

基于生态水文变异特征的济南南部山区河流生态需水研究

李洪涛¹, 赵龙², 李丹³, 张健先², 王延明⁴, 李成亮⁵

(1.济南市水文中心, 山东 济南 250000; 2.山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 3.山东省水文中心, 山东 济南 250000; 4.山东农业大学勘察设计研究院, 山东 泰安 271018; 5.山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 开展基于生态水文变异特征的山东省济南市南部山区河流生态需水研究, 为区域水资源综合管理和生态保护, 加强黄河流域生态保护, 促进黄河流域可持续发展提供理论依据。[方法] 收集1979—2021年黄河下游济南南部山区的固山站(北大沙河)和卧虎山站(玉符河)的径流量数据, 采用累积距平法, Mann-Kendall(M-K)检验法, 滑动T检验法, 双累积曲线法多种统计分析方法, 分析径流突变点; 结合IHA-RVA法, 研究济南南部山区河流径流变异特征和生态需水; 通过分析河流生态需水满足度, 研究区域生态水文和生态需水变异的主要影响因素, 提出济南南部山区生态需水的保障措施。[结果] 北大沙河和玉符河的径流量突变点为1996年, 整体水文改变度分别为72.75%和69.42%, 均属高度改变; 北大沙河和玉符河的年生态需水分别为 1.47×10^6 , 1.81×10^6 m³。总体上, 北大沙河月生态需水满足度平均为32.35%, 玉符河月生态需水满足度平均为60.42%。[结论] 济南南部山区在突变前后水文变异较大, 总体的生态需水满足度整体偏低, 可从河流生态调度和提高水资源利用效率方面加强河流生态需水保障。

关键词: 济南南部山区; IHA-RVA法; 生态水文变异度; 生态需水; 保障措施

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0371-12

中图分类号: TV213.4

文献参数: 李洪涛, 赵龙, 李丹, 等. 基于生态水文变异特征的济南南部山区河流生态需水研究[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 371-382. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240715.001; Li Hongtao, Zhao Long, Li Dan, et al. Ecological water demand of rivers in southern mountainous area of Jinan based on characteristics of ecohydrological variation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 371-382.

Ecological Water Demand of Rivers in Southern Mountainous Area of Jinan Based on Characteristics of Ecohydrological Variation

Li Hongtao¹, Zhao Long², Li Dan³, Zhang Jianxian², Wang Yanming⁴, Li Chengliang⁵

(1. Hydrological Center of Jinan City, Jinan, Shandong 250000, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University,

Taian, Shandong 271018, China; 3. Hydrological Center of Shandong Province, Jinan, Shandong

250000; 4. Shan Dong Agriculture University Survey and Design Institute, Taian, Shandong 271018, China;

5. Faculty of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] The study of river ecological water demand in the southern mountain area of Jinan City, Shandong Province based on ecohydrological variation characteristics was carried out to provide theoretical basis for regional water resources integrated management and ecological protection, strengthening ecological protection, and promoting sustainable development of the Yellow River basin. [Methods] The runoff data from Gushan station (Beidasha River) and Wohushan station (Yufu River) in the southern

收稿日期: 2024-02-28

修回日期: 2024-05-10

资助项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目“北方丘陵山区下小流域土壤氮磷流失规律及模型模拟研究”(IWHR-SKL-202219); 教育部产学合作协同育人项目(201902211016; 202101284013); 水利部专项支撑计划水资源费项目(WE0149B052020)

第一作者: 李洪涛(1979—), 男(汉族), 山东省兰陵县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面的研究。Email: lioak@sina.com。

通信作者: 王延明(1990—), 男(汉族), 山东省高唐县人, 本科, 工程师, 主要从事水土保持和水资源保护的设计和咨询。Email: wangyanming2024@163.com。

李成亮(1976—), 男(汉族), 山东省昌乐县人, 博士, 教授, 主要从事新型肥料应用及环境效应方面的研究。Email: chlli@sdau.edu.cn。

mountainous area of Jinan, located in the lower reaches of the Yellow River, were collected for the period 1979 to 2021. The study utilized the cumulative anomaly method, Mann-Kendall (M-K) test method, sliding T-test method, and double accumulation curve method to analyse abrupt changes in runoff. The IHA-RVA method was additionally used to examine variations in river runoff and ecological water demand. By comparing the rivers' satisfaction with ecological water demand, this paper investigated key factors influencing the regional ecohydrology and variations in ecological water demand while proposing protective measures to ensure adequate supply within the study area. [Results] The runoff mutation points of Beidasha River and Yufu River were observed in 1996, and the overall hydrological alteration degrees were determined to be 72.75% and 69.42%, respectively, indicating significant alterations in both rivers. The annual ecological water demand of Beidasha River and Yufu River was $1.47 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $1.81 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively. Overall, the monthly ecological water demand satisfaction of the Beidasha River and Yufu River was 32.35% and 60.42% on average, respectively. [Conclusion] The hydrological variation in the southern mountainous area of Jinan was found to be large before and after the mutation, and the overall satisfaction of the ecological water demand was relatively low. The ecological water demand of rivers may be guaranteed by strengthening the ecological regulation of rivers and improving the efficiency of water resource utilisation.

Keywords: southern mountainous area of Jinan City of Shandong Province; IHA-RVA method; eco-hydrological variability; ecological water demand; safeguard measure

河流生态需水是维持河流生态环境的最基本需水量,也是维持河流自然环境与社会环境均衡所需要的基本水量,在生态系统中发挥至关重要的作用。近年来,全球气候的变化和人类活动的加剧造成了水资源不合理开发利用,进而出现河流水资源短缺、水污染严重,生态需水量无法得到保障等问题,直接影响河流生态系统的正常运转,破坏了生物多样性,甚至导致生态系统的崩溃^[1-3]。2021年水利部明确指出,新阶段水利工作的主题旨在推动高质量发展,其中,复苏河湖生态环境是推动高质量发展的6条路径之一。河流生态需水研究引起了广泛关注^[4-6],水文变异条件下的河流生态需水量的确定是目前亟待解决的问题,对水资源的可持续利用和河湖生态环境的复苏具有重要的现实意义。随着学者对河流生态需水量计算方法的深入研究和不断完善,目前河流生态需水量的计算方法已超过200种,传统方法从类型上主要划分为水文学法(Tennant法、Texa法、7Q10法、NGPRP法、基本流量法等)、水力学法(湿周法、R2CROSS法)、栖息地法(IFIM法、Basque法、CA-SIMIR法)和综合法(BBM法、整体评价法)等^[7]。传统方法在计算生态水量方面得到了广泛运用,如贾小俊^[8]采用Tennant法计算了塔里木河的生态需水量,张叶等^[9]采用湿周法中的斜率法,计算了济南西南部山区创新谷内中小型河流的生态流量,提出宽深比相对较小、横断面为抛物线形的河道断面使用湿周法计算生态流量时应用效果较好。皇甫欣予^[10]采用Tennant法、Qp法、频率曲线法、年内展布法、月

