

基于水情变化的河流生态流量阈值及多时间尺度保障率计算

陈雪¹, 徐富刚¹, 李琴², 肖睿¹, 谢亨旺³, 邓海龙³, 贾卓¹

(1. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330038; 2. 江西省科学院能源研究所, 江西 南昌 330096;
3. 江西省灌溉试验中心站, 江西 南昌 330201)

摘要:为加强河流生态流量阈值及保障率计算对天然水文情势变化的适应性,提出了基于水文集合分位数的生态流量计算方法。根据河流长序列实测径流数据,在年际和年内划分不同水文情景,基于生态流量水文集合的中位数和下四分位数确定年内汛期、非汛期生态流量阈值下限,以丰、平水年组的计算结果分别作为平、枯水年组的生态流量理想值,结合生态流量中长期和短期保障率,计算分析河流在不同时间尺度下的生态流量保障程度。抚河下游应用结果表明:综合水情变化的生态流量阈值和多时间尺度保障率分析方法能够更好地适应天然河流年际和年内水情变化,更准确识别河流水文健康状况;丰、平、枯水年组抚河下游年均生态流量阈值下限分别为156.49、90.43、29.54 m³/s;不同时间尺度下抚河下游生态流量的保障程度均较低,中长期保障率大于短期保障率,中长期和短期保障率分别为63.64%~93.11%、42.50%~91.85%。

关键词:生态流量;阈值;生态流量保障率;水文情势;抚河下游

中图分类号:TV213.4;X143

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)04-0128-09

River ecological flow threshold and multi-time scale guarantee rate calculation based on hydrological regime changes//CHEN Xue¹, XU Fugang¹, LI Qin², XIAO Rui¹, XIE Hengwang³, DENG Hailong³, JIA Zhuo¹ (1. School of Engineering and Construction, Nanchang University, Nanchang 330038, China; 2. Energy Research Institute of Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 3. Jiangxi Irrigation Experiment Center Station, Nanchang 330201, China)

Abstract: An ecological flow calculation method based on quartiles of hydrological ensemble is proposed to enhance the adaptability of river ecological flow threshold and guarantee rate calculation to natural hydrological regime changes. Long series of measured runoff data of a river were classified inter-annually and intra-annually according to different hydrological scenarios, and the lower limits of ecological flow threshold for flood season and non-flood season in a year were determined based on the median and lower quartile of the ecological flow hydrological ensemble. The ecological flow calculation results in wet and normal hydrological years were taken as the ideal values of ecological flow in normal and dry hydrological years, respectively, and the guarantee degree of ecological flow in the river on different time scales was analyzed based on the ecological flow guarantee rate for the mid-long and short terms. A case study of the lower Fuhe River shows that the analytical method that integrates ecological flow thresholds and multi-scale guarantee rates, is more adaptable to inter-annual and intra-annual changes in hydrological regime in natural rivers, and it can identify the hydrological health status of rivers more accurately. The average lower limits of ecological flow threshold of the lower Fuhe River were 156.49, 90.43, and 29.54 m³/s in wet, normal, and dry hydrological years, respectively. The guarantee degree of ecological flow in the lower Fuhe River was low on different time scales, and the ecological flow guarantee rate of mid-long term is higher than that of short term, with values ranging from 63.64% to 93.11% and 42.50% to 91.85%, respectively.

Key words: ecological flow; threshold; ecological flow guarantee rate; hydrological regime; lower Fuhe River

在气候变化和高强度人类活动综合作用下,河流天然水文情势发生了一定程度的改变^[1-2],导致河

流流量减小、水质下降等问题^[3-4],河流生态系统结构的完整性和功能性受到影响^[5-6]。随着对河流生

基金项目:国家自然科学基金项目(42202278);江西省水利厅重大科技项目(202224ZDKT24);江西省自然科学基金项目(20232BAB213080)

作者简介:陈雪(1994—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源与生态水利研究。E-mail:250100871@qq.com

通信作者:贾卓(1992—),男,讲师,博士,主要从事水文与水生态环境效应研究。E-mail:jiazhao@ncu.edu.cn

态研究的不断推进,人们逐渐意识到科学量化河流生态流量对维持河流生态系统平衡、恢复生态系统结构和功能、实现经济与水生态环境间的协调发展、推动水资源的合理开发利用具有重要意义^[7-8]。

目前,河道生态流量没有统一的定义和计算方法,全球有200多种生态流量计算方法^[9],这些方法大致可以分为4类:水文学法、水力学法、栖息地模拟法和整体法。其中水文学法是最常用的方法,主要利用长系列流量资料估算生态流量,具有较高的应用性,但在适用性方面仍存在一定的局限性。针对此问题,学者们采用多种水文学法综合确定生态流量,如武连洲等^[10]结合3种水文学法的下包线与变化范围法的阈值区间计算生态流量;李阳等^[11]针对清水河年内汛期和非汛期,分别采用3种水文学法的平均值、最小值计算其生态流量;Qu等^[12]采用改进Tenant法和年内展布法的内包线确定东江生态流量。

根据生物生长发育所遵循的耐受定律,为维持河流基本良性生态功能,生态流量具有阈值性和适宜性,然而,当前有关生态流量的研究往往忽视了其阈值的重要性。冯平等^[13]采用3种方法分别计算了滹沱河最小生态流量、适宜生态流量、理想生态流量;黄显峰等^[14]从5种常用水文学法中筛选出2种,将其外包线和内包线分别作为适宜生态流量阈值的上、下限;Hu等^[15]用核密度曲线和月径流分位数综合确定了东荆河的生态流量阈值;Yu等^[16]采用二次拟合和95%置信区间确定了白龙河生态流量阈值。

在河流生态流量的基础上分析其保障率,可以科学评估河流生态系统的健康状况。学者们更倾向直接从数值上分析生态流量保障率,如李梦瑶等^[17]利用全年满足生态流量的天数占比计算了汾河中游河道的生态流量保障率;童心等^[18]利用月径流大于生态流量阈值的时间序列长度与总序列的比值分析了雅砻江中游河段的生态流量保障率;Zhang等^[19]用生态流量占径流的比例计算了大渡河上游生态流量保障率。但仅从单一数值层面分析生态流量保障率,无法全面真实地反映河流生态健康状况。生态流量中长期保障率可以总体把握河流生态情况,而短期保障率在更短时间内评估河流生态的动态变化,综合中长期和短期生态流量保障率,可以在掌握河流整体生态流量保障水平的基础上,精准识别生态流量保障程度较低年份中的脆弱期,制定更适宜河流的长期规划和短期调控,以实现可持续发展的河流生态系统管理。

