



黄土高原夜间地表能量不平衡问题的初步研究

赵建华, 张强, 王胜, 梁芸, 张良, 岳平, 赵福年

引用本文:

赵建华, 张强, 王胜, 等. 黄土高原夜间地表能量不平衡问题的初步研究[J]. *地球物理学报*, 2025, 68(2): 385–398.

Zhao J H, Zhang Q, Wang S, et al. Preliminary study on the nocturnal surface energy imbalance on the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, 68(2): 385-398.

<https://doi.org/10.6038/cjg2024R0790>

相关论文

黄土高原冬季湍流相干结构在地表能量平衡中的作用

赵建华, 张良, 王胜, 梁芸, 隆霄, 王涓力

地球物理学报 2023, 66(6): 2292–2305 doi: 10.6038/cjg2022Q0184

黄土高原靖边剖面岩石磁学性质及其古环境意义

董良, 沈中山, 邓成龙

地球物理学报 2024, 67(8): 3060–3074 doi: 10.6038/cjg2023R0271

热带气旋Rossby波能量频散问题研究进展

史文丽, 费建芳, 黄小刚, 刘磊, 李启华, 杨璐

地球物理学报 2021, 64(3): 752–764 doi: 10.6038/cjg2021N0425

青藏高原东南缘三江地区上地壳各向异性初步研究

吴鹏, 高原, 陈安国, 石玉涛

地球物理学报 2020, 63(3): 1104–1116 doi: 10.6038/cjg2020N0232

1718年通渭M7.5地震滑坡特征分析——黄土高原历史强震触发滑坡数据库的应用

徐岳仁, 杜朋, 李文巧, 张伟恒, 田勤俭, 熊仁伟, 王林

地球物理学报 2020, 63(3): 1235–1248 doi: 10.6038/cjg2020N0146

利用区域地震记录测定地震辐射能量

王子博, 刘瑞丰, 李赞, 孔韩东, 胡岩松

地球物理学报 2023, 66(2): 626–637 doi: 10.6038/cjg2022P0886



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵建华, 张强, 王胜等. 2025. 黄土高原夜间地表能量不平衡问题的初步研究. 地球物理学报, 68(2): 385-398, doi: 10.6038/cjg2024R0790.

Zhao J H, Zhang Q, Wang S, et al. 2025. Preliminary study on the nocturnal surface energy imbalance on the Loess Plateau. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 68(2): 385-398, doi: 10.6038/cjg2024R0790.



黄土高原夜间地表能量不平衡问题的初步研究

赵建华¹, 张强¹, 王胜¹, 梁芸², 张良^{1*}, 岳平¹, 赵福年¹

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 Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China

摘要 一般认为白天的地表能量不平衡 (surface energy imbalance, SEI) 主要由涡动相关法造成, 但夜间湍流受到抑制, 其产生的原因尚不清楚. 本文分析了夜间与白天地表能量的区别, 认为夜间土壤热量存在的双向传递慢过程、向上长波辐射位相延后与湍流相干结构是其重要原因. 为此, 本文利用黄土高原典型代表站的观测数据, 对夜间 SEI 展开研究. 发现: (1) 考虑慢过程后, 夜间土壤温度、土壤热通量、土壤热储与地表土壤热通量均有一定程度的增大, 其能量闭合率 (Energy Balance Ratio, EBR) 提高了 0.02 或 3%, 达到 0.71, 能量平衡残差 (Residual, Res) 绝对值降低了 $0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 4%, 为 $17.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (2) 考虑向上长波辐射位相延后, 夜间向上长波辐射和净辐射均有所降低, 其 EBR 也为 0.71, 也提高了 0.02 或 3%, |Res| 为 $15.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 降低了 $2.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 13%; (3) 考虑相干结构的贡献后, 感热与潜热分别增大了 53%(绝对值) 和 35%, 其 EBR 未有显著变化, 但 |Res| 降低了 $1.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 6%; (4) 既考虑慢过程, 又考虑向上长波辐射位相延后和相干结构时, 夜间 EBR 为 0.73, 提高了 0.04 或 6%, |Res| 为 $14.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 降低了 $3.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 17%. 显然, 这三个过程均可改善夜间地表能量闭合水平, 但综合效应改善更大; (5) 增加 Durand (2022) 提出的湍流通量漏失部分, 可使 EBR 提高 0.03, 达到 0.76, |Res| 降低 $1.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 达到 $13.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 但仍未闭合, 故涡动相关法可能不是夜间 SEI 产生的主要原因. 分析发现, 长波辐射计的观测误差较大, 且无世界标准; 检测结果显示, 长波辐射存在系统误差, 且 EBR 和 Res 与长波辐射均存在显著的正相关关系, 因此我们认为长波辐射的系统误差可能是夜间 SEI 产生的主要原因, 提高长波辐射计的观测精度应该是改善夜间地表能量闭合水平的重要途径.

关键词 夜间地表能量不平衡; 慢过程; 长波辐射位相延后; 湍流相干结构; 长波辐射计精度

中图分类号 P404

收稿日期 2023-11-23, 2024-06-19 收修定稿

DOI: 10.6038/cjg2024R0790

CSTR: 32084.14.cjg2024R0790

Preliminary study on the nocturnal surface energy imbalance on the Loess Plateau

ZHAO JianHua¹, ZHANG Qiang¹, WANG Sheng¹, LIANG Yun², ZHANG Liang^{1*},
YUE Ping¹, ZHAO FuNian¹

1 Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province (Chinese Meteorological Administration),
Lanzhou Institute of Arid Meteorology of Chinese Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

2 Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China

Abstract It is generally believed that the surface energy imbalance (SEI) during the day is mainly caused by eddy covariance technique. While turbulence at night is suppressed, the reason for its occurrence is not clear. This study analyzes the differences in surface energy between nighttime and daytime, and suggests that the slow process of two-way transfer of soil heat at night, the delayed phase of upward longwave radiation and the

基金项目 国家自然科学基金(重点)项目(42230611,41375019,41875020), 气象能力提升联合研究专项(23NLTSZ008), 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J049), 甘肃省自然科学基金(22JR5RA746,24JRRA724)和中国博士后基金(2022MD713816)资助.

第一作者简介 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** 张良, 男, 1980 年生, 研究员, 主要从事陆面过程方面的研究. E-mail: lzhangmet@163.com

turbulent coherent structure are important reasons for it. To investigate this, the study uses the data from an observatory on the Loess Plateau to examine the nocturnal SEI. The results show that: (1) After considering the slow process of soil heat transfer, nocturnal soil temperature, soil heat flux, soil heat storage, and surface soil heat flux all increase to a certain extent. The energy balance rate (EBR) increases by 0.02 (3%) to 0.71, and the absolute value of energy balance residual (Res) decreases by $0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (4%) to $17.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; (2) After considering the phase delay of upward longwave radiation, both nocturnal upward longwave radiation and net radiation decrease, with an EBR also of 0.71, an increase also of 0.02 (3%), and a $|\text{Res}|$ of $15.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a decrease of $2.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (13%); (3) After considering the contribution of the coherent structures, sensible heat and latent heat increase by 53% (absolute value) and 35%, respectively, with an EBR unchanging significantly and a $|\text{Res}|$ decrease of $1.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (6%); (4) When considering the slow processes, the phase delay of upward longwave radiation and the coherent structure, the nocturnal EBR is 0.73, an increase of 0.04 (6%), and the $|\text{Res}|$ is $14.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a decrease of $3.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (17%). Clearly, all three processes can improve the level of nocturnal surface energy closure, but the overall effect is greater; (5) Adding the turbulent flux leakage part proposed by Durand (2022) can increase the EBR by 0.03 to 0.76 and decrease the Res by $1.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ to $13.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, but the nocturnal surface energy is still not balanced. Therefore, the eddy covariance technique may not be the main cause of nocturnal SEI. Analysis shows that the longwave radiation instruments have large observation errors and there is no world standards. The detection results reveal the existence of systematic errors, and there is a significant positive correlation between EBR and Res and longwave radiation. Therefore, we believe that the systematic errors of longwave radiation may be the main cause of nocturnal SEI. Improving the observation accuracy of longwave radiometers should be an important way to improve the level of nocturnal surface energy closure.

Keywords Nocturnal surface energy imbalance; Slow processes; Phase delay of longwave radiation; Turbulent coherent structure; Longwave radiometer's accuracy

0 引言

地表能量平衡是地球气候系统理论的重要基石,它对天气和气候预测、中尺度和气候模式中的陆面模型的地面和冠层表面温度的计算、生态系统功能的评估、风能研究以及水文学和生态学的发展具有重要作用 (Gao et al., 2010; Li and Chao, 2022; Mauder et al., 2020; Teng et al., 2021; Zhou et al., 2018).

