

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221632

红河流域(中国部分)潜在蒸散发估算方法适用性评价

张继辉^{1a}, 陈俊旭^{1a, 1b}, 范云江^{1a}, 童健航^{1a}, 杨馥熔^{1a}, 胡智文², 邵毕涛³

(1. 云南大学 a. 地球科学学院; b. 国际岩溶联合研究中心, 云南 昆明 650500; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000; 3. 云南省地矿测绘院, 云南 昆明 650011)

摘要: 蒸散发是地表—大气系统能量交换的核心过程,在复杂地形条件下选择合适方法对其精确估算是揭示该区域陆气耦合机理的基础和难题。基于红河流域(中国部分)25个站点60年气象资料,以FAO56-Penman-Monteith方法为基准,M-K检验和泰勒图为主要依据,从五个方面评估8种潜在蒸散发估算方法的适用性。结果表明,辐射类方法中的Hargreaves、Priestley-Taylor法适用性最好,估算结果与FAO接近($R^2 \approx 0.9$),Makkink、Abtew法次之;温度类方法中Linacre法优于McCloud法;质量传输类方法中Rohwer、Penman法较差。研究结果不仅为红河流域(中国部分)提供了高适应性蒸散发估算方法,同时揭示了流域PET时空分布特征。

关键词: 潜在蒸散发; 辐射法; 温度法; 质量传输法; 红河流域

中图分类号: P333; [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0008-04

1 概况

红河流域是流经中国、越南和老挝的国际河流,位于中国西南地区的纵向岭谷区,处在热带、亚热带交界处,植被覆盖率高且类型丰富。流域处在印度洋季风与太平洋季风交界处,表现出典型的季风气候,5~10月为湿季,平均气温为27~29℃,85%~90%的降水集中在湿季;干季平均气温约16~21℃,降水极少。流域地形差异大,主要地貌类型为山地和半山地,平原地区占总流域面积不到5%,流域内海拔由西北向东南逐渐降低,最高达3312m,最低只有17m,复杂的地形条件使得流域不同地区的气候条件差异很大^[1]。蒸散发不仅是地表—大气系统中能量交换的一个核心过程,而且在水循环过程中也发挥着重要作用^[2]。蒸散发的时空变化对农牧业生产规划、生态环境修复与保护、水资源综合管理及环境污染治理等重要方面都有直接影响^[3]。潜在蒸散发(PET)指大气环境最大蒸发需求,是准确估算实际蒸散发的前提,因此研究PET十分必要。然

而目前从不同时空尺度对PET适用性在复杂地形和气象站点稀疏地区开展的研究较少。对此,本文使用红河流域(中国部分)(图1)25个气象站点1960~2020年间气象观测资料,以FAO56-PM方程为基准,从年内变化、年代变化、年代际变化、趋势变化及空间分布等五个方面,评估Priestley-Taylor、Hargreaves、Makkink、Abtew等辐射类方法及McCloud、Linacre等温度类方法、Penman、Rohwer等质量传输类方法共8种PET估算方法在此流域的适用性,为红河流域在缺少气象资料的情况下PET方法的选取提供选

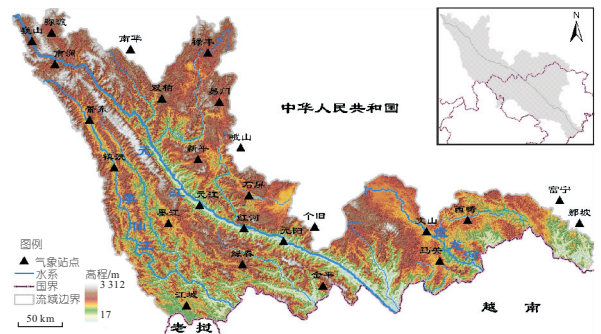


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

收稿日期: 2022-08-08, **修回日期:** 2022-09-22

基金项目: 云南省基础研究计划项目(2019FB145);国家自然科学基金项目(42161006,41701039);中国地质调查局项目(DD20221824);云南省高层次人才青年拔尖人才专项(WX069051)

