

黄静, 李想, 沈延青, 等. 黄河上游径流年际变化规律及丰枯统计特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 165-176. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.012

HUANG Jing, LI Xiang, SHEN Yanqing, et al. Interannual runoff variation and statistical characteristics of wet and dry years in upper reaches of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 165-176. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.012

黄河上游径流年际变化规律及丰枯统计特征

黄静¹, 李想^{1,2}, 沈延青³, 包娟^{2,4}, 刘靖³, 魏加华^{1,5}, 王战策³

(1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全国家重点实验室 北京 100038; 3. 青海黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810008; 4. 西昌学院 土木与水利工程学院, 四川 西昌 615013; 5. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:【目的】黄河上游水量和库容占全流域的近2/3和4/5,是流域主要产水区和径流年际调蓄区。然而,长期以来径流年际变异大且难以准确预测,制约了上游水库工程“蓄丰补枯”效益发挥和水资源安全保障。【方法】为进一步增强对径流的认知,搜集了黄河干流主要断面1956—2022年还原径流(唐乃亥、兰州、利津)以及1736—1911年考古径流(青铜峡),采用Copula函数、非一致性检验等多元统计方法,探究了上游对全流域径流贡献度、上游径流年际变化规律以及丰枯统计特征。【结果】研究表明,兰州与全流域径流丰平枯同步概率71.5%,其中同枯和同丰发生概率分别为32.2%和20.3%。兰州断面单年枯水和丰水发生概率分别为43.3%和26.9%,其中特丰发生概率为7.5%,研究期未发生特枯;两年连枯和连丰发生概率分别为19.7%和12.1%,三年连枯和连丰发生概率分别为7.7%和4.6%;丰枯转移发生概率为16.7%。【结论】为有效应对特丰特枯、连丰连枯不利影响,一方面须提升径流长期预测水平并充分挖潜龙羊峡水库年际调蓄能力,另一方面须加快构建黄河流域“一线七库”水网工程体系。

关键词: 径流; 特丰特枯; 连丰连枯; Copula函数; 非一致性检验; 黄河上游; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV11

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)07-0165-12



Interannual runoff variation and statistical characteristics of wet and dry years in upper reaches of Yellow River

HUANG Jing¹, LI Xiang^{1,2}, SHEN Yanqing³, BAO Juan^{2,4}, LIU Jing³, WEI Jiahua^{1,5}, WANG Zhance³

(1. School of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; 2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810008, Qinghai, China; 4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang 615013, Sichuan, China; 5. School of

收稿日期: 2025-02-14; 修回日期: 2025-05-12; 录用日期: 2025-05-13; 网络出版日期: 2025-05-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206700); 国家自然科学基金(52479032; U2243232); 青海省基础研究计划项目(2025-ZJ-964J)

作者简介: 黄静(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文学水资源研究。E-mail: qhdxhuanj@163.com

通信作者: 李想(1986—),男,正高级工程师,博士,主要从事水资源规划管理研究。E-mail: lixiang@iwhr.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] The upper reaches of the Yellow River contribute approximately two-thirds of the water volume of the entire river basin and four-fifths of its reservoir storage capacity, serving as the major water-producing area and interannual runoff regulation area for the river basin. However, the significant interannual variation of runoff and its difficulties in accurate prediction have constrained the effectiveness of reservoirs in the upper reaches in “storing water in wet years to compensate for dry years” and undermined the security of water resources. [Methods] To further enhance the understanding of runoff, naturalized runoff data at major cross-sections along the Yellow River’s mainstream from 1956 to 2022 (Tangnaihai, Lanzhou, Lijin) and archaeological runoff data from 1736 to 1911 (Qingtongxia) were collected. Multivariate statistical method such as Copula function and non-consistency tests were employed to explore the contribution of the upper reaches to the runoff of the entire river basin, interannual variation patterns of runoff in the upper reaches, and statistical characteristics of wet and dry years. [Results] The synchronous probability of wet, normal, and dry years of runoff at the Lanzhou cross-section and the entire river basin was 71.5%, with the probabilities of coincident dry or wet years being 32.2% and 20.3%, respectively. The probabilities of single dry or wet year at the Lanzhou cross-section were 43.3% and 26.9%, respectively. Specifically, the probability of an extremely wet year was 7.5%, with no extremely dry year observed during the study period. The probabilities of two consecutive dry or wet years were 19.7% and 12.1%, respectively, while three consecutive dry or wet years showed probabilities of 7.7% and 4.6%, respectively. The probability of transition between wet and dry years was 16.7%. [Conclusion] To effectively cope with the adverse effects of extremely wet or dry years, as well as consecutive wet or dry years, it is imperative to improve the long-term runoff prediction capabilities while fully leveraging the interannual regulation capacity of the Longyangxia Reservoir, and to accelerate the construction of the “one-route and seven-reservoir” water network system in the Yellow River Basin.

Keywords: runoff; extremely wet/dry years; consecutive wet/dry years; Copula function; non-consistency test; upper reaches of the Yellow River; influencing factors

0 引 言

黄河为中国第二大河, 同时也是一条资源型缺水河流(见图1)。以全国约2%的水资源量, 承载了近12%的人口、15%的耕地以及14%的GDP^[1-5]。黄河径流年际和年内变化大, 据1956—2022年数据显示, 利津断面多年平均径流502.6亿m³, 其中最小径流246.2亿m³(2002年), 仅占最大径流947.2亿m³(1964年)的26%; 汛期(6—10月)多年平均径流占全年的近七成, 干旱与洪水等水安全问题并存。按照河段功能定位, 通常将黄河划分为“水量调控”为主的上游子体系, 以及“蓄洪调沙”为主的中下游子体系^[1,6]。其中, 黄河上游河段自河源至头道拐区间。兰州断面以上多年平均径流量332.0亿m³, 约占全流域水量的2/3, 是流域的主要产水区。然而, 大部分用水量却集中于兰州断面以下, 占全流域的近九成, 流域水资源供需矛盾十分尖锐^[7-10]。为满足供水、防洪、防凌、发电、输沙、生态等水资源综合利用需求, 有关部门提出构建黄河流域“一线七库”水网格局, 即南水北调西线工程和龙羊峡、刘家峡、黑山峡、碛口、古贤、三门峡、小浪底七大水库^[11-15]。目前, 黄河上游总库容约占全流域的4/5, 是流域重要的水量年际调蓄区^[16-17]。

黄河上游大部分位于青藏高原地区, 地处世界第三极, 高寒气候鲜明且独特。由于多圈层相互作用过程和机制, 对区域和全球水循环和水资源演化具有深刻影响。黄河上游涉及降水、冰川、积雪、冻土等水文过程, 径流驱动机制复杂, 且在气候变化影响下径流不确定性增加, 难以准确预测^[18-20]。尤其是对于特丰特枯、连丰连枯等极端场景未能提前认知和及时应对, 极大程度上制约了水库工程“蓄丰补枯”效益发挥, 造成了丰水期水量浪费、枯水期无水可用的不利局面^[21-22]。例如, 1988—2012年龙羊峡水库年均入库水量184.6亿m³, 远低于276.3亿m³的设计值。其中, 为应对2000—2002年黄河流域连续三年特枯场景, 三年龙羊峡水库下泄水量较入库水量合计多出约97.8亿m³, 导致库水位持续降低, 截至2003年5月达2530.4m, 逼近极限死水位2530.0m。2018—2020年为连续三年特丰场景, 年均入库水量316.5亿m³, 远高于设计值。三年龙羊峡水库入库水量较下泄水量合计多出约27.5亿m³, 促使库水位持续攀升。2017年6月年末消落水位仅为2574.42m, 2018年6月和2019年6月年末消落水位逐步抬升至2584.37m和2592.91m, 并于2020年10月达历史最高水位2600.9m。年末消落水位回升, 导致主汛期水库调洪库容限制, 造成非发电弃水累计达到