但随着涡动相关法的广泛使用,人们越来越多地发现了地表能量不平衡 (Surface Energy Imbalance, SEI),即净辐射减去土壤热通量后并不等于感热与潜热之和。不同站点的研究显示,地表能量平衡比率在 0.7 到 0.9 之间 (Eder et al., 2015a; Foken, 2008; Wilson et al., 2002),即存在 10%~30% 的能量亏缺。围绕此问题,科学家们展开了大量研究,并取得了大量成果。Mauder 等 (2020) 将这些成果归结为四个主要方面:仪器误差、数据处理误差、被忽略的附加项以及亚中尺度输送过程。目前主流认识认为涡动相关法是导致 SEI 的主因 (Eder et al., 2015a,b; Mauder et al., 2020; Wilson et al., 2002; Zhou et al., 2023),该法的主要缺陷在于其不能捕获低频湍流和地表非均匀性引

起的平流等的贡献 (Babić et al., 2021; Foken et al., 2011b; Gao et al., 2017; Mauder et al., 2010, 2020; Zhou et al., 2023)。

经过几十年的努力,白天的 SEI 得到了很大的改善,能量闭合度提高了 10%~20%,可以达到 0.9 以上 (Durand, 2022; Jacobs et al., 2008; Leuning et al., 2012; Majozi et al., 2017; Were et al., 2007; 武建军, 2014; 杨彦龙, 2016; 岳平等, 2012; 张强等, 2012),有些研究可以达到闭合 (Brötzel et al., 2014; Eder et al., 2015a, b; Gao et al., 2017; Heusinkveld et al., 2004; Jacobs et al., 2008; Majozi et al., 2017; Zhou et al., 2023; 赵建华等, 2023)。但是在夜间,SEI 问题依然十分严重。Wilson 等 (2002) 发现年平均的能量平衡闭合率 EBR (Energy Balance Ratio) 在夜间为负值,其绝对值远小于 1。Burns 等 (2015) 发现夜间地表能量闭合度在 19:00—23:00 约 40%~50%,在 00:00—04:00 约 60%~70%。Majozi 等 (2017) 利用 15 年数据发现白天的线性回归闭合度和闭合率 EBR 可达 0.99 和 0.96,而在夜间此两值非常低,只有 0.11 和 0.26,他们认为这与夜间摩擦速度低有关。Nelli 等 (2020) 在阿联酋的一个干旱地区发现绝对能量闭合率在夜间只有 0.08~0.25。曹寰琦等 (2020) 在塔克拉玛干沙漠发现夜间

的地表能量闭合度为 0.41. 郭建侠等 (2008) 的结果显示, 夜间 EBR 只有极低的 3.5%, 经位相调整后, 也只提高到 6%. 李宏宇等 (2010) 在半干旱区考虑了土壤热储后, 夜间的能量闭合度平均只有 0.4 (不闭合度平均是 0.6), 不平衡差额在 $-40 \sim -20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间. 杨彦龙 (2016) 研究显示, 荒漠下垫面夜间能量闭合度为 0.37 ~ 0.51, 能量残差为 $14.6 \sim 24.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. 武建军 (2014) 利用三种方法研究了在干旱半干旱区的 SEI, 结果显示夜间能量闭合度在 0.02 ~ 0.75 之间, 平均值为 0.47. Guo 和 Zuo (2017) 指出, 中尺度运动是夜间能量平衡闭合差的一个重要原因, 在剔除中尺度运动后, 夜间地表能量闭合度由 55% ~ 60.8% 提高到 60.5% ~ 65.3%. 显然, 夜间的闭合度只在 0.02 ~ 0.75 之间, 很分散, 很不理想.

夜间地表能量收支同白天相比, 有 4 个显著不同的特点. 一是夜间没有太阳辐射, 只有长波辐射; 二是地表在夜间以向上长波辐射放热为主, 白天却是以吸收短波辐射为主; 三是夜间土壤热通量方向向上, 即热量由土壤深处往上传播; 四是夜间湍流间歇性强, 且以机械湍流为主 (钱敏伟和李军, 1996). 这四个特点使得: (1) 夜间地表土壤块受下面的土壤热通量和上面的向下长波辐射的双向热源作用 (白天只有一个方向), (2) 土壤吸热是慢过程, 辐射是快过程, 存在向上长波辐射的位相延后; (3) 夜间湍流不活跃, 感热与潜热很小. 由于以往对夜间 SEI 产生的原因研究较少, 并没有考虑夜间地表能量同白天的显著差异, 故从以上三个角度出发研究夜间 SEI 的很少, 而且 SEI 研究中也较少考虑这三点. 黄土高原地处我国半湿润和半干旱气候的过渡带, 水土流失严重, 生态环境脆弱, 是干旱半干旱地区的重要组成部分, 对气候变化敏感, 其 SEI 问题具有一定的复杂性和典型性 (梁捷宁等, 2013; 张强等, 2012; 张强和王胜, 2008), 在该地区开展 SEI 的研究具有重要意义. 本文即从上面三个角度出发, 对此问题展开研究.

1 站点、数据和方法

1.1 站点和数据

观测站点为黄土高原典型代表站——中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地 ($104^{\circ}37'E$, $35^{\circ}35'N$, 1886.7 m), 该站属典型的半干旱区, 周围地势平坦, 无高大建筑与树木. 观测期间属于春季, 尚未耕种, 地表为裸土. 站点布

设有涡动相关系统、辐射四分量观测系统、土壤温湿度观测系统、热流板与梯度塔等. 具体见赵建华等 (2023) 和郝小翠等 (2015).

本文使用的数据范围为: 2010 年 3 月 29 日—同年 5 月 5 日, 扣除 14 天的雨天, 有效数据共 24 天. 夜间取为 21:30—6:00, 取法是先根据 5 cm 土壤温度大于 0 cm 地表土壤温度的时间和土壤热通量小于 0 的时间共同确定出夜间大致范围, 然后扣除热量自热流板铺设深度抵达地表的时间, 最终得到了该时间范围. 数据事先进行了质量控制, 同时采用 30 min 的块平均计算均值与通量, 并对 24 d 的资料进行条件平均以获得其整体的时间变化.

1.2 方法

夜间大气层结稳定, 湍流受到抑制. 数据显示, 夜间感热平均为 $-6.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 潜热平均为 $4.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 相比于向上长波辐射 (平均为 $341.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)、向下长波辐射 (平均为 $291.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) 和土壤热通量 (平均为 $-27.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) 很小 (绝对值), 只有 $1/80 \sim 1/5$, 故夜间湍流通量不是 SEI 产生的主要原因. 此时, 地表能量平衡方程不应写为白天的形式, 即 (均匀平坦裸地)

$$R_n - G - S = H + \lambda E, \quad (1)$$

而应写为主导因子的平衡关系, 如

$$R_n = G + S + H + \lambda E, \quad (2)$$

$$R_{ld} - G - S = R_{lu} + H + \lambda E \quad (3)$$

的形式, 否则就相当于在不同量级上进行计算, 导致方程左右不平衡, 从而出现闭合失真的现象. 本文采用 (2) 式. 式中, $R_n = R_{ld} - R_{lu}$ 是净辐射, R_{ld} 是向下长波辐射, R_{lu} 是向上长波辐射, G 是土壤热通量 (夜间为负值), S 是土壤热储 (空气热储很小可忽视), $H + \lambda E$ 是湍流通量, H 是感热, λE 是潜热. 一般将 $G_0 = G + S$ 定义为地表土壤热通量.

由 (2) 式可知, 对夜间 SEI 的研究, 需要从向下长波辐射、向上长波辐射、土壤热通量、土壤热储和湍流通量等 5 个方面展开, 其中, 向下长波辐射和土壤热通量是外在强迫项, 且是观测项, 不需单独研究, 故本文只从向上长波辐射、土壤热储和湍流通量等 3 个方面展开.

1.2.1 土壤热储的计算

土壤热储一般以下式计算 (孙树臣和邵明安, 2018; 张强等, 2012):

$$S = \frac{C_g \Delta h}{\Delta t} \left(\frac{T_1 - T_0}{2h_1} \Delta h + T_0 \right) \Big|_{t_0}^{t_1}, \quad (4)$$

其中, t_0 和 t_1 是积分的起止时间, $\Delta t = t_1 - t_0$, $\Delta h = 2.2 \text{ cm}$ 是土壤热流板所在的深度. $C_g = 1.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ 是土壤体积热容, T_0 和 T_1 分别是地表和热流板下最近的浅层 (深度为 h_1 , 本文 $h_1 = 5 \text{ cm}$) 所观测的土壤温度.

但已有研究 (赵建华等, 2013) 表明, 由于热量在土壤中的传递是慢过程, 计算表明, 热量传递到 2.2 cm 深度时需要花费时间 42.3 min , 而慢过程又会产生热力分层结构 (图 1), 即同一时刻不同深度处的热量来自于热源不同时刻的释放, 这就使得在同一时刻采用不同深度处的温度来计算热储会产生较大误差, 为此需要将不同深度处的土壤温度的位相

调整为同一位相, 然后再进行计算. 对于夜间, 地表厚度为 h 的土壤块会受到上面 R_{ld} 和下面 G 两个方向的双向加热, 故会产生上下两个热力分层结构 (图 1(a, b)), 每一个分层结构都会产生一个土壤热储, 即产生两个土壤热储 S_1 和 S_2 , 整个的土壤热储 S 是 S_1 与 S_2 之和. 但由于不易从资料中区别 S_1 和 S_2 相对应的土壤温度 T , 故事先将 T 认为是上下两种传输背景各自独立产生的, 然后将相对应的热储求平均得到最终的 S . 单向传输背景产生的热储文献 (赵建华等, 2013) 已经给出 (即原文中传输线上的热储公式 (4)), 双向的可以类比得到, 故夜间 S 的公式可简单得到, 如下:

$$S = \frac{1}{2} \left[\frac{C_g}{\Delta t} \left(\frac{(T'_1 - T'_0)}{2h_1} \Delta h^2 + T'_0 \Delta h \right) \right]_{t_0}^{t_1} + \frac{C_g}{\Delta t} \left(\frac{(T''_0 - T''_1)}{2h_1} \Delta h^2 + T''_1 \Delta h \right) \right]_{t_0}^{t_1}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{C_g \Delta h}{\Delta t} \left(\frac{(T'_1 - T'_0 + T''_0 - T''_1)}{2h_1} \Delta h + T'_0 + T''_1 \right) \right]_{t_0}^{t_1} \quad (5)$$

其中, T'_0 和 T'_1 是地表和浅层 (深度为 h_1) 从上到下的能量传输线 (不同时刻温度廓线上位相相同的点的连线) 上的温度, 即按照热量从上到下的传递方向、根据热量由地表抵达该浅层 h_1 处的时间将 h_1 处的土壤温度前移至与地表同一位相的温度. T''_1 和 T''_0 是浅层 (深度为 h_1) 和地表从下到上的能量传输线上的温度, 即按照热量从下到上的传递方向、根据热量由浅层 h_1 处上传至地表的时间将地表处的土壤温度前移至与 h_1 同一位相的温度.

