

连续水闸对河流 COD 容量的影响*

伍中航, 孙海龙, 冯镜洁**, 李 然, 任 爽, 袁雨亮

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘 要: 水闸建设对河流产生阻隔作用, 改变了河段水流形态, 污染物输运及水质时空分布也随之发生改变, 进而可能对水环境容量产生影响。本研究以拉萨河城区段为研究对象, 考虑水闸建设对水动力学条件的影响, 在利用平面二维模型进行水动力-水质模拟的基础上, 计算分析了水闸建设前、后 COD 的水环境容量, 探讨了连续水闸建设对河流水环境容量的影响。研究成果表明, 水闸修建对水环境容量的影响主要有两个方面: 一是水闸蓄水后, 水体由流动转变为相对静止的状态, 闸前水流流速减缓, 水深增加, 影响污染物的扩散, 降低污染物降解系数, 进而影响污染物降解过程; 二是水闸蓄水会使污染物在库区滞留, 使污染物滞留时间增加, 从而提高污染物的降解量。拉萨河水闸修建后, 因水闸蓄水影响, 流速减缓, 污染物向河道中央扩散受阻, 易聚集于排污侧; 与天然河道相比, 蓄水河段平均流速由 0.34 m/s 下降至 0.10 m/s, 平均水深由 0.6 m 增大至 2.0 m, COD 降解系数由 0.12 d⁻¹ 下降至 0.04 d⁻¹, 下降约 67%, 污染物滞留时间增大为原来的 3 倍左右。计算结果表明, 在两种影响的综合作用下, 1 个水闸使研究河段 COD 容量下降约 2.2%, 2 个水闸共同作用使 COD 容量下降约 9.9%, 3 个水闸共同作用使 COD 容量下降约 12.3%。整体来看, 连续水闸对河流水环境容量产生了一定影响, 水闸数量越多, 对水环境容量的影响越大。

关键词: 水环境容量; 水闸; 降解系数; 水质; 拉萨河

Influence of continuous sluices on river water environmental capacity of COD*

Wu Zhonghang, Sun Hailong, Feng Jingjie**, Li Ran, Ren Shuang & Yuan Yuliang

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R.China)

Abstract: The sluice construction has a blocking effect on river, which changes the flow pattern, the transport of pollutants and the temporal and spatial distributions of water quality, hence may have an impact on the water environmental capacity. In this study, the urban section of the Lhasa River is taken as the research case, and the influence of sluice construction on hydrodynamic conditions has been studied. On the basis of hydrodynamic and water quality simulations of two-dimensional model, the water environmental capacity of COD before and after sluice construction is calculated and analyzed, and the influence of continuous sluice construction on river water environmental capacity is discussed. The results show that there are two main aspects of the influence of sluice construction on water environmental capacity. First, once sluice stores water, the water body changes from flowing to relatively static state, the flow velocity in front of sluice slows down, the water depth increases; these affect the diffusion of pollutants, reduce the degradation coefficient of pollutants, and then affect the degradation process of pollutants. Second, sluice storage makes pollutants stay in the reservoir area, so that the retention time of pollutants will be increased, which leads to the increase of degradation of pollutants. After the construction of the Lhasa River sluices, due to the influence of sluices water storage, the velocity of pollutants is slowed down, and the diffusion of pollutants to the central part of the river is hindered, which allows pollutants to easily accumulate on the sewage-draining side. Comparing with the natural river, the average flow velocity in the sluice storage area decreased from 0.34 m/s to 0.10 m/s, the average water depth increased from 0.6 m to 2.0 m, and the COD degradation coefficient decreased from 0.12 d⁻¹ to 0.04 d⁻¹ (about 67% decrease), and the pollutant retention time increased by about three times. The calculation results show that, one sluice reduces the COD capacity by about 2.2%, two 9.9%, and three 12.3%. Overall, the continuous sluices have certain impacts on the river water environmental capacity. The more sluices, the greater the impacts on the wa-

* 2022-02-10 收稿; 2022-06-22 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52039006, U2240212)资助。

** 通信作者; E-mail: fengjingjie@scu.edu.cn。

ter environmental capacity.

