

# 长期施肥对冬小麦/夏玉米轮作下土壤呼吸及其组分的影响<sup>①</sup>

孟磊<sup>1,2</sup>, 丁维新<sup>3</sup>, 何秋香<sup>2</sup>, 蔡祖聪<sup>3</sup>

(1 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南儋州 571737; 2 海南大学农学院, 海南儋州 571737;

3 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)

**摘要:** 为阐明施肥对农田土壤呼吸的影响, 于 2002 年 6 月至 2003 年 6 月在河南封丘潮土上进行的长期试验地上测定了玉米/冬小麦轮作系统下的土壤呼吸, 分析了土壤呼吸与土壤水分和温度的关系, 并利用统计分析方法研究了土壤呼吸各组分的贡献。土壤呼吸变化与作物生长发育规律一致, 施肥通过影响作物的生长发育而对土壤呼吸产生影响。不同作物生长期, 根际呼吸、土壤原有有机质以及前作根茬和有机肥中碳对土壤呼吸的贡献不同。玉米期土壤有机质、根际呼吸、前作根茬和有机肥中的碳对土壤呼吸的平均贡献率分别为 70.19%、19.43% 和 10.37%; 而小麦生长期则分别为 23.75%、62.26% 和 14.11%。由于不同施肥处理的作物生长量、土壤有机质含量以及前作根茬和有机肥施入而进入的有机碳量不同, 造成土壤呼吸个体上存在着较大差异。土壤有机质的消耗主要发生在玉米生长阶段。

**关键词:** 土壤呼吸; 根际呼吸; 温度; 土壤水分

**中图分类号:** S153.6

土壤呼吸是陆地植物固定  $\text{CO}_2$  后又释放  $\text{CO}_2$  返回大气的主要途径, 也是土壤 C 库中 C 输出的主要途径<sup>[1]</sup>。全球每年因土壤呼吸排放到大气中的  $\text{CO}_2$ -C 量约为 68 Pg, 远高于因燃料燃烧而释放到大气中的 C 量<sup>[2-3]</sup>。因此, 土壤呼吸对大气  $\text{CO}_2$  浓度变化有着重要影响。土壤通过呼吸排放的  $\text{CO}_2$  是决定陆地生态系统 C 平衡的主要因子, 适当调控土壤呼吸, 不仅可以缓解大气  $\text{CO}_2$  浓度的增加, 还具有改善土壤肥力的作用。

土壤呼吸包括 3 个生物学过程(植物根系呼吸、土壤微生物呼吸及土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含 C 物质的化学氧化过程), 土壤动物呼吸量和化学氧化量非常微小, 往往忽略不计。土壤呼吸各组分对土壤总呼吸的贡献是定量评价植物和土壤 C 平衡的重要基础。目前, 在区分土壤呼吸各组分的研究方法上已获得一定的进展, 但由于这些方法在具体实践中或因破坏土壤结构而使测定结果存在着一定的偏差, 或因成本高、设备复杂等而难以推广<sup>[4]</sup>。这导致有关土壤呼吸各组分贡献率的研究结果少, 并可能偏离了实际值。因此土壤呼吸各组分区分方法的改进、完善和创新以及不同区分方法间的比较研究将是未来研究的一个重要方向。

过去, 土壤呼吸被作为土壤微生物活性、土壤肥

力乃至土壤透气性等土壤生物、化学和物理属性的指标<sup>[5-8]</sup>。近年来, 涉及到气候变化的土壤-植物系统中的土壤呼吸研究多见于森林生态系统<sup>[9-11]</sup>和草原生态系统<sup>[12-13]</sup>, 而农田生态系统土壤呼吸的研究鲜有报道。农田生态系统受人为利用和管理措施的较快影响, 其 C 库可在 5 ~ 10 年尺度上快速调节<sup>[14]</sup>。农田生态系统土壤呼吸应大不同于自然状态下的森林和草原生态系统。精确获得农田生态系统土壤呼吸及其各组分的贡献, 对于确定农田生态系统中 C “源”与 C “库”的关系, 解决 C “失汇”问题及目前全球变化有重要意义。

为此我们利用布置在华北平原的长期定位试验, 对玉米/冬小麦轮作下农田土壤呼吸进行为期 1 年的田间观测, 并就影响农田土壤呼吸因素进行了分析。同时, 利用统计分析软件探讨了土壤呼吸各组分的贡献率, 期望在土壤呼吸组分研究的方法上有所借鉴。试验地土壤类型、利用方式和施肥方式有很强的代表性和普遍性。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

