

玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节动态 与碳收支初步估算*

韩广轩¹ 周广胜^{2**} 许振柱²

(1.中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所 烟台 264003;

2.中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室 北京 100093)

摘要 从2005年4月底到9月底对玉米农田生态系统的土壤呼吸作用进行了连续观测,结果表明:2005年玉米生长季土壤呼吸速率均值为 $3.16 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值为 $4.77 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在7月28日,最小值为 $1.31 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在5月4日。通过建立土壤呼吸作用速率与玉米根系生物量的回归方程,对土壤异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例进行间接估算。玉米生长季中,土壤异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例在36.4%~56.9%之间波动,均值为45.5%。假定玉米果实和秸秆中的碳在收获期间未从农田中转移走,2005年整个生长季中玉米农田生态系统的碳收支为 $-1127.0 \text{ g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2}$,碳交换速率在 $0.52 \sim -18.05 \text{ g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间波动。玉米生长初期,玉米农田生态系统表现为碳的弱源;玉米播种后35 d一直到收获,玉米农田生态系统表现为碳汇。

关键词 土壤呼吸 季节动态 土壤异养呼吸 碳收支 碳汇 碳源 玉米农田生态系统
中图分类号: S944 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2009)05-0000-06

Seasonal dynamics of soil respiration and carbon budget of maize (*Zea mays L.*) farmland ecosystem

HAN Guang-Xuan¹, ZHOU Guang-Sheng², XU Zhen-Zhu²

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2. State Key Laboratory for Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract In this investigation, we continually measured the soil respiration in a maize farmland ecosystem from late April to late September 2005. Soil heterotrophic respiration is indirectly evaluated by established linear regression relations between soil respiration rates and dry root weights. Soil respiration fluctuates greatly during the growing season of 2005. The mean soil respiration rate is $3.16 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; with a maximum of $4.77 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ on July 28 and a minimum of $1.31 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ on May 4. The proportions of soil heterotrophic respiration to soil respiration are 45.5%, with a range of 36.4%~56.9%. Assuming that all sequestered C in the grains and straws is not removed from the fields by harvest, net carbon budget of the maize ecosystem is $-1127.0 \text{ g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2}$, with a range of carbon exchange rate of $0.52 \sim -18.05 \text{ g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Maize ecosystems serve as a minor source of C in early growth stages of maize, and a C-sink from 35 days after planting lasting until harvest.

Key words Soil respiration, Seasonal dynamics, Soil heterotrophic respiration, Carbon budget, Carbon source, Carbon sink, Maize farmland ecosystem

(Received July 29, 2008; accepted Dec. 11, 2008)

全球变暖是目前人类面临的主要环境问题。在学、生物科学和社会科学共同关注的3个主题之一^[1]。陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组

* 国家杰出青年基金项目(40625015)和国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418507-1)资助

** 通讯作者:周广胜(1965-),男,博士,研究员,主要从事全球生态学、数量生态学、大气科学等研究。E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn
韩广轩(1978-),男,博士,副研究员,主要从事植物生态学、生态系统碳循环研究。E-mail: gxhan@yic.ac.cn

收稿日期:2008-07-29 接受日期:2008-12-11

成部分,也是受人类活动影响最大的部分。人类活动对陆地生态系统碳循环的影响和干扰日趋严重,这正是当今和未来全球气候变暖的根源^[2]。众多研究表明,陆地生态系统是一个重要的汇,在减少全球碳收支不平衡中起着关键作用^[3]。由于实测资料的缺乏,使得陆地生态系统碳汇强度的量化仍存在很大不确定性。因此,精确测定土壤-植被-大气间的碳通量,对揭示和理解区域范围内碳的源汇过程具有重要意义和现实价值^[4]。

土壤呼吸作用是土壤碳库向大气层碳库输入的主要途径,包括 3 个生物学过程(植物根呼吸、土壤微生物呼吸及土壤动物呼吸)和 1 个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用)。土壤呼吸作用与全球变暖之间存在着正反馈作用,土壤呼吸作用的微小改变将显著改变大气 CO₂ 浓度和土壤碳的累积速率,进而加剧或减缓全球变暖^[5,6]。全球变暖有利于增强土壤呼吸作用,释放更多的 CO₂,进而加剧全球变暖的趋势^[7,8]。因此,测定不同陆地生态系统土壤呼吸速率及其时空波动,阐明土壤 CO₂ 释放量的环境因子和人为因子的影响,对于全球碳素平衡预算和估计全球变化的潜在效应是最为基本的数据^[9-12]。

