文章编号: 1674-7070(2012) 03-0226-07

基于涡度相关法的中国农田生态系统碳通量研究进展

薛红喜[1] 李峰[1] 李琪[2,3] 王连喜[2,3] 王云龙[2,3] 胡正华[2,3]

摘要

农田生态系统是受人为活动强烈控制和干扰的系统,对其碳源/汇的评价是全球碳循环研究的热点. 首先概括了以涡度相关法为手段的中国农田生态系统碳通量的研究进展,重点总结了中国农田生态系统碳通量的时间变化、驱动机制和模型模拟等方面的研究成果,并在此基础上对今后中国农田生态系统碳通量研究提出了建议,认为长期观测与研究、多因子协同作用、模型开发与尺度推绎、数据质量监控和评价是今后研究的重点方向.

关键词

碳通量; 农田生态系统; 涡度相关

中图分类号 P404

文献标志码 A

收稿日期 2011-05-12

资助项目 中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2010Z05) ; 南京信息工程大学科研启动基金(20080264)

作者简介

薛红喜,男,博士,高级工程师,主要从事农业气象、大气探测方面的研究工作. xue-hongxi@163.com

李琪(通信作者) ,男,博士,副教授,主要从事生态系统碳循环、农业气象方面的研究工作. liqix123@sina.com

1 中国气象局气象探测中心,北京,100081

2 南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室,南京,210044

3 南京信息工程大学 环境科学与工程学院,南京,210044

0 引言

陆地生态系统下垫面的复杂性以及人类活动的强烈干扰,是目前陆地生态系统碳循环研究中存在不确定性的最重要的原因之一,对陆地生态系统碳循环规律和驱动机制的研究是全球碳循环研究的关键环节[1-3]. 农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,也是受人为因素强烈控制和干扰的系统,农业活动已经成为加速全球变暖不容忽视的活动之一,因此农田生态系统碳循环的研究得到了发展和重视,对该系统碳的源/汇评价是目前国际上研究的热点问题之一[4-6].

涡度相关法是长期定位观测生态系统碳通量的重要方法,涡度相关技术的进步使得长期、连续的通量观测成为可能,为研究农田生态系统尺度碳通量的变化规律及其对环境变化的响应提供了可行途径[7-9],因此成为农田生态系统碳通量观测的主要方法. 国内学者利用涡度相关技术对农田生态系统碳通量进行了大量的研究,本文针对这些成果进行阶段性的总结,希望为今后的研究方向提供支撑.

1 农田生态系统碳通量时间变化特征

在非生长季作物的生长几乎停滞,此时农田生态系统碳通量的日变化不明显,在生长季(3—10 月) ,则呈现出明显的变化规律. 一般来说,农田生态系统碳通量在生长季都呈单峰型的“U”型曲线(向下的碳通量为负,下同) : 夜间碳通量为正值,农田生态系统释放碳,日出后由碳源转为碳汇,此后随着辐射的增强,农田吸收的碳不断增加,一般在 12:00 左右达到吸收峰值,此后随着太阳辐射的减弱,农田碳吸收量不断下降,在日落前后重新转变为碳源[10-14]. 农田生态系统的吸收峰值一般出现在正午前后,但也有例外,如黄土源区冬小麦生态系统的峰值出现在 10:00[15],安徽寿县冬小麦和水稻生态系统峰值分别出现在 13:00 和 13:30[16],华北平原的夏玉米农田生态系统峰值则出现在 14:00—15:00[17].

除单峰型变化外,农田生态系统的碳通量也有双峰型或不规则型的变化情况,如亚热带稻田生态系统碳通量在 1 d 内出现 2 个碳吸收或排放高峰,且多出现在白天光强发生较大波动的情况下[18]. 王建

林等[19]也观测到了华北平原冬小麦齐穗期碳通量的双峰现象,并解释为光合"午休"现象.不规则型表现在通量随时间出现忽高忽低甚至交换方向发生逆转的波浪状变化,这与特殊的天气条件(晴间多云、阴雨或风速变化较大)有关[18].郭建侠等[20]的研究也表明华北平原夏玉米田生长季净生态系统碳交换(Net Ecosystem Exchange of Carbon,NEE)为多峰型曲线.