1.2.2 向上长波辐射位相的延后

如前所述, 地表土壤块吸收到 R_{ld} 和 G 两部分热量后向上辐射能量; 或者从另一个角度, 土壤块向上辐射的能量有来自于前期的 R_{ld} 和 G 的贡献. 土

壤块吸热是慢过程; 而它缓慢吸收到热量后再放射辐射却是快过程, 故土壤块放射的 R_{lu} 的位相要延后于 R_{ld} 和 G . 换言之, R_{ld} 和 G 的位相要超前于 R_{lu} , 若不考虑长波辐射的这种位相延后, 将会产生计算的错乱. 因此需要考虑 R_{lu} 的位相延后效应, 也就是要考虑相对应于 R_{ld} 和 G 这两个外源强迫时的 R_{lu} 的位相. 具体公式如下:

$$R_{lu, \text{new}} = \frac{R_{lu, \text{old}} + R''_{lu}}{2}, \quad (6)$$

式中, $R_{lu, \text{new}}$ 是考虑位相延后时的向上长波辐射, $R_{lu, \text{old}}$ 是原始观测的向上长波辐射, R''_{lu} 与 (5) 式中的 T''_0 对应, 表示从下到上能量传输线在地表时刻的向上长波辐射.

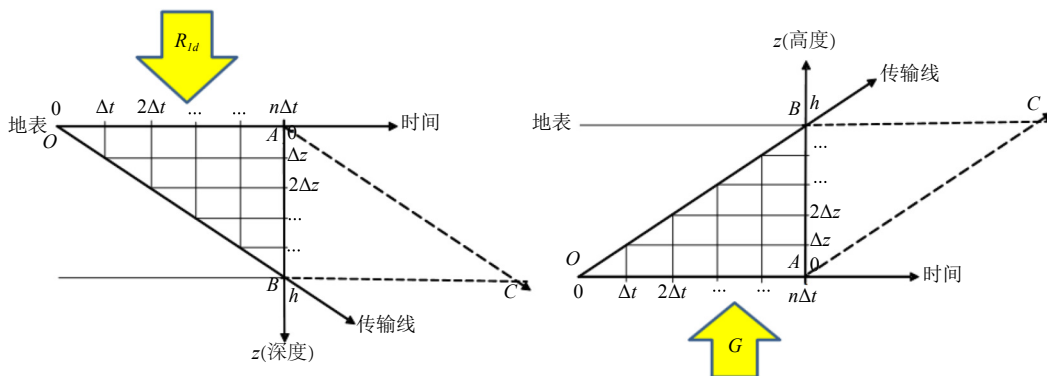


图 1 夜间厚度为 h 的土壤块受到热源强迫时产生的热力分层结构

(a) 净长波辐射强迫 (改绘自赵建华等, 2013); (b) 土壤热通量强迫.

Fig. 1 Thermal stratification structure generated in a soil block with a thickness of h at night by heat source forcing

(a) Net longwave radiation forcing (adapted from Zhao et al., 2013); (b) Soil heat flux forcing.

1.2.3 湍流通量的计算

湍流相干结构在 SEI 研究中具有重要作用,它可以显著提高导致白天 SEI 的涡动相关法的计算精度. 研究认为, 涡动相关法低估湍流通量的根源在于其采用的雷诺平均法的局限性, 即雷诺平均法忽视了湍流的间歇性和相干结构的贡献, 从而造成其在流动分离上的问题(赵建华等, 2023). 为克服此问题, 作者提出了大涡平均法, 该法的基本思想就是在涡动相关法中增加了相干结构的贡献, 其中相干结构的贡献既包括其构成流元的贡献, 又包括相干结构整体在流场中的贡献. 结果显示, 考虑相干结构的贡献后, 涡动相关法计算的感热可提高 24%, 潜热可提高 31%, 白天地表能量闭合度可达到 0.96, 基本闭合. 本文也采用此法, 其通量公式如下:

$$\begin{aligned} \text{Flux} &= \overline{A_{CS} B_{CS}} + [A'_{in} B'_{in}] + \overline{A'_{CS} B'_{CS}} \\ &= \overline{A' B'}_{\tau} + \overline{A'_{CS} B'_{CS}}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 下标 CS 表示以发卡涡为代表的相干结构, in 表示非相干结构的时段, τ 表示一段时间, 本文 $\tau = 30 \text{ min}$. A'_{CS} 是相干结构包含的流元的湍流脉动量, A'_{in} 是非相干结构的脉动, $\overline{A_{CS}}$ 和 $\overline{A_{in}}$ 分别是相干结构和非相干结构的均值, $\overline{[A]}$ 是基于 τ 的平均, 该段时间内一般包含数十个相干结构, B 同. $\overline{A_{CS} B_{CS}} + [A'_{in} B'_{in}] = \overline{A' B'}_{\tau}$, 表示未考虑相干结构的传统方法通量的贡献, 但注意在计算时, 它与传统方法是有一定的差别, 即需要扣除相干结构的流元的脉动. (7) 式的意义是在传统通量的基础上, 新增加了相干结构的贡献.

1.2.4 地表能量闭合指标

本文采用两种方法评价地表能量的闭合程度, 一种是能量平衡闭合率 EBR(Wilson et al., 2002; 郭阳, 2018), 定义为 (2) 式左右两端的商, 见

$$\text{EBR} = \frac{G + S + H + \lambda E}{R_n}, \quad (8)$$

另一种是能量平衡残差 Res (Residual) (岳平等, 2012), 定义为 (2) 式左右两端的差:

$$\text{Res} = R_n - (G + S + H + \lambda E), \quad (9)$$

一般而言, EBR 越接近于 1 或 Res 越接近于 0, 闭合程度越好, 反之越差.

为了反映慢过程、向上长波辐射 R_{lu} 位相和相干结构(即采用大涡平均法计算湍流通量)的作用, 本文另外计算了不考虑慢过程、不考虑 R_{lu} 位相延后和不考虑相干结构的地表能量平衡闭合情况, 共进行了 8 组试验, 各试验标记与描述详见表 1.

1.2.5 系统误差判定法

长波辐射仪器的系统误差对 SEI 有重要影响. 偶然误差一般服从正态分布, 但不是唯一分布, 比如还可服从均匀分布、反正弦分布、三角形分布等(费业泰, 2017), 因此不能从误差分布上判定是否存在系统误差. 我们采用马利科夫准则和 t 检验法两种方法对长波辐射数据是否存在系统误差进行判定(费业泰, 2017; 吴石林和张玘, 2010).

马利科夫准则是对测量列内数据进行判断, 具体方法是以前 K 个残余误差之和与后 $n-K$ 个残余误差之和的差来进行判断, 即判断

$$\Delta = \sum_{i=1}^K v_i - \sum_{i=K+1}^n v_i$$

是否显著不为 0. 若显著不为 0, 则有理由认为测量中存在系统误差. 其中, n 是样本数, K 是 $n/2$ 四舍五入取整得到的值, v 是残余误差.

t 检验法是针对测量列间数据进行判断, 具体如下:

对两组数据 $x_i (i=1, 2, \dots, n_x)$ 和 $y_j (j=1, 2, \dots, n_y)$, 令

$$t = (\bar{x} - \bar{y}) \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{(n_x + n_y) [(n_x - 1) s_x^2 + (n_y - 1) s_y^2]}}, \quad (10)$$

其中, \bar{x} 和 \bar{y} 是均值,

$$s_x^2 = \frac{1}{n_x - 1} \sum_{i=1}^{n_x} (x_i - \bar{x})^2 \text{ 和 } s_y^2 = \frac{1}{n_y - 1} \sum_{j=1}^{n_y} (y_j - \bar{y})^2$$

是样本方差.

t 服从自由度为 $n_x + n_y - 2$ 的 t 分布. 给定显著度 $\alpha = P(|t| > t_\alpha)$, 若 $|t| < t_\alpha$, 则无根据怀疑数据有系统误

