

通量观测: 认识气候系统各圈层相互作用的重要桥梁

■ 许小峰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.001

阐述了通量观测系统在天气、气候、生态、环境等领域涉及到不同圈层相互机理研究中的重要性;介绍了陆面通量的特征和观测机理,及相关观测方法的发展脉络;对几种主要通量观测方法做了概要说明;并对目前全球陆气、海气通量网发展建设概况做了介绍;最后对如何进一步加强通量观测网建设提出了建议。

研究气候系统的演变规律,不仅要了解组成气候系统的各个圈层是如何变化的,更要掌握各圈层之间相互影响、相互作用的过程和机理,这样才能把握住气候系统运动的整体规律及演变背后各圈层之间的内在联系。而研究不同圈层间的相互作用,需要获取它们之间的物质(如二氧化碳、水汽)和能量(如感热、潜热)交换信息,即这些量在不同圈层间的通量变化。得到这些数据需要建立观测站点或观测网络,针对特定的交换要素,对其变化进行监测、跟踪和分析,掌握相互作用的实际过程与定量变化,并以此为依据做进一步分析预测。不仅对气候问题如此,在天气尺度问题的研究中,也同样需要关注通量变化,如大气环境问题中的污染扩散、城市化对天气系统的影响、不同下垫面对陆气、海(水)气、冰气相互作用等,都与各圈层界面间的交互和边界层的影响密切相关。相关研究和试验已表明,无论是对短期天气预报,还是中长期天气预报,地表通量信息的加入都能对准确率提升产生正效应。

所谓通量,定义为单位时间通过单位面积气流对某物理量的输送。从天气、气候研究分析各圈层相互作用的角度,重点关注的是大气与不同圈层界面间的垂直通量。如水汽通量,指植物蒸腾和土壤蒸发可以造成地表或植被与大气间向上的水汽通量输送,而水汽凝结造成的通量方向向下。植被和土壤通过呼出二氧化碳造成与大气间向上的碳通量,植被通过光合作用提供方向向下的碳通量。这些通量交换过程主要是在大气边界层发生的,而湍流运动是大气在边界层的重要运动方式,也是下垫面与大气能量与物质输送交换的主要载体。因此,要想正确认识陆气或海气通量过程,就必须对湍流进行观测和分析。

当某层大气上下边界的动量或热量输送有差异时,就会引起层内大气的风速或温度发生变化,即大气物理量上下边界的差值控制着其在层内的变化。因此,通量测量与分析的基本原理是根据近地面层温度、湿度、动

量及其他物理量存在垂直差异为基础进行推算的。在处理湍流通量时,有两个基本假定,一是水平方向上通量输入与输出相等,即: $u_1\rho_1 = u_2\rho_2$,二是平均垂直风速为0,即: $\bar{w} = 0$, ρ 为单位物理量密度。在这样假定下,若某物理量垂直通量 $F = w\rho$, $w = \bar{w} + w'$, $\rho = \bar{\rho} + \rho'$,可推出: $F = \overline{w'\rho'}$,某物理量的湍流通量仅与物理量的脉动量与垂直扰动输送相关,即通过直接观测脉动量就可以计算通量。

由于湍流运动的复杂性,很难像自由大气那样通过闭合方程组推算其运动规律,但通过观测资料可以发现湍流变化中确实存在某些稳定且可重现的规律性特征存在,这为利用某些变量建立统计经验关系式提供了可能。利用相似理论,可将相关变量组成无量纲组,利用实测数据确定无量纲数组量值,再通过经验曲线或回归方法描述实测数据,从而确定无量纲数组相互间的关系。1954年,苏联科学家莫宁(Monin)和奥普霍夫(Obukhov)在总结前人工作的基础上,提出了湍流运动相似理论(简称M-O理论),建立了湍流通量统计量与平均值之间的联系。该理论以摩擦速度 u_* , 温度脉动通量 $(w'T')$, 浮力因子 g/T 和高度 z 为控制参数,构造出新的长度尺度 $L = -Tu_*^3 / \kappa g(T'w')$, 称为Monin-Obukhov长度,其中 T 为温度, T' 为脉动温度, κ 为卡门常数, g 为重力加速度, w' 为垂直脉动速度。M-O相似理论的核心是,以高度 z 和 L 构成一个无量纲的相似坐标 $\zeta = z/L$, 地表层所有湍流统计量 F_* 在使用基本参量无量纲化后都是相似坐标 ζ 的普适函数, $F_*' = \varphi_*(\zeta)$, 其中下标*表征具体的物理量,上标'表示无量纲化后的物理量。 φ_* 无法由量纲分析直接给出,需要结合理论模型和实验数据共同获得。由于大气浮力参数通常变化不大,实际要解决的问题是热通量和速度量的表述。尽管在当时条件下,受观测条件的限制,难以通过实际资料和实验准确确定无量纲参数量值,相似理论与实际应用尚有距离,但为后期的研究工作提供了理论指导,并在实践完善过程中得以

