

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0069

吴昌贤,薄岩,黄微尘,等.黄河干流生态流量赤字及其成因[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):08-16. WU C X, BO Y, HUANG W C, et al. Ecological flow requirement deficit of the Yellow River and its key drivers[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 08-16. (in Chinese)

黄河干流生态流量赤字及其成因

吴昌贤^{1,2},薄岩^{1,2},黄微尘^{1,2},周丰^{1,2}

(1. 北京大学 城市与环境学院,北京 100871; 2. 北京大学 地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

摘要:为准确核算和评估黄河生态流量,以黄河干流吉迈、唐乃亥、贵德、兰州、石嘴山、龙门、花园口和利津为研究对象,运用6种水文学方法分析生态流量过程,评估1956—2013年各断面生态流量赤字及其成因。研究表明:生态流量核算对方法选择较为敏感,其中Q90_Q50法的计算结果远高于其他5种方法;黄河干流8个断面的生态流量为(47±9)、(273±59)、(273±53)、(456±103)、(433±94)、(473±124)、(639±172)和(727±160) m³/s,占天然径流量的36%~43%,其中5—11月占全年生态流量的70%~77%;在过去近60年,1985—2003年是黄河干流存在生态流量赤字最为严重的时期,吉迈、唐乃亥、贵德和兰州断面的生态流量赤字主要发生在枯水期,而石嘴山、龙门和花园口断面主要发生在丰水期,利津断面集中在上半年;人类耗水是造成生态流量赤字的最重要的原因,其次为气候变化。未来要加强用不同方法全面评估黄河干流、支流的生态流量,推动“精准”节水,完善水量调度方案,最大程度地减少生态流量赤字风险。

关键词:生态流量;水文学法;生态流量赤字;人类耗水;气候变化;黄河

中图分类号:TV213.4;X143 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Ecological flow requirement deficit of the Yellow River and its key drivers

WU Changxian^{1,2}, BO Yan^{1,2}, HUANG Weichen^{1,2}, ZHOU Feng^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Laboratory for Earth Surface Process, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To accurately calculate and evaluate the ecological flow of the Yellow River, six hydrological methods are used to analyze the process of ecological flow and the ecological flow deficit and its causes of formation from 1956 to 2013 in Jimai, Tangnaihai, Guide, Lanzhou, Shizuishan, Longmen, Huayuankou, and Lijin stations. The results show that: the ecological flow accounting is more sensitive to method selection, among which the results of the Q90_Q50 method are much higher compared to the other five methods; the ecological flow of 8 sections of the Yellow River is (47±9), (273±59), (273±53), (456±103), (433±94), (473±124), (639±172) and (727±160) m³/s, accounting for 36%~43% of the natural runoff, of which May to November accounts for 70%~77% of the annual ecological flow; in the past 60 years, the most serious period of ecological flow deficit is from 1985 to 2003 in the mainstream of the Yellow River. The ecological flow deficit in Jimai, Tangnaihai, Guide, and Lanzhou sections mainly occurs in the dry season, while in Shizuishan, Longmen and Huayuankou sections mainly occur in the wet season, and Lijin section concentrated in the first half of the year; human water consumption is the most important cause of ecological flow deficit, followed by climate change. In the future, it is necessary to comprehensively assess the ecological flow of

收稿日期:2020-03-31 修回日期:2020-05-19 网络出版时间:2020-05-26

网络出版地址:https://kns.cnki.net/KCMS/detail/13.1430.TV.20200526.1136.002.html

基金项目:国家自然科学基金(41977082);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41561134016)

作者简介:吴昌贤(1998—),女,浙江杭州人,主要从事水循环过程与全球变化研究。E-mail:wuchangxian@pku.edu.cn

通信作者:周丰(1981—),男,湖南岳阳人,副教授,博士生导师,主要从事全球生物地球化学循环研究。E-mail:zhouf@pku.edu.cn

the mainstream and tributaries of the Yellow River with different methods, promote "accurate" water conservation, improve water regulation schemes, and minimize the risk of ecological flow deficit.

Key words: ecological flow requirement; hydrological method; environmental flow requirement deficit; human water consumption; climate change; Yellow River

黄河是我国西北和华北地区的重要水源,以仅占全国 2.6% 的水资源量承担着全国 15% 的耕地和 12% 的人口的供水,同时还承担着向流域外调水的任务^[1-2]。黄河流域人均水资源量 905 m³,仅为全国人均水平的 1/3,是我国水资源极度短缺的地区之一^[3]。2019 年 9 月 18 日,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调,保护黄河是事关中华民族伟大复兴的千秋大计。黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略之一。随着经济社会发展,黄河上游地区水资源开发利用进程加快,随之产生的生态环境问题正在日益恶化。黄河中游地区水土保持工程效果明显,河流径流量下降形成的缺水风险正呈加剧的态势。水沙连年减少造成下游滩区、黄河三角洲湿地与河口萎缩等成为亟待解决的重大问题。在气候变化与人类无序用水的影响下,黄河的水文过程发生了剧烈变化,出现了罕见的干流断流,丧失了水资源可再生性,直接或间接影响了流域生态环境健康和社会经济发展^[4]。保障黄河生态流量是流域生态保护修复和高质量发展的重要基础^[5]。