在作物不同的生育期,农田生态系统的碳通量也有明显的差异.农田生态系统的碳交换主要发生在作物生长较为旺盛的时期内,碳吸收能力也是在这些时期达到最强.一般来说,作物在营养生长期的固碳能力要大于生长初期或生殖生长期,如冬小麦在拔节孕穗期[15,21]或灌浆期[22-23]、玉米在开花或吐丝期[20,23-24]、水稻在拔节[11,16]或抽穗期[25-26]的固碳能力最强.值得注意的是,作物固碳能力最强的时期往往也是其碳排放最强的时期,这主要是因为固碳能力最强的时期一般水热条件较好,此时土壤呼吸也处在高峰期,从而使农田生态系统的碳排放量也较多.

表1是中国农田生态系统NEE的比较,可以看出,由于种植方式、区域水热等条件的不同,各种作物的最大碳吸收速率有很大的差异,即使是相同的作物,也会由于地理位置或不同年份带来的水热条件不同,而产生很大的差异.从碳收支上来看,由于不同学者研究时所选的时间段不一样,所以缺乏可比性,但至少在生长季作物都表现出了明显的碳汇特征.

2 环境因素对农田碳通量的影响

2.1 光照对农田碳通量的影响

在生长季,作物以光合作用为主,因此光照是影响农田生态系统碳通量的重要因素,而光合有效辐射和净辐射是国内学者研究最多的2个因子.在生长季的白天,光合有效辐射和净辐射都是影响NEE变化的主要因素.随着光合有效辐射和净辐射的增加,作物对碳的同化吸收能力加大,这2个因子与农田生态系统NEE之间有明显的相关关系[10,20-22,26-27].林同保等[22]通过研究认为玉米吸收碳的最适宜辐射条件是470 $W \cdot m^{-2}$.但在不同的生育期,由于其他环境因素的影响,作物碳通量对光照的响应程度是不同的,如白天冬小麦的NEE与光合有效辐射在出苗分蘖期、起身期和成熟期几乎不相关,在灌浆期低度相关,在其他生育期内都达到了显著相关以上水平[15,17].

表1 中国农田生态系统NEE比较

Table 1 Comparison of NEE over different agro-ecosystems in China

研究地点	作物类型	年份	最大CO_2吸收速率/($mg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	最大C吸收速率/($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)	碳收支/($g \cdot m^{-2}$)	碳收支时间段
山东禹城[12]	冬小麦	2003	-0.81*	-8.19	-77.6	2002—2003年生长季
		2004	-1.07*	-9.50	-152.2	2003—2004年生长季
	夏玉米	2003	-1.14*	-10.20	-120.1	2003年生长季
		2004	-1.42*	-12.50	-165.6	2004年生长季
湖南桃源[27]	早稻	2003		-9.68	-675.2	2003年
	晚稻			-9.41		
辽宁锦州[24]	春玉米	2004		-16.68	-641.49	6—9月
		2005		-11.50	-468.93	
		2006		-21.38	-795.28	
河北固城[20]	夏玉米	2004	-1.7**	-10.1**		
三江平原[13]	水稻	2004	-0.68*	—	-530	2004年生长季
陕西长武[15]	冬小麦	2005		-13.70***		
山东禹城[23]	冬小麦	2006	-1.52	-9.35		
	夏玉米	2006	-2.36	-6.36		
安徽寿县[16]	冬小麦	2008	-2.45	-11.76	-326.87	拔节到成熟期
	水稻		-2.48	-10.40	-300.05	返青到成熟期

注:* 月均日变化极值;** Liu方法[28]计算;***拔节孕穗期平均值.

生长季的白天随着光量子通量密度(Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD)的增加,早稻和晚稻的碳通量逐渐增大,但当PPFD大于1 000 μmol·m^{-2}·s^{-1}时,碳净吸收趋于稳定,因此朱咏莉等[29]认为1 000 μmol·m^{-2}·s^{-1}左右是水稻群体光合作用由光控制阶段向非光控制阶段转换的转折点. 李祎君[24]对玉米的研究也得到了类似的结果,并通过进一步研究认为,NEE日最大值出现的时间受PPFD日最大值的控制,但NEE日最大值的大小则是多种因素作用的结果.