作者简介: 张继辉(1997-),男,硕士研究生,研究方向为蒸散发模拟,E-mail:zjh15rs@gmail.com

通讯作者: 陈俊旭(1984-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为水土资源过程模拟,E-mail:chenjunxu@ynu.edu.cn

择依据,同时揭示流域 PET 时空分布特征。

2 数据与方法

2.1 数据来源

气象数据来自中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)^[4],涉及 25 个气象站点,主要参数有风速(m/s)、日照时数(h)、最高气温(°C)、最低气温(°C)、相对湿度(%)、平均气压(Pa)等。

2.2 研究方法

(1)潜在蒸散发估算方法。选取较为通用的潜在蒸散发计算方法(表 1),包括两种温度法、两种质量传输法及四种辐射法。PET 参考值 P 由 FAO56-Penman-Monteith 方法计算得到^[5]。

表 1 不同 PET 估算方法^[6]

Tab. 1 PET estimation methods

分类	估算方法	公式
综合法	FAO56-PM	$P = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34)u_2}$
温度法	McCloud	$P = \alpha W^{1.87T}$
	Linacre	$P = \frac{500T_m / (100 - \varphi) + 15(T - T_d)}{80 - T_a}$
质量传输法	Penman	$P = \alpha(1 + 0.27u_2)(e_s - e_a)$
辐射法	Rohwer	$P = \alpha(1 + 0.98u_2/100)(e_s - e_a)$
	Abteu	$P = \alpha R_s / \lambda$
	Hargreaves	$P = \alpha(T + 17.8)R_s / \lambda$
	Makkink	$P = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$
	Priestley-Taylor	$P = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda}$

(2)Mann-Kendell 检验法

假定数据序列由 X_1, X_2, \dots, X_n 组成。为验证假设是否成立,需检验数据变化情况,假设检验统计量 S 定义为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中,sgn 为符号函数。

统计量 S 的均值 $E(S)$ 和方差 $\text{Var}(S)$ 分别为:

$$E(S) = 0 \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

验证假设成立的标准化统计量 Z 为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

本研究采用 0.01 的显著性水平,即当 $|Z| > 2.32$ 时视为通过显著性检验。

在 M-K 突变检验中,对于时间序列 X_i ,构造秩序列 r_i 表示 $X_i > X_j (1 \leq j \leq i)$ 的样本累计数,定义 S_k 为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (5)$$

$$\text{其中 } r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i$$

假设时间序列随机独立,则定义统计量 U_{UF_k} 为:

$$U_{UF_k} = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$$\text{其中 } E(S_k) = n(n+1)/4$$

$$\text{Var}(S_k) = n(n-1)(2n+5)/72$$

式中, U_{UF_k} 为标准正态分布量; $E(S_k)$ 为 S_k 的均值; $\text{Var}(S_k)$ 为 S_k 的方差。

获得 U_{UF_k} 后,将时间序列 X_i 按照逆序排列,再重复式(5)、(6),可得新的统计量 $U_{UB_k} (U_{UB_k} = -U_{UF_k}, k = n, n-1, \dots, 1)$ 。当 U_{UF_k} 和 U_{UB_k} 出现交点且位于置信区间内时,说明时间序列 X_i 在此刻发生了突变。

(3)评价指标。为客观比较不同 PET 估算方法的适用性,使用方差(S_{SD})、相关系数(R)、平均绝对误差(M_{MAE})和中心均方根误差(R_{RMSD})等四种指标衡量不同方法与 FAO 的差异:

$$S_{SD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (7)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

$$M_{MAE} = \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (9)$$

$$R_{RMSD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (10)$$

式中, n 为 PET 总数; X 为被检验 PET; Y 为 FAO; \bar{X} 为 PET 平均值; \bar{Y} 为 FAO 平均值。

3 结果与分析

3.1 不同 PET 估算方法对比

对比 1960~2020 年间 8 种 PET 估算方法与 FAO 的计算结果可知,Hargreaves 法与 FAO 的计算结果最为接近,Penman 法与 FAO 差距最大。辐射类方法整体精度最高, R^2 均可达到 0.7 以上;其中 Hargreaves、Priestley-Taylor 法精度优于 Makkink、Abteu 法。温度法中,Linacre 法精度高于 McCloud 法,二者相对 FAO 均存在高估。