Keywords: Water environmental capacity; sluice; degradation coefficient; water quality; Lhasa River

随着河流上水工建筑物的兴建,库、闸等改变了河流的天然水文过程,河流内水质及分布也随之发生改变。在水工建筑物中,水闸应用十分广泛,常用于挡水或泄水,河流上闸坝工程的修建改变了水流的连通性,使河流水动力条件发生变化,进而影响了水体中污染物的降解、沉降和输运过程,导致河流水质发生改变。

闸坝的调度运行对河流水环境容量存在有利与不利的影 响。三峡工程蓄水后,小江流域 COD_{Cr} 、氨氮、总磷水环境容量均有所降低^[1]。三峡工程的运行使洞庭湖 COD_{Mn} 水环境容量在枯水期增大、丰水期降低^[2]。南水北调工程的实施使汉江中下游河段的水环境容量减少,降低了水体自净能力^[3]。河流梯级开发势必会带动周边社会经济发展,可能会使污染负荷提高,入河污染物增多,降低河流的水环境容量^[4]。

闸坝的建设和运行不可避免会对水体自净能力及河流水质产生了影响。土耳其 Kilickaya 大坝建成后,库区水质有一定程度的改善,除 Na^+ 和 Cl^- 之外,其余大部分水质因子的年平均浓度有所下降,研究者认为可能是由于污染物在水库的滞留时间长,污染物得到了有效沉降^[5]。土耳其 Kurtun 大坝的运行后,下游河段亚硝酸盐、磷酸盐年平均浓度降低,而硝酸盐、氨氮、总氮及 COD 年平均浓度有所增加^[6]。韩国 Geum 河口大坝建造后,库区和下游河口水质均有一定程度恶化,在丰水期,水库的流量对河口水质有较大影响,而在枯水期,开闸次数少,流量小,对河口水质影响不大^[7]。闸坝泄水时流速较大的水流易使底泥发生扰动,底泥污染物释放造成二次污染,使水质恶化^[8],闸坝蓄水时,库区蓄水量较大,水体纳污能力强,一定程度上稀释了污染物浓度^[9]。

降解系数的大小对于污染物降解过程和水环境容量计算至关重要。有研究指出,与静止水体相比,增大流速能增强水体污染物的自净能力,提高污染物降解速率^[10]。水闸蓄水后,河流水动力条件发生改变,对污染物降解系数的影响较大。Wright 等^[11]利用美国多处河流监测资料,提出了 BOD 降解系数和河流水动力条件的关系式。Luo 等^[12]研究发现河流流速对污染物降解系数的影响最为显著,流速越高,降解系数越高。华祖林等^[13]考虑了流速对湖泊中 COD_{Mn} 降解系数的影响,通过动态实验和静态实验提出了 $K_{\text{动}}$ 、 $K_{\text{静}}$ 及增量 Δk ,并建立了 Δk 与流速水深之比的关系式。李锦秀等^[14]通过收集三峡库区段河道的历年水文数据,分析了该河段天然河道水流运动特征,对三峡库区段河道进行多次数值模拟,结合三峡水库建设后的水流条件变化趋势,将 BOD₅ 的降解系数表示为流速、水深和温度的函数。Huang 等^[15]通过环境水槽试验,模拟了典型污染水体中不同流速条件下 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的降解过程,建立了降解系数和流速的定量关系式。崔文生等^[16]总结了国内外学者针对水力特征影响降解系数的研究,建议采用 Bosko 的公式对降解系数进行修正,该公式被应用于日本隅田川、我国长江中下游和北运河水质^[17]研究。还有许多学者针对我国淮河—海河水系^[18]、三峡库区重庆段^[19]、浏阳河长沙段^[20]等地的河流污染物降解系数作了研究,拟合得到了降解系数与流速有关的经验关系。

综合分析表明,闸坝的修建对河流水环境容量有一定影响,目前的研究多集中于天然河道水环境容量研究和大型水利工程对河流水环境容量的影响研究。许多城市或农村河段常修建中小型水闸用于拦蓄、调洪,或为营造宽阔的滨水景观,以改善居民生活环境,这类水闸具有数量较多、分布密集、布置连续的特点,上下游两个水闸间距较短,连续的隔断作用对河流的连通性影响较大,因而需要重视其对水环境的影响。为此本文选择拉萨河城区段为典型河段,结合水闸的布置,采用数学模型方法研究水闸运行前后河流水质和水环境容量变化,探讨水闸运行对水环境容量的影响。

1 研究河段概况

研究河段位于拉萨河城区段,全长约 11.0 km,研究范围见图 1。近年来该河段陆续修建了 3 个水闸,自上游至下游分别为 4[#]闸、3[#]闸与 2[#]闸,3 个水闸分别于 2016 年 5 月、2014 年 10 月、2016 年年底完工。4[#]闸与 3[#]闸之间距离为 3.4 km,3[#]闸与 2[#]闸之间的距离为 2.9 km。3 个水闸正常蓄水深度在 2.2~2.5 m 之间,回水长度为 1.7~2.6 km。

研究河段上游约 90 km 处建有直孔水电站,直孔水电站于 2007 年 9 月完工。按照《拉萨河流域综合规划环境影响报告书》^[21] 要求,直孔电站需保证下游唐家水文站生态基流 $37 \text{ m}^3/\text{s}$,拉萨水文站生态基流 $39.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。4[#]、3[#] 和 2[#] 闸均无调节性能,可以认为水闸建成后基本未改变河道流量。根据拉萨水文站资料,研究河段多年平均径流量为 $288 \text{ m}^3/\text{s}$,枯水期平均流量为 $74 \text{ m}^3/\text{s}$,本文水环境容量研究中采用 90% 保证率下最枯月平均流量 $42 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为设计流量条件。

