

黄河流域甘肃段河道生态需水阈值的探讨

王梓宇¹, 乔晓英^{1,2}, 安宇廷³, 冯泽超¹

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安黄河规划设计有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 研究河道生态需水阈值对于提升河流生态系统多样性、稳定性、持续性及河道生态需水管理具有重要意义。针对黄河流域甘肃段河流断流、水污染严重及泥沙含量高水与生态环境问题,依据30个水文站1956—2016年的河流月径流资料,采用年内展布计算法确定生态基流量,并与自净需水量、输沙需水量按照“取大”原则整合为基本生态流量;采用逐月频率计算法确定目标生态流量。综合基本生态流量与目标生态流量分布特征,获得年内河道生态需水阈值,对其进行等级评价并分析满足程度。结果表明:年内水量较枯、较丰时段黄河干流河道生态需水阈值分别为74.78~393.29 m³/s, 595.35~1 108.84 m³/s;玛曲至上段支流分别为8.97~26.81 m³/s, 30.16~156.20 m³/s;上段至安宁渡段支流分别为0.64~11.93 m³/s, 3.50~124.61 m³/s;安宁渡以下段支流分别为5.67~7.76 m³/s, 14.77~30.53 m³/s。河道生态需水阈值评价等级在年内水量较枯、较丰时段分别位于“一般—最佳”、“很好—最佳”;其满足程度在年内各个时段祖厉河、马莲河皆未超过67%,在水量较丰时段大通河、庄浪河未超过50%。研究成果对于研究区河道生态需水管理具有可操作性,可为黄河上游水源涵养及水资源优化配置提供一定的科学依据。

关键词: 生态需水阈值; 基本生态流量; 目标生态流量; 动态评价; 黄河流域甘肃段

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0081-10

Exploration of ecological water demand thresholds for rivers in Gansu section of the Yellow River Basin

WANG Ziyu¹, QIAO Xiaoying^{1,2}, AN Yuting³, FENG Zechao¹

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Underground Hydrology and Ecological Effects in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710054, China;

3. Xi'an Yellow River Planning and Design Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The study of ecological water demand thresholds is important for improving the diversity, stability, and sustainability of river ecosystems and the management of river ecological water demand. In response to water and ecological environmental problems such as river cutoff, severe water pollution, and high sediment content in the Gansu section of the Yellow River Basin, the ecological base flow is calculated using annual distribution method based on the monthly runoff data from 30 hydrological stations from 1956 to 2016, and then integrated with the water demand of self-purification and the sediment transport to form the basic ecological flow according to the principle of “taking the big one”. Meanwhile, the target ecological flow is determined by the month-by-month frequency calculation method. Finally, the distribution characteristics of the basic ecological flow and target ecological flow are integrated to obtain the annual ecological water demand thresholds for the rivers, which are then graded and evaluated to ascertain the degree of satisfaction. The results show that the ecological water demand thresholds of the mainstream of the Yellow River during the dry and wet periods of the year are 74.78 – 393.29 m³/s and 595.35 – 1,108.84 m³/s; the tributaries in the section from Maqu to Shangquan are 8.97 – 26.81 m³/s and

收稿日期:2022-09-01; 修回日期:2023-01-27

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-03)

作者简介:王梓宇(1997—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事水资源调查与生态环境保护研究。

通讯作者:乔晓英(1969—),女,山西运城人,博士,教授,博士生导师,主要从事旱区地下水文过程与生态效应的教学与科研工作。

30.16 – 156.20 m³/s; the tributaries in the section from Shangquan to Anningdu are 0.64 – 11.93 m³/s and 3.50 – 124.61 m³/s; the tributaries in the section below Anningdu are 5.67 – 7.76 m³/s and 14.77 – 30.53 m³/s, respectively. The ecological water demand thresholds of the rivers are graded as “fair – best” and “very good – best” during the dry and wet periods of the year, respectively; their satisfaction levels of the year were less than 67% for the Zuli and Malian Rivers, and less than 50% for the Datong and Zhuanglang Rivers during the wet periods of the year. The results of the study is conducive to the management of ecological water demand of the rivers and can provide a technical support for the water conservation and optimal allocation of water resources in the upper reaches of the Yellow River.

Key words: ecological water demand threshold; basic ecological flow; target ecological flow; dynamic evaluation; Gansu section of the Yellow River Basin

1 研究背景

根据水利部《第一批重点河湖生态流量保障目标(试行)》^[1],黄河干流、大通河、渭河等位列其中,加大黄河水量生态调度力度,开展河道生态需水尤其是跨省河流主要控制断面生态流量的研究,对于解决年内水量较枯、较丰时段生态用水与工农业用水矛盾,具有重要的科学与实践意义。

已有诸多学者应用多种方法探讨了黄河流域河道生态需水问题。陈朋成等^[2]计算了黄河上游不同水文频率年的河道内生态需水总量;马广慧等^[3]应用逐月最小生态径流量计算法和逐月频率计算法确定了黄河干流唐乃亥、头道拐、花园口3个主要水文断面的生态径流量;黄成剑等^[4]应用5种概率分布函数拟合变异前河流月均流量序列,确定了大通河生态需水;陆建宇等^[5]通过逐月次最小值法、逐月频率计算法对比确定了洮河干流的最小、适宜生态径流;邓居礼等^[6]采用90%月年保证率设定法计算祖厉河干流生态环境需水量;吴喜军等^[7]提出基流比例法,得到渭河干流宝鸡段丰、平、枯及特枯年等不同年型的生态基流量;张珈玮^[8]取基本生态环境需水、输沙需水、自净需水3项最大值与蒸发需水量相加,得到泾河流域河道生态环境需水量。需要特别提及的是潘扎荣等^[9]提出的年内展布计算法,该方法弥补了传统水文学法以多年平均径流量的特定百分率或者天然径流量频率曲线上的特定保证率进行生态需水量计算的不足,综合考虑了河流天然径流的丰、平、枯变化特征,满足了河流生态水文过程对径流的年内动态需求,并首次应用于淮河流域。

