

涡动相关法通量数据处理研究概述

赵佳伟^{1, 2} 何清^{1, 3} 金莉莉¹ 李振杰⁴ 郑先念^{1, 2} 马明杰^{1, 2}

(1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地, 乌鲁木齐 830002;

2 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 3 新疆维吾尔自治区气象台, 乌鲁木齐 830002;

4 云南省临沧市气象局, 临沧 677099)

摘要: 涡动相关法可直接测定地气间水热通量, 成为国际上陆面过程野外观测试验中广泛应用的技术方法。但地表环境通常难以达到理论要求的标准, 观测偏差会对地表能量平衡以及陆面模拟产生影响。通量数据质量不仅是长期野外观测试验可行性的基础, 而且不同地表环境高质量通量数据对于全球气候变化响应研究具有一定意义。通过概述涡动相关法数据预处理、坐标旋转校正、频率响应校正、超声虚温校正和空气密度效应校正处理方法在不同下垫面的应用成果, 以及数据处理过程对通量的影响和不同校正方法在下垫面的适用性选择, 在探讨涡动相关法通量数据处理方法不足的基础上对未来的研究展开讨论。

关键词: 涡动相关法, 湍流通量, 数据处理

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.002

Overview of Flux Data Processing by Eddy Covariance Technique

Zhao Jiawei^{1, 2}, He Qing^{1, 3}, Jin Lili¹, Li Zhenjie⁴, Zheng Xiannian^{1, 2}, Ma Mingjie^{1, 2}

(1 Meteorology Field Scientific Experiments Base of Taklimakan Desert, Institute of Desert Meteorology, China

Meteorological Administration, Urumqi 830002

2 College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054

3 Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002 4 Lincang Meteorological Bureau, Lincang 677099)

Abstract: In the field observation experiment of land surface process, the eddy covariance technique can directly measure the water vapor and heat fluxes between ground and atmosphere, which has become a widely used technique and method in the world. However, the surface observation conditions are difficult to meet the theoretically requirements, and the observation deviation will have an impact on the surface energy balance and land surface simulation. Flux data quality is not only the basis for the feasibility of long-term field observation experiments, but also high-quality flux data from different surface environments has a certain significance for the study of global climate change response. This paper summarized the application results of the eddy covariance technique, the influence of data processing on the flux and the applicable selection of different correction methods in the underlying surface, applying the data preprocessing, coordinate rotation correction, frequency response correction, sonic temperature correction and air density correction. On the basis of discussing the deficiency of flux data processing method of eddy covariance technique, the future research is discussed.

Key words: eddy covariance technique, turbulent flux, data processing

0 引言

陆面过程研究是解决当前一系列环境问题的重要

途径之一, 陆地与大气之间的相互作用一直是人们关注的热点^[1-3]。地表不仅是各个圈层相互作用的交叉界面, 更是气候的下边界条件。地表与上部大气间直接的物质能量交换速率通常用通量进行量化^[4], 主要表征参量热量、动量和水汽通量对大气边界层的发育、局地环流、大气环流乃至全球能量和水分循环产生影响。

测定地气间通量的方法有波文比-能量平衡法、涡动相关法、空气动力学法等^[5]。在方法比较研究中, 发现湍流通量结果在大部分时刻相关性较好^[6]。

收稿日期: 2019年6月15日; 修回日期: 2019年8月16日

第一作者: 赵佳伟(1992—), Email: zhaojwqx@126.com

通信作者: 何清(1965—), Email: qinghe@idm.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41605008, 41641045); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)201506001-14); 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj20160006); 新疆高层次人才引进项目(2016-金莉莉)

间接测定方法如波文比-能量平衡法和空气动力学法均通过物理量的垂直梯度资料计算通量，但空气动力学方法依赖于Monin-Obukhov相似理论，计算结果会因势适函数的不同参数化方案而产生差异；波文比-能量平衡法通过假设水热交换和能量守恒的相似性来估计感热通量和潜热通量，但是当波文比值接近-1时，波文比-能量平衡法计算结果会出现不稳定和虚假峰值^[7]。相比来看，直接测定方法的涡动相关法几乎不存在假设^[8]。