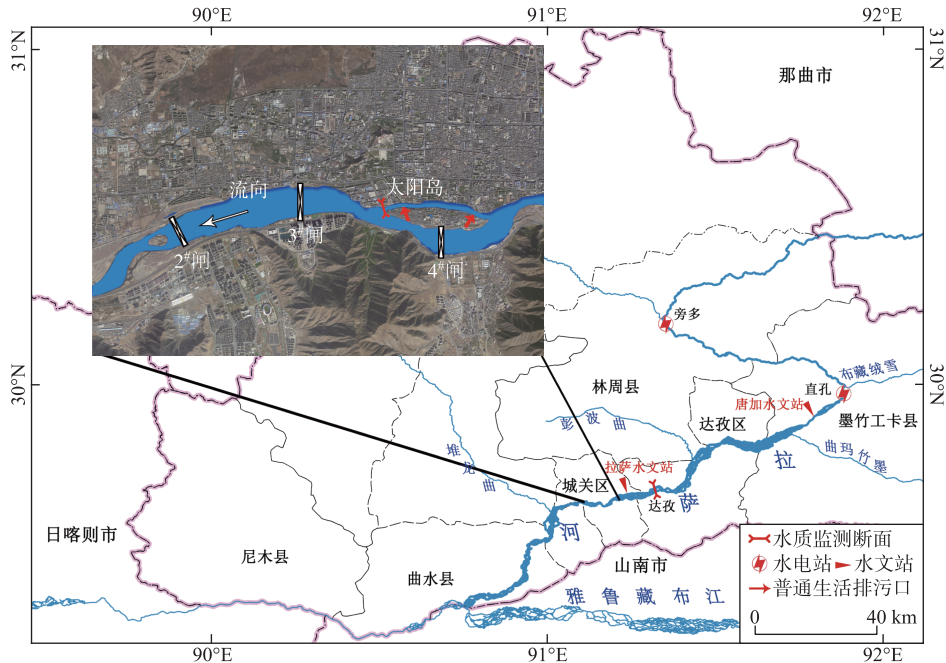


图 1 研究河段示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study river reach

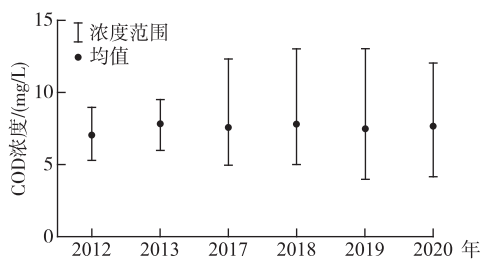


图 2 研究河段 2012—2020 年年均水质变化

Fig.2 Annual average water quality change in the study reach from 2012 to 2020

研究河段污染负荷整体较低,污染物入河量较少,污染负荷以生活污水为主。根据当地水质监测资料,建闸前(2012—2013 年)研究河段 COD 浓度范围为 $5.3 \sim 9.5 \text{ mg/L}$,平均浓度为 7.2 mg/L ,建闸后(2017—2020 年)研究河段 COD 浓度范围为 $5.0 \sim 13.0 \text{ mg/L}$,平均浓度为 7.6 mg/L 。建闸前后研究河段年均水质未发生显著变化(图 2)。

计算河段长约 11.0 km ,按照水功能区划要求执行 II 类水质标准。该段修建 3 个水闸,共有 2 个生活污水排污口,本文对水环境容量的研究可为现有排污口允许负荷量的核算提供参考依据。为了分析水闸建设对水环境容量的影响,计算工况分为无闸和有闸两种情况。由于枯期上游来水流量较小,按照 3 个水闸的调度运行要求,枯水期 3 个水闸同时下闸蓄水。水闸运行可能会对河流自净容量产生影响,故水环境容量计算时,上游入流以水质标准($C_0 = 15.00 \text{ mg/L}$)输入。

2 数学模型及其参数确定

2.1 计算模型

根据《水域纳污能力计算规程》^[22], $Q \geq 150 \text{ m}^3/\text{s}$ 的大型河段宜采用河流二维模型计算水域水环境容

量,故本文水环境容量计算采用平面二维模型,模型包括水动力方程和污染物输运方程^[23],已有研究者针对该模型对天然河流平面二维水动力学条件的模拟开展了模型验证^[24]。模型求解借助 MIKE 21 软件实现。

