

# 基于Budyko假设的西汉水流域蒸散发特征研究

李文珊<sup>1</sup>, 孙栋元<sup>1</sup>, 陈学林<sup>2</sup>, 武兰珍<sup>1</sup>, 王兴繁<sup>1</sup>,  
马亚丽<sup>1</sup>, 舒和平<sup>1</sup>, 崔艳强<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省陇南水文水资源勘测中心, 甘肃 陇南 742500)

**摘要:** [目的] 分析西汉水流域潜在及实际蒸散发时空特征, 揭示其演变规律及主要驱动因子, 为区域水资源合理调配和生态环境保护提供科学参考。[方法] 以西汉水流域为研究区, 基于流域礼县、大桥、平洛和谭家坝4个水文站等资料, 结合Penman-Monteith公式和Budyko假设估算流域潜在及实际蒸散发量, 其次采用Mann-Kendall突变检验确定其突变点及显著趋势, 然后使用水量平衡法和试错法进行校准与验证, 最后利用斯皮尔曼相关系数法探究蒸散发影响因素。[结果] (1) 礼县站、康县站、西和站和成县站多年潜在蒸散发平均值分别为621.18 mm, 603.32 mm, 572.45 mm和637.18 mm。(2) 水量平衡法和Choudhury-Yang方程计算的礼县站实际蒸散发多年平均分别为409.31 mm, 400.37 mm; 平洛站为499.09 mm, 481.70 mm; 大桥站为419.82 mm, 409.57 mm; 谭家坝站为545.70 mm, 525.91 mm。(3) 流域在1976—2022年实际蒸散发多年平均值为451.02 mm, 整体呈现不显著上升趋势; 空间特征为自西北向东南递增分布, 且中游部分分布差异较大。(4) 流域实际蒸散发的主要影响因素为降水量, 其相关系数高达0.823。[结论] 西汉水流域在研究时段内实际蒸散发呈现不显著上升趋势, 该区域实际蒸散发变化主要受其水量条件控制。

**关键词:** Budyko假设; 潜在蒸散发; 实际蒸散发; 时空分布特征; 西汉水

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0158-10

## Study on evapotranspiration characteristics of Xihan River Basin based on Budyko hypothesis

Li Wenshan<sup>1</sup>, Sun Dongyuan<sup>1</sup>, Chen Xuelin<sup>2</sup>, Wu Lanzhen<sup>1</sup>, Wang Xingfan<sup>1</sup>,  
Ma Yali<sup>1</sup>, Shu Heping<sup>1</sup>, Cui Yanqiang<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Longnan Hydrological and Water Resources Survey Center of Gansu Province, Longnan, Gansu 742500, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to analyze the spatiotemporal characteristics of potential and actual evapotranspiration in the Xihan River Basin and to reveal their evolution patterns and main driving factors, thereby providing scientific references for the rational allocation of regional water resources and ecological environment protection. [Methods] The Xihan River Basin was selected as the study area. Based on data from four hydrological stations (Lixian, Daqiao, Pingluo, and Tanjiaba), the potential and actual evapotranspiration of the river basin were estimated using the Penman-Monteith formula and the Budyko hypothesis. Subsequently, the Mann-Kendall abrupt change test was used to identify the abrupt change points and significant trends. Then, the water balance method and the trial-and-error method were used for calibration and validation. Finally, Spearman's rank

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-07-15

接受日期: 2025-07-26

资助项目: 甘肃省省级生态文明建设重点研发专项(24YFFF002); 甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA015); 甘肃省高等学校青年博士资助项目(2022QB-070); 甘肃省水利科学试验研究与技术推广项目(甘水科外发[2017]76号); 甘肃省青年科技基金计划项目(21JR7RA855)

第一作者: 李文珊(2002—), 女, 甘肃民勤人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面研究。E-mail: 2176768089@qq.com

通信作者: 孙栋元(1978—), 男, 甘肃民乐人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源与干旱区水土资源方面的教学和科研工作。E-mail: sundy@gsau.edu.cn.

<https://stbcj.publish.founderss.cn>

correlation coefficient method was utilized to explore the influencing factors of evapotranspiration. [Results] (1) The multi-year average values of potential evapotranspiration at the Lixian, Kangxian, Xihe, and Chengxian stations were 621.18 mm, 603.32 mm, 572.45 mm, and 637.18 mm, respectively. (2) The multi-year average values of actual evapotranspiration at Lixian station calculated by the water balance method and the Choudhury-Yang equation were 409.31 mm and 400.37 mm, respectively. The corresponding values were 499.09 mm and 481.70 mm at Pingluo station, 419.82 mm and 409.57 mm at Daqiao station, and 545.70 mm and 525.91 mm at Tanjiaba station. (3) From 1976 to 2022, the multi-year average value of actual evapotranspiration in the river basin was 451.02 mm, showing a generally insignificant upward trend. The spatial distribution showed an increasing trend from northwest to southeast, with considerable distribution differences in the middle reaches. (4) The main influencing factor of actual evapotranspiration in the river basin was precipitation, with a correlation coefficient reaching 0.823. [Conclusion] The actual evapotranspiration in the Xihan River Basin exhibits an insignificant upward trend during the study period, and its variation is mainly controlled by water conditions in this region.

**Keywords:** Budyko hypothesis; potential evapotranspiration; actual evapotranspiration; spatiotemporal distribution characteristics; Xihan River

近年来,气候变化不断加剧,深刻影响着全球环境。研究表明,陆地上有60%的水分通过蒸散发的形式损耗。蒸散发作为流域水文循环和能量循环的关键环节<sup>[1]</sup>,不仅在气候调节方面发挥作用,还影响着植物的生长发育和大气环流,并在流域水量平衡中占据重要地位。因此深入了解流域蒸散发变化特征,对于指导区域水资源管理、改善环境问题等方面具有重要价值<sup>[2]</sup>。流域尺度上的实际蒸散发难以通过直接测量得到,一般都采用间接方法进行估算。在估算过程中,需要综合考虑降水、潜在蒸散发以及下垫面参数之间的复杂关系。准确估算流域实际蒸散发<sup>[3]</sup>,对于深入认识流域水循环过程、增进对陆—气交互作用的理解至关重要。

