J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0141
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

温度选择对 Penman-Monteith 潜在蒸散量计算的影响*

戚君燕[1,2]，朱永华[1]，吕海深[1]，吴心渠[2,3,4]，王容[2,3]，冯思琪[2,4,5]，刘元波[2,3,4]**
（1：河海大学水文水资源学院，南京 210098）
（2：中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 211135）
（3：中国科学院大学，北京 100049）
（4：中国科学院大学南京学院，南京 211135）
（5：南京信息工程大学地理科学学院，南京 210044）

摘　要：潜在蒸散量（PET，potential evapotranspiration）是水文循环和生态过程研究的重要参数，目前多采用 Penman-Monteith（P-M）公式计算。然而，通常难以直接测量 PET，导致计算结果缺乏实证检验，其计算结果的不确定性往往不得而知。本研究利用鄱阳湖洲滩湿地的下垫面特性，基于涡动相关系统的潜热通量（LE）观测数据，借鉴 Granger(1989)关于 PET 的概念解析，结合多种精度评价指标，检验了不同的温度输入条件下 P-M 公式的计算结果。综合分析表明：不同方法得到的 PET 计算值与实测数据具有较高一致性，但采用表面温度作为输入的 PET 最接近 LE 观测值，能更好地反映 PET 的时间变化特征。这一研究结果，有助于进一步厘清 PET 对温度的敏感性，提升计算结果的可靠性，具有积极的理论意义和实际参考价值。
关键词：PET 量；Penman-Monteith 公式；表面温度；VPD；涡度相关系统

Impact of temperature selection on Penman-Monteith potential evapotranspiration calculation

QI Junyan[1,4], ZHU Yonghua[1], LYU Haishen[1], WU Xinqu[2,3,4], WANG Rong[3,4], FENG Siqi[3,4,5], LIU Yuanbo[2,3,4]**
(1: *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)
(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)
(3: *University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China*)
(4: *State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China*)
(5:*Nanjing University of Information Science and Technology, School of Geographical Sciences, Nanjing 210044, P.R.China*)

Abstract: Potential evapotranspiration (PET) is a core parameter for hydrological cycle and ecological process research. The Penman-Monteith (P-M) equation is the most widely adopted method for PET estimation at present. Nevertheless, in-situ direct PET measurement is challenging. This limitation causes insufficient empirical validation of modeled PET values and unclear estimation uncertainty. This study adopted latent heat flux data collected via an eddy covariance system in the Poyang Lake floodplain wetland. Following the classic conceptual framework proposed by Granger (1989), this study assessed P-M equation performance under varied temperature input scenarios via multiple accuracy indicators. Results indicate that PET estimates from different temperature inputs achieve good consistency with field observations. Specifically, PET calculated using surface temperature shows the optimal consistency with measured latent heat flux, and better characterizes PET temporal variations. This study clarifies PET sensitivity to temperature, improves the credibility of PET

* 2025-12-01 收稿；2026-04-27 收修改稿；2026-05-11 录用。
国家自然科学基金项目（42230112，51879255）资助.
** 通讯作者；E-mail: ybliu@niglas.ac.cn

estimation, and provides theoretical references and practical implications for relevant watershed and wetland research.

Keywords: Potential evapotranspiration; Penman-Monteith equation; Surface temperature; Saturation vapor pressure deficit; Eddy covariance system

地表蒸散是极其重要的陆面过程[错误!未找到引用源。]，它既是地表水量平衡的关键要素，又是地表能量平衡的核心环节，同时与植物的生理活动以及生物量密切相关[错误!未找到引用源。]，是诸多领域研究的重点对象[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。基于蒸散发过程的复杂性和重要性，科学准确地量化蒸散发成为众多学科的核心研究任务。在此背景下，潜在蒸散量（PET，potential evapotranspiration）作为蒸散发研究的重要理论基础，不仅为深入理解蒸散发机制提供了概念框架，更为实际蒸散发的间接估算提供了有效途径，如广泛应用的蒸发互补方法[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。PET 反映的是充分供水条件下地表通过蒸发和植物蒸腾向大气输送水分的最大能力[错误!未找到引用源。]，因此在气象、水文、农业、生态等相关领域得到了广泛的应用[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。在全球气候变化背景下，准确估算 PET，对于正确把握地表水水资源潜力、合理优化水资源配置以及应对高温干旱等极端气候事件，具有重要的现实意义[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。

PET 最早由英国学者 Thornthwaite 提出，定义为大气对水的需求，即在水分不受限制的条件下土壤蒸发与植物蒸腾的总和[错误!未找到引用源。]。此后，学者们从不同视角对其内涵进行了进一步阐释和扩展[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]（图 1）。例如，Penman 强调了无水分限制条件下特定作物的蒸腾速率[错误!未找到引用源。]，Van Bavel 将其推广到所有无水分限制表面，即任何地表的最大蒸发能力[错误!未找到引用源。]，Mortan 则认为无水分限制条件下 PET 仅由气象因子控制，这些不同定义间的差异主要在于下垫面类型（如开放水体与作物）及空间尺度（点位与区域）的考量上。基于此，Granger（1989）对 PET 的概念混用现象进行了系统性梳理，明确指出各个 PET 概念的区别在于对公式中饱和水汽压差（VPD，vapor pressure deficit）的不同计算方式[错误!未找到引用源。]。简而言之，PET 表示在气象和地表条件稳定、水分不受限制的前提下，从饱和地表（植被、裸土或水体）蒸发的理论上限，反映环境影响的最大蒸散速率[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。

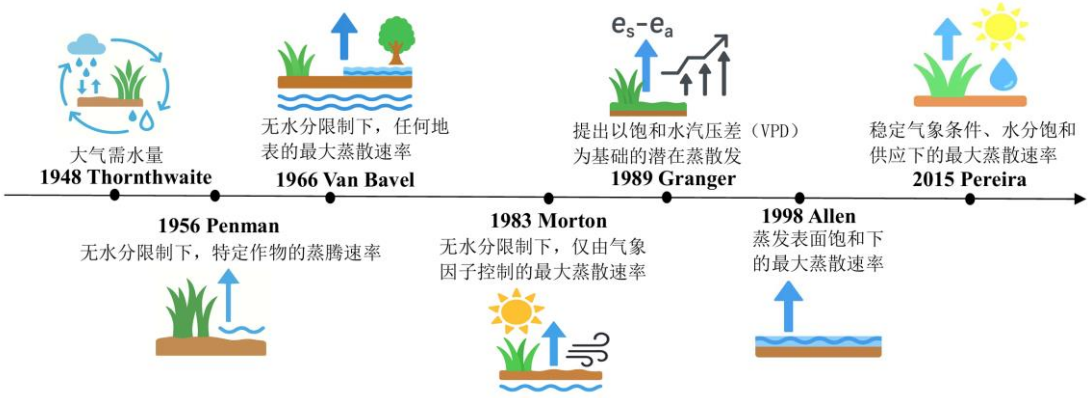

图 1 1948 年以来 PET 定义演进的时间线。反映了作物需水、气象控制、VPD 驱动等多种定义视角

Fig.1 A diagram for major conceptual development in potential PET since 1948, encompassing different perspectives such as crop water requirement, meteorological control, and vapor pressure deficit-based formulations

目前估算 PET 的方法多种多样，主要有经验公式法（如 Thornthwaite 公式、Hargreaves 公式）和物理模型法（如 P-M 公式[错误!未找到引用源。]）。其中，P-M 公式因其理论基础扎实、适用范围广，是计算 PET 的标准方法。尽管 P-M 公式在理论上较为完善，但其计算过程涉及参数较多[错误!未找到引用源。]，由此产生了多种派生形式，可能会导致不同的计算结果[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。例如，采用蒸发表面温度或气温来计算饱和水气压，

可能会导致显著的结果差异[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。另一方面，由于 PET 通常难以直接测量而缺乏实证检验，其计算结果的可靠性往往不得而知，成为长期困扰蒸散研究的关键问题之一[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。

本文利用鄱阳湖洲滩湿地的湿润下垫面特性，基于涡动相关系统的潜热通量（LE）观测数据，借鉴 Granger 关于 PET 的概念解析，结合多种精度评价指标，检验了不同温度输入条件下基于 P-M 公式的 PET 计算结果，有助于进一步厘清 PET 的基本概念，提升计算结果的可靠性，具有积极的理论意义和实践参考价值。

1 研究区域及数据

鄱阳湖位于中国江西省北部，地处长江中下游南岸，地理坐标为东经 115°47′至 116°45′，北纬 28°22′至 29°45′[错误!未找到引用源。]。国家级水文站星子站位于附近（图 2）。在鄱阳湖洲滩湿地上，安置了 10 米高的通量观测铁塔。在观测铁塔上安装了一套涡度相关（EC，Eddy Covariance）系统。该系统基于湍流统计理论，目前被认为是地表通量观测的最可靠手段[2]。涡度相关系统所观测到的潜热通量，并非仅代表塔基位置处的单点通量，而是代表在一定观测高度下、由上风向一定范围内下垫面共同贡献形成的动态源区通量。该源区范围受观测高度、风速风向以及大气稳定度等因素共同影响。