表 1 各试验标记

Table 1 Label of each test

试验	Trad	Line	NAR	AR
描述	无慢过程	慢过程	无 R_{lu} 位相延后	R_{lu} 位相延后
试验	NCS	CS	Trad + NAR + NCS	Line + AR + CS
描述	无相干结构	相干结构	无慢过程 + 无 R_{lu} 位相延后 + 无相干结构	慢过程 + R_{lu} 位相延后 + 相干结构

差,反之则可能有系统误差。

具体计算时,我们取相邻两日夜间的资料作为两组数据,分别计算观测期间所有相邻日的 t 值,然后进行判断。

2 结果

2.1 慢过程对 SEI 的影响

由对 24 天资料进行条件平均的结果图 2a(文中所有图均为条件平均结果)可见,夜间 5 cm 深度处

的土壤温度(红线)高于地表土壤温度(黑线),因此热量是从下往上输送.考虑慢过程时,调整后的土壤温度(蓝线)位相前移,使得同时刻的数值比未考虑的值平均偏大约 1.31°C .土壤热通量(图 2b)亦然,考虑慢过程后,土壤热通量位相前移,在 22:30 之前,其绝对值比未调整的结果小,这是由于白天余温的影响;22:30 之后则慢过程的结果偏大约 $0.36\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.由于土壤温度是计算土壤热储的重要变量,土壤热通量又和土壤热储是 SEI 中的重要参量,因此,土壤温度和土壤热通量位相的变化会对 SEI 产生一定影响。

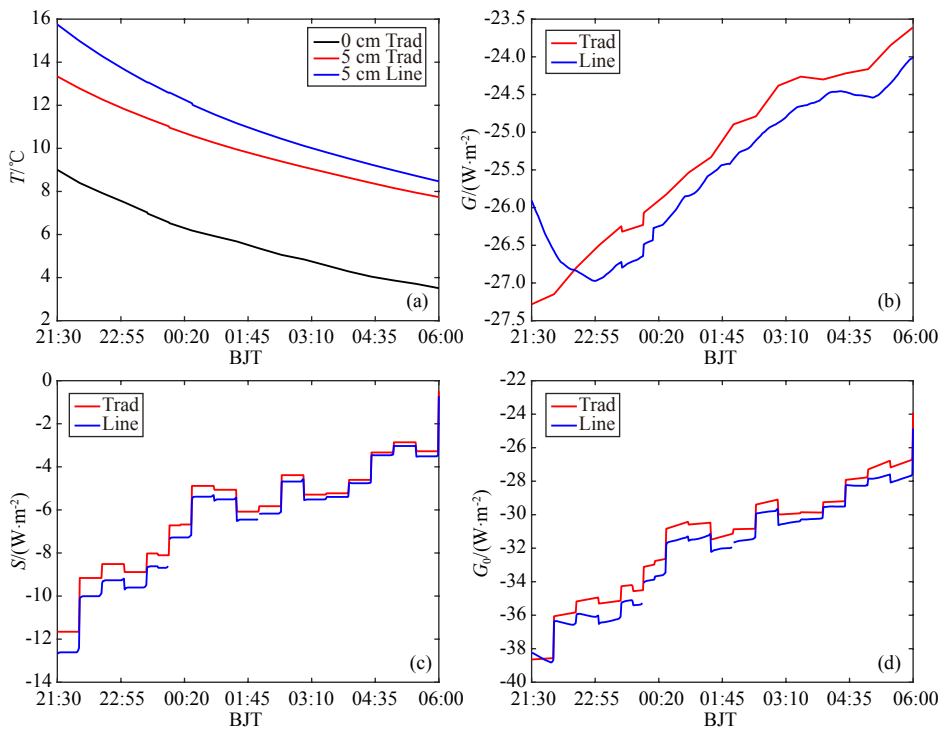


图 2 夜间考虑慢过程前后的土壤温度(a)、土壤热通量(b)、土壤热储(c)与地表土壤热通量(d)的演变

图中 0 cm 表示地表, 5 cm 表示距地表 5 cm 深度。

Fig. 2 Evolutions of soil temperature (a), soil heat flux (b), soil heat storage (c) and surface soil heat flux (d) before and after considering slow processes at night

0 cm represents the surface, 5 cm represents a depth of 5 cm from the surface in figure.

如前所述,土壤热储将会产生变化,如图 2c 所示,不过这种变化较小,计算显示,考虑慢过程后土壤热储绝对值增大了 $0.44\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,占原值的 7%,这意味着夜间慢过程只对土壤热储的细节产生一定影响.图 2d 显示,地表土壤热通量 G_0 除了白天与夜间过渡阶段的开始时段较小外,其他时间有所增大(绝对值),但增幅也较小.计算显示,地表土壤热通量增大了 $0.67\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,占原值的 2%,所以慢过程对地表土壤热通量也有一定影响。

现在看一下慢过程对 SEI 的影响.由图 3(a,b)

可见,不考虑慢过程时,EBR 从晚上到夜间较大,接近凌晨时逐渐减小,平均为 0.69 (表 2 中的 Trad);考虑慢过程后,EBR 演变趋势基本未变,平均为 0.71 (表 2 中的 Line).显然,考虑慢过程后 EBR 的演变未发生大的改变,但均值获得了提高,提高了 0.02 ,约占原 EBR 的 3%.由图 3(c,d)可见,Res 均小于 0,表明存在地表能量的不闭合.注意,Res 小于 0 表示:由于夜间净辐射为负,由土壤热通量、热储和湍流通量供给的能量不足以抵消净辐射的损失,从而出现了能量的亏耗,进而导致 Res 为负,并不是

表 2 各情况下地表能量闭合水平
Table 2 Surface energy closure level

试验	EBR			Res (W·m ⁻²)		
	均值	提高值	比率(%)	均值	降低值	比率(%)
Trad(NAR,NCS)	0.69	—	—	17.8	—	—
Line	0.71	0.02	3	17.0	0.8	4
AR	0.71	0.02	3	15.5	2.3	13
CS	0.69	0.0	0	16.7	1.1	6
Line + AR + CS	0.73	0.04	6	14.8	3	17

注:提高值与降低值是相对于Trad的结果而言,比率是提高值或降低值与Trad的比值.试验名括号中的内容表示兼有相关角度,比如Trad(NAR,NCS)实际代表Trad + NAR + NCS,余同.

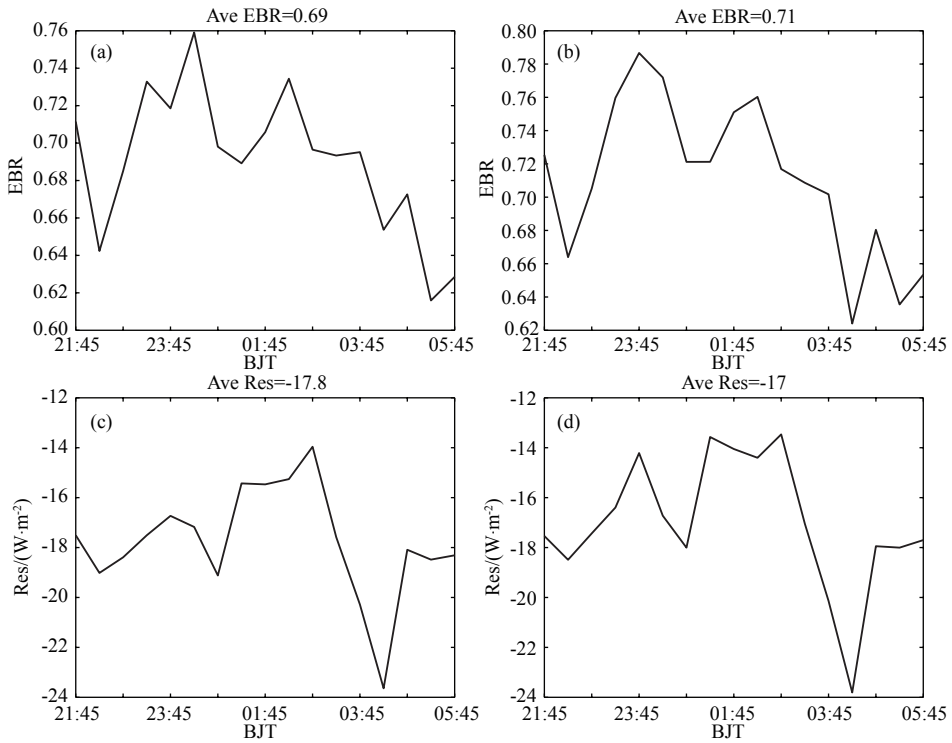


图 3 考虑慢过程前(a, c)、后(b, d)的EBR和Res

Fig. 3 EBR and Res before (a, c) and after (b, d) considering slow processes

所谓的过闭合现象.不考虑慢过程时,|Res|平均为 $17.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (表2);考虑慢过程后,其平均为 $17.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,降低了 $0.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,占原|Res|的4%,但其演变过程类似于未考虑的结果,没有明显变化.所以,慢过程可以提高EBR和降低|Res|,即提高地表能量的闭合水平,不过这种提高较小,相当于光合作用和空气热储项的作用(李宏宇等,2012a;孙树臣和邵明安,2018).

2.2 向上长波辐射位相延后对SEI的影响

图4a是向上长波辐射位相调整前后在夜间的演变,图4b是相应的净辐射的演变.可见,调整后,向上长波辐射和净辐射(绝对值)均有所降低,随着

时间向白天逼近,降低的幅度越来越小,计算显示,两者平均均降低了 $1.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,最大降低了 $1.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,该值虽然较小,但考虑到夜间的能量本来就较小,而且该值和感热与潜热处于同一量级,故该值还是有意义的.

