

陆气通量交换观测研究进展

贾庆宇¹ 周莉² 吴琼³ 谢艳兵¹ 温日红¹ 李荣平¹ 蔡福¹ 王笑影¹

(1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 121001;

2 中国气象科学研究院, 北京 100081; 3 盘锦国家气候观象台, 盘锦 124000)

摘要: 陆气通量交换观测是陆面过程研究的基础, 也是生态学、水文学、数值模式等研究的基础内容。探讨了陆气通量交换研究现状、通量观测与全球变化、模型、陆面过程模式之间的关系。分析了我国陆气通量观测站点建设情况, 重点分析东北地区陆气通量观测站点现状。分析了中国气象局东北地区生态与农业气象野外科学试验基地的陆气通量观测内容、观测意义与存在的问题, 并对通量观测发展进行展望。

关键词: 陆气通量, 观测, 全球变化, 模型, 东北

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.003

Research Progress on the Observation of Land-atmosphere Flux Exchange

Jia Qingyu¹, Zhou Li², Wu Qiong³, Xie Yanbing¹, Wen Rihong¹, Li Rongping¹, Cai Fu¹, Wang Xiaoying¹

(1 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Panjin National Climate Observatory, Panjin 124000)

Abstract: Land-air flux exchange observation is the foundation of land surface process research, and also the basic content of ecology, hydrology and atmospheric numerical models. A brief introduction is offered concerning the research status of land-atmosphere flux exchange as well as the relationship between flux observation and global change, modelling, and land surface process model. The construction of land-air flux observation stations in China, especially in Northeast China is analyzed, and the content, significance and existing problems of land air flux observation in the ecological and agrometeorological scientific field bases of China Meteorological Administration in Northeast China is investigated. In addition, the future development of flux observation is proposed.

Keywords: land-atmosphere flux, observation, global change, model, Northeast

0 引言

1895年, Osborne Reynolds爵士提出了雷诺平均的概念, 建立了以涡动相关技术为基础的生态系统通量观测的理论基础。1954年, Monin和Obukhov提出了Monin-Obukhov相似理论, 涡动相关技术开始被零星地应用于自然生态系统CO₂通量观测。1974年, 世界气象组织(WMO)和国际科联(ICSU)首次提出“气候系统”的概念, 为了对气候模型进行验证, 并进行敏感性研究, 以评估大气对地表强迫的大规模异常的反应。1984年, 世界气候研究计划(WCRP)开始了全球地表陆气热量和水收支组成部分数据的收集工作。在WCRP和国际地圈生物圈计划(IGBP)的协调和组

织下, 针对不同的气候区域相继开展了大量国际研究计划^[1], 随着陆面观测研究计划针对陆气通量交换项目进行的观测, 开展了大量的陆气相互作用以及对区域气候变化影响的研究^[2-5], 获得的数据源推动了陆面过程数值模拟研究和参数化方案的发展^[6]。

1 陆气通量交换研究进展

1.1 陆气通量观测技术

1.1.1 塔基通量观测

目前, 广泛应用的是基于地面塔站的涡动相关(EC)观测和大孔径闪烁仪(LAS)观测。调谐二极管激光吸收光谱技术与涡动相关技术结合, 在不干扰土壤或植被的情况下, 直接和近连续的测定生态系统尺度陆面与大气之间的湍流通量交换^[7], 被广泛应用于国际上的各大陆面过程观测试验^[8-9], 因为具有较高的观测精度, 涡动相关观测常被作为验证遥感和陆面过程模型水热通量模拟的重要数据源。最典型

收稿日期: 2020年9月15日; 修回日期: 2021年3月23日

第一作者: 贾庆宇(1978—), Email: jiaqingyu@iaesy.cn

通信作者: 李荣平(1975—), Email: lrp@iaesy.cn

资助信息: 科技基础资源调查项目(2019FY0101302)

的EC装置由CO₂和H₂O气体分析仪和三维超声风速仪组成,该仪器允许对CO₂通量和能量通量(即潜热通量(LE)和显热通量(H))进行高频测量。涡动相关观测技术受到主要科技大国的关注和重视,建成了区域和国家层次的长期通量观测网络,例如FLUXNET-ORNL (<https://daac.ornl.gov/>)、European Fluxes (<http://www.europe-fluxdata.eu/home>)、ICOS (<https://www.icos-cp.eu/>)、OzFlux (<http://www.ozflux.org.au/>)、AsiaFlux (<http://www.Asiaflux.net>)和AmeriFlux (<http://ameriflux.lbl.gov>)。同时,中国通量网ChinaNET (<http://www.chinaflux.org>)成立于2002年,是国际通量观测网络的重要组成部分。

涡动相关观测源区仅有几十到几百米,仅能获取局地尺度的陆气通量结果^[10]。大孔径闪烁仪观测源区从几百米到上千米,能获取更大尺度、非均匀下垫面的通量观测结果^[11],并且能够与卫星遥感像元尺度匹配。许多学者将大孔径闪烁仪与涡动相关观测进行对比,结果发现在下垫面相对均匀的农作物植被,观测的感热通量相关系数为0.82~0.97,差异较小^[12-13];下垫面非均匀的城市区,LAS测量与塔基涡动相关测量不同方法观测结果与安装位置、通量源区大小、源区内下垫面类型和占比不同、塔基涡动相关观测的能量闭合率等因素相关^[14-15]。LAS观测也常出现在国际上大型陆面过程试验中,如SALSA、CASES、EBEX等。虽然LAS具有相对较大的通量观测源区,但在复杂通量源区对LAS的影响很难量化。但其因为大孔径闪烁仪建站数量较少,且其千米级尺度的观测仍然不能满足卫星遥感区域尺度的地表通量,无法满足陆面过程模式粗网格尺度通量模拟验证的需求。