涡动相关法 (Eddy Covariance, EC) 是由Swinbank^[9]提出的，根据微气象学原理直接测量各物理量的湍流脉动量，对大气湍流运动中产生的风速脉动与物理量脉动的协方差来计算通量，以此测量地气间的热量、质量和动量交换。EC方法是在风速仪发展后才真正建立起来，并随着流体力学和微气象学理论的发展以及观测仪器、数据采集和计算机存储、数据分析和自动传输等技术不断进步的基础上经过长期发展而逐渐成熟^[10]。20世纪80年代以来基于涡动相关法开展了许多大型陆面野外观测试验，如HAPEX^[11-12]、FIFE^[13]、EFEDA^[14]、NOPEX^[15]、HEIFE^[16]、IMGRASS^[17]、GAME-Tibet^[18]等。这些实验不仅进一步认识了不同下垫面的陆面特征及地表能量交换机制，而且为检验和验证陆面模型及遥感观测提供数据基础^[10]。目前，涡动相关法是国际上长期测定地气间湍流通量的主流技术方法，得到微气象学、生态学以及地理学等研究人员的广泛接受和认可，在全球通量观测网络 (FLUXNET) 应用并开发了多款涡动相关数据专业处理软件 (表1)。但是涡动相关法的应用需要满足湍流平稳、下垫面水平均匀、湍流充分发展、存在常通量层、仪器安装水平等条件^[19]，然而陆面观测下垫面环境的复杂性和地表不均匀性使得通量观测可靠性受到影响，湍流在时间尺度上的平稳性发生变化，

表1 涡动相关数据专业处理软件
Table 1 Professional processing software for eddy covariance data

开发机构	软件
Bayreuth大学	TK3
Alterra	Alteddy
Wageningen大学	ECPacK
Max-Planck研究院	EddySoft
Edinburgh大学	EdiRE
Zürich技术大学	eth-flux
Dresden技术大学	TUDD
NCAR/EOL	S+packages
IMECC-EU, Tuscia大学	ECO ₂ S ^a
Li-cor	EddyPro

空气膨胀 (或压缩) 还会引起气体和水汽密度的改变，这些都会造成观测数据出现偏差。Oncley等^[20]和Mauder等^[21]指出涡动相关法通量观测不能满足地表能量平衡标准，Foken^[22-23]的研究也表明地表能量不平衡的原因与能量各分量空间水平尺度的测量误差有关，同时需要注意的是观测误差还会对基于能量平衡原理的陆面模拟产生影响。为此许多学者就涡动相关法通量数据校正处理这一问题展开研究，以此评估校正后的数据质量和野外观测试验可靠性与可行性。本文主要概述过去科学家在涡动相关法通量数据处理方面的研究成果，探讨在不同下垫面环境的数据校正处理问题以及未来发展方向，为开展陆面观测试验提供参考。

1 涡动相关法

涡动相关法由澳大利亚微气象学家Swinbank于1951年提出，主要是通过观测湍流脉动值计算湍流通量的方法。

将某一物理量X的垂直通量定义为：

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T wx dt, \quad (1)$$

式中：w为垂直风速；x为物理量的脉动值；T为平均时间。根据雷诺平均法则，有 $w = \bar{w} + w'$ ， $x = \bar{x} + x'$ ，其中 \bar{w} 、 \bar{x} 表示平均值， w' 、 x' 表示瞬时扰动值。则：

$$F = \overline{wx} + \overline{w'x'}, \quad (2)$$

式(2)中右边第一项为垂直直流项，第二项为湍流通量项。假设下垫面均匀平坦，则 $\bar{w} = 0$ ，此时垂直直流项为0，则：

$$F = \overline{w'x'}, \quad (3)$$

根据式(3)，感热通量H、潜热通量LE、二氧化碳通量 F_c 以及动量通量 τ 表示为：

$$H = \rho c_p \overline{w'T'_s}, \quad (4)$$

$$LE = L_v \overline{w'\rho'_v}, \quad (5)$$

$$F_c = \overline{w'\rho'_c}, \quad (6)$$

$$\tau = -\rho u_*^2 = -\rho(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/2}. \quad (7)$$