本研究中水环境容量按下式计算:

$$M = \int_0^B [C_s - C_{(x,y)}] dy Q \quad (1)$$

式中, C_s 为水质目标浓度值,mg/L; $C_{(x,y)}$ 为代表点的污染物浓度,通过二维水质模型计算得到,mg/L; Q 为水环境容量计算控制单元末端断面流量, m^3/s ; B 为河宽,m。

2.2 降解系数的确定

考虑到建闸后水动力学特性对降解系数的影响,本文分别对天然河道和闸前蓄水区确定降解系数。

2.2.1 天然河道降解系数 靳甜甜等^[25]利用 2017 年 5 月 1 日—2017 年 5 月 30 日实测水质率定得到该河段 COD 降解系数为 $0.12 d^{-1}$,本研究采用该成果。

2.2.2 闸前蓄水区降解系数 水闸建成后,闸前蓄水区水深增加,流速减小,降解系数随之减小。综合分析国内外研究成果,参考研究者 Bosko 建立的降解系数与水温、流速之间的定量关系^[16]:

$$K = K' + \alpha \frac{U}{H} \quad (2)$$

式中, K 为降解系数, d^{-1} ; K' 为未考虑流速影响的降解系数, d^{-1} ; U 为河流平均流速, m/s ; H 为平均水深, m ; α 为系数,与河流平均水面坡 J 降有关,取值参考表 1。

表 1 α 取值参考
Tab.1 α value reference

$J/\text{‰}$	0.33	0.66	1.32	3.3	6.6
α	0.10	0.15	0.25	0.4	0.6

式(2)是基于天然动水条件和静水条件下的水流动力复氧作用差异建立的关系式,公式建立中考虑了 3 条不同类型的河流,流速范围为 $0 \sim 1.6 m/s$,水深范围为 $0.35 \sim 10 m$ ^[26]。

研究河段 3 个水闸蓄水深度在 2.2 m 以内,闸前水深较浅,流速范围为 $0.03 \sim 0.13 m/s$,属于河道型蓄水区,因此可以采用式(2)考虑闸前流速、水深对降解系数的影响。

降解系数计算时通过天然河道下的降解系数、流速、水深等反算确定 K' 的值,再通过蓄水区的流速、水深计算出水闸蓄水后的降解系数。

天然河道河段的平均水面坡降约为 0.66‰ ,平均流速为 $0.34 m/s$,平均水深约为 $0.6 m$;水闸蓄水区的平均水面坡降约为 0.33‰ ,平均流速为 $0.10 m/s$,平均水深约为 $2.0 m$ 。计算得到蓄水区降解系数为 $0.04 d^{-1}$ 。与天然河道降解系数相比,蓄水区 COD 降解系数下降约 67%。研究河段降解系数计算结果见表 2。

表 2 研究河段降解系数结果

Tab.2 Correction results of degradation coefficient in water storage area

区域	$J/\text{‰}$	α	$U/(m/s)$	H/m	K/d^{-1}
天然河道	0.66	0.15	0.34	0.6	0.12
蓄水区	0.33	0.10	0.10	2.0	0.04

3 计算结果与分析

3.1 平面二维水质分布特征分析

从研究河段平面水质分布(图 3)可以看出,水闸修建后,对排污口处的污染带产生了影响,污染带长度、宽度增加,污染物平均浓度上升。3#闸的修建产生了回水区,回水长度约 2.6 km,使得上游一定范围内的河段水深增加,水流流速减缓,降低了污染物的降解速率。4#闸的修建阻碍了上游来水向下游流动,上游来水

涌入4#闸北侧岔道,造成该岔道水流流速上升,与无水闸相比,该岔道平均流速从0.27 m/s上升至0.42 m/s,污水入河后,随水流进入3#闸蓄水区,污染带扩散范围更广。对比分析可以发现,有水闸时,较高污染物浓度的污染带有一定程度的扩大,岔道出口平均浓度由14.87 mg/L增加至14.96 mg/L。