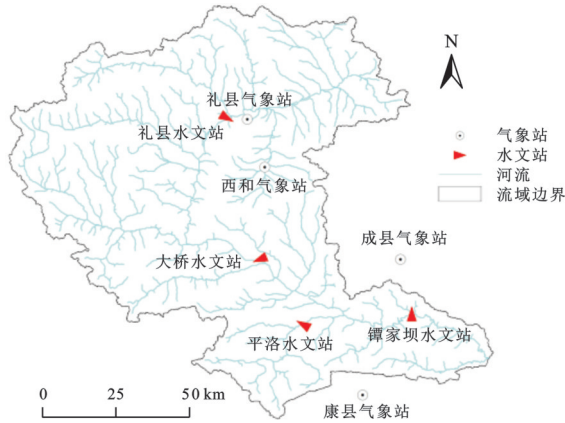
在计算流域实际蒸散发的方法中,Budyko假设打破了传统方法的局限,没有复杂参数的测定与单一因素的影响,巧妙地结合气候因素与下垫面特性,通过构建简单、不失精准的框架,深入剖析降水、潜在蒸散发等关键要素,以创新性的思维方式,为我们提供了一种高效、可靠且具有更强说服力的计算方法。曹振江等<sup>[4]</sup>基于Budyko假设对黄河源实际蒸发变化开展了时间尺度归因分析。张丹等<sup>[5]</sup>基于Budyko假设对71个典型流域蒸散发进行估算,并分析其对气候和下垫面的敏感性。周君华等<sup>[6]</sup>基于Budyko假设对岷江流域实际蒸散发进行了模拟研究。张静等<sup>[7]</sup>基于Budyko假设对松花江流域实际蒸散发进行模拟研究。曹文旭等<sup>[8]</sup>基于Budyko假设研究了气候和植被变化对潮河流域实际蒸散发的影响。西汉水流域因其独特的水系变迁、复杂的水文结构、显著的水沙特性以及重要的生态与战略价值,在水文

研究领域极具特殊性。为支撑相关研究,该流域已建成较为完善的气象、水文观测网络,能够提供长期连续的降水、径流、气温、风速、相对湿度等数据。这些数据的丰富性与持续性完全满足应用Budyko假设等理论方法的研究基础。然而,现有针对西汉水流域的研究多集中在降水、径流和泥沙变化等方面,对蒸散发的研究相对缺乏。因此,有必要开展流域蒸散发时空变化特征研究,以掌握区域水文要素转换规律、支撑水资源综合管理等提供科学依据。

本研究以西汉水流域为研究区,基于流域礼县、大桥、平洛和谭家坝4个水文站1961—2022年系列数据(大桥站1976—2022年),采用彭曼公式估算流域潜在蒸散发,运用M-K突变检验分析其突变趋势,基于Budyko水热耦合假设,计算整个流域的实际蒸散发量并分析其时空变化特征,研究成果可为西汉水流域水资源优化配置及生态环境保护提供科学依据和决策支持。

## 1 研究区概况

西汉水流域位于甘肃和陕西交界处,为嘉陵江北岸重要一级支流,其泥沙含量在长江流域各支流中居于首位。地理坐标为东经104°30′—106°04′和北纬33°16′—34°31′,河源起始于甘肃省天水市境内的西秦岭山脉齐寿山区域<sup>[9]</sup>,流经甘肃礼县、西和、康县及成县,最终汇入陕西省略阳县境内。全长279 km,流域面积9 569 km<sup>2</sup>,主要支流有10条左右。流域气候为暖温带湿润型,年平均气温8~12℃。西汉水流域水文监测站点沿河道梯度分布特征明显,上游设有礼县水文站,中游分布平洛和大桥水文站,下游配置谭家坝水文站。西汉水流域分布详见图1。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2023)2764号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 西汉水流域分布

Fig. 1 Distribution of Xihan River Basin

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

收集西汉水流域礼县、大桥、平洛和谭家坝4个水文站1961—2022年(大桥1976—2022年)的年降水量和年径流量资料,资料来源于水文部门,以及附近礼县、西和、康县和成县4个气象站的相关气象资料,资料来源于气象部门。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 Budyko假设** Budyko假设通过综合考虑流域内降水、潜在蒸散发以及模型参数之间的关系,进而对流域实际蒸散发进行估算<sup>[10]</sup>。Budyko假设最初只考虑到降水、潜在蒸散发等气候影响因子,后改进开始关注到植被覆盖、土壤特性等流域特征的影响<sup>[11]</sup>。经过学者们不断探索,Budyko假设增加表征流域特征的下垫面参数,并提出经验公式Choudhury-Yang方程,其公式如下:

$$ET = \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (1)$$

式中:ET为流域多年实际蒸散发(mm);P为多年平均降水量(mm);ET<sub>0</sub>为潜在蒸散发量;n为下垫面参数<sup>[12]</sup>。

**2.2.2 彭曼公式(FAO Penman-Monteith公式)** 蒸散发是一个持续变化且难以捕捉的过程,准确计算蒸散发是一道难题。本研究选用彭曼公式来估算西汉水流域潜在蒸散发。彭曼公式相对于其他估算潜在蒸散发的方法来说,具有以下优点(1)在数据不全,甚至缺失情况下仍可使用,其变量参数较多,可以替换计算;(2)该方法由联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)于1998年提出,在潜在蒸散发的计算中具有较高的精度优势<sup>[13]</sup>;(3)在广泛的位置和气候条件下都极有可能正确预测可能蒸

散发。FAO Penman-Monteith公式表达如下<sup>[14]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中:ET<sub>0</sub>为潜在蒸散发量(mm/d);R<sub>n</sub>为地表净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];G为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];T为2 m高处日平均气温(°C);U<sub>2</sub>为2 m高处风速(m/s);e<sub>s</sub>为饱和水气压(kpa);e<sub>a</sub>为实际水气压(kpa);Δ为饱和水气压曲线斜率(kpa/°C);γ为干湿表常数(kpa/°C)。

本研究采用FAO Penman-Monteith公式计算流域内各气象站点的潜在蒸散发,式中各参数的计算方法和计算步骤均参考《中华人民共和国气象行业标准》<sup>[15]</sup>。

**2.2.3 Mann-Kendall突变检验** MK突变检验是一种非参数统计检验的方法,不需要样本数据遵循一定的分布规律,不受少数值的干扰,主要用于检测时间序列数据中的趋势突变<sup>[16]</sup>。本研究采用M-K趋势检验(显著性水平为α=0.05)来确定蒸散发变化趋势的显著性。

### 2.2.4 模型校准与验证

(1) 水量平衡法。水量平衡法综合考虑了水量和能量对蒸散发的影响,简单来说就是一个区域水的收入与支出相等,是计算流域蒸散发的最有效的方法之一,其方程式为:

$$\Delta S = P - ET - R \quad (3)$$

式中:P为多年平均降水量(mm);ET为多年实际蒸散发(mm);R为多年平均径流深(mm);ΔS为蓄水量变化(mm);在多年尺度下ΔS可忽略不计。

(2) 试错法。试错法通过计算逐年相对误差(Relative Error, Re)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),来检验参数的精度,其计算公式为:

$$Re_i = \frac{E_{sim,i} - E_{obs,i}}{E_{obs,i}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{sim,i} - E_{obs,i})^2} \quad (5)$$

式中:n为时间序列长度;E<sub>sim,i</sub>为第i年模型模拟的年实际蒸散发;E<sub>obs,i</sub>为第i年水量平衡法计算的年实际蒸散发。

