

台州主城区河道生态需水计算与水量调度

高 勋¹, 陈 星¹, 卢娟娟², 胡星星¹, 许 钦³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 承德市生态环境局围场满族蒙古族自治县分局, 河北 承德 068469;
3. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:为保障台州市主城区河道的生态服务功能,在分析该地区河道特点的基础上,构建了一种适用于该地区的生态需水计算方法,该方法综合考虑了流速、水位和水质3个方面的要求,并利用MIKE11水动力水质模型,定量确定了能够达到生态流速、生态水位和水质目标的河道水量调度方法。计算结果表明,主城区河网的生态流速为0.1 m/s,生态水位阈值范围为1.8~2.24 m,在充分发挥再生水清洁水源的基础上辅以河道补水,台州主城区河网在丰水年、平水年、枯水年均能够同时满足水位、流速及水质的目标要求,可为城市河网合理调配水资源维持河湖生态健康提供决策依据。

关键词:生态水量调度;生态流速;生态水位;台州主城区;水量水质模型

中图分类号:TV123.4 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2023)03-0055-07

Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area//GAO Xun¹, CHEN Xing¹, LU Juanjuan², HU Xingxing¹, XU Qin³ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Weichang Manchu and Mongolian Autonomous County Branch of Chengde Ecological Environment Bureau, Chengde 068469, China; 3. Nanjing Institute of Water Resources, Ministry of Water Resources, Ministry of Transport, National Energy Administration, Nanjing 210029, China)

Abstract: To ensure the ecological service function of the rivers in the main urban area of Taizhou City, this study constructed an ecological water demand calculation method suitable for this area based on the analysis of the characteristics of the rivers in this area. This method comprehensively considers the requirements of flow velocity, water level and water quality, and uses MIKE11 hydrodynamic water quality model to quantitatively determine a river water allocation method which can achieve ecological flow velocity, ecological water level and water quality goals. The calculation results have shown that the ecological flow velocity of the main urban river network is 0.1 m/s, and the ecological water level threshold range is 1.8~2.24 m. By fully utilizing reclaimed water as a clean water source supplemented by river replenishment, Taizhou's main urban river network is meeting the target requirements of water level, flow velocity and water quality in wet years, normal years and dry years. This study provides a decision basis for rationally allocating water resources to maintain ecological health of rivers and lakes in urban river network areas.

Key words: ecological water regulation; ecological flow velocity; ecological water level; Taizhou core area; water quantity and quality model

随着社会经济建设的迅速发展,台州主城区河流面临着水质恶化、水资源短缺、水生态系统破坏等严峻问题,但是河流又承担着人们日益增长的幸福需要,人们对于河流的景观娱乐、生态环境功能也提出了更高的要求。因此如何科学地保障台州主城区河流的生态服务功能,保证河道生态需水,对于改善河流生态环境,增强人们幸福感具有重要意义。

目前,国内外学者围绕河流生态需水的确定提

出了多种计算方法,大致可分为水文学法、水力学法、生境模拟法和综合法四大类^[1]。水文学法主要通过天然径流过程推求生态流量,其具有代表性的方法为Tennant法^[2],适用于水文资料较长的天然河道。台州河道由于其水文要素受人为调控因素高度影响,无法适用水文学法。水力学法主要通过分析河道断面水力参数与流量的关系从而确定生态流量,常用的水力学法有湿周法^[3,4]、R2-CROSS法和

基金项目:国家自然科学基金(51879163)
作者简介:高勋(1998—),男,硕士研究生,主要从事水生态环境保护与修复研究。E-mail:sdhxsxgx@163.com
通信作者:陈星(1980—),女,副教授,博士,主要从事水生态环境保护与修复研究。E-mail:chenxing@hhu.edu.cn

生态水力半径法^[5]等,适用于天然未被破坏的河道断面,台州河道由于渠化或修复后其河道形态较天然形态发生较大差异也不适用于水力学法。生境模拟法根据物种适宜的生存环境确定河流的生态流量,代表方法有河道内流量增加法^[6]、有效宽度法^[7]等,但是由于台州河道内生物多样性较低,无法准确反映河道的其他生态服务功能,也无法采用。综合法从河道生态服务功能出发,通过综合分析各个生态服务功能同时满足的流量从而确定河道生态流量,可较好的适用于承担多种生态服务功能的台州河道。

对于台州河道而言,随着社会经济的不断发展,水资源日趋紧张,汛期时面源污染汇入河道,非汛期时河道的水量难以保证,河流的生态服务功能遭到破坏,实行生态水量调控是恢复城市河流生态功能的重要措施^[8-9]。大量的工程实践及数值模拟表明,通过科学的调度水利工程,对河流进行生态补水,可有效促进水体流动,改善水体的水环境质量^[10]。制约台州河道生态需水的关键是清洁的补水来源,再生水由于其水量稳定,并且随着水处理技术和排放标准的提升,具有水质优良、持续性高及附带经济效益等优势,将再生水作为生态补水水源是解决水生态环境问题的有效途径。为此,本文在分析台州河流生态服务功能的基础上,构建了一种适用于该地区的生态需水计算方法,提出了如何根据生态需水进行生态水量调度的方法,以期能为城市合理调配水资源保障河道生态流量提供基础支撑。