鄱阳湖水位通常在春季上升，夏季达到峰值。在 2021 年的一整年观测中，站点位置经历了从湿地覆盖到水体覆盖再到湿地覆盖的变化[错误!未找到引用源。]。从 5 月 15 日开始观测站点进入到淹没期，10 月 20 日湖泊水位下降至 14.6 米以下，洲滩出露而成为湿地[错误!未找到引用源。]。考虑到 PET 为充分供水条件下的蒸散量，而淹没期的 LE 符合其定义条件，因此将淹没期（2021 年 05 月 15 日至 2021 年 10 月 20 日）实测的 LE 值近似为 PET [错误!未找到引用源。]。

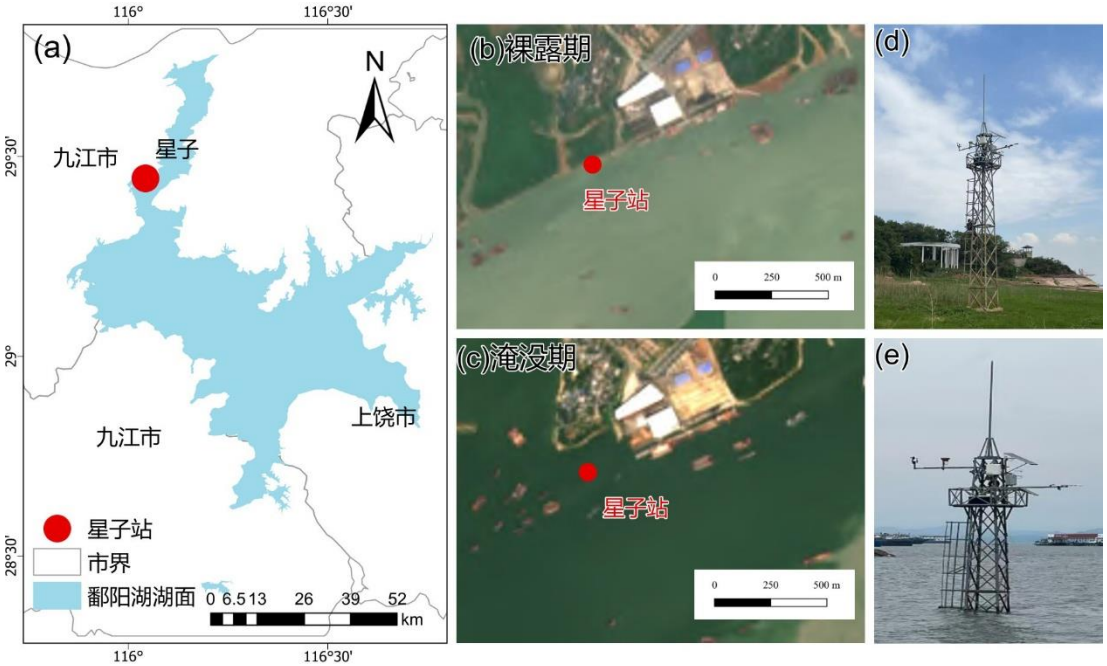

图 2 鄱阳湖区及观测站环境示意图。鄱阳湖洲滩湿地的位置概况（a），裸露期（b）和淹没期（c）的遥感影像，裸露期（d）和淹没期（e）的实地照片

Fig.2 Observation site in Poyang Lake, China. (a) Xingzi Station in Poyang Lake; (b) and (c) satellite capture of the areas surrounding observation site for exposed and inundated periods, respectively; (d) and (e) field photos for the two periods, respectively

在通量观测铁塔上，安装了一套涡度相关（EC，Eddy Covariance）系统，包括三维超声风速仪（CSAT-3，用于测量三维风速和风向）、CR3000 数据记录仪（以 10Hz 的频率记录观测数据，包括三维风速、声速温度、H_2O 浓度等）、红外气体分析仪（EC150，美国坎贝尔公司，用于测量 H_2O 和 CO_2浓度）和表面温度传感器（Model Sl-111，Apogee，美国，用于测量表面温度，为感热通量和 LE 计算提供输入）。其他气象变量由微气候系统（HMP155A，Vaisala，Inc.，芬兰）测量，包括空气温度、相对湿度和降水量等。这些观测结果每 30 分钟由 CR3000 数据记录仪记录。大气湍流是下垫面与大气间进行物质交换和能量流动的主要方式，EC 系统可记录其过程中物质和能量流通的量[错误!未找到引用源.]，通过测量近地表的湍流运动，可直接获取水汽和热量通量数据。EC 技术可以直接测量感热通量和 LE，目前已成为世界范围的标准方法[错误!未找到引用源.]。计算所用数据时间跨度为 2021 整年，时间分辨率为 30 分钟。

为确保数据的准确性，采用了 FLUXNET 标准的数据处理方法，包括野点剔除、坐标旋转和 WPL 修正等[错误!未找到引用源.]。EddyPro 软件（https://www.licor.com/env/support/EddyPro/software.html）用于处理 10Hz 的原始数据。10Hz 原始数据将被检测峰值和噪声，并且自动增益控制（AGC）值小于 70（即 LI-COR 7500 传感器输出）将被视为异常值并被拒绝。通过双旋转法每 30 分钟进行一次坐标校正[错误!未找到引用源.]，通过频率校正法解决高频衰减问题。WPL 方法用于密度校正，以减少空气密度波动的影响[错误!未找到引用源.]。剔除了低湍流（摩擦速度<0.1m/s）[错误!未找到引用源.]、降雨期间和夜间（Rn＜0）的数据。

为进一步评价涡度相关观测数据的质量，本文对淹没期有效观测样本的能量平衡闭合度进行了检验。通常采用可利用能量 (R_n-G)与湍流通量之和 (H+LE)的一致性来评价 EC 观测结果的可靠性，其中能量平衡比（Energy Balance Ratio, EBR）定义为：

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

其中，R_n 为净辐射，G 为表面热通量，H 为感热通量，LE 为潜热通量。计算结果表明，淹没期样本的能量闭合度为 75%，说明湍流通量能够解释约 75%的可利用能量，整体上具有较好的能量闭合水平[错误!未找到引用源.]。考虑到涡度相关观测中普遍存在一定程度的能量不闭合现象，且本研究区在淹没期以下垫面水体覆盖为主，能量分配过程较为复杂，因此该闭合水平处于通量观测研究中较为常见且可接受的范围，可满足后续将淹没期实测 LE 作为 PET 观测参照进行分析的需要。

此外，还进行了通量足迹分析。利用 EddyPro 软件能直接导出通量足迹数据，可过滤来自湖区陆地方向区域的数据源[错误!未找到引用源.]。如图 3(a)所示，在水面覆盖期间，西北风占主导地位；能量通量也主要来自西北（图 3(b)）。通过足迹分析，删除了来自 225°至 20°之间陆地的通量数据和风速数据，以及来自 22.5°至 67.5°之间陆地的少量数据，以确保通量来自湖面。

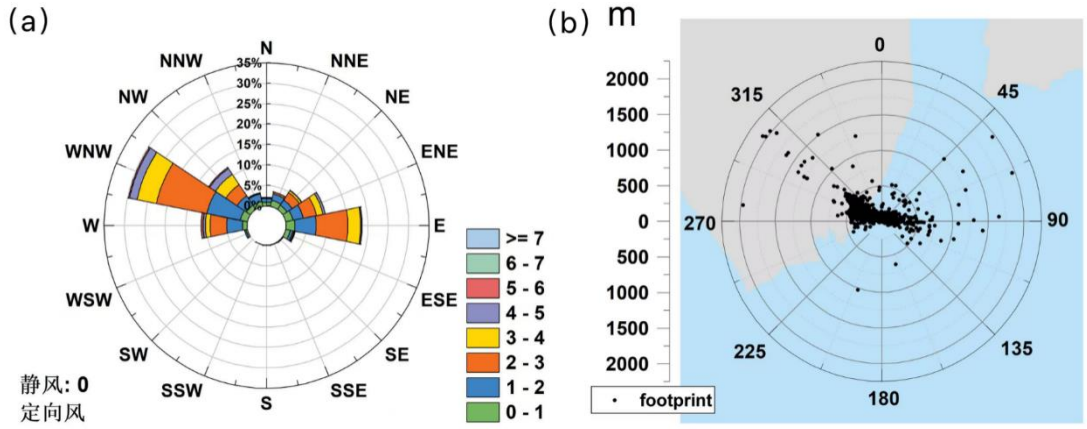

图 3 星子站淹没期通量足迹。(a)风速和风向的玫瑰图；(b)涡动协方差系统在淹没期的通量足迹分布图

Fig.3 Flux footprint during the inundation period at the Xingzi station. (a)Wind rose diagram showing wind speed and direction frequency; (b)Flux footprint distribution measured by the eddy covariance system during the inundation period