生态流量核算是当前生态水文研究的热点之一^[6-10],国内外学者针对不同类型水体提出多种生态流量核算方法。据不完全统计,目前河流生态流量计算方法超过 200 种,大致可分为水文学方法^[11-12]、水力学方法^[13]、水文—生物分析法^[14]、生境模拟法^[15-16]以及综合评价法^[12,17]等 5 大类。Smakhtin 等^[18]首次评估了全球主要流域生态流量及水胁迫指数,认为黄河流域生态流量需要占到多年平均天然流量的 31%,才能满足赖以生存的淡水生态系统需求,但当前实际径流量难以保证,造成“环境缺水”。Pastor 等^[19]利用 5 种水文学方法进行核算,同样认为该比例约为 30%。从区域尺度来看,郝伏勤等^[20]利用一维水质模型和历史流量法计算了黄河干流沿线的生态流量,得出石嘴山、龙门、花园口和利津断面的适宜流量分别为 360、580、480 和 300 m³/s。许拯民等^[21]进一步细化河道生态流量,包括水生生境最小需水量、河道渗流需水量和河道蒸发需水量,得到黄河宁夏段下河沿站和青铜峡站适宜生态流量占比分别为 30.5%~32.5% 和

22.5%~30.0%。在此基础上,王高旭等^[22]以河流水体存在、水生生物完整性以及河流系统的水沙平衡为保护目标,分别计算河道最小生态流量、适宜生态流量和洪水期生态流量,将不同生态流量耦合时间特征计算了全过程的生态需水。在其他流域,李紫妍等^[23]运用 RVA、Q90 法和多年日流量资料排频法计算汉江流域子午河生态流量发现:60% 保证率对应的年生态需水量最大,可以达到较高的生态环境保护目标;Q90 法对应的年生态需水量最小,对应最低的生态环境保护目标。水艳等^[24]利用湿周法计算淮河流域生态流量,发现大部分情况下湿周法的计算成果较 Tennant 法和栖息地模拟法成果偏小。然而,目前大多数研究仅考虑单个生态流量核算方法,缺乏多方法集合研究。此外,目前大部分研究针对河流提出一个固定的生态流量值(或者分为汛期和非汛期),没有考虑各月生态流量的变化和误差,难以有效评估河流生态流量的赤字或盈余水平和识别其关键成因。

基于此,本文以黄河干流为研究对象,选取常用的 6 种水文学方法,核算黄河干流沿线 8 个主要断面(上游河段的吉迈、唐乃亥、贵德、兰州、石嘴山,中游河段的龙门,下游河段的花园口和利津)的月尺度生态流量(图 1),评估 1956—2013 年各断面生态流量赤字情况(包括季节性和年际变化),量化评估人类耗水量、气候变化和其他因素(包括土地利用、分洪、引水、库蓄变化)等 3 个方面对黄河干流生态流量赤字或盈余变化的影响,为未来推动黄河流域水生态保护和水量调度提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河自西向东流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等 9 省(区),横跨中国青藏高原、内蒙古高原、黄土高原、华北平原,以及干旱、半干旱、半湿润区,在山东省垦利县注入渤海。干流全长 5 464 km,水面落差 4 480 m,流域面积 79.5 万 km²(含内流区面积 4.2 万 km²)。黄河流域水资源的地区分布很不均匀,由南向北呈递减趋势。大致西起吉迈,过积石山,到大夏河、洮河,沿渭

河干流至汾河与沁河的分水岭一线以南,主要是山地,植被较好,年径流深 100 mm 以上,是黄河流域水资源较丰沛的地区。流域北部,经皋兰、海原、同心、定边到包头一线以北,年径流深在 10 mm 以下,是黄河流域水资源最贫乏的地区。在以上两条线之间的广大黄土高原地区,年径流深只有 25~50 mm,是黄河泥沙的主要来源区。因受季风影响,黄河流域河川径流的季节性变化很大,夏秋河水暴涨,容易泛滥成灾,冬春水量很少,容易水源匮乏^[25]。其中,黄河汛期径流量占全年径流量的 60% 左右。黄河流域水资源年际变化也很悬殊,花园口站多年平均天然年径流量 580 亿 m³,最大年径流可达 938.66 亿 m³(1964 年 7 月—1965 年 6 月),最小年径流仅 273.52 亿 m³(1928 年 7 月—1929 年 6 月),最大与最小年径流的比值为 3.4。



图 1 黄河流域及主要研究站分布

Fig. 1 Distribution of Yellow River basin and main research stations

1.2 生态流量核算方法

本文选择 6 种水文学方法包括 Tennant 法^[26]、Tessmann 法^[27-28]、VMF 法^[29]、逐月最小生态径流法^[30]、频率曲线法^[31-32]和 Q90_Q50 法^[33]。水文学方法原理简单,计算快速,是目前世界上应用数量最多的一类,主要是依托 30 年以上的天然径流数据来确定生态需水。Tennant 法由美国学者和美国渔业野生动物协会于 1976 年共同开发,依据观测资料建立流量和河流生态环境状况之间的经验关系确定年内不同时间段的生态环境需水量;Tessmann 法将全年分为高流量月份、中流量月份和低流量月份分别计算;VMF 法基于 Tessmann 法和 Hoekstra 法^[34-35]确定生态流量;逐月最小生态径流法是在尽可能多的月径流序列中选择最小者作为该月份的最小生态流量,并组成年内最小生态流量过程;频率曲线法是用长系列水文资料的月平均流量的历史资料构建各月水文频率曲线,将 95% 频率相应的月平均流量作为对应月份的生态流量,组成年内不同时段值;Q90_Q50 法将全年分为高流量和低流量季节并基

于水文自然频率确定生态流量。其中,Tessmann 法和 VMF 法多用于全球生态流量核定^[36]。本文选取 1956—2000 年天然径流量估算黄河干流生态流量,除逐月最小生态径流法和频率曲线法之外的 4 种估算方法如下。

Tennant 法:

$$EFR = \begin{cases} 0.2 \times MAR & MMF \leq MAF \\ 0.4 \times MAR & MMF > MAF \end{cases} \quad (1)$$

