

# 淮河流域稻麦轮作农田生态系统CO<sub>2</sub>通量多时间尺度变化特征

段春锋<sup>1, 2, 3</sup> 田红<sup>1, 2, 3</sup> 黄勇<sup>2, 3</sup> 曹雯<sup>2, 3</sup> 凌新锋<sup>3</sup>

(1 安徽省气候中心, 合肥 230031; 2 安徽省气象科学研究所/大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3 寿县国家气候观象台/中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 寿县 232200)

**摘要:** 为了准确评价农田生态系统在区域碳平衡中的作用, 采用涡度相关技术对淮河流域典型稻麦轮作农田生态系统CO<sub>2</sub>通量进行了长期连续观测。基于数据质量控制后的寿县国家气候观象台2007年7月—2019年12月CO<sub>2</sub>通量观测资料, 分析了淮河流域稻麦轮作农田生态系统不同时间尺度CO<sub>2</sub>通量的变化特征。结果表明: 淮河流域稻麦轮作农田生态系统CO<sub>2</sub>通量具有明显的日变化、季节变化和年际差异。多年平均CO<sub>2</sub>通量日变化为U型特征, 白天为净吸收, 最大值在12时, 夜间为净排放, 最大值在21时30分, 白天净吸收量明显多于夜间净排放量。多年平均CO<sub>2</sub>通量季节变化为W型双峰特征, 1—5月、7—10月和12月为CO<sub>2</sub>净吸收, 4月和8月为次大值和最大值; 6月和11月为净排放。不同生育期CO<sub>2</sub>通量差异显著, 小麦和水稻孕穗期CO<sub>2</sub>净吸收均最大, 分别为-0.207 mg/(m<sup>2</sup>·s)和-0.266 mg/(m<sup>2</sup>·s)。寿县稻麦轮作农田生态系统具有强固碳能力, 2007—2019年平均的年CO<sub>2</sub>净吸收量为-2.58 kg/(m<sup>2</sup>·a)。CO<sub>2</sub>净吸收量年际差异大, 2008年最大, 为-3.26 kg/(m<sup>2</sup>·a); 2017年最小, 仅为-1.78 kg/(m<sup>2</sup>·a)。整个生育期CO<sub>2</sub>净吸收总量为-2.8 kg/m<sup>2</sup>, 小麦和水稻分别占43.2%和56.8%。稻麦轮作两个间歇期CO<sub>2</sub>净排放量为0.21 kg/m<sup>2</sup>。

**关键词:** CO<sub>2</sub>通量, 多时间尺度, 稻麦轮作, 寿县国家气候观象台

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.020

## Multi-Time Scale Variation of Net Ecosystem CO<sub>2</sub> Flux over Rice-wheat Rotation Agroecosystem in Huaihe River Basin

Duan Chunfeng<sup>1, 2, 3</sup>, Tian Hong<sup>1, 2, 3</sup>, Huang yong<sup>2, 3</sup>, Cao Wen<sup>2, 3</sup>, Ling Xinfeng<sup>3</sup>

(1 Anhui Climate Center, Hefei 230031 2 Anhui Institute of Meteorological Sciences, Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031 3 Shouxian National Climatology Observatory, Huaihe River Basin Typical Farm Eco-meteorological Experiment Field of CMA, Shouxian 232200)

**Abstract:** For accurately evaluating the role of agroecosystem in regional carbon balance, the CO<sub>2</sub> flux of typical rice-wheat rotation agroecosystem was continuously observed for a long time by using vorticity correlation technology in Huaihe River Basin. Based on the observation data of CO<sub>2</sub> flux of Shouxian National Climate Observatory from July 2007 to December 2019 after data quality control, the variation characteristics of CO<sub>2</sub> flux in different time scales of rice-wheat rotation agroecosystem in Huaihe River Basin was analyzed. The results showed that there were obvious diurnal, seasonal and interannual variations in CO<sub>2</sub> flux of that in Huaihe River Basin. The diurnal variation of CO<sub>2</sub> flux shows a U-shaped feature, with net absorption in the daytime, maximum at 12:00 BT, and net emission at night, maximum at 21:30 BT. The net absorption in the daytime is significantly higher than the net emission at night. The seasonal variation of CO<sub>2</sub> flux shows a W-shaped double peak feature. The net absorption of CO<sub>2</sub> is from January to May, July to October and December, and reaches the second maximum in April and the maximum in August; the net emission is from June and November. The net CO<sub>2</sub> uptake of wheat and rice at booting stage was -0.207 mg/(m<sup>2</sup>·s) and -0.266 mg/(m<sup>2</sup>·s) respectively. The rice-wheat rotation agroecosystem in Shouxian has strong carbon sequestration capacity, and the annual average net CO<sub>2</sub> absorption from 2007 to 2019 is -2.58 kg/(m<sup>2</sup>·a). The annual difference is large. In 2008, the net absorption of CO<sub>2</sub> is the largest, -3.26 kg/(m<sup>2</sup>·a). In 2017, the net absorption of CO<sub>2</sub> is the smallest, only -1.78 kg/(m<sup>2</sup>·a). During the whole growth period, the total net CO<sub>2</sub> uptake was -2.8 kg/m<sup>2</sup>, accounting for 43.2% of wheat and 56.8% of rice, respectively. The net CO<sub>2</sub> emission of rice-wheat rotation in two intermittent periods was 0.21 kg/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> flux, multi-time scale, rice-wheat rotation, Shouxian National Climatology Observatory

收稿日期: 2020年5月21日; 修回日期: 2020年8月21日  
第一作者: 段春锋(1983—), Email: dcf118@126.com  
资助信息: 中国气象局气候变化专项(CCSF201928); 安徽省气象局研究型业务科技攻关项目(201903); 淮河流域气象开放研究基金(HRM201804)

## 0 引言

全球气候变化正逐渐改变陆地生态系统固有的自然过程。近几十年来,气候要素时空分布模式的改变和极端气候事件频次的增多,影响了植被的光合作用和呼吸作用,同时也影响土壤微生物的活性,从而导致生态系统的碳循环过程发生改变<sup>[1-2]</sup>。生态系统碳通量变化特征及其对环境因子的响应研究是掌握全球生态系统碳平衡的关键<sup>[3-4]</sup>,因此越来越受到关注和重视。

