

基于机器学习的 Penman-Monteith-Leuning 蒸散发模型参数优化及其应用

李建柱¹,赵路云²,陈旭³

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 河北省石家庄水文勘测研究中心;
3. 水利部海河水利委员会水文局)

摘要:基于河北省柳林流域的涡动相关系统与蒸渗仪观测数据,评估了 Bowen 比法对能量闭合的修正效果,分别采用粒子群优化算法和机器学习模型优化了 Penman-Monteith-Leuning (PML) 模型中的关键参数,进而模拟了研究区长时间序列蒸散发并分析了其时空变化规律。结果表明:能量闭合修正后,研究区涡动相关系统与蒸渗仪观测值拟合结果的决定系数(R^2)提高了 0.04;采用机器学习模型优化动态土壤蒸发系数提升了 PML 模型的模拟效果,模拟结果的 R^2 为 0.79、纳什效率系数为 0.76,与基于流域水量平衡法模拟的蒸散发相对误差为-5.06%;2001—2022 年柳林流域多年平均蒸散发为 477.8mm,年内蒸散发集中在 5—8 月,具有西北高、东南低的空间分布特征,林地的年均蒸散发最大,草地和农田次之,建筑用地最小。

关键词:蒸散发;土壤蒸发系数;能量闭合修正;机器学习模型;Penman-Monteith-Leuning 模型;柳林流域

Parameter optimization of Penman-Monteith-Leuning evapotranspiration model based on machine learning and its application//Li Jianzhu¹, Zhao Luyun², Chen Xu³ (1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University*; 2. *Shijiazhuang Hydrology Survey and Research Center of Hebei Province*; 3. *Hydrology Bureau of Haihe River Water Conservancy Commission, MWR*)

Abstract: Based on the vortex correlation system and evapotranspiration observation data in the Liulin watershed of Hebei Province, the correction effect of the Bowen ratio method on energy closure was evaluated. Particle swarm optimization algorithm and machine learning model were used to optimize the key parameters in the Penman-Monteith-Leuning (PML) model, and the long-term evaporation of the study area was simulated and its spatiotemporal variation was analyzed. The results showed that after energy closure correction, the determination coefficient (R^2) of the fitting results between the observed values of the vortex related system and the lysimeters in the study area increased by 0.04. The use of machine learning models to optimize the dynamic soil evaporation coefficient improved the simulation performance of the PML model. The simulation results showed an R^2 of 0.79 and a Nash efficiency coefficient of 0.76, with a relative error of -5.06% compared to the evapotranspiration simulated based on the watershed water balance method. The average annual evapotranspiration in the Liulin Watershed from 2001 to 2022 was 477.8 mm, with evapotranspiration concentrated from May to August. It had a spatial distribution characteristic of being higher in the northwest and lower in the southeast. Forest land had the highest average annual evapotranspiration, followed by grassland and farmland, and building land had the smallest.

Key words: evapotranspiration; soil evaporation coefficient; energy closure correction; machine learning model; Penman-Monteith-Leuning model; the Liulin Watershed

蒸散发过程关联着水、碳及能量交换,是水文循环和能量循环的重要组成部分^[1]。在全球范围内,约 60% 的降水量会通过蒸散发回归到大气中^[2],在干旱和半干旱地区,蒸散发可占年降水量的 90%^[3]。准确模拟流域实际蒸散发,探明实际蒸散发时空变化特征对流域水资源评价、维持生态系统的水分平衡和干旱预测等具有重要意义^[4-5]。涡动相关系统、蒸渗仪、闪烁仪等传统点尺度观测手段能够提供较为精确的蒸散发数据,但由于布设和维护成本较高,且空间代表性不足,难以满足流域尺度蒸

基金项目:国家自然科学基金项目(52279022,52079086)
作者简介:李建柱(1981—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lijianzhu@tju.edu.cn

散发的连续监测需求。另外,涡动相关系统观测数据普遍存在能量不闭合的问题,能量平衡残差通常为 10%~30%^[6],对蒸散发估算精度造成较大影响^[7]。为提升其观测结果的可信度,需要对原始通量数据进行能量闭合修正,从而提高蒸散发估算的准确性和适用性^[8]。

随着遥感反演地表变量和参数的理论方法不断成熟^[9],遥感蒸散发模型逐渐发展,为大尺度蒸散发的估算提供可靠的技术途径,例如基于能量平衡原理的 Penman-Monteith (PM) 模型^[10]、陆面地表能量平衡 (surface energy balance algorithm for land, SEBAL) 模型^[11]、Shuttleworth-Wallace (SW) 双层模型^[12]、基于地表温度和植被指数关系的三角形/四边形模型^[13]等。其中,PM 模型因其理论基础坚实、计算精度高、适用性强得到广泛应用^[14-17]。已有研究对其参数化方法进行了改进,例如,B-PM-ET 模型中地表导度可以表示为冠层导度和土壤导度的叠加,其中冠层导度可以通过 Jarvis 模型计算^[18]; Penman-Monteith-MU 模型中地表导度的计算考虑了水汽压差和温度^[19]; Penman-Monteith-Leuning (PML) 模型^[20]通过耦合冠层导度和土壤蒸发构建了地表导度参数化模型。其中,PML 模型只需确定土壤蒸发系数和最大气孔导度两个关键参数,并且在减少参数的同时确保了模拟精度^[21-24],但土壤蒸发系数通常被简化为固定值,忽略了其时空动态变化特性^[15,22]。因此,PML 模型中土壤蒸发系数的参数化方案成为蒸散发动态模拟的关键,Zhang 等^[25]提出了用累计降水量与土壤表面平衡蒸发率的比值作为土壤蒸发系数的参数化方法,Morillas 等^[26]使用降雨事件后的土壤干燥模拟系数来计算土壤蒸发系数。尽管这些土壤蒸发系数参数化方案体现了其时空动态变化,但多依赖于单一驱动因子,未能综合考虑影响土壤蒸发内因(土壤含水量)与外因(气象要素等)的多因子协同作用^[27]。机器学习方法可以在无先验知识的条件下自主建立要素间的隐藏关系^[28],为土壤蒸发系数动态参数化提供技术手段。CatBoost 模型在蒸散发模拟中展现出良好的性能,并在多个地区成功应用^[29-31]。然而,如何利用机器学习方法构建融合多因子协同作用的土壤蒸发系数参数化模型,并将其应用到 PML 模型中以提高蒸散发模拟精度,有待进一步研究。

鉴于此,本文以河北省柳林流域为研究区,采用波文比法对涡动相关系统观测的能量通量数据进行能量闭合修正,在此基础上优化 PML 模型中的关键参数。提出一种基于 CatBoost 模型的动态土壤蒸发系数参数化方法,建立土壤蒸发系数与土壤含水量

及气象因子之间的响应关系。基于动态土壤蒸发系数,利用 PML 模型模拟 2001—2022 年柳林流域的蒸散发,并分析其时空变化特征,以期提升流域蒸散发模拟精度提供技术支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

柳林流域位于河北省邢台市内丘县,隶属于牙河流域,流域面积 57.4 km²,河长 13.2 km,如图 1 所示。柳林流域属于半干旱半湿润气候,多年平均径流深 80.7 mm,多年平均水面蒸发 1045.5 mm,多年平均降水量 594.5 mm,年内降水分配不均,主要集中在 6—9 月,多年平均气温 13.3℃。柳林流域内有林地、草地、农田、建筑用地和水面 5 种土地利用类型,其中,农田占流域面积的 51.9%。柳林流域内设有雨量站和水文站进行雨量和流量的观测;布设涡动相关系统进行通量和气象数据的观测,采样频率为 10 Hz,数据存储时间间隔为 0.5 h,通量塔下垫面属于农田生态系统;两套 2 m×2 m×2.4 m 称重式蒸渗仪进行实际蒸散发的观测,蒸渗仪型号 BSI-ZSY2020,分辨率为 0.01 mm。

