰动,以致出现第1次排放高峰。两棉花试验地  $\text{CO}_2$  排放峰值基本上都是  $550 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  左右,随着作物的生长发育以及土壤温度的升高,使得土壤呼吸速率快速增大。在6月中旬的第2次施肥又是导致  $\text{CO}_2$  排放高峰的主要因素,但是由于南棉花地(图2b)施肥量大,有机质含量高,因此具有比北棉花地(图2a)更加明显的排放高峰,两处理地在环境因素如土壤温度和水分相同的条件下,有机质是决定土壤呼吸的重要因素。进入秋

冬季棉花成熟期,由于作物消耗土壤剩余的有机质,土壤有机质含量不高,微生物活性也不是很强, $\text{CO}_2$  排放趋势略有下降。

休闲地  $\text{CO}_2$  排放通量季节变化规律如图2c、2d。土壤  $\text{CO}_2$  排放季节的动态变化与土壤温度的季节性动态变化也具有相似性,总体趋势是冬季较低,夏季较高。休闲地由于没有人为活动(播种、翻耕,施肥等)因素的干扰, $\text{CO}_2$  排放变化趋势仅随降雨、温度起伏变化。

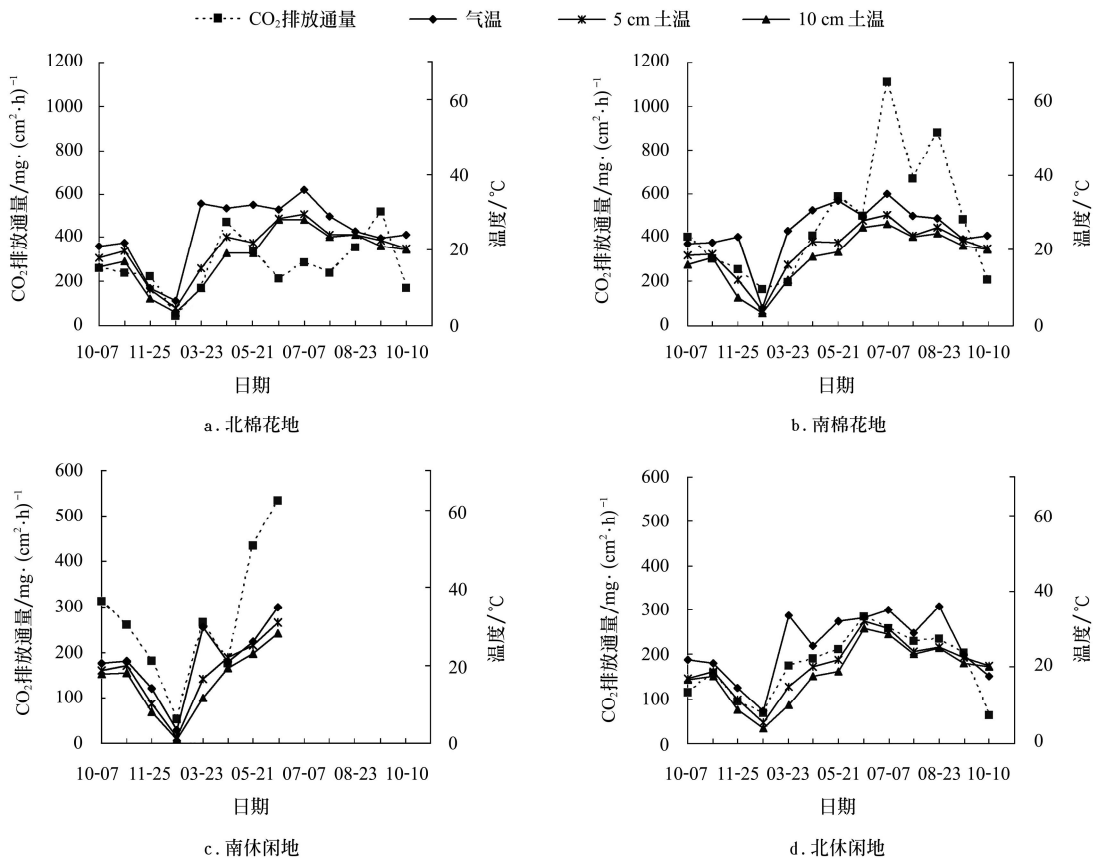


图2 棉花地和休闲地土壤  $\text{CO}_2$  排放季节变化规律

Fig.2 Seasonal variations of soil  $\text{CO}_2$  emissions in cotton and fallow fields