2.2 温度对农田碳通量的影响

土壤温度是控制农田生态系统碳通量的重要因子. 朱咏莉等[29]以25 ℃为参考温度,采用Van's Hoff方程对夜间通量和温度的平均值进行了拟合,结果表明稻田生态系统生长季的夜间呼吸通量与5、10、20 cm土层温度之间都存在极显著的指数相关关系,温度在控制稻田生态系统夜间呼吸的过程中起着主导作用. 进一步研究表明,5 cm土层温度是最适宜的反映稻田夜间碳通量变化的指标. 其他学者[12,15]对冬小麦、夏玉米的研究也得到了夜间NEE与地温之间的较强的相关关系. 但从已有的研究来看,土壤温度对夜间NEE的影响明显要强于对白天NEE的影响. 如李双江等[15]的研究表明,白天冬小麦的NEE与2 cm土壤温度返青期可达显著相关水平,在出苗分蘖、成熟期只有低度相关,而其他4个生育期几乎不相关.

另外在不同的水分条件下,农田生态系统呼吸对温度的敏感性是不同的. 如当土壤水分处于过高或过低的水平时,土壤温度已经不是影响生态系统呼吸的主导因子,此时水分胁迫的影响变得更为重要. 只有在土壤水分适宜,作物生长较少受土壤水分影响时,土壤温度才成为影响生态系统呼吸的重要因子[24].

空气温度也是影响农田生态系统的重要因素,研究[11,26]表明,稻田生态系统碳通量与气温有良好的相关性,一定范围内气温越高,作物生长速度越快,消耗CO_2越多,并且二者之间可达极显著的相关水平.

2.3 水分对农田碳通量的影响

对于小麦和玉米而言,水是其生长发育的关键因子,也是影响碳通量的重要因素. 研究[22,24]表明:土壤水分过低时,水分亏缺会引起作物的气孔关闭,导致光合能力下降;水分充足时,适宜的条件会使农田生态系统呼吸随着水分的增加而增加;但当土壤水分过高时,会造成土壤通透能力减弱,影响根系活力,致使根系的吸水能力减弱,也会影响作物的固碳能力.

通常情况下,稻田生态系统是不会受到水分影响的,但在排水条件下,稻田生态系统的碳通量也会发生有规律的变化. 朱咏莉等[30]研究了排水措施对亚热带稻田生态系统碳通量的影响,结果表明排水前后稻田碳通量的日变化趋势基本一致,但交换强度存在明显差异. 稻田排水期白天净吸收通量较淹水期平均下降约12%,夜间排放通量则增加52%左右. 日均净吸收通量下降了16%. 复水后碳排放明显受到抑制,夜间排放通量下降约44%. 进一步分析表明,排水后引起的环境条件的改善促进了稻田生态系统的土壤呼吸作用,从而导致排水期碳排放增加,净碳吸收减少.

3 农田碳通量的模拟研究

碳通量的模拟研究是深入认识农田生态系统碳循环及其控制机理的重要方面,国内学者在这方面也进行了一定的尝试. 何洪林等[31]基于人工神经网络对农田生态系统生长季碳通量的变化进行了模拟,结果表明模拟精度较高,可以有效地模拟农田生态系统的碳通量,也可以揭示出一些机理现象. 袁再健等[21]运用SiB2模型对华北平原冬小麦生长过程中的碳通量进行了模拟,也获得了较好的模拟效果,尤其是在下垫面相对均一的拔节孕穗期的模拟效果最佳. 王旭峰等[32]利用LPJ模型模拟了玉米的碳水通量,结果表明LPJ模型能够较好地模拟制种玉米与环境之间的碳水交换,其中NEE模拟值与观测值基本一致,决定系数达到了0.79. 王超[33]运用BIOME-BGC模型模拟了农田生态系统的碳通量,但模拟效果并不理想. 该模型对中国半干旱地区农田生态系统碳交换模拟尚有不确切之处,特别是净初级生产力模块和土壤异氧呼吸模块. 但Wang等[34]在对BIOME-BGC模型的部分参数进行修正后应用到了华北平原的农田生态系统上,得到了比较理想的模拟效果,说明碳通量模型的本地化工作还需要进一步加强. Huang等[35]从作物和土壤2个方面构建了农田生态系统碳收支模型Agro-C,作为一个机理性的模型,Agro-C可以很好地模拟水稻、小麦、玉米和棉花等作物的净初级生产力的值. 当然,由于模型本身的简化以及对一些生理过程的了解还不够深

入,使得模型在应用及推广上还需要做进一步的改进和验证.

