

武汉市东沙水系水质现状及污染成因分析

谷芳华^{1,2}, 张翔^{1,2*}, 陶士勇^{1,2}, 王瑶^{1,2}, 徐晶^{1,2}

¹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

²武汉大学, 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年11月3日; 录用日期: 2021年12月22日; 发布日期: 2021年12月30日

摘要

东沙水系位于武汉市中心城区, 连接长江和东湖, 是典型的城市复杂水系。为探究东沙水系水污染成因, 于2019年4月至2020年1月对东沙水系34个采样点进行8次水质采样, 并测定pH、溶解氧(DO)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)以及重金属(Cu, Se, Pb)共8项水质指标。监测结果表明, 东沙水系的水环境污染较为严重, 尤其是罗家港、东湖港、楚河等城市河道。各项水质指标中, TN超标比例最高, 其中沙湖、东湖的TN浓度高于V类水标准的比例分别为100%和80.6%。综合其余七项水质指标进行水环境单因子评价, NH₃-N、TP和DO的超标比例较高, 劣V类水质的点位占比分别为24.4%、17.3%和10.5%。从季节分布上看, 劣V类水占比呈现冬季(41.2%) > 秋季(32.4%) = 夏季(32.4%) > 春季(11.8%)的规律。结合东沙水系结构及其汇水区下垫面特点对水环境影响因素进行分析, 东沙水系水环境主要受到生活污水、面源污染、内源污染以及水系连通性的影响。城市河渠主要受到生活污水、固体垃圾排放以及底泥内源释放的影响, 局部河道受到建筑工地排污的影响, 城市湖泊主要受到面源污染的影响。东沙水系的水环境治理应以源头控制为主, 水系连通为辅, 综合考虑水系结构和水质状况, 制定合理的生态调水方案。

关键词

城市复杂水系, 东沙水系, 水环境, 水污染成因

Analysis on Water Quality Status and Pollution Causes in Dongsha Water Network of Wuhan

Fanghua Gu^{1,2}, Xiang Zhang^{1,2*}, Shiyong Tao^{1,2}, Yao Wang^{1,2}, Jing Xu^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Hubei Provincial Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Nov. 3rd, 2021; accepted: Dec. 22nd, 2021; published: Dec. 30th, 2021

作者简介: 谷芳华(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文学与水资源研究, Email: gufanghua@whu.edu.cn
*通讯作者 Email: zhangxiang@whu.edu.cn

文章引用: 谷芳华, 张翔, 陶士勇, 王瑶, 徐晶. 武汉市东沙水系水质现状及污染成因分析[J]. 水资源研究, 2021, 10(6): 572-580. DOI: 10.12677/jwrr.2021.106062

Abstract

Dongsha Water Network is located in the center of Wuhan, connecting the Yangtze River and the East Lake, which is a typical complex urban water network. In order to explore the causes of water pollution, 34 water samples were collected 8 times from April, 2019 to January, 2020, and 8 water quality parameters including pH, dissolved oxygen (DO), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH₃-N) and heavy metals (Cu, Se, Pb) were detected. The results showed that the water pollution was serious, especially in Luojiagang River, Donghugang River and Chuhe River. Among all the parameters, the proportion of TN exceeding the standard was the highest, and the proportions of TN concentration belonging to inferior V category in Shahu Lake and East Lake were 100% and 80.6%, respectively. The single factor evaluation of water environment based on the other seven parameters showed that high proportion of NH₃-N, TP and DO exceeded the standard, and the percentages of inferior V category were 24.4%, 17.3% and 10.5%, respectively. The proportion of inferior V category demonstrated the seasonal order of winter (41.2%) > autumn (32.4%) = summer (32.4%) > spring (11.8%). The influencing factors of water environment in Dongsha Water Network were analyzed based on the water network structure and the characteristics of underlying surface in the catchment area. The results showed that the water environment was mainly affected by domestic sewage, non-point source pollution, internal source pollution and water network connectivity. Urban rivers were mainly affected by domestic sewage, solid waste discharge and internal release of sediment, some parts were affected by sewage discharge from construction sites, and urban lakes were mainly affected by non-point source pollution. The water environmental control should mainly rely on source control, supplemented by water network connection, and a reasonable ecological water diversion scheme should be formulated considering the water network structure and water quality condition.