农田生态系统受到强烈的人为干扰,是全球碳库中最活跃的部分,通常认为许多农田生态系统有吸收大量碳从而提高土壤固碳能力的潜力^[13-15]。中国是一个农业大国,农业用地面积约为 1.33×10⁷ km²,占我国国土总面积的 14%^[16],农田生态系统土壤呼吸作用在我国生态系统碳循环中具有重要地位。然而与其他生态系统相比,农田生态系统的土壤呼吸作用和碳收支研究还较少。本文基于东北玉米农田生态系统土壤呼吸作用和环境因子全生长季的观测资料,分析水热因子、生物量、土壤因子与土壤呼吸作用的关系,阐明玉米生物量和净第一性生产力(NPP)的季节动态以及玉米生长季土壤呼吸作用的季节动态,并估计了土壤异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例,在此基础上明确玉米农田生态系统的碳收支状况。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

试验在中国气象局沈阳大气环境研究所锦州农田生态系统野外观测站进行。该试验站位于 41°49'N, 121°12'E,海拔 17 m,属暖温带季风性气候,多年平均气温 9.1℃,玉米生长季(4~9月)平均气温 20.1℃,非生长季平均气温 0.5℃,多年平均降雨量 568.8 mm。试验田土壤为典型棕壤,土壤 pH 值 6.3,有机质 6~9 g·kg⁻¹,全氮 0.69 g·kg⁻¹。玉米品种为“丹

育 47”,氮肥品种为碳酸氢铵,玉米生长季用量为 300 kg(N)·hm⁻²,在播种前一次性施入田中。

1.2 土壤呼吸作用测定

用 Li-6400 便携式气体分析系统(Li-cor, Lincoln, NE, 美国)和 Li-6400-09 土壤呼吸室测定土壤呼吸作用。为减少对土壤表层的干扰,土壤呼吸室放置在 PVC 圈(直径 10 cm,高度 5 cm)上,PVC 圈插入土壤 1~2 cm,在土壤测定的前一天安置。为研究土壤呼吸作用的空间异质性,根据距离玉米植株的远近不同,每个小区共安置 15 个土环,土环有 3 种位置:株间(距玉米 8~15 cm)、行间(距玉米 20~30 cm)和靠近玉米处(距玉米 1~8 cm),每种位置分别安放 5 个土环。土壤呼吸速率测定主要在玉米生长季进行,具体时间为 4~9 月。玉米生长季每月对土壤呼吸作用至少进行 1 次观测,时间为 6:00~18:00,每 1 h 采样 1 次,每天共测定 13 次,13 次土壤呼吸速率的平均值代表该样方土壤呼吸作用的日均值。在土壤呼吸作用测定的同时,土环附近的 10 cm 土壤温度通过土壤热电偶探针(LI-6400-09 TC, LiCor, 美国)测定,土壤湿度(12 cm 和 20 cm 土层)通过便携式土壤水分测定仪(Hydrosense, Campbell, 美国)测定。另外,观测样地安置的小气候梯度观测系统(HMP45C, Vaisala, Helsinki, 芬兰)为 24 h 全天候观测,主要观测指标有风向、风速(2 m 和 4 m 两个高度),空气温度、湿度(2 m 和 4 m 两个高度),光合有效辐射、净辐射及土壤剖面上 7 个层次上的土壤温度(5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、30 cm、40 cm 和 60 cm)等。

1.3 玉米地上和地下生物量测定

每 20 d 左右在样方中一次性采集完整的玉米植株地上鲜样 5 株,同时,挖取植株下的土壤样方(15 cm 宽×30 cm 长×30 cm 深),挑选土壤中的植物根系。植株地上和地下鲜样使用通风高温烘炉在 105℃下杀青,80℃下烘干至恒重。样地中玉米植株密度为 5.13 株·m⁻²,单株玉米的重量乘以植株密度即为玉米的生物量。利用收获法计算玉米的净初级生产力(NPP),两次采样间的重量差即为该时段内植被的 NPP^[17]。

$$NPP = \Delta B = \frac{B_2 - B_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