1.1.2 走航通量观测

地面通量观测受到测量空间尺度的限制,无法满足大范围区域地表通量研究的应用需要^[16],伴随着激光高度计、小型飞机飞行控制、实时动态差分GPS的发展,小型无人机平台已经能实现<30 m低空观测地面通量。无人机(UAV)的通量观测方法于1994年被提出^[17],M2AV^[18]、Manta^[19]、ScanEagle^[20]为代表的无人机搭载涡动相关仪器观测平台已经成熟,是目前解决更大尺度陆气通量观测的方式之一。根据无人载荷不同可以对大气温度脉动、三维超声风速、水汽浓度进行通量观测(目前还没有对CO₂通量的观测),可以搭载净辐射、地表温度和反照率等仪器观测能量平衡,搭载激光测高和高分辨率可见光和红外谱分析仪观测海洋表面波和精细尺度(O(10)cm)表面温度结构。无人机通量观测在多个野外观测实验中得到了广

泛应用,例如BLLAST^[19]、MAC^[21]、CLOUD-MAP^[22]等。我国走航通量观测技术刚刚起步^[23],2016年中国科学院遥感与数字地球研究所采购了意大利Magnaghi公司生产的Sky Arrow 650 TCNS通量观测飞机的托管服务,一些学者也利用船载涡动相关系统对海洋大气边界层湍流特征进行了研究^[24-25],船载无人机可避免船体运动和晃动对观测结果的影响^[26]。

1.1.3 通量数据处理与数据质量控制

EC方法假设下垫面均匀并且有充分的湍流交换,为了满足这些假设,并消除仪器误差,通量观测数据需要进行彻底的数值质量检查,实施检查后数据的百分比通常在原始数据集的20%~60%,特别在夜间大气稳定条件下,湍流不充分发达,删除数据比例很高。在研究较长时间尺度(如每日、每月或每年)上的通量特征时缺失数据必须被更有意义的值所取代。ChinaFLUX自主开发了通用性的碳水通量数据分析和计算机自动化处理系统^[27-28]。Fluxnet^[29]开发了ONEFlux采用统一的方法对数据进行质量控制和处理,以提高各站点的一致性和可比性(图1),并且提供了包含1532个站点通量数据Fluxnet 2015数据集。美国LI-COR公司(<https://www.licor.com/>)发展的开源式的EddyPro涡动相关通量处理软件和Tovi软件质量控制软件,除了实现通量数据预处理功能之外还集成了能量平衡存储项修正(EBR)、摩擦风速阈值计算(MPT)、能量平衡分析(EB)、通量源区分析(FPA)和分配(FFA)绘制、数据插补(MDS)、碳循环分析等数据可视化分析功能。德国马克斯-普朗克研究所开发了MDS(<https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Main/HomePage>)通量数据在线预处理、插补和制图工具。这些工具为通量数据处理与数据质量控制和

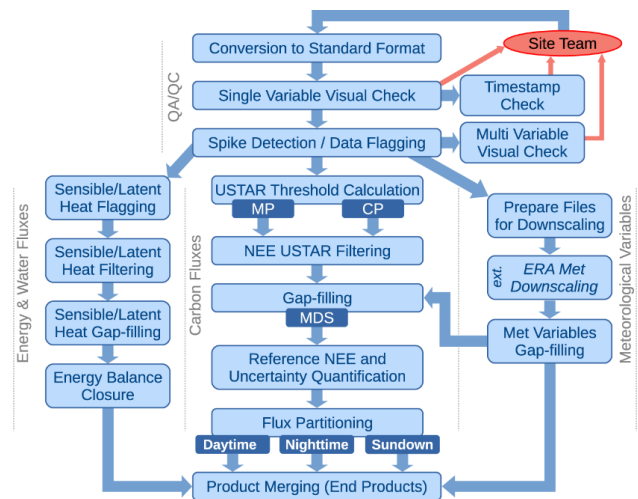


图1 ONEFlux通量数据处理流程^[30]

Fig. 1 ONEFlux flux data processing flow^[30]

分析提供了方便。

插补方法根据通量缺失数据的时间段长短、不同缺失原因等,分为平均日变化、查表法和非线性回归法等^[30]。缺失时间 ≤ 14 d的通量数据使用平均日变化法和查表法^[31],对缺失时间 > 14 d则使用非线性回归法。非线性回归法插补白天缺失数据需建立 CO_2 净交换量与光合有效辐射的Michaelis-Menten光响应曲线模型^[32],夜间缺失数据建立温度与生态系统呼吸的Arrhenius模型等^[33-34]。插补通量也是当今的前沿研究领域,人工神经网络(ANN)、随机森林(RF)和支持向量机(SVM)等机器学习(ML)算法在插补缺失通量数据方面表现出良好的性能,为插补通量的缺失提供了新的思路。