作为陆地生态系统的重要组成部分<sup>[5]</sup>,农田生态系统的碳库在全球碳库中最为活跃<sup>[6]</sup>,占据着全球及区域碳平衡中的重要地位<sup>[7]</sup>。我国是农业大国,深入研究农田生态系统CO<sub>2</sub>时空变化特征及其与环境因素、管理因素之间的关系,对于制订合理的农业管理措施、提高农田生态系统的固碳功能和制订减排对策具有重大意义<sup>[7]</sup>。

国内外已开展了一系列农田生态系统碳循环的相关研究,主要集中在农田碳通量观测及其时空特征<sup>[4,5,7-11]</sup>、利用模型估算农田碳通量<sup>[12-14]</sup>、耕作方式与管理措施对农田碳平衡的影响<sup>[15-16]</sup>等方面。我国主要采用箱式法研究农田生态系统碳通量,但该方法存在对下垫面扰动较大、观测不连续和时间分辨率低的缺陷<sup>[7]</sup>。通量观测技术的发展,为农田生态系统碳循环研究提供了大量连续观测的数据支持。其中,涡动相关法是直接测定大气与群落碳交换通量的主流方法,其可在不扰动下垫面的情况下连续大面积直接测定能量、物质通量,已经成为世界上碳通量测定的标准方法,并在农田生态系统碳通量研究方面得到广泛应用<sup>[5,7,10-11]</sup>。

淮河流域是我国典型的稻麦轮作区和主要的粮食生产区,粮食产量占中国粮食总产量的18%<sup>[17]</sup>,该流域的农田生态系统对区域碳收支具有重要影响,研究其碳通量变化特征对区域碳平衡估算具有重要意义。中国气象局于2007年开始在淮河流域中部的寿县建立了国家气候观象台,开展了包括近地面层水热碳通量、气象要素和农作物生物量等项目的长时间序列连续观测,积累了丰富的观测数据。基于寿县国家气候观象台碳通量观测资料,众多学者针对冬小麦和一季稻生长季CO<sub>2</sub>通量及其影响因素等方面开展了一系列研究<sup>[11,18-25]</sup>。但是多基于观测站建设前期资料,研究时间短,CO<sub>2</sub>通量变化特征的年际差异和年代际差异认识不足,此外还忽略了农田休闲期的碳排放,并且缺乏年尺度碳通量研究。

本研究整编了寿县国家气候观象台2007年7月—2019年12月共计13年的CO<sub>2</sub>通量观测资料,分析

了淮河流域稻麦轮作农田生态系统不同时间尺度(小时、日、月和年)CO<sub>2</sub>通量变化特征;定量分析农田生态系统在小麦和水稻生育期、间歇期以及整个生育期的碳收支状况和固碳能力,并对比分析不同阶段固碳能力的异同。为淮河流域农田生态系统碳收支估算和相关碳模型参数修正提供参考,为政府制订减排决策提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 观测场地概况

观测地点位于寿县国家气候观象台。寿县地处安徽省北部沿淮地区、淮河中游南岸,属亚热带季风性半湿润气候,四季分明,雨热同期。寿县作为农业大县,下垫面主要是平坦农田,以水稻—小麦、水稻—油菜轮作为主,一年两熟。寿县国家气候观象台属于中国气候观测系统确定的黄淮农业生态观测区,代表了东亚季风区的主要气候条件和生态环境状况,也是我国农业生产经营活动的典型区域之一<sup>[11]</sup>。它所在的淮河流域代表了我国东部半湿润半干旱季风区关键地区的下垫面特征。

2007年7月—2013年4月观测场位于九龙(海拔26.8 m),2013年5月至今位于窑口(海拔25.7 m)。九龙观测场在城区中心以南9 km处,占地面积17亩(1亩约为666.7 m<sup>2</sup>),东、南、西三面为大片农田,北面为居民区;观测塔立于场内西南角,周围2~5 km<sup>2</sup>范围内基本是平坦农田。窑口观测场在城区中心以南12 km处,占地面积300亩,四面均为大片农田;观测塔立于基准气候观测区东北侧,下垫面平坦开阔,周边植被类型为当地典型的稻麦轮作农田。两个观测场的环境30~50年不受破坏,周边无污染源、无高层建筑,因此是研究农田生态系统各要素变化规律及其物理过程的理想观测试验区。

### 1.2 研究资料

寿县近地面层通量观测系统由湍流观测分系统和梯度观测分系统组成。湍流观测分系统主要包括三维超声风温仪和红外H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>分析仪;梯度观测分系统中气象塔高32 m,由安装在梯度塔上的5层温度、湿度、风速传感器,1层风向传感器,四分量长、短波(向上、向下)辐射传感器,光合有效辐射传感器,气压、红外地表温度传感器,5层铂电阻地温传感器,5层土壤水分观测传感器和1层3点土壤热通量传感器组成。2007年6月在观测场安装了开路式涡度相关系统,用于测量农田生态系统与大气间的通量交换。该系统主要由开路式红外H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>分析仪(CS7500, LI-COR, USA)、三维超声风速仪

(CSAT-3, Campbell, USA)和数据采集器(CR3000, Campbell, USA)组成。仪器安装高度为4 m, 采样频率

为10 Hz, 同时在线计算30 min通量并把结果存储在数据采集器内, 观测仪器的基本技术性能见表1。

表1 寿县CO<sub>2</sub>通量观测系统主要观测仪器的基本技术性能  
Table 1 Technical performance of main instruments in Shouxian CO<sub>2</sub> flux observation system

观测仪器	准确度	分辨率	平均时间/min	自动采样频率
三维超声风速仪 (CSAT-3)	风速水平分量: 4.0 cm/s 风速垂直分量: 2.0 cm/s	风速水平分量: 1 mm/s 风速垂直分量: 0.5 mm/s 虚温 0.025 °C	30	10 Hz
开路式红外H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub> 分析仪 (CS7500)	0.3 mg/kg (CO <sub>2</sub> ) 0.15 mmol/mol (H <sub>2</sub> O)	0.1 mg/kg (CO <sub>2</sub> ) 0.1 mmol/mol (H <sub>2</sub> O)	30	10 Hz

### 1.3 数据处理

以中国气象局《近地层通量观测规范》<sup>[26]</sup>和王介民编写的《涡动相关通量观测指导手册》作为参照, 借助国际上通用的涡度相关数据处理软件EddyPro软件, 对涡度相关系统观测进行数据质量控制与订正, 得到采样周期为30 min的通量数据产品<sup>[6]</sup>。数据处理过程主要包括数据合理性检验、数据一致性检验、样本数量和AGC数据检查、摩擦风速检验、降水时段碳通量数据剔除、异常值剔除检验、延迟时间订正、超声虚温订正、坐标旋转订正、空气密度效应订正、频率效应订正。