河道生态需水不仅需要反映径流的季节性变化,还应该体现丰、平、枯不同水平年河道需水的变化。受降水量减少、灌溉需水以及居民用水增加等影响,平水年、枯水年河道生态需水往往难以满足。本文考虑到黄河流域甘肃段在年内不同时段生态用

水与生态需水平衡的需要,从水资源三级分区的角度出发,引入年内展布计算法确定河道基本生态流量。选择黄河流域甘肃段流域面积不小于 3×10^3 km²(大通河亭堂以上除外)的水资源三级分区为研究对象,各分区选取1~2个控制断面。在确定河流生态保护目标的基础上,计算河道基本生态流量和目标生态流量,评价年内不同时间段的河道生态需水量阈值及其满足程度。研究成果可为合理构建黄河流域生态用水调度体系提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河流域甘肃段位于黄河流域上游,总面积 14.59×10^4 km²,占甘肃省国土面积的34.3%,水资源量占甘肃省水资源总量的44.4%,却创造了全省70%的国内生产总值^[10]。黄河流域甘肃段包括大夏河、庄浪河、祖厉河及其他支流的黄河干流、洮河、湟水、渭河、泾河及北洛河6个水系,具有输送水量、稀释污染和维持生物生存等主要生态功能。研究区包含4个水资源二级分区,12个水资源三级分区,30个水文断面,其中控制断面12个,各水资源三级分区及水文断面分布见图1。

2.2 数据来源

本文选用黄河流域甘肃段内30个水文断面逐月天然河川径流资料,其中21个水文断面为1956—2016年系列径流资料,其他9个水文断面径流资料起始年份不等,分别为天堂寺1977年、连城1968年、夏河1961年、碌曲1980年、下巴沟1963年、红崖子1968年、平凉1974年、渭源1980年、洪德1959年。河道输沙数据来自1999—2016年《甘肃省水资源公报》。

2.3 河流生态保护目标确定

黄河流域甘肃段主要支流断流状况见表1。由表1中的统计数据来看,自1999年以来3条主要支

流年最大断流天数高达 234 d,并且断流河段长度、年份跨度皆有不同幅度的增长。因此,确定研究区河道生态需水首先应考虑避免河道发生断流的生态基流量。其次,按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的单因子评价法^[11],兰州至下河沿、泾河张家山以上、渭河宝鸡峡以上 3 个水资源三级分区 2016 年河流劣 V 类水占评价河长的比例分别为 59.58%、29.06%、39.04%,河流水质污染严重。另外,黄河流域甘肃段 1956—2016 多年平均输沙量

为 3.41×10^8 t,占全省输沙总量的 86.11%,其中兰州至下河沿、泾河张家山以上以及渭河宝鸡峡以上分区输沙量占研究区输沙总量的比例分别为 22.29%、45.17%、18.91%。河流泥沙含量过高导致河道淤积、萎缩严重,过流能力降低,增大了河段防洪防凌压力^[12]。因此,确定河道生态需水时还须考虑自净需水量与输沙需水量。由于黄河流域甘肃段内河水相对较深,河流水面蒸发损失水量较小,因此本文不单独计算。



图 1 黄河流域甘肃段水资源三级分区及水文断面分布

表 1 黄河流域甘肃段主要支流断流状况统计

| 河流名称 | 断流河段位置 | 断流长度/km | 年最大断流天数/d | 断流年份 |
|------|----------|---------|-------------|--------------------------|
| 庄浪河 | 红崖子水文站以下 | 1.33 | 126(2001 年) | 2000—2014 |
| 渭 河 | 陇西—武山 | 8.0 | 234(2000 年) | 1982—2000 |
| | 甘谷—葫芦河口 | 41.5 | 32(1999 年) | |
| 泾 河 | 平凉水文站以下 | 71.4 | 32(2006 年) | 1997—2001、2003、2005—2007 |

2.4 河道生态需水计算方法

《河湖生态环境需水计算规范》(SL/T 712—2021)^[13]中对“基本生态流量”“目标生态流量”“生态基流量”等概念作了进一步明晰。鉴于水力学法较难满足年内径流的丰枯变化,栖息地模拟法所需河流生态资料难以收集,综合分析法计算过程复杂且需要大量专家参与,相比之下水文学法^[9]计算简便、结果可靠^[14]。因此,本文采取水文学法计算河

道生态需水。

2.4.1 河道基本生态流量计算方法 研究区河道生态需水属于非消耗型需水^[15],河道生态基流量、输沙需水量及自净需水量属于重叠项。在整合河道基本生态需水量时采用“取大”原则,表达式如下:

$$W = \max(W_r, W_d, W_s) \quad (1)$$

式中: W 为河道基本生态需水量, 10^8 m^3 ; W_r 为生态基流量, 10^8 m^3 ; W_d 为自净需水量, 10^8 m^3 ; W_s 为输

沙需水量, 10^8 m^3 。

(1) 生态基流量计算。采用年内展布计算法(以下简称年内展布法)确定,依据多年年均径流量、各月最小月均径流量的年均值确定同期均值比,并以多年月均径流过程为基准计算生态基流量,其计算步骤详见文献[9]。

(2) 自净需水量计算。采用最枯月平均流量法^[16]确定,公式如下:

$$W_b = \frac{t}{n} \sum_{i=1}^n \min(Q_{ij}) \times 10^{-8} \quad (2)$$

式中: W_b 为自净需水量, 10^8 m^3 ; Q_{ij} 为第 i 年 j 月的平均流量, m^3/s ; t 为换算系数,取值为 $3.1536 \times 10^7 \text{ s}$; n 为统计年数。

(3) 输沙需水量计算。采用不考虑冲淤法^[17]确定,公式如下:

$$W_s = \frac{S_t}{10^4 C_{\max}} \quad (3)$$

$$C_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max C_{ij} \quad (4)$$

式中: W_s 为河流输沙需水量, 10^8 m^3 ; S_t 为多年平均输沙量, 10^4 t ; C_{\max} 为最大月平均含沙量的平均值, t/m^3 ; C_{ij} 为第 i 年 j 月的月平均含沙量, t/m^3 ; n 为统计年数。

