

DOI: 10.5846/stxb201404010614

徐昔保, 杨桂山, 孙小祥. 太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素. 生态学报, 2015, 35(20): - .

Xu X B, Yang G S, Sun X X. Analysis of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in the rice-wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu Basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素

徐昔保*, 杨桂山, 孙小祥

中国科学院南京地理与湖泊研究所, 流域地理学重点实验室, 南京 210008

摘要: 利用涡度相关技术观测太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统 2 年净生态系统碳交换 (net ecosystem CO₂ exchange, NEE) 变化过程, 分析其碳交换特征及影响机理, 结果表明: 太湖流域典型稻麦轮作农田年 NEE 为 -749.49—-785.38 gC m⁻² a⁻¹, 考虑作物籽粒碳和秸秆还田后净吸收 88.12 gC m⁻² a⁻¹, 为弱碳汇; 稻/麦季日均 NEE 和白天 NEE 季节变化直接受作物植被生长影响; 麦季夜间 NEE 与 10 cm 土壤温度呈显著指数关系, 2012/2013 年温度敏感系数 (Q_{10}) 分别为 3.03 和 2.67; 当土壤水分低于田间持水量时, 麦季夜间 NEE 主要受土壤温度影响, 反之, 夜间 NEE 受土壤温度和水分双重影响; 降水对麦季夜间 NEE 有短时的激发效应; 稻季淹水对土壤呼吸产生较明显的阻滞效应, 降低了夜间 NEE 对土壤温度的敏感性, 2012 和 2013 年分别为 1.88 和 1.39, 稻季淹水与烤田交替变化对土壤呼吸产生明显的抑制或激发的短时效应。

关键词: 农田生态系统; 碳交换; 稻麦轮作; 涡度相关; 太湖流域

Analysis of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in the rice-wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu Basin, China

XU Xibao*, YANG Guishan, SUN Xiaoxiang

Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: The agroecosystem plays an important role in global and regional carbon balance due to its large area and high carbon sequestration potential. Due to limitations in observation techniques and the spatial heterogeneity of the environment, net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in the rice-wheat rotation system of the Lake Taihu Basin remains poorly understood. This paper aimed to investigate NEE in this agroecosystem based on observations of CO₂ flux with the eddy covariance technique, from December 2011 to November 2013. Annual carbon balance was estimated from observed NEE and carbon contents of grain and straw. Half-hourly flux data were first corrected by removal of anomalous data points, coordinate rotation, frequency loss correction, and WPL correction. Two neural network models for daytime and nighttime NEE gap-filling were built. The results showed that annual daytime and nighttime NEE was -749.49 gC/m² · y⁻¹ and -785.38 gC m⁻² a⁻¹, respectively. Accounting for grain removal and return of straw to the field, total net C absorption was 88.12 gC m⁻² a⁻¹, characterizing the agroecosystem as a weak carbon sink. This carbon sequestration capacity is greater than those of the Huaihe River Basin, subtropical region, and north China plain. Diurnal NEE exhibited a typical "W" bimodal seasonal pattern, and both seasonal NEE and average monthly diurnal NEE showed significant annual fluctuations. Cumulative diurnal NEE ranged from -12.88 gC/m² d⁻¹ to 5.94 gC m⁻² d⁻¹, with a mean of -2.10 gC m⁻² d⁻¹. Maximum cumulative

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41030745); 国家自然科学基金 (41101565, 41371532); 所“135”学科前沿项目 (NIGLAS2012135019); 江苏省自然科学基金 (BK2011882)

收稿日期: 2014-04-16; 网络出版日期: 2014-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xbxu@niglas.ac.cn

diurnal NEE occurred in the wheat season of each year, with values of $-12.88 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ on April 26, 2012 and $-11.62 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ on April 11, 2013, respectively. Variation in diurnal NEE and daytime NEE in the rice-wheat season was significantly correlated with crop height, suggesting that diurnal NEE and daytime NEE were both influenced by crop growth. Nighttime NEE and soil temperature at 10 cm during the wheat season exhibit a significant exponential relationship, with a temperature sensitivity coefficient (Q_{10}) of 3.03 and 2.67 in 2012—2013, respectively, larger than that of many soil respiration models ($Q_{10} = 2.0$). If soil moisture is lower than the field capacity, nighttime NEE is affected mainly by soil temperature; otherwise, nighttime NEE is dually controlled by soil temperature and moisture. There exists a short excitation effect to enhance nighttime NEE after heavy rainfall. Permanent flooding significantly reduces soil respiration, simultaneously decreasing the sensitivity of nighttime NEE to soil temperature. The temperature sensitivity coefficient (Q_{10}) in the rice seasons of 2012—2013 were 1.88 and 1.39, respectively. Alternate change of water regime between the permanent flooding and soil drying in the rice season would generate significant short-term effects of inhibition or excitation on soil respiration, respectively. The effects of carbon flux observation techniques and data gap-filling methods on uncertainty are discussed. Finally, the impact of straw application on greenhouse gas emissions (CO_2 , CH_4 , N_2O) from the agroecosystem is suggested as an avenue of further investigation.

Key Words: agroecosystem; net ecosystem exchange; rice-wheat rotation; eddy covariance; Lake Taihu Basin

生物圈碳循环机理和全球陆地生态系统碳收支及其对环境变化的响应已成为全球土地计划 (GLP) 和全球碳计划 (GCP) 等大型国际计划共同关注的核心问题。农田作为一种典型的土地利用类型, 全球面积约 $17 \times 10^9 \text{ hm}^2$, 其碳储量约 170 Pg, 超过全球陆地碳储量的 10%, 在全球及区域碳平衡中占据重要地位。据 Lal 估算, 全球农业土壤的固碳潜力约为 $0.4\text{—}0.9 \text{ Pg/a}^{[1]}$; 20 世纪 90 年代因农业生产活动导致全球植被与土壤的碳库分别减少 24% 和 10%^[2]; 我国是农业大国, 耕地面积占国土面积 12.7%, 农田生态系统固碳现状约 101.4 TgC/a , 固碳潜力约 $182.1 \text{ TgC/a}^{[3]}$ 。因此, 农田生态系统 CO_2 源/汇评价及影响机理研究是国际碳循环研究的热点问题之一。深入研究农田生态系统 CO_2 时空变化、以及与环境因子、管理措施等之间的关系, 有助于制定合适的农业管理措施以提高农田生态系统固碳功能, 为政府制订减排对策提供依据。