2 数据处理方法概述

地-气通量观测数据质量取决于试验下垫面条件和必要的校正处理，数据处理过程 (图1) 主要包括数据预处理、坐标旋转校正、频率响应校正、超声虚温校正和空气密度效应校正等。

2.1 数据预处理

受雨雪和地形等外部环境以及传感器电路等自身影响，仪器记录的原始数据序列中经常会出现有硬标记和软标记的野点值^[24]，数据预处理就是剔除超出

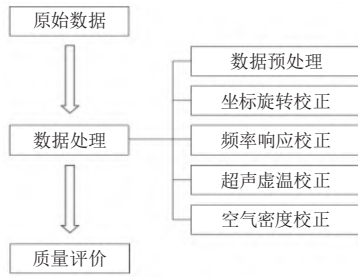


图1 涡动相关法数据处理过程

Fig. 1 Data processing by eddy covariance technique

物理极限范围的记录和应用标准偏差等方法检验判别数据是否为野点值。Schmid等^[25]提出了一种判别方法，即计算平均时间周期内观测值与平均值的差异，若差异超过变异系数与平均值标准偏差的乘积被视为野点值；另一种方法是Clement等^[26]提出的基于相邻数据之间差异的标准偏差检验方法，EdiRE软件程序采用了该方法。野点值的存在不可避免，总的来看预处理前后的通量结果相差不大，出现个别差异的原因与地理位置、环境和下垫面类型相关。例如在干旱环境下，野点处理对黄土高原草地下垫面通量结果影响不大^[27]；在胡杨林下垫面CO₂通量显著降低11.21%，而对感热通量和潜热通量几乎没有影响，仅分别降低0.21%和0.77%^[28]。湿润环境下，野点剔除对大理地区的感热通量具有一定意义，感热通量增大4.8%，动量通量、潜热通量和CO₂通量减小在0.8%以内影响很小^[29]，相比来看在热带岛礁的通量观测数据，野点处

理过程对于潜热通量和CO₂通量不可忽略^[30]。

2.2 坐标旋转校正

应用涡动相关法的基本条件是垂直平均风速为零^[31]，风速计仪器应保持垂直且相对于地形水平倾斜度控制在0.1°之内^[32]。由于下垫面不平或者仪器安装不垂直通常会造平均垂直风速不为零，这就需要利用不同方法使得垂直风速为零。将仪器观测坐标系转换为平均流线坐标系，使得x轴与平均水平风速方向一致，z轴垂直于地表。常用的坐标旋转校正包括二次坐标旋转法Double Rotation (DR)^[33-34]、三次坐标旋转法Triple Rotation (TR)^[35]和平面拟合法Planar Fit (PF)^[35]。其中，DR法第一次旋转使侧向平均风为零，第二次使平均垂直风为零；TR法，即第三次旋转使侧风为零；PF法是利用一段时间的平均风矢量拟合出一个平均流线平面，使长期平均垂直风速为零。在不同旋转方法的选择中（表2），地形环境是影响适用校正方法的主要因素。Finnigan等^[36]研究指出，地形平坦时DR法与PF法均适用，而在复杂起伏的地形上PF法更稳定。马小红等^[28]在荒漠胡杨林下垫面得出相似的结论，经DR法和PF法校正后感热通量、潜热通量与CO₂通量差异在3%之内，李振杰^[37]、谌志刚等^[38]在不同环境条件下的平坦、起伏较小地形上，研究结果也表明应用DR或PF法是适用的。王丹等^[39]讨论了不同生长季对旋转方法的影响，指出DR法适用于植被生长中末期（7—10月），PF

表2 不同下垫面坐标旋转校正方法选择

Table 2 Selection of rotation correction methods for different underlying surface coordinates

