

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.016.

周敏, 孙栋元, 赵玉峰, 等. 1980—2020年疏勒河流域水面蒸发量变化趋势及预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 50-58.

Zhou Min, Sun Dongyuan, Zhao Yufeng, et al. Change Trend and Prediction of Water Surface Evaporation in Shule River Basin from 1980 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 50-58.

# 1980—2020年疏勒河流域水面 蒸发量变化趋势及预测

周敏<sup>1</sup>, 孙栋元<sup>1</sup>, 赵玉峰<sup>2</sup>, 惠磊<sup>3</sup>, 牛最荣<sup>1</sup>, 马亚丽<sup>1</sup>, 武兰珍<sup>1</sup>, 王兴繁<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070; 2. 西和县水务局, 甘肃 陇南 742100; 3. 酒泉市党河流域水资源管理局, 甘肃 酒泉 735000)

**摘要:** [目的] 揭示疏勒河流域水面蒸发量的变化特征及未来演变趋势, 以期更深入了解流域内水资源的动态变化, 为该地区规划和管理水资源的利用提供决策支撑。 [方法] 基于 1980—2020 年昌马堡、双塔堡水库、党城湾、党河水库 4 个水文站逐月、逐年水面蒸发资料, 采用线性倾向率、滑动 t 检验、R/S 分析法、BP 神经网络等分析方法对流域近 40 年水面蒸发变化特征进行了研究, 并预测了未来水面蒸发量及其变化趋势。 [结果] (1) 1980—2020 年疏勒河流域各站点水面蒸发量年际变化整体均呈减少趋势, 各站倾向率排序为: 双塔堡水库站 ( $-187.10 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ) > 党河水库站 ( $-178.20 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ) > 昌马堡站 ( $-33.00 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ) > 党城湾站 ( $-30.00 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ), 其中双塔堡水库和党河水库站减少趋势十分显著。 (2) 昌马堡、双塔堡水库和党河水库站四季水面蒸发量均表现为减少趋势, 党城湾站春季呈不显著增加趋势, 其他季节呈下降趋势。 (3) 昌马堡、党城湾、双塔堡水库和党河水库 4 站突变年份分别为 2004 年、2015 年、2007 年和 2007 年。 (4) 流域水面蒸发量不均匀系数和集中度整体表现为减少趋势。 (5) 预测 2021—2026 年水面蒸发量将继续呈下降变化趋势。 [结论] 整体上, 疏勒河流域全年和四季水面蒸发量呈减少变化趋势, 且未来也表现为下降演变趋势。

**关键词:** 水面蒸发量; 演变特征; 未来趋势; 疏勒河流域

中图分类号: P332.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0050-09

## Change Trend and Prediction of Water Surface Evaporation in Shule River Basin from 1980 to 2020

Zhou Min<sup>1</sup>, Sun Dongyuan<sup>1</sup>, Zhao Yufeng<sup>2</sup>, Hui Lei<sup>3</sup>,  
Niu Zuirong<sup>1</sup>, Ma Yali<sup>1</sup>, Wu Lanzhen<sup>1</sup>, Wang Xingfan<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Xihe County Water Affairs Bureau, Longnan, Gansu 742100, China; 3. Danghe River Basin Water Resources Management Bureau of Jiuquan City, Jiuquan, Gansu 735000, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the variation characteristics and future evolution trend of water surface evaporation in the Shule River Basin, to better understand the dynamic changes of water resources in the basin, so as to provide decision support for the planning and management of water resources utilization in the region. [Methods] Based on the monthly and yearly water surface evaporation data of four hydrology stations in Changmabao, Shuangtabao Reservoir, Dangcheng Bay and Danghe Reservoir

收稿日期: 2023-08-31

修回日期: 2023-10-02

资助项目: 甘肃省高等学校青年博士资助项目(2022QB-070); 甘肃农业大学科技创新基金——青年导师扶持资助项目(GAU-QDFC-2021-16); 甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA015); 甘肃省青年科技基金项目(21JR7RA854); 甘肃省水利科学试验研究与技术推广项目(23GSLK092)

第一作者: 周敏(1998—), 女, 山东安丘人, 在读博士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: 1627146937@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教学和科研工作。E-mail: sundy@gsau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

from 1980 to 2020, linear dip rate, sliding t test, R/S analysis, BP neural network and other analysis methods were used to examine the characteristics of surface evaporation changes in the past 40 years, and the future evaporation and its change trend were predicted. [Results] (1) The annual variation of water surface evaporation at all stations in the Shule River Basin showed a decreasing trend during 1980—2020, and the trend rate of each station was ranked as: Shuangtabao Reservoir Station ( $-187.10$  mm/decade) $>$ Danghe Reservoir Station ( $-178.20$  mm/decade) $>$ Changmabao Station ( $-33.00$  mm/decade) $>$ Dangchengwan Station ( $-30.00$  mm/decade), among which the decrease trend of Shuangtabao Reservoir and Danghe Reservoir Station was very significant. (2) The water surface evaporation of Changmabao, Shuangtapao Reservoir and Danghe Reservoir Stations showed a decreasing trend in all seasons, while that of Dangchengwan Station showed an insignificant increasing trend in spring and a decreasing trend in other seasons. (3) The mutation years of Changmabao, Dangcheng Bay, Shuangtabao Reservoir and Danghe Reservoir were 2004, 2015, 2007 and 2007, respectively. (4) The uneven coefficient and concentration of evaporation on the surface of the basin showed a decreasing trend as a whole. (5) It is predicted that the evaporation of water surface will continue to show a downward trend in 2021—2026. [Conclusion] On the whole, the annual and seasonal water surface evaporation in the Shule River Basin shows a decreasing trend, and it also shows a decreasing trend in the future.

