

底洞沟流域污染溯源及水环境容量研究

马秋霞^{1,2}, 逢勇^{1,2}, 胥瑞晨^{1,2}, 宋为威^{1,2}, 胡祉冰^{1,2}

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了使底洞沟入嘉陵江断面水质达标,通过现场勘查、资料收集和野外同步监测,构建一维非恒定流数学模型,耦合 Thomas 算法,对底洞沟的水环境现状进行研究。结果表明:构建的模型拟合精度高,计算结果可靠;底洞沟水体主要超标因子为氨氮和总磷,氨氮、总磷入河量分别为 43.1、3.9 t/a;在污染源构成方面,城镇生活源对污染物入河量的贡献最大,达 76.5%;在空间位置方面,上游的贡献最大,占比达 92%;底洞沟的氨氮、总磷水环境容量分别为 16.3、2.2 t/a。建议对流域内污水管网进行整治,提高污水接管率,减少污染负荷,使入嘉陵江断面水质稳定达标。

关键词: 污染溯源; 水环境容量; Thomas 算法; 底洞沟

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0058-06

Pollution origins and water environmental capacity of Didonggou River Basin

MA Qiuxia^{1,2}, PANG Yong^{1,2}, XU Ruichen^{1,2}, SONG Weiwei^{1,2}, HU Zhibing^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the water quality status of the cross section of Didonggou River to Jialing River, a one-dimensional unsteady flow model coupled with Thomas algorithm was constructed to study the current situation of water environment in Didonggou River based on in situ investigation, data collection and field synchronous monitoring. The results show that the main indicators that exceeded the required standards were $\text{NH}_3\text{—N}$ and TP; the proposed model exhibited excellent performance with high precision and reliable prediction results; the amount of $\text{NH}_3\text{—N}$ and TP pollution discharge to Jialing River were 43.1 t/a and 3.9 t/a, respectively; according to the analysis of the composition of pollution sources, about 76.5% of the pollution load was contributed by the urban sewage; from the spatial perspective, over 92% of the pollution load came from the upstream; the water environmental capacity of Didonggou River for $\text{NH}_3\text{—N}$ and TP are 16.3 t/a and 2.2 t/a, respectively. It is suggested that control measures such as repairing the sewage pipe network in the Didonggou River Basin, improving the rate of piped sewage and reducing pollution load should be implemented, so as to make the water quality of the Didonggou to Jialing River section reach the required standard.

Key words: pollution origin; water environmental capacity; Thomas algorithm; Didonggou River

1 研究背景

随着人口的增长与经济社会的快速发展,水环境污染日益加剧。水环境容量的研究对控制水域污染物排放总量以及保护和改善水生态环境具有重要意义^[1-2],因而针对流域污染负荷和水环境容量计算方法的研究也逐渐成为学者们关注的焦点^[3-5]。

入河污染负荷是指各污染源在单位时间内向水域排放的污染物总量,而污染物入河量是入河污染负荷的主要表达方式^[6]。水环境容量是指在给定的水质目标和水文设计条件下,水域的污染物最大允许排放量^[7]。目前应用较普遍的水环境容量计算方法包括模型试错法^[8]、概率稀释模型法^[9]、解析法^[10]和系统分析法^[11]等,在这些计算方法的应

收稿日期:2020-06-20; 修回日期:2020-11-24

基金项目:国家重大科技专项(2018ZX07208-003)

作者简介:马秋霞(1995-),女,浙江嘉兴人,博士研究生,研究方向为水环境数学模拟。

通讯作者:逢勇(1958-),男,山东胶南人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水环境数学模拟和环境影响评价与规划。

用中,大多以水量、水质模型为基础,建立数学模型对水环境容量进行研究。瞿一清等^[12]通过建立二维数学模型对城南河进行了水量、水质模拟,并对控制断面达标下的水环境容量进行了研究,提出了两种水质提升措施;王雪等^[13]通过构建模型对枯水期不同保证率条件断面达标下秃尾河污染物排放总量控制进行了研究,并提出了多种总量控制方案;韩梓流等^[14]基于京杭运河五牧断面的水质达标情况,建立一维数学模型对研究区域进行了水环境容量研究。总体而言,以上研究缺乏对研究区域污染物的来源分析,提出的解决方案针对性不强,且水环境容量的计算结果精度不高。

