DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241248

基于水质达标与河流连通性的生态流量研究

李新宇[1,2],刘佩玺[3],李建军[3],刁艳芳[1],苏 瑞[1],郭诗超[1]

(1. 山东农业大学水利土木工程学院,山东 泰安 271000;2. 南京水利科学研究院水文水资源研究所,江苏 南京 210029;3. 济宁市水利事业发展中心泗河分中心,山东 济宁 272000)

摘要:河流水质污染及气候和人类活动导致的断流均会严重影响河流生态健康和沿河区域经济社会可持续发展。为此,以山东省泗河干流泗水大闸至书院水文站和书院水文站至龙湾店闸两个河段为例,以COD、BOD、NH_3-N、TP值为状态变量,基于MIKE21构建水动力水质耦合模型,区分水文季节并分别制定可涵盖75%(情景1)、50%(情景2)水质条件的模拟方案,通过模拟不同流量工况下的水质效应并考虑河流连通性水量需求确定生态流量,同时分析了书院水文站生态流量保证率。结果表明,泗水大闸情景1在10月~翌年6月生态流量为0.8 m^3/s,7~9月为1 m^3/s,情景2各月生态流量均为0.8 m^3/s;书院水文站情景1在10月~翌年6月生态流量为2 m^3/s,7~9月为7 m^3/s,情景2两个时期生态流量则分别为0.8、4 m^3/s;泗河流域人类活动对径流影响显著,应重点关注4、5月份的生态流量需求,且制定的生态流量有利于满足泗河干流不同河段、不同水文季节兼顾水质达标与河流连通性的生态需求。

关键词:泗河;水质;水动力水质耦合模型;生态流量

中图分类号:TV213.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)05-0039-05

1 概况

泗河发源于山东省泰安新泰市太平顶,干流全长169 km,流域面积2 357 km^2。流域内有贺庄水库水文站、书院水文站、尼山水库水文站3处水文站,其中书院水文站是泗河干流唯一控制站,拥有长系列水文资料。根据《山东省水功能区划》及《济宁市水功能区划》,泗水县故县坝至曲阜市红旗闸为泗水排污控制区,红旗闸至微山县接庄公路桥为泗河曲阜兖州段农业用水区,水质目标均为Ⅳ类。泗河来水主要由降水补给,水质良好,但曲阜段排放的污水和各类废水造成了泗河水体曲阜、兖州段的严重污染,下游水质多年来一直处于Ⅴ类水。山东省水利厅颁布的《山东省水功能区限制纳污警戒线》中,济宁市有14个重点水功能区划定了COD和NH_3-N警戒线,根据济宁市年度水功能区水质监测报告,2012~2019年,泗河曲阜兖州段农业用水区COD预警共计17次,NH_3-N预警共计8次,可见泗河流域COD和NH_3-N污染较为严重。水质作为河流健康的关键要素,不仅关系着水生动植物的生存和繁衍,还影响着人类健康和经济社会可持续发展。随着工业化和城市化的快速发展,水质污染引起的水质型缺水问题频现,由此引发的河流水资源和生态保护问题日益凸显[1-2]。在此背景下,积极开展基于水质目标推求河流生态流量的研究,对河流水质水量管理具有重要意义[3]。常文婷等[4]以青山水库水电站为例,耦合水质和水动力模型,得到了使下游断面水质达标的坝下最小下泄流量;余真真等[5]通过建立水动力水质耦合模型,基于黄河鲤繁殖期对水质的要求进行河流自净需水流量计算;韩亚萍[6]利用MIKE21模型研究了满足控制断面水质目标所需的灌河鲇鱼山水库环境流量,并依此确定了水库的生态流量泄放方案;章运超等[7]运用MIKE11建立了河道水量水质模型,通过试算法计算了控制断面水质达标的生态流量;金传鑫等[8]基于MIKE21构建了西丽水库二维水动力水质模型,分析了加快水体净化的最优入库流量方案。由于人类对水资源的利用需求及水资源与生态环境承载能力的不同,不同区域的河流、同一条河流的不同河段的保护目标也会有所