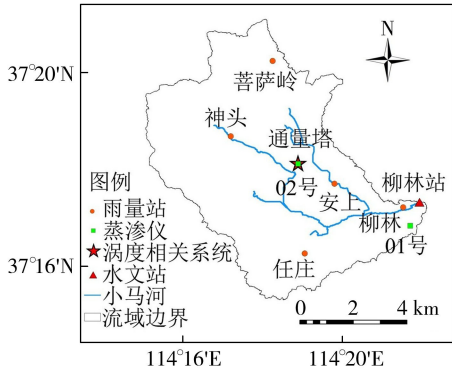


图 1 柳林流域位置和站点分布

Fig. 1 Location of the Liulin Watershed and distribution of stations

1.2 数据来源

本文收集了 2001—2022 年柳林水文站及其控制流域内 5 个雨量站的实测流量和降水量,基于水量平衡法逐年反演研究区的实际蒸散发,上述数据由河北省邢台水文勘测研究中心提供。本文还收集了天津大学水文课题组于 2021—2022 年在柳林流域观测获得的涡动相关系统通量数据(分辨率为 0.5 h)及两套蒸渗仪记录的 1 h 分辨率蒸散发数据,用于涡动相关系统能量闭合修正与 PML 模型模拟结果的验证分析。此外,获取了多源遥感数据以支撑 PML 模型蒸散发模拟,遥感数据信息见表 1。在利用粒子群优化 (PSO) 算法反演 PML 模型参数以及构建的 CatBoost 模型进行土壤蒸发系数预测时使

表 1 遥感数据信息
Table 1 Information of remote sensing data

数据名称	数据来源	空间分辨率	时间分辨率	数据类型	时间范围
ERA5-Land	欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集	0.1°	1 h	气温、大气压、风速、辐射等	2001—2022 年
MOD 15A2H	美国国家航空航天局 MODIS 系列数据	500 m	8 d	叶面积指数	2001—2022 年
CLCD	中国逐年地表覆盖数据集	30 m	1 a	土地利用类型	2001—2022 年
SMCI	国家青藏高原数据中心	1 km	1 d	土壤湿度	2001—2022 年

用柳林流域内站点的观测数据;在进行流域尺度蒸散发计算时使用栅格数据,包括再分析产品以及遥感数据。为保证数据的一致性,遥感数据均经过统一投影、重采样和裁剪处理,空间分辨率统一至 30 m。

2 研究方法

2.1 能量闭合度分析及能量闭合修正

能量闭合度是评价涡度相关系统观测数据可靠性的指标^[32],采用普通最小二乘 (ordinary least squares, OLS) 法和能量平衡比率 (energy balance ratio, EBR) 法对能量闭合度进行评估。OLS 法利用最小二乘法对湍流通量和有效能量进行线性回归分析,回归方程的斜率表征能量闭合度;EBR 法通过计算湍流通量与有效能量的比值来描述能量闭合度。

采用波文比法进行能量闭合修正,该方法假设涡动相关系统观测的感热通量 H 与潜热通量 LE 的比值是准确的^[7],利用观测的波文比将有效能量进行分割,得到闭合修正后的 H 与 LE 。

2.2 PML 模型

PML 模型通过耦合冠层导度模型对地表导度进行参数化推求蒸散发,计算公式为:

$$ET = \frac{1}{\lambda} \left[\left(\frac{\Delta}{\gamma} A + \frac{\rho c_p}{\gamma} D_a G_a \right) / \left(\frac{\Delta}{\gamma} + 1 + \frac{G_a}{G_s} \right) \right] \tag{1}$$

其中

$$G_s = G_c \left\{ \left\{ 1 + \frac{\tau G_a}{(\varepsilon + 1) G_c} \left[f - \frac{(\varepsilon + 1)(1 - f) G_c}{G_a} \right] + \frac{G_a}{\varepsilon G_i} \right\} / \left\{ 1 - \tau \left[f - \frac{(\varepsilon + 1)(1 - f) G_c}{G_a} \right] + \frac{G_a}{\varepsilon G_i} \right\} \right\}$$
$$G_c = \frac{g_{smax}}{k_Q} \ln \left[\frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-k_Q L) + Q_{50}} \right] \left(\frac{1}{1 + D_a/D_{50}} \right)$$

式中: ET 为蒸散发; λ 为汽化潜热系数; Δ 为饱和水汽压与温度变化曲线的斜率; γ 为干湿表常数; A 为可用能量; ρ 为空气密度; c_p 为定压比热容; D_a 为饱和水汽压差; G_a 为空气动力学导度; G_s 为地表导度; G_c 为冠层导度; τ 为土壤吸收的可利用能量占总可利用能量的比例; ε 为饱和水汽压与 Δ 及 γ 的比值;

f 为土壤蒸发系数; G_i 为气候导度; G_a 为空气动力学导度; g_{smax} 为最大气孔导度; L 为叶面积指数; Q_h 为冠层顶部的可见辐射通量; k_Q 为短波辐射的衰减系数; Q_{50} 为当气孔导度为最大值一半时的可见辐射通量; D_{50} 为气孔导度为最大值一半时的饱和水汽压差。

参考 Franks 等^[33]的研究,基于对植物叶片气孔特征的测定,利用气孔密度 (即单位叶面积上的气孔数量) 和气孔长度 (指气孔保卫细胞的长度) 来计算最大气孔导度,公式为:

$$g_{smax} = \frac{d \Delta l S_D}{v (0.5 + 0.627 \sqrt{\theta})} \tag{2}$$

式中: l 为气孔长度; θ 为系数,取 0.12; d 为空气中水蒸气的扩散速率; S_D 为气孔密度; v 为气体摩尔常数。

利用 PML 模型模拟实际蒸散发时,关键是对土壤蒸发系数和最大气孔导度进行率定。本文首先利用 PSO 算法对土壤蒸发系数和最大气孔导度进行优化,得到两个关键参数的固定值;其次构建 CatBoost 模型,建立土壤蒸发系数与相关环境变量之间的非线性关系,实现对土壤蒸发系数的动态预测;最后分别基于土壤蒸发系数的固定值和动态值,驱动 PML 模型,对研究区的实际蒸散发进行模拟。

2.3 CatBoost 模型

CatBoost 是一种基于梯度提升决策的机器学习算法,具有较强的处理类别型特征的能力,同时能有效减少过拟合现象^[29]。与 XGBoost 等传统梯度提升方法不同, CatBoost 无需对类别特征进行手动编码,而是通过有序目标编码动态处理类别变量,提升模型效率和准确性。为了进一步抑制过拟合, CatBoost 采用有序提升策略,减小梯度估计的偏差。此外, CatBoost 还结合了正则化技术 (如 L2 正则化),以增强模型的泛化能力。

本文以 2021—2022 年波文比法修正后的柳林流域涡动相关系统观测数据为基础,以 PML 模型的关键参数——土壤蒸发系数作为目标预测变量,构建 CatBoost 模型。CatBoost 模型的参数设置为: 树的数量 4 000、学习率 0.015、深度 5、L2 正则化系数 80。CatBoost 模型的输入参数包括气温、净辐射、大