研究表明, 通量观测过程中, 受仪器故障、天气状况、大气稳定性和供电系统故障等影响造成大量数据的异常和缺失, 数据不可用比例通常在17%~50%<sup>[27]</sup>。本研究观测时间为2007年7月—2019年12月, 有效观测数据达到79%, 数据缺测率为19%, 数据异常率为2%。

缺失数据插补方法主要有平均日变化法、根据特定气象条件查表法、非线性回归法<sup>[28]</sup>。本研究对于小于2 h 缺失数据用线性内插法插补, 对于大于2 h而且小于1 d缺失数据用平均日变化法进行插补, 白天取14 d、夜间取7 d的平均时间长度<sup>[27, 29]</sup>。

通量观测数据缺失较多, 直接平均的方式计算CO<sub>2</sub>通量年总量误差非常大。本研究多年平均CO<sub>2</sub>通量计算方式为: 基于2007—2019年逐日CO<sub>2</sub>通量资料, 先计算多年平均得到一年中每天的CO<sub>2</sub>通量, 再将日累加得到多年平均的年CO<sub>2</sub>通量总量。每年CO<sub>2</sub>通量计算方式为: 先利用多年平均日CO<sub>2</sub>通量插补缺失, 再将日累加得到年CO<sub>2</sub>通量总量。数据缺失超过40 d, 该年记为数据缺失。2007—2019年13 a中, 年尺度CO<sub>2</sub>通量资料较为完整的年份有8 a, 分别为2008—2011年和2016—2019年; 数据缺失年份有5 a, 分别为2007年和2012—2015年; 数据缺失年份不做年尺度变化分析。四季按照春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—2月)进行划分。

## 2 结果分析

### 2.1 多年平均小时尺度CO<sub>2</sub>通量变化特征

寿县稻麦轮作农田生态系统2007—2019年多年平均的年和四季小时尺度CO<sub>2</sub>通量具有明显的日变化, 呈现U型特征(图1)。白天作物同时进行呼吸作用和光合作用, 但光合作用明显强于呼吸作用, 农业生态系统不断从大气中吸收CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>通量为负值, 表现为CO<sub>2</sub>净吸收。夜间土壤呼吸和作物暗呼吸释放CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>通量为正值, 农田生态系统表现为CO<sub>2</sub>净排放。

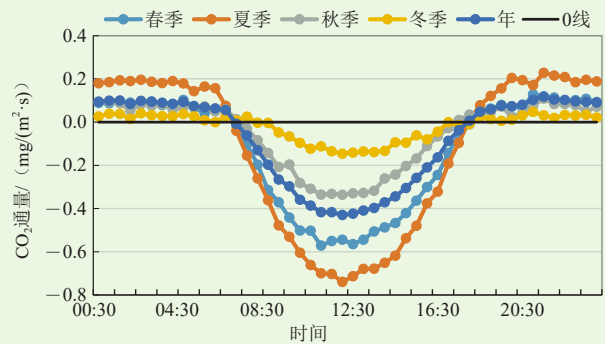


图1 2007—2019年多年平均的年和四季CO<sub>2</sub>通量逐小时变化  
Fig. 1 Hourly variation of annual and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes in 2007–2019

年平均来看, 农田生态系统在07时开始CO<sub>2</sub>净吸收, CO<sub>2</sub>净吸收随时间逐渐增大, 12时达到最大值, 为-0.43 mg/(m<sup>2</sup>·s), 随后逐渐减弱, 并在17时开始转为CO<sub>2</sub>净排放, 一直持续到次日06时30分, CO<sub>2</sub>净排放最大值出现在21时30分, 达到0.118 mg/(m<sup>2</sup>·s)。白天CO<sub>2</sub>净吸收量为-0.26 mg/(m<sup>2</sup>·s), 明显多于夜间CO<sub>2</sub>净排放量0.086 mg/(m<sup>2</sup>·s)。

四季日尺度CO<sub>2</sub>通量变化特征与年平均CO<sub>2</sub>通量相似, 呈U型特征, 白天CO<sub>2</sub>净吸收多于夜间CO<sub>2</sub>净排放。但CO<sub>2</sub>通量日变化幅度、净吸收和净排放峰值大小以及出现时间存在差异。CO<sub>2</sub>通量日变化幅度、净吸收谷值和净排放峰值夏季均最大, 净吸收和净排放最大值分别为-0.74 mg/(m<sup>2</sup>·s)和0.228 mg/(m<sup>2</sup>·s); 春

季其次，分别为 $-0.572 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.129 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；冬季最小，仅为 $-0.147 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.047 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。 $\text{CO}_2$ 净吸收最大值春季出现在11时，其他季节均出现在12时。 $\text{CO}_2$ 净排放最大值冬春季出现在21时，夏秋季出现在21时30分。 $\text{CO}_2$ 净吸收时长为10~11.5 h：春季最长，为07—18时；秋季最短，为7时30分—17时。四季 $\text{CO}_2$ 净吸收和净排放的差异主要与气象条件和作物生育期有关。夏季和春季分别是水稻和小麦的关键生育期，气温高、太阳辐射强，作物生长迅速，白天光合作用和夜间呼吸作用强、净吸收和净排放大；秋季是水稻成熟期至小麦播种期的过渡阶段，白天光合作用和夜间呼吸作用较弱，净吸收和净排放较小；冬季小麦处于越冬期，生长缓慢、光合作用弱，同时温度低，夜间土壤呼吸和作物暗呼吸作用受抑制，净吸收和净排放最小。

## 2.2 多年平均日尺度 $\text{CO}_2$ 通量变化特征

寿县稻麦轮作农田生态系统日尺度 $\text{CO}_2$ 通量具有明显的季节变化，呈现为W型双峰特征（图2）。一年中存在明显的两个 $\text{CO}_2$ 净吸收期和两个 $\text{CO}_2$ 净排放期。

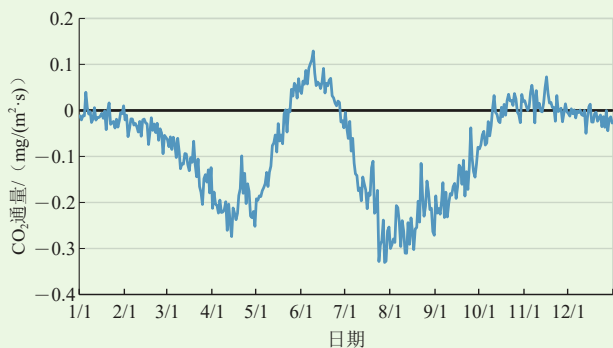


图2 2007—2019年多年平均的 $\text{CO}_2$ 通量逐日变化  
Fig.2 Daily variation of annual average  $\text{CO}_2$  flux in 2007–2019