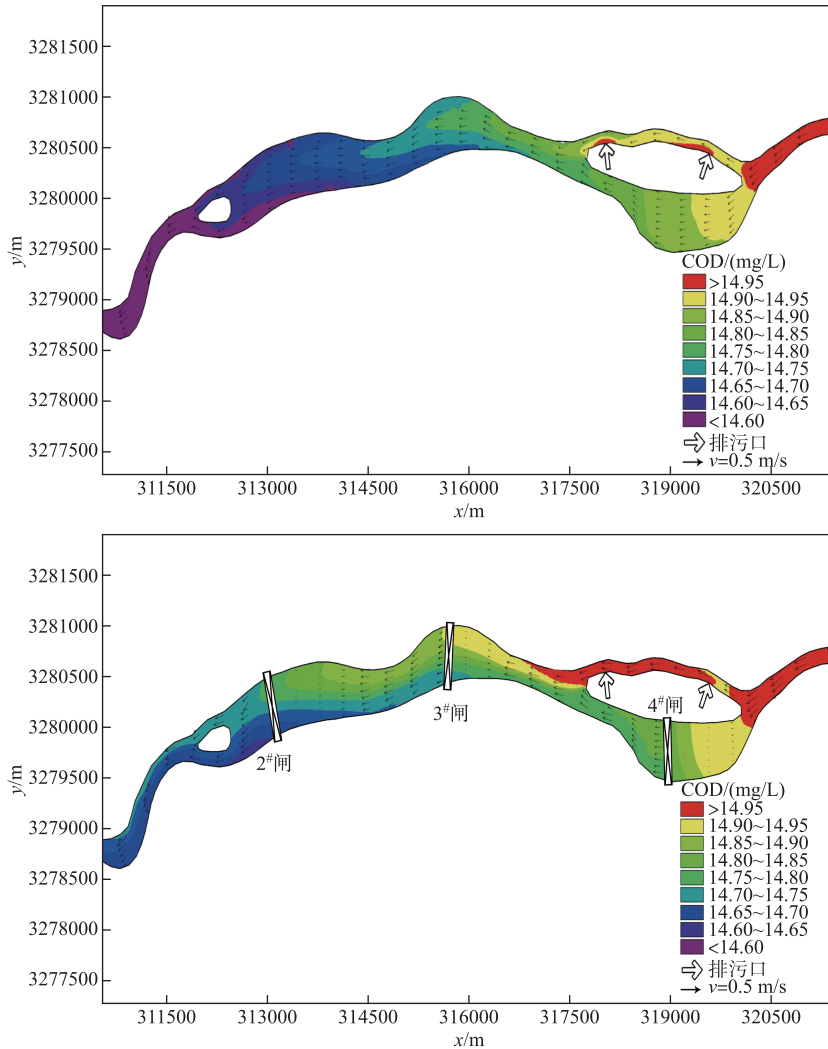


图3 COD平面分布对比:(a)无闸;(b)有闸

Fig.3 Comparison diagram of COD plane distribution: (a) without sluices; (b) with sluices

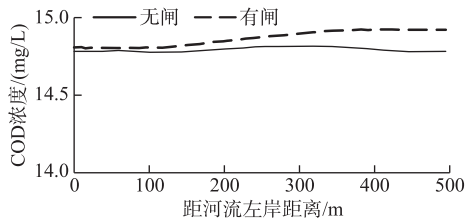


图4 典型断面(3#闸前)COD浓度横向分布
Fig.4 Transverse distribution of COD concentration in typical section;3# sluice

选取3#闸前断面为典型断面,绘制污染物浓度横向分布图(图4)。从图4可以看出,无闸时污染物浓度范围为14.77~14.82 mg/L,有闸时污染物浓度范围为14.80~14.93 mg/L。有闸时污染物浓度自河流右岸向左岸递减,分析认为,3#闸上游有北侧岔道,污染物从河流右岸汇入,因水闸蓄水影响,流速减缓,污染物向河道中央扩散受阻,主要聚集于河流右岸。

3.2 水质纵向沿程变化分析

以研究河段各断面平均污染物浓度来表征整个断面

的水质状况,针对蓄水影响区进行污染物浓度沿程变化分析。据图 5 可知,水闸修建后,污染物若在库区汇入,将在库区滞留,会引起库区污染物浓度迅速上升,在 3 个水闸的共同作用下,研究河段 COD 浓度在末断面有所上升。

3.3 水环境容量计算与结果分析

根据水质模拟结果,利用平面二维水环境容量计算公式(式 1)对研究河段进行水环境容量计算,各断面水环境容量计算值见图 6。无水闸时,整个研究河段 COD 容量为 594 t/a,建闸后,COD 容量为 521 t/a。4[#]闸使研究河段 COD 容量减少 13 t/a,下降约 2.2%;4[#]闸与 3[#]闸共同作用使 COD 容量减少 59 t/a,下降约 9.9%;4[#]闸、3[#]闸与 2[#]闸共同作用使 COD 容量减少 73 t/a,下降约 12.3%。故水闸建设使研究河段水环境容量有所下降,且水闸数量越多,对水环境容量影响越大。

4 水闸建设对水环境容量的影响分析

根据水环境容量计算结果,开展水闸建设对水环境容量的影响分析。污染物降解随时间的变化符合一级动力学反应,即:

$$C_x = C_0 e^{-Kt} \quad (3)$$

式中, C_x 为最终污染物浓度,mg/L; C_0 为污染物初始浓度,mg/L; K 为降解系数, d^{-1} ; t 为时间,d。如图 7 所示,无水闸时,污染物在河段滞留时间为 t_1 ,河段末断面浓度为 C_1 ;水闸修建后,污染物在河段滞留时间增加至 t_2 ,河段末断面浓度为 C_2 。