资助信息: 国家自然科学基金重点项目(91637211)

确认，成为研究边界层湍流运动规律及间接观测方法的基础和依据。

到目前为止，湍流通量的观测方法正是按照对湍流运动规律的基本认识沿着两条路径推进的，即直接观测与间接观测。

1 几种近地层的通量测量方法

常用的通量观测方法主要有涡动相关法（Eddy Covariance）、波文比法（Bowen Ratio System能量平衡法）、空气动力学法（Aerodynamic Method，简称AM，也称为梯度法）、总体输送法（Bulk Transfer Method，简称TM）等。

涡动相关法属于直接观测法，是1951年澳大利亚科学家Swinbank提出的，通过选择垂直地表的一个体积单元，利用连续方程研究体积元内的空气流动，分析其中某物理量的收支变化情况，通过计算风速垂直脉动量与某物理量脉动量的协方差所求得结果。 $F = \overline{w'c'}$ ， F 为通量， w' 为垂直风速脉动量， c' 为某物理量 c 的脉动量。

这种方法是一种基于直接测量、精度较高的通量观测方法，利用专门设计的仪器可以相对简单地测出地表物质通量、感热通量和潜热通量，但由于仪器价格和维护成本也高，普遍使用有一定难度。

随着航空技术和探测技术的发展，近年来利用小型飞机配备涡动相关探测所需仪器装备的通量观测法（Aircraft Eddy Covariance）逐步发展成熟，在欧洲、美国的一些区域通量观测研究项目上得到应用。如在欧洲碳收支区域评估和模拟研究计划（RECAP）中就使用了飞机在西班牙、意大利、德国、荷兰和瑞典开展了区域通量观测（图1）。飞机上装有测量各类气象基本要素、大气湍流、大气成分的高频传感器，可以获取计算地表通量的所需变量。

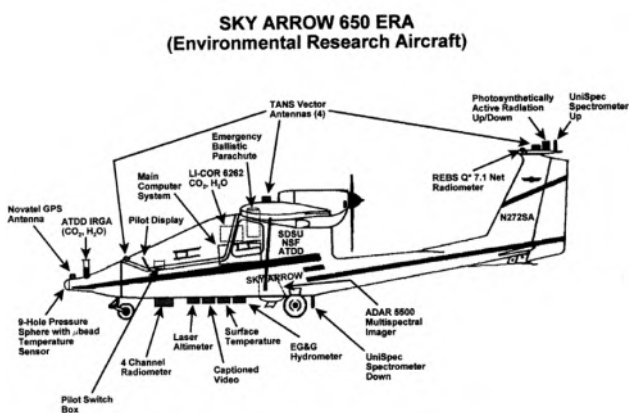


图1 通量观测飞机机构示意图

波文比法也称为能量平衡法，是1926年英国物理学家Bowen在研究自由水面的能量平衡时提出的。他通过获取水面与空气间的乱流交换热量（感热通量 H ）与自由水面蒸发水汽的耗热（潜热通量 λET ）的比值（波文比

β ），并结合能量平衡公式，求出感热通量和潜热通量。下垫面能量平衡方程为： $R_n = \lambda ET + H + G$ ， R_n 为到达地表的净辐射通量； λ 为水的汽化潜热； G 为土壤热通量。波文比测量仪就是根据波文比法原理设计的，也是比较常用的地表通量测量方法。