气压、叶面积指数等气象和植被参数以及 10、20 cm 土壤含水量等土壤湿度信息。同时, CatBoost 模型中涉及计算地表导度的 3 个变量 s_1 、 s_2 、 s_3 , 计算公式为:

$$s_1 = \frac{\tau G_a}{(\varepsilon + 1) G_c} \tag{3}$$

$$s_2 = \frac{G_a}{\varepsilon G_i} \tag{4}$$

$$s_3 = \left[1 + \frac{\tau G_a}{(\varepsilon + 1) G_c} + \frac{G_a}{\varepsilon G_i} \right] / \left(1 + \frac{\tau G_a}{G_c} + \frac{G_a}{\varepsilon G_i} \right) \tag{5}$$

采用 80% 的样本数据作为训练集, 其余 20% 作为测试集, 以评估模型的泛化能力。通过计算各输入变量的特征重要性, 识别对土壤蒸发系数影响较大的主控因子。同时, 以纳什效率系数 (NSE) 和决定系数 (R^2) 为评价指标, 对不同输入参数组合下模型模拟精度进行对比分析, 验证 CatBoost 模型在动态估算土壤蒸发系数方面的适用性与鲁棒性。NSE 的值越接近 1 表示模型的模拟越精确; R^2 值越接近 1 表示模型对观测数据的拟合越好。

3 结果与分析

3.1 能量闭合度分析及波文比法修正效果

利用 OLS 法从 0.5 h 尺度和日尺度分别评估 2021—2022 年柳林流域涡动相关系统的能量闭合度, 结果如图 2 所示。由图 2 可见, 在 0.5 h 尺度下, 2021 年和 2022 年的 OLS 斜率分别为 0.64 和 0.59,

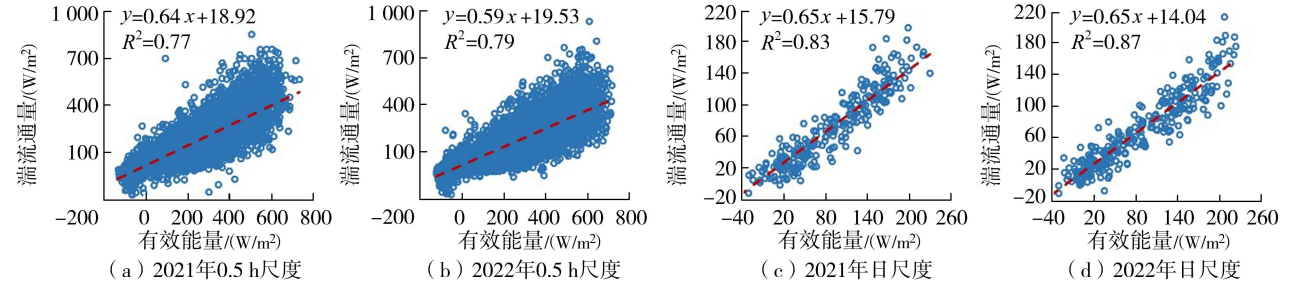


图 2 2021—2022 年柳林流域 0.5h 和日尺度能量闭合度拟合结果

Fig. 2 Fitting results of energy closure degree at 0.5h and daily scales in the Liulin Watershed from 2021 to 2022

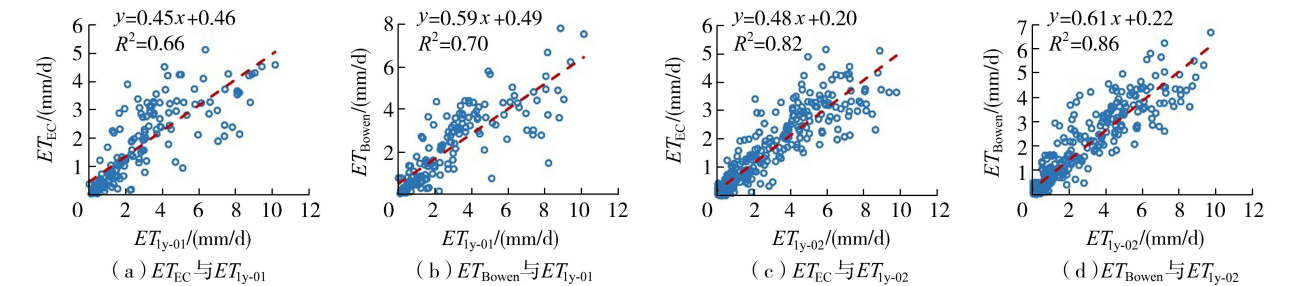


图 3 ET_{EC} 、 ET_{Bowen} 与蒸渗仪实测值对比

Fig. 3 Comparison between ET_{EC} 、 ET_{Bowen} and lysimeter measured evapotranspiration

截距分别为 18.9、19.5 W/m^2 ; 在日尺度下, 2021 年和 2022 年的 OLS 斜率均为 0.65, 截距分别为 15.8、14.1 W/m^2 。对于 EBR 法的计算结果, 2021 年为 0.84, 2022 年为 0.82, 均明显低于理想闭合状态, 表明涡动相关系统观测数据存在较明显的能量不闭合问题。

为验证能量闭合修正后数据的可靠性, 将涡动相关系统观测的蒸散发 (ET_{EC}) 和波文比法能量闭合修正后的蒸散发 (ET_{Bowen}) 分别与两套蒸渗仪实测的蒸散发 (ET_{ly-01} 、 ET_{ly-02}) 进行对比, 结果如图 3 所示。由图 3 (a) (c) 可见, ET_{EC} 与 ET_{ly-01} 的 R^2 为 0.66, 与 ET_{ly-02} 的 R^2 为 0.82, 表明涡动相关系统与蒸渗仪观测数据具有较好的相关性。由于 01 号蒸渗仪未处于通量塔影响的源区内, 其观测值与 ET_{EC} 的一致性相对较差。02 号蒸渗仪实测的 ET_{ly-02} 日均值为 1.88 mm/d, 显著高于 ET_{EC} 的 1.08 mm/d, 表明原始涡动相关系统观测可能低估了潜热通量。由图 3 (b) (d) 可见, 经波文比法进行能量闭合修正后的 ET_{Bowen} 与 ET_{ly-01} 、 ET_{ly-02} 的 R^2 分别提高至 0.70 和 0.86, 较 ET_{EC} 均提升了 0.04, 且 ET_{Bowen} 日均值为 1.32 mm/d, 明显更接近蒸渗仪观测结果, 说明波文比法在一定程度上提高了通量数据的精度与可信度。进一步将 ET_{EC} 、 ET_{Bowen} 、 ET_{ly-02} 进行对比, 由图 4 (a) (b) 可见, 2021 年和 2022 年 ET_{EC} 和 ET_{Bowen} 在年尺度上的变化趋势基本一致; 由图 4 (c) 可见, ET_{Bowen} 相较于 ET_{EC} 更接近 ET_{ly-02} , 进一步验证了采用波文比法进行能量闭合修正在提升潜热通量估算

