

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.006

多目标协控下伊洛河自净需水流量研究

余真真, 闫莉, 王瑞玲, 马秀梅, 张世坤

(黄河水资源保护科学研究院, 河南 郑州 450004)

摘要: 建立基于河道边界条件水动力学与水质相耦合模型, 结合伊洛河生态系统特点及功能性需水组成, 以河流水功能区水质目标作为协控因子, 进一步考虑伊洛河河口黄河鲤鱼繁殖期对水质的要求进行自净需水流量计算。结果表明, 伊洛河在现状排污与控制排污条件下, 黑石关断面达到水功能区水质目标Ⅳ类的自净需水流量分别为 $14.00 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $8.00 \text{ m}^3/\text{s}$; 满足4—6月基本维持鱼类正常繁育水质要求的自净需水流量为 $13.62 \text{ m}^3/\text{s}$, 维持鱼类良好繁育状态下水质要求的自净需水流量为 $35.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

关键词: 自净需水量; 生态环境; 水生生物; 黄河鲤; 黄河流域; 伊洛河

中图分类号: TV213.4; TV882.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)05-0038-05

Study on self-purification water demand flow in the Yiluo River under multi-objective coordination control // YU Zhenzhen, YAN Li, WANG Ruiling, MA Xiumei, ZHANG Shikun (Yellow River Water Resources Protection Institute, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: A coupling model of hydrodynamics and water quality has been established based on river boundary conditions. Combined with the characteristic of the ecosystem and the composition of functional water demand in the Yiluo River, taking the water quality target of the water function zone as the co-control factor, and considering the water quality requirements of the *Cyprinus Carpio* in the breeding season in the Yiluo River Estuary, the self-purification water demand flow was calculated. The results indicate that under the condition of the current status of pollution discharge into river, and meeting the limit of total emission control, the self-purification water demand flow are $14.0 \text{ m}^3/\text{s}$ and $8.0 \text{ m}^3/\text{s}$, respectively, to reach the water quality target of class IV; The self-purification water demand flow of maintaining the water quality of normal fish breeding from April to June is $13.62 \text{ m}^3/\text{s}$, and the self-purification water demand flow of maintaining the water quality of fish in good breeding condition is $35.80 \text{ m}^3/\text{s}$.

Key words: self-purification water demand flow; ecological environment; aquatic life; *Cyprinus carpio*; Yellow River Basin; Yiluo River

以往关于自净需水的研究^[1]仅从量的方面考虑, 一般采用河流多年平均天然径流量的10%及近10年最枯月平均流量或90%保证率最枯月平均流量, 或以历史水文数据为基础的7Q10法、Tennant法^[2]等计算得到, 大都缺乏对研究河段水体功能和生态保护目标的识别。在黄河流域相关研究中, 郝伏勋等^[3]研究了黄河干流2003年现状纳污、污染可控及目标控制3种纳污模式下的宁蒙、龙三、小花河段的自净水量; 黄锦辉等^[4]在河流水质及污染源调查的基础上, 分析河流水质和污染源分布及排放规律之间的关系, 建立了湟水、渭河、沁河、伊洛河自净

需水模型, 提出保障水功能区水质目标所需的水量; 张建军等^[5]建立了黄河干流自净需水量模型, 分别对黄河花园口以上河段以及利津断面的自净需水量进行了计算。以上研究偏重以水功能区水质目标为约束条件, 较少考虑生态系统功能发挥对水质的需求, 以及生态系统变化和流量、水质的响应关系。本文建立基于河道边界条件水动力学与水质相耦合模型, 结合伊洛河生态系统特点及功能性需水组成, 以河流水功能区水质目标为协控因子, 进一步考虑伊洛河河口黄河鲤鱼繁殖期对水质的要求进行自净需水流量计算, 同时考虑不同河流纳污水平, 将入河排污

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFC0404401); 国家自然科学基金(51709126)

作者简介: 余真真(1982—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源保护与管理、水环境数值模拟研究。E-mail: zzyhydro@126.com

又称“洛鲤”，伊洛河口成为维持黄河鲤渔业资源的主要集中产卵场，也是黄河中下游其他鱼类繁殖、育幼阶段最为重要的栖息场所之一。鲤鱼属分批产卵鱼类，繁殖期延续时间较长，黄河鲤产卵时间为4—6月，要求有较为适宜的产卵条件（依据繁殖期黄河鲤栖息地适宜度曲线，黄河鲤产卵期适宜流速为 $0.15 \sim 0.4 \text{ m/s}$ ，适宜水深为 $0.8 \sim 1.5 \text{ m}$ ，并对水质有较高要求）。

