

淮河流域典型农田生态系统碳通量变化特征

李琪¹, 胡正华¹, 薛红喜², 王云龙¹, 谭甜甜³, 吴东丽²

(1.南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2.中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 3.柯坪县气象局, 新疆 柯坪 843600)

摘要:为了准确评价农田生态系统在全球碳平衡中的作用,利用涡度相关技术对安徽省寿县冬小麦/水稻生态系统进行了碳通量的监测,并在数据校正、剔除和插补的基础上,研究生长季农田净生态系统碳交换(NEE)的变化特征。结果显示,2008年寿县农田生态系统CO₂通量的日变化进程为单峰型,冬小麦和水稻最大的CO₂吸收速率分别为2.45和2.48 mg·m⁻²·s⁻¹。从物候期的角度来看,冬小麦在抽穗期碳通量值最小,乳熟期最大;水稻拔节时期碳通量值最小,即固碳能力最强。冬小麦/水稻生态系统不同月份碳通量月均日变化也呈U型曲线,作物生命活动越旺盛,NEE峰值越高,夜间CO₂排放则在8月份达到最高值。2008年冬小麦和水稻月平均最大日CO₂吸收峰分别出现在4月和8月,分别为1.30和1.07 mg·m⁻²·s⁻¹。冬小麦生态系统NEE的日最大累积吸收量出现在4月16日,可达11.76 gC·m⁻²·d⁻¹,水稻生态系统的出现在8月3日,为10.40 gC·m⁻²·d⁻¹。冬小麦从拔节到成熟时间段内的固碳能力为326.87 gC·m⁻²,水稻从返青到成熟时间段内的固碳能力也达到了300.05 gC·m⁻²。

关键词:农田生态系统;碳通量;淮河流域;涡度相关

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2545-06

Variation of Net Ecosystem Carbon Flux over Typical Agro-ecosystem in Huaihe River Basin

LI Qi¹, HU Zheng-hua¹, XUE Hong-xi², WANG Yun-long¹, TAN Tian-tian³, WU Dong-li²

(1.Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China; 3.Keping Meteorological Bureau, Keping 843600, China)

Abstract: For the accurate assessment on the function of agro-ecosystem in global carbon balance, carbon fluxes in winter wheat/rice ecosystem in Shouxian of Anhui Province were measured using eddy covariance technique. Based on the data rectification, rejecting and filling, the variation characteristics of net ecosystem CO₂ exchange(NEE) in growing season was discussed. The results indicated that CO₂ flux pattern in agro-ecosystem was single peak type in 2008. The maximum CO₂ uptake rates for winter wheat and rice were 2.45 and 2.48 mg·m⁻²·s⁻¹, respectively. The minimum and maximum values of CO₂ flux for winter wheat were observed in the tassel period and at the milk stage, respectively. For the rice, the minimum value of CO₂ flux occurred at the jointing stage. The average date change in one month of net ecosystem carbon flux showed the U type curve for the winter wheat/rice ecosystem in different month. The life activities were more vigorous, the peak values for the NEE were higher, and the carbon emission reached the maximum value in the August. The average date change values in one month of net ecosystem carbon flux for winter wheat and rice were 1.30 and 1.07 mg·m⁻²·s⁻¹, occurred in April and August, respectively. Daily integrated NEE value of winter wheat ecosystem reached its uptake peak magnitude of 11.76 gC·m⁻²·d⁻¹ on April 16, 2008, and for the rice ecosystem, the maximum daily integrated NEE value was 10.40 gC·m⁻²·d⁻¹ on August 3, 2008. From the jointing stage to the mature stage in 2008, the value of carbon uptake was 326.87 gC·m⁻² for the winter wheat, and the value was 300.05 gC·m⁻² for the rice from green stage to mature stage.

