

密云水库上游潮白河流域丰平枯特征及其与入库水量的定量关系

熊锐¹, 赵永军¹, 邱云霄²

(1.水利部水土保持监测中心, 北京 100053; 2.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 揭示密云水库上游潮白河流域水量变化的年际时序规律及丰平枯季节性差异, 为京津冀地区水资源高效利用及生态用水保障提供决策参考。[方法] 在收集流域水量数据, 进行潮白河流域逐月丰平枯水期分析的基础上, 采用距平百分率解析潮白河流域水量变化特征, 并推导流域丰平枯时段与径流水量的定量化关系。[结果] 2010—2021年, 潮白河流域的枯水期历时远大于丰水期和平水期时间, 但丰水水量及其距平百分比每隔1~2a均会呈现指数级增长趋势, 表明潮白河流域近年来更多的表现出了极端的气候特征。潮白河流域的丰水时段均主要出现在7—12月, 流域平水时段基本伴生于丰水时段, 但是2010—2021年, 潮河与白河流域仅出现了6~7个月的平水期; 枯水时段占据了12a来的大部分时期, 阶段性密集分布在除丰水期和平水期以外的所有时段。在所有时段, 白河流域的水量均高于潮河流域, 这可能归因于春季融雪对径流的补给。[结论] 2010—2021年, 潮白河流域极端降水时间增多, 但枯水时段的比例远高于平水期和丰水期。3者的比例关系是影响流域水量最重要的因素。

关键词: 密云水库; 潮白河流域; 丰平枯特征; 流域径流量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0151-06

中图分类号: S715

文献参数: 熊锐, 赵永军, 邱云霄. 密云水库上游潮白河流域丰平枯特征及其与入库水量的定量关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 151-156. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.016; Xiong Rui, Zhao Yongjun, Qiu Yunxiaol. Characteristics of wet, normal and dry in Chaobai River basin, upper reaches of Miyun Reservoir, and their quantitative relationship with inflow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 151-156.

Characteristics of Wet, Normal and Dry in Chaobai River basin, Upper Reaches of Miyun Reservoir, and Their Quantitative Relationship with Inflow

Xiong Rui¹, Zhao Yongjun¹, Qiu Yunxiao²

(1. Water and Soil Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources,

Beijing 100053, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The interannual time-series patterns of water quantity changes and seasonal differences in wet, normal and dry in the Chaobai River basin upstream of the Miyun Reservoir were studied to provide decision support for efficient water utilisation and ecological water security in the Beijing-Tianjin-Hebei region. [Methods] Based on the collection of water quantity data and the analysis of the monthly wet, normal, and dry periods, the distance flatness percentage was used to explore the characteristics of water quantity changes in the Chaobai River basin and to derive the quantitative relationship between the wet, normal and dry periods of the basin and the amount of runoff water. [Results] From 2010 to 2021, the dry season of the Chaobai River basin was much longer than that of the wet and normal seasons, but the high

收稿日期: 2023-11-13

修回日期: 2024-03-13

资助项目: 高分辨率对地观测系统重大专项“高分水利遥感应用示范系统(2期)”(08-Y30F02-9001-20/22)

第一作者: 熊锐(1981—), 男(汉族), 湖北省广水市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持生态治理及生产建设项目水土保持技术研究和管理工作。Email: crazyxr99@163.com。

通信作者: 赵永军(1969—), 男(汉族), 河北省晋州市人, 博士, 教授级高级工程师(专业技术二级), 主要从事水土保持技术研究和管理工作。Email: yongjun_zhao@163.com。

water volume and its anomaly percentage showed an exponential growth trend every 1—2 years, indicating that the Chaobai River basin had more extreme climate characteristics in recent years. The wet period in the Chaobai River basin mainly occurred from July to December, and the normal period of the basin was accompanied by a wet period. However, from 2010 to 2021, the normal periods of the Chaobai River basin only had a normal water period of 6—7 months, respectively, and the dry period covered most of the 12 years, and it was densely distributed in all periods except the wet dry period and the normal period. During all periods, the water volume of the Baihe River basin was higher than that of the Chaohe River basin, which may be attributed to the recharge of runoff by melting snow in spring. [Conclusion] The Chaobai River basin experienced an increase in extreme precipitation events from 2010 to 2021; however, the percentage of dry periods was much higher than that during the normal and wet periods. The relationship between the proportions of the three periods was the most important factor influencing the change in water quantity in this watershed.