1.2 陆气通量观测对于全球变化研究的作用

1.2.1 陆气通量的环境响应

通过长期涡动相关观测,使我们能在时间和空间尺度上评估全球生态系统变化^[35-36]。对多种原生森林和草原生态系统进行的陆气通量测量发现,净碳交换率随着光照的增加而饱和^[37]。在个别地点,这种非线性响应的程度随叶面积指数、土壤水分亏缺和光合能力而变化。目前越来越多的研究正在量化冠层光合作用与太阳诱导荧光^[38-39]或植被反射的近红外辐射^[40-41]之间的观测,通过在塔架或卫星上测量这些变量,寻求提高光合作用在时间和空间上的替代方法。传统研究认为叶片光合作用随着温度的升高而增加,直到达到峰值的温度($20\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$),最近的数据表明,叶片光合作用的峰值温度不是固定的,是可调节的,并且表现出适应性^[42-43]。陆气通量观测表明在足够的降水量($> 800\text{ mm/a}$)的情况下,GPP随温度升高而增加,而干燥气候($< 800\text{ mm/a}$)的GPP不会随着温度升高而升高。就土壤呼吸而言,降雨对半干旱生态系统会产生巨大的二氧化碳脉冲,在降雨事件之后,脉冲大小随着时间的推移而减小,最后碳汇会消失。

1.2.2 陆气通量观测的长期观测

第一次测量净碳通量和总碳通量可追溯到1990年^[44],而早期的净碳通量和总碳通量都是推测性的,随着通量观测站点的增加,可以为我们以后研究提供更多的数据。国内学者基于涡动相关技术陆续开展了长白山阔叶红松林^[45]、帽儿山人工兴安落叶松林^[46]、伊春阔叶红松林^[47]生态系统碳通量变化特征和影响机理的基础研究,时间序列多在2 a以下。芦苇湿地的陆气通量交换研究时间序列在4 a以下^[48]。开展了东北雨养玉米的连续3 a非生长季碳通量动态^[49]、连续10 a的日一月一年尺度的 CO_2 通量、水分利用效率和

控制机制^[50-51]、连续10 a地面蒸散和控制机制^[52]。开展水稻田陆气通量交换观测大多在3 a以下,连续3 a的水稻的蒸散及其组分进行模拟^[53],连续2 a的甲烷排放和控制机制^[54],连续3 a的大豆田蒸散量^[55]。日本2002年开始在坎托平原稻田开展了连续13 a的蒸发散测量^[56],表明ET/EP与降水有很好的相关性。德国的常绿针叶林最长蒸发散记录17年,它呈上升趋势($+16.6\text{ mm/a}$)^[57]。Ilvesniemi等^[58]对芬兰常绿针叶林蒸发量进行了长达10年的研究,也显示了蒸散量的增加(7.8 mm/a)。长期观测表明水热交换与作物的产量休戚相关^[59]。其他陆气通量交换研究多采用静态箱一气相色谱法^[60]。但是这些研究是基于单点的,在区域上是不完整的。

1.3 陆气通量与模型、遥感数据融合

1.3.1 陆气通量观测与模型、遥感融合

目前陆面过程模拟中主要通过“有效参数”“Discrete”“动态统计”三种方式来参数化次网格尺度关键参数的异质性。随着涡动相关观测网络上通量站点的不断增加,尤其是一些通量观测矩阵可以为区域尺度通量模拟提供更高分辨率的地表验证数据集,对陆地碳循环计算的可靠性也增强;然而,需要扩大观测范围,以评估区域到全球范围内的二氧化碳通量。经验升尺度法基于观测通量与解释变量之间的经验关系,以站点观测为基础升尺度法来评估时空二氧化碳通量,该方法首先在观测点建立一个经验模型,然后利用遥感观测的空间数据和气象网格数据对观测数据进行插值和外推。神经网络(ANN)、支持向量回归(SVR)和模型树集成等机器学习算法,这种方法依赖涡动相关数据集来确定非线性统计关系^[61]可以有效地构建目标和输入变量之间的经验关系。这些算法生成的模型用于评估全球^[62-63]和大陆尺度的二氧化碳通量,例如亚洲^[64]、美国^[65]、欧洲^[66]。以拉斯维加斯为例,使用21个涡动相关站^[67]进行的升尺度分析表明,在2000—2011年,阿拉斯加内陆北部森林是二氧化碳的“汇”,而北极冻原是二氧化碳的“源”。Fluxcom项目启动了一种新的方法,旨在基于多个机器学习算法生成更强大的集成产品,并生成了全球能源和碳通量产品^[68]。

近来,很多研究侧重于模型—数据融合(Model-data Fusion)来估算陆地生态系统碳平衡^[69-70]。GONSAMO等^[71]基于遥感的LSP数据与83个通量塔(包括针叶林、阔叶林和农田)的 CO_2 通量观测数据融合研究地表物候。Zhang等^[72]将通量观测与CoupModel模型融合研究格陵兰 CO_2 通量。Zhang等^[73]将通量观

测与LPJ-GUESS模型融合研究了欧亚大陆北部CH₄通量。

1.3.2 对陆面过程模式的参数化

用于数值天气预报、季节预报和气候模拟的模型要使用陆地过程模型(LSM)来模拟地表和大气之间的水和能量交换。多年来,陆地过程模型已经从简单的“水桶”模型发展到包括具有高度物理机制的土壤-植被-大气传输模型(SVAT)^[74]。但陆面过程模型在准确评估和精确模拟陆地与大气之间的半小时时间尺度上的感热和潜热相互作用时,仍有相当大的不确定性,不可忽视的问题就是模型参数不确定性的作用^[75]。在目前的全球陆面模型中,涡动相关站点可以提供超过20个参数,这些参数直接或间接地对陆面过程模型中的蒸散模块起到驱动作用^[76]。Chaney等^[75]基于涡动相关站点进行Sobol敏感性分析,使用1000个拉丁超立方体样本对敏感参数进行彻底采样,借助数据质量较好的涡动相关站点和全球陆地和气象数据,使用机器学习算法来建立校准参数集,超越了经典的参数查找表法。