Keywords: agro-ecosystem; carbon flux; Huaihe River Basin; eddy covariance

收稿日期:2009-07-30

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAD04B09);国家自然科学基金项目(40605029);南京信息工程大学科研启动项目(20080264)

作者简介:李琪(1977—),男,河北新城人,博士,讲师,主要从事生态气象、农业气象、陆地生态系统碳循环的研究。E-mail:liqix123@sina.com

通讯作者:薛红喜 E-mail:xue-hongxi@163.com

农耕是世界上规模最大的人类活动,农田生态系统中的碳库是全球碳库中最活跃的部分,对维持全球碳平衡具有很重要的作用^[1-3]。尤其是在中纬度地区,农田生态系统对区域的碳积累有重要贡献^[4],因此农田生态系统 CO₂ 源/汇评价是国际碳循环研究的热点问题^[5]。我国是农业大国,农田在地表覆盖中占很大比例,深入认识农田生态系统 CO₂ 时空变化特征以及与环境因素、人为管理因素之间的关系,有助于我国制定正确的农业管理措施,通过减少农田生态系统碳排放或增加碳的存储使中国在国际排放权的争夺中处于主动地位^[6]。

目前为止,我国农田生态系统 CO₂ 通量研究所用的方法主要以箱式法(静态暗箱法和静态透明箱法)为主,对下垫面植被的干扰较大,且缺乏观测的连续性^[6]。目前普遍认为微气象法是长期测定生态系统碳通量的最可行的方法^[7-8]。涡度相关法是一种非破坏性的微气象通量测定技术,其观测的通量表示观测面以下土壤-植被系统与大气间交换状况,是光合过程与呼吸过程综合作用的结果^[9-10]。涡度相关技术可以长时间大范围的观测,已广泛应用于陆地生态系统碳通量的测定中^[11-14]。中国气象局于 2007 年开始利用涡度相关技术对淮河流域内的安徽寿县农田生态系统进行长期观测,本文是这一研究过程中的初步结论,希望能为该观测站内农田生态系统碳通量的深入研究提供基础,并为我国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,为政府制定减排决策提供依据。

1 研究区域自然概况

寿县地处安徽中腹地,淮河中游南岸,属亚热带季风性半湿润气候,是我国南北气候过渡带,四季分明,雨热同期。多年平均气温 14.8℃,降水量 906.7 mm,无霜期 213 d。寿县作为农业大县,是国家首批商品粮食基地县之一。农作物种植面积大、作物种类多,在耕地面积中,以水稻-小麦、水稻-油菜轮作为主,一年两熟占据首位。

观测地点(32°33'N,116°47'E)位于寿县国家气

候观测台,海拔 26.8 m。该观测台位于淮河南岸,其下垫面状况属于中国气候观测系统(CCOS)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。其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。

2 研究方法

2.1 数据来源

2007 年 6 月在研究地点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 CO₂/H₂O 分析仪(CS7500,LI-COR,USA)、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。按照微气象学符号协定,生态系统净碳交换(NEE)向下通量(即碳吸收)用负号表示。

2.2 数据分析与处理

本文选取 2008 年研究区内冬小麦/水稻轮作田主要生长季(3—9 月)的碳通量数据进行研究。观测点上的农田生态系统灌溉条件较好,肥力中等。冬小麦于 2007 年 10 月 22 日播种,5 月 30 日收割。水稻于 5 月 7 日播种,6 月 11 日移栽进入研究区域内,9 月 18 日收割干净。所种植的冬小麦和水稻的物候期普遍期见表 1。

为确保数据的准确性,对涡度相关系统监测的半小时通量数据进行 3 次坐标旋转和 WPL 密度效应修正^[15],对由于系统故障、降雨等因素造成的数据丢失进行了剔除。为了消除夜间低湍流对数据的影响,以夜间摩擦风速>0.15 m·s⁻¹ 为标准对数据进行筛选^[16]。经过数据筛选和剔除异常点后,白天缺失数据利用光响应曲线进行插补^[17],夜间缺失数据用指数关系插补^[18]。

3 结果与讨论

3.1 碳通量的日动态

寿县农田作物冬小麦/水稻生态系统在生长季内

表 1 冬小麦和水稻的物候期(日期)
Table 1 The phenophases for the winter wheat and rice(date)

物候期	播种	出苗	三叶	返青	分蘖	拔节	孕穗	抽穗	开花	乳熟	成熟
冬小麦	10.22*	10.30*	11.16*	—	11.22*	3.18	4.6	4.11	4.23	5.10	5.26
水稻	5.7	5.14	5.22	6.14	6.24	7.18	7.30	8.8	—	8.26	9.16

