

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.022

# 面向水环境改善的城市河网动态水环境容量

张万顺<sup>1,2,3</sup>,李琳<sup>1</sup>,彭虹<sup>4</sup>,张潇<sup>1</sup>,夏函<sup>1</sup>,张紫倩<sup>1</sup>

(1. 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;

3. 武汉大学中国发展战略与规划研究院,湖北 武汉 430072; 4. 武汉大学水利水电学院,湖北 武汉 430072)

**摘要:**为掌握城市河网动态水环境容量变化规律,构建了基于“空-地-水”一体化模型体系的城市河网动态水环境容量计算模型,以粤港澳大湾区惠州市金山湖流域为研究区域,定量核算了2017年金山湖流域COD和TP动态水环境容量。结果表明,模型模拟的流量、COD和TP浓度率定、验证的相对误差均在14.04%以内;2017年,金山湖流域COD和TP水环境容量整体呈先增大后减小的趋势,受降雨影响显著,逐日容量变化范围分别为238.55~3 027.49 kg/d和3.73~58.02 kg/d;枯水期水环境容量较小且与降水量负相关;丰水期的大雨或暴雨时期水环境容量明显提升,中小雨时期COD容量与降水量负相关,TP反之;保障生态基流能明显改善容量不足的问题,全年动态生态流量保障对金山湖流域水质达标率提升效果明显。

**关键词:**动态水环境容量;城市河网;生态流量;水环境改善;金山湖流域;粤港澳大湾区

**中图分类号:**X26      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2022)01-0167-09

**Dynamic water environment capacity of urban river network for water environment improvement // ZHANG Wanshun<sup>1,2,4</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, PENG Hong<sup>3</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>, XIA Han<sup>1</sup>, ZHANG Ziqian<sup>1</sup> (1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. China Institute of Development Strategy and Planning Research Institute, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)**

**Abstract:** In order to master the variation law of dynamic water environmental capacity of urban river network, a “air-ground-water” integrated calculation model of dynamic water environmental capacity of urban river network was constructed. Taking Jinshan Lake Basin in Huizhou City, Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area as a typical area, the dynamic water environmental capacity of COD and TP in Jinshan Lake Basin in 2017 was quantitatively calculated. The results show that the relative errors of calibration and verification of flow, COD and TP concentrations simulated by the model are within 14.04%. In 2017, the overall water environmental capacity of COD and TP in Jinshan Lake Basin increased first and then decreased, which was significantly affected by rainfall. The daily capacity variations range of COD and TP were 238.55~3 027.49 kg/d and 3.73~58.02 kg/d, respectively. The water environment capacity in dry season is small and negatively correlated with rainfall. The water environmental capacity increases obviously in heavy rain or rainstorm period in wet season. The COD capacity is negatively correlated with rainfall in moderate and light rain period, and the TP is the opposite. Ensuring ecological base flow can significantly improve the problem of insufficient capacity, and the dynamic ecological flow guarantee has an obvious effect on improving the water quality compliance rate of Jinshan Lake Basin.

**Key words:** dynamic water environmental capacity; urban river network; ecological flow; water environment improvement; Jinshan Lake Basin; Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area

城市是人类活动和自然水循环相互耦合最剧烈的区域<sup>[1-2]</sup>,城市河网人工化程度高、水力结构复

杂、水资源开发强度大、污染负荷重、水质性缺水问题显著,成为河流生态系统服务功能变差或丧失的

基金项目:国家自然科学基金(41877531)

作者简介:张万顺(1965—),男,教授,博士,主要从事流域环境数值模拟研究。E-mail: wszhang@whu.edu.cn

突出区域<sup>[3-5]</sup>。河流生态系统服务功能的良性发挥与流域水资源环境承载能力密切相关,科学度量以水环境容量为目标的承载能力的空间异质性<sup>[6]</sup>,明确容量不足的重点时段,可为保障流域水生态环境质量、恢复河流生态系统服务功能提供科学管控方向,对城市河网水生态环境综合治理与修复工程实施具有指导意义。

针对流域水环境容量不足的问题,众多学者主要在水文条件、来流水质、水利水电设施及引水工程等<sup>[7-10]</sup>影响因素和容量合理分配<sup>[11]</sup>方面开展了大量的研究,但研究区多集中在大中型流域或河段。复杂城市河网具有集水面积小、水力结构复杂、社会分异特征明显等特点,亟须建立考虑流域系统性特征、精准反映水质时空分异性的动态水环境容量核算方法。通过模型模拟流域动态水质状况来计算水环境容量是当下研究的主流方法之一<sup>[7-13]</sup>。耦合陆面单元、一维河网的“空-地-水”一体化模型体系能够精准模拟预测降雨、陆面、水体全要素和多过程的水动力水质变化<sup>[14-16]</sup>,并在不同尺度流域得到了广泛应用<sup>[16-19]</sup>,可作为核算城市河网动态水环境容量的模型基础。考虑污染源分布及上下游关系,采用基于贡献率的水体混合区控制达标法<sup>[20]</sup>,可解决当下环境管理核算容量仅在设计流量下关注目标水质断面,对水环境容量动态性和流域整体性考虑不足的局限<sup>[21]</sup>。

位于粤港澳大湾区的惠州市金山湖流域是我国长期高速粗放的发展方式导致生态环境与经济发展不协调的典型复杂城市河网流域<sup>[22]</sup>。本文基于“空-地-水”一体化模型体系,构建城市河网动态水环境容量计算模型,定量核算金山湖流域容量变化规律,以期为强人类活动影响下的复杂城市河网开展精细化环境管控,推动经济、环境协同高质量发展提供借鉴。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