针对农田生态系统碳循环研究, 国内外已开展了一系列的相关研究, 主要集中在农田碳通量监测及特征变化^[4-9]、模型与估算^[10-12]、土壤有机碳^[13-15]、耕作方式与管理措施对农田碳平衡影响^[16-19]等方面。农田生态系统碳通量观测方法主要以箱式法(静态暗箱/明箱法)为主, 该方法对下垫面扰动较大, 缺乏观测的连续性, 时间分辨率低。近十年来, 具有长时间连续、高频率、自动观测等优势的热度相关技术已成为生态系统尺度碳通量变化规律及其对环境变化响应研究的可靠观测手段^[8, 20], 并且在农田生态系统碳通量研究方面也开始得到应用^[5-9, 18, 19]。农田生态系统受区域空间分布、气候与土壤环境、耕作制度、管理措施等差异影响, 农田生态系统碳交换(net ecosystem CO_2 exchange, NEE) 特征变化及机理存在较大的差异, 进而导致区域尺度估算仍存在较大的不确定性与区域差异性。

太湖流域是我国举足轻重的经济核心区和城市密集区, 也是我国土地利用变化最为快速的地区之一。太湖流域为典型的稻麦轮作区, 据遥感解译流域耕地面积从 1985 年的 23571.3 km^2 减少到 2010 年的 16142.1 km^2 (减少 31.5%), 主要表现为大量优质耕地转为城镇用地, 因此研究该地区农田生态系统碳交换 (NEE) 特征及机理对区域碳平衡的估算具有重要的意义。目前, 在太湖流域无锡 FACE 平台, 利用静态箱-气相色谱法初步揭示了农田生态系统碳交换特征、以及施肥、秸秆还田和大气 CO_2 浓度升高对 NEE 的影响, 但由于箱式法观测手段的局限, 其 NEE 估算及 FACE 处理对 NEE 的影响仍存在很大的不确定性^[21]。此外, 在苏州吴江区稻油轮作^[22]、上海崇明岛稻麦轮作农田^[23], 利用箱式法开展了碳通量观测及不同施肥水平对农田生态系统碳交换的影响研究。总体上, 受箱式法观测技术手段局限及流域环境因子空间异质性影响, 目前太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换 (NEE) 特征及机理仍存在很大的不确定性。鉴于此, 本研究利用涡度相

关技术,针对太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统开展 2 年周期的碳通量观测,分析其碳交换特征及影响机理,以期对太湖流域生态系统碳收支估算和相关模型修正提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间观测

试验区位于无锡市锡山区羊尖镇严家桥村(N31°39'14",E120°32'43",海拔 6 m),亚热带季风气候,全年降水量大于蒸发,属湿润地区。年均降水量 1048 mm,年均气温 16 ℃,全年日照时数 2019 h,全年无霜期 220 d 左右。试验区地处太湖流域北部平原水网区,为江苏省基本农田保护区,作物种植制度为冬小麦/夏水稻一年两熟制。实验田块面积约 600 m × 600 m,土壤类型为典型的潴育水稻土,土壤地质为沙壤土,土壤有机质含量为 1.71%。从自然条件、种植制度和管理措施看,该试验区在太湖流域具有典型代表性。试验区农田生态系统灌溉条件较好,年均施肥 517 kgN/hm²、146 kgP₂O₅/hm²和 146 kgK₂O/hm²。冬小麦于 2011 年 11 月 13 日播种,2012 年 5 月 30 日收割;水稻于 5 月 7 日播种,6 月 15 日移栽进入试验区内,11 月 2 日收割种冬小麦。

碳通量观测采用开路式涡度相关系统,主要有 EC150 开路 CO₂/H₂O 分析仪(Campbell Sci. Inc., USA)、CSAT3 三维超声风速仪(Campbell Sci. Inc., USA)和 CR1000 数据采集器(Campbell Sci. Inc., USA)组成。仪器安装在地面以上 3.56 m,数据采样频率为 10 Hz,系统同时记录并存储平均周期为 30 min 的 CO₂通量数据和气象等环境因子。常规气象观测包括空气温湿度(HMP155A, Vaisala, Helsinki, Finland)、降水(TE525MM, Campbell, USA)、总辐射(LP02, Hukseflux);土壤水分/温度/介电常数/电导率(SDI-12 数字式 TDT, Campbell, USA)观测分三层,分别在土壤深度 10 cm、20 cm 和 40 cm。常规气象数据观测频率为 0.5 Hz,通过 CR1000 数采每 30 min 自动存储,用于碳通量环境因子影响分析及缺失数据插补。

1.2 通量数据校正与插补

CO₂通量即净生态系统碳交换量(NEE),由 10 Hz 的 CO₂/H₂O 浓度与垂直风速的原始数据经过协方差计算而来,平均时间长为 30 min,具体计算见式(1):

$$F_c = \overline{\rho W' S'} \quad (1)$$

式中, F_c 为 30 min 平均的碳通量, ρ 为干空气密度, S' 为 CO₂混合比率的脉动, W' 为垂直风速脉动,上划线(-)表示平均值。

为了控制通量数据精度,对原始观测数据进行校正与插补,具体步骤如下:(1)野点去除:剔除雨、尘粒等环境因子及电源不稳定等因素对湍流原始观测数据产生的野点,同时剔除夜间摩擦风速小于 0.15 m/s 的观测数据以消除夜间低湍流对数据的影响;(2)对平坦下垫面,进行 2 次坐标旋转以消除“倾斜”误差或湍流通量不同分量间的交叉干扰;(3)频率损失修正:通过频率损失修正低频损失(较大涡旋的贡献估计不充分)及高频损失(较小涡旋的贡献估计不充分),使不同通量分别增加约 5%—30%;(4)WPL 校正:以消除水热传输造成 NEE 变化的密度效应,步骤(1)—(4)采用 EdiRe 软件处理完成。(5)数据插补:首先利用 SPSS 筛选影响白天(风速、气压、空气温度、空气湿度、10 cm 土壤温度、土壤水分、土壤电导率、太阳辐射)与夜间(风速、空气温度、空气湿度、10 cm 土壤温度、土壤电导率)NEE 变化的主要环境因子,其次利用 Matlab 分别建立基于神经网络的白天与夜间通量数据插补模型,插补缺失通量数据。