收稿日期:2024-06-06,**修回日期**:2024-07-26

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME058);山东省重点研发计划项目(2019GSF111043)

作者简介:李新宇(2000-),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源,E-mail:lxy330613@163.com

通讯作者:刁艳芳(1981-),女,博士、副教授,研究方向为水资源管理,E-mail:diaoyanfang@sdau.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

差异[9]。泗河沿岸地形地貌、生态环境、社会经济发展状况以及上下游间的水流特性均有很大不同，生态流量的内涵和外延也将有所变化。为此，本文在综合考虑水文站分布、水功能区划、河道地形数据等的基础上，选取泗河干流泗水大闸至书院水文站 29 km、书院水文站至龙湾店闸 17.5 km 两个河段为例，并确定水质目标；根据山东省水利厅颁布的《山东省水功能区限制纳污警戒线》及河段沿岸存在的生活及农业面源污染[10]，选取 COD、BOD、NH_3-N、TP 4 个水质因子为状态变量，通过 MIKE21 构建两个河段的水动力水质耦合模型；通过制定模拟方案，分析不同水质和流量条件下的水质效应，并考虑河流连通性，最终确定泗河干流泗水大闸和书院水文站断面兼顾水质达标与河流连通性的生态流量。

2 模型构建

2.1 水动力模块构建

(1)网格化地形。通过离散化和高程插值等前期处理构建 Mesh 网格地形文件。网格剖分结果为：泗水大闸至书院水文站河段共生成 1 698 个节点和 2 765 个单元；书院水文站至龙湾店闸河段共生成 1 026 个节点和 1 704 个单元。两个河段河道插值地形见图 1。

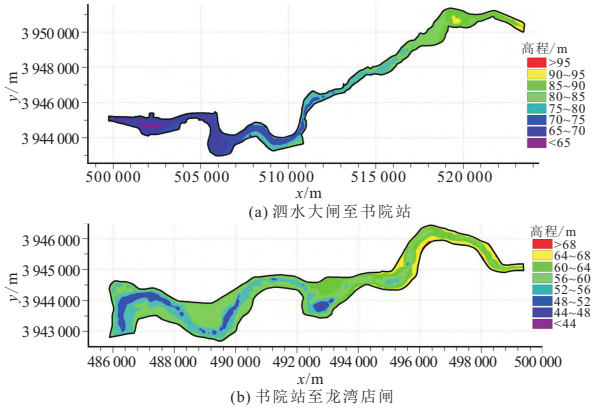


图 1 河段插值地形图

Fig. 1 Interpolated topographic maps of reaches

(2)参数及条件设置。本文模型中定义干水深为 0.005 m，淹没水深为 0.05 m，湿水深为 0.1 m，涡粘系数最大值、最小值分别为 1×10^{8}、1.8×10^{-6} m^2/s，以曼宁系数的形式表示底摩擦力，取值为 32 $m^{1/3}/s$，均为模型推荐值[11-13]。水动力模型上游采用流量边界条件，下游为水位边界条件。由于泗河干流仅书院水文站具有长系列水文资料，且缺乏河段内支流水文数据，因此泗水大闸和龙湾店闸断面的水文数据以书院水文站数据为基础，采用水文比拟法推算，以考虑区间汇流的影响。源汇项位置及排放强度来自济宁市年度水功能区水质监测报告。初始条件设置为随空间变化的水位模式。

