DOI: 10. 3724/SP.J.1011.2009.00874

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 μ mol (CO₂) · m⁻² · s⁻¹, 最大值为 4.77 μ mol (CO₂) · m⁻² · s⁻¹, 出现在 7 月 28 日,最小值为 1.31 μ mol (CO₂) · m⁻² · s⁻¹, 出现在 5 月 4 日。通过建立土壤呼吸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-1 127.0 g (C) · m⁻², 碳交换速率在 0.52~-18.05 g (C) · m⁻² · 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 36 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 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)05-0874-06

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

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

 Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;
 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 rate is $3.16 \mu mol (CO_2) \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; with a maximum of $4.77 \mu mol (CO_2) \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ on July 28 and a minimum of $1.31 \mu mol (CO_2) \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ on May 4. The proportions of soil heterotrophic respiration to soil respiration are 45.5%, with a range of $36.4\% \sim 56.9\%$. 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 $-1 127.0 \text{ g} (\text{C}) \cdot \text{m}^{-2}$, 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 grow stages of maize, and a C-sink from 36 days after planting lasting until harvest.

Key words Soil respiration, Seasonal dynamics, Soil heterotrophic respiration, Carbon budget, 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 全球变暖的大背景下,全球碳循环已成为地球科 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

** 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

していた。 ◎ 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

^{*} 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

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定量化仍存 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, 样地共安置 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1h采样 1次,每天共测定13次,13次土壤呼吸速率的平均 值代表该样地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 土壤热电耦探针(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(2m和4m两个高度), 空气温、 湿度(2m和4m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 左右在样地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品(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]:

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

式中, *NPP* 为净初级生产力(g · m⁻² · d⁻¹), B_1 、 B_2 为 t_1 、 t_2 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

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铁筛,挑选出玉米根系(直径 2 mm),80 下烘干 至恒重并称重,测定玉米根系生物量。

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。





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](图 3):

$$y = ax + b \tag{2}$$

式中, y 为土壤呼吸速率[μ mol (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。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 数土壤呼吸作用中土壤异养呼吸作用所占比例, 从而得到 2005 年玉米生长季土壤异养呼吸作用季 节动态。

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(净生态 生产力, NEP)由 NPP 和 R₄(土壤异养呼吸)决定:

$$NEP = NPP - R_h \tag{3}$$

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:

$$NPP = \Delta B / \Delta D \tag{4}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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(<i>R_i</i>) Soil respiration (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	土壤异养呼吸作用(R_h) Soil heterotrophic respiration (μ mol · m ⁻² · s ⁻¹)	根系呼吸作用 $(R_t - R_h)$ Root respiration $(\mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	比例(R _h /R _l) Proportion (%)
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

表1 2005 年玉米生长季十壤异养呼吸作用占十壤呼吸作用的比例





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 $g(C) \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; 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 0.52~0.87 g (C) · m⁻² · 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 $18.05 g(C) \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 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:

$$y = 5.798 \times 10^{-3} x^{3} - 0.011 \ 2x^{2} + 0.369 \ 9x - 0.212 \ 8$$

$$(r^{2} = 0.93, P < 0.001) \tag{5}$$

式中, y 为 NEP[g (C) · m⁻² · 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-1 127.0 g (C) · m⁻², 碳交换速 率在 0.52~-18.05 g(C) · m⁻² · 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)。



日期(月-日) Date (month-day)

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*, carbon budget) 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CO2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。成分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 CO2 量^[20]。根系生物量外 推法是通过建立土壤呼吸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 CO₂ 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 拷天然林、格氏拷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 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 g (C) · m⁻² (碳 吸收),碳交换速率在 0.52~-18.05 g (C) · m⁻² · 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 36 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 为碳汇, 生长季中碳收支分别为-733.4 g (C) \cdot m⁻²、 $-880.4 \text{ g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \pi - 702.4 \text{ g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2}$ Verma $\text{\$}^{[29]}$ 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 g (C) · m⁻²。莫兴国等^[30]用涡度相关分 析仪对小麦拔节期的 CO2 通量进行观测、结果表明 CO_2 日总量约为-20~-15 g·m⁻²·d⁻¹、麦田主要表 现为 CO₂ 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

879

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、王风玉、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., Isenhart 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] 李长生,肖向明, Frolking S.,等.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 Phytoecol. 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