1.3 碳平衡计算

本文年尺度碳平衡计算主要考虑作物收获和秸秆还田,对施肥、灌溉和土壤碳库等影响忽略不计,具体计算如式(1)所示:

$$NBP = NEP - C_{gr} * f_{gr} - C_{st} * f_{st} \quad (1)$$

式中,NBP 为净生物群区生产力,NEP 为净生态系统生产力(近似等于 NEE 负值); C_{gr} 和 C_{st} 分别为小麦/水稻的籽粒和秸秆单位面积干重; f_{gr} 和 f_{st} 分别为小麦/水稻的籽粒和秸秆的含碳率,根据野外采样与实验室分

析获取,分别为 0.399 / 0.402 和 0.4397 / 0.3817。

2 结果与分析

2.1 环境因子变化

从图 1(a)可知,试验区 2012 年度(2011.12—2012.11)和 2013 年度(2012.12—2013.11)的太阳总辐射变化趋势类似,8 月最大,1 月最小,3—9 月太阳总辐射量分别占年总辐射量的 70.9%和 72.5%,为冬小麦和夏水稻的生长提供了充足的光照条件,与多年平均一致。2012 和 2013 年度平均气温分别为 15.9 °C 和 16.4 °C,较多年平均气温(15.7 °C)略高。10 cm 土壤温度与气温保持一致变化趋势,冬季(12 月—2 月)土壤温度比气温略高,4—11 月土壤温度比气温略低(图 1(b))。2012 和 2013 年度年降水量分别为 800.3 mm 和 703.4 mm,分别比多年平均降水量(1048 mm)少 22%和 33%(图 1(c))。降水年内季节分配不均,2012 和 2013 年度降水大部分集中在夏季(6—8 月),分别占总量的 50.8%和 39.7%。2012 年在 7 月 13 日、8 月 8 日和 9 月 8 日出现三次强降水,分别达 42 mm、173 mm 和 59 mm;2013 年在 7 月 5 日、8 月 29 日、10 月 7 日、10 月 8 日出现四次强降水,达 31 mm、35 mm、90 mm 和 32 mm。总体上,观测期间太阳辐射和气温具有较好的代表性,但降水比正常年份偏少,属枯水年。土壤水分季节与年际变化均较显著(图 1(c)),2012 和 2013 年度 10 cm 土壤水分变化范围分别为 0.18—0.66 m³/m³和 0.23—0.55 m³/m³,年均土壤水分达 0.36 m³/m³和 0.39 m³/m³。2013 年麦季 10 cm 土壤水分显著高于 2012 年麦季,日平均分别为 0.33 m³/m³和 0.23 m³/m³,主要由于土壤 TDT 探头在 2011 年 11 月中旬埋进土壤,土壤处于扰动恢复期,导致 2012 年麦季土壤水分监测明显偏低。夏水稻生长季因处于淹水状态,10 cm 土壤水分均接近饱和状态,

但由于在 2012 年 7 月 22 日因 10 cm 土壤 TDT 探头损坏更换新的探头对土壤产生较大的扰动,导致 2012 年稻季(从 7 月 22 日开始)在淹水状态下土壤水分比 2013 年偏高。

2.2 NEE 季节变化

从图 2 可知,太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换(NEE)季节变化呈典型的“W”型双峰特征,日累积量在-12.88—5.94 gC m⁻² d⁻¹之间,平均值为-2.10 gC m⁻² d⁻¹。一年中有 234 天 NEE 日累积量为负值,占总天数的 64.1%,全年表现为碳净吸收。NEE 日累积量正值(碳排放)主要出现在两个时段,其它月份只有少量天数日累积表现为正值:(1)小麦收割到水稻移栽初期(5 月底至 6 月底);(2)水稻收割到翌年小麦返青(10 月底到次年 2 月份)。5 月底至 6 月初为太湖流域小麦收割期,农田土壤呈裸露状态,再加上水稻插秧前进行翻耕、烤田,人为扰动增大了土壤呼吸,导致农田碳排放量相应大;6 月中旬至月底为水稻移栽初期阶段,水稻幼苗生长缓慢,因气温较高导致土壤呼吸作用较为强烈,故 NEE 日变化表现为碳排放。10 月底水稻收割地表裸露,11 月份虽然小麦出苗和三叶,但植被生长活动较弱,随着气温下降,冬小麦停止生长越冬,对 CO₂的吸收能力下降,导致农田生态系统 NEE 日变化表现为碳净排放。

受气象条件与物候年际波动影响,2012 年与 2013 年 NEE 总量存在一定的年际波动,分别达-749.49 gC m⁻² a⁻¹和-785.38 gC m⁻² a⁻¹,波动约 4.9%。同时,两年麦季与稻季 NEE 总量变化也呈较大的年际波动,2012 年麦季(2011.12—2012.5)NEE 总量(-416.84 gC/m²)大于稻季(6—11 月)(-332.65 gC/m²),而 2013 年麦季 NEE 总量(-344.89 gC/m²)小于稻季(-440.49 gC/m²),但两年水稻主要生长期(7—9 月)NEE 总量均大于小麦主要生长期(3—5 月),与水稻产量高于小麦相一致。两年 NEE 日最大累计吸收量均出现在麦季,分别为 2012 年 4 月 26 日(-12.88 gC m⁻² d⁻¹)和 2013 年 4 月 11 日(-11.62 gC m⁻² d⁻¹)。

2.3 NEE 月均日变化

从图 3 可以看出,太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换(NEE)月均日变化、正负变化时刻、最大碳排放与碳吸收时刻均呈显著的月际变化特征。日均 NEE 变化除 6 月外均呈“U”型变化趋势,表现为白天 NEE 为负,夜间 NEE 为正,说明该生态系统在夜间由于呼吸作用表现为碳源,白天由于光合作用而表现为碳汇。6 月份为冬小麦收割期,地表裸露,翻耕、烤田、水稻移栽,为农田生态系统碳排放时段,日变化不显著,