两个 $\text{CO}_2$ 净吸收期分别在11月下旬—5月下旬和7月上旬—10月上旬， $\text{CO}_2$ 通量为负值。第一段为小麦生育期，第二段为水稻生育期。净吸收强弱与作物生长发育进程密切相关。净吸收峰值分别出现在4月中旬和7月下旬，对应着冬小麦抽穗期和水稻孕穗期。

两个 $\text{CO}_2$ 净排放期分别在5月下旬—6月下旬和10月中旬—11月下旬，对应两个稻麦轮作间歇期， $\text{CO}_2$ 通量为正值。净排放峰值分别出现在6月上旬和11月中旬。 $\text{CO}_2$ 净排放主要有两方面原因：一是第一季作物成熟收获和第二季作物移栽或播种期间存在一个没有作物生长的裸地阶段；二是刚移栽或播种的水稻/小麦幼苗前期生长缓慢，生长量很小，而土壤呼吸作用

较为强烈。

$\text{CO}_2$ 通量季节变化与作物生长有着密切的关系。1—4月，小麦经过越冬开始返青生长， $\text{CO}_2$ 通量为净吸收，并随着生长发育而不断增强；4月中旬，冬小麦处于抽穗期，作物生长活动旺盛， $\text{CO}_2$ 净吸收达到一年中的次峰值；随着冬小麦灌浆成熟， $\text{CO}_2$ 净吸收不断减弱。5月下旬和6月，随着小麦的成熟收割、腾茬、水稻种植（插秧），下垫面的呼吸与分解使得 $\text{CO}_2$ 通量表现为净排放；其后随着水稻进入生长期， $\text{CO}_2$ 通量再次表现为净吸收；到了7月下旬，水稻处于孕穗期， $\text{CO}_2$ 净吸收达到最大。9—10月，随着水稻灌浆至成熟， $\text{CO}_2$ 净吸收迅速减小，直至11月冬小麦播种与出苗期， $\text{CO}_2$ 通量表现为弱排放。12月冬小麦进入越冬期， $\text{CO}_2$ 通量表现为弱吸收。

## 2.3 多年平均月尺度 $\text{CO}_2$ 通量变化特征

2007—2019年多年平均的月尺度 $\text{CO}_2$ 通量具有明显的季节变化，呈现为W型双峰特征（图3a），与日尺度 $\text{CO}_2$ 通量的季节变化特征相似。1—5月、7—10月和12月 $\text{CO}_2$ 通量均为负值，是 $\text{CO}_2$ 净吸收期。 $\text{CO}_2$ 净吸收最大值出现在8月，为 $0.24 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；次大值出现在4月，为 $0.21 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；分别对应水稻的孕穗期和冬小麦的抽穗期。6月和11月 $\text{CO}_2$ 通量均为正值，是 $\text{CO}_2$ 净排放期，6月 $\text{CO}_2$ 净排放最大，为 $0.05 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2007—2019年月尺度 $\text{CO}_2$ 通量虽然季节变化特征相似，但年际和年代际差异明显（图3b）。与多数年份相比，2016年和2017年1—6月 $\text{CO}_2$ 通量明显偏大， $\text{CO}_2$ 净吸收偏弱，甚至5月为 $\text{CO}_2$ 净排放。2014年7月、2015年8月和2009年9月 $\text{CO}_2$ 通量明显偏大，净吸收偏小。2019年11—12月 $\text{CO}_2$ 通量较为反常，11—12月净排放异常偏大5倍，可能与近40年最严重的伏秋连旱有关系。这次干旱过程（8月12日—11月23日）寿县降水量较常年同期偏少八成，为历史同期第二少，10月以后长期维持重旱以上。11—12月小麦进入出苗和冬前分蘖期，幼苗前期生长缓慢，生长活动很弱，多数年份 $\text{CO}_2$ 通量表现为弱的净吸收。2019年伏秋连旱影响了冬小麦幼苗生长发育，严重抑制了农田生态系统 $\text{CO}_2$ 吸收能力，光合作用吸收的 $\text{CO}_2$ 小于作物和土壤呼吸排放的 $\text{CO}_2$ ，导致 $\text{CO}_2$ 净排放异常增加。

月尺度 $\text{CO}_2$ 通量年代际差异主要体现在2013年迁站前与迁站后 $\text{CO}_2$ 通量季节变化特征不同（图3a）。迁站后（2014—2019年）冬小麦生育期1—5月和12月 $\text{CO}_2$ 净吸收和6月 $\text{CO}_2$ 净排放均明显小于迁站前（2007—2012年）的情况。迁站后水稻生育期7—8月

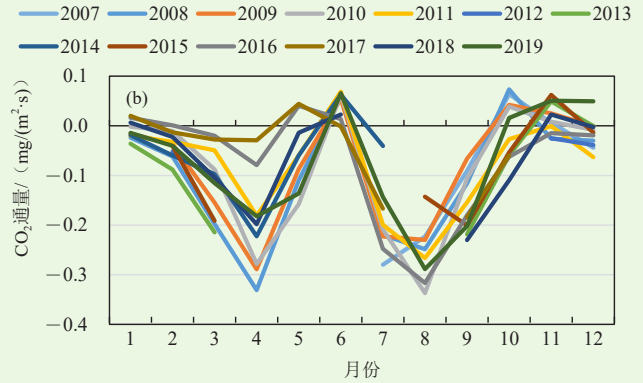
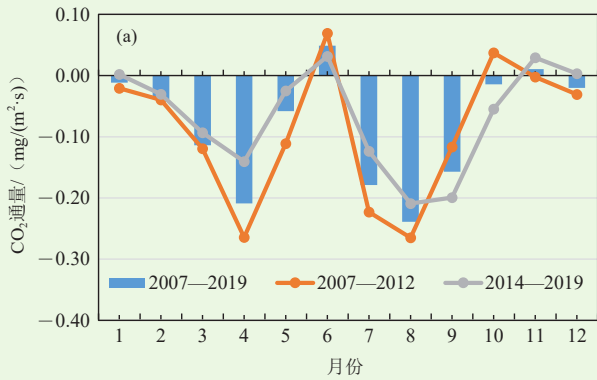