流量变动法计算曹娥江的生态流量,推荐月流量变动法作为适宜生态流量的计算方法。传统方法在国内外河流的应用效果较好,但目前河流生态需水量的计算方法缺乏对河流水文情势整体的考虑^[11]。近年来,受到气候变化和人类活动的影响,许多河流径流序列发生了不同程度的变化,其一致性往往难以保证,使得一些生态需水量的计算方法不再直接适用^[12]。马晓超^[13]发现在RVA算法说明中,当河流水文情势未受到影响时,河流的流量均值应在RVA目标值差值的50%左右变动,提出了基于RVA法的生态需水估算方法,并且将该方法结果与其他河流典型断面已有研究成果进行对比后,发现RVA法与Tennant法计算结果在渭河流域上基本一致性。赖敬明^[14]采用基于RVA法的生态需水计算方法计算了金沙江支流云龙水库的生态需水量,认为该方法计算过程简便,计算结果可靠,适用于水文变异较大的河流生态需水研究。本研究拟采用该方法进行济南南部山区北大沙河和玉符河河流生态需水量的计算。

济南南部山区位于山东省济南市南部,是济南市重要的水源涵养区,泉群“补给区”,城市的“绿肺”,天然生态屏障,其对保证泉群正常喷涌,维护生态系统稳定和平衡有重要作用^[15]。济南南部山区包括两大流域,分别为北大沙河与玉符河,为黄河下游的重要支流。1976—2003年,济南市泉群停喷现象严重,趵突泉最长连续停喷26d,济南南部山区河流径流锐减。随着城镇规模的扩张、工农业发展迅速、灌溉需

水量和城市供水量激增、地下水过度开采等一系列问题的出现,造成水资源短缺,河流水文变异程度进一步加剧^[16-17]。目前,对于济南南部山区的生态保护及修复方面研究较多,而关于河流生态需水的研究较少^[15]。为此,本研究侧重于采用 RVA 法对水文变异程度较大的济南南部山区河流进行生态需水研究,以期为流域水资源综合管理提供理论依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

济南南部山区(36°21'—36°40'N, 116°54'—117°17'E)位于山东省中部,为泰山余脉^[18],是济南城市生态系统中极其重要的组成部分,承担着重要的生态屏障作用。南部山区位于暖温带半湿润地区,在自然气候上属于典型的大陆性季风气候。济南南部山区包括两大流域,分别为北大沙河流域与玉符河流域。北大沙河起源于济南市武家庄乡,属黄河下游右岸支流,位于长清区东面,全长 54.3 km,多年平均

年径流量为 $7.60 \times 10^7 \text{ m}^3$,流域面积 584 km^2 。玉符河发源于济南南部泰山北麓的长城岭,最后注入黄河,全长 85.4 km,流域面积 751.3 km^2 ,属于黄河下游右岸支流。北大沙河和玉符河同属以汛期降雨为主要补给的季节性河流^[19-20]。

1.2 数据来源

研究基于 1979—2021 年北大沙河崮山水文站(36°29'N, 116°52'E),玉符河卧虎山水文站(36°30'N, 116°58'E)逐日实测径流量数据。数据来源于《黄河流域水文年鉴》。

2 研究方法

2.1 水文变异特征研究方法(IHA-RVA 法)

为评估水文情势变化,Richter 提出了水文改变指标(Indicators of hydrologic alteration, IHA)法,该体系包含 33 个指标^[21-22]。依据各指标对生态系统的影响,将指标分为 5 组。指标及其对应的生态系统影响详见表 1。

表 1 IHA 指标与其对生态系统的影响^[23]

Table 1 IHA indicator and its impact on ecosystem^[23]

组别	内容	水文改变指标(IHA)	生态影响
第 1 组	各月流量	各月流量中值	满足水生生物、陆地生物等的栖息要求、植物对土壤含水量的需求以及对水体理化性质造成影响
第 2 组	年极端流量强度和持续时间	年最大、最小 1, 3, 7, 30, 90 d 平均流量、零流量天数及基流指数	塑造多样的栖息地,连通河道与河漫滩,塑造河床形态、冲沙,清除外来物种
第 3 组	年极端流量发生时间	年最大、最小流量发生时间	触发生物生命活动
第 4 组	高、低流量的频率及延时	发生低流量、高流量的次数和低流量、高流量的平均延时	触发生物生命活动,塑造河道的自然形态,影响河床质粒径大小,保持栖息地连通性与物质交换
第 5 组	流量变化改变率及频率	流量平均减少率、增加率及每年流量逆转次数	清除外来物种,影响水体理化特征

注:基流指数指年最小 7 d 流量与日平均流量的比值,用以评价河川的基流特性。

变异范围法(range of variability approach, RVA)是在 IHA 法基础上发展的,常用来定量评估河流水文改变度的一种方法^[22-24]。

$$A_i = \left| \frac{e_i - e_0}{e_0} \right| \times 100\% \quad (e_0 = \gamma e_i) \quad (1)$$

式中: A_i 为指标变化度; e_i 表示第 i 个指标在变异后年份落在 RVA 阈值内的年数; e_0 表示第 i 个指标在变异后预期落入 RVA 阈值内的年数; γ 为受影响前生态指标落于生态目标阈值内的比例,本文取值为 50%; e_i 为变异后的序列总年数^[25]。

突变后总水文改变程度 A_0 为:

$$A_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} A_i^2 \right)} \quad (2)$$

式中:33 表示 IHA 法中的 33 个指标,为定性反映生

态水文指标变化程度,规定:当 $0\% \leq |A_i| < 33\%$ 时为低度改变,当 $33\% \leq |A_i| < 67\%$ 时为中等改变,当 $67\% \leq |A_i| \leq 100\%$ 时为高度改变。

2.2 基于 RVA 法的河流生态需水研究

基于 RVA 法的生态需水计算方法主要思路是通过规定流量指标的 RVA 阈值来计算河流的生态流量,通常认为,将 IHA 各指标发生位次的 75%,25% 的值作为 RVA 阈值,在河流水文情势未受到影响时,维持河流生态系统健康发展的河流流量是 RVA 阈值差值的 50%。基于 RVA 法的生态流量计算公式为^[13]:

$$E_i = 50\% \times (RVA_{i75\%} - RVA_{i25\%}) \quad (3)$$

式中: E_i 表示第 i 月的生态环境流量 (m^3/s); $RVA_{i75\%}$ 表示第 i 月的 RVA 阈值上限,即该月逐日径流量发生概率为 75% 的值 (m^3/s); $RVA_{i25\%}$ 表示

第 i 月的 RVA 阈值下限,即该月逐日径流量发生概率为 25% 的值 (m^3/s)。在确定生态流量后,经换算即可得到生态需水。

2.3 生态需水满足度计算方法

生态需水满足度是指某一时期某一河流流域径流可满足其生态需水的日数与该时期总日数之比。计算公式为^[13]:

$$\alpha_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} = \frac{\sum \text{sgn}(Q_{ijk} - Q_j)}{D} \quad (4)$$

式中: α_{ij} 表示第 i 年第 j 月的生态需水满足度; D_{ij} 指第 i 年第 j 月生态需水的满足天数; D 指第 i 年第 j 月的总天数。

$$\text{sgn}(Q_{ijk} - Q_j) = \begin{cases} 1 & (Q_{ijk} > Q_j) \\ 0 & (Q_{ijk} < Q_j) \end{cases} \quad (5)$$