Keywords: Miyun Reservoir; Chaobai River basin; characteristics of wet, normal and dry; watershed runoff

流域的科学管理能够为地区保障水资源质量和环境安全,促使人类生产生活得以正常运作和维护。流域径流量及其所表现出的丰平枯状况始终是国内外流域治理学者十分关注的内容,针对流域的丰平枯水期划分也存在较为丰富的方法,常用方法包括均值标准差法、频率分析法和距平百分率法等^[1-5],其中距平法是更为常见的丰平枯划分方法^[6]。水资源的丰平枯结果更多的与气温和降水存在较好的相关关系^[7],气温的抬升使得水分运动或转化速率更快,降水增长带来了显著的水分输入变化。相对精确地划分流域丰平枯时段后更便于探索其与流域水量之间的关系。李哲卿等^[8]在划分流域丰平枯水期的基础上,综合分析了水量和水质之间的关系及其变化;邓铭江等^[9]认为基于流域丰平枯情景可以调控生态用水量,不同的水量输入频率对应着拥有显著差异的生态供水量及植被需水保障度;吴常雪等^[10]分析了鄱阳湖 40 a 间枯水期内水量的变化特征,认为自 2002 年以后,人类活动导致的土地利用变化是造成水量降低的主要原因,其贡献率达到了 87.48%;张亚杰等^[11]创新使用群体智能仿生算法构建了 GEO-RVM 模型,有效预测了枯水期流域径流量,此外流域降水和径流丰枯是否一致是评判流域风险概率的重要指标^[12]。

京津冀地区作为全国最重要最高速的发展区域之一,自始至终对水资源都有较高的要求,密云水库就是有效保障区域水资源质与量的重要环节。自 2003 年起潮白河流域开始建设生态清洁小流域,着手保障下游用水安全^[13];在此之后京津冀跨省域生态补偿的标准与方式也逐渐提上了日程,从稻改早到面源污染治理等多个方面均进行了生态补偿的方法探索^[14-15],这一切均凸显了密云水库及其上游潮白河流域对区域繁荣发展的极端重要特征。本研究通过

对 2010—2021 年密云水库上游潮白河流域的丰平枯水平特征,反向推导其水量情况,相对精准的描述丰平枯水期与流域水量的定量化关系,以期京津冀地区生产应用与社会实践提供一定技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

潮白河流域地处海河流域北部,是北京密云水库的上游流域,地势以低山丘陵为主,属于温带大陆季风气候。流域年均气温为 1.5~14.0 °C,年均相对湿度约 60%,年均降水量为 539 mm,属于半湿润半干旱地区。值得注意的是,2021 年为研究时段内降水量最丰沛的一年,根据《北京市水资源公报》显示,2021 年全市降水量 924 mm,比多年平均值 585 mm 多 57.9%,极端降雨尤为明显。流域横跨河北滦平县、丰宁县、兴隆县、赤城县和沽源县,其中潮河流域控制面积为 4 854.5 km²,白河流域控制面积为 9 006.5 km²。60 a 来流域内土地利用方式变化明显,当前流域土地利用方式以森林为主,包括天然次生林和后期栽植的人工林。

1.2 研究方法

本研究根据北京市水务局官网公开数据《密云水库逐月逐年平均入库流量》,对自 2010 年 1 月至 2021 年 12 月潮白河入库流量进行丰、平、枯水量的界定和分析。其中潮河平均入库流量监测点为下会站(控制流域面积 5 300 km²),白河平均入库流量监测点位张家坟站(控制流域面积 8 500 km²)。根据《中国河流泥沙公报》显示结果,下会站多年平均径流量(2002—2021 年)为 4.01 m³/s,张家坟站多年平均径流量(2002—2021 年)为 7.32 m³/s,本研究时段内(2010—2021 年)下会、张家坟平均径流量则分别为