1 研究区概况

本文以台州市主城区为研究区,台州市主城区北濒椒江,东西分别以永宁河、三才泾为界,南部以高闸浦为界,是台州市行政中心驻地,人口密集,社会经济发展水平高。其内河网纵横交错,主要河流有4条,为海门河、葭沚泾、三才泾和高闸浦,均为渠道化硬质河道。根据相关规划,为了将高闸浦纳入主城区水系,避免区外污水流入,在高闸浦、葭沚泾和三才泾上新建4座闸门(钢坝闸),保障主城区内水量不流失。由于区域内自身水源缺乏,主要依赖上游长潭水库补充生态需水,但长潭水库水量紧缺,伴随着污染源污染河道,研究区水生态环境恶化,从河道历年水质监测数据以及河道水质现状监测数据可知,当前主城区水环境总体水质为地表水Ⅴ类, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP存在超标现象,尚未达到Ⅳ类水质目标。拟通过生态水量调度保障河道生态服务功能,改善河道水环境质量。研究区水系概况见图1。

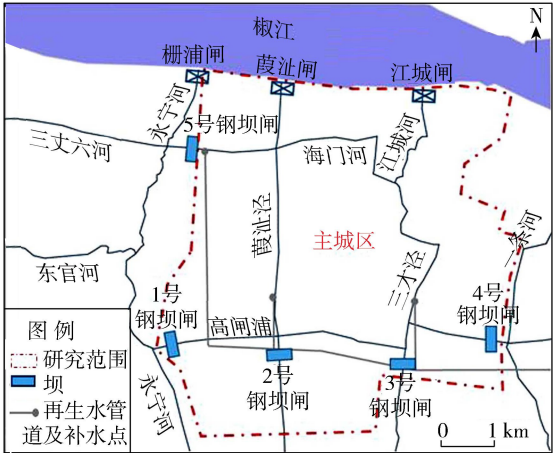


图1 研究区水系概况

2 计算方法

基于台州市河道的生态服务功能确定河网满足目标,由于河道受到人类活动的不断干预,河道径流受人工高度控制,河流上下水文、水力要素不连续,流量与水位相关性不明显,因此,河道需要同时满足流速与水位的要求^[11],同时还需要满足水质管理目标需要。

2.1 生态需水要素分析

台州市河道是受到人类活动干预的城市河道,相较于天然河流,通常失去了灌溉、航运、输沙、河口水盐平衡等功能^[12],其生态服务功能主要包括维持河道连通性功能、维持水生生物生境功能、维持良好景观娱乐功能、维持防洪排涝需要的功能以及维持水质目标的功能。

2.1.1 维持河道连通性功能

台州市河道多在平原河网地区,地势过于平坦,同时河道上通常建有水闸、泵站,其河道的水力水文要素受人工调控,水系连通受阻,因此需要一定的流速及水位保证河道流动性。

a. 流速目标 v_1 。采用变动范围法^[13](range of variability approach, RVA)计算城市河道生态流速 v_1 。RVA 阈值通常选用水文评价指标在长序列年发生概率的75%和25%所对应的值作为上下限,此阈值范围被认为是河流生态系统保持健康的生态流量变化范围,生态流速的确定可参考此计算方法,计算公式为

$$v_1 = \bar{v} - (v_{\text{上限}} - v_{\text{下限}}) \quad (1)$$

式中: v_1 为维持河道连通性所需的生态流速; $\bar{v}$ 为流速的多年平均月均值; $v_{\text{上限}}$ 为流速发生概率的75%对应的值; $v_{\text{下限}}$ 为流速发生概率的25%对应的值。

b. 水位目标 H_1 。与维持河道连通性的生态流速计算方法相同,采用RVA法计算维持河道连通性所需的生态水位 H_1 。

$$H_1 = \bar{H} - (H_{\text{上限}} - H_{\text{下限}}) \quad (2)$$

式中: $\bar{H}$ 为水位的多年平均月均值; $H_{\text{上限}}$ 为水位发生概率的 75% 对应值; $H_{\text{下限}}$ 为水位发生概率的 25% 对应值。

2.1.2 维持水生生物生境功能

台州市河道多为人工硬化渠道,河道生物多样性较差,水生生物种群多为常见广谱品种,河道需要为鱼类提供适宜的流速、水位等生长条件。同时因为污染问题及水体流动不畅的特点,成为藻类大量繁殖爆发水华的场所,因此需要一定的流速抑制藻类的繁殖,避免水华的发生^[14]。

a. 流速目标 v_2 。相关研究^[11,15-17]表明,城市河道的鱼类多为人为投放的广谱物种,考虑到城市河道鱼类的生存环境对流速的要求以及藻类生长受到抑制时的流速,维持水生生物生境功能的流速取 0.1 m/s 为宜。

b. 水位目标 H_2 。参考相关研究成果^[11,17],维持鱼类生境的生态水深需要考虑鱼类在不同生长阶段所必需的生存水深,同时还要考虑鱼类垂向转身所需要的水深,通常情况下鱼类适宜生长在其体长 2~3 倍的水深中。