表 2 崮山、卧虎山水文站年均流量突变检验结果

Table 2 Results of abrupt annual discharge at Gushan and Wohushan stations

水文站	不同检验方法的水文变异年份				变异年
	M-K 检验法	累积距平法	滑动 T 检验法	双累积曲线法	
崮山站	1988,1996,2001	1996,2002,2010	2002,2010	1996,2002	1996
卧虎山站	1996,2020	1993,1996,2003	1996,2005	1996	1996

(1) 北大沙河水文变异特征。突变后水文指标整体上发生较大改变(表 3),其中,8 个指标为高度改变,17 个指标为中度改变,8 个指标为低度改变。年最大值出现时间指标无明显变化,原因是该指标主要表征流域降水的年内分布,短时间内不会变化。①第 1 组指标(月均流量变化)。突变前后年内流量中值的变化情况如图 1 所示,突变前时期的流量整体上大于突变后时期的流量,表明在突变后,受到人类活动影响,北大沙河水文情势发生变化,径流量急剧减少^[26]。第 1 组的 12 项指标中,6 和 8 月份的流量中值属于低度改变,4,5,7,9,10 和 11 月份的流量中值属于中度改变,1,2,3 和 12 月份的流量中值属于高度改变。②第 2 组指标(年极值流量变化)。由表 3 可知,第 2 组的 12 个指标中,零流量天数指标变化最大,突变前平均值为 73 d,突变后平均值为 285 d。流量极值的整体改变度为 69.75%,为中度改变,一定程度上影响了济南南部山区北大沙河流域生态系统的稳定性。③第 3 组指标(年极端值出现时间变化):由表 3 和图 2 所示,极端流量出现时间较突变前趋于稳定,但趋势不明显。年最大径流的发生时间发生了一些变化,平均发生在 15.5 d 以后,年最大径流发生在较小的范围内,变化程度为 -40%,属于中等变化;年平均最小径流的发生有 156 d 的延迟,其变化程度为

式中: Q_{ijk} 指第 i 年第 j 月第 k 日的河流流量 (m^3/s); Q_j 表示第 i 年第 j 月的河流生态流量 (m^3/s)。

3 结果与分析

3.1 济南南部山区河流水文变异特征研究

3.1.1 水文序列突变性分析 对 1979—2021 年北大沙河和玉符河实测年径流量进行突变性分析,结果详见表 2。综合分析由 4 种方法计算的突变年份,确定突变年份为 1996 年。

3.1.2 河流水文变异特征研究 突变前为 1979—1996 年,突变后为 1997—2021 年,采用 IHA-RVA 法,分析北大沙河与玉符河径流量突变前后的指标变化情况,结果详见表 3—4。

—100%,变化程度最高。④第 4 组指标(年高低流量脉冲频次及历时):其中,低脉冲持续时间指标较突变前增加 119 d,改变度 -85.60%,属高度改变。突变之后,低脉冲次数逐渐增多。⑤第 5 组指标(变化次数及逆转率):该组指标中上升率为低度改变,下降率为高度改变,河道流量波动幅度增强,会对河流和河岸带生物产生较大影响。水流刺激会促使水生生物产卵,脉冲期会给水生植物提供足够的水分,而较弱的脉冲期会为水体强烈的水流提供能量。逆转次数为中度改变。变化次数及逆转率综合改变度为 74%,为高度改变。这表明济南南部山区北大沙河流域流量改变程度较高,生态系统处于不稳定的状态。

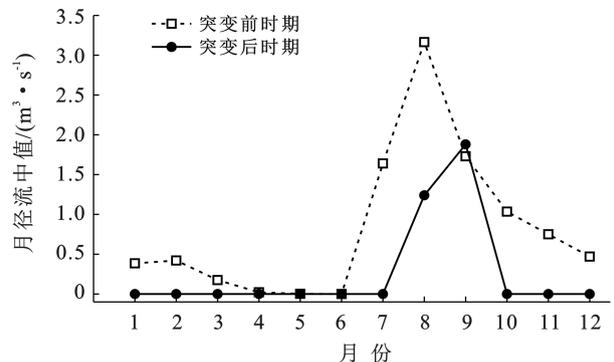


图 1 崮山水文站各月中值径流量

Fig.1 Monthly median runoff of Gushan station

表 3 崮山水文站的 33 个生态水文指标统计结果

Table 3 Statistical results of 33 ecological and hydrological indicators of Gushan station

指标组	指标序号	IHA 指标	变化前	变化后	RVA 阈值		水文改变度	
					下限	上限	数值	改变程度
第 1 组	1	10 月份中值	1.035	0.000	0.479	1.338	-52.00%	中
	2	11 月份中值	0.750	0.000	0.406	1.112	-64.00%	中
	3	12 月份中值	0.470	0.000	0.278	0.890	-88.00%	高
	4	1 月份中值	0.385	0.000	0.264	0.689	-88.00%	高
	5	2 月份中值	0.420	0.000	0.235	0.605	-88.00%	高
	6	3 月份中值	0.175	0.000	0.115	0.348	-88.00%	高
	7	4 月份中值	0.022	0.000	0.000	0.030	44.00%	中
	8	5 月份中值	0.002	0.000	0.000	0.029	44.00%	中
	9	6 月份中值	0.000	0.000	0.000	0.009	32.00%	低
	10	7 月份中值	1.642	0.000	0.056	2.888	-40.00%	中
	11	8 月份中值	3.165	1.240	1.135	4.207	-28.00%	低
	12	9 月份中值	1.734	1.880	0.762	2.725	-64.00%	中
第 2 组	13	1 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	38.46%	中
	14	3 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	38.46%	中
	15	7 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	38.46%	中
	16	30 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.001	44.00%	中
	17	90 d 最小值	0.002	0.000	0.000	0.029	44.00%	中
	18	1 d 最大值	29.851	42.900	7.694	55.632	32.00%	低
	19	3 d 最大值	17.214	21.380	5.965	31.721	32.00%	低
	20	7 d 最大值	10.433	15.670	4.742	24.664	56.00%	中
	21	30 d 最大值	5.292	6.677	2.551	11.812	44.00%	中
	22	90 d 最大值	3.663	2.809	1.278	6.609	20.00%	低
	23	零流量天数	73.000	285.000	23.260	94.380	-100.00%	高
	24	基流指数	0.000	0.000	0.000	0.000	38.46%	中
第 3 组	25	年最小值出现时间	119	275	111.300	144.500	-100.00%	高
	26	年最大值出现时间	209.5	225	201.800	215.900	-40.00%	中
第 4 组	27	低脉冲次数	1.000	1.000	1.000	1.731	2.86%	低
	28	低脉冲历时	69.000	188.000	47.031	88.382	-85.60%	高
	29	高脉冲次数	2.000	2.000	1.000	3.734	50.55%	中
	30	高脉冲历时	16.000	17.000	6.942	44.973	2.86%	低
第 5 组	31	上升率	0.153	0.712	0.075	0.497	-28.00%	低
	32	下降率	-0.095	-0.421	-0.117	-0.053	-88.00%	高
	33	逆转次数	27.000	16.000	21.000	56.982	-38.29%	中