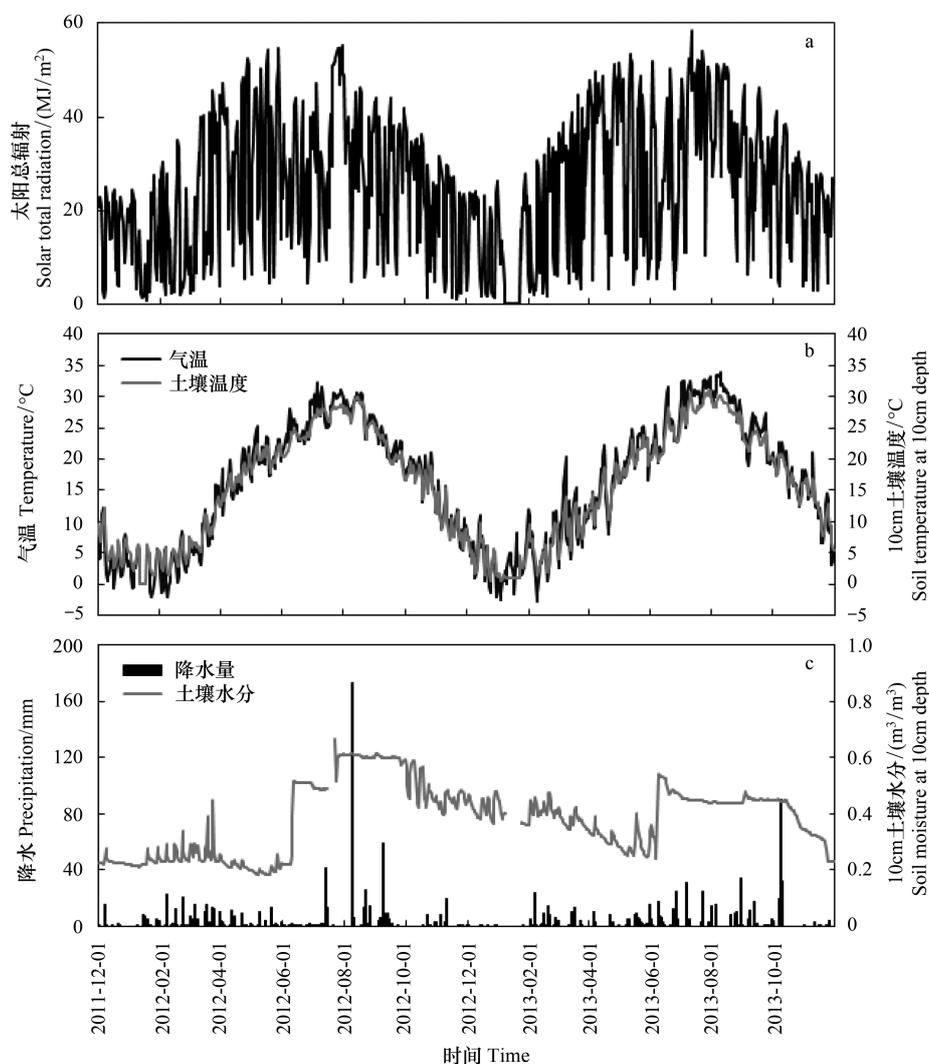


图 1 环境因子季节变化

Fig.1 Seasonal dynamics of environmental factors

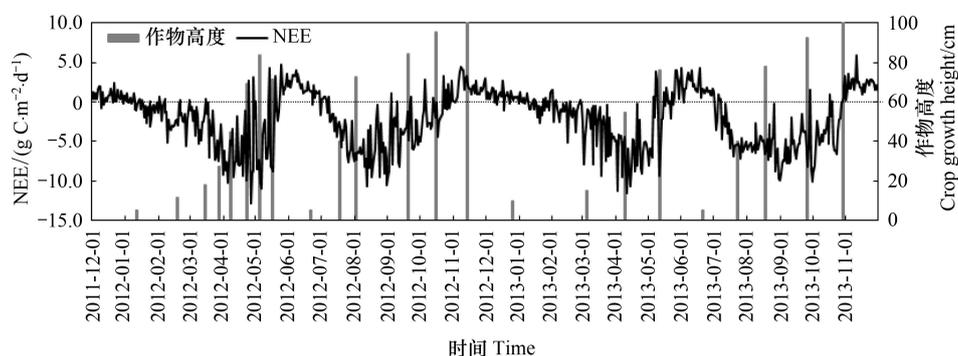


图 2 2012—2013 年作物高度与净生态系统碳交换季节变化

Fig.2 Seasonal dynamics of crop height and net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in 2012—2013

NEE 基本都为正值。各月 NEE 符号变化由正值转为负值在日出后 1—1.5 h, 夏季比春秋季提前 0.5 h, 比冬季提前 1.5 h; 由负值转为正值时刻正好相反, 夏季比春秋季晚 0.5—1 h, 比冬季晚 1—1.5 h, 主要集中在 16:30—18:00。NEE 中午 12 点以前逐渐增大, 中午 12 点左右达到最大值, 12 点以后 NEE 逐渐减小, 11 月—翌年 2 月

NEE 最大值在 -0.0302 — $-0.163 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、3—5 月(麦季主要生长期)NEE 最大值在 -0.177 — $-0.338 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、7—10 月(稻季主要生长期)达 -0.174 — $-0.396 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、6 月份 NEE 最大值在 -0.011 — $-0.023 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。2012/2013 年 8 月份月均温度分别达 28.04°C 和 29.93°C ，正午 12 点分别高达 30.70°C 和 33.05°C ，过高的气温对作物生长及 NEE 产生显著的高温胁迫效应，导致 2012/2013 年 8 月份月均 NEE 日变化均呈较显著的“双峰”特征。