2.4.2 河道目标生态流量计算方法 逐月频率计算法(以下简称逐月频率法)同时考虑生态系统对水量及其不同时段的要求,尤其是季节性的丰枯变化,因此,该方法用于确定河道目标生态流量具有一定优势和合理性。逐月频率法在划分汛期、非汛期基础上确定丰、平、枯水期,将枯水期(90%)、平水期(70%)、丰水期(50%)不同保证率条件下的月径流量作为河流目标生态流量。其计算步骤详见文献[3]、[18]。

3 结果与分析

3.1 河道生态基流量计算结果

按照水资源三级分区计算出研究区 30 个水文断面各月的河道生态基流量,结果见图 2。

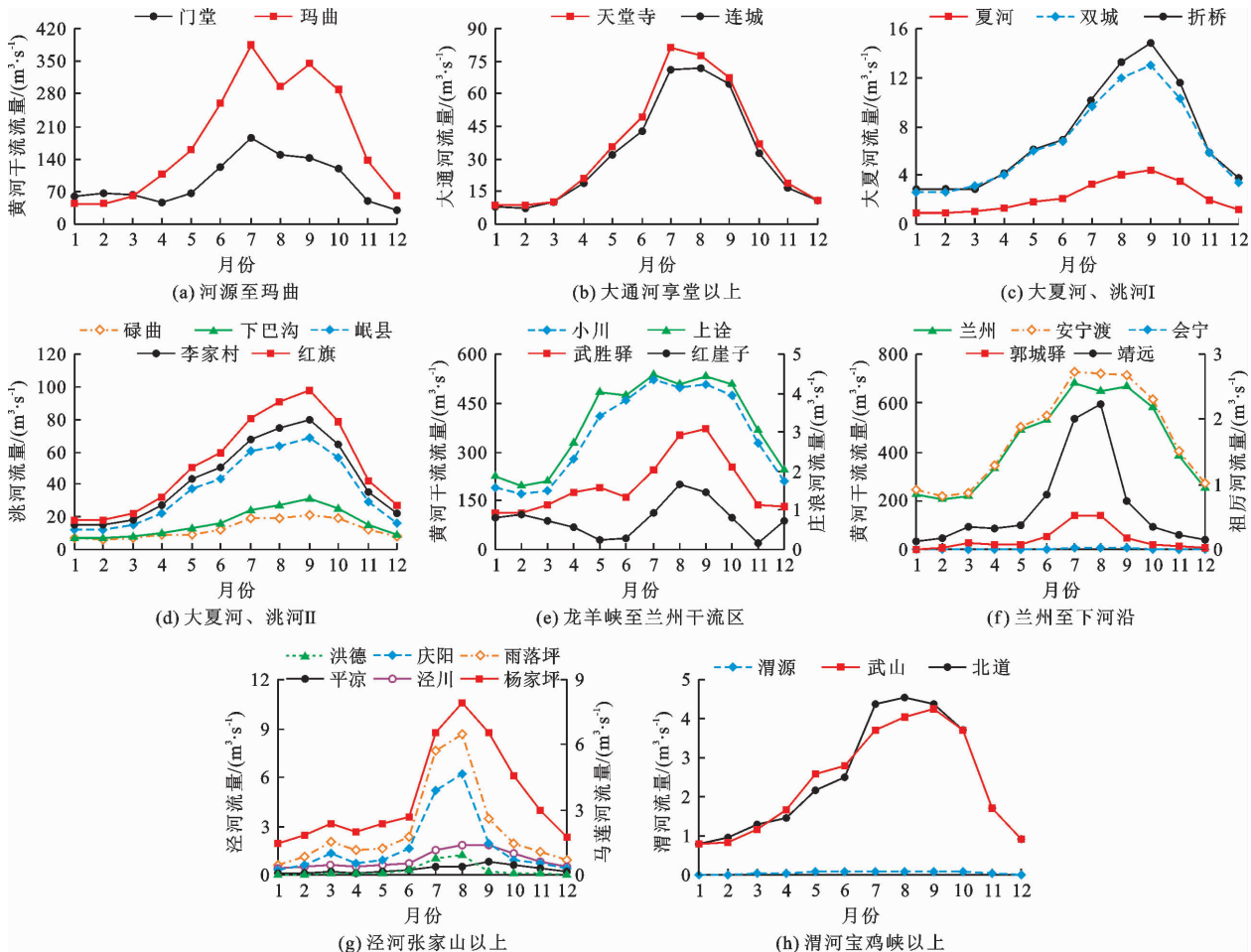


图2 黄河流域甘肃段水资源三级分区不同水文断面各月河道生态基流量计算结果

综合图2可以看出,除大通河、庄浪河外,河道生态基流量符合从河流上游至下游逐渐增大的趋势;年内分配特征有80%的断面呈单峰形态,峰值为7—9月,谷值出现在12—翌年2月。

从图2(b)、(e)可以看出,大通河、庄浪河皆出现年内各月上游生态基流量大于下游的情况。这是因为引大入秦、引疏济金等跨流域调水工程导致连城断面年均径流量较天堂寺断面减少1.2%~49.1%^[19];庄浪河中下游永登县工业、农业用水量分别占用水总量的17.76%、75.26%^[20],挤占了生态用水,导致红崖子断面径流量严重减少。

从图2(a)、(e)、(f)可以看出,黄河干流4个断面于8月出现相对低值。黄河上游径流以雨水与融雪为主要补给来源^[21],降水变化主要受西风、东亚夏季风和南亚夏季风环流系统的共同影响,玛曲断面位于降水对径流影响最强的区域^[22],因此玛曲断面出现低值可能与气候变化有关。其他3个断面可能与人类活动有关,是因为有7个大中型水库位于黄河干流龙羊峡至兰州段^[23],水库的调洪拦截会对黄河径流变化产生重要影响^[24]。庄浪河武胜驿和红崖子断面谷值皆为5—6月和11月,尤其是红崖子断面谷值已接近零值,这与庄浪河流域水资源短缺、利用效率偏低等因素密切相关。例如流域内永

登段多数灌溉设施建于20世纪50—60年代,建设标准低,长期运行缺乏维修和改造,并且流域内灌溉方式、耕作制度、栽培方式等方面存在问题^[20],导致水资源浪费严重。