Tessmann 法:

$$EFR = \begin{cases} MMF & MMF \leq 0.4 \times MAF \\ 0.4 \times MAF & 0.4 \times MAF < MMF \leq MAF \\ 0.4 \times MMF & MMF > MAF \end{cases} \quad (2)$$

VMF 法:

$$EFR = \begin{cases} 0.6 \times MMF & MMF \leq 0.4 \times MAF \\ 0.45 \times MMF & 0.4 \times MAF < MMF \leq 0.8 \times MAF \\ 0.3 \times MMF & MMF > 0.8 \times MAF \end{cases} \quad (3)$$

Q90_Q50 法:

$$EFR = \begin{cases} Q_{90} & MMF \leq MAF \\ Q_{50} & MMF > MAF \end{cases} \quad (4)$$

式中:EFR 为生态流量,m³/s;MMF 为月均天然流量,m³/s;MAF 为年均天然流量,m³/s。

1.3 生态流量盈余/赤字及其变化成因分析

根据 Jagermeyr 等^[37]提出的方法,黄河干流生态流量盈余或赤字可表示为

$$\Delta Q(i) = Q_c(i) - EFR(i) \quad (5)$$

$$\Delta Q = \sum_i \Delta Q(i) \quad (6)$$

式中: $\Delta Q(i)$ 是某月 i 的生态流量盈余或赤字,m³/s; ΔQ 为全年生态流量盈余或赤字,m³/s; $Q_c(i)$ 为断面实测月流量,m³/s; $EFR(i)$ 为生态流量,m³/s。 $\Delta Q(i) < 0$ 或 $\Delta Q < 0$,表明生态流量被挤占,存在赤字;反之,则表明生态流量存在盈余。生态流量盈余/赤字变化的因素包括气候变化、人类耗水量和其他因素(包括土地利用变化、引水、分洪和库蓄变化)^[38-39]。根据水文还原的原理,可以分解以上 3 方面因素对径流变化的影响,因此反映其对生态流量盈余/赤字变化的影响,具体计算公式为

$$\Delta C(i) = Q_n(i) - \bar{Q}_n(i) \quad (7)$$

$$\Delta H(i) = - \sum_j WC(i, j) \quad (8)$$

$$\Delta O(i) = Q_c(i) + \Delta H(i) - Q_n(i) \quad (9)$$

式中: $\Delta C(i)$ 、 $\Delta H(i)$ 和 $\Delta O(i)$ 分别为气候变化、人类耗水量和其他因素的影响; $Q_n(i)$ 和 $\bar{Q}_n(i)$ 分别为当年和多年平均天然流量; $WC(i, j)$ 为断面 i 对应的流域范围内部门 j 的人类耗水量,包括灌溉耗水、

工业耗水和生活耗水。由于人类耗水量数据为年尺度,因此,成分分析也为年尺度。

1.4 主要数据

本文涉及黄河干流 8 个断面 1956—2013 年逐月的天然径流量、实测径流量和人类耗水量 3 部分数据。1956—2000 年逐月天然径流量来自于第一和第二次水资源调查评价成果^[40],2000 年之后则根据水文还原原理进行计算。1956—2013 年逐月实测流量来自于《黄河流域水文年鉴》。黄河流域 1956—2013 年地级市人类耗水数据来自于 Zhou 等^[41]建立的中国高分辨率用水调查数据集。本文根据人口、灌溉用地、建设用地分布以及行政单元与三级流域之间的关系确定各站点人类耗水量。

2 结果与分析

2.1 黄河干流生态流量时空特征

图 2 展示了基于 6 种水文学方法估算的黄河干流 8 个站点逐月生态流量。首先,方法间估算

的生态流量差异较大,8 个站点各自最大值和最小值的比例在 1.9~3.0 倍。其次,Q90_Q50 法计算结果最大,除了龙门站点之外,该方法的估计结果在丰水期远大于其他 5 种方法,因为该方法在丰水期采用 50% 频率相应的月平均流量作为生态流量使得河流生态状况近似于天然条件。Pastor 等^[19]在评估全球生态流量时也发现 Q90_Q50 法得出的结果相较其他 4 种方法大。除花园口站以外,Tennant 法计算的年生态流量低于其他方法。另外,6 种水文学法均能反映各个站点天然流量的季节性特征。其中,Tessman 法和 VMF 法与天然流量季节变化最为一致,Q90_Q50 法计算的生态流量在枯水期和丰水期的差异最大,Tennant 法计算结果在枯水期和丰水期的差异最小。因此,有必要综合多种水文学方法来估算生态流量。在以下研究中,本文选择了除 Q90_Q50 法之外的 5 种方法的平均值、区间范围来估算和分析黄河干流生态流量。