(3) 斯皮尔曼相关系数。斯皮尔曼相关系数(ρ值)是衡量两个变量间单调关系的非参数统计方法,常用于表征两变量间的相关程度,计算公式为:

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为斯皮尔曼相关系数; $x_i, y_i$ 为变量; $\bar{x}, \bar{y}$ 为变量的平均值,此处 $x$ 取实际蒸散发的影响因素, $y$ 取年实际蒸散发。

### 3 结果与分析

#### 3.1 潜在蒸散发估算

(1) 4个气象站潜在蒸散发估算。本研究结合西汉水流域气象资料,运用Penman-Monteith公式计算流域内各气象站点的潜在蒸散发,结果见图2。计算出礼县站多年潜在蒸散发平均值为621.18 mm,最大值为754.22 mm,最小值为516.66 mm;康县站分别为603.32 mm,730.08 mm,473.60 mm;西和站分别为572.45 mm,682.74 mm,434.69 mm;成县站分别为637.18 mm,756.77 mm,457.96 mm。礼县站、康县站、成县站多年潜在蒸散发呈下降趋势,下降速率分别为1.153 0 mm/a,0.690 3 mm/a,1.020 8 mm/a;西和站多年潜在蒸散发呈上升趋势,上升速率为1.459 7 mm/a。5 a滑动平均曲线显示,礼县站潜在蒸散发最大值为685.15 mm,最小值为548.52 mm;

康县站分别为636.63 mm,510.10 mm;西和站分别为729.91 mm,555.03 mm;成县站分别为653.12 mm,552.23 mm。其中礼县站、康县站和成县站潜在蒸散发5 a滑动平均曲线呈下降趋势,表明其存在显著的长期下降趋势;大桥站潜在蒸散发5 a滑动平均曲线呈上升趋势,表明其存在显著的长期上升趋势。

表1给出了西汉水流域长序列年潜在蒸散发M-K趋势检验的结果。结果显示,礼县站、西和站、成县站潜在蒸散发的变化趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验( $|Z|>1.96$ ),康县站没有通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验( $|Z|<1.96$ );礼县站和成县站年潜在蒸散发序列呈显著下降趋势,康县站呈不显著下降趋势,西和站呈显著上升趋势。

表1 西汉水流域潜在蒸散发M-K趋势检验统计  
Table 1 M-K trend test statistics of potential evapotranspiration in Xihan River Basin

气象站	礼县站	康县站	西和站	成县站
Z值	-3.24	-1.57	2.15	-2.07
检验结果	显著下降	不显著下降	显著上升	显著下降

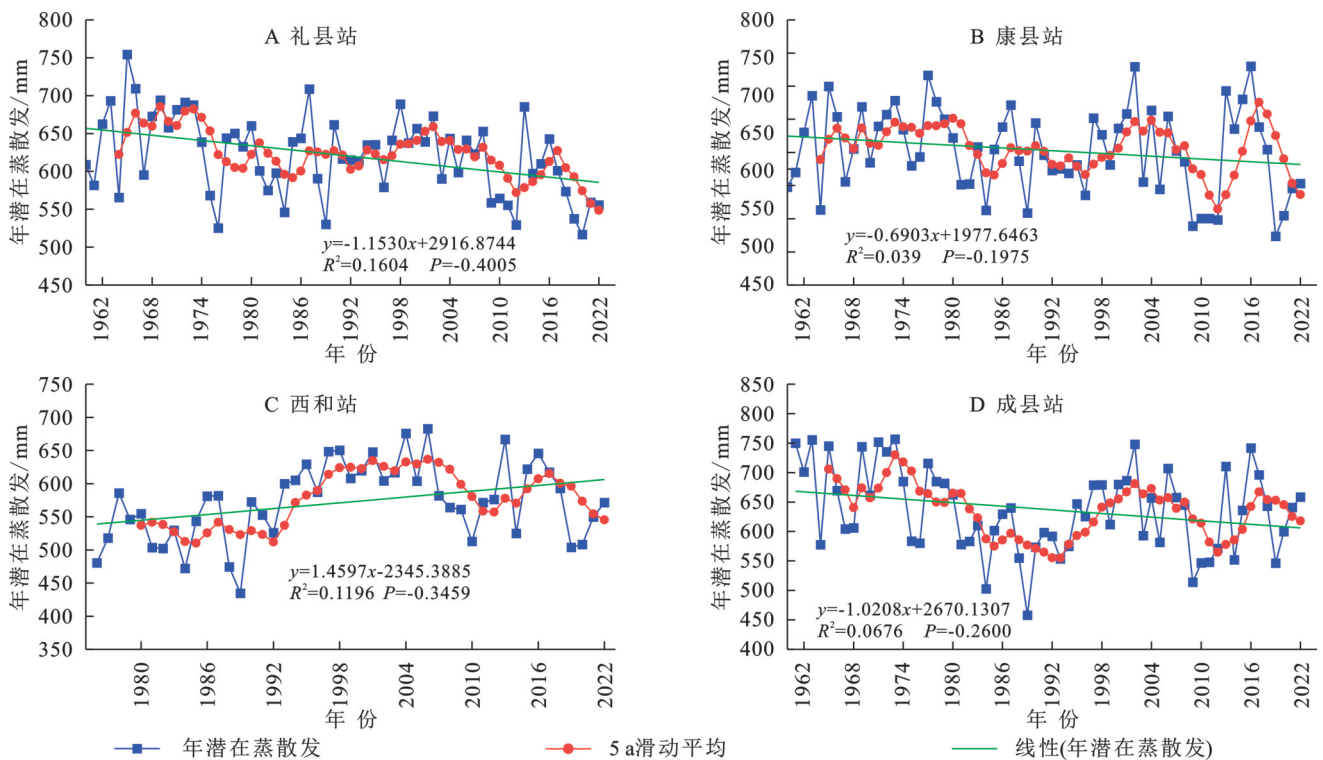


图2 西汉水流域4个气象站潜在蒸散发变化趋势

Fig. 2 Variation trends of potential evapotranspiration at four meteorological stations in Xihan River Basin

(2) 西汉水整体潜在蒸散发估算。由于西和站建站较晚,4个站的数据年限不统一,为求出西汉水流域整体的潜在蒸散发变化,故选用最短年限以此求出4个气象站潜在蒸散发的平均值,作为西汉水流域的整体潜在蒸散发。由图3可知,西汉水流域多年平均潜在蒸散发均值为600.32 mm,最大值(690.03

mm)出现在2016年;最小值(482.88 mm)出现在1989年,整体趋势呈上升变化,上升速率为0.0381 mm/a。由MK趋势检验结果可知Z值为-0.037,因而西汉水流域整体潜在蒸散发的变化趋势未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平( $|Z|<1.96$ ),表明其潜在蒸散发上升趋势不显著。西汉水流域UF统计量在1976—1980