4.89 和 8.19 m^3/s , 该略高的结果归因于 2021 年极端降水的发生, 并非多年来径流明显增大, 因此本研究时段是具备典型性和代表性的。丰、平、枯水量的界定依据为国标《水文情报预报规范 (GB/T22482—2008)》, 采用距平百分率作为划分径流丰、平、枯的标准, 当距平百分率 $< -10\%$ 时属于枯水期, 当 $-10\% < \text{距平百分率} \leq 10\%$ 时属于平水期, 当距平百分率 $> 10\%$ 时属于丰水期。

2 结果与分析

2.1 潮白河入库水量及其丰平枯水期划分

下会断面是潮河向密云水库输入水量的主要监测断面。图 1 显示潮河流域 2010 年以来月均流量存在较小的上升趋势, 每年的 7—10 月容易出现流量极大值, 其中在 2021 年 8 月出现了月均流量最大值 65.39 m^3/s 。图 1 也明显表现为潮河流域枯水期时间远大于丰水期和平水期时间。从枯水期角度来看, 枯

水水量的距平百分比 12 a 来始终较为稳定; 而从丰水期角度来看, 丰水水量及其距平百分比均呈现指数级增长趋势, 每两个较为集中的丰水期之间均存在最多 2 a 的间隔期。

图 1 所表达的信息证明, 潮河流域丰水期水量既明显增多, 又表现出间歇性非连续的脉冲特征, 这表明潮河流域径流近年来更多的表现出极端降雨特征影响: 每年夏季均会出现较为集中的降雨事件, 然而每年或每隔一到两年的集中降雨时段均会造成比上一次更多的降雨量或形成更强烈的降雨强度。这在距平百分比图中表现的尤为明显, 而且可能正是由于脉冲性的强烈集中的降雨, 使得流域后续的径流补给难以以为续, 在更多的时候表现为枯水期现象, 在长期枯水期和脉冲性丰水期之间, 平水期持续时间短暂且不明显, 仅在 2011 年 9 月, 2013 年 11 月, 2015 年 9 月, 2016 年 12 月, 2017 年 9 月, 2020 年 8 月和 11 月内短期呈现了平水期特征。