注:零流量天数表示一年中流量为零的天数;高/低脉冲次数指标表示一年中流量高于/低于特定阈值的脉冲次数;高/低脉冲历时表示一年中流量高于/低于特定阈值的脉冲持续时间,超过 75%分位数的划分为高流量,低于 25%分位数的划分为低流量;上升率/下降率表示流量从一个特定阈值下降到另一个特定阈值所需的时间,反映河流流量对流量输入变化的响应速度的信息,低阈值一般采用河流年平均流量的 10%,高阈值一般采用河流年平均流量的 90%。表中流量单位均为 m³/s,时间单位为 d。

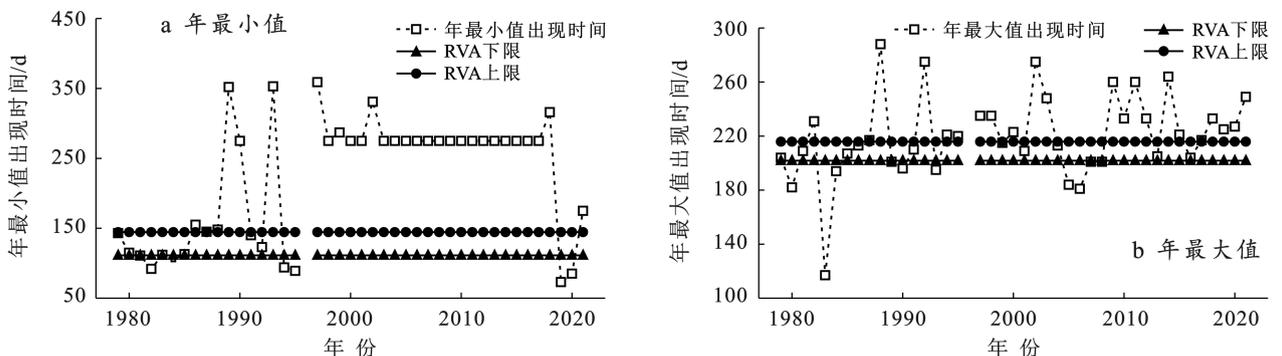


图 2 崮山水文站年最小值出现时间和年最大值出现时间过程

Fig.2 Process of occurrence time of annual minimum value and annual maximum value in Gushan station

(2) 玉符河水文变异特征。玉符河水文变异特征如表 4 所示。玉符河径流突变后,4 个生态水文指标为高度改变,7 个生态水文指标为中度改变,22 个生态水文指标为低度改变(表 4)。

表 4 卧虎山水文站的 33 个生态水文指标
Table 4 33 ecological and hydrological indexes of Wohushan station

指标组	指标序号	IHA 指标	变化前	变化后	变异范围(RVA)阈值		水文改变度	
					下限	上限	数值	改变程度
第一组	1	10 月份中值	0.502	1.180	0.000	1.557	20.00%	低
	2	11 月份中值	0.890	1.100	0.260	1.197	20.00%	低
	3	12 月份中值	0.820	0.942	0.220	1.038	-16.00%	低
	4	1 月份中值	0.570	0.771	0.136	0.907	-16.00%	低
	5	2 月份中值	0.570	0.580	0.000	0.754	-16.00%	低
	6	3 月份中值	0.042	1.120	0.000	0.460	-66.77%	中
	7	4 月份中值	0.061	1.265	0.000	0.665	-58.00%	中
	8	5 月份中值	0.225	1.400	0.0138	0.826	-52.00%	中
	9	6 月份中值	0.445	1.590	0.0243	0.787	-88.00%	高
	10	7 月份中值	0.275	1.100	0.000	1.198	-10.00%	低
	11	8 月份中值	1.035	1.320	0.254	3.202	92.00%	高
	12	9 月份中值	1.140	1.180	0.165	2.226	92.00%	高
第二组	13	1 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.00%	低
	14	3 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	-10.00%	低
	15	7 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	-28.00%	低
	16	30 d 最小值	0.000	0.000	0.000	0.000	-22.46%	低
	17	90 d 最小值	0.214	0.281	0.002	0.424	8.00%	低
	18	1 d 最大值	7.995	8.010	7.287	28.630	-16.00%	低
	19	3 d 最大值	7.857	7.817	7.194	28.510	-16.00%	低
	20	7 d 最大值	7.511	7.319	6.899	25.320	-28.00%	低
	21	30 d 最大值	5.428	4.203	4.603	10.860	-40.00%	中
	22	90 d 最大值	4.063	2.593	2.966	4.568	-76.00%	高
	23	零流量天数	92.000	60.000	60.050	181.400	-4.00%	低
	24	基流指数	0.000	0.000	0.000	0.000	-28.00%	低
第三组	25	年最小值出现时间	284.500	282.000	253.100	280.500	-52.00%	中
	26	年最大值出现时间	217.000	229.000	174.500	230.400	-40.00%	中
第四组	27	低脉冲次数	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.00%	低
	28	低脉冲历时	—	—	—	—	—	—
	29	高脉冲次数	4.500	4.000	3.000	6.000	17.00%	低
	30	高脉冲历时	11.750	10.500	9.270	16.460	-28.00%	低
第五组	31	上升率	0.385	0.053	0.210	0.718	-28.00%	低
	32	下降率	-0.143	-0.031	-0.307	-0.053	-40.00%	中
	33	逆转次数	27.000	30.000	21.270	31.000	13.14%	低

突变后的各月流量均值相较突变前有增加趋势,零流量天数指标变化程度较小,平均值由突变前的 92 d 变化为突变后的 60 d。年最大值、最小值出现时间并无明显变化。①第 1 组指标(月均流量变化)。突变前后年内径流中值的变化情况如图 3 所示,各月流量中值整体上呈现上升趋势,并且突变后的各月径流值均大于突变前。第 1 组包含的 12 个指标内,1,2,7,10,11 和 12 月份的月均径流变化中值属于低度改变,3,4,5 月份的月均径流变化中值属于中度改变,6,8,9 月份的月均径流变化中值达到了高度改

变。②第 2 组指标(年极值流量变化)。由表 4 所示,该组的 12 个指标中,30 d 最大值为中度改变,90 d 最大值为高度改变,其余指标均为低度改变。基流指数水文改变度为低度改变,研究结果显示,玉符河地下水互馈关系基本保持稳定。流量极值综合改变度为高改变度,表明济南南部山区玉符河极端流量事件为不稳定状态,影响济南南部山区生态系统的稳定性,突变后玉符河 90 d 最小值为 0.281 m³/s,北大沙河 90 d 最小值为零,且北大沙河和玉符河 1,3,7 和 30 d 最小值在突变前后都为零,说明北大沙河和玉符河在

突变后出现严重断流现象, 不利于河岸生态补水。③第 3 组指标(年极端值出现时间变化): 由表 4 和图 4 所示, 年最大值出现时间有一定的波动性, 其出现时间有一定的延迟, 平均滞后 12 d, 水文改变度为 -40%, 为中等改变; 年最小流量出现时间提前了 2.5 d, 水文改变度为 -52.00%, 为中度改变。极端值出现时间综合改变度为中度改变, 会对水生生物的栖息地产生影响。④第 4 组指标(年高低流量脉冲频次及历时)。在该组指标中, 高脉冲历时比突变前增加 1d, 改变度为 2.86%, 属于低度改变, 但低脉冲历时比突变前增加 119 d, 改变度为 -85.60%, 属于高度改变。低脉冲次数在突变后呈增加趋势, 且较为明显。⑤第 5 组指标(变化次数及逆转率)。由表 4 所示, 上升率属于低度改变, 下降率属于高度改变, 逆转次数为中度改变。