图3 2007—2019年多年平均 (a) 和各年 (b) CO<sub>2</sub> 通量逐月变化  
Fig. 3 Monthly variation of annual average (a) and annual (b) CO<sub>2</sub> flux in 2007–2019

CO<sub>2</sub>净吸收小于迁站前的情况，但9月迁站后CO<sub>2</sub>净吸收大于迁站前的情况。10月迁站前为CO<sub>2</sub>净排放，而迁站后为CO<sub>2</sub>净吸收；而11月则相反，迁站前为CO<sub>2</sub>净吸收，迁站后为CO<sub>2</sub>净排放。这种年代际差异可能和气候变化以及观测场地环境状况发生变化有关系。迁站后比迁站前气候更为异常，如2016年秋季发生了严重渍涝，2019年发生了严重的伏秋连旱。

## 2.4 年尺度 CO<sub>2</sub> 通量变化特征

2007—2019年寿县稻麦轮作农田生态系统表现为碳汇，为CO<sub>2</sub>净吸收。2007—2019年多年平均的年CO<sub>2</sub>通量为-2.58 kg/(m<sup>2</sup>·a)。2008—2011年年CO<sub>2</sub>通量均小于2007—2019年多年平均值，而2016—2019年年CO<sub>2</sub>通量均大于多年平均值（图4）。表明2016—2019年农田生态系统的固碳能力比2008—2011年明显减小，可能是因为2013年迁站后，农田生态系统观测场地和周边环境发生变化以及气候更为异常，导致农田生态系统的固碳能力明显减小。农田生态系统固碳能力年际差异明显。2008年CO<sub>2</sub>通量为-3.26 kg/(m<sup>2</sup>·a)，CO<sub>2</sub>净吸收最大，较2007—2019年平均值偏多26.1%；2017年CO<sub>2</sub>通量为-1.78 kg/(m<sup>2</sup>·a)，CO<sub>2</sub>净吸收最小，

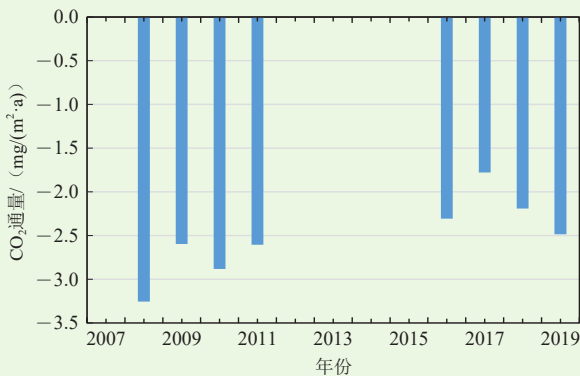


图4 2007—2019年CO<sub>2</sub>通量年总量逐年变化  
Fig. 4 Annual variation of annual total CO<sub>2</sub> flux in 2007–2019

较2007—2019年平均值偏少31.0%。2008年CO<sub>2</sub>净吸收是2017年的1.8倍。2008—2011年中，CO<sub>2</sub>净吸收最大的2008年比最小的2009年偏多25.3%。2016—2019年中，CO<sub>2</sub>净吸收最大的2019年比最小的2017年偏多39.7%。

2017年CO<sub>2</sub>净吸收量异常偏少与前期秋季降水异常有关系。2016年秋季寿县出现持续性阴雨天气，降水异常偏多一倍，为历史同期第二多，导致大范围农田土壤持续过湿，发生严重渍涝，冬小麦无法播种，2017年冬小麦生育期农田生态系统对CO<sub>2</sub>的吸收较少。分月（图3b）来看，2017年1—5月农田没有冬小麦等作物生长，CO<sub>2</sub>通量波动较小。1月表现为CO<sub>2</sub>弱排放；2—4月表现为CO<sub>2</sub>弱吸收，4月CO<sub>2</sub>净吸收最大，仅为-0.03 mg/(m<sup>2</sup>·s)，较2007—2019年平均值偏少85.7%。2017年农田生态系统CO<sub>2</sub>净吸收主要发生在水稻生长季，贡献率达到92.7%。

## 2.5 小麦和水稻生育期 CO<sub>2</sub> 通量变化特征

寿县稻麦轮作农田生态系统CO<sub>2</sub>通量变化与作物生育期有着直接的联系，冬小麦和一季稻是寿县农田生态系统主要的农作物，表2给出了寿县冬小麦和一季稻不同生育期CO<sub>2</sub>通量的2007—2019年多年平均值。

冬小麦播种、出苗和冬前分蘖期CO<sub>2</sub>通量为正值，是CO<sub>2</sub>净排放期。进入越冬期，CO<sub>2</sub>通量由正转负，进入CO<sub>2</sub>净吸收期，但由于小麦生长活动较弱，CO<sub>2</sub>净吸收非常弱。随着小麦进入返青分蘖期和拔节期，小麦开始快速生长，CO<sub>2</sub>净吸收越来越多，其中孕穗期和抽穗期CO<sub>2</sub>净吸收达到最强，CO<sub>2</sub>通量分别为-0.207 mg/(m<sup>2</sup>·s)和-0.206 mg/(m<sup>2</sup>·s)。进入灌浆乳熟期，CO<sub>2</sub>净吸收持续下降。进入成熟期，小麦基本停止生长，等待收割，收割后还有一段没有作物生长的裸地阶段，CO<sub>2</sub>通量由净吸收转为净排放。

表2 不同生育期CO<sub>2</sub>通量变化特征  
Table 2 Variation characteristics of CO<sub>2</sub> flux in different growth periods

冬小麦	播种	出苗	冬前分蘖	越冬	返青分蘖	拔节
时间	10月中下旬	11月上旬	11月中旬—12月中旬	12月下旬—2月上旬	2月中旬—3月上旬	3月中下旬
天数/d	21	10	40	52	28	21
CO <sub>2</sub> 通量/(mg/(m <sup>2</sup> ·s))	0.007	0.019	0.002	-0.018	-0.056	-0.131
冬小麦	孕穗	抽穗	灌浆	乳熟	成熟	
时间	4月上旬	4月中下旬	5月上旬	5月中下旬	6月上中旬	
天数/d	10	20	10	21	20	
CO <sub>2</sub> 通量/(mg/(m <sup>2</sup> ·s))	-0.207	-0.206	-0.169	-0.017	0.070	
一季稻	移栽	分蘖	孕穗	抽穗扬花	灌浆乳熟	乳熟成熟
时间	6月中旬—7月上旬	7月中旬—8月上旬	8月中旬	8月下旬—9月上旬	9月中下旬	10月上旬
天数/d	20	31	10	21	20	10
CO <sub>2</sub> 通量/(mg/(m <sup>2</sup> ·s))	-0.005	-0.232	-0.266	-0.206	-0.139	-0.051