考虑 R_{lu} 位相延后时,EBR演变(图4c)同于未考虑位相延后结果(图3a与表2中的Trad),但其均值有一定提高,提高到0.71(表2中的AR);Res演变(图4d)与图3c的Trad相比有一定变化,其均值降低到 $15.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (绝对值,表2).显然, R_{lu} 的位相对SEI有一定影响,当考虑其位相延后时,平均可以将EBR提高0.02或3%、将|Res|降低 $2.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 或13%.

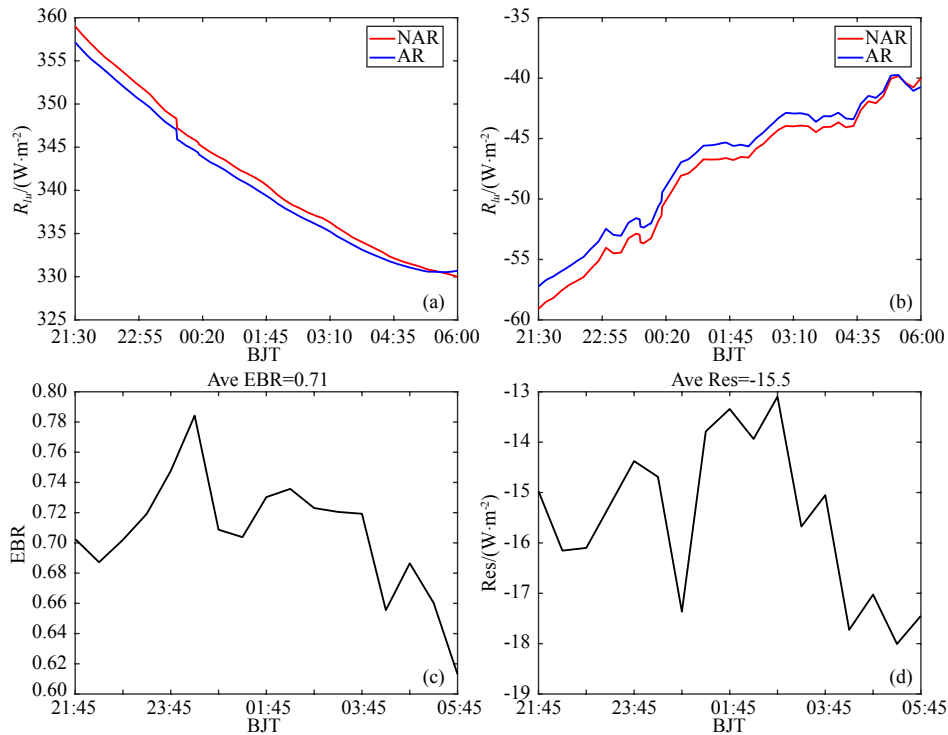


图 4 R_{lu} 位相调整前后其值的演变 (a)、净辐射的演变 (b) 及考虑 R_{lu} 位相延后时的地表能量闭合水平; (c) EBR; (d) Res
Fig. 4 Evolutions of R_{lu} (a) and net radiation (b) before and after phase adjustment of R_{lu} , and surface energy closure level considering R_{lu} phase delay; (c) EBR; (d) Res

2.3 相干结构对 SEI 的影响

夜间考虑相干结构后 (图 5(a, b)), 感热与潜热均有一定程度的增大 (绝对值), 感热平均增大 $1.68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (绝对值), 潜热增大 $0.83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 两者最大增大为 $3.45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (绝对值) 和 $1.60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. 而在白天, 计算显示, 感热与潜热平均增大 $29.51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $15.41 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 最大增大 $46.06 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $23.73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. 显然, 夜间的增量与白天相比很小, 但夜间增量所占比率平均分别为 53% 和 35% (最大分别为 127% 和 193%), 比白天的值 (平均为 26% 和 24%, 最大为 30% 和 30%) 普遍要大的多. 所以, 考虑相干结构可以提高涡动相关法的计算结果, 相干结构对湍流通量的计算是很重要的.

数据显示, 夜间大涡平均法计算的湍流量与传统未考虑该法的结果相比存在以下拟合公式 (样本量 ≥ 778 , 决定系数 ≥ 0.91):

$$H_{CS} = 1.20H_{NCS} - 0.95, \quad (11)$$

$$\lambda E_{CS} = 1.11\lambda E_{NCS} + 0.70, \quad (12)$$

该拟合关系的斜率比白天的要小. 考虑相干结构后, 地表能量闭合情况见图 5(c, d) 和表 2 中的 CS. 显然, EBR 没有显著变化, 这是由于夜间湍流量本身就很小的缘故; 不过 Res 降低了 $1.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 约占 6%. 整体

上, 考虑相干结构后, 可在一定程度上改善闭合水平.

2.4 慢过程、向上长波辐射位相延后和相干结构对 SEI 的共同影响

在既考虑慢过程、又考虑 R_{lu} 位相延后和相干结构的情况下 (图 6 和表 2 的 Line + AR + CS), 相比于三者均不考虑的原始情况 (图 3(a, c) 和表 2 中的 Trad), EBR 又有所提高, 其值为 0.73, 提高了 0.04, 占原有 EBR 的 6%; |Res| 有所降低, 其值为 $14.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 降低了 $3.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 占原有 |Res| 的 17%. 显然, 这两个结果比单独考虑其中任何一项的都更优. 因此, 慢过程、 R_{lu} 位相延后和相干结构的综合效应更能提高夜间地表能量的闭合水平.

3 讨论

显然, 考虑慢过程、 R_{lu} 位相延后和相干结构后, 在夜间可以提高 0.04 或 6% 的 EBR 和降低 $3.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 17% 的 |Res|, 这与白天的空气热储存、光合作用和土壤水分垂直运动热量输送的综合效果接近, 后三者可使 |Res| 减小 $3.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (李宏宇等, 2012b); 也与垂直感热平流的效果接近, 它可使 EBR 提高 0.02 ~ 0.03 (赵建华等, 2023). 因此, 夜间的慢过程、 R_{lu} 位相延后和相干结构具有与上面这些物理过程

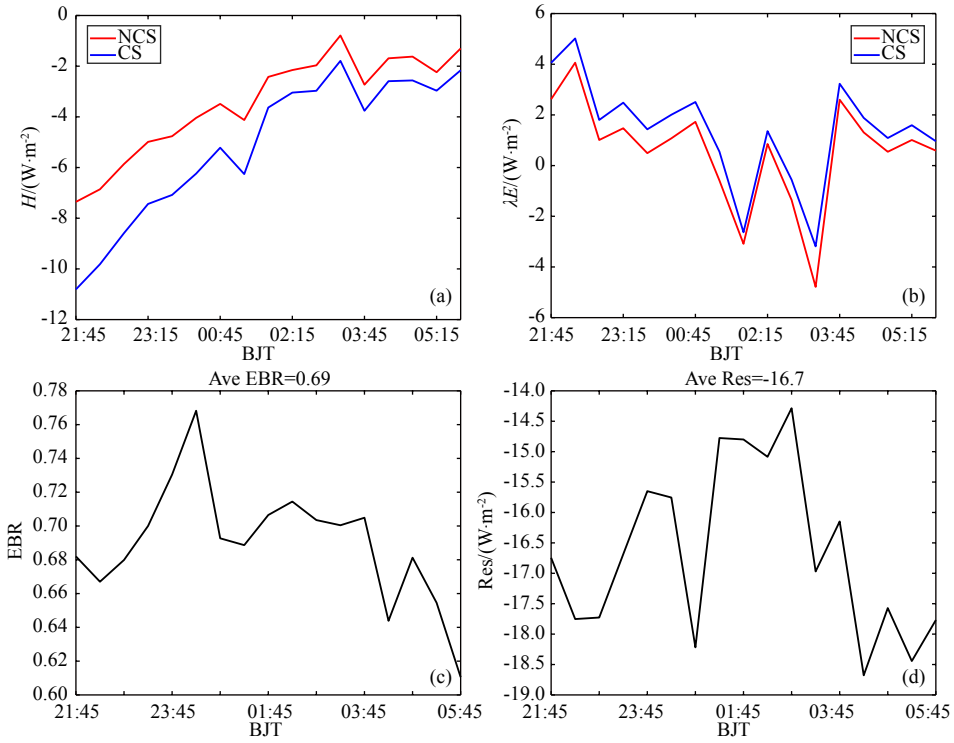


图 5 考虑相干结构后得到的感热 (a) 与潜热 (b) 的演变及其地表能量闭合水平; (c) EBR; (d) Res

Fig. 5 Evolutions of sensible heat (a) and latent heat (b) obtained after considering coherent structure and its surface energy closure levels; (c) EBR; (d) Res