**Keywords:** water surface evaporation; evolution characteristics; future trends; Shule River Basin

当今世界正经历着日益严峻的气候变化,水文循环作为地球上海洋、陆地和大气相互作用中最活跃的联结纽带,受气候变化影响十分显著<sup>[1-2]</sup>,而水面蒸发作为水文循环中的关键环节<sup>[3]</sup>,可表征区域水循环变化<sup>[4]</sup>,也是水文模型模拟、水资源评价、水资源开发利用规划中基本参证资料<sup>[5-6]</sup>,越来越受到众多学者关注,有关蒸发的相关研究也成为重要研究内容和议题。水面蒸发即能直接影响区域水-能平衡<sup>[7]</sup>,又对水资源供应起着至关重要作用<sup>[8]</sup>。因此,研究水面蒸发对深入解析水资源变化趋势及水文循环变化规律与特征<sup>[9]</sup>,对制定高效水资源管理制度和节水措施具有重要意义。

近年来不同学者对水面蒸发做了大量研究,主要集中在时空变化趋势、影响因素分析及蒸发量预测等方面。闫桂霞等<sup>[10]</sup>利用 M-K 检验、不均匀系数等方法系统分析了全国及七大流域水面蒸发量突变性和年内分配特征;肖曼珍等<sup>[11]</sup>运用气候倾向率、M-K 趋势检验法等方法对中国南北过渡带水面蒸发量的年际和季节时空变化作了分析;李学辉等<sup>[12]</sup>采用线型比较、均值 t 检验等方法研究了云南省水面蒸发系列突变性和稳定性;王玥等<sup>[13]</sup>采用气候倾向率和完全相关系数方法开展了淮北平原近 57 年水面蒸发量汛期、非汛期、年和年代多尺度变化特征及其差异性研究。秦鹏飞等<sup>[14]</sup>基于序列均一性多元分析(MASH)和 Climatol 均一化方法,揭示了近 60 年中国年、季节蒸发皿蒸发量的时、空演变特征。陈金红等<sup>[9]</sup>通过

构建小波包分解的 GJO-XGBoost 模型,预测了云南省龙潭站、董湖站、西洋站的水面蒸发量。

疏勒河流域位于甘肃省河西走廊西端,是中国西北部重要的生态安全和发展区,也是西北地区重要的水资源供应地。水面蒸发作为调控区域水量平衡、地表能量平衡及气候变化等方面的重要因素<sup>[1]</sup>,其变化不仅会直接影响区域水资源供应,还将对区域农业灌溉、生态平衡以及社会经济产生深远影响,但前人对疏勒河流域水面蒸发的研究相对薄弱。鉴于此,本文基于 1980—2020 年疏勒河流域昌马堡、双塔堡水库、党城湾和党河水库站蒸发量观测资料,系统研究流域水面蒸发量演变特征和未来变化规律,以期为进一步明晰变化环境下干旱内陆河流域水面蒸发变化规律及其影响因素奠定基础,也为疏勒河流域水资源优化分配和生态保护提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

疏勒河流域是甘肃省三大内陆河流域之一,位于东经  $92^{\circ}11'$ — $99^{\circ}00'$ ,北纬  $38^{\circ}00'$ — $42^{\circ}48'$ ,干流全长 670 km,流域面积  $4.13 \times 10^4$  km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>,年蒸发量 2 897~3 042 mm,蒸发强度较高,属典型的内陆干旱性气候,区域内有昌马堡、双塔堡水库、党城湾、党河水库等水文站。

### 1.2 数据资料

由于实际蒸发观测难度大,但蒸发皿蒸发量与水面蒸发相关性较高,是表征蒸发强度的直接观测气象

指标,同时该指标观测资料累积序列长、可比性好,成为水资源评价、水利工程设计、水文研究的基本参证指标<sup>[5-6]</sup>,故选取疏勒河流域 1980—2020 年昌马堡站、双塔堡水库站、党城湾站、党河水库站 4 个水文站逐月、逐年蒸发皿蒸发量数据作为基础资料,所有数据来源于甘肃省水文站,流域蒸发量实测仪器采用 E601 型蒸发皿。文中季节划分:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—2 月为冬季。

### 1.3 研究方法

采用线性倾向率法<sup>[16]</sup>、5 a 滑动平均法<sup>[17]</sup>分析水面蒸发年际变化趋势,并通过 M-K 趋势检验法对变化趋势进行显著性检验。借助滑动  $t$  检验分析水面蒸发突变特征,此方法是考察两个样本平均值的差异是否显著来检验突变点,当  $|t| > |t_{\alpha/2}|$  时,说明存在显著性差异,反之则不存在显著性差异,对于满足  $|t| > |t_{\alpha/2}|$  所有可能的点,选择使  $t$  检验统计量达到极大值的那一点作为最可能的变异点<sup>[18]</sup>。本文选择子序列步长均为 5,置信区间为 95%,查询  $t$  分布表得到对应的临界值  $|t_{\alpha/2}|$  为 2.31。运用不均匀系数 ( $C_v$ ) 和集中度 ( $C_d$ ) 研究水面蒸发量不均匀性与集中变化情况<sup>[19]</sup>。通过 R/S 分析法研究流域水面蒸发的未来变化趋势<sup>[11]</sup>,利用 BP 人工神经网络模型预测流域 2021—2026 年水面蒸发量<sup>[20]</sup>。

表 1 1980—2020 年疏勒河流域水面蒸发量变化特征

Table 1 Variation characteristics of water evaporation in Shule River basin from 1980 to 2020

站点	倾向率/(mm/10 a)				
	全年	春季	夏季	秋季	冬季
昌马堡站	-33.00	-0.70	-23.30	-9.50	-2.00
双塔堡水库站	-187.10 **	-52.30 **	-88.10 **	-37.70 **	-9.10 **
党城湾站	-30.00	5.10	-13.50	-20.00 **	-1.50
党河水库站	-178.20 **	-41.00 **	-80.50 **	-46.20 **	-10.70 **

注:“\*”表示通过 0.05 显著性检验,“\*\*”表示通过 0.01 显著性检验。

### 2.2 水面蒸发量季节变化特征

采用线性倾向率分析研究区水面蒸发量的季节变化特征。如表 1 和图 2 所示,昌马堡站春、夏、秋、冬季水面蒸发量的倾向率依次 -0.70, -23.30, -9.5, -2.00 mm/10 a,即四季蒸发量减少幅度存在明显差异,均表现为不显著减小趋势。双塔堡水库站春季蒸发量倾向率为 -52.30 mm/10 a,夏季为 -88.10 mm/10 a,秋季为 -37.70 mm/10 a,冬季为 -9.10 mm/10 a,四季减少趋势均显著。党城湾站春季蒸发量倾向率为 5.10 mm/10 a,呈不显著增加趋势,夏季、秋季、冬季倾向率依次为 -13.50, -20.00, -1.50 mm/10 a,秋季减少趋势显著,夏冬季节减少不显著。党河水库站四季蒸发量倾向率依次为 -41.00, -80.50, -46.20, -10.70 mm/10 a,均