分析认为,水闸修建后,河流中污染物降解系数(K)和降解时间(t)产生了变化,进而影响了污染物的降解,在增加一定的降解时间后,降解系数的降低程度将影响污染物浓度变化。

根据模型模拟结果,无水闸时河段流速范围为 0.08~0.78 m/s,河段平均流速为 0.38 m/s。有水闸时,流速范围为 0.03~0.78 m/s,河段平均流速为 0.24 m/s;水闸蓄水后流速在 0.03~0.13 m/s 之间,蓄水后平均流速为 0.10 m/s。与天然河道相比,蓄水后流速明显降低,蓄水河段平均水深由 0.6 m 增加至 2.0 m,导致污染物降解系数下降。根据模型软件的水流示踪功能,无水闸时水流自上游断面运动至下游断面需要约 6 h,有水闸时水流自上游断面运动至下游断面需要约 18 h,建闸后污染物在河段滞留时间增大为原来的 3 倍。

从图 6 可以看出,与无水闸相比,4[#]闸蓄水后 COD 容量略有下降;根据水动力模拟结果,该段蓄水后库区平均流速一定程度上减小,污染物降解速率下降,滞留时间增加,降解系数的影响大于降解时间的影响,在二者综合作用下该段水环境容量下降。

与 4[#]闸相比,3[#]闸蓄水后有污水汇入,水闸蓄水后对水质影响较为明显。3[#]闸蓄水后污染物滞留时间稍有减小,对于 COD,滞留时间减小后,降解系数的影响大于降解时间的影响,表现为 COD 容量较无水闸时下

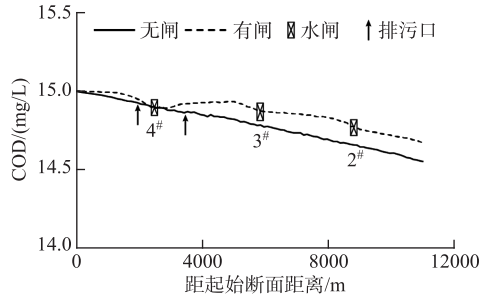


图 5 水质沿程变化对比示意图

Fig.5 Comparison diagram of water quality along the river

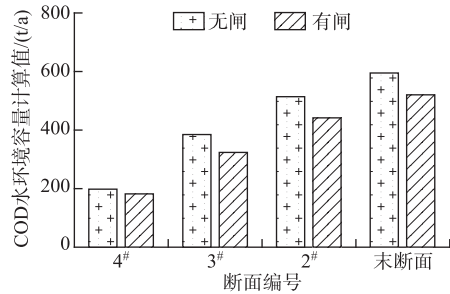


图 6 各断面水环境容量计算值

Fig.6 Calculation values of water environmental capacity of each section

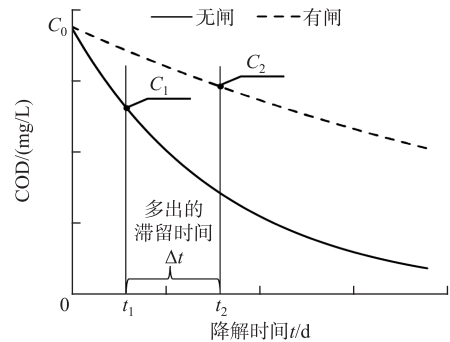


图 7 一级动力学反应示意图

Fig.7 Diagram of first order kinetic reaction

降,与4#闸蓄水影响相比,降幅明显增大。

2#闸蓄水影响区无排污口,水环境容量大小受河流自净能力与上游来水污染物浓度影响。对于COD,降解系数的影响仍大于降解时间的影响,加上污染物在3#闸蓄水区并未得到有效降解,因而与无水闸时相比污染物在2#断面时浓度更高,COD容量下降。

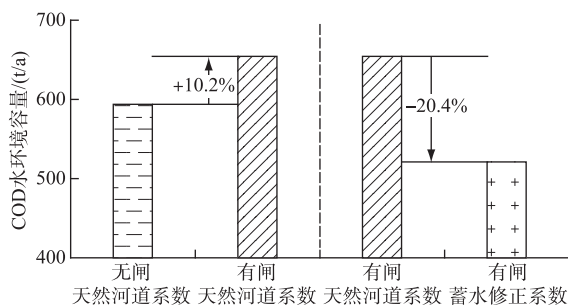


图8 不同条件下水环境容量对比示意图

Fig.8 Comparison diagram of water environmental capacity under different conditions