下垫面	观测站点环境	DR	TR	PF	仪器	文献来源
草原	站点较为开阔，典型坡地地形，坡度为10°~15°	+	+	+	CSAT3、Li-7500	[41]
草原	平坦均匀稀疏矮草地，高0.02~0.03 m，周围较为开阔			+		[38]
农田	小麦生长旺季	+	+	+		[41]
森林	地形相对平坦，红松阔叶混交林，平均树高为26 m			+	CSAT3、Li-7500	[41]
森林	站区相对高差为20~50 m，地形属于平缓的丘陵地带，植被为中亚热带常绿阔叶林带			+	CSAT3、Li-7500	[41]
森林	东南—西北走向山谷，平均坡度约为9°，有山谷风局地环流，植被为温带落叶阔叶林，冠层高度约为18 m	+		+	CSAT3、Li-7500	[43]
城市	2 km内地势平坦 条件复杂，周围有道路、建筑、公园、植被、高速公路	+			Gill、Li-7500	[47]
城市	观测铁塔在2 km半径内地势相对平坦 地表覆盖以建筑为主	+	+		CSAT3、Li-7500	[48]
黄土高原残塬	半干旱区，观测场较为平坦，生长短小植被，冬季植被高约为0.1 m	+			CSAT3、Li-7500	[49]
黄土高原	半干旱区，地表主要由矮草覆盖			+	CSAT3、Li-7500	[27]
流动沙地	北方典型沙丘—草甸相间半干旱荒漠化地区，植被覆盖度<20%，流动沙丘高低起伏，生态环境脆弱	+			CSAT3、Li-7500A	[39]
沙漠	典型干旱区内流动沙漠腹地，以细沙和极细沙为主	+			CSAT3、Li-7500	[37]
山谷	条件较为复杂，西南—东北走向的山谷，地形起伏不大	+		+	CSAT3、Li-7500	[42]
海岸山地	距海岸西北约15 km处山顶，植被为草地和矮灌丛，山坡南面较缓，北面坡度最陡平均坡度约为11°			+	CSAT3、Li-7500	[45]
海岸	观测台面距海面平均高度约为11 m，受潮位涨落影响			+	CSAT3、Li-7500	[44]

法适用于生长初期（5—6月），整个生长季而言DR法较适用。在复杂条件下，旋转方法之间的差异取决于地形的复杂性^[40]。Zhu等^[41]在草原、农田和森林的4个站点的研究，其中千烟洲森林站地形不规则起伏较大，DR、TR和PF法校正后的结果差异比相对平坦的长白山森林站大。在山谷地带，徐自为等^[42]和王兴昌等^[43]均指出优先选用PF法，其次为DR法。赵中阔等^[44]利用海洋气象平台观测数据，比较得出DR法会使6%的垂直风速存在过旋转，与Liu等^[45]在海岸山地的观测研究结论一致，均认为PF法比较适用。可以看出PF法在复杂条件下是合适的，但Yuan等^[46]认为场地的复杂性必须考虑不同坡度和不同风向向上的多个方向拟合平面，从而减少误差。刘郁钰等^[47]在城市中研究指出，一定时段内的PF拟合平面对地形反应较差，原因在于城市建筑物对风场的影响导致PF法出现偏差，宋涛等^[48]对同一观测塔研究认为，如果使用PF法，应当分风向拟合平面。所以，PF法在下垫面非均匀且存在多风向的地区难以拟合出一个理想平面，不同风向拟合能更好地符合下垫面状况^[27,49]。有的学者已经不再仅仅关注地形环境对旋转的影响，Griessbaum等^[50]考虑了观测仪器引起的流场畸变对倾斜角的影响，应用大涡模拟方法得到风向的修正因子，在修正数据集的基础上讨论传统坐标旋转方法的应用问题。总的来说，最佳旋转法的选择在平坦或复杂下垫面没有通用方法，基本上以站点下垫面环境状况通过比较分析来确定。

2.3 频率响应校正

涡动相关系统中，高频损失可能是由于路径平均、传感器分离和频率响应不足等引起的，低频损失是平均时间不够长引起的^[51]。低频贡献需要一定的采样时间，直接选择30 min时间周期可有效避免通量的低频损失，也可应用拱形（Ogive）函数确定通量的平均周期^[52]。多数研究中主要对高频损失进行校正处理，通过传递函数算法进行处理^[53]。频率校正使感热通量、潜热通量和CO₂通量不同程度增加1%~12%^[28-30,54]。同时，由于白天和夜间的大气层结状况不同，白天湍流发育强烈，涡动相关系统容易获取湍流信息，使得白天的频率修正没有夜间明显^[44,47]。