## 2 结果与分析

### 2.1 水面蒸发量年际变化特征

采用线性倾向率和 5 a 滑动平均法分析疏勒河流域水面蒸发量年际变化特征。由表 1 和图 1 可知,昌马堡站水面蒸发量时间序列 M-K 统计量  $Z$  值未达到 0.01/0.05 显著水平,倾向率为 -33.00 mm/10 a,整体呈不显著减少趋势,2002 年出现年极大值 2 165.10 mm,2019 年出现年极小值为 1 030 mm,蒸发量围绕多年平均值 1 745.51 mm 呈波动下降变化。双塔堡水库站统计量  $Z$  值达到 0.01 显著水平,倾向率为 -187.10 mm/10 a,整体呈显著减少趋势,1983 年出现年极大值 2 873.70 mm,2020 年出现年极小值 1 428.30 mm,蒸发量围绕多年平均值 1 996.61 mm 呈波动下降变化。党城湾站统计量  $Z$  值未达到 0.01/0.05 显著水平,倾向率为 -30.00 mm/10 a,整体呈不显著减少趋势,1997 年出现年极大值 1 696.90 mm,2018 年出现年极小值 1 050.80 mm,蒸发量围绕多年平均值 1 374.98 mm 呈波动下降变化。党河水库站统计量  $Z$  值达到 0.01 显著水平,倾向率为 -178.20 mm/10 a,2001 年出现年极大值 2 242.70 mm,2020 年出现年极小值 1 213.80 mm,蒸发量围绕多年平均值 1 748.85 mm 呈波动下降变化。总体上,疏勒河流域水面蒸发量表现为波动下降趋势。

呈显著减小趋势。昌马堡、双塔堡水库、党河水库站水面蒸发量四季变化趋势与全年一致,党城湾站春季变化趋势与全年相反,可见春季蒸发量对该站全年蒸发量的贡献率微小。党城湾站海拔较高,春季来临,气温升高,日照时数明显增加,而降水量并未大幅度增多,因此蒸发量呈增加趋势。

### 2.3 水面蒸发量突变性分析

运用滑动  $t$  检验分析疏勒河流域水面蒸发量突变性特征,结果见图 3 和表 2。由图 3 可知,昌马堡站、党城湾站、双塔堡水库站和党河水库站水面蒸发量分别在 2004 年、2015 年、2007 年和 2007 年发生突变。由表 2 可知,昌马堡站水面蒸发量突变年份前后均值分别为 1 807.89, 1 633.58 mm,变化幅度为 -9.64%。双塔

堡水库站、党城湾站、党河水库站蒸发量突变年份前后均值分别减少了 538.07, 286.88, 635.15 mm, 变幅依次为  $-24.73\%$ ,  $-20.28\%$ ,  $-32.37\%$ 。

#### 2.4 水面蒸发不均匀性与集中度变化分析

采用不均匀系数和集中度分析疏勒河流域水面蒸发量不均匀性与集中度变化, 结果如图 4 所示。昌马堡

站水面蒸发量不均匀系数倾向率为  $-0.003/10\text{ a}$ , 呈减小趋势,  $C_v$  变化范围为  $0.52\sim 0.9$ , 多年平均值为  $0.67$ , 2001 年出现最大值为  $0.9$ , 2018 年出现最小值  $0.52$ 。水面蒸发量集中度倾向率为  $-0.003/10\text{ a}$ , 呈现下降趋势。  $C_d$  的变化范围为  $0.33\sim 0.5$ , 多年平均值为  $0.45$ , 1995 年出现最大值  $0.5$ , 2009 年出现最小值  $0.33$  (图 4A)。

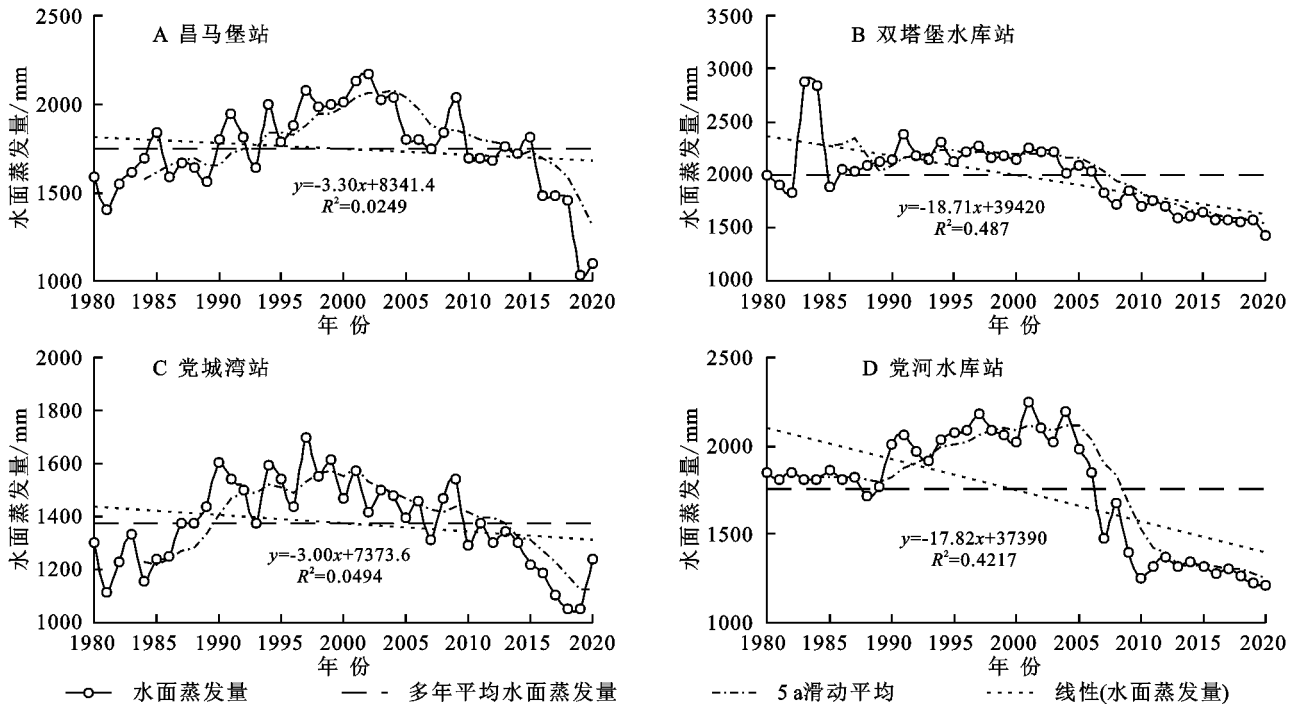


图 1 疏勒河流域水面蒸发量年际变化趋势

Fig. 1 Interannual variation trend of water surface evaporation in Shule River basin