质量传输类方法的 Rohwer、Penman 法精度较差,且存在明显低估。

(1)年内变化比较。由不同 PET 估算方法的年内变化可知,FAO 年内差异较大,最大值出现在 5 月,最小值出现在 11 月(表 2)。除 Abtew 法外,辐射类方法最大值出现在 5 月。温度法中,McCloud 法的最高值出现在 7 月,Linacre 法出现在 5 月。质量传输法的最大值则均出现在 4 月。辐射法中的 Priestley-Taylor 法和 Makkink 法最小月份与 FAO 一致,Hargreaves 法出现在 12 月,Abtew 法则提前到 10 月。温度法中,Linacre 法的最小值出现在 12 月,而 McCloud 法出现在 1 月。质量传输的两种方法的最小值均出现在 12 月。辐射法不同站点差异较大,有部分站点存在低估。

区间)可知,1960~2020 年间 FAO 呈增长趋势,Hargreaves、Priestly-Taylor、Makkink、Linacre 法表现出相似特征。7 种 PET 方法均表现出上升趋势,而 Abtew 法则呈下降趋势,温度法的趋势较为明显。质量传输法不同年代差异较小,且远低于其他方法。

(3)M-K 突变检验结果比较。由 M-K 突变检验结果可知,FAO 的突变时间为 2008 年左右。辐射法中的 Abtew、Makkink 法不能识别突变点;Haracre 法的突变发生时间早于 FAO 的突变发生时间,为 2005 年左右;Priestley-Taylor 法与 FAO 法的突变时间一致。Linacre 法的突变发生在 2001 年左右,而 McCloud 法的突变发生在 2003 年左右,但二者的突变点位于置信区间外,可信度低。质量传输的两种方法中,Penman 法的突变发生在 2004 年左右,Rohwer 法的突变发生在 2005 年左右。

时间尺度变化特征比较显示,Harareaves、Priestly-Taylor 法计算结果与 FAO 相近,时间特征与 FAO 相似,能够得到与 FAO 相近的 M-K 突变点和变化曲线,适用性更好。其他方法与 FAO 相差较大。

3.2 空间分布特征

由不同 PET 计算方法空间分布状况及趋势变化(图 3)可知,17 个站点的 FAO 呈增加趋势,有 7 个通过了显著性检验;剩余站点中仅有 1 个下降趋势较显著。辐射类方法中,Hargreaves、Priestly-Taylor、Abtew、Makkink 法分别有 21、20、14、20 个站点呈上升趋势。温度法中只有流域东北部的一个站点的 Linacre 法出现下降,其余均呈上升趋势,趋势显著的站点有 18 个(McCloud 法为 22 个)。质量传输的两种方法中,Rohwer 法有 4 个站点出现下降趋势,Penman 法则只有 2 个站点出现下降趋势。FAO 从西北部向东南方向递减,较高的地区主要分布在流域西北部和中央的河谷地区,低值区主要集中在流域东南部,具有显著的空间差异。除 McCloud 法外,不同的 PET 计算方法的空间分布特征与 FAO 相似。

以 R_{RMSD} 、 S_{SD} 、 R 三个指标构建泰勒图,挑选位于流域西北部的巍山站、东北部的禄丰站、中部的红河站、西南部的江城站、东部的马关站和富宁站等 6 个典型站点评估不同地区 PET 估算方法适用性(图 4)。红河流域(中国部分)表现较好的是辐射类方法,其次是 Linacre 法和质量传输类方法,McCloud 法的表现最差。典型站点中,辐

表 2 不同 PET 估算方法的年内最大值和最小值
Tab. 2 Intra-year maximum and minimum values for different PET estimation methods