2.4 超声虚温校正

三维超声风速仪观测的温度，是外界风对仪器探头往返回程脉动信号作用，利用声速来推算空气温度。由于这一温度是物理原理换算的超声温度（虚温），利用该温度与垂直风速计算的温度脉动协方差项需要校正。超声温度并非空气的实际温度，空

气湿度和侧向风速会对其产生影响。当前应用较广的Campbell公司超声风速计产品已经对侧向风进行了校正处理，空气湿度采用Schotanus修正方法进行处理^[55]。超声虚温修正主要对感热通量产生影响，修正后的感热通量均减少在10%左右^[28-29, 49, 54]；在校正的量级上白天与夜间有明显差别，白天的校正量大于夜间，原因是与昼夜间的大气稳定度有关。姜海梅等^[56]指出大气层结越不稳定，订正值越大，柳媛普等^[57]的研究结果也验证了这一点。

2.5 空气密度效应校正

近地层中，地表受热导致近地层空气密度变小而向大气传输热量使得空气不稳定性增加。随着空气随温湿度的变化产生膨胀/压缩，这会引起气体和水汽密度的增加或减少。由于气体浓度仪测量的通常是绝对密度而非相对含量，在应用涡动相关法时就需要校正密度变化引起的通量观测误差。Webb等^[58]提出了基于干空气质量守恒原理的WPL（Webb, Pearman and Leuning）修正方法，指出WPL校正对获取高质量通量数据至关重要。Liebethal和Foken研究结论表明WPL校正使CO₂通量发生20%~30%的改变，潜热通量发生2%~3%的改变^[59]。在不同下垫面研究中，WPL校正后CO₂通量变化明显^[47, 49, 60]。例如苑广辉等^[49]在半干旱环境下WPL校正使CO₂通量降低72.2%，王咏薇等^[61]在城市下垫面校正后CO₂通量增幅6.9%，认为城市下垫面不均匀且观测期属于不稳定情况造成了CO₂通量出现增幅。Liu^[62]提出了另外一种基于湿空气膨胀/压缩原理的LIU方法，他认为应当考虑湿空气膨胀（或压缩）对气体和水汽密度变化的影响，认为WPL方法基于干空气膨胀/压缩的校正方法更接近于干燥地区的情况，在湿润且潜热较大的地区应用WPL方法仅考虑湿空气中干空气的膨胀/压缩作用，从而忽略了湿空气的膨胀（或压缩）作用。WPL方法与LIU方法的差别在于是否在校正过程中充分考虑水汽的作用，王有恒等^[63]和郭建侠等^[64]研究认为，LIU方法比WPL方法更合理。刘郁钰等^[47]指出城市中的水汽含量不可忽略，所以LIU方法更适用城市下垫面的通量校正。但是，Leuning^[65]经过推导Liu^[62]的密度效应校正方法后，指出LIU方法的理论取代了原来干空气垂直通量为0的假设，要求地面或测量高度以下的一层没有干空气的源和汇，认为LIU方法是不正确的。

3 结论和讨论

数据预处理中，利用野点值判别方法对原始数据进行检验时，移动窗口的大小以及变异系数的选择，都会对数据序列产生影响，可能将某些有价值的数

被剔除掉。坐标系旋转中, DR和PF法是应用较多的方法, 但仍存在理论方法上的缺点。DR法和TR法强迫平均时间周期内的平均垂直风速为0, DR法可能没有充分修正仪器旋转角度, 会对横向风产生影响^[66], TR法可能消除了真实的侧向应力, 对结果造成更大的误差^[67]。PF由于需要一定时间的数据量拟合平面, 不能提供短期数据验证计算通量。与DR和TR法相比, PF法可能保留了观测中真实的平均垂直风速信息。空气密度效应校正LIU方法还存有争议。对于长期涡动相关通量观测, 涡动通量数据校正处理在理论方法上还有待进一步研究。