在全球气候变暖及人类活动加剧的大背景下,

将年际、年内的丰枯水情纳入生态流量阈值和保障率的计算体系,可以提高流域水资源管理的灵活性,实现河道生态系统更高水平的可持续发展。本文综合考虑河流年际、年内水情变化,采用多种水文学法计算河流生态流量阈值,并结合中长期、短期保障率,对河流生态流量保障程度进行综合评定,以期为复杂变化环境下的河流健康管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 生态流量阈值计算方法

不同水文学法计算的生态流量对河流的适应性存在一定的差异性,为进一步结合天然河流水情变化,细化生态流量计算方式,本文提出了一种基于水文集合分位数的生态流量阈值计算方法。具体计算过程为:①根据P-Ⅲ型频率曲线,以水文频率 P_w 为标准,在年际上将水文径流序列划分丰水年组($P_w < 25\%$)、平水年组($25\% \leq P_w < 75\%$)和枯水年组($P_w \geq 75\%$),在年内按各月径流特征划分为汛期和非汛期。②基于历时曲线法^[20]、月流量变动法^[21]、年内展布法^[22]、Lyon法^[23]、改进的7Q10法^[24]、多年日流量排频法^[25]、逐月最小生态流量法^[26]等7种水文学法,计算各水情年组的生态流量,以其结果作为基础水文集合。③为了更准确地反映多种方法的平均水平,同时避免计算原理与河流情况不匹配的极端情形,取基础水文集合的中位数作为各水情年组汛期生态流量阈值下限;考虑到非汛期径流量相对较低,采用水文集合下四分位数作为各水情年组非汛期生态流量阈值下限。④为应对河流水情变化的不确定性,增加河流生态管理工作的灵活性,将丰、平水年组生态流量阈值下限计算结果分别作为平、枯水年组的生态流量理想值。丰水水情下,降水量大,河流来水充沛,河流生态用水的保障标准相对较高,丰水水情的生态流量理想值通常是一个难以达到的标准,且缺乏实际操作意义,故丰水水情下不设理想值。

1.2 生态流量保障率计算方法

1.2.1 生态流量中长期保障率

河流生态系统处于周期性或非周期性的律动变换之中,在中长期时间尺度上评价生态流量保障情况可以评估河流生态系统健康的动态稳定性。生态流量中长期保障率(E_{GL})以流量序列的流量持续时间为基础,其值为大于生态流量的历时占总历时的比例^[27]。中长期保障率可作为河流长期规划的基础指标,为河流生态水资源配置提供重要依据。

流量历时曲线是描述流量与历时之间关系的曲

线,反映观测时段内,流量超过(或低于)某一特定强度的持续时间或出现的频率^[28]。以流量历时曲线为基础计算中长期保障率,可以宏观评价历史过程中河流生态流量的整体保障情况。

1.2.2 生态流量短期保障率

生态流量短期保障率是河流流量在一定时期内以生态流量数值、特征、过程为标准的累积达标概率^[27]。生态流量短期保障率以河流的高、低流量过程为计算基础,分汛期、非汛期两种类型。其考虑了年内不同时期水生生物对生态流量过程的需求,可为保护水生生境多样性和生态系统健康提供依据。生态流量短期保障率计算步骤如下:

步骤1 划分流量过程。河流生态系统健康不仅取决于径流的动态过程,还需要考虑径流过程特征和其连续性^[29]。以河流日径流的相应频率(受影响前)、动态持续时间、恢复间隔作为划分流量过程的标准,河道流量过程可分为极低流量、低流量、高流量脉冲、小洪水和大洪水(后两者也可称为高流量)5种类型^[30]。河道流量的变化是影响生物物种生态过程的关键因素,高流量过程和低流量过程都可能对其产生重要影响^[31]。

步骤2 计算生态流量短期保障率。河流生态流量短期保障率 E_{GS} 由非汛期和汛期生态流量达标天数来定义:

$$E_{GS} = \frac{D_{NF} + D_F}{D} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_{NF} 、 D_F 分别为非汛期和汛期生态流量达标天数; D 为年总天数。

非汛期达标天数 D_{NF} 为

$$D_{NF} = \sum_i \text{sgn} Q_{NF,i} \quad (2)$$

$$\text{sgn} Q_{NF,i} = \begin{cases} 1 & Q_{NF,i-1}, Q_{NF,i}, Q_{NF,i+1} \geq Q_E \\ & \text{且 } Q_{NF,i-1}, Q_{NF,i}, Q_{NF,i+1} \in S_{LF} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: $Q_{NF,i}$ 为非汛期第 i 天的流量; Q_E 为生态流量; S_{LF} 为低流量过程(包含极低流量、低流量)。

汛期径流起伏变化较大,流量过程类型较多,根据高、低流量过程将流量需求类型划分为基本流量需求和适宜流量需求,满足基本流量需求和适宜流量需求的天数 D_{FB} 和 D_{FS} 分别为

$$D_{FB} = \sum_i \text{sgn} Q_{FB,i} \quad (3)$$

$$D_{FS} = \sum_i \text{sgn} Q_{FS,i} \quad (4)$$

$$\text{sgn} Q_{FB,i} = \begin{cases} 1 & Q_{F,i-1}, Q_{F,i}, Q_{F,i+1} \geq Q_E \\ & \text{且 } Q_{F,i-1}, Q_{F,i}, Q_{F,i+1} \in S_{LF} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{sgn} Q_{FS,i} = \begin{cases} 1 & Q_{F,i-1}, Q_{F,i}, Q_{F,i+1} \geq Q_E \\ & \text{且 } Q_{F,i-1}, Q_{F,i}, Q_{NF,i+1} \in S_{HF} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: $Q_{F,i}$ 为汛期第 i 天的流量; S_{HF} 为高流量脉冲或高流量过程(包含大洪水、小洪水)。