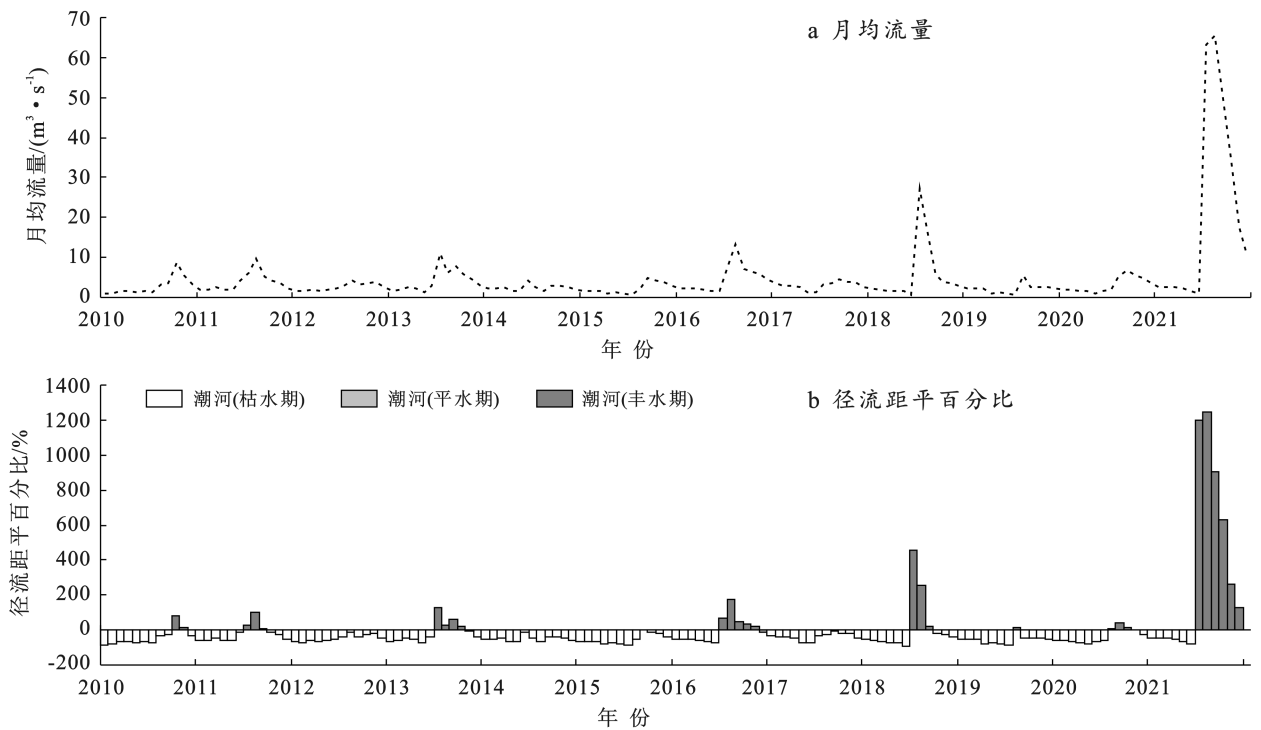


图 1 潮河下会断面 2010—2021 年丰平枯水期划分

Fig.1 Division of wet, normal and dry levels at Xiahui section of Chaohe River during 2010—2021

白河张家坟断面是白河向密云水库输入水量的主要监测断面, 图 2 中白河流域月均流量在 2010 年至今具备微弱的逐年上升趋势, 其中在 2021 年 7 月出现了月均流量最大值 107.31 m^3/s 。与潮河流域不同的是, 除了在每年 7—11 月存在流量的极大值, 白河流域在每年 3—5 月同样会出现流量的短暂高峰, 这使得白河流域水量分配相对均匀。通过计算距平

百分比, 可以同样发现白河流域枯水期时间远大于丰水期和平水期时间。在 12 a 内枯水水量距平百分比同样相对稳定。丰水期水量也存在指数级增长的特征, 只是白河流域丰水期要比潮河流域更长一些, 间歇性脉冲特征相对不明显, 不过从潮白河流域在 2021 年 7—8 月出现的极端流量来看, 极端气候事件或现象始终能够对流域水文过程造成严重影响。白