数据预处理方面, 为了有效判别数据野点值, 研究提出适用观测下垫面的移动窗口和变异系数。涡动相关法的观测依赖于风矢量, 而坐标旋转与风场变化关系密切。有必要考虑障碍物引起的流场畸变, 强烈的风场变化对坐标旋转的影响, 例如城市建筑物、高大沙丘或设备安装桅杆引起的流场改变, 台风等强对流天气风速风场条件对坐标旋转的影响。在同一下垫面不同天气背景下的坐标旋转, 同时大气稳定度的变化对其产生影响也有待研究。超声虚温校正中, 波文比达到多大时可不必要对温度脉动项 $\overline{w'T'}$ 进行校正。准确描述空气中气体受热膨胀引起的压力、温度和湿度的改变, 需要在理论方法上量化真实的气体膨胀/压缩对平均垂直速度的影响。同时, 夜间通量普遍存在被低估的现象^[68]。

总的来说, 涡动相关法通量数据处理问题, 讨论各种校正方法适用于什么气候区? 同时同一种下垫面的普遍适用性问题? 对于同一个站点, 利用同一套涡动相关观测系统, 讨论对三维风速、二氧化碳、水汽以及痕量气体(如 CH_4)等的校正适用方法。

参考文献

- [1] 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的最近进展. *大气科学*, 2013, 37(2): 189-210.
- [2] 胡隐樵, 孙菽芬, 郑元润, 等. 稀疏植被下垫面与大气相互作用研究进展. *高原气象*, 2004, (3): 281-296.
- [3] 张强, 张红丽, 张良, 等. 论我国夏季季风影响过渡区及其陆-气相互作用问题. *地球学进展*, 2017, 32(10): 1009-1019.
- [4] 李旭辉. 边界层气象学基本原理. 北京: 科学出版社, 2018: 1-3.
- [5] 艾力·买买提明, 何清, 高志球, 等. 塔克拉玛干沙漠近地层湍流热通量计算方法比较研究. *中国沙漠*, 2008, (5): 948-954.
- [6] 刘树华, 茅宇豪, 胡非, 等. 不同下垫面湍流通量计算方法的比较研究. *地球物理学报*, 2009, 52(3): 616-629.
- [7] 刘鹏飞, 刘树华, 胡非, 等. 湍流通量计算方法和误差的比较研究. *气象学报*, 2010, 68(4): 487-500.
- [8] 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 陆地生态系统通量观测的原理与方法(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2017: 50-51.
- [9] Swinbank W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 1951, 8: 135-145.
- [10] 胡继超, 申双和, 孙卫国, 等. 微气象学基础. 北京: 气象出版社, 2014: 160-166.
- [11] Holtslag A A M, Ek M. Simulation of surface fluxes and boundary layer development over the pine forest in HAPEX-MOBILHY. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1996, 35(2): 202-213.
- [12] Goutorbe J P, Lebel T, Tinga A, et al. HAPEX-Sahel: a large scale study of land atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Annales Geophysicae*, 1994, 12: 53-64.
- [13] Sellers P J, Hall F Q, Asrar G, et al. The first ISLSCP field experiment (FIFE). *Bulletin of American Meteorological Society*, 1988, 69(1): 22-27.
- [14] Bolle H J, Andre J C, Arrue J L, et al. EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area. *Annales Geophysicae*, 1993, 11(2/3): 173-189.
- [15] Lundin L C, Halldin S. NOPEX Experiment plan: Part I and II. NOPEX central Office, Uppsala, Sweden: 1994.
- [16] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从HEIFE到IMGRASS和GAME-Tibet/TIPEX. *高原气象*, 1999, (3): 280-294.
- [17] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用综合研究. *气象学报*, 2005, (5): 571-593.
- [18] 马耀明, 姚檀林, 王介民. 青藏高原能量和水循环环流研究——GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展. *高原气象*, 2006, (2): 344-351.
- [19] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1-2): 0-105.
- [20] Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 1-28.
- [21] Mauder M, Oncley S P, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 29-54.
- [22] Foken T, Wimmer F, Mauder M, et al. Some aspects of the energy balance closure problem. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(12): 4395-4402.
- [23] Foken T. The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1351-1367.
- [24] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 512-526.
- [25] Schmid H P, Grimmond C S B, Cropley F, et al. Measurements of CO_2 and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(4): 357-374.
- [26] Clement R J. Mass and energy exchange of a plantation forest in Scotland using micrometeorological methods. University of Edinburgh, 2004.
- [27] Zuo J Q, Huang J P, Wang J M, et al. Surface Turbulent Flux Measurements over the Loess Plateau for a semi-arid climate change study. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 649-691.
- [28] 马小红, 苏永红, 鱼腾飞, 等. 荒漠河岸胡杨林生态系统涡度相关通量数据处理与质量控制方法研究. *干旱区地理*, 2015, 38(3): 626-635.
- [29] 徐安伦, 孙绩华, 李建, 等. 大理涡动相关观测数据的处理及质量评价研究. *云南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(2): 224-232.
- [30] 周峰华, 张荣望, 石睿, 等. 永兴岛涡动相关数据处理与质量评价. *热带海洋学报*, 2017, 36(4): 48-59.
- [31] 张宏昇. 大气湍流基础. 北京: 北京大学出版社, 2014: 145-150.
- [32] Kaimal J C, Haugen D A. Some errors in the measurement of Reynolds stress. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8(3): 460-462.
- [33] Tanner C B, Thurtell G W. Anemometer measurements of Reynolds stress and heat transport in the atmospheric surface layer. *Wisconsin Univ-Madison Dept of Soil Science*, 1969.
- [34] Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. New York: Oxford University Press, 1994: 289.
- [35] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [36] Finnigan J J. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part II: coordinate systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 113(1): 1-41.
- [37] 李振杰. 塔克拉玛干沙漠塔中近地层湍流特征研究. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010.