年和 1998—2021 年  $>0$ , 说明流域在该时期内潜在蒸散发上升趋势明显; 1981—1996 年和 2022 年  $<0$ , 说明该研究时段内潜在蒸散发呈显著下降趋势; UB 统计量在 2019 年的值  $>1.96$ , 说明该年潜在蒸散发上升趋势显著; 其余年份均在置信区间  $[-1.96, 1.96]$ , 且统计量 UF 与 UB 在置信区间一共有 4 个交点, 故西汉水流域潜在蒸散发的突变年份分别为 1980 年、1987 年、

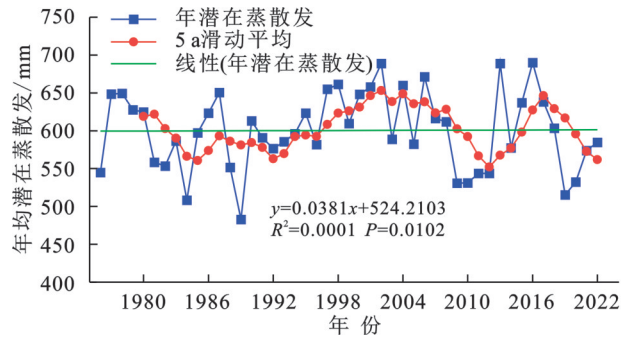


图 3 西汉水流域年均潜在蒸散发变化趋势及 MK 趋势检验

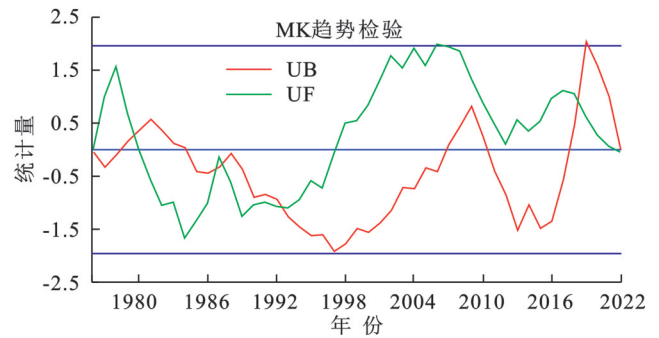
Fig. 3 Variation trends of annual average potential evapotranspiration and M-K trend test in Xihan River Basin

### 3.2 实际蒸散发计算

(1) 参数推求。通过将 Choudhury-Yang 方程与水量平衡方程联立, 得出西汉水流域的下垫面参数, 见表 2。计算得礼县站、平洛站、大桥站和谭家坝站下垫面参数  $n$  分别为 2.38, 4.71, 2.66, 3.75。由于西汉水流域降水量和年径流深的主要突变年份为 1993 年, 所以将研究时期在 1993 年之前划分为基准期, 之后划分为变化期。变化期的  $P$  (降水量)、 $R$  (径流深)、 $R/P$  (径流系数) 与基准期相比, 4 个站均有所下降; 变化期的  $ET_0/P$  (干旱指数) 与基准期相比, 礼县站、大桥站和谭家坝站均上升, 平洛站下降; 其中 3 个站的干旱指数大于 1, 说明西汉水流域偏于干燥, 且 4 个站中礼县站干旱指数最大, 由此可见礼县站区域最为干燥; 变化期的潜在蒸散发与基准期相比, 只有大桥站上升, 其余 3 个站均下降。其中径流深降幅最明显, 4 个站变化率由大到小分别为礼县站 (51.4%)  $>$  谭家坝站 (38.6%)  $>$  大桥站 (36.16%)  $>$  平洛站 (36.07%), 说明径流深对 4 个站的水文气象影响最为显著。变化期的参数  $n$  相对基准期来说, 4 个站均增大, 且 4 个站下垫面参数  $n$  变化率很大, 说明下垫面参数对西汉水流域水文气象影响较大。

(2) 模型验证及实际蒸散发的计算。基于流域地表水水量平衡, 根据多年平均降水量减去径流深来计算流域实际蒸散发。依据西汉水流域误差统计结果, 模型模拟 4 个水文站计算结果的逐年相对误差分别为  $-1.035\%$ ,  $-2.1\%$ ,  $-1.2\%$ ,  $-1.797\%$ , 且 4 个站的逐年相对误差均在 5% 以内, 说明该模型模拟可靠度高。西汉水流域年实际蒸散发模拟统计结果见表 3。

1993 年、2018 年。1980 年, 农业开发导致耕地扩大、植被减少, 削弱了植被对蒸散的抑制作用, 致使潜在蒸散发减小并发生突变。1987 年、1993 年, 主要水文站降水量发生异常突变性增减, 通过其水分供应作用间接引发潜在蒸散发突变。2018 年, 城市化进程加快, 建设用地扩张与绿地锐减, 显著改变了地表属性, 进而导致潜在蒸散发突变。



通过水量平衡法和 Choudhury-Yang 方程计算西汉水流域 4 个水文站实际蒸散发变化趋势见图 4。水量平衡法计算礼县站实际蒸散发多年平均为 409.31 mm, Choudhury-Yang 方程计算为 400.37 mm; 平洛站分别为 499.09 mm, 481.70 mm; 大桥站分别为 419.82 mm, 409.57 mm; 谭家坝站分别为 545.70 mm, 525.91 mm。两种方法对于 4 个水文站多年平均实际蒸散发的计算结果基本一致, 表明该模型在西汉水流域模拟精度较高。

### 3.3 蒸散发时空分布特征

(1) 蒸散发时间变化趋势。在年时间尺度上, 流域的实际蒸散发主要受潜在蒸散发、降水量和径流深等因素控制, 西汉水流域实际蒸散发时间变化趋势见图 5。西汉水流域实际蒸散发总体上呈现出“先上升后下降”的单峰趋势。1976—2022 年西汉水流域实际蒸散发多年平均值为 451.02 mm, 最大值 (529.33 mm) 出现在 2013 年; 最小值 (369.96 mm) 出现在 1997 年。西汉水流域多年实际蒸散发谭家坝站和平洛站较大, 高于流域平均值; 礼县站和大桥站较小, 低于流域平均值。西汉水流域蒸散发随时间变化趋势比较平稳, 整体上呈现上升趋势, 上升速率为  $0.167 \text{ mm/a}$ 。

基于小波分析方法, 对西汉水流域实际蒸散发进行了周期性分析和小波方差检验, 并绘制其小波分析图, 结果见图 6。分析结果表明: 在 64 a 周期尺度上, 西汉水流域实际蒸散发呈现显著的周期性变化, 其中以 56 a 为尺度的实际蒸散发周期性变化最为明显, 振荡性最强; 在 1976—2022 年实际蒸散发表现为“正—负—正”交替变化的趋势。