水稻生育期过程中，移栽期为微弱的CO<sub>2</sub>净吸收期。随着进入分蘖期和孕穗期，CO<sub>2</sub>净吸收达到最强，CO<sub>2</sub>通量分别为-0.233 mg/(m<sup>2</sup>·s)和-0.266 mg/(m<sup>2</sup>·s)。抽穗扬花期CO<sub>2</sub>净吸收有所下降，但CO<sub>2</sub>通量依然达到-0.206 mg/(m<sup>2</sup>·s)。灌浆乳熟期CO<sub>2</sub>净吸收快速下降，CO<sub>2</sub>通量为-0.139 mg/(m<sup>2</sup>·s)，乳熟成熟期CO<sub>2</sub>净吸收非常微弱。

因此，随着小麦和水稻的生长，光合作用吸收的CO<sub>2</sub>越来越多，同时土壤呼吸和作物暗呼吸排放CO<sub>2</sub>也增多，但作物吸收的CO<sub>2</sub>远大于放出的CO<sub>2</sub>。

2007—2019年多年平均的冬小麦生育期CO<sub>2</sub>通量为-0.078 mg/(m<sup>2</sup>·s)，总量为-1.21 kg/m<sup>2</sup>；一季稻生育期CO<sub>2</sub>通量为-0.173 mg/(m<sup>2</sup>·s)，总量为-1.59 kg/m<sup>2</sup>。整个生育期CO<sub>2</sub>通量总量为-2.8 kg/m<sup>2</sup>，小麦和水稻分别占43.2%和56.8%。水稻平均CO<sub>2</sub>通量是小麦的2.2倍，但是生育期长度明显短于小麦，只有小麦的59%，因此水稻CO<sub>2</sub>通量总量只比小麦多31.5%。表明水稻农田生态系统CO<sub>2</sub>净吸收能力强于冬小麦。稻麦轮作农田生态系统间歇期为CO<sub>2</sub>净排放。小麦至水稻的间歇期CO<sub>2</sub>通量为0.056 mg/(m<sup>2</sup>·s)，总量为0.16 kg/m<sup>2</sup>，小麦至水稻的间

歇期CO<sub>2</sub>通量为0.013 mg/(m<sup>2</sup>·s)，总量为0.05 kg/m<sup>2</sup>，间歇期合计总量为0.21 kg/m<sup>2</sup>，削减整个生育期CO<sub>2</sub>净吸收总量的7.7%。

分年（图5b）来看，2016年和2017年冬小麦生育期CO<sub>2</sub>通量总量接近于0，主要由于前期没有播种小麦所导致。2008—2011年、2018—2019年整个水稻和小麦生育期CO<sub>2</sub>通量总量均超过-2.0 kg/m<sup>2</sup>，其中2008年总量最大，为-3.38 kg/m<sup>2</sup>，2017年最小，为-1.74 kg/m<sup>2</sup>，前者是后者的1.9倍。小麦生育期CO<sub>2</sub>通量总量除2016—2017年外均超过-0.8 kg/m<sup>2</sup>，其中2008年总量最大，为-2.01 kg/m<sup>2</sup>，2018年最小，为-0.85 kg/m<sup>2</sup>，前者是后者的2.4倍。水稻生育期CO<sub>2</sub>通量总量均超过-1.2 kg/m<sup>2</sup>，其中2016年总量最大，为-1.95 kg/m<sup>2</sup>，2009年最小，为-1.21 kg/m<sup>2</sup>，前者是后者的1.6倍。

进一步分析冬小麦和水稻生育期对整个生育期固碳能力的贡献，2008年和2009年整个生育期CO<sub>2</sub>净吸收的主要贡献均来自冬小麦生育期，分别占60%和58%；2010年、2011年、2018年、2019年整个生育期CO<sub>2</sub>净吸收的主要贡献均来自水稻生育期，分别占55%、65%、59%、58%。2016年和2017年因没有播种小麦，整个生育期CO<sub>2</sub>净吸收均直接来自水稻生育

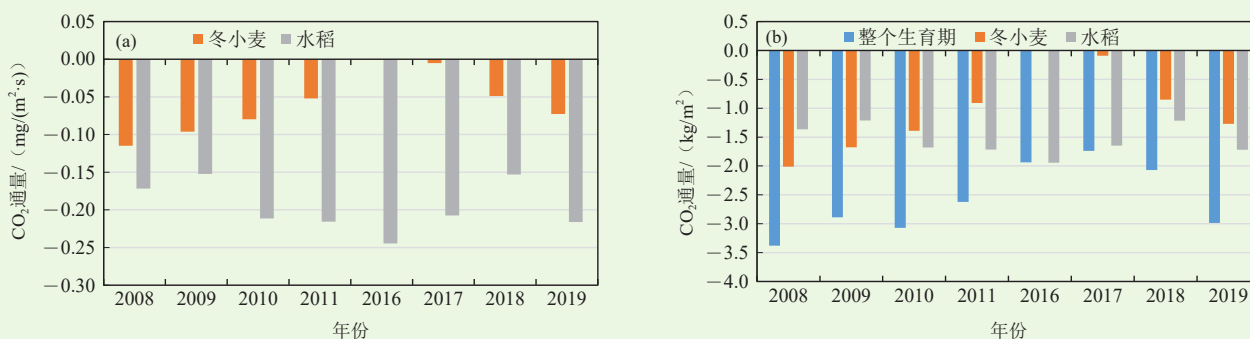


图5 不同生育期CO<sub>2</sub>通量的平均值 (a) 和总量 (b) 逐年变化  
Fig. 5 Annual variation of CO<sub>2</sub> flux average value (a) and total amount (b) in different growth period

