# 2024年10月16日

## 文章的创新点和重要意义:

地表能量平衡是任何地球气候系统理论描述的重要基石,对天气和气候预测至关重要(Mauder等,2020),对被广泛应用于中尺度和气候模式中的陆面模型中的地面和冠层表面温度的计算具有重要意义(Gao等,2010)。而且,其封闭性也是生态系统一大气相互作用研究的重要内容,对评估生态系统功能非常重要(Teng等,2021)。另外,它对风能研究、水文学和生态学的发展具有重要作用(Mauder等,2020)。但研究发现,地表能量并不平衡,存在地表能量不平衡(surface energy imbalance, SEI)问题。该问题一般认为是由广泛使用的计算湍流通量的标准技术—涡动相关法(eddy covariance technique, EC)导致的(Jin等,2022; Majozi等,2017; Mauder等,2020),因 EC 存在低估湍流通量的问题(Babic等,2021; Zhou等,2023)。为此,科学家围绕 EC 展开了大量研究。这其中,有两项研究值得注意,它们均使 EC 计算的湍流通量得到大幅提高,并使地表能量在白天达到了闭合,分别是赵建华等(2019,2023)提出的大涡平均法和 Durand(2022)提出的通量附加项。

大涡平均法质疑了 EC 的基础——雷诺平均,认为雷诺平均没有考虑湍流的发卡涡、大 尺度流动和超大尺度流动等相干结构,没有考虑湍流的间歇性,从而使其在流动分离上出现 了困难,也就是没有分离干净湍流与层流,进而使其在计算湍流通量上出现了低估。为此, 作者考虑了相干结构的基础—发卡涡的输送,同时也考虑了其上一级尺度——大尺度流动与 超大尺度流动的贡献,从而提出了大涡平均法。结果显示,其计算的湍流通量提高了 30%, 地表能量在白天实现了平衡。

另一方面, Durand (2022) 仔细分析了热量从地表向上输送的过程, 认为蒸发/蒸腾时 由于水汽向气柱中输送, 气柱增加了额外的质量, 体积增大, 会轻推上层空气做功, 这部分 能量在计算潜热时被忽视了。感热亦然, 他认为, 气柱在白天被地表加热后, 受热膨胀, 向 上做功, 这部分能量也没有被 EC 考虑。故潜热与感热存在低估现象。他估算显示, 潜热低 估量占 EC 计算量的 5.5%, 感热低估量占比则高达 28.6%。他还发现, 考虑这两附加项后, 白天地表能量闭合度提高到了 0.97 的高闭合水平。

显然,这两个方法均可使地表能量达到闭合,是 SEI 研究的重要进展。但两者的物理基础有何异同、相互之间有没矛盾、同时考虑会不会出现过闭合现象,这些问题需要厘清。本文即对此展开研究,这对认识清楚 EC 低估湍流通量和地表能量不平衡的真正原因,具有重要意义。

本文结论显示,大涡平均法是一种重要的方法,这突出反映了湍流相干结构在流动分离 与地表能量平衡中的重要作用。另外,Durand的感热附加项需要舍弃,但潜热附加项需要 考虑,该项在一定程度上也可提高地表能量闭合率。因此,EC在计算湍流通量时需要兼顾 考虑这两种方法。

5



# 湍流相干结构与通量附加项对白天地表能量平衡的影响研究\*

赵建华1,张强1\*,梁芸2,隆霄3,韩晖1,牛丽娟4

- 1 甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点实验室,中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020
- 2兰州区域气候中心, 兰州 730020
- 3兰州大学大气科学学院,兰州 730000
- 4张掖国家气候观象台,张掖 734000



摘要 涡动相关法的不足是导致地表能不平衡的重要原因。本文对文献中提出的能显著提升涡动相关法计算精度、并能使地表能量实现平衡的大涡平均法与 Durand 法展开研究,在 白天通过 5 组试验对比研究了两者的异同、综合效应与改进方法。结果发现: (1) 地表能量闭合水平与序列长度有一定关系,序列长度过长,闭合水平变差;过短,闭合水平则不一致,两者之间存在一转折点。在此转折点长度上,闭合水平可达最优; (2) 原始的能量闭 合率 (Energy balance ratio, EBR)为 0.80,能量残差 (Residual, Res)为 64.9W·m<sup>-2</sup>,占可用 能量 23.8%,远未平衡; (3)考虑大涡平均法后,EBR 提高了 0.18,达到 0.98, Res 降低 到可用能量的 5.3% (14.5W·m<sup>-2</sup>),达到平衡; (4)考虑 Durand 法后,EBR 提高了 0.15,达到 0.95, Res 降低到 25.1W·m<sup>-2</sup>,占可用能量的 9.2%,效果逊于大涡平均法; (5) 既考虑大涡平均法、又考虑 Durand 法后,EBR 提高到 1.17、Res 降低到-35.1W·m<sup>-2</sup>,严重过闭 合。分析发现,严重过闭合的原因是 Durand 法的感热附加项过度累加了气体膨胀做功项; (6)去除 Durand 法的感热附加项这一累加部分,只考虑其潜热附加项,并同时考虑大涡平均法,结果可使 EBR 达到 1.0、Res 降低到只占可用能量 3.2% (8.7W·m<sup>-2</sup>)的理想闭合状况。分析发现,大涡平均法是实现地表能量闭合的主导因素。

关键词 地表能量平衡 大涡平均法 Durand 法 文章编号 中图分类号 P404 文献标

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2501.24074

文献标识码 A

## Study on the Effects of Turbulent Coherent Structures and Flux

## Additional Term on the Diurnal Surface Energy Balance

ZHAO Jianhua<sup>1\*</sup>, ZHANG Qiang<sup>1\*</sup>, LIANG Yun<sup>2</sup>, Long Xiao<sup>3</sup>, Han Hui<sup>1</sup>, Niu Lijuan<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province(Chinese

收稿日期 2024-7-11; 网络预出版日期

**作者简介** 赵建华,男,1976年生,研究员,主要从事湍流和陆面过程方面的研究. E-mail:pine guest@163.com

**通讯作者** 张强,男,1965年生,研究员,主要从事陆气相互作用方面的研究. E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

\*资助项目 气象能力提升联合研究专项(23NLTSZ008)、国家自然科学基金(重点)项目 (42230611,41375019)和甘肃省自然科学基金(22JR5RA746, 22JR5RA748)