2.1.3 维持良好景观娱乐功能

台州市主城区河道因其所处的特殊位置需要满足人们对河湖系统自然景观的审美需要,这要求河道具有一定的水深等条件,通常受通航、灌溉、市民亲水等多方面因素的影响。从人的景观感受出发,水位越高,水面越宽,亲水性越好,越能提高人们的景观需要。因此,维持良好景观娱乐各项影响因素所需的生态水位计算公式^[18]为

$$H_3 = \max(H_{\text{通航}}, H_{\text{灌溉}}, H_{\text{亲水}}) \quad (3)$$

其中 $H_{\text{灌溉}} = \min(H_{\text{灌溉1}}, H_{\text{灌溉2}}, \dots, H_{\text{灌溉j}})$

式中: $H_{\text{通航}}$ 为通航要求的最低河道水位,通常情况下满足小型游船通航的水深为 1.5 m; $H_{\text{灌溉}}$ 为河道两岸灌溉取水要求的最低水位; $H_{\text{亲水}}$ 为亲水的休闲活动平台适宜的河道水位,研究表明,在亲水平台距离河道水面 0.5 m 以内时,平台亲水效果较好; $H_{\text{灌溉j}}$ 为第 j 个取水建筑物的设计最低取水水位。

2.1.4 维持防洪排涝需要的功能

台州市河道应当符合两岸防洪排涝安全的要求,同时确保市政排水系统的正常运行。随着城市化的不断提高,不透水面积的增加,防洪排涝安全显得尤为重要,河道在汛前水位越低越有利于洪水调蓄和涝水冲排,这要求河道不能超过一定的水位,保证汛期河道的安全。河道需要满足防洪排涝的水位要求,不得超出该水位^[18],因此维持防洪及市政排水需要在汛前不能超过的河道水位的计算公式为

$$H_4 = \min(H_{\text{防洪}}, H_{\text{市政}}) \quad (4)$$

其中 $H_{\text{市政}} = \min(H_{\text{排1}}, H_{\text{排2}}, \dots, H_{\text{排m}})$

式中: $H_{\text{防洪}}$ 为水管理部门规定的防洪水位; $H_{\text{市政}}$ 为保证市政排水系统稳定运行的水位; $H_{\text{排m}}$ 为第 m 个排水口所处的水位高程。

2.1.5 维持水质目标的功能

水体对于污染物来说具有一定的稀释净化能力。台州市河道水体流动性受人工调控,水质易受排污口污染,常表现为水质变差的现象,而水环境管理部门对河道却提出更高的水质目标,河道应保证达到水质目标以维持生态功能。

2.1.6 生态需水要素综合

综合以上各生态服务功能的要求,流速、水位以及水质要求如下:

a. 流速的下限为 v_1 和 v_2 。当河道生态流速保障率(大于生态流速的历时占总历时比例)达到 50% 即视为满足生态流速要求:

$$v \geq \max(v_1, v_2) \quad (5)$$

b. 水位的下限为 H_1 、 H_2 和 H_3 ,上限为 H_4 。当河道生态水位保障率达到 50% 即视为满足生态水位的要求,同时全时段不得超出防洪排涝的水位限值:

$$H_4 > H \geq \max(H_1, H_2, H_3) \quad (6)$$

c. 水质目标确定为河道的水质管理目标,要求河网各断面的月平均浓度均符合标准。

2.2 生态水量调度方法

城市河道通常需要生态水量调度来保证各项生态服务功能的正常运行,满足生态流速、生态水位以及水质管理目标,本文提出的生态水量调度方法是以水量平衡为基础,以数值模型为决策依据,结合台州市生态需水要素综合确定。

在水量平衡中,河道会通过蒸发、渗漏、灌溉、绿化等途径损失水量,其损耗方式视河道在社会服务中承担的功能决定,因此维持其他生态服务功能所需的水力条件是在河道消耗用水损失的前提下综合得到的。必须将这部分损耗的水量进行补充,才能保证出入水平衡。河道消耗水量的计算公式^[19]为

$$W_{\text{消耗}} = W_{\text{蒸发}} + W_{\text{渗漏}} + W_{\text{用水}} \quad (7)$$

其中

$$W_{\text{渗漏}} = KA$$

式中: $W_{\text{消耗}}$ 为城市河道消耗水量; $W_{\text{蒸发}}$ 为河道的月蒸发损失水量; $W_{\text{渗漏}}$ 为河道的月渗漏损失水量; $W_{\text{用水}}$ 为河道承担社会服务功能过程中的用水量,主要包括灌溉、城市净化、景观绿化用水等; K 为渗漏经验系数,综合河道的水文要素及地质条件确定; A 为各月水位对应下的水面面积。