注:* 表示 2007 年的日期

的夜间 NEE 为正值,表现为生态系统的碳排放。日出后,光合有效辐射(PAR)达到一定数值后 NEE 转为负值,表现为生态系统的碳吸收。为了能表征研究区域普遍的变化规律,本文采用 7 日的平均值来分析农田生态系统碳通量的日变化特征(图 1)。

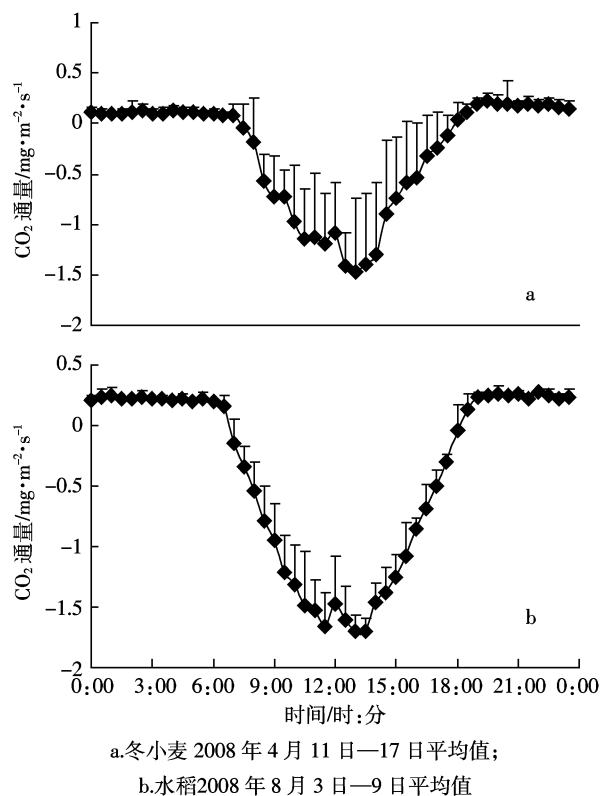


图 1 碳通量日变化

Figure 1 Date change of net ecosystem carbon flux

从图 1 可以看出,2008 年寿县冬小麦和水稻生态系统在生长季中,CO₂ 通量的日进程均表现为一种具有一个吸收高峰的 U 型曲线。冬小麦和水稻生态系统都是在日出后(即 7:00 以后)开始吸收 CO₂, NEE 随着太阳辐射的增加迅速增大,冬小麦在 13:00 左右到达吸收高峰后,CO₂ 的吸收开始下降,18:00 左右重新转为碳释放;水稻则在 13:30 左右到达吸收高峰,18:30 左右后重新转为碳释放,到达吸收高峰和转为碳源的时间都比冬小麦稍晚一些。水稻农田生态系统碳通量变化的单峰型与朱咏莉等得到的单峰型基本相同^[18]。

2008 年寿县农田生态系统生长季内最大的 CO₂ 吸收速率为 2.48 mg·m⁻²·s⁻¹,出现在 8 月 10 日(即属于水稻生态系统);小麦生态系统的最大 CO₂ 吸收速率为 2.45 mg·m⁻²·s⁻¹(4 月 18 日),与稻田的值相差不大。胡雯等^[19]于 2004 年在安徽寿县也得到了稻田吸

收 CO₂ 通量最大可超过 2 mg·m⁻²·s⁻¹ 的结果,与本文的结论相似。

3.2 不同物候期的碳通量日动态

寿县冬小麦/水稻生态系统在不同的物候期碳通量日变化也呈 U 型(图 2),但变化的幅度和情况都不同。对冬小麦而言,拔节、孕穗和开花期的碳通量变化幅度比较接近,抽穗期的碳通量值最小,但与上述 3 个物候期内的值相差不大,而乳熟期的碳通量值最大。这说明冬小麦在拔节、孕穗、抽穗和开花时期的碳吸收比较强,而到了乳熟期,冬小麦已经接近成熟,固碳能力有了较明显的下降,再加上土壤呼吸作用的增强,所以乳熟期的碳通量值最大。李双江等^[20]在黄土高原对冬小麦研究得到的不同物候期 CO₂ 通量的变化幅度远小于寿县地区的,而且各物候期的固碳能力大小顺序也与本研究的结论不同。造成这种差异的原因很多,气候因素、种植和管理制度、作物品种等都有可能,因此对该问题还需进行深入的研究。