波文比 β 还可以衡量近地层空气的稳定度状况：波文比越大，表明感热交换越强烈，空气越不稳定，波文比越小，大气越稳定。

空气动力学法测通量也称为梯度法，根据Monin-Obukhov相似理论，可得到风速、位温、湿度的垂直廓线，然后可计算出感热、潜热通量。

空气动力学方法物理概念清晰，应用相对简单，得到较为普遍的应用，但同波文比方法类似，都属于间接测量方法，在算法上做了简化，而其中的假定条件会与特定的时空环境密切相关，在不同的下垫面和大气层结等因素的影响下，测量结果易出现偏差。也有人提出了将波文比法与空气动力学方法相结合，各取所长的组合法，有一定改进，但无法完全消除计算不稳定问题。

总体输送法同样是一种间接计算通量的方法，也是基于Monin-Obukhov相似理论，利用温度、湿度、风的梯度资料计算地表湍流通量，关键问题是要确定经验常数，即总体输送系数，建立某地的湍流通量与常规风、温、湿梯度变化的关系。这种方法从原理到计算都相对简单，比较适用于台站业务使用。但由于确定总体输送系数的参数化方案有不确定性，同时也受到环境条件的影响，容易造成计算结果的差异。

根据总体输送理论，总体输送系数可表示为：

$$C_D = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \psi_M\left(\frac{Z}{L}, \frac{Z_0}{L}\right)\right]^2}, \quad (1)$$

$$C_H = \frac{k^2}{P_{r0} \left[\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \psi_M\left(\frac{Z}{L}, \frac{Z_0}{L}\right)\right] \left[\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \psi_H\left(\frac{Z}{L}, \frac{Z_{0H}}{L}\right)\right]}, \quad (2)$$

$$C_E = \frac{k^2}{P_{r0} \left[\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \psi_M\left(\frac{Z}{L}, \frac{Z_0}{L}\right)\right] \left[\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \psi_E\left(\frac{Z}{L}, \frac{Z_{0E}}{L}\right)\right]}, \quad (3)$$

式中， C_D 、 C_H 、 C_E 分别为动量、热量和水汽的总体输送系数， k 是Karman常数， P_{r0} （0.74）为中性层结时的湍流Prandtl数， ψ_M 、 ψ_H 和 ψ_E 是动量热量和水汽廓线函数从 Z_0 到 Z 的积分形式， Z_0 、 Z_{0H} 、和 Z_{0E} 分别是地面风速、气温和水汽的粗糙度，可假定三者近似相等。 L 为Monin-Obukhov稳定度参数，需要根据大气层结情况通过经验函数或迭代方法计算。有了总体输送系数，按照总体输送理论，地面动量、感热和潜热通量可以表示为：

$$F_M = \rho C_D U^2 \quad (4)$$

$$F_H = \rho C_P C_H U (T_g - T), \quad (5)$$

$$F_L = \beta \rho L_E C_E U (q_{gs} - q), \quad (6)$$

式中 ρ 为地面空气密度，与海拔高度有关； T_g 为地面温度； L_E 潜热系数； q_{gs} 是地面饱和比湿； β 为土壤湿度蒸发系数。

输送系数与湍流输送强度密切相关，由于算法不同，成为影响地面通量计算结果最不确定的因素。具体算法可分为直接法和间接法两种。直接法包括涡旋相关法、廓线-通量法和经验函数参数化方法等3种；间接法也称倒算法，先利用空气动力学方法、组合法、波文比能量平衡法或变分法等结合风、温、湿等气象要素的梯度观测资料，计算出地面动量、感热和潜热通量，再通过总体输送公式反算出总体输送系数。如果气象台站能增加温度、湿度、风的梯度观测，采用总体输送法估算地表通量应是值得选择的方案，实现会相对简单。

还有其他一些测定通量的方法，如蒸渗仪法（Lysimeter Method），通过称重的方式确定不同时间土壤水分的差异，确定通量；大孔径闪烁仪法（Large Aperture Scintillometer, LAS），通过发射器与接收器之间光速随湍流通量变化而产生的折射变化推算通量强度。