综合城市河道生态需水要素以及水量平衡对河道水量的要求,城市河道生态调度水量 W 的计算公

式为

$$W = \max(W_{\text{流速}}, W_{\text{水位}}, W_{\text{水质}}) + W_{\text{消耗}} \quad (8)$$

式中： $W_{\text{流速}}$ 为满足河道生态流速目标所需的调度水量； $W_{\text{水位}}$ 为满足河道生态水位目标所需的调度水量； $W_{\text{水质}}$ 为满足河道水质管理目标所需的调度水量。

台州主城区河道水量调度计算流程框图如图 2 所示。

2.3 一维水环境数学模型构建

2.3.1 模型选用

本文选用 MIKE11 构建台州主城区水动力水质模型,其水动力模块(HD)、对流扩散模块(AD)和降雨径流模块(RR)可有效模拟水量、污染物和水质之间的响应关系。

2.3.2 模型概化

台州市河网纵横,在河网概化时将对水动力影响不大的小河道进行简化处理,合并到临近大河道中,为保证输水能力、调蓄能力与实际河网基本一致,将合并河道进行相应扩大。本文以 2020 年台州市椒江区水系现状图为基础,以东官河、永宁河、海门河、葭沚泾、三才泾和高闸浦为骨干河道进行概化,共概化河道 36 条,断面 105 个,设置闸坝 11 座,其中控制主城区河道水力要素的闸坝有葭沚闸、江城闸、1~4 号钢坝闸以及海门河橡胶坝,水利工程调度服从防洪调度。

降雨径流模块(RR)汇水分区划分时以各主干道河道为基本边界,假定陆域面上的调蓄作用沿周围河道均匀分布,即雨水按河道长度比例均匀汇流,综合考虑河流的流向、地形特点以及雨水管网,主城区块共划分汇水分区 16 个。

模型设置三丈六河、东官河为闭边界,模拟上游长潭水库不提供生态补水的不利条件,永宁河、葭沚泾、江城河等河道北部入海口以及南部通往路桥区的边界条件设置为水位。

研究区水环境压力较大的水质指标为 $\text{NH}_3\text{-N}$

与 TP,选取 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 TP 作为模型的污染物计算因子。研究区已完成“污水零直排”,控制了入河点源污染,影响河道水质的污染源主要为城市地表径流污染以及河道内源污染,同时还包含少部分管道点源污染。其中地表径流污染参考浙江省多个城市的地表径流水质情况,结合降雨径流模块耦合计算;内源污染采用底泥的内源释放通量试验模拟结果,根据平均释放通量初步估算;点源污染通过对排水口水量水质调查分析进行概化。

2.3.3 主要参数确定

NAM 模块的主要参数参考浙江省多个平原城市的取值,水动力模块及对流扩散模块主要参数根据连续 5 d 原型调水试验进行率定,流量模拟计算值与实测值的平均相对误差为 6.9%,河道糙率范围在 0.02~0.04; $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的模拟计算值与实测值的平均相对误差为 14.2%,水质降解系数分别为 0.06~0.08 d^{-1} 、0.06~0.08 d^{-1} ,模型的模拟效果理想,可以较好地模拟台州主城区河网的实际情况。