计算了整个河段不同条件下的水环境容量,其对比示意图8。水闸修建后,污染物滞留时间变为原来的3倍左右,从图8可以看出,不改变降解系数,只增加污染物滞留时间,COD容量增加约10.2%;蓄水后,水深增加流速降低,COD降解系数下降约67%,在一定的蓄水时间内,研究河段COD容量降低约20.4%;最终降解系数的影响大于降解时间的影响,使COD自净降解受阻,故相较于无水闸时末断面COD浓度会更高,体现为不利于COD的降解,使研究河段COD容量降低约12.3%。

综上,水闸的调度运行影响了河道的水文情势,改变了天然河道的连通性,形成蓄水区,

水体由流动转变为相对静止状态,表现为水流流速减缓,水深增加,进而使污染物降解系数减小,降低了污染物的降解效率,减小了河流的水环境容量;但库区回水还会影响污染物的扩散,使污染物在库区滞留,会增加污染物在库区的降解时间,使污染物降解量增大,一定程度上会增加河流的水环境容量。降解系数和降解时间共同影响河流中污染物的降解,进而使河流的水环境容量发生改变。

5 结语

以拉萨河城区段为研究区域,采用平面二维模型对该河段进行了水动力水质模拟,研究了连续水闸修建对COD水环境容量的影响,研究表明:水闸修建后对污染物降解的影响主要有两个方面:一是水闸蓄水使蓄水区水流流速放缓,水深增加,降低污染物降解系数,进而影响污染物降解速率;二是水闸蓄水区会使污染物在蓄水区滞留,导致污染物降解时间增加,提升污染物的自净降解量。拉萨河水闸修建后,蓄水区河段平均流速由0.34 m/s下降至约0.10 m/s,COD降解系数下降67%,污染物滞留时间增加为原来的3倍左右。在两种影响的综合作用下,4#闸使研究河段COD容量减少13 t/a,下降约2.2%;4#闸与3#闸共同作用使COD容量减少59 t/a,下降约9.9%;4#闸、3#闸与2#闸共同作用使COD容量减少73 t/a,下降约12.3%。

连续水闸上下游之间间隔较短,对河流的隔断作用大,研究表明连续水闸建设使研究河段水环境容量有所下降,且水闸数量越多,对水环境容量的影响程度越大。此外,水闸蓄水后回水会对污染物扩散产生影响,使污染带呈不均匀分布,污染物易在排污侧聚集。因此,今后河道水闸布置需考虑连续的隔断作用对河流水环境容量的影响,科学设计上下游之间水闸的间距,适当预留一定的天然河段用于污染物的充分降解。本文研究成果可以为准确评估水闸建设对河流水环境容量的影响提供理论方法和定量依据,对于河流水闸建设和运行调度具有重要指导价值。

本文研究河段COD浓度天然背景值较低,降解系数的选取趋于保守,对于背景浓度较高的河流,建议开展针对性研究,进一步丰富本文研究成果。本文仅对COD展开了水环境容量计算,由于不同水质参数在河道的降解特性不同,建议丰富不同水质参数的水环境容量计算结果,综合评估水闸建设对河流水环境容量的影响。

6 参考文献

- [1] Wang XQ, Guo JS. Effects on the COD_{Cr} , $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP capacities in the Xiaojiang River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *China Environmental Science*, 2012, 32(4): 674-678. [王晓青, 郭劲松. 三峡蓄水对小江 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及TP纳污能力的影响. *中国环境科学*, 2012, 32(4): 674-678.]