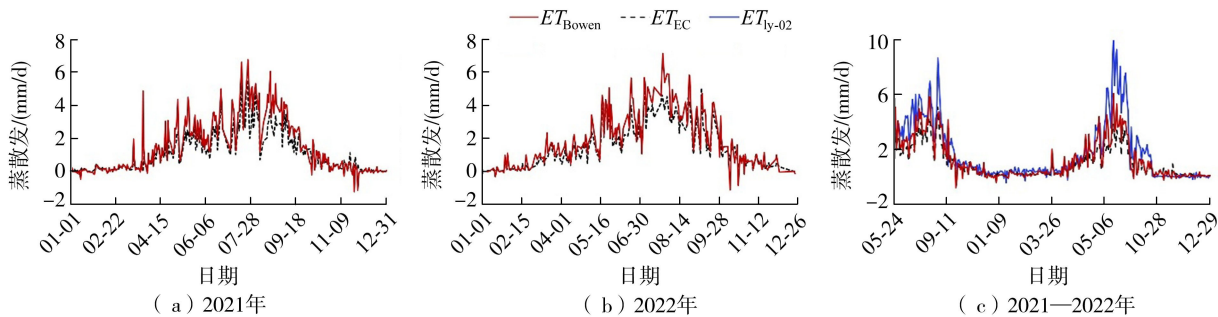


图4 ET_{EC} 、 ET_{Bowen} 与 ET_{ly-02} 对比

Fig. 4 Comparison between ET_{EC} , ET_{Bowen} and ET_{ly-02}

方面的有效性。

3.2 PML 模型参数优化

3.2.1 基于 PSO 算法的参数优化

以 2021—2022 年涡动相关系统经波文比法能量闭合修正后的潜热通量为参考值,数据集的 80% 作为率定集,20% 作为验证集,以 NSE 作为目标函数进行求解。PSO 算法的最大迭代次数和粒子群大小均为 100,惯性权重为 0.5。PSO 算法率定参数范围设置为:土壤蒸发系数 f 为 0~1,最大气孔导度 g_{smax} 为 0~0.16 m/s。参数优化结果见图 5,可见训练集的 NSE 为 0.84,测试集的 NSE 为 0.81。结果表明 PSO 算法的拟合精度和稳定性均较好,优化得到 $f=0.26$, $g_{smax}=0.01$ m/s,为后续基于 PML 模型的蒸散发长期模拟提供参数基础。

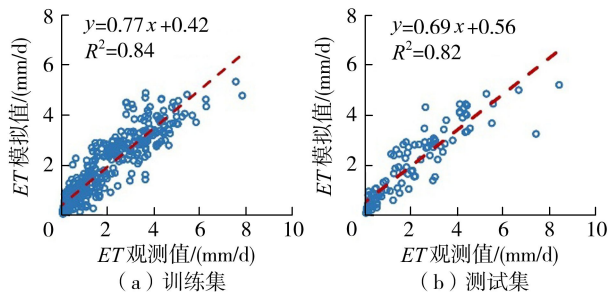


图5 基于 PSO 算法的参数优化结果

Fig. 5 Parameter optimization results based on PSO algorithm

3.2.2 基于 CatBoost 模型的参数优化

柳林流域涡动相关系统通量源区的下垫面主要为农田,主要种植作物为小麦与玉米,参考李茂松等^[34-35]的研究,确定小麦和玉米的最大气孔导度分别为 0.011 m/s 和 0.013 m/s。在确定了最大气孔导度的基础上,基于 2021—2022 年柳林流域气象观测数据、经波文比法修正的潜热通量数据及叶面积指数,结合研究区日尺度土壤蒸发系数时间序列的 PML 模型反演值,选择影响蒸散发过程的单变量(如净辐射、实际水汽压、土壤含水量等)和非线性组合的过程变量(如 s_1 、 s_2 、 s_3 等)作为主要影响因

子,构建土壤蒸发系数 f 与主要影响因子之间的非线性映射关系。基于训练集计算 CatBoost 模型输入变量的特征重要性,采用递归特征消除(RFE)方法,逐步剔除特征重要性较低的变量,最终确定最优输入特征组合。结果表明,当剔除特征重要性排名后六位的变量(ρ 、 ε 、气温、 g_{smax} 、 Δ 、饱和水汽压)后, CatBoost 模型预测性能最优, CatBoost 模型训练集和测试集的预测结果如图 6 所示。由图 6 可见, CatBoost 模型在训练集上对土壤蒸发系数的预测精度较高,其 NSE 与 R^2 均为 0.99;在测试集上 NSE 与 R^2 均为 0.66,表明 CatBoost 模型在土壤蒸发系数的动态估算中具有较好的泛化能力。

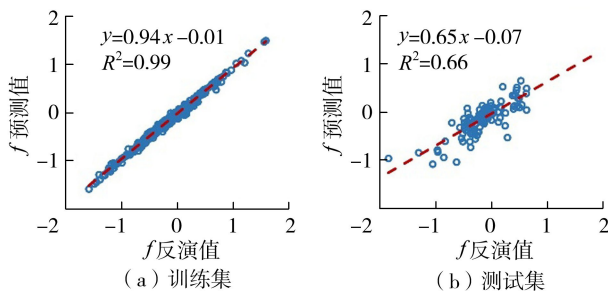


图6 CatBoost 模型训练集和测试集的预测结果

Fig. 6 Prediction results of CatBoost model on training and test sets

3.3 PML 模型验证

基于 PSO 算法优化的土壤蒸发系数和最大气孔导度固定值,所对应的蒸散发模拟结果记为 ET_{PSO} ;基于 CatBoost 模型优化的土壤蒸发系数动态值以及不同土地利用类型指定的最大气孔导度,所对应的蒸散发模拟结果记为 $ET_{CatBoost}$ 。

3.3.1 基于涡动相关系统实测蒸散发的模型验证

为提升高分辨率蒸散发模拟结果的空间精度评价,本文基于涡动相关系统通量源区开展像元尺度的验证分析^[36]。考虑到通量源区空间范围随季节及大气稳定度变化显著,采用 Kljun 等^[37]提出的足迹函数模型解析 2021—2022 年不同季节稳定大气条件下的通量源区分布情况。选取涡动相关系统

80%的通量源区范围作为蒸散发精度验证区域。在此基础上,分别提取 ET_{PSO} 与 $ET_{CatBoost}$ 在验证区域内的值,与 ET_{Bowen} 进行对比分析,结果如图7所示。由图7所示, ET_{PSO} 与 ET_{Bowen} 的 R^2 为0.75,NSE为0.75; $ET_{CatBoost}$ 与 ET_{Bowen} 的 R^2 为0.79,NSE为0.76,并且 $ET_{CatBoost}$ 与 ET_{Bowen} 的拟合斜率更接近1。对比结果表明,基于CatBoost模型的动态土壤蒸发系数,PML模型模拟结果在通量源区范围内表现出更高的模拟精度。综上所述,考虑土壤蒸发系数的动态变化特征,可有效提升PML模型对蒸散发的模拟能力,优于基于土壤蒸发系数固定值的方案。