金山湖流域位于粤港澳大湾区东部的惠州市惠城区,东江流域中下游,西枝江左岸,入湖河涌包括金山河、河桥水、冷水坑和莲塘布,水系如图1所示,集水面积约63.7 km<sup>2</sup>。根据水质监测数据,金山河上游激流坑水库和河桥水上游山坪塘水质优于Ⅲ类,莲塘布水库水质为V类;金山河、河桥水、冷水坑和莲塘布整体均为轻度黑臭,COD和TP为主要污染物。

### 1.2 数据来源

基于30 m分辨率的数字高程模型数据和金山

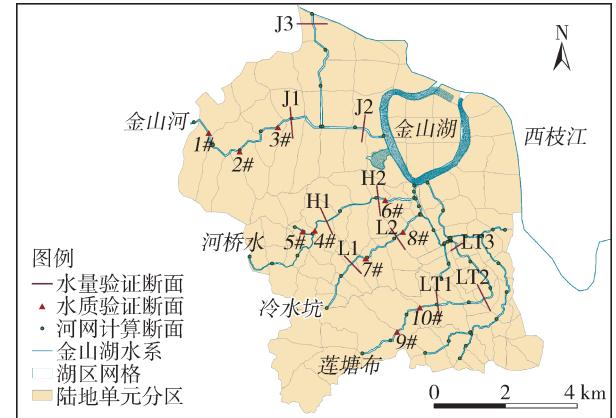


图1 金山湖流域水系及验证断面分布

Fig. 1 Distribution of river system and verification sections in the Jinshan Lake Basin

湖流域2017年土地利用数据,得到各子流域汇水关系、面积、不透水面积占比、流域宽度、平均坡度等确定性参数。选用惠阳国家气象站(23°05'N, 114°25'E)2017年逐日气温、降雨、相对湿度和蒸发等数据作为输入气象条件。

## 2 研究方法

基于“空-地-水”一体化模型体系等前期研究成果<sup>[14-16]</sup>,构建金山湖流域动态水环境容量模型。“空-地-水”一体化模型体系是一套应用于流域水动力、水质、水生态模拟的模型体系,综合考虑了多种因素影响下,水和污染物在流域气象、陆面、水体3种要素内的全流程迁移转化。本文应用该模型体系,将逐日降水数据作为边界条件输入暴雨洪水分流模型(storm water management model, SWMM),进一步集成至一维河网水动力水质模型。金山湖流域共划分为153个子流域,95个出水口;基于金山河、莲塘布、河桥水、冷水坑河道地形资料,4条河涌共划分为20条河段,75个计算断面。

### 2.1 动态水环境容量模型

构建的金山湖流域“空-地-水”一体化的动态水环境容量模型包括水动力学模型和污染物的对流扩散模型。污染物迁移扩散模型方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u\rho}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) - k\rho + S_d \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为污染物质量浓度,mg/L; $t$ 为时间,s; $u$ 为 $x$ 方向的流速,m/s; $E_x$ 为纵向弥散系数,m<sup>2</sup>/s; $S_d$ 为污染物输移的源漏项,源项包括点面源污染物的负荷输入,漏项包括需水量的输出; $k$ 为污染物的衰减率,d<sup>-1</sup>。

水环境容量核算原理如图2所示。各类源排放负荷对水质呈线性影响,满足迭加原理,在每一

个混合区下游控制断面上,点源和背景浓度(由来流背景浓度和面源污染共同影响)产生水质响应关系为

$$\rho(i,t) = \rho_i(t) + \rho_{0i}(t) \quad (2)$$

式中: $\rho(i,t)$ 为第*i*个混合区下游断面在*t*时刻的污染物质量浓度,mg/L; $\rho_i$ 为第*i*个混合区*t*时刻中点源排放产生的质量浓度,mg/L; $\rho_{0i}$ 为第*i*个混合区*t*时刻的背景质量浓度,mg/L。

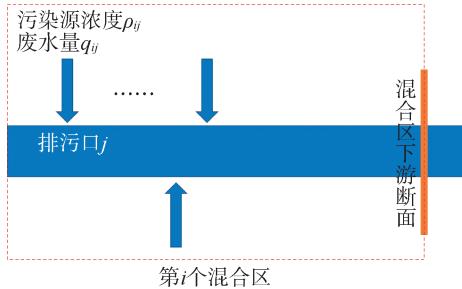


图2 水环境容量核算原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water environment capacity accounting principle

当第*i*个混合区中第*j*个污染源排放废水量恒定,排放污染物为单位负荷时,混合区下游边界浓度变化值与废水浓度关系见式(3),在第*i*个混合区中第*j*个污染源的分担率见式(4):

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_{ij}} \quad (3)$$

$$r_{ij} = \frac{\Delta\rho_{ij}}{\sum_j \Delta\rho_{ij}} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{ij}$ 为第*i*个混合区中第*j*个污染源的污染物贡献系数; $\rho_{ij}$ 为第*i*个混合区中第*j*个污染源的排放质量浓度,mg/L; $\Delta\rho_{ij}$ 为第*j*个污染源排放浓度为 $\rho_{ij}$ 时第*i*个混合区下游质量浓度变化值,mg/L; $r_{ij}$ 为第*j*个污染源对第*i*个混合区断面的分担率。

排污口边界条件为

$$\begin{cases} \alpha_{ij}(x,t) = 1 & (x = x_{j0}) \\ q_{ij}(x,t) = q_j & \end{cases} \quad (5)$$

