

1956—2022 年黄河入海水量演变特征及其归因分析

朱翰林,何国华,赵 勇,王建华,何 凡,李雯晴,王宣宣

(中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室,北京 100038)

摘要:为量化人类活动和气候变化对黄河入海水量演变的影响,将经济社会耗水纳入计算过程,利用还原后的天然径流数据,基于 Budyko 假设的弹性系数法,分析了 1956—2022 年黄河入海水量的演变特征,识别了断流前(1956—1971 年)、断流期(1972—1998 年)和恢复期(1999—2022 年)不同阶段黄河入海水量变化的驱动因素。结果表明:1956—2022 年黄河入海水量呈显著下降趋势,尽管 2018—2022 年入海水量明显增加,但恢复期的年均入海水量仍低于断流期;经济社会耗水增加是断流期黄河入海水量衰减的主导因素,其贡献率为 44.45%;恢复期入海水量进一步减少的主导因素为下垫面变化,其贡献率为 100.74%;黄河未来入海水量变化仍存在不确定性,需进一步研究论证入海水量演变态势,保障黄河流域水资源的可持续利用。

关键词:黄河入海水量;天然径流;经济社会耗水;Budyko 假设;弹性系数法

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0167-09

Evolution characteristics and attribution analysis of water discharge from the Yellow River into sea during 1956-2022//ZHU Hanlin, HE Guohua, ZHAO Yong, WANG Jianhua, HE Fan, LI Wenqing, WANG Xuanxuan (State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To quantify the impacts of human activities and climate change on the evolution of water discharge from the Yellow River into sea, socio-economic water consumption was incorporated into the calculation process. Using restored natural runoff data and the elasticity coefficient method based on the Budyko hypothesis, this study analyzed the evolution characteristics of water discharge from the Yellow River into sea from 1956 to 2022, and identified the driving factors of the changes in water discharge in the period before flow cessation (1956-1971), flow cessation period (1972-1998), and the recovery period (1999-2022). The results indicated that from 1956 to 2022, the water discharge from the Yellow River into sea exhibited a significant declining trend. Although a notable increase occurred during 2018-2022, the average annual water discharge into sea during the recovery period remained lower than that during the flow cessation period. Increased socio-economic water consumption was the dominant factor leading to the decline in water discharge into sea during the flow cessation period, with a contribution rate of 44.45%. In contrast, during the recovery period, underlying surface changes became the primary factor leading to further reductions, accounting for 100.74% of the contribution. The future trajectory of the water discharge from the Yellow River into sea remains uncertain, necessitating further research to elucidate its evolving trends and ensure sustainable water resources utilization in the Yellow River Basin.

Key words: water discharge from the Yellow River into sea; natural runoff; socio-economic water consumption; Budyko hypothesis; elasticity coefficient method

入海水量是判断黄河健康状态的关键指标,是流域水资源、水生态质量的综合反映^[1-2]。受气候变化和高强度人类活动的共同影响,黄河干流在 1972—1998 年间频繁出现断流现象,27 年间共断流 82 次,累计断流时间达到 1 055 天,年均断流天数为 50 天^[3-4]。1999 年以来,随着一系列水资源管理措

施的实施,黄河干流断流现象得到了有效遏制,已实现连续 25 年不断流,全流域生态健康状况得到了显著改善^[5]。

黄河流域是我国水资源最为短缺、供需水矛盾最为尖锐的流域之一,针对近年来入海水量的变化,在全流域用水需求日益扩大的背景下,不同学者对

基金项目:国家自然科学基金项目(52394231);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项资金项目(WR110145B0022025)
作者简介:朱翰林(1998—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhuhanlin0504@163.com
通信作者:何国华(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:hegh@iwhr.com

水量分配方案调整持有不同观点。一种观点认为,随着黄河入海水量的增加和泥沙含量的减少,流域水量具有可进一步分配的空间,应将部分入海水量指标调整到上中游缺水地区,以缓解上中游地区的水资源短缺压力^[6-7];另一种观点认为,近年来黄河流域耗水规模不断增加,黄河干流之所以不断流,只是通过科学调配将缺水矛盾由显性转为隐性、由干流转移到支流,将水量指标调整至上中游地区并不能有效解决流域缺水问题^[8-9]。当前正处于南水北调西线工程和黄河“八七”分水方案论证调整的关键期,科学认知入海水量的演变态势和驱动因素对于黄河流域生态保护和高质量发展具有重要的理论与实践意义。

科学认知径流变化成因是当前水文水资源领域的研究热点,目前广泛采用的径流变化定量归因方法主要有基于 Budyko 假设的弹性系数法、双累积曲线法以及基于物理过程的水文模拟法等^[10-13]。水文模拟法通过多个输入变量模拟不同因素对径流变化的影响,能够有效识别径流变化的主导因素。然而,该方法依赖大量高精度数据,模型校准验证相对困难,尤其在流域产汇流条件发生变化时,数据缺乏或代表性不足可能导致计算结果存在较大误差。双累积曲线法通过分析降水-径流的相互关系识别径流变化原因,计算过程相对简单,但该方法更适用于宏观趋势性分析,难以精确量化各因素对径流变化的贡献。相比之下,基于 Budyko 假设的弹性系数法物理机制明确,参数容易获取且处理过程较为简便,已成为定量识别径流演变归因的重要方法,在黄河、海河、长江等流域得到了广泛应用^[14-16]。