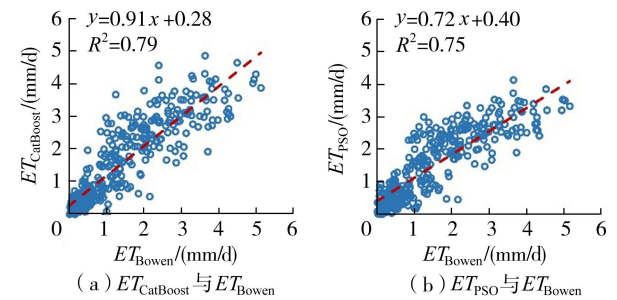


图7 ET_{PSO} 、 $ET_{CatBoost}$ 与 ET_{Bowen} 对比

Fig.7 Comparison between ET_{PSO} 、 $ET_{CatBoost}$ and ET_{Bowen}

3.3.2 基于流域水量平衡方程计算蒸散发的模型验证

进一步基于流域水量平衡法对PML模型的模拟结果进行验证。由于柳林流域面积较小,年尺度储水量变化不大,取为0。将基于流域水量平衡法得到的蒸散发值记为 ET_{WB} ,将其与 $ET_{CatBoost}$ 、 ET_{PSO} 进行对比,结果见图8,可见两种情况下PML模型模拟的蒸散发与水量平衡法估算结果均具有较好的一致性。与 ET_{WB} 相比, $ET_{CatBoost}$ 多年平均值的相对误差为-5.06%, ET_{PSO} 多年平均值的相对误差为-15.02%,表明 $ET_{CatBoost}$ 的模拟精度优于 ET_{PSO} ,进一步说明土壤蒸发系数动态变化取值时,PML模型能够更好地模拟流域蒸散发,因此后续研究基于

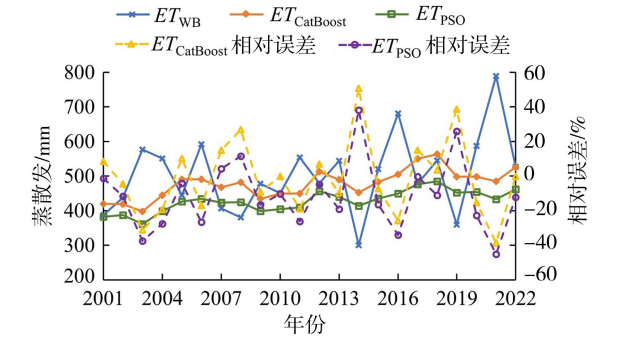


图8 蒸散发模拟值与水量平衡法计算值对比

Fig.8 Comparison between evapotranspiration simulated values and calculated values by water balance method

$ET_{CatBoost}$ 进行。

3.4 柳林流域蒸散发的时空变化特征

3.4.1 时间变化特征

图9为2001—2022年柳林流域蒸散发的年际和年内变化。由图9(a)可见,2001—2022年柳林流域蒸散发呈现波动上升的趋势,线性增长速率达4.6 mm/a。研究期内蒸散发年波动范围为397.5~563.9 mm,其中最低值出现在2003年,最高值出现在2018年,多年平均蒸散发为477.8 mm。由图9(b)可见,柳林流域蒸散发年内变化趋势为先上升后下降,呈现单峰型,月蒸散发变化范围为5.0~86.8 mm,年内蒸散发主要集中在5—8月,该时段蒸散发占全年的67.6%,其中7月达到峰值(86.8 mm),占全年的18.4%。

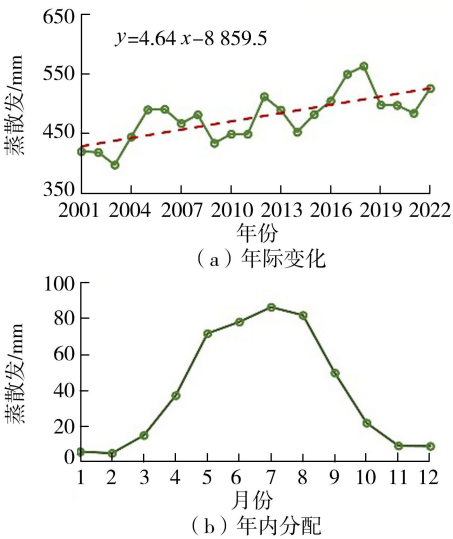


图9 2001—2022年柳林流域蒸散发的年际和年内变化
Fig.9 Interannual and annual change of evapotranspiration in the Liulin Watershed from 2001 to 2022

图10为2001—2022年柳林流域各季节蒸散发的年际变化,可见4个季节的蒸散发均呈现波动上升趋势,春季上升速率为1.60 mm/a,夏季为1.89 mm/a,秋季为1.14 mm/a,冬季为0.02 mm/a。柳林流域蒸散发在季节上分配不均匀,多年平均蒸散发由大到小依次为:夏季、春季、秋季、冬季。其中,春季为124.3 mm,占全年的26.30%;夏季为247.5 mm,占全年的52.38%;秋季为81.1 mm,占全年的17.16%;而冬季仅有19.7 mm,占全年的4.16%。这种差异主要源于柳林流域夏季降水集中,植被生长旺盛,气温较高,日照时间长,显著促进蒸散发,而冬季气温较低,植被凋萎,导致蒸散发最低。

3.4.2 空间分布特征

图11为2001—2022年柳林流域蒸散发多年平

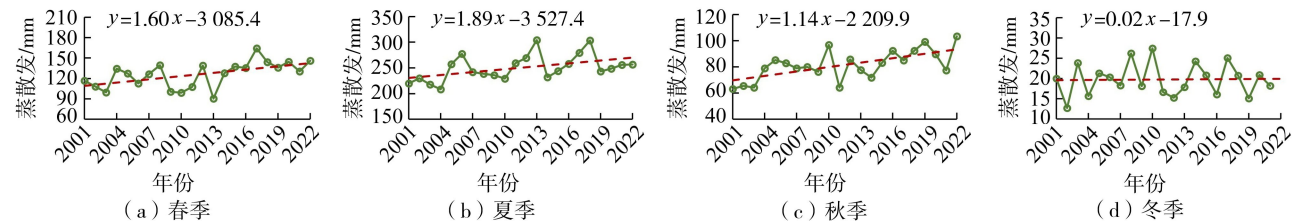


图 10 2001—2022 年柳林流域各季节蒸散发的年际变化

Fig. 10 Interannual change of evapotranspiration in each season of the Liulin Watershed from 2001 to 2022

均值的空间分布,可见流域多年平均蒸散发呈现显著差异性,空间变化范围为 360.6~836.9 mm,整体表现为西北高、东南低的分布格局,沿西北-东南方向呈明显递减趋势。结合柳林流域的土地利用类型分布,统计了 2001—2022 年不同土地利用类型下的蒸散发,如图 12 所示。由图 12 可见,2001—2022 年不同土地利用类型的蒸散发均呈现出波动上升趋势,多年平均值由大到小依次为:林地、草地、农田、建筑用地。西北部林地区域蒸散发最高,变化范围为 524.6~738.3 mm,多年平均值为 627.9 mm,最大值为 836.9 mm;草地与农田区域蒸散发相近,变化范围分别为 386.6~579.9、392.4~543.9 mm,多年平均值分别为 473.4、454.8 mm;建筑用地蒸散发最低,变化范围为 355.9~473.9 mm,多年平均值为 398.7 mm,最小值为 360.6 mm。

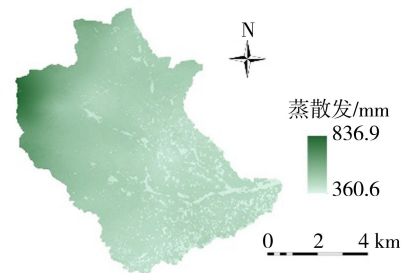


图 11 2001—2022 年柳林流域蒸散发多年平均值的空间分布

的空间分布,可见呈现显著的空间差异性,与流域多年平均值呈现相似的空间分布规律,即西北高、东南低的特点。其中,夏季蒸散发的空间差异性最大,变化范围为 201.5~397.1 mm,冬季蒸散发的空间差异最小,变化范围为 7.0~36.7 mm,春季变化范围为 86.8~259.8 mm,秋季变化范围为 60.0~148.6 mm。