(2) 蒸散发空间分布特征。利用反距离权重插值法分析西汉水流域1976—2022年多年平均实际蒸散发和变化趋势空间分布特征<sup>[17]</sup>,结果见图7。由下图可知研究区多年平均实际蒸散发空间变化范围为393.08~519.95 mm,总体趋势呈现自西北向东南方向递增。西汉水下游谭家坝站多年平均实际蒸散发最大,为519.95 mm;下游蒸散发较大的原因在于降水量

大以及人类活动对地表和水分循环的影响。上游礼县站多年平均实际蒸散发最小,为393.08 mm;中游大桥站和平洛站地区的等值线分布比较密集,说明该区域的实际蒸散发空间分布差异大且分布不均匀。西汉水流域实际蒸散发空间变化趋势为礼县站显著下降,平洛站、谭家坝站不显著下降,大桥站不显著上升,西汉水流域整体实际蒸散发空间变化趋势呈不显著上升。

表2 西汉水流域水文气候因子及弹性系数变化结果

Table 2 Variations in hydroclimatic factors and elastic coefficients in Xihan River Basin

	变量	长序列	基准期	变化期	变化量	变化率/%
礼县站	$P/mm$	497.08	526.21	467.7	-58.51	-11.12
	$ET_0/mm$	621.18	632.72	607.82	-24.9	-3.94
	$R/mm$	87.77	115.64	56.2	-59.44	-51.40
	$R/P$	0.18	0.22	0.12	-0.10	-45.33
	$ET_0/P$	1.25	1.20	1.30	0.10	8.08
	$n$	2.38	2.09	2.96	0.87	41.63
平洛站	$P/mm$	558.14	563.28	559.57	-3.71	-0.66
	$ET_0/mm$	603.32	611.36	593.26	-18.10	-2.96
	$R/mm$	59.05	71.82	45.91	-25.90	-36.07
	$R/P$	0.11	0.13	0.08	-0.05	-35.64
	$ET_0/P$	1.08	1.09	1.06	-0.03	-2.32
	$n$	4.71	3.98	6.18	2.2	55.28
大桥站	$P/mm$	521.54	545.53	513.64	-31.89	-5.85
	$ET_0/mm$	572.47	531.00	598.26	67.25	12.66
	$R/mm$	101.71	132.73	84.74	-47.99	-36.16
	$R/P$	0.20	0.24	0.16	-0.08	-32.19
	$ET_0/P$	1.10	0.97	1.16	0.19	19.66
	$n$	2.66	2.62	2.79	0.17	6.49
谭家坝站	$P/mm$	678.72	691.64	669.08	-22.55	-3.26
	$ET_0/mm$	637.18	640.23	631.03	-9.20	-1.44
	$R/mm$	133.02	164.42	100.96	-63.46	-38.60
	$R/P$	0.20	0.24	0.15	-0.09	-36.53
	$ET_0/P$	0.94	0.93	0.94	0.02	1.89
	$n$	3.75	3.01	5.25	2.24	74.42

表3 西汉水流域年实际蒸散发模型模拟结果统计

Table 3 Statistics of model simulation results of annual actual evapotranspiration in Xihan River Basin

参数	礼县站	平洛站	大桥站	谭家坝站
长序列	1960—2022年	1960—2022年	1976—2022年	1961—2022年
Re变化范围	-0.19~0.31	-0.35~0.41	-0.14~0.20	-0.35~0.21
Re均值/%	-1.035	-2.10	-1.20	-1.797
RMSE/mm	41.557	59.55	37.058	73.551

(3) 蒸散发影响因素分析。影响流域蒸散发的因素很多,本研究主要分析气候变化因子对西汉水流域实际蒸散发的影响。实际蒸散发受水量条件(降雨和相对湿度)和能量条件(日照时间)共同作用,其规律相对复杂。在基于Budyko假设的模型计算中,流域的实际蒸散发主要受其降水量、风速、气温、日照时

数和相对湿度等气象要素调控。降水量是影响蒸散发的主要因素,通过改善下垫面供水条件来促进蒸散发;风速对蒸散发的影响相对来说较小;气温是影响蒸散发变化的重要因素,直接作用于蒸散发;日照时数的变化对蒸散发过程具有显著调控作用,日照时数的增加会增强太阳辐射强度,从而促进蒸散发量的增