计算汛期达标天数 D_F 时,引入流量需求比例系数 Δ 和保障率降低系数 α :

$$\Delta = D_{FS}/D_{FB} \quad (5)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \Delta \geq 50\% \text{ 且 } t \geq 1 \\ \alpha_1 & \Delta < 50\% \text{ 且 } t \geq 1 \\ \alpha_2 & \Delta \geq 50\% \text{ 且 } t < 1 \\ \alpha_1 \alpha_2 & \Delta < 50\% \text{ 且 } t < 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$D_F = \alpha \sum_i \text{sgn} Q_{F,i} \quad (7)$$

式中: α_1 、 α_2 为不同条件下的保障率降低系数; t 为洪水次数。

2 实例应用

抚河流域地处 $26^{\circ}30'N \sim 28^{\circ}50'N$ 、 $115^{\circ}35'E \sim 117^{\circ}09'E$ 之间,位于江西省东部,隶属于鄱阳湖水系,是长江鄱阳湖流域第二大入湖支流,流域面积 15811 km^2 。抚州以下至南昌为抚河下游(图1),于进贤县三阳村入鄱阳湖,干流长 114 km ,最大河宽为 0.9 km 。抚河下游属亚热带湿润季风气候,气候湿润,雨量充沛,四季分明。其径流主要依靠降雨补给,多年平均降水量为 1722.7 mm ,多年平均蒸发量为 1271.6 mm ,年内降雨主要集中在汛期(3—7月),汛期降水量约占全年的 66.88% 。流域水量

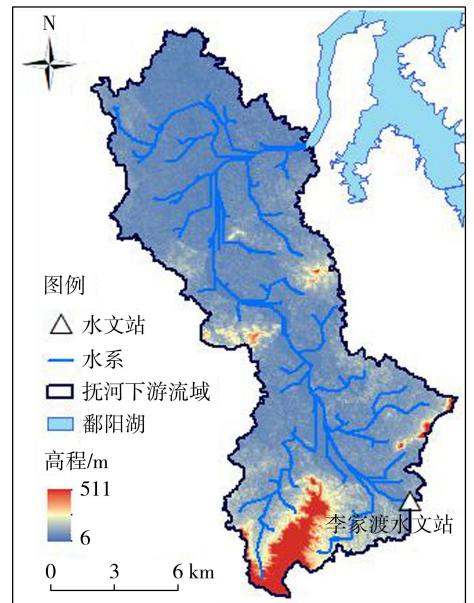


图1 抚河下游流域概况

Fig.1 Overview of the lower Fuhe River Basin

丰富,多年平均径流量为406 m³/s,全年径流量主要集中在汛期,3—7 月径流量约占年径流量的 74.02%,8 月至次年 2 月为非汛期,其径流量约占年径流量的 25.98%。

抚河下游控制站为李家渡水文站,集水面积 1 581 km²,河长 278 km。本文基础数据主要来源于李家渡水文站 1953—2022 年日尺度实测径流资料,数据具有较高的可靠性和代表性。

2.1 生态流量水文集合

根据 P-Ⅲ型水文频率曲线将抚河下游 1953—2022 年的径流序列划分为丰水年组(共 17 年)、平水年组(共 36 年)、枯水年组(共 17 年)。

采用历时曲线法、月流量变动法、年内展布法、Lyon 法、改进的 7Q10 法、多年日流量排频法、逐月最小生态流量法等 7 种水文学法,对李家渡水文站历史径流数据进行分析计算,生态流量计算结果如图 2 所示。总体来看,7 种方法计算的生态流量分布规律与多年平均流量基本一致,体现了生态流量随季节性降雨补给或径流亏缺的变化特征,同时也与 Tennant 法描述的河流中生物群落在繁殖季节(鱼类产卵和育苗季节)和一般用水季节的实际需水量变化相吻合。从全年时间尺度来看,各水情年组 7 种方法计算中,Lyon 法的年均生态流量结果最大,多年日流量排频法的结果最小。从年内时间尺度来看,各水情年组汛期外包线均为 Lyon 法结果,内包线则由历时曲线法、多年日流量排频法、逐月最小生态流量法结果共同构成;非汛期外包线均为月流量变动法结果,内包线均为多年日流量排频法结果。

图 2 中 7 种方法计算得出的丰、平、枯水年组年均生态流量标准差分别为 49. 06、34. 40、28. 75 m³/s,年内各月生态流量标准差分别为 35. 75 ~ 147. 60、16. 95 ~ 107. 88、11. 57 ~ 65. 54 m³/s,呈现出较大的离散程度。这主要源于不同方法的计算原理差异,有的方法侧重于保障枯

水年的河流生态,而有的方法侧重于保障出现概率较高的平、丰水年河流生态,不同计算方法对河流水情变化的适应性表现出一定的差异。如月流量变动法和 Lyon 法根据年内各月径流情况,采取相应固定的流量需求比例确定生态流量;多年日流量排频法通过选取各月固定频率的日径流量作为生态流量,三者均未充分考虑河流生态系统的复杂性和动态性,对年内径流变化显著的河流适应性较差。年内展布法和历时曲线法虽然均根据实际径流确定流量需求比例系数,得到生态流量,但前者易受到极端水情的干扰,而后者无法准确反映非季节性河流的生态需求。改进的 7Q10 法和逐月最小生态流量法从最枯水情的角度定义生态流量,更侧重于枯水期的生态保障,可能导致汛期生态流量值偏低。

由此可见,上述 7 种生态流量计算方法各有优点和不足,因此将不同方法的计算结果作为生态流量基础水文集合,以降低单一方法带来的误差和不确定性,提高整体计算结果的可靠性。