长期定位试验始于 1989 年冬小麦播种时。试验设①化肥 N + 化肥 P + 化肥 K (简称 NPK, 下同), ②化肥 N + 化肥 P (NP), ③有机肥 (OM), ④有机

<sup>①</sup>基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB121101)、华南热带农业大学博士启动基金项目(Rndy0601)和热带作物栽培生理学重点开放室开放课题基金项目(KLOF0603)资助。

作者简介: 孟磊(1973—), 男, 安徽萧县人, 博士, 主要从事农田土壤碳氮循环与温室气体排放的研究。E-mail: menglei94@sohu.com

肥 N 和化肥 N 各半 (1/2OM); ⑤化肥 P+ 化肥 K (PK), ⑥化肥 N+ 化肥 K (NK) 和 ⑦不施肥 (CK, 对照) 7 个处理。其中, 小麦和玉米生长期 N 肥和 K 肥用量都一致, 分别为  $N 150 \text{ kg/hm}^2$  和  $K_2O 150 \text{ kg/hm}^2$ , P 肥用量分别为  $P_2O_5 75 \text{ kg/hm}^2$  和  $60 \text{ kg/hm}^2$ 。试验地的基本情况和施肥方法见参考文献[15]。

### 1.2 气体采集和分析

2002 年 6 月玉米种子播下后开始进行为期 1 年的土壤呼吸的检测。气体样品采用密闭箱法进行采集。采集时间、采样操作、 $CO_2$  分析、 $CO_2$  排放通量和土壤呼吸总量的计算见参考文献[16]。气体样品采集过程中使用数字温度计 (Model 2455, Yokogawa, Japan) 测定气温及表层土壤 5 cm 和 20 cm 处的温度。同时, 利用铝盒采集耕层土壤样品, 带回实验室, 利用烘箱法测定土壤含水量, 并利用下列公式转换成土壤充水孔隙率即 WFPS (soil water-filled pore space) 表示。

$WFPS\% = [(重量含水量 \times 土壤容重) / 总孔隙度] \times 100$   
式中, 总孔隙度 =  $[1 - (土壤容重 / 2.65)]$ , 2.65 为假定土壤颗粒密度。

### 1.3 土壤样品采集和测定

于土壤呼吸测定前, 采集耕层土壤 (0~20 cm), 风干、磨碎、过筛。利用重铬酸钾氧化-容量法测定土壤有机 C, 乘以 1.724 即为有机质含量。

### 1.4 有机 C 进入量计算

作物收割前期, 每小区多点采集植株样品。玉米采集 5 株, 小麦采集大约 1 kg, 按收获时的标准进行, 人工脱粒。籽粒、秸秆和根茬分开, 风干粉碎称量, 计算出籽粒、秸秆和根茬生物量。以此为基础, 根据小区收获后籽粒产量计算出根茬等生物量。测定根茬 C 含量,

计算出通过根茬进入土壤的 C 量。有机肥施入前测定其 C 含量, 乘以施用量即获得有机肥施用带入土壤的 C 量。二者 C 含量皆采用铬酸钾氧化-容量法进行。

### 1.5 数据分析

数据分析采用 SPSS 和 Microsoft Excel for Windows 2000 进行。

## 2 结果

### 2.1 土壤呼吸通量与作物生长发育的关系

土壤呼吸观测的 1 年中, 无作物生长时间共 27 天, 几乎全分布于玉米收获后。在比较土壤呼吸通量变化时, 把该期与玉米生长期放置一起。

参照玉米一生形态学和生物学特性, 把玉米生长期划分为出苗前、出苗-拔节、拔节-抽雄、抽雄-乳熟以及乳熟-成熟 5 个时期。土壤呼吸通量与作物生长发育有着密切的关系 (图 1)。旺盛生长时土壤呼吸通量高, 反之则低。

施肥造成土壤呼吸的差异。提供均衡养分供应的 OM、1/2OM、NPK 和 NP 处理, 除 OM 处理在出苗-拔节时略有降低外, 其它阶段土壤呼吸通量变化规律一致。养分供应不足的处理 NK、PK 和 CK 的变化较为一致。NK、PK 和 CK 处理的土壤呼吸通量变化滞后于养分供应充分的处理。从拔节-抽穗到抽穗-成熟阶段, 1/2OM、NPK 和 NP 处理的土壤呼吸开始逐渐降低, 而 NK、PK 和 CK 处理却仍维持原呼吸通量, 直至成熟期开始下降。