水流的振幅、频度增加, 从而对水生生物及河岸地带的生物、景观产生很大的影响。

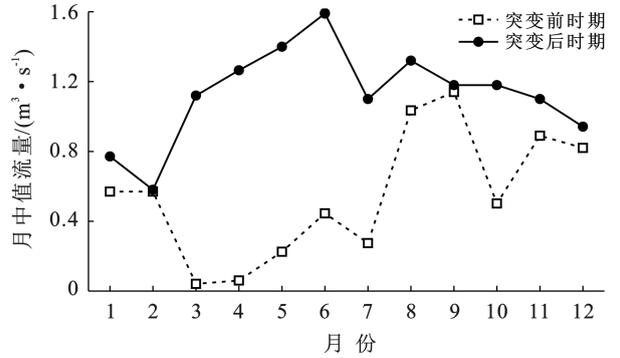


图 3 卧虎山水文站各月中值径流量
Fig.3 Monthly median runoff of hydrology station in Wohushan station

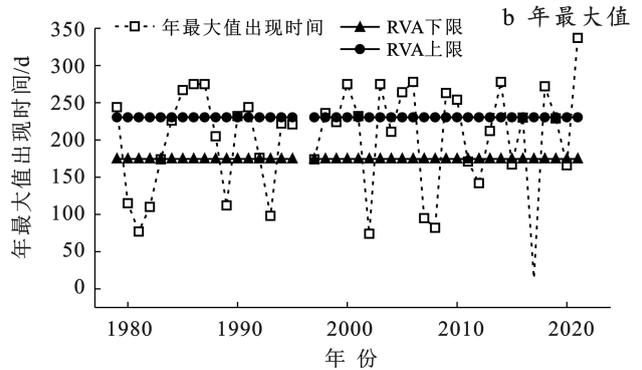
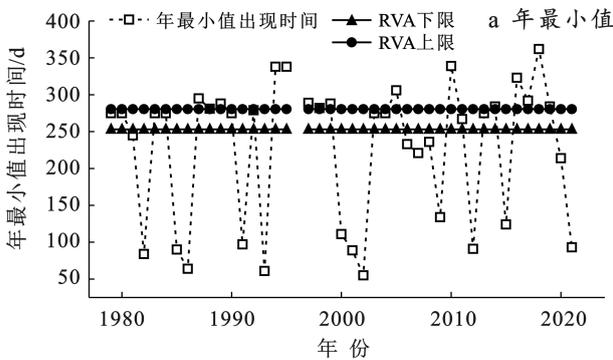


图 4 卧虎山水文站年最小值出现时间和年最大值出现时间过程

Fig.4 Process of occurrence time of annual minimum value and annual maximum value in Wohushan station

(3) 整体水文改变度。采用加权平均法, 分别计算北大沙河和玉符河各指标组水文改变度及整体水文改变度, 计算结果详见表 5。北大沙河各组指标的水文改变度均为高度改变; 玉符河第 1 组和第 2 组指标水文改变度为高度改变, 第 3 组和第 5 组指标水文改变度为中度改变, 第 4 组指标水文改变度为低度改变。水文变异后, 月平均径流量和年极端径流量发生显著变化。北大沙河和玉符河第 4 组指标水文改变度差异较大, 分别为 71.65% 和 11.25%, 主要原因是北大沙河和玉符河的低脉冲历时变化差异较大。玉符河低脉冲历时改变程度为 0, 这是由于玉符河低脉冲次数为 0, 即低脉冲历时较突变前没有变化。北大

沙河的低脉冲历时的改变度为 -85.60%, 为高度改变, 突变前该指标值基本处于 RVA 阈值内, 而突变后大部分年份都超过 RVA 阈值上限, 表明突变后北大沙河径流不稳定。由整体水文改变度的计算结果可知, 北大沙河及玉符河在受人类影响前后的整体水文改变度为 72.75% 和 69.42%, 均属高度改变, 其中北大沙河的 1, 2, 3 和 12 月均流量中值, 零流量天数, 年最小值出现时间, 低脉冲历时和下降率 8 个指标属于高度改变, 且突变前零流量天数为 73 d, 突变后零流量天数为 285 d; 玉符河的 6, 8 和 9 月均流量中值和 90 d 最大值属于高度改变, 说明北大沙河受人类活动的影响更为明显。

表 5 各水文站整体水文改变度
Table 5 Overall hydrologic change degree of each hydrologic station

水文站	各组水文改变度					整体水文改变度
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	
嵩山水文站	74.00	69.75	83.50	71.65	74.00	72.75
卧虎山水文站	72.92	67.75	46.00	11.25	35.33	69.42

注: 第 1 组为各月平均流量; 第 2 组为年极值流量; 第 3 组为年极端值出现时间; 第 4 组为年高低流量脉冲频次及历时; 第 5 组为变化次数及逆转率。

3.2 济南南部山区河流生态需水研究

3.2.1 河流生态需水计算 河流流量的显著变化会影响水生生物的栖息地环境,无法充分保证植物的土壤水分和陆生动物的供水;若年极端流量变化较大,则会影响湖泊、池塘、泛滥平原中植物群落的分布,从而对水生生态系统产生不利影响。

在济南南部山区生态水文特征分析的基础上,采用基于 RVA 法的生态需水量方法计算北大沙河和玉符河流域生态需水量。结果详见表 6。由表 6 可以看出,北大沙河和玉符河流域的生态流量分别为 $5.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $6.87 \text{ m}^3/\text{s}$,生态需水量分别为 $1.47 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $1.81 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

表 6 济南南部山区 RVA 法生态需水

Table 6 Ecological water demand by RVA method in southern mountain area of Jinan City

月份	北大沙河(崮山水文站)				玉符河(卧虎山水文站)			
	变异范围(RVA)		生态流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	生态需水/ (10^4 m^3)	变异范围(RVA)		生态流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	生态需水/ (10^4 m^3)
	下限	上限			下限	上限		
1	0.264	0.689	0.212	5.690	0.136	0.907	0.385	10.320
2	0.235	0.605	0.185	4.469	0.000	0.754	0.377	9.118
3	0.115	0.348	0.117	3.120	0.000	0.460	0.230	6.160
4	0.000	0.030	0.015	0.385	0.000	0.665	0.332	8.617
5	0.000	0.029	0.015	0.394	0.014	0.826	0.406	0.870
6	0.000	0.009	0.005	0.121	0.024	0.787	0.381	9.878
7	0.056	2.888	1.416	37.920	0.000	1.198	0.599	16.040
8	1.135	4.207	1.536	41.140	0.254	3.202	1.474	39.480
9	0.762	2.725	0.981	25.440	0.165	2.226	1.030	26.710
10	0.479	1.338	0.430	11.510	0.000	1.557	0.779	20.850
11	0.406	1.112	0.353	9.147	0.260	1.197	0.468	12.140
12	0.278	0.890	0.306	8.199	0.220	1.038	0.409	10.960
合计			5.570	147.534			6.871	181.134