另外,从图2(f)、(g)可以看出,祖厉河与泾河河道生态基流量骤增骤落,最大、最小月生态基流量相差4.11~252.66倍,年内波动幅度较大。原因是祖厉河、泾河径流主要由大气降水补给为主,汛期降水量分别占年降水量的68%~80%与72%~86%,且多以局地暴雨的形式出现,加之流域内植被稀疏,土壤侵蚀强烈、水土流失严重^[25-26],导致流域内汛期洪水频发,径流量年内起伏较大。

综上所述,流域内河道生态基流量受气候变化与人类活动的共同影响。

3.2 自净需水量与输沙需水量计算结果

图3为研究区30个断面自净需水量与输沙需水量的计算结果。河源至玛曲分区、大通河亭堂以上分区及大夏河、洮河分区内的7个断面位于甘南高原区,西部呈高原草原景观,东部为高山峡谷地貌,水土保持能力较强。上述区域多年平均输沙量为 391.3×10^4 t,占黄河流域甘肃段输沙总量的1.15%,河流汛期径流即可满足输沙要求,故不单独计算输沙需水量。

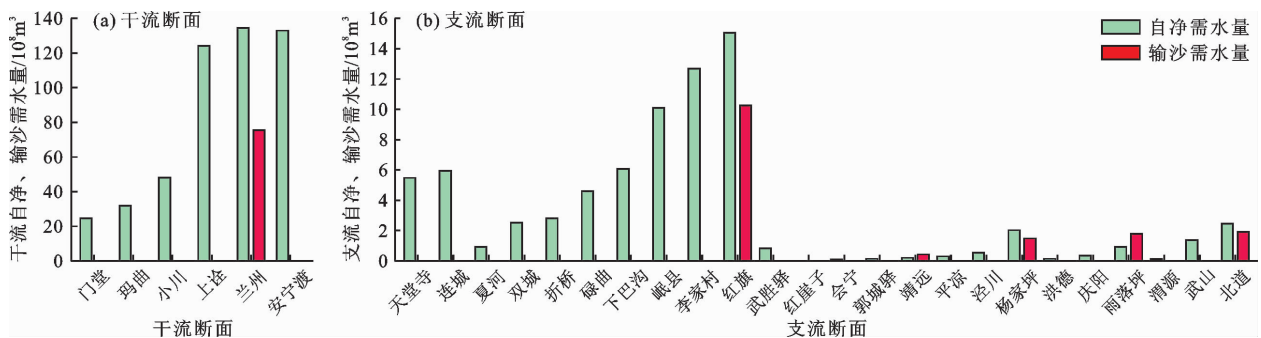


图3 黄河流域甘肃段不同水文断面自净需水量及输沙需水量计算结果

从图3可以看出,各条河流几乎所有断面的自净需水量自上游至下游均呈现增大趋势,只有安宁渡、红崖子断面例外,这是因为兰州至安宁渡断面区间人口密度大,工业、农业、生活用水陡增,而庄浪河红崖子断面以下自产水资源量较低、水资源开发利用程度较高;从输沙需水量来看,红旗、雨落坪断面多平均输沙量分别占输沙总量的4.81%、44.93%,但输沙需水量占比为11.24%、1.96%。由此可以推知,多年平均输沙量越大并不代表所需输沙水量越多,计算河道输沙水量时需要考虑各条河流的水

文特征和挟沙能力。

3.3 河道基本生态流量整合结果

根据前文2.4.1节的“取大”原则,整合河道生态基流量、自净需水量与输沙需水量计算结果,见图4。

由图4可以看出,在整合基本生态流量时,大夏河、泾河、渭河所有断面与上迳、碌曲、下巴沟、武胜驿断面选择自净需水量,靖远、雨落坪断面选择输沙需水量,其余断面选择生态基流量。即研究区30个水文断面中,选择生态基流量、自净需水量、输沙需水量作为基本生态流量分别占50%、43%、7%。

3.4 河道目标生态流量计算结果

按照水资源三级分区计算出研究区 30 个水文断面各月的河道目标生态流量,结果见图 5。

从图 5 可以看出,河道目标生态流量符合从上游至下游逐渐增大的趋势(图 5(a)、5(e) 除外)。图 5(a) 表明,黄河干流 1—3 月目标生态流量门堂断面高于玛曲断面,这是因为河源至玛曲分区河流径流量主要受气候变化影响,气候变化导致黄河源区积雪融水、冻土退化,冬季源区径流增加^[27]。

从图 5(e) 可以看出,小川、红崖子断面目标生态流量比上迳、武胜驿断面年内波动幅度大。这是因为小川断面为刘家峡水库出库控制断面,其径流变化严重受水库调度的影响^[28];庄浪河流域受人口密度及工业、农业、生活用水等因素的综合影响,水