2.2 生态流量阈值下限及理想值

各方法对年际水情变化的适应程度不一致,对极端水文事件的兼顾程度存在差异。为使各水情年组生态流量适应年内丰枯变化,汛期选取 7 种水文学法计算得到的基础水文集合的中位数作为生态流量阈值下限,非汛期选取水文集合的下四分位数作为生态流量阈值下限;将丰、平水年组的计算结果分别作为平、枯水年组的生态流量理想值。生态流量阈值下限和理想值及其在径流中的占比如图 3 所示,抚河下游丰、平、枯水年组生态流量阈值下限的平均值分别为 156. 49、90. 43、29. 54 m³/s,汛期生态流量阈值下限均值分别为 313. 27、171. 00、56. 41 m³/s,非汛期生态流量阈值下限均值分别为 46. 74、32. 88、10. 34 m³/s。丰水年组汛期与非汛期生态流量阈值下限的倍比较大,达到 6. 7 倍,而平、枯水年组阈值下限的倍比相对较低,分别约为 5. 20、5. 45。平、枯水年组的生态流量理想值的年均值分

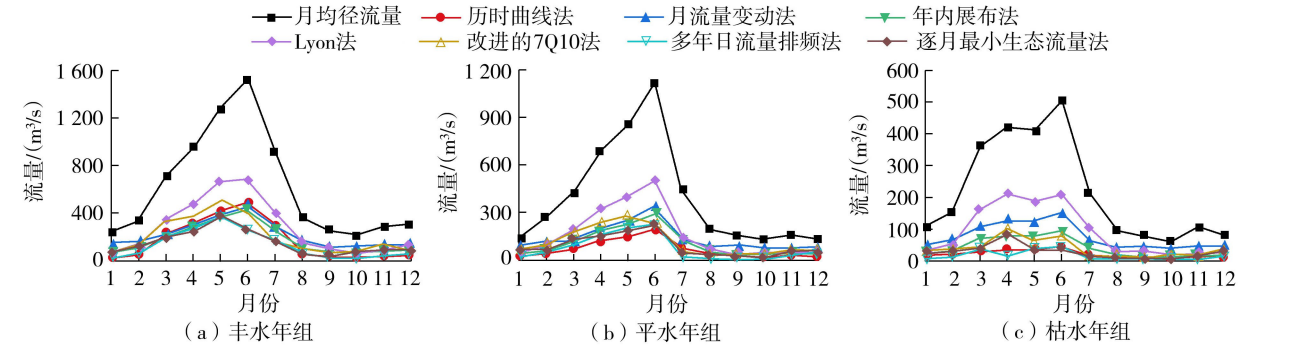


图 2 不同水情年组生态流量过程计算结果

Fig. 2 Calculation results of ecological flow process for different hydrological years

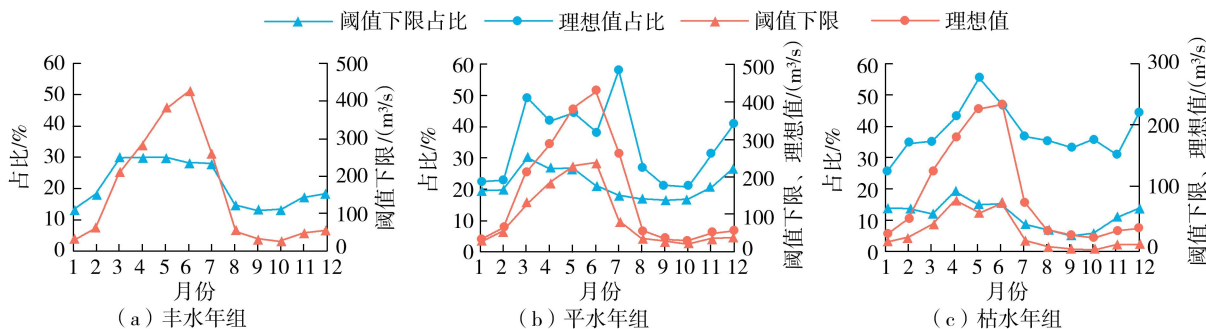


图3 不同水情年组生态流量阈值下限和理想值及其在径流中的占比

Fig.3 Lower limits of threshold and ideal values of ecological flow and their percentages in runoff for different hydrological years

别为 156.49、90.43 m^3/s ，平、枯水年组汛期均值分别为 313.27、171.00 m^3/s ，非汛期均值分别为 46.74、32.88 m^3/s 。

随着水情的丰枯变换，生态流量也随之发生变化，如图3所示，抚河下游生态流量呈起伏变化，各水情年组生态流量阈值下限、理想值最大值均出现在6月，最小值均出现在10月，这与各水情年组多年平均流量变化趋势一致。抚河下游丰、平、枯水年组汛期生态流量阈值下限均值占比分别为29.24%、24.31%、13.96%，非汛期均值占比分别为15.41%、19.12%、9.96%，汛期需求明显大于非汛期。非汛期平水年组生态流量阈值下限占比大于丰水年组，这是因为从生态角度来看，非汛期为一般用水期，生态用水需求相对汛期较少且更加稳定，丰、平水年组生态流量需求差距较小，加之丰水水情下非汛期径流量相对较大，导致其生态流量阈值下限占比相对较小。汛期平、枯水年组生态流量理想值均值占比分别为46.16%、43.49%；非汛期均值占比分别为26.40%、34.27%。

2.3 生态流量保障率计算

2.3.1 生态流量中长期保障率

结合流量历时曲线可得到抚河下游生态流量阈值下限中长期保障率。抚河下游丰、平水年组生态流量阈值下限年均中长期保障率较为接近，均在85%左右；枯水年组相对较低，约为77%。丰、平、枯水年组汛期生态流量阈值下限中长期保障率均值分别为84.13%、84.95%、79.36%，非汛期均值分别为87.54%、85.50%、76.26%。汛期丰水年组中长期保障率略小于平水年组，非汛期则相反，可能是由于丰水水情下汛期生态用水需求高于平水水情，非汛期生态用水需求降低，保证率提高。

由抚河下游年内生态流量阈值下限中长期保障率的变化趋势(图4)可知，中长期保障率在年内呈现动态波动变化特征。丰、平、枯水年组生态流量阈值下限中长期保障率最大值分别为91.91%、

98.03%、88.07%，分别出现在2月、12月、3月；最小值分别为77.30%、67.07%、63.64%，分别出现在6月、9月、7月。其中，丰、平水年组生态流量阈值下限中长期保障率1—5月较为稳定，汛期末端的6、7月两者出现差异，这是因为汛期丰水年组径流稳定性低于平水年组；8、9月丰、平水年组中长期保障率均呈现先升后降的特征，至10月，两者达到接近水平后中长期保障率有所提升。平水年组增加程度更大，这是因为在非汛期后段，平水年组的径流分配更加均匀。枯水年组中长期保障率总体上与丰水年组呈现相反特征，这与两者水文特征的差异有关。