本文以底洞沟流域为研究区域,基于《重庆市北碚区统计年鉴 2018》,分析底洞沟流域各污染物的主要来源,构建一维非恒定流数学模型并耦合 Thomas 算法对其水环境现状进行研究,为底洞沟河道治理提供具有方向性的措施和建议。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区域概况

底洞沟流域(106°26'E~106°29'E;29°44'N~29°47'N)位于重庆市北碚区蔡家岗街道施家梁镇境内,是嘉陵江下游段右岸一级支流,处于中梁山中段东麓,大致呈狭长的西南至东北走向。底洞沟发源于嘉陵江流域西南部尖顶坡一带,源头段东流至瓦房子,之后折而流向东北方向,蜿蜒穿行于两翼山脉之间的槽谷内,沿途分别经狗脚湾、龙家桥、狮子坝、黑龙潭等地,汇纳左岸老厂沟支流、底洞洞支沟、赵家沟支流,最后在嘉陵江流域东北角汇入嘉陵江。底洞沟流域面积为 11.6 km²,干流长度为 7.8 km,平均比降为 16.9‰。底洞沟流域地理位置及主要水系见图 1。

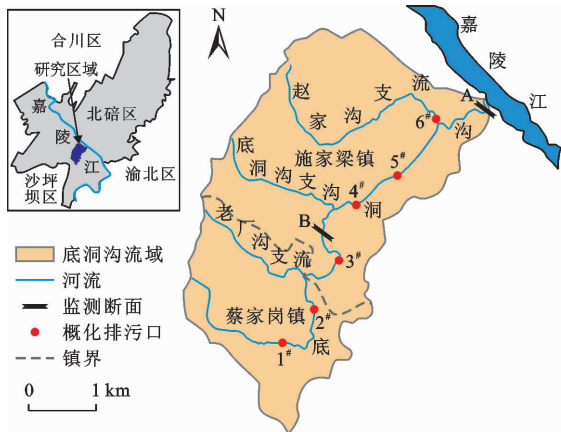


图 1 底洞沟流域地理位置及主要水系

2.2 研究方法

2.2.1 野外同步监测 本研究于 2019 年 2 月 27 日至 3 月 2 日进行野外同步监测,在底洞沟流域内设置入嘉陵江断面(A 断面)、施家梁-蔡家岗交界断面(B 断面)2 个监测断面(图 1),按照要求进行水样采样,并分别参考相关规范(GB 11892—1989、HJ 535—2009 和 GB 11893—1989)对水样中的 COD_{Mn}、氨氮和总磷进行测定。

2.2.2 入河污染负荷计算 本次污染物产生量及入河量采用污染源调查方法进行计算,主要对工业企业、城镇生活、农村生活、农田面源及畜禽养殖进行污染物入河量分析,污染物入河量 W 的计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^n N_i \alpha_i \beta_i \gamma_i \quad (1)$$

式中: N_i 为第 i 种类型污染源的数量或面积; α_i 为第 i 种类型污染源的污染物排放系数,本文工业企业污染物排放系数由重庆市《2018 年四清四治企业许可证台账》提供,城镇生活、农村生活、农田面源及畜禽养殖污染物排放系数取值于《第一次全国污染源普查产排污系数手册》,详见表 1; β_i 为第 i 种类型污染源的污染物入河系数; γ_i 为第 i 种类型污染源的污染物修正系数。

表 1 各污染源的污染物排放系数取值

污染源	污染物排放系数 α_i		
	COD _{Cr}	氨氮	总磷
城镇生活(每人)/(g·d ⁻¹)	70	12	0.90
农村生活(每人)/(g·d ⁻¹)	50	5.5	0.45
农田面源/(g·hm ⁻² ·d ⁻¹)	150	30	3.75
每头畜禽养殖/(kg·a ⁻¹)	牛	244	19.7
	猪	48.8	3.9
	家禽	0.8	0.2

2.2.3 水环境容量计算 综合考虑水文、污染来源等因素,对研究区域内进入水功能区的各污染源进行概化,通过查阅《中华人民共和国水文年鉴》第 6 卷 9 册《长江流域水文资料——嘉陵江区》,取 90% 保证率下降雨径流计算结果作为设计水文条件,取重庆市北碚区 2019 年河长制水质断面现状监测的不利值作为水质边界,利用一维非恒定流数学模型和 Thomas 算法,计算得到入嘉陵江断面水质达Ⅲ类水标准时各概化排口的允许排污量,各概化排口的允许排污量之和即为基于考核断面水质达标的水功能区水环境容量。