2 我国陆气通量观测站点建设现状

自1990年代以来,涡动相关观测站点不断增加,截至2017年在Fluxnet注册(<http://fluxnet.fluxdata.org/about/history/>)的有全球914个站点(超过1500个通量塔),其中较多站点为森林生态系统CO₂通量观测站点,且多分布于温带地区。自2000年以来,我国先后依托中国生态研究网络(CERN)、国家生态系统观测研究网络(CNERN)、中国森林生态系统定位研究网络(CFERN)和中国气象监测站网等,长期投入通量观测系统建设并产生了长序列生态系统尺度大量的观测资料。自开始研究人员依托CERN于2001年建立了中国通量观测研究联盟ChinaFLUX,2014年建立了陆面过程观测网络(CAS-Lason),覆盖了森林、草地、湿地、干旱区、荒漠、农田、城市和水域等几个主要生态系统,组成了站点一样带一组网的陆-气相互作用联网观测和试验平台。目前进行陆气通量观测站点有79个(观测塔83座)^[77],而东北仅有8个观测站点,可以看出陆气通量观测站点在东北分布较少,使得对东北地区陆气相互作用的认识具有局限性。

3 东北地区陆气通量观测站点建设现状

东北地区粮食商品率高达55%以上,商品粮占全国总量的1/4左右^[78],被视为中国粮食市场的“压舱石”和“商品粮战略后备基地”^[79],关系我国粮食生

产安全^[80]。气候变化引起的气温升高使东北地区春玉米播种期提前、成熟期推迟,种植范围北移东扩、东北部产量增加^[81]。区域气候模式A2和B2情景,东北水稻生长季有效积温升高,产量高产年出现的概率明显提高^[82]。气温升高伴随降水减少,干旱可能加重,可能对农业生态系统产生影响。根据情景模拟分析结果增温对农作物生长的正影响超过负影响,所以东北地区未来粮食增产潜力巨大。东北地区的森林对维护碳平衡具有重要的作用,受气候变化影响最为显著^[83]。受全球气候变化和人类活动影响,近30年东北湿地呈现面积减少、斑块数量增加、景观破碎指数增加^[84]。近30年东北草地整体稳定性差,黑龙江东北部和内蒙古东部的草地剧烈退化^[85]。全球气候变暖引发高纬度生态系统地表物质能量通量急剧变化,深层冻土温度升高,冻土融化释放更多的有机碳^[86],冻融交替变化也会加速温室气体的释放^[87]。因此急需陆表水文、能量平衡、地表及土壤水热传输等陆气通量交换方面的观测。

3.1 东北地区通量观测台建设

在东北地区,中科院系统、林业系统以及高校已建成与陆气通量观测相关的野外科学实验站有25个,其中农业生态系统4个占16%,森林生态系统12个占48%,湿地生态系统2个占8%,草地生态系统3个占12%、沙地生态系统3个占12%、碱地生态系统1个占4%^[88-89]①,基本涵盖了东北主要的生态系统类型。其中草地系统在1979年(锡林郭勒盟)开始观测,森林系统在1974年(帽儿山)开始观测,农业生态系统在1978年(海伦)开始观测,湿地生态系统在1986年(三江平原)开始观测,荒漠生态系统在1985年(奈曼旗)开始观测,沙地生态系统在1988年(大青沟)开始观测,各实验站的观测内容已经从原来的单一观测内容和目的转向多圈层多系统相互作用综合、联网观测,陆续补充或加强了陆气通量观测内容。

中国气象局在2018年1月批准21个中国气象局野外科学试验基地序列中,东北地区共有2个野外基地(观测站点8个)入选(表1),其中东北地区生态与农业气象野外科学试验基地以陆气通量联网观测为核心。图2中“旗帜”代表气象部门野外基地位置,“气球”代表气象部门以外野外站位置,东北地区生态与农业气象野外科学试验基地和龙凤山大气本底野外科学试验基地的建设提升了东北野外观测试验站的建设水平。

① 中国科学院野外台站发展状况调查报告(<http://www.cas.cn/ggzy/kycx/ywtz/>); 中国农业科学院园区基地网(<http://www.caasbase.cn/index.aspx>); 中国森林生态系统定位研究网络已建生态站名录(<http://www.cfern.org/wjpicture/upload/gycf/gycf2011-10-21-7-52-15.swf>)。

表1 气象部门东北地区野外基地(台站)列表
Table 1 Field bases (stations) of China Meteorological Administration in Northeast China