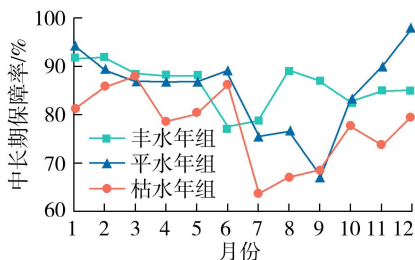


图4 生态流量阈值下限中长期保障率年内变化

Fig.4 Intra-annual variation of mid-long term guarantee rate of lower limit of ecological flow threshold

2.3.2 生态流量短期保障率

生态流量短期保障率与河道径流的动态变化密切相关，分别选取1961年、2001年、2008年作为抚河下游丰、平、枯典型水文年，对其极低流量、低流量、高流量脉冲、小洪水、大洪水的动态发展情况进行分析。抚河下游各典型水文年流量过程如图5所示，丰、平、枯典型年的流量过程以低流量为主，且均出现极低流量，持续时间分别为42、68、136 d，大洪水持续时间分别为20、4、3 d。由此可见，各典型年径流丰枯特征明显，随着抚河下游年际水情由丰转枯，极低流量的出现频率随之增大，其在枯水典型年是丰水典型年的3.2倍。

结合抚河下游径流变化特征，文中生态流量短期保障率的折减系数 α_1 、 α_2 分别设定为0.85和

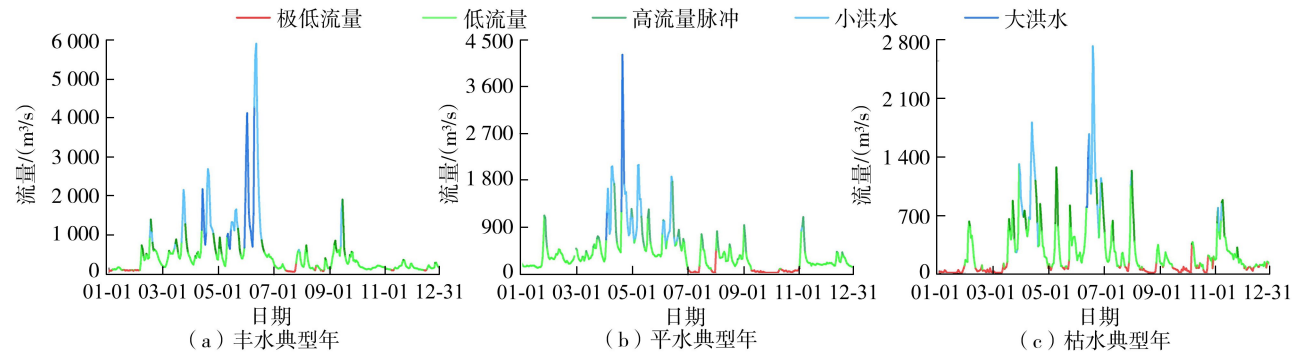


图5 典型水文年流量过程

Fig. 5 Flow processes in typical hydrological years

0.95。抚河下游丰、平、枯水年组生态流量阈值下限年均短期保障率分别为 73.84%、77.09%、62.70%；汛期短期保障率均值分别为 78.59%、79.34%、62.74%；非汛期短期保障率均值分别为 70.45%、75.48%、62.67%，总体呈汛期短期保障率大于非汛期的特征，汛期丰水年组与平水年组短期保障率较为接近，两者均大于枯水年组，平水年组短期保障率略大于丰水年组，这种差异在非汛期时有增大趋势，其主要受河流年内径流分布不均程度影响，在丰水水情下河流非汛期的径流不均匀程度更加剧烈。

抚河下游各水情年组生态流量阈值下限短期保障率区间为 42.50%~91.85%，其年内变化规律（图 6）与中长期保障率基本一致，反映了抚河下游生态保障率在不同尺度上保持相对稳定的变化趋势。但在汛期和非汛期过渡时段存在细微差异，丰、平水年组 7—8 月中长期保障率均呈上升趋势，短期保障率却呈下降趋势，说明 8 月作为非汛期的第一个月，其径流动态稳定程度相对较低。枯水年组汛期短期保障率与中长期保障率存在较大区别，这是由于在较枯水情下，高流量事件的恢复间隔相对较长，在高流量事件进程中低流量事件发生概率更高。

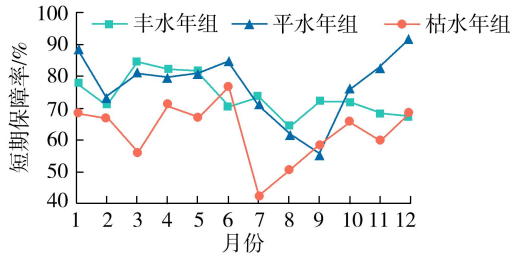


图6 生态流量阈值下限短期保障率年内变化

Fig. 6 Intra-annual variation of short-term guarantee rate of lower limit of ecological flow threshold

对抚河下游各月生态流量短期保障率进行分析，结果如图 7 所示。1953—2022 年全序列年内各月 $E_{GS} < 60\%$ 的占比较高，仅 8.82% 的年份全年各月

$E_{GS} > 60\%$ ，年内 $E_{GS} > 60\%$ 超过 4 月的年份约占全序列的 26.47%，年内出现 $E_{GS} < 10\%$ 的年份占比为 25%，年内出现 $E_{GS} = 0$ 的年份占比为 13.24%，可见抚河下游生态流量动态保障率较低。抚河下游 2019—2022 年生态流量短期保障率较低，2019 年、2022 年分别有 4 月和 3 月短期保障率为 0，且均集中在非汛期。这是因为受极端天气影响，鄱阳湖流域水文干旱化趋势加剧，河流生态难以保障。

