

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.001

粤港澳大湾区金山湖流域水质变化规律

张万顺^{1,2,3}, 张紫倩¹, 彭虹⁴, 李琳¹, 张潇¹, 夏函¹, 章玲¹

(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:针对粤港澳大湾区城市河湖水质变化规律复杂、机制不确定等问题,建立了金山湖流域耦合陆面单元、河网、湖泊等不同尺度的“空-地-水”一体化模型,模拟了 2017 年水量、COD 质量浓度和 TP 质量浓度的变化规律,3 个指标的相对误差均在 15% 以内。模型模拟结果表明,金山湖流域内水质超标严重,枯水期相对丰水期水质较差,典型枯水月 12 月湖区逐日劣 V 类面积占比大于 96.66%;年内中小雨共出现 31 次,在中小雨后的 1~3 d 易出现水质下降现象;大雨共出现 8 次,在大雨后水质得到改善;金山湖流域水质指标浓度与耕地、农村居民点面积呈显著正相关关系,与林地面积呈显著负相关,人类活动强的区域水质相对较差。

关键词:城市河湖;“空-地-水”一体化模型;水质;土地利用格局;金山湖流域;粤港澳大湾区

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0001-08

Water quality variations of Jinshan Lake Basin in Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area//ZHANG Wanshun^{1,2,3}, ZHANG Ziqian¹, PENG Hong⁴, LI Lin¹, ZHANG Xiao¹, XIA Han¹, ZHANG Ling¹ (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, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the complicated variations of water quality and uncertain change mechanism of urban rivers and lakes in Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area, the “air-ground-water” integrated model of the Jinshan Lake Basin coupling different scales of land surface unit, river network and lake was established. The variation laws of water volume, COD mass concentration and TP mass concentration in 2017 were simulated, and the relative errors of the three indexes were within 15%. The simulation results show that the water quality in the Jinshan Lake Basin exceeds the standard seriously, and the water quality in the dry season is worse than that in the wet season. In December of the typical dry month, proportion of area with daily water quality inferior to class V standard is more than 96.66%. There are 31 times of moderate and light rain in the year, and the water quality in the basin tends to decline in 1-3 d after moderate and light rain. There are 8 times of heavy rain in the year, after which the water quality is improved. The concentration of water quality index in the Jinshan Lake Basin has a significant positive correlation with cultivated land and rural residential area, and a significant negative correlation with forest land area, indicating that the water quality in areas with strong human activities is relatively poor.

Key words: urban rivers and lakes; “air-ground-water” integrated model; water quality variations; land use pattern; Jinshan Lake Basin; Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area

粤港澳大湾区是我国城镇化水平最高的城市群区域^[1],人口集聚度高、河湖水系发达、自然地貌复杂,随着人水关系逐渐增强,水资源短缺、水体黑臭、

生态服务功能下降等城市河湖水环境问题日益严峻^[2-5]。受社会经济过程与自然过程交叉影响,城市河湖水质变化规律愈发复杂,存在水质变化机制

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,主要从事环境规划与管理研究。E-mail:wszhang@whu.edu.cn

不确定的突出问题,成为制约粤港澳大湾区高质量发展的瓶颈^[6-8]。精准揭示城市河湖独特的水文情势和强人类活动相互影响下的水质变化规律,涉及河湖水系交汇、陆面降雨径流、土地利用格局和水库调度等多过程^[9-11],亟须对气象、水文、水质等多要素全过程进行全面精细的量化研究。

近年来,国内外学者针对精细量化水环境变化规律开展了大量研究,主要集中在自然条件下大尺度流域降水、径流、水量、水质等过程的定量模拟^[12-13]。城市河湖存在水文、生态、社会异质性特征复杂多变等特点,为精细刻画城市河湖水质变化过程,需要统筹陆面单元大尺度、河网中尺度、重要水域小尺度水环境过程机制差异的模型体系^[14-15]。基于耦合气象数值模型、陆地模型和水动力-水质-水生态模型的“空-地-水”一体化模型逐渐成为全面揭示水质变化规律的重要工具^[16-18],可突破流域陆面空间上不同尺度单元耦合的瓶颈,实现流域自然过程与社会经济过程的耦合与响应关系的定量模拟^[19-20],能够弥补传统流域水环境模型尺度单一、唯自然过程的不足。

金山湖流域是位于粤港澳大湾区的典型城市流域,河湖水系交错,社会经济发展空间分异明显,水质不达标、水体黑臭等水环境问题较为严重。本文以金山湖流域为例,建立了耦合陆面单元、河网、湖泊等不同尺度的“空-地-水”一体化模型,模拟强人类活动、水文、气象过程等多重因素影响下流域内污染负荷以及水质变化过程,以揭示水质变化机制以及土地利用格局对水质的影响。

