

涡度相关能量闭合影响因素研究进展

胡倩¹, 窦超银^{1*}, 魏征^{2,3}, 张宝忠^{2,3}, 陈鹤^{2,3}, 韩聪颖^{2,3}, 张娣^{2,3}

(1.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;

2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

3.国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 能量平衡闭合率是客观评价生态系统物质和能量交换的关键指标, 但能量不闭合现象普遍存在, 不闭合率达 10%~30%。本文结合国内外研究, 从仪器测量误差、观测源区尺度不匹配、复杂下垫面的涡旋和平流影响、相关能量项的忽略以及降雨过程影响等角度系统论述了造成能量平衡不闭合现象的原因, 尤其涡度相关法在降雨时测量通量的可靠性值得讨论。明确指出今后研究的突破点及发展方向: 从热储能项的计算适用性、考虑根层土壤热储量和冠层热储量作为附加热源以及多站点观测方法等方面进一步提升能量平衡闭合率。

关键词: 涡度相关法; 能量闭合率; 湍流通量; 降雨

中图分类号: S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022417

胡倩, 窦超银, 魏征, 等. 涡度相关能量闭合影响因素研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.2): 52-57.

HU Qian, DOU Chaoyin, WEI Zheng, et al. Research Progress on Influencing Factors in the Energy Closure of Eddy Covariance Systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.2): 52-57.

0 引言

涡度相关法 (Eddy Covariance, EC) 是陆面过程观测试验中测量地表与大气水热通量最直接且可靠的方法, 国内外已开展一系列不同下垫面的陆面过程对比试验, 如 HAPEX-SAHEL 试验、KUREX 试验、黑河地区地气相互作用野外观测实验 (HEIFE)、干旱区陆-气相互作用野外试验 (NWC-ALIEX)、古浪近地层综合观测实验 (GHUSLE) 等, 现已形成国际通量网 (FLUXNET)、中国通量网 (ChinaFLUX) 等全球-区域的通量和微气象数据平台, 实现数据共享和数据处理标准化^[1], 为研究变化环境的陆地生态系统水、碳、物质循环的科学问题提供数据支撑。

基于涡度相关技术的通量观测数据已广泛应用于模型的关键参数获取与验证、遥感产品验证及陆地生态系统的碳源和汇估算等方面, 常用能量闭合率 (Energy Balance Ratio, EBR) 或能量不闭合率 (I) 来衡量通量数据质量状况, 即:

$$EBR = \frac{H+LE}{R_n-G-S}, \quad (1)$$

$$I = \frac{R_n-G-H-LE-S}{R_n-G-S} = 1-EBR, \quad (2)$$

式中: EBR 为能量闭合率; I 为能量不闭合率; H 为显热通量 (W/m^2); LE 为潜热通量 (W/m^2); R_n 为净辐射 (W/m^2); G 为地表土壤热通量 (W/m^2); S 为植被大气间热储通量 (W/m^2)。

理想情况下能量平衡是闭合的, 即可提供的有效能量与湍流通量 (显热通量和潜热通量之和) 相等, 但实际观测过程中普遍存在能量不闭合现象, 涡度相关法观测的湍流通量 ($H+LE$) 通常比有效能量 (R_n-G-S) 小 10%~30%^[2]。Masseroni 等^[3]评估了 Livraga 地区玉米田的能量平衡闭合情况, 发现能量不闭合率高达 20%; Joshi 等^[4]对尼泊尔 3 个站点地表热通量交换特征及能量平衡闭合度研究表明各站点能量平衡均不理想, 不闭合率约 30%~45%, 且潜热通量在能量分配中占主导地位, 土壤热通量占比最小; 众多学者在我国华东沿海地区^[5]、三江平原^[6]、黑河流域^[7]等地开展试验观测, 结果表明, 大部分农田和草原生态系统能量不闭合率介于 10%~20%之间。能量平衡闭合率存在明显的日变化规律, 昼夜交替时段波动最为剧烈, 能量闭合状况整体呈下午优于上午、白天优于夜间、晴天优于阴雨天的日变化规律^[8-9]。

影响能量不闭合的因素众多, 涉及仪器测量误

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52130906); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题 (SKL2022TS13); 中国水科院基本科研业务费专项项目 (ID0145B022021, ID0145B052021)