- [38] 谌志刚, 卞林根, 陆龙骅, 等. 涡度相关仪倾斜订正方法的比较及应用. 气象科技, 2008, (3): 355-359.
- [39] 王丹, 刘廷奎, 张圣微, 等. 流动沙丘涡度相关通量的坐标旋转订正与对比研究. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1038-1046.
- [40] Stiperski I, Rotach M W. On the measurement of turbulence over complex mountainous terrain. Boundary-Layer Meteorology, 2016, 159(1): 97-121.
- [41] Zhu Z L, Sun X M, Zhou Y L, et al. Correcting method of eddy covariance fluxes over non-flat surfaces and its application in ChinaFLUX. Science in China Series D (Earth Sciences), 2005, 48: 42-50.
- [42] 徐自为, 刘绍民, 官丽娟, 等. 涡度相关仪观测数据的处理与质量评价研究. 地球科学进展, 2008, (4): 357-370.
- [43] 王兴昌, 王传宽. 坐标旋转对东北山地森林涡度通量的影响. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2779-2788.
- [44] 赵中阔, 廖菲, 刘春霞, 等. 近岸海洋气象平台涡度相关数据处理与质量控制. 地球科学进展, 2011, 26(9): 954-964.
- [45] Liu L, Wang T, Sun Z, et al. Eddy covariance tilt corrections over a coastal mountain area in South-East China: significance for near-surface turbulence characteristics. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(6): 1264-1278.
- [46] Yuan R, Kang M, Park S B, et al. Expansion of the planar-fit method to estimate flux over complex terrain. Meteorology and atmospheric physics, 2011, 110(3-4): 123-133.
- [47] 刘郁珏, 胡非, 程雪玲, 等. 北京325米气象塔上CO₂梯度观测数据质量控制与评价. 大气科学, 2016, 40(2): 390-400.
- [48] 宋涛, 修天阳, 孙扬, 等. 城市复杂环境下涡度相关通量观测的适用性分析. 环境科学学报, 2014, 34(5): 1089-1098.
- [49] 苑广辉, 张镭, 李遥, 等. 黄土高原复杂地形上高质量湍流通量数据获取方法. 地球物理学报, 2016, 59(6): 1971-1982.
- [50] Griessbaum F, Schmidt A. Advanced tilt correction from flow distortion effects on turbulent CO₂ fluxes in complex environments using large eddy simulation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography, 2009, 135(643): 1603-1613.
- [51] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 37(1-2): 17-35.
- [52] 张佩, 袁国富, 朱治林. 荒漠河岸林涡度相关通量测定中平均时间的确定及其对通量计算的影响. 干旱区地理, 2013, 36(3): 400-408.
- [53] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林CO₂交换的涡度通量修订. 中国科学(地球科学), 2004, 34(S2): 95-102.
- [54] 张智慧, 王维真, 马明国, 等. 黑河综合遥感联合试验涡度相关通量数据处理及产品分析. 遥感技术与应用, 2010, 25(6): 788-796.
- [55] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, De Bruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. Bound-Layer Meteorology, 1983, 26(1): 81-93.
- [56] 姜海梅, 刘树华, 张磊, 等. EBEX-2000湍流热通量订正和地表能量平衡闭合问题研究. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 9(3): 443-451.
- [57] 柳媛普, 李锁锁, 吕世华, 等. 几种通量资料修正方法的比较. 高原气象, 2013, 32(6): 1704-1711.
- [58] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Meteorological Society, 1980, 106: 85-100.
- [59] Liebethal C, Foken T. On the significance of the Webb correction to fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 109(1): 99-106.
- [60] 王春林, 周国逸, 王旭, 等. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析. 中国农业气象, 2007, 28(3): 233-240.
- [61] 王咏薇, 王雪倩, 胡楠, 等. 城市地表湍流观测数据的后处理及质量控制. 气象科学, 2013, 33(2): 153-159.
- [62] Liu H P, Peters G, Foken T. New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 1000(3): 459-468.
- [63] 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.
- [64] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 在华北玉米生育期观测的16 m高度CO₂浓度及通量特征. 大气科学, 2007(4): 695-707.
- [65] Leuning R. The correct form of the Webb, Pearman and Leuning equation for eddy fluxes of trace gases in steady and non-steady state, horizontally homogeneous flows. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 123(2): 263-267.
- [66] Oh H M, Kim K E, Ha K J, et al. Quality control and tilt correction effects on the turbulent fluxes observed at an ocean platform. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(3): 700-712.
- [67] Foken T, Gööckede M, Mauder M, et al. Post-field data quality control//Handbook of micrometeorology. Springer, Dordrecht, 2004: 181-208.
- [68] Schimel D, Aubinet M, Finnegan J. Eddy Flux measurements in difficult conditions. Ecological Applications, 2008, 18(6): 1338-1339.