国内农田生态系统碳通量模拟研究的时间尺度比较单一,能否用于大的时空尺度的模拟以及如何进一步提高模拟精度等问题还有待进一步研究.

4 其他研究

姚玉刚[23]对比了涡度相关法和透明箱法之间的差异,认为涡度相关法的扰动小,能够长时间连续观测,数据观测精度高,因此较箱法的优越性更高.涡度相关法白天测定的碳通量值可以作为标准校正透明箱法的值,当夜间风速较低时,涡度相关法测定的碳通量偏低,用箱法加以校正,可明显减少低估程度.二者之间的补充可以有效提高碳通量数据的精确度.

农田生态系统碳通量的变化也具有尺度效应,因此秦钟[36]利用小波变换研究了华北平原夏玉米碳通量的多尺度变化特征,结果表明夏玉米生育期间碳通量具有明显的阶段性特征,60~110 d 的时间尺度上,表现出偏多和偏少的振荡交替出现,极值中心位置出现在玉米播种后 100 d 左右.另外他还认为涡度相关系统的夜间碳通量观测值普遍偏低是引起植被/大气净生态系统碳交换量估算的不确定性的主要原因之一,这种不确定性对生态系统的长期碳收支的计算带来相当大的偏差,同时也会给过程模型的建立带来相当大的麻烦.利用涡度相关系统对通量进行长期观测过程中,观测记录不完整是普遍存在的问题,而仪器本身和气象条件限制是造成上述两个问题的主要原因.

郭建侠等[20]探讨了不同方法计算碳通量时的差异,认为直接计算在裸土时期会出现一定的负振幅,属于虚假的吸收信息,经过 WPL 方法和 Liu 方法[28]修正后,这种虚假信息可以被有效地抑制.WPL 方法夸大了水汽变化的作用,因而对碳吸收的减小作用更为强烈,会导致过量修正.Liu 方法在直接计算方法和 WPL 方法之间取得了很好的折中,既对虚假信息进行了有效修正,同时修正幅度又小于 WPL 方法,因此是目前能够得到的最为合理可信的结果.但从目前国内的情况来看,WPL 方法仍然是通量数据处理的最主要的方法,因此不同方法之间的比较及优化还需在今后的研究中深入探讨.

5 研究展望

国内学者利用涡度相关技术对农田生态系统的碳通量展开了定位观测,在农田生态系统碳通量的时间变化以及驱动机制研究方面已经有了一定的成果,但受诸多因素的限制,中国农田生态系统碳通量研究还需要在以下几方面进一步加强.

1) 已经开展的农田生态系统碳通量的日、月、生育期、年等不同时间尺度的研究,由于观测时间较短,因此得到的结果还不能够精确描述我国农田生态系统的碳通量时间变化规律,需要长时间地观测和研究才能得到更有价值的结论.国内的研究集中在小麦、玉米和水稻这 3 类作物上,所选区域虽然有典型性,但还不足以代表我国农田生态系统的碳通量的空间差异,还需扩大研究区域和研究对象.另外,由于研究时所选的时间尺度不一致,因此研究结果之间的可比性较低,今后要注意统一时间尺度,使研究结果更具实际意义.

2) 国内学者对农田生态系统碳通量的环境影响因素进行了初步的研究,得到了许多有价值的结论,但这些结论主要是单因素的研究成果,对多因素之间的协同作用还少有涉及.另外,除了光照、温度和水分外,其他环境因子和人为因子方面的研究少有开展,这些都会在正确认识农田生态系统碳通量驱动机制时带来很多不确定性,今后在这方面需要进一步加强.