双塔堡水库站蒸发量不均匀系数倾向率为  $-0.059/10\text{ a}$ , 呈减小趋势,  $C_v$  变化范围为  $0.54\sim 1.06$ , 多年平均值为  $0.70$ , 1984 年出现最大值  $1.06$ , 最小值  $0.54$  在 2013 年、2017 年均出现。水面蒸发量集中度倾向率为  $-0.002/10\text{ a}$ , 呈下降趋势。  $C_d$  的变化范围在  $0.43\sim 0.51$ , 多年平均值为  $0.47$ , 1992 年、2010 年均出现最大值  $0.51$ , 2013 年出现最小值  $0.43$  (图 4B)。

党城湾站蒸发量不均匀系数倾向率为  $-0.01/10\text{ a}$ , 呈减小趋势,  $C_v$  变化范围为  $0.35\sim 0.72$ , 多年平均值为  $0.57$ , 最大值  $0.72$  出现在 1997 年, 最小值  $0.35$  出现在 2015 年。水面蒸发量集中度倾向率为  $-0.0007/10\text{ a}$ , 呈下降趋势,  $C_d$  的变化范围在  $0.24\sim 0.45$ , 多年平均值为  $0.38$ , 2020 年出现最大值  $0.45$ , 2015 年出现最小值  $0.2$  (图 4C)。

党河水库站蒸发量不均匀系数倾向率为  $-0.046/10\text{ a}$ , 呈减小趋势,  $C_v$  变化范围为  $0.53\sim 0.9$ , 多年平均值为  $0.69$ , 最大值  $0.9$  出现在 2001 年, 最小  $0.53$  出现在 2007 年。水面蒸发量集中度呈上升趋势, 倾向率为  $0.002/10\text{ a}$ 。  $C_d$  的变化范围在  $0.42\sim 0.51$ , 多年平均值为  $0.46$ , 最大值  $0.51$  出现在 2008 年, 最小值  $0.4$  出

现在 2007 年 (图 4D)。

#### 2.5 水面蒸发未来趋势及蒸发量预测分析

运用 R/S 分析法分析疏勒河流域水面蒸发量未来变化趋势, 结果如图 5 所示。1980—2020 年流域内昌马堡站、双塔堡水库站、党城湾站、党河水库站的 Hurst 指数均大于  $0.5$ , 分别为  $0.98, 0.86, 1.02, 1.03$ , 表现出很强的正持续性特征, 这表明流域未来水面蒸发量将与过去  $41\text{ a}$  的变化趋势相同, 继续保持减少趋势。

将水面蒸发量作为预测因子, 采用 BP 神经网络模型预测疏勒河流域 2021—2026 年水面蒸发量, 结果见表 3 和图 6。在  $10\%$  误差以内, 2021—2026 年昌马堡站水面蒸发量预测值分别为  $965.70, 958.21, 956.67, 956.36, 956.30, 956.28\text{ mm}$ ; 双塔堡水库站水面蒸发量预测值分别为  $1\,292.34, 1\,074.30, 967.19, 936.42, 929.09, 927.42\text{ mm}$ ; 党城湾站水面蒸发量预测值分别为  $1\,205.24, 1\,207.11, 1\,207.86, 1\,208.16, 1\,208.28, 1\,208.33\text{ mm}$ ; 党河水库站水面蒸发量预测值分别为  $1\,210.706, 1\,210.618, 1\,210.601, 1\,210.598\,3, 1\,210.597\,7, 1\,210.597\,6\text{ mm}$ 。