Keywords

Urban Complex Network, Dongsha Water Network, Water Environment, Water Pollution Causes

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市化是我国经济社会发展的引擎，但在快速城市化过程中，城市管理滞后带来水资源短缺、城市内涝以及水污染等诸多城市水问题，成为制约经济社会高质量发展的瓶颈之一。城市水问题的成因复杂，其中水污染问题涉及城市下垫面、经济社会结构、人口密度、污染物和河湖水系特征等诸多因素，是城市水问题研究的重点和难点。

城市水污染成因的相关研究表明，城市污染普遍源自城市的固有特征，如密集的人口、活跃的经济活动、以及增加的不透水面积等[1]。人口的增长和经济的发展带来了生活污水和工业废水的大量排放，导致较多污染物排入城市河渠[2]。一些地区还存在向水体倾倒垃圾或偷排废水的情况，加大了污水治理的难度。楼房及道路等硬化工程的建设使得城市的下垫面条件大大改变，进而影响城市水文循环过程[3]。降雨在不透水面上快速产流，将地面前期累积的各类污染物冲刷进入城市河湖，造成面源污染。其中初期雨水的污染程度尤为严重，往往含有大量有机物、重金属、病原体、油脂等污染物，污染程度与未经处理的城市污水相当[4]。此外，尽管新建城区的排水系统已实现雨污分流制，但部分老城区仍然存在雨污合流制，且短时间内难以改造。在暴雨事件

中,雨水若超出管网的承载能力,会出现合流制溢流现象,使污水混合雨水一同汇入城市地表水体,造成汛期突发性水质恶化[5]。

内源性污染在城市的河湖中也较为常见。河湖经过自然淤积产生底泥,吸附大量有机物、氮磷营养元素,以及重金属等污染物。当水体受到扰动或者水体化学环境发生改变时,底泥会将污染物释放到上层水体,造成二次污染[6]。部分城市水体受到自然淤积及人为干扰的影响,其流动性降低,形成缓流水体甚至死水,致使水体的自净能力大大降低,底泥沉积的污染物增加,容易形成缺氧或厌氧环境,严重破坏水生态环境[7][8]。

除城市共有的污染成因外,一些具有特殊生产方式或者独特水系结构的城市会形成独有的污染来源。如以武汉市[9]、大冶市[10]等城市为代表的工业城市受到工业废水影响较大,通常存在水体重金属超标的风险;以上海市[11]、佛山市[12]等城市为代表的沿海城市受到感潮现象的影响,不便于排出水体中的污染物,极易造成反复污染。但是,对于滨江城市较为普遍的复杂水系,其水污染成因的研究较少,这是因为水系复杂的连通关系加大了污染成因的分析难度。为探究城市复杂水系水污染的特征与成因,本文以武汉市东沙水系为研究对象,将水环境监测结果与水系连通关系、汇水区下垫面特点相结合,分析典型城市复杂水系水污染的影响因素。

2. 武汉东沙水系结构及水环境调查

2.1. 武汉东沙水系结构

武汉东沙水系(30°31'52"~30°39'54"N, 114°16'59"~114°25'15"E)位于武汉市中心城区,连接长江与东湖,其水系结构如图1所示。东沙水系主要包括3个湖泊(东湖、沙湖、杨春湖)以及5条河渠(楚河、沙湖港、罗家港、青山港和东湖港)。东沙水系主要通过三条路线实现与长江的水体交换:第一条为东湖经人工河楚河与沙湖连通,再通过新生路泵站排水入长江;第二条为东湖通过新沟渠、沙湖港、罗家港排水入长江,罗家港常年直排入长江,罗家路泵站在汛期抽水协排;第三条为泵站将长江水引入青山港,来自杨春湖的支流东杨港与青山港一同汇入东湖港,最终流入东湖。东沙水系分布有较多闸门、泵站,水体流通受到人为控制的影响较大,闸门和泵站通常在汛期开启,以促进城市排涝。东沙水系流域内分布着较多的商业区及住宅区,屋顶、硬质路面和道路等不透水面在下垫面中占比44.3%。

2.2. 武汉东沙水系水环境调查

武汉东沙水系承担着防洪排涝、生态需水、工业供水和景观用水的功能,但近年来水质状况恶化,引起社会的广泛关注。本研究在2019年4月至2020年1月进行8次采样,其中每个季节进行2次采样。采样点共34个,分布如图1所示。采集水样位于水面以下0.5 m深处,以避免表面不稳定因素的影响。

酸碱度(pH)和溶解氧(DO)采用EXO多参数水质检测仪现场测定。其他水质指标测定实验在武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室进行。总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)采用哈希预制试剂法检测。其中,TP和TN的测量需要消解,使用哈希DB200消解反应器,各指标的检测使用哈希DR3900多参数比色计。铜(Cu)、硒(Se)、铅(Pb)的测定采用《水质65种元素的测定电感耦合等离子质谱法》(HJ700-2014)。