2 标志性鱼种群繁育对水质的要求

受水沙条件、水体物理化学性质及流域气候、地理条件等因素影响,黄河水生生物种类和数量相对贫乏,生物量较低,鱼类种类相对较少,但许多特有土著鱼类具有重要保护价值,是国家水生生物保护和鱼类物种资源保护的重要组成部分。伊洛河是小浪底水利枢纽以下黄河一级支流,流域面积 1.89 万 km²,流经陕西、河南两省。随着小浪底水库“调水调沙”运行,黄河下游频繁出现“流鱼”现象,同时水库低温水下泄也对鱼类资源破坏极大。黄河下游支流水环境相对稳定,生物行为学特性研究表明,鱼类在不适宜生境条件下,可以依靠其侧线管等感应系统的判断,转移到环境相对适宜的水域。目前黄河鱼类有自黄河下游干流迁徙到连通支流的趋势,因此对作为鱼类主要生境的伊洛河的保护和修复显得尤为重要。

伊洛河流域位于我国暖温带和北亚热带的分界区,体现出南北过渡、东西交汇的特征,流域上游是自然植被主要分布区,中下游地区人类活动和干扰比较严重,以农田植被为主。上游水质优良,为Ⅱ类,河流经过城镇后,水质变差,为Ⅲ类或Ⅳ类。干流灵口以上河段水环境相对良好,其他河段均存在水电无序开发现象,河流纵向连通性遭到严重破坏,枯水期及平水期多个河段存在断流、脱流现象,水生生物合适的生境数量锐减、面积萎缩且片段化。

黄河水生生态系统中,鱼类处于水生生物群落食物链的顶层,对其他类群的存在和丰度有着重要作用。伊洛河流域曾经是我国著名经济鱼类“洛鲤伊鲂”的出产地,是多种地方土著鱼类的重要分布区,共有鱼类 4 目 8 科 36 种,其中鲤科鱼类 25 种,占总数的 69%;鳅科鱼类 4 种,占总数的 13%;鲃科、鲮科、鮠科、鰕虎鱼科、合鳃鱼科、攀鲈科、鳢科鱼类各 1 种,各占 3%^[4]。鲤科鱼类是伊洛河标志性鱼种群,具有重要遗传与生态保护价值。

伊洛河入黄口河段由于水量充足、营养丰富,一直是流域的鱼类传统产卵场,具有较佳的栖息生境,目前被划为黄河鲤国家级水产种质资源保护区,其中伊洛河核心区位于巩义市境内,保证黄河鲤繁殖生长期的水量是该河段水生态保护的主要目标。黄河鲤属鲤形目鲤科鲤亚科,是黄河流域著名经济鱼种之一,以洛河和黄河中下游最为盛产,洛河内鲤鱼

水污染是黄河鱼类保护面临的主要威胁因子。自 1980 年起,由于经济的快速发展,各种工业废水及生活污水大量排放,黄河流域水质总体呈现恶化的趋势^[6]。2000 年前后是全流域水质最差的时段,满足Ⅲ类水的河长比例仅占 38.7%^[6]。黄河鱼类资源自 20 世纪 80 年代以来大幅度减少,鱼类种质资源数量减少约 42%,鱼类资源及种类减少除受不合理捕捞、大坝阻隔、气候变化等因素影响外,河川径流条件的变化和水质恶化是导致黄河鱼类资源减少的重要原因。

水质直接影响着黄河水生生物的繁殖及栖息, 水体污染造成鱼类生长发育滞缓、生殖能力减弱; 同时污染造成水体富营养化, 引起水中藻类多样性减少, 优势度提高, 鱼类的可利用食料减少, 影响到鱼类的多样性和数量。根据野外监测结果和实践经验, 地表水Ⅲ类的标准可以满足和保证鱼类繁育, 黄河水域的Ⅲ类水质对于鱼类胚胎发育的影响几乎接近阈值, 水质恶化将影响鱼类产卵和孵化。GB 11607—1989《渔业水质标准》对鱼类水质要求是: 淡水 pH 值为 6.5 ~ 8.5, 溶解氧质量浓度连续 24 h 中 16 h 以上必须大于 5 mg/L (对应Ⅲ类标准)。GB 3838—2002《地表水环境质量标准》依据地表水水域环境功能和保护目标, 规定Ⅱ类水适用于珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼的索饵场等, Ⅲ类水适用于鱼虾类越冬场、洄游通道、水产养殖区等渔业水域及游泳区。