河流域的显著丰、枯水期过程中,平水期同潮河一般仍然短暂,仅在 2010 年 9 月和 11 月,2016 年 4 月,

2017 年 3 月和 9 月,2021 年 3 月内短期呈现了平水期特征。

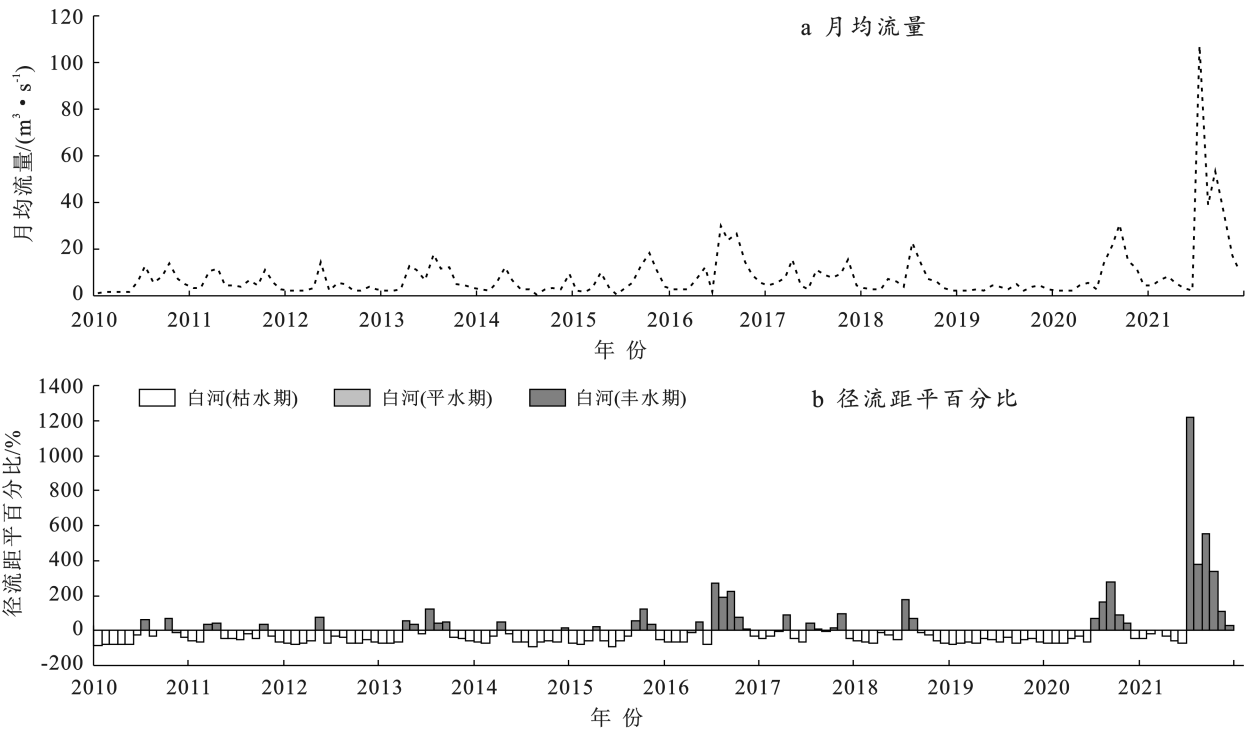


图 2 白河张家坟断面 2010—2021 年丰平枯水平划分

Fig.2 Division of wet, normal and dry levels at Zhangjiafen section of Baihe River during 2010—2021

2.2 不同时期潮白河入库水量分异规律

基于对潮白河流域月均流量的丰、平、枯水期划分,可以分别对其时间段进行精确归类。表 1 为潮白河流域 2010—2021 年的丰水时段,其中白河丰水时段共有 41 个月,潮河丰水时段共有 25 个月,比白河流域少了 39.02%。白河多年平均丰水水量达到 $14.82 \text{ m}^3/\text{s}$,潮河多年平均丰水水量则为 $9.00 \text{ m}^3/\text{s}$,比白河流域低 39.27%,说明白河流域的水量输入要比潮河流域更多一些。潮河流域丰水时段均集中在

7—12 月,这也是该流域年降水量较为集中的时段,在降水输入补给影响下,潮河出现相应的丰水时段;白河流域丰水时段与潮河流域存在显著差异,其丰水时段除了在 7—12 月较为集中,而且在多个年份的 3—5 月有所呈现,该现象可能与春季融雪有关,白河流域上游地处华北坝上高原(沽源、张北等地)地区,年内气候温差较大,每年 3—5 月是该地区土壤解冻的主要时间段,因此更容易对河川径流有所补给,进而造成春季丰水期现象。

表 1 潮白河流域流量丰水期时间段

Table 1 Time periods of wet season in Chaobai River basin

年份	白河		潮河	
	丰水时段	平均水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	丰水时段	平均水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
2010	7,10 月	13.37	10—11 月	7.21
2011	3—4,10 月	11.24	7—8 月	8.00
2012	5 月	14.33		
2013	4—5,7—9 月	13.11	7—10 月	7.71
2014	4,12 月	10.91		
2015	4,9—11 月	13.05		
2016	5,7—11 月	19.30	7—11 月	8.14
2017	4,7—8,10—11 月	12.26		
2018	7—8 月	18.17	7—9 月	16.71
2019			8 月	5.41
2020	7—11 月	18.56	9—10 月	6.23
2021	7—12 月	43.79	7—12 月	40.26
切尾均值		14.82		9.00

从表2潮白河流域流量平水期时间段来看,潮河和白河两地均相对较为短暂,其中白河流域平水时段共有6个月,潮河流域平水时段共有7个月,二者较为相近,从平水水量方面来看白河流域多年平均平水水量为 $7.72 \text{ m}^3/\text{s}$,而潮河流域多年平均平水水量仅为 $4.76 \text{ m}^3/\text{s}$,比白河流域低 38.34% ,这种白河流域水量高于潮河流域水量的特征与丰水期的现象保持了一致。从平水期分布时段来看,潮河流域平水期是与丰水期相伴而生的,分布在8—11月;白河流域平水期同样与丰水时段相近,分布在3—4月或9—11月。丰水时段的前期或末期,其水量的距平百分比无法达到丰水期标准,因此更容易被分配至平水期内,而这也对枯水期的到来有所铺垫。