类型	基地名	所在省市(县)	地理坐标		研究重点	建站时间
			E	N		
1	东北地区生态与农业气象野外科学试验基地—锦州玉米站	辽宁省锦州市太和区	121°10′	41°09′	玉米	2004
3	东北地区生态与农业气象野外科学试验基地—盘锦芦苇站	辽宁省盘锦市赵圈河镇	121°58′	40°56′	芦苇	2004
1	东北地区生态与农业气象野外科学试验基地—盘锦水稻站	辽宁省盘锦市鼎祥自然保护区	122°02′	40°48′	水稻	2004
1	东北地区生态与农业气象野外科学试验基地—榆树玉米站	吉林省榆树市	126°31′	44°50′	玉米	2012
1	东北地区生态与农业气象野外科学试验基地—富锦水稻站	黑龙江省富锦市	131°55′	47°08′	水稻	2012
1	东北地区生态与农业气象野外科学试验基地—铁岭玉米站	辽宁省铁岭市铁岭县蔡牛镇	123°38′	42°21′	玉米	2014
2	东北地区生态与农业气象野外科学试验基地—五营森林站	黑龙江省伊春市五营区	129°08′	48°04′	红松林	2014
4	龙凤山大气本底野外科学试验基地	黑龙江省五常市龙凤山水库	127°36′	44°44′	大气本底	1989

备注: 类型1为农业生态系统; 2为林业生态系统; 3为湿地及其他生态系统; 4为大气本底



图2 东北地区长期定位野外试验站分布
Fig. 2 Distribution of long-term fixed-site field experimental stations in Northeast China

东北地区生态与农业气象野外科学试验基地依托各地气象部门的野外观测场, 建设在东北地区具有代表性的森林、湿地、农田生态系统的中心区域, 观测场开展陆气通量观测, 以及同步的气象综合, 统一观测内容和观测仪器, 通量观测包括CO₂/H₂O和CH₄等物质浓度, 三维风向风速, 计算CO₂/H₂O通量、CH₄通量、潜热通量、感热通量和动量通量。其中锦州玉米农田野外观测场陆气通量观测数据始于2004年, 已经形成连续17 a时间序列的通量观测数据集。盘锦湿地观测场观测数据始于2004年, 但在2009—2012年数据中断。其他观测场数据时间序列都在5 a以下。

自东北地区生态与农业气象野外科学试验基地成立以来开展东北典型下垫面陆—气相互作用分析和模拟, 气候变化对辽河三角洲湿地生态系统固碳功能的影响, 东北水稻甲烷排放及环境因子贡献率等研究。

构建基于生物因子和环境因子的芦苇冠层阻力模型, 实现芦苇湿地冠层尺度蒸腾与蒸发过程模拟。利用作物生长发育观测试验数据和通量结果, 对作物生长模型进行校正、验证和改进。针对农业气象灾害对作物生长发育过程影响机理问题, 开展作物生长模型对灾害反应的敏感性检验。玉米根系吸水过程控制机制及其对陆—气水热交换过程的影响、气候变化对农业气候生产潜力影响等方面研究。

3.2 东北陆气通量观测存在的问题

3.2.1 观测试验待完善

虽然各部门在东北的农田、森林、湿地等典型生态系统开展了通量观测和试验, 但是, 陆气通量站点的空间布局还不够合理、完善^[90], 缺少覆盖东北针对滨海湿地、针对落叶阔叶林生态系统、城市复杂生态系统的基础型科学观测。大多停留在分析单个站点的陆气通量动态及环境控制机制上, 或玉米农田、稻田、芦苇等不同典型生态系统相关观测数据未形成成果。对于不同生态系统之间陆气通量的比较研究还相对缺乏, 从而制约着对陆气通量特征及其控制机制的深入理解。缺少对陆面过程相关的云和辐射、边界层等项目观测, 缺少基于观测数据对陆面过程模式、数值预报的优化、调整、改进方面研究。观测数据对“生态文明建设”“应对气候变化”“温室气体减排”等国家需求方面的大型科研项目的数据支撑较少。基于观测数据对气候系统各圈层间物质和能量交换、海陆气相互作用对天气气候和生态系统的影响、不同下垫面对天气气候的影响等科学问题的还需进一步阐述。

3.2.2 缺乏野外站的规范化管理

前期野外基地建设和观测内容缺乏顶层设计和统一规划, 为后期规范化管理造成很大困难, 导致观测指标和数据可比较性差。观测目标不明确就可能无法形成长期、连续的观测数据。由于缺少对国际前沿

了解、与相关领域一流专家的沟通,采购的仪器先进性、科学性有待论证。辐射、气象观测的仪器设备、观测指标及观测方法等方面不一致,致使观测数据和传输方式千差万别,使这些数据较难利用和比较。各类观测设备的数据传输格式与储存方式不统一,不利于观测数据的储存、分析与管理。同一观测项目,仪器型号不一致或重复观测,获取的数据比对困难。

研究人员处理通量观测数据一般采用个人擅长的技术方法,处理过程缺乏统一和规范性,导致同一个人不同人处理结果可能无法比较。目前通量观测数据采集器还可以通过编程嵌入在线数据的处理模块,输出结果可直接使用,但在线输出结果下垫面和气象条件较复杂的情况下,就可能会出问题^[91]。

3.2.3 通量观测数据在陆面模式科研业务中的应用水平较低

基于通量野外基和地天一空一地多源观测数据的整合与分析,建立了长时间序列的高时空分辨率的陆面模拟系统所需的大气圈、陆地表层、自然资源、遥感等各类数据集^[2]。但是由于时间不匹配、空间不匹配等问题,还没有针对野外基通量数据的陆面资料同化系统,缺乏高质量的陆面同化分析数据集^[92],使东北陆面模式业务还没有应用通量数据。东北陆面过程模式参数化方案的改进还没有利用通量观测数据,不能应用于大气数值模式。制约了陆气通量野外站作为中国气象局科技创新支撑平台作用的发挥。