根据小麦生理发育特征和生物学特性把小麦一生划分为出苗前、出苗-三叶、三叶-拔节、拔节-抽穗、抽穗-开花、开花-籽粒形成以及成熟 7 个阶段。小麦生长期土壤呼吸通量明显低于玉米生长期呼吸通量 (图 1, 图 2)。小麦期土壤呼吸除显示出与小麦生长

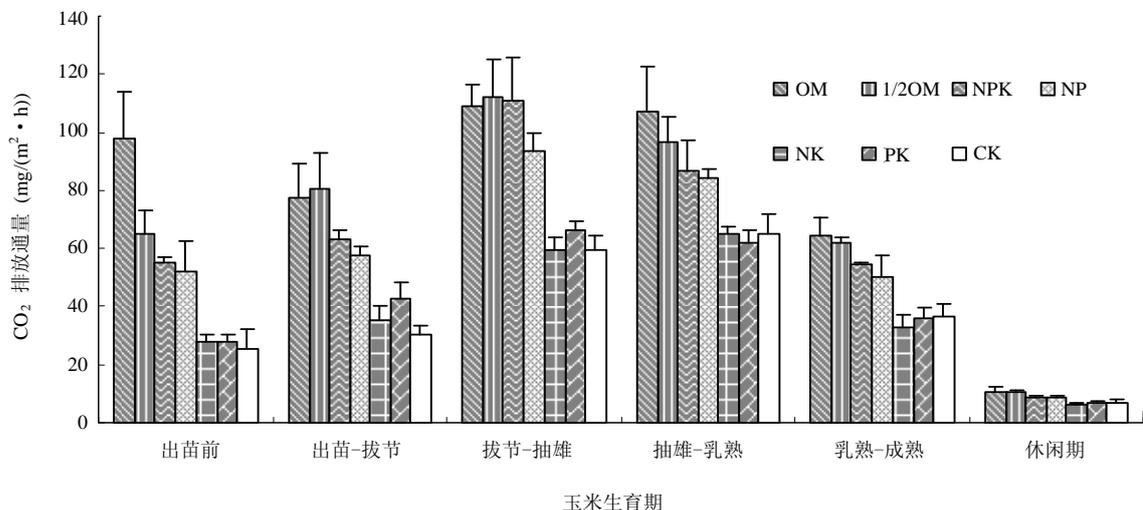


图 1 玉米生长期土壤呼吸通量

Fig. 1 Soil respiration flux during maize growth period

发育时期有着密切关系外,同时也显现出了施肥影响。整体上看,OM、1/2OM、NPK 和 NP 处理土壤保持着较为一致的土壤呼吸变化规律,而 NK、PK 和 CK 处理土壤呼吸亦基本一致,这些处理的土壤呼吸通量在小麦生长后期也表现出与玉米相似的变化,即滞后于养分供应充分的处理。

与玉米生长期相比,小麦生长期的土壤呼吸最大值没有出现于营养和生殖并行的拔节-抽穗期,而是出现在随后的生殖生长前期(抽穗-开花阶段)。NK、PK 和 CK 处理更是推迟至开花-籽粒形成阶段。另一点与玉米生长期不同的是小麦成熟期土壤呼吸降低的相对幅度小于玉米成熟期的。