加;相对湿度通过影响水汽扩散和空气的流动性来间接影响蒸散发。本研究采用斯皮尔曼相关系数法

分析识别西汉水流域主要气候因子对实际蒸散发的作用,进而确定其关键气候驱动因子。

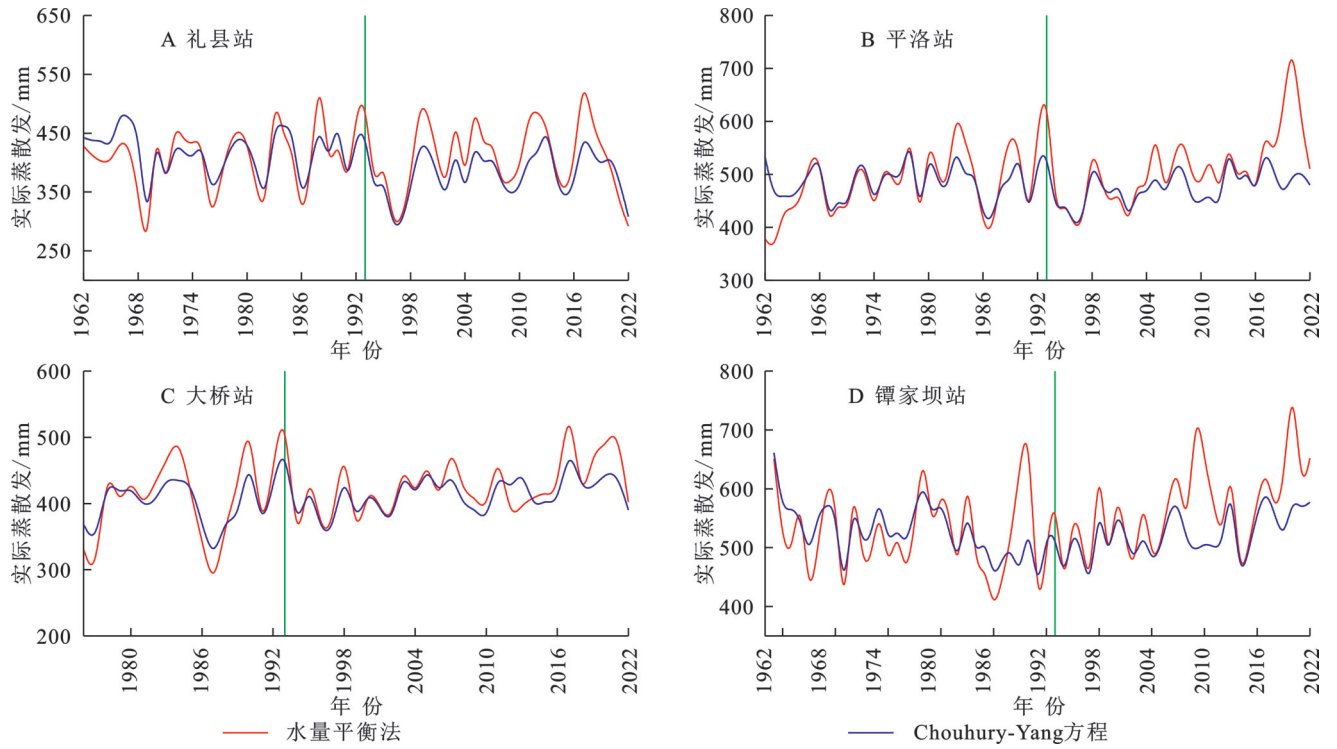


图 4 西汉水流域 4 个水文站实际蒸散发变化趋势

Fig. 4 Variation trends of actual evapotranspiration at four hydrological stations in Xihan River Basin

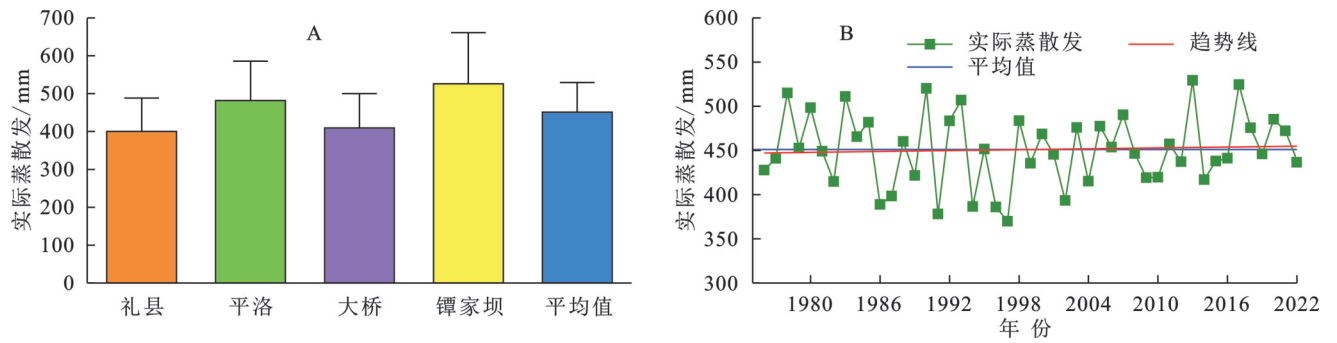


图 5 西汉水流域实际蒸散发时间变化趋势

Fig. 5 Temporal variation trends of actual evapotranspiration in Xihan River Basin

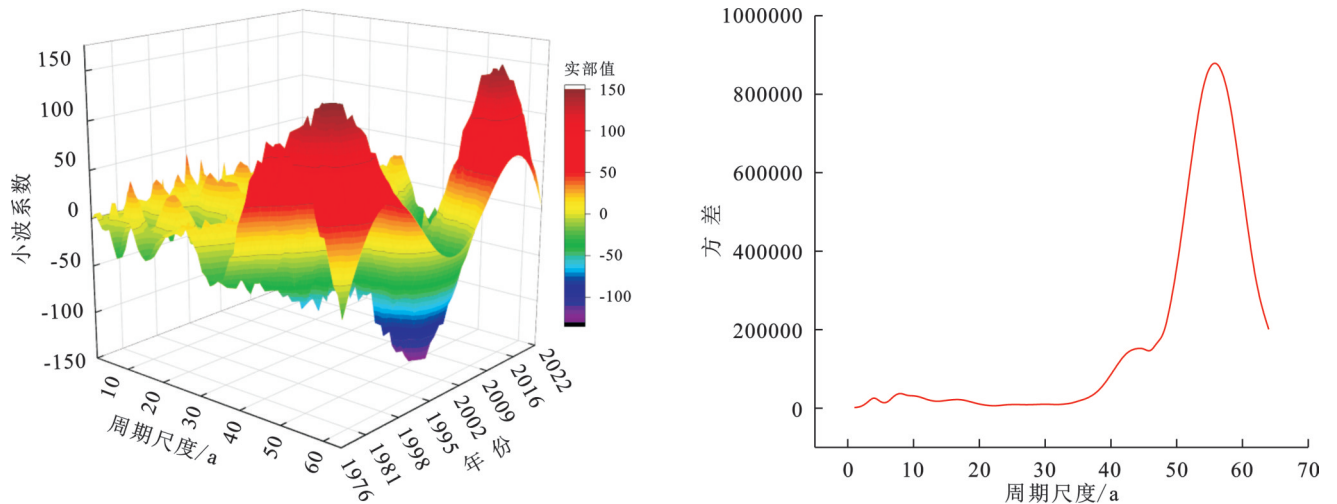


图 6 西汉水流域实际蒸散发小波分析

Fig. 6 Wavelet analysis of actual evapotranspiration in Xihan River Basin

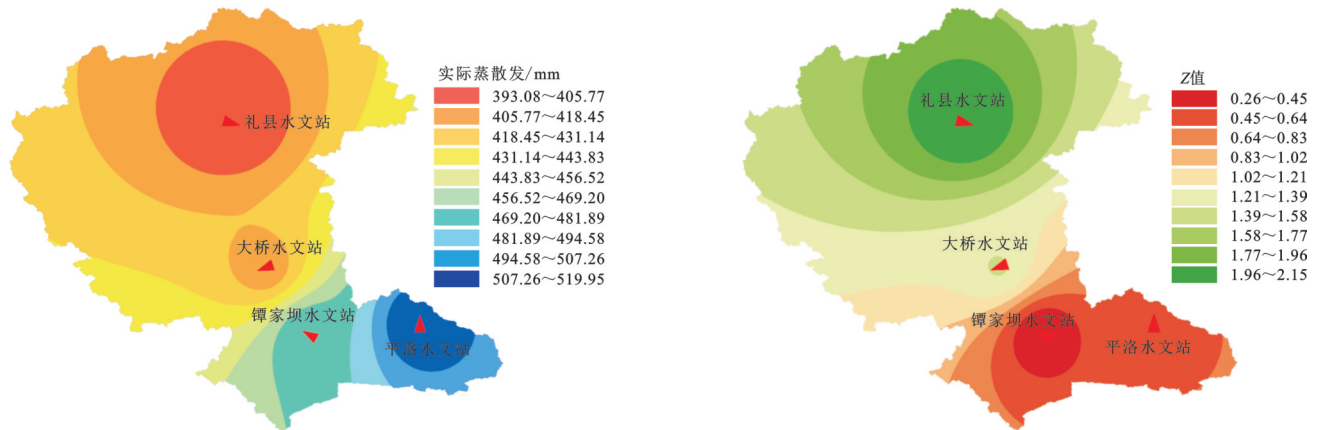


图7 西汉水流域多年平均实际蒸散发和变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of multi-year average actual evapotranspiration and variation trends in Xihan River Basin