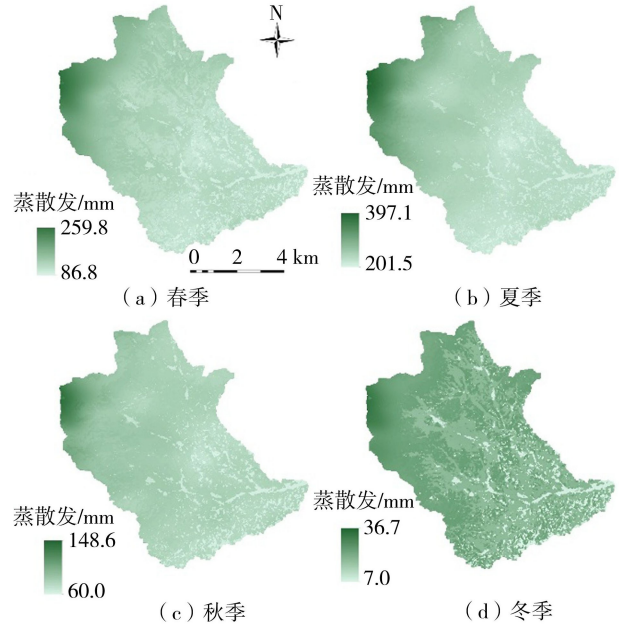


图 13 2001—2022 年柳林流域各季节蒸散发的空间分布
Fig. 13 Spatial distribution of evapotranspiration in each season of the Liulin Watershed from 2001 to 2022

4 讨论

本文 PML 模型模拟得到的 2001—2022 年柳林流域多年平均蒸散发为 477.8 mm,与李建柱等^[38]基于作物系数和归一化差异植被指数 (NDVI) 的 PM 模型模拟结果相比,多年平均蒸散发相对偏低,但年蒸散发均呈上升趋势。不同土地利用类型的蒸散发方面,本文 PML 模型模拟得到的林地、草地、农田、建筑用地多年平均蒸散发分别为 627.9、473.4、454.8、398.7 mm。王林娜等^[39]基于高精度 PML-V2 遥感产品得到的华北平原多年平均蒸散发为 588.1 mm,其中农业用地为 590.0 mm,城市用地为 526.0 mm;王俊峰等^[40]在子牙河流域计算的多年平均年蒸散发为 520.3 mm,其中林地、草地、城镇、农

Fig. 11 Spatial distribution of multi-year average evapotranspiration in the Liulin Watershed from 2001 to 2022

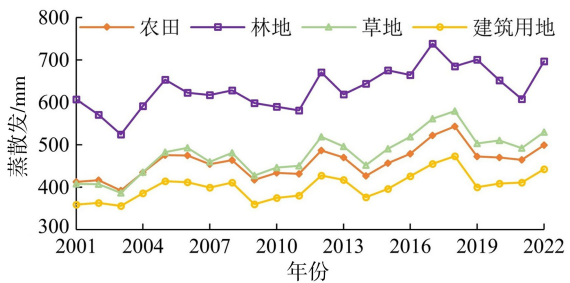


图 12 2001—2022 年柳林流域不同土地利用类型的蒸散发
Fig. 12 Interannual variation of evapotranspiration under different land cover types

图 13 为 2001—2022 年柳林流域各季节蒸散发

田分别为 638.8、554.8、511.0、492.8 mm。建筑用地年蒸散发与农田相差较小,可能是因为年尺度上,农田蒸散发主要发生在小麦和玉米生长季,而建筑用地蒸散发(包括绿地蒸腾和不透水表面蒸发)全年比较稳定。

机器学习模型的样本容量对模拟结果具有一定的影响,本文 CatBoost 模型训练样本为 565,土壤蒸发系数模拟结果的 R^2 和 NSE 均为 0.66;Hao 等^[41]使用随机森林模型估算作物蒸散发的训练样本为 598,模拟结果在 3 个 FLUXNET 站点的 R^2 分别为 0.63、0.73、0.67,与本文结论相似。Ouyang 等^[42]使用深度学习模型进行径流预测的结果表明,小数据集验证期的 NSE 为 0.69。由于机器学习模型在预测中的性能通常受到高质量训练数据稀缺的限制^[43-45],在未来的研究中可以考虑通过数据增强的方法扩充数据量,进一步提升模型的性能。

本文还基于 Zhang 等^[25]提出的土壤蒸发系数计算方法,通过计算日降水量 P 与日土壤平衡蒸发率 E_{eq} 的比值来估算土壤蒸发系数。累计时段设置为 16d,即通过第 i 天及前 15d 的 P 和 E_{eq} 计算每日土壤蒸发系数值,基于该方法模拟得到的蒸散发记为 ET_{Zhang} 。另外,基于日尺度的 PML-V2 蒸散发产品^[46],采用柳林流域边界对 PML-V2 蒸散发数据进行空间裁剪,获得流域尺度蒸散发量,记为 ET_{PML-V2} 。由于 PML-V2 产品仅到 2020 年,在不同方法估算蒸散发对比分析时选用 2001—2020 年时间段,结果如图 14 所示。由图 14 可见,在多数年份 $ET_{CatBoost}$ 、 ET_{PML-V2} 和 ET_{Zhang} 较为一致,但在极端降水年份 $ET_{CatBoost}$ 比 ET_{PML-V2} 和 ET_{Zhang} 与 ET_{WB} 的误差更小。2001—2020 年 ET_{WB} 、 $ET_{CatBoost}$ 、 ET_{PML-V2} 、 ET_{Zhang} 多年平均值分别为 487.8、475.1、472.7、440.3 mm。与 ET_{WB} 相比, $ET_{CatBoost}$ 、 ET_{PML-V2} 和 ET_{Zhang} 相对误差分别为 -2.6%、-3.1%、-9.7%。

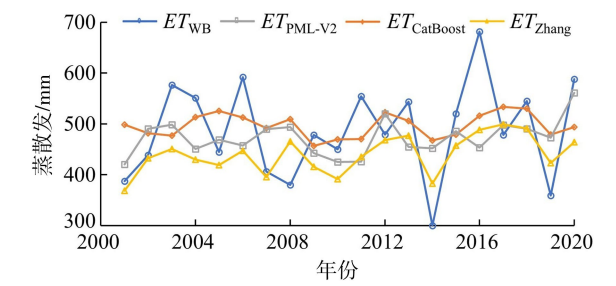


图 14 2001—2020 年柳林流域不同方法计算的蒸散发
Fig. 14 Evapotranspiration calculated by different methods in the Liulin Watershed from 2001 to 2020

5 结 论

a. 基于柳林流域涡动相关系统的能量观测数

据,评价了涡动相关系统的能量闭合度,采用波文比法对能量通量进行了闭合修正。2021 年和 2022 年基于 OLS 法的 0.5h 尺度能量闭合度分别为 0.64 和 0.59,日尺度能量闭合度均为 0.65,基于 EBR 法的能量闭合度分别为 0.84 和 0.82。采用波文比法进行能量闭合修正后,涡动相关系统蒸散发与蒸渗仪观测值拟合结果的 R^2 提升了 0.04。

b. 采用 PSO 算法与 CatBoost 模型分别对 PML 模型中的土壤蒸发系数进行了优化。与 ET_{Bowen} 相比, ET_{PSO} 与 $ET_{CatBoost}$ 的 R^2 分别为 0.79 和 0.75, NSE 分别为 0.76 和 0.75;与 ET_{WB} 相比, ET_{PSO} 与 $ET_{CatBoost}$ 的相对误差分别为 -5.06% 和 -15.02%。动态调整土壤蒸发系数可使 PML 模型模拟精度显著提升。

c. 2001—2022 年柳林流域蒸散发整体呈波动上升趋势,变化范围为 397.5~563.9 mm,多年平均值为 477.8 mm。月蒸散发呈单峰型,7 月达到最大。空间分布上,蒸散发表现出显著差异,西北部较高,东南部较低。不同土地利用类型蒸散发年际变化趋势相似,多年平均值由大到小依次为:林地、草地、农田、建筑用地。

参考文献:

[1] 李哈,陈哈,黄津辉,等. 区域遥感双源蒸散发模型研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 87-94. (Li Han, Chen Han, Huang Jinhui, et al. Research progress on dual-source evapotranspiration models based on regional remote sensing[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 87-94. (in Chinese))

[2] Glenn E P, Huete A R, Nagler P L, et al. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2007, 26(3): 139-168.