(1) 水动力模型。以描述明渠一维非恒定流、补充了漫滩和旁侧入流的圣维南方程组作为水动力计算的控制方程, 包括连续性方程和动量方程^[12,15-17], 方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C_z AR} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; b 为调蓄宽度, 指包括滩地在内的全部河宽, m ; x 为沿水流方向空间坐标, m ; t 为时间, s ; q 为旁侧入流流量(将概化排污口视为点源从岸边汇入底洞), m^3/s , 入流为正, 出流为负; h 为水位, m ; α 为动量校正系数; R 为水力半径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; C_z 为谢才系数; A 为主槽过水

断面面积, m^2 。

(2) 对流扩散模型。污染物的扩散、随水流的运动及自身的降解决定着污染物在水中的浓度及分布, 一维对流扩散方程为对流扩散模块的控制方程^[12,15-17], 方程式如下:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_1 q \quad (3)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; x 为沿水流方向的空间坐标, m ; A 为主槽过水断面面积, m^2 ; D 为纵向扩散系数; C 为物质浓度, mg/L ; C_1 为源汇浓度, mg/L ; K 为线性衰减系数, s^{-1} ; t 为时间, s ; q 为旁侧入流流量, m^3/s 。

(3) Thomas 算法。本次水环境容量研究中采用 Thomas 算法对水动力方程组和对流扩散方程式进行最终求解。存在 3 对角线性方程组 $Ax = f$, A 可分解为两个三角线性方程组 P 、 Q ^[18]:

$$A = \begin{pmatrix} b_1 & c_1 & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \\ & & & a_n & b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1 & & & & \\ a_2 & p_2 & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & a_{n-1} & p_{n-1} & \\ & & & a_n & p_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & q_1 & & & \\ & 1 & q_2 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & q_{n-1} \\ & & & & 1 \end{pmatrix} = PQ \quad (4)$$

质监测值可得线性回归方程 $Y = 3.15X + 1.25$ 。
COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 的水质超标率的计算公式如下:

$$L_{\text{COD}_{\text{Mn}}} = \frac{X - X_s}{X_s} \times 100\% \quad (8)$$

$$L_{\text{COD}_{\text{Cr}}} = \frac{Y - Y_s}{Y_s} \times 100\% \quad (9)$$

$$L_{\text{COD}_{\text{Mn}}} = L_{\text{COD}_{\text{Cr}}} \quad (10)$$

因此, COD_{Mn} 的水质超标率也可用于分析 COD_{Cr} 的水环境容量计算结果的合理性。

3 结果与分析

3.1 现状水质评价

图 2 为野外同步监测的 2019-02-27 至 2019-03-02 底洞沟 A、B 监测断面水质指标现状。由图 2 中的监测结果可知, A、B 两个监测断面在 2019 年 2 月 27 日至 3 月 2 日期间各项水质指标浓度变化幅度较小, 其中 COD_{Mn} 均达标, 氨氮和总磷均超标。A 断面氨氮平均浓度为 1.71 mg/L (平均超标 71%), 总磷平均浓度为 0.31 mg/L (平均超标 55%); B 断面氨氮平均浓度为 4.78 mg/L (平均超标 3.78 倍), 总磷平均浓度为 0.21 mg/L (平均超标 5%)。

3.2 水污染溯源分析

根据《重庆市北碚区统计年鉴(2018 年)》《北碚区 2018 年四清四治企业名单》以及《北碚区畜禽

$$\text{其中: } \begin{cases} p_1 = b_1 \\ q_i = c_i/p_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \\ p_i = b_i - a_i q_{i-1} \quad (i = 2, 3, \dots, n) \end{cases}$$

(4) 概化排污口设置。研究区污染源共概化为 6 个排污口, 底洞沟上游概化为 1[#]、2[#]和 3[#]排污口; 下游概化为 4[#]、5[#]和 6[#]排污口, 各概化排污口分布见图 1。

(5) 水环境容量合理性分析。水环境容量合理性指标 R :

$$R = |L - K| \quad (5)$$

$$L = \frac{C_p - C_s}{C_s} \times 100\% \quad (6)$$

$$K = \frac{W_p - W_c}{W_c} \times 100\% \quad (7)$$

式中: L 为水质超标率, %; C_p 为现状水质浓度, mg/L ; C_s 为水质标准浓度(GB 3838—2002 河道 III 类水标准), mg/L ; K 为污染物需削减率, %; W_p 为污染物入河量, t/a ; W_c 为水环境容量, t/a 。