**Funded by** Joint Research Project on Meteorological Capacity Enhancement (23NLTSZ008), National Natural Science (key) Foundation of China (Grants 42230611,41375019) and Gansu Provincial Natural Science Foundation (22JR5RA746, 22JR5RA748) Meteorological Administration), Lanzhou Institute of Arid Meteorology of Chinese Meteorological

Administration, Lanzhou 730020, China

2 Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China

3 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

4 Zhangye National Climate Observatory, Zhangye, 734000, China



**Abstract** The deficiency of the eddy covariance method is a significant cause of surface energy imbalance. This paper investigates the large eddy averaging method and the Durand method, which have been proposed in the literature to significantly improve the computational accuracy of the eddy covariance method and achieve surface energy balance. Through 5 sets of daytime experiments, the similarities, differences, comprehensive effects, and improvement methods of the two methods were comparatively studied. The results revealed: (1) The level of surface energy closure is related to the sequence length. If the sequence length is too long, the closure level deteriorates; if it is too short, the closure level becomes inconsistent. There is a turning point between the two, at which the closure level can reach its optimum; (2) The original energy balance ratio (EBR) is 0.80, with an energy residual (Res) of 64.9 W·m<sup>-2</sup>, accounting for 23.8% of the available energy, far from balanced; (3) After considering the large eddy averaging method, the EBR increased by 0.18, reaching 0.98, and the Res decreased to 5.3% of the available energy  $(14.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2})$ , achieving balance; (4) After considering the Durand method, the EBR increased by 0.15, reaching 0.95, and the Res decreased to 25.1 W $\cdot$ m<sup>-2</sup>, accounting for 9.2% of the available energy, with an effect inferior to the large eddy averaging method; (5) When considering both the large eddy averaging method and the Durand method, the EBR increased to 1.17, and the Res decreased to -35.1 W·m<sup>-2</sup>, resulting in severe over-closure. Analysis revealed that the severe over-closure was due to the excessive accumulation of the sensible heat additional term in the Durand method; (6) By removing the accumulation part of the sensible heat additional term in the Durand method and only considering its latent heat additional term, while simultaneously considering the large eddy averaging method, the EBR can reach 1.0, and the Res can be reduced to only 3.2% (8.7 W·m<sup>-2</sup>) of the available energy, achieving an ideal closure state. Analysis showed that the large eddy averaging method is the dominant factor in achieving surface energy closure.

Keywords surface energy balance, large eddy averaging method, Durand method

### 1. 引言

地表能量平衡是描述地球气候系统理论的重要基石(Mauder et al., 2020),是生态系统— 大气相互作用研究的重要内容和生态系统功能评估的重要方面(Teng et al., 2021; 屈侠和黄 刚,2024),对耦合陆面模型的中尺度和气候模型的预报精度有重要影响(Gao et al., 2010; 陈 广宇等,2019),对天气和气候预测至关重要(Mauder et al., 2020; 杨丽薇等,2017),因此研究 地表能量平衡具有重要意义。

然而,来自世界各地的大量研究表明,地表能量并不平衡(Mauder et al., 2020; 郭阳 等,2015;刘熙明等,2008;仲雷等,2007),也就是下式表示的地表能量平衡方程并不成立(均匀 裸地表):

式中, $R_n$ 是净辐射, $G_s$ 是地表土壤热通量,H是感热, $\lambda E$ 是潜热。左端一般称为可用能量,右端称为有效能量或湍流通量。

对不同生态系统的多地点分析表明,能量平衡比率通常在 0.7-0.9 之间(Eder et al., 2015a; Stoy et al., 2013; Wilson et al., 2002),未达到理想的 1.0,这被称为地表能量不平衡(Surface Energy Imbalance, SEI)问题(Eder et al., 2014; Zhou et al., 2023)。SEI 已成为微气象学和地气 相互作用研究的瓶颈(Teng et al., 2021)。根据热力学第一定律,输入和输出的能量分量必须 平衡(Serrano-Ortiz et al., 2015; Wilson et al., 2002)。为此,科学家从仪器误差、数据处理误差、 忽略的附加项以及亚中尺度输送过程等多个方面展开研究(Gao et al., 2017; Mauder et al., 2020)。基于已有的研究,Nelli et al (2020)将 SEI 归因于通量测量的不确定性、通量平均时 间长度不足、地表非均质性和次生环流或者不同来源的组合等,Majozi 等 (2017)则将之总 结为未计算的土壤和冠层蓄热项、湍流通量计算中未包括高低频湍流、陆地表面非均质性、 系统测量和采样误差等。

虽然产生原因很多,但其中计算湍流通量的涡动相关法(Eddy Covariance technique, EC) 一般被认为是导致 SEI 的主要原因, SEI 正是在 EC 广泛使用后产生(Eder et al., 2015a, 2015b; Mauder et al., 2020; Teng et al., 2021; Wilson et al., 2002; Zhou et al., 2023)。通常认为, EC 是 确定地表能量平衡中的湍流通量最合适、最直接的方法,是直接和准确测量陆地-大气系统 中湍流通量的标准技术,该方法提供了其它技术无法实现的精度和时间分辨率(Fortuniak et al., 2017; Inagaki et al., 2006; Jin et al., 2022; Majozi et al., 2017)。然而, 使用 EC 测量通常会 低估湍流热通量(Inagaki et al., 2006; Jin et al., 2022; Mauder et al., 2020; Zhang and Zhang, 2015),低估可达可用能量的10%至20%或更多(Massman, 2020)。一般认为,EC的问题是不 能捕获中尺度湍流结构或二次环流以及地表非均匀性引起的平流等的贡献(Babić et al., 2021; Eder et al., 2015a; Mauder et al., 2020; Zhang and Zhang, 2015; Zhou et al., 2023), 尤其在高湍 流、低风速以及不均匀地形等复杂条件下, EC 在数据处理和质量控制方面的局限性更加突 出(Nelli et al., 2020)。为此,科学家提出了许多方法去克服之,这些方法包括延长平均时间 (Eder et al., 2015a; Finnigan et al., 2003; Foken, 2008; Zhou et al., 2018)、利用大涡模式研究湍 流有组织结构或二次环流等亚中尺度运动的作用(De Roo and Mauder, 2018; Inagaki et al., 2006; Kanda et al., 2004; Zhou et al., 2018; 陈家宜等, 2006)、空间多塔平均取代点平均 (Engelmann and Bernhofer, 2016; Mauder et al., 2008, 2010)、采用大孔径闪烁仪进行面平均(Jin et al., 2022; Zhang and Zhang, 2015; 郝小翠等, 2015, 2017)、采用光学一微波闪烁仪估算湍流 通量(Zheng et al., 2023)、采用谱拟合法计算感热(Jin et al., 2022)、采用机器学习方法弥补 EC 计算的潜热低估(Zhang et al., 2023)、采用组合 EC 法(Engelmann and Bernhofer, 2016)、考虑 湍流通量附加项(Durand, 2022)、考虑湍流相干结构的贡献(赵建华等, 2023)、质疑作为 EC 基础的泰勒冻结假设的适用性(Cheng et al., 2017)、利用模型计算结果替代 EC 结果(Jacobs et al., 2008)以及湍流通量预测方法与划分方法(Zhou et al., 2023)等。