方法	PET 最大值 /(mm·月 ⁻¹)	PET 最小值 /(mm·月 ⁻¹)
FAO	123.63(5月)	68.63(11月)
Hargreaves	128.00(5月)	76.73(12月)
Priestly-Taylor	131.98(5月)	79.29(11月)
Makkink	102.37(5月)	66.02(11月)
Abtew	126.90(3月)	87.33(10月)
McCloud	141.35(7月)	36.86(1月)
Linacre	150.88(5月)	81.68(12月)
Penman	19.42(4月)	6.77(12月)
Rohwer	10.22(4月)	3.87(12月)

(2)年代际变化比较。不同 PET 方法年代际变化情况见图 2,(图中虚线为趋势线,虚线两侧的阴影区域及弯曲的实线表示趋势的 95% 置信

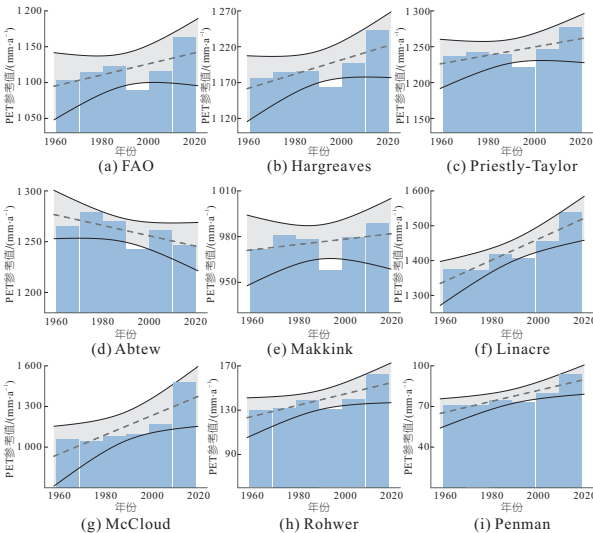


图 2 不同 PET 估算方法的年代际变化比较

Fig. 2 Comparison of interdecadal variation for different PET estimation methods

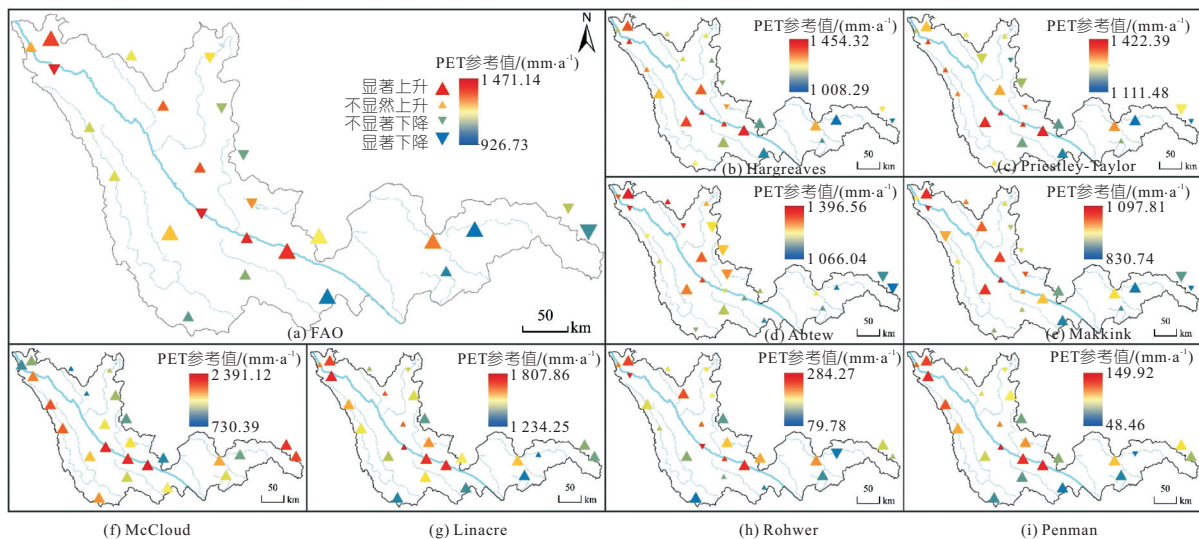


图 3 1960~2020 年不同 PET 估算方法的空间分布和时间趋势

Fig. 3 Spatial distribution and temporal trends of different PET estimation methods from 1960 to 2020