期, 分别占100%和95%。

从CO<sub>2</sub>通量平均值(图5a)来看, 2008—2018年水稻生育期CO<sub>2</sub>通量绝对值明显大于冬小麦生育期CO<sub>2</sub>通量绝对值。2008—2011年和2018—2019年冬小麦生育期CO<sub>2</sub>通量平均值为-0.049~0.115 mg/(m<sup>2</sup>·s), 2008—2018年水稻生育期CO<sub>2</sub>通量为-0.152~0.245 mg/(m<sup>2</sup>·s), 前者绝对值的最大值小于后者的最小值。水稻生育期CO<sub>2</sub>通量值是冬小麦生育期CO<sub>2</sub>通量平均值的1.5~4.1倍。但由于冬小麦生育期长度202 d, 是水稻生育期长度92 d的2.2倍, 因此水稻生育期和冬小麦生育期CO<sub>2</sub>通量总量差异为68%~189%。2008和2009年虽然水稻生育期平均CO<sub>2</sub>通量明显强于冬小麦生育期, 但由于冬小麦生育期长度明显长于水稻生育期长度, 从而使得冬小麦生育期CO<sub>2</sub>通量总量大于水稻生育期。2008—2011年和2018—2019年水稻和冬小麦生育期平均CO<sub>2</sub>通量强度差异难以抵消生育期长度差异, 水稻生育期CO<sub>2</sub>通量总量明显大于冬小麦生育期。

### 3 结论与讨论

本研究基于寿县国家气候观象台2007年7月—2019年12月CO<sub>2</sub>通量观测资料, 分析了淮河流域稻麦轮作农田生态系统不同时间尺度和不同生育期CO<sub>2</sub>通量的变化特征。

CO<sub>2</sub>通量具有明显的日变化、季节变化和年际差异。多年平均CO<sub>2</sub>通量日变化呈现为U型特征。CO<sub>2</sub>净吸收从07时开始, 在12时达到最大, 17时以后转为CO<sub>2</sub>净排放, 持续到次日06时30分。白天为CO<sub>2</sub>净吸收, 夜间为CO<sub>2</sub>净排放, 白天净吸收明显多于夜间净排放。CO<sub>2</sub>净吸收和净排放的最大值分别出现在12时和21时30分。CO<sub>2</sub>通量日变化幅度、净吸收和净排放的最大值夏季均最大, 冬季最小。CO<sub>2</sub>净吸收时段春季最长, 秋季最短。

多年平均CO<sub>2</sub>通量季节变化呈现为W型双峰特征, 两个CO<sub>2</sub>净吸收期分别对应小麦生育期和水稻生育期, 净吸收强弱与作物生长发育进程密切相关。两个CO<sub>2</sub>净排放期对应两个稻麦轮作间歇期。CO<sub>2</sub>通量年际差异明显, 尤其是2019年11—12月CO<sub>2</sub>净排放异常偏大5倍, 可能与近40年最严重的伏秋连旱有关。迁站后冬小麦整个生育期和主要生育期CO<sub>2</sub>净吸收和6月CO<sub>2</sub>净排放明显小于迁站前, 可能和气候变化以及观测场环境状况发生变化有关。

稻麦轮作农田生态系统具有强的固碳能力, 2007—2019年多年平均的年CO<sub>2</sub>净吸收量为-2.58 kg/(m<sup>2</sup>·a)。2016—2019年农田生态系统固

碳能力比2008-2011年明显减小, 可能与迁站后观测场环境变化以及气候更为异常有关。农田生态系统固碳能力年际差异明显。2008年CO<sub>2</sub>净吸收最大, 为-3.26 kg/(m<sup>2</sup>·a); 2017年CO<sub>2</sub>净吸收最小, 仅为-1.78 kg/(m<sup>2</sup>·a), 主要原因是2016年秋季发生严重渍涝, 冬小麦无法播种, 2017年CO<sub>2</sub>净吸收主要发生在水稻生长期。

CO<sub>2</sub>通量变化与作物生育期有直接关系。冬小麦孕穗期和抽穗期CO<sub>2</sub>净吸收最强, 水稻分蘖期和孕穗期CO<sub>2</sub>净吸收最强。整个生育期CO<sub>2</sub>净吸收总量为-2.8 kg/m<sup>2</sup>, 小麦和水稻分别占43.2%和56.8%。稻麦轮作间歇期CO<sub>2</sub>净排放总量为0.21 kg/m<sup>2</sup>, 可以削减整个生育期CO<sub>2</sub>净吸收总量的7.7%。

在认识不同时间尺度CO<sub>2</sub>通量变化特征的基础上, 下一步将评估CO<sub>2</sub>通量变化与气象因子和土壤水热参数的响应关系, 分析影响CO<sub>2</sub>通量变化的主导气象环境因子, 揭示CO<sub>2</sub>通量对气象环境的响应规律, 探讨气象环境影响CO<sub>2</sub>通量变化的可能物理机理。

### 参考文献

- [1] 李国栋, 张俊华, 陈聪, 等. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(5): 873-878.
- [2] 许小峰. 通量观测: 认识气候系统各圈层相互作用的重要桥梁. 气象科技进展, 2020, 10(4): 2-6.
- [3] 张旭东, 彭镇华, 漆良华, 等. 生态系统通量研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1976-1982.
- [4] 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与CO<sub>2</sub>通量的测定. 地理学报, 2002, 57(3): 333-342.
- [5] 孙小祥, 常志州, 杨桂山, 等. 长三角地区稻麦轮作生态系统净碳交换及其环境影响因子. 中国生态农业学报, 2015, (7): 15-23.
- [6] 于贵瑞, 等. 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.
- [7] 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): 6655-6665.
- [8] Baldocchi D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C<sub>3</sub> (wheat) and an open C<sub>4</sub> (corn) crop II: CO<sub>2</sub> exchange and water use efficiency. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 67(3/4): 291-321.
- [9] Li J, Yu Q, Sun X M, Tong X J, et al. 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.
- [10] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 亚热带稻田生态系统CO<sub>2</sub>通量的季节变化特征. 环境科学, 2007, 28(2): 283-288.
- [11] 李琪, 胡正华, 薛红喜, 等. 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.
- [12] 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.
- [13] Giltrap D L, Li C, Saggat S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 136(3/4): 292-300.
- [14] Wattenbach M, Sus O, Vuichard N, et al. The carbon balance of European croplands: a cross-site comparison of simulation models. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 139(3): 419-453.
- [15] 韩士杰, 董云社, 蔡祖聪, 等. 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.
- [16] Ciais P, Gervois S, Vuichard N, et al. Effects of land use change and management on the European cropland carbon balance. Global