作者简介: 胡倩 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: 754022437@qq.com

通信作者: 窦超银 (1982-), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为节水灌溉理论与技术、农业水土资源高效利用。E-mail: chydou@163.com

差、观测源区尺度不匹配、复杂下垫面的涡旋和平流影响、能量平衡方程中相关能量项的忽略以及降雨过程影响等。本文系统总结能量闭合影响因素, 提出涡度相关能量闭合率未来研究重点及发展方向。

1 仪器测量误差

1.1 净辐射计

不同辐射计之间差异明显。Kohsiek 等^[10]对比了不同类型的辐射计性能, 结果表明净辐射白天最大误差达 25 W/m^2 , 夜间最大误差为 10 W/m^2 , 四分量辐射系统、Kipp&Zonen CNR1 和 Schulze-Däke 仪器的净辐射偏差均在 20 W/m^2 以内, 而 REBS (Radiation and Energy Balance Systems) Q*7 辐射计偏差高达 30 W/m^2 。Michel 等^[11]研究表明, 当仪器受到露水等外界天气因素影响时, 具有工厂默认校准系数的 CNR1 净辐射计与高质量的参考仪器测量的 $R_{n, \text{ref}}$ ($0 < R_{n, \text{ref}} < 600 \text{ W/m}^2$) 相比, 测量得到的日均 R_n 高估值在 15 W/m^2 以内。Blonquist 等^[12]发现 NR-Lite 仪器也存在类似的低估现象, 日均净辐射差异在 $\pm 20 \text{ W/m}^2$ 范围内。

1.2 超声风速仪

不同型号的超声风速仪存在特征性差异, 但这些差异很小且不够系统, 难以解释低估的湍流通量。正交设计而非正交设计超声风速仪之间的垂直风速和显热通量的测量值存在差异, 正交设计的超声风速计传感器成 90° , 非正交设计的所有传感器 (包括垂直风速在内) 都是倾斜和聚集的, 因此所有实际测量均非简单的水平或垂直^[13]。Mauder 等^[14]研究发现正交传感器与非正交相比, 高估了垂直风速和显热通量, 但没有充分理由解释正交传感器存在测量错误, 可能采用非正交超声风速仪的涡度相关系统低估了垂直风速和显热通量。垂直风速中的声速测量误差会导致显热通量存在误差, 误差约为 $3\% \sim 5\%$ ^[13], 影响能量平衡闭合。

1.3 湿度计

校准后的紫外和红外湿度计对能量平衡闭合影响较小, 但是莱曼-阿尔法湿度计校准不稳定, 通常在快速响应莱曼-阿尔法湿度计的同时, 会增加 1 个慢响应湿度计^[15]。随着技术的发展, 红外湿度计能够测量 CO_2 浓度且稳定性良好, 正逐渐取代紫外湿度计。但红外湿度计的路径长度通常为 0.1 m , 而紫外湿度计为 0.01 m , 这可能会导致光谱损失。由于管道阻尼, 闭路式涡度相关系统下湿度计会受到额外的低通滤波效应的影响^[16]。若误差较小时, 这些光谱损失可以作为相对湿度的函数对误差进行有效校正^[17]。

1.4 通量修正

涡度相关仪器自身存在的误差无法避免, 但仪器倾斜误差可通过坐标旋转法校正。选取合适的坐标旋转法进行数据修正时, 需充分考虑地形因素, 二次坐标旋转法适合修正起伏较大的流动沙丘通量数据^[18], 平面拟合法适合修正下垫面均匀、湍流交换稳定的通量数据, 采用二次坐标旋转法和平面拟合法修正数据可分别提高能量闭合率 3.47% 和 2.78% ^[19]。涡度相关系统数据处理需要进行密度修正 (WPL) 和超声虚温订正, 马小红等^[20]研究表明 WPL (Webb-Pearman-Leuning) 校正对潜热通量的影响最大, 其值增加了 6.5% ; 超声虚温订正对显热通量的影响最大, 其值降低了 9.3% , 校正后明显提高通量数据的可靠性, 对能量闭合起到积极作用。