潮白河流域枯水时段占据了12a来的大部分时期,在短期丰水或平水月份外,一般连续填补在这些间隔时段间,该结果在表3的归纳中十分明显。白河流域枯水时段共有97个月,潮河流域枯水时段共有112个月,占到总时段的 67.36% 和 77.78% ,潮河比白河流域多了 15.46% 。从平均枯水水量来看,白河流域多年平均枯水水量为 $3.56 \text{ m}^3/\text{s}$,潮河流域多年平均枯水水量仅为 $2.23 \text{ m}^3/\text{s}$,比白河流域低 37.36% 。

值得注意的是,无论丰水期、平水期还是枯水期,潮河流域多年平均水量比白河流域降低的范围均保持在一个相对一致的水平上($37.36\% \sim 39.02\%$),体现了两个流域的气候环流背景一致。

表2 潮白河流域流量平水期时间段

Table 2 Time periods of normal season in Chaobai River basin

年份	白河		潮河	
	平水时段	平均平水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平水时段	平均平水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
2010	9,11月	7.76		
2011			9月	5.22
2012				
2013			11月	4.54
2014				
2015			9月	4.89
2016	4月	7.44	12月	4.40
2017	3,9月	7.68	9月	4.63
2018				
2019				
2020			8,11月	4.98
2021	3月	8.47		
切尾均值		7.72		4.76

表3 潮白河流域流量枯水期时间段

Table 3 Time periods of dry season in Chaobai River basin

年份	白河		潮河	
	枯水时段	平均枯水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	枯水时段	平均枯水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
2010	1—6,8,12月	3.02	1—9,12月	1.91
2011	1—2,5—9,11—12月	4.19	1—6,10—12月	2.75
2012	1—4,6—12月	3.03	1—12月	2.60
2013	1—3,6,10—12月	3.69	1—6,12月	2.30
2014	1—3,5—11月	3.19	1—12月	2.44
2015	1—3,5—8,12月	2.99	1—8,10—12月	2.03
2016	1—3,6,12月	3.16	1—6月	2.03
2017	1—2,5—6,12月	4.18	1—8,10—12月	2.88
2018	1—6,9—12月	4.39	1—6,10—12月	2.16
2019	1—12月	3.18	1—7,9—12月	1.89
2020	1—6,12月	3.53	1—7,12月	1.91
2021	1—2,4—6月	4.57	1—6月	2.11

2.3 潮白河丰平枯水期与水量的定量关系

基于所获得的潮白河流域丰平枯水期的月尺度划分,以及丰平枯水期多年平均水量切尾均值,可以构建潮白河流域丰平枯水期与水量的定量关系。由前述分析已知潮河丰水期平均流量 $9.00 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2.84 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),平水期平均流量 $4.76 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),枯水期平均流量 $2.23 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0.70 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),设某一年丰水期比例为 ω_1 ,平水期比例为

ω_2 ,枯水期比例为 ω_3 ,则潮河在该年径流量 Q_1 (m^3)应当表达如公式(1);已知白河丰水期流量 $14.82 \text{ m}^3/\text{s}$ ($4.67 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),平水期流量 $7.72 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2.44 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),枯水期流量 $3.56 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.12 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),设某一年丰水期比例为 ω_4 ,平水期比例为 ω_5 ,枯水期比例为 ω_6 ,则白河在该年径流量 Q_2 (m^3)应当表达如公式(2)。从公式(1)—(2)中丰平枯水期比例 ω 前的系数可以明显看出,在两条流域丰

平枯水期比例相近的情况下,白河流域将会产生更多的水量输出。

$$Q_1 = (2.84\omega_1 + 1.50\omega_2 + 0.70\omega_3) \times 10^8$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (1)$$

$$Q_2 = (4.67\omega_4 + 2.44\omega_5 + 1.12\omega_6) \times 10^8$$

$$\omega_4 + \omega_5 + \omega_6 = 1 \quad (2)$$

式中: ω_1 为潮河丰水期比例; ω_2 为平水期比例; ω_3 为枯水期比例; Q_1 为潮河在该年径流量(m^3); ω_4 为白河丰水期比例; ω_5 为平水期比例; ω_6 为枯水期比例; Q_2 为白河年径流量(m^3)。