1 研究区概况

金山湖流域位于广东省惠州市城区南部,东江流域中下游,西枝江左岸。金山湖流域水系由金山湖与4条主要入湖河涌构成,入湖河涌为金山河、莲塘布、河桥水和冷水坑,流域集雨面积约63.7 km²,水系如图1所示。流域上游为农业区域,中游为城乡接合部,下游为城市地区,点源排放密集,农业面源、城镇面源污染严重,人类活动影响显著。2019年,入湖4条河涌整体为劣V类水体,水质状况均属于“轻度黑臭”;湖区水质整体为V类,金山河入湖口至河桥水入湖口湖段水质属于“轻度黑臭”,全湖段均呈现出不同程度的富营养化现象。

2 “空-地-水”一体化模型构建

基于课题组前期研究成果^[17,20-21],综合考虑陆面降雨径流、河网及湖泊水动力演进与污染物输移,构建“空-地-水”一体化模型,包含一维河网与二维



图1 金山湖流域水系

Fig.1 Water system of Jinshan Lake Basin

湖泊水动力水质模型以及面源模型。以流域面源模型的模拟结果作为水动力水质模型的旁侧入流条件,实现降雨径流面源模型与水动力水质模型的耦合计算;通过在一维河网和二维湖泊的连接断面处设置过渡单元,根据过渡单元上两种模型模拟的水位、流量、浓度相等的条件,实现一、二维模型的耦合。

2.1 面源模型

本文选用的流域面源模型为SWMM模型,包含水文与水质模块。选择地表汇流方式、Horton下渗模型进行地表径流模拟,选择指数函数方程进行污染物累积冲刷模拟^[20-21]。采用30 m精度的DEM栅格,将金山湖流域陆面共划分为153个子汇水区,如图1所示。通过DEM数据、土地利用数据确定各子汇水区的面积、不透水面积占比、流域宽度、平均坡度等确定性参数;采用惠阳国家气象站逐日降雨、蒸发、气温、相对湿度等数据建立气象数据库。

2.2 一维河网与二维湖泊水动力水质模型

采用圣维南方程组描述水动力学过程,并充分考虑水体污染物的对流、扩散、降解作用,建立一维河网与二维湖泊水动力水质模型^[17]。收集整理流域内水文地形资料,构建金山河、莲塘布、河桥水、冷水坑4条河涌的一维模型地形断面,共计75个;构建金山湖湖区的二维模型,划分正交结构网格共计46624个,网格精度为20 m×20 m,地形断面与网格设置如图2所示。

2.3 模型参数率定与验证

根据金山湖流域水质现状,选取主要污染因子COD、TP作为模拟指标。利用金山湖2018年12月(枯水期)和2017年8月(丰水期)的GF-2号遥感

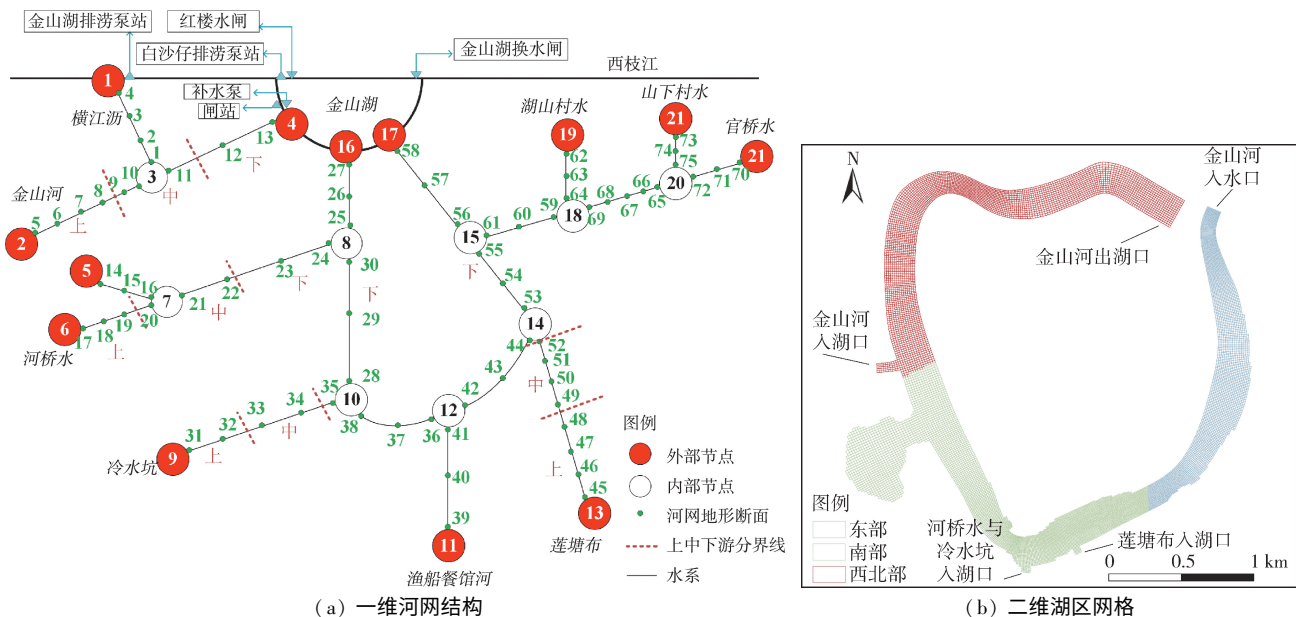


图2 金山湖流域地形断面与网格设置
Fig.2 Topographic sections and grid setting of Jinshan Lake Basin