衡量通量数据质量的重要标准之一是能量闭合度CR，定义为：

$$CR = \frac{H + LE}{R_0 - G_0}, \quad (7)$$

式中，CR越接近1，能量闭合度越高，表示净辐射与土壤热通量之差越接近等于感热通量与潜热通量之和。

2 全球陆气、海气通量观测发展概况

从天气、气候到生态、环境领域，都离不开对相关要素通量交换的分析研究，建立通量观测系统逐步在国际相关领域形成共识。随着通量观测技术的发展，20世纪80年代开始，美国、欧洲、日本等开始逐步建立通量监测站，对碳、热、水汽等要素的陆面交换过程进行通量观测，并伴随开展了一些试验研究项目，对观测数据进行分析研究，如“北方生态系统—大气研究（BOREOS）”、“北半球气候—陆面过程试验（NHCPLE）”。

1995年，在意大利阿尔卑斯山的La Thuile举行的通量观测国际研讨会上，各国同行讨论并提出了建立国际通量观测网（FLUXNET）的建议，成为促进全球和区域范围通量观测站的建设的重要转折点。此次会议后，通量观测网建设加速，大约经历了8~10年时间，全球范围的通量站从几十个发展到400多个。在各国政府和科学界的支持下，在欧洲、北美、亚洲区域逐步形成了EuroFlux、AmeriFlux和AsiaFlux，为建立全球性的网络FLUXNET奠定了基础。

1998年，美国国家航空航天局（NASA）决定正式成立全球通量监测网FLUXNET，将其作为检验对地观测系统卫星（EOS）产品的地面验证支持系统，并在美国

蒙大拿州的波尔森召开了第一届FLUXNET研讨会，在会上讨论并提出了将通量数据和卫星遥感信息相结合，提供全球碳总量和净量交换评估产品的构想，这一构想以论文的形式发表在1999年*Remote Sensing of Environment*期刊上。

FLUXNET历史上另一个重要事件是2000年在美国加州马可尼召开的研讨会。会上，30名科学家在一起首次分享了各自的通量数据，并计划以此为基础，共同撰写一组综合性论文，体现FLUXNET观测的科学成果和应用价值，约十几篇论文发表在2002年*Agricultural and Forest Meteorology*期刊上。

大约间隔1~2年，都会举办一次FLUXNET国际研讨会，随着巴西、加拿大、中国和澳大利亚等国的区域网络建设和加入，FLUXNET覆盖范围和站点数都在持续增长。FLUXNET第二阶段发展得到了美国国家科学基金会（NSF）“研究协调网络计划（Research Coordination Networks Program 2007-2011）”的支持，一些知名企业、大学和实验室也给予了技术和设备支持，从而加快了数据库和网络建设，使信息共享与分发的能力明显增强。

2009年，在美国加利福尼亚州阿西洛玛（Asilomar）召开的研讨会上，关注的问题不再仅限于观测网和数据库的建设，而是探讨如何使这些珍贵的资料在地球系统模拟研究中得到应用。例如，代表们着重分析了利用通量数据在改善对地表、气候以及碳循环建模工作中的作用，并将研讨成果应用到了正在发展的地球系统模式的最新版本中。这次研讨会的成果发表在2013年*Ecosystems*杂志上，主要内容是关于干旱条件如何影响生态系统通量模拟的准确性。

2014年，美国能源部向FLUXNET网站托管地加州大学伯克利分校和劳伦斯伯克利国家实验室提出进一步改进和扩展FLUXNET建议，以解决好全球生物地球科学界面临新的不断增长的科学问题，提出应努力像科学界提供自由开放、公平共享的数据集，并提供计算资源和支持科研人员定期生成更新数据集，而不是每7年左右才生成一个新数据集的传统做法。这项提案促进了站网管理者在改进数据管理、开放共享数据、提高数据质量等方面进行了改进和提升，方便了全球相关领域科学家对数据库信息的获取和使用，在气候、生态、环境、农业、林业、城市发展等领域产生了大量基于FLUXNET资料的科研成果。目前FLUXNET站点已覆盖了全球主要陆地区域，共有800多个活跃通量测站，可以反映大部分区域的通量交换状况，涵盖了各类林地、草原、湿地、农田、冰雪、裸地等不同下垫面状况，还有些特殊区域站点相对缺乏，如我国的青藏高原地区、格陵兰地区和非洲的部分区域（图2）。