伊洛河入黄口河段分布有国家级水产种质资源保护区,对水质和水量过程的要求较高。笔者认为维持伊洛河口水产种质资源保护区核心区的黄河鲤正常繁育所需的水质为Ⅲ类,维持鱼类良好产卵生存状态下所需的水质为Ⅱ类。

3.1 控制方程及求解方法

建立机理性水质模型,根据质量守恒定律、能量守恒定律与动量守恒定律,应用模型方法建立数学

方程,通过实测资料确定相关参数,对水环境中污染物在时间和空间上的分布做定量的分析和预测。

采用数值模拟方法研究伊洛河流域自净需水量。圣维南方程作为求解控制方程,由以下连续方程和运动方程联立组成:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ^2}{Ac^2R} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: x, t 分别为计算点空间坐标和时间坐标; A 为过水断面面积; Q 为过流流量; h 为水位; q 为旁侧入流流量或排污口流量; c 为谢才系数; R 为水力半径; α 为动量校正系数; g 为重力加速度。

此外,水质模型的控制方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中: C 为水质浓度; u_x 为纵向流速; E_x 为扩散系数。

方程组利用 Abbott-Ionescu 六点隐式有限差分格式求解。该格式在每一个网格点按顺序交替计算水位和流量,分别称为 h 点和 Q 点。离散后的线性方程组用追赶法求解^[7-8]。

3.2 计算河段选取

研究范围为伊洛河流域及小浪底以下黄河干流河段。小浪底以下黄河干流河段自小浪底至入海河口,全长 895.7 km。伊洛河为伊河陆浑水库坝址断面至洛河交汇处,洛河为故县水库坝址断面至入黄口。伊洛河流域自净需水流量研究范围与河网构建详见图 1 和图 2。

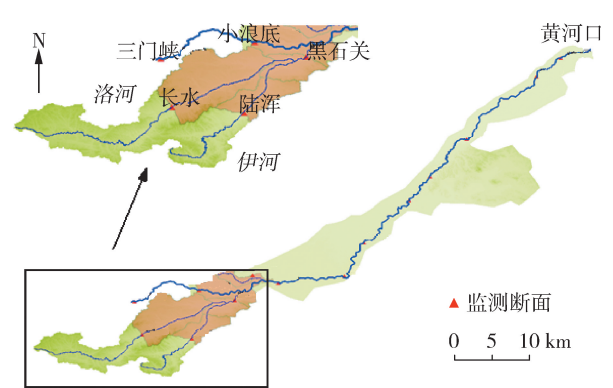


图 1 伊洛河流域自净需水流量研究范围
Fig.1 Scope of study on the self-purification water demand flow in the Yiluo River

3.3 入河排污口调查与设置

伊洛河流域污染源达标排放后黄河不得不接纳的污染物量及其时空分布的量化标准,是计算伊洛河流域自净需水流量的前提^[9]。为准确了解伊洛河纳污现状,调查流域入河排污口数据,发现伊洛河

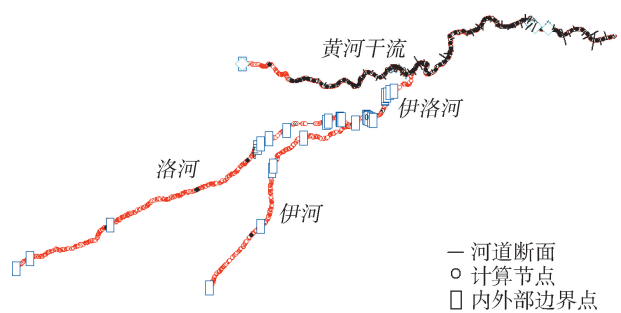


图 2 伊洛河流域自净需水流量模型河网构建
Fig.2 River network building of self-purification water demand flow model in the Yiluo River