此外，由于仪器故障、电力中断等因素，观测数据存在不同程度的缺失，本研究使用查找表法（LUT）和平均日变化曲线法（MDC）进行插补。LUT 法即基于相似的气象条件，来寻找缺失值的代替值；MDC 则适用于气象数据完全缺失的情况，并使用一天中同一时间的历史平均值进行插补。当缺少通量数据时，依据辐射、气温和水汽压差等气象数据与通量之间的关系，建立查找表。当仅有辐射数据而缺少气温和水汽压差数据时，使用 LUT，并根据移动窗口为 7 天的辐射数据来获得相似气象条件下的数值。当辐射数据也缺失时，使用 MDC 进行插补。

插补后，最终用于分析的半小时有效数据点数量为 7632 个，相较于插补之前的 4425 条数据，显著提高了数据的可用性和完整性。

2 研究方法

2.1 PET 计算方法

P-M 公式是估算 PET 的经典方法。此方法基于能量平衡和空气动力学原理，具有完备的理论依据，具有较高的精度和适用性，能够适应多种气候条件和地表类型[错误!未找到引用源.]，其物理意义在于通过能量平衡方程和空气动力学方程，描述地表水分蒸发和植物蒸腾的物理机制。公式的核心思想是将蒸散过程分解为辐射项和空气动力学项，分别反映能量驱动和大气湍流对蒸散的影响。P-M 公式的基本形式如下[错误!未找到引用源.]：

$$PET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \tag{2}$$

其中，R_n 为净辐射，G为土壤热通量，Δ 为饱和水汽压－温度关系曲线斜率，ρ_a 为空气密度，$\mathrm{C_p}$ 为空气比热容，e_s 为饱和水汽压，e_a 为实际水汽压，r_a 为空气动力学阻抗，r_s 为表面阻抗，γ 为干湿常数。

在计算 PET 时，通常假设一个水分充分供应的下垫面。在此假设下（即假想蒸发面始终处于湿面或饱和状态），各个参数的输入数据直接或间接来自通量塔的涡动数据。在淹没期间，站点附近下垫面为自由水面水分供应不受限制且无明显植被覆盖（图 2e），因此本文在全部 PET 方案计算中统一取表面阻抗 $r_s = 0\ \mathrm{s\ m^{-1}}$，公式简化为$PET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma}$。本文所用气温 T_a 为 10 m 高通量塔上的 30 min 平均观测值；蒸发表面温度 T_s则由表面温度传感器观测获得。其中，各个参数的计算参考[错误!未找到引用源.]，公式如下：

$$\Delta = \frac{4098\ [0.6108 exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)]}{(T+237.3)^2} \tag{3}$$

$$e_s = 0.6108 exp\frac{17.27T}{T+237.3} \tag{4}$$

$$\gamma = \frac{\mathrm{C}p\ P}{\varepsilon\ \lambda} = 0.00065P \tag{5}$$

Granger 总结梳理了早期使用的 PET 不同定义及相应的计算公式[错误!未找到引用源.]，其核心在于如何计算饱和水气压差（VPD）：采用蒸发表面温度还是气温，来计算实际水汽压与饱和水汽压值。在此基础上，结合饱和水汽压－温度关系曲线斜率 Δ，本文进一步拓展梳理了 12 种可能的不同方式（图 4）。P-M 公式中 Δ 及 VPD 是对温度输入较为敏感的两个核心参数。其中，Δ 分别基于气温（T_a）和蒸发表面温度（T_s）计算，形成两种方案。而 VPD 本质上反映了水汽浓度梯度，本文跳出传统的饱和水汽压减实际水汽压的单一计算方式，扩展定义为 6 种水汽压组合方式（图 4）。需要明确的是，在构建不同温度组合的 PET 方案时，本文中的大气实际水汽压（$\mathrm{e_{AirAct}}$）和表面实际水汽压（$\mathrm{e_{SurAct}}$），均是通过实测的大气相对湿度（RH）

乘以对应温度下的饱和水汽压计算得到的，即

$$e_{AirAct} = RH \times e_{AirSat}(T_a) \quad (6)$$

$$e_{SurAct} = RH \times e_{SurSat}(T_s) \quad (7)$$

通常情况下，基于日均值（Daily mean）气象数据计算实际水汽压时，由于饱和水汽压与温度之间存在非线性关系，直接采用日均温和日均相对湿度计算可能会导致对实际水汽压的低估。然而，本研究采用的是涡度相关系统半小时（30 分钟）分辨率的高频观测数据。在如此短的时间步长内，气温和相对湿度的波动幅度极小。依据微气象学理论[错误!未找到引用源。]，直接使用该短时段的平均温度和平均相对湿度计算实际水汽压，可以有效避免因非线性关系带来的低估偏差。

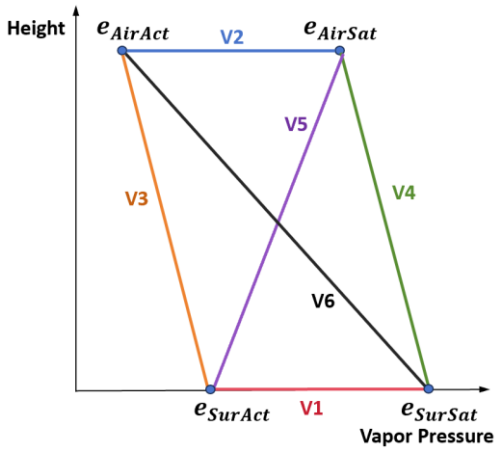

图 4 PET 估算中不同温度组合形成的蒸汽压梯度图（改编自 Granger，1989）。图中展示了 6 种水汽浓度梯度的组合方式。其中，e_{AirAct} 和 e_{AirSat} 是使用气温 T_a 计算的实际水汽压和饱和水汽压，e_{SurAct} 和 e_{SurSat} 是使用蒸发表面温度 T_s 计算的实际水汽压和饱和水汽压

Fig.4 Vapor pressure gradient diagram for potential evapotranspiration estimation under different temperature combinations (adapted from Granger, 1989). The figure illustrates six distinct ways to combine vapor concentration gradients. Here, e_{AirAct} and e_{AirSat} denote the actual and saturation vapor pressures computed using air temperature (T_a), whereas e_{SurAct} and e_{SurSat} denote the actual and saturation vapor pressures computed using the evaporative surface temperature (T_s)

在上述六种水汽压组合方式中，V3（$e_{AirAct} - e_{SurAct}$）与 V4（$e_{AirSat} - e_{SurSat}$）从传统 VPD 的定义角度来看，并不直接符合经典 VPD 用于刻画空气与蒸发界面之间水汽扩散驱动力的物理含义。传统 VPD 强调饱和状态与实际状态之间的差异，其物理意义在于描述大气水汽压不足对蒸发过程的促进作用。

然而，本文在构建水汽压组合方式时，并非局限于传统 VPD 的定义，而是从蒸发界面与近地大气之间水汽浓度梯度的完整理论表达出发，对不同热力状态假设下可能形成的水汽压梯度形式进行系统梳理。V3 表示空气与蒸发界面在实际水汽状态下的梯度关系，V4 表示空气与蒸发界面在饱和水汽状态下的梯度关系。这两种情景并非用于直接表征传统意义上的蒸发驱动力，而是用于刻画界面水汽浓度在不同热力状态假设下的分布形式。

通过将其纳入统一框架，并与符合传统 VPD 定义的组合方式进行对比，可以系统评估不同水汽梯度刻画方式对 P-M 公式计算结果的影响，从而揭示 P-M 模型对蒸发界面物理状态假设的响应特征。

具体采用的温度组合类型见下表 1。

需要特别指出的是，在上述 12 种组合方式中，PETs1 方案在物理意义上具有特殊的内涵。在理想的充分供水条件下，紧贴蒸发物理界面（$z = 0$）的极薄空气层理论上应为完全饱和，此时绝对界面的实际水

汽压等于饱和水汽压，VPD 趋近于 0。然而，本研究在 PETs1 方案中所构建的表面实际水汽压（$\mathrm{e_{SurAct}}$）并非刻画绝对物理界面的内部状态，而是定义为一个理论重构变量，其计算方式设定为：$\mathrm{e_{SurAct}} = \mathrm{RH} \times \mathrm{e_{SurSat}(T_s)}$。因此，PETs1 的 VPD 数学表达为：$\mathrm{VPD} = \mathrm{e_{SurSat}(T_s)} \times (1 - \mathrm{RH})$。由于大气实测相对湿度（RH）通常小于 100%，该方案下的有效 VPD 并不为 0。

表 1 不同 PET 估算方法中 VPD 及 Δ 的温度来源组合

Table.1 Temperature sources used for VPD and Δ in different PET estimation methods