影像水质反演结果(图3)做模型率定。流域内糙率取值范围为0.025~0.055,COD降解系数为0.01~0.4 d⁻¹,TP降解系数为0.02~0.5 d⁻¹。以2019年1月水量验证断面(图1)实测汇水水量进行流域面源模型验证,以4条河涌10个断面、湖区5个点位(图1)的水质监测结果进行一维河网与二维湖泊水动力水质模型验证。模型验证结果见图4,面源模

型水量的相对误差均在5%以内,水动力水质模型COD和TP的相对误差均在15%以内,表明“空-地-水”一体化模型能够满足金山湖流域面源及水质模拟的要求。

3 水质变化规律分析

3.1 水质时空变化规律

由于降水是造成非点源污染的主要驱动因素,丰水期非点源污染尤为显著^[22],因此选择典型丰水年2017年作为研究时段。基于“空-地-水”一体化模型,模拟了2017年水文、气象条件下COD、TP质量浓度的变化过程。选取4条河涌上游、中游和下游典型断面开展水质变化分析,结果见图5和图6。金山湖2017年典型丰水月6月与典型枯水月12月的水质指标不同浓度范围面积占比如图7所示。由图5~7可见,金山湖流域水质整体较差,枯水期水质比丰水期差,金山湖在典型丰水月劣V类面积占比均在86.14%以上,在典型枯水月劣V类面积占比在96.66%以上。在春夏季降雨丰沛时期,河道与湖泊的流量、流速整体较大,对污染物的稀释作用较强。以地表水Ⅳ为标准,各河涌断面COD质量浓度年达标率均在16.71%以下,TP质量浓度年达标率均在2.47%以下;湖泊TP质量浓度超标严重,COD质量浓度整体较好。

水质波动与降水量密切相关,枯水期水质无明显波动,丰水期水质随降雨波动明显。2017年,日降水量为15~60 mm的中小雨共出现31次,在中小雨后的1~3 d,金山湖全流域的COD质量浓度易升高,TP质量浓度有所降低;降水量超过60 mm的大

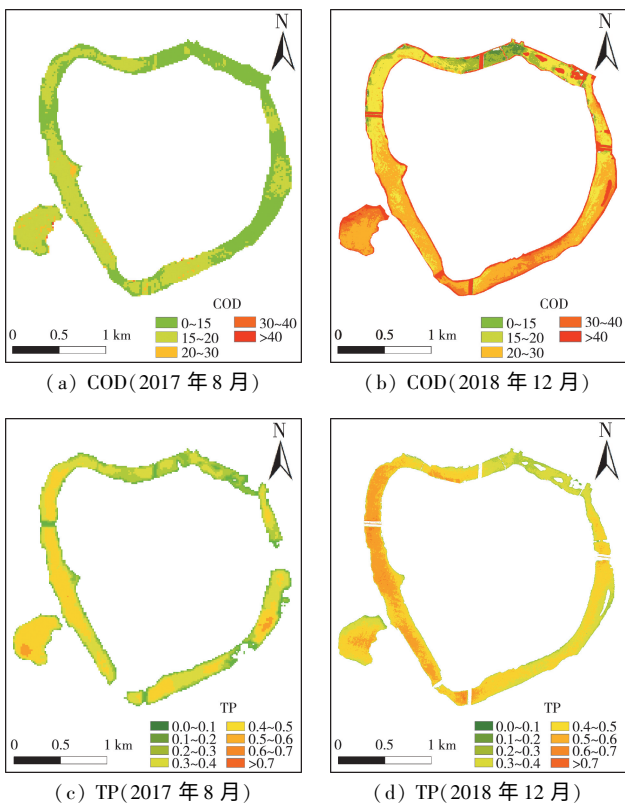


图3 遥感反演结果(单位:mg/L)

Fig.3 Remote sensing inversion results(unit: mg/L)