共接纳废污水 2.8 亿 m^3/a , COD 1.8 万 t/a , 氨氮 0.1 万 t/a 。其中洛河纳污量占 3/4, 伊河占 1/4。伊洛河的纳污特点是: 纳污量 80% 以上集中在洛阳、偃师及巩义河段, 超标因子为 COD、 BOD_5 和氨氮等, 主要来源于生活排污。因此, 伊洛河水质沿程变化趋势是河流经过城镇后, 受人为排污影响水质变差。将调查到的 37 个入河排污口以点源形式设置于模型中, 给定排污流量及浓度值。

4 结果与分析

4.1 水功能区环境目标条件下的自净需水流量

分别以现状排污与控制排污两种情景模式, 推算主要控制断面满足水质目标所需的自净需水流量, 见表 1。现状排污条件下, 伊洛河入黄断面黑石关要确保满足汛期 $11.50 \text{ m}^3/\text{s}$ 、非汛期 $14.00 \text{ m}^3/\text{s}$ 的自净需水流量, 才能保证入黄水质满足 IV 类水质目标要求, 即 $\rho(\text{COD}) \leq 30 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) \leq 1.5 \text{ mg/L}$ 。控制排污条件下(入河情景模拟所有排污口满足一级 A 达标排放标准, 该条件下, 经计算 COD、氨氮入河控制量分别小于 1.87 万 t 、1055 t , 满足限制排污总量控制要求^[10]), 伊洛河入黄断面黑石关要确保满足汛期 $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、非汛期 $8.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 的自净需水流量, 才能保证入黄水质满足水质目标要求。

表 1 现状排污与控制排污条件下自净需水流量

Table 1 Self-purification water demand flow under current and control of sewage conditions m^3/s								
断面名称	现状排污条件				控制排污条件			
	汛期		非汛期		汛期		非汛期	
	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮
故县水库	3.36	3.00	4.56	3.60	0.48	0.06	1.20	0.12
陆浑水库	2.24	2.00	3.04	2.40	0.32	0.03	0.82	0.09
黑石关	11.50	10.80	14.00	11.90	6.60	5.90	8.00	6.00

4.2 生态功能性需水条件下的自净需水流量

4.2.1 基本维持鱼类正常繁育的自净需水流量

a. 模拟条件设置。现状洛河故县、长水和伊河陆浑水库断面水质满足 II 类水质标准, 背景浓

度选取伊河、洛河Ⅱ类水质目标上限浓度,推算入河排污口达标排放浓度下,黑石关能够基本维持黄河鲤4—6月正常繁育期间,水质目标达到Ⅲ类($\rho(\text{COD}) = 20 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 1 \text{ mg/L}$)所需的自净需水流量。

b. 预测结果。经模拟预测,在达标纳污水平条件下,洛河故县水库坝址下泄断面 COD、氨氮自净需水流量分别为 $4.62 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2.26 \text{ m}^3/\text{s}$;伊河陆浑水库坝址下泄断面 COD、氨氮自净需水流量分别为 $3.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.52 \text{ m}^3/\text{s}$;入黄口黑石关断面 COD、氨氮自净需水流量为 $13.62 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $9.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。按照偏严格确定,在控制排污条件下,伊洛河入黄断面黑石关4—6月应满足 $13.62 \text{ m}^3/\text{s}$ 的自净需水流量,才能基本维持鱼类正常繁育需求所需的水质要求。

4.2.2 维持鱼类良好生存状态下的自净需水流量

a. 模拟条件设置。背景浓度选取伊河、洛河Ⅱ类水质目标上限浓度,推算入河排污口达标排放浓度下黑石关断面维持黄河鲤等代表鱼类良好生存状态,4—6月正常繁育期间,水质目标达到Ⅱ类($\rho(\text{COD}) = 15 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 0.5 \text{ mg/L}$)所需的自净需水流量。

b. 预测结果。经模拟预测,在达标纳污水平条件下,洛河故县水库坝址下泄断面 COD、氨氮自净需水流量为 $10.20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $18.00 \text{ m}^3/\text{s}$;伊河陆浑水库坝址下泄断面 COD、氨氮自净需水流量为 $6.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $12.00 \text{ m}^3/\text{s}$;入黄口黑石关断面 COD、氨氮自净需水流量为 $22.70 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $35.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。按照偏严格确定,在控制排污条件下,伊洛河入黄断面黑石关4—6月的自净需水流量应满足 $35.80 \text{ m}^3/\text{s}$,这是能够维持鱼类繁殖期良好生存状态下的自净需水流量。