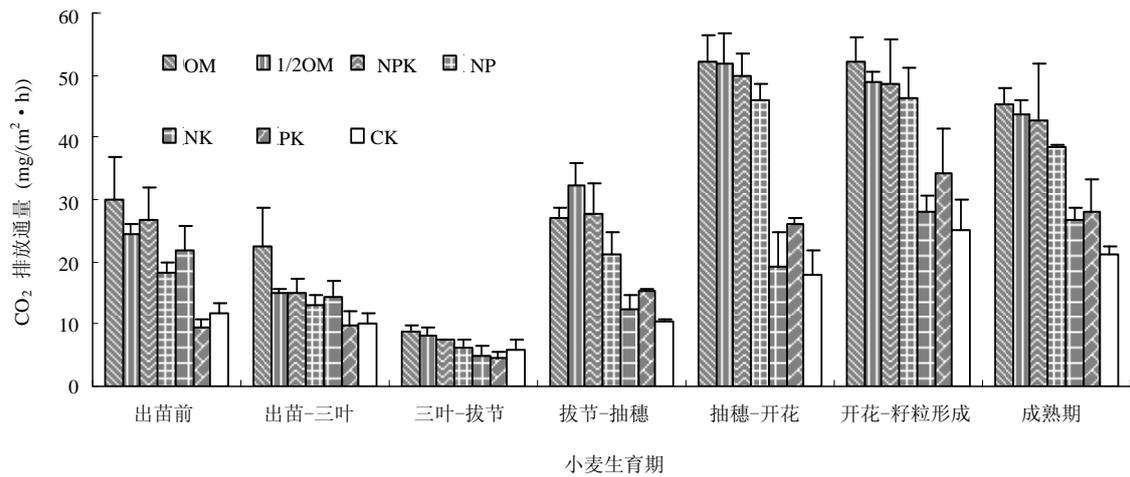


图 2 小麦生长期土壤呼吸通量

Fig. 2 Soil respiration flux during wheat growth period

## 2.2 土壤呼吸与土壤温度和土壤水分之间的关系

用抛物线方程拟合土壤呼吸与土壤温度和土壤水分之间关系,相关系数见表 1。玉米生长期土壤呼吸通量与土壤 WFPS 的关系密切。除 NP 和 CK 处理外,其余处理的土壤呼吸通量与 WFPS 之间的关系达到显著水平(表 1)。土壤呼吸与温度的关系中,除 PK 和 OM 处理与土壤 5 cm 和 20 cm 处温度的相关关系显著外,其他处理都没有达到显著水平。

小麦生长期土壤呼吸通量与土壤水分的相关性不显著,而与温度相关性极其显著。除 OM 和 NP 处理外,土壤呼吸通量与温度在 5 cm 处的相关系数高于 20 cm 处的,表明了土壤表层的温度(0~5 cm)较底层的温度对土壤呼吸的影响更重要。

## 2.3 土壤呼吸组分的构成

在整个生长期,土壤呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 总量相当大。我们根据土壤呼吸释放的 C 来源把它们分为如下 3 部分。①外源输入 C,指前茬作物根茬和施用有机肥中的 C;②生长的作物通过根系提供的,这部分 C 与根际呼吸的关系密切;③土壤有机质,是土壤微生物异养呼吸的 C 源。利用 SPSS 软件拟合出玉米和小麦生长期间的土壤呼吸量(R<sub>CO<sub>2</sub></sub>)与外源输入 C(IC)、

作物固定 C(PC)和土壤有机 C(SC)之间

表 1 土壤呼吸通量与土壤水分(WFPS)和温度(°C)的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between soil respiration flux and soil moisture and soil temperature

作物	处理	土壤水分	T <sub>5 cm</sub>	T <sub>20 cm</sub>
玉米	OM	0.447 *	0.499 *	0.470 *
	1/2OM	0.363 *	0.267	0.273
	NPK	0.367 *	0.289	0.316
	NP	0.257	0.205	0.260
	NK	0.418 *	0.316	0.325
	PK	0.350 *	0.363 *	0.401 *
	CK	0.319	0.220	0.229
小麦	OM	0.212	0.844 **	0.797 **
	1/2OM	0.132	0.757 **	0.682 **
	NPK	0.084	0.807 **	0.741 **
	NP	0.048	0.739 **	0.792 **
	NK	0.230	0.800 **	0.761 **
	PK	0.120	0.736 **	0.678 **
	CK	0.249	0.753 **	0.713 **

注:“\*”表示 p<0.05 水平显著,“\*\*”表示 p<0.01 水平显著。玉米期 n=34;小麦期 n=43。

的回归方程分别为:

$$\text{玉米生长期: } R_{\text{CO}_2} = 246.246 + 21.94\ln(\text{IC}) + 0.05938\text{PC} + 105.574\text{SC} \quad R^2 = 0.994$$

$$\text{小麦生长期: } R_{\text{CO}_2} = -39.964 + 101.08\ln(\text{IC}) + 0.113\text{PC} + 1055.683(1/\text{SC}) \quad R^2 = 0.990$$

根据上述两方程可计算出不同施肥处理下外源有机 C、作物根际呼吸以及土壤有机 C 对土壤呼吸总量的贡献(表 2)。总体上看,玉米生长期对土壤呼吸的贡献远大于小麦生长期。玉米和小麦生长期的土壤呼

吸构成上也存在着较大的差异。玉米生长期以土壤有机质的异养分解对土壤呼吸的贡献为主,平均贡献率达 70.19%,小麦生长期仅为 14.11%;但玉米生长期根际呼吸和外源输入 C 的贡献远小于小麦期,其根际呼吸和外源 C 的平均贡献率分别只有 19.43% 和 10.37%,而小麦期则达到 23.75% 和 62.26%。从贡献上比较,玉米生长期对土壤呼吸贡献顺序为土壤有机质>根际呼吸>外源有机 C;而小麦期为外源输入 C>根际呼吸>土壤有机质。