式中,NPP 为净初级生产力(g·m⁻²·d⁻¹),B₁、B₂为 t₁、t₂时刻的生物量(g·m⁻²)。

为评价玉米根系生物量对土壤呼吸作用的影响,在土壤呼吸作用测定完毕后,用与土环直径等同的土钻取出每个土环中的土壤圆柱(直径为 10 cm,深度为 20 cm)12~15 个。用水冲洗土壤圆柱并过 0.2

mm 铁筛, 挑选出玉米根系(直径 2 mm), 80 下烘干至恒重并称重。

1.4 数据处理

运用线性回归分析方法分析土壤呼吸速率与根系生物量之间的关系; 用非线性回归方法分析碳收支(NEP)与玉米栽种天数的关系。所有的数据分析基于统计分析软件 SPSS 11.0 (SPSS, Chicago, IL, 美国) 完成。

2 结果与分析

2.1 玉米生物量和净第一性生产力(NPP)的季节动态

图 1 为玉米生长季生物量的动态变化。玉米生长初期, 玉米地上和地下生物量缓慢增加, 地上生物量自 7 月初增长迅速, 9 月底达到最大值 2 477 g · m⁻²。地下生物量的季节动态不同于地上生物量, 地下生物量自玉米播种后缓慢增加, 8 月初达到最大值 414 g · m⁻², 之后逐渐减小直到玉米收获。玉米总生物量的季节动态与地上生物量一致, 收获时的最大生物量为 2 664 g · m⁻²。玉米生长季 NPP 呈单峰型, 生长初期和末期较小, 生长中期(7 月中旬至 8 月中旬)较大, 最大值为 42.3 g · m⁻² · d⁻¹。

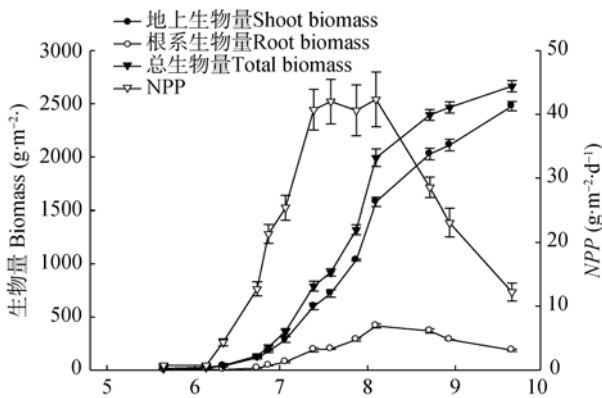


图 1 2005 年玉米生长季地上部分生物量、地下部分生物量、总生物量和净第一性生产力(NPP)的季节变化
Fig. 1 Seasonal variations of averaged shoot biomass, root biomass, total biomass and NPP of maize during the growth season in 2005

2.2 土壤呼吸作用的季节动态

2005 年玉米生长季中, 土壤呼吸作用波动较大, 呈明显的单峰型, 土壤呼吸速率的波动趋势与土壤温度基本一致(图 2)。玉米播种时(5 月 4 日)土壤呼吸速率最低, 为 1.31 μmol · m⁻² · s⁻¹, 这是由于这段时间玉米处于出苗期, 土壤呼吸作用主要来源于土壤微生物呼吸; 同时, 这段时间温度较低, 较低的地温抑制了土壤微生物的活性, 减小了土壤呼吸速率。随着地温升高和作物生长, 土壤呼吸速率波动上升, 7 月 28 日达到最大值 4.77 μmol · m⁻² · s⁻¹。该

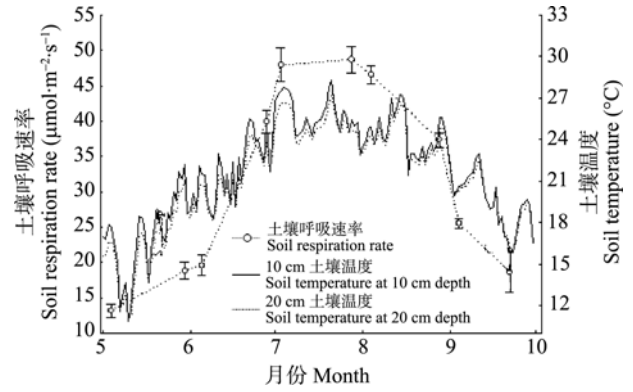


图 2 2005 年玉米生长季土壤呼吸作用的季节变化
Fig. 2 Seasonal variations of soil respiration during the growth season of maize in 2005