3 结论

(1) 2010—2021 年,潮白河流域的枯水期时间远大于丰水期和平水期时间,丰水水量的距平百分比每隔 1~2 a 均会呈现指数级增长趋势,表明潮白河流域近年来更多的表现出了极端降雨的气候特征。

(2) 潮白河流域的丰水时段均主要出现在 7—12 月,流域平水时段基本伴生于丰水时段前或后,2010—2021 年,潮河与白河流域分别仅出现了 6~7 个月的平水期;枯水时段密集分布在短时段的丰水期和零星的平水期以外的所有时段。

(3) 基于流量与丰枯时段的精细划分,构建了潮白河流域丰平枯水期与水量的定量化关系,其中流域丰平枯水期时段的比例大小是流域水量最重要的影响因素。

参考文献(References)

- [1] 解阳阳,黄成剑,刘赛艳,等.年径流丰枯分类方法的效果研究[J].中国农村水利水电,2022(2):95-103.
Xie Yangyang, Huang Chengjian, Liu Saiyan, et al. Research on the effects of annual runoff wet-dry classification methods [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2):95-103.
- [2] Liu Dan, Wang Ben de. Study on the wet-dry classification of annual runoff in Biliuhe Reservoir [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256/257/258/259: 2407-2411.
- [3] 毛宗波,刀海娅.基于 LBA-PP 模型的年径流丰枯分类[J].长江科学院院报,2016,33(9):23-27.
Mao Zongbo, Dao Haiya. Wet-dry classification of annual runoff based on LBA-PP model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016,33(9):23-27.
- [4] 丁小玲,周建中,陈璐,等.基于模糊集合理论和集对原理的径流丰枯分类方法[J].水力发电学报,2015,34(5):4-9.
Ding Xiaoling, Zhou Jianzhong, Chen Lu, et al. Approach to annual runoff classification based on fuzzy

set theory and set pair analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(5):4-9.

- [5] 高大鹏.基于 GSPP 的年径流分类模型应用探析[J].水利规划与设计,2017(5):47-49.
Gao Dapeng. Application of annual runoff classification model based on GSPP [J]. Water Resources Planning and Design, 2017(5):47-49.
- [5] 高大鹏.基于 GSPP 的年径流分类模型应用探析[J].水利规划与设计,2017(5):47-49.
Gao Dapeng. Application of annual runoff classification model based on GSPP [J]. Water Resources Planning and Design, 2017(5):47-49.
- [6] 刘赛艳,解阳阳,黄强,等.流域水文年及丰枯水期划分方法[J].水文,2017,37(5):49-53.
Liu Saiyan, Xie Yangyang, Huang Qiang, et al. Method of partitioning water year, wet season and dry season of river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5):49-53.
- [7] 范广洲,吕世华,程国栋.华北地区夏季水资源特征分析及其对气候变化的响应(II):华北地区夏季水量丰、枯与气候变化的关系[J].高原气象,2002,21(1):45-51.
Fan Guangzhou, Lü Shihua, Cheng Guodong. Feature analysis of summer water resource in North China and its response to climate change (II): The relationship between plentiful or short of summer WaterResource in North China and climate change [J]. Plateau Meteorology, 2002,21(1):45-51.
- [8] 李哲卿,张红艳,许景璇,等.漓江上游灵渠丰枯水期水量水质综合变化分析[J].人民长江,2022,53(8):43-49.
Li Zheqing, Zhang Hongyan, Xu Jingxuan, et al. Analysis on comprehensive variation of water quantity and quality in Lingqu Canal in upper reaches of Lijiang River during wet and dry seasons [J]. Yangtze River, 2022,53(8):43-49.
- [9] 邓铭江,周海鹰,徐海量,等.塔里木河干流上中游丰枯情景下生态水调控研究[J].干旱区研究,2017,34(5):959-966.
Deng Mingjiang, Zhou Haiying, Xu Hailiang, et al. Regulation of ecological water volume under high-or low-flow in the mainstream area of the Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2017,34(5):959-966.
- [10] 吴常雪,田碧青,高鹏,等.近 40 年鄱阳湖枯水期水体面积变化特征及驱动因素分析[J].水土保持学报,2021,35(3):177-184.
Wu Changxue, Tian Biqing, Gao Peng, et al. Characteristics and driving factors of water area change of Poyang Lake during dry season in recent 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):177-184.