西汉水流域实际蒸散发与气候因子的相关性分析<sup>[18]</sup>结果见表4。年时间尺度上平均气温、日照时间、降水量和相对湿度4个气候变量与实际蒸散发呈正相关关系,其中西汉水流域的实际蒸散发与降水量关系最为显著,降水量相关系数高达0.823;呈负相关的气候影响因子是风速。造成西汉水流域实际蒸散发在1976—2022年这一变化的主要原因在于风速的减弱以及降水量等几个气象因子的持续增加。西汉水流域蒸散发的主要影响因子按斯皮尔曼相关系数的绝对值大小排序依次为降水量>相对湿度>日照时间>平均气温>风速,因此西汉水流域实际蒸散发主要受其水量条件控制。

表4 实际蒸散发与气候因子的相关性

Table 4 Correlation between actual evapotranspiration and climatic factors

气候因子	风速	平均气温	日照时间	降水量	相对湿度
相关系数	-0.014	0.015	0.020	0.823	0.223

## 4 讨论

基于Choudhury-Yang方程计算西汉水流域实际蒸散发,并通过反演推求出各水文站点的下垫面参数 $n$ 。经各站点数据平均,得到流域综合参数 $n=3.38$ 。该参数用于表征流域下垫面特性对水文过程的综合影响,但其具体物理意义尚不明确,学界存在不同理解。同时,流域间的差异性以及气候变化和人类活动的影响<sup>[19]</sup>,均导致参数 $n$ 表现出显著的不确定性和复杂性。

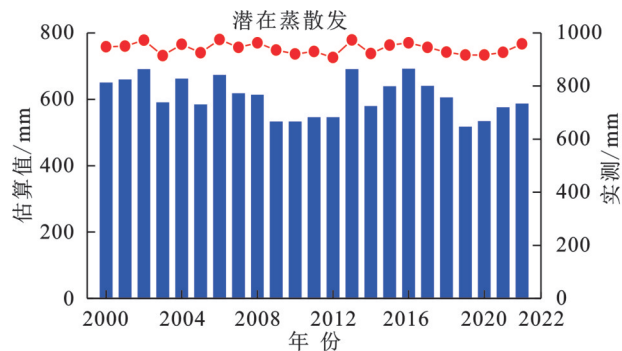
西汉水流域属于山区向平原的过渡地带,地形起伏显著,地表覆盖和土壤类型复杂多样。然而,Budyko假设在理论上基于地表较为均一的前提,未能充分考虑坡度、坡向以及由高程变化引起的小气候差异。为评估其适用性,本研究收集西汉水流域2000—2022年潜在蒸散发与实际蒸散发的遥感数

据,并与基于Budyko假设的估算值进行对比分析。由图8可知,遥感数据与估算值存在较明显差距。流域显著的地形差异是导致估算偏差的主要原因。特别是在地形梯度变化大的山区向平原过渡区域,坡向和海拔对辐射分布、土壤湿度、植被覆盖等产生显著影响,而Budyko假设未充分考虑这些空间异质性。尽管研究结果表明Budyko假设总体上适用于西汉水流域蒸散发估算,但其估算值与前人发布的遥感数据集相比仍存在一定差距。

此外,Budyko假设本身对输入参数高度敏感,如植被覆盖度、干旱指数以及土壤水可利用性等。本研究所用的遥感数据源于遥感反演或大尺度气候数据集,虽具有广泛应用性,但在地形复杂区域,其代表性存在一定局限。加之参考数据集的空间分辨率跨度较大,难以捕捉短期气象波动对蒸散发的影响,这在极端天气频发的西汉水流域表现得尤为明显。

研究表明1976—2022年西汉水流域实际蒸散发远小于潜在蒸散发,实际蒸散发多年平均值为451.02 mm,潜在蒸散发多年平均值为600.32 mm。潜在蒸散发与实际蒸散发的相关系数为0.0784,二者呈正相关关系。西汉水流域整体水分供应充足但地区分布不均,上中下游降水分布差异大,致使下游区域水分供应过剩,另外区域可能相对不足,实际蒸散发未能按潜在蒸散发水平变化,从而二者相关性较小。1976—2022年西汉水流域多年平均潜在蒸散发和实际蒸散发整体均呈不显著上升趋势;且实际蒸散发空间分布存在差异性,空间分布特征表现为自西北向东南方向显著递增,该空间分布格局说明水量条件是影响实际蒸散发大小的主要因素。通过对西汉水流域蒸散发影响因素的分析,确定降水量为其主导因素,这与张丹等<sup>[5]</sup>的研究一致。因为降水形成的地表水与土壤水为蒸散发奠定了充足的水分供

应基础,降水正是通过影响这一水分供应过程,主导着流域蒸散发的变化。姬广兴等<sup>[20]</sup>基于月尺度蒸散发模拟研究开展了归因分析,本研究仅通过西汉水流域具有代表性的水文、气象站资料来估算西汉水



流域整体的实际蒸散发,尚存在一定的局限性。未来将考虑进一步细致化估算西汉水流域日、月尺度的蒸散发,并划分流域区域性特征来进行具体分析,更好地评估西汉水流域蒸散发变化特征。

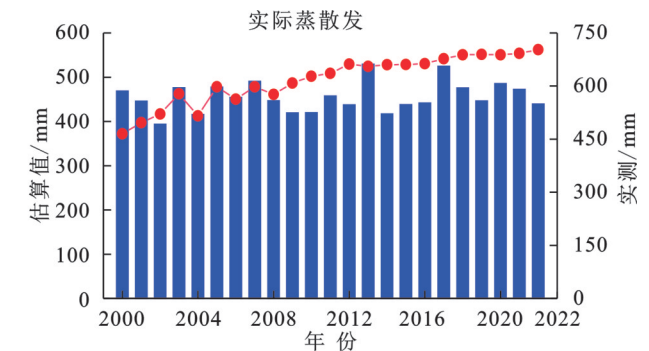


图8 西汉水流域2000—2022年潜在、实际蒸散发估算值与数据集对比

Fig. 8 Comparison of estimated potential and actual evapotranspiration with datasets in Xihan River Basin (2000—2022)

## 5 结论

(1) 采用Penman-Monteith公式计算出礼县站多年潜在蒸散发平均值为621.18 mm,康县站为603.32 mm,西和站为572.45 mm,成县站为637.18 mm。

(2) 西汉水流域4个水文站通过水量平衡法和Choudhury-Yang方程所得的实际蒸散发计算结果基本一致,水量平衡法和Choudhury-Yang方程计算的礼县站实际蒸散发多年平均分别为409.31 mm,400.37 mm;平洛站分别为499.09 mm,481.70 mm;大桥站分别为419.82 mm,409.57 mm;谭家坝站分别为545.70 mm,525.91 mm。