时期为玉米的开花期, 植物生长旺盛, 植物根系呼吸作用强度增大; 同时, 7 月为温度、降水均较高的月份, 良好的水热条件促进了微生物呼吸作用。在玉米生育后期, 随着气温降低和玉米生理活性降低, 土壤呼吸速率逐渐下降直到收获。玉米整个生长季土壤呼吸速率均值为 3.16 μmol · m⁻² · s⁻¹。

2.3 土壤呼吸作用的区分

回归分析表明, 在空间尺度上, 土壤呼吸作用与根系生物量呈显著线性关系^[18]:

$$y = ax + b \quad (2)$$

式中, y 为土壤呼吸作用速率[μmol (CO₂) · m⁻² · s⁻¹], x 为玉米根系生物量(g · m⁻²)。

方程(2)中, 外推到根系生物量 x 为 0 时, 截距 b 值为土壤微生物呼吸速率, 即土壤异养呼吸。

由表 1 可以看出, 在玉米生长季中, 土壤异养呼吸作用在 1.11~1.96 μmol · m⁻² · s⁻¹ 之间, 波动较小。土壤呼吸作用中土壤异养呼吸作用所占比例为两边高中间低, 呈马鞍型, 波动趋势与土壤温度基本一致。玉米生长初期(6 月 5 日)异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例约为 56.9%; 随着玉米根系生物量的增加, 其所占比例逐渐降低; 玉米生长后期其所占比例缓慢上升, 9 月下旬达到 51.4%(表 1)。用直接插值法求出其他测定天数土壤呼吸作用中根系呼吸作用所占比例, 从而得到 2005 年玉米生长季土壤异养呼吸作用季节动态(图 3)。

2.4 玉米农田生态系统碳收支估算

假定玉米果实和秸秆中的碳在收获期间没有从农田中转移走, 则玉米农田生态系统碳收支(NEP)由 NPP 和 R_h 决定:

$$NEP = NPP - R_h \quad (3)$$

采集某一时段内的地上和地下生物量, 两次采样间的重量差即为该时段内的净初级生产力:

$$NPP = \Delta B / \Delta D \quad (4)$$

表 1 2005 年玉米生长季土壤异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例

Tab. 1 Contribution of soil heterotrophic respiration to soil respiration during the maize growing season in 2005

测定日期(月-日) Sampling date (month-day)	土壤呼吸作用 $R_t (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	土壤异养呼吸作用 $R_h (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	根系呼吸作用 $R_r (R_t - R_h, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	比例 Proportion (R_h/R_t , %)
06-05	1.95	1.11	0.84	56.9
06-28	4.33	1.58	2.75	36.5
07-28	5.39	1.96	3.43	36.4
08-28	3.92	1.82	2.10	46.4
09-22	2.80	1.44	1.36	51.4