PET 计算值	Δ 计算使用的温度	VPD 计算方式
PET_{a1}	T_a	$e_{SurSat} - e_{SurAct}$
PET_{a2}		$e_{AirSat} - e_{AirAct}$
PET_{a3}		$e_{AirAct} - e_{SurAct}$
PET_{a4}		$e_{AirSat} - e_{SurSat}$
PET_{a5}		$e_{AirSat} - e_{SurAct}$
PET_{a6}		$e_{SurSat} - e_{AirAct}$
PET_{s1}	T_s	$e_{SurSat} - e_{SurAct}$
PET_{s2}		$e_{AirSat} - e_{AirAct}$
PET_{s3}		$e_{AirAct} - e_{SurAct}$
PET_{s4}		$e_{AirSat} - e_{SurSat}$
PET_{s5}		$e_{AirSat} - e_{SurAct}$
PET_{s6}		$e_{SurSat} - e_{AirAct}$

T_s表示蒸发表面温度，T_a表示气温；e_{AirAct} 和 e_{AirSat} 是使用气温T_a计算的实际水汽压和饱和水汽压，e_{SurAct} 和 e_{SurSat} 是使用蒸发表面温度T_s计算的实际水汽压和饱和水汽压。

引入这一设定的实质是将刻画大气蒸发需求的热力学参考系从高空下移到了蒸发界面。其物理假定在于：当近地层空气团与饱和下垫面发生剧烈的湍流热交换时，其热力状态趋于地表温度（$\mathrm{T_s}$），这决定了界面向外输送水汽的最大理论容量上限；但与此同时，该空气团的实际水分状态仍受到大尺度大气湍流混合的强烈约束，无法瞬间达到完全饱和。基于此，PETs1 方案将传统 P-M 公式中由纯空气湿度差驱动的空气动力学项，修正为了界面温度与大气湿度共同驱动。这种处理方式更真实地刻画了饱和下垫面与大气之间的有效水汽输送梯度，从物理机制层面解释了为何 PETs1 在本研究特定场景下表现最优。

2.2 精度评价指标

为了评估不同的 PET 计算值与实测值的接近程度，本研究采用均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和相关系数（R^2）作为评价指标。RMSE 能够有效地反映预测误差的总体情况；MAE 是预测值与实际值之间绝对差异的平均值；R^2 用于衡量估算值与实测值之间的线性相关性。各个评价指标的计算式如下[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]：

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(PET_i - LE_i)^2} \tag{8}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|PET_i - LE_i| \tag{9}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(PET_i - \overline{PET})(LE_i - \overline{LE})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(PET_i - \overline{PET})^2 \sum_{i=1}^{n}(LE_i - \overline{LE})^2}} \right)^2 \quad (10)$$

其中，PET_i 和 LE_i 分别是第 i 个计算值和实测值，$\overline{PET}$ 和 $\overline{LE}$ 分别为估算值和实测值的平均值，n 为样本数量。

为进一步评估不同的 PET 计算值相对于实测 LE 值的高估/低估程度，采用偏差百分比（PBIAS）作为补充评价指标。PBIAS 反映估算值相对于实测值的系统性偏差，能够直观判断计算结果是否存在整体高估或低估现象，值越接近 0 表示估算与实测越接近，正值代表低估，负值代表高估，计算公式如下所示[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]：

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(LE_i - PET_i)}{\sum_{i=1}^{n} LE_i} \times 100\% \quad (11)$$

其中，PET_i 和 LE_i 分别是第 i 个计算值和实测值，$\overline{LE}$ 为实测值的平均值，n 为样本数量。

3 结果与讨论

3.1 PET 计算值时间尺度分析

评估 PET 计算值是否接近实际情况，应考虑其动态一致性，特别是在季节性强、水文过程剧烈变化的湿地或湖区环境中[错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。]。本研究从淹没期整体时间尺度出发，分析不同 PET 是否合理反映实际 PET 的时间变化特征，将估算结果与实测 LE 进行对比来实现（图 5）。同时，为全面评估数值精度和波动特征，对各 PET 计算值进行多时间尺度误差分析：分别计算了半小时、日、月和整个淹没期四个尺度下的标准差与偏差百分比（PBIAS），并绘制 Taylor 图与偏差热图（图 6 和图 7）。

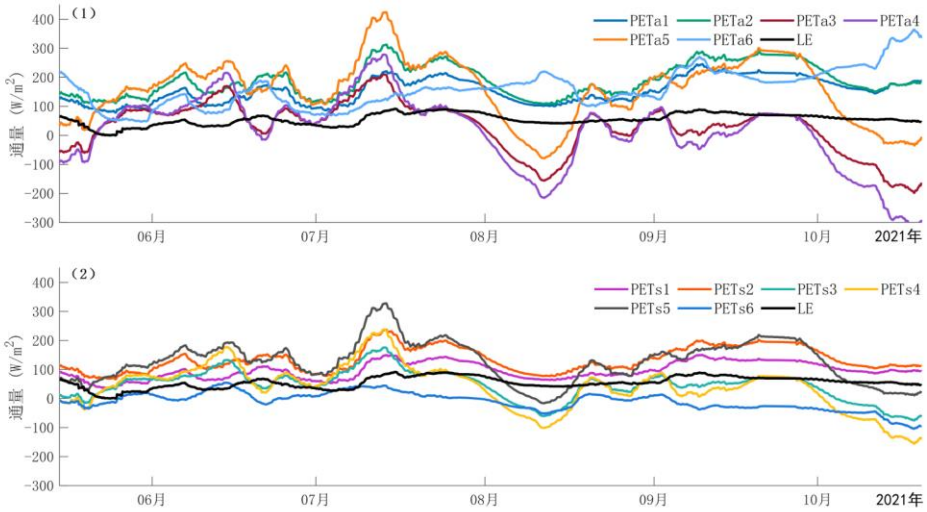

图 5 2021 年淹没期整体 PET 计算值与实测 LE 时间序列图。图中细线为各方案的半小时分辨率 PET 原始值，粗线为对应的趋势线。以 Δ 的计算方法进行分组绘制：（1）为基于气温 T_a 计算 Δ 的六种 PET 值；（2）为基于表面温度 T_s 计算 Δ 的六种 PET 值

Fig.5 Time series of PET estimates and observed latent heat flux (LE) during the 2021 inundation period.In each panel, the thin lines show the half-hourly PET values from each scheme and the thick lines show the corresponding trend lines. The subplots are grouped by the method used to compute Δ: (1) six PET schemes with Δ calculated from air temperature (T_a); (2) six PET schemes with Δ calculated from surface temperature (T_s)

如图 5 所示，12 条 PET 曲线与观测 LE 在时间序列上总体呈现相似变化，均表现出 7 月中旬和 9 月

下旬的通量高峰特征。通过进一步比较分析发现，以气温 T_a 为 Δ 的温度输入变量的 PET 值（图 5(1)）存在明显的系统性偏差。具体而言， PET_{a1}、PET_{a2} 和 PET_{a6} 整体高估 LE，日峰值平均超出观测 80-120W/m²； PET_{a3} 和 PET_{a4} 虽在高峰处与 LE 较为接近，但在多个时间点（8 月中旬和 10 月中旬）出现严重低估，偏差可达-70W/m²以上；PET_{a5}则表现为高峰处过度高估，而在低谷处过度低估。

相比之下，以表面温度 T_s 驱动的 PET 值（图 5(2)）在振幅和相位上均与 LE 保持更紧密的一致性。其中 PET_{s1} 表现最优，在 7-9 月高峰期的日最大偏差多控制在±30W/m²以内；PET_{s2} 略高估，但平均偏差显著小于 40W/m²；， PET_{s3}、PET_{s4}、PET_{s5} 和 PET_{s6} 整体波动范围均较大，说明混合温度下计算出的 VPD 值对 PET 估算值会造成较大误差。上述差异表明，以 T_s 作为输入变量计算出的 PET 值，能够更准确再现淹没湿地条件下 LE 的时间演变规律，更接近实际情况下的 PET 值。

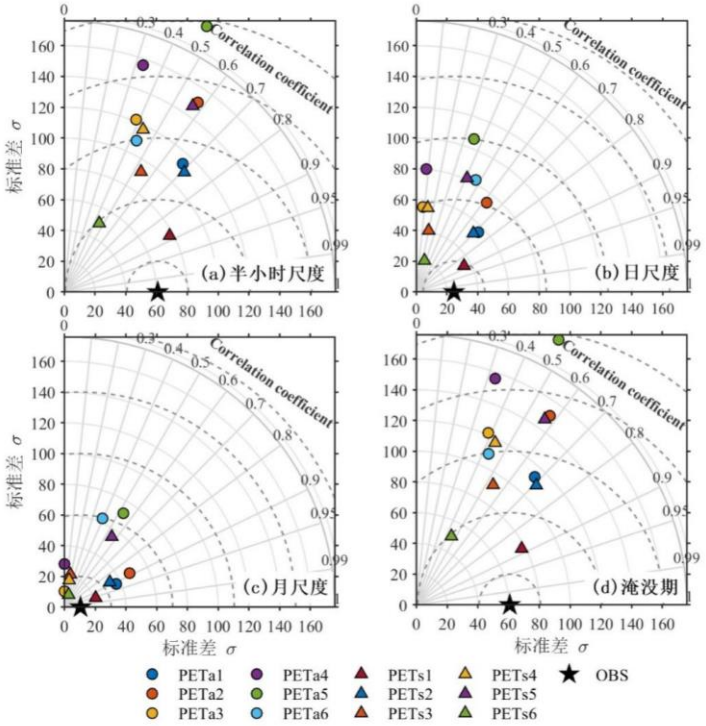

图 6 不同时间尺度下 PET 计算值的 Taylor 图。图中以半小时尺度(a)、日尺度(b)、月尺度(c)及淹没期整体(d)四个时间尺度，对十二种 PET 估算值与涡度相关系统观测潜热通量（LE）之间的统计关系进行综合展示。图中以原点为圆心的同心圆表示标准差等值线，射线角度表示 Pearson 相关系数，且以观测值为圆心的虚线圆弧表示中心均方根误差（RMSD）等值线。该图能够在同一几何框架下同时反映各 PET 方案在波动幅度、时间一致性及整体误差方面与观测值的综合吻合程度。