2 观测源区尺度不匹配

不同仪器的非一致性引起的观测数据偏差会直接影响能量闭合率。涡度相关观测的通量源区与净辐射、土壤热通量的测量空间尺度不匹配, 会导致湍流通量与有效能量比值降低, 影响涡度相关观测能量闭合率。杨宾等^[21]研究表明, 湍流通量的观测偏差造成地表能量闭合率 $1\% \sim 3\%$ 的不确定性, 有效能量造成 5% 的不确定性, 湍流通量和有效能量数据的总偏差造成地表能量闭合率 $6\% \sim 8\%$ 的不确定性。Foken 等^[22]总结了各能量通量的观测仪器误差及其能观测到的高度和水平尺度 (表 1)。

表 1 能量平衡各分量的典型误差及其观测的高度和水平尺度

分量	误差/%	水平尺度/m	观测高度/m
潜热通量	5~20	100	2~10
显热通量	5~20	100	2~10
净辐射	5~20	10	1~2
土壤热通量	20~50	0.1	-0.02~0.1
储存量	20~50	0.1~1	-0.02~0.1

2.1 净辐射

净辐射表测量范围是以净辐射表为中心, 一定半径为圆的下表面面积, 其测量面积不随时间、风速、风向的变化而变化, 而涡度相关仪器的测量则受风速和风向的影响^[23]。净辐射表与涡度相关仪器测定的下垫面面积不相符, 辐射表观测范围在 $10 \sim 1\,000 \text{ m}^2$, 而湍流通量贡献区量级可达 $100 \sim 100\,000 \text{ m}^2$, 这导致能量平衡闭合产生更大误差^[24]。Schmid 等^[25]指出需要注意辐射和湍流通量源区域之间的不匹配。

2.2 土壤热通量

热传导系数的不匹配、土壤水分致使土壤导热

率变化、热通量板与土壤接触的密切程度以及热通量板埋深的观测难度等能够造成土壤热通量的观测误差达 20%~50%^[26], 这可以通过平均土壤热电偶法 (TCAV 法)、实测土壤热通量和土壤热储量相结合的方法 (Plate Cal 法)、土壤温度预报校正法 (TDEC 法)、谐波法 (HM 法)、耦合热传导-对流法 (ITCC 法) 等方法进行校正和计算^[27-28]。Kukharets 等^[29]研究表明, 误差可能存在于上层土壤热储量, 使得土壤热通量与能量平衡闭合紧密相关, 需关注空气温度和地表温度的变化, 以及土壤含水量变化引起的土壤热容变化。

3 复杂下垫面的涡旋和平流影响

非均匀下垫面、夜间偏稳定条件或白天对流较强时能量不闭合问题普遍存在, 这将产生较大尺度的涡旋。单点涡度相关方法观测大尺度湍流输送存在不足, Lee 等^[30]运用单点涡度相关系统, 认为局地中尺度环流是造成非 0 垂直速度的原因, 并给出了修正湍流热通量的垂直显热平流项, 但理论和实验结果^[31]均证明单点垂直平流通量难以修正能量闭合问题。涡度相关法难以测量大尺度涡旋的能量输送, 这是导致能量不闭合的主要原因。众多研究者针对延长平均时间、平流的影响、空间平均的通量测量方法分别进行了讨论。

3.1 延长平均时间

低频损失引起的湍流谱贡献缺失会影响地表能量平衡的闭合程度, 而延长平均时间可以获取到更多的低频湍流信息。Finnigan 等^[32]在试验 LITFASS-2003 中对美国 Amazon 站的通量分析表明, 时长周期从 15 min 延长到 4 h, 能量平衡闭合率可从 70% 上升到 100%。Grachev 等^[33]指出将平均时间从 0.5 h 增加到更长的时间间隔可显著减少能量不闭合, 将平均时间增加到每天或更长的时间间隔能够大幅减少地面热通量和储存量, 但易受天气影响, 导致观测数据稳定性较差, 增加通量观测的随机误差。