- [29] 李镇,齐志国,秦伟,等.利用高分立体影像构建东北黑土地丘陵地区切沟体积估算模型[J].农业工程学报,2021,37(7):122-130.
Li Zhen, Qi Zhiguo, Qin Wei, et al. Gully volume estimation model using high-resolution satellite imaging in mountainous and hilly regions with black soil of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(7):122-130.
- [30] 闫业超,张树文,岳书平.克拜东部黑土区侵蚀沟遥感分类与空间格局分析[J].地理科学,2007,27(2):193-199.
Yan Yechao, Zhang Shuwen, Yue Shuping. Classification of erosion gullies by remote sensing and spatial pattern analysis in black soil region of eastern kebai [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007,27(2):193-199.
- [31] 白建宏.东北黑土区侵蚀沟分级初探[J].中国水土保持,2017(10):41-42.
Bai Jianhong. Preliminary study on classification of erosion gully in black soil area of Northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(10):41-42.
- [32] 温艳茹.黑土区典型农业小流域沟蚀发育历史、速度和关键过程研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2020.
Wen Yanru. Gully Erosion History, Development rates and key processes in a typical agriculture catchment in the Northeast China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [33] Vanmaercke M, Poesen J, Van Mele B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. Earth-Science Reviews, 2016,154:336-355.
- [34] 焦鹏.东北低山丘陵典型区侵蚀沟发育特征与影响因素研究[D].吉林 长春:吉林农业大学,2023.
Jiao Peng. The study on the development characteristics and influencing factors of erosion gullies in typical areas of the northeastern hill [D]. Changchun, Jilin: Jilin Agricultural University, 2023.
- [35] 李镇.黄土高原切沟发育监测方法与侵蚀模型研究[D].北京:北京林业大学,2015.
Li Zhen. Study on monitoring and modelling gully erosion on the Chinese Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
-
- (上接第 156 页)
- [11] 张亚杰,崔东文.基于 GEO-RVM 模型的枯水期月径流预报研究[J].人民珠江,2022,43(8):93-99.
Zhang Yajie, Cui Dongwen. Research on monthly runoff forecast in dry seasons based on GEO-RVM model [J]. Pearl River, 2022,43(8):93-99.
- [12] 王飞宇,张彦,王偲,等.基于 Copula 函数的汉江流域降水径流丰枯遭遇研究[J].灌溉排水学报,2022,41(8):95-105.
Wang Feiyu, Zhang Yan, Wang Cai, et al. Using copula model to analyze consecutive Wetting-drying occurrence in rainfall-runoff in Hanjiang basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(8):95-105.
- [13] 白鹤岭,刘慧勤,高计生.密云水库上游生态清洁小流域建设技术体系研究[J].中国水土保持,2016(10):43-45.
Bai Heling, Liu Huiqin, Gao Jisheng. Study on technological system for eco-friendly small watershed construction in Miyun Reservoir upstream [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(10):43-45.
- [14] 王晓贞,王炎如.京津冀跨区域调水生态补偿标准与方式研究[J].海河水利,2018(4):13-15.
Wang Xiaozhen, Wang Yanru. Study on standard and mode of ecological compensation in Beijing-Tianjin-Hebei inter-regional water transfer project [J]. Haihe Water Resources, 2018(4):13-15.
- [15] 门宝辉,蔡斌,田巍.基于 SPEI 的潮白河流域气象干旱时空特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(2):10-20.
Men Baohui, Cai Bin, Tian Wei. SPEI-based analysis of temporal and spatial characteristics of meteorological drought in the Chaobai River basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022,43(2):10-20.