资源枯竭现象较为普遍,加之流域内洪水流量集中,历时较短,导致红崖子断面目标生态流量波动幅度较大。

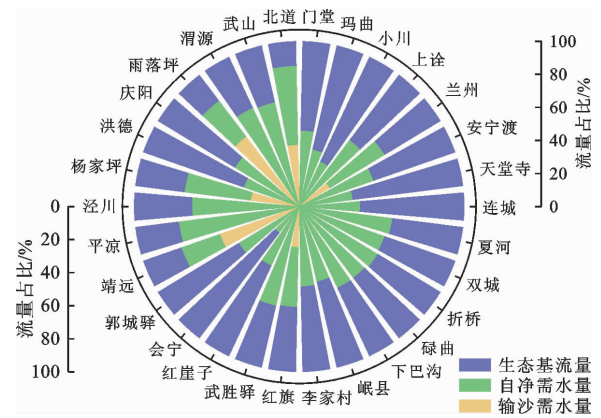


图 4 黄河流域甘肃段河道基本生态流量整合结果占比

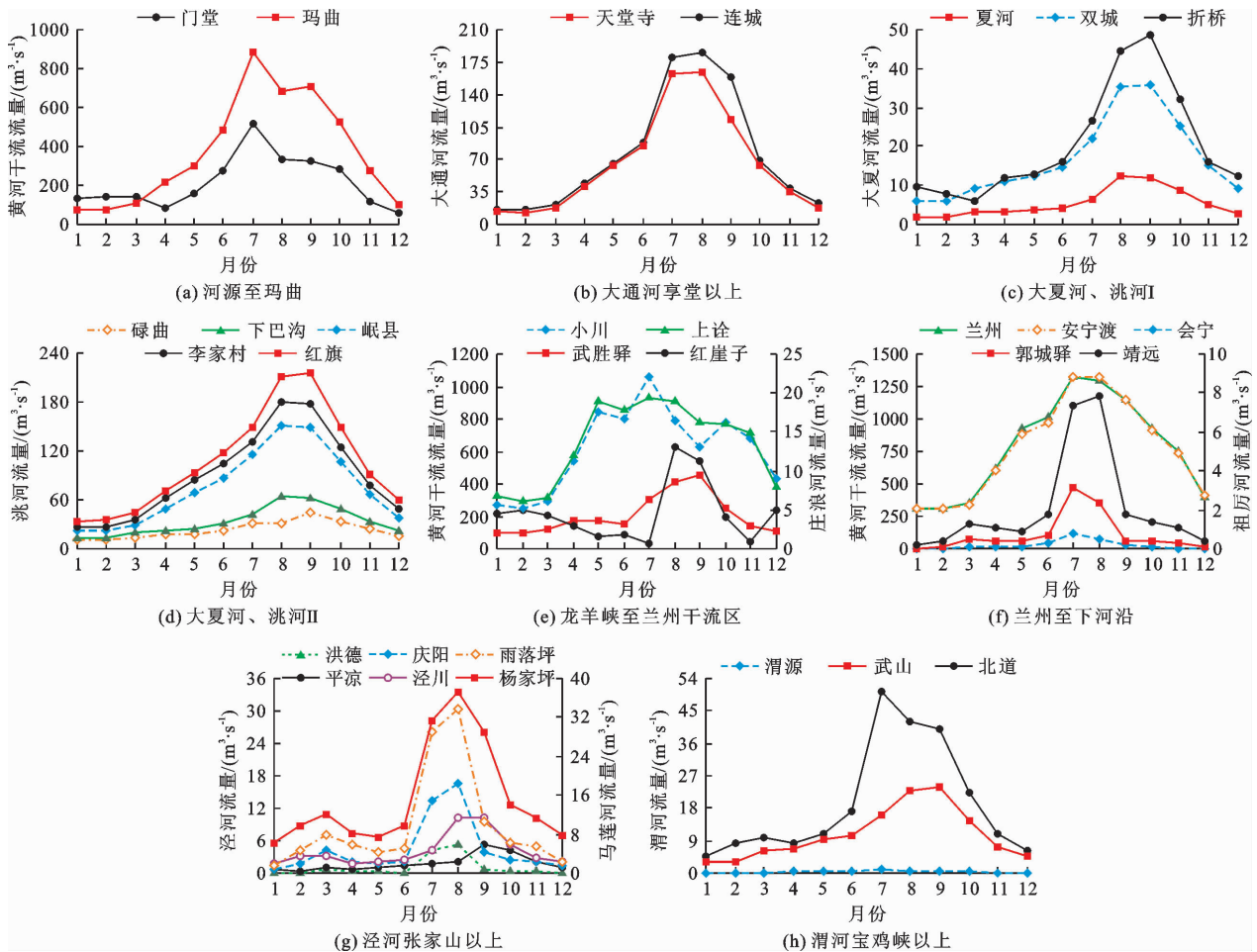


图 5 黄河流域甘肃段水资源三级分区不同水文断面各月河道目标生态流量计算结果

从图 5(g) 可以看出,泾河流域 4—6 月断面目标生态流量出现谷值,这与该时段农田灌溉用水量较大有关。

泾河流域在 1990 年之前建成的万亩以上灌区

有 27 处,水库总容量为 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$,建有淤地坝 1 243 座^[29],大量的水利工程拦蓄河流及取水灌溉使农业用水量占到泾河流域多年平均径流量的 31.37%^[30]。

3.5 河道生态流量整合结果

综合图 2 和图 5 可知,不同控制断面在反映其所在水资源三级分区的水文生态特征时具有代表性和全面性,本文后续内容将从 12 个控制断面探讨黄河流域甘肃段各水资源三级分区河道生态需水问题。将上述各控制断面的目标生态流量计算结果换算为年均值,并与相应断面的基本生态流量进行比较,见图 6。

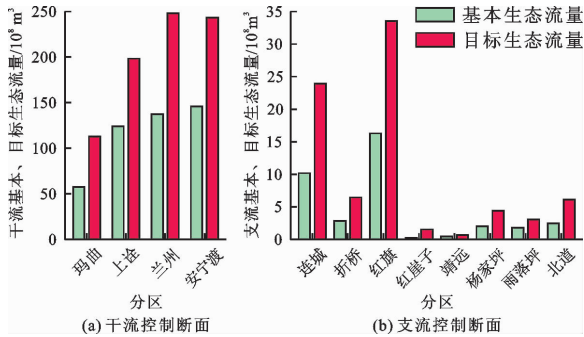


图 6 黄河流域甘肃段不同控制断面河道生态需水整合结果

从图 6 可看出,研究区黄河干流玛曲、上迳、兰州、安宁渡控制断面基本生态流量范围为 $57.48 \times 10^8 \sim$

$146.07 \times 10^8 \text{ m}^3$;目标生态流量范围为 $112.95 \times 10^8 \sim 247.89 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。干流和支流各控制断面目标生态流量与基本生态流量相差 1.6 ~ 6.4 倍,并且从图 5 可以看出,部分控制断面目标生态流量年内各月份之间波动幅度较大,因此在确定河道生态需水阈值时需要综合考虑基本生态流量与目标生态流量。