表 2 外源输入 C、根际呼吸和土壤有机 C 对土壤呼吸的贡献

Table 2 Contributions to soil respiration from exotic carbon, rhizosphere respiration and soil organic carbon

作物生长期	处理	土壤呼吸量 (kg/hm <sup>2</sup> )	外源输入 C (kg/hm <sup>2</sup> )	外源 C 贡献率 (%)	作物固定 C (kg/hm <sup>2</sup> )	根际贡献率 (%)	土壤有机质 (kg/hm <sup>2</sup> )	土壤贡献率 (%)
玉米生长期	OM	2278	4902	9.18	6590	19.26	13.86	72.02
	1/2OM	2134	3019	9.31	7700	24.22	11.51	64.37
	NPK	1880	972	9.24	7689	27.95	9.57	61.84
	NP	1727	959	10.18	7084	28.41	9.07	64.67
	PK	1229	189	11.70	2173	13.13	7.47	80.23
	NK	1161	122	11.52	2117	13.74	6.34	73.14
	CK	1142	108	11.47	1402	9.29	6.37	75.04
小麦生长期	OM	1316	4507	62.72	3672	30.60	13.86	5.62
	1/2OM	1313	2296	57.84	4286	35.81	11.51	6.78
	NPK	1224	732	52.72	3985	35.62	9.57	8.72
	NP	1039	723	61.65	3166	33.14	9.07	10.78
	PK	735	172	67.15	1252	18.25	7.47	18.24
	NK	679	94	63.80	406	6.38	6.34	23.15
	CK	610	90	69.96	372	6.47	6.37	25.50

注:贡献率计算为自变量在回归方程所在项的值占因变量与常数量的合并值的百分比。

施肥显著改变土壤性质和作物生长,组成土壤呼吸的各组分的贡献也因土壤有机质含量、作物固定C和外源输入C的不同而存在着差异。如玉米期,产量低的 NK、PK 和 CK处理的根际呼吸对土壤呼吸的贡献率分别为 13.13%、13.74% 和 9.29%,而产量较高的 NPK 和 NP 处理的贡献率则分别达到 27.95% 和 28.41%。小麦生长期也是如此,NK、PK 和 CK 处理的根际呼吸对土壤呼吸的贡献率分别为 18.25%、6.38% 和 6.47%,而 NPK 和 NP 处理则达到 35.26% 和 33.14%。因此,产量差异悬殊的前提下,虽然养分胁迫促进其土壤呼吸强度的增加<sup>[17]</sup>,但产量低的处理通过根系分泌到土壤的C的数量少于高产的土壤,根际呼吸对土壤呼吸的贡献率也相对小于产量高的处理。而土壤原有机质对土壤呼吸的贡献率却相反,产量低的处理贡献率高于产量高的处理。如玉米期,产量低的NK、PK 和 CK 处理的贡献分别为 80.23%、

73.14% 和 75.04%,高于 NPK 和 NP 处理的 61.84% 和 64.67%。小麦期也是如此,NPK 和 NP 处理的贡献率分别为 8.72% 和 10.78%,低于 NK、PK 和 CK 处理的 18.24%、23.15% 和 25.50%。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤呼吸变化

土壤呼吸主要由根际呼吸和微生物分解土壤有机质和施入土壤有机物料的异养呼吸构成。根际呼吸包括根系呼吸和微生物对根系分泌物、根系凋落物和死亡根的分解<sup>[18]</sup>。土壤呼吸随作物的生长发育呈现强弱变化规律是主要由组成土壤呼吸的各组分综合贡献的外在体现。尽管不同施肥处理之间土壤呼吸通量的高低存在着差异(图 1,图 2),但土壤呼吸通量与作物生长发育呈现出一致的关系。然而在图 2 中,小麦生长期的抽穗-籽粒形成阶段最高,而不是出现在作物生

长最旺盛期, 作物固定C输入土壤最多的拔节期<sup>[19]</sup>。表2的结果可解释该现象, 即由于小麦期土壤呼吸受温度的显著影响。在小麦拔节-抽穗期间, 土壤温度虽逐渐升高, 但大都低于15℃以下, 其中一半以上天数的土壤温度低于10℃以下<sup>[20]</sup>, 也就使得该阶段土壤呼吸处于较低水平。

玉米生长阶段的温度则对土壤呼吸抑制作用甚小, 故土壤呼吸变化与玉米生长发育表现出很好的一致性。这是由玉米生长期适宜于土壤呼吸的温度决定的, 玉米期间土壤温度一般在25℃上下变动<sup>[20]</sup>。