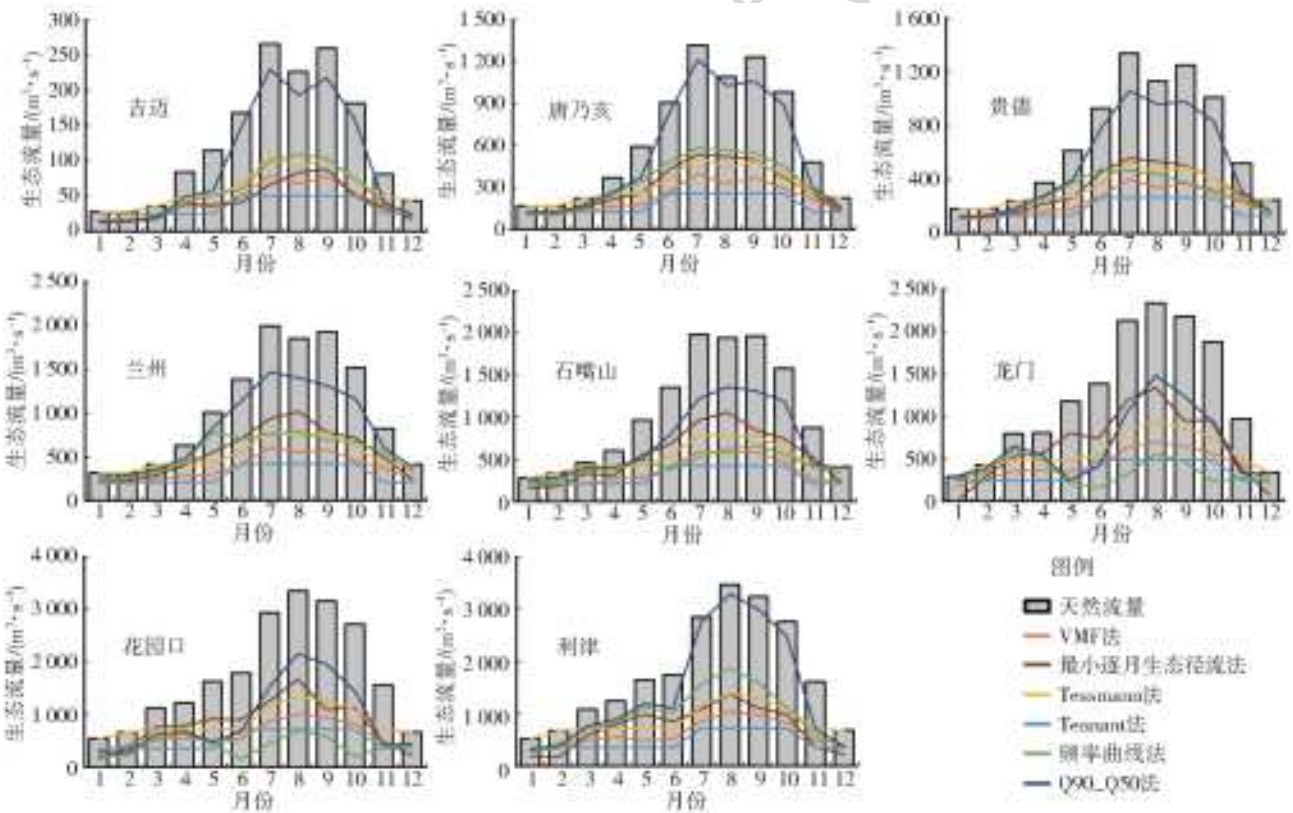


图 2 基于不同水文学方法的黄河干流 8 个站点生态流量的季节特征

Fig. 2 Seasonal characteristics of ecological flow at eight stations of the main stream of the Yellow River based on different hydrological methods

黄河干流生态流量沿程增加,8 个站点自上而下的年平均生态流量分别为 (47 ± 9) 、 (273 ± 59) 、 (273 ± 53) 、 (456 ± 103) 、 (433 ± 94) 、 (473 ± 124) 、 (639 ± 172) 和 (727 ± 160) m^3/s ,占年均天然径流量

的 36%~43%(表 1)。黄河干流生态流量存在明显季节特征,7 月或 8 月生态流量达到最高,是年均生态流量的 1.6~1.8 倍。在天然流量较高的 5—11 月,各站点生态流量占对应期间天然流量的

29%~50%;在天然流量较低的 12 月一次年 4 月,各 枯水期生态流量占天然流量的比例较高,会对河道
 站点生态流量占天然流量的 46%~75%。总体上, 外其他用水需求构成限制。

表 1 黄河干流生态流量沿程变化
 Tab. 1 Ecological flow changes along the main stream of the Yellow River

站点	类型	全年	月份											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
吉迈	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	47±9	19±6	20±6	24±6	39±8	40±10	54±9	81±21	80±20	85±20	61±11	37±8	27±9
	比例/%	37.3	68.5	69.4	66.9	46.0	34.8	32.1	30.3	35.6	32.7	33.3	45.9	62.3
唐乃亥	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	273±59	127±23	127±23	162±33	205±49	234±74	360±88	461±119	423±115	434±106	355±70	228±53	155±37
	比例/%	42.1	74.7	75.0	73.0	55.0	39.3	39.9	34.9	38.7	35.2	36.2	47.3	68.1
贵德	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	273±53	132±28	139±25	173±38	214±54	245±83	371±87	446±105	407±94	406±89	340±55	237±54	163±44
	比例/%	40.7	71.3	74.7	71.9	56.5	39.8	39.9	33.4	36.0	32.5	33.7	45.4	65.2
兰州	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	456±103	234±45	241±44	300±72	349±87	454±202	560±128	704±178	705±204	647±134	575±118	412±119	291±75
	比例/%	43.4	73.3	75.4	71.9	55.5	45.1	40.4	35.3	38.0	33.6	37.9	49.9	69.7
石嘴山	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	433±94	209±42	236±56	309±86	314±73	395±127	488±112	659±193	694±215	662±149	567±114	367±115	290±78
	比例/%	40.7	74.1	69.9	67.2	52.1	41.0	36.0	33.3	35.8	33.8	35.9	42.0	69.7
龙门	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	473±124	196±104	311±68	447±129	432±114	422±215	474±190	699±305	806±307	688±194	601±244	365±95	234±91
	比例/%	38.5	66.9	72.2	56.0	53.4	35.8	34.2	32.8	34.5	31.6	32.0	37.4	68.3
花园口	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	639±172	320±134	400±146	578±146	610±149	584±204	604±249	896±297	1085±376	918±249	788±335	474±128	415±144
	比例/%	35.9	58.8	59.9	51.6	49.8	35.8	33.8	30.6	32.4	29.1	29.0	30.3	62.2
利津	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	727±160	331±110	391±165	573±135	652±174	738±289	696±235	1073±290	1278±386	1136±295	951±156	501±136	406±153
	比例/%	40.5	63.7	57.6	52.5	52.5	44.8	40.0	37.6	36.8	35.1	34.4	31.0	59.2