3.2.2 河流生态需水满足度分析 基于 RVA 法的生态流量的计算结果,对北大沙河和玉符河 1979—1989,1990—2000,2001—2011,2012—2021 年 4 个时期的各月生态需水满足度进行分析,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,北大沙河月生态需水满足度平均值为 32.35%。1979—1989 年期间,北大沙河生态需水满足度较高,仅有 7 月份满足度低于 50%;1990—2011 年,生态需水满足度整体较小,仅在汛期能够满足 50% 保证率;2012—2021 年,各月均无法保证 50%

的生态需水满足度。玉符河月生态需水满足度平均为 60.42%。1979—1989 年月生态需水满足度平均为 47.42%,1990—2000 年月生态需水满足度平均为 63.75%,2001—2011 年月生态需水满足度平均为 71.33%,2012—2021 年月生态需水满足度平均为 59.12%。但存在反复波动,各个时期的生态需水满足度趋势不一致,1979—1989 年和 2012—2021 年的大致呈现上升—下降—上升的趋势,1990—2011 年的大致呈现下降—上升—下降的趋势。1979—1989 年和 2012 年之后的生态需水满足度低于 50%。

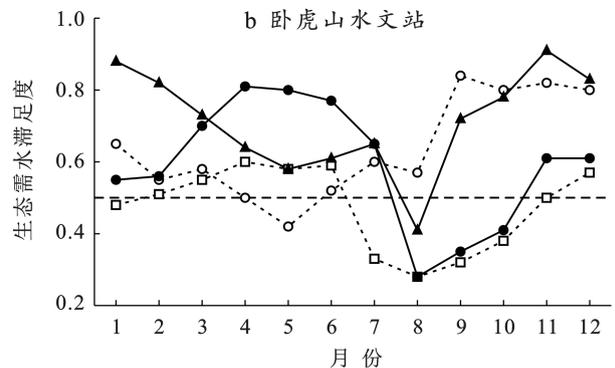
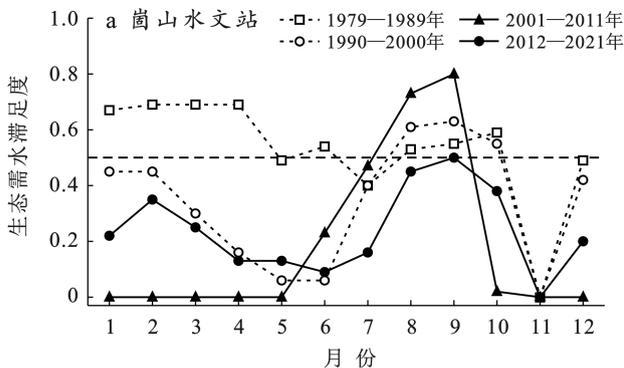


图 5 北大沙河(崮山水文站)、玉符河(卧虎山水文站)各月生态需水满足度

Fig.5 Monthly ecological water supply satisfaction index for Beidasha River (Gushan station) and Yufu River (Wohuhan station)

4 讨论

4.1 济南南部山区生态需水计算方法比较

根据1979—2021年北大沙河、玉符河43 a实测径流量资料,采用最枯月平均流量法研究北大沙河和玉符河生态流量,结果详见表7,两河流生态流量分别为0.38和6.91 m³/s,生态需水量分别为9.85×10⁴ m³和1.791×10⁶ m³。该方法每个月份的生态需水量相同,无法反映季节变化;在人类影响比较剧烈的流域使用该方法时,结果可靠性偏低^[27];玉符河的生态流量数值约为北大沙河的18倍,与实际情况不符。因此,该方法不适用于济南南部山区的生态需水研究。基于RVA法的生态需水计算方法从整体角度对河流的水文情势展开分析和研究,评估在人类活动等因素的影响下河流所需的生态需水量,更适合济南南部山区生态水文状况。

表7 最枯月平均流量法的生态流量及生态需水量
Table 7 Ecological discharge and ecological water demand using average discharge method in driest month

项目	崮山水文站		卧虎山水文站	
	生态流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	生态需水量/ (10 ⁴ m ³)	生态流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	生态需水量/ (10 ⁴ m ³)
数值	0.38	9.85	6.91	179.11

4.2 济南南部山区河流水文变异主要影响因素

根据济南南部山区的水文变异特征,北大沙河和玉符河的径流量突变年份为1996年。主要原因为1995年起,济南南部山区城镇规模扩张,这一现象增加了人类的水资源需求,使地区非透水面积增加,地表径流减少。1995—2003年,济南南部山区土地利用主要变化是由其他地类向建筑用地转化。转化来源主要是耕地,转化面积为10.4 km²,其次是林地,转化面积为4.9 km²^[28]。此外,20世纪90年代以来黄河下游遭遇了数百年一遇干旱灾害,造成河流断流^[29]。人类活动的加剧与气候条件的变化导致河流水文变异程度的加剧。

北大沙河地表水主要用于灌溉、工业和生活用水供给,建国后在北大沙河修建了一系列水利工程,包括东风水库[大(2)型水库]、石店水库(中型水库)、武家庄水库(中型水库)等。截至2022年,北大沙河上游段(张夏大桥以上)建有中型水库1座(石店水库)、小(1)型水库7座、小(2)型水库14座、塘坝105座,总拦蓄库容为3.30×10⁷ m³。水库建设与拦蓄使得下游的水文过程受到影响^[20]。据济南市第七次全国人口普查公报,北大沙河的人口密度较高,约为

500人/km²,玉符河的人口密度相对较低,约为300人/km²;从城乡人口比例上,北大沙河城乡比例约为6:4,玉符河城乡比例约为4:6。中国水资源公报显示,2021年中国城市用水量约为2.80×10¹¹ m³,而农村用水量约为6.00×10¹⁰ m³。城市用水量是农村用水量的4.7倍,导致北大沙河的取用水量大于玉符河。济南市政府在1994—2000年,对北大沙河进行了大规模的河道改造,截弯取直河道约20 km,缩短河道长度约10 km,加固堤坝约30 km,提高了防洪能力。但河道改造在带来了防洪能力提高等益处的同时,河流的自然流向发生改变,水流补给受到影响。由于以上原因,在高强度的人类活动影响下,导致北大沙河突变后第一组、第二组参数及RVA法下限出现大量零值,表明突变后10月至次年7月流量中值,90 d流量的最小值为零及25%位次下径流量的值也为零,与玉符河相比,断流情况更加严重。