3 结果与分析

3.1 生态需水目标

主城区南侧的高闸浦为重要的城市景观生态廊道,选取高闸浦(葭沚泾—三才泾段)为保证生态流速和水位目标的控制断面,水质目标控制范围为整个主城区河网区域。

3.1.1 生态流速

a. 采用数值模型模拟河道 2001—2020 年的径流过程,根据 RVA 法计算得到维持河道连通性的基本流速 v_1 ,见表 1。

b. 椒江区河道鱼类主要为政府相关部门投放,投放的鱼苗种类主要为四大家鱼中的鲢鱼和鳊鱼,根据水生生物生境确定生态流速 v_2 为 0.1 m/s。

综上,研究区生态流速目标为 0.1 m/s。

3.1.2 生态水位

a. 研究区河道为多个闸坝封闭的城市内河,河

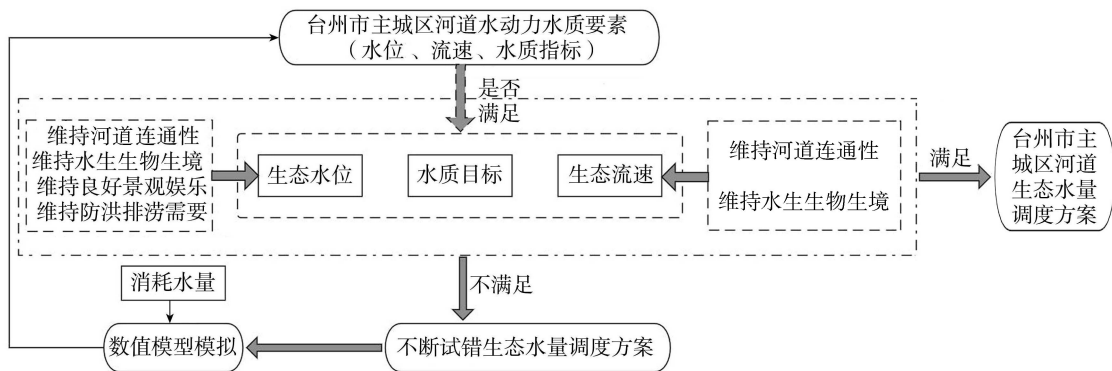


图 2 台州主城区河道生态需水计算与水量调度流程

表 1 维持河道连通性生态流速计算结果				单位: m/s
月份	$v_{\text{上限}}$	$v_{\text{下限}}$	$\bar{v}$	v_1
1	0.011	0.005	0.008	0.002
2	0.018	0.009	0.012	0.003
3	0.025	0.016	0.020	0.011
4	0.033	0.019	0.023	0.009
5	0.040	0.027	0.030	0.017
6	0.069	0.043	0.047	0.022
7	0.035	0.018	0.024	0.007
8	0.051	0.024	0.030	0.003
9	0.056	0.029	0.038	0.012
10	0.023	0.013	0.017	0.007
11	0.014	0.005	0.010	0.000
12	0.010	0.004	0.007	0.001

道水位受钢坝闸水位控制,不同频率的水位即为钢坝闸控制水位,根据 RVA 法可知 H_1 对生态水位目标没有影响。

b. 根据相关资料分析,研究区常见鱼类(鲢鱼、鳙鱼)在产卵期(4—7 月)和幼鱼期(8—9 月)的生存水深为 0.9 m,在成鱼期(10—3 月)的生存水深为 0.8 m,同时根据其鱼类平均体长 0.5 m 计算得到垂向转身所需水深为 1 m。综合水生生物生境的生态水深(1 m)和研究区的河底平均高程(0.6 m)可得维持水生生物生境的生态水位 H_2 为 1.6 m。

c. 研究区河道主要承担人们亲水娱乐的需要,不具备灌溉、航运等需求,根据高闸浦河道两岸亲水平台平均高程为 2.3 m,可得最适宜人们亲水的河道水位 H_3 为 1.8 m。

d. 根据台州市椒江区城市防洪排涝的要求,河道的汛前限制水位为 2.24 m,当河道水位高于此水位时,则开闸放水;结合椒江区相关排水资料可知,研究区内雨水排水口的入河口高程基本高于防汛限制水位。则维持防洪排涝需要的水位 H_4 为2.24 m。

综上,研究区水位阈值范围为 $1.8\text{ m} \leq H < 2.24\text{ m}$ 。

3.2 生态水量调度方案

3.2.1 补水水源

主城区的补水水源主要有河道补水和再生水回用。河道补水主要通过泵站经海门河橡胶坝引入永宁河水源,本文模拟的永宁河水质条件为Ⅳ类水质, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 的质量浓度分别为 1.5 mg/L 和 0.3 mg/L,最大补水能力为泵站的设计流量 $2.4\text{ m}^3/\text{s}$ 。再生水回用主要采用椒江污水处理厂的再生水水源,椒江污水处理厂一期和三期的出水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 等主要指标已达到地表水Ⅳ类水标准,可满足再生水利用的要求,在海门河、葭沚泾、三才泾均布置补水点,可有效促进主城区河网水体流动。本文根据椒江污水处理厂的年出水水质资料模拟再生水的水质条件, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 的质量浓度分别为0.3 mg/L

和 0.055 mg/L,远优于Ⅳ类水质标准,最大补水能力为再生水规模 $10\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

3.2.2 调度方案

根据 1951—2020 年水文序列排频计算结果,分别对 25% 丰水年(1975 年)、50% 平水年(2013 年)、75% 枯水年(1988 年)进行生态需水量模拟计算,设置永宁河、再生水单水源引水及永宁河和再生水联合补水 3 种调度方案,最大补水能力分别为 $2.40\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.16\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.56\text{ m}^3/\text{s}$ 。拟通过河道补水和管道再生水分别从 5 号坝和海门河补水口引入清洁水源,促进主城区水体流动,最终通过三才泾的 3 号闸向南溢流排出,其中将三才泾闸门高度设置为 1.8 m,保证河网生态水位要求。