这其中,有两个引人注意的进展是赵建华等 (2023)提出的大涡平均法和 Durand (2022) 提出的通量附加项。这两个方法均可显著提高 EC 计算的湍流通量的大小,提高地表能量闭 合水平在 0.13 以上,并使地表能量达到平衡。但两者有何异同、各自效果到底如何、综合 效果又如何以及综合效果会不会出现过闭合等问题,需要进一步探讨。本文即对这些问题展 开研究。 2 数据与方法

#### 2.1 站点和数据

试验站点为中国气象局兰州干旱气象研究所的定西干旱气象与生态环境试验站,该站为 黄土高原典型代表站,站点信息详见王胜和张强 (2011)、张强等 (2011)和赵建华等 (2023)。 本文采用其涡动相关系统、四分量辐射观测系统、热流板以及土壤温湿度观测系统等观测的 数据。观测期间站点地表尚未耕种,为裸土。数据事先进行了质量控制。由于本文研究的 Durand 的方法适用于白天(Durand, 2022),而且白天和夜间地表能量不平衡的主导因素不同, 本文这里只对白天进行研究。

原始数据为 2010 年 3 月 28 日—同年 5 月 24 日,但由度量地表能量闭合水平的能量闭 合率(Energy Balance Ratio, EBR)和能量残差(Residual, Res)随序列长度的演变可见(图 1),EBR 大体随数据长度增大而降低,但 4 月 27 日之前 EBR 比较平稳,之后则发生明显 转折;Res则先减小后增大,也在同日发生转折,这种转折应该与站点外围种植的春小麦进 入分蘖期有关,小麦进入分蘖期后枝叶增多,会吸收部分动能,降低湍流垂直输送;已有研 究也指出,地表异质性与 EBR 呈负相关(Panin and Tetzlaff, 1999; Xu et al., 2017)。当然,序 列过长,气候效应开始显现,也会影响结果。另外,由图可见,序列日期也对 EBR 和 Res 产生一定影响,基本上序列日期越靠后,EBR 越大,越前越小;Res则存在极值。本文选取 具有稳定变化、日期相对居前、数据长度相对较长的序列进行研究,即取 3 月 28 日—4 月 27 日、共计 31 天的数据。



图 1 EBR 和 Res 随序列长度的演变(图标中的数字表示起始序数, x 轴表示结束序数) Fig.1 The evolution of EBR and Res with time series length (the numbers in legend represent the starting ordinal, and the x-axis represents the ending ordinal number)

#### 2.2 方法

本文主要采用考虑湍流相干结构贡献的大涡平均法和考虑通量附加项的 Durand 法进行研究。

## 2.2.1 大涡平均法

大涡平均法是为克服 EC 基础的雷诺平均的不足而提出的(赵建华等, 2019, 2023),该法 主要认为雷诺平均没有考虑湍流的相干结构和间歇性,从而造成其在流动分离上的困难,即 雷诺平均分解后的湍流和层流是混叠的:层流中含有湍流成分、湍流中含有层流成分。为此, 作者提出了大涡平均法对此进行克服,该法是基于湍流的主体结构——相干结构进行分解。 基本思想是认为相干结构的基本结构——发卡涡除了与叠加在其上的其它尺度湍流一同输 送物质、动量和能量外,其自身亦会产生额外输送。由于考虑了额外输送,故其提高了 EC 计算湍流通量的大小,计算显示,采用大涡平均法后,白天黄土高原地区计算的感热、潜热 和湍流通量提高分别达 24%(25.33W·m<sup>-2</sup>)、31%(6.23W·m<sup>-2</sup>)和 30%(31.66W·m<sup>-2</sup>),且 白天地表能量闭合率达到 0.96 的基本闭合程度(赵建华等, 2023)。作者认为,相干结构是导 致地表能量不平衡的最重要原因之一。

该法计算感热与潜热的通用公式如下:

 Flux =  $\overline{A}_{CS}\overline{B}_{CS} + [A'_{in}B'_{in}] + \overline{A'_{CS}B'_{CS}} = \overline{A'B'_{\tau}} + \overline{A'_{CS}B'_{CS}}$  (2)

 其中,下标 CS 表示平均时段  $\tau$  (一般取为 30min)内出现的相干结构(主要指发卡涡)时段, *in* 表示间歇期中的非相干结构时段。 $A'_{CS}$ 和  $A'_{in}$ 分别是相干结构流元和非相干结构流元

 的脉动, $\overline{A}_{CS}$ 和  $\overline{A}_{in}$ 为相对应的均值, $[\overline{A}]$ 是基于  $\tau$  的平均, B 同。 $\overline{A}_{CS}\overline{B}_{CS} + [A'_{in}B'_{in}] = \overline{A'B'_{\tau}}$ ,

 表示未考虑相干结构贡献的传统 EC 方法计算的通量。

 2.2.2 Durand 法

Durand (2022)认为涡动相关法计算的潜热与感热分别漏失了一部分附加能量,这部分能量对地表能量平衡具有重要价值,考虑这部分能量后,其回归斜率的几何平均值由 0.825 提高到了 0.967,基本闭合。

他认为蒸发/蒸腾时会向大气中注入一定质量的水蒸气,这些水蒸气具有一定的体积, 它会"轻推"上面的空气柱做功,但该功并不被 EC 计算的潜热所包括。他给出的这部分潜热 ΔλE 公式为:

$$\Delta \lambda E = \frac{R^* T}{m_v L_v} \lambda E$$



其中, *T* 是绝对气温,  $R^*$ 是普适气体常数或摩尔气体常数,  $m_v$ 是水汽摩尔质量,  $L_v$ 是汽 化潜热。Durand (2022)在 T=293K 的标准气象条件下算出,  $\Delta\lambda E$  约为 $\lambda E$  的 5.5%。