4 展望

4.1 通量观测与其他技术结合

通量观测应依托长期观测和研究平台,作为系统、长期、重要的观测内容,向长期业务观测方向转变。随着涡动理论的进步,通量观测仪器原只能在均一下垫面安装,现根据需要可以在复杂下垫面安装。以长期通量观测样地为基础,结合环境气象、水文学、生物学、生态学观测,增加光谱观测、太阳诱导荧光等与卫星遥感相结合的地面观测,结合加碳、氮、氢、氧的稳定同位素等观测拆分碳水循环和溯源分析,以扩大通量观测数据的应用领域。为了能实时评估通量,通量观测必须增加与新一代高光谱和高分辨率卫星之间的联合,并通过深度学习的方法解释这些数据。

4.2 观测规范化、数据处理标准化

研究^[33]发现通量数据的异质性主要是由于数据收集、通量计算和提交前数据整理的差异造成的,突出了对数据不确定性的估计和对数据质量的统一评估的必要性,下一步急需研究、制定通量观测、数据存储

和传输、数据剔除、差补的标准和规范,建立具有气象特色的标准通量业务数据集和气象、植被、土壤、水文数据集。按照统一的数据规范、数据库结构和协议存储管理数据,开发数据共享与网络管理平台,具备数据收集、数据汇总、数据分发、数据转换、数据处理、共享功能。服务于陆面过程模式验证、生态学领域、科学试验和联网观测研究,服务于重大科技需求的专题性观测和科学研究。

4.3 区域联网长期研究

建立和维护通量站需要大量的财政投资,气象部门建设的通量站数量虽逐年增加,但在空间上仍非常稀疏,部分站点的空间代表性存在问题,气象部门应发挥高密度气象观测站的优势,将通量站与气象站结合能捕捉到极端气象事件和罕见气象事件。目前CNERN、CERN、CFERN等许多台站通量积累的数据的持续最长的已达20年,气象部门台站可以与其合作对通量观测持续支持,构建面向全社会的网络化、智能化的通量科学数据管理与共享服务体系,通过更长期的观测会揭示新的和重要的问题,提高相关创新能力和服务国家建设的支撑能力。

4.4 后续的数据同化工作

陆面过程参数化是陆面模式的核心内容,在以往的研究中仅做了局部地区参数化,通量观测对我国的陆面过程参数化方案改进并没有实质贡献,需要进一步开展结合陆气通量做好参数化方案的改进工作^[93]。由第3.1和第3.2节的介绍可知,目前已有不少的陆气通量观测数据和与生物圈相关的观测数据集,通量数据集的原始频率是10 Hz,原始数据需要经过一系列质量控制变成半小时数据,把这些信息融合进陆面模型,可提高模型的准确性,并可补充卫星遥感验证数据集。再把局部地区观测的高分辨率陆面过程模拟逐步转化、升尺度耦合到大气数值模式的网格上^[91]。

参考文献

- [1] 陈海山,孙照渤. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展. 大气科学学报, 2002, 25(2): 277-288.
- [2] Deng X, Zhao C, Yan H, et al. Systematic modeling of impacts of land use and land cover changes on regional climate: A review. *Advances in Meteorology*, 2013, 2013: 1-11.
- [3] Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 929-953.
- [4] Avissar R. Recent advances in the representation of land-atmosphere interactions in general circulation models. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(S2): 1005-1010.
- [5] Yang R, Friedl M A. Modeling the effects of three-dimensional vegetation structure on surface radiation and energy balance in boreal forests. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D16): 8615-8625.