Fig.6 Taylor diagrams of calculated PET values at different time scales. The diagrams present a comprehensive statistical comparison between twelve PET estimates and the latent heat flux (LE) observed by the eddy covariance system at four time scales: (a) half-hourly, (b) daily, (c) monthly, and (d) the entire inundation period. Concentric circles centered at the origin denote isolines of standard deviation, radial rays represent the Pearson correlation coefficient, and dashed arcs centered at the observation point indicate isolines of the centered root mean square difference (RMSD). This geometric framework enables a simultaneous evaluation of the variability, temporal consistency, and overall deviation of each PET scheme relative to the observations.

Taylor 图能够在统一的几何框架下，同时反映模型结果与观测值之间的标准差、相关系数及中心均方根误差（RMSD）的综合关系，从而评价模型在波动幅度、时间一致性及整体误差方面的吻合程度。PBIAS

图用于直观呈现模型模拟值相对于观测值的平均偏差百分比，反映系统性偏差大小。综合分析表明，各种 PET 估算方法对 LE 的模拟呈现出不同的特征规律。

在较短的时间尺度（半小时、日尺度）上，多个 PET 值（如 PET_{a1}、PET_{a2} 及 PET_{s1}、PET_{s2}等）能较好地模拟 LE，但存在不同程度的正偏；其他 PET 值（如 PET_{a3}、PET_{s3} 等）在短时尺度的泰勒图中表现出标准差偏离度大、相关系数偏低的特征，其波动与时序匹配度较差，且 PBIAS 呈不同程度的负偏，可能是这些 PET 值受下垫面水分条件（如土壤湿度、植被覆盖）的影响较小，导致蒸散值出现低估。在较长时间尺度（月、淹没期整体）下，虽然各 PET 值在 Taylor 图中呈现出较好表现，但在偏差图中相对于 LE 的偏差却有所增大。这说明随着时间尺度的延长，误差逐渐累积，各种 PET 方法对 LE 的估计精度降低。

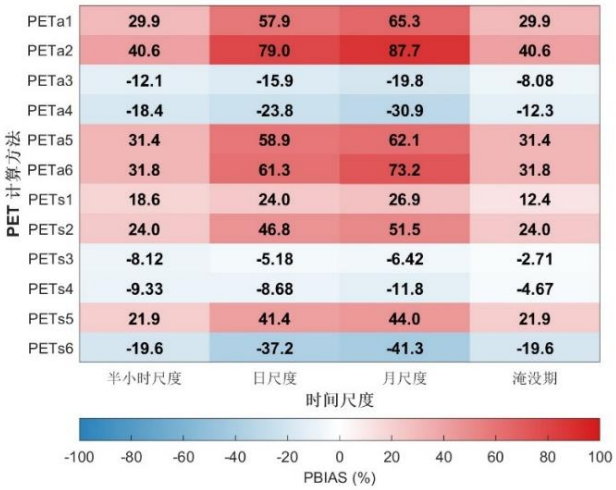

图 7 不同时间尺度下 PET 计算值的偏差百分比（PBIAS）热图。热图按半小时、日、月及淹没期整体四个时间尺度，列示 12 种 PET 计算值的 PBIAS 值（%）。蓝色至红色渐变表示从强负偏（低估）到强正偏（高估），格内数字为具体偏差百分比，可用于定量比较各方案在不同尺度上的系统性偏差大小。图下方色标对应 PBIAS 值域

Fig.7 Heatmap of Percent Bias (PBIAS) for calculated PET values at different time scales.The heatmap presents the PBIAS values (%) for 12 PET estimates across four time scales: half-hourly, daily, monthly, and the entire inundation period. The gradient from blue to red indicates the range from strong negative bias (underestimation) to strong positive bias (overestimation). The numbers within the cells represent specific bias percentages, allowing for a quantitative comparison of the systematic bias magnitude of each scheme across different scales. The color scale at the bottom corresponds to the range of PBIAS values

尽管各方法在短期波动上存在较大差异，但从长期趋势上来看，PET_{a1}、PET_{s1} 与 LE 走势最为接近，特别是在 7-9 月高蒸散季节能够跟随观测变化。这与图 6 和图 7 的定量结果一致，说明在湿地淹没条件下，基于表面温度计算不仅能减小整体偏差，还能更好地反映季节性蒸散变化，是更适用于这种环境的 PET 估算方法。综上，不同 PET 方法在各时间尺度下均具备一定的模拟能力，其中 PET_{s1} 最能体现 PET 的时间变化规律。

4.2 PET 估算精度分析

为系统评估不同温度输入对 P-M 公式计算精度的影响，本研究采用不同的温度组合计算 VPD，并代入 P-M 公式，得到 12 个 PET 计算值，与实测 LE 进行对比验证。各计算值与实测 LE 的散点图如图 8，直观比较不同计算方法所得 PET 值与实测 LE 之间的拟合程度与偏差。同时通过残差（PET-LE）箱线图（图 8），分析各方法的系统性偏差大小、数据离散程度以及异常值分布特征，以全面评估不同温度输入条件下 P-M 公式的计算稳定性和可靠性。

结果表明，不同方法对PET的估算精度存在显著差异。 PET_{s1} 的估算结果与实测值最为接近，确定性

系数 R^2为 0.82，均方根误差 RMSE 为 54.4W/m²，平均绝对误差 MAE 为 41.4W/m²。综合考虑散点图和 R^2、RMSE、MAE，可知 PET_{s1} 是最接近实际的 PET 值。

由图 9 可见，大多数方法的残差中位值接近零，整体上未出现明显的系统性偏差。但仍有部分方法（如 PET_{a1}、PET_{a2}、PET_{a5} 和 PET_{s5}）呈现正偏差，说明这些方法普遍高估了 PET。不同方法间的离散度存在差异：PET_{a5} 和 PET_{s5} 箱体高度较大，残差波动明显，而 PET_{s1}、PET_{s2} 和 PET_{s3} 的箱体较矮，表明其结果更为集中，稳定性较好。综合来看，采用蒸发表面温度计算的蒸散值在残差分布和稳定性上普遍优于气温计算的蒸散值。这主要是因为表面温度能够更直接地反映蒸发界面的能量状态，而 VPD 作为驱动蒸散的关键变量，其计算精度直接影响 P-M 公式的估算结果。因此，在计算 PET 时，公式中的 VPD 应基于蒸发表面温度计算，蒸发表面温度是蒸散的重要影响因素之一，与 PET 紧密相关。

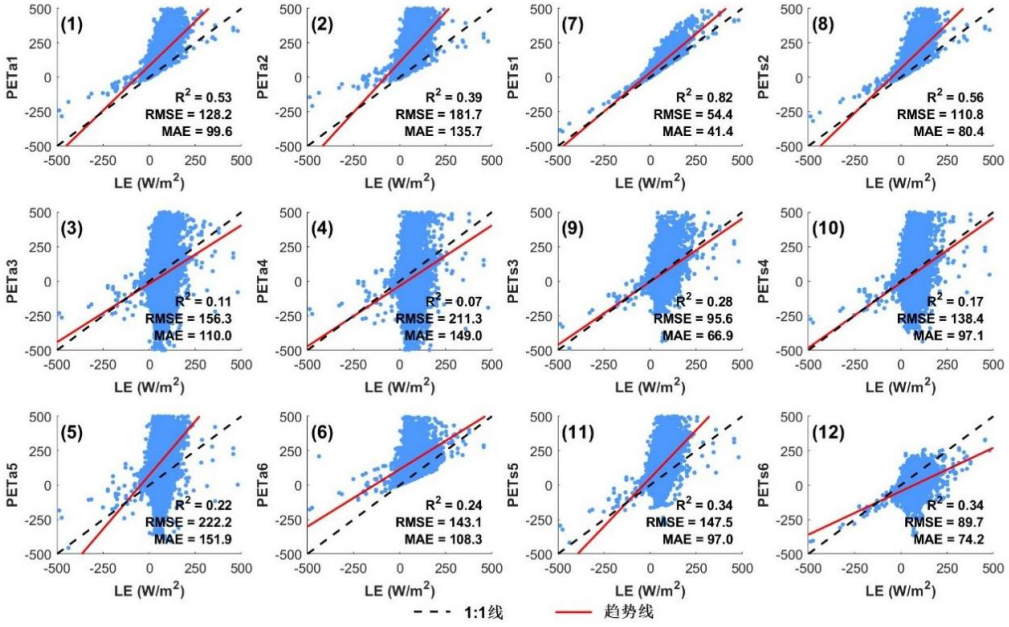

图 8 PET 计算值与实测 LE 散点图。图中标注了回归线、1:1 线及误差评价指标

Fig.8 Scatter plot of potential evapotranspiration estimates versus measured latent heat flux. The plot includes the regression line, the 1:1 line, and error evaluation metrics