本文基于多方法估算的黄河干流生态流量占天然流量的比例与我国 2014 年颁布的《河湖生态环境需水计算规范》(SL/Z 712—2014)^[42]和 2012 年国务院批复的《黄河流域综合规划(2012—2030)》^[43]比较接近,其中前者为 40%~50%,后者为 39%,同时,本文结果与密西西比河和莱茵河的生态流量占天然流量的比例相当^[18],但高于其他的研究结果。例如,唐蕴等^[44]基于河流形状计算花园口站和利津站生态流量仅占天然流量的比例的 8.9%和 7.9%。

2.2 黄河干流生态流量赤字情况

从过去 58 年结果(图 3)来看,黄河干流各个站点均存在生态流量赤字,且从上游到下游逐渐增加。黄河上游的吉迈、唐乃亥、贵德和兰州站生态流量赤字主要发生在枯水期(10 月一次年 3 月)。在此期间,上游 4 个站点月生态流量赤字平均值分别达到 0.02 亿、0.02 亿、0.06 亿和 0.01 亿 m^3 ,占实际月径流量的 3%、0.4%、0.5%和 0.04%。相反,石嘴山、龙门和花园口站生态流量赤字发生在丰水期,主要为 5—7 月,对应的月生态流量赤字平均值分别达到 0.2 亿、2.3 亿和 1.5 亿 m^3 ,占实际月径流量的 1%、17%和 6%。与上述站点不同的是,利津站月生态流

量赤字最为严重,1 月最小为 1.1 亿 m^3 ,5 月最大达到 11.3 亿 m^3 ;该断面的生态流量赤字占实际月径流量的比例高值集中在上半年,从 1 月的 9%增长到 5 月的 97%和 6 月的 90%;随后该比例下降到 5%~22%。

从年际变化来看,黄河干流生态流量赤字可分为 3 个阶段(图 3)。1985 之前,生态流量赤字较少发生,上游 5 个站点平均年生态流量赤字仅为 0.2 亿 m^3 ,下游利津站平均年生态流量赤字为 33.0 亿 m^3 ,占实测流量的比例为 15%。1985—2003 年,虽然 1987 年国务院批准了《黄河可供水量分配方案》^[45],但是赤字最为严重。除兰州站外,其他站点的最大年生态流量赤字均较前一阶段有显著增加,上游 5 个站点最大年生态流量赤字为 10.4 亿 m^3 ,下游利津站最大年生态流量赤字为 212 亿 m^3 。2003 年之后,黄河流域实施了在 1998 年颁布的《黄河可供水量年度分配及干流水量调度方案》^[46-47],黄河干流沿程生态流量赤字情况得到有效缓解,黄河上游 5 个站点几乎不发生生态流量赤字,花园口站和利津站生态流量赤字占实际流量的比例迅速下降到 2%和 37%左右。龙门站赤字占实际流量比例下降趋势较缓。不同站点出现生态流量赤字时间不同,与黄河干流各河段大规模开发利用的时间和程度不同有关。