- [6] 戴永久. 陆面过程模式研发中的问题. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 33-38.
- [7] Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [8] 庄金鑫, 王维真, 王介民. 涡动相关通量计算及三种主要软件的比较分析. *高原气象*, 2013, 32(1): 78-87.
- [9] 陈琪婷. 地表水热通量模拟尺度效应研究. 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [10] 贾贞贞, 刘绍民, 毛德发, 等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1248-1260.
- [11] 孙根厚, 胡泽勇, 王介民, 等. 那曲地区两种空间尺度感热通量的对比分析. *高原气象*, 2016, 35(2): 285-296.
- [12] Cain J D, Rosier P T W, Meijninger W, et al. Spatially averaged sensible heat fluxes measured over barley. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 307-322.
- [13] Hoedjes J C B, Chehbouni A, Ezzahar J, et al. Comparison of large aperture scintillometer and eddy covariance measurements: can thermal infrared data be used to capture footprint-induced differences? *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(2): 144-159.
- [14] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W, et al. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105(1): 37-62.
- [15] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(4): 1291-1306.
- [16] Liu S, Xu Z, Song L, et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230/231: 97-113.
- [17] Daida J M, Russell P B, Crawford T L, et al. An unmanned aircraft vehicle system for boundary-layer flux measurements over forest canopies//Proceedings of IGARSS'9-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena, CA, USA, 1994.
- [18] Van den Kroonenberg A, Martin T, Buschmann M, et al. Measuring the wind vector using the autonomous mini aerial vehicle M2AV. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(11): 1969-1982.
- [19] Thomas R M, Lehmann K, Nguyen H, et al. Measurement of turbulent water vapor fluxes using a lightweight unmanned aerial vehicle system. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5: 243-257.
- [20] Reineman B D, Lenain L, Stom N M, et al. Development and testing of instrumentation for UAV-Based flux measurements within terrestrial and marine atmospheric boundary layers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(7): 1295-1319.
- [21] Lathon M, Lohou F, Pino D, et al. The BLLAST field experiment: Boundary-Layer late afternoon and sunset turbulence. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(20): 10 931-10 960.
- [22] Jacob D J, Chilson B P, Houston L A, et al. Considerations for Atmospheric Measurements with Small Unmanned Aircraft Systems. *Atmosphere*, 2018, 9(7): 268.
- [23] 孙义博. 机载涡动相关区域湍流水热通量观测方法研究. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [24] 薛宇欢, 高会旺, 高增祥. 船载涡动相关观测系统及其有效性研究. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(S): 177-183.
- [25] 高会旺, 顾明, 王仁磊, 等. 北黄海海域大气湍流强度特征及风速标准差相似性分析. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(4): 563-568.
- [26] Edson J B, Hinton A A, Prada K E, et al. Direct Covariance Flux Estimates from Mobile Platforms at Sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(2): 547-562.
- [27] 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. 北京: 科学出版社, 2008.
- [28] 何洪林, 张黎, 黎建辉, 等. 中国陆地生态系统碳收支集成研究的E-Science系统构建. *地球科学进展*, 2012, 27(2): 246-254.
- [29] Pastorello G, Arkebauer T, Billesbach D P, et al. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data*, 2020, 7: 225.
- [30] Neftel A, Spirig C, Ammann C. Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations. *Environ Pollut*, 2008, 152(3): 644-652.
- [31] Aubinet M, Vesala T, Papale D. *Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis*. Springer Science and Business Media, 2012.
- [32] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [33] 徐小军, 周国模, 杜华强, 等. 缺失数据插补方法及其参数估计窗口大小对毛竹林CO₂通量估算的影响. *林业科学*, 2015, 51(9): 141-149.
- [34] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [35] Baldocchi D D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 242-260.
- [36] Vernadsky V. *The Biosphere*. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [37] Gilmanov T G, Aires L, Barcza Z, et al. Productivity, respiration, and light response parameters of world grassland and agroecosystems derived from fluxtower measurements. *Rangeland Ecology and Management*, 2020, 63(1): 16-39.
- [38] Magney T S, Bowling D R, Logan B A, et al. Mechanistic evidence for tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(24): 11640.
- [39] Wood J D, Griffis T J, Baker J M, et al. Multiscale analyses of solar induced fluorescence and gross primary production. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 533-541.
- [40] Badgley G, Field C B, Berry J A. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1602244.
- [41] Y Zeng, Badgl Ey G, Dechant B, et al. A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111209.
- [42] Nicholas, G, Smit, et al. Short-term acclimation to warmer temperatures accelerates leaf carbon exchange processes across plant types. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4840-4853.
- [43] Way D A, Yamori W. Thermal acclimation of photosynthesis: on the importance of adjusting our definitions and accounting for thermal acclimation of respiration. *Photosynthesis Research*, 2014, 119(1-2): 89-100.
- [44] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net Exchange of CO₂ in a Mid-Latitude Forest. *Science*, 1993, 260(5112): 1314-1317.
- [45] 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 等. 长白山红松阔混交林CO₂通量的日变化与季节变化. *林业科学*, 2006, 42(10): 123-128.
- [46] 崔崧. 基于微气象学方法的落叶松人工林CO₂通量研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007: 1-6.
- [47] 王宇, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的碳通量特征及其影响因子比较. *生态学报*, 2010, 30(16): 4376-4388.
- [48] Jia Q Y, Yu W Y, Zhou L, et al. Atmospheric and Surface-Condition Effects on CO₂ Exchange in the Liaohe Delta Wetland, China. *Water*, 2017, 9(10): 806.
- [49] 李荣平, 周广胜, 王宇. 中国东北玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用及其对环境因子的响应. *科学通报*, 2010(13): 8.
- [50] Zhou L, Wang Y. Direct and indirect effects of environmental factors on daily CO₂ exchange in a rainfed maize cropland—a SEM analysis with 10 year observations. *Field Crops Research*, 2019, 242: 1-7.
- [51] Wang Y, Li Z, X Ping, et al. Ten-year variability and environmental controls of ecosystem water use efficiency in a rainfed maize