(3)率定及验证。模型率定期为 2017～2018 年，验证期为 2019 年。通过纳什效率系数(N_{SE})和均方根误差(R_{RMSE})检验模拟效果。图 2 为书院水文站、龙湾店闸率定期和验证期水位对比，表 1 为书院水文站、龙湾店闸水动力模块率定期及验证期模拟效果检验。由图 2 可看出，书院水文站及龙湾店闸率定期、验证期水位模拟值与实测值基本吻合。由表 1 可看出，书院水文站断面率定期、验证期 N_{SE} 分别为 0.99、0.92，R_{RMSE} 分别为 0.098、0.25 m；龙湾店闸断面 N_{SE} 分别为 0.79、0.88，R_{RMSE} 分别为 0.004、0.06 m，可见率定期和验证期模拟效果均良好。说明所构建的泗河干流两个研究河段水动力学模型结构和参数合理，可进行水质模型构建。

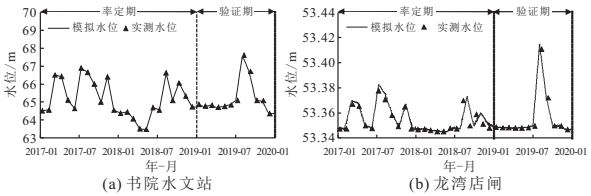


图 2 书院水文站、龙湾店闸率定期和验证期水位对比

Fig. 2 Water level comparison during calibration and verification of Shuyuan Hydrological Station and Longwandian Sluice

表 1 书院水文站、龙湾店闸水动力模块率定期及验证期模拟效果检验

Tab. 1 Simulation effectiveness test during calibration and verification of hydrodynamic module of Shuyuan Hydrological Station and Longwandian Sluice

断面	N_{SE}		R_{RMSE}/m	
	率定期	验证期	率定期	验证期
书院水文站	0.99	0.92	0.098	0.25
龙湾店闸	0.79	0.88	0.004	0.06

2.2 水质模块构建

(1)条件设置。泗水大闸缺少水质监测数据，故采用上游 1.7 km 处的故县坝断面水质监测数据作为泗水大闸边界条件。书院水文站和龙湾店闸均采用实测数据作为水质边界条件。排污口的监测频率较低，故根据同时期排污口排污浓度和下断面污染物浓度之间的倍比关系，将排污口概化成连续排污的时间序列。根据上下断面初始水质条件和污染源初始排污浓度，设置随空间变化的水质初始条件。

(2)率定及验证。经过反复调整率定，确定泗

中国知网 https://www.cnki.net

水大闸至书院水文站河段 COD、BOD、TP 降解系数分别为 0.1、0.01、0.03 d^{-1}，氨氮硝化速率为 0.05 d^{-1}；书院水文站至龙湾店闸河段相应参数则分别为 0.1、0.15、0.05、0.25 d^{-1}。书院水文站及龙湾店闸率定期及验证期 4 个状态变量模拟值与实测值对比见图 3、4，同样由 N_{SE}、R_{RMSE} 检验模型的模拟效果，见表 2。

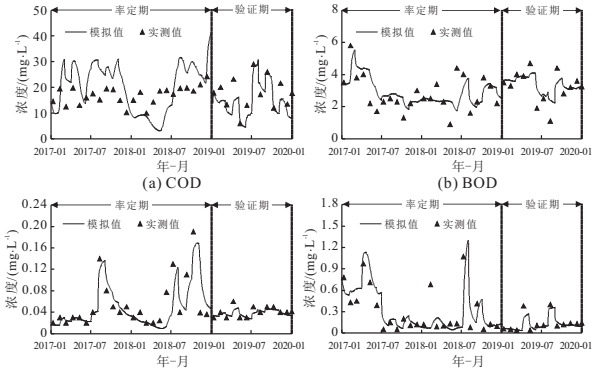


图 3　书院水文站率定期和验证期模拟结果对比

Fig. 3　Comparison of water quality simulation results during calibration and verification of Shuyuan Hydrological Station