3. 武汉东沙水系水污染变化规律及其成因分析

3.1. 武汉东沙水系水污染变化规律

本文采用单因子指数法进行水环境评价,评价标准参照《地表水环境质量标准》(GB38388-2002),评价指标包括pH、DO、TP、NH₃-N、Cu、Se、Pb,其中东湖、沙湖的评价指标按照湖泊标准执行,其余按照河渠标准执行,逐季水环境评价结果见图2。

结果表明,东沙水系的水污染较为严重,并且存在自春季到冬季恶化的趋势。所有采样点中,水质为劣V类的点位在春季、夏季、秋季和冬季的占比分别为11.8%,32.4%,32.4%和41.2%。各分区的污染状况及其时

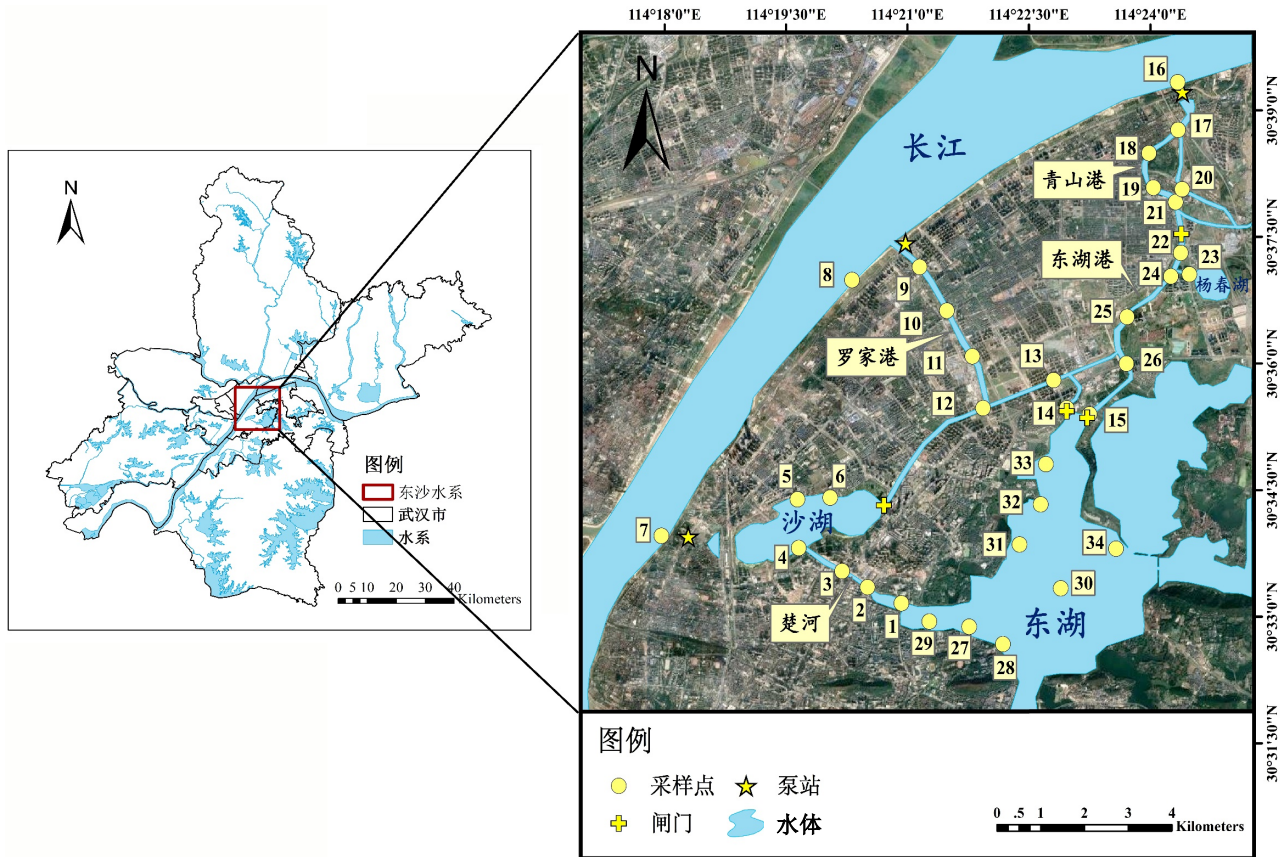


Figure 1. Structure of Dongsha water network and the distribution of sampling sites