瞿一清等^[12]和韩梓流等^[14]在基于断面水质达标的水环境容量计算研究中提出, 若 R 在 30% 以内, 则计算所得的水环境容量基本合理。

COD_{Mn} 与 COD_{Cr} 两者之间存在显著的相关性与一定的线性关系^[19-22], 以 COD_{Mn} 浓度为 X , COD_{Cr} 浓度为 Y , 根据重庆市北碚区 2019 年河长制断面水

养殖情况统计表(20 生猪当量以上)》将底洞沟水质污染源分为工业企业、城镇生活、农村生活、农田面源和畜禽养殖,并计算出各污染源对入河水质指标的贡献率,如图 3 所示。由图 3 可计算出底洞沟流域各污染物入河量分别为:COD_{Cr} 361.2 t/a、氨氮 43.1 t/a、总磷 3.9 t/a。对图 3 中污染源构成进行分析,城镇生活源对污染物的入河量的贡献率最大,其各污染物入河量分别为:COD_{Cr} 286 t/a、氨氮 32.7 t/a 和总磷 2.9 t/a,各占总污染物入河量的 79.2%、

75.9% 和 74.3%;工业企业、农村生活和农田面源对各污染物入河量的贡献率均较小。由于研究区域内无规模化畜禽养殖厂,因而畜禽养殖几乎无贡献。

根据区域特征对各概化排污口进行污染物入河量分析,结果见图 4。图 4 表明,底洞沟上游是各污染物入河量的主要来源,其中 3[#]概化排污口对污染物入河量的贡献最大,达 34%,其各污染物入河量分别为:COD_{Cr} 125.6 t/a、氨氮 14.1 t/a、总磷 1.3 t/a;2[#]和 1[#]概化排污口的贡献率分别为 31% 和 27%。