中国陆地生态系统通量观测研究网络（CHINAFLUX）

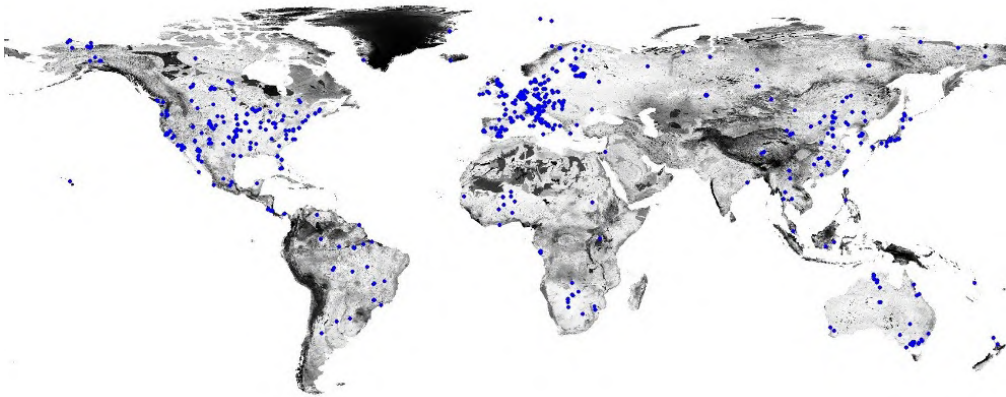


图2 FLUXNET站点分布，蓝色圆点表示测站，暗黑色部分表示尚不能很好反映的区域
(来自FLUXNET网站)

创建于2001年，由中国科学院牵头负责，依托国家生态系统观测研究网络(CNERN)和中国生态系统研究网络(CERN)，以研究生态系统变化规律为主要目标。站点选择以我国植被地理分布特征生态区划为依据，选取在东北样带(NECT)、东部南北样带(NSTEC)和草原样带(CGT)区域布设观测站点。2014年，中国通量观测研究联盟成立，在北京举办了第一次学术研讨会，除中国科学院外，来自农业、林业、水文、气象等部门和高等院校，及从事通量观测研究的学术团体的代表加入了联盟，相关的通量观测站也并入到CHINAFLUX。目前CHINAFLUX已拥有近百个针对农田、草地、森林、湿地、荒漠、城市、水域等不同类型生态系统的通量观测站，成为全球通量网FLUXNET的重要组成部分。

中国气象局2006年开始启动了国家气候观象台建设试点工作，在内蒙古、安徽、广东、云南、甘肃选择反映不同气候带特点的5个站点作为气候观象台。在试点的基础上，2018年在全国遴选了首批24个站正式成为国家气候观象台，在这些台站建设中，大都设计了通量观测

项目，将成为我国气候系统业务、科研工作的重要支撑。若能在未来的气象台站规划中，适当增加梯度观测项目，可为扩充通量观测奠定基础。实际上，我国不少单位在研究气候问题过程中也都布设了不少通量观测点，如中国科学院青藏高原所在青藏高原、新疆沙漠气象研究所所在新疆沙漠地区、广东生态气象中心在南海一带(图3)也都建设了区域通量观测网；国家气候中心通过气候变化科研项目的支持也在湖南洞庭湖区和东北大兴安岭林区、南瓮河沼泽湿地等地建有二氧化碳、甲烷等通量观测站；还有许多科研项目也都建立了独立的通量站网，如能整合好这些资源，将有助于我国生态、环境、天气、气候科研与业务水平的提高。