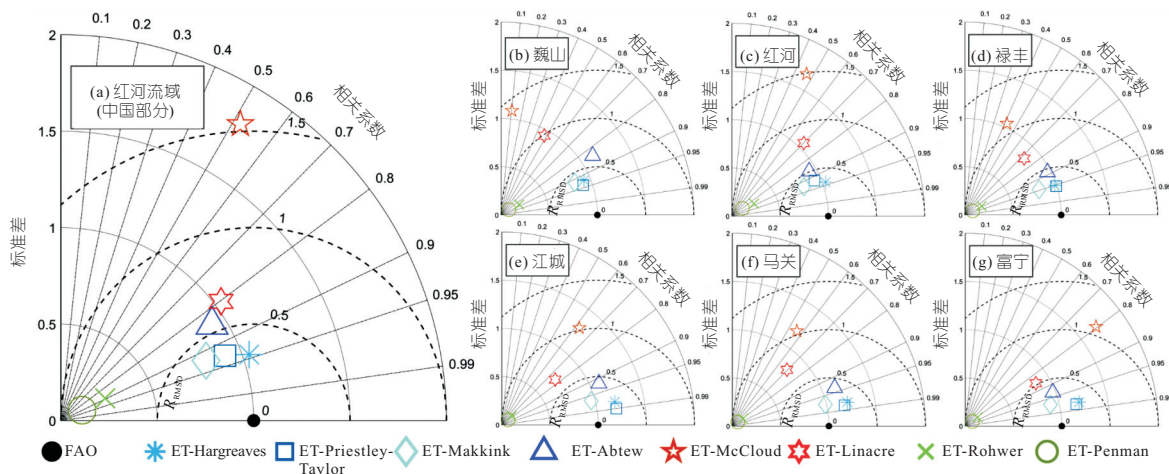


图 4 不同 PET 估算方法典型站点与流域平均值适用性评价的泰勒图

Fig. 4 Taylor diagram of selected stations applicability evaluation for different PET methods

射类方法的适用性优于其他方法。巍山站不同方法适用性整体较差;禄丰站、江城站、马关站、富宁站等站点泰勒图相似,即辐射类方法表现最好,温度类方法 R 较低,质量传输类方法 R_{RMSD} 较高;红河站的泰勒图与流域整体情况基本一致。

4 结论

8 种 PET 估算方法中, Hargreaves、Priestley-Taylor 法计算结果与 FAO 最为接近,时间变化趋势相同,多尺度变化特征相似,空间分布特征基本一致,且在泰勒图中与 FAO 距离最近,是适用性最好的 PET 估算方法;Makkink、Linacre 法适用性次之;Abtew 法在时间趋势上与 FAO 相反,McCloud 法存在严重高估, Penman、Rohwer 法则存在严重低估,此 4 种方法在红河流域(中国部分)适用性较差。

参考文献:

- [1] 陈俊旭, 赵红玲, 吕燕, 等. 红河流域径流演变分异及其特征[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 22-26.
- [2] TU Z, YANG Y, RODERICK M L. Testing a maximum evaporation theory over saturated land: implications for potential evaporation estimation [J]. Hydrology and earth system sciences, 2022, 26(7):1745-1754.
- [3] 赵红玲, 陈俊旭, 吕燕, 等. 玉溪市水资源短缺风险时空分异及预测研究[J]. 节水灌溉, 2019(1): 57-60, 71.
- [4] 国家气象信息中心. 中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)(1951-2010)[Z]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019.
- [5] 伍海, 夏军, 赵玲玲, 等. 变化环境下 12 种潜在蒸散发估算方法在不同干湿区的适用性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 1-11.
- [6] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J]. 地理学报, 2013, 68(1):127-136.