- Change Biology, 2011, 17(1): 320-338.
- [17] 马尚谦, 张勃, 杨文义, 等. 1960—2015年淮河流域异常初、终霜日时空变化及其影响因子. 自然资源学报, 2019, 34(2): 359-373.
- [18] 伍琼, 田红, 严平, 等. 淮河流域农田CO<sub>2</sub>和热通量日、季节变化特征. 中国农学通报, 2009, 25(1): 211-216.
- [19] 韩云芳, 严平, 陈琛, 等. 淮河流域农田生态系统碳通量变化特征. 安徽农学通报, 2013, 19(22): 82-83.
- [20] CHEN Chen, LI Dan, GAO Zhiqiu, et al. Seasonal and interannual variations of carbon exchange over a rice-wheat rotation system on the North China Plain. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, (32): 1365-1380.
- [21] 胡雯, 王东勇, 张苏, 等. 淮河流域旱涝易发区农田的陆气相互作用——CO<sub>2</sub>通量、能量交换和水汽输送的季节变化特征. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 92-100.
- [22] 薛红喜, 李峰, 李琪, 等. 基于涡度相关法的中国农田生态系统碳通量研究进展. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2012, 4(3): 226-232.
- [23] 叶飞, 严平, 钱坤, 等. 淮河流域农田碳收支特征及影响因素分析. 生态环境学报, 2012, 21(1): 49-54.
- [24] 王有恒, 景元书, 郭建侠, 等. 涡度相关通量修正方法比较. 气象科技, 2011, 39(3): 363-368.
- [25] 费敦悦, 郭建侠, 刘俊伟, 等. 基于涡度相关通量数据估算水稻光能利用率. 气象科学, 2018, 38(01): 76-84.
- [26] 中国气象局. 近地层通量观测规范. 北京: 气象出版社, 2007.
- [27] 孙小祥, 常志州, 杨桂山, 等. 长三角地区稻麦轮作生态系统净碳交换及其环境影响因子. 中国生态农业学报, 2015(7): 15-23.
- [28] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林 CO<sub>2</sub>通量季节变化及其环境因子的影响. 中国科学D辑: 地球科学, 2004, 34(S2): 109-117.
- [29] 孙成, 江洪, 周国模, 等. 我国亚热带毛竹林 CO<sub>2</sub>通量的变异特征. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2717-2724.

(上接137页)

接影响能量平衡闭程度, 对仪器的交叉标定和确保数据采集器的正常运行可以减少能量平衡闭合研究的不确定性<sup>[22]</sup>; ②能量平衡各分量 ( $R_n$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $LE$ ) 观测的高度和时空尺度有差异, 测量面积的不匹配等因素可能给能量闭合带来误差<sup>[8]</sup>; ③忽略了其他能量吸收项而造成的误差, 例如土壤热通量板上层土壤的热储量、冠层热储量中植被的热储量、植物的光合耗能等能量吸收项未加以考虑, 给有效能量的估算带来误差<sup>[9]</sup>; ④垂直平流造成的误差, 在涡度相关技术通量观测中, 认为垂直平流可以通过坐标旋转使得垂直风速为零而被忽略, 然而垂直风速和垂直平流不为零是真实存在的, 因而造成了误差<sup>[23]</sup>; ⑤高频与低频湍流通量损失造成的误差, 湍流通量由于低通滤波的作用和高通滤波的作用而被低估, 此外, 超声风速仪和红外气体分析仪的空间分离也会充当低通滤波的角色造成高频损失等<sup>[24]</sup>。淮河流域农田生态系统能量不闭合主要是由哪方面因素造成的? 各影响因素对能量不闭合的贡献如何? 这有待于进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 赵鸣, 苗曼倩. 大气边界层. 北京: 气象出版社, 1992.
- [2] 张强. 大气边界层气象学研究综述. 干旱气象, 2003, 21(3): 74-78.
- [3] 张旭东, 彭镇华, 漆良华, 等. 生态系统通量研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1976-1982.
- [4] 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与CO<sub>2</sub>通量的测定. 地理学报, 2002, 57(3): 333-342.
- [5] 伍琼, 田红, 严平, 等. 淮河流域农田CO<sub>2</sub>和热通量日、季节变化特征. 中国农学通报, 2009, 25(1): 211-216.
- [6] 王兵, 刘世荣, 崔向慧, 等. 全球陆地生态系统水热平衡规律研究进展. 世界林业研究, 2002, 15(1): 19-28.
- [7] 苑旭, 朱元骏, 刘文兆, 等. 黄土塬区麦田能量平衡特征. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 227-233.
- [8] 王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析. 地球科学进展, 2009, 24(7): 705-713.
- [9] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(China FLUX)能量平衡闭合状况的评价. 中国科学(地球科学), 2004, 34(z2): 46-56.
- [10] 吴东星, 李国栋, 张茜. 华北平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡与闭合研究. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1413-1422.
- [11] 李国栋, 史桂芬, 吴东星, 等. 黄淮海平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡研究——以封丘地区为例. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 93-100.
- [12] 李阳, 景元书, 李根, 等. 低丘红壤区集水区和田块尺度农田能量平衡特征比较. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2393-2403.
- [13] 吴锦奎, 丁永建, 沈永平, 等. 黑河中游间作灌溉农田的能量平衡. 冰川冻土, 2006, 28(3): 443-449.
- [14] 安东, 崔耀鹏, 刘青, 等. 密西西比地区农田下垫面能量平衡特征研究. 现代农业科技, 2016, 17: 163-164.
- [15] 丛宏斌, 赵立欣, 姚宗路, 等. 玉米秸秆连续干馏条件下能量平衡分析. 农业工程学报, 2017, 33(7): 206-212.
- [16] 田红, 伍琼, 童应祥. 安徽省寿县农田能量平衡评价. 应用气象学报, 2011, 22(3): 356-361.
- [17] 谢五三, 田红, 童应祥, 等. 基于淮河流域农田生态系统观测资料的通量研究. 气象科技, 2009, 37(5): 601-606.
- [18] 童应祥, 田红. 寿县地区麦田能量平衡闭合状况分析. 中国农学通报, 2009, 25(18): 384-387.
- [19] 童应祥, 王东, 田红, 等. 淮河流域农田光合有效辐射(PAR)的基本特征. 中国农学通报, 2010, 26(23): 331-335.
- [20] 余子, 李扬云, 童应祥, 等. 寿县地区小麦和水稻田地表面反射率观测分析. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 639-645.
- [21] 中国气象局. 近地层通量观测规范. 北京: 气象出版社, 2007.
- [22] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 2000, 114-175.
- [23] Paw U KT, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. Corrections of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97: 487-511.
- [24] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37:17-35.