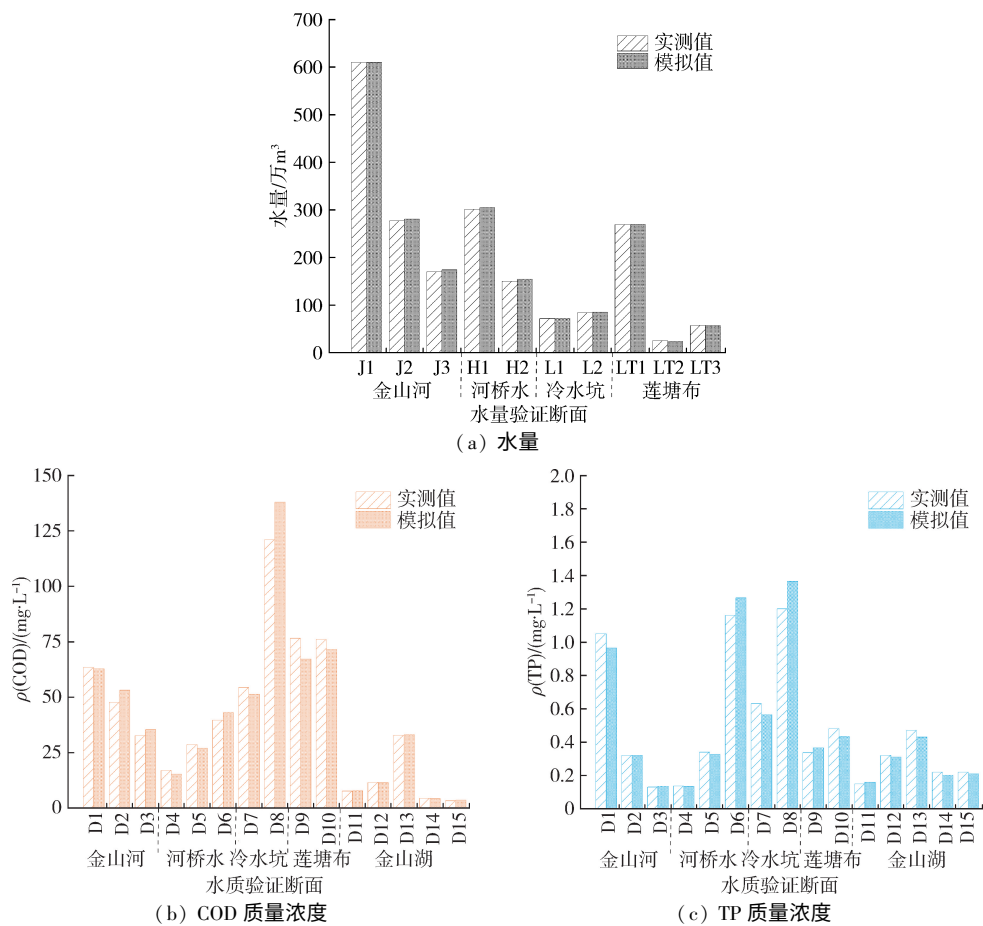


图 4 模型验证结果

Fig. 4 Model validation results

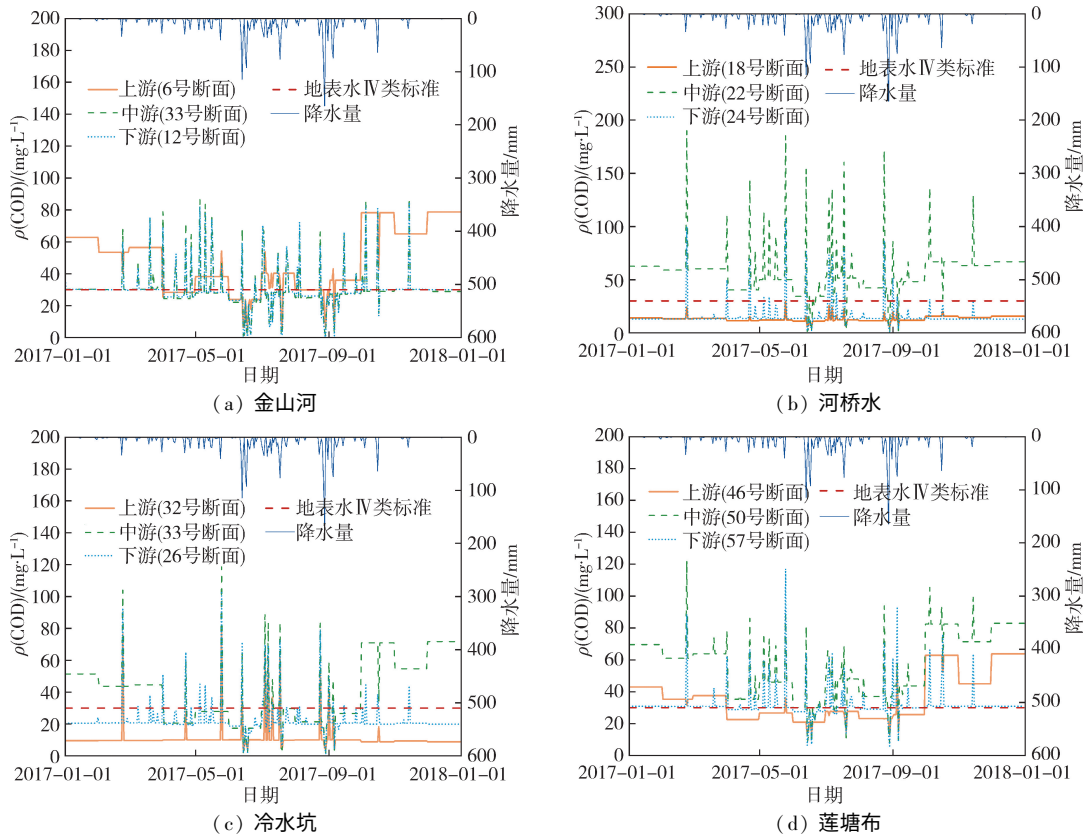


图 5 4 条河涌典型断面 COD 质量浓度变化

Fig. 5 Variation of COD mass concentration in typical sections of 4 rivers

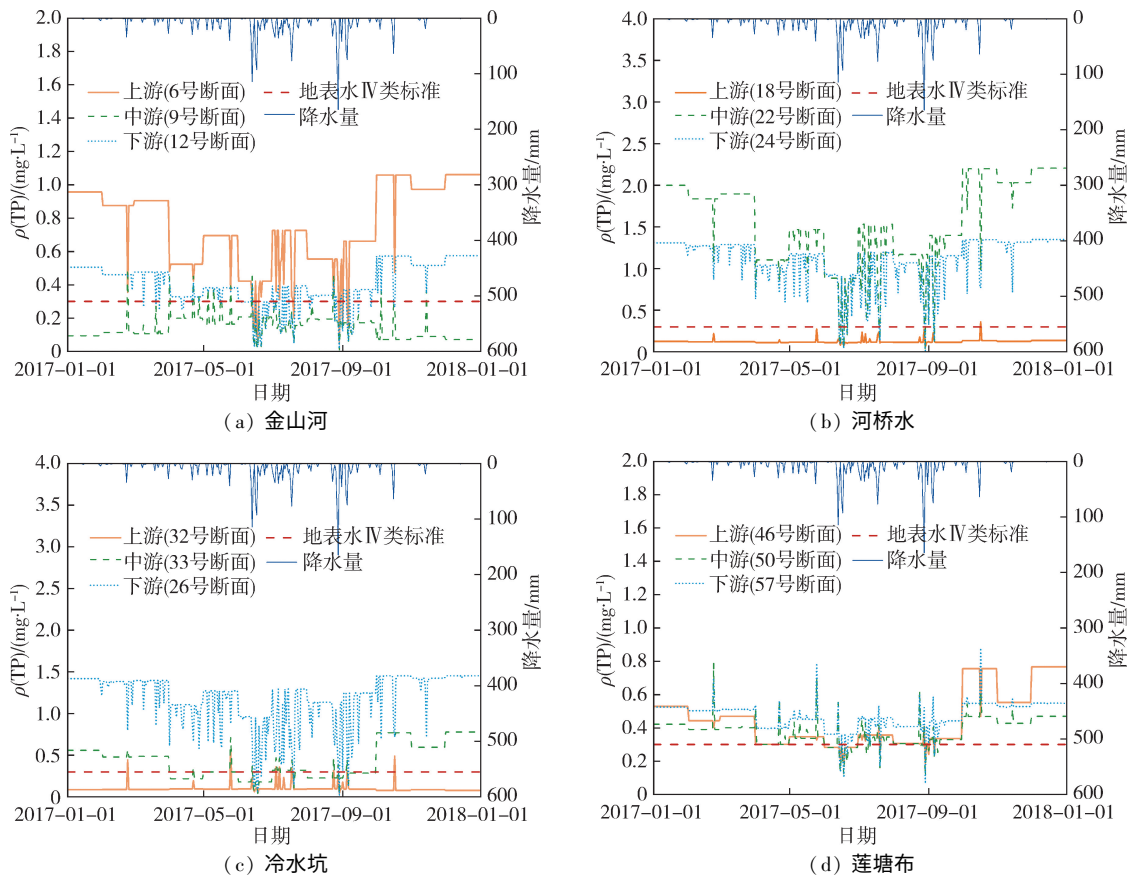


图 6 4 条河涌典型断面 TP 质量浓度变化

Fig. 6 Variation of TP mass concentration in typical sections of 4 rivers

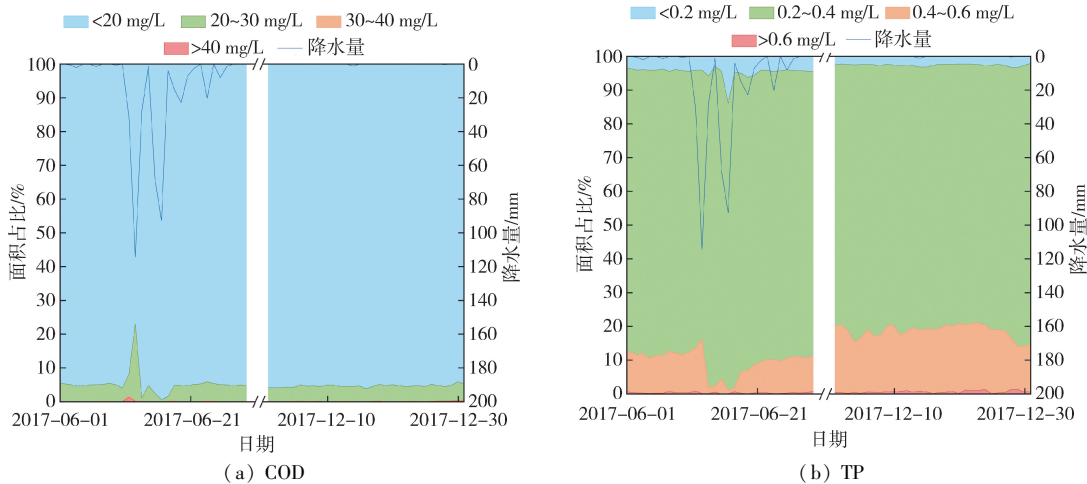


图 7 金山湖典型水期 COD、TP 不同质量浓度范围面积占比

Fig. 7 Daily area proportion of different concentration ranges of COD and TP in typical water period of Jinshan Lake