当环境因子不限制微生物的活性时, 土壤原有机C含量是影响土壤CO<sub>2</sub>排放通量的重要因子。土壤呼吸与土壤有机C含量高度正相关<sup>[21-22]</sup>。因此尽管OM处理的生物量低于NPK处理, 但呼吸速率高于NPK处理。这在作物生长前期和后期表现得更为明显(图1)。外源C的输入(根茬和有机肥), 以及随后的土壤翻耕为土壤呼吸营造了很好的呼吸条件, 使得OM和1/2OM处理在出苗前有较高的土壤呼吸。在玉米和小麦播种时, 温度适宜<sup>[20]</sup>, 以根茬形式进入土壤的C中, 易分解部分能快速分解<sup>[23]</sup>, 因此, 根茬中的C对土壤呼吸的贡献在生长前期贡献较大, 当然其后的翻耕对土壤呼吸的增加也有很大的作用<sup>[24]</sup>, 这可解释玉米和小麦出苗前的土壤呼吸通量远高于没有作物生长的休闲期。

养分供求比例严重失衡, 最终导致植物体内营养失调, 而使作物生育期延长<sup>[25]</sup>。NK、PK和CK处理等不平衡或养分缺乏的施肥处理, 其作物的生育期延迟了, 其中玉米延长了近10天, 小麦延长了7天。正常供应养分的植物的生长发育阶段的划分不适应于这些处理。这些处理的土壤呼吸通量变化滞后于OM、1/2OM、NPK和NP等处理, 这并不是说明NK、PK和CK处理的土壤呼吸通量变化与生长发育不一致, 而是其土壤呼吸通量与作物生长发育保持一致的具体体现。由于施肥影响了与土壤呼吸相关的作物生长、发育以及土壤有机C含量等, 才使得土壤呼吸具有相似的变化规律, 又存在着处理间的差异。

### 3.2 环境变化对微生物活性的影响

土壤呼吸与土壤水分和温度间的相关性因种植作物不同而异。玉米生长期, 大多处理的土壤呼吸通量与土壤水分之间相关性显著, 而与温度间的相关性不显著(表1)。这是由玉米生长期间的土壤水分决定的。玉米生长期间, 土壤水分蒸腾作用剧烈, 加上频繁的降雨, 使得土壤水分在超过微生物永久萎蔫点或超过田间持水力之间变化, 从而表现出了水分和土壤呼吸之间存在着的显著相关关系<sup>[26]</sup>。而玉米生长时期的温

度在25℃上下浮动<sup>[20]</sup>, 不成为抑制微生物活动的主要因素。

小麦生长期恰相反, 土壤呼吸通量只与温度之间的相关性显著。根据统计, 小麦生长期中, 有长达110天的时间温度低于10℃, 而85天的温度在10℃~20℃之间<sup>[20]</sup>。12℃条件下有机C分解比较缓慢<sup>[27]</sup>, 而小麦在3℃以下时, 小麦生长发育基本停止<sup>[28]</sup>。在小麦生长期很长时间内(如三叶-拔节阶段)各处理土壤呼吸没有差异, 并基本接近停止(图2)。如此低的呼吸通量掩盖了土壤水分的作用。温度较低的情况下, 温度升高将大大促进有机C分解<sup>[29]</sup>。小麦生长期, 正经历了高-低-高的温度变化过程<sup>[20]</sup>, 对土壤呼吸的作用则表现为适宜-抑制-适宜, 这使得小麦生长期间的土壤呼吸与温度关系密切。土壤呼吸与水分的关系不显著。但不能就此推断土壤水分对土壤呼吸没有影响, 后期温度升高时, 土壤呼吸与土壤水分尽管没达到统计学上的显著相关水平, 但仍表现出一定的正相关。由此可推断, 某一因素不成为土壤呼吸的限制因素时, 其与土壤呼吸之间的相关性就难于达到显著水平。也就是说, 在玉米生长期, 土壤温度不成为限制土壤呼吸的因素, 土壤呼吸主要受土壤水分的控制。小麦生长期间, 温度和水分都是限制土壤呼吸的因素, 二者对土壤呼吸共同作用。