(3) 西汉水流域在1976—2022年实际蒸散发多年平均值为451.02 mm,整体呈现不显著上升趋势;西汉水流域多年平均实际蒸散发空间分布特征为自西北向东南递增,且流域中游实际蒸散发空间分布差异较大。

(4) 西汉水流域实际蒸散发的主要气候影响因素为降水量,且其相关系数高达0.823。

### 参考文献(References):

- [1] 孙福宝. 基于Budyko水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究[D]. 北京:清华大学,2007.  
Sun F B. Study on Watershed Evapotranspiration based on the Budyko Hypothesis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [2] 刘素华,韩宇平,张仁华. 利用改进的MOD16模型估算区域蒸散发[J]. 农业工程学报,2022,38(12):145-153.  
Liu S H, Han Y P, Zhang R H. Estimating regional Evapotranspiration by the improved MOD16 model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(12):145-153.
- [3] 云兆得,胡庆芳,王银堂,等. 遥感和再分析蒸散发数据

精度评估:基于GRACE和流域月水量平衡模型的研究[J]. 水利学报,2023,54(1):117-127.

Yun Z D, Hu Q F, Wang Y T, et al. Accuracy validation of remote sensing and reanalysis Evapotranspiration data: a comparative study based on GRACE and monthly water balance model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023,54(1):117-127.

- [4] 曹振江,姬广兴,杨瑞婷,等. 黄河源实际蒸发和径流变化多时间尺度归因分析[J]. 水土保持研究,2025,32(1):209-217.

Cao Z J, Ji G X, Yang R T, et al. Multi-temporal scale attribution analysis of actual evapotranspiration and runoff changes in the source area of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(1):209-217.

- [5] 张丹,梁康,聂茸,等. 基于Budyko假设的流域蒸散发估算及其对气候与下垫面的敏感性分析[J]. 资源科学,2016,38(6):1140-1148.

Zhang D, Liang K, Nie R, et al. Estimation of evapotranspiration and sensitivity to climate and the underlying surface based on the Budyko Framework[J]. Resources Science, 2016,38(6):1140-1148.

- [6] 周君华,尹铎皓,范云鹤,等. 基于Budyko假设的岷江流域实际蒸散发模拟研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(1):107-112.

Zhou J H, Yin D H, Fan Y H, et al. Simulation and analysis of actual evapotranspiration in Minjiang River Basin based on Budyko Hypothesis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017,36(1):107-112.

- [7] 张静,刘国庆,宋小燕,等. Budyko假设对松花江流域实际蒸散发的模拟研究[J]. 水文,2019,39(2):22-27.

Zhang J, Liu G Q, Song X Y, et al. A simulation study of actual evapotranspiration in Songhuajiang River Basin based on Budyko Hypothesis [J]. Journal of China Hydrology, 2019,39(2):22-27.

- [8] 曹文旭,张志强,查同刚,等. 基于Budyko假设的潮河流

- 域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究[J].生态学报,2018,38(16):5750-5758.
- Cao W X, Zhang Z Q, Zha T G, et al. Exploring the effects of vegetation dynamics and climate changes on the Chaohe watershed actual evapotranspiration: Budyko Hypothesis approach[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16):5750-5758.
- [9] 申雄达.1960年-2020年西汉水径流变化特征及其影响因素探究[D].兰州:兰州大学,2022.
- Shen X D. Variation characteristics and influencing factors of water runoff in the Western Han Dynasty from 1960 to 2020 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [10] 黄俊雄,韩丽,许志兰,等.基于Budyko理论的北京地区实际蒸散发估算及特征研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):1-7.
- Huang J X, Han L, Xu Z L, et al. Estimation and variation of actual evapotranspiration of Beijing region based on Budyko theory[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(3):1-7.
- [11] 黄霄翔,李润杰,甘永德,等.基于Budyko假设的布哈河流域径流变化归因分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(3):480-490.
- Huang X X, Li R J, Gan Y D, et al. Attribution analysis of runoff change in Buha River Basin based on Budyko hypothesis [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(3):480-490.
- [12] 李帅,宋进喜,齐贵增.基于Budyko模型的渭河流域蒸散发时空变化归因分析[J].水土保持研究,2024,31(5):304-314.
- Li S, Song J X, Qi G Z. Analysis of spatiotemporal variation and attribution of evapotranspiration in Weihe River Basin based on Budyko model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(5):304-314.
- [13] 杨杰,黄鹏,魏邦龙.河西绿洲灌区小麦灌溉预报模型的研究[J].甘肃农业大学学报,2007,42(4):118-122.
- Yang J, Huang P, Wei B L. Research on irrigation forecast model of wheat in the Hexi Oasis irrigation district [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2007, 42(4):118-122.
- [14] 殷长琛,齐广平,康燕霞,等.甘肃省参考作物蒸散量变化特征与影响因子分析[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):7-15,49.
- Yin C C, Qi G P, Kang Y X, et al. Variation characteristics and influencing factors of evapotranspiration for reference crops in Gansu Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1):7-15,49.
- [15] 薛丽君.基于Budyko水热耦合平衡理论的嫩江流域蒸散发研究[D].长春:吉林大学,2016.
- Xue L J. Evapotranspiration study based on Budyko coupled water-energy balance theory in Nenjiang River Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [16] 黄宇佳.塔里木河流域环境演变及其影响因素[D].西安:西安理工大学,2024.
- Huang Y J. Environmental evolution and its influencing factors in Tarim River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [17] 张珂,鞠艳,李致家.金沙江流域实际蒸散发遥感重建及时空特征分析[J].水科学进展,2021,32(2):182-191.
- Zhang K, Ju Y, Li Z J. Satellite-based reconstruction and spatiotemporal variability analysis of actual evapotranspiration in the Jinshajiang River Basin, China [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2):182-191.
- [18] 孙凡博,余凤,赵春子.图们江干流流域气候因素对径流影响变化分析[J].安徽农业科学,2019,47(21):1-4.
- Sun F B, Yu F, Zhao C Z. Analysis of the effects of climate factors on runoff variations in Tumen River Main Stream Watershed [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(21):1-4.
- [19] 张晓娇.大清河流域水循环模拟与演变规律研究[D].济南:济南大学,2020.
- Zhang X J. Distributed simulation and evolution Law of water cycle in the Daqing River Basin [D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
- [20] 姬广兴,刘智培,高红凯,等.1961—2020年赣江流域月尺度实际蒸发模拟及归因分析[J].水土保持研究,2025,32(1):195-202.
- Ji G X, Liu Z P, Gao H K, et al. Monthly scale actual evaporation simulation and attribution analysis in Gan River Basin from 1961 to 2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):195-202.