3) 在农田生态系统碳通量的模型模拟方面,国内学者已经有了有益的尝试,但这些研究还是对已有模型的再利用.由于国内在农田生态系统碳通量观测与研究方面的工作刚起步不久,数据的积累以及对碳通量驱动机制的认识还远远不够,因此在开发具有自主知识产权的模型方面还有很多工作要做.另外,尽管有些模型模拟的精度较高,但模型参数的本地化仍是需要关注的方面,尤其是进行未来情景预测或进行尺度推绎时,这些模型的精度和适用性还有待进一步检验.

4) 仪器本身的物理限制、二维和三维的气流运动带来的数据偏差、数据处理方法和夜间通量的低估等不确定性因素仍然是农田生态系统碳通量观测和研究中需要优先关注的问题[37-38],只有处理好这些问题,才能使精确认识农田生态系统碳通量时空分布格局及其驱动机制以及为模型提供高精度的数据和参数成为可能,因此通量数据的质量控制与分析以及误差评价应该是今后研究工作的首要任务,而跨学科、多尺度、多途径的综合研究体系则是农田生态系统碳通量未来研究的发展方向[39].

参考文献
References

[1] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past,present and future [J]. Global Change Biology,2003,9(4):479-492

[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
LI Kerang. Land use change,net emission of greenhouse gas and terrestrial ecosystem carbon cycle [M]. Beijing: China Meteorological Press,2002

[3] Schimel D S,House J I,Hibbard K A,et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. Nature,2001,414: 169-172

[4] Berbigier P,Bonnefond J M,Mellmann P. CO_2 and water vapor fluxes for 2 years above Euroflux forest site [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2001,108(3): 183-197

[5] Hutchinson J J,Campbell C A,Desjardins R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2007,142(2/3/4): 288-302

[6] 李晶,王明星,王跃思,等. 农田生态系统温室气体排放研究进展 [J]. 大气科学,2003,27(4):740-749
LI Jing,WANG Mingxing,WANG Yuesi,et al. Advance of researchs on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2003,27(4):740-749

[7] 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(1/2/3/4):93-109

[8] 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(1/2):25-39

[9] 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(1/2):77-96

[10] 郭家选,李玉中,梅旭荣. 冬小麦农田尺度瞬态 CO_2 通量与水分利用效率日变化及影响因素分析 [J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):78-81
GUO Jaixuan,LI Yuzhong,MEI Xurong. Diurnal variation of instantaneous carbon dioxide flux and water use efficiency of winter wheat at field scale and analysis of influencing factors [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2006,14(3):78-81

[11] 冯敏玉,宫松,魏丽,等. 稻田 CO_2 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 Minyu,GONG Song,WEI Li,et al. A Study on the features of CO_2 concentration and flux changes and WUE in rice field [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2008,30(5):927-932

[12] 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机制 [J]. 中国科学: D 辑,2006,36(增刊 1):210-223
LI Jun,YU Qiang,SUN Xiaomin,et al. Carbon exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain [J]. Science in China Ser: D,2006,36(sup1):210-223

[13] 宋涛,王跃思,宋长春,等. 三江平原稻田 CO_2 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 Yuesi,SONG Changchun,et al. CO_2 fluxes from rice fields of Sanjiang plain and its environmental response factors [J]. China Environmental Science,2006,26(6):657-661

[14] 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 [J]. 气象科技,2009,37(5):601-606
XIE Wusan,TIAN Hong,TONG Yingxiang,et al. Flux of cropland ecosystem in Huaihe river basin [J]. Meteorological Science and Technology,2009,37(5):601-606

[15] 李双江,刘文兆,高桥厚裕,等. 黄土塬区麦田 CO_2 通量季节变化 [J]. 生态学报,2007,27(5):1987-1992
LI Shuangjiang,LIU Wenzhao,Takahashi A,et al. The seasonal variation of CO_2 flux in a wheat field of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(5):1987-1992

[16] 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 [J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2545-2550
LI Qi,HU Zhenghua,XUE Hongxi,et al. Variation of net ecosystem carbon flux over typical agro-ecosystem in Huaihe river basin [J]. Journal of Agro-Environment Science,2009,28(12):2545-2550

[17] 张永强,沈彦俊,刘昌明,等. 华北平原典型农田水、热与 CO_2 通量的测定 [J]. 地理学报,2002,57(3):333-342
ZHANG Yongqiang,SHEN Yanjun,LIU Changming,et al. Measurement and analysis of water,heat and CO_2 flux from a farmland in the North China Plain [J]. Acta Geographica Sinica,2002,57(3):333-342