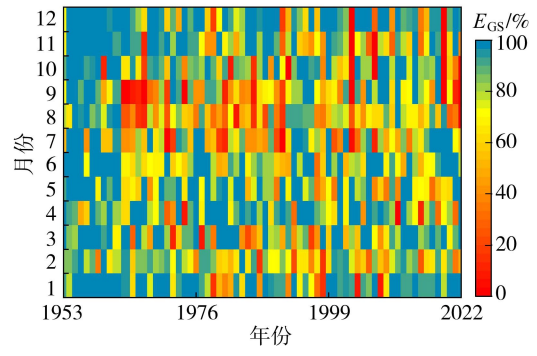


图7 抚河下游 1953—2022 年生态流量短期保障率分布

Fig. 7 Distribution of short-term guarantee rate of ecological flow in the lower Fuhe River from 1953 to 2022

3 讨论

3.1 生态流量阈值分析

生态流量应与河流周期性、季节性变化相适应，方可维持河流自然栖息地的天然水文状态。如图 2 所示，各水情年组年内月均径流的水文节律变化总体呈现 1—6 月逐月增加，7—10 月逐月减少，11—12 月小幅度上升的特征；5—6 月经流量增加程度由大到小为平、丰、枯水年组；各水情年组主峰均出现在 6 月，枯水年组 5 月出现折点，4—5 月经流量下降，4 月出现次峰；12 月经流呈现平、枯水年组下降、丰水年组上升的特征。这与基于水文集合分位数法的抚河下游年内生态流量阈值下限变化趋势基本一致（图 3）。

利用皮尔逊相关系数 R 在不同水文情景下对

生态流量阈值下限与天然径流进行相关性分析, R 越接近 1, 说明两者相关程度越高。相关性分析结果显示, 丰、平、枯水年组的天然径流与生态流量阈值下限的相关性系数 R 分别为 0.995 ($P<0.05$)、0.956 ($P<0.05$)、0.966 ($P<0.05$), 可见各水情年组生态流量阈值下限与天然径流均呈显著正相关关系。因此, 基于水文集合分位数法计算的生态流量阈值对天然河流季节性水情变化的适应性较强, 能够满足河流系统在不同水情下的生态用水需求。

Tennant 法依据观测资料建立流量和栖息地质量之间的关系, 以此确定生态流量。采用 Tennant 法推荐的生态流量占比评估生态流量理想值的状态等级, 抚河下游平、枯水年组生态流量理想值均处于“极好”或“非常好”的状态, 说明计算结果能够满足栖息地水生生物的优良生存条件。

3.2 生态流量保障率分析

受水文情势的影响, 不同地域河流生态系统表现出一定的差异, 因此同一种生态流量计算方法在不同河流中适应性不同。7 种水文学法计算的各水情年组生态流量保障率见表 1, 生态流量波动范围为 50.61 ~ 161.34 m³/s, 且生态流量保障率无论在中长期还是短期尺度下, 丰水、枯水年组的差值均较大, 如汛期、非汛期的丰、枯水年组生态流量中长期保障率差值分别为 23.85% ~ 42.02%、23.20 % ~

43.19%, 短期保障率差值分别为 42.05% ~ 52.08%、21.70% ~ 34.54%。基于水文集合分位数法计算结果中, 汛期丰、枯水年组生态流量中长期保障率差值为4.77%, 短期保障率差值为 15.85%; 非汛期丰、枯水年组生态流量中长期保障率差值为 11.28%, 短期保障率值为 7.78%。由此可见, 在由丰至枯的水情变化过程中, 基于基础水文学法计算的生态流量保障率逐级降低, 其原因在于这些方法未能全面考虑天然河流在年际尺度上的水情变化, 导致这种单一维度的计算方式在丰水年组容易低估实际生态流量, 在枯水年组则容易高估生态流量。而基于水文集合分位数法的生态流量计算方法, 通过在年际上划分丰、平、枯水年组, 根据其径流特点获取不同水情下的生态流量, 提高了计算的准确度, 也使得各种水情条件下不同时间尺度的生态流量保障率更为稳定。因此, 基于水文集合分位数法计算的生态流量对河流生态系统水情变化的动态适应性更强, 其计算原理科学可靠。

此外, 抚河下游径流在不同时间尺度下均表现出显著的不均匀特征, 其中年径流波动范围为 115.74 ~ 796.61 m³/s, 年内分配不均匀系数 C_v 范围为 0.91 ~ 2.73。通过相关性分析(表 2)发现, 抚河下游生态流量短期保障率与径流水文频率和年内分配不均匀系数均呈负相关关系。水文频率越高、月

表 1 不同水情年组生态流量保障率

Table 1 Ecological flow guarantee rates for different hydrological years								
方法	水情年组	生态流量/(m ³ /s)			生态流量中长期保障率/%		生态流量短期保障率/%	
		年组平均	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期
历时曲线法	丰水年组				92.02	76.94	88.96	57.83
	平水年组	140.27	215.97	86.20	78.82	62.59	71.90	49.89
	枯水年组				52.39	33.75	36.88	23.29
月流量变动法	丰水年组				92.60	85.43	89.77	67.99
	平水年组	115.74	205.61	51.55	80.11	79.02	73.38	67.62
	枯水年组				54.04	48.80	38.69	36.24
年内展布法	丰水年组				97.64	96.44	96.21	81.01
	平水年组	50.61	97.55	17.09	93.95	94.78	87.79	86.53
	枯水年组				73.79	73.24	54.16	59.31
Lyon 法	丰水年组				84.65	85.50	78.91	68.01
	平水年组	161.34	310.98	54.46	67.43	77.89	58.19	66.59
	枯水年组				42.63	47.65	27.78	35.14
改进的 7Q10 法	丰水年组				93.79	85.18	90.81	68.61
	平水年组	111.01	191.47	53.53	82.78	77.33	74.91	65.96
	枯水年组				57.69	46.49	41.75	34.94
多年日流量排频法	丰水年组				97.00	89.50	95.49	73.00
	平水年组	74.26	125.36	37.76	90.04	85.22	84.63	75.17
	枯水年组				66.34	57.08	50.31	44.25
逐月最小生态流量法	丰水年组				96.80	95.19	95.78	79.64
	平水年组	55.13	109.28	16.45	90.70	90.00	87.61	80.96
	枯水年组				69.03	67.66	53.54	54.44
水文集合分位数法	丰水年组	156.49	313.27	46.74	84.13	87.54	78.59	70.45
	平水年组	90.43	171.00	32.88	84.95	85.50	79.34	75.48
	枯水年组	29.54	56.41	10.34	79.36	76.26	62.74	62.67