### 3.3 土壤呼吸组分构成

Kuzyakov<sup>[30]</sup>利用示踪法研究植物-土壤系统中C的转化, 认为小麦输送大约20%~30%的同化C到地下, 其中一半作用于根系生长, 1/3作用于根际呼吸, 而玉米在整个生长期中根际呼吸的CO<sub>2</sub>等于作物净光合产物的18%~25%<sup>[31]</sup>。从同化产物分配到根际呼吸的比例来看, 玉米高于小麦。同时玉米作为C<sub>4</sub>植物, 生物量高于小麦。针对于同一施肥处理, 玉米生长期的根际呼吸高于小麦生长期, 表2的根际呼吸的贡献量(贡献率×呼吸量)上给以验证。

根际呼吸由植物光合产物控制<sup>[32]</sup>, 统计分析的结果表明土壤有机质(X)与土壤呼吸量(Y)之间具有显著的抛物线关系。因此, 可以用线性方程进行多元回归拟合。由于回归方程的截距不为零, 以此计算各组分对土壤呼吸的贡献时会产生一定的偏差。但是, 该方程结果仍可给出土壤呼吸组分的相对贡献, 因此是有意义的。土壤有机质含量一致, 但对土壤呼吸的贡献量在玉米期远高于小麦期, 然而玉米期外源输入C量多于小麦期, 但外源C对土壤呼吸贡献量要小于小麦期, 但由于根际呼吸和土壤原有机质贡献, 使得玉米期土壤呼吸高于小麦期。

拟合方程计算的结果表明, 不同处理的土壤呼吸

的组成存在着差异。这由图 1、图 2 的土壤呼吸通量变化, 以及土壤呼吸量(表 2)和作物产量<sup>[33]</sup>等所证实。如玉米生长期, OM处理 的生物量少于 1/2OM处理的, 但呼吸量却和 1/2OM 处理一致, 主要是由于出苗前高的土壤呼吸弥补了根际呼吸的不足。同样 1/2OM处理 和 NPK 及 NP处理的生物量一致, 但由于 1/2OM处理外源C的加入以及土壤有机质的分解, 而使 1/2OM处理土壤呼吸较高。在小麦期则不同, 尽管 OM处理输入的C最多, 1/2OM处理次之, 但呼吸量与 NPK 处理没有显著差异, 这是长时间的低温限制了土壤有机C的分解。1/2OM 和 NPK处理有着几乎相同的生物量, 由此可以推断土壤呼吸以根际呼吸的贡献大。因此, 土壤有机质的消耗主要发生在玉米生长阶段。

土壤呼吸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。根际呼吸由植物光合产物控制, 而异养呼吸则受土壤有机质和还田的作物根茬及施入的有机肥的影响。因此, 二者C源不同, 对全球变化的作用亦不相同。根据 Hanson 等<sup>[34]</sup>的报道, 根际呼吸占土壤呼吸的贡献可以低到 10%, 也可以高到 90%, 这取决于植物类型和生长季节。我们通过统计方法获得的根际呼吸的贡献率在玉米生长期和小麦生长期分别为 19.43% 和 23.75% 的结果与之相符。该研究结果也刚好落到利用 C 示踪技术获得的根际呼吸的贡献在 19% ~ 80% 的范围<sup>[35]</sup>。因此, 利用统计分析方法获得的土壤呼吸组分在一定程度上是可行的。