《气象科技进展》第五次“台站巡礼”策划研讨活动成功举办

■ 何静凡 张萌

2020年10月,《气象科技进展》“台站巡礼”栏目第五次组稿策划研讨活动在辽宁省营口市成功举办。研讨活动上,辽宁省气象局局长王邦中、营口市气象局局长李明香进行开场致辞,特约专家沈克尼、收藏家张广胜及葫芦岛市气象局局长王涛分别进行了“兵要地质与气象”“抗战文物收藏”和“从《满洲兵要气象志》看气象情报在日本侵华战争中的运用”的特约讲座,拓展了与会代表们对兵要气象和抗战文物收藏的认知视野;许小峰主编做了题为“我国气象探测发展的若干节点”的报告。后续专题研讨中,各机构专家代表们分享了在“党的气象事业”主题下各类气象事业发展的渊源,以及对基于史料的气象事业发展进行了梳理和介绍,加深了参会代表们对党的气象事业的认知。在“边疆沿海百年台站”专题下,针对



营口、徐家汇、芜湖、沈阳和大连几个百年站等的口述历史、文物挖掘、台站发展的介绍,以及沿海气象观测、徐近之对西藏的贡献、传教士气象观测地域分布等内容都进行了“小开口、深挖掘”的研究分析成果。本次研讨活动成果丰硕,为本刊即将推出的“党的气象事业”专栏带来优质稿源。

(作者单位:南京信息工程大学)