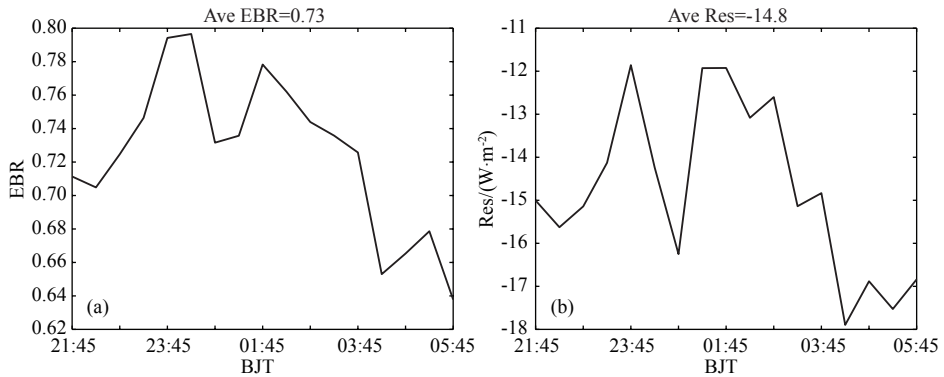


图 6 考虑慢过程、 R_{lu} 位相延后与相干结构时的闭合水平。(a) EBR; (b) Res

Fig. 6 Surface energy closure level considering slow processes, R_{lu} phase delay and coherent structure. (a) EBR; (b) Res

同等的重要性。而且,由于夜间地表能量的主要通量一般比白天低数倍乃至 $1 \sim 2$ 个量级,所以这三个因素对地表能量平衡的意义更大。

不过,夜间仍有 0.27 的不闭合率与 $14.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的残差,距离平衡很远。这表明,上述 3 个因素并不是夜间 SEI 产生的主要原因。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。他考虑这部分能量后,其回归斜率的几何平均值由 0.825 提高到了 0.967,基本闭合。我们下面考虑这部分附加能量,看能否在夜间改善地表能量闭合水平。

Durand (2022) 认为感热与潜热需要增加以下两项:

$$\Delta H = \frac{R}{C_p m_{\text{air}}} H, \quad (13)$$

$$\Delta \lambda E = \frac{RT}{m_v L_v} \lambda E, \quad (14)$$

其中, ΔH 是增加的感热, $\Delta \lambda E$ 是增加的潜热, R 是普适气体常数, C_p 是定压比热, m_{air} 是空气的分子量, T 是绝对气温, m_v 是水汽摩尔质量, L_v 是汽化潜热。Durand (2022) 计算显示, $\Delta H = 0.286H$, $\Delta \lambda E = 0.055\lambda E$ (在 $T=293 \text{ K}$ 的标准气象条件下得出), 综合结果与文

献中通常公布的不平衡水平一样高。

我们在潜热与感热中考虑这两项,得到新的地表能量闭合情况见表3。可见,考虑他的结果后(此处指Line + AR + CS + Durand), Line + AR + CS的EBR增大到0.76,增大了0.03或4%; |Res|由14.8 W·m⁻²

降低到13.4 W·m⁻²,降低了1.4 W·m⁻²或8%,这些结果低于Line + AR + CS的共同效果,但大体上比三者中的单一结果要好。显然,考虑Durand (2022)的结果也可以在夜间改善地表能量闭合水平,但地表能量也未平衡。

表3 考虑Durand (2022)订正结果的地表能量闭合水平

Table 3 Surface energy closure level with considering the results of Durand (2022)

试验	EBR			Res (W·m ⁻²)		
	均值	提高值	比率(%)	均值	降低值	比率(%)
Trad + AR + CS + Durand	0.74	0.01	1	14.1	0.7	4
Line + AR + CS + Durand	0.76	0.03	4	13.4	1.4	8

注:提高值与降低值是相对于表2中的Line + AR + CS的结果而言,比率是提高值或降低值与表2中的Trad的比值。

我们在计算湍流通量时,既采用了相干结构的贡献,又考虑了Durand (2022)的结果,这两者均可以显著提高湍流通量,并在白天可使地表能量接近平衡,但在夜间并未取得较好的闭合水平,这与白天的结果迥然不同;而且,如前所述,湍流通量只占长波辐射和土壤热通量的1/80~1/5,数值很小,这都表明湍流通量并不是导致夜间SEI的主要原因,也就是普遍认为的涡动相关法是白天导致SEI的主因在夜间可能并不成立,夜间SEI可能具有与白天不同的产生机制,有其它原因导致了夜间的SEI。

我们查阅了文献中关于夜间SEI产生的除本文涉及到的其他原因,主要有:(1)与摩擦速度有关,比如Aubinet等(1999)和Blanken等(1997)表明,夜间能量不平衡通常在摩擦速度较小时最大。Wilson等(2002)研究发现,夜间EBR与摩擦速度有一个微弱的线性关系,EBR随摩擦速度增大而增大。Aubinet等(1999)和Blanken等(1997)也表明,在夜间,当摩擦速度较小时,能量不平衡通常是最大的。(2)与仪器精度有关(此处专指辐射计),仪器误差是造成SEI的重要因素(Eder et al., 2015b; Foken et al., 2011a; Jacobs et al., 2008; Leuning et al., 2012; Mauder et al., 2020; Simó et al., 2019; Wilson et al., 2002), Foken (2008)列出净辐射测量不确定度为10%~20%, Kohsiek等(2007)发现夜间EBEX-2000的净辐射的最大误差为10 W·m⁻²,与本文的Res接近。(3)与土壤水分垂直运动有关,李宏宇等(2012a)计算得到夜间土壤水分垂直运动携带的热量输送在-2.0 W·m⁻²附近。(4)与平流有关,Simó等(2019)发现夜间平流值在-6~6 W·m⁻²之间(平均值为-0.3 W·m⁻²,其Res为-10 W·m⁻²), Cuxart等(2016)发现百米尺度的

平流可以解释不平衡部分。(5)与中尺度运动有关,Guo和Zuo(2017)在排除中尺度运动后,发现夜间能量平衡闭合异常值显著减少,EBR增大。

这些原因中,第1个与摩擦速度有关的结论并不尽然,比如Nelli等(2020)发现在夜间,EBR与摩擦速度之间没有显著的相关性。而我们的结论也显示,湍流通量在夜间很小,其对SEI的改善不大。第3个与土壤水分垂直运动有关,但相关结果显示,其值只在-2.0 W·m⁻²附近(李宏宇等, 2012a);而且,夜间Res<0,表明夜间损耗的能量多、收入的能量少,夜间缺乏的是能量来源,而不是能量汇,这与白天显著不同,因此这个结论也不是主要原因。第4个平流原因不确定性较大,文献中与不平衡能量接近的结果主要是在百米尺度的非均匀地表取得的,对于均匀地表,这一项实际上很小;而且Mauder等(2020)也指出,没有证据表明夜间百米尺度是最接近不平衡的尺度,除平流外的其他机制可能对地表能量不闭合起重要作用。第5个中尺度运动,Guo和Zuo(2017)在剔除其后也未能在夜间闭合地表能量,其EBR只提高了5.8%、5.8%和4.8%,只达到60.8%、59.1%和65.7%。

现在剩下辐射计误差。夜间净辐射主要定义为向下与向上的长波辐射之差。Mauder等(2020)指出,净辐射测量的相对不确定性很大,在夜间要大于10%。Blonquist等(2009)指出,夜间长波辐射的测量不如白天准确,辐射计之间的差异在夜间往往比白天更大。Michel等(2008)观察到,具有出厂原始灵敏度系数的两个CNR1净辐射计不确定性在日平均上(~10 W·m⁻²)高达26%。Zhang等(2023)发现,在高相对湿度条件下(夜间相对湿度较高),开路和闭路

气体分析仪观测的潜热被低估。而且,不同制造和设计的仪器之间存在许多不一致之处。Kohsiek 等(2007)比较了不同制造商的几种辐射计的性能,发现出射长波辐射显示高达 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的差异,整个田地的净辐射有几十 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 差异,在灌溉期间上升到 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或更多。Blonquist 等(2009)得出结论: CNR1 和 NR01 通常是最准确的,其次是 CNR2、NR-Lite 和 Q*7.1S; CNR1 和 NR01 在入射长波辐射测量上有大约 5% 的差异;在晚上, CNR2 测得的结果低约 12%~14%(负值较小), NR-Lite 低 14%~16%(负值较小), Q*7.1 低 22%~27%(负值较小)。徐安伦等(2013)发现, CNR1 观测的长波辐射可靠性较低,正确率只有 70.67%~73.49%。Gavilán(2016)发现, NR-Lite 的测量值小于 Q*7.1 的,其低估范围为 8%至 12%,且两传感器测量值之间的差异随风速的增大而增大。Dou 等(2015)发现 PQS1、CNR4、CUV5 等辐射传感器的差异相当大。本文使用的辐射仪器为荷兰 Kipp&Zone 制造的四分量辐射计 CNR4,该仪器说明书中指出,长波辐射的日总量不确定性 <10%(Kipp & Zonen, 2016),每日总净辐射的不确定性为 10%(Goldbach and Kuttler, 2015)。Hobby 等(2013)列出了 CNR4 向上和向下长波辐射的精度均为 10%。陈继伟等(2014)对比了 CNR4、PSP 和 MS102 等仪器,发现三者之间观测的净辐射差异在 10% 以内。Dou 等(2015)证明, CNR4 测量的长波辐射是非线性的。本文数据显示,夜间向上和向下长波辐射的值分别位于 $[282.44, 410.50] \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $[222.97, 390.25] \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,按照 10% 的精度计算,其误差为 $22.30 \sim 41.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,比本文的 Res 绝对值大。而且,Blonquist