雨共出现 8 次,在大雨过后,流域的 COD、TP 质量浓度均有所降低。水质波动特征表明日降水量小于 15 mm 的降雨对陆面的冲刷作用不明显,带来的降雨径流污染影响较小,降雨期水质较为稳定;中小雨时期产生的陆面降雨径流污染程度最高,对水体的 COD 质量浓度影响显著;大雨冲刷作用产生更高的面源污染负荷,但由于此时降雨径流量较大,面源负荷对水质的影响程度有所降低。各河涌水质具有明显的空间分异特征,金山河、莲塘布的中上游水质较

下游好,河桥水、冷水坑的中下游水质较上游好。金山湖丰水期与枯水期 COD、TP 质量浓度分布如图 8 所示,湖泊的南部出现超标污染带的污染物浓度较高、范围较广,西北部次之,东部水质相对较好。

金山湖流域污染物浓度较高的区域与点源排放密集区域一致,各区域点源负荷如表 1 所示,金山河、莲塘布的上游区域,河桥水、冷水坑的中下游区域,以及湖泊的南部与西北部区域点源负荷较高,表明点源是影响水质空间分布特征的主要原因。此

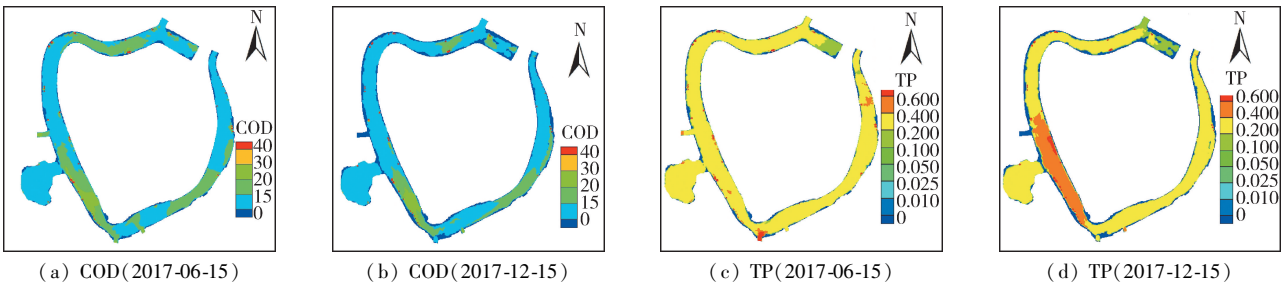


图8 金山湖典型水期 COD、TP 质量浓度分布 (单位:mg/L)

Fig. 8 Concentration distribution of COD and TP in typical water period of Jinshan Lake(unit: mg/L)

外,湖区南部是河桥水、冷水坑、莲塘布等河涌集中入汇区域,河涌入汇携带大量污染负荷至湖泊,对湖泊水质造成不利影响。

表1 金山湖流域各区域点源负荷

Table 1 Regional point source load in Jinshan Lake Basin

河涌/湖区	位置	负荷/(t·a ⁻¹)	
		COD	TP
金山河	上游	75.00	1.54
	中游	0	0
	下游	18.65	0.46
河桥水	上游	0	0
	中游	67.77	1.88
	下游	164.93	1.97
冷水坑	上游	0	0
	中游	45.14	0.47
	下游	29.72	0.68
莲塘布	上游	155.44	0.89
	中游	8.39	0.12
	下游	10.00	0.12
金山湖	东部	42.84	0.65
	南部	116.18	2.44
	西北部	79.01	1.85