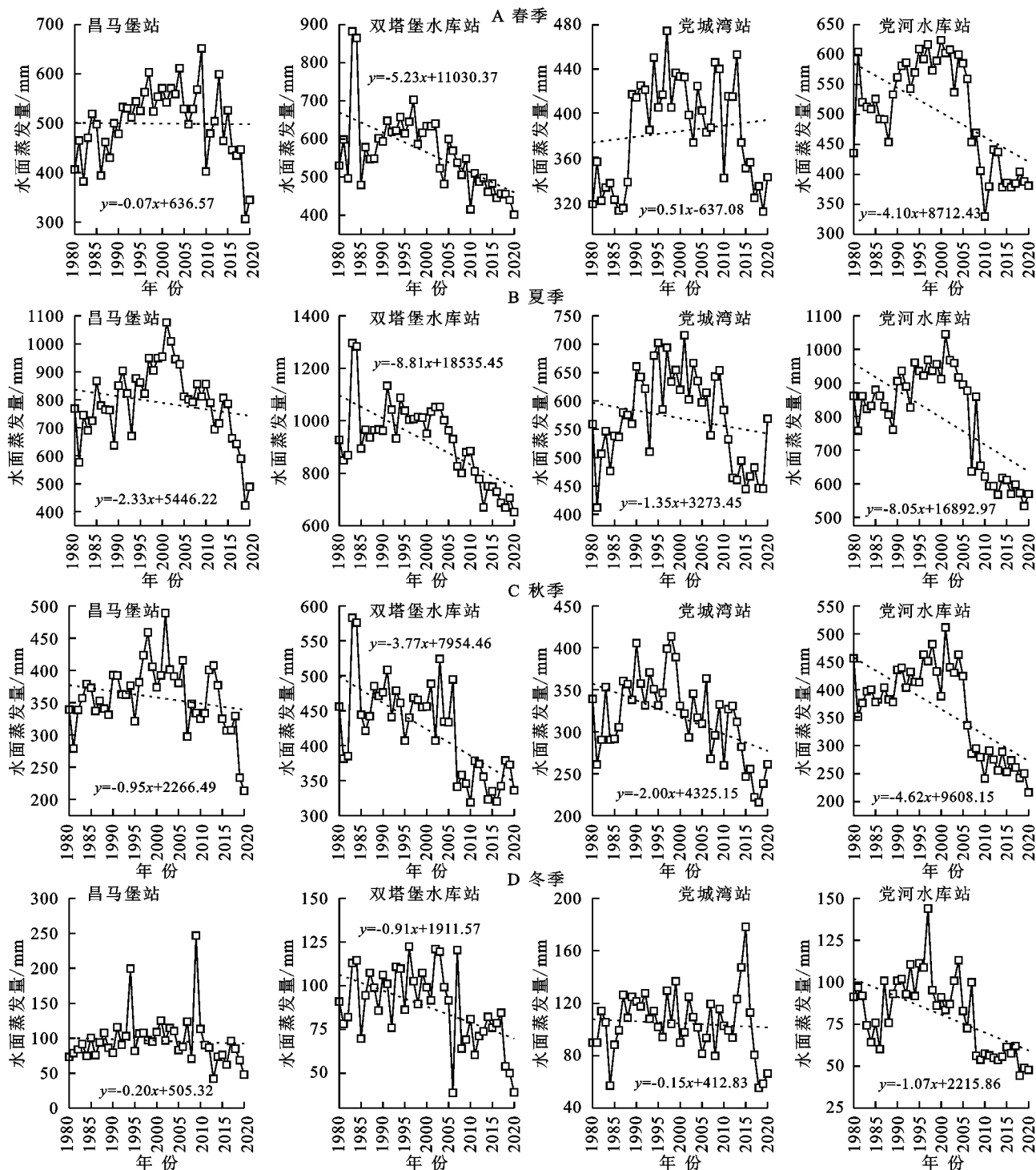


图2 疏勒河流域四季水面蒸发量变化趋势

Fig. 2 Change trend of water surface evaporation in four seasons in Shule River basin

### 3 讨论

研究期内疏勒河流域全年及四季水面蒸发量整体表现为减少趋势,与中国西北诸河流域变化<sup>[21]</sup>趋势基本一致,也与刘红国<sup>[22]</sup>疏勒河流域各站蒸发量的变化趋势相同。

全球气温持续变暖的趋势下,疏勒河流域水面蒸发量却呈下降趋势,表明流域存在“蒸发悖论”现

象<sup>[13]</sup>,关于“蒸发悖论”的解释大体有两种:一是云量或气溶胶含量增加引起的太阳辐射量减少;二是水体表面蒸发与陆面实际蒸发存在互补关系,当陆面实际蒸发增加,作为蒸发皿环境的大气水汽含量增多,记录的水面蒸发量就会减少<sup>[23]</sup>。任国玉等<sup>[21]</sup>指出我国西北区云量和降水有比较明显的增多,陈娜娜等<sup>[24]</sup>研究也表明1967—2016年疏勒河流域降水显著增多,因此,疏勒河流域水面蒸发减少与云量和降

水增加有极大相关性。昌马堡站在 1990 年发生正突变,在 2010 年发生负突变,党城湾站在 1987 年出现正突变,在 2010 年出现负突变,双塔堡水库站和党河水库站均在 2007 年均出现负突变,这可能受降水增加或减少影响,昌马堡和党城湾站在 20 世纪 90 年代

从丰水年转变为平水年,21 世纪 10 年代进入丰水年<sup>[25]</sup>,双塔堡水库与党河水库在 2007 年左右从枯水年转变为丰水年<sup>[26]</sup>,水面蒸发量相应发生变化。流域各站点集中度与不均匀系数均呈下降趋势,表明水面蒸发量逐渐均匀化。

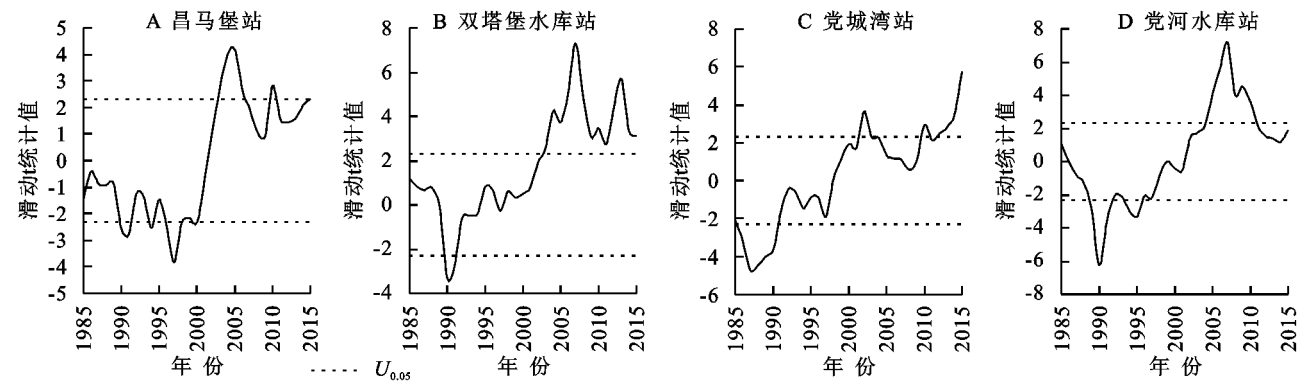


图 3 疏勒河流域水面蒸发量突变性分析

Fig. 3 Analysis on the mutation of water surface evaporation in Shule River basin

表 2 疏勒河流域水面蒸发量突变性分析结果  
Table 2 Abrupt analysis of water evaporation  
in Shule River basin

1980—2020 年	突变 年份	突变前 均值/mm	突变后 均值/mm	变化 幅度/%
昌马堡站	2004	1807.89	1633.58	−9.64
双塔堡水库站	2007	2175.73	1637.66	−24.73
党城湾站	2015	1414.74	1127.86	−20.28
党河水库站	2007	1962.10	1326.95	−32.37

随着降水量增加和气温升高导致的冰川融水量增大,流域地表径流会显著增大<sup>[27]</sup>,而水面蒸发量呈下降变化,可能导致流域内暴雨洪水频繁发生<sup>[22]</sup>。本研究仅对疏勒河流域水面蒸发量自身演变规律做出分析,未深入探究蒸发量的影响因素,同时基于水面蒸发量自身变化规律进行预测,未能考虑气象条件对蒸发量变化的影响,预测结果可能存在误差。因此,今后的研究中需继续加强水面蒸发成因分析及多因素预测等方面研究。