4.3 济南南部山区生态需水保障措施

2001—2011年北大沙河生态需水满足度最低,仅汛期(7—9月)生态需水满足度大于50%,该时期北大沙河的水文情势极为严峻,无法满足生态需水的要求。2010年以来,山东省政府和济南市政府提出了严格控制城市用地向南部山区扩张发展,合理开发保护自然资源的相关政策,批准建立南部山区生态功能保护区,构建自然与城市和谐发展格局^[30]。2012—2021年,北大沙河的生态需水满足度明显提高,但各月生态需水满足度仅有9月能够达到50%,生态需水满足度状况远低于1990年前。与北大沙河相比,玉符河生态需水满足度较高。玉符河汛期生态需水满足度较非汛期低,主要原因是,济南南部山区夏季一般种植玉米,玉米需水量最大的时期通常是在抽雄期和灌浆期(7—9月),且8月份玉米需水量远高于7和9月^[31]。因此,济南南部山区居民在7—9月对河流的引水量会显著提高,导致河流流量无法满足河流生态需水的要求。整体上,济南南部山区北大沙河和玉符河生态需水满足度整体偏低,生态环境受到威胁和损害。应加强对河流生态需水的保障。基于前文分析结果,作者认为在保持济南南部山区河流径流不超过RVA阈值的前提下,还应采取一系列水资源调控措施,以保障济南南部山区河流生态系统的健康。具体建议措施为:①实现流域水量与生态需水统一调度。济南南部山区是黄河下游重要的生态保护区,生态和经济地位突出,为保障区域生态需水。一方面强化各种节水的基础设施建设;另一方面可以加强生态功能区的管理力度,水量调度计划加入生态水量指标,开展河流流域生态调度;其次,建立健全水

量调度管理运行机制,做好预警、监管和评估等工作,结合流域现有的水利工程,例如卧虎山水库等,协调各方需水量,遵循“四水四定”原则^[32]。②加强基础设施建设,提升水资源利用效率。济南南部山区北大沙河和玉符河流域以耕地为主,其面积占 40%左右^[33]，“十三五”计划完成,济南市农田灌溉水有效利用系数约为 0.654 3,节水潜力巨大。济南南部山区作为黄河下游生态保护和高质量发展的重要战略区,一方面可以加强区域高标准农田建设,引进先进的农田节水设施,提升农田灌溉水利用效率;另一方面要加强节水和污水处理工程的实施,形成全民节水和保护水资源的共识,达到新型节水型社会的标准,实现人与自然的和谐共处。为区域水资源可持续利用和生态系统良性运转提供依据。

5 结论

(1) 北大沙河和玉符河的径流变异点为 1996 年;总体上,北大沙河和玉符河的水文改变度分别为 72.75%和 69.42%,生态水文变异属于高度改变,从整体来看,月平均径流量和年最大径流量这两组参数受人为因素的影响较为显著,如大量的水库、塘坝和引水工程建设,另外,与玉符河相比,北大沙河受人类活动的影响较大

(2) 北大沙河和玉符河的年生态需水量分别为 $1.47 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $1.81 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。总体上,北大沙河月生态需水满足度平均为 32.35%;玉符河月生态需水满足度平均为 60.42%。虽然雨季降水增多,但是由于引水量增加和人类活动的加剧,导致区域河流生态环境需水满足度较低。总体上,济南南部山区的生态需水满足度整体偏低,应加强对河流生态环境需水的保障。

(3) 应从河流生态调度、提升水资源利用效率等方面着手,提升济南南部山区河流生态需水满足度,为区域水资源综合管理和生态保护提供理论依据,助力黄河流域生态保护和高质量发展。

参考文献 (References)

- [1] 王鸿翔,陈鼎新,李越,等.三峡水库对坝下河流水文情势影响研究[J].水生态学杂志,2018,39(5):1-6.
Wang Hongxiang, Chen Dingxin, Li Yue, et al. Impact of Three Gorges Reservoir on the downstream hydrology of Yangtze River [J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39 (5): 1-6.
- [2] 占焜,于洋,吴秀芹.湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J].生态学报,2021,41(18):7260-7272.
Zhan Tian, Yu Yang, Wu Xiuqin. Supply-demand

spatial matching of ecosystem services in the Huangshui River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (18): 7260-7272.

- [3] Song Ge, Huang Jinting, Ning Bohan, et al. Effects of groundwater level on vegetation in the arid area of Western China [J]. China Geology, 2021, 4(3): 527-535.
- [4] 徐鹤,缪萍萍,王立明,等.基于河流廊道构建目标的洋河生态需水核算[J].海河水利,2022(6):18-22.
Xu He, Miao Pingping, Wang Liming, et al. Study on ecological water demand of Yanghe River based on the goal of river corridor construction [J]. Haihe Water Resources, 2022(6): 18-22.
- [5] 李晶晶.基于生态健康稳定的汉江中下游干流生态需水量研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2023.
Li Jingjing. Research on ecological water demand of Hanjiang River in the middle and lower reaches based on ecological health stability [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [6] 张维克,吕德生,王振华,等.新疆白杨河流域河道内外生态需水研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2024, 42(2):192-197.
Zhang Weike, Lü Desheng, Wang Zhenhua, et al. Study on ecological water requirement inside and outside the rivers of Baiyang River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2024, 42 (2): 192-197.
- [7] 易燃,谈广鸣,常剑波,等.基于分布流量法的长江宜昌段生态需水研究[J].中国农村水利水电,2023(12):94-102.
Yi Ran, Tan Guangming, Chang Jianbo, et al. Ecological water requirement in Yichang section of the Yangtze River based on distribution flow method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12): 94-102.
- [8] 贾小俊.基于 Tennant 法的塔里木河河道基流生态需水量计算[J].水利科学与寒区工程,2021,4(3):49-53.
Jia Xiaojun. Calculation of ecological water demand for base flow of Tarim River based on Tennant method [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2021, 4(3): 49-53.
- [9] 张叶,魏俊,黄森军,等.基于湿周法的济南山区中小河流生态流量研究[J].人民黄河,2022,44(1):89-93.
Zhang Ye, Wei Jun, Huang Senjun, et al. Research on ecological flow of small and medium-sized rivers in Jinan Mountain Area based on wet cycle [J]. Yellow River, 2022, 44(1): 89-93.
- [10] 皇甫欣予,陈星,田传冲,等.曹娥江适宜生态流量计算和评价研究[J/OL].水文,1-9.[2024-07-11].https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20230217.
Huangfu Xinyu, Chen Xing, Tian Chuanchong, et al. Research on calculation and evaluation of suitable