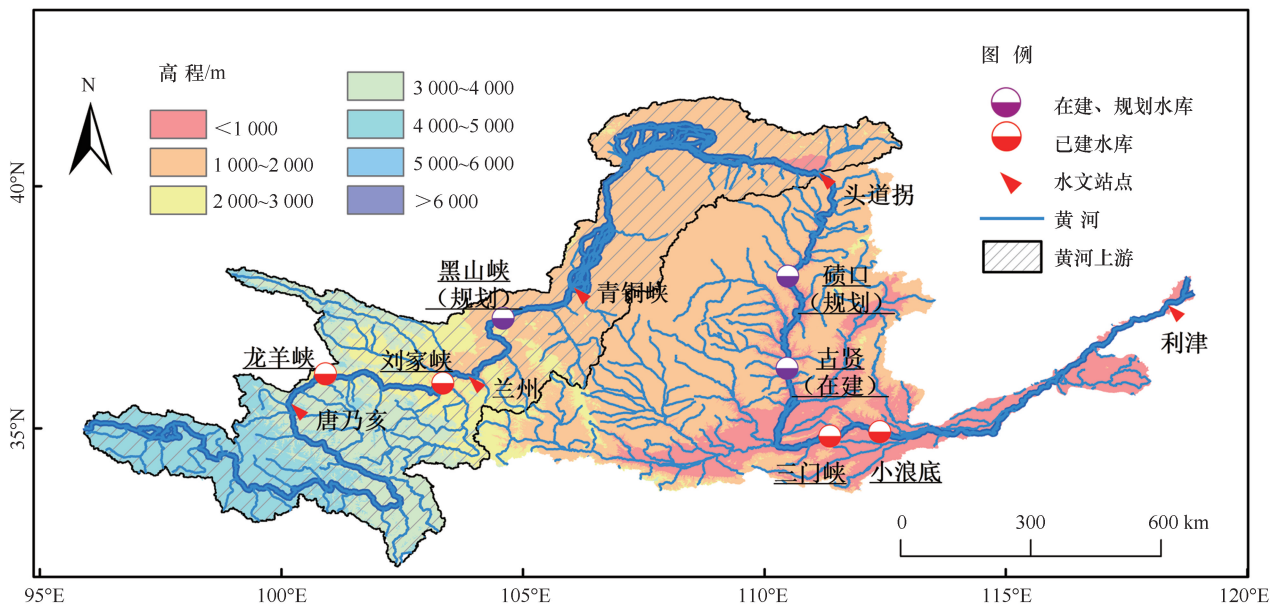


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

190.0 亿 m^3 。

已有黄河上游径流变化相关研究成果主要集中于三个方面：一是径流演变规律方面，如刘昌明等^[23]基于 1956—2016 年黄河 84 个子流域的气象水文资料，发现黄河上游径流和降水呈增加趋势，径流突变集中于 1980—2000 年，径流变化由下垫面主导（贡献率大于 75%）。尚文绣等^[22]采用黄河干流兰州和花园口断面 1920—2019 年径流系列，通过标准化径流指数和距平法，识别了 1922—1932 年和 1990—2002 年两个连续枯水段，分析了用水特征和水资源安全保障能力。二是径流形成机理方面，如魏伊宁等^[24]利用 1969—2012 年黄河上游吉迈、玛曲、唐乃亥、贵德、循化、小川和兰州 7 个水文站实测月径流数据和青藏高原月降水量、月平均气温和月累积积雪深度数据等，通过多因子分析发现黄河上游降水对径流丰枯变化起主控作用，积雪和气温的季节性影响较为明显。TIAN 等^[25]通过对比黄河上游下河沿、石嘴山、三湖河口和头道拐等水文站的实测和重构径流，发现人类活动较气候变化对径流变化的影响更为显著，1986 年龙羊峡水库投运以来径流发生突变，呈明显减少趋势，另外径流高频周期性减小，低频周期性增加。三是径流未来预估方面，JIN 等^[26]基于 CMIP5 模式的 3 个情景（RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5）和 VIC 模型预估了黄河上游气象水文变化，结果显示未来年降水量小幅增加，年径流量小幅减少，与 1961—1990 年相比，2080 年径流变化幅度介于 1%~38%。

尽管前期关于黄河上游径流变化取得许多成果，但关于特丰特枯、连丰连枯等统计特征仍缺乏深入认知。为此，本文搜集了黄河干流主要断面 1956—2022 年还原径流（唐乃亥、兰州、利津）以及 1736—1911 年考古径流（青铜峡），特别是针对唐乃亥和兰州—龙羊峡和黑山峡两库控制断面，基于非一致性检验、Copula 函数等多元统计方法，揭示了上游径流年际变化规律以及丰枯统计特征，为逐步增强对径流的认知、充分挖潜径流年际调蓄能力、在上游没有新水源调入前保障水安全等提供支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文搜集了黄河干流关键断面的还原与考古径流资料。其中，唐乃亥、兰州、青铜峡为上游重要控制断面，利津为流域出口断面。唐乃亥、兰州、利津三断面有还原径流数据，时间跨度为 1956—2022 年（有连续 67 a 数据），其中 1956—2016 年数据来自第三次水资源调查评价，2017—2022 年数据来自《黄河水资源公报》。青铜峡断面有考古径流数据，时间跨度为 1736—1911 年（有不连续 88 a 数据），由史辅成等^[27]根据历年观测涨水尺数估算所得。

1.2 径流丰枯等级划分

已有研究表明，径流丰枯等级划分有许多方式，目前尚未形成统一标准。本文根据《水文情报预报规范（GB/T 22482—2008）》和文献[28]的距平百分率

法, 将年径流定性划分为“枯”“平”和“丰”三个等级, 其中对于等级“丰”又细分为“特丰”“丰水”和“偏丰水”, 等级“枯”又细分为“特枯”“枯水”和“偏枯水”, 如表 1 所列。由于兰州断面至青铜峡断面区间仅有祖厉河和清水河两条小支流汇入(1956—2016 年多年平均径流分别为 1.0 亿 m³ 和 1.1 亿 m³), 本文以兰州断面丰枯等级划分标准, 确定青铜峡断面丰枯等级划分。

1.3 Copula 函数

Copula 函数通过联合分布函数合成多个边缘分布函数, 可以实现对水文变量的组合分析, 为更好理解水文事件关联性提供了有效的研究方法^[29-31]。以两变量 u 和 v 时间序列构建的 Copula 函数^[32], 计算公式为

$$F(u, v) = C_{\theta}(F_1(u), F_2(v)) \quad (1)$$

式中, C 为 Copula 函数; θ 为 Copula 参数; F_1, F_2 为两变量 u 和 v 的边缘分布。

采用对数正态、伽玛和皮尔逊 III 型 3 种边缘分布函数, 分别对唐乃亥、兰州和利津径流序列进行拟合。进而, 通过 Gumbel、Clayton 和 Frank Copula 联合分布函数, 分别构造黄河上游与全流域径流的关联关系。采用均方根误差 (RMSE) 作为评价指标, 选取拟合效果最好的边缘分布函数和 Copula 函数, 描述黄河上游与全流域径流不同丰枯状态发生概率。

根据表 1 定义的径流枯、平、丰 3 种状态, 计算黄河上游与全流域径流丰枯遭遇概率, 如表 2 所列。其中, X 和 Y 分别表示上游(唐乃亥或兰州断面)和全流域(利津断面)径流距平百分率。

1.4 非一致性检验

本文采用小波变换、启发式分割和线性回归等方

法, 开展水文序列非一致性检验, 包括周期、突变和趋势分析。

小波变换^[33-35]: 能够给出径流频谱特征随时间演化的信息, 具体公式为

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

式中, t 为时间序列; $f(t)$ 为随时间 t 变化的函数; $\psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为 $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 的复共轭函数; $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为基小波函数 $\psi(t)$ 通过尺度因子 a 伸缩和时间因子 b 平移构成, 小波的选择取决于原始时间序列的特征; $W(a, b)$ 为小波变换系数。