等(2009)和 Gavilán(2016)指出,净辐射是最难精确测量的,净辐射和长波辐射测量并没有世界标准。鉴于此,我们有理由认为,长波辐射计的误差可能是夜间 SEI 的主要原因。

我们利用马利科夫准则和 t 检验法对 R_{ld} 和 R_{lu} 是否存在系统误差进行了判定。马利科夫准则结果显示,当以 $\Delta > 10$ 作为 Δ 显著不为 0 的标准时,夜间的 R_{ld} 和 R_{lu} 的 Δ 均显著不为 0; t 检验法结果显示,83% 和 75% 的 R_{ld} 分别通过了 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验, R_{lu} 通过信度检验的比例更高,分别是 86% 和 78%,因此有理由怀疑长波辐射存在系统误差。我们使用的辐射仪器 CNR4 精度相对较高(Mauder et al., 2020),一般被用来定标(陈继伟等, 2014),且没有更高精度的仪器进行对比,另外由于系统误差没有统一的方法获得,故无法得到准确的系统误差。但我们对比了 R_{ld} 和 R_{lu} 与 Line + AR + CS + Durand 的 EBR 和 Res 的关系,见图 7,发现 EBR 和 Res 确实与 R_{ld} 和 R_{lu} 演变一致,它们之间均呈现出显著的正相关关系 ($p=0.02$),尤其是 EBR 和 Res 与 R_{ld} , 演变趋势更显一致,其相关系数 >0.79 ,通过了 $p=0.001$ 的显著性检验。这表明,夜间地表能量不平衡密切依赖于长波辐射,辐射产生的强迫并没有被湍流通量消耗掉,其信号依然残留在 EBR 和 Res 中。由于我们已经在地表能量平衡方程中考虑了长波辐射的位相和与其相关因素的作用,现在 EBR 和 Res 依然与其有关,再加上上述系统误差的检测结果,因此,我们有理由认为本文的不闭合部分是长波辐射计的系统误差所致。

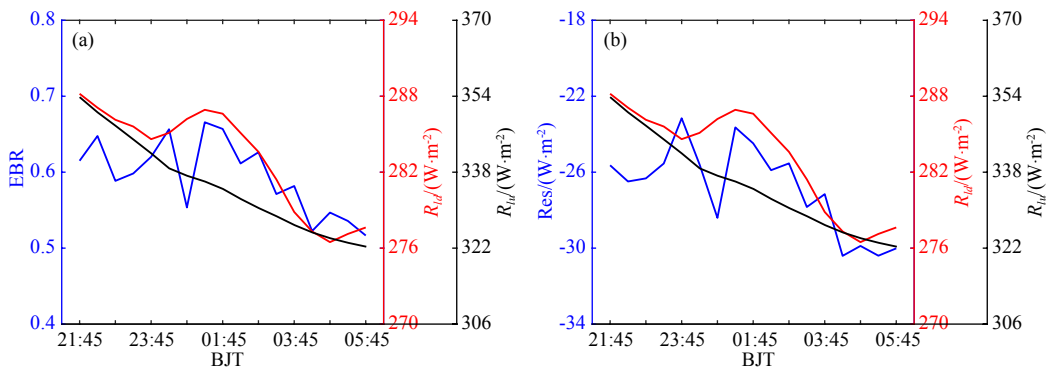


图 7 长波辐射与 EBR (a) 和 Res (b) 的关系

Fig. 7 Comparison of longwave radiation with EBR (a) and Res (b)

4 结论

由于夜间地表能量不平衡问题非常突出,我们

通过在夜间考虑土壤热量传递的慢过程、向上长波辐射位相的延后和湍流相干结构等三方面对此展开了研究,发现考虑这三因素后,夜间地表能量不平

衡问题得到了一定的改善. 主要结论如下:

(1) 考虑慢过程后, 夜间土壤温度增大 $1.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、土壤热通量增大 $0.36\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、土壤热储增大 $0.44\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 地表土壤热通量增大 $0.67\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. 不考虑慢过程时, 夜间 EBR 为 0.69, |Res| 为 $17.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; 考虑后, 两者变为 0.71 和 $17.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, EBR 提高了 0.02 或 3%, |Res| 降低了 $0.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 4%.

(2) 考虑向上长波辐射位相延后, 向上长波辐射和净辐射均有所降低, 平均均降低了 $1.03\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. 考虑向上长波辐射位相延后时, 夜间 EBR 平均为 0.71, 提高了 0.02 或 3%; |Res| 平均为 $15.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 降低了 $2.3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 13%.

(3) 考虑相干结构后, 感热与潜热分别增大 $1.68\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (绝对值) 和 $0.83\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 约占原来的 53% 和 35%, 增幅较大. 其 EBR 没有显著变化, 但 |Res| 为 $16.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 降低了 $1.1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 6%.

(4) 既考虑慢过程, 又考虑向上长波辐射位相延后和相干结构后, 夜间 EBR 为 0.73, 提高了 0.04 或 6%; |Res| 为 $14.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 降低了 $3.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 17%. 这三个因素均可改善夜间地表能量闭合水平, 但其综合效应改善更大.

(5) 考虑 Durand (2022) 提出的湍流通量漏失部分, 可使 EBR 提高 0.03, 达到 0.76, |Res| 降低 $1.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 达到 $13.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 但地表能量也未闭合. 涡动相关法可能不是夜间 SEI 产生的主要原因.

(6) 夜间净辐射体现为长波辐射, 而长波辐射没有世界标准, 误差较大. 检测结果显示其存在系统误差, 而且 EBR 和 Res 与长波辐射均存在显著的正相关关系, 故长波辐射的系统误差可能是夜间 SEI 产生的主要原因. 提高长波辐射计的观测精度可能是克服夜间 SEI 的重要途径.

致谢 诚挚感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见, 使作者更全面的验证了文中的结论, 并使文章更详实.

References

Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. 1999. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Adv. Ecol. Res.*, 30: 113-175.

Babić N, Stiperski I, Marinović I, et al. 2021. Examining relationships between entrainment-driven scalar dissimilarity and surface energy balance underclosure in a semiarid valley. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298-299: 108272, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108272.

Blanken P D, Black T A, Yang P C, et al. 1997. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: Partitioning overstory and

understory components. *J. Geophys. Res. : Atmos.*, 102(D24): 28915-28927.

Blonquist J M, Tanner B D, Bugbee B. 2009. Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10): 1709-1721.

Brötz B, Eigenmann R, Dörnbrack A, et al. 2014. Early-morning flow transition in a valley in low-mountain terrain under clear-sky conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 152(1): 45-63.

Burns S P, Blanken P D, Turnipseed A A, et al. 2015. The effect of warm-season precipitation on the diel cycle of the surface energy balance and carbon dioxide at a Colorado subalpine forest site. *Biogeosciences Discussions*, 12: 8939-9004.

Cao H Q, He Q, Jin L L, et al. 2020. Surface energy balance closure characteristics in the hinterland of Taklimakan desert. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 38(6): 955-964.

Chen J W, Zuo H C, Wang Y, et al. 2014. Parameterization scheme about albedo changing with solar altitude angle over different underlying surface in arid areas of northwest China. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 33(1): 80-88.

Cuxart J, Wrenger B, Martínez-Villagrasa D, et al. 2016. Estimation of the advection effects induced by surface heterogeneities in the surface energy budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(14): 9489-9504.

Dou B C, Wen J G, Li X H, et al. 2015. Sensor intercomparison of distributed surface radiation measurement system. //Proceedings Volume 9808, International Conference on Intelligent Earth Observing & Applications. Guilin, China: SPIE, 416-421, doi: 10.1117/12.2207628.

Durand P. 2022. A possible reconciliation between eddy covariance fluxes and surface energy balance closure. *Atmosphere*, 13(12): 1965, doi: 10.3390/atmos13121965.

Eder F, De 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211-212: 115-127.

Eder F, Schmidt M, Damian T, et al. 2015b. Mesoscale eddies affect near-surface turbulent exchange: evidence from lidar and tower measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(1): 189-206.

Fei Y T. 2017. Error Theory and Data Processing (in Chinese). 7th ed. Beijing: Machinery Industry Press, 28-42.

Foken T. 2008. The energy balance closure problem: An overview. *Ecological Applications*, 18(6): 1351-1367.

Foken T, Aubinet M, Finnigan J J, et al. 2011a. Results of a panel discussion about the energy balance closure correction for trace gases. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4): ES13-ES18.

Foken T, Aubinet M, Finnigan J J, et al. 2011b. Results of a panel discussion about the energy balance closure correction for trace gases. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4): ES13-ES18.