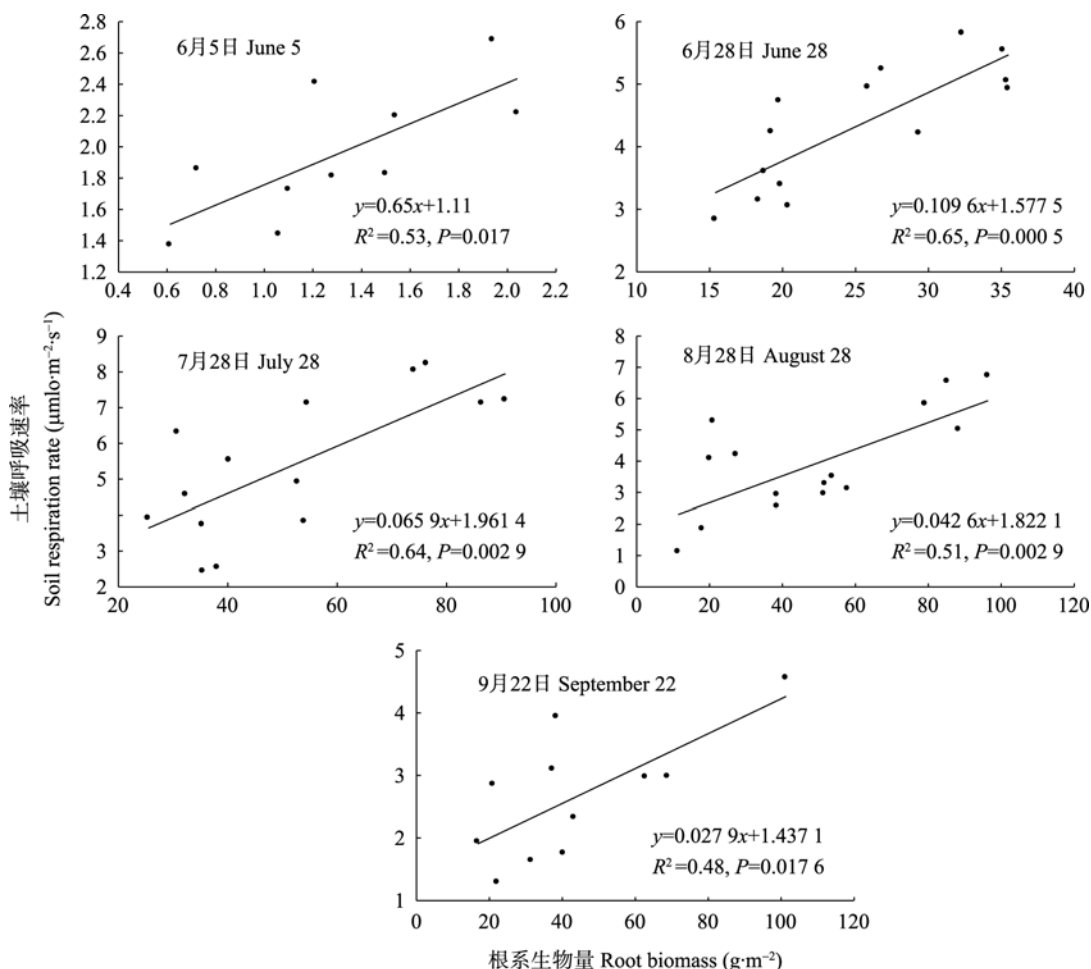


图 3 玉米生长季土壤呼吸作用速率与玉米根系生物量的线性关系

Fig. 3 Linear relationships between soil respiration rate and root biomass of maize during growing season in 2005

式中, ΔB 为两次采样的生物量重量差, 单位为 $\text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; ΔD 为两次采样的间隔天数。为直接对土壤呼吸作用释放的碳和 NPP 吸收的碳进行比较, 本研究假定玉米植株的碳含量为 0.47。

从 5 月 1 日到 6 月 5 日, 玉米农田生态系统为碳的弱源, 其碳排放速率为 $0.52\sim 0.87 \text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 玉米播种后约 36 d 一直到收获, 玉米农田生态系统表现为碳汇, 最大吸收速率为 $18.05 \text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 出现在 8 月 4 日, 此时为玉米灌浆期。

通过回归方法分析 NEP 与玉米栽种天数的关

系, 玉米生长季每天的 NEP 与玉米栽种天数可由方程(5)表示:

$$y = 5.798 \times 10^{-5} x^3 - 0.0112 x^2 + 0.3699 x - 0.2128 \quad (r^2 = 0.93, P < 0.001) \quad (5)$$

式中, y 为 $NEP[\text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}]$, x 为播种后天数。根据方程(5), 可以估算出 2005 年整个生长季玉米农田生态系统的 NEP 为 $-1127.0 \text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2}$, 碳交换速率在 $0.52\sim 18.05 \text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间波动, 主要集中在 7 月中旬到 9 月中旬, 占全生长季碳交换量的 74%(图 4)。

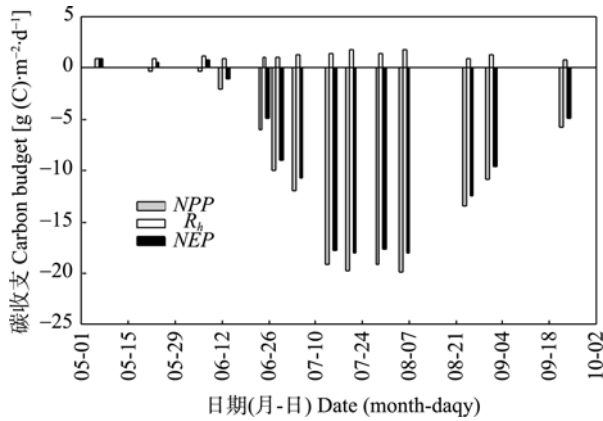


图 4 2005 年 5 月 1 日至 9 月 26 日玉米农田生态系统净生态生产力(NEP)