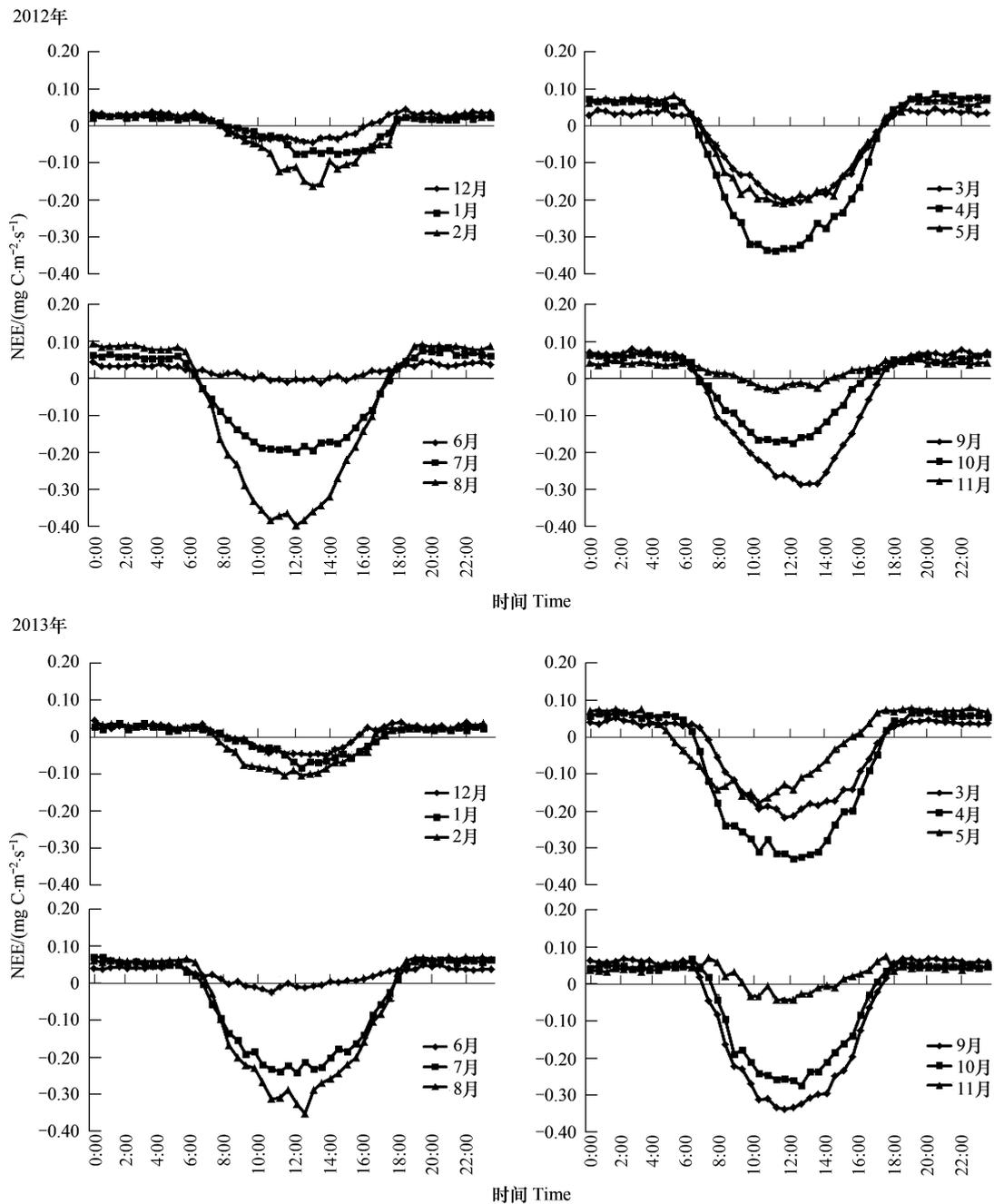


图3 2012—2013 年 NEE 月均日变化

Fig.3 Seasonal dynamics of NEE in 2012—2013

2.4 农田碳平衡

通量观测显示,2012—2013 年度农田 NEE 分别为 -749.49 — $-785.38 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,为大气 CO_2 的汇,且存在一定的年际波动性。因收获的粮食大多被农民或运到城市消费,又转化为 CO_2 排放到大气中。考虑作物籽粒

碳和秸秆全部还田,太湖流域典型稻麦轮作农田净吸收 $88.12 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 表现为弱碳汇, 稻季净碳汇 ($63.15 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 比麦季 ($24.97 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 略高; 如果不实施秸秆还田措施, 考虑作物籽粒碳后, 太湖流域农田生态系统由碳汇变为显著的碳源, 2013 年净排放 $448.66 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。为了保护大气环境, 太湖流域(包括本试验区)从 2012 年开始全面禁止焚烧秸秆, 并实施秸秆还田农业补助政策, 有助于提高农田生态系统的碳汇能力和土壤有机质含量。

2.5 NEE 影响因子

从图 4 可以看出, NEE 日均值和白天 NEE 均值与作物高度均呈显著非线性关系, R^2 系数分别达 0.686 和 0.752。麦季, 随着小麦出苗、三叶、返青、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟和成熟, 作物高度逐渐增大, 在孕穗、抽穗和开花期(4—5 月) NEE 较大, 而后逐步降低(图 2)。稻季, 水稻从移栽到成熟, NEE 逐渐增大并在抽穗和孕穗期(8—9 月)达最大。综合 NEE 季节变化和月均日变化, 说明日均 NEE 和白天 NEE 季节变化直接受作物植被生长情况影响。同时, 其他相关研究也证实农田白天 NEE 也受光合有效辐射和叶面积指数影响^[5,20]。