[3] Huxman T E, Wilcox B P, Breshears D D, et al. Ecohydrological implications of woody plant encroachment[J]. Ecology, 2005, 86(2): 308-319.

[4] 鞠艳,张珂,李炳锋,等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 104-110. (Ju Yan, Zhang Ke, Li Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Jinsha River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 104-110. (in Chinese))

[5] 鞠琴,刘小妮,刘娣,等. 基于遥感和通量观测的实际蒸散发时空变化特征:以黄河流域水源涵养区为例[J]. 水科学进展, 2024, 35(2): 338-347. (Ju Qin, Liu Xiaoni, Liu Di, et al. Spatiotemporal variation characteristics of actual evapotranspiration based on

- remote sensing and flux observations: case study in the water conservation area of the Yellow River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35 (2): 338-347. (in Chinese))
- [6] 周彦昭,李新. 涡动相关能量闭合问题的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(9): 898-913. (Zhou Yanzhao, Li Xin. Progress in the energy closure of eddy covariance systems [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (9): 898-913. (in Chinese))
- [7] 邵久,王伟,徐敏,等. 基于机器学习算法和能量闭合理论的高标准稻田蒸散估算[J]. *中国农业气象*, 2024, 45 (10): 1109-1122. (Tai Jiu, Wang Wei, Xu Min, et al. Simulation of evapotranspiration in a well-facilitated paddy field based on machine learning algorithms and energy balance closure [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(10): 1109-1122. (in Chinese))
- [8] Ding Risheng, Kang Shaozhong, Li Fusheng, et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 87-95.
- [9] 李炳锋,张珂,鞠艳,等. 金沙江流域实际蒸散发 GRACE 重力卫星遥感重构不确定性分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 159-166. (Li Bingfeng, Zhang Ke, Ju Yan, et al. Uncertainty analysis of actual evapotranspiration reconstructed with GRACE gravity satellite data in the Jinsha River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 159-166. (in Chinese))
- [10] Monteith J L. Evaporation and environment [J]. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965, 19: 205-234.
- [11] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1: formulation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 198-212.
- [12] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111(469): 839-855.
- [13] Carlson T N, Capehart W J, Gillies R R. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(2): 161-167.
- [14] 焦醒,刘广全,匡尚富,等. Penman-Monteith 模型在森林植被蒸散研究中的应用[J]. *水利学报*, 2010, 41(2): 245-252. (Jiao Xing, Liu Guangquan, Kuang Shangfu, et al. Review on application of Penman-Monteith equation to studying forest vegetation evapotranspiration [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41 (2): 245-252. (in Chinese))
- [15] 陈永喆,崔艳红,张才金,等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2): 141-149. (Chen Yongzhe, Cui Yanhong, Zhang Caijin, et al. Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40 (2): 141-149. (in Chinese))
- [16] 王芊予,粟晓玲,褚江东,等. 基于 GRACE 数据重建的黄河流域实际蒸散发及其时空演变特征分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40 (5): 112-121. (Wang Qianyu, Su Xiaoling, Chu Jiangdong, et al. Analysis of actual evapotranspiration and its spatio-temporal evolution characteristics in the Yellow River Basin based on GRACE data reconstruction [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5): 112-121. (in Chinese))
- [17] Ruiz-Ortega F J, Clemente E, Martínez-Rebollar A, et al. An evolutionary parsimonious approach to estimate daily reference evapotranspiration [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 6736.
- [18] 吴绍飞,姜烈. Budyko 框架下基于多种潜在蒸散发公式的径流演变归因:以博阳河梓坊站为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2025, 36(3): 35-44. (Wu Shaofei, Jiang Lie. Attribution analysis of runoff evolution using different potential evapotranspiration formulas based on Budyko equations: a case study of Zifang Station, Boyang River Basin [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2025, 36(3): 35-44. (in Chinese))
- [19] Mu Qiaozhen, Heinsch F A, Zhao Maosheng, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [20] Leuning R, Zhang Yongqiang, Rajaud A, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44 (10): W10419.
- [21] 钟昊哲,徐宪立,张荣飞,等. 基于 Penman-Monteith-Leuning 遥感模型的西南喀斯特区域蒸散发估算[J]. *应用生态学报*, 2018, 29 (5): 1617-1625. (Zhong Haozhe, Xu Xianli, Zhang Rongfei, et al. MODIS-driven estimation of regional evapotranspiration in Karst area of Southwest China based on the Penman-Monteith-Leuning algorithm [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1617-1625. (in Chinese))
- [22] 李红霞,张永强,张新华,等. 遥感 Penman-Monteith 模型对区域蒸散发的估算[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(4): 457-461. (Li Hongxia, Zhang Yongqiang, Zhang Xinhua, et al. Estimation of regional transpiration and evaporation using Penman-Monteith equation [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(4): 457-461. (in Chinese))
- [23] Li Fawen, Cao Runxiang, Zhao Yong, et al. Remote sensing