以上通量观测方法或站网建设以陆面为主，只有在陆面或近海一带有条件设置较完备的探测站点，而要解决全球大范围通量观测问题，还应从空间对地观测角度考虑，探索利用卫星资料的解决方案。在这一方向上已取得显著进展，通过反演海面温度、湿度、风场垂直变化廓线来推算通量变化，不少网站已能提供卫星通量数据产品，但仍需要设法克服卫星探测存在的弱点，如精度、云雨衰减、时间分辨率等，才有可能获取满意的结果。有学者2006年曾发表文章，对5类公开发表的通过卫星资料制作的海洋通量产品进行评估检验，当时得出的结论是卫星通量产品尚不适合在全球海洋气候研究中定量使用，精度不够，与实测资料相比存在20%~30%的误差，但可以在区域数值模式中使用，使用效果取决于具体模式对通量资料的同化能力。

2016年12月15日，NASA成功发射了CYGNSS测风小卫星星座，由8颗6U-Cubesat星组成，每颗星可以同时接收至少4颗GPS卫星的折射和反射信号，折射信号用来确定CYGNSS卫星自身的位置，反射信号来自海洋表面，通过测量反映海

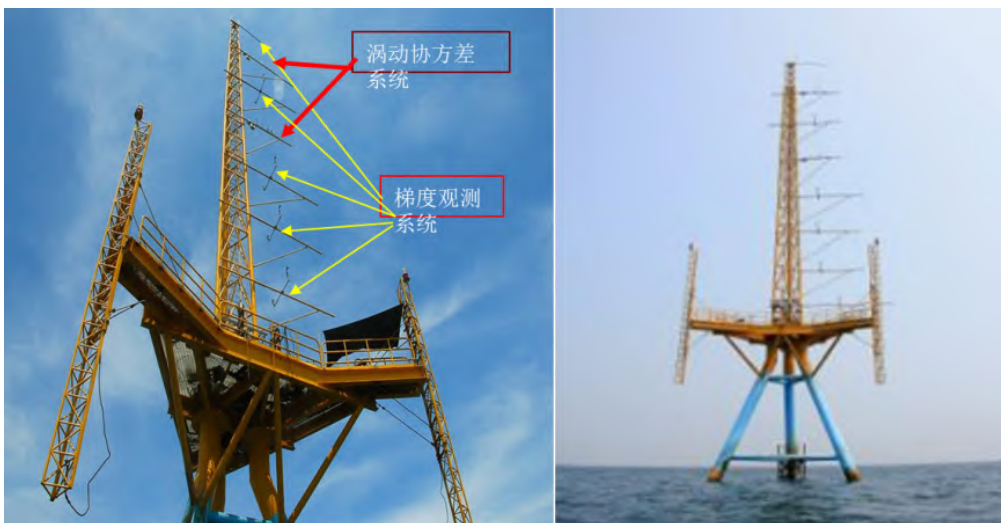


图3 广东电白/博贺国家气候观象台海洋观测平台

面风浪运动的粗糙度变化,分析确定风速、风向等级和变化。8颗小卫星协同观测,可以在40°N—40°S任一观测点每3 h重复一次。由于GPS的微波信号具有穿透云雨的全天候特征,CYGNSS星座可以捕捉到在广阔的海洋上完整的风场信息,而不受天气系统发生时云系和降雨的影响。这一成果为气象学家获取海气通量产品提供了技术条件,将海面风场信息与模式大气湿分析场信息结合,利用空气动力学方法,可以推算出海面潜热和感热通量。图4为利用CYGNSS海面测风信息结合NASA的高分辨再分析资料MERRA-2的温度、湿度资料计算的全球海洋潜热、感热通量分布。