- [2] Lu HW, Zeng GM, Zhang SF. The effect of operation of Changjiang Gorges Project on water environmental capacity of Dongting Lake. *Environmental Engineering*, 2004, **22**(1): 61-63, 5. DOI: 10.13205/j.hjgc.2004.01.019. [卢宏伟, 曾光明, 张硕辅. 三峡工程的运行对洞庭湖水环境容量的影响. *环境工程*, 2004, **22**(1): 61-63, 5.]
- [3] Dou M, Zuo QT, Hu CH. Assessment of influence of water transfer project from south to north on ecological environment. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2005, **26**(2): 63-66. [窦明, 左其亭, 胡彩虹. 南水北调工程的生态环境影响评价研究. *郑州大学学报: 工学版*, 2005, **26**(2): 63-66.]
- [4] Ma ZL, Cheng GW. Progress in research on impacts of river hydro-power engineering on eco-environment. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 748-753. DOI: 10.1016/S1872-2032(06)60052-8. [麻泽龙, 程根伟. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 748-753.]
- [5] Kurunc A, Yurekli K, Okman C. Effects of Kilickaya Dam on concentration and load values of water quality constituents in Kelkit Stream in Turkey. *Journal of Hydrology*, 2006, **317**(1/2): 17-30. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.05.006.
- [6] Bayram A, Önsöy H, Kömürçü Mİ *et al.* Reciprocal influence of Kirtün Dam and wastewaters from the settlements on water quality in the stream Harşit, NE Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72**(8): 2849-2860. DOI: 10.1007/s12665-014-3190-0.
- [7] Jeong YH, Yang JS, Park K. Changes in water quality after the construction of an estuary dam in the Geum River estuary dam system, Korea. *Journal of Coastal Research*, 2014, **298**: 1278-1286. DOI: 10.2112/jcoastres-d-13-00081.1.
- [8] Zheng BQ, Dou M, Huang LB *et al.* Analysis of sluice operation impact on diversification in water quality. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(2): 14-18, 24. [郑保强, 窦明, 黄李冰等. 水闸调度对河流水质变化的影响分析. *环境科学与技术*, 2012, **35**(2): 14-18, 24.]
- [9] Zhang YY, Chen JF, Xia J *et al.* Research on the impact of dams and floodgates on riverine runoff and water quality in Wenyu River basin. *Journal of Natural Resources*, 2009, **24**(10): 1697-1705. [张永勇, 陈军锋, 夏军等. 温榆河流域闸坝群对河流水量水质影响分析. *自然资源学报*, 2009, **24**(10): 1697-1705.]
- [10] Wang R, Huang TY, Wu W. Different factors on nitrogen and phosphorus self-purification ability from an urban Guandu-Huayuan River. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 105-113. DOI: 10.18307/2016.0112. [王蓉, 黄天寅, 吴玮. 典型城市河道氮、磷自净能力影响因素. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 105-113.]
- [11] Wright RM, McDonnell AJ. In-stream deoxygenation rate prediction. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1979, **105**(2): 323-335.
- [12] Luo Y, Xu L, Rysz M *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1827-1833. DOI: 10.1021/es104009s.
- [13] Hua ZL, Li YW, Gu L. A mixed-order model of COD_{Mn} degradation in different lake regions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(5): 521-526. [华祖林, 李亚伟, 顾莉. 湖泊不同湖区 COD_{Mn}降解的混合级数模型. *水利学报*, 2013, **44**(5): 521-526.]
- [14] Li JX, Liao WG. The effect of water flow on the biodegradation of organic pollutant. *Research of Environmental Sciences*, 2002, **15**(3): 45-48. DOI: 10.13198/j.res.2002.03.47.lijx.013. [李锦秀, 廖文根. 水流条件巨大变化对有机污染物降解速率影响研究. *环境科学研究*, 2002, **15**(3): 45-48.]
- [15] Huang BS, Hong CH, Du HH *et al.* Quantitative study of degradation coefficient of pollutant against the flow velocity. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2017, **29**(1): 118-123. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60723-0.
- [16] 雒文生, 宋星原. 水环境分析及预测. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [17] Zhang PP, Wu YF, Pang SJ *et al.* COD_{Cr} degradation coefficient of urban river recharged with reclaimed water and its impacting factors. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 99-112. DOI: 10.18307/2019.0110. [张培培, 吴艺帆, 庞树江等. 再生水补给河南北运河 COD_{Cr}降解系数变化及影响因素. *湖泊科学*, 2019, **31**(1): 99-112.]
- [18] Han YZ, Zhai SJ, Sun HT. An estimation model of river COD degradation coefficient from river velocity and COD density. *Environmental Monitoring in China*, 1998, **14**(5): 40-42. [韩言柱, 翟素军, 孙洪涛. 由河流流速、COD浓度估计河流COD衰减系数的经验模型. *中国环境监测*, 1998, **14**(5): 40-42.]
- [19] 李国权. 三峡库区排污口下游污染物降解规律的研究[学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [20] 王福科. 浏阳河长沙段降解系数及水环境容量研究[学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [21] 中水北方勘测设计研究有限责任公司. 拉萨河流域综合规划环境影响报告书, 2018.
- [22] 中华人民共和国水利部. 水域纳污能力计算规程. GB 25173-2010. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [23] Chubarenko I, Tchepikova I. Modelling of man-made contribution to salinity increase into the Vistula Lagoon (Baltic Sea). *Ecological Modelling*, 2001, **138**(1/2/3): 87-100. DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00395-1.
- [24] Chen Z, Feng JJ, Li R *et al.* Field observation and numerical modelling of supersaturated dissolved gas at river confluence. *Ecological Modelling*, 2022, **471**: 110017. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110017.
- [25] Jin TT, Lu M, Liu GH *et al.* Water environmental capacity of Lhasa River in urban sections and its influencing factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8955-8963. DOI: 10.5846/stxb201806271413. [靳甜甜, 卢敏, 刘国华等. 拉萨河干流城市段水环境容量. *生态学报*, 2018, **38**(24): 8955-8963.]
- [26] Jenkins SH. *Advances in water pollution research: proceedings of the fourth international conference held in Prague*, 1969.