式中 $q_{ij}$ 为第*i*个混合区中第*j*个污染源排放的废水量,m<sup>3</sup>/s。

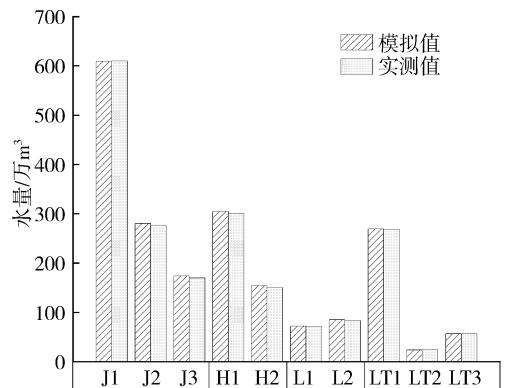
当该混合区下游断面的水质目标浓度为 $\rho_b$ ,某一时段内河流的水环境容量 $W$ 为

$$W = \int_0^t \sum_i \sum_j \frac{|\rho_b - \rho_{0i}|}{\alpha_{ij}} r_{ij} q_{ij} dt \quad (6)$$

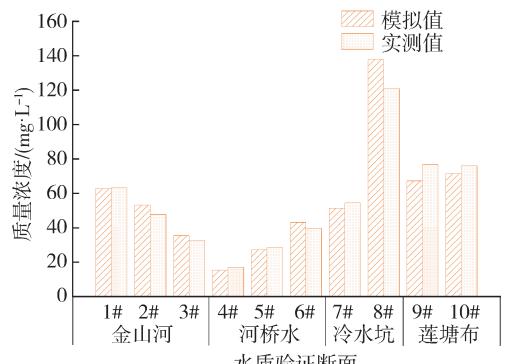
## 2.2 率定与验证

参考相关研究文献得到金山湖流域不同地表类型污染物累积和冲刷参数取值范围<sup>[18-19,23-24]</sup>,对比面源模型水量验证断面(图1)和实测汇水水量,结果如图3(a)所示,各验证断面水量误差范围为

-4.02%~3.00%,可见,SWMM模型能满足模拟金山湖流域降雨径流过程需求。



(a) 水量



(b) COD

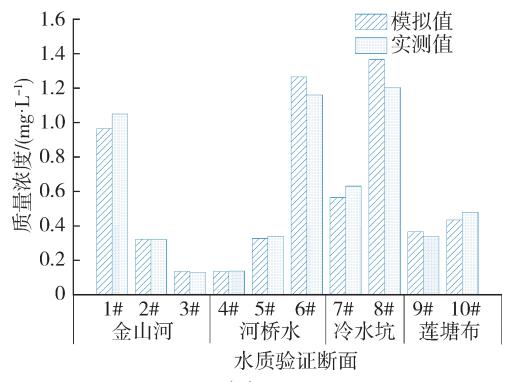


图3 各河涌水量水质率定验证

Fig. 3 Verification of water quality and quantity of each river

根据2018年12月和2017年8月遥感影像水质反演结果,对金山湖流域河网水动力水质参数进行率定。金山河、河桥水、冷水坑和莲塘布的糙率取值分别为0.05~0.055、0.035~0.055、0.05~0.055和0.045~0.055;各河涌的COD降解系数为0.01~0.4 d<sup>-1</sup>,TP的降解系数为0.02~0.5 d<sup>-1</sup>。根据2019年1月水质监测实测数据,选择各河涌和湖区模型计算断面和水质实测点位吻合的断面(图1)进行验证,结果如图3(b)和3(c)所示,COD、TP质量浓度模拟值与实测值相对误差范围为

-12.20%~14.04%和-10.48%~13.37%。表明模型模拟值与实测值吻合较好,能够满足本文的要求。

### 2.3 边界条件确定

#### 2.3.1 水文条件

一般水环境容量计算按照GB 25173—2010《水域纳污能力计算规程》中规定,以90%保证率最枯月平均流量作为水文条件,但城市河网地区闸坝等水利设施众多、生态基流不足、雨源特征明显,降雨是造成面源污染的主要因素,且丰水期降雨对面源污染影响尤为突出。因此,为准确掌握城市河网水环境容量动态变化过程,选择典型丰水年2017年为研究时段,以实际产汇流作为水文条件。

#### 2.3.2 水质目标

依照GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和《惠州市人民政府关于印发惠州市水污染防治工作方案的通知(惠府函[2015]476号)》,根据金山湖流域实际情况,流域水体拟实现功能为娱乐和景观用水,因此以IV类水质标准为金山湖流域水环境目标。根据GB 25173—2010《水域纳污能力计算规程》,金山湖流域各河涌为小型河流,排污口混合区长度为1km。

#### 2.3.3 污染物排放

各河涌点源及断面分布如图4所示,断面汇入点源的流量及负荷如表1所示。金山河流域共9个点源,COD和TP入河负荷量分别为256.58kg/d和5.47kg/d;河桥水流域共30个点源,COD和TP入河负荷量分别为462.15kg/d和11.14kg/d;冷水坑流域共36个点源,COD和TP入河负荷量分别为380.15kg/d和5.65kg/d;莲塘布流域共有23个点源,COD和TP入河负荷量分别为533.78kg/d和3.44kg/d。