3.2 平流的影响

下垫面的异质性易形成局地环流或夜间泄流, 地表能量难以闭合。即使在较为平坦的地区, 夜间大气层结相对稳定、湍流运动较弱, 近地层依旧存在夜间泄流和平流现象, 也会导致 CO₂ 不能传输到仪器观测高度, 观测值不能真实地反映土壤-植被-大气之间的 CO₂ 交换状况^[34]。王春林等^[35]发现鼎湖山通量站存在明显的山谷风现象, 其地形原因引起夜间泄流, 导致夜间能量闭合依旧较差。Baldocchi 等^[36]指出由于水平平流的作用, 相隔 300 m 的区域显热通量和潜热通量变化量分别达 20% 和 18%。Lee 等^[37]发现近地

层垂直平流是引起夜间能量不闭合的原因之一。蔡旭晖等^[38]认为水平流和垂直平流使得地面热通量不均匀性增加, 其影响的空间尺度至少达 10 km。

3.3 空间平均的通量测量

空间平均方法则是利用多个站点的空间平均通量, 与单点通量观测相比, 可观测到大尺度低频湍流的整体特征, 但由于水平梯度和垂直梯度观测对于精度要求较高, 实现空间平均较为困难。Mauder 等^[39]在加拿大渥太华农田应用空间平均方法, 设置 25 个地面传感器, 测量与垂直速度和温度有关的垂直热平流并将其作为额外的通量来获取“空间平均”的通量, 但发现观测的平流通量误差较大。Steinfeld 等^[40]提出一种新的滤波方法, 利用所获取的高精度温度数据, 使局部不平衡的水平平均温度消失, 减少通量的空间变异性。

4 能量平衡方程中相关能量项的忽略

众多学者认为植物光合耗能、冠层、土壤的热储存等其他额外的能量源和汇很小将其忽略, 但这些能量储存分项对能量闭合具有一定影响。Kutikoff 等^[41]研究发现, 储能将白天能量闭合率提高了 25%。田志伟等^[42]研究表明, 能量储存分项能提升能量闭合率, 提升幅度约为 5.18%。

若不能准确估算热通量板到地表之间的土壤层能量储存, 这些能量会对残余量产生重要影响。Gao 等^[43]考虑水分在土壤热传导和热对流过程中的作用, 增加土壤热通量方程的相应附加项, 发现能量闭合率可提升 20%。高红贝等^[44]研究表明, 热储通量不可忽略, 热储通量占净辐射的 7.5%~12%, 0~5 cm 土壤热储通量在总热储通量中的贡献超过 95%。

高大植被冠层热储存会对能量闭合产生较大影响, 茂密森林冠层储热可以达到有效能量的 7%^[45-46]。Oliphant 等^[47]研究发现, 高杆玉米冠层总储存对能量闭合的影响可达 10%。李祎君等^[48]发现引起玉米农田能量不闭合的主要原因可能是未考虑 0~5 cm 土壤热储量与冠层热储量, 从而造成约 15.5% 的能量损失。

植被光合作用的储能占可利用能量的 1%~2%^[49]。Oncley 等^[50]在 EBEX-2000 试验中得到棉花冠层总初级生产日平均值为 8 W/m²。Meyers 等^[51]估算白天玉米光合作用通量值为 10~20 W/m², 大豆光合作用通量值为 5~10 W/m², 玉米和大豆的综合储存通量分别占净辐射的 14% 和 8%。Xu 等^[2]在中国黑河流域中游绿洲荒漠区考虑玉米地表能量平衡冠层和光合作用储能后能量闭合率提高约 6%。

5 降雨过程影响

5.1 涡度相关法通量测量

降雨期间, 落到植被上的雨水受到冠层截留, 从湿冠层蒸发, 这部分降雨截留的蒸发量可能大于降雨后^[52]。降雨过程中对涡度相关法测量和通量数据的校正, 目前尚无标准方法。在众多研究中, 大都直接接受或删除降雨期间的潜热通量数据以及使用数据插补法填补降雨数据。这些假设方法类似于在干燥冠层条件下的通量测量分析, 但这会使获得的蒸散估计值存在较大的误差。