### 2.2.2 冬小麦/夏玉米地土壤呼吸的季节变化规律

冬小麦/玉米地在观测期内,土壤  $\text{CO}_2$  排放速率具有明显的季节变化规律(图3)。整个测定期间,土壤  $\text{CO}_2$  排放速率季节变化的总体趋势是夏季高、其他季节低,与对应地温的动态变化基本一致。冬季较低,施氮量高( $\text{N}_2$ )的处理最低值为  $134 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,施氮量低的处理( $\text{N}_1$ )为  $180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,对照处理为  $55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;夏季较高,施氮量高( $\text{N}_2$ )的处理最高值为  $2324 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,施氮量低的处理( $\text{N}_1$ )为  $1251 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,对照处理为  $1183 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与王立刚等<sup>[6]</sup>报道的土壤呼吸速率冬季最低值  $75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,夏季最高值  $1100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  相比,冬季偏低、夏季偏高,可能是由于地温与土壤含水率的差异以及测定土壤呼吸方法间存在误差所致。

2004年11月—2005年3月, $\text{CO}_2$  排放量变化不大,这是由于这段时间气温较低,小麦处于越冬期,生长缓慢甚至停止生长,植物呼吸作用减弱,呼吸作用排放的  $\text{CO}_2$  较低且变化不大;同时,较低的气温、地温抑制了土壤微生物的活性,减少了土壤中  $\text{CO}_2$  的排放通量。3月中旬后,随着气温回升,小麦进入返青期,生长旺盛,小麦根系呼吸作用强度逐渐增大;同时,由于气温升高和降水量的增加,土壤微生物的活性增强。这两方面的共同作用使得小麦地的  $\text{CO}_2$  排放通量迅速增大。4月下旬,小麦开始拔节灌浆,在5月中旬,达到呼吸速率高峰。而在  $\text{N}_2$  处理地,可能由于施肥量大土壤仍有充足的碳氮源, $\text{CO}_2$  排放通量仍在持续增长。在小麦成熟期,小麦叶子逐渐枯黄,光合作用能力下降,呼吸作用也随之减弱,所

以测得的小麦地的 CO<sub>2</sub> 排放通量降低，直到 6 月 10 日小麦收割。6 月 14 日左右开始播种夏玉米，这段期间由于土壤频繁耕翻，且由于少量降雨以及残留在土壤中的小麦根茬快速腐解的缘故，土壤呼吸速率迅速增大，于 7 月中旬达到全年最高。之后随着小麦根茬快速腐解阶段的结束和土壤水分的限制，夏玉米地土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量快速下降，因此使得一年中温度较高时期的土壤呼吸速率反而处于相对较低的水平，戴万宏等<sup>[7]</sup>的研究也观察到了相同的现象。此后在整个冬季冬小麦/夏玉米地 CO<sub>2</sub> 排放通量一直稳定在较低的水平。

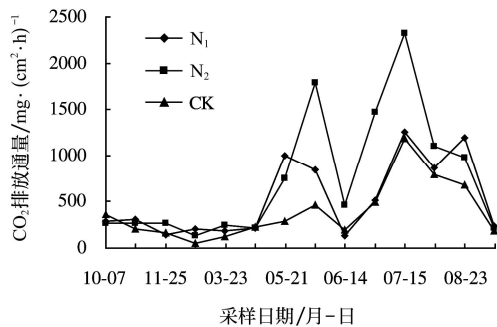


图 3 冬小麦/夏玉米土壤 CO<sub>2</sub> 排放季节变化规律

Fig.3 Seasonal variations of soil CO<sub>2</sub> emissions in winter wheat and summer maize rotation fields

### 2.3 影响土壤呼吸的环境因素

#### 2.3.1 土壤呼吸与土壤温度、湿度之间的关系

土壤温度和水分是影响土壤呼吸速率的关键环境因子。有关研究已发现土壤呼吸随温度升高呈指数增加，而土壤含水率对土壤呼吸的影响则较为复杂，往往同时取决于温度的相互协调情况<sup>[6, 8, 9]</sup>。观测发现 5 cm 地温与土壤呼吸的相关系数最大，相关系数极显著（表 2）。