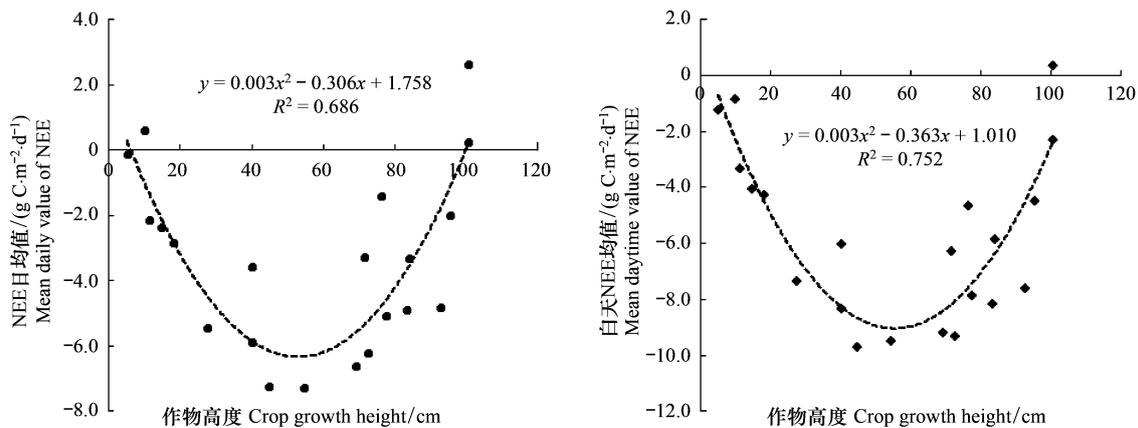


图 4 NEE 与作物高度关系

Fig.4 Relationship between mean NEE and crop height

NEE 日均值和白天 NEE 均值取作物高度观测值当天前后各 5 天的均值

温度和水分是影响夜间 NEE 的关键环境因子^[5,20]。从图 5 可以看出, 太湖流域典型麦季农田生态系统夜间 NEE 与 10 cm 土壤温度呈指数关系, 并达 0.001 显著水平, 2012 和 2013 年 R^2 系数分别为 0.694 和 0.683, 温度敏感系数 (Q_{10}) 分别为 3.03 和 2.67, 高于许多土壤呼吸模型所采用的 Q_{10} 值 ($Q_{10} = 2.0$), 略高于华北平原农田 (2.94/2.49)^[5]。2012 和 2013 年麦季夜间 NEE 与 10 cm 土壤水分呈显著曲线关系, R^2 系数分别为 0.335 和 0.645。麦季 2013 年 10 cm 土壤水分 (0.25—0.49, 平均 0.37) 显著高于 2012 年 (0.180—0.59, 平均 0.23)。2012 年麦季为土壤 TDT 探头安装初期, 土壤水分监测偏低, 进而导致夜间 NEE 与土壤水分的 R^2 系数偏低。试验区土壤田间持水量约为 0.314, 从图 5 可知在太湖流域湿润区, 当土壤水分低于田间持水量时, 夜间 NEE 主要受土壤温度影响, 土壤水分对其影响不大; 反之, 夜间 NEE 受土壤温度和水分双重影响, 土壤水分增加对夜间 NEE 起明显的抑制作用, 同时土壤水分增加也降低了土壤呼吸对温度的敏感性 (Q_{10})。此外, 从表 1 可知麦季降水增大了土壤空隙, 导致降水后初期夜间 NEE 增大, 增强了土壤呼吸。P1, P2 和 P3 三次典型降水事件前后温度均有所下降, 但夜间 NEE 显著大于降水前, 主要受降水影响; P4 典型降水事件后温度有较明显上升, 但夜间 NEE 增加幅度大于温度对其影响, 夜间 NEE 增大受温度升高和降水双重影响。

稻季因农田灌溉长期淹水, 土壤水分含量几乎接近饱和状态, 对土壤呼吸产生较明显的阻滞效应^[20], 导致土壤呼吸与 10 cm 土壤温度的相关性显著降低, 2012 和 2013 年 R^2 系数分别为 0.545 和 0.360, 温度敏感系数 (Q_{10}) 分别为 1.88 和 1.39, 与朱咏莉等(涡度相关法)^[6]和邹建文等(箱式法)^[24]对稻田观测获取的 Q_{10} 接近, 分别为 1.70 和 1.68。F3 为 2013 年稻季初期由裸地至淹水初期, 淹水明显抑制了夜间 NEE, 降低了

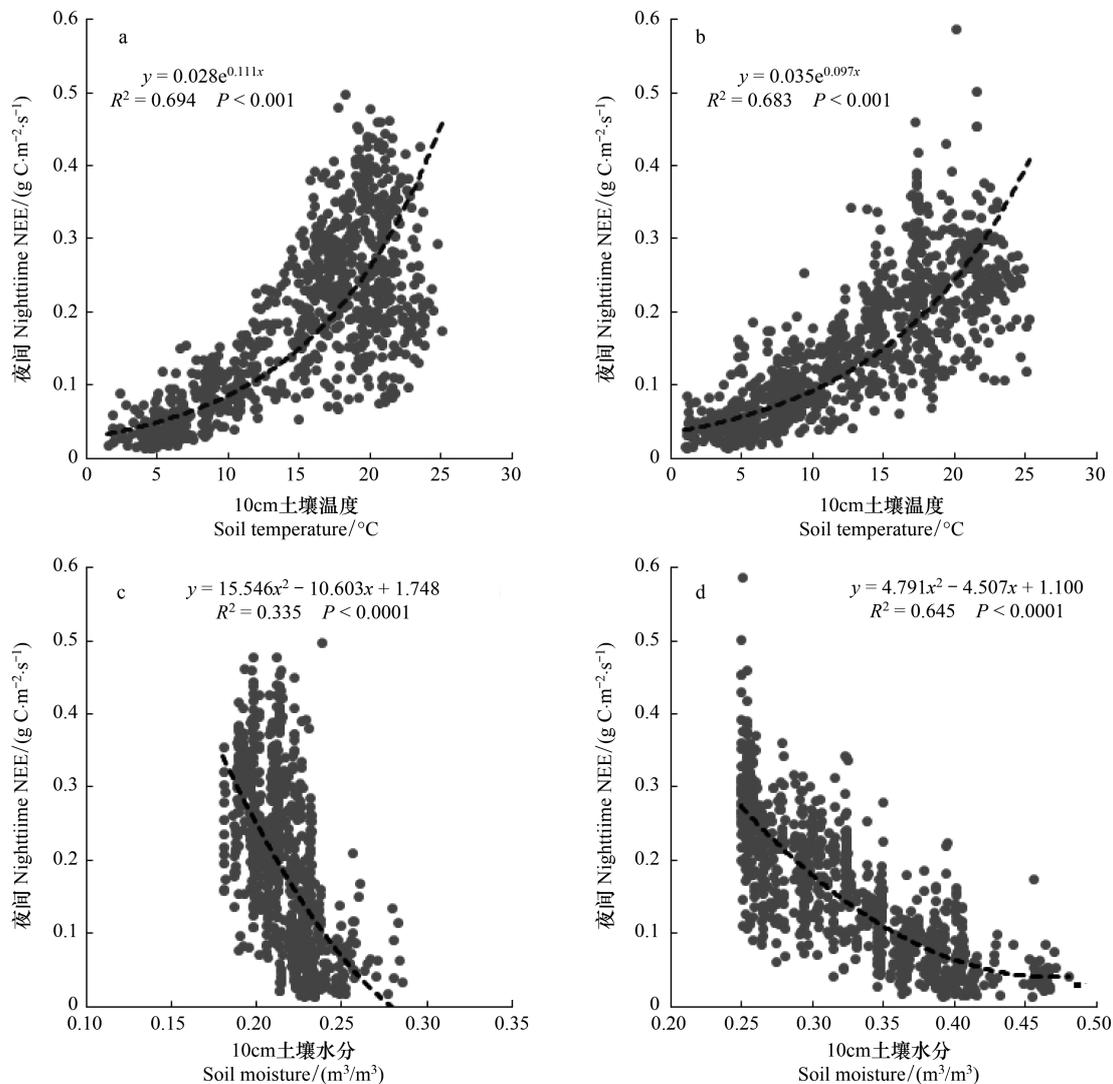


图5 麦季夜间 NEE 对 10cm 土壤温度/水分响应

Fig.5 Relationship between nighttime NEE and soil temperature and moisture at the 10 cm depth during the wheat season