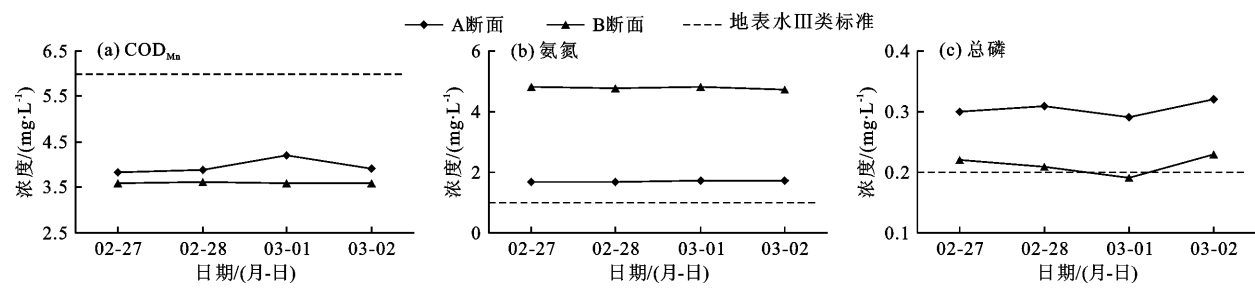


图 2 2019-02-27 - 2019-03-02 底洞沟 A、B 监测断面水质指标现状

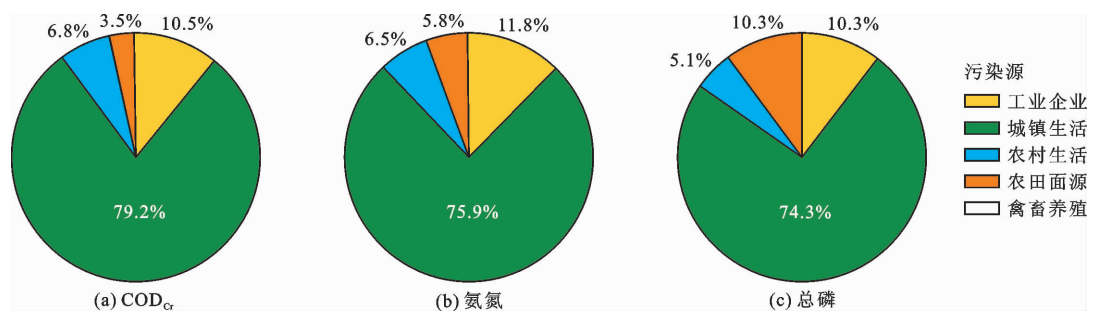


图 3 2019-02-27 - 2019-03-02 底洞沟水质污染源构成及其贡献率

3.3 水环境容量分析

3.3.1 模型参数率定 根据野外同步监测结果,采用试错法对水质模型参数进行率定,模拟时段计算值与实测值的对比如图 5 所示。由图 5 中的结果经统计分析得出 COD_{Mn}、氨氮和总磷的模拟平均相对误差分别小于 13%、7% 和 16%,表明模拟结果与实际值拟合较好。底洞沟 COD_{Mn}降解系数为 0.09 ~ 0.11 d⁻¹,氨氮降解系数为 0.065 ~ 0.080 d⁻¹,总磷降解系数为 0.060 ~ 0.075 d⁻¹,表明该水质模型可

用于水环境容量的精准计算。

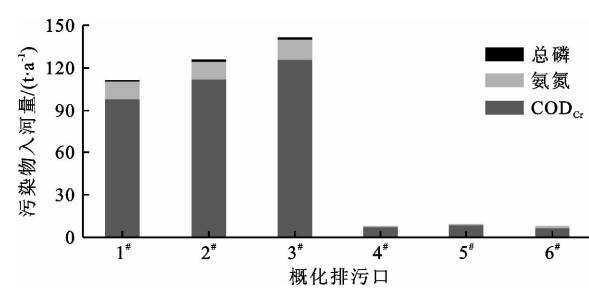


图 4 底洞沟各概化排污口污染物入河量

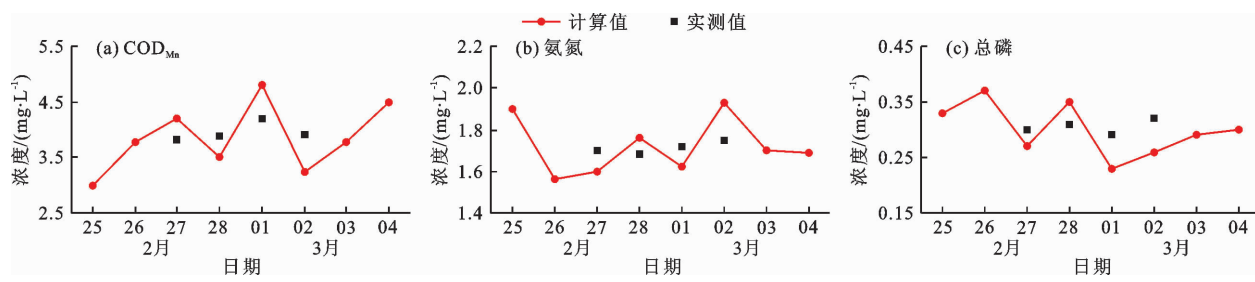


图 5 2019 年模拟时段内底洞沟水质模型计算值与实测值的对比

3.3.2 计算结果与合理性分析 利用已建立的水环境数学模型,计算得到的满足入嘉陵江断面(监测断面 A)达Ⅲ类水质目标的各概化单元允许排污量见表2。如表2所示,底洞沟上游允许排污量远大于下游,约占总允许排污量的87%;1[#]、2[#]和3[#]概化排污口的允许排污量基本处于同一水平,其中3[#]徐家院子河段的COD_{Cr}允许排污量最大,约占COD_{Cr}总允许排污量的35%;2[#]三溪村河段的氨氮和总磷允许排污量最大,分别占各自总允许排污量的33%和32%。

表2 底洞沟各概化单元允许排污量

概化排污口	河段名称	允许排污量/(t·a ⁻¹)		
		COD _{Cr}	氨氮	总磷
上游	1 [#] 瓦房子河段	106.7	4.2	0.5
	2 [#] 三溪村河段	121.9	5.3	0.7
	3 [#] 徐家院子河段	137.0	4.7	0.6
下游	4 [#] 颐尚温泉旅游度假区河段	7.8	0.8	0.1
	5 [#] 狮子村河段	9.1	0.9	0.1
	6 [#] 赵家沟河段	7.7	0.4	0.1
合计		390.2	16.3	2.2