涡度相关法在降雨过程测量通量的可靠性值得讨论。作物蒸散发受气象条件和作物本身生物条件影响, 降雨条件下的蒸散发难以精确计算。涡度相关系统中的超声风速仪在传感器上采用疏水材料, 并且自动去除尖峰, 但传感器表面的水和沿着传感器流下的雨滴仍会影响仪器读数。Mizutani 等^[53]在降雨期间和降雨后测试了超声风速仪的性能, 发现在降雨强度小于 3 mm/h 条件下, 超声风速仪测量显热通量效果较好, 当降雨强度大于 4 mm/h 时, 对测量结果产生较大影响。降雨或湿度过大会导致红外气体分析仪数据缺失、潜热通量损失^[54-55]。

5.2 植被内部热储量释放

阴雨天气植被内部热储量释放对蒸散发影响与晴天相比存在较大区别, 在相同的大气条件下, 存在向下的显热通量、向上释放的土壤热储量以及冠层热储量, 使得湿润冠层蒸散发是干燥冠层的 4 倍, 降雨条件下, 相对较高的湿冠层蒸发值可以通过辐射、向下的显热通量以及土壤和冠层的热量释放来维持^[56]。Michiles 等^[57]分析全球通量站点指出, 在降雨期间高大植被的冠层热储量平均释放量为 $(29 \pm 31) \text{ W/m}^2$, 土壤热通量为 $(2 \pm 8) \text{ W/m}^2$, 短小植被的冠层热储量平均释放量为 $(8 \pm 1.3) \text{ W/m}^2$, 并发现土壤热储量和冠层热储量是蒸散发的一个重要来源, 能够增加 17% 的蒸散发量。

Dijk 等^[56]研究认为, 在降雨期间也可能出现向上的地面热通量, 高植被的平均向上热通量为 $(2 \pm 8) \text{ W/m}^2$, 占净辐射的 8%, 短植被平均向上热通量为 $(6 \pm 11) \text{ W/m}^2$, 相当于净辐射的 28%。从理论上讲, 这可增加树冠空气的能量, 有助于增加蒸发量, 因此, 向上的地面热通量是不可忽略的蒸发能量来源。

6 存在问题及展望

能量不闭合会弱化观测数据在一系列基础应用研究中的价值, 会在一定程度上限制陆面模型的发展, 探寻影响能量闭合因素和提升能量闭合率方法

一直是该领域的研究热点。目前众多修正方法依然不能消除能量不闭合问题, 这表明存在能量储存或损失在何处, 现有假设条件的制约或者突发的陆气交互作用影响需要考虑。通过对国内外研究成果梳理分析, 对涡度相关能量闭合研究提出如下展望:

1) 众多学者通常忽略植被冠层热储存、土壤热储存等能量储存分项, 但这部分能量能够显著影响能量闭合过程。目前这些能量储存分项多根据经验公式计算, 无法真实反映能量平衡中热储能的大小, 因此, 可开展不同气候类型、植被覆盖下的热储能项的计算方法研究, 以期满足各种条件下的能量储存分项计算。

2) 众多研究通常直接接受或删除降雨期间的通量以及使用数据插补法填补, 但降雨天气会影响涡度相关系统观测精度和存在不同的能量转化或损失, 不同天气状况对通量数据的影响也存在差异, 会直接影响最终能量闭合效果, 阴雨天能量闭合与晴天相比较差。因此, 可开展根层土壤热储量、冠层热储量对蒸散发在水力传导和气孔导度方面的不同影响机制、二者的解耦贡献以及协同作用研究。

3) 涡度相关法假设在均匀平坦下垫面、适宜气候条件下, 能够获得较为可靠的湍流通量数据, 而实际绝大部分观测地区的地形是复杂非均匀的下垫面, 这会对数据的准确性造成影响。并且涡度相关法虽然可以直接获得研究区域的水热通量变化状况, 但是属于单点观测, 不能有效反映通量的空间分布规律及年际变化规律, 从而缺乏区域代表性和空间分布真实性。因此, 将地面通量观测、遥感技术和水热耦合模型相结合, 可开展多站点协同监测的区域农田生态系统的水热收支特征分析。

参考文献:

- [1] 龚元, 郭智娟, 张凯迪, 等. 植被对亚热带城市生态系统 CO_2 通量的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 530-541.
- [2] XU Z W, MA Y F, LIU S M, et al. Assessment of the energy balance closure under advective conditions and its impact using remote sensing data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56(1): 127-140.
- [3] MASSERONI D, CORBARI C, MANCINI M. Limitations and improvements of the energy balance closure with reference to experimental data measured over a maize field[J]. Atmosfera, 2014, 27(4): 335-352.
- [4] JOSHI B B, MA Y M, MA W Q, et al. Seasonal and diurnal variations of carbon dioxide and energy fluxes over three land cover types of Nepal[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 139(1/2): 415-430.
- [5] 徐敏, 徐敬争, 刘文菁, 等. 华东沿海稻麦轮作区生态系统能量闭合度和 CO_2 通量特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3):

- 367-379.
- [6] 贾志军, 张稳, 黄耀. 三江平原稻田能量通量研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 820-826.
- [7] 邱中齐, 周琳琳, 刘红娟, 等. 玉米农田生态系统蒸散发模型参数优化[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 33-40.
- [8] WILSON K, GOLDSTEIN A, FALGE E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4): 223-243.
- [9] 刘渡, 李俊, 同小娟, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 493-499.
- [10] KOHSIEK W, LIEBETHAL C, FOKEN T, et al. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part III: Behaviour and quality of the radiation measurements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 55-75.
- [11] MICHEL D, PHILIPONA R, RUCKSTUHL C, et al. Performance and uncertainty of CNR1 net radiometers during a one-year field comparison[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(3): 442-451.
- [12] BLONQUIST J M, TANNER B D, BUGBEE B. Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(10): 1 709-1 721.
- [13] KOCHENDORFER J, MEYERS T P, FRANK J, et al. How well can we measure the vertical wind speed? implications for fluxes of energy and mass[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, 145(2): 383-398.
- [14] 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[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 29-54.
- [15] FOKEN T, BUCK A L, NYE R A, et al. A lyman-alpha hygrometer with variable pathlength[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(1): 211-214.
- [16] HASLWANTER A, HAMMERLE A, WOHLFAHRT G. Open-path vs. closed-path eddy covariance measurements of the net ecosystem carbon dioxide and water vapour exchange: A long-term perspective[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(2): 291-302.
- [17] IBROM A, DELLWIK E, FLYVBJERG H, et al. Strong low-pass filtering effects on water vapour flux measurements with closed-path eddy correlation systems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(3/4): 140-156.
- [18] 王丹, 刘廷玺, 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[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1 038-1 046.
- [19] 杨丹妮, 陈岩, 秦淑静, 等. 不同坐标旋转方法对玉米地水热通量校正的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 1-8.
- [20] 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[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 626-635.
- [21] 杨宾, 左洪超, 董龙翔, 等. 干旱区荒漠下垫面能量通量观测误差对能量闭合的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 451-460.
- [22] FOKEN T. The energy balance closure problem: An overview[J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1 351-1 367.
- [23] 肖霞. 黄土高原半干旱区荒草地湍流和湍流能量传输特征及能量平衡状况[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [24] 王兴昌. 东北山地森林涡动协方差碳、水、能量通量观测误差分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [25] SCHMID H P. Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(2/3): 179-200.
- [26] 王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问题—综述及个例分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 705-713.
- [27] 郭阳, 左洪超, 王扶斌, 等. 3种土壤热通量计算方法对观测数据偏差的敏感性分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 183-190.
- [28] 徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 等. 不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究[J]. 地球科学进展, 2013, 28(8): 875-889.
- [29] KUKHARETS V P, NALBANDYAN H G, FOKEN T. Thermal interactions between the underlying surface and a nonstationary radiation flux[J]. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2000, 36(3): 318-325.
- [30] LEE X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(1/2): 39-49.
- [31] KANDA M, INAGAKI A, LETZEL M O, et al. LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 110(3): 381-404.
- [32] FINNIGAN J J, CLEMENT R, MALHI Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part I: Averaging and coordinate rotation[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107(1): 1-48.
- [33] GRACHEV A A, FAIRALL C W, BLOMQUISIT B W, et al. On the surface energy balance closure at different temporal scales[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: 107 823.
- [34] ANTHONI P M, ANNETTE Freibauer, OLAF Kolbe, et al. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 55-67.
- [35] 王春林, 周国逸, 王旭, 等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 643-651.
- [36] BALDOCCHI D D, RAO K S. Intra-field variability of scalar flux densities across a transition between a desert and an irrigated potato field[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1995, 76(1/2): 109-136.
- [37] LEE X H, HU X Z. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 103(2): 277-301.
- [38] 蔡旭晖, 陈家宜. 水平非均匀对流边界层热量平衡和平流输送作用的大涡模拟[J]. 大气科学, 2000, 24(1): 95-102.
- [39] MAUDER M, DESJARDINS R L, PATTEY E, et al. Measurement of the sensible eddy heat flux based on spatial averaging of continuous ground-based observations[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 128(1): 151-172.
- [40] STEINFELD G, LETZEL M O, RAASCH S, et al. Spatial representativeness of single tower measurements and the imbalance problem with eddy-covariance fluxes: Results of a large-eddy simulation study[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 77-98.