- Penman-Monteith model to estimate catchment evapotranspiration considering the vegetation diversity [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 127 (1/ 2): 111-121.
- [24] Yang Yongmin. Estimating actual evapotranspiration across China by improving the PML algorithm with a shortwave infrared-based surface water stress constraint [J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 318: 114544.
- [25] Zhang Yongqiang, Leuning R, Hutley L B, et al. Using long-term water balances to parameterize surface conductances and calculate evaporation at 0. 05° spatial resolution [J]. Water Resources Research, 2010, 46 (5): W05512.
- [26] Morillas L, Leuning R, Villagarcía L, et al. Improving evapotranspiration estimates in mediterranean drylands: the role of soil evaporation [J]. Water Resources Research, 2013, 49 (10): 6572-6586.
- [27] 吴友杰, 杜太生. 西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2020, 36 (12): 110-116. (Wu Youjie, Du Taisheng. Evaporation and its influencing factors in farmland soil in the arid region of Northwest China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (12): 110-116. (in Chinese))
- [28] 薛联青, 陈雨欣, 刘远洪, 等. 基于机器学习的 Budyko 框架流域时变特征参数估计 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (4): 10-18. (Xue Lianqing, Chen Yuxin, Liu Yuanhong, et al. Estimation of watershed time-varying feature parameter in Budyko framework based on machine learning [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 10-18. (in Chinese))
- [29] 陈志月, 吴立峰, 刘小强, 等. 基于 GPR、CatBoost、XGBoost 三种模型预测江西地区水面蒸发量 [J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31 (6): 116-125. (Chen Zhiyue, Wu Lifeng, Liu Xiaoqiang, et al. Prediction of pan evaporation of Jiangxi Province using GPR, CatBoost and XGBoost models [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31 (6): 116-125. (in Chinese))
- [30] Zhang Yixiao, Zhao Zhongguo, Zheng Jianghua. CatBoost: a new approach for estimating daily reference crop evapotranspiration in arid and semi-arid regions of northern China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125087.
- [31] Huang Guomin, Wu Lifeng, Ma Xin, et al. Evaluation of CatBoost method for prediction of reference evapotranspiration in humid regions [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 1029-1041.
- [32] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2004, 34 (增刊 2): 46-56. (Li Zhengquan, Yu Guirui, Wen Xuefa, et al. Energy balance closure at ChinaFLUX sites [J]. Scientia Sinica Terrae, 2004, 34 (Sup2): 46-56. (in Chinese))
- [33] Franks P J, Drake P L, Beerling D J. Plasticity in maximum stomatal conductance constrained by negative correlation between stomatal size and density: an analysis using *Eucalyptus globulus* [J]. Plant, Cell & Environment, 2009, 32 (12): 1737-1748.
- [34] 李茂松, 王春艳, 宋吉青, 等. 小麦进化过程中叶片气孔和光合特征演变趋势 [J]. 生态学报, 2008, 28 (11): 5385-5391. (Li Maosong, Wang Chunyan, Song Jiqing, et al. Evolutional trends of leaf stomatal and photosynthetic characteristics in wheat evolutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (11): 5385-5391. (in Chinese))
- [35] 殷嘉伟. CO₂ 浓度升高和水分亏缺对玉米气孔特征、气体交换参数及生化特性的影响 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- [36] Liu Shaomin, Xu Ziwei, Song Lisheng, et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 230-231: 97-113.
- [37] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, et al. A simple parameterisation for flux footprint predictions [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 112 (3): 503-523.
- [38] 李建柱, 逯清, 张婷, 等. 基于 K_e 和 NDVI 关系的蒸散发量空间尺度提升及时空变化 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2023, 21 (3): 417-426. (Li Jianzhu, Lu Qing, Zhang Ting, et al. Spatial scaling up and spatiotemporal variation of evapotranspiration based on K_e and NDVI [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21 (3): 417-426. (in Chinese))
- [39] 王林娜, 韩淑敏, 李会龙, 等. 华北平原蒸散发变化及对植被生产力的响应 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2022, 30 (5): 735-746. (Wang Linna, Han Shumin, Li Huilong, et al. Variation of evapotranspiration and its response to vegetation productivity in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30 (5): 735-746. (in Chinese))
- [40] 王俊峰, 李建柱, 张佩, 等. 子牙河流域蒸散发时空变化及其影响因素分析 [J]. 水文, 2024, 44 (5): 75-83. (Wang Junfeng, Li Jianzhu, Zhang Pei, et al. Temporal and spatial variation of evapotranspiration and its influencing factors in Ziya River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44 (5): 75-83. (in Chinese))
- [41] Hao Pengyu, Di Liping, Guo Liying. Estimation of crop evapotranspiration from MODIS data by combining random forest and trapezoidal models [J]. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107249.
- [42] Ouyang Wenyu, Zhang Chi, Ye Lei, et al. Dive into transfer-learning for daily rainfall-runoff modeling in data-limited basins [J]. Journal of Hydrology, 2025, 657: 133063.

[43] Xu Wenxin, Chen Jie, Corzo G. Combining data augmentation and hybrid modeling approaches for deep learning-based monthly streamflow forecasting[J]. Journal of Hydrology,2025,659:133318.

[44] Kratzert F, Klotz D, Brenner C, et al. Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(11):6005-6022.

[45] 贾玉雪,张奇,曾冰茹,等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 8-16. (Jia Yuxue, Zhang Qi, Zeng Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 8-16. (in Chinese))

[46] He Shaoyang, Zhang Yongqiang, Ma Ning, et al. A daily and 500 m coupled evapotranspiration and gross primary production product across China during 2000-2020[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5463-5488. (收稿日期:2025-05-08 编辑:王芳)

+++++

(上接第 31 页)

[101] DelSontro T, Boutet L, St-Pierre A, et al. Methane ebullition and diffusion from northern ponds and lakes regulated by the interaction between temperature and system productivity[J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61(S1): S62-S77.

[102] 秦宇,黄璜,李哲,等. 内陆水体好氧甲烷氧化过程研究进展[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1004-1017. (Qin Yu, Huang Huang, Li Zhe, et al. Research progress of aerobic methane oxidation process in inland waters[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 1004-1017. (in Chinese))

[103] 杨可昀,宋海亮,黄诗蓓,等. 根系分泌物调控对人工湿地去除雌激素的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 59-66. (Yang Keyun, Song Hailiang, Huang Shibei, et al. Influence of different root exudates on steroidal estrogen removal in constructed wetlands [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 59-66. (in Chinese))

[104] 郭小熙,田鹏飞,孙杨,等. 工业有机废水深度处理:非均相 Fenton 催化剂研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(2): 605-620. (Guo Xiaoxi, Tian Pengfei, Sun Yang, et al. Tertiary treatment of industrial organic wastewater: development of heterogeneous Fenton catalysts [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(2): 605-620. (in Chinese))

[105] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等. 洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 122-130. (Lu Shuaishuai, Zhou Nianqing, Cai Yi, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 122-130. (in Chinese))

[106] 邱英英,郑西来,刘乐成,等. 干湿交替频率影响下非饱和带有机氮转化的生物学机制[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 242-250. (Qiu Yingying, Zheng Xilai, Liu Lecheng, et al. Biological mechanism of dry-wet alternation frequency affecting organic nitrogen transformation in vadose zone [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 242-250. (in Chinese))

[107] 兰梓溶,清江,陈有为,等. 金属有机框架材料 MIL-101 在吸附去除水中有机污染物中的应用进展[J]. 分析测试学报, 2024, 43(4): 654-662. (Lan Zirong, Qing Jiang, Chen Youwei, et al. Research progress of adsorption and removal of organic pollutants in water by metal-organic framework MIL-101 [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(4): 654-662. (in Chinese))

[108] Brachi M, El Housseini E, Beaver K, et al. Advanced electroanalysis for electrosynthesis[J]. ACS Organic & Inorganic Au, 2024, 4(2): 141-187.

[109] 张璧洁,杨奎,张众. 基于耦合电氧化-还原的反应性电化学膜工艺处理高含氯难处理工业废水[J]. 环境工程学报, 2024, 18(6): 1582-1592. (Zhang Bijie, Yang Kui, Zhang Zhong. Treatment of high chlorine-containing refractory industrial wastewater using reactive electrochemical membrane coupled with electro-oxidation and reduction processes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(6): 1582-1592. (in Chinese))

[110] 何晨,何丁,陈春茂,等. 傅里叶变换离子回旋共振质谱在溶解性有机质组成分析中的应用[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(12): 2323-2341. (He Chen, He Ding, Chen Chunmao, et al. Application of Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry in molecular characterization of dissolved organic matter [J]. Scientia Sinica Terrae, 2022, 52(12): 2323-2341. (in Chinese))

[111] Lowe M, Qin Ruwen, Mao Xinwei. A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring[J]. Water, 2022, 14(9): 1384. (收稿日期:2025-09-11 编辑:王芳)