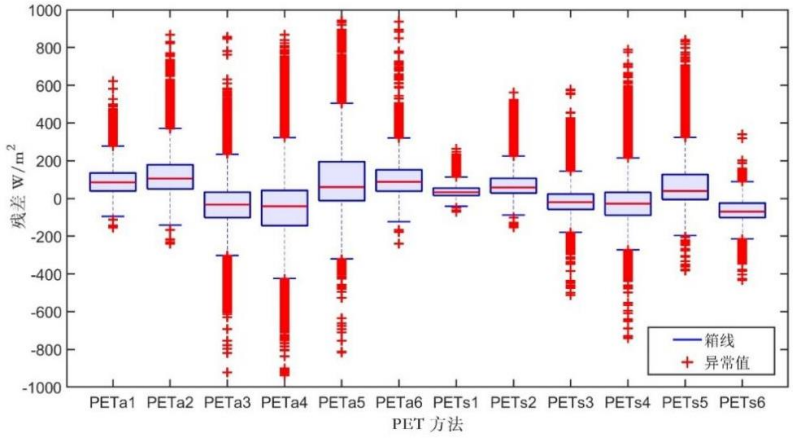

图 9 不同 PET 计算方法残差的箱线图。图中显示了各 PET 方法计算值与实测 LE 之间残差（PET-LE）的分布情况。箱线图展示了中位数（红线）、四分位范围（箱体）、数据整体波动范围以及异常值。通过该图可以比较不同计算方法的系统偏差和离散程度，评估其计算精度和稳定性

Fig.9 Boxplot of residuals for different PET calculation methods. The figure shows the distribution of residuals (PET-LE) between the calculated PET values and the measured latent heat flux (LE) for each method. The boxplot illustrates the median (red line), interquartile range (box), overall data spread, and outliers. This plot allows for the comparison of systematic bias and variability among different calculation methods, enabling the assessment of their accuracy and stability

3.3 不同气象条件下的偏差分析

3.3.1 多要素气象组合对 PET 估算偏差的影响　为系统分析不同气象条件对 PET 估算精度的影响，本研究选取与蒸散发过程密切相关的 5 个关键气象因子：相对湿度（RH）、净辐射（Rn）、风速（WS）、气温（T_a）与地表温度（T_s），采用两两配对的方式构建双变量分析框架，共形成 10 种气象因子组合，并以热图形式可视化偏差的空间分布特征。考虑到湿地生态系统的气候特征和蒸散发机理，本文重点分析三种典型气象组合情景的偏差分布：（1）低湿度-高辐射条件（RH-Rn 组合，图 10），代表干燥高能环境下的蒸散特征；（2）高辐射-高气温条件（Rn-T_a组合，图 11），反映强辐射驱动的高温蒸散过程；（3）高风速-高地表温度条件（WS-T_s组合，图 12），体现湍流交换强化的蒸散情景。这三种组合涵盖了湿地蒸散的主要驱动机制，能够有效揭示极端气象条件下不同 PET 方法的估算差异。

基于所展示的三种典型气象组合分析（图 10-图 12），发现不同气象因子的变化对各类 PET 方法的估算精度产生显著影响，且呈现出明显的规律性特征。计算时采用气温计算的 PET 值多呈现高估，其在低湿高辐射、高温高辐射以及高风速高地表温度等高能量条件下表现出明显的系统性高估，部分方法的偏差幅度超过+80%甚至+100%。相比之下，采用蒸发表面温度计算的 PET 值误差较小，在不同气象条件组合中，偏差均在±20%以内，体现了其在干旱、强辐射及高温高风速等极端环境下的稳健性与物理一致性。这表明引入地表温度信息的计算方法在不同气象条件下更能准确再现实际蒸散过程，而依赖气温的计算方法则在高能量条件下存在显著偏差。

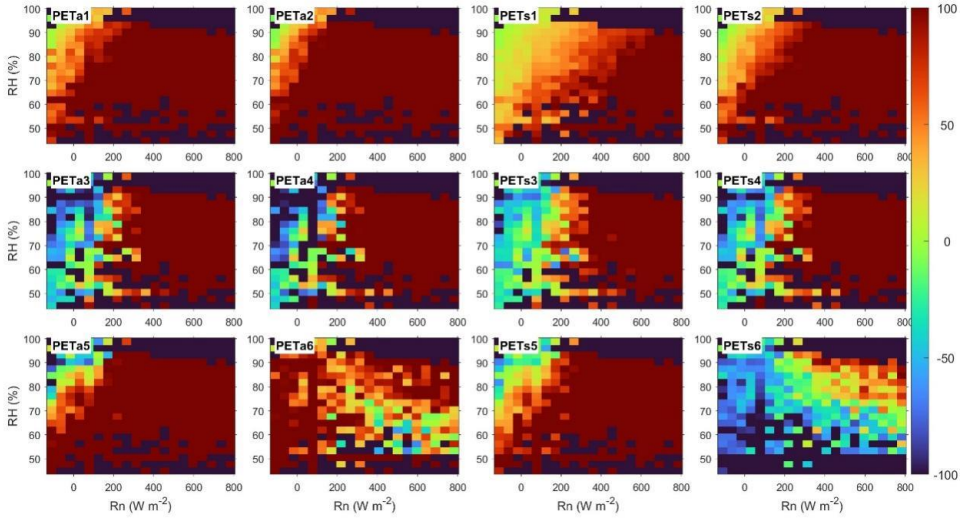

图 10 不同 PET 计算值在净辐射（Rn）与相对湿度（RH）条件下的残差分布。图中展示了 12 种基于不同温度组合的 PET 计算值，其残差（PET-LE）在不同 Rn 与 RH 数值组合下的变化情况。颜色表示残差大小（W/m²），红色、蓝色表示高估和低估

Fig.10 Residual distribution of PET estimates under different net radiation (Rn) and relative humidity (RH) conditions. The figure shows the residuals (PET-LE) of 12 PET estimates derived from different temperature combinations, plotted against various Rn and RH value

combinations. Colors indicate the magnitude of residuals (W/m²), with red representing overestimation and blue representing underestimation

4.3.2 温度扰动下的敏感性与综合评估　在估算 PET 时，因蒸发表面温度（T_s）难以获取，实际应用中常以气温（T_a）代替[2]错误!未找到引用源.，这种替代计算可能导致误差。为定量评估温度参数选择对 PET 估算精度的影响程度，本文开展了温度变量（T_a 与 T_s）对 PET 结果的敏感性分析，该分析有助于明确不同温度组合下 PET 估算的稳定性与物理合理性，为参数选取提供理论依据。在半小时分辨率下对气温与表面温度分别施以±10%和±20%的相对扰动，并计算每个 PET 计算值的平均响应斜率（图 13）。

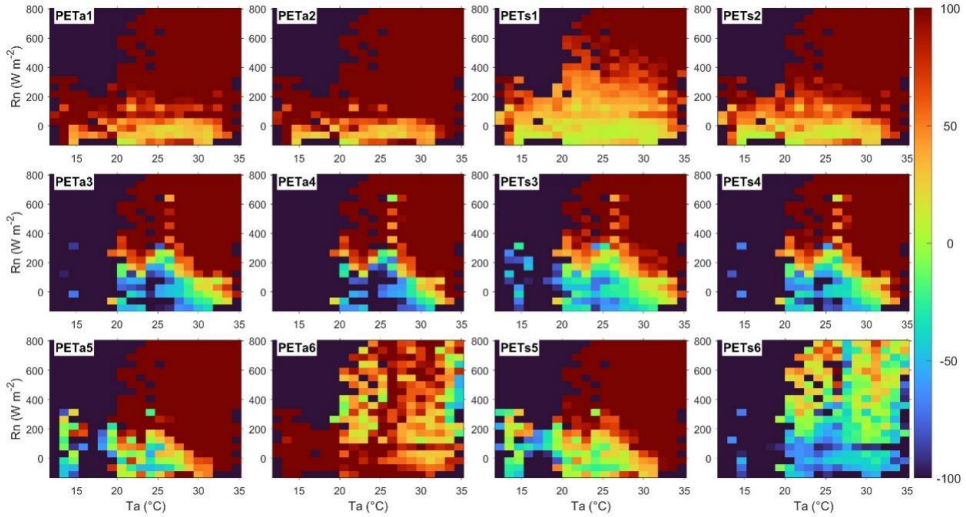

图 11 不同 PET 计算值在净辐射（Rn）与气温（T_a）条件下的残差分布。图中展示了 12 种基于不同温度组合的 PET 计算值，其残差（PET-LE）在不同 Rn 与T_a数值组合下的变化情况。颜色表示残差大小（W/m²），红色表示高估，蓝色表示低估