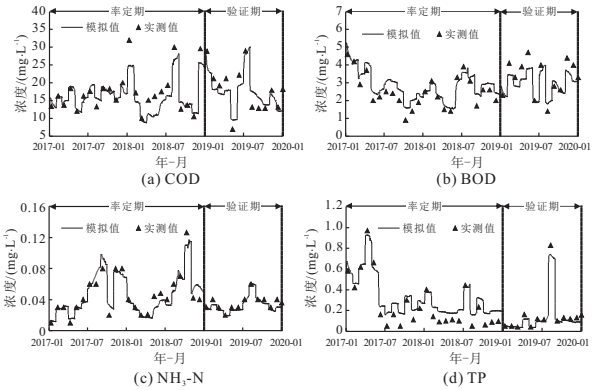


图 4　龙湾店闸率定期和验证期模拟结果对比

Fig. 4　Comparison of water quality simulation results during calibration and verification of Longwandian Sluice

表 2　书院水文站及龙湾店闸水质模块率定期及验证期模拟效果检验

Tab. 2　Simulation effectiveness test during calibration and verification of water quality module of Shuyuan Hydrological Station and Longwandian Sluice

断面	时期	评价指标	状态变量			
			COD	BOD	NH_3-N	TP
书院水文站	率定期	N_{SE}	0.10	0.14	0.40	0.440
		R_{RMSE}	8.53	1.00	0.23	0.030
	验证期	N_{SE}	0.56	0.56	0.69	0.430
		R_{RMSE}	4.19	0.66	0.06	0.007
龙湾店闸	率定期	N_{SE}	0.78	0.79	0.88	0.890
		R_{RMSE}	2.66	0.42	0.08	0.090
	验证期	N_{SE}	0.82	0.69	0.92	0.850
		R_{RMSE}	2.70	0.56	0.03	0.004

注：R_{RMSE} 单位为 mg/L。

由图 3、4 可看出，书院水文站及龙湾店闸率定期、验证期各状态变量实测值和模拟值的变化趋势具有一致性。表 2 中，从 N_{SE} 来看，TP、NH_3-N 模拟效果较好，COD、BOD 模拟效果较差，书院站断面各状态变量模拟效果均较差，而龙湾店闸断面各状态变量模拟效果均较理想。从 R_{RMSE} 来看，COD 模拟效果最差，BOD 模拟效果处于可接受水平，而 NH_3-N、TP 模拟效果则处于较优水平。相较于率定期，验证期模拟效果整体有所提升，整体模拟效果符合预期。说明建立的泗河干流两个研究河段水质模型结构和参数合理，可用于水质目标约束条件下的生态流量的模拟研究。

3　模拟方案与结果分析

3.1　模拟方案

泗河干流书院水文站 1963～2019 年多年平均流量为 6.77 m^3/s，汛期 6～9 月的平均流量为 14.56 m^3/s，非汛期 10 月～翌年 5 月的平均流量为 2.8 m^3/s，但 6 月为汛前期，多年平均流量仅为 3.26 m^3/s，流量相对于汛期其他月份明显偏小；同时，从泗水大闸、书院水文站和龙湾店闸断面月尺度水质监测数据平均值来看，7～9 月整体水质条件较差，各污染物平均浓度相对 10 月～翌年 6 月较大。鉴于泗河季节性水质、水量条件差异，分别制定 7～9 月、10 月～翌年 6 月两个时期的水质、水量模拟方案，以期在水资源管理调度中可根据不同水质、水量条件适时调整生态流量方案，以免造成水资源的浪费。具体模拟方案如下：①水质方案。对泗水大闸和书院水文站两个研究河段月尺度水质监测数据分别进行统计分析，均选取上四分位点(情景 1)和二分位点(情景 2)对应监测值作为模拟方案，即分别可涵盖河段内 75%、50%的历史水质条件；污染源水质排放方案同样按两种情景设置；模型初始水质条件及出口断面状态变量浓度按Ⅳ类水限值进行设置。②水量方案。采用试算法试算出口断面各状态变量达标时的入流流量。根据泗河干流流量特性，入流流量范围设置为 0.5～20.0 m^3/s。根据研究河段内不同流量条件下洪水演进规律，将不同流量条件分别赋予一定的模拟时间(见表3)，确保该