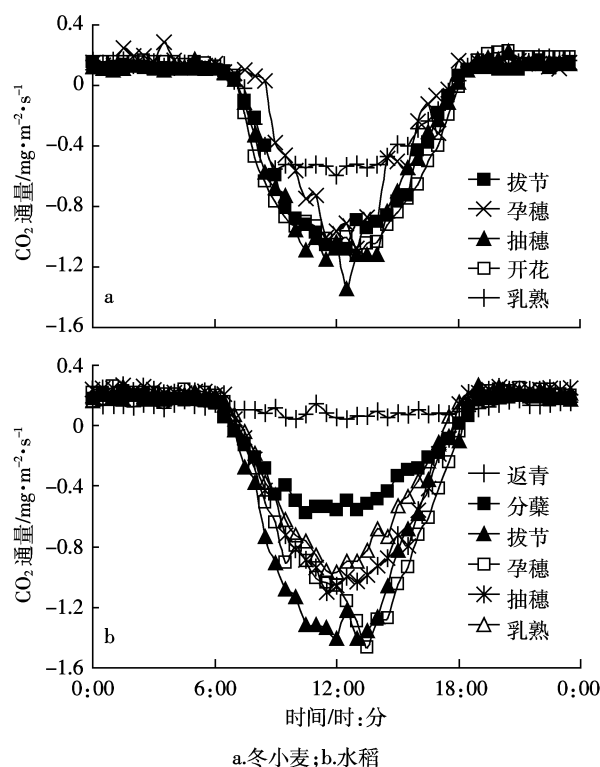


图 2 不同物候期的碳通量日变化

Figure 2 Date change of net ecosystem carbon flux in different phenophases

对于水稻而言,返青期全天都表现为碳源,其余几个时期的碳固定能力由弱到强依次为分蘖、乳熟、抽穗和孕穗,拔节时期的固碳能力最强,说明水稻生态系统营养生长期间的固碳能力大于生殖生长期,

该结论与冯敏玉等^[21]、朱咏莉等^[22]的研究结果相似。

3.3 碳通量的月均日动态

寿县冬小麦/水稻农田生态系统不同月份碳通量月均日变化过程有较大差异。从图 3 可以看出,农田生态系统在 6 月份的 NEE 昼夜变化比较平缓,且碳通量以正值为主。这主要是由两个原因造成的:一是第一季作物冬小麦已经在 5 月 30 日收割,而第二季作物水稻在 6 月 11 日才移栽过来,这之间有一个没有作物生长的裸地阶段;二是因为刚移栽过来的水稻幼苗在前期生长较缓慢,植物的生长活动很弱,而此时土壤呼吸作用较为强烈,故整个生态系统基本上表现为碳的排放。在 3—5 月和 7—9 月,随着气温的升高和土壤水分的增加(降水量的增加以及灌溉),适宜的生长条件使作物的生长活动旺盛,碳通量的月均日变化也呈 U 型曲线。

3—5 月是冬小麦的主要生长期,3 月以后冬小麦开始拔节,系统在白天的大部分时间里 CO_2 通量都为负值(碳吸收),3 月份平均气温较历年平均值偏高,降水较历年偏少,光、温、水组合好且土壤墒情适宜,有利于冬小麦生长发育,系统白天的碳吸收活动较强,峰值较高。4 月份为小麦孕穗、抽穗、开花至灌浆期,生命活动很旺盛,此阶段碳吸收活动最强,而且此时土壤呼吸作用还比较弱,所以 NEE 形成了宽大的单峰曲线。5 月份进入冬小麦的生殖生长期,固碳能力有了较明显的下降,再加上此时土壤的呼吸作用继续增强,所以其 CO_2 吸收值是除 6 月份外最低的。7—9 月是水稻的主要生长季,水稻生态系统碳通量的月均日变化特征与冬小麦相似,因此本文不再赘述。