Fig. 4 Estimated net ecosystem productivity (NEP) for the maize ecosystems from May 1 to September 26, 2005

3 结论与讨论

3.1 土壤呼吸作用的区分

土壤异养呼吸是生态系统碳库的主要损失途径,是陆地生态系统碳平衡的重要分量之一,与净初级生产力(NPP)共同决定了陆地生态系统的碳收支(NEP)状况。为精确估算生态系统中 CO_2 动态过程,必须对自养呼吸作用和异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例进行量化^[19]。然而在野外条件下区分土壤呼吸作用仍然比较困难^[10]。目前,我国野外区分农田土壤呼吸作用的方法主要有两种,即成份综合法和根系生物量外推法。成份综合法是将土壤呼吸作用分为根系、无根土壤和凋落物等不同组成部分,分别测定不同组分释放的 CO_2 量^[20]。根系生物量外推法是通过建立土壤呼吸作用速率与根系生物量的回归方程,外推到根系生物量为 0 时得出土壤微生物呼吸速率,从而对根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例进行间接估算。这种根系生物量外推法因其在测量过程中对土壤和根系的干扰小,便于野外操作,费用低等优点,被许多研究者使用^[21-23],但根系生物量外推法可能会高估根系呼吸量的贡献^[22]。由于土壤性状、气候条件和植被类型的差异,加之测定方法的不同,使得根系呼吸所占比例存在极大的不确定性。因此,精确区分根系呼吸和根际微生物呼吸已成为未来碳收支研究的重要课题和难题。

本文利用根系生物量外推法对土壤呼吸作用进行区分。玉米生长季中,土壤异养呼吸在土壤呼吸作用中所占比例平均为 45.5%,在 36.4~56.9%之间。玉米生长前期,土壤异养呼吸速率较低,波动不大;玉米生长中期,随着地温升高和作物生长,土壤异养呼吸速率在 7 月 28 日达到排放高峰;玉米生育后期,土壤异养呼吸速率逐渐下降。土壤异养呼吸主

要受温度、湿度、植被生长、土壤性质等因素的影响^[24,25],本文中土壤异养呼吸作用波动趋势呈马鞍型,与土壤温度波动趋势基本一致。杨兰芳和蔡祖聪(2005)运用盆栽试验研究了玉米生长和施氮水平对土壤呼吸的影响,发现施氮对裸土呼吸速率(即土壤异养呼吸作用)无显著影响,玉米生长季中,裸土土壤呼吸速率与气温、表土温度、5 cm 土壤温度均呈极显著相关性。无植株参与的稻田土壤 CO_2 排放与 10 cm 土温呈极显著正相关关系,同时也受淹水水层深度的制约^[26]。杨玉盛等^[27]应用挖壕沟法,对中亚热带格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土壤异养呼吸连续两年的野外定位观测,发现土壤温度和土壤湿度共同解释不同年份枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率的季节变化。

3.2 玉米农田生态系统碳收支

假定玉米果实和秸秆中的碳在玉米收获时没有从大田中转移,本研究估算出 2005 年玉米农田生态系统在生长季中的碳收支为 $-1\ 127.0\ \text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-2}$ (碳吸收),碳交换速率在 $0.52\sim-18.05\ \text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间。玉米生长季最大碳吸收速率出现在玉米灌浆期(8 月 4 日),而 Hollinger 等^[28]发现最大的碳吸收速率出现在玉米抽穗期。在玉米生长初期,玉米农田生态系统是碳的弱源;玉米播种后约 35 d 一直到收获,玉米农田生态系统表现为碳汇。

许多研究者认为玉米农田生态系统可能是碳汇。Hollinger 等^[28]利用涡度相关技术对玉米农田生态系统生长季的碳收支进行了连续观测,结果发现玉米农田生态系统在 1997 年、1999 年和 2001 年均均为碳汇,生长季中碳收支分别为 $-733.4\ \text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $-880.4\ \text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $-702.4\ \text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-2}$ 。Verma 等^[29]研究发现,美国内布拉斯加州灌溉条件下和非灌溉条件下的玉米农田生态系统在玉米生长季中的碳收支约为 $-700\ \text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-2}$ 。莫兴国等^[30]用涡度相关分析仪对小麦拔节期的 CO_2 通量进行观测,结果表明 CO_2 日总量约为 $-20\sim-15\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,麦田主要表现为 CO_2 的汇。与这些研究结果相比,本研究得出的碳收支值偏大,这可能是由于耕作制度、田间管理以及碳收支估算方法的不同造成的。例如,与自然降雨条件下的玉米农田生态系统相比,灌溉条件下的玉米农田生态系统由于土壤湿度较高,生态系统呼吸作用也较大^[29]。