启发式分割^[36-37]: 给定一个时间序列 t , 序列长度为 n , 设置一个滑动指针在 $i(1 \leq i < n)$ 位置将时间序列分为两个子序列, n'_i 和 n''_i 为 i 位置左、右两个子序列的长度, 分别计算两个子序列的均值 \bar{x}'_i, \bar{x}''_i 和标准差 S'_i, S''_i , i 点的混合方差为 S_i^* , i 点的均值差异为 T_i , 具体公式为

$$S_i^* = \sqrt{\frac{(n'_i - 1) \cdot S'^2_i + (n''_i - 1) \cdot S''^2_i}{n - 2} \times \left(\frac{1}{n'_i} + \frac{1}{n''_i} \right)} \quad (3)$$

$$T_i = \left| \frac{\bar{x}'_i - \bar{x}''_i}{S_i^*} \right| \quad (4)$$

式中, 取最大 T_i 值作为潜在变化点, 定义最大 T_i 对应的统计显著性 $Q(T_i^*)$ 。如果 $Q(T_i^*)$ 大于阈值 Q_0 , 则将时间序列分割成两个子序列, 并继续迭代, 直到 $Q(T_i^*)$ 小于 Q_0 或子序列小于最小分割尺度 L_0 。否则, 不对时间序列进行拆分。本文最小分割尺度 L_0 设置为 25, 阈值 Q_0 设置为 0.9。

表 1 径流丰枯等级划分

Table 1 Classification of wet and dry years of runoff

三级划分	枯			平	丰		
距平百分率	$P < -10\%$			$-10\% \leq P \leq 10\%$	$P > 10\%$		
七级划分	特 枯	枯 水	偏枯水	平 水	偏丰水	丰 水	特 丰
距平百分率	$P < -40\%$	$-40\% \leq P < -20\%$	$-20\% < P < -10\%$	$-10\% \leq P \leq 10\%$	$10\% < P < 20\%$	$20\% < P \leq 40\%$	$P > 40\%$

表 2 上游与全流域径流丰枯遭遇概率

Table 2 Probability of runoff wet and dry years between upper reaches and entire river basin

遭遇情况	概率计算	遭遇情况	概率计算
丰-丰	$p_1 = P(X > 10\%, Y > 10\%)$	平-枯	$p_6 = P(-10\% \leq X \leq 10\%, Y < -10\%)$
丰-平	$p_2 = P(X > 10\%, -10\% \leq Y \leq 10\%)$	枯-丰	$p_7 = P(X < -10\%, Y > 10\%)$
丰-枯	$p_3 = P(X > 10\%, Y < -10\%)$	枯-平	$p_8 = P(X < -10\%, -10\% \leq Y \leq 10\%)$
平-丰	$p_4 = P(-10\% \leq X \leq 10\%, Y > 10\%)$	枯-枯	$p_9 = P(X < -10\%, Y < -10\%)$
平-平	$p_5 = P(-10\% \leq X \leq 10\%, -10\% \leq Y \leq 10\%)$		

2 结果与分析

2.1 上游对全流域径流贡献度

黄河上游径流占全流域径流比重(唐乃亥/利津、兰州/利津)如图2所示。结果显示如下。

(1)唐乃亥断面最大径流发生于1989年,为329.3亿 m^3 (占全流域的54.2%);最小径流发生于2002年,为106.9亿 m^3 (占全流域的43.4%)。

(2)兰州断面最大径流发生于1967年,为533.7亿 m^3 (占全流域的73.9%);最小径流发生于2002年,为210.7亿 m^3 (占全流域的85.6%)。

(3)总体上,唐乃亥/利津占比与唐乃亥径流,以及兰州/利津占比与兰州径流均呈正相关关系,表明当上游径流量较大时,上游占全流域比重也相对较高,尤其是唐乃亥断面表现较为明显。

基于Copula函数的黄河上游与全流域(唐乃亥-利津、兰州-利津)径流联合概率分布如图3所示。需要说明的是,经对比发现,皮尔逊III型分布为拟合度最优的边缘分布函数,Clayton为拟合度最优的Copula函数。结果显示如下。

(1)两组联合概率分布形状相似,都呈均匀对称状。

(2)唐乃亥断面径流介于100~200亿 m^3 区间,

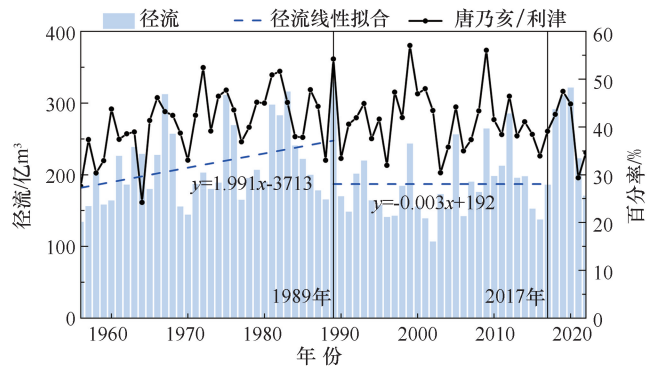
利津断面径流介于400~500亿 m^3 区间,联合概率最大,为22.9%;唐乃亥断面径流介于100~200亿 m^3 区间,利津断面径流介于300~400亿 m^3 区间,联合概率次之,为17.5%;唐乃亥断面径流介于200~300亿 m^3 区间,利津断面径流介于500~600亿 m^3 区间,联合概率为17.3%。

(3)兰州断面径流介于300~400亿 m^3 区间,利津断面径流介于500~600亿 m^3 区间,联合概率最高,为19.2%;兰州断面径流介于200~300亿 m^3 区间,利津断面径流介于400~500亿 m^3 区间,联合概率次之,为19.0%;兰州断面径流介于200~300亿 m^3 区间,利津断面径流介于300~400亿 m^3 区间,联合概率为17.7%。

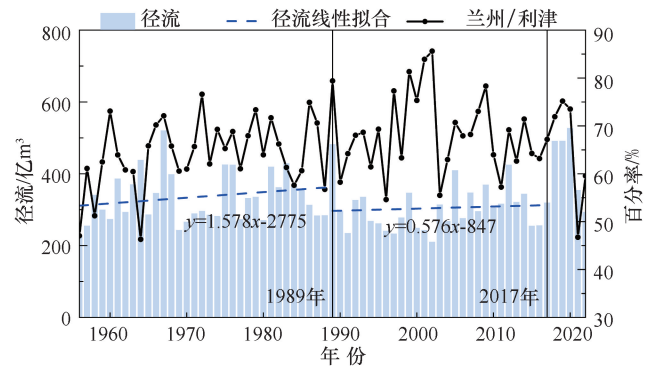
进一步计算了黄河上游与全流域径流丰枯遭遇发生概率,如图4所示。结果显示如下。

(1)对于唐乃亥与利津断面,径流丰平枯同步概率较大,为64.2%,其中同丰、同平、同枯发生概率分别为19.3%、14.4%和30.4%。当唐乃亥断面发生枯水时,利津断面有75.2%的概率也发生枯水;而当唐乃亥断面发生丰水时,利津断面有63.5%的概率也发生丰水。

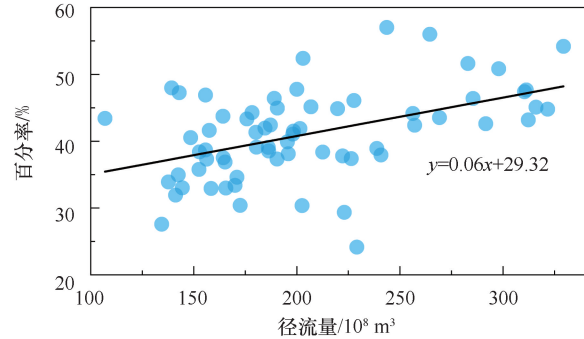
(2)对于兰州与利津断面,径流丰平枯同步概率更大,为71.5%,其中同丰、同平、同枯发生概率