2008 年冬小麦/水稻生态系统夜间 CO_2 排放随着气温和降雨的增加而逐渐增高(6 月份除外),8 月份达

到最高值,这主要是因为土壤和作物(水稻)的呼吸作用都在 8 月份达到最强;进入 9 月份排放值又有所下降。4 月份作物(冬小麦)的呼吸作用虽然也很强,但由于土壤呼吸作用很弱,4 月份的通量值并不高。

2008 年冬小麦和水稻月平均最大日 CO_2 吸收峰分别出现在 4 月和 8 月,吸收速率分别为 1.30 和 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与其他地区相比,寿县地区农田生态系统月平均日吸收峰值高于华北平原的冬小麦(2003 和 2004 年分别为 0.81 和 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[23]以及三江平原的水稻(2004 年为 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[24]。与三江平原和华北平原相比,寿县所处的纬度更低,热量和雨量更充足,植被的生产力也更高,这可能是造成上述现象的根本原因。

3.4 碳通量日总量的季节动态

本文把每日每半小时的通量进行积分求出每日的 NEE,并分析其季节变化特征。图 4 显示,在 2008 年生长季期间,寿县农田生态系统出现了 2 个明显的碳吸收峰,分别对应研究区内的两季作物冬小麦和水稻的生长情况。对于农田生态系统而言,因为生长季的温度较适宜,所以水分条件是影响其碳通量变化的主要因素。在自然状况下,由于受降雨条件的制约,自然物种在生长季中会因土壤水分条件的不同而出现多个碳吸收峰的现象^[25]。但对于寿县的冬小麦和水稻生态系统而言,由于人为灌溉的原因,水分因子不再成为制约作物生长的限制因子,一季作物通常只会出现一个明显的碳吸收峰。

从图 4 可以看出,冬小麦生态系统 NEE 的日最大累积吸收量出现在 4 月 16 日(第 107 d),可达 $11.76 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,NEE 的日最大累积释放量为 $4.56 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,出现在 5 月 26 日(第 147 d);而水稻生态系统 NEE 的日最大累积吸收量出现在 8 月 3 日(第 216 d),为 $10.40 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,NEE 的日最大累积释放量为 $4.76 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,出现在 8 月 16 日(第 229 d)。4 月份以及 8 月份前后分别是冬小麦和水稻生长的旺季,所以 NEE 日最大累积吸收量会出现在这一时期。5 月份冬小麦的生长能力下降,但由于此时水热条件适宜,土壤呼吸作用增强,所以冬小麦的日最大累积释放出现在 5 月份;对于水稻而言,9 月份植物生长能力下降,但同时土壤呼吸作用也在降低,因此 NEE 的日最大累积释放值反而出现在 8 月份。

2008 年研究区的冬小麦从拔节到成熟这段时间里,固碳能力达到了 $326.87 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,水稻从返青到成熟的这段时间里,固碳能力也达到了 $300.05 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,