### 3 结果与分析

#### 3.1 水环境容量时空分布特征

基于构建的动态水环境容量计算模型,在气象、排污口分布及排放负荷条件下,定量核算金山湖流域 COD 和 TP 的动态水环境容量,如图 5 所示,COD 和 TP 全年水环境容量分别为  $611.93 \text{ t/a}$  和  $4.13 \text{ t/a}$ 。从时间尺度上看,各河涌逐日水环境容量呈现先上升后下降的动态变化特征,4 条河涌 COD 逐日容量之和在  $238.55 \sim 3027.49 \text{ kg/d}$  范围波动,TP 逐日容量之和在  $3.73 \sim 58.02 \text{ kg/d}$  范围波动。总体而言,枯水期水环境容量小于丰水期。以 2 月为枯水期典型月,金山湖流域 COD 平均容量为  $1602.97 \text{ kg/d}$ ,TP 平均容量为  $9.80 \text{ kg/d}$ ,均低于 2017 年点源负荷量,这主要是由于金山湖流域为典型雨源型河流流域,枯水期流量较小,导致各河涌水动力条件弱,污染物稀释扩散过程缓慢、容量不足。从空间尺度上看,各河涌水环境容量呈现明显差别,对于 COD 而言,各河涌的水环境容量从大到小排序为:河桥水、冷水坑、莲塘布、金山河;河桥水 COD 质量浓度低于其他 3 条河涌,点源排放污水量为各河涌中最大且排放平均浓度最低,故河桥水 COD 容量最高。此外,莲塘布 COD 容量与点源负荷比值为各河涌中最小,主要是由于莲塘布 COD 污染负荷重且点源分布集中,表明水环境容量受点源分布影响较为明显。对于 TP 而言,各河涌的容量从大到小排序为:金山河、莲塘布、河桥水、冷水坑;金山河年径流量为  $1402.35 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,是各河涌中最大值,水体的自净稀释能力和污染物受纳能力较强。

#### 3.2 不同雨型对水环境容量的影响

选取 2017 年 6—7 月作为丰水期典型时段,2—

3 月作为枯水期典型时段,各河涌水环境容量与面源负荷量如图 6 所示。分析 COD 和 TP 逐日水环境容量与降水量、面源负荷量的相关关系,Pearson 相关系数如表 3 所示,其中枯水期仅发生 2 次大雨或暴雨降雨过程,无法进行相关性分析。

丰水期典型时段内,共发生 34 次中小雨(日降水量小于  $25 \text{ mm}$ )和 11 次大雨或暴雨降雨过程(日降水量大于  $25 \text{ mm}$ )。在中小雨降雨过程中,COD 水环境容量与降水量呈负相关关系,TP 与之相反,主要原因是各河涌面源污染负荷随降水量的增大而增大且滞后 1 d;当降水量小于  $1 \text{ mm}$  时,降雨冲刷能力不足,几乎不产生面源污染。COD 水环境容量与面源负荷量呈显著负相关关系,表明金山湖流域中随着降水量增大,COD 面源负荷增大,且成为流域内 COD 的主要来源。TP 水环境容量与面源负荷量呈正相关关系,表明点源为金山湖流域内 TP 的主要来源。根据监测资料可知,金山湖流域各河涌 TP 超标严重,尤其在莲塘布和冷水坑下游回水区。虽然降雨过程导致面源负荷增大,但降雨径流中 TP 平均质量浓度莲塘布最高,为  $0.29 \text{ mg/L}$ ,仍比河道内水体低。

在大雨或暴雨降雨过程中,COD 和 TP 水环境容量与降水量均呈正相关关系。在此期间两种污染物面源负荷量有所增加,但其水环境容量均明显增大。对于 COD 而言,丰水期降雨天数相对较多,在大雨或暴雨过程前通常已有降雨过程,且冲刷之后的地表 COD 污染物累积量较少,虽有较大的降雨过程但面源负荷量并不完全随降水量的增加而增大;对于 TP 而言,金山湖流域 TP 浓度地表本底值较高,负荷量的增加会导致容量降低。总体而言,水动力条件改变对水环境容量的正向作用大于水体受纳