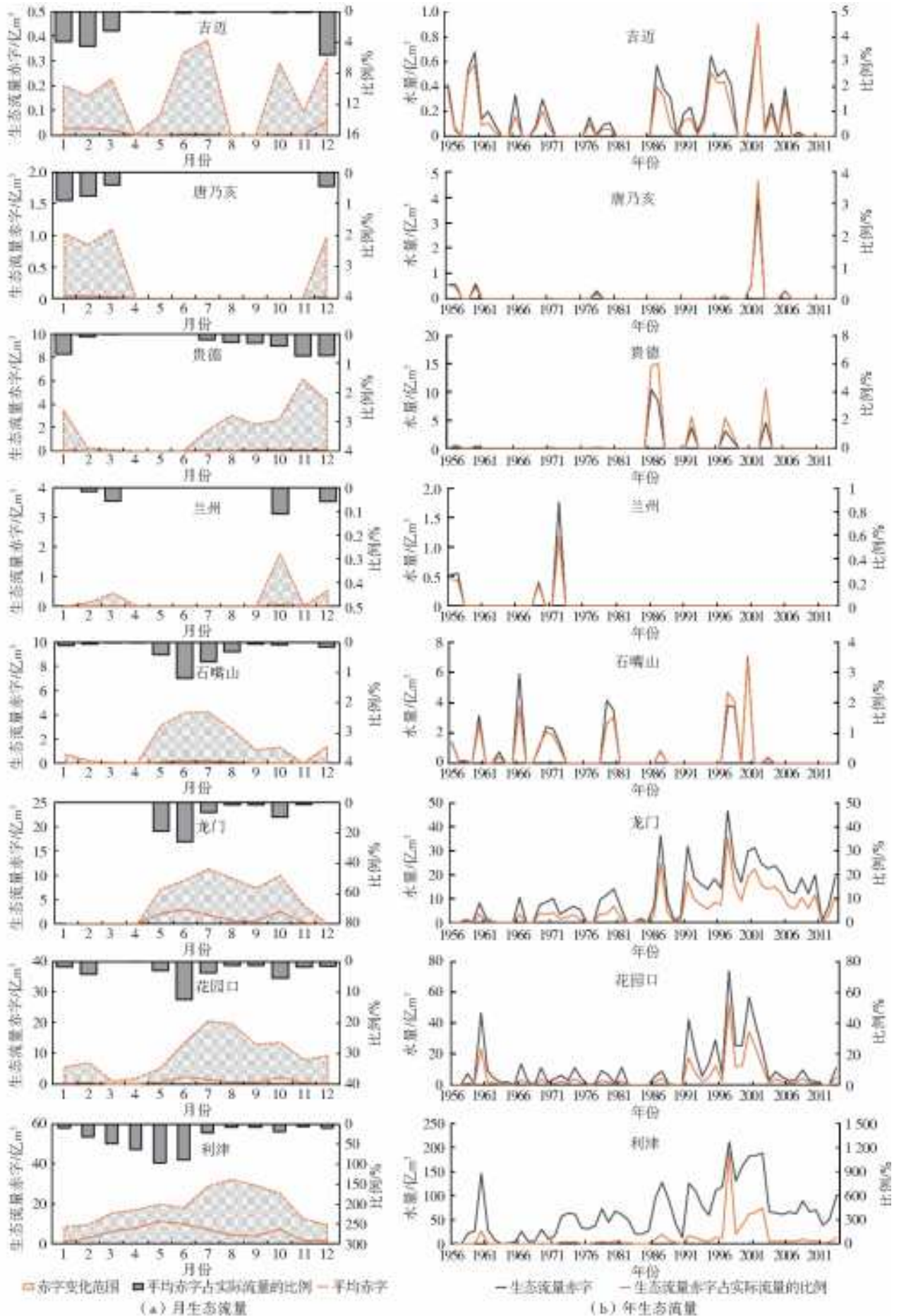


图 3 黄河干流生态流量赤字时间规律

Fig. 3 Temporal dynamics of ecological flow deficit in the main stream of the Yellow River

黄河干流生态流量赤字比国内一些重要河流严重。比如,滦河流域 1980—2000 年平均生态流量保证率为 92.6%,1998—2011 年平均生态流量保证率为 67.6%^[48]。淮河流域鲁台子站 1956—2010 年汛期适宜生态流量保证率为 100%,非汛期生态流量保证率为 73%^[49]。同时,黄河干流生态流量赤字也比国外一些河流严重,例如恒河的生态流量赤字占实测流量的比例低于黄河,为 10%左右^[37]。

2.3 黄河干流生态流量赤字的成因

本文识别了生态流量赤字严重的中下游 3 个站点(龙门、花园口和利津)的主要成因。由图 4 可得,人类耗水量对生态流量赤字的影响最大,是造成赤字的主导因素。1956—2000 年,黄河干流人类总耗水量总体呈上升趋势,且增加幅度沿程升高。龙门站、花园口站和利津站的人类耗水量由 1956 年的 57.7 亿、80.9 亿和 86.9 亿 m³ 增长至 2000 年的 162 亿、228 亿和 255 亿 m³,增速分别为 2.0 亿 m³/a ($n=58; r=0.97; P<0.001$)、3.0 亿 m³/a ($n=58; r=0.99; P<0.001$) 和 3.6 亿 m³/a ($n=58; r=0.98; P<0.001$)。黄河不同河段(区间)受人类耗水和其他因素影响的强度不一致,导致其生态流量

赤字变化规律也有所不同。

从年际变化来看,1985 年以前龙门和花园口较少出现生态流量赤字,但逐年增加的人类耗水使生态流量盈余被大大削减,甚至抵消了气候变化带来作用。20 世纪 80 年代中期至 20 世纪末,人类耗水对生态流量赤字的贡献进一步变大,气候变化加剧了生态流量赤字。21 世纪以来,黄河流域降水略呈增加趋势,气候变得湿润,天然径流量升高^[38],气候因素对生态流量赤字的影响逐渐变弱,龙门站和花园口站气候因素对生态流量赤字的影响由正向作用转变为负向作用;人类耗水量在实施一系列水量调度管理方案之后趋于稳定甚至略微下降,因此黄河干流生态流量赤字逐渐变小。在以上阶段,土地利用、引水、分洪和库蓄变化对黄河干流生态流量赤字的影响较小,只是在利津断面表现为促进了生态流量赤字。本研究认识与以往研究较为一致,例如:王国庆等^[50]采用水文模拟途径评估得到人类活动是黄河径流量减少的主要原因;王雁林等^[51]认为人类活动是黄河河川基流量中最活跃的因子,流量衰减最明显的地区也是人类活动频繁的地区。