- cropland in Northeast China. *Field Crops Research*, 2018, 226: 48-55.
- [52] Zhou L, Wang Y, Jia Q, et al. Evapotranspiration over a rainfed maize field in northeast China: How are relationships between the environment and terrestrial evapotranspiration mediated by leaf area?. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 538-546.
- [53] 王宇, 周莉, 贾庆宇, 等. 基于 Shuttleworth-Wallace 模型的水稻蒸散组分模拟及其特征分析. *中国农业气象*, 2017, 38(11): 709-719.
- [54] 贾庆宇, 李晓岚, 于文颖, 等. 温度对东北平原水稻田甲烷排放的影响. *生态环境学报*, 2020(1): 1-10.
- [55] 贾志军, 吴文心, 赵海亮. 三江平原大豆田蒸散量模拟. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(1): 50-56.
- [56] Ikawa H, Ono K, Mano M, et al. Evapotranspiration in a rice paddy field over 13 crop years. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2017, 73(3): 109-118.
- [57] Babel W, Johannes Lüers, Jörg Hübner, et al. Long-Term Carbon and Water Vapour Fluxes. Energy and matter fluxes of a spruce forest ecosystem, 2017: 73-96.
- [58] Ilvesniemi H, Pumpanen J, Duursma R, et al. Water balance of a boreal Scots pine forest. *Boreal Environment Research*, 2010, 15(4): 375-396.
- [59] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, et al. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(1): 65-82.
- [60] 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量特征研究. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 387-395.
- [61] Jung M, Reichstein M, Margolis H A, et al. 89 Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G3): G00J07.
- [62] Kondo M, Ichii K, Takagi H, et al. Comparison of the data-driven top-down and bottom-up global terrestrial CO₂ exchanges: GOSAT CO₂ inversion and empirical eddy flux upscaling. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120: 1226-1245.
- [63] Jung M, Reichstein M, Schwalm C R, et al. Compensatory water effects link yearly global land CO₂ sink changes to temperature. *Nature*, 2017, 514: 516-520.
- [64] Ichii K, Ueyama M, Kondo M, et al. New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2017, 122(4): 767-795.
- [65] Xiao J, Zhuang Q L, Baldocchi D D, et al. Estimation of net ecosystem carbon exchange for the conterminous United States by combining MODIS and AmeriFlux data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 1827-1847.
- [66] Papale D, R Valentini. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology*, 2003, 9: 525-535.
- [67] Ueyama M, Ichii K, Iwata H, et al. Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2013, 118: 1266-1281.
- [68] Tramontana G, Jung M, Schwalm C R, et al. Predicting carbon and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms. *Biogeosciences*, 2016, 13: 4291-4313.
- [69] Raupach M R, Rayner P J, Barrett D J, et al. Model-data synthesis in terrestrial carbon observation: methods, data requirements and data uncertainty specifications. *Global Change Biology*, 2005, 11(3): 378-397.
- [70] Wang Y P, Trudinger C M, Enting I G. A review of applications of model-data fusion to studies of terrestrial carbon fluxes at different scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1829-1842.
- [71] Gonsamo A, Chen J M, Price D T, et al. Land surface phenology from optical satellite measurement and CO₂ eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G3): 1-18.
- [72] Zhang W, Jansson P E, Sigsgaard C, et al. Model-data fusion to assess year-round CO₂ fluxes for an arctic heath ecosystem in West Greenland (69 ° N). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 272-273: 176-186.
- [73] Zhang, WX, Miller, et al. Tundra shrubification and tree-line advance amplify arctic climate warming: results from an individual-based dynamic vegetation model. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): AR034023.
- [74] Pitman A J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(5): 479-510.
- [75] Chaney N W, Herman J D, Ek M B, et al. Deriving global parameter estimates for the Nh land surface model using FLUXNET and machine learning. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 121(22): 13218-13235.
- [76] Baldocchi D. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56: 1-26.
- [77] 杨萍, 白永飞, 宋长春, 等. 野外站科研样地建设的思考、探索与展望. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 125-134.
- [78] 张正斌, 陈兆波, 孙传范, 等. 气候变化与东北地区粮食新增. *中国生态农业学报*, 2011, 19(1): 193-196.
- [79] 刘海江, 孙聪, 齐杨. 国内外生态环境观测研究台站网络发展概况. *中国环境监测*, 2014, 30(5): 125-131.
- [80] 罗毅, 柴发合, 高峰亮. 加快建成与生态文明建设要求相适应的生态环境监测网络——解读《生态环境监测网络建设方案》. *环境保护*, 2016, 44(1): 10-12.
- [81] 纪端鹏, 张玉书, 姜丽霞, 等. 气候变化对东北地区玉米生产的影响. *地理研究*, 2012, 31(2): 290-298.
- [82] 姚凤梅, 张佳华. 气候变化情景下中国主要水稻种植区水稻产量的影响和评价//中国气象学会. 中国气象学会2006年年会“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2006.
- [83] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. *生态学报*, 2008, (1): 92-102.
- [84] 王延吉, 神祥金, 吕宪国. 1980—2015年东北沼泽湿地景观格局及气候变化特征. *地球与环境*, 2020, 33(3): 73-82.
- [85] 满卫东, 刘明月, 王宗明, 等. 1990—2015年东北地区草地变化遥感监测研究. *中国环境科学*, 2020, 40(5): 393-400.
- [86] Hollesen J, Matthiesen H, Moller A B, et al. Permafrost thawing in organic Arctic soils accelerated by ground heat production. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 574-578.
- [87] Priemé A, Christensen S. Natural perturbations, drying -wetting and freezing -thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2083-2091.
- [88] 贾庆宇, 王笑影, 谢艳兵, 等. 东北地区生态与农业气象野外科学试验基地建设规划. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 161-168.
- [89] 高峰, 张雨, 李宁. 农业野外科学观测试验站现状及贡献分析-以中国农业科学院为例. *广东农业科学*, 2012, (9): 212-214.
- [90] 邹旭东, 刘海龙, 贾庆宇, 等. 北方典型农业生态区陆面过程研究简述. *湖北农业科学*, 2017, 56(21): 4006-4012, 4016.
- [91] 王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 791-797.
- [92] 邹兰军. 中国区域陆面模式大气驱动数据同化及其在CLM中的应用. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [93] 曾剑. 中国北方地区陆面过程特征和参数化及其与气候关系. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.