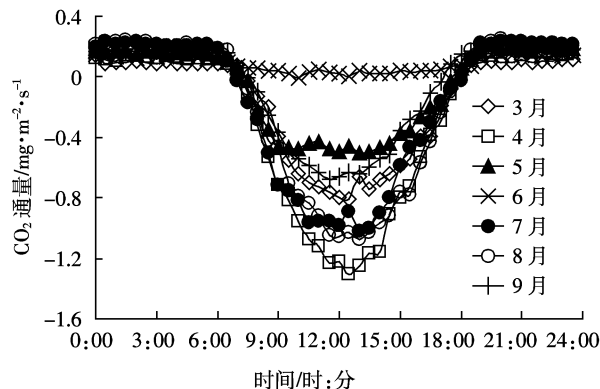


图 3 碳通量的月均日变化

Figure 3 Average date change in one month of net ecosystem carbon flux

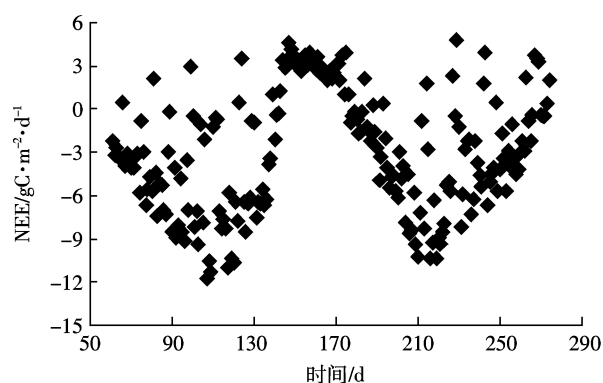


图4 碳通量日总量季节变化

Figure 4 Season change of day total net ecosystem carbon flux

该研究区内的农田生态系统在生长季内表现出了很强的碳汇的特征。

与其他地区的研究结果相比,寿县冬小麦生态系统 NEE 的日最大累积吸收量大于华北平原冬小麦农田(2003 和 2004 年分别为 8.19 和 $9.50 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[23], 小于美国俄勒冈地区小麦田 ($13.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[26], 而与德国 Thuringia 州地区冬小麦田 ($10.0 \sim 12.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[27] 的值差不多。寿县稻田生态系统 NEE 日最大累积吸收量比亚热带稻田区早稻和晚稻的吸收峰值(分别为 9.7 和 $9.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[28] 略高。

4 结论

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,其与大气间的物质交换过程在当前全球碳循环研究领域占据非常重要的地位。本文利用涡度相关技术观测了寿县冬小麦/水稻生态系统与大气之间的 NEE,结果表明:

2008 年生长季中寿县冬小麦/水稻田 CO_2 通量的日变化进程都为单峰型,其中冬小麦在 2008 年最大的 CO_2 吸收速率为 $2.45 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 水稻最大的 CO_2 吸收速率为 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;寿县冬小麦/水稻生态系统在不同的物候期碳通量日变化也呈 U 型,冬小麦抽穗期碳通量最小,乳熟期最大;水稻拔节时期固碳能力最强。

2008 年寿县冬小麦/水稻农田生态系统不同月份的碳通量月均日变化也呈 U 型曲线,作物的生命活动越旺盛,NEE 形成的曲线越宽大,峰值越高。冬小麦/水稻生态系统夜间 CO_2 排放随着气温和降雨的增加而逐渐增高,8 月份达到最高值;2008 年冬小麦和水稻月平均最大日 CO_2 吸收峰分别出现在 4 月和 8 月,分别为 1.30 和 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2008 年寿县农田生态系统出现 2 个明显的碳吸收峰,分别对应两季作物冬小麦和水稻的生长情况。冬小麦生态系统 NEE 的日最大累积吸收量出现在 4 月 16 日(第 107 d),达 $11.76 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,水稻生态系统的出现在 8 月 3 日(第 216 d),为 $10.40 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。2008 年研究区的冬小麦从拔节到成熟这段时间里,固碳能力达到了 $326.87 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$,水稻从返青到成熟的这段时间里,固碳能力达到了 $300.05 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

从本文的研究来看,寿县冬小麦和水稻生态系统在生长季具有较高的固碳能力,都表现出明显的碳汇的特征。但由于受人类活动的强烈干预,其碳通量的变化与自然生态系统表现出不同的规律特征,主要体现在日总量的季节变化上。受篇幅所限,将会在后续的研究中深入探讨环境因子对寿县农田生态系统碳通量的影响和响应机制。

参考文献:

- [1] 于瑞贵,孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及其时空变化特征[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [2] YU Rui-gui, SUN Xiao-min. Carbon flux observation techniques and temporal and spatial characteristics on terrestrial ecosystems in China [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [3] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351:304-306.
- [4] Cambell C S, Heilman J L, Mcinnes K J, et al. Diel and seasonal variation in CO_2 of irrigated rice[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108:15-27.
- [5] Soegaard H, Jensen N O, Boegh E, et al. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 114:153-173.
- [6] Hutchinson J J, Campbell C A, Desjardins R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142:288-302.
- [7] 姚玉刚,蒋跃林,李俊. 农田 CO_2 通量观测的研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6):626-629.
- [8] YAO Yu-gang, JIANG Yue-lin, LI Jun. Advance on carbon dioxide flux observation of farmland[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(6):626-629.
- [9] Saito M, Miyata A, Nagai H, et al. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135:93-109.
- [10] Moureaux C, Debacq A, Bodson B, et al. Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139:25-39.
- [11] Verma S B, Dobermann A, Cassman K G, et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize 2 based agroecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131:77-96.
- [12] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T T. Measuring biosphere-atmo-