- ecological flow of Cao'e River [J]. *Hydrology*: 1-9. [2024-07-11]. <https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20230217>.
- [11] 张志广, 金弈, 李克锋, 等. 基于RVA法的河流生态基流过程研究[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(9): 155-160. Zhang Zhiguang, Jin Yi, Li Kefeng, et al. RVA method-based study on river ecological baseflow hydrograph [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(9): 155-160.
- [12] 谢平, 夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的通用水文频率计算方法[C]//水问题的复杂性与不确定性研究与进展: 第二届全国水问题研究学术研讨会论文集. 北京, 2004. Xie Ping, Xia Jun. General hydrological frequency calculation method for inconsistent annual runoff series in changing environment [C]// Beijing: National Symposium on Water Problems, 2004.
- [13] 马晓超. 基于生态水文特征的渭河中下游生态环境需水研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. Ma Xiaochao. Research of eco-environmental water requirement in the middle and lower reaches of wei river based on eco-hydrological characteristics [D]. Yangling, Shanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [14] 赖敬明. 云龙水库流域的生态流量影响及河流健康评价研究[D]. 云南 昆明: 昆明理工大学, 2022. Lai Jingming. Study on ecological flow impact and river health evaluation in Yunlong reservoir basin [D]. Kunming, Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [15] 刘敏敏. 济南南部山区生态修复与重建技术研究[D]. 山东 济南: 山东建筑大学, 2019. Liu Minmin. Study on ecological restoration and reconstruction technology in southern mountain area of Jinan [D]. Jinan, Shandong: Shandong University of Architecture and Engineering, 2019.
- [16] 管清花, 李福林, 陈学群, 等. 济南趵突泉泉域泉群生态基流量研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(4): 75-80. Guan Qinghua, Li Fulin, Chen Xuequn, et al. Research on the ecological base flow of Baotu springs in Jinan spring region [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(4): 75-80.
- [17] 王艳茹. 基于低影响开发的济南兴隆片区的水文响应研究[D]. 山东 济南: 济南大学, 2019. Wang Yanru. Research on hydrological response of Jinan Xinglong area based on low impact development [D]. Jinan, Shandong: Jinan University, 2019.
- [18] 鲁敏, 程洁, 刘敏敏, 等. 济南南部山区生态修复途径与对策[J]. *山东建筑大学学报*, 2018, 33(2): 8-13. Lu Min, Cheng Jie, Liu Minmin, et al. Ecological restoration ways and countermeasures in the southern mountain area of Jinan [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2018, 33(2): 8-13.
- [19] 李传磊, 贾涛, 刚什婷, 等. 地下水水源地重点补给地段保护区划分研究: 以玉符河流域为例[J]. *地下水*, 2021, 43(1): 33-36. Li Chuanlei, Jia Tao, Gang Shenting, et al. Research on the division of protection areas of key recharge areas of groundwater source area: Take the Yufu River Basin for example [J]. *Ground Water*, 2021, 43(1): 33-36.
- [20] 何玉芬, 杨汉波, 唐莉华, 等. 北大沙河流域径流变化归因分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 95-101. He Yufen, Yang Hanbo, Tang Lihua, et al. Attribution analysis of runoff change in the Beidasha River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 95-101.
- [21] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [22] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(4): 329-340.
- [23] 李光录, 樊立娟. 基于IHA-RAV法的长江源区生态水文情势变化[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(1): 37-42. Li Guanglu, Fan Lijuan. Study on ecohydrological regime change in headwaters of the Yangtze River by using indicators of hydrologic alteration and range of variability approach [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(1): 37-42.
- [24] 杨涛, 陈永勤, 陈喜, 等. 复杂环境下华南东江中上游流域筑坝导致的水文变异[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(1): 135-142. Yang Tao, Chen Yongqin, Chen Xi, et al. Evaluating hydrologic alteration along the East River Basin, Southern China, under the changing environment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1): 135-142.
- [25] 任锦豪, 乔长录, 赵进勇, 等. 基于主成分分析法的玛纳斯河水文情势分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(1): 25-29. Ren Jinhao, Qiao Changlu, Zhao Jinyong, et al. Analysis of river hydrological regime in manas river based on principal component analysis [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(1): 25-29.
- [26] 鞠琴, 吴佳杰, 姚婷月, 等. 基于IHA-RVA法的渭河流域水文情势变化分析[J]. *水文*, 2022, 42(4): 76-82. Ju Qin, Wu Jiajie, Yao Tingyue, et al. Analysis of

- hydrological regime change in Weihe River Basin based on IHA-RVA method [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(4):76-82.
- [27] 石永强, 左其亭. 基于多种水文学法的襄阳市主要河流生态基流估算[J]. *中国农村水利水电*, 2017(2):50-54. Shi Yongqiang, Zuo Qiting. The estimation of ecological base flow of main rivers in Xiangyang city based on multiple hydrological methods [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(2):50-54.
- [28] 邓振华, 张晶, 于明洋, 等. 济南南部山区土地利用的时空变化分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(1):69-73. Deng Zhenhua, Zhang Jing, Yu Mingyang, et al. Spatio-temporal change of land use in south mountain of Jinan [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(1):69-73.
- [29] 杨志刚, 杨洪昌, 谷湘潜, 等. 近年来黄河下游断流的干旱背景分析[J]. *气象学报*, 2000, 58(6):751-758. Yang Zhigang, Yang Hongchang, Gu Xiangqian, et al. Climatic background analysis of flow-break episode of lower reaches of Yellow River in recent years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(6):751-758.
- [30] 熊国平, 程亚午, 徐武. 济南南部山区东片保护和发展规划探索[J]. *中国科技论文*, 2013, 8(5):481-486. Xiong Guoping, Cheng Yawu, Xu Wu. Exploration of conservation and development planning for southern mountain areas (east zone) of Jinan City [J]. *China Sciencepaper*, 2013, 8(5):481-486.
- [31] 魏童彤. 华北地区小麦—玉米轮作月尺度灌溉需水量研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2020. Wei Tongtong. Study on monthly scale irrigation water requirement of wheat-maize rotation in North China [D]. Taian, Shandong: Shandong Agriculture University, 2020.
- [32] 刘玉年. 贯彻落实“四个统一”强化沂沭泗流域治理管理工作[J]. *治淮*, 2022(6):4-6. Liu Yunian. Carrying out the “four unifications” and strengthening the management of Yishusi River basin [J]. *Harnessing the Huaihe River*, 2022(6):4-6.
- [33] 王怡冰, 李成亮, 张鹏, 等. 济南南部山区土地利用/覆被变化对碳储量的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2024: 1-15. Wang Yibing, Li Chengliang, Zhang Peng, et al. Research on the impact of land use/cover changes in the southern mountainous area of Jinan on carbon storage [J]. *China Environmental Science*, 2024:1-15.
- ~~~~~
- (上接第 246 页)
- [28] 陈欢, 任志远. 中国大陆植被覆盖对降水与温度变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(2):78-82. Chen Huan, Ren Zhiyuan. Response of vegetation coverage to changes of precipitation and temperature in Chinese mainland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2):78-82.
- [29] Chu Hongshuai, Venevsky S, Wu Chao, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650:2051-2062.
- [30] Li Yali, Wang Xiaoqin, Chen Yunzhi, et al. Land surface temperature variations and their relationship to fractional vegetation coverage in subtropical regions: A case study in Fujian Province, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(6):2081-2097.
- [31] Farrar T J, Nicholson S E, Lare A R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50(2):121-133.
- [32] 黄鹏, 郭闽, 夏思颖, 等. 城市化与生态环境耦合状况分析: 以福建龙岩为例[J]. *内江师范学院学报*, 2015, 30(4):52-56. Huang Peng, Guo Min, Xia Siying, et al. Analysis of the coupling effects between urbanization and eco-environment: A case study of Longyan city, Fujian province [J]. *Journal of Neijiang Normal University*, 2015, 30(4):52-56.
- [33] 陈森, 汪小钦, 林敬兰, 等. 土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化的定量影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5):168-177. Chen Miao, Wang Xiaoqin, Lin Jinglan, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):168-177.
- [34] Zhao Yi, Tomita M, Hara K, et al. Effects of topography on status and changes in land-cover patterns, Chongqing City, China [J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2014, 10(1):125-135.