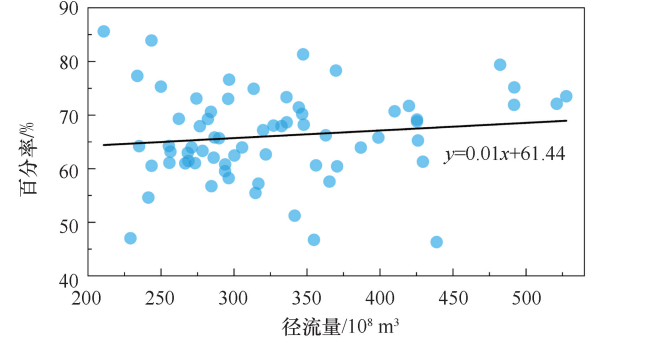
(a)唐乃亥/利津径流占比过程



(b)兰州/利津径流占比过程



(c)唐乃亥/利津径流占比与唐乃亥径流散点



(d)兰州/利津径流占比与兰州径流散点

图2 黄河上游径流占全流域径流比重

Fig. 2 Proportion of runoff in upper reaches to runoff in entire river basin in Yellow River

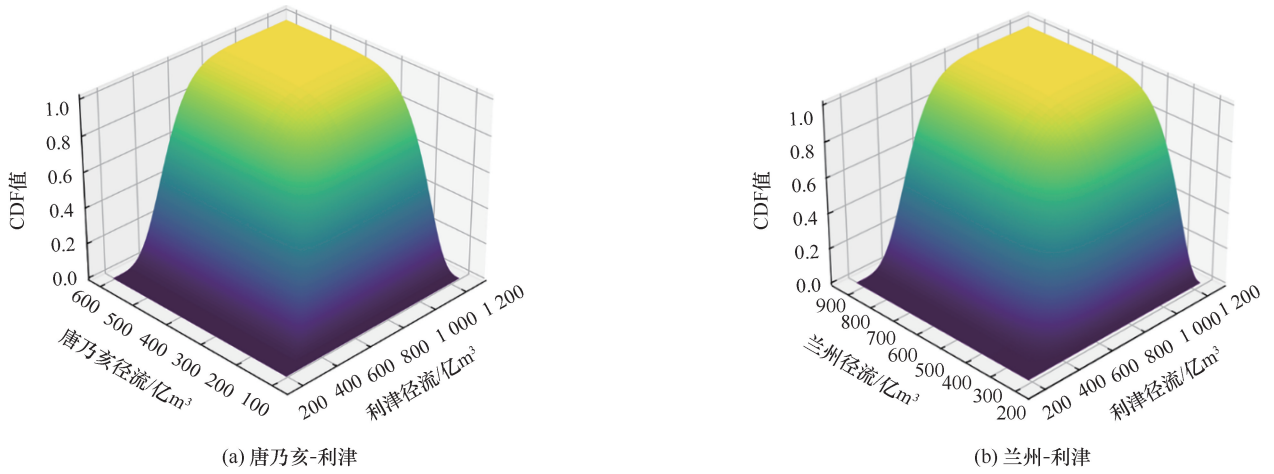


图 3 基于 Copula 函数的黄河上游与全流域径流联合概率分布

Fig. 3 Joint probability distribution of runoff in upper reaches and entire river basin of Yellow River based on Copula function

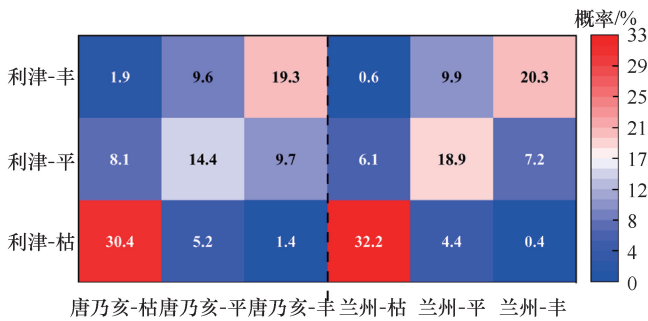


图 4 黄河上游与全流域径流丰枯遭遇概率

Fig. 4 Probability of runoff wet and dry years in upper reaches and entire river basin of Yellow River

分别为 20.3%、18.9%和 32.2%。当兰州断面发生枯水时, 利津断面有 82.8%的概率也发生枯水; 而当兰州断面发生丰水时, 利津断面有 72.8%的概率也发生丰水。总的来说, 上游枯水时, 全流域大概率发

生枯水; 而上游丰水时, 全流域丰水概率略小之。

2.2 径流年际变化规律

基于小波变换的唐乃亥和兰州两断面 1956—2022 年还原径流周期分析结果如图 5 所示。该图可以清晰反映两断面径流在不同时间尺度上的周期振荡与强弱程度, 其中红色实线表示丰水周期, 蓝色虚线表示枯水周期。结果显示如下。

(1)唐乃亥断面径流序列在不同时间尺度上有较为明显的振荡, 经历了丰-枯循环交替变化, 呈现大、小尺度周期变化嵌套结构, 主要存在 8 a 和 42 a 周期。

(2)兰州断面径流序列周期变化规律与唐乃亥断面高度相似, 主要存在 8 a、14 a、20 a 和 42 a 周期。

基于启发式分割的唐乃亥和兰州两断面 1956—2022 年还原径流变点分析结果如图 6 所示。结果显示如下。

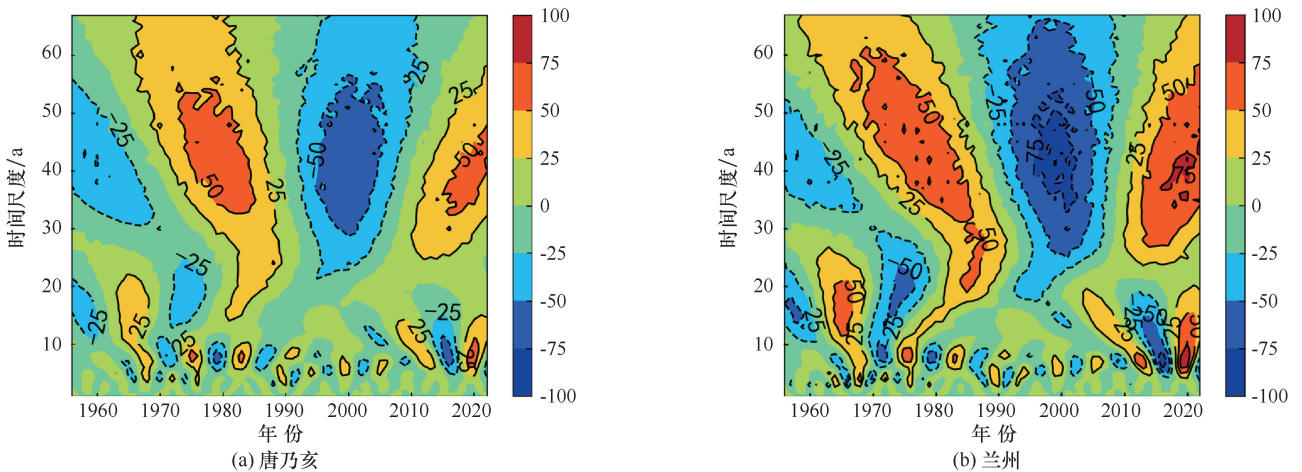


图 5 黄河上游径流周期分析

Fig. 5 Periodicity analysis of runoff in upper reaches of Yellow River

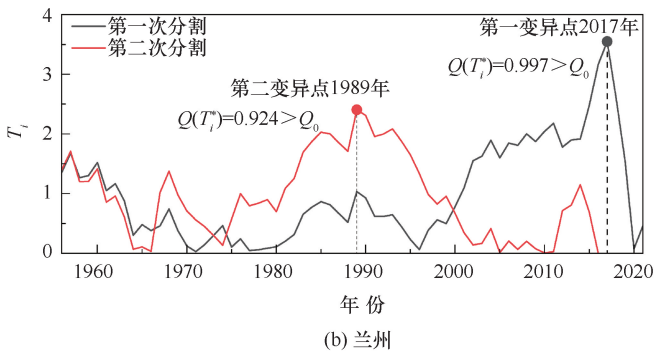
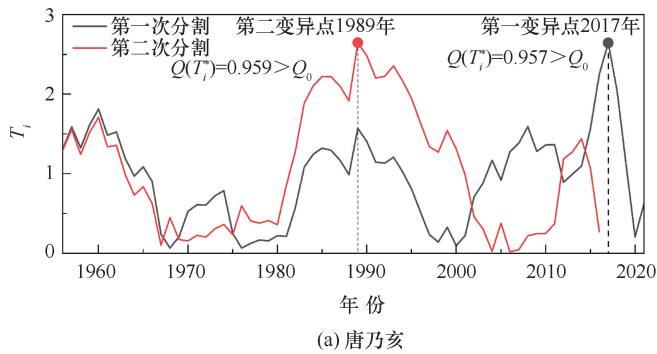