3.2.3 生态水量调度方案的确定

利用水动力水质模型分别对不同补水水源的丰、平、枯水年进行模拟,不断调整补水流量以寻求满足各控制断面生态流速、水质以及维持消耗用水的需求。

a. 永宁河引水。图 3 为永宁河引水方案并发挥泵站最大引水能力下,不同设计水文年河网各计算断面的总磷、氨氮平均质量浓度和 50% 时段流速。由图 3(a)可知,总磷和氨氮的改善效果及年内变化趋势近似相同,主要表现为枯水年的水质优于丰水年,枯水期优于丰水期(5—9 月),单纯的靠永宁河引水难以稳定满足研究区的Ⅳ类地表水水质目标,这主要因为永宁河的水质模拟条件为Ⅳ类水质,当有过量的污染物进入河道时就会导致河网水质劣于Ⅳ类,由于研究区河道内污染物主要来源于地表径流污染,降雨径流携带地表上的污染物进入受纳水体,地表径流污染负荷与降雨量呈正相关,因而丰水期河网的水质劣于枯水期。由图 3(b)可知,永宁河引水基本可以满足河网生态流速要求,降雨量越大汇流进入河网的水量越大,河道内的流速也越大,表现为丰水年的生态流速保障率大于枯水年,汛期大于非汛期。

b. 再生水管道补水。再生水水源与永宁河河道补水相比其水质较好、供水能力较低,即以再生水的供水能力无法满足研究区的生态流速目标,但是其优越的水质条件可以有效净化河道水质,满足研究区的Ⅳ类地表水水质目标。不断调整再生水的补水流量,模拟得到维持研究区水质目标时补水点处所需的生态流量见表 2。由表 2 可知,椒江污水处理厂能够满足不同水文年不同月份的环境补水需求。由于研究区对点源污染的严格控制,河道内污染物来源主要为地表径流污染,因此为满足水质目标,丰水年所需补水量大于枯水年,丰水期大于枯水

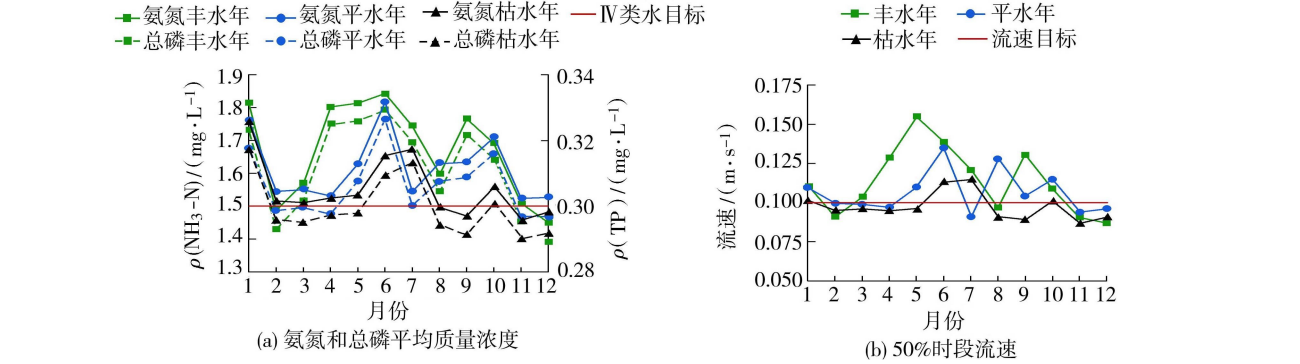


图3 河道补水条件下河网的氨氮、总磷平均质量浓度及流速

表2 满足水质目标所需的再生水调度水量

设计水文年	补水流量/(m³·s⁻¹)												年调度水量/ 万 m³
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
丰水年	0.00	0.00	0.17	0.81	0.52	0.81	0.58	0.12	0.69	0.35	0.02	0.00	1071
平水年	0.00	0.05	0.09	0.10	0.29	0.72	0.09	0.00	0.35	0.35	0.07	0.01	556
枯水年	0.00	0.03	0.03	0.10	0.07	0.19	0.29	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	220

期,丰水期的环境补水量分别占丰、平、枯水文年环境补水量的75.5%、84.8%、79.6%。

c. 永宁河、再生水联合调度。由于再生水的水量稳定及水质优越,本文考虑在充分发挥再生水供水能力(10万m³/d)的前提下,不断增大永宁河的补水流量以满足河网的生态流速、水质及维持消耗用水的目标。消耗用水为蒸发渗漏用水量和承担社会服务功能过程中的用水量,其中蒸发水量在数值模型计算中已涉及,在此不做多余计算。主城区河道均为硬质渠道,且河道为常年有水的河道,河床含水率较为饱和,渗漏损失可忽略;社会服务功能主要承担维持河道外景观绿化的功能,采用面积定额法计算景观绿化用水,主城区河道总长度约18.3 km,两岸绿化程度较高,平均绿化带宽度为20 m,用水定额采用浙江省绿化用水定额0.55 m³/(m²·a),推求得到景观绿化用水量20万m³。根据数值模型模拟得到维持河网的生态流速、水质目标的生态调度水量,由模拟结果可知,通过永宁河和再生水联合调度的方式可以满足台州主城区生态流速、生态水位、水质目标,永宁河月调度水量计算结果见表3。台州主城区河网在丰水年、平水年、枯水年的生态调度水量分别为6103万m³、6652万m³和7997万m³,其中再生水的年调度水量均为3660万m³,永宁河的年调度水量分别为2423万m³、2972万m³和4317万m³,在降雨量较充分的月份,仅再生水补水即可满足生态需水要求,降水较少时还需要依靠永宁河的水量来保证流速目标。生态调度水量变化趋势表现为丰水年低于枯水年,丰水期低于枯水期,这与维持生态流速目标所需水量的趋势相同,与维持水质目标的趋势相反,对于台州主城区河网而言,生态流