对于感热亦然,加热空气后,气柱受热向上膨胀,会对外做功,他认为这部分功也没有 被 EC 计算的感热所包括,所漏失的能量为:

$$\Delta H = \frac{\overline{\rho}R^* \overline{w'T'}}{m_{air}} = \frac{R^*}{c_p m_{air}} H = \frac{R}{c_p} H \tag{4}$$

其中,  $H = c_p \overline{\rho} \overline{w'T'}$ 为感热,  $R = R^* / m_{air}$ 是比气体常数,  $c_p$ 是定压比热,  $m_{air}$ 是空气的摩尔质量,  $\rho$ 是空气密度。计算可知,  $\Delta H = 0.286H$ , 这与文献中通常公布的不平衡水平一样高(Durand, 2022)。

Durand 认为应该在潜热和感热中添加这两个附加项。为方便记,记此法为 Durand 法。 显然,大涡平均法考虑的是湍流相干结构的贡献,Durand 法考虑的是准静态过程的因 质量增加与受热膨胀引起的额外气压做功项,两者考虑的过程并不相同,它们相互并不关联, 是各自独立的过程,故以下分别考虑其效果。

### 2.2.3 地表能量平衡的评价方法

本文以前述且普遍采用的 EBR 与 Res 度量地表能量的闭合水平。EBR 定义为湍流通量 与可用能量之比,也就是(1)式右端与左端之商; Res 定义为可用能量与湍流通量之差, 也就是(1)式左端与右端之差,详见文献 Wilson et al (2002)、郭阳 (2018)和岳平等 (2012)。 2.2.4 试验方案 为了比较大涡平均法与 Durand 法的效果,本文利用白天的数据共进行了 5 组试验,分别如下(表1):第一组试验(记为 Org),以传统 EC 技术计算湍流通量;第二组试验(CS),以大涡平均法代替传统 EC 技术计算湍流通量;第三组试验(Durand),以 Durand 法计算 湍流通量,即在传统 EC 技术计算的湍流通量中增加其感热与潜热附加项;第四组试验 (CS+Durand),既考虑大涡平均法,又考虑 Durand 法;第五组试验(CS+NewDurand), 考虑大涡平均法的同时,再考虑 Durand 法中的潜热附加项,其感热附加项不再考虑。各试 验计算出湍流通量后,再以 EBR 和 Res 研究相应的地表能量闭合水平。

表格	1	各试验标记
Table	1	Label of each test

试验名	Org	CS	Durand	CS+Durand	CS+NewDurand
描述	原始情况	大涡平均法	Durand 法	大涡平均法 +Durand 法	大涡平均法+潜热 附加项
				7	

# 3 结果

### 3.1 原始闭合度

图 2 是未考虑大涡平均法和 Durand 法的原始闭合情况,可见 EBR 在早晨 9:50 左右之前的 35 分钟内过闭合,应该反映了清晨尚未消失的夜间急流所产生的机械湍流与地表加热产生的热力湍流的双重作用; 然后随时间逐渐降低,在傍晚降至最低,平均为 0.80 (图 2a,表 2)。Res 亦然(图 2b,表 3),在 9:30 之前为负值,也为过闭合,然后变为欠闭合的正值,最大可达 101.9W·m<sup>-2</sup>,平均为 64.9W·m<sup>-2</sup>,占可用能量的 23.8%。显然,原始的地表能量距离平衡很远。



Fig.2 Original closure level (a.EBR, b.Res)



### 表 2 各情形下的 EBR

Table 2 EBR at different cases

闭合方案	EBR(A)	提高部分 B(=A-A <sub>org</sub> )	B/A <sub>org</sub> (%)	1-A
Org	0.80=A <sub>org</sub>	-		0.20
CS	0.98	0.18	22.5	0.02
Durand	0.95	0.15	18.8	0.05
CS+Durand	1.17	0.37	46.3	-0.17
CS+NewDurand	1.0	0.20	25.0	0.0
表 3 各情形下的 Re	8	XX		
Table 3 Res at different cas	ses			

Table 3 Res at different cases

闭合方案	Res(A, $W \cdot m^{-2}$ )	$A/(R_n-G_s)(\%)$	提高部分 B (=A-A <sub>org</sub> , W·m <sup>-2</sup> )	$B/A_{org}(\%)$
Org	64.9=A <sub>org</sub>	23.8	-	Y'
CS	14.5	5.3	-50.4	-77.7
Durand	25.1	9.2	-39.8	-61.3
CS+Durand	-35.1	-12.9	-100.0	-154.1
CS+NewDurand	8.7	3.2	-56.2	-86.6
	1 Action			

## 3.2 大涡平均法的闭合情况

考虑大涡平均法后(图3), EBR与 Res 的演变除细节有一定变化外, 其趋势并未变化, 但 EBR 的值明显提高, Res 的值明显降低。计算显示, EBR 平均为 0.98, 提高了 0.18 或 22.5% (表 2); Res 平均为 14.5W·m<sup>-2</sup>, 提高了 50.4W·m<sup>-2</sup>或 77.7%(表 3)。其中, EBR 达到闭 合, Res 接近闭合(占可用能量的 5.3%),显然,大涡平均法对 SEI 改进非常大,可使之 达到平衡,这与已有文献的结论一致(赵建华等,2023)。



图 3 大涡平均法的闭合水平 Fig.3 Closure level of large eddy averaging method

### 3.3 Durand 法的闭合情况

Durand 法的闭合情况见图 4。显然,其演变趋势也同于原始情况(图 2),表明 Durand 法也只是对湍流通量的大小进行改变,并不改变其位相或演变趋势。表 2、3 显示,该法的 EBR 提高了 0.15 或 18.8%,达到了 0.95; Res 降低了 39.8W·m<sup>-2</sup> 或 61.3%,达到了 25.1W·m<sup>-2</sup>, 对 SEI 的改进也很大,EBR 基本达到闭合,Res 占可利能量的 9.2%,逊于大涡平均法的结果。



### 3.4 大涡平均法+Durand 法的闭合情况

现在我们将两者结合起来,考虑两者综合效应对地表能量平衡的影响。结果显示(图略), EBR 和 Res 演变趋势也未变,但出现了 EBR 提高到 1.17、Res 降低到-35.1W·m<sup>-2</sup>的严重过 闭合状况(表 2、3)。

## 4 问题与讨论

由上可见,单独考虑大涡平均法可使 EBR 接近理想平衡,不过 Res 尚有部分偏差;单 独考虑 Durand 法时,也可使 EBR 达到可接受的平衡,当然效果逊于大涡平均法;将两种方 法同时考虑时出现了严重过闭合现象,这显然不合适,这说明两者要么存在重合,要么某一种方法存在过度考虑的现象。