图6 黄河上游径流变点分析

Fig. 6 Change-point analysis of runoff in upper reaches of Yellow River

(1)唐乃亥断面径流序列第一次分割时,2017年对应的 T 值最大,为第一个突变点 $[Q(T_i^*) = 0.957 > Q_0]$;第二次分割时,1989年对应的 T 值最大,为第二个突变点 $[Q(T_i^*) = 0.959 > Q_0]$ 。

(2)兰州断面径流序列突变点与唐乃亥断面高度相似,2017年为第一次分割时找出的突变点 $[Q(T_i^*) = 0.997 > Q_0]$,1989年为第二次分割时找出的突变点 $[Q(T_i^*) = 0.924 > Q_0]$ 。

基于线性回归的唐乃亥和兰州两断面1956—2022年还原径流趋势分析结果如图2所示。根据变点分析结果,对1956—1989年和1990—2017年两个时段分别进行回归分析。结果显示:(1)对于第一个时段(1956—1989年),唐乃亥和兰州两断面径流均呈明显上升趋势,唐乃亥断面径流增速(19.9亿 $m^3/10a$)略大于兰州断面径流增速(15.8亿 $m^3/10a$);(2)对于第二个时段(1990—2017年),唐乃亥断面径流没有明显趋势变化(-0.03亿 $m^3/10a$),而兰州断面径流表现为小幅上升趋势(5.8亿 $m^3/10a$)。

2.3 径流丰枯统计特征

2.3.1 唐乃亥断面(还原径流)

基于唐乃亥断面1956—2022年还原径流资料,开展多时间尺度径流丰枯统计特征分析,如图7所示。结果显示如下。

(1)对于单一年份,枯、平和丰发生概率分别为40.3%、29.9%和29.9%,枯水发生概率最高,其中特枯和特丰发生概率分别为1.5%和11.9%。

(2)对于连续两年,枯-枯发生概率最高,为19.7%。两年极端连枯场景如2001—2002年,年平均径流最小,仅为123.1亿 m^3 。丰-丰发生概率为13.6%。两年极端连丰场景如2019—2020年,年平均径流最大,达316.0亿 m^3 。两年极端连丰场景径流量为两年极端连枯场景的2.6倍。丰枯转移发生概

率为16.7%。其中,枯-丰发生概率为7.6%,极端场景如1988—1989年,连续两年径流比值最小约为0.5。丰-枯发生概率为9.1%,极端场景如1989—1990年,连续两年径流比值最大约为1.9。

(3)对于连续三年,枯-枯-枯发生概率最高,为7.7%。三年极端连枯场景如2000—2002年,年平均径流最小,仅为133.9亿 m^3 。丰-丰-丰发生概率其次,为6.2%。三年极端连丰场景如2018—2020年,年平均径流最大,达307.8亿 m^3 。三年极端连丰场景径流量为三年极端连枯场景的2.3倍。丰枯转移中,丰-枯-枯和丰-丰-枯发生概率为4.6%,枯-丰-丰和枯-枯-丰发生概率分别为1.5%和4.6%。

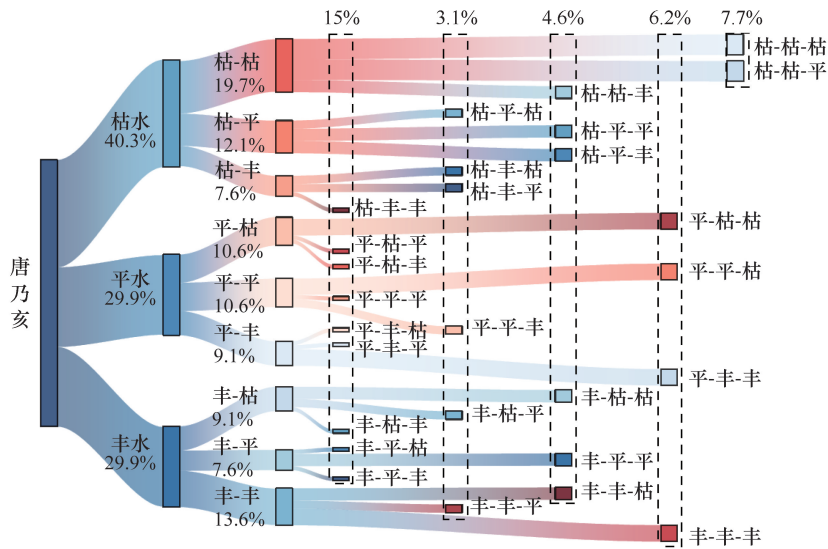
(4)对于连续多年,径流序列发生多次丰枯交替。典型短历时连续枯水段如1956—1960年和2012—2017年,年平均径流分别为163.1亿 m^3 、205.4亿 m^3 和192.6亿 m^3 。典型长历时连续枯水段如1968—1974和1989—2008年,年平均径流分别为188.1亿 m^3 和179.7亿 m^3 。典型连续丰水段如1960—1968年、1974—1976年、1980—1989年、2008—2012年和2017—2021年,年平均径流分别为224.6亿 m^3 、256.5亿 m^3 、242.3亿 m^3 、227.3亿 m^3 和266.5亿 m^3 。

2.3.2 兰州断面(还原径流)

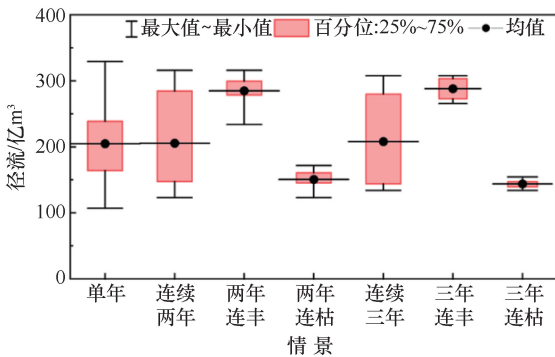
基于兰州断面1956—2022年还原径流资料,开展多时间尺度径流丰枯统计特征分析,如图8所示。结果显示如下。

(1)对于单一年份,枯、平和丰发生的概率分别为43.3%、29.8%和26.9%,枯水发生概率最高,其中特丰发生概率为7.5%,研究期未发生特枯。

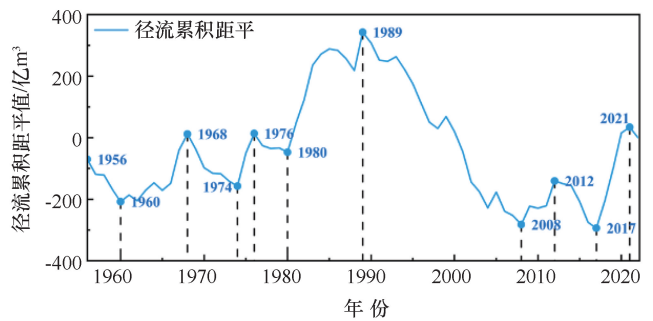
(2)对于连续两年,枯-枯发生概率最高,为19.7%。两年极端连枯场景如2001—2002年,年平均径流最小,仅为227.1亿 m^3 。丰-丰发生概率为12.1%。两年极端连丰场景如2019—2020年,年平均