5 结论

a. RF-SVM 模型在单时段模拟中的应用结果表明,其对于锦东—官地电站间的流量响应关系刻画更为准确,与滞时模型马斯京根模型相比,可更好地拟合官地实际入库过程。

b. 在应用于梯级电站短期调度时,RF-SVM 模型可更有效减少调度模型偏差,能够为下游电站入库流量过程的确定提供依据。

参考文献:

- [1] 效文静, 周建中, 杨建华, 等. 基于机器学习的长江干流中长期径流预报[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 31-34, 26.
- [2] 谢祥洲, 刘军龙, 霍斐斐, 等. 基于机器学习模型

的关中地区 GPM_IMERG 降水数据订正方法[J]. 水电能源科学, 2022, 40(2): 6-9.

- [3] LI J, ZHONG P, YANG M, et al. Intelligent identification of effective reservoirs based on the random forest classification model[J]. Journal of hydrology, 2020, 591: 125324.
- [4] 王涛, 李治军. PSO-SVM 模型在黑龙江省水资源承载力评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2023, 41(1): 30-33.
- [5] 贾本军, 周建中, 陈潇, 等. 水电站尾水位特性解析与建模[J]. 水力发电学报, 2021, 40(10): 45-59.
- [6] CHEN X, ZHOU J Z, JIA B J, et al. Characterizing the hydraulic connection of cascade reservoirs for short-term generation dispatching via gaussian process regression[J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 145489-145502.

Study on Inter-station Flow Response in Short-term Operation of Jindong-Guandi Cascade Hydropower Stations

LI Jun-cong^{a,b}, ZHANG Yong-chuan^{a,b}, QIN Hui^{a,b}, FANG Wei^{a,b}, YAO Jia-hong^{a,b}, HUANG Jing-wei^{a,b}

(a. School of Civil and Hydraulic Engineering; b. Hubei Key Laboratory of Digital Valley Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper aims at the complex flow response relationship in the short-term joint operation of Jindong-Guandi cascade hydropower stations in Yalong River basin. In order to predict the inflow response process of the Guandi hydropower station, the random forest (RF) model and support vector regression (SVR) model were combined to mine the nonlinear relationship, and compared with the traditional lag-time model and the Muskingum model. On this basis, two simulation dispatching models were established to test the applicability of each model in the short-term operation of cascade hydropower stations. The result shows that the RF-SVR model has a higher fitting ability for the flow response relationship between hydropower stations, which can reduce the errors in the formulation of short-term dispatching plan, and effectively reduce the deviation of daily generation and the risk of water level violation. The research results can provide a reference for making short-term dispatching schemes of cascade power stations under complex hydraulic connections.

Key words: flow response between hydropower stations; short-term operation of hydropower station; random forest; support vector regression

(上接第 11 页)

Applicability Evaluation of Potential Evapotranspiration Estimation Methods in the Red River Basin, China

ZHANG Ji-hui^{1a}, CHEN Jun-xu^{1a,1b}, FAN Yun-jiang^{1a}, TONG Jian-hang^{1a},
YANG Fu-rong^{1a}, HU Zhi-wen², SHAO Bi-tao³

(1a. School of Earth Sciences; 1b. International Joint Research Center for Karstology, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650000, China; 3. Yunnan Surveying and Mapping Institute, Kunming 650011, China)

Abstract: Evapotranspiration is a key process of energy exchange in the terrestrial-atmospheric system, and the selection of a suitable method for its accurate estimation is the basis and challenges to revealing the energy exchange process and the mechanism of Land-Atmosphere coupling under complex topographic conditions. Based on 60 years of meteorological data from 25 stations in the Red River Basin, China, the FAO56-Penman-Monteith method was used as a benchmark, and the MK statistical tests and Taylor diagrams were used to evaluate 8 potential evapotranspiration (PET) estimation methods from five aspects. The results show that the radiative methods Priestley-Taylor and Hargreaves had the best applicability, their results were closest to FAO ($R^2 \approx 0.9$); The temperature methods McCloud and Linacre were followed; The mass transport class methods Rohwer and Penman were worse. This study not only provided a highly adaptive PET estimation method for the Red River Basin, China, but also revealed the spatial and temporal distribution characteristics of the PET.

Key words: potential evapotranspiration; radiation method; temperature method; mass transport method; Red River Basin