将底洞沟污染物入河量与水环境容量进行对比分析,底洞沟COD_{Cr}水环境容量为390.2 t/a, COD_{Cr}入河量为361.2 t/a,理论上无需削减;氨氮水环境容量为16.3 t/a,氨氮入河量为43.1 t/a,理论上需要削减26.8 t/a(需削减62%);总磷水环境容量为2.2 t/a,总磷入河量为3.9 t/a,理论上需要削减1.7 t/a(需削减44%)。

基于入嘉陵江断面(监测断面 A)的水质,本文计算得出的氨氮和总磷的水质超标率与需削减率之差均在20%以内,说明本次研究计算的水环境容量值是合理的。

4 讨论

对底洞沟流域污染负荷的研究表明,城镇生活源是污染物入河量的最大贡献者,各污染物平均约占总入河量的76.5%,因而城镇生活源对水环境的污染不容忽视。造成城镇生活污水排入河道的主要原因可归纳为污水管网设计不合理、资金短缺造成污水处理不当以及城市污水处理的善后问题^[23-25]。为改善城市污水处理问题,应做好城市污水处理规划,加强对污水管网的维护,严控污水处理标准,建

立完善的运营、管理机制,提高管理水平,积极满足城市居民日常生活^[26]。

经现场勘查、污染溯源分析及水环境容量研究可知,底洞沟上游蔡家岗镇建有的污水处理厂出水达不到排放标准,河道沿途污水管道多处破损、地下管网混乱,使富含氮元素与磷元素的城镇生活污水直排进入河道,氨氮和总磷的入河量大于水环境容量,需要对其削减。

现针对底洞沟流域实际问题,并响应“十三五”规划纲要,本研究建议对蔡家岗镇和施家梁镇实施污水管网整治、污水处理厂提标改造等措施,使城镇生活污水收集处理率提升至85%。在整治措施实施后,COD_{Cr}、氨氮和总磷可分别削减113.5、27.8和2.4 t/a,通过已构建的一维非恒定流模型预测入嘉陵江断面(A断面)COD_{Mn}、氨氮和总磷的年平均浓度值分别为3.51、0.96和0.19 mg/L,可满足河道地表水Ⅲ类水标准,故此次建议措施对底洞沟流域水质整治具有一定的指导意义。

5 结论

通过对底洞沟流域现场勘查监测、污染溯源分析和水环境容量研究,得出以下结论:

(1)底洞沟流域COD_{Cr}、氨氮、总磷入河量分别为361.2、43.1、3.9 t/a,相应的水环境容量分别为390.2、16.3、2.2 t/a。其中氨氮、总磷入河量大于水环境容量,需要对氨氮、总磷进行污染物削减,从而改善底洞沟水质,使底洞沟入嘉陵江断面水质达标。

(2)通过水污染溯源分析可知,城镇生活源对污染物入河量的贡献最大,平均约占总污染物入河量的76.5%,对城镇生活源的管控成为流域水质整治的主要方向。经勘查发现,底洞沟流域上游污水处理厂出水不达标,河道沿途污水管网破损、混乱,使富含氮元素和磷元素的城镇生活污水直排进入河道,导致底洞沟入嘉陵江断面水质不达标。

(3)建议对区域城镇生活污染源进行整治,应重点通过新建、改建、修建区域污水管网以及对城镇生活污水厂进行提标改造,以减少区域污染负荷,保障区域水生态安全,维护水生态系统功能,实现水资源与水生态环境健康发展。

参考文献:

- [1] 杨国录,陆晶,骆文广,等. 水环境容量研究共识问题探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(4):1-6.