速目标要求较高,为生态水量调度的决定性因子。

表3 台州主城区永宁河月调度水量

月份	永宁河调度水量/万 m³		
	丰水年	平水年	枯水年
1月	187	214	321
2月	401	301	376
3月	295	321	402
4月	0	363	389
5月	0	214	375
6月	0	0	130
7月	54	455	107
8月	348	0	455
9月	0	259	492
10月	214	107	321
11月	415	389	492
12月	509	348	455

4 结 论

a. 针对台州主城区河流水文、水力要素不连续的特点,河流生态健康需要同时满足水位、流速及水质的目标要求,本文从连通性、水生生物生境、景观娱乐及防洪排涝等多方面确定生态流速及生态水位,计算结果表明,台州主城区河网的生态流速0.1 m/s,生态水位阈值范围为1.8~2.24 m。

b. 以构建的水量水质耦合模型为依据,在河网水位通过闸坝控制下满足生态水位的基础上,模拟台州主城区河网满足生态流速及水质要求的生态水量调度方案。模拟结果表明,单水源引水下,永宁河补水和再生水补水均能促进水体流动,增大流速,改善水环境质量;永宁河补水对水质的改善效果有限,雨期难以稀释地表径流污染以达到水质目标;再生水补水对水质的改善效果明显,能够满足除鱼类适

宜流速之外其他生态服务功能的要求。

c. 在永宁河及再生水联合补水下台州主城区河网能够同时满足生态流速、生态水位及水质目标,模拟得到台州主城区河网在丰水年、平水年、枯水年的生态调度水量分别为 6 103 万 m³、6 652 万 m³、7 997 万 m³,降水较多的月份仅靠再生水即可满足生态需水要求。

参考文献:

[1] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):8-14. (JIN Chun,JIANG Cuiling,WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2):8-14. (in Chinese))

[2] ZHAO C S, PAN X, YANG S T, et al. Standards for environmental flow verification [J]. Ecohydrology, 2021, 14(1):e2252.

[3] 于鲁冀,陈慧敏,王莉,等. 基于改进湿周法的贾鲁河河道内生态需水量计算[J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):5-9. (YU Luji, CHEN Huimin, WANG Li, et al. Study of ecological instream flow requirement of Jialu River based on improved wetted perimeter method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(3):5-9. (in Chinese))

[4] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较[J]. 水利水电科技进展,2011,31(4):41-44. (SHANG Songhao. Comparison among several wetted perimeter methods to determine the minimum environmental flows of rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(4):41-44. (in Chinese))

[5] 刘昌明,门宝辉,宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. 自然科学进展,2007(1):42-48. (LIU Changming, MEN Baohui, SONG Jinxi. Ecological hydraulic radius method for estimating ecological water demand in river channels [J]. Progress in Natural Science,2007(1):42-48. (in Chinese))

[6] 傅菁菁,黄滨,芮建良,等. 生境模拟法在黑水河鱼类栖息地保护中的应用[J]. 水生态学杂志,2016,37(3):70-75. (FU Jingjing, HUANG Bin, RUI Jianliang, et al. Application of habitat simulation to fishery habitat protection in Heishui River [J]. Chinese Journal of Water Ecology,2016,37(3):70-75. (in Chinese))

[7] 杜龙飞. 基于鱼类栖息地模型的洋河流域生态需水研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019.

[8] 姜翠玲,王俊. 我国生态水利研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):168-175. (JIANG Cuiling, WANG

Jun. Recent advances of ecological water conservancy in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):168-175. (in Chinese))

[9] SONG W W, PANG Y. Research on the influence of diversion flow ratio on the water environment in Nanjing [J]. Water Supply,2019,19(8):2367-2378.

[10] 王鹏,华祖林,褚克坚,等. 高度城镇化地区河网水生态系统调控方案 [J]. 水资源保护,2022,38(1):205-212. (WANG Peng, HUA Zulin, CHU Kejian, et al. Ecological regulation scheme of river network and water system in highly urbanized areas [J]. Water Resources Protection, 2022,38(1):205-212. (in Chinese))

[11] 华祖林,董越洋,褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法 [J]. 水资源保护,2021,37(1):140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 140-144. (in Chinese))

[12] 褚俊英,严登华,周祖昊,等. 基于综合功能辨识的城市河湖生态流量计算模型及应用[J]. 水利学报,2018,49(11):1357-1368. (CHU Junying, YAN Denghua, ZHOU Zuhao, et al. Ecological flow calculation in urban rivers and lakes base on synthesized ecosystem service function identification: model and application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (11): 1357-1368. (in Chinese))

[13] TANG Y, CHEN L, SHE Z. Evaluation of instream ecological flow with consideration of ecological responses to hydrological variations in the downstream Hongshui River Basin, China [J]. Ecological Indicators,2021,130:108104.