- [41] KUTIKOFF S, LIN X, EVETT S, et al. Heat storage and its effect on the surface energy balance closure under advective conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 56-69.
- [42] 田志伟, 王维真, 王介民. 植被大气间能量储存分项对能量闭合率的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 794-803.
- [43] GAO Z Q. Determination of soil heat flux in a Tibetan short-grass prairie[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 114(1): 165-178.
- [44] 高红贝, 邵明安. 黑河中游绿洲春小麦生育期农田热储通量分析[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(5): 33-40, 90.
- [45] MCCAUGHEY J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario—A case study[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 31(1): 89-101.
- [46] MOORE C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37(1/2): 17-35.
- [47] OLIPHANT A J, GRIMMONG C S B, ZUTTER H N, et al. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(3/4): 185-201.
- [48] 李伟君, 许振柱, 王云龙, 等. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1 132-1 144.
- [49] 李宏宇, 张强, 王春玲, 等. 空气热储存、光合作用和土壤垂直水分运动对黄土高原地表能量平衡的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 159 201.
- [50] ONCLEY S P, FOKEN T, VOGT R, et al. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part I: Overview and energy balance[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 1-28.
- [51] MEYERS T P, HOLLINGER S E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(1/2): 105-115.
- [52] CALDER I R, WRIGHT I R. Gamma ray attenuation studies of interception from sitka spruce: Some evidence for an additional transport mechanism[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(3): 409-417.
- [53] MIZUTANI K, YAMANOI K, IKEDA T, et al. Applicability of the eddy correlation method to measure sensible heat transfer to forest under rainfall conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 86(3/4): 193-203.
- [54] 王倩, 王云琦, 马超, 等. 缙云山针阔混交林碳通量变化特征及影响因子研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 565-576.
- [55] FRATINI G, IBROM A, ARRIGA N, et al. Relative humidity effects on water vapour fluxes measured with closed-path eddy-covariance systems with short sampling lines[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 165: 53-63.
- [56] DIJK A, GASH J H, GORSEL E V, et al. Rainfall interception and the coupled surface water and energy balance[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214/215: 402-415.
- [57] MICHILES A A D S, GIELOW R. Above-ground thermal energy storage rates, trunk heat fluxes and surface energy balance in a central Amazonian rainforest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6/7): 917-930.

Research Progress on Influencing Factors in the Energy Closure of Eddy Covariance Systems

HU Qian¹, DOU Chaoyin^{1*}, WEI Zheng^{2,3}, ZHANG Baozhong^{2,3},
CHEN He^{2,3}, HAN Congying^{2,3}, ZHANG Di^{2,3}

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The energy balance ratio is the key index to objectively evaluate the material and energy exchange of ecosystem, but the phenomenon of energy balance unclosure is common, and the unclosure rate is 10%~30%. Based on the existing research at home and abroad, this paper systematically discusses the reasons for the unclosure of energy balance from the perspectives of instrument measurement error, scale mismatch of observation source area, eddies and advection of complex underlying surface, neglect of relevant energy terms and influence of rainfall process. In particular, the reliability of eddy covariance in measuring flux during rainfall is worth discussing. It clearly points out the breakthrough point and development direction of future research, that is, from the aspects of the calculation applicability of energy storage terms, considering root soil heat storage and canopy heat storage as additional heat sources, and multi station observation methods to further improve the energy balance ratio.

Key words: eddy covariance; energy balance ratio; turbulent fluxes; rainfall

责任编辑: 白芳芳