#### 参考文献:

- [1] Schlesinger WH, Andrews JA. Soil respiration and the global cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7-20
- [2] Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climates. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99
- [3] Fernandez II, Son Y, Kraske CR. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 1115-1121
- [4] 金钊, 董云社, 齐玉春. 综论土壤呼吸各组分区方法. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 22-33
- [5] Anderson JO, Domsch KH. Measurement of bacterial and fungal contributions to respiration of selected agricultural and forest soils. *Can. J. Microbiol.*, 1975, 21: 314-322
- [6] Macfadyer A. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration. *Soil Bio. Biochem.*, 1970, 2: 9-18
- [7] Neilson JW, Pepper IL. Soil respiration as an index of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 428-432
- [8] Reiners WA. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. *Ecology*, 1968, 49: 47-483
- [9] Jones JB, Mulholland PJ. Carbon dioxide variation in a Hardwood forest stream: An integrative measure of whole catchment soil respiration. *Ecosystems*, 1998, 1(2): 183-195
- [10] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Bio. Biochem.*, 2000, 32(11/12): 1625-1635
- [11] Lusk CH, Reich PB. Relationships of leaf dark respiration with light environment and tissue nitrogen content in Juveniles of 11 cold-temperate tree species. *Oecologia*, 2000, 123: 318-329
- [12] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜, 李凌浩. 内蒙古锡林河流域大柞茅草原土壤呼吸和凋落物分解的CO<sub>2</sub>排放速率研究. *植物学报*, 1999, 41: 645-650
- [13] 曹广民, 李英年, 张金霞, 赵新全. 高寒草垫不同土地利用格局土壤CO<sub>2</sub>的释放量. *环境科学*, 2001, 22(6): 14-19
- [14] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 代静玉, 周运超, 张平究. 中国土壤有机碳库量与耕地土壤碳固定动态的若干问题. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 609-618
- [15] 钦绳武, 顾益初, 朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报. *土壤学报*, 1998, 35(3): 367-375.
- [16] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸的影响. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 687-692
- [17] Bloom AJ, Sukrapanna SS, Warner RL. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiol.*, 1992, 99: 1294-1301
- [18] Kuzyakov Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2002, 165: 382-396
- [19] Swinnen J, Van Veen JA, and Merckx T. Carbon fluxes in the rhizosphere of wheat and spring barley with conventional vs integrated farming. *Soil Bio. Biochem.*, 1995, 27(6): 811-820
- [20] Meng L, Ding WX, Cai ZC. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub>O emission, soil quality and crop productivity in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 2037-2045
- [21] Fang C, Moncrieff JB. A model for soil CO<sub>2</sub> production and transport 1: Model development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95: 225-236
- [22] Priess JA, Koning GHJ de, Veldkamp A. Assessment of interactions between land use and carbon and nutrient fluxes in Ecuador. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2001, 85: 269-279
- [23] Murayama S. Decomposition kinetics of straw saccharides and synthesis of microbial saccharides under field conditions. *Journal*

- of Soil Science, 1984, 35: 231-242
- [24] Reicosky DC and Lindstrom KY. Fall tillage method: Effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.*, 1993, 85: 1237-1243
- [25] 余海英, 李廷轩, 周建民. 设施栽培中逆境对园艺作物生长发育及其病害的影响. *土壤通报*, 2006, 37(5): 1027-1032
- [26] Kucera CL, Kirkham DR. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecolgy*, 1971, 52: 912-915
- [27] 黄耀. 地气系统碳氮交换—从实验到模型. 北京: 气象出版社, 2003
- [28] 彭永欣, 郭文善, 严六零主编. 小麦栽培生理. 南京: 东南大学出版社, 1992
- [29] Kirschbaum MUF. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Bio. Biochem.*, 1995, 27: 753-760
- [30] Kuzyakov Y. Tracer studies of carbon translocation by plants from the atmosphere into the soil ( A review). *Eurasian Soil Science*, 2001, 34(1): 28-42
- [31] Philippe Rochette and Lawrence B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 466-474
- [32] Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396: 570-572
- [33] 蔡祖聪, 钦绳武. 作物 N、P、K 含量对平衡施肥的诊断意义. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 473-478
- [34] Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, Andrews JA. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115-146
- [35] Hustch BW, Augustin J, Merbach W. Plant rhizodeposition – an important source for carbon turnover in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2002, 164: 397-407

## Effect of Long-Term Fertilization on Soil Respiration Flux and Its Components Under Winter Wheat/Summer Maize Rotation

MENG Lei<sup>1, 2</sup>, DING Wei-xin<sup>3</sup>, HE Qiu-xiang<sup>2</sup>, CAI Zu-cong<sup>3</sup>

(1 Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou, Hainan 571737, China;

2 College of Agriculture, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China;

3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

**Abstract:** To understand the influence of fertilization on soil respiration, a long-term experiment, in a fluvo-aquic soil in Fengqiu County, Henan Province, was conducted to monitor soil respiration under the rotation system of winter wheat/summer maize from June 2002 to June 2003. The relationship between soil respiration and soil water and temperature, and the contributions of soil respiration components were analyzed by statistic method. Fertilization influenced crop growth and caused the differences in soil respiration among the plots under different fertilization treatments, but the seasonal variation of soil respiration nearly coincided with crop growth. Contributions to soil respiration from rhizosphere respiration, heterotrophic respiration of intrinsic organic matter and decomposition of organic carbon in stubble of pre-crop and manure were different in different crop growth periods. The average contributions during maize growth season from the rhizosphere respiration, heterotrophic respiration of intrinsic organic matter and decomposition of organic carbon in stubble of pre-crop and manure were 19.43%, 70.19% and 10.37%, respectively, whereas 62.26%, 23.75% and 14.11% during wheat growth season, respectively. There were enormous differences in soil respiration among different fertilization treatments. Consumption of soil organic matter occurred mainly in maize growth period.

**Key words:** Soil respiration, Rhizosphere respiration, Temperature, Soil water content