[14] FU Y C, LENG J W, ZHAO J Y, et al. Quantitative calculation and optimized applications of ecological flow based on nature-based solutions [J]. Journal of Hydrology, 2021,598(5):126216.

[15] 李晋,辛克刚,王磊,等. 基于 MIKE11 的城市雨源型河流再生水补水方案研究[J]. 给水排水,2020,56(增刊1):681-686. (LI Jin, XIN Kegang, WANG Lei, et al. Study on regeneration water replenishment scheme of urban rain-source river based on MIKE11 [J]. Water and Wastewater Engineering,2020,56(Sup1):681-686. (in Chinese))

[16] ZHAO C S, YANG Y, YANG S T, et al. Effects of spatial variation in water quality and hydrological factors on environmental flows [J]. Science of the Total Environment,2020,728:138695.

(下转第 106 页)

- [8] YANG W, CHOI S U. Impact of stem flexibility on mean flow and turbulence structure in depth-limited open channel flows with submerged vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (4) : 445-454.
- [9] KOUWEN N. Field estimation of the biomechanical properties of grass [J]. Journal of Hydraulic Research, 1988, 26 (5) : 559-568.
- [10] NEPF H M, VIVONI E R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105 (C12) : 28547-28557.
- [11] NEPF H, GHISALBERTI M. Flow and transport in channels with submerged vegetation [J]. Acta Geophysica, 2008, 56 (3) : 753-777.
- [12] OKAMOTO T A, NEZU I. Turbulence structure and “Monami” phenomena in flexible vegetated open-channel flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (6) : 798-810.
- [13] NEZU I, SANJOU M. Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2008, 2 (2) : 62-90.
- [14] POGGI D, PORPORATO A, RIDOLFI L, et al. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 111 (3) : 565-587.
- [15] 李艳红, 赵敏. 含植物河流动力学实验研究-流速、摩阻流速及曼宁糙率系数垂线分布 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2004, 19 (4) : 513-519. (LI Yanhong, ZHAO Min. Experimental studies of hydrodynamics in vegetated river flows; vertical profiles of velocity, shear velocity and Manning roughness [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2004, 19 (4) : 513-519. (in Chinese))
- [16] CHENG Niansheng, NGUYEN H T, TAN S K, et al. Scaling of velocity profiles for depth-limited open channel flows over simulated rigid vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138 (8) : 673-683.
- [17] GHISALBERTI M, NEPF H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107 (C2) : 3011.
- [18] CHEN Zhengbing, JIANG Chunbo, NEPF H. Flow adjustment at the leading edge of a submerged aquatic canopy [J]. Water Resources Research, 2013, 49 (9) : 5537-5551.
- [19] OKAMOTO T A, NEZU I. Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, 13 (5) : 417-434.
- [20] 闫静, 刘杰夫, 陈红, 等. 植物条件下明渠紊流 KH 涡相关问题研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2) : 90-94. (YAN Jing, LIU Jiefu, CHEN Hong, et al. Advances in related issues on KH vortex in vegetated open channel flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2) : 90-94. (in Chinese))
- [21] 赵汗青. 含淹没植物明渠的紊流涡结构及床面形态影响研究 [D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [22] NEPF H, GHISALBERTI M, WHITE B, et al. Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies [J]. Water Resources Research, 2007, 43 (4) : W04422.
- [23] 闫静, 王晓丽, 陈红, 等. 淹没植物条件下明渠 KH 涡的垂向几何尺度和频率 [J]. 水科学进展, 2021, 32 (5) : 770-779. (YAN Jing, WANG Xiaoli, CHEN Hong, et al. Vertical geometry scale and frequency of KH vortex in open channel flow through submerged vegetation [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (5) : 770-779. (in Chinese))
- [24] 余洋. 植物密度对明渠紊流拟序结构的影响研究 [D]. 南京: 河海大学, 2022.
- (收稿日期: 2022 - 12 - 05 编辑: 俞云利)

(上接第 61 页)

- [17] 于守兵, 张朝晖, 徐丛亮. 黄河河口鱼类春季生态需水 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (3) : 1-7. (YU Shoubing, ZHANG Zhaohui, XU Congliang. Spring ecological water requirement for fishes in Yellow River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (3) : 1-7. (in Chinese))
- [18] 余明勇, 张海林. 基于综合效益发挥的南方平原区城市湖泊景观水位 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (3) : 222-229. (YU Mingyong, ZHANG Hailin. Suitable water level for landscape function of lakes in southern plains of China based on optimization of comprehensive benefits [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (3) : 222-229. (in Chinese))
- [19] 冉红达, 程伍群, 张福洋. 城市水系生态环境需水量分析与计算 [J]. 水电能源科学, 2017, 35 (8) : 35-39. (RAN Hongda, CHENG Wuqun, ZHANG Fuyang. Analysis and calculation of eco-environmental water demand in urban water system [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (8) : 35-39. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022 - 11 - 08 编辑: 刘晓艳)