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. *Journal of Geophysical Research*, 115:D16112,

- doi:10.1029/2009JD013278.
- Gao Z M, Liu H P, 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. *Environmental Research Letters*, 12(3): 034025, doi: 10.1088/1748-9326/aa625b.
- Gavilán P. 2016. Comparing net radiation measurements using domeless and domed net radiometers: Impact on ET_o estimations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(12): 04016060, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001097.
- Goldbach A, Kuttler W. 2015. Turbulent heat fluxes above a suburban reservoir: A case study from Germany. *Journal of Hydrometeorology*, 16(1): 244-260.
- Guo J X, Bian L G, Dai Y J. 2008. Multiple time scale evaluation of the energy balance during the maize growing season, and a new reason for energy imbalance. *Sciences in China Series D: Earth Sciences*, 52(1): 108-117.
- Guo Y, Zuo H C. 2017. Impact of mesoscale motions on Monin-Obukhov similarity and surface energy balance over a homogeneous surface. *Advances in Meteorology*, 2017: 6425695, doi: 10.1155/2017/6425695.
- Guo Y. 2018. A study on surface energy balance and effect of mesoscale motions on turbulence over a homogenous bare soil surface in arid area [Ph. D. thesis] (in Chinese). Lanzhou: Lanzhou University.
- 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. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 35(1): 211-219.
- Heusinkveld B G, Jacobs A F G, Holtslag A A M, et al. 2004. Surface energy balance closure in an arid region: Role of soil heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 122(1-2): 21-37.
- Hobby M, Gascoyne M, Marsham J H, et al. 2013. The fennec automatic weather station (AWS) network: Monitoring the Saharan climate system. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(4): 709-724.
- Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Holtslag A A M. 2008. Towards closing the surface energy budget of a mid-latitude grassland. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(1): 125-136.
- Kipp, Zonen. 2016. Instructions manual CNR4 net radiometer. Manual revision 9/71. Available online at www. Campbellsci. Com/cnr4.
- Kohsiek W, Liebenthal C, Foken T, et al. 2007. The energy balance experiment EBEX-2000. Part III: Behaviour and quality of the radiation measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 123(1): 55-75.
- Leuning R, van Gorsel E, Massman W J, et al. 2012. Reflections on the surface energy imbalance problem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156: 65-74.
- Li H Y, Zhang Q, Zhao J H, et al. 2010. Research on characteristic of surface energy imbalance in Loess Plateau in middle part of Gansu and its effect mechanism. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 29(5): 1153-1162.
- Li H Y, Zhang Q, Wang C L, et al. 2012a. The influences of air heat storage, plant photosynthesis and soil water movement on surface energy balance over the Loess Plateau. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 61(15): 159201, doi: 10.7498/aps.61.159201.
- Li H Y, Zhang Q, Zhao J H. 2012b. Causes of surface energy imbalance and its possible solutions. *Arid Zone Research* (in Chinese), 29(2): 222-232.
- Li Y K, Chao J P. 2022. A two-dimensional energy balance climate model on Mars. *Earth Planet. Phys.*, 6(3): 284-293, doi: 10.26464/epp2022026.
- Liang J N, Zhang L, Bao J, et al. 2013. Turbulence influenced by mesoscale motions in the stable boundary layer over complex terrain of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(1): 113-123.
- Majozi N P, 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. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7): 3401-3415.
- Mauder M, Desjardins R L, Pattey E, et al. 2010. An attempt to close the daytime surface energy balance using spatially-averaged flux measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 136(2): 175-191.
- Mauder M, Foken T, Cuxart J. 2020. Surface-energy-balance closure over land: A review. *Boundary-Layer Meteorology*, 177(2): 395-426.
- Michel D, Philipona R, Ruckstuhl C, et al. 2008. Performance and uncertainty of CNR1 net radiometers during a one-year field comparison. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(3): 442-451.
- Nelli N R, Temimi M, Fonseca R M, et al. 2020. Micrometeorological measurements in an arid environment: Diurnal characteristics and surface energy balance closure. *Atmospheric Research*, 234: 104745, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104745.
- Qian M W, Li J. 1996. Intermittent turbulence and temperature burst in the nocturnal surface layer. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 20(2): 250-254.
- Simó G, Cuxart J, Jiménez M A, et al. 2019. Observed atmospheric and surface variability on heterogeneous terrain at the hectometer scale and related advective transports. *J. Geophys. Res. : Atmos.*, 124(16): 9407-9422.
- Sun S C, Shao M A. 2018. Effects of heat storage on surface energy balance in Caragana forest land of northern the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 38(16): 5782-5791.
- Were A, Villagarcía L, Domingo F, et al. 2007. Analysis of effective resistance calculation methods and their effect on modelling evapotranspiration in two different patches of vegetation in semi-arid SE Spain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5): 1529-1542.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4): 223-243.
- Wu J J. 2014. The analysis of energy closure abnormality and the characteristics of energy unbalance on surface layer in arid and semi-arid region [Master's thesis](in Chinese). Lanzhou: Lanzhou University.
- Wu S L, Zhang Q. 2010. Error Analysis and Data Processing (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 72-83.
- Xu A L, Li J, Liu H Z, et al. 2013. Quality control of surface radiation data measured in Dali national climate observatory. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 32(5): 1432-1441.
- Yang Y L. 2016. Analysis of characteristics of surface energy balance on desert and farmland underlying in arid regions of northwest China [Master's thesis](in Chinese). Lanzhou: Lanzhou University.

- Yue P, Zhang Q, Niu S J, et al. 2012. Characters of surface energy balance over a semi-arid grassland and effects of soil heat flux on energy balance closure. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70(1): 136-143.
- Zhang Q, Wang S. 2008. On land surface processes and its experimental study in Chinese Loess Plateau. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 23(2): 167-173.
- Zhang Q, Li H Y, Zhao J H. 2012. Modification of the land surface energy balance relationship by introducing vertical sensible heat advection and soil heat storage over the Loess Plateau. *Science China Earth Sciences*, 55(4): 580-589.
- Zhang W J, 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 330: 109305, doi: 10.1016/j.agrformet.2022.109305.
- Zhao J H, Zhang Q, Wang S, et al. 2013. Effect of soil heat slow transmission process on surface energy balance in semi-arid area. *Chinese Journal of Soil Science* (in Chinese), 44(6): 1321-1331.
- Zhao J H, Zhang L, Wang S, et al. 2023. The role of turbulent coherent structure on surface energy balance on Loess Plateau in winter. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 66(6): 2292-2305, doi: 10.6038/cjg2022Q0184.
- Zhou Y Z, Stühling M, Li X. 2023. Evaluation of energy balance closure adjustment and imbalance prediction methods in the convective boundary layer-A large eddy simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333: 109382, doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109382.
- Zhou T J, Wang B, Yu Y Q, et al. 2018. The FGOALS climate system model as a modeling tool for supporting climate sciences: An overview. *Earth Planet. Phys.*, 2(4): 276-291, doi: 10.26464/epp2018026.
- 特征分析及不平衡原因的探索. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(9): 1103-1111.
- 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 [博士论文]. 兰州: 兰州大学.
- 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. 中国沙漠, 35(1): 211-219.
- 李宏宇, 张强, 赵建华等. 2010. 陇中黄土高原地表能量不平衡特征及其影响机制研究. 高原气象, 29(5): 1153-1162.
- 李宏宇, 张强, 王春玲等. 2012a. 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. 物理学报, 61(15): 159201, doi: 10.7498/aps.61.159201.
- 李宏宇, 张强, 赵建华. 2012b. 论地表能量不平衡的原因及其解决办法. 干旱区研究, 29(2): 222-232.
- 梁捷宁, 张镭, 鲍婧等. 2013. 黄土高原复杂地形受中尺度运动影响的稳定边界层湍流特征. 大气科学, 37(1): 113-123.
- 钱敏伟, 李军. 1996. 夜间近地面稳定边界层湍流间歇与增温. 大气科学, 20(2): 250-254.
- 孙树臣, 邵明安. 2018. 热储通量对黄土高原北部柠条林地地表能量平衡的影响. 生态学报, 38(16): 5782-5791.
- 武建军. 2014. 干旱半干旱区近地层能量闭合异常及不平衡特征分析 [硕士论文]. 兰州: 兰州大学.
- 吴石林, 张玘. 2010. 误差分析与数据处理. 北京: 清华大学出版社, 72-83.
- 徐安伦, 李建, 刘辉志等. 2013. 大理国家气候观象台地面辐射观测数据的质量控制研究. 高原气象, 32(5): 1432-1441.
- 杨彦龙. 2016. 中国西北干旱区荒漠和农田下垫面地表能量平衡特征分析 [硕士论文]. 兰州: 兰州大学.
- 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. 气象学报, 70(1): 136-143.
- 张强, 王胜. 2008. 关于黄土高原陆面过程及其观测试验研究. 地球科学进展, 23(2): 167-173.
- 张强, 李宏宇, 赵建华. 2012. 垂直平流输送和土壤热储存补偿对黄土高原地表能量平衡的修正. 中国科学: 地球科学, 42(1): 42-51.
- 赵建华, 张强, 王胜等. 2013. 半干旱区土壤热量传递的慢过程对地表能量平衡的影响. 土壤通报, 44(6): 1321-1331.
- 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. 地球物理学报, 66(6): 2292-2305, doi: 10.6038/cjg2022Q0184.

(本文编辑 胡素芳)

附中文参考文献

- 曹寰琦, 何清, 金莉莉等. 2020. 塔克拉玛干沙漠腹地地表能量平衡闭合特征. 干旱气象, 38(6): 955-964.
- 陈继伟, 左洪超, 王颖等. 2014. 西北干旱区不同下垫面反照率随太阳高度角变化的参数化方案. 高原气象, 33(1): 80-88.
- 费业泰. 2017. 误差理论与数据处理. 7 版. 北京: 机械工业出版社, 28-42.
- 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 2008. 玉米生育期地表能量平衡的多时间尺度