Hollinger 等^[28]假定玉米果实中的碳有 3 个去向,通过 3 种方法计算玉米农田生态系统碳收支。第 1 种方法假定玉米果实中的碳没有从大田中转移走,第 2 种方法假定玉米收获时玉米果实中的碳全部释放到大气中,第 3 种方法假定每年收获的农作物在

第 2 年农作物收获之前已经消耗完。本研究只通过第 1 种方法计算玉米农田生态系统碳收支,即假定玉米果实和秸秆中的碳在玉米收获时没有从大田中转移走。另外,本研究也没有考虑田间管理方式对碳收支的影响,以后要加强对这些不足之处的研究。本文的碳收支研究结果可以为其他碳收支研究方法(如涡度相关法)提供参考,也可为农田生态系统碳收支估算提供依据。

致谢 中国科学院植物研究所许振柱、王玉辉、蒋延玲、贾丙瑞、王凤玉、王旭、周莉、王云龙、李祎君、林祥磊等对本项研究工作给予了支持与帮助,谨表谢意!

参考文献

- [1] 陈泮勤. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 266-268
- [2] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 296-230
- [3] 杨昕, 王明星. 陆面碳循环研究中若干问题的评述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 427-435
- [4] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林 CO₂ 通量季节变化及其环境因子的影响[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2004, 34(增刊 II): 109-117
- [5] Grace J., Rayment M. Respiration in the balance[J]. Nature, 2000, 404: 819-820
- [6] Schlesinger W. H., Andrews J. A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 7-20
- [7] Sánchez M. L., Ozores M. I., López M. J., et al. Soil CO₂ fluxes beneath barley on the central Spanish plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 118: 85-95
- [8] Rodeghiero M., Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1024-1041
- [9] Lindroth A., Grelle A., Moren A. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity[J]. Global Change Biology, 1998, 4: 443-450
- [10] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1625-1635
- [11] Tufekcioglu A., Raich J. W., Isenhardt T. M., et al. Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields[J]. Plant and Soil, 2001, 229: 117-124
- [12] Lee X. H., Wu H. J., Sigler J., et al. Rapid and transient response of soil respiration to rain[J]. Global Change Biology, 2004, 10: 1017-1026
- [13] Watson R. T., Noble I. R., Bolin B., et al. Land Use, Land-Use Changes, and Forestry. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press, 2000
- [14] Freibauer A., Rounsevell M. D. A., Smith P., et al. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. Geoderma, 2004, 122(1): 1-23
- [15] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 229-236
- [16] 季长生, 肖向明, Frolking S., et al. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493-503
- [17] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997
- [18] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5254-5261
- [19] Larionova A. A., Yermolayev A. M., Blagodatsky S. A., et al. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use[J]. Biology Fertilizer Soils, 1998, 27: 251-257
- [20] 刘立新, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 35-42
- [21] Xu M., DeBiase T. A., Qi Y., et al. Ecosystem respiration in a young ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains, California[J]. Tree Physiology, 2001, 21: 309-318
- [22] Li L. H., Han X. G., Wang Q. B., et al. Separating root and soil microbial biomass contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River Basin[J]. Acta Phytocool. Sin., 2002, 26: 29-32
- [23] Jia B. R., Zhou G. S., Wang F. Y., et al. Partitioning root and microbial biomass contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 653-660
- [24] O'Neill K. P., Kasischke E. S., Richter D. D. Environmental controls on soil CO₂ flux following fire in black spruce, white spruce, and aspen stands of interior Alaska[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(9): 1525-1541
- [25] Rayment M. B., Jarvis P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 35-45
- [26] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764
- [27] 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤异养呼吸特性及动态[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 53-61
- [28] Hollinger S. E., Carl J. B., Tilden P. M. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130: 59-69
- [29] Verma S. B., Dobermann A., Cassman K. G., et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131: 77-96
- [30] 莫兴国, 陈丹, 林忠辉, 等. 不同水分条件麦田能量与 CO₂ 通量变化特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 77-81