- sphere exchange of biologically related gases with micro meteorologically methods[J]. *Ecology*, 1988, 69:1331-1340.
- [11] Gilmanov T G, Soussana J F, Aires L, et al. Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 121:93-120.
- [12] Ciais P, Reichstein M, Niovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J]. *Nature*, 2005, 437:529-533.
- [13] Fu Y L, Yu G R, Sun X M, et al. Depression of net ecosystem CO₂ exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe and alpine shrub[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137:234-244.
- [14] Grace J, S Jose J, Meir P, et al. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas[J]. *Journal of Biogeography*, 2006, 33:387-400.
- [15] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106:85-100.
- [16] Xu L K, Baldocchi D B. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123:79-96.
- [17] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107:43-69.
- [18] 朱咏莉, 吴金水, 陈微微, 等. 稻田生态系统 CO₂ 通量的日变化特征[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9):604-605.
ZHU Yong-li, WU Jin-shui, CHEN Wei-wei, et al. Diurnal characteristics of CO₂ fluxes in rice paddy ecosystem in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(9):604-605.
- [19] 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——CO₂ 通量、通量交换和水汽输送的季节变化特征[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6):92-100.
HU Wen, WANG Dong-yong, ZHANG Su, et al. Seasonal variation of CO₂ flux, energy exchange and water vapor transfer over a cropland in Huaihe River Basin, China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(6):92-100.
- [20] 李双江, 刘文兆, 高桥厚裕, 等. 黄土塬区麦田 CO₂ 通量季节变化[J]. 生态学报, 2007, 27(5):1987-1992.
LI Shuang-jiang, LIU Wen-zhao, Atsuhiko Takahashi, et al. The seasonal variation of CO₂ flux in a wheat field of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1987-1992.
- [21] 冯敏玉, 宫 松, 魏 丽, 等. 稻田 CO₂ 浓度和通量变化特征以及水分利用效率的研究[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(5):927-932.
FENG Min-yu, GONG Song, WEI Li, et al. A study on the features of CO₂ concentration and flux changes and WUE in rice field[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2008, 30(5):927-932.
- [22] 朱咏莉, 吴金水, 童成立, 等. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征[J]. 环境科学, 2008, 29(4):1040-1044.
ZHU Yong-li, WU Jin-shui, TONG Cheng-li, et al. Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(4):1040-1044.
- [23] 李 俊, 于 强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控和机制[J]. 中国科学 D 辑·地球科学, 2006, 36(增刊):210-223.
LI Jun, YU Qiang, SUN Xiao-min, et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain[J]. *Science in China Ser D Earth Sciences*, 2006, 36(suppl):210-223.
- [24] 宋 涛, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原稻田 CO₂ 通量及其环境响应特征[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6):657-661.
SONG Tao, WANG Yue-si, SONG Chang-chun, et al. CO₂ fluxes from rice fields of Sanjiang plain and its environmental response factors[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6):657-661.
- [25] 杨 娟, 周广胜, 王云龙, 等. 内蒙古克氏针茅草原生态系统——大气通量交换特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3):533-538.
YANG Juan, ZHOU Guang-sheng, WANG Yun-long, et al. Characteristics of net ecosystem flux exchanges over *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3):533-538.
- [26] 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[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 67:291-321.
- [27] Anthoni P M, Freibauer A, Kolle O, et al. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121:55-67.
- [28] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征[J]. 环境科学, 2007, 28(2):283-288.
ZHU Yong-li, TONG Cheng-li, WU Jin-shui, et al. Seasonal characteristics of CO₂ fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2):283-288.