Budyko 假设是水文学中研究流域水热耦合关系的重要方法,该假设认为在长期水热平衡背景下,流域径流变化主要受降水量、潜在蒸散发量及其相互关系的控制。利用该方法进行径流变化归因分析时,理论上应使用天然径流数据^[17]。王宣宣等^[18]将 Budyko 假设与水量平衡原理相结合,利用天然径流数据开展了西辽河流域的径流衰减归因分析。杨大文等^[19]在利用 Budyko 假设进行黄河流域径流归因分析时也强调使用天然径流,并选择了 38 个人类活动影响较小的子流域作为研究区。黄河流域作为典型的人工-自然二元复合流域,经济社会耗水对径流的影响极为显著,应将其作为径流变化的主要因素予以考虑。然而,现有研究普遍选择实测径流数据进行黄河流域径流变化归因分析,对经济社会耗水的作用缺少评估^[20-21]。此外,现有研究较少从断流视角对比分析黄河入海水量的演变特征,与传统基于径流序列突变点划分研究时段的方法相比,以

断流期和非断流期作为划分依据,能够更加直观地反映入海水量在不同水文状态下的变化规律。鉴于此,本文以黄河干流断流事件为切入点,利用还原后的天然径流数据,采用基于 Budyko 假设的弹性系数法对不同时期黄河入海水量演变特征进行归因分析,以期为黄河流域水资源宏观管理决策提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域位于 32°10'N ~ 41°50' N,95°53' E ~ 119°05' E,总面积 79.5 万 km²(其中内流区面积 4.23 万 km²),横跨我国东、中、西 3 大区域,地势高低起伏显著^[22-23]。根据全国第三次水资源调查评价结果,1956—2016 年黄河流域年均地表水资源量为 490 亿 m³,相较于 1919—1975 年减少了 16%,水资源短缺已成为黄河流域生态保护和高质量发展的关键制约因素^[24]。黄河流域径流变化具有显著的空间差异性^[15],为了分析不同区间的径流演变特征,根据黄河干流 4 座代表性水文站(兰州、龙门、三门峡、利津)的地理位置,考虑水文气象和水库蓄变量等数据的完整性,将黄河流域划分为 4 个区间,分别为兰州以上、兰州至龙门(不考虑内流区)、龙门至三门峡和三门峡以下区间,各区间及水文气象站点分布见图 1。

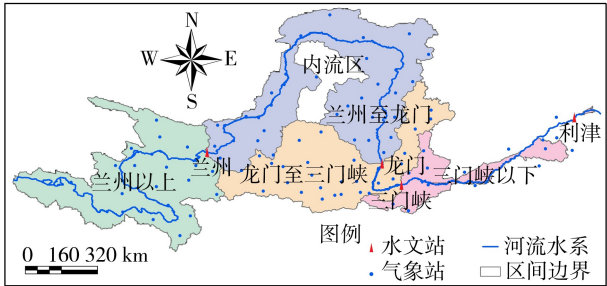


图 1 研究分区及水文气象站点分布

Fig. 1 Study area division and distribution of hydrometeorological stations

1.2 数据来源

1.2.1 气象要素

采用黄河流域 103 个国家气象站点 1956—2022 年的实测气象数据,包括日降水量、最高温度、最低温度、平均温度、日照时数、平均气压、平均相对湿度、平均风速,气象资料来自中国气象数据共享服务平台(<http://cdc.cma.gov.cn>),个别缺测值利用线性插值方法插补完善。

1.2.2 径流与水库调蓄量

1956—2022 年兰州、龙门、三门峡、利津 4 个水文站实测和天然径流数据来源于全国第三次水资源调查评价、《黄河水资源公报》《黄河流域水资源调

查评价》。利津站是黄河入海的最后一个水文站,由于利津站至入海口之间的引黄水量占比较小,通常将利津站实测径流量看作黄河入海水量^[25]。本文采用相邻水文站点的径流差值反映不同区间的径流变化情况,1956—1997 年水库调蓄数据根据《黄河历年水文基本资料审查、评价及天然径流量计算》获取,1998—2022 年水库调蓄数据参考《黄河水资源公报》获取。

1.2.3 植被数据集

采用归一化植被指数 (normalized vegetation index, NDVI) 反映流域植被变化情况,数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) 全球监测与模型研究数据集 (GIMMS)^[26]。该数据集的空间分辨率为 8 km×8 km,时间分辨率为 15 d,时间范围为 1982—2022 年,本文采用最大值合成法消除图像噪声,并获取年均 NDVI 数据。

2 研究方法

2.1 经济社会耗水量计算

黄河流域各水文站的天然径流量主要由实测径流量、经济社会耗水量和水库调蓄变化量等数据还原计算得到,其中,经济社会耗水量指地表水取水量扣除其回归到黄河干、支流河道后的水量^[27],计算公式为

$$W_e = R_t - R_m - W_r \tag{1}$$

式中: W_e 为经济社会耗水量; R_t 为天然径流量; R_m 为实测径流量; W_r 为水库调蓄变化量。经过对比,本文采用的天然径流数据与文献[28-29]的结果较为一致,具有较好的可靠性。

2.2 潜在蒸散发计算

采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式^[30] 计算各气象站点的逐日潜在蒸散发量,该方法充分考虑了作物地表特征和空气动力学参数变化,目前已被广泛应用于各地区蒸散发计算,具体计算公式参考马亚丽等^[31] 的研究。

2.3 天然径流的气候弹性和下垫面弹性

利用 Choudhury-Yang 公式进行黄河流域天然径流变化的定量归因研究,该公式在 Budyko 假设的基础上引入下垫面特性参数对实际蒸散发量进行修正。下垫面特性参数主要与地形、土壤和植被等因素有关,考虑到流域的地形、土壤因素相对稳定,因此,下垫面特性参数的变化主要反映了植被的变化^[32]。综合来看,植被通过改变冠层截留、蒸散发、土壤持水、地表粗糙度等多种方式影响径流过程,当植被覆盖度增加时,下垫面特征参数通常随之增大,导致流域径流量呈现减少趋势。Choudhury-Yang 公

式为

$$ET = PET_0 / (P^n + ET_0^n)^{1/n} \tag{2}$$

式中: ET 为年均实际蒸散发量; P 为年均降水量; ET_0 为年均潜在蒸散发量; n 为下垫面特征参数。

在应用 Choudhury-Yang 公式时,需满足流域多年平均蓄水变化量可忽略的条件^[33]。通过分析黄河流域主要大中型水库多年调蓄数据发现,1956—2022 年大中型水库多年调蓄变化量远小于流域降水量和潜在蒸散发量,可以忽略不计^[34]。因此还原后的年均天然径流量为

$$R_t = P - ET = P - PET_0 / (P^n + ET_0^n)^{1/n} \tag{3}$$

对式(3)求全微分,得到:

$$\frac{dR_t}{R_t} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} + \varepsilon_n \frac{dn}{n} \tag{4}$$

其中

$$\varepsilon_P = \frac{(1 + \varphi^n)^{1/(n+1)} - \varphi^{n+1}}{(1 + \varphi^n) [(1 + \varphi^n)^{1/n} - \varphi]}$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + \varphi^n) [1 - (1 + \varphi^{-n})^{1/n}]}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\ln(1 + \varphi^n) + \varphi^n \ln(1 + \varphi^{-n})}{n [(1 + \varphi^n) - (1 + \varphi^n)^{1/(n+1)}]}$$

$$\varphi = ET_0 / P$$

式中 ε_P 、 ε_{ET_0} 、 ε_n 分别为降水弹性系数、潜在蒸散发弹性系数和径流下垫面弹性系数^[35],弹性系数的正负分别表示影响因子对径流变化的正向和负向影响,弹性系数绝对值的大小表示该影响因子对径流变化的影响程度。

2.4 入海水量变化的贡献率分析

将研究时段划分为 3 个时期,分别为断流前 (1956—1971 年)、断流期 (1972—1998 年) 和恢复期 (1999—2022 年),相邻时期的入海水量变化量为 4 个区间实测径流变化量 (ΔR_m) 之和。

各区间实测径流在经济社会耗水、天然径流和水库调蓄的作用下发生变化。黄河流域各区间长时间尺度水库调蓄变化量可忽略不计,而天然径流变化量则受到降水、潜在蒸散发和下垫面特征参数共同影响,故实测径流变化量为

$$\Delta R_m = \Delta R_{W_e} + \Delta R_t = \Delta R_{W_e} + \Delta R_P + \Delta R_{ET_0} + \Delta R_n \tag{5}$$

其中

$$\Delta R_P = \varepsilon_P R_t \Delta P / P$$

$$\Delta R_{ET_0} = \varepsilon_{ET_0} R_t \Delta ET_0 / ET_0$$

$$\Delta R_n = \varepsilon_n R_t \Delta n / n$$

式中: ΔP 、 ΔET_0 、 Δn 分别为降水量、潜在蒸散发量、下垫面特征参数的变化量; ΔR_{W_e} 、 ΔR_P 、 ΔR_{ET_0} 、 ΔR_n 分别为经济社会耗水量、降水量、潜在蒸散发量、下垫面变化引起的实测径流变化量。

各区间不同影响因素对入海水量变化量的贡献率为

$$C_i = \Delta R_i / \Delta R_m \times 100\% \quad (6)$$

式中 C_i 为各影响因素对入海水量变化量的贡献率, i 分别代表 W_c 、 P 、 ET_0 和 n 。

3 结果与分析

3.1 黄河入海水量变化趋势

如图 2 所示,1956—2022 年黄河年均入海水量为 277.25 亿 m^3 ,整体上呈现显著下降趋势($p < 0.01$),年均降幅为 4.91 亿 m^3 。入海水量最大值出现在 1964 年,达到 973.27 亿 m^3 ;最小值出现在断流现象最严重的 1997 年,仅为 18.60 亿 m^3 。分时段来看,断流前黄河入海水量呈现不显著下降趋势($p > 0.05$),年均入海水量为 464.76 亿 m^3 ;断流期入海水量呈现显著下降趋势($p < 0.01$),年均降幅为 8.96 亿 m^3 ,年均入海水量仅为 245.85 亿 m^3 ,相较于断流前骤降了 47.1%;恢复期入海水量呈现显著上升趋势($p < 0.01$),年均增幅为 9.32 亿 m^3 ,年均入海水量为 187.58 亿 m^3 。尽管自 1999 年小浪底水利枢纽投入运行以及黄河实施流域水量统一调度以来,黄河干流未再出现断流现象,但恢复期年均入海水量比断流期的均值低 23.7%。黄河入海水量大幅增加现象主要出现在 2018 年后,2018—2022 年的年均入海水量达到 341.52 亿 m^3 ,而在此之前的 2016 年和 2017 年入海水量不足 100 亿 m^3 。可以看出,尽管近年来黄河干流的断流问题得到了有效缓解,但 1999—2022 年黄河入海水量变化态势并不稳定。

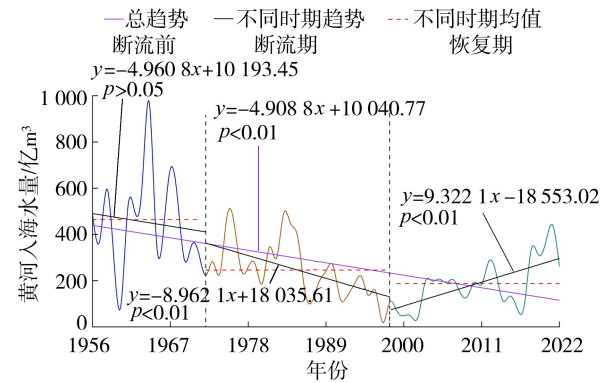


图 2 黄河入海水量时间序列变化

Fig. 2 Temporal variation of water discharge from the Yellow River into sea

3.2 黄河入海水量影响因素变化特征

3.2.1 时间变化特征

1956—2022 年,除了降水量减少外,黄河流域潜在蒸散发量、经济社会耗水量、NDVI 均呈现增加

趋势(图 3)。其中,经济社会耗水量的变化尤为显著($p < 0.01$),从 1956 年的 110.91 亿 m^3 快速增加到 2022 年的 297.94 亿 m^3 ,增幅达到 187.03 亿 m^3 ,说明随着社会经济快速发展和人口增长,流域水资源需求急剧上升。由于退耕还林还草、水土保持等工程的持续实施,黄河流域 NDVI 也呈显著增加趋势($p < 0.01$),从 1982 年的 0.33 增加到 2022 年的 0.41。潜在蒸散发量整体上呈不显著增加趋势($p > 0.05$),变化速率为 0.54 mm/a,一方面可能与流域气温升高、太阳辐射等气象因子变化有关;另一方面,植被变化通过改变地表反照率和地表粗糙度影响感热和潜热通量而产生一定影响^[36]。尽管黄河流域降水量变化整体并不显著($p > 0.05$),但自 2002 年以来流域降水出现了小幅增加的趋势,2002—2022 年流域降水量年均增幅为 4.19 mm。

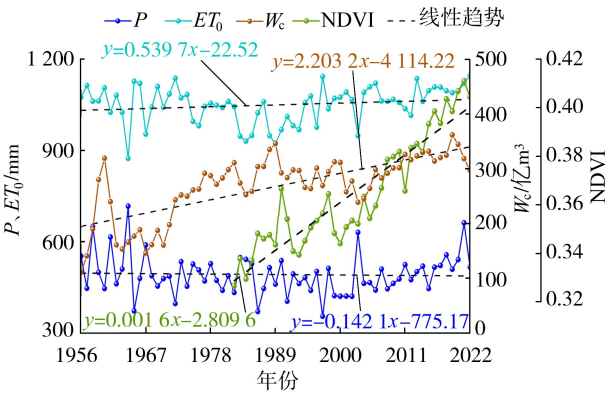


图 3 黄河入海水量主要影响因素变化趋势

Fig. 3 Trends of major influencing factors on water discharge from the Yellow River into sea

3.2.2 空间变化特征

从图 4(a)~(c)可以看出,黄河流域降水量的分布特征为东多西少、南多北少,三门峡以下区间是黄河流域降水量的高值区,其降水量几乎是兰州至龙门区间降水量的两倍;从图 4(d)~(f)可以看出,潜在蒸散发量整体上呈现由西南向东北递增的趋势,兰州以上区间为潜在蒸散发量低值区,不同时期均值都不超过 800 mm。相较于断流前,龙门至三门峡和三门峡以下区间的降水量和潜在蒸散发量在断流期明显减小,变化幅度均超过 50 mm;与断流期相比,恢复期各区间降水量和潜在蒸散发量的增加趋势较为明显,其中三门峡以下区间的降水量增幅最为显著,达到 53.1 mm,而兰州至龙门区间的潜在蒸散发量增幅最大,为 82.10 mm。

从图 5(a)(b)可以看出黄河流域 NDVI 整体呈现东南高、西北低的空间分布特征,与降水量的空间分布特征相似,说明黄河流域降水量与 NDVI 之间存在一定的相关性,这与吴思源等^[37]对黄河流域

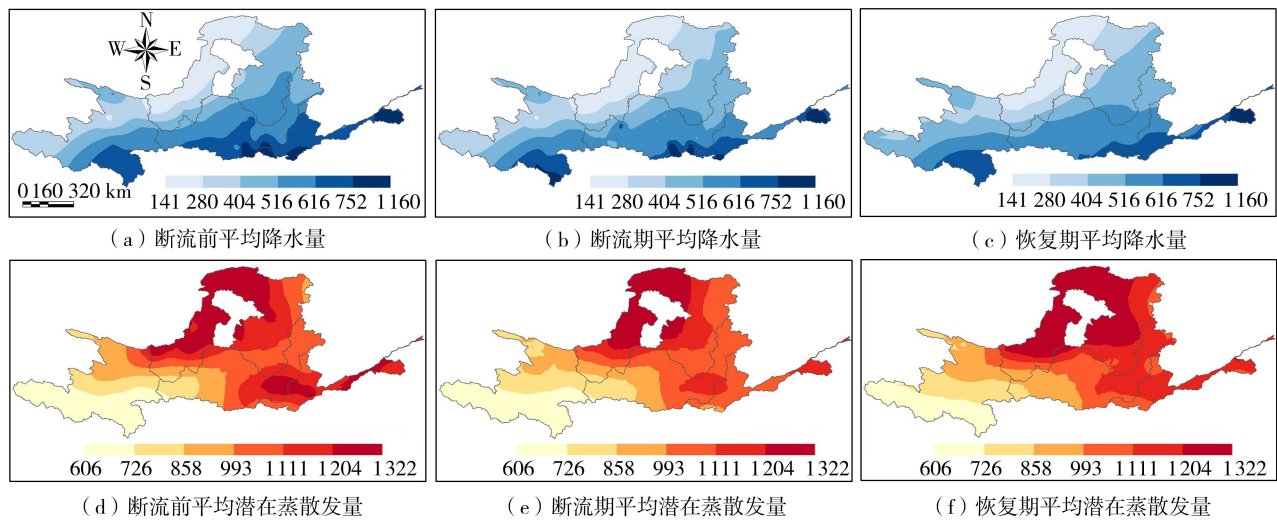


图 4 不同时期降水量、潜在蒸散发的空间分布(单位:mm)

Fig. 4 Spatial distributions of precipitation and potential evapotranspiration in different periods(unit: mm)

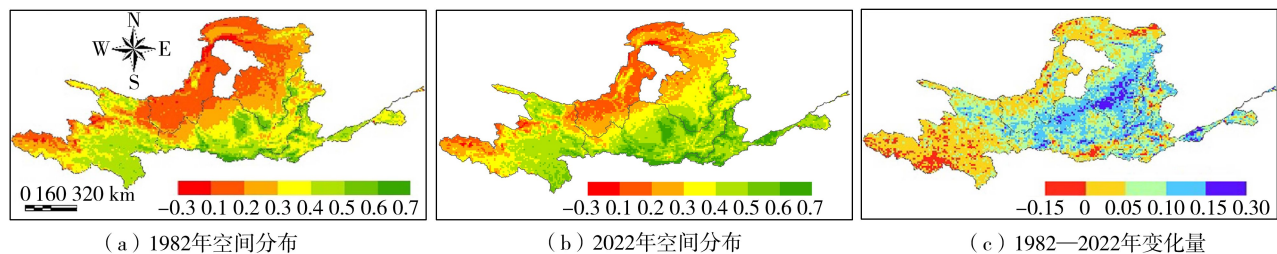


图 5 1982—2022 年 NDVI 空间分布与变化量

Fig. 5 Spatial distributions and temporal variation of NDVI from 1982 to 2022

NDVI 的研究成果较为一致。从图 5(c) 中可以发现,1982—2022 年黄河流域地表植被改善的区域面积远远大于植被退化的区域面积,植被改善最显著的地区主要集中在兰州至龙门区间的黄土高原。

图 6 为 1956—2022 年黄河流域各区间经济社会耗水量的变化情况。可以看出,各时期兰州以上和龙门至三门峡区间的耗水规模始终相对较小,各区间变化趋势有一定差异,龙门至三门峡区间的经济社会耗水量在 1956—2022 年呈现出稳定上升的趋势,而兰州以上区间在恢复期则出现了下降趋势。相比之下,兰州至龙门和三门峡以下区间是黄河流域主要的耗水区,2022 年这两个区间的经济社会耗水量分别达到 120.10 亿 m^3 和 106.73 亿 m^3 ,分别占总耗水量的 40.31% 和 35.82%。分时期来看,兰州至龙门区间由于地处黄河“几”字弯区域,该区间是黄河流域重要的经济增长区,能源富集、人口集中,还包含了宁夏平原、河套平原等用水大户,导致用水需求不断增加^[38],平均耗水量由断流前的 88.02 亿 m^3 增加到恢复期的 115.28 亿 m^3 ;三门峡以下区间的平均耗水量从断流前的 71.74 亿 m^3 快速增加到断流期的 127.31 亿 m^3 ,但在恢复期则相对稳定。

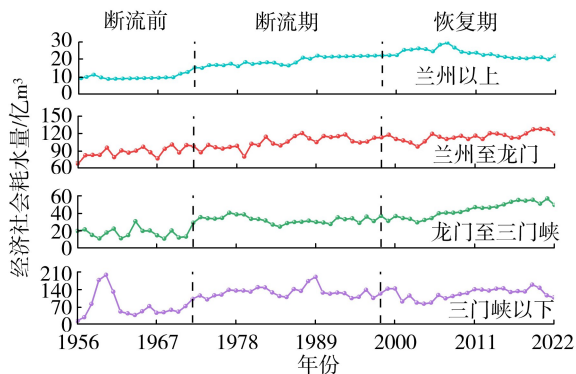


图 6 1956—2020 年黄河流域各区间经济社会耗水量
Fig. 6 Socio-economic water consumption in different subregions in the Yellow River Basin

3.3 黄河入海水量变化归因分析

黄河入海水量变化归因分析结果如表 1 所示。可以看出,相较于断流前,断流期黄河入海水量大幅减少 218.91 亿 m^3 ,各区间实测径流量均出现了不同程度的衰减,其中衰减最为明显的是三门峡以下区间,衰减量达到 115.81 亿 m^3 ,占总衰减量的 52.9%;其次为龙门至三门峡区间,占比为 20.59%。从衰减归因来看,经济社会耗水量增加和下垫面变化对三门峡以下区间实测径流量衰减的贡献率高达 87.47%,远高于气候变化的贡献率(12.53%)。

表 1 黄河入海水量变化归因分析结果

Table 1 Attribution analysis results of water discharge from the Yellow River into sea

区间	比较 时段	$\Delta R_m /$ 亿 m^3	$\Delta R_{w_c} /$ 亿 m^3	$C_{w_c} / \%$	$\Delta P /$ mm	$\Delta R_p /$ 亿 m^3	$C_p / \%$	$\Delta ET_0 /$ mm	$\Delta R_{ET_0} /$ 亿 m^3	$C_{ET_0} / \%$	Δn	$\Delta R_n /$ 亿 m^3	$C_n / \%$
兰州 以上	T_2 与 T_1	-21.80	-9.11	41.79	-2.12	-2.63	12.06	-24.01	0.66	-3.03	0.02	-10.72	49.17
	T_3 与 T_2	1.58	-4.33	-274.05	23.43	29.02	1836.71	55.98	-20.98	-1327.85	0.01	-2.13	-134.85
	T_3 与 T_1	-20.22	-13.44	66.47	21.31	26.39	-130.51	31.97	-20.32	100.49	0.03	-12.85	63.55
兰州至 龙门	T_2 与 T_1	-36.24	-17.27	47.65	-36.53	-12.36	34.11	-18.41	1.25	-3.45	0.12	-7.86	21.69
	T_3 与 T_2	-50.54	-10.01	19.81	12.91	4.37	-8.65	82.10	-5.57	11.02	0.59	-39.33	77.82
	T_3 与 T_1	-86.78	-27.28	31.44	-23.62	-7.99	9.21	63.69	-4.32	4.98	0.71	-47.19	54.38
龙门至 三门峡	T_2 与 T_1	-45.07	-15.36	34.08	-53.12	-28.92	64.17	-52.86	10.05	-22.30	0.11	-10.84	24.05
	T_3 与 T_2	-26.55	-11.31	42.60	8.08	4.40	-16.57	53.00	-10.08	37.97	0.09	-9.56	36.01
	T_3 与 T_1	-71.62	-26.67	37.24	-45.04	-24.52	34.24	0.14	-0.03	0.04	0.20	-20.40	28.48
三门峡 以下	T_2 与 T_1	-115.81	-55.57	47.98	-68.09	-22.01	19.01	-83.23	7.50	-6.48	0.40	-45.73	39.49
	T_3 与 T_2	17.25	5.12	29.68	53.15	23.02	133.45	35.75	-3.22	-18.67	0.14	-7.67	-44.46
	T_3 与 T_1	-98.56	-50.45	51.19	-14.94	1.01	-1.02	-47.48	4.28	-4.34	0.54	-53.40	54.18
黄河 流域	T_2 与 T_1	-218.91	-97.31	44.45	-39.54	-65.92	30.11	-35.54	19.46	-8.89	0.07	-75.15	34.33
	T_3 与 T_2	-58.26	-20.53	35.24	18.72	60.81	-104.38	59.64	-39.85	68.40	0.08	-58.69	100.74
	T_3 与 T_1	-277.17	-117.84	42.52	-20.82	-5.11	1.84	24.10	-20.39	7.36	0.15	-133.84	48.29

注： T_1 、 T_2 、 T_3 分别表示断流前、断流期和恢复期。

究其原因,一方面是由于三门峡以下区间包括河南、山东等人口和农业大省,随着人口增长和经济快速发展,农业用水需求不断增加,特别是引黄灌溉工程的实施,使得下游引黄灌区农业灌溉面积从 20 世纪 50 年代约 30 万 hm^2 迅速扩大到 90 年代的 220 万 hm^2 ,导致断流期耗水量激增^[28];另一方面是断流期耕地面积扩张以及大面积灌溉显著改善了区域植被覆盖情况,使得下垫面特征参数增大了 0.40,导致区域蒸散发量增加,径流量减小。龙门至三门峡区间径流量衰减的主要影响因素是降水量减少和经济社会耗水量增加,两者的贡献率总和达到 98.28%。尽管断流期各区间潜在蒸散发量的减小对实测径流具有正向作用,但其贡献率在各区间均处于最低水平,对入海水量变化的平均贡献率仅为 -8.89%。综合来看,断流期黄河入海水量在流域经济社会耗水规模扩大、降水量减少以及下垫面变化的共同作用下出现大幅衰减,导致极端断流现象频繁发生。其中,经济社会耗水量增加是断流期黄河入海水量大幅衰减的主导因素,贡献率达到 44.45%。

恢复期入海水量进一步减少 58.26 亿 m^3 ,不同于断流期的统一衰减趋势,恢复期各区间径流量呈现出显著的空间分异特征。兰州至龙门区间是流域主要的径流衰减区,径流量减少 50.54 亿 m^3 ;而三门峡以下区间则为径流量增加的主要区域,径流量增加 17.25 亿 m^3 。从影响因素来看,恢复期兰州至龙门区间下垫面变化导致径流量减少 39.33 亿 m^3 ,贡献率达 77.82%,是该区间径流量减少的主导因素,而断流期下垫面变化的贡献率仅为 21.69%。Chen 等^[39]研究表明,黄土高原作为黄河流域主要

的植被恢复区,1981—1999 年植被覆盖率仅增加约 5%,1999 年退耕还林项目实施后植被覆盖率大幅提升约 25%,可以发现退耕还林项目实施时期与本文恢复期时间节点一致,在一定程度上解释了兰州至龙门区间恢复期主导因素的转变。降水条件的改善对三门峡以下区间径流量增加起到关键作用,对径流量增加的贡献为 23.02 亿 m^3 ,贡献率高达 133.45%。总的来看,恢复期入海水量进一步衰减的主导因素转变为下垫面变化,贡献率达 100.74%,但相较于断流期入海水量的大幅衰减趋势,恢复期由于流域降水条件的好转以及各区间耗水规模的有效控制,使入海水量衰减趋势得以控制。

整体来看,与断流前相比,恢复期黄河入海水量共减少 277.17 亿 m^3 ,其中经济社会耗水量和下垫面变化的贡献量分别为 117.84 亿 m^3 和 133.84 亿 m^3 ,两者共同主导了入海水量的衰减,其影响远高于气候变化。这一结果进一步验证了经济社会耗水和下垫面变化对黄河入海水量演变的长期主导作用。将黄河流域径流长时间序列细分为 3 个时期具有一定的科学性,为全面解析黄河入海水量的演变特征及其驱动机制提供了依据。

值得注意的是,兰州以上区间作为黄河流域的主要产水区,径流与降水量之间有较强的相关性^[40-41]。与断流期相比,恢复期兰州以上区间降水量增加 23.43 mm,对实测径流量增加的贡献为 29.02 亿 m^3 ,然而在各影响因素的共同作用下,该区间实测径流量却只增加 1.58 亿 m^3 。黄河源区面积占兰州以上区间的 55%,其产流量占兰州以上区间的 67%^[42],已有研究表明,21 世纪以来,黄河源区降水量的变化并未与径流变化完全同步,降水量

出现了明显的增加,但径流增幅相对较少,仍然为负距平^[43]。此外,张一然等^[44]研究发现,2003—2017年黄河源区的降水量增加主要集中在西北部干旱地区,这些地区的降水更多地转化为蒸散发,对产流增加的贡献有限;与此同时,东南部产流区的降水量增幅较小,进一步抑制了产流。

4 结 论

a. 从黄河入海水量的变化规律看,1956—2022年黄河入海水量整体呈现显著下降趋势,断流期相较于断流前大幅衰减47.1%,恢复期入海水量虽然显著上升($p<0.01$),但大幅增长主要出现在2018—2022年,1999—2022年年均入海水量仍较断流期低23.7%,表明尽管1999年以来黄河干流断流问题得到了有效缓解,但恢复期黄河入海水量变化态势并不稳定。

b. 从影响因素的变化特征看,1956—2022年,除了降水量有所减少,黄河流域潜在蒸散发、经济社会耗水量、NDVI均呈现增加趋势,其中经济社会耗水量和NDVI的增长幅度显著。兰州至龙门和三门峡以下区间是黄河流域经济社会耗水的高值区,2022年耗水量分别占流域总量的40.31%和35.82%。NDVI增长主要得益于退耕还林项目的实施,增长区主要集中在兰州至龙门区间的黄土高原。

c. 从入海水量的演变归因看,与断流前相比,断流期入海水量大幅减少主要受流域经济社会耗水规模扩大、降水量减少以及下垫面变化的共同作用,其中经济社会耗水量增加是流域入海水量减少的主因,贡献率为44.45%。与断流期相比,恢复期各区间径流量变化呈现出显著的空间分异特征,退耕还林等导致的下垫面变化是兰州至龙门区间径流量衰减的主要原因,而降水条件改善则是三门峡以下区间径流量增加的主要原因。整体来看,恢复期黄河入海水量进一步减少的主导因素是下垫面变化,贡献率达100.74%。

参考文献:

[1] 刘晓燕,连煜,可素娟. 黄河河口生态需水分析[J]. 水利学报,2009,40(8):956-961. (LIU Xiaoyan, LIAN Yu, KE Sujuan. Analysis on water demand for ecosystem protection in Yellow River Delta[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8): 956-961. (in Chinese))

[2] 范明元,李福林,仕玉治,等. 黄河下游利津站入海水沙通量时序变化特征识别[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 5-8. (FAN Mingyuan, LI Fulin, SHI Yuzhi, et al. Identification of characteristics of time series changes of water and sand flux at Lijin Hydrological Station in lower

Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 5-8. (in Chinese))

[3] 刘昌明,刘小莽,田巍,等. 黄河流域生态保护和高质量发展亟待解决缺水问题[J]. 人民黄河,2020,42(9): 6-9. (LIU Changming, LIU Xiaomang, TIAN Wei, et al. Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin urgently need to solve the water shortage problem[J]. Yellow River, 2020, 42(9): 6-9. (in Chinese))

[4] 任玲玲,栗云召,于森,等. 1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J]. 农业资源与环境学报,2020,37(4): 493-502. (REN Lingling, LI Yunzhao, YU Miao, et al. Evolution of artificial wetlands in the Yellow River Delta and related driving factors during 1984-2015 [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(4): 493-502. (in Chinese))

[5] 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 Changming, WANG Kaiwen, WANG Guan, 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. (in Chinese))

[6] 郑慧玲,王永红. 1960—2020年黄河、长江、珠江入海水沙通量演变特征[J]. 水土保持通报,2024,44(1): 147-157. (ZHENG Huiling, WANG Yonghong. Evolution characteristics of runoff and sediment fluxes of Yellow River, Yangtze River and Pearl River into sea during 1960-2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 147-157. (in Chinese))

[7] 王忠静,姜俊鹏. 关于黄河“八七”分水方案调整的几点思考[J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 1-5. (WANG Zhongjing, LOU Junpeng. Some thoughts on the adjustment of water resources allocation of “87 Scheme” of Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(8): 1-5. (in Chinese))

[8] 赵勇,何凡,何国华,等. 全域视角下黄河断流再审视与现状缺水识别[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 42-46. (ZHAO Yong, HE Fan, HE Guohua, et al. Review the phenomenon of Yellow River cutoff from a whole perspective and identification of current water shortage [J]. Yellow River, 2020, 42(4): 42-46. (in Chinese))

[9] 李福生,彭少明,李克飞,等. 南水北调西线工程受水区缺水形势研究[J]. 人民黄河,2023,45(5): 19-23. (LI Fusheng, PENG Shaoming, LI Kefei, et al. Study on water shortage situation in receiving area of West Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Yellow River, 2023, 45(5): 19-23. (in Chinese))

[10] 郭巧玲,韩振英,丁斌,等. 窟野河流域径流变化及其影响因素研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 75-80. (GUO Qiaoling, HAN Zhenying, DING Bin, et al. Study of runoff variation characteristics and influence factors in Kuye River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33

- (5):75-80. (in Chinese))
- [11] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(1):1-6. (XIA Jun, MA Xieyi, ZOU Lei, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 1-6. (in Chinese))
- [12] MO Chongxun, LAI Shufeng, YANG Qing, et al. A comprehensive assessment of runoff dynamics in response to climate change and human activities in a typical karst watershed, Southwest China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 332: 117380.
- [13] 王国庆,张建云,管晓祥,等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [14] 彭涛,梅子祎,董晓华,等. 基于 Budyko 假设的汉江流域径流变化归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1114-1124. (PENG Tao, MEI Ziyi, DONG Xiaohua, et al. Attribution of runoff changes in the Hanjiang River Basin based on Budyko hypothesis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1114-1124. (in Chinese))
- [15] NI Yongxin, YU Zhongbo, LYU Xizhi, et al. Spatial difference analysis of the runoff evolution attribution in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128149.
- [16] XU Xiangyu, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe Basin [J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540.
- [17] FU Jianyu, LIU Bingjun, WANG Weriguang, et al. Evaluating main drivers of runoff changes across China from 1956 to 2000 by using different Budyko-based elasticity methods [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 117070.
- [18] 王宣宣,刘欢,胡鹏,等. 基于水量平衡原理和 Budyko 假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 165-172. (WANG Xuanxuan, LIU Huan, HU Peng, et al. Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 165-172. (in Chinese))
- [19] 杨大文,张树磊,徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(10): 1024-1034. (YANG Dawen, ZHANG Shulei, XU Xiangyu. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(10): 1024-1034. (in Chinese))
- [20] 孙莉茹,毕华兴,马志瑾,等. 1951—2020 年黄河上中游径流变化特征及归因分析[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 82-92. (SUN Liru, BI Huaxing, MA Zhijin, et al. Runoff variation characteristics and attribution analysis of the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020 [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 82-92. (in Chinese))
- [21] 杨林,赵广举,穆兴民,等. 基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8421-8429. (YANG Lin, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko hypothesis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8421-8429. (in Chinese))
- [22] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 10-17. (XIE Lingfeng, YANG Xiaoli, WU Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))
- [23] 王国庆,张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))
- [24] 薛联青,王文壮,刘远洪,等. 黄河流域植被总初级生产力对持续性干旱水分亏缺的响应[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 44-51. (XUE Lianqing, WANG Wenzhuang, LIU Yuanhong, et al. Response of gross primary productivity of vegetation to persistent drought-induced water deficit in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 44-51. (in Chinese))
- [25] 许炯心,孙季. 近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 690-695. (XU Jiongxin, SUN Ji. Influence of precipitation and human activities on water fluxes from the Yellow River into the sea in the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 690-695. (in Chinese))
- [26] LU Houliang, ZUO Huimin, ZHOU Han, et al. Variability of long-term terrestrial water storage changes and its environmental effects in the Three Rivers Source Region, China [J]. Journal of Mountain Science, 2025, 22(7): 2439-2457.
- [27] 于海超,张扬,马金珠,等. 1969—2018 年黄河实测径流与天然径流的变化[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 1-7. (YU Haichao, ZHANG Yang, MA Jinzhu, et al. Variation of observed and natural runoff of Yellow River

- from 1969 to 2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 1-7. (in Chinese))
- [28] 黄河断流成因分析及对策研究组. 黄河下游断流及对策研究[J]. 人民黄河, 1997, 19(10): 1-9. (The Research Group. Research of no-flow in the lower Yellow River and corresponding treatments [J]. Yellow River, 1997, 19(10): 1-9. (in Chinese))
- [29] 贾绍凤, 梁媛, 张士锋. 黄河流域天然径流量评价探讨[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 33-38. (JIA Shaofeng, LIANG Yuan, ZHANG Shifeng. Discussion on evaluation of natural runoff in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 33-38. (in Chinese))
- [30] 王芊予, 栗晓玲, 褚江东, 等. 基于 GRACE 数据重建的黄河流域实际蒸散发及其时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 112-121. (WANG Qianyu, SU Xiaoling, CHU Jiangdong, et al. Analysis of actual evapotranspiration and its spatio-temporal evolution characteristics in the Yellow River Basin based on GRACE data reconstruction [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 112-121. (in Chinese))
- [31] 马亚丽, 张芮, 许健, 等. 黄河流域甘肃段潜在蒸散发时空变异规律及驱动因子分析[J]. 节水灌溉, 2021(10): 7-12. (MA Yali, ZHANG Rui, XU Jian, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of potential evapotranspiration in Gansu section of Yellow River Basin [J]. Water Saving Irrigation, 2021(10): 7-12. (in Chinese))
- [32] YANG Hanbo, YANG Dawen, LEI Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): W03410.
- [33] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613. (ZHANG Shulei, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960-2010 [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 605-613. (in Chinese))
- [34] 杨盼, 梁伟, 严建武, 等. 黄河流域多尺度水系统结构变化特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 223-234. (YANG Pan, LIANG Wei, YAN Jianwu, et al. Multi-scale analysis of water system structure changes in the Yellow River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 223-234. (in Chinese))
- [35] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(4): 519-530. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(4): 519-530. (in Chinese))
- [36] 吕美霞, 马柱国, 李明星. 气候变化、植被改变及人类用水与黄河流域水循环的研究进展[J]. 大气科学学报, 2023, 46(6): 801-812. (LYU Meixia, MA Zhuguo, LI Mingxing. A review on the changing water cycle of the Yellow River Basin under changes in climate, vegetation, and human water use [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(6): 801-812. (in Chinese))
- [37] 吴思源, 郝利娜. 2001—2021 年黄河流域植被覆盖变化及其驱动因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(8): 1373-1384. (WU Siyuan, HAO Lina. Changes in vegetation cover and driving factors in the Yellow River Basin from 2001 to 2021 [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(8): 1373-1384. (in Chinese))
- [38] 赵勇, 王浩, 邓铭江, 等. 黄河几字弯水网: 南水北调西线配套东延工程构想[J]. 水利学报, 2023, 54(9): 1015-1024. (ZHAO Yong, WANG Hao, DENG Mingjiang, et al. Jiziwan water network in the Yellow River Basin: conceptualizing the east extension project of the west route of the South-to-North Water Diversion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(9): 1015-1024. (in Chinese))
- [39] CHEN Yiping, WANG Kaibo, FU Bojie, et al. 65% cover is the sustainable vegetation threshold on the Loess Plateau [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2024, 22: 100442.
- [40] LAN Yongchao, ZHAO Guohui, ZHANG Yaonan, et al. Response of runoff in the headwater region of the Yellow River to climate change and its sensitivity analysis [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(6): 848-860.
- [41] 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 Changming. Study of some problems in water cycle changes of the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 608-614. (in Chinese))
- [42] 江善虎, 任明明, 章二子, 等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51(2): 1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 1-7. (in Chinese))
- [43] HOU Bingfei, JIANG Chao, SUN O J. Differential changes in precipitation and runoff discharge during 1958-2017 in the headwater region of Yellow River of China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(9): 1401-1418.
- [44] 张一然, 周德刚, 郭晓峰. 变暖背景下黄河源区气候响应特征及对径流的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(3): 862-873. (ZHANG Yiran, ZHOU Degang, GUO Xiaofeng. Regional climate response to global warming in the source region of the Yellow River and its impact on runoff [J]. Scientia Sinica Terrae, 2024, 54(3): 862-873. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-02-26 编辑: 施业)