3.6 河道生态需水阈值确定

考虑到研究区水与生态环境的实际条件,选取多年平均天然月径流量连续最大的 6 个月作为年内水量较丰时段,其余月份作为年内水量较枯时段。获得 11 个控制断面水量较丰时段为 5—10 月,水量较枯时段为 11—翌年 4 月,只有杨家坪断面推迟 1 个月。因黄河流域甘肃段河流输沙、自净、鱼类产卵等河流生态保护目标多在水量较丰时段完成,本文提出作为黄河上游的研究区,应适当降低年内水量较枯时段生态需水,以提高年内水量较丰时段生态需水的理念。在确定河流生态需水阈值时,年内水量较枯时段采用基本生态流量,年内水量较丰时段采用目标生态流量,分别对两个时段的计算结果求平均值,得到 12 个控制断面在相应时段的河道生态需水阈值,见表 2。

表 2 黄河流域甘肃段不同控制断面河道生态需水阈值年内分布

| 控制断面 | m ³ /s | | | | | | | | | | | |
|------|-------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |
| 玛曲 | 74.78 | 74.78 | 74.78 | 74.78 | 595.35 | 595.35 | 595.35 | 595.35 | 595.35 | 595.35 | 74.78 | 74.78 |
| 连城 | 11.93 | 11.93 | 11.93 | 11.93 | 124.61 | 124.61 | 124.61 | 124.61 | 124.61 | 124.61 | 11.93 | 11.93 |
| 折桥 | 8.97 | 8.97 | 8.97 | 8.97 | 30.16 | 30.16 | 30.16 | 30.16 | 30.16 | 30.16 | 8.97 | 8.97 |
| 红旗 | 26.81 | 26.81 | 26.81 | 26.81 | 156.20 | 156.20 | 156.20 | 156.20 | 156.20 | 156.20 | 26.81 | 26.81 |
| 上迳 | 393.29 | 393.29 | 393.29 | 393.29 | 858.53 | 858.53 | 858.53 | 858.53 | 858.53 | 858.53 | 393.29 | 393.29 |
| 红崖子 | 0.64 | 0.64 | 0.64 | 0.64 | 5.37 | 5.37 | 5.37 | 5.37 | 5.37 | 5.37 | 0.64 | 0.64 |
| 兰州 | 269.81 | 269.81 | 269.81 | 269.81 | 1108.84 | 1108.84 | 1108.84 | 1108.84 | 1108.84 | 1108.84 | 269.81 | 269.81 |
| 安宁渡 | 284.96 | 284.96 | 284.96 | 284.96 | 1088.65 | 1088.65 | 1088.65 | 1088.65 | 1088.65 | 1088.65 | 284.96 | 284.96 |
| 靖远 | 1.35 | 1.35 | 1.35 | 1.35 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 1.35 | 1.35 |
| 杨家坪 | 6.45 | 6.45 | 6.45 | 6.45 | 6.45 | 20.02 | 20.02 | 20.02 | 20.02 | 20.02 | 20.02 | 6.45 |
| 雨落坪 | 5.67 | 5.67 | 5.67 | 5.67 | 14.77 | 14.77 | 14.77 | 14.77 | 14.77 | 14.77 | 5.67 | 5.67 |
| 北道 | 7.76 | 7.76 | 7.76 | 7.76 | 30.53 | 30.53 | 30.53 | 30.53 | 30.53 | 30.53 | 7.76 | 7.76 |

从表 2 可以看出,位于黄河干流的 4 个控制断面玛曲、上迳、兰州、安宁渡河道生态需水阈值年内水量较枯时段为 $74.78 \sim 393.29 \text{ m}^3/\text{s}$,年内水量较丰时段为 $595.35 \sim 1108.84 \text{ m}^3/\text{s}$ 。玛曲至上迳段支流大夏河、洮河年内水量较枯、较丰时段的河道生

态需水阈值分别为 $8.97 \sim 26.81 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30.16 \sim 156.20 \text{ m}^3/\text{s}$;上迳至安宁渡段支流大通河、庄浪河、祖厉河分别为 $0.64 \sim 11.93 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.50 \sim 124.61 \text{ m}^3/\text{s}$;安宁渡以下段支流泾河、渭河分别为 $5.67 \sim 7.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $14.77 \sim 30.53 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由此可见,由于气

候、水文、人类活动强度等不同因素的影响,导致研究区控制断面河道生态需水阈值差异较大。

4 讨论

4.1 不同时段河道生态需水阈值评价

结合研究区河流的地理位置、气候条件以及生态保护目标等特征,本文对 Tennant 法进行适用性修正,其中,分期修正为年内水量较枯、较丰时段。依据《河湖生态环境需水计算规范》(SL/T 712—2021)^[13]将等级标准修正为最佳、优秀、很好、良好、一般、差与极差。通过将年内不同时段生态需水阈值与同期多年月均天然径流量相比,得到不同时段同期均值比,用修正后 Tennant 法的等级标准对水资源三级分区不同控制断面河道生态需水阈值进行评价,结果见表 3。

表 3 黄河流域甘肃段不同控制断面河道生态需水阈值评价结果

| 控制断面 | 年内水量较枯时段 | | 年内水量较丰时段 | |
|------|----------|-------|----------|-------|
| | 同期均值比/% | 评价结果 | 同期均值比/% | 评价结果 |
| 玛曲 | 40.81 | 优秀—最佳 | 84.36 | 最佳 |
| 连城 | 36.88 | 很好—优秀 | 87.85 | 最佳 |
| 折桥 | 57.01 | 优秀—最佳 | 68.42 | 优秀—最佳 |
| 红旗 | 35.36 | 很好—优秀 | 72.55 | 最佳 |
| 上迳 | 70.49 | 最佳 | 79.49 | 最佳 |
| 红崖子 | 12.02 | 一般—良好 | 71.33 | 最佳 |
| 兰州 | 45.19 | 优秀—最佳 | 83.72 | 最佳 |
| 安宁渡 | 48.63 | 优秀—最佳 | 82.97 | 最佳 |
| 靖远 | 100.93 | 最佳 | 52.50 | 很好—优秀 |
| 杨家坪 | 52.28 | 优秀—最佳 | 60.95 | 最佳 |
| 雨落坪 | 90.24 | 最佳 | 69.76 | 最佳 |
| 北道 | 46.25 | 优秀—最佳 | 59.98 | 很好—优秀 |