大涡平均法的基础是相干结构,相干结构存在三级结构,即发卡涡、发卡涡包或大尺度 流动和特大尺度流动(Adrian et al., 2000; Balakumar and Adrian, 2007; Lee and Sung, 2011),该 法考虑了这些结构,但以 30min 默认为特大尺度流动或热泡的时间尺度,这虽然不太准确,但与文献中普遍采用的 30min 平均时间相同,其问题应该不大。

Durand 法分两部分,其潜热附加项没有疑问,但其感热附加项有问题。 感热附加项的推导过程如下:

一维前提下不考虑气压变化的感热导致大气下层的加热做功为



其中, V 是空气体积, p 是气压,  $n = \overline{\rho V} / m_{air} = \overline{m} / m_{air}$  是摩尔数, m 是空气质量, 已 忽视密度的脉动, 即认为  $\overline{\rho} = \rho$  (刘式适和刘式达, 1991)。n 带入可得

$$\overline{p}\frac{\partial\overline{V}}{\partial t} = \overline{m}R\frac{\partial\overline{T}}{\partial t}$$
(6)  
当不考虑上边界的湍流输入时,可得  

$$\frac{\partial\overline{T}}{\partial t} = \frac{\overline{w'T'}}{\overline{h}}$$
(7)  
其中, h是气柱或边界层高度,  $\overline{w'T'}$ 是地表热通量。  
继而得到(原文公式(17))  

$$\overline{p}\frac{\partial\overline{V}}{\partial t} = \overline{m}R\frac{\partial\overline{T}}{\partial t} = \frac{\overline{m}R}{\overline{h}}\overline{w'T'}$$
(8)  
对单位面积,则(8)式反映的加热做功项  $\Delta H$  简化为  

$$\Delta H = \overline{p}\frac{\partial\overline{h}}{\partial t} = \overline{\rho}R\overline{w'T'} = \frac{R}{c_p}H$$
(9)

式中,由于对单位面积,故在数值上 $\partial V / \partial t = \partial h / \partial t$ 和 $m / h = \rho$ 。另外,最后一步已分子 分母同乘了 $c_p$ 。这项就是 Durand 认为的感热附加项。

实际上,该推导的(9)式或原文(20)式是有问题的。它不应该分子分母同乘定压比 热 $c_p$ 以转换为感热,而应该乘以定容比热 $c_v$ ,因为该过程考虑的气柱受热首先产生的是内 能的增加(而不是焓),内能增加后,受热膨胀,才推动气柱向外做功。整个过程中内能与 不计压力变化的膨胀做功或压力能之和称为感热,这也正是感热的定义(盛裴轩等,2014)。 华莱士与霍布斯(2008)也指出,"在有加热给空气的单位质量的能量中, $du = c_v dT$ 用于内 能的增加, $pd\alpha = RdT$ 用于膨胀和对上面空气做功"。刘式适和刘式达(1991)在《大气动 力学》教材上也指出"(热力学第一定律)表示单位质量空气从外界吸收的热量等于空气内 能 $c_v T$ 的增加和对外做功之和"。显然,大气热力学方程本身考虑了这个过程。

既然是基于内能的变化,故此后推导其"感热附加项"公式(9)时应该乘以定容比热 $c_v$ ,即

其中已应用等式 $c_p = c_v + R$ 。

显然,前后感热相等,感热并没有增加。Durand考虑的膨胀做功项已然包含在感热的 定义当中,作者误把膨胀做功项累加到感热之中,而不是正确做法的累加到内能之中,或者 换句话说,作者实际上将膨胀做功累加了2次,结果导致了过度计算。另外也表明作者似乎 只是把大气热力学方程用物理过程重新诠释了一遍。

(11) 式还可以如下反映出来, (6) 式可变为

$$\overline{p}\frac{\partial \overline{V}}{\partial t} = \overline{mp}\frac{\partial \overline{\alpha}}{\partial t} = \overline{mR}\frac{\partial \overline{T}}{\partial t}$$

式中,  $\alpha = 1/\rho = V/m$ 是比容。

刘式适和刘式达(1991)给出的不计外界热量供给条件下单位质量的大气热力学方程或热力学第一定律为

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = 0$$

(13)

此式中的第二项的局地变化本质上就是 Durand 考虑的加热做功项。

该式的平均化形式比较复杂,一般认为气压和密度的脉动比均值小得多(刘式适和刘式 达,1991;Stull,1991),这里对两者的脉动项我们仅考虑与比容均值有关的梯度项,则得

$$c_{v}\frac{d\overline{T}}{dt} + \frac{c_{v}}{\overline{\rho}}\frac{\partial}{\partial x_{i}}\overline{\rho}\overline{u_{i}'T'} + \overline{p}\frac{d\overline{\alpha}}{dt} + \overline{p'u'}_{i}\frac{\partial\overline{\alpha}}{\partial x_{i}} = 0$$

当不考虑平均运动和水平方向的湍流输送时,则 $d()/dt = \partial()/\partial t$ 和

$$\frac{\partial}{\partial x} \overline{\rho} \overline{u'T'} = \frac{\partial}{\partial y} \overline{\rho} \overline{v'T'} = 0 \quad (\overline{\alpha} \ \overline{\eta} | \overline{n}) , \quad \text{L式化为}$$

$$c_v \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} + \frac{c_v}{\overline{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} \overline{\rho} \overline{w'T'} + \overline{p} \frac{\partial \overline{\alpha}}{\partial t} + \overline{p'w'} \frac{\partial \overline{\alpha}}{\partial z} = 0$$
(15)
  
将加热做功项 (12) 式带入可得
  
(15)

$$c_{v}\frac{\partial T}{\partial t} + R\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{c_{v}}{\overline{\rho}}\frac{\partial}{\partial z}\overline{\rho}\overline{w'T'} + \overline{p'w'}\frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0$$

$$\Leftrightarrow c_{p}\frac{\partial \overline{T}}{\partial t} + \frac{c_{v}}{\overline{\rho}}\frac{\partial}{\partial z}\overline{\rho}\overline{w'T'} + \overline{p'w'}\frac{\partial \overline{\alpha}}{\partial z} = 0$$
(16)