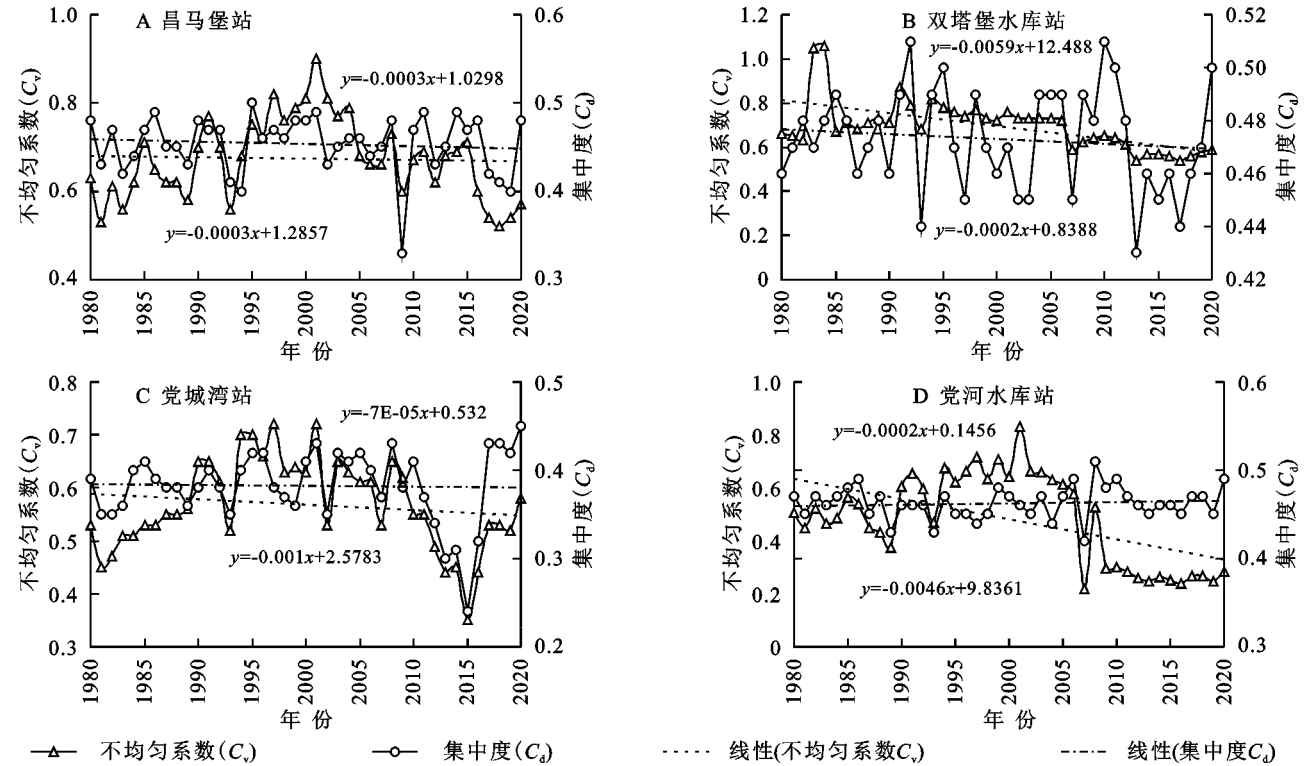


图 4 疏勒河流域不均匀系数和集中度年际变化曲线

Fig. 4 Inter annual variation curve of uneven coefficient and concentration ratio in Shule River basin

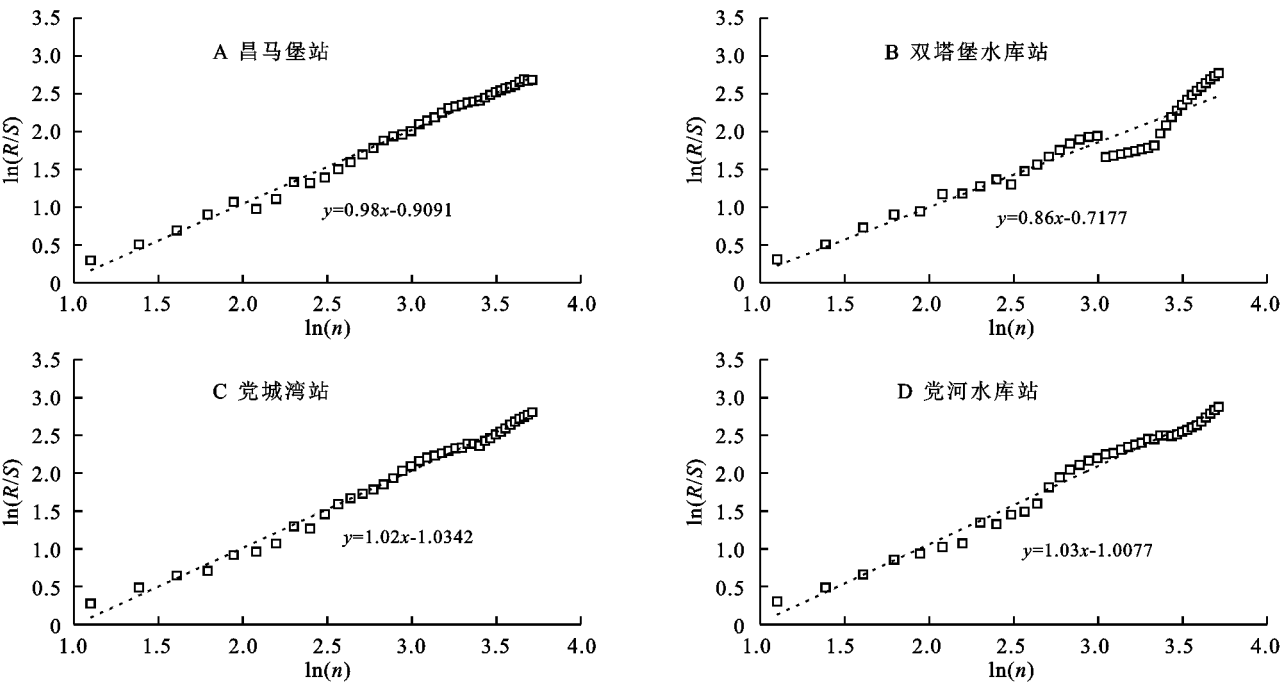


图 5 1980—2020 年疏勒河流域水面蒸发量  $R/S$  分析结果

Fig. 5  $R/S$  Analysis of water surface evaporation in Shule River basin from 1980 to 2020