内径流分配越不均匀,极端径流出现概率越大,这是导致抚河下游生态流量短期保障程度较低的主要原因之一。

表 2 生态流量短期保障率相关性分析

Table 2 Correlation analysis of short-term guarantee rate of ecological flow			
指标	皮尔逊相关系数		
	E_{GS}	C_V	水文频率
E_{GS}	1	-0.550 **	-0.362 **
C_V	-0.550 **	1	-0.057
水文频率	-0.362 **	-0.057	1

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

4 结 论

a. 不同水情年组抚河下游生态流量呈起伏变化,丰、平、枯水年组生态流量阈值下限的平均值分别为 156.49、90.43、29.54 m³/s,汛期生态流量均值占比分别为29.24%、24.31%、13.96%,非汛期生态流量均值占比分别为15.41%、19.12%、9.96%,汛期需求明显大于非汛期。

b. 水情变化下抚河下游丰、平、枯水年组生态流量阈值下限范围分别为 26.78 ~ 428.40、21.40 ~ 236.48、3.26 ~ 77.60 m³/s,以此确定平、枯水年组生态流量理想值,计算结果能够较好地适应天然河流水情变化,反映不同水文情景下的生态流量需求水平。

c. 受径流在时间上的不均匀性和人为调控的影响,在历史演变过程中以及年内动态条件下,抚河下游生态流量保障率均偏低,枯水年组生态流量保障率均明显低于丰、平水年组,且呈中长期保障率大于短期保障率的态势,中长期和短期保障率分别为 63.64% ~ 93.11%、42.50% ~ 91.85%。

d. 综合水情变化下生态流量阈值和其多尺度保障率的计算成果,更加符合天然水情动态条件下的河流生态流量,可以更精确地识别不同时间尺度下河流水文健康状况。

参考文献:

[1] 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))

[2] 贾卓,杨国华,张赫轩,等. 挠河流域地下水氮污染特征分析[J]. 环境污染与防治,2018,40(4):418-422.

(JIA Zhuo, YANG Guohua, ZHANG Hexuan, et al. Analysis of characteristics of groundwater nitrogen pollution in Naoli River Basin [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40 (4): 418-422. (in Chinese))

[3] 刘瑞艳,张建华,刘凌,等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):42-49. (LIU Ruiyan,ZHANG Jianhua, LIU Ling,et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(2):42-49. (in Chinese))

[4] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):1-9. (in Chinese))

[5] 张璞,刘欢,胡鹏,等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. 水资源保护,2022,38(2):176-182. (ZHANG Pu, LIU Huan, HU Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (2): 176-182. (in Chinese))

[6] 田熊长,蒋水华,贾卓,等. 基于 KH-SVM 的鄱阳湖水质评价及变化趋势分析[J]. 环境工程,2023,41(1):72-78. (TIAN Xiongchang,JIANG Shuihua, JIA Zhuo, et al. Water quality evaluation and change trend analysis of the Poyang Lake based on KH-SVM [J]. Environmental Engineering,2023,41(1):72-78. (in Chinese))

[7] 阿膺兰,胡鹏,曾庆慧,等. 基于底栖动物响应特征的洮儿河生态流量目标适应性分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):253-260. (A Yinglan,HU Peng,ZENG Qinghui,et al. Adaptability analysis of ecological flow based on response characteristics of benthos in the Taoer River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 253-260. (in Chinese))

[8] 戴凌全,张培培,常曼琪,等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):38-45. (DAI Lingquan,ZHANG Peipei,CHANG Manqi, et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):38-45. (in Chinese))

[9] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers

- [J]. River Research and Applications, 2003, 19 (5/6): 397-441.
- [10] 武连洲,白涛,黄强. 基于 RVA 阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J]. 水资源保护, 2022, 38 (6): 168-174. (WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6): 168-174. (in Chinese))
- [11] 李阳,邹进,张雷,等. 基于水文学法的小流域生态流量研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41 (8): 52-55. (LI Yang, ZOU Jin, ZHANG Lei, et al. Study on ecological flow of small watershed based on hydrological method[J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (8): 52-55. (in Chinese))
- [12] QU Jiamei, DING Xiaowen, SANG Jing, et al. A comprehensive ecological flow calculation for a small hydropower development river: a case study [J]. Hydrological Processes, 2022, 36(12): e14772.
- [13] 冯平,白粟,张婷,等. 径流变异对漳沱河流域水库生态调度的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 99-108. (FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 99-108. (in Chinese))
- [14] 黄显峰,钟婧玮,方国华,等. 基于 ME-Tennant 法的河道生态流量过程评价模型研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (2): 20-26. (HUANG Xianfeng, ZHONG Jingwei, FANG Guohua, et al. Evaluation of ecological flow process of river by coupling matter element analysis and Tennant method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 20-26. (in Chinese))
- [15] HU Wentong, GU Wenquan, MIAO Donghao, et al. Research on the ecological flow and water replenishment thresholds for diversion rivers based on the MC-LOR algorithm [J]. Water Resources Management, 2022, 36 (14): 5353-5369.
- [16] YU Jiandong, YU Shouchao, ZHANG Hengjia, et al. Determination of ecological flow thresholds for rainfall-recharging rivers based on multiple hydrological methods [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1116633.
- [17] 李梦瑶,付兴涛. 汾河中游河道生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33 (2): 45-53. (LI Mengyao, FU Xingtiao. Analysis on ecological flow in the middle reaches of Fen River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 45-53. (in Chinese))
- [18] 童心,刘冀,彭涛,等. 基于水文学法的雅砻江中游河段生态流量研究[J]. 人民长江, 2022, 53 (8): 58-64. (TONG Xin, LIU Ji, PENG Tao, et al. Research on ecological flow of middle Yalong River based on hydrological methods [J]. Yangtze River, 2022, 53 (8): 58-64. (in Chinese))
- [19] ZHANG Xiang, MENG Yu, XIA Jun, et al. A combined model for river health evaluation based upon the physical, chemical, and biological elements [J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 416-424.
- [20] 李千珣,郭生练,邓乐乐,等. 清江最小和适宜生态流量的计算与评价[J]. 水文, 2021, 41 (2): 14-19. (LI Qianxun, GUO Shenglian, DENG Lele, et al. Calculation and evaluation of minimum and suitable ecological flows of Qingjiang River[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41 (2): 14-19. (in Chinese))
- [21] 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]. Science of the Total Environment, 2016, 559: 317-325.
- [22] 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. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 119-126. (in Chinese))
- [23] OPDYKE D R, OBORNY E L, VAUGHS S K, et al. Texas environmental flow standards and the hydrology-based environmental flow regime methodology [J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(3/4): 820-830.
- [24] 牛丽霞,管仪庆,葛捍东,等. 生态环境需水量对芹山水电站发电效益的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27 (2): 29-33. (NIU Lixia, GUAN Yiqing, GE Handong, et al. Effect of eco-environmental water demand to on electricity benefit of Qinshan Hydropower Station [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 29-33. (in Chinese))
- [25] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2): 8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2): 8-14. (in Chinese))
- [26] 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. (YU Longjuan, XIA Ziqiang, DU Xiaoshun. Connotation of minimum ecological runoff and its calculation method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(1): 18-22. (in Chinese))
- [27] GUAN Xinjian, ZHANG Yiming, MENG Yu, et al. Study on the theories and methods of ecological flow guarantee rate index under different time scales [J]. Science of the Total Environment, 2021, 771: 145378.