[18] 朱咏莉,吴金水,陈微微,等. 稻田生态系统 CO_2 通量的日变化特征 [J]. 中国农学通报,2007,23(9):603-606
ZHU Yongli,WU Jinshui,CHEN Weiwei,et al. Diurnal characteristics of CO_2 fluxes in rice paddy ecosystem in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2007,23(9):604-605

[19] 王建林,温学发,孙晓敏,等. 华北平原冬小麦生态系统齐穗期水碳通量日变化的非对称响应 [J]. 华北农学报,2009,24(5):159-163
WANG Jianlin,WEN Xuefa,SUN Xiaomin,et al. Asymmetry characteristic on the diurnal changes of CO_2 and H_2O fluxes at full heading time of winter-wheat in North China [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2009,24(5):159-163

[20] 郭建侠,卞林根,戴永久. 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO_2 浓度及通量特征 [J]. 大气科学,2007,31(4):695-707
GUO Jianxia,BIAN Lingen,DAI Yongjiu. Measured CO_2 concentration and flux at 16 m height during corn growing

period on the North China Plain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2007,31(4):695-707

[21] 袁再健,沈彦俊,褚英敏,等. 华北平原冬小麦生长期典型农田热、碳通量特征与过程模拟 [J]. 环境科学,2010,31(1):41-48
YUAN Zaijian,SHEN Yanjun,CHU Yingmin,et al. Characteristics and simulation of heat and CO_2 fluxes over a typical cropland during the winter wheat growing in the North China Plain [J]. Environmental Science,2010,31(1):41-48

[22] 林同保,王志强,宋雪雷,等. 冬小麦农田二氧化碳通量及其影响因素分析 [J]. 中国生态农业学报,2008,16(6):1458-1463
LIN Tongbao,WANG Zhiqiang,SONG Xuelei,et al. CO_2 flux and impact factors in winter wheat field ecosystem [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2008,16(6):1458-1463

[23] 姚玉刚. 两种方法测定华北平原农田生态系统净碳交换量的研究 [D]. 合肥:安徽农业大学资源与环境学院,2007
YAO Yugang. Study on agro-ecosystem NEE using eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in North China Plain [D]. Hefei: Resources and Environment College,Anhui Agricultural University,2007

[24] 李祎君. 玉米农田水热碳通量动态及其环境控制机理研究 [D]. 北京:中国科学院植物研究所,2008
LI Yijun. Dynamics of carbon,water and heat fluxes and their environmental controls in a maize agroecosystem [D]. Beijing: Institute of Botany,CAS,2008

[25] 卞林根,高志球,陆龙骅,等. 长江下游农业生态区 CO_2 通量的观测试验 [J]. 应用气象学报,2005,16(6):828-834
BIAN Lingen,GAO Zhiqiu,LU Longhua,et al. Measurements of CO_2 fluxes over two different underlying surfaces in an agricultural ecosystem over lower basins of the Yangtze [J]. Journal of Applied Meteorological Scinece,2005,16(6):828-834

[26] 曾凯,王尚明,张崇华,等. 南方稻田生态系统产量形成期 CO_2 通量的研究 [J]. 中国农学通报,2009,25(15):219-222
ZENG Kai,WANG Shangming,ZHANG Chonghua,et al. Study on CO_2 flux during the yield formation stage in a southern paddy rice ecosystem [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(15):219-222

[27] 朱咏莉,童成立,吴金水,等. 亚热带稻田生态系统 CO_2 通量的季节变化特征 [J]. 环境科学,2007,28(2):283-288
ZHU Yongli,TONG Chengli,WU Jinshui,et al. Seasonal characteristics of CO_2 fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region [J]. Environmental Science,2007,28(2):283-288

[28] Liu H P. An alternative approach for CO_2 flux correction caused by heat and water vapour transfer [J]. Boundary-Layer Meteorology,2005,115(1):151-168

[29] 朱咏莉,吴金水,童成立,等. 稻田 CO_2 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 Yongli,WU Jinshui,TONG Chenli,et al. Responses of CO_2 fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field [J]. Environmental Science,2008,29(4):1040-1044