表 3 2021—2026 年疏勒河流域水面蒸发量预测误差分析

年份	昌马堡站			双塔堡水库站			党城湾站			党河水库站		
	真实值/	预测值/	误差/%	真实值/	预测值/	误差/%	真实值/	预测值/	误差/%	真实值/	预测值/	误差/%
	mm	mm		mm	mm		mm	mm		mm	mm	
2017	1480	1473.75	0.42	1570.2	1570.97	0.05	1107.9	1165.11	5.16	1304.9	1263.35	3.18
2018	1450.7	1333.99	8.05	1556.7	1561.69	0.32	1050.8	1171.95	11.53	1262.4	1225.29	2.94
2019	1030	1121.55	8.89	1567.5	1542.64	1.59	1052.4	1189.9	13.07	1220.5	1213.62	0.56
2020	1094.8	1000.01	8.66	1428.3	1473.84	3.19	1237.8	1200.62	3.00	1213.8	1211.17	0.22

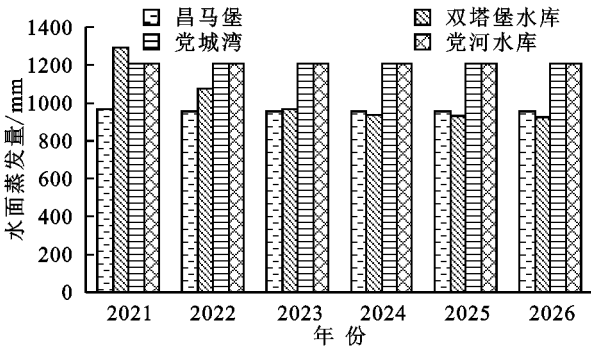


图 6 2021—2026 年疏勒河流域水面蒸发量预测结果

Fig. 6 Prediction results of water surface evaporation in Shule River basin from 2021—2026

4 结论

(1) 疏勒河流域昌马堡站、双塔堡水库站、党城湾站、党河水库站水面蒸发量整体呈下降趋势,倾向率分别为 $-33.00,-187.10,-30.00,-178.20\text{ mm}/10\text{ a}$ ,41 a 年内分别减少了 $135.30,767.11,123.00,730.62\text{ mm}$ ,其中双塔堡水库和党河水库站减少趋势尤其显著。

(2) 流域昌马堡站水面蒸发量四季表现为不显著降低趋势。双塔堡水库站和党河水库站水面蒸发量四季均呈显著降低趋势。党城湾站蒸发量春季呈不显著增加趋势,其他季节呈减少趋势,其中秋季减少趋势十分显著。

(3) 流域昌马堡站、双塔堡水库站、党城湾站、党河水库站水面蒸发量分别在 2004 年、2007 年、2015 年、2007 年发生突变后,水面蒸发量均值较突变前依次减少了 $9.64\%,24.73\%,20.28\%,32.37\%$ 。流域水面蒸发量不均匀系数和集中度整体表现为减少趋势。

(4) 流域全年及四季水面蒸发量 Hurst 指数均大于 0.5,呈正持续性特征,表明未来流域蒸发量可能有减少趋势,2021—2026 年预测结果显示,蒸发量仍呈现逐年减少变化趋势。

参考文献 (References):

[1] 李秀,郎琪,雷坤,等.1958—2018 年永定河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析[J].气候与环境研究,2021,26(3):323-332.

Li X, Lang Q, Lei K, et al. Variation characteristics of

- pan evaporation and the influencing factors in the Yongding River Basin during 1958—2018[J]. Climatic and Environmental Research, 2021,26(3):323-332.
- [2] 姜彤,孙赫敏,李修仓,等.气候变化对水文循环的影响[J].气象,2020,46(3):289-300.
- Jiang T, Sun H M, Li X C, et al. Impact of climate change on water cycle[J]. Meteorological Monthly, 2020,46(3):289-300.
- [3] Li Z, Chen Y N, Shen Y J, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China[J]. Water Resources Research, 2013,49(4):2205-2212.
- [4] 叶林媛,鲁汉,秦淑静,等.长江流域1960—2019年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律[J].水科学进展,2022,33(5):718-729.
- Ye L Y, Lu H, Qin S J, et al. Changes in pan evaporation and actual evapotranspiration of the Yangtze River Basin during 1960—2019[J]. Advances in Water Science, 2022,33(5):718-729.
- [5] 张耀宗,张勃,张多勇,等.1960—2018年黄土高原地区蒸发皿蒸发时空变化特征及影响因素[J].干旱区研究,2022,39(1):1-9.
- Zhang Y Z, Zhang B, Zhang D Y, et al. Spatio-temporal patterns of pan evaporation from 1960 to 2018 over the Loess Plateau: Changing properties and possible causes[J]. Arid Zone Research, 2022,39(1):1-9.
- [6] 赵梓琨,孙文义,穆兴民,等.黄河流域水文站和气象站蒸发皿蒸发量时空变化及其差异[J].人民黄河,2023,45(6):24-31.
- Zhao Z K, Sun W Y, Mu X M, et al. Temporal and spatial variation and difference of pan evaporation between hydrological station and meteorological station in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023,45(6):24-31.
- [7] Guan X X, Liu C S, Zhang J Y, et al. On the attribution of changing water surface evaporation across China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,40:100991.
- [8] 刘昌明.黄河流域水循环演变若干问题的研究[J].水科学进展,2004,15(5):608-614.
- Liu C M. Study of some problems in water cycle changes of the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2004,15(5):608-614.
- [9] 陈金红,崔东文.基于小波包分解的GJO-XGBoost水面蒸发量预测[J].三峡大学学报:自然科学版,2023,45(3):1-7.
- Chen J H, Cui D W. GJO-XGBoost prediction of water surface evaporation based on wavelet packet decomposition[J]. Journal of China Three Gorges University; Natural Sciences, 2023,45(3):1-7.
- [10] 闫桂霞,李登华.1961—2006年我国水面蒸发时空变化特征分析[J].水电能源科学,2015,33(10):1-5.
- Yan G X, Li D H. Research of spatiotemporal variation of water surface evaporation in China during 1961—2006[J]. Water Resources and Power, 2015,33(10):1-5.
- [11] 肖曼珍,朱春苗,宋小燕,等.我国南北过渡带水面蒸发的时空变化及趋势预测[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):263-272.
- Xiao M Z, Zhu C M, Song X Y, et al. Spatiotemporal changes and trend prediction of water surface evaporation in the north-south transitional zone of China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021,19(2):263-272.
- [12] 李学辉,谷桂华,余守龙,等.云南省水面蒸发量变化趋势及其影响因素分析[J].人民长江,2020,51(S2):63-67.
- Li X H, Gu G H, Yu S L, et al. Analysis on the changing trend of water surface evaporation and its influencing factors in Yunnan Province[J]. Yangtze River, 2020,51(S2):63-67.
- [13] 王玥,王怡宁,雷晓辉,等.淮北平原近57年多尺度水面蒸发悖论差异性研究[J].节水灌溉,2022,47(11):59-65.
- Wang Y, Wang Y N, Lei X H, et al. Study on the difference of multi-scale water surface evaporation paradox in Huaibei Plain in recent 57 years[J]. Water Saving Irrigation, 2022,47(11):59-65.
- [14] 秦鹏飞,赵天保,曹建荣,等.基于均一化数据的1960—2021年中国蒸发皿蒸发量时空变化特征[J].气象学报,2023,81(3):478-491.
- Qin P F, Zhao T B, Cao J R, et al. Characteristics of tempo-spatial variations of pan evaporation in China during 1960—2021 based on a homogenized dataset[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2023,81(3):478-491.
- [15] 孙栋元,齐广平,鄢继选,等.疏勒河干流降水变化特征[J].干旱区研究,2020,37(2):291-303.
- Sun D Y, Qi G P, Yan J X, et al. Research on variation characteristics of precipitation in the mainstream of Shule River[J]. Arid Zone Research, 2020,37(2):291-303.
- [16] 热孜宛古丽·麦麦提依明,杨建军,刘巍.艾比湖流域1957—2013年潜在蒸散、气温、降水变化特征分析[J].冰川冻土,2016,38(1):69-76.
- Maimaitiyiming R, Yang J J, Liu W. Changing characteristics of potential evapotranspiration, air temperature and precipitation in Ebinur Lake Basin from 1957 to 2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016,38(1):69-76.