(下转第 156 页)

- [28] 吴丹,向筱茜,冀晨辉. 京津冀水资源与产业结构优化适配模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):20-26. (WU Dan, XIANG Xiaoqian, JI Chenhui. Adaptation model between water resources and industrial structure optimization in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(2):20-26. (in Chinese))
- [29] 余柯瑶,李志刚,杨舒惠,等. 异质型环境规制对长江经济带高质量发展的影响及差异[J]. 经济地理,2023,43(10):34-43. (YU Keyao, LI Zhigang, YANG Shuhui, et al. Impact and difference of heterogeneous environmental regulations on the high-quality development of the Yangtze River economic belt [J]. Economic Geography, 2023, 43(10):34-43. (in Chinese))
- [30] 李佳佳,郭雅娟,刘嘉彤. 环境规制、外商直接投资与环境污染:基于中国城市面板数据的实证分析[J]. 经济问题,2022(12):45-52. (LI Jiajia, GUO Yajuan, LIU Jiatong. Environmental regulation, foreign direct investment and environmental pollution: empirical analysis based on China's urban panel data [J]. On Economic Problems, 2022(12):45-52. (in Chinese))
- [31] 胡德秀,刘子晨,刘铁龙,等. 陕西省渭河流域用水效率时空差异性分析[J]. 人民黄河,2020,42(8):56-61. (HU Dexiu, LIU Zichen, LIU Tielong, et al. Analysis on spatial-temporal difference of water use efficiency in Weihe River Basin of Shaanxi Province [J]. Yellow River, 2020,42(8):56-61. (in Chinese))
- [32] 佟金萍,马剑锋,刘高峰. 基于完全分解模型的中国万元 GDP 用水量变动及因素分析[J]. 资源科学,2011,33(10):1870-1876. (TONG Jinping, MA Jianfeng, LIU Gaofeng. Analysis of variations and factors of water use amount per ten thousand yuan GDP in China based on a complete decomposition model [J]. Resources Science, 2011,33(10):1870-1876. (in Chinese))
- [33] 刘建民,薛妍. 财政分权与经济高质量发展:基于环境规制的“U型”调节效应[J]. 河北大学学报(哲学社会科学版),2021,46(1):58-67. (LIU Jianmin, XUE Yan. Fiscal decentralization and high-quality economic development: “U-shaped” regulatory effect based on environmental regulation [J]. Journal of Hebei University (Philosophy and Social Science), 2021, 46(1):58-67. (in Chinese))
- [34] 高长海,王锋. 地方政府生态保护力度如何影响经济高质量发展? [J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(3):177-191. (GAO Changhai, WANG Feng. How do the local governments' ecological protection efforts affect high-quality economic development? [J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(3):177-191. (in Chinese))
- [35] 姚鹏,梁琼云,杜曙光. 水资源与产业高质量发展:政策演进、互动机理及发展路径[J]. 学习与实践,2023(8):86-95. (YAO Peng, LIANG Qiongyun, DU Shuguang. Water resources and high-quality industrial development: policy evolution, interaction mechanism and development path [J]. Study and Practice, 2023(8):86-95. (in Chinese))
- [36] 岳立柱,张家伟,韩荣腾. 2011—2021 年黄河中游城市群高质量发展与水资源保护利用耦合关系[J]. 水土保持通报,2023,43(6):421-433. (YUE Lizhu, ZHANG Jiawei, HAN Rongteng. Coupling coordination relationship between high-quality development and water resource protection and utilization in urban agglomerations of middle reaches of Yellow River from 2011 to 2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6):421-433. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-21 编辑:施业)

(上接第 136 页)

- [28] 刘静,郑红星,戴向前. 随机流量历时曲线及其在生态流量计算中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(3):118-123. (LIU Jing, ZHENG Hongxing, DAI Xiangqian. Stochastic flow duration curve and its application in ecological instream flow estimation in the Songhuajiang Basin [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(3):118-123. (in Chinese))
- [29] BELMAR O, VILA-MARTÍNEZ N, IBÁÑEZ C, et al. Linking fish-based biological indicators with hydrological dynamics in a Mediterranean river: relevance for environmental flow regimes [J]. Ecological Indicators, 2018,95:492-501.
- [30] RICHTER B D, WARNER A T, MEYER J L, et al. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations [J]. River Research and Applications, 2006,22(3):297-318.
- [31] 史名洋,黄伟,王卓微,等. 基于功能流量法的抚河流域关键水文指标确定研究[J]. 水电能源科学,2022,40(10):22-25. (SHI Mingyang, HUANG Wei, WANG Zhuowei, et al. Study on determination of key hydrological indicators in Fuhe River Basin based on functional flow method [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(10):22-25. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-01 编辑:施业)