(a) 和 (c) 为 2011 年 12 月至 2012 年 5 月; (b) 和 (d) 为 2012 年 12 月至 2013 年 5 月

44.5%。F1 和 F2 为 2012 年两次典型的烤田, 夜间 NEE 均显著大于其前后淹水状态期间的夜间 NEE, 因此稻田淹水与烤田交替变化对土壤呼吸产生明显的抑制或激发的短时效应(见表 1)。此外, F1 和 F2 同处于淹水状态, F1 期间的温度显著高于 F2, 而 F2 的夜间 NEE 则高于 F1, 主要由于 F2 处于稻季成熟期, 其凋落物远大于 7 月份孕穗期, 进而导致其夜间 NEE 大于 F1。

3 讨论

太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统相比其他区域具有更高的固碳能力。太湖流域麦季 NEE 日最大累积吸收量大于华北平原 ($8.19\text{--}9.50\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$)^[5] 和淮河流域 ($11.76\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$)^[7], 小于美国俄勒岗地区小麦田 ($13.4\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$)^[4]; 2012—2013 年稻季 NEE 日最大累积吸收量 ($-10.63\text{--}-10.16\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$) 高于中亚热带双季稻区晚稻的最大吸收峰值 ($-9.4\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$)^[6], 与淮河流域 ($-10.4\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$) 基本接近^[7]; 年尺度上, 太湖流域稻麦轮作农田生态系统碳吸收量大于华北平原 ($-197.6\text{--}-317.9\text{ gC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$)^[5]、中亚热带地区 ($-675.2\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$)^[6] 和淮河流域 (生长季 3—9 月, $-626.92\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$)^[7]。此外, 考虑作物籽粒碳和秸秆全部还田, 太湖流域典型稻麦轮作农田表现为弱碳汇, 而华北平原和法国西南部地区农田生态系统均由碳汇变

为碳源,分别排放 $107.5\text{--}340.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $372\pm 78 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{y}^{-1}$ [5,17]。

表 1 降水和淹水对太湖流域典型稻麦轮作农田夜间 NEE 影响

Table 1 Impacts of rainfall and flooding on the nighttime NEE for typical wheat-rice rotation agroecosystem in the Lake Taihu basin

时间 Time	NEE 均值 Mean NEE / ($\text{gC m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	降水 Precipitation/ cm	土壤水分均值 Mean soil moisture/ (m^3/m^3)	土壤温度均值 Mean soil temperature/ $^{\circ}\text{C}$
P1	2012/3/16 20:00:00—3/17 6:00:00		0.25	11.3
	2012/3/17 14:00:00—3/17 23:00:00	15.3	0.44	11.7
	2012/3/18 19:30:00—3/19 6:00:00		0.25	10.0
P2	2012/3/21 19:30:00—3/22 6:00:00		0.24	8.5
	2012/3/22 15:30:00—3/23 13:30:00	25.5	0.43	8.5
	2012/3/23 19:30:00—3/24 6:00:00		0.28	7.8
P3	2013/2/4 19:30:00—2/4 23:00		0.39	6.4
	2013/2/4 23:30:00—2/5 13:30	23.8	0.45	5.8
	2013/2/6 19:30:00—2/7 6:00:00		0.45	4.3
P4	2013/3/15 19:30:00—3/15 23:30:00		0.37	7.7
	2013/3/16 16:00:00—3/17 23:30:00	17.2	0.40	11.6
	2013/3/18 19:30:00—3/19 5:00:00		0.40	11.9
F1	2012/7/22 19:00:00—7/23 5:30:00		0.65	26.8
	2012/7/23 19:30:00—7/24 5:30:00		0.44	26.1
	2012/7/24 19:00:00—7/25 5:30:00		0.61	26.4
F2	2012/10/6 18:30:00—10/7 5:00:00		0.58	18.5
	2012/10/12 18:30:00—10/13 5:00:00		0.41	15.6
	2012/10/14 18:30:00—10/15 5:00:00		0.56	19.3
F3	2013/6/6 18:30:00—6/7 3:30:00		0.24	23.1
	2013/6/14 18:30:00—6/15 3:30:00		0.53	22.7

P1, P2, P3 和 P4 分别为麦季四次降雨; F1, F2 和 F3 分别为稻季三次淹水; 30 分钟 NEE 观测数据质量均较高, 均值计算剔除个别插补数据

现有研究已证实秸秆还田能有效增加土壤有机碳含量, 提高农田生态系统的固碳潜力, 如地处太湖流域的江苏省、上海市和浙江省, 采用秸秆还田措施将使其农田土壤固碳潜力分别达 $45.57 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $25.97 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $29.22 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ [3]。同时, 实施秸秆还田、严禁就地焚烧, 有助于对近年来持续爆发的严重雾霾天气的有效防范与治理。但需指出的是, 目前针对农田生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放之间的相互作用影响机理还不清晰, 初步研究表明小麦秸秆还田将显著促进稻季 CH_4 排放, 增加量甚至高达 3—11 倍 [21,25]。因此, 秸秆还田虽然有助于提高农田生态系统 CO_2 固碳能力, 但同时农田生态系统净温室气体排放产生较大的不确定性, 有待进一步加强观测秸秆还田对多种温室气体排放的相互作用影响, 评估其对全球增温潜势 (Global warming potential, GWP) 的综合影响, 探讨秸秆施入量及施入方式的最佳优化模式, 提高秸秆还田政策及农业补助政策的科学性与合理性。