(a) 基于概率统计的径流单年、连续两年、连续3年丰枯特征



(b) 基于箱图统计的年平均径流量



(c) 基于累积距平的径流连续多年丰枯特征

图7 唐乃亥断面多时间尺度径流丰枯统计特征

Fig. 7 Statistical characteristics of runoff wet and dry years across multiple time scales at Tangnaihai cross-section

均径流最大, 达 509.8 亿 m^3 。两年极端连丰场景径流量为两年极端连枯场景的 2.2 倍。丰枯转移发生概率为 16.7%。其中, 枯-丰发生概率为 9.1%, 极端场景如 1988—1989 年, 连续两年径流比值最小约为 0.6。丰-枯发生概率为 7.6%, 极端场景如 1968—1969 年, 连续两年径流比值最大约为 1.6。

(3) 对于连续三年, 枯-枯-枯发生概率最高, 为 7.7%。三年极端连枯场景如 2000—2002 年, 年平均径流最小, 仅为 234.7 亿 m^3 。丰-丰-丰发生概率为 4.6%。三年极端连丰场景如 2018—2020 年, 年平均径流最大, 达 503.8 亿 m^3 。三年极端连丰场景径流量为三年极端连枯场景的 2.1 倍。丰枯转移中, 丰-枯-枯和丰-丰-枯发生概率分别为 3.1% 和 4.6%, 枯-丰-丰和枯-枯-丰发生概率均为 3.1%。

(4) 对于连续多年, 径流序列发生多次丰枯交替。典型短历时连续枯水段如 1956—1960 年、1976—1980 年和 2014—2017 年, 年平均径流分别为

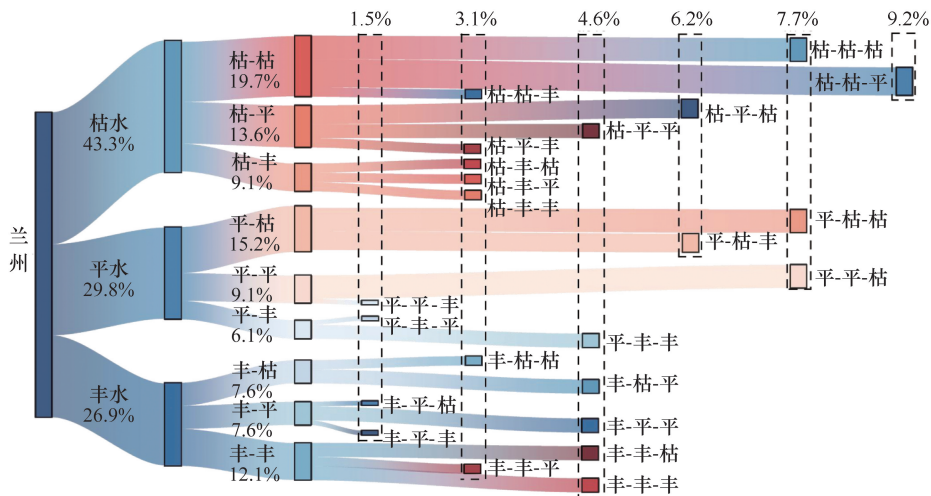
286.9 亿 m^3 、335.6 亿 m^3 和 294.0 亿 m^3 。典型长历时连续枯水段如 1968—1974 年和 1989—2004 年, 年平均径流分别为 301.9 亿 m^3 和 287.2 亿 m^3 。典型连续丰水段如 1960—1968 年、1974—1976 年、1980—1989 年和 2017—2021 年, 年平均径流分别为 377.6 亿 m^3 、387.0 亿 m^3 、363.0 亿 m^3 和 437.2 亿 m^3 。

2.3.3 青铜峡断面(考古径流)

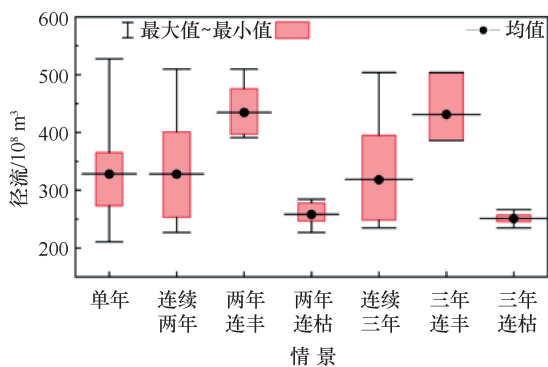
基于青铜峡断面 1736—1911 年考古径流资料, 开展多时间尺度径流丰枯统计特征分析, 如图 9 所示。需要说明的是, 由于青铜峡断面考古径流数据时间不连续, 未能开展径流连续多年丰枯特征分析, 结果显示如下。

(1) 对于单一年份, 枯、平和丰发生概率分别为 37.5%、40.9% 和 21.6%, 平水发生概率最高, 其中特枯和特丰发生概率分别为 1.6% 和 4.3%。

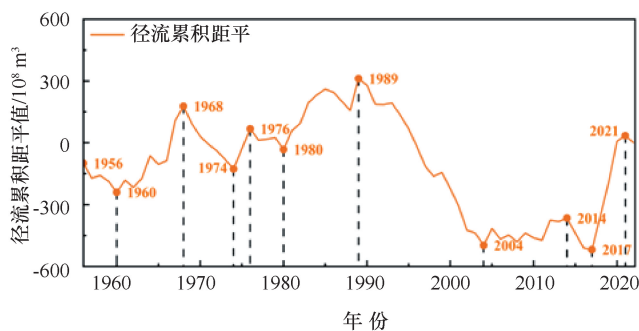
(2) 对于连续两年, 枯-枯发生概率较大, 为 14.3%。两年极端连枯场景如 1765—1766 年, 年平



(a) 基于概率统计的径流单年、连续两年、连续三年丰枯特征



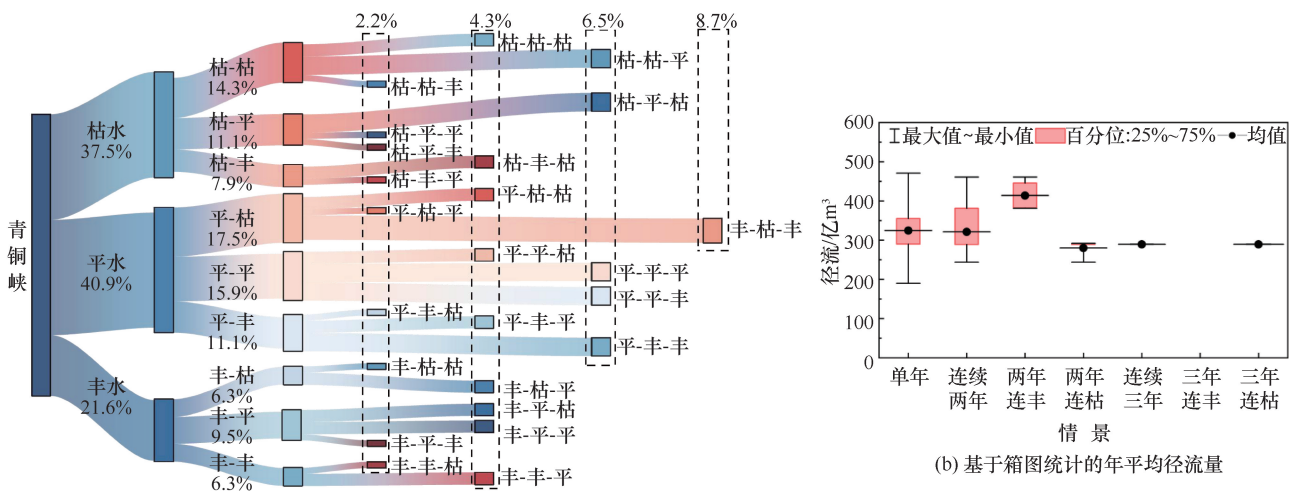
(b) 基于箱图统计的年平均径流量



(c) 基于累积距平的径流连续多年丰枯特征

图 8 兰州断面多时间尺度径流丰枯统计特征

Fig. 8 Statistical characteristics of runoff wet and dry years across multiple time scales at Lanzhou cross-section