显然,也可看到 Durand 考虑的加热做功项的基础是内能,当它与内能结合时,形成感热。

所以, Durand 法考虑的感热附加项是有问题的,故以下我们不再考虑它。此时如果只 考虑其潜热附加项,并考虑大涡平均法,则结果显示(表2、3,表中的 NewDurand),其 EBR 达到理想的 1.0, Res 降低到 8.7W·m<sup>-2</sup>,降低了 86.6%,只占可用能量的 3.2%。显然, 这是极为理想的闭合水平,也即是说,在考虑大涡平均法、并同时考虑 Durand 法的潜热附 加项,即可使地表能量达到理想平衡。注意的是,大涡平均法可使 EBR 达到 0.98, Res 降 低到 14.5W·m<sup>-2</sup>,推算可知,Durand 法的潜热附加项对 EBR 和 Res 的贡献只有 0.02 和 5.8W·m<sup>-2</sup>, 相比于大涡平均法的 0.18 (EBR)和 50.4W·m<sup>-2</sup> (Res)的贡献其值很小。这表明,在此理想 的地表能量闭合中,大涡平均法的贡献占绝大部分,湍流相干结构是地表能量实现平衡的关



键因素。

### 5 结论

以上我们研究了考虑大涡平均法与 Durand 法对白天地表能量不平衡的影响,指出了 Durand 法的失误,在去除其失误部分后,结果在白天实现了地表能量的理想平衡。主要结 论如下:

(1) 序列长度对地表能量闭合水平有一定影响,在均匀裸土、且外在环境没变化时,能量闭合率 EBR 一般先减小后保持平稳,能量残差 Res 则逐渐降低。当周围植被生长时,EBR 逐渐变小, Res 逐渐增大,地表能量越发欠闭合。

(2) 原始的地表能量很不平衡,其 EBR 为 0.80, Res 为 64.9W·m<sup>-2</sup>, 占可用能量的 23.8%。 当只引入考虑湍流相干结构贡献的大涡平均法后,EBR 提高到 0.98,提高了 0.18 或 22.5%; Res 平均为 14.5W·m<sup>-2</sup>,提高了 50.4W·m<sup>-2</sup>或 77.7%,占可用能量的 5.3%,达到平衡。当只 考虑通量附加项的 Durand 法时,EBR 提高到 0.95,提高了 0.15 或 18.8%; Res 降低到 25.1W·m<sup>-2</sup>, 降低了 39.8W·m<sup>-2</sup>或 61.3%,占可用能量的 9.2%,接近平衡。

(3) 既考虑大涡平均法、又考虑 Durand 法时出现了严重过闭合现象,此时 EBR 为1.17, Res 为-35.1W·m<sup>2</sup>。分析指出,大涡平均法与 Durand 法考虑的物理过程并不相同,前者考虑 的是湍流相干结构的贡献,后者考虑的是准静态过程中因质量增加和受热膨胀产生的额外做 功,两者并不关联。仔细研究发现,过闭合的原因是 Durand 在推导其感热附加项时误将热 力学第一定律中已考虑的气体膨胀做功项过度累加到感热中所致。

(4) 在修正 Durand 法的问题后,同时考虑大涡平均法,结果显示,该修正方案的 EBR 达到了 1.0, Res 降低到只占可用能量的 3.2%,实现了理想的闭合。另外,计算显示,修正 后 Durand 法的 EBR 贡献只有 0.02、Res 只有 5.8W·m<sup>-2</sup>,远低于大涡平均法的贡献,因此湍 流相干结构是实现白天地表能量平衡的关键因素。

但是,从EBR和Res的日变化可以发现,地表能量并不是在每个时次都闭合,而是在11:00-15:00之间的闭合情况最理想,在11:00之前偏大,15:00之后偏小,本文得到的理想闭合情况是平均后的结果。显然,在湍流活跃时,闭合情况良好,反映了湍流在地表能量平衡中的重要作用。在湍流减弱的阶段,闭合情况普遍偏差,EBR甚至低至0.74、Res大至42.3W·m<sup>2</sup>的远未平衡的地步。而且,我们也发现,当采用最小二乘线性回归法评价闭合水平时,大涡平均法、Durand法和修正的方法能使闭合度由原始的0.72分别提高到0.92、0.85和0.95,其中,修正的方法是可以接受的闭合水平。由于EBR和Res可以达到理想闭合,即湍流通量和可用能量在大小上实现了平衡,最小二乘线性回归法尚有欠缺,表明这些方法在位相上尚有不足。由于大涡平均法改进力度最大,而该法以30min平均时间默认为特大尺度流动或热泡的时间尺度,这可能是不太恰当的;而且15:00之后湍流输送中热泡这种流动的贡献与尺度可能发生了变化,Xu et al (2017)也指出,下午会出现强烈的次级环流并对地表能量平衡产生影响,大涡平均法对此考虑尚有欠缺。这可能是本文出现的闭合情况在白天存在变化的原因,这需要进一步研究。

另外,需要指出的是,湍流相干结构虽然对地表能量平衡产生了重要影响,但其作用并 不仅限于此,这是由于其还涉及到湍流与层流的流动分离问题。传统的分离方法是基于雷诺 平均实现的,但如前所述,雷诺平均由于没有很好的考虑具有各向异性和间歇性的相干结构 的贡献,使得其在流动分离上出现一定困难,这进而使得基于其得到的雷诺平均方程、湍流 脉动方程以及湍流参数化方案受到影响。这意味着,考虑相干结构后,相关方程与方案都会 产生变化,并进一步影响到边界层数值模式上。这需要进一步的研究。