Fig.11 Residual distribution of PET estimates under different net radiation (Rn) and air temperature (T_a) conditions. The figure shows the residuals (PET-LE) of 12 PET estimates derived from different temperature combinations, plotted against various Rn and T_a value combinations. Colors indicate the magnitude of residuals (W/m²), with red representing overestimation and blue representing underestimation

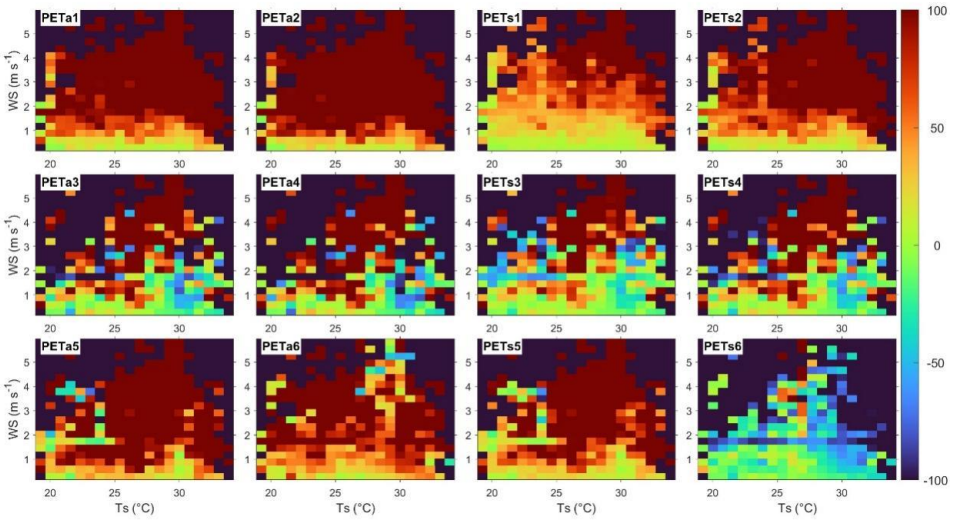

图 12 不同 PET 计算值在地表温度（T_s）与风速（WS）条件下的残差分布。图中展示了 12 种基于不同温度组合的 PET 计算值，其残差（PET-LE）在不同T_s与 WS 数值组合下的变化情况。颜色表示残差大小（W/m²），红色表示高估，蓝色表示低估

Fig.12 Residual distribution of PET estimates under different land surface temperature (T_s) and wind speed (WS) conditions. The figure shows the residuals (PET-LE) of 12 PET estimates derived from different temperature combinations, plotted against various T_s and WS value combinations. Colors indicate the magnitude of residuals (W/m²), with red representing overestimation and blue representing underestimation

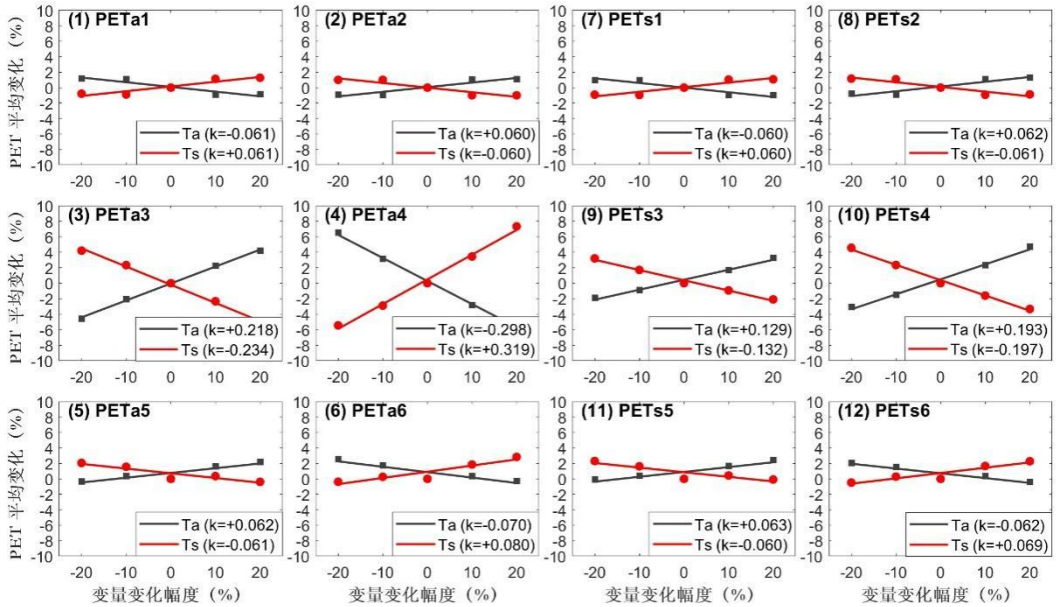

图 13 不同温度扰动下 PET 估算结果的响应趋势。图中展示了在不同扰动幅度（±10%、±20%）下，气温（T_a）与蒸发表面温度（T_s）对 12 种 PET 估算结果的影响。横轴为输入温度变量的相对变化百分比，纵轴为 PET 变化的均值（%）

Fig.13 PET response trends under different temperature perturbations. This figure illustrates the mean percentage change in PET values under ±10% and ±20% perturbations in surface temperature (T_s) and air temperature (T_a), for twelve estimation methods. The x-axis

denotes relative changes in temperature inputs, and the y-axis represents the resulting changes in PET (%)

从结果可见，大部分方法对 T_a 和 T_s 扰动的敏感性较弱，曲线斜率接近零（如 PET_{a1}、PET_{a2}、PET_{a5}、PET_{s1}、PET_{s2}、PET_{s5}、PET_{s6}），说明这类方法在温度变化下计算结果较为稳定。相比之下，部分方法（如 PET_{a3}、PET_{a4}、PET_{s3}、PET_{s4}）对温度扰动表现出显著的敏感性，尤其是 PET_{a4}，其 T_a 与 T_s 斜率绝对值分别达到-0.298 和 0.319，表明温度变化会对该 PET 值产生较大影响。此外，敏感性方向存在差异：在敏感性较高的 PET 值中，T_a 的变化对 PET 呈负相关，而 T_s 的变化则呈正相关。这表明不同 PET 值对空气温度和地表温度变化的响应机制并不一致，需要在实际应用中根据研究区气候特征谨慎选择合适的 PET 计算方法。

上述结果可从 Penman-Monteith (P-M) 公式的数学结构中获得更深层的物理解释。P-M 公式的经典推导依赖于对饱和水汽压-温度曲线 $e^*(T)$ 的线性化假设，即以气温 T_a 处的切线斜率 Δ 来近似计算界面与大气之间的水汽压差。然而，由于 $e^*(T)$ 呈指数型增长的下凸（Convex）特性，在 T_a 处评估的切线斜率必然系统性地小于两点间的真实割线斜率。这就意味着，传统算法会低估界面真实的饱和水汽压，且该线性近似误差会随着气温与表面温差 $|T_s - T_a|$ 的增大而单调递增[错误!未找到引用源.]。

在本研究的淹没期场景中，浅水下垫面热容量大且吸收了大量太阳短波辐射，使得实际蒸发表面温度 T_s 通常显著高于气温 T_a。在高辐射、低湿度的极端条件下，若强行以 T_a 同时计算 Δ 与饱和水汽压差 (VPD)，一方面 Δ 取值偏小，人为压低了辐射项在 P-M 公式中的驱动权重；另一方面，被低估的界面饱和水汽压使得 VPD 严重偏离了大气的实际蒸发驱动力。这两种效应的非线性叠加，直接导致了基于气温的方案在强蒸发条件下出现显著的系统性高估（正如前文图 11、图 12 所示）。

相反，本研究中表现最优的 PET_{s1} 方案，直接以实测的 T_s 驱动 Δ 和 VPD 的计算。这一处理等价于将 $e^*(T)$ 的线性化参考点从高空下移至蒸发物理界面本身，从根本上规避了因曲线下凸带来的切线近似误差[错误!未找到引用源.]，准确刻画了浅水环境真实的界面热力学状态，因而与实测潜热通量 (LE) 保持了最高的一致性。

4 结论

PET是水文循环和生态系统研究的关键参数。本研究基于 Granger [错误!未找到引用源.] 对 PET 的定义及分类展开探究，利用鄱阳湖星子站通量观测塔 2021 年淹没期的涡度相关观测数据，采用气温和蒸发表面温度的不同组合计算 VPD，并代入公式得到 12 个 PET 值，并将 PET 计算值与实测 LE 进行比较。本文主要结论如下：