表 3　水量模拟方案

Tab. 3　Programme of water quantity simulation

流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟时间/月	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟时间/月
0.5	4	4～9	2
1～3	3	10～20	1

中国知网　https://www.cnki.net

流量条件下模型可在赋予的时段内达到稳定，以形成稳定的水质效应。排污口流量变化较小，故采用常量形式，取监测流量的平均值。

3.2 模拟结果

根据模拟方案，得到书院水文站和龙湾店闸断面在两种水质情景下 4 个状态变量浓度达标时对应的入流流量，见表 4。

表 4 满足水质达标要求的下泄流量下限值

Tab. 4 Lower limit discharge flow meeting the water quality standard m^3/s

断面	水文季节	模拟方案	COD	BOD	NH_3-N	TP
书院水文站	7～9 月	情景 1	0.5	0.5	1	0.5
		情景 2	0.5	0.5	0.5	0.5
	10 月～翌年 6 月	情景 1	0.5	0.5	0.5	0.5
		情景 2	0.5	0.5	0.5	0.5
龙湾店闸	7～9 月	情景 1	7	3	2	2
		情景 2	4	1	0.5	0.5
	10 月～翌年 6 月	情景 1	1	2	0.5	0.5
		情景 2	0.5	0.5	0.5	0.5

根据统计数据，泗水大闸至书院水文站河段内水质条件较好，故在书院站断面，除 7～9 月情景 1 NH_3-N 浓度达标流量为 1 m^3/s 之外，其他情况下各状态变量浓度在 0.5 m^3/s 流量条件下即可处于达标水平。书院水文站至龙湾店闸河段内水质条件相对较差，出口断面状态变量浓度达标流量普遍较高。对于龙湾店闸断面在 7～9 月，情景 1 各状态变量对应达标流量均大于情景 2；在 10 月～翌年 6 月，除情景 1 COD、BOD 浓度达标流量分别为 1、2 m^3/s 之外，NH_3-N、TP 以及情景 2 各状态变量浓度达标流量均为 0.5 m^3/s。

泗河作为典型的季节性河流，枯水季节水量形势极为严峻，在水质达标的情况下需兼顾水量需求，最大限度地降低河段内断流的风险，保障水生生物生存需求和河流水体自净能力。根据泗河干流书院水文站 1963～2013 年发生断流的月份的实测月平均流量及月断流天数统计(图 5)，流量小于等于 0.8 m^3/s 时，断流次数为 57 次，占总

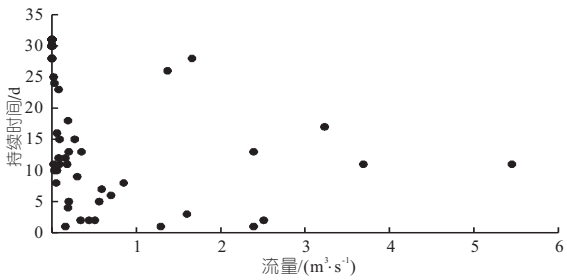


图 5 书院水文站断流流量及天数统计

Fig. 5 Statistics on flow breaks and duration of Shuyuan Hydrological Station

断流次数 83.8%，累计断流天数 1 200 d，占总断流天数的 90.8%；流量大于 0.8 m^3/s 时，断流风险明显降低。可见，保障河流连通性的流量不宜低于 0.8 m^3/s，因此将 0.8 m^3/s 设置为各状态变量浓度达标流量的下限。由此得到两个河段水质达标时的泗水大闸和书院水文站生态流量结果见表 5。