表 2 CO<sub>2</sub> 排放通量与影响因子之间的相关性

Table 2 Correlations between soil CO<sub>2</sub> emission flux and soil temperature, water content or air moisture

处理	气温	5 cm 土温	10 cm 土温	土壤湿度
Bm	0.41	0.55(*)	0.47	0.09
Nm	0.66(*)	0.76(**)	0.74(**)	0.48
Bx	0.84(**)	0.87(**)	0.77(**)	0.35
Nx	0.86(**)	0.88(**)	0.87(**)	0.59
N1	0.53(*)	0.73(**)	0.64(*)	0.58
N2	0.72(**)	0.80(**)	0.79(**)	0.41
CK	0.45	0.73(**)	0.70(**)	0.62

注：\*\* 表示在 0.01 水平上的显著性(2-tailed)； \* 表示在 0.05 水平上的显著性(2-tailed)。

土壤含水率是影响土壤呼吸的另一重要因子，仅次于温度<sup>[10]</sup>。土壤水分的改变势必影响植物根系分布、根系呼吸以及土壤微生物群落组成，进而导致土壤呼吸的剧烈变动。单独分析土壤湿度对 CO<sub>2</sub> 排放的影响时，相

关系系数却不显著（表 2）。试验中观测到土壤含水率在较小范围内变化，棉花地土壤湿度在 10.6%~20.8%之间，平均土壤湿度为 15.7%，休闲地平均土壤湿度为 13%，冬小麦/夏玉米地土壤平均湿度为 25%。在本研究中，土壤含水率与土壤呼吸之间没有显著的线性关系，可能是由于所观测到的土壤水分的变化没有超出一定的极端范围，而不足以影响微生物与植物根系的活动，则难以测出水分对土壤呼吸的影响。陈全胜等<sup>[11]</sup>也在试验中观察到，水分变化范围如果太小，土壤呼吸受水分变化的影响也可能被其他因子的影响或系统误差所掩盖。

#### 2.3.2 不同处理地土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的对比

在作物的整个生长季中，不同土地利用类型 CO<sub>2</sub> 的排放通量有明显差异（如表 3），在各个生育期中，CO<sub>2</sub> 排放通量在种植作物处理明显高于休闲地（Bx, Nx），统计分析表明，棉花和冬小麦/夏玉米处理地 CO<sub>2</sub> 的平均排放通量和休闲地的差异显著。此外，对比同一土地利用类型，施肥量高的处理 CO<sub>2</sub> 平均排放通量要比施肥量低的大：Nm>Bm，小麦处理地 N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>>CK。土壤有机质是微生物营养和能量的来源，而且肥料的施入改善了土壤理化性质，增加了土壤有机质的积累，促进了土壤微生物的活性和数量以及根系的生长和活力，从而增加了 CO<sub>2</sub> 的排放通量。因此，对照地（不施肥料）CO<sub>2</sub> 排放小于施用肥料的处理，低施肥量处理的 CO<sub>2</sub> 排放通量低于高施肥量的处理<sup>[1]</sup>。

表 3 不同处理地 CO<sub>2</sub> 排放通量的对比

Table 3 Comparison of CO<sub>2</sub> emission flux for each treatment field

处理	通量范围 / mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>	通量平均值 / mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>	施肥量 / kg·hm <sup>-2</sup>	有机质 / g·kg <sup>-1</sup>
Bm	40.2~518.6	270.8	213	7.1
Nm	208.7~1111.9	474.8	265.5	10.8
Bx	62.5~359.7	198.7	0	2.9
Nx	53.3~436.1	277.3	0	10.4
N <sub>1</sub>	137.8~1251.7	526.8	135	10.1
N <sub>2</sub>	134.6~2324.5	749.2	270	10.6
CK	127.5~183.5	386.7	0	9.9

### 2.4 土壤根系对土壤呼吸的贡献

研究土壤呼吸各个组分对土壤总呼吸的贡献是定量评价作物和土壤碳平衡及能量平衡的重要基础。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和土壤微生物的异养呼吸，但实际研究中同位素示踪法设备成本高、操作难度大，而根去除法由于作物的干扰如小麦妨碍了对 CO<sub>2</sub> 排放的测定，很难将根系呼吸从根际呼吸中分离出来。考虑到两个方法的优缺点，采取模型的方法被认为是一个相对合适的选择。DNDC 模型是目前国际上最