3.2 土地利用格局对水质的影响

金山湖流域陆面以城镇用地为主,占全流域陆面面积的 37.38%,其次为林地、耕地和农村居民点,占比分别为 25.29%、24.27%和 9.12%,荒地与草地占比仅分别为 3.21%和 0.75%。城镇用地主要分布在各支流的中下游,林地主要分布在各支流的中上游,耕地主要分布在河桥水中游、冷水坑上游以及莲塘布中上游,农村居民点主要分布在河桥水中游、冷水坑中下游以及莲塘布中上游。

从土地利用格局尺度分析,不同水质断面受区间入汇直接影响^[23],因此本文将每个断面的子流域范围定义为断面区间范围内符合产汇流机制的所有子流域。分别对 4 条河涌选取典型干流断面开展子流域土地利用格局分析,4 条河涌所选断面以及不同断面子流域土地利用类型占比如图 9 所示。各支流从上游至下游,金山河 5 个断面子流域城镇用地、农村居民点面积占比逐渐增大,林地、耕地面积占比逐渐减小,草地、荒地面积占比低于 2%;河桥水 4 个断面子流域城镇用地面积占比逐渐增大,农村居

民点、耕地面积占比先增大后减小,林地占比逐渐减小,草地、荒地占比低于 1%;冷水坑 4 个断面子流域城镇用地面积占比先增大后减小,林地、耕地面积占比逐渐减小,农村居民点面积占比逐渐增大,草地、荒地面积占比低于 4%;莲塘布 7 个断面子流域城镇用地面积占比逐渐增大,耕地面积占比先增大后减小,林地面积占比逐渐减小,农村居民点面积先增大后减小,草地、荒地面积占比低于 5%。

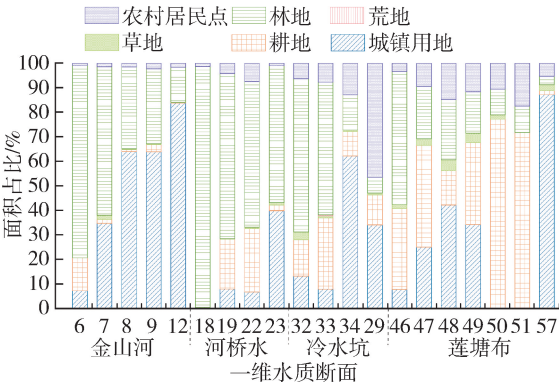


图9 不同断面子流域土地利用类型

Fig. 9 Land use types in sub-basins of different sections

将不同水质断面 COD、TP 质量浓度的年均值、典型丰水月 6 月均值和典型枯水月 12 月均值与对应子流域土地利用类型结构进行 Pearson 相关性分析,结果如表 2 所示。COD 质量浓度与耕地、草地面积占比呈显著正相关关系,与林地面积占比呈显著负相关关系;TP 质量浓度与耕地、农村居民点面积占比均呈显著正相关关系;其余土地利用类型面积占比与水质指标质量浓度的相关性不显著。耕地面积占比与水质指标质量浓度均呈正相关关系,耕地区域农业耕作活动频繁,化肥流失、农业面源污染严重,导致水体中的污染加重;丰水月 COD 质量浓度和 TP 质量浓度与耕地面积占比相关性高于枯水月和年均值,表明降水会加重农业面源污染;COD 质量浓度的相关性较 TP 质量浓度更高,表明农业面源污染对 COD 质量浓度的影响程度更大。林地面积占比与水质指标质量浓度均呈负相关关系,林

表2 水质指标与土地利用类型面积占比的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between water quality index and area proportion of land use type

土地利用类型	COD			TP		
	年均值	丰水月	枯水月	年均值	丰水月	枯水月
城镇用地	-0.124	-0.242	-0.007	-0.145	-0.217	-0.024
耕地	0.539 *	0.633 **	0.313	0.182	0.472 *	-0.028
草地	0.348	0.573 **	0.095	0.050	0.424	-0.211
荒地	-0.091	-0.194	0.062	-0.062	-0.167	0.027
林地	-0.451 *	-0.352	-0.413	-0.113	-0.302	-0.116
农村居民点	0.327	0.153	0.426	0.297	0.319	0.463 *