#### 参考文献(References)

- Adrian R, Meinhart C, Tomkins C. 2000. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 422: 1-54. doi:10.1017/S0022112000001580
- Babić N, Stiperski I, Marinovic I, et al. 2021. Examining relationships between entrainment-driven scalar dissimilarity and surface energy balance underclosure in a semiarid valley[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 298-299:108272.
- Balakumar J, Adrian R. 2007. Large- and very-large-scale motions in channel and boundary-layer flows[J]. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 365: 665-681.doi:10.1098/rsta.2006.1940
- 陈家宜, 范邵华, 赵传峰等. 2006. 涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究[J]. 大气科学,30(3): 423-432. Chen J Y, Fan S H, Zhao C F, et al. 2006. The underestimation of the turbulent fluxes in eddy correlation techniques[J]. Chinese Journal of Atmospheric Scence (in Chinese),30(3): 423-432.doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.06
- 陈广宇, 韦志刚, 董文杰等. 2019: 中国西部陆面过程次网格地形参数化的改进对区域气温和降水模拟的影响研究[J]. 大气科学, 43(4): 846-860. Chen G Y, WEI Z G, Dong W J, et al. 2019: Effects of improvement of land surface subgrid topographic parameterization on regional temperature and precipitation simulation in western China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 43(4): 846-860. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1807.18156
- Cheng Y, Sayde C, Li Q, et al. 2017. Failure of Taylor's hypothesis in the atmospheric surface layer and its correction for eddy-covariance measurements[J]. Geophysical Research Letters, 44(9): 4287-4295.
- De Roo F, Mauder M. 2018. The influence of idealized surface heterogeneity on virtual turbulent flux measurements[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 18: 5059-5074.doi:10.5194/acp-2017-498.
- Durand P. 2022. A possible reconciliation between eddy covariance fluxes and surface energy balance closure[J]. Atmosphere, 13: 1965.
- Eder F, Roo F, Rotenberg E,et al. 2015a. Secondary circulations at a solitary forest surrounded by semi-arid shrubland and their impact on eddy-covariance measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 211-212: 115-127.doi:10.1016/j.agrformet.2015.06.001
- Eder F, Schmidt M, Damian T,et al. 2015b. Mesoscale eddies affect near-surface turbulent exchange: evidence from lidar and tower measurements[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54:189-206.doi: 10.1175/JAMC-D-14-0140.1
- Engelmann C, Bernhofer C. 2016. Exploring eddy-covariance measurements using a spatial approach: the eddy matrix[J]. Boundary-Layer Meteorology, 161(1):1-17.doi 10.1007/s10546-016-0161-x
- Finnigan J, Clement R, Malhi Y, et al. 2003. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part I: averaging and coordinate rotation[J]. Boundary-Layer Meteorology, 107: 1-48. doi::10.1023/A:1021554900225
- Foken T. 2008. The energy balance closure problem: an overview[J]. Ecological applications, 18(6): 1351-1367.doi:10.1890/06-0922.1
- Fortuniak K, Przybylak R, Araźny A, et al. 2017. Sea water surface energy balance in the Arctic fjord (Hornsund, SW Spitsbergen) in May–November 2014[J]. Theoretical and Applied Climatology, 128(3-4):959-970. doi:10.1007/s00704-016-1756-3

- Gao Z, Horton R, Liu H. 2010. Impact of wave phase difference between soil surface heat flux and soil surface temperature on soil surface energy balance closure[J]. Journal of Geophysical Research, 115: D16112.doi:10.1029/2009JD013278
- Gao Z, Liu H, Katul G G,et al. 2017. Non-closure of the surface energy balance explained by phase difference between vertical velocity and scalars of large atmospheric eddies[J]. Environmental Research Letters, 12(3): 034025.doi:0.1088/1748-9326/aa625b
- 郭阳. 2018. 干旱区均匀裸土下垫面近地层能量平衡及中尺度运动对湍流的影响[D]. 兰州大学博 士论文. Guo Y.2018. A study on surface energy balance and effect of mesoscale motions on turbulence over a gomogeneous bare soil surface in arid area[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou university.
- 郭阳, 左洪超, 陈继伟等.2015. 均匀裸土地表土壤热通量计算方法对比及对能量闭合的影响[J]. 气候与环境研究, 20(2): 177-187. Guo Y, Zuo H C, Chen J W, et al. 2015. Comparison of soil heat flux calculation approaches and their impacts on surface energy balance closure over homogeneous bare soil surface[J]. Climatic and Environmental Research, 20(2): 177-187. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14019
- 郝小翠, 张强, 杨泽粟. 2015. 陇中黄土高原垂直感热平流输送对 LAS 和EC 观测感热通量差异的 影响[J]. 中国沙漠, 35(1): 211-219. Hao X C, Zhang Q, Yang Z S. 2015. Impact of vertical sensible heat advection on differences between LAS and EC measured sensible heat flux over the Loess Plateau in central Gansu, China[J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 35:211-219. doi: 10.7522/j.issn.1000-694X.2014.00156
- 郝小翠,张强,杨泽粟等. 2017. 陇中黄土高原 LAS 在非均匀下垫面的观测优势及其在区域陆面 模式验证中的初步应用[J]. 冰川冻土, 39(5): 1057-1064. Hao X C, Zhang Q, Yang Z S, et al. 2017. Superiority of LAS in observation on heterogeneous surface and its preliminary application for the validation of land surface models in Longzhong Loess Plateau [J]. Journal of Gloicology and Geocryology (in Chinese), 39(5):1057-1064. doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0117
- Inagaki A, Letzel M, Raasch S, et al. 2006. Impact of surface heterogeneity on energy imbalance: a study using Les. Journal of The Meteorological Society of Japan[J]. Journal of Meteorological Society of Japan, 84(1): 187-198.
- Jacobs A, Heusinkveld B, Holtslag B. 2008. Towards closing the surface energy budget of a mid-latitude grassland[J]. Boundary-Layer Meteorology, 126(1): 125-136. doi:10.1007/s10546-007-9209-2
- Jin L, Zhang H, He Q,et al. 2022. Comparison of the sensible heat flux determined by large-aperture scintillometer and eddy covariance measurements with respect to the energy balance problem in the Taklimakan desert[J]. Boundary-Layer Meteorology, 185(3): 365-393.
- Kanda M, Inagaki A, Letzel M, et al. 2004. Les study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes[J]. Boundary-Layer Meteorology, 110(3): 381-404.
- Lee J H, Sung H J. 2011. Very-large-scale motions in a turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mechanics, 673: 80-120.doi:10.1017/S002211201000621X
- 刘式适, 刘式达. 1991. 大气动力学 (上册)[M]. 北京: 北京大学出版社. 9-25.Liu S S, Liu S D. 1991. Atmospheric Dynamics (Volume 1) (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press. 9-25.
- 刘熙明, 胡非, 姜金华等. 2008: 白洋淀水陆不均匀地区能量平衡特征分析[J]. 大气科学, 32(6): 1411-1418. Liu X M, Hu F, Jiang J H, et al. 2008: Energy budget over the water[CD\*2] land

heterogeneous surface in Baiyangdian region. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 32(6): 1411-1418. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.15