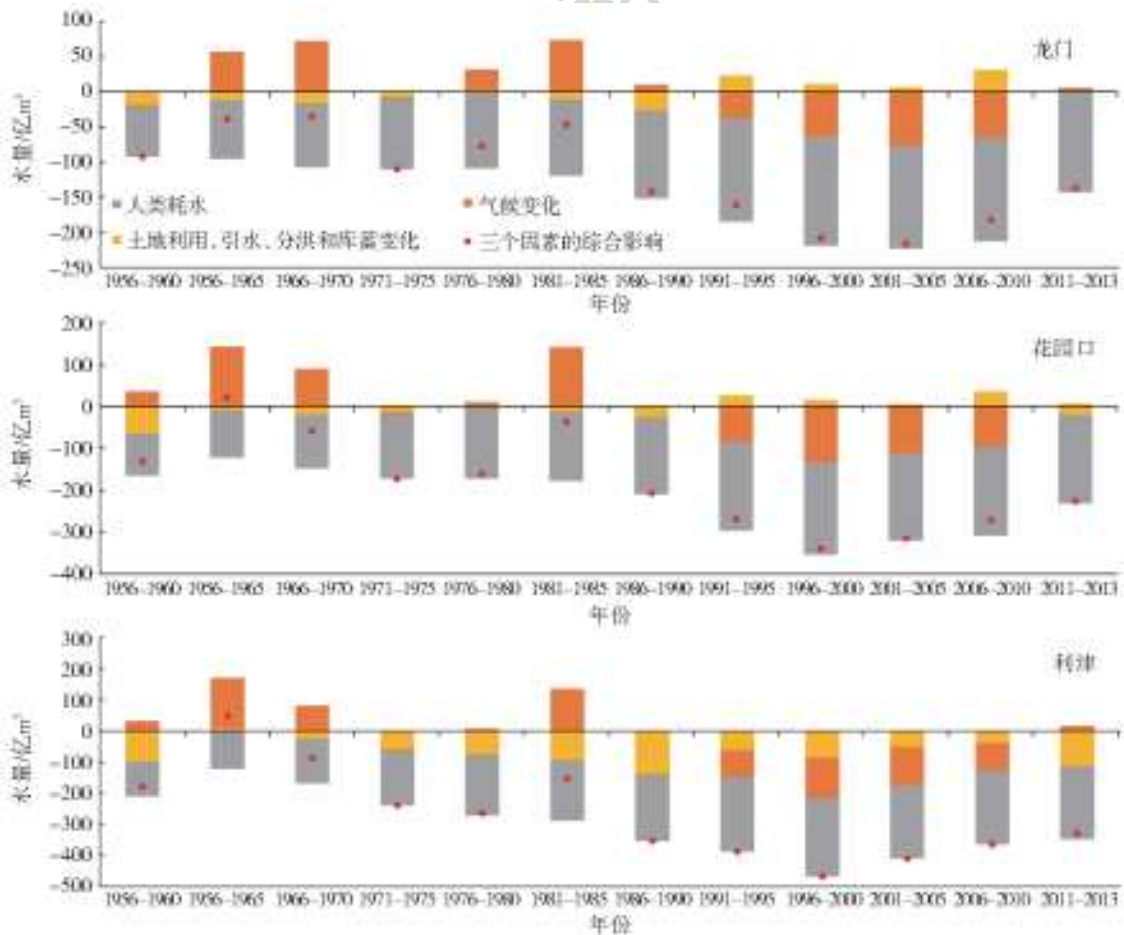


图 4 黄河干流生态流量赤字成因分析

Fig. 4 Key drivers of ecological flow deficit along the main stream of the Yellow River

3 结论与展望

(1)黄河干流上游河段的吉迈、唐乃亥、贵德、兰州、石嘴山,中游河段的龙门,下游河段的花园口和利津断面的生态流量为 (47 ± 9) 、 (273 ± 59) 、 (273 ± 53) 、 (456 ± 103) 、 (433 ± 94) 、 (473 ± 124) 、 (639 ± 172) 和 (727 ± 160) m^3/s ,占天然径流量的36%~43%,其中5—11月占全年生态流量的70%~77%。

(2)黄河干流存在生态流量赤字,且从上游到下游逐渐增加。吉迈、唐乃亥、贵德和兰州断面的生态流量赤字主要发生在枯水期,而石嘴山、龙门和花园口断面主要发生在丰水期,利津断面集中在上半年。在过去近60年期间,1985—2003年是黄河干流存在生态流量赤字最为严重的时期。

(3)人类耗水是造成生态流量赤字的最重要的原因,其次为气候变化。因此,为了保障黄河生态流量,有必要推动“精准”节水,最大限度减少人类耗水,比如从节水优先向兼顾区域性用水总量控制转变,从田块、企业的个体节水向“田一沟一塘”和企业群的“大循环利用”转变,加速黄河流域经济增长与用水的脱钩,减少生态流量赤字风险。另外,加强黄河流域生态流量的实时监测、预警和改善提升,实现黄河流域生态流量精细化管控。

参考文献:

[1] 李民东. 黄河水资源统一调度管理研究与实践[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[2] 蒋晓辉, 王洪铸. 黄河干流水生态系统结构特征沿程变化及其健康评价[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 991-998. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.08.004.

[3] 王煜, 彭少明, 武见, 等. 黄河“八七”分水方案实施30年回顾与展望[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 6-13, 9. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.09.002.

[4] 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 11-15. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.10.003.

[5] 王金南. 黄河流域生态保护和高质量发展战略思考[J]. 环境保护, 2020, 48(Z1): 18-21. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.z1.003.

[6] BOVEE K D, LAMB B L, BARTHOLOW J M, et al. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology[R]. U. S. Geological Survey 1998-0004, 1998.

[7] FLORENTIN B, ABT S, WATSON C, et al. Environmental impact research program. Low-flow aquatic habitat restoration evaluation, the RCHARC methodology, Goose Creek, Colorado[R]. Technical Report EL-97-1, 1997.

[8] POFF N L, MATTHEWS J H. Environmental flows in the anthropocene: past progress and future prospects [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6): 667-675.

[9] JOWETT I G. Instream flow methods: A comparison of approaches[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1997, 13(2): 115-127.

[10] NESTLER J, LATKA D, SCHNEIDER T. Using RCHARC to evaluate large river restoration alternatives[J]. Engineering Approaches to Ecosystem Restoration, 2020, 823-828. DOI: 10.1061/40382(1998)140.

[11] ND G, FINLAYSON B, GIPPEL C, et al. Stream hydrology: An introduction for ecologists[M]. Wiley, 1994.

[12] ARTHINGTON A H, RALL J L, KENNARD M J, et al. Environmental flow requirements of fish in Lesotho rivers using the DRIFT methodology[J]. River Research and Applications, 2003, 19(5-6): 641-666.

[13] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1998, 14(1): 53-67.

[14] PETERS M R, ABT S R, WATSON C C, et al. Assessment of restored riverine habitat using RCHARC [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1995(31): 745-752.