注：* 和 ** 分别表示通过了可信度 95% 和 99% 的显著性检验。

地区域人类活动较弱,植被覆盖度高,水土保持能力强,植被对污染物的截流以及净化作用可以有效减少污染物。农村居民点面积占比与水质指标质量浓度均呈正相关关系,农村居民点承载了较多农村居民生活、畜禽养殖活动,给水环境带来大量农村生活污染。城镇用地面积占比与水质指标质量浓度相关性不显著,城镇带来的污染以工业废水和市政污水点源为主,而流域内点源在支流各区域分布不均。流域内草地与荒地由于面积占比极小,与水质指标质量浓度相关性的不确定性较大。

4 结 语

本研究建立的耦合陆面单元、河网、湖泊等不同尺度的“空-地-水”一体化模型能够实现对粤港澳大湾区强人类活动影响下的金山湖流域河湖水质变化过程的精细化模拟。模型综合考虑了陆面降雨径流、河网及湖泊水动力演进与污染物输移的影响,能有效反映流域水质变化机制。模拟结果表明,金山湖流域水质与流域降雨和土地利用类型密切相关,为推进流域水环境精细化管理提供有力的技术支撑,助力形成“人水和谐”的新时代生态文明格局。

参考文献:

- [1] 蔡文博,韩宝龙,遼非,等. 全球四大湾区生态环境综合评价研究[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8392-8402. (CAI Wenbo, HAN Baolong, LU Fei, et al. Comprehensive evaluation of the eco-environment in the four global bay areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8392-8402. (in Chinese))
- [2] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. (in Chinese))
- [3] 胡庆芳,王银堂,李伶杰,等. 水生态文明城市与海绵城市的初步比较[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 13-18. (HU Qingfang, WANG Yintang, LI Lingjie, et al. Preliminary comparison between water-ecological civilization city and sponge city [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 13-18. (in Chinese))
- [4] 梁志宏,陈秀洪,罗欢,等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 93-99. (LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 93-99. (in Chinese))
- [5] 曹士圯,胡庆芳,蒋思佳,等. 1995—2016 年深圳市用水量变化与节水潜力分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 76-81. (CAO Shiyi, HU Qingfang, JIANG Sijia, et al. Analysis of water consumption change from 1995 to 2016 and water saving potential in Shenzhen City [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 76-81. (in Chinese))
- [6] 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): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))
- [7] 杨卫,张利平,李宗礼,等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 115-128. (YANG Wei, ZHANG Liping, LI Zongli, et al. Interconnected river system network scheme of urban lake group based on water environment improvement [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 115-128. (in Chinese))
- [8] 陈庆江,丁瑞,赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40

- (3): 8-13. (in Chinese))
- [9] LI J, YANG W J, LI W J, et al. Coupled hydrodynamic and water quality simulation of algal bloom in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Ecological Engineering, 2018, 119: 97-108.
- [10] LIAN J J, YAO Y, MA C, et al. Reservoir operation rules for controlling algal blooms in a tributary to the impoundment of Three Gorges Dam [J]. Water, 2014, 6 (10): 3200-3223.
- [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] CHEN X M, XU G H, ZHANG W S, et al. Spatial variation pattern analysis of hydrologic processes and water quality in Three Gorges Reservoir area [J]. Water, 2019, 11: 2608.
- [13] SHI Y Y, XU G H, WANG Y G, et al. Modelling hydrology and water quality processes in the Pengxi River Basin of the Three Gorges Reservoir using the soil and water assessment tool [J]. Agricultural Water Management, 2017, 182: 24-38.
- [14] 夏军, 张翔, 韦芳良, 等. 流域水系统理论及其在我国的实践 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16 (1): 1-7. (XIA Jun, ZHANG Xiang, WEI Fangliang, et al. Water system theory and its practices in China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16 (1): 1-7. (in Chinese))
- [15] CEOLA S, MONTANARI A, KRUEGER T, et al. Adaptation of water resources systems to changing society and environment: a statement by the International Association of Hydrological Sciences [J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61 (16): 2803-2817.
- [16] 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))
- [17] 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))
- [18] 王永桂, 夏晶晶, 张万顺, 等. 基于大数据的水环境风险业务化评估与预警研究 [J]. 中国环境管理, 2017, 9 (2): 43-50. (WANG Yonggui, XIA Jingjing, ZHANG Wanshun, et al. Research of water environment risk assessment and early warning based on big data [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9 (2): 43-50. (in Chinese))
- [19] 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 Research, 2011, 9 (1): 53-58. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 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))
- [22] 李家科, 彭凯, 郝改瑞, 等. 黄河流域非点源污染负荷定量与控制研究进展 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 90-102. (LI Jiake, PENG Kai, HAO Gairui, et al. Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 90-102. (in Chinese))
- [23] 于松延, 徐宗学, 武玮, 等. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应 [J]. 环境科学学报, 2014, 34 (5): 1309-1315. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei, et al. Spatial variation of water quality and its response to landuse in the Beiluo River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (5): 1309-1315. (in Chinese))

(收稿日期:2021-01-20 编辑:王 芳)