（1）不同时间尺度下，各 PET 方法对 LE 的估算精度存在显著差异。基于表面温度计算的 PET 值，尤其是 PET_{s1}，在日变化振幅、季节相位变化及长期趋势上与 LE 的一致性最高，且系统性偏差较小（各时间尺度下偏差均低于 30W/㎡）；而基于气温的 PET 值出现明显高估或低估。随着时间尺度延长，所有方法的偏差均有所累积，但地表温度类方法在趋势一致性和长期稳定性方面表现更优。

（2）12 种温度组合方法在 PET 估算精度上存在显著差异。整体而言，基于蒸发表面温度计算的 PET 值在拟合度、残差分布及稳定性方面优于基于气温计算的 PET 值，其中 PET_{s1} 方法表现最优（R^2=0.82，RMSE=54.4W/m²，MAE=41.4W/m²），且残差集中、异常值占比低，表现出较高的稳健性。部分方法如 PET_{a1}、PET_{a2}、PET_{a5} 和 PET_{s5} 存在系统性高估，异常值数量较多。结果表明，采用蒸发表面温度计算能显著提升 PET 估算的准确性与稳定性。

（3）多气象因子组合分析表明，不同方法在极端气象条件下的估算稳定性差异显著。气温类 PET 方法在高能量气象条件下（低湿高辐射、高温高辐射、高风速高温等）表现出明显的高估倾向，偏差可超过+80%~+100%；而基于蒸发表面温度的方法在各类气象组合下偏差普遍控制在±20%以内，表现出更高的稳定性。

需要指出的是，以往研究普遍采用 T_a 替代 T_s，根本原因在于蒸发表面温度的获取受限于观测手段

和空间异质性。因此，实际应用中需分场景选择 PET 估算方案：对于湖泊、水库等水分供应充分、界面均一且 T_s 可获取的场景，可优先采用基于 T_s 的方案（如 PET_{s1}），能够提升估算精度；对于 T_s 难以获取的非均质陆面，T_a 方案仍是合理的替代选择，但需重点关注其在高能量气象条件下的高估倾向，必要时可结合局部观测数据进行校正，以降低估算偏差。

本研究基于鄱阳湖星子站通量塔的涡动相关（EC）数据，采用不同方式计算 VPD 并代入 P-M 公式，估算 PET，并与实测LE对比，选取最接近实际的结果。EC 技术是目前广泛应用于研究能量与物质交换的核心手段[错误!未找到引用源.]，尽管精度高、可实现实时监测，但仍存在如数据缺失、夜间通量低估与足迹偏移等问题[错误!未找到引用源.]，需通过严格的数据处理提升有效性。结合 PET 的定义，研究将淹没期（2021 年 5 月 15 日至 10 月 20 日）LE 视作真实 PET，并通过足迹分析剔除陆地干扰，确保数据代表性。然而，严苛筛选使有效数据点较少，一定程度上影响对比直观性。

需要说明的是，本研究仅基于鄱阳湖星子站（亚热带湿润地区）的观测数据展开，该区域降水充沛、气候湿润、下垫面水分充足，因此研究结论的普适性存在一定地学区域边界局限性，更适用于同类湿润区的类似场景，对于干旱半干旱区、寒区等气候差异显著区域，结论的借鉴性需进一步验证。未来研究可进一步引入多年数据，评估最优估算方法在更长时间尺度下的稳定性与适用性，同时结合不同下垫面类型、不同气候区（尤其是非湿润区）的观测数据，完善 PET 估算方案的场景适配准则。

5 参考文献

[1] Chahine, M.T. The hydrological cycle and its influence on climate . Nature, 1992, 359: 373–380.

[2] Liu Y, Qiu G, Zhang H, et al. Theories and Methods for Calculating Terrestrial Evapotranspiration: Review and Prospects . Science China Earth Sciences, 2022, 52 (3): 381–399. [刘元波，邱国玉，张宏昇，等。陆域蒸散的测算理论方法：回顾与展望 . 中国科学：地球科学，2022, 52 (3): 381–399.]

[3] Yang Y J, Cao J F. Quantitative analysis of meteorological factors influencing reference crop evapotranspiration in Haihe River Basin . Journal of Arid Meteorology, 2017, 35 (3): 367-373. [杨艳娟，曹经福。影响海河流域参考作物蒸散量的气象因子定量分析 . 干旱气象，2017, 35 (3): 367-373.]

[4] Gao G L, Feng Q. Advances in simulating land surface evapotranspiration by combining evapotranspiration models with micrometeorological data . Plateau Meteorology, 2017, 36 (6): 1630-1637. [高冠龙，冯起。蒸散模型结合微气象数据模拟陆面蒸散研究进展 . 高原气象，2017, 36 (6): 1630-1637.]

[5] 胡国玲，胡增辉。咸阳市农田蒸散分析 . 陕西气象，2018 (2): 47-50.

[6] Brutsaert W. Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications . Springer Science & Business Media, 1982.

[7] Hinkle D E, Wiersma W, Jurs S G. Applied Statistics for the Behavioral Sciences (5th ed). Boston: Houghton Mifflin, 2003.

[8] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate . Geographical Review, 1948, 38 (1): 55-94.

[9] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements . FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.

[10] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale . Water Resources Research, 2001, 37 (3): 701-708.

[11] Brutsaert W. Hydrology: An Introduction . New York: Univ. of Cambridge Press, 2005.

[12] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements . ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990, 70.

[13] Penman H L. The dependence of transpiration on weather and soil conditions . Journal of Soil Science, 1950, 1 (1): 74–89.

[14] Morton F I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology . Journal of Hydrology, 1983, 66: 1–76.

[15] Van Bavel C H M. Potential evaporation: The combination concept and its experimental verification . Journal of Applied

Meteorology, 1966, 5 (4): 455–467.

[16] Maidment D R, ed. Handbook of hydrology . McGraw-Hill, 1993.

[17] Lhomme J P. Towards a rational definition of potential evaporation . Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13 (12): 2303–2315.

[18] Granger R J. An examination of the concept of potential evaporation . Journal of Hydrology, 1989, 111 (1-4): 9-19.

[19] Pereira L S, Steduto P, Allen R G. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future . Irrigation Science, 2015, 33 (4): 359–373.

[20] Milly P C D. Potential evaporation and soil moisture in general circulation models . Journal of Climate, 1992, 5: 209–226.

[21] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability . Reviews of Geophysics, 2012, 50: RG2005.

[22] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, Otkin J A, Kustas W P. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D10).

[23] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1023–1027.

[24] Zhou S, Yu B. Physical basis of the potential evapotranspiration and its estimation over land. Journal of Hydrology, 2024, 641: 131825.

[25] Fisher J B, Tu K P, Baldocchi D D. Global estimates of the land–atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 901–919.

[26] Liu C M, Sun R. Ecological aspects of water cycle: advances in study of water and energy balance in soil-vegetation-atmosphere system . Advances in Water Science, 1999, 10 (3): 251-259. [刘昌明，孙睿。水循环的生态学方面：土壤 - 植被 - 大气系统水分能量平衡研究进展 . 水科学进展，1999, 10 (3): 251-259.]

[27] Cui Y, Liu Y, Gan G, et al. Hysteresis behavior of surface water fluxes in a hydrologic transition of an ephemeral lake . Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125 (12).

[28] Aubinet M, Vesala T, Papale D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis . Springer, 2012: 365-376.

[29] Granger R J, Hedstrom N. Modelling hourly rates of evaporation from small lakes . Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15 (1): 267-277.

[30] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer . Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106 (447): 85-100.

[31] 李梅，刘发根，沈友恒，李琦，郭玉银，戚君燕，刘元波。鄱阳湖区水热碳通量对 2022 年极端干旱事件的响应 . 湖泊科学，2026, 38 (1): 401-410.

[32] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification . Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99: 207-224.

[33] Monteith J L. Evaporation and environment . Symposia of the Society for Experimental Biology, 1965, 19: 205-234.

[34] Kutner M H, Nachtsheim C J, Neter J, Li W. Applied Linear Statistical Models (5th ed). McGraw-Hill, 2005.

[35] Willmott C J, Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance . Climate Research, 2005, 30 (1): 79-82.

[36] Chai T, Draxler R R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature . Geoscientific Model Development, 2014, 7 (3): 1247-1250.

[37] Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration . Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 4 (2): 135-143.

[38] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models: part I — a discussion of principles . Journal of

Hydrology, 1970, 10: 282–290.

[39] Er-Raki S, Chehbouni A, Saux M, Mougin E. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water requirements of rainfed and irrigated wheat . Agricultural Water Management, 2007, 94 (1-2): 48–57.

[40] Qualls R J, Crago R D. Graphical interpretation of wet surface evaporation equations . Water Resources Research, 2020, 56: e2019WR026766.

[41] McColl K A. Practical and theoretical benefits of an alternative to the Penman-Monteith evapotranspiration equation . Water Resources Research, 2020, 56: e2020WR027106.

[42] Baldocchi D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. Global Change Biology, 2003, 9(4): 479–492.