为成功的模拟生物地球化学循环的过程模型之一<sup>[13-15]</sup>, 目的是模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环, 经过世界上许多国家的科学家的应用, 认为能够较好的模拟土壤中碳、氮的循环过程和温室气体 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 等的释放规律, 已有许多成功应用的经验。DNDC 模型从机理过程模拟了土壤向大气释放 CO<sub>2</sub> 的过程, 为测算土壤呼吸中各组成成分对土壤总呼吸的贡献提供了可能, 其最新版本及其简介都能从网上直接获得 (<http://www.dndc.sr.unh.edu>)。验证是模型进一步推广应用的前奏工作, 不可或缺。该模型使用前在该地区得到了充分的验证, 它很好地拟合了田间观测到的土壤 CO<sub>2</sub> 排放的季节变化趋势和总的变化通量, 较好地反映了不同农业生态系统土壤呼吸的真实情况, 表明该模型具有较高的可信度, 具体的验证工作可参见文献<sup>[16]</sup>。模型运转所需的参数如气象数据(每日最高、最低气温)、土壤属性数据、农作物种类轮作类型以及作物的播种和收割日期、秸秆还田比例、氮肥和有机肥的施用次数、施用量等管理措施均为试验地观测和分析所得。根据模型估算, 各种作物生育期的土壤呼吸见表 4。作物类型对土壤呼吸总量有较大影响, 在作物的整个生育期内, 各处理地土壤呼吸总量棉花>夏玉米>冬小麦。其中, 作物根系呼吸是土壤呼吸的主要部分, 玉米根际呼吸在土壤呼吸中占比例最大, 为 91%~95%, 棉花和冬小麦根际呼吸比例分别约为 70%和 80%。此外, 同种作物不同施氮量对土壤呼吸也有显著影响, 施氮量高的土壤微生物的呼吸量以及根系呼吸量都要显著高于施氮低的, 其原因可能是施氮一方面促使植物根系的生长使根系呼吸增加, 另一方面提供给微生物有效氮, 使微生物活性和数量增加, 导致微生物呼吸增加。这种现象在棉花地表现最为明显, 施氮量高的土壤呼吸总量比施氮低的高 27%。

表 4 不同作物生育期的土壤呼吸量

Table 4 Accumulative soil respiration at the growing stage for different crops

		/kg·hm <sup>-2</sup>			
采样地	处理	微生物呼吸量	根系呼吸量	总呼吸量	根呼吸贡献/%
棉花	Bm	1610.06	4289.24	5899.3	72.71
	Nm	2369.99	5877.73	8247.72	71.26
冬小麦	N <sub>1</sub>	627.59	3285.86	3913.45	83.96
	N <sub>2</sub>	689.27	3572.91	4262.18	83.83
	CK	613.51	3174.03	3787.54	83.80
夏玉米	N <sub>1</sub>	320.97	3869.71	4190.68	92.34
	N <sub>2</sub>	390.53	3950.72	4341.25	91.00
	CK	155.59	2992.14	3147.73	95.06
休闲地	Bx	605	—	605	—
	Nx	703	—	703	—

### 3 讨论

1) 本试验在黄淮海平原测得数据与其他研究者测得数据基本相当, 如宋文质<sup>[11]</sup>和刘允芬<sup>[17]</sup>等在华北平原测定的小麦地 CO<sub>2</sub> 排放通量范围分别为 120~400 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 470~1250 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 陈述悦<sup>[18]</sup>测得棉花地 CO<sub>2</sub> 平均排放通量为 217.48 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; 而王立刚<sup>[6]</sup>, 董玉红<sup>[19]</sup>在黄淮海平原冬小麦/夏玉米地上观测也分别得出 CO<sub>2</sub> 排放通量范围为 75~1100 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 240~1530 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; 在本研究中, 棉花地的 CO<sub>2</sub> 平均排放通量为 372 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 冬小麦/夏玉米地 CO<sub>2</sub> 排放通量范围为 127.5~2324.5 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 总体水平略高一些, 可能是由于地温与土壤含水率的差异以及测定土壤呼吸方法和时间上存在误差所致。本研究表明气温和地表温度对土壤呼吸存在显著的影响, 而土壤水分对 CO<sub>2</sub> 排放的影响并不明显, 虽然土壤水分能强烈影响土壤呼吸, 但在复杂的田间条件下多种因素的共同作用, 以致土壤含水量与土壤呼吸之间没有明显的相关关系, 或者只有微弱的相关关系, 这与一些相关研究的结论基本一致<sup>[17-18]</sup>。影响土壤呼吸的因素是多方面的, 单独强调其中某一个因子的作用是片面的, 因此在以后的实验中, 有必要在控制各因素的前提下, 深入探讨各因素之间的量化关系, 从而更深入地了解土壤 CO<sub>2</sub> 的排放规律。