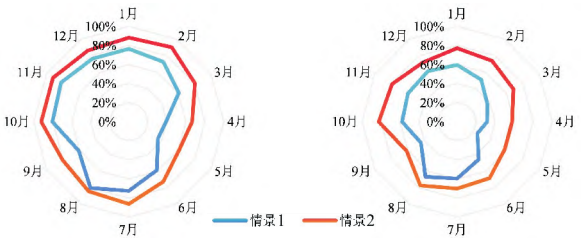
表 5 满足书院水文站水质达标要求的泗水大闸生态流量计算结果

Tab. 5 Ecological flow of Sishui Sluice which can meet the water quality standard of Shuyuan Hydrological Station m^3/s

生态断面	模拟方案	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
泗水大闸	情景 1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8
	情景 2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
书院水文站	情景 1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	7.0	7.0	7.0	2.0	2.0	2.0
	情景 2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	4.0	4.0	4.0	0.8	0.8	0.8

3.3 保证率分析

生态流量保证率指的是一定时期内，河道内流量大于生态流量阈值的时间序列长度与总时间序列长度的比值[14]。采用书院水文站 1963～2019 年实测和天然月径流系列，分别计算该断面天然和实测径流条件下各月的生态流量保证率，见图 6。



(a) 天然径流条件 (b) 实测径流条件

图 6 书院水文站生态流量保证率

Fig. 6 Guaranteed rate of ecological flow at Shuyuan Hydrological Station

由图 6 可知，天然径流条件下，情景 1 对应生态流量保证率除 4、5、9 月外基本能达到 60%，情景 2 对应生态流量保证率除 4、5、6 月外均在 80%以上。但实测径流条件下，两种情景对应的生态流量保证率整体降低约 20%，可见泗河流域人类活动对径流的影响较为显著。同时，根据书院水文站流量资料，历史上泗河干流断流较为频繁，每个月均存在流量为 0 或极端低流量的情况，故生态流量保证率均不能达到 100%。

需要特别关注的是 4、5 月份，受大陆季风气候影响，春季降水量明显偏少，导致这一时期的生态流量保证率最低。而根据书院水文站 1963～2013 年断流统计，泗河干流每年 4～5 月为枯水

中国知网 https://www.cnki.net

季节,断流频发,这一时期的水质情势虽较为和缓,但过低的流量却不利于满足水生生物繁殖需求,会对河流生态系统造成难以修复的破坏。因此,应加强这一时期的水资源管理调度,在保证生产生活用水的基础上,提高生态流量满足率。

4　结论

a. 以山东省泗河干流泗水大闸至书院水文站和书院水文站至龙湾店闸两个河段为例,以 COD、BOD、NH_3-N、TP 值为状态变量,基于 MIKE21 构建水动力水质耦合模型,并通过验证说明建立的泗河干流两个研究河段水动力水质模型结构和参数合理,可用于水质目标约束条件下的生态流量的模拟。

b. 通常在设置水质模型模拟方案时多使用污染负荷的概念,即将一定时间内进入水体的污染物总量作为水质条件,而本文由于缺乏泗河干流两个代表性河段有效的污染负荷统计数据,故以断面和排污口水质监测数据为基础,分别制定了可涵盖 75%(情景 1)和 50%(情景 2)历史水质条件的模拟方案,能够与实际情况更加符合,且计算结果更为客观可靠。

c. 本文在基于水质达标要求计算泗河干流两个代表性断面流量的过程中,考虑到了水质水量条件的季节性差异,同时通过分析断流监测数据,确定了维持河流水体连通的流量下限,更有利于保障河流水体自净能力。

参考文献:

[1] 罗慧萍,赵科锋,曹慧群,等. 关于水域纳污能力计算理论的总结与思考[J]. 长江科学院院报,2022,39(1):47-55,69.

[2] 孟春芳,宋孝玉,田珂宁,等. 卫河水系新乡段环境流量最小值研究[J]. 灌溉排水学报,2022,41(7):86-95.

[3] 李一平,施媛媛,姜龙,等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护,2019,35(4):1-8.