[30] 朱咏莉,吴金水,朱博宇,等. 排水措施对稻田 CO_2 通量的影响 [J]. 农业环境科学学报,2007,26(6):2206-2210
ZHU Yongli,WU Jinshui,ZHU Boyu,et al. Effects of drainage on carbon dioxide flux in rice paddy field [J]. Journal of Agro-Environment Science,2007,26(6):2206-2210

[31] 何洪林,于贵瑞,张雷明,等. 基于人工神经网络的 ChinaFLUX 观测站 CO_2 模拟研究通量 [J]. 中国科学:D 辑,2006,36(增刊 1):234-243
HE Honglin,YU Guirui,ZHANG Leiming,et al. Simulating CO_2 flux of three different ecosystems in ChinaFLUX based on artificial neural networks [J]. Science in China Ser: D,2006,36(sup1):234-243

[32] 王旭峰,马明国. 基于 LPJ 模型的制种玉米碳水通量模拟研究 [J]. 地球科学进展,2009,24(7):734-740
WANG Xufeng,MA Mingguo. Carbon and water fluxes of cornfield simulated with LPJ model [J]. Advances in Earth Science,2009,24(7):734-740

[33] 王超. 应用 BIOME-BGC 模型研究典型生态系统的碳、水汽通量 [D]. 南京:南京农业大学资源与环境科学学院,2006
WANG Chao. With BIOME-BGC model on the carbon and water fluxes of the typical ecosystem [D]. Nanjing: College of Resources and Environmental Science,Nanjing Agricultural University,2006

[34] Wang Q X,Watanabe M,Ouyang Z. Simulation of water and carbon fluxex using BIOME-BGC model over crops in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2005,131(3/4):209-224

[35] Huang Y,Yu Y Q,Zhang W,et al. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2009,149(1):106-129

[36] 秦钟. 华北平原农田水热、CO_2 通量的研究 [D]. 杭州:浙江大学生命科学学院,2005
QIN Zhong. Studies of water,heat,and CO_2 fluxes over a crop field in the North China Plain [D]. Hangzhou: College of Life Sciences,Zhejiang University,2005

[37] 温学发,于贵瑞,孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO_2 交换量中的不确定性 [J]. 地球科学进展,2004,19(4):658-663
WEN Xuefa,YU Guirui,SUN Xiaomin. Uncertainties in long-term studies of net ecosystem CO_2 exchange with the atmosphere based on eddy covariance technique [J]. Advances in Earth Science,2004,19(4):658-663

[38] 于贵瑞,孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征 [M]. 北京:科学出版社,2008
YU Guirui,SUN Xiaomin. Carbon flux observation techniques and temporal and spatial characteristics on terrestrial ecosystems in China [M]. Beijing: Science Press,2008

[39] 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
YAO Yugang,JIANG Yuelin,LI Jun. Advance on carbon

dioxide flux observation of farmland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2007,23(6):626-629

Research progress on carbon flux over agro-ecosystem based on the eddy covariance method in China

XUE Hongxi[1] LI Feng[1] LI Qi[2,3] WANG Lianxi[2,3] WANG Yunlong[2,3] HU Zhenghua[2,3]

1 Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration,Beijing 100081

2 Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control,
Nanjing University of Information Sciences & Technology,Nanjing 210044

3 School of Environmental Science and Engineering,Nanjing University of Information Sciences & Technology,Nanjing 210044

Abstract Agro-ecosystem is one of the terrestrial ecosystems under the intensive control and interference by human activities,the estimation on carbon source or sink of agro-ecosystem has become a study focus in the field of global carbon cycle studies. Direct and continuous long-term measurements of carbon fluxes over grassland ecosystem have become possible due to the improvement of eddy covariance method. This paper summarizes the research progresses of carbon flux over agro-ecosystem based on the eddy covariance method in China,and gives emphasis to the research results on the temporal variation characteristics,driving mechanism and model simulation of carbon flux over agro-ecosystem. Based on the research,the paper also offers some suggestions on the study of carbon flux over agro-ecosystem in China,and points out that long-term observation and study,multi-factor cooperative function,model development and scaling,data quality control and assessment should be the key research directions.

Key words carbon flux; agro-ecosystem; eddy covariance