2) 根际呼吸是有植物生长的生态系统中土壤呼吸的主要部分。由于试验水平、植被种类、生态系统类型等因素的差异, 各研究者所采用的方法及所计算的根际呼吸的比例也存在一定的差异。Hall 等<sup>[20]</sup>研究发现向日葵根际呼吸占到土壤总呼吸的 60%~70%, 文献报道<sup>[21]</sup>的禾谷类和草类的根际呼吸占土壤呼吸的比例变化在 51%到 89%之间。杨兰芳等<sup>[22]</sup>通过试验研究得出, 玉米全生育期中, 根际呼吸在土壤呼吸中占 93%~95%, 在不同生长阶段中, 除了苗期不到 60%外, 其余时期均在 94%以上, 这与本研究中, 玉米根际呼吸占土壤呼吸比例为 90%~93%结果基本一致, 从而推论本研究结果是有效可靠的; 但也有一些不同的研究结果, 蔡艳<sup>[23]</sup>通过试验测得的玉米根系呼吸比例在 30%~70%之间, Kuzyakov<sup>[24]</sup>用 <sup>14</sup>C 示踪法测定的值为 15%~60%, 其原因可能由于本研究中土壤有机碳含量很低而导致土壤微生物呼吸低, 它对总土壤呼吸的贡献也就低, 因而玉米根系对总土壤呼吸的贡献就高。本研究也有不足之处, 高氮和低氮的冬小麦/夏玉米处理地根系呼吸差别不大, 即氮肥对冬小麦和夏玉米作物根系呼吸影响不明显, 因此有必要进一步确定氮素对根系呼吸的影响, 以提高估算结果的精确度。

3) 中国农业土壤具有很大的固碳潜力与容量, 农业及其耕地土壤的有机碳固定势必成为我国 CO<sub>2</sub> 减排压力

下碳汇的最重要去向。准确估算土壤  $\text{CO}_2$  的排放量是研究全球变化情景下碳循环的基础, 而且作为土壤呼吸的重要组成部分的植物根系呼吸与土壤微生物呼吸对环境因子的变化有着不同的反应, 但还缺乏这方面的直接验证, 精确、原位的区分纯根呼吸和根际微生物呼吸仍是当前研究最大的难点, 不同方法间的比较研究也较少, 本研究也只作了初步的探讨。这就需要以不同生态区和不同作物带农区的长期试验为基础, 重视和加强土壤  $\text{CO}_2$  的排放观测和分析, 并适当扩大长期试验的地区和作物的代表性。随着人们对农田土壤  $\text{CO}_2$  释放机制认识的不断深入, 环境参数数据库的逐步完善, 模型推算和预测的准确度和精度及模型功能会随之不断提高, 模型的应用也将更普遍。

#### 4 结 论

1) 冬小麦/夏玉米轮作系统  $\text{CO}_2$  排放存在着明显的日变化。凌晨 4:00~6:00 排放量最低, 在 13:00~15:00 达到峰值

2) 土壤  $\text{CO}_2$  排放通量具有明显的季节变化规律, 总体趋势是夏季高、其他季节低, 与相应气温的动态变化基本一致。土壤  $\text{CO}_2$  排放通量受到温度的影响最大, 其中与 5 cm 地温的相关性最好, 与土壤湿度的相关性却不太明显, 没有表现出明显的规律性, 这说明在该地区除了温度、土壤水分外, 其他因素也共同作用影响  $\text{CO}_2$  排放。氮肥的施用量也显著影响土壤  $\text{CO}_2$  的排放。

3) 根据模型估算, 作物类型对土壤呼吸总量有较大影响。在作物的整个生育期内, 各处理地土壤呼吸总量棉花>夏玉米>冬小麦。玉米根际呼吸在土壤呼吸中占比例最大, 为 91%~95%, 棉花和冬小麦根际呼吸比例分别约为 70%和 80%。施氮量高的土壤微生物的呼吸量以及根系呼吸量都要显著高于施氮量低的。