从表 3 可以看出,年内水量较枯时段除了红崖子控制断面评价等级位于“一般—良好”,其余 11 个控制断面都位于“很好”以上;年内水量较丰时段有 9 个控制断面达到了“最佳”,其余 3 个控制断面位于“很好”以上,可推断不同控制断面生态需水阈值在水量较枯时段可使河流不断流,在水量较丰时段也能够使河道内输沙、自净、鱼类产卵等生态需水目标得以满足。由此可知,本文所确定的不同时段河道生态需水阈值能够满足河流生态功能区划的实际需求。

4.2 河道生态需水阈值适用性分析

为进一步验证本文河道生态需水阈值的适用性及合理性,选取部分计算结果与前人研究成果进行对比。赵凯云等^[31]确定杨家坪断面、雨落坪断面年生态需水量分别为 6.60×10^8 、 $3.97 \times 10^8 \text{ m}^3$,本文为 6.04×10^8 、 $3.22 \times 10^8 \text{ m}^3$,二者计算结果差异较小。王一艳等^[32]确定北道断面生态基流量推荐值为 $5.68 \text{ m}^3/\text{s}$,本文为 $7.76 \text{ m}^3/\text{s}$ (水量较枯时段)、 $30.53 \text{ m}^3/\text{s}$ (水量较丰时段)。分析二者产生差异的原因:一是前者将各月生态基流量计算结果的最小值作为推荐值,本文在确定生态基流量时综合考虑了汛期鱼类产卵、河道自净与输沙等生态保护目标;二是生态基流量在本文中仅是整合基本生态流量的分项之一。综合基本生态流量与目标生态流量确定的生态需水阈值,有利于年内不同时段河道需水动态评价。

另外,多年径流量大致相等的不同河流,在年内水量较枯时段河道生态需水阈值却不一定相近。如折桥断面年内水量较枯时段河道生态需水阈值为 $8.97 \text{ m}^3/\text{s}$,与其多年径流量相似的北道断面同期河道生态需水阈值为 $7.76 \text{ m}^3/\text{s}$,说明本文所提出的河道生态需水阈值确定方法兼顾了河流径流量及区域生态环境现状的共同影响。研究成果更加有利于黄河上游水资源与生态环境保护的规划实施。

4.3 河道生态需水阈值满足程度分析

本文将河道生态需水阈值与逐月实测径流量的多年均值相比较,以进一步探讨其满足程度。依据《水利部办公厅关于开展重要河湖生态水量调查工作的通知》要求^[33],若某月实测径流量的多年均值大于河道生态需水阈值,则认为该月河道生态水量满足需求。由此,将全年满足河道生态需水的月份数除以总月数得到年内河道生态需水阈值的满足程度,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,玛曲、上迳、兰州、安宁渡断面河道生态需水阈值在年内所有时段满足程度皆高于 80%,说明黄河干流上游水利工程的联合调度对于保障生态用水起到至关重要的作用。在水量较枯、较丰时段连城和红崖子断面河道生态需水阈值满足程度分别为 100%、50% 和 100%、33%;靖远和雨落坪断面满足程度分别为 33%、67% 和 50%、50%。因此,建议大通河、庄浪河、祖厉河与马莲河在保障生活、生产用水的前提下,合理利用蓄水、引调水工程,尽快制定跨流域生态水量调度方案,以保障河湖生态系统健康与安全。

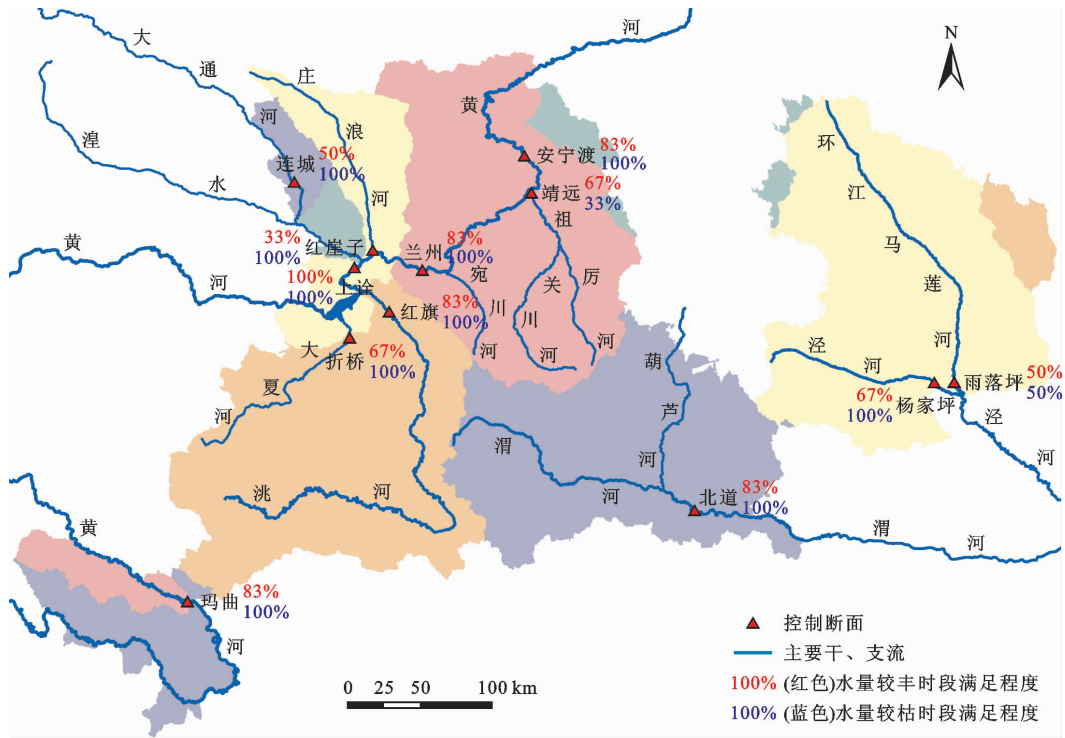


图 7 黄河流域甘肃段不同控制断面年内河道生态需水阈值满足程度

5 结 论

本文针对黄河流域甘肃段水资源与生态环境问题,综合河道基本生态流量与目标生态流量确定河道生态需水阈值,并分析了其适用性及满足程度,主要结论如下:

(1)河道生态基流量符合从上游至下游逐渐增大的趋势。按照“取大”原则整合河道基本生态流量时,大夏河、泾河、渭河所有断面与上迳、碌曲、下巴沟、武胜驿共 13 个断面选择自净需水量,靖远、雨落坪 2 个断面选择输沙需水量,其余 15 个断面选择生态基流量。

(2)黄河干流及主要支流各控制断面目标生态流量与基本生态流量相差 1.6~6.4 倍,其中庄浪河红崖子断面差异最大;综合二者年内分布特征,在确定控制断面河道生态需水量阈值时,年内水量较枯时段采用基本生态流量,年内水量较丰时段采用目标生态流量。

(3)水资源三级分区不同控制断面河道生态需水阈值的评价等级在水量较枯、较丰时段分别位于“一般—最佳”、“很好—最佳”。水量较丰时段大通河、庄浪河河道生态需水阈值满足程度未超过 50%,祖厉河、马莲河年内各个时段满足程度皆未超过 67%,建议尽快开展大通河、庄浪河、祖厉河及马莲河的生态水量调度方案研究。

参考文献:

- [1] 水利部.水利部关于印发第一批重点河湖生态流量保障目标的函[J].中国水利,2020(15):5-7.
- [2] 陈朋成,周孝德,靳春燕,等.黄河上游河道生态需水量研究[J].人民黄河,2008,30(2):41+44+80.
- [3] 马广慧,夏自强,郭利丹,等.黄河干流不同断面生态径流量计算[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(5):496-500.
- [4] 黄成剑,解阳阳,刘赛艳,等.考虑水文变异的大通河生态需水研究[J].水文,2022,42(3):32-36+19.
- [5] 陆建宇,张育德.考虑径流年际变异的洮河河道生态径流研究[J].人民珠江,2020,41(2):41-49.
- [6] 邓居礼,姜丽红,贾杰.祖厉河流域水质评价与生态环境需水量研究[J].地下水,2018,40(6):86-89.
- [7] 吴喜军,李怀恩,董颖,等.基于基流比例法的渭河生态基流计算[J].农业工程学报,2011,27(10):154-159.
- [8] 张珈玮.泾河流域水文过程模拟预测及生态环境需水研究[D].西安:长安大学,2021.
- [9] 潘扎荣,阮晓红,徐静.河道基本生态需水的年内展布计算法[J].水利学报,2013,44(1):119-126.
- [10] 武兰珍,赵霞,成艺,等.黄河流域甘肃段水资源承载力与水资源安全评价[J].排灌机械工程学报,2021,39(9):897-903.
- [11] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准 GB 3838—2002[S].北京:中国环境

- 科学出版社,2002.
- [12] 郭彦,侯素珍,夏润亮,等. 1955—2014年黄河内蒙古河段水沙变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(4):70-77.
- [13] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范 SL/T 712—2021[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
- [14] 杨志峰,张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2003,18(3):294-301.
- [15] 周林飞,赵崧,张玉龙. 基于水文要素变化特征的浑河干流生态需水量计算[J]. 大连理工大学学报,2014,54(2):215-221.
- [16] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. 制订地方水污染物排放标准的技术原则与方法 GB/T 3839—1983[S]. 北京:中国质检出版社,1983.
- [17] 唐斌. 基于河流健康的渭河经济用水与生态用水合理配置研究[D]. 西安:西北大学,2018.
- [18] 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),2004,32(1):18-22.
- [19] 李小荣. 大通河跨流域引水和梯级水电站建设对径流的影响分析[J]. 地下水,2017,39(4):134-136.
- [20] 姚志春,王得虎,刘佳莉,等. 甘肃省庄浪河流域水资源可持续利用对策研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(6):109-112.
- [21] 赵晨旭. 黄河上游龙青段水温演变特征及影响因素研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [22] 苏贤保,李勋贵,张建香,等. 气候变化和人类活动对黄河上游径流影响的时空差异[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2021,57(3):285-293.
- [23] ZHANG Hongbo, SINGH V P, ZHANG Qiang, et al. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River Basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 938.
- [24] 苏贤保,李勋贵,王义鹏,等. 多时间尺度下黄河上游径流复杂度变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021,32(5):1-10.
- [25] 杜丽芳. 祖厉河中下游水沙特征和河道演变分析[D]. 兰州:兰州大学,2020.
- [26] 李雯. 泾河流域气候变化对径流量的影响研究[D]. 西安:长安大学,2008.
- [27] 王学良,李洪源,陈仁升,等. 变化环境下1956—2020年黄河兰州站以上干支流径流演变特征及驱动因素研究[J]. 地球科学进展,2022,37(7):726-741.
- [28] 许文龙,赵广举,穆兴民,等. 近60年黄河上游干流水沙变化及其关系[J]. 中国水土保持科学,2018,16(6):38-47.
- [29] 冯绍杰,穆兴民,高鹏,等. 泾河水沙变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(10):151-157.
- [30] 刘宇,管子隆,田济扬,等. 近70a泾河流域径流变化及其驱动因素研究[J]. 干旱区地理,2022,45(1):17-26.
- [31] 赵凯云,石长伟,张广林. 泾河入陕主要控制断面生态需水量的分析与确定[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):206-208.
- [32] 王一艳,杨涛,王伟,等. 渭河生态基流时空分异特征及保障率分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3):66-75.
- [33] 水利部. 水利部关于做好河湖生态流量确定和保障工作的指导意见[J]. 中国水利,2020(15):1-2.

(上接第80页)

- [40] 程雪蓉. 基于CMIP5模式预估长江上游流域气温及降水时空特征[J]. 水电能源科学,2019,37(1):13-16.
- [41] 何旭,缪子梅,田佳西,等. 基于CMIP6多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版),2021,(2022-10-26)[2023-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20221026.1053.006.html>.
- [42] 侯丽娜. 气候变化对金沙江干流径流的影响分析[J]. 中国农村水利水电,2018(6):63-67.
- [43] 王媛,苏布达,王艳君,等. “双碳”情景下抚河流域径流变化特征[J/OL]. 长江科学院院报,2022,(2022-05-05)[2023-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20220429.1146.015.html>.