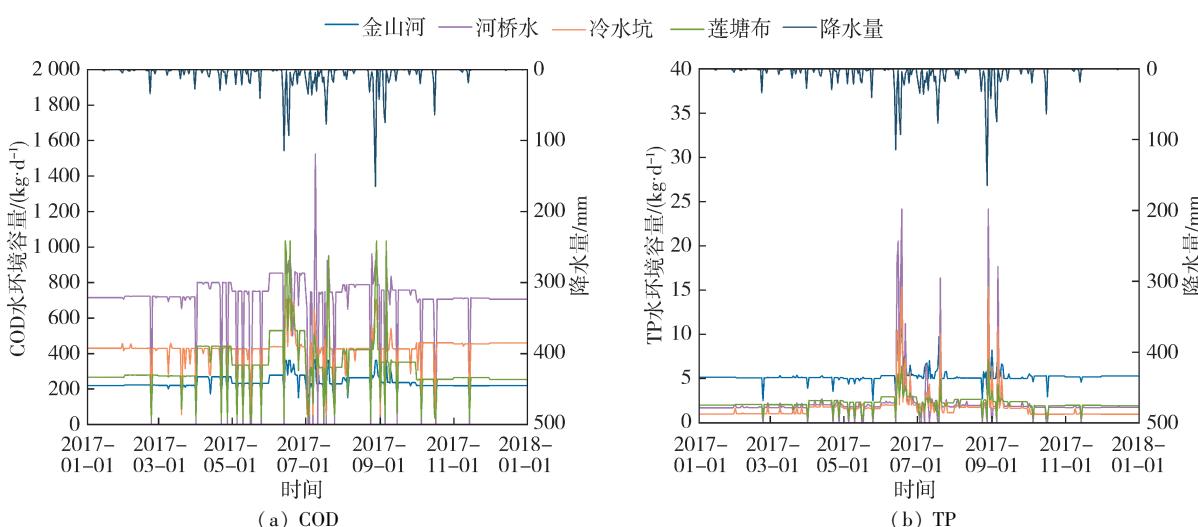


图 5 各河涌逐日动态水环境容量

Fig. 5 Daily dynamic environmental capacity of each river

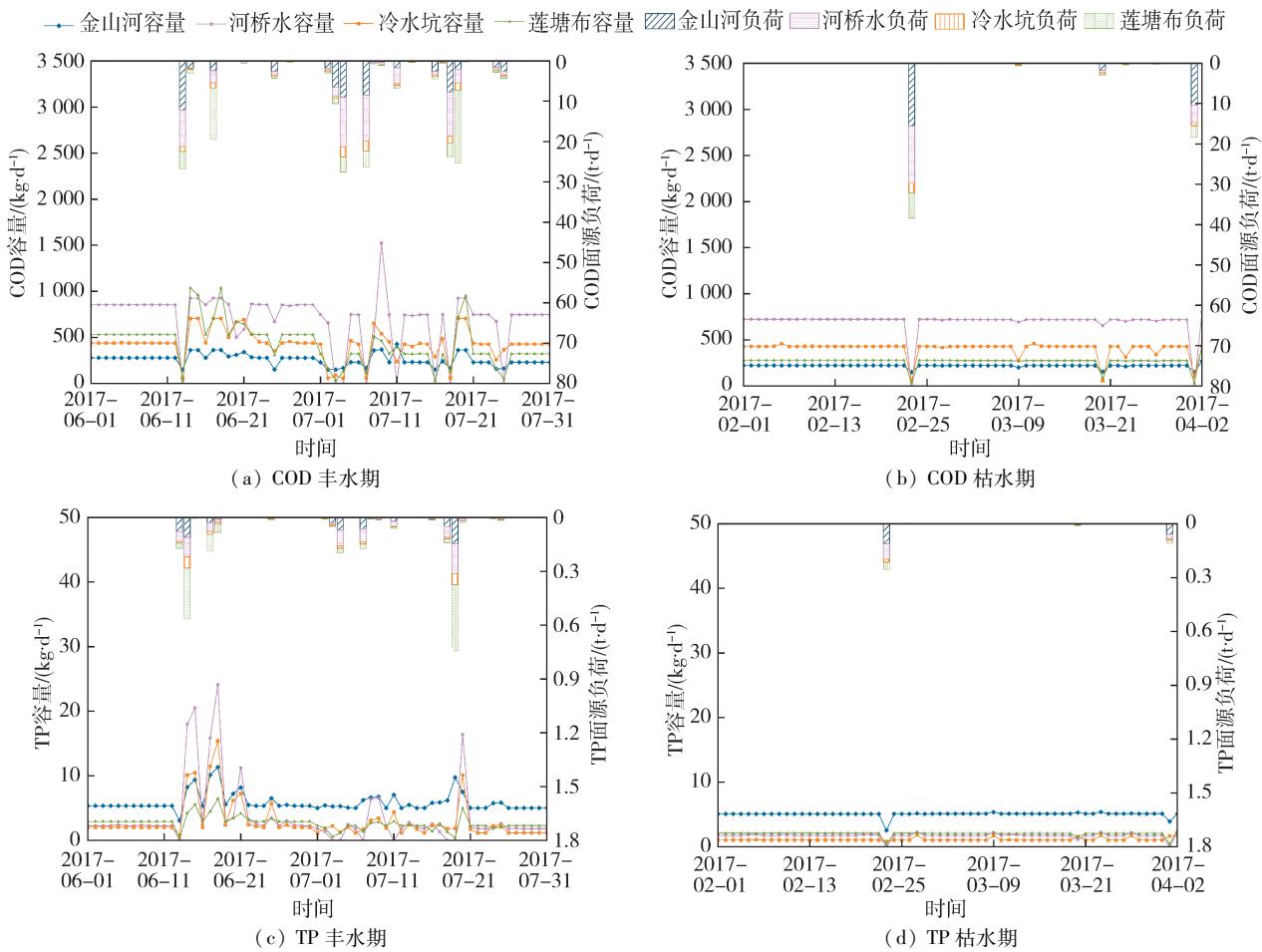


图 6 典型枯水、丰水期水环境容量与面源负荷

Fig. 6 Environmental capacity and non-point source load in typical dry season and wet season

表 3 降水量、面源负荷量和水环境容量的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient of rainfall, non-point source load and water environmental capacity

雨型	指标	降水量-面源负荷量	面源负荷量-水环境容量	降水量-水环境容量
丰水期中小雨	COD	0.655 ~ 0.800( + )	0.613 ~ 0.797( - )	0.118 ~ 0.490( - )
	TP	0.665 ~ 0.764( + )	0.144 ~ 0.554( + )	0.068 ~ 0.821( + )
丰水期大雨或暴雨	COD	0.245 ~ 0.490( - )	0.092 ~ 0.936( - )	0.413 ~ 0.605( + )
	TP	0.399 ~ 0.765( + )	0.063 ~ 0.329( - )	0.324 ~ 0.596( + )
枯水期中小雨	COD	0.771 ~ 0.954( + )	0.980 ~ 0.998( - )	0.730 ~ 0.934( - )
	TP	0.732 ~ 0.952( + )	0.310 ~ 0.993( - )	0.087 ~ 0.864( + )

注: (+) 表示正相关, (-) 表示负相关。

面源负荷量增加造成的负向作用,表现为随着降水量的增加水环境容量增大。对比 COD 和 TP 的水环境容量变化规律可知,金山湖流域 COD 面源负荷对水环境影响较大,TP 点源负荷对水环境影响较大。

枯水期典型时段内,共发生 21 次中小雨和 2 次大雨或暴雨降雨过程,在所有的降雨天数内降水量与后一天各河涌的面源负荷呈显著的正相关关系,面源负荷量与水环境容量呈负相关关系。2 月 22 日降水量达到最大,为 33.9 mm,金山湖流域 COD 和 TP 面源负荷分别为 38423.04 kg/d 和 255.31 kg/d,水环境容量分别为 238.55 kg/d 和 3.73 kg/d,远小于当日点源负荷量,且河桥水的 COD 和 TP 水环境容量均为 0。由于枯水期降雨较少,流域内陆面单元