#### [参 考 文 献]

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304: 35-39.
- [2] 黄承才, 葛 滢. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究[J]. *生态学报*, 1999, 19 (3): 324-328.
- [3] Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration [J]. *Soil Biol Biochem*, 1970 (2): 9-18.
- [4] 陈素英, 胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究[J]. *生态农业研究*, 1997, 5 (2): 42-46.
- [5] 李凌浩, 王其兵. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24 (6): 680-686.
- [6] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. *土壤肥料*, 2002, (6): 13-17.
- [7] 戴万宏, 王益权, 黄 耀, 等. 农田生态系统土壤  $\text{CO}_2$  释放研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2004, 32 (12): 1-7.
- [8] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. *生态学报*, 1997, 17 (5): 469-476.
- [9] 杨 平, 杜宝华. 国外土壤二氧化碳释放问题的研究动态[J]. *中国农业气象*, 1996, 17 (1): 48-50.
- [10] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 23 (5): 972-978.
- [11] 宋文质, 曾江海. 我国农田土壤的主要温室气体  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放研究[J]. *环境科学*, 1996, 17 (1): 85-88.
- [12] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. *农业工程学报*, 2006, 22 (7): 143-148.
- [13] Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity [J]. *Geophysical Research*, 1992, 97: 9759-9776.
- [14] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems [J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2000, 58: 259-276.
- [15] 邱建军, 王立刚, 唐华俊, 等. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 4 (8): 594-600.
- [16] 李 虎, 王立刚, 邱建军. 黄淮海平原河北省范围内农田土壤二氧化碳和氧化亚氮排放量的估算[J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (9): 1994-2000.
- [17] 陈述悦, 李 俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. *应用生态学报*, 2004, 15 (9): 1552-1560.
- [18] 罗天祥, 钟华平, 张宪洲, 等. 青藏高原农田生态系统碳平衡[J]. *土壤学报*, 2002, 39 (5): 636-642.
- [19] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24 (5): 913-918.
- [20] Hall A J, ConNor D J, Whitfield D M. Root respiration during grain filling in sun flower: the effects of water stress [J]. *Plant Soil*, 1990, 121: 57-66.
- [21] Domanski G, Knzyakov Y, Siniakina S V, et al. Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*) [J]. *Plant Nutr Soil Sci.*, 2001, 164: 381-38.
- [22] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42 (1): 9-15.
- [23] 蔡 艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J]. *生态学报*, 2006, 26 (12): 4273-4280.
- [24] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne*[J]. *Soil Biol.Biochem*, 2001, 33: 61-74.

## Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration

Li Hu, Qiu Jianjun<sup>\*</sup>, Wang Ligang

(*Institute of Natural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** Daily and seasonal variation of soil CO<sub>2</sub> emission fluxes were measured using close chamber method in typical crop fields in Huang-huai-hai Plain, the impacts of soil temperature and moisture on soil CO<sub>2</sub> emission flux were analyzed respectively, and the contribution of root respiration by using the DNDC ( DeNitrification – DeComposition ) model was also discussed. The results indicate that seasonal variations of CO<sub>2</sub> emissions from cotton, fallow and winter wheat–summer corn rotation field are all remarkable. The emission of CO<sub>2</sub> is relatively higher in summer and lower in other seasons, and it is consistent with the variation of air temperature. The maximum values of CO<sub>2</sub> emission fluxes are 2324 mg •m<sup>-2</sup> •h<sup>-1</sup> in winter wheat–summer corn rotation fields, 1111.9 mg •m<sup>-2</sup> •h<sup>-1</sup> in cotton fields and 436.07 mg •m<sup>-2</sup> •h<sup>-1</sup> in fallow fields. Analyses show that the CO<sub>2</sub> emission is exponentially correlated with the soil temperature at 5 cm, but there is no significant correlation between soil respiration and soil moisture. The fields under the same crop with higher soil organic matter content can emit more CO<sub>2</sub>. According to the DNDC simulated results, the contribution of maize root respiration to soil respiration at the whole growth stage varied from 91% to 93%, while the contributions of cotton and wheat root respiration were 70% and 80%, respectively. Soil N-application did not only influence the soil microbial respiration but also the root respiration.

**Key words:** CO<sub>2</sub>; Huang-huai-hai Plain; farmland soils; root respiration; soil microbial respiration