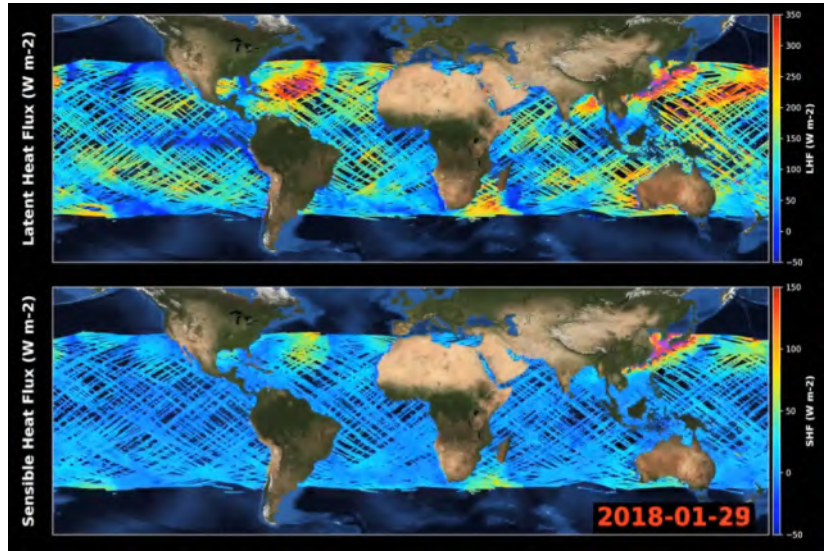


图4 2018年1月29日通过CYGNSS测风小卫星星座计算的全球海洋通量数据

3 结论

1) 无论是对生态系统、气候系统还是大气运动的研究,通量都是最重要的基础信息。从目前的观测业务能力看,还远不能满足需求,在未来的科研项目或业务建设中,都应更加重视这一环节,加快弥补这一短板,从而掌握各圈层相互作用过程中能量、物质交换的实际情况和影响。

2) 从技术层面,通量观测已比较成熟,直接观测相对精准,但成本高一些。间接观测直接投入成本低,但需要的在数据处理方面做更多的工作,有可能在更多的观测台站实现。对于广阔的海洋,可以通过浮标、铁塔等方式观测。但最终解决大范围的观测,卫星遥感信息

有更大的潜力。对一些特殊性的区域性观测,也可以尝试通过飞机(包括无人机)实现。

3) 尽管目前的测站从观测密度和覆盖面都尚不能满足需求,但分布在各部门、各单位所建设的测站通量信息也还未能实现完全共享,CHINAFLUX网整合了一些站点,还应协调更广泛的合作,使有限的资源发挥更大效益。

4) 通量信息的应用相对要复杂一些,不像应用一般要素那么直接,需要加强相关的研究、学习和培训。通过应用产生效益,将会进一步促进对通量观测重要性的认识。

深入阅读

Baldocchi D, Valentini R, Running S, et al. Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 159-168.

Betts A K, Ball J H, Beljaars A C M, et al. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D3): 7209.

Bourras D. Comparison of five satellite-derived latent heat flux products to moored buoy data. *Journal of Climate*, 2006, 19(24): 6291-6313.

Brooks S, Dumas E, Verfaillie J. Development of the sky arrow surface-atmosphere flux aircraft for global ecosystem research. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 8-11 January 2001, Reno, NV, USA.

Crespo J A, Posselt D J, Asharaf S. CYGNSS surface heat flux product development. *Remote Sensing*, 2019, 11(19): 2294.

Gioli B, Miglietta F, Martino B D, et al. Comparison between tower and aircraft-based eddy covariance fluxes in five European regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(1-2): 1-16.

Monin A S, Obukhov A M. Basic regularity in turbulent mixing in the

surface layer of the atmosphere. *Tr Akad Nauk SSSR Geophys Inst*, 1954, 24(151): 163-187.

Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, et al. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 108-127.

Vargas R, Sonntag O, Abramowitz G, et al. Drought Influences the accuracy of simulated ecosystem fluxes: A model-data meta-analysis for Mediterranean Oak Woodlands. *Ecosystems*, 2013, 16(5): 749-764.

纪勇,余振苏.不稳定大气表面层的相似理论.中国力学大会暨庆祝中国力学学会成立60周年大会.北京,2017.

李国平,段廷扬,巩远发.青藏高原西部地区的总体输送系数和地面通量. *科学通报*, 2000, 45(8): 865-869.

王慧,李栋梁,胡泽勇,等.陆面上总体输送系数研究进展. *地球科学进展*, 2008, 23(12): 29-39.

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.

严晓强,胡泽勇,孙根厚,等.那曲高寒草地上四种地表通量计算方法的对比. *高原气象*, 2018, 37(2): 358-370.

(作者单位:中国气象局)