污染物存在累积效应,当发生降雨时地表冲刷作用产生的面源负荷较大,污染物从地表进入河道后水质变差甚至超标,导致流域水环境容量急剧减小。

### 3.3 生态补水对水环境容量的影响

金山湖流域不包括生态敏感区,因此参考水文学 Tennant 法<sup>[25]</sup>,确定不同比例的生态流量,核算金山湖流域全年动态水环境容量,结果如图 7 所示。金山湖流域内无水文监测站,流域多年平均径流深为 966 mm<sup>[26]</sup>,金山河、河桥水、冷水坑和莲塘布 4 条河涌的多年平均径流分别为 1970 万 m<sup>3</sup>、948 万 m<sup>3</sup>、508 万 m<sup>3</sup> 和 2210 万 m<sup>3</sup>。根据流域特征和水期不同,生态基流一般为多年平均径流的 10% ~ 30%,因此本文设置 5%、10%、20%、30% 和 50% 共 5 种

不同生态流量保障情景。

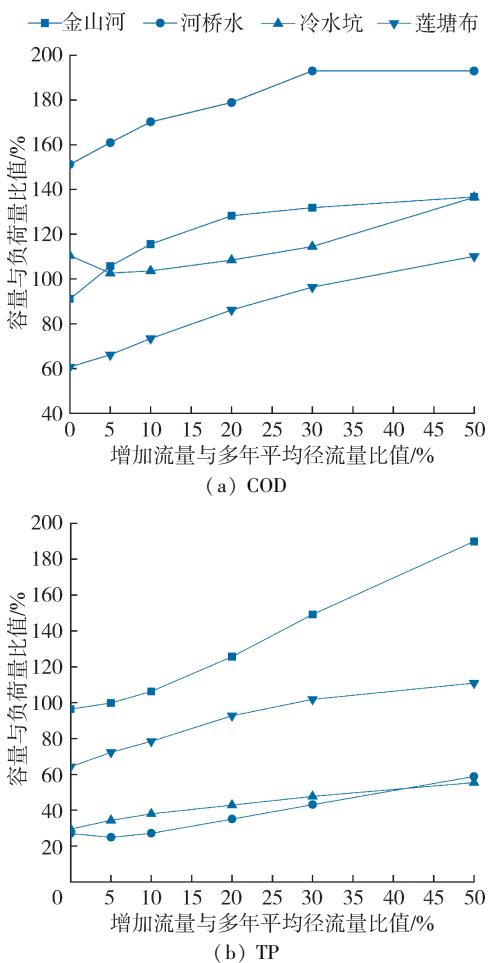


图 7 各河涌增加生态基流后水环境容量变化

Fig. 7 Capacity change of each river after adding ecological base flow

由图 7 可见,各河涌 COD 和 TP 水环境容量变化趋势相似,均随补充生态流量的增加而增大,且增大的速率逐渐变缓。说明金山湖流域各河涌 2017 年流量小于河涌所需生态流量,保障生态基流可显著提高流域水环境容量。各河涌之间水环境容量提升效果也存在明显差异性:在 50% 生态流量保障情境中,除冷水坑的 COD 和 TP、河桥水的 TP 水环境容量仅提高 26.08%、25.94% 和 31.79% 以外,其余 3 条河涌容量与负荷量的比值均提高 45% 以上。冷水坑由于集水面积在各河涌中最小,多年平均径流量较小,受河桥水汇入、点源负荷重的影响,有接近 50% 长度的河道由于下游金山湖顶托作用处于回水区,水动力条件较弱,仅靠保障生态流量难以改善水环境质量,需实施负荷量削减措施进行治理。各河涌中河桥水 TP 点源负荷最大,因此需要削减负荷量以改善河桥水水质。

为保障流域水环境容量充足和水质达标,以金山河为例探究在 2017 年基础上需补充生态流量的动态过程,结合水文 Tennant 法将补充生态流量限

制在 30% 的多年平均径流量内,结果如图 8 所示。总体而言,枯水期所需补充的生态流量约为多年平均径流的 22%,小于丰水期所需补充的生态流量。6 月由于降水量较大,河道本底流量相对充足,需补充的生态流量最少约为 13%。若控制补充的总水量不变,将补水过程均化,则逐日补充的生态流量为多年平均径流的 20.43%。



图 8 金山河补充生态流量动态及平均过程

Fig. 8 Dynamics and average process of supplementary ecological flow in Jinshan River

以金山河所有断面为对象,分别统计以动态过程补充生态流量、总水量不变情况下平均补充生态流量和未补充条件下 COD 和 TP 水质达标率。未补充条件下,金山河 COD 和 TP 水质达标率仅为 10.14% 和 2.47%,以动态过程进行补水时金山河 COD 和 TP 水质达标率分别显著提升至 92.05% 和 96.71%,平均补水的情况下,COD 和 TP 水质达标率分别提升至 91.78% 和 80.82%。平均补水过程虽能提高金山河水质达标率,但相同的补水量下达标率提升效果不如动态过程。若保障平均补水过程达标率不低于动态补水过程,则补水量需在动态补水过程基础上增加 10.64%。表明在水环境综合治理与修复工作中,需明确流域本底水文和水质变化规律,以动态过程补充生态流量,保障所需生态基流,才能在满足水环境容量充足且水质达标要求下,工程效益最大化。