- [2] 张强,刘巍,杨霞,等. 汉江中下游流域污染负荷及水环境容量研究[J]. 人民长江,2019,50(2):79-82.
- [3] 花莉,曹立帆,张浏,等. 双桥河流域水环境容量及污染负荷分配研究[J]. 陕西科技大学学报,2019,37(1):31-36.
- [4] 王雁,高俊峰,刘正文,等. 潼湖流域污染负荷与水环境容量[J]. 湿地科学,2016,14(3):354-360.
- [5] 李响,陆君,钱敏蕾,等. 流域污染负荷解析与环境容量研究——以安徽太平湖流域为例[J]. 中国环境科学,2014,34(8):2063-2070.
- [6] 张丹,段慧,杨洪霞,等. 农村河流断面污染物通量估算研究[J]. 中国沼气,2015,33(3):95-98.
- [7] 逢勇,陆桂华,王华,等. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [8] 袁寿荣. 陆良县水污染控制系统规划研究[J]. 云南环境科学,2000,19(4):20-22.
- [9] 林国强. 南流江玉林城区段污染物总量控制及方案[J]. 广西水利水电,2002(1):54-57.
- [10] 戴正德,王蕾,马生伟,等. 杞麓湖水污染总量控制和工程治理的效益分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),2000,22(1):18-19+22.
- [11] 赵军. 浅论污染物排放总量控制[J]. 山东环境,2000(S1):28-29.
- [12] 瞿一清,逢勇. 基于龙王庙断面水质达标的城南河流域水环境容量[J]. 水资源保护,2018,34(5):76-80.
- [13] 王雪,逢勇,谢蓉蓉,等. 基于控制断面水质达标的秃尾河流域总量控制[J]. 北京工业大学学报,2015,41(1):123-130.
- [14] 韩梓流,逢勇. 基于京杭运河五牧断面水质达标的水环境容量计算研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):81-87.
- [15] 姚凌伟,逢勇. 秦淮新河引水量对断面水质达标影响的研究[J]. 四川环境,2017,36(4):118-122.
- [16] 宋为威,逢勇. 秦淮河流域控源截污与生态补水联合效应研究[J]. 水力发电学报,2018,37(1):31-39.
- [17] 宋为威,逢勇. 不同行政区入秦淮河污染物通量分担率研究[J]. 水资源保护,2018,34(3):91-95.
- [18] 王兴波,钟志华. 求解周期性三对角方程组的广义 Thomas 算法[J]. 计算力学学报,2004,21(1):73-76.
- [19] 高明,黄绍祥,彭小明. 湖泊水体中 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、 BOD_5 、 DO 之间相互关系的研究[J]. 环境科学导刊,2013,32(3):121-123.
- [20] 王晓春. 化学需氧量(COD_{Cr})和高锰酸盐指数(COD_{Mn})相关关系分析[J]. 山西科技,2015,30(4):59-61.
- [21] 王晶. 浅析地表水中高锰酸盐指数(COD_{Mn})和化学需氧量(COD_{Cr})之间的相关性分析[J]. 科技经济导刊,2019,27(29):100.
- [22] 白毓豪. 邕江水 COD_{Cr} 与 COD_{Mn} 的相关性探讨[J]. 广西化工,1993,22(1):47-50.
- [23] 邢景敏,张后辉. 城市生活污水治理问题及对策探析[J]. 环境与发展,2019,31(7):52+54.
- [24] 徐毅. 城市污水管网项目造价的影响因素及控制措施[J]. 工程技术研究,2019,4(16):156-157.
- [25] 刘滨. 城市污水处理在环境工程中的探讨[J]. 中外企业家,2019(27):96-97.
- [26] 王贻峰. 关于环境工程污水处理的几点建议[J]. 石化技术,2019,26(6):316+327.

(上接第57页)

- [22] 祁晓凡,李文鹏,李传生,等. 济南岩溶泉域地下水位与降水的趋势性与持续性[J]. 灌溉排水学报,2015,34(11):98-104.
- [23] 杨丽芝,刘春华,祁晓凡. 济南泉水水化学特征变异研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):59-64.
- [24] 隋海波,康凤新,李常锁,等. 水化学特征揭示的济北地热热水与济南泉水关系[J]. 中国岩溶,2017,36(1):49-58.
- [25] 李常锁,武显仓,孙斌,等. 济南北部地热水水化学特征及其形成机理[J]. 地球科学,2018,43(S1):313-325.
- [26] 西蒙·海金. 神经网络原理(第二版)[M]. 叶世伟,史忠植,译. 北京:机械出版社,2004.
- [27] 韦凌翔,董建军,陈志龙,等. 基于BP神经网络的城市货运生成预测模型[J]. 上海海事大学学报,2020,41(4):50-54.
- [28] 余胜威. MATLAB 优化算法案例分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [29] 阎俊爱,钟登华. 基于遗传算法的神经网络优化预测模型及其在年径流预报中的应用[J]. 水利水电技术,2003,34(6):1-5.
- [30] 杨梅,卿晓霞,王波. 基于改进遗传算法的神经网络优化方法[J]. 计算机仿真,2009,26(5):198-201.