- Majozi N, Mannaerts C M, Ramoelo A, et al. 2017. Analysing surface energy balance closure and partitioning over a semi-arid savanna FLUXNET site in Skukuza, Kruger National Park, South Africa[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 21(7): 1-21. doi:10.5194/hess-2016-76, 2016
- Massman W. 2020. Impacts of non-ideality and the thermodynamic pressure work term  $p \Delta v$  on the surface energy balance[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 24: 967-975.
- Mauder M, Desjardins R, Pattey E, et al. 2008. Measurement of the sensible eddy heat flux based on spatial averaging of continuous ground-based observations[J]. Boundary-Layer Meteorology. 128(1): 151-172. doi: 10.1007/s10546-008-9279-9
- Mauder M, Desjardins R, Pattey E, et al. 2010. An attempt to close the daytime surface energy balance using spatially-averaged flux measurements[J]. Boundary-Layer Meteorology, 136(2): 175-191.doi:10.1007/s10546-010-9497-9
- Mauder M, Foken T, Cuxart J. 2020. Surface-energy-balance closure over land: a review[J]. Boundary-Layer Meteorology, 177: 395-426.doi: 10.1007/s10546-010-9497-9
- Nelli N R, Marouane T, Fonseca R M,et al. 2020. Micrometeorological measurements in an arid environment: diurnal characteristics and surface energy balance closure[J]. Atmospheric Research, 234: 104745. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104745
- Panin G, Tetzlaff G. 1999. A measure of inhomogeneity of the land surface and parametrization of turbulent fluxes under natural conditions[J]. Theoretical and Applied Climatology, 62(1-2): 3-8. doi:10.1007/s007040050069
- 屈侠, 黄刚. 2024. 碳移除下全球地表气温峰值出现时间的主要影响因子: 能量平衡模型研究[J].
   气候与环境研究, 29(3): 339-352. Qu X, Huang G. 2024. Factors influencing the timing of global temperature peaks under carbon removal: an energy balance model study [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 29 (3): 339-352. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23065shu
- Serrano-Ortiz P, Sánchez-Cañete E, Olmo F, et al. 2015. Surface-parallel sensor orientation for assessing energy balance components on mountain slopes[J]. Boundary-Layer Meteorology, 158(3):489-499.
- 盛裴轩,毛节泰,李建国等.2014.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,133. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. 2014. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 133.
- Stoy P, Mauder M, Foken T,et al. 2013. A data-driven analysis of energy balance closure across FLUXNET research sites: The role of landscape-scale heterogeneity[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 171-172:137-152.doi: 10.1016/j.agrformet.2012.11.00
- Stull R B. 1991. 边界层气象学导论[M].北京: 气象出版社,88.
- Teng D, He X, Qin L, et al. 2021. Energy balance closure in the tugai forest in Ebinur lake basin[J]. Northwest China. Forests, 12: 243.doi:10.3390/F12020243
- 王胜,张强. 2011. 黄土高原半干旱区露水形成的大气物理特征研究[J]. 物理学报, 60(5): 846-853.
   Wang S, Zhang Q. 2011. Atmospheric physical characteristics of dew formation in semi-arid in loess plateau [J]. Acta Phys. Sin.(in Chinese), 60(5):846-853.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 113(1-4): 223-243. doi:10.1016/S0168-1923(02)00109-0
- Xu Z, Ma Y, Shaomin L,et al. 2017. Assessment of the energy balance closure under advective

conditions and its impact using remote sensing data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56. doi:10.1175/JAMC-D-16-0096.1

- 杨丽薇, 高晓清, 惠小英等.2017. 青藏高原中部聂荣半干旱草地夏季近地层能量平衡与输送分析 [J]. 气候与环境研究, 22(3): 335-345. Yang, X Q, Gao, X Q, Hui X Y, et al. A study on energy balance and transfer in the surface layer over semiarid grassland of nyainrong area in central Tibetan plateau in summer[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(3): 335-345. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16136
- 岳平,张强,牛生杰等. 2012. 半干旱草原下垫面能量平衡特征及土壤热通量对能量闭合率的影响[J]. 气象学报. 70(1): 136-143. Yue P, Zhang Q, Niu S J, et al. 2012. Characters of surface energy balance over a semi-arid grasslands and effect of soil heat flux on energy balance closure [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(1): 136-143.
- Zhang H and Zhang H. 2015. Comparison of turbulent sensible heat flux determined by large-aperture scintillometer and eddy covariance over urban and suburban areas[J]. Boundary-Layer Meteorol, 154(1): 119-136. doi:10.1007/s10546-014-9965-8
- 张强,孙昭萱,王胜. 2011. 黄土高原定西地区陆面物理量变化规律研究[J]. 地球物理学报, 54(7):
  1727-1737. Zhang Q, Sun Z X, Wang S. 2011. Analysis of variation regularity of land-surface physical quantities over Dingxi region of the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(7): 1727-1737. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2001.07005
- Zhang W, Jung M, Migliavacca M, et al. 2023. The effect of relative humidity on eddy covariance latent heat flux measurements and its implication for partitioning into transpiration and evaporation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 330: 109305. doi:10.1016/j.agrformet.2022
- 赵建华, 王介民, 张强等. 2019. 半干旱区湍流相干结构对地表能量不平衡问题的解决[J]. 中国 科技纵横. 306(6): 248-256. Zhao J H, Wang J M, Zhang Q, et al.2019. Solution of surface energy imbalance by coherent structure in semi-arid area [J]. China Science & Technology Overview (in Chinese),306(6):248-256.
- 赵建华, 张良, 王胜等. 2023. 黄土高原冬季湍流相干结构在地表能量平衡中的作用[J]. 地球物 理学报, 66(6): 2292-2305. Zhao J H, Zhang L, Wang S, et al. 2023. The role of turbullent structure on surface energy balance on Loess Plateau in winter[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(6): 2292-2305. doi:10.6038/cjg2022Q00184
- Zheng C, Liu S, Song L,et al. 2023. Comparison of sensible and latent heat fluxes from optical-microwave scintillometers and eddy covariance systems with respect to surface energy balance closure[J]. Agricultural and Forest Meteorology,331:109345.
- 仲雷,马耀明,李茂善.2007.珠穆朗玛峰绒布河谷近地层大气湍流及能量输送特征分析[J].大气科 学,31(1): 48-56. Zhong L, Ma Y M, Li M S. 2007. An analysis of atmosphere turbulence and energy transfer characteristics of surface layer over rongbu valley in Mt. Qomolangma area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 31(1): 48-56. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.05
- Zhou Y, Li D, Liu H. 2018. Diurnal variations of the flux imbalance over homogeneous and heterogeneous landscapes[J]. Boundary-Layer Meteorology, 168: 417-442.
- Zhou Y, Sühring M, Li X. 2023. Evaluation of energy balance closure adjustment and imbalance prediction methods in the convective boundary layer - A large eddy simulation study[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 333: 109382.