## 4 结 论

a. 2017 年金山湖流域 COD 全年水环境容量为 611.93 t/a,逐日波动范围为 238.55 ~ 3 027.49 kg/d,TP 全年水环境容量为 4.13 t/a,逐日波动范围为 3.73 ~ 58.02 kg/d。

b. 金山湖流域枯水期水环境容量较小,且与降水量呈负相关关系;丰水期容量随降雨变化幅度较大,大雨或暴雨时期容量有明显提升,中小雨时期 COD 水环境容量与降水量呈负相关,TP 水环境容量与降水量呈正相关。

c. 保障生态基流能明显改善金山湖流域水环境容量不足的问题,全年动态生态流量保障对水质

达标率提升效果明显。

## 参考文献：

- [ 1 ] 王浩,王佳,刘家宏,等.城市水循环演变及对策分析 [J]. 水利学报,2021,52(1):1-9. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(1):1-9. (in Chinese))
- [ 2 ] 张翔,廖辰旸,韦芳良,等.城市水系统关联模型研究 [J]. 水资源保护,2021,37(1):14-19. (ZHANG Xiang, LIAO Chenyang, WEI Fangliang, et al. Research on the nexus model of urban water system [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):14-19. (in Chinese))
- [ 3 ] 郝璐,孙阁.城市化对流域生态水文过程的影响研究综述[J]. 生态学报,2021,41(1):13-26. (HAO Lu, SUN Ge. Impact of urbanization on watershed ecohydrological processes: progresses and perspectives [J]. Acta Ecologica Sinica,2020,41(1):13-26. (in Chinese))
- [ 4 ] 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 ))
- [ 5 ] 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 ))
- [ 6 ] 刘丹,王烜,曾维华,等.基于ARMA模型的水环境承载力超载预警研究[J]. 水资源保护,2019,35(1):52-55. ( LIU Dan, WANG Xuan, ZENG Weihua, et al. Research on overload warning of water environment carrying capacity based on ARMA model [J]. Water Resources Protection,2019,35(1):52-55. (in Chinese))
- [ 7 ] 靳甜甜,卢敏,刘国华,等.拉萨河干流城市段水环境容量[J]. 生态学报, 2018, 38 ( 24 ) : 8955-8963. ( JIN Tiantian, LU Min, LIU Guohua, et al. Water environmental capacity of Lhasa River in urban sections and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Simica, 2018, 38 ( 24 ) : 8955-8963. (in Chinese))
- [ 8 ] 熊鸿斌,张斯思,匡武,等.基于MIKE 11模型的引江济淮工程涡河段动态水环境容量研究[J]. 自然资源学报,2017,32(8):1422-1432. (XIONG Hongbin, ZHANG Sisi, KUANG Wu, et al. Environment capacity of the Guohe River in the water transfer project from Yangtze River to Huaihe River based on a MIKE 11 model [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 ( 8 ) : 1422-1432. (in Chinese))
- [ 9 ] 冯利忠,裴国霞,吕欣格,等.“引黄入呼”取水口动态性水环境容量计算[J]. 环境科学学报,2016,36(10):3848-3855. ( FENG Lizhong, PEI Guoxia, LYU Xinge, et al. Dynamic water environment capacity of the intake of the water diversion project from the Yellow River to Huhhot [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36 ( 10 ) :3848-3855. (in Chinese))
- [ 10 ] 管仪庆,陈玥,张丹蓉,等.平原河网地区水环境模拟及污染负荷计算[J]. 水资源保护,2016,32(2):111-118. ( GUAN Yiqing, CHEN Yue, ZHANG Danrong, et al. Aquatic environmental simulation and pollutant load calculation in plain river networks [J]. Water Resources Protection,2016,32(2):111-118. (in Chinese))
- [ 11 ] 申诗嘉,彭虹,夏函,等.基于环境质量底线的污染物总量控制研究:以汉江中上游为例[J]. 人民长江,2020,51(7):52-57. ( SHEN Shijia, PENG Hong, XIA Han, et al. Study on total pollutant control in middle-lower Hanjiang River based on environment quality baseline [J]. Yangtze River,2020,51(7):52-57. (in Chinese))
- [ 12 ] 孙冬梅,程雅芳,冯平.海河干流汛期动态水环境容量计算研究[J]. 水利学报,2019,50(12):1454-1466. (SUN Dongmei, CHENG Yafang, FENG Ping, et al. Study on dynamic water environmental capacity of mainstream of Haihe River in flood season [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(12):1454-1466. (in Chinese))
- [ 13 ] 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. ( QU Yiqing, PANG Yong. Water environmental capacity of Chengnan River Basin based on water quality standard of Longwangmiao Section [J]. Water Resources Protection, 2018,34(5):76-80. (in Chinese))
- [ 14 ] 张万顺,王浩.流域水环境水生态智慧化管理云平台及应用[J]. 水利学报,2021,52(2):142-149. (ZHANG Wanshun, WANG Hao. Cloud platform and application of watershed water environment and aquatic ecology intelligent management [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(2):142-149. (in Chinese))
- [ 15 ] 夏晶晶,张万顺,王永桂,等.三峡库区水环境模型系统构建[J]. 人民长江,2017,48(3):19-22. (XIA Jingjing, ZHANG Wanshun, WANG Yonggui, et al. Construction of water environment model system for TGP reservoir area [J]. Yangtze River,2017,48(3):19-22. (in Chinese)).
- [ 16 ] WANG Y G, ZHANG W S, ZHAO Y X, et al. Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the middle-lower Hanjiang River [J]. Journal of Hydrology, 2016,541:1348-1362.
- [ 17 ] 赵琰鑫,张万顺,汤怡,等.湖泊-河网耦合水动力水质模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2011,9(1):53-58. ( ZHAO Yanxin, ZHANG Wanshun, TANG Yi, et al. Numerical study of coupled one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic and water quality model for complex lake and river networks regions [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower

- [18] 涂华伟,王莉,张潇,等.河湖连通条件下城市湖泊水环境治理研究[J].中国农村水利水电,2020(12):101-105. ( TU Huawei, WANG Li, ZHANG Xiao, et al. Research on the restoration of urban lake water environment under the impact of river network [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020 ( 12 ) : 101-105. ( in Chinese) )
- [19] 郑晓燕,张万顺,徐高洪,等.暴雨对梁子湖水动力和水质的影响研究[J].人民长江,2016,47(9):17-21. ( ZHENG Xiaoyan, ZHANG Wanshun, XU Gaohong, et al. Study on impact of storm on hydrodynamic and water quality of Liangzi Lake [J]. Yangtze River, 2016,47(9): 17-21. ( in Chinese) )
- [20] 刘晓波,彭文启,何国建,等.基于水质-污染源响应关系的抚仙湖水环境承载力计算研究[J].水动力学研究与进展 A辑,2011,26(6):652-659. ( LIU Xiaobo, PENG Wenqi, HE Guojian, et al. Study on environmental carrying capacity of Fuxian Lake based on the response of water quality to pollution load [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011,26(6):652-659. ( in Chinese) )
- [21] 董飞,刘晓波,彭文启,等.地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J].水科学进展,2014,25(3):451-463. ( DONG Fei, LIU Xiaobo, PENG Wenqi, et al. Calculation methods of water environmental capacity of surface waters: review and prospect [J]. Advances in Water Science, 2014,25(3):451-463. ( in Chinese) )
- [22] 黄报远,卢显妍,陈桐生,等.粤港澳大湾区协同推进经济高质量发展和生态环境高水平保护的对策研究

(上接第 166 页)

- [22] 宋劼,易雨君,周扬,等.小浪底水库下游浮游生物及细菌群落对水沙调控的响应规律[J].水利学报,2020,51(9):1121-1130. ( SONG Jie, YI Yujun, ZHOU Yang, et al. Response of river plankton and bacterial community distribution to environmental factors under the influence of water and sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir, Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9):1121-1130. ( in Chinese) )
- [23] 娄广艳,葛雷,黄玉芳,等.黄河下游生态调度效果评估研究[J].人民黄河,2021,43(7):100-103. ( LOU Guangyan, GE Lei, HUANG Yufang, et al. Evaluation on the effect of ecological regulation in the Lower Yellow River [J]. Yellow River, 2021, 43 ( 7 ) : 100-103. ( in Chinese) )
- [24] 陈宁,杨艳艳,魏振华,等.调水调沙前后黄河口渔业资源结构变化[J].中国水产科学,2017,24(5):953-962. ( CHEN Ning, YANG Yanyan, WEI Zhenhua, et al. Composition and distribution of fishery resources before and after the water and sediment discharge regulation in the Yellow River estuary [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24 ( 5 ) : 953-962. ( in Chinese) )
- [25] 刘明,杨雅迪,毕乃双,等.2015年调水调沙期间黄河

[J].环境与可持续发展,2020,45(3):86-89. ( HUANG Baoyuan, LU Xianyan, CHEN Tongsheng, et al. Study on the countermeasures of promoting the high-quality development of economy and high level protection of ecological environment in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [ J ]. Environment and Sustainable Development, 2020,45 ( 3 ) : 86-89. ( in Chinese) )

- [23] TU M C, PATRICIA S. Modeling pollutant buildup and washoff parameters for SWMM based on land use in a semiarid urban watershed [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2018,229(4):121-136.
- [24] 马萌华,李家科,邓陈宁.基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J].水力发电学报,2017,36(11):62-72. ( MA Menghua, LI Jiake, DENG Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017,36(11):62-72. ( in Chinese) )
- [25] 李扬,孙翀,刘涵希.福建省域河流生态流量监管与控制目标核定[J].水资源保护,2020,36(2):92-96. ( LI Yang, SUN Chong, LIU Hanxi. Supervision of river ecological flow and verification of control objectives in Fujian Province [ J ]. Water Resources Protection, 2020,36 ( 2 ) : 92-96. ( in Chinese) )
- [26] 严彬.惠州市水文特性分析[J].广东水利水电,2004(5): 73-75. ( YAN Bin. Analysis on hydrological characteristics of Huizhou City [ J ]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2004 ( 5 ) : 73-75. ( in Chinese) )

(收稿日期:2021-01-20 编辑:王芳)

悬浮颗粒 Pb 及其稳定同位素组成变化[J].中国环境科学,2019,39(7):3009-3017. ( LIU Ming, YANG Yadi, BI Naishuang, et al. Variations of Pb and its stable isotopic composition of suspended particles in the Yellow River during water-sediment regulation scheme period in 2015 [J]. China Environmental Science, 2019, 39 ( 7 ) : 3009-3017. ( in Chinese) )

- [26] BAOLIGAO B Y, XU F G, CHEN X R, et al. Acute impacts of reservoir sediment flushing on fishes in the Yellow River [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016,13:26-35.
- [27] 黄河水系渔业资源调查协作组.黄河水系渔业资源[M].大连:辽宁科学技术出版社,1986;53-61.
- [28] 蒋晓辉,何宏谋,曲少军,等.黄河干流水库对河道生态系统的影响及生态调度 [M].郑州:黄河水利出版社,2012;360-364.
- [29] 刘晓燕,王瑞玲,张原锋,等.黄河河川径流利用的阈值[J].水利学报,2020,51(6):631-641. ( LIU Xiaoyan, WANG Ruiling, ZHANG Yuanfeng, et al. Threshold of the runoff utilization of the Yellow River [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 ( 6 ) : 631-641. ( in Chinese) )

(收稿日期:2021-07-27 编辑:俞云利)