(a) 基于概率统计的径流单年、连续两年、连续三年丰枯特征

图 9 青铜峡断面多时间尺度径流丰枯统计特征

Fig. 9 Statistical characteristics of runoff wet and dry years across multiple time scales at Qingtongxia cross-section

均径流最小, 仅为 244.0 亿 m^3 。丰-丰发生概率最小, 为 6.3%。两年极端连丰场景如 1849—1850 年, 年平均径流最大, 达 461.0 亿 m^3 。两年极端连丰场

景径流量为两年极端连枯场景的 1.9 倍。丰枯转移发生概率为 14.2%。其中, 枯-丰发生概率为 7.9%, 极端场景如 1754—1755 年, 连续两年径流比值最小

约为 0.5。丰-枯发生概率为 6.3%，极端场景如 1738—1739 年，连续两年径流比值最大约为 1.5。

(3) 对于连续三年，枯-枯-枯发生概率为 4.3%，丰-丰-丰情景未发生。典型三年连枯场景如 1836—1838 年，年平均径流最小，仅为 290.0 亿 m^3 。丰枯转移中，丰-枯-枯、丰-丰-枯和枯-枯-丰发生概率为 2.2%，枯-丰-丰情景未发生。

总的来说，青铜峡断面考古径流丰枯统计特征结论与唐乃亥和兰州断面基本一致。

3 讨 论

通过距平法划分径流丰枯等级，探究黄河上游丰枯急转发生机制与影响因素。黄河上游唐乃亥和兰州两断面连续两年丰枯急转发生概率均为 16.7%。其中，唐乃亥断面连续两年径流比值介于 0.5~1.9，兰州断面则为 0.6~1.6。进一步计算两断面年际径流变异系数，唐乃亥断面为 0.27，兰州断面为 0.23。由此可知，唐乃亥断面径流丰枯急转相比兰州断面更为显著。初步分析认为，唐乃亥断面以上流域高寒高海拔面积占比较大，径流组分包括降水、冰川、积雪、冻土等，对气候变化更为敏感。相比之下，兰州断面上流域高寒高海拔面积占比相对小，对气候变化的敏感性有所减少，使得兰州断面径流变化程度相对减少^[38]。

基于黄河上游径流特丰特枯、连丰连枯特征认知，分析极端径流对水库调度潜在影响。对于单一年份，唐乃亥断面特丰发生概率为 11.9%，特枯发生概率为 1.5%；兰州断面特丰发生概率为 7.5%，研究期未发生特枯。对于连续两年，唐乃亥断面连枯发生概率为 19.7%，连丰发生概率为 13.6%；兰州断面连枯发生概率为 19.7%，连丰发生概率为 12.1%。对于连续三年，唐乃亥断面连枯发生概率为 7.7%，连丰发生概率为 6.2%；兰州断面连枯发生概率为 7.7%，连丰发生概率为 4.6%。上述结果表明，黄河上游特丰发生概率高于特枯，连枯发生概率高于连丰，调节库容限制与长历时枯水段问题导致丰水期水量浪费、枯水期无水可用，给水库工程“蓄丰补枯”带来了极大挑战^[22,39]。

为提升对黄河上游极端水文事件的认知与应对能力，未来还需推进以下工作：一是搜集树轮、冰芯等资料^[40-41]，构建更长时间径流序列，全面准确把握黄河上游径流长期规律与极值特征；二是挖掘黄河上游水文过程与驱动机制^[24-39]，深入分析特丰特枯、连丰连枯归因，提升径流长期预测水平。

4 结 论

本文聚焦黄河上游一流域主要产水区和年际调蓄区，搜集了干流唐乃亥、兰州、利津三断面 1956—2022 年还原径流以及青铜峡断面 1736—1911 年考古径流，采用多元统计方法，探究了上游对全流域径流贡献度、上游径流年际变化规律以及丰枯统计特征，取得主要研究结论如下。

(1) 基于 Copula 函数揭示了黄河上游对全流域径流的贡献度。黄河上游与全流域径流丰平枯同步概率明显高于丰平枯异步概率，其中唐乃亥与利津断面同步概率 64.2%（同丰 19.3%、同平 14.4%、同枯 30.4%），兰州与利津断面同步概率 71.5%（同丰 20.3%、同平 18.9%、同枯 32.2%）。上游枯水时，全流域有七成至八成概率发生枯水；而上游丰水时，全流域丰水概率降为六成至七成。

(2) 基于非一致性检验揭示了黄河上游径流年际变化规律。1956—2022 年还原数据显示，黄河上游径流序列主要存在 8 a 和 42 a 周期，两个明显突变分别发生于 1989 年和 2017 年，其中 1956—1989 年唐乃亥和兰州两断面径流均呈明显上升趋势（增速 19.9 亿 $m^3/10 a$ 和 15.8 亿 $m^3/10 a$ ）；1990—2017 年唐乃亥断面径流没有明显趋势变化（速率 -0.03 亿 $m^3/10 a$ ），而兰州断面径流表现为小幅上升趋势（增速 5.8 亿 $m^3/10 a$ ）。

(3) 基于概率分析揭示了黄河上游径流丰枯统计特征。青铜峡考古径流研究结论与唐乃亥和兰州还原径流研究结论基本一致。兰州断面单年枯水发生概率 43.3%，研究期未发生特枯；两年连枯发生概率 19.7%，三年连枯发生概率 7.7%。单年丰水发生概率 26.9%，其中特丰发生概率为 7.5%；两年连丰发生概率 12.1%；三年连丰发生概率 4.6%。丰枯急转发生概率为 16.7%，其中枯转丰、丰转枯发生概率分别为 9.1% 和 7.6%。

综上，黄河上游径流年际变异特征明显，尤其是特丰特枯、连丰连枯事件为水资源高效利用带来了极大挑战。为保障流域水资源安全，一是要提升径流长期预测水平，二是要充分挖掘龙羊峡水库年际调蓄能力，三是要加快构建黄河流域“一线七库”水网工程体系。

参考文献 (References):

- [1] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 1-12.

- LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 national water conservancy work conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(1): 1-12.
- [2] NIU C, CHANG J X, WANG Y M, et al. A water resource equilibrium regulation model under water resource utilization conflict: A case study in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(6): e2021WR030779.
- [3] 夏军, 刘柏君, 程丹东. 黄河水安全与流域高质量发展思路探讨 [J]. *人民黄河*, 2021, 43(10): 11-16.
- XIA J, LIU B J, CHENG D D. Discussion on water security and high-quality development of Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2021, 43(10): 11-16.
- [4] 杨大文, 杨雨亭, 高光耀, 等. 黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应 [J]. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 544-551.
- YANG D W, YANG Y T, GAO G Y, et al. Water cycle and soil-water coupling processes in the Yellow River Basin [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(4): 544-551.
- [5] 杜军凯, 贾仰文, 李晓星, 等. 基于流域水循环视角的黄河水源涵养区水源涵养量评价方法 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(10): 71-82.
- DU J K, JIA Y W, LI X X, et al. Evaluation method of water conservation capacity based the perspective of the water cycle in the conserving region of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(10): 71-82.
- [6] 王煜, 彭少明, 武见, 等. 黄河“八七”分水方案实施 30 a 回顾与展望 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(9): 6-13, 19.
- WANG Y, PENG S M, WU J, et al. Review of the implementation of the Yellow River water allocation scheme for thirty years [J]. *Yellow River*, 2019, 41(9): 6-13, 19.
- [7] 郭媛媛, 郭英, 刘峰贵, 等. 黄河上中游地区能源生产及其水足迹变化特征 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(5): 856-864.
- GUO Y Y, GUO Y, LIU F G, et al. Energy production and water footprint changes in the upper and middle reaches of the Yellow River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(5): 856-864.
- [8] ZHAO F F, XU Z X, ZHANG L, et al. Streamflow response to climate variability and human activities in the upper catchment of the Yellow River Basin [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(11): 3249-3256.
- [9] 江恩慧, 李洁玉, 王远见, 等. 黄河流域系统可持续运行的“139+”水沙调控指标体系 [J/OL]. *水利学报*, 2025: 1-11. [2025-01-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20250102.1703.003.html>.
- JIANG E H, LI J Y, WANG Y J, et al. Water and sediment regulation index system “139+” for sustainable development of the Yellow River Basin [J/OL]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025: 1-11. [2025-01-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20250102.1703.003.html>.
- [10] 李跃红, 蒋晓辉, 张琳. 黄河流域水资源节约集约利用能力评价 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 731-741.
- LI Y H, JIANG X H, ZHANG L. Evaluation of conservation and intensive utilization capacity of water resources in Yellow River Basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 731-741.
- [11] 张金良. 构建黄河流域水网的思考 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 1-5.
- ZHANG J L. Thoughts on construction of water network in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 1-5.
- [12] 彭少明, 王煜, 郑小康, 等. 黄河梯级水库群多过程协同调度模型与方法 [J]. *水利学报*, 2022, 53(12): 1410-1420.
- PENG S M, WANG Y, ZHENG X K, et al. A multi-process coordinated scheduling model and method for cascade reservoirs in Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(12): 1410-1420.
- [13] 席海潮, 解阳阳, 刘赛艳, 等. 龙羊峡水库蓄丰补枯特征研究 [J]. *水文*, 2024, 44(3): 47-51.
- XI H C, XIE Y Y, LIU S Y, et al. Characteristics of wetness storage and dryness compensation of Longyangxia Reservoir [J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(3): 47-51.
- [14] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. *水利发展研究*, 2024, 24(1): 1-10.
- LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1): 1-10.
- [15] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. *水利发展研究*, 2023, 23(1): 1-11.
- LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 1-11.
- [16] 钟加星, 董增川, 孟金玉, 等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 30-37.
- ZHONG J X, DONG Z C, MENG J Y, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6): 30-37.
- [17] 邓安军, 陈建国, 胡海华, 等. 我国水库淤损情势分析 [J]. *水利学报*, 2022, 53(3): 325-332.
- DENG A J, CHEN J G, HU H H, et al. Analysis of reservoir siltation in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(3): 325-332.
- [18] XIANG Z R, YAN J, DEMIR I. A rainfall-runoff model with LSTM-based sequence-to-sequence learning [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(1): e2019WR025326.
- [19] TAN Q F, LEI X H, WANG X, et al. An adaptive middle and long-term runoff forecast model using EEMD-ANN hybrid approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 767-780.
- [20] 温馨, 孙艳, 李昱, 等. 流域年径流预报方法及影响因素分析

- [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(11): 113-123.
- WEN X, SUN Y, LI Y, et al. Analysis of annual runoff forecasting methods and the influence of factors in watersheds [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(11): 113-123.
- [21] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 155-163.
- LI E H, MU X M, ZHAO G J. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 155-163.
- [22] 尚文绣, 王煜, 郑小康, 等. 黄河百年径流系列连续枯水段识别和用水特征分析[J]. *人民黄河*, 2024, 46(6): 20-25.
- SHANG W X, WANG Y, ZHENG X K, et al. Identification of continuous low water period in the Yellow River's centennial runoff series and analysis of water use characteristics [J]. *Yellow River*, 2024, 46(6): 20-25.
- [23] 刘昌明, 王恺文, 王冠, 等. 1956—2016年黄河流域径流及其影响因素的变化分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(9): 1-5.
- LIU C M, WANG K W, WANG G, et al. Analyzing the changes of streamflow and associated influencing factors in the Yellow River Basin from 1956 to 2016[J]. *Yellow River*, 2022, 44(9): 1-5.
- [24] 魏伊宁, 李勋贵, 李芳. 黄河上游径流丰枯空间分布特征及其影响因素[J]. *水资源保护*, 2021, 37(6): 103-113.
- WEI Y N, LI X G, LI F. Spatial distribution characteristics and influencing factors of wet and dry of runoff in upper reaches of the Yellow River[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6): 103-113.
- [25] TIAN S M, XU M Z, JIANG E H, et al. Temporal variations of runoff and sediment load in the upper Yellow River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 46-56.
- [26] JIN J L, WANG G Q, ZHANG J Y, et al. Impacts of climate change on hydrology in the Yellow River source region, China[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2020, 11(3): 916-930.
- [27] 史辅成, 慕平, 高治定. 清代青铜峡志桩考证及历年水量估算[J]. *人民黄河*, 1990, 12(4): 27-30.
- [28] 井立军, 高婧, 井立红, 等. 四棵树河径流量与气候影响因子分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(4): 513-518.
- JING L J, GAO J, JING L H, et al. Runoff volume of Sikesu River and its influential factors of climate[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 513-518.
- [29] REN K, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Assessing the reliability, resilience and vulnerability of water supply system under multiple uncertain sources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119806.
- [30] 高月娇, 黄生志, 王韩叶, 等. 考虑非一致性的黄土高原区旱涝复合事件的演变特征及其动态变化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 133-143.
- GAO Y J, HUANG S Z, WANG H Y, et al. Evolution characteristics and dynamic changes of drought-flood complex events on Loess Plateau in terms of non-consistency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(8): 133-143.
- [31] GUO Y, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Copulas-based bivariate socioeconomic drought dynamic risk assessment in a changing environment [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 1052-1064.
- [32] 王慧颖, 刘舒, 李敏, 等. 基于 Copula 函数的区域洪水频率分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 30-42.
- WANG H Y, LIU S, LI M, et al. Regional flood frequency analysis based on copula function [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(8): 30-42.
- [33] 陈雪, 胡宏昌, 刘慧, 等. 基于机器学习算法的清涧河流域径流及含沙量预测研究 [J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(5): 520-529.
- CHEN Xue, HU Hongchang, LIU Hui, et al. Prediction of runoff and sediment concentration in Qingjian River basin based on machine learning algorithm [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(5): 520-529.
- [34] HAN Z M, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Assessing GRACE-based terrestrial water storage anomalies dynamics at multi-timescales and their correlations with teleconnection factors in Yunnan Province, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 836-850.
- [35] 司源, 李想, 鲍军. 黄河上游梯级水库调度若干关键问题研究 [M]. 武汉: 长江出版社, 2019.
- SI Y, LI X, BAO J. Research on Key Issues in the Regulation of Cascade Reservoirs in the Upper Yellow River [M]. Wuhan: Yangtze River Press, 2019.
- [36] 封钰, 宋佑斌, 金晟, 等. 基于随机森林算法和粗糙集理论的改进型深度学习短期负荷预测模型 [J]. *发电技术*, 2023, 44(6): 889-895.
- FENG Y, SONG Y B, JIN S, et al. Improved deep learning model for forecasting short-term load based on random forest algorithm and rough set theory [J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(6): 889-895.
- [37] LIU S Y, HUANG S Z, XIE Y Y, et al. Spatial-temporal changes in vegetation cover in a typical semi-humid and semi-arid region in China: Changing patterns, causes and implications [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 462-475.
- [38] NI Y X, YU Z B, LYU X Z, et al. Spatial difference analysis of the runoff evolution attribution in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128149.
- [39] 王煜, 郑小康, 张迪, 等. 极端枯水年黄河流域水资源安全保障策略研究 [J]. *中国水利*, 2024(24): 55-59.
- WANG Y, ZHENG X K, ZHANG D, et al. Study on water resources security guarantee strategies for the Yellow River Basin during extreme water scarcity year [J]. *China Water Resources*, 2024(24): 55-59.
- [40] LI B F, FENG Q, WANG F, et al. A 1.68 Ma organic isotope record from the Hetao Basin, upper reaches of the Yellow River in northern China: Implications for hydrological and ecological variations [J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 184: 103061.
- [41] LI J J, ACHIM B, ZHENG Z Y, et al. Unusual recent prolonged low flow in the Moqu River, Northeastern Tibetan Plateau, inferred from tree-ring width variations [J]. *Catena*, 2023, 228: 107110.

(责任编辑 王海锋)