碳通量观测手段及缺失数据插补方法对 NEE 估算存在较大的不确定性。同为采用涡度相关技术, 本研究观测的太湖流域稻麦轮作农田生态系统年 NEE 分别比淮河流域和中亚热带地区高 19.6%—25.3% 和 11.0%—16.3%, 其差异尚在可接受范围内, 主要可能受区域环境因子及农作物品种差异等影响。利用箱式法观测的上海崇明岛 2011 年稻季 NEE (-67.13 gC/m^2) [23]、南京稻麦轮作耕地 2001—2002 年 NEE ($-196.6\text{--}258.0 \text{ gC/m}^2$) [24], 分别仅为本研究的 15.2%—20.2% 和 25.1%—34.4%, 存在明显低估; 而利用箱式法观测的川中丘陵区稻麦轮作农田年 NEE 为 1205.0 gC/m^2 , 则比本研究高估 57.0% [21]。此外, 采用均值法插补本研究 2012 年缺失数据估算的年 NEE, 比本文采用的神经网络插补法高估 11.7%。因此, 采用不同碳通量观测技术手段以及缺失数据插补方法均对 NEE 估算及区域比较研究产生较大的不确定性。另外, 在湿润季风气候区,

由于雨季连续降水时间较长,导致开路式涡度相关法的观测数据缺失较多,给数据插补带来较大的难度。由于本研究前期没有观测光量子通量密度、稻/麦季各生长期 LAI 和生物量等要素,后期需进一步补充观测以明晰 NEE 与其之间的响应关系。

4 结论

(1)太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换(NEE)呈典型的“W”双峰型季节变化特征,NEE 季节变化及月均日 NEE 变化均呈明显的年际波动;年 NEE 为-749.49— -785.38 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,考虑作物籽粒碳和秸秆全部还田后净吸收 88.12 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,为弱碳汇,比淮河流域、华北平原和中亚热带地区农田生态系统具有更高的固碳能力。

(2)稻/麦季日均 NEE 和白天 NEE 的季节变化直接受作物植被生长情况影响;夜间 NEE 与 10 cm 土壤温度呈显著指数关系,2012/2013 年温度敏感系数(Q_{10})分别为 3.03 和 2.67;当土壤水分低于田间持水量时,夜间 NEE 主要受土壤温度影响;当土壤水分超过田间持水量时,夜间 NEE 受土壤温度和水分双重影响;降水对夜间 NEE 有短时的激发效应。

(3)稻季淹水对土壤呼吸产生较明显的阻滞效应,同时降低了夜间 NEE 对土壤温度的敏感性,2012 和 2013 年温度敏感系数(Q_{10})分别为 1.88 和 1.39,稻季淹水与烤田交替变化对土壤呼吸产生明显的抑制或激发的短时效应。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [2] Bondeau A, Smith P, Zaehle S, Schaphoff S, Lucht W, Cramer W, Gerten D, Campen H, Christoph M, Reichstein M, Smith B. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 2007, 13(3):679-706.
- [3] 陈泮勤,王效科,王礼茂. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策. 北京:科学出版社,2008.
- [4] Baldocchi D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C3 (wheat) and an open C4 (corn) crop II:CO₂ exchange and water use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 67(3/4):291-321.
- [5] Li J, Yu Q, Sun X M, Tong X J, Ren C Y, Wang J, Liu E M, Zhu Z L, Yu G R. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2006, 49(2):226-240.
- [6] 朱咏莉,童成立,吴金水,王克林,王勤学,任秀娥. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征. *环境科学*, 2007, 28(2):283-288.
- [7] 李琪,胡正华,薛红喜,王云龙,谭甜甜,吴东丽. 淮河流域典型农田生态系统碳通量变化特征. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12):2545-2550.
- [8] Smith P, Lanigan G, Kutsch W L, Buchmann N, Eugster W, Aubinet M, Ceschia E, Beziat P, Yeluripati J, Osborne B, Moors E, Brut A, Wattenbach M, Saunders M, Jones M. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(3):302-315.
- [9] Schmidt M, Reichenau T, Fiener P, Schneider K. The carbon budget of a winter wheat field:an eddy covariance analysis of seasonal and inter-annual variability. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 165:114-126.
- [10] Wang Q, Watanabe M, Ouyang Z. Simulation of water and carbon fluxes using BIOME-BGC model over crops in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3/4):209-224.
- [11] Giltrap D L, Li C, Sagar S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136(3/4):292-300.
- [12] Wattenbach M, Sus O, Vuichard N, Lehuger S, Gottschalk P, Li L H, Leip A, Williams M, Tomelleri E, Kutsch W, Buchmann N, Eugster W, Dietiker D, Aubinet M, Ceschia E, Béziat P, Grünwald T, Hastings A, Osborne B, Ciais P, Cellier P, Smith P. The carbon balance of European croplands:A cross-site comparison of simulation models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(3):419-453.
- [13] Ogle S, Breidt F, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 2005, 72(1):87-121.
- [14] Qin Z C, Huang Y. Quantification of soil organic carbon sequestration potential in cropland;a model approach. *Science in China Series C:Life Sciences*, 2010, 53(7):868-884.

- [15] Elsgaard L, Görres C M, Hoffmann C C, Blicher-Mathiesen G, Schelde K, Petersena S O. Net ecosystem exchange of CO₂ and carbon balance for eight temperate organic soils under agricultural management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 162:52-67.
- [16] 韩士杰,董云社,蔡祖聪,宋长春. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程. 北京:科学出版社, 2008.
- [17] Béziat P, Ceschia E, Dedieu G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(10):1628-1645.
- [18] Ciais P, Gervois S, Vuichard N, Piao S L, Viovy N. Effects of land use change and management on the European cropland carbon balance. *Global Change Biology*, 2011, 17(1):320-338.
- [19] Zona D, Janssens I A, Aubinet M, Gioli B, Vicca S, Fichot R, Ceulemans R. Fluxes of the greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) above a short-rotation poplar plantation after conversion from agricultural land. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169:100-110.
- [20] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [21] 王跃思,王迎红. 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测. 北京:科学出版社, 2008.
- [22] 刘晓雨,李志鹏,潘根兴,李恋卿. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9):1783-1790.
- [23] 侯玉兰,王军,陈振楼,王东启,许世远. 崇明岛稻麦轮作系统稻田温室气体排放研究. *农业环境科学学报*, 2012, 31(9):1862-1867.
- [24] 邹建文,黄耀,宗良纲,郑循华,王跃思. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, 23(6):758-764.
- [25] Ma J, Li X L, Xu H, Han Y, Cai Z C, Yagi K. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(5):359-367.