4.3 自净需水流量满足程度与可实现性分析

伊洛河现状入河排污口排污、满足限排总量控制要求下,黑石关断面达到水功能区水质目标Ⅳ类所需的自净需水流量分别为 $14.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.0 \text{ m}^3/\text{s}$,占黑石关多年平均流量的 10.70%、6.18%。从考虑伊洛河水生态功能角度出发,维持伊洛河口黄河鲤等土著代表鱼类栖息生境对优良水质的需求,满足4—6月基本维持鱼类正常繁育水质要求的自净需水流量为 $13.62 \text{ m}^3/\text{s}$,维持鱼类良好繁育状态下水质要求的自净需水流量为 $35.80 \text{ m}^3/\text{s}$,分别占黑石关多年平均流量的 10.79%、28.37%。

根据黑石关 2009—2018 年长系列实测流量数据,开展伊洛河自净需水流量满足程度与可实现性分析,结果发现,与多年实测流量相比,伊洛河现状入河排污状态下满足水功能目标所需自净需水流量满足程度为 88.89%,控制排污状态下自净需水流量满足程度为 96.80%。2009—2018 年每年 1 月 1

日满足水功能水质目标条件下自净需水流量与实测流量对比见图 3。

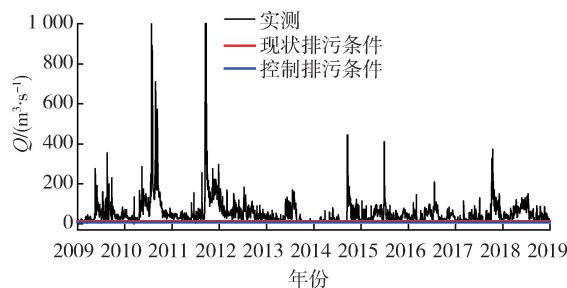


图 3 满足水功能水质目标条件下
自净需水流量与实测流量对比

Fig.3 The comparison between self-purification and measured water flow under the condition of meeting water quality objectives

提取 2009—2018 年 4—6 月黑石关断面实测流量数据进行对比分析,发现基本维持鱼类正常繁育水质要求的自净需水流量满足程度为 94.11%,维持鱼类良好繁育状态下水质要求的自净需水流量满足程度为 61.28% (图 4)。因此,2009—2018 年的黑石关断面实际流量满足鱼类良好繁育状态所需的满足程度不高(特别是 4 月上旬至 5 月下旬春耕用水挤占了部分鱼类产卵期满足良好水质要求的水量),凸显了人类用水与生态竞争性用水之间的矛盾。

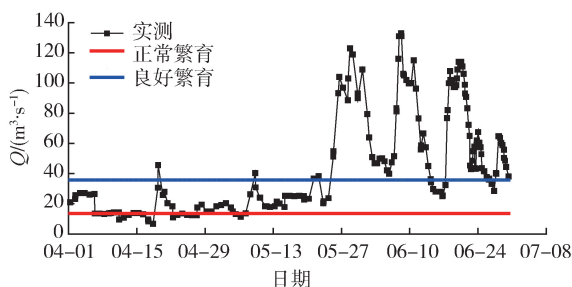


图 4 满足鱼类繁育水质要求条件下 4—6 月自净需水
流量与实测流量对比

Fig.4 The comparison between self-purification and measured water flow under the condition of meeting the requirements of fish breeding water quality from April to June

5 结 语

今后应加强重要生态单元的水质监测,提高水质生物监测能力,逐步改善生态保护重点河段水环境质量;实施流域多目标生态调度,在确保防汛安全的前提下,将伊洛河河道内满足鱼类生存的自净水量需求纳入黄河水资源统一调度体系,尽可能提高关键期黄河土著代表鱼类繁育期对水质的需求;把水资源作为最大的刚性约束,协调人类用水与生态竞争性用水关系,完善伊洛河流域用水总量控制指标,加大农业

节水力度,推动用水方式从粗放向节约集约转变。

参考文献:

- [1] 倪晋仁,金玲,赵业安,等.黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J].水利学报,2002,33(10):1-7. (NI Jinren, JIN Ling, ZHAO Yean, et al. Minimum water demand for ecosystem protection in the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(10):1-7. (in Chinese))
- [2] 王东升,袁树堂,杨祺.金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J].水资源保护,2019,35(4):35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):35-41. (in Chinese))
- [3] 郝伏勤,连煜,黄锦辉,等.黄河干流污染自净稀释水量研究[J].人民黄河,2005,27(11):39-41. (HAO Fuqin, LIAN Yu, HUANG Jinhui, et al. Study on self-purification dilution water for contamination of the Main Yellow River[J]. Yellow River, 2005, 27(11):39-41. (in Chinese))
- [4] 黄锦辉,王瑞玲,葛雷,等.黄河干支流重要河段功能性不断流指标研究[M].郑州:黄河水利出版社,2016:218-252.
- [5] 张建军,马秀梅,黄锦辉,等.黄河自净需水量研究[J].水利学报,2010,41(8):977-983. (ZHANG Jianjun, MA Xiumei, HUANG Jinhui, et al. Study on self-purification water requirements for the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8):977-983. (in Chinese))

- [6] 韩艳利,姜广艳,葛雷,等.黄河流域与水有关生态补偿框架的探讨[J].水资源保护,2016,32(6):142-150. (HAN Yanli, LOU Guangyan, GE Lei, et al. Discussion of water-related ecological compensation framework for Yellow River Basin. Water Resources Protection [J], 2016, 32(6):142-150. (in Chinese))
- [7] 李勋贵,王晓磊,苏贤保.黄河上游河道一维河道水温模型和经验公式法对比[J].水资源保护,2019,35(4):24-29(48). (LI Xungui, WANG Xiaolei, SU Xianbao. Comparison of one-dimensional river water temperature model and empirical formula method in upper reaches of Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):24-29(48). (in Chinese))
- [8] 王卫光,陆文君,邢万秋,等.黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J].水资源保护,2018,34(2):7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):7-13. (in Chinese))
- [9] 刘晓燕,连煜,黄锦辉,等.黄河环境流研究[J].科技导报,2008,26(17):24-30. (LIU Xiaoyan, LIAN Yu, HUANG Jinhui, et al. Environmental Flows of the Yellow River[J]. Review Science & Technology, 2008, 26(17):24-30. (in Chinese))
- [10] 黄河水资源保护科学研究院.伊洛河流域综合规划环境影响报告书[R].郑州:黄河水资源保护科学研究院,2014年.

(收稿日期:2019-10-29 编辑:彭桃英)

(上接第30页)

- [26] 金文婷,王义民,白涛,等.黄河上游梯级水库联合调水调沙及合理库容研究[J].水利水运工程学报,2018(6):19-29. (JIN Wenting, WANG Yimin, BAI Tao, et al. Analysis of joint regulation of water and sediment and reasonable storage of cascade reservoirs of upper Yellow River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(6):19-29. (in Chinese))
- [27] 黎铭,张会兰,孟铨铨.黄河皇甫川流域水沙关系特性及关键驱动因素[J].水利水电科技进展,2019,39(5):27-35. (LI Ming, ZHANG Huilan, MENG Chengcheng. Study on characteristics of water-sediment relationship and key influencing factors in Huangfuchuan Watershed of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5):27-35. (in Chinese))
- [28] 左其亭.黄河流域生态保护和高质量发展研究框架[J].人民黄河,2019,41(11):1-6. (ZUO Qiting. Research framework for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2019, 41(11):1-6. (in Chinese))
- [29] 徐祥功,任丽军,刘明,等.黄河三角洲地区城市化测度与水环境系统耦合关系[J].水资源保护,2015,31

- (3):33-39. (XU Xianggong, REN Lijun, LIU Ming, et al. Coupling relationship between urbanization and water environment in Yellow River Delta[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3):33-39. (in Chinese))
- [30] 金凤君.黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J].改革,2019(11):33-39. (JIN Fengjun. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform, 2019(11):33-39. (in Chinese))
- [31] 栗晓玲,梁箴.关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J].水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):17-23. (in Chinese))
- [32] 陈璐. Copula 函数理论在多变量水文分析计算中的应用研究[M].武汉:武汉大学出版社,2013.
- [33] 罗党,刘思峰.灰色关联决策方法研究[J].中国管理科学,2005,13(1):101-106. (LUO Dang, LIU Sifeng. Study on the method for grey incidence decision-making[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(1):101-106. (in Chinese))

(收稿日期:2020-01-13 编辑:王芳)