[4] 常文婷,潘向忠,翁仕龙,等. 基于水质达标的水电站最小下泄流量研究[J]. 环境科学与技术, 2015(增刊 A1):107-110.

[5] 余真真,闫莉,王瑞玲,等. 多目标协控下伊洛河自净需水流量研究[J]. 水资源保护,2020, 36(5):38-42.

[6] 韩亚萍. 基于断面水质目标的水库生态流量泄放研究[J]. 水电能源科学,2021, 39(5):50-53.

[7] 章运超,柴朝晖,王家生,等. 量质结合的举水新洲段生态流量[J]. 长江科学院院报,2023,40(7):1-7.

[8] 金传鑫,刘杨洋,高熠飞,等. 基于不同供水方式的西丽水库污染物浓度扩散规律研究[J]. 水力发电,2023,49(5):10-15,32.

[9] 徐宗学,李鹏,侯昕玥. 河道生态基流理论基础与计算方法研究[J]. 人民黄河,2019, 41(10):119-127.

[10] 张晓瑾,王月敏,李贺,等. 基于 SWAT 的泗河流域非点源污染物时空分布特征[J]. 山东大学学报(工学版),2022,52(3):134-140.

[11] 马铁梅,付俊峰,孙英. 基于 MIKE21 的异龙湖水动力优化与水质改善研究[J]. 水电能源科学,2023,41(7):54-58.

[12] 徐存东,任子豪,李智睿,等. 基于 MIKE21 的南浔区河网水动力水质耦合模拟研究[J]. 环境科学与技术,2022,45(10):51-59.

[13] 曹立. 泗河中下游水质及污染物通量分析研究[D]. 济南:山东大学,2020.

[14] 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):58-64,93.

Ecological Flow Study Based on Water Quality Attainment and River Connectivity

LI Xin-yu[1,2], LIU Pei-xi[3], LI Jian-jun[3], DIAO Yan-fang[1], SU Rui[1], GUO Shi-chao[1]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China;
2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Si River Sub-center of Jining Water Conservancy Affairs Development Center, Ji'ning 272000, China)

Abstract: River water quality pollution, as well as runoff breaks due to climate and human activities, can seriously affect the ecological health of the river and the sustainable economic and social development of the regions along the river. Therefore, two river sections from Sishui Sluice to Shuyuan Hydrological Station and from Shuyuan Hydrological Station to Longwandian Sluice of the main stream of the Sihe River in Shandong Province were taken as the research objects. The coupled hydrodynamic water quality model was constructed on the basis of MIKE21 with COD, BOD, NH_3-N and TP as the state variables, differentiating the hydrological seasons and formulating simulation schemes that can cover 75% (Scenario Ⅰ) and 50% (Scenario Ⅱ) of the water quality conditions, respectively. And then water quality effects were simulated under different flow conditions. Considering the water quantity demand of river connectivity, ecological flow was determined while the guaranteed rate of ecological flow at Shuyuan Hydrological Station was analyzed. The results show that the ecological flow of Sishui Sluice was 0.8 m^3/s from October to the next June and 1 m^3/s from July to September in Scenario Ⅰ, while the ecological flow of Scenario Ⅱ was 0.8 m^3/s in each month; The ecological flow of Shuyuan Hydrological Station was 2 m^3/s from October to the next June and 7 m^3/s from July to September in Scenario Ⅰ, while the ecological flow of Scenario Ⅱ was 0.8 m^3/s and 4 m^3/s in the two periods, respectively; The impact of human activities on runoff in the Sihe River Basin is significant and the ecological flow demand in April and May should be paid more attention to. The ecological flow calculated in this paper is conducive to meet the ecological needs of different sections of the mainstream of the Sihe River and different hydrological seasons, taking into account the water quality standards and the connectivity of the river.

Key words: Sihe River; water quality; hydrodynamic water quality coupling model; ecological flow

中国知网　https://www.cnki.net