- [17] 师银芳,熊劲锐,邢捷.1971—2015 年鄂西山地极端气温变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(6):10-17.  
Shi Y F, Xiong J K, Xing J. Characteristics of extreme temperature changes in Western Hubei Mountains from 1971 to 2015[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(6):10-17.
- [18] 丁爱中,赵银军,郝弟,等.永定河流域径流变化特征及影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(1):17-22.  
Ding A Z, Zhao Y J, Hao D, et al. Analysis of variation characteristics of runoff and their influencing factors in the Yongding River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(1):17-22.
- [19] 曹振宇.穆棱河流域上游径流年内分配特性[J].水电能源科学,2019,37(1):21-25.  
Cao Z Y. Variation regularity of intra-annual runoff distribution in the upstream of the Muling River Basin [J]. Water Resources and Power, 2019,37(1):21-25.
- [20] 马于航,索梅芹.基于 GA-BP 神经网络与正态区间估计的需水预测:以邯郸市为例[J].中国农村水利水电,2022,64(3):19-24.  
Ma Y H, Suo M Q. Research on water demand forecasting in Handan City based on GA-BP neural network and normal interval estimation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022,64(3):19-24.
- [21] 任国玉,郭军.中国水面蒸发量的变化[J].自然资源学报,2006,21(1):31-44.  
Ren G Y, Guo J. Change in pan evaporation and the influential factors over China: 1956—2000 [J]. Journal of Natural Resources, 2006,21(1):31-44.
- [22] 刘红国.疏勒河流域水文气象要素趋势分析[J].地下水,2020,42(3):184-185.  
Liu H G. Trend analysis of hydrometeorological elements in Shule River Basin [J]. Ground Water, 2020,42(3):184-185.
- [23] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等.“蒸发悖论”在中国的规律分析[J].水科学进展,2008,19(2):147-152.  
Cong Z T, Ni G H, Yang D W, et al. Evaporation paradox in China [J]. Advances in Water Science, 2008,19(2):147-152.
- [24] 陈娜娜,任欣琪.疏勒河流域气温、降水、径流演变特征及径流影响因素分析[C]//河海大学,生态环境部黄河流域生态环境监督管理局,华北水利水电大学,中国自然资源学会水资源专业委员会,2020(第八届)中国水生态大会论文集.  
Chen N N, Ren X Q. Variation Characteristics of Temperature, Precipitation, Runoff and Influencing Factors of Runoff in Shule River Basin [C] // Hohai University, Yellow River Basin Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Ministry of Ecology and Environment, North China University of Water Resources and Hydropower, Water Resources Committee of Chinese Society of Natural Resources. Proceedings of the 8th China Water Ecology Conference 2020.
- [25] 张昌顺.疏勒河流域山前区降水量变化趋势分析[J].地下水,2015,37(5):158-159,165.  
Zhang C S. Analysis of precipitation change trend in the piedmont area of Shule River Basin [J]. Ground Water, 2015,37(5):158-159,165.
- [26] 颜明慧,张文春,刘刚.疏勒河干流降水时空分布研究[J].地下水,2022,44(5):197-200.  
Yang M H, Zhang W C, Liu G. Spatiotemporal distribution of precipitation in Shule River main stream [J]. Ground Water, 2022,44(5):197-200.
- [27] 贾玲,张百祖,牛最荣,等.疏勒河上游径流变化与预测分析[J].干旱区研究,2022,39(5):1588-1597.  
Jia L, Zhang B Z, Niu Z R, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River [J]. Arid Zone Research, 2022,39(5):1588-1597.

(上接第 49 页)

- [28] 罗为东,甘淑,袁希平,等.基于 UAV 高分辨率 DEM 的复杂微地貌形态特征分析:以恐龙谷南缘山区为例[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(5):109-117.  
Luo W D, Gan S, Yuan X P, et al. Morphological characterization of complex micro-landscapes based on UAV high-resolution DEM: Take the mountainous area on the southern rim of Dinosaur valley as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(5):109-117.
- [29] 陈楠,王钦敏.基于地形因子信息量的数字高程模型分辨率的选择:以黄土高原的研究为例[J].武汉大学学报:信息科学版,2009,34(6):692-695,705.  
Chen N, Wang Q M. Selection of DEM resolutions based on the information amount of terrain factors: A case study of Loess Plateau area [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(6):692-695,705.