[15] BOVEE K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. IFIP No. 12[R]. U. S. Fish Wildlife, Service 82/26, 1982.

[16] STALNAKER C, LAMB B, HENRIKSEN J, et al. The instream flow incremental methodology: A primer for IFIM[J]. Biol Sci Rep, 1995(29): 53.

[17] POFF N, RICHTER B, ARTHINGTON A, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards[J]. Freshwater Biology, 2010(55): 147-170.

[18] SMAKHTIN V, REVENGA C, DÖLL P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity[J]. Water International, 2004, 29(3): 307-317.

[19] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2013, 10(12): 14987-5032.

[20] 郝伏勤, 黄锦辉, 高传德, 等. 黄河干流生态与环境需水量研究综述[J]. 水利水电技术, 2006, 37. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2006.02.013.

[21] 许拯民, 韩宇平, 王培燕. 黄河宁夏段河道基本生态环境需水量研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(5): 74-76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.05.031.

[22] 王高旭, 陈敏建, 丰华丽, 等. 黄河中下游河道生态需

- 水研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(5): 125-130. DOI:10.3321/j.issn:0529-6579. 2009. 05. 025.
- [23] 李紫妍, 刘登峰, 黄强, 等. 基于多种水文学方法的汉江子午河生态流量研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634. 2017. 01. 002.
- [24] 水艳, 刘建, 娄云. 湿周法计算淮河流域主要河流断面生态流量[J]. 治淮, 2017(11): 35-36. DOI:10.3969/j.issn.1001-9243. 2017. 11. 020.
- [25] 张学成, 王玲. 黄河天然径流量变化分析[J]. 水文, 2001, 21(5): 30-33. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852. 2001. 05. 008.
- [26] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [27] GAUPP F, HALL J, DADSON S. The role of storage capacity in coping with intra- and inter-annual water variability in large river basins[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(12): 125001. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125001.
- [28] TESSMANN S A. Environmental use sector reconnaissance elements of the western dakotas region of south dakota study[R]. Environmental Assessment, Technical Appendix E, 1980.
- [29] SHADKAM S, LUDWIG F, VAN VLIET M T H, et al. Preserving the world second largest hypersaline lake under future irrigation and climate change[J]. Sci Total Environ, 2016(559): 317-325. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2016. 03. 190. .
- [30] 于龙娟, 夏自强, 杜晓舜. 最小生态径流的内涵及计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004(1): 18-22. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980. 2004. 01. 005.
- [31] 陈江, 段明, 吴培军, 等. 不同时间尺度的鄱阳湖生态水位研究[J]. 江西水利科技, 2018, 44(3): 160-163. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701. 2018. 03. 02.
- [32] 汪秀丽. 河流生态流量浅论[J]. 水利电力科技, 2007, 33(1): 20-9.
- [33] ALLAIN M, EL-JABI N. Hydrological approach to in-stream flow evaluation : A sensitivity analysis [Z]. Proceedings, Annual Conference-Canadian Society for Civil Engineering, 2002.
- [34] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M, CHAPAGAIN A K, et al. Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability [J]. PLOS ONE, 2012, 7(2): e32688.
- [35] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(9): 3232.
- [36] 葛金山, 彭文启, 张汶海, 等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法: 以沙颍河周口段为例[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 75-80. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq. 2019. 0036.
- [37] JAGERMEYER J, PASTOR A, BIEMANS H, et al. Reconciling irrigated food production with environmental flows for sustainable development goals implementation [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 15900. DOI: 10.1038/ncomms15900.
- [38] XI Y, PENG S, CIAIS P, et al. Contributions of climate change, CO₂, land-use change, and human activities to changes in river flow across 10 Chinese basins [J]. Journal of Hydrometeorology, 2018, 19(11): 1899-1914. DOI: 10.1175/JHM-D-18-0005. 1.
- [39] 胡彩虹, 王纪军, 柴晓玲, 等. 气候变化对黄河流域径流变化及其可能影响研究进展[J]. 气象与环境科学, 2013, 36(2): 57-65. DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148. 2013. 02. 002.
- [40] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水资源及其开发利用调查评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [41] ZHOU F, BO Y, CIAIS P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 201909902. DOI: 10.1073/pnas.1909902117.
- [42] SL/Z 712-2014, 河湖生态环境需水技术规范[S].
- [43] 黄河水利委员会. 黄河流域综合规划(2012—2030 年) [Z].
- [44] 唐蕴, 王浩, 陈敏建, 等. 黄河下游河道最小生态流量研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 171-174. DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242. 2004. 03. 043.
- [45] 王忠静, 郑航. 黄河“八七”分水方案过程点滴及现实意义[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 109-112, 27. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379. 2019. 10. 019.
- [46] 刘涵, 黄强, 赵麦换, 等. 黄河干流供水发电补偿效益及其分配方案研究[J]. 水力发电学报, 2003(2): 24-30. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243. 2003. 02. 004.
- [47] 张文鸽, 裴勇. 《黄河水量调度条例》实施效果评估体系框架[J]. 中国水利, 2014(17): 8-9, 27. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123. 2014. 17. 004.
- [48] 徐伟, 董增川, 付晓花, 等. 滦河流域生态流量保证程度分析[J]. 人民长江, 2015, 46(24): 13-16. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179. 2015. 24. 004.
- [49] 孟钰, 张翔, 夏军, 等. 河道内生态用水保证率的概念、内涵与计算分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 229-238. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930. 2018. 02. 001.
- [50] 王国庆, 管晓祥, 王乐扬, 等. 气候变化和人类活动对黄河重点区间径流的影响[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 26-30, 9. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379. 2019. 10. 006.
- [51] 王雁林, 王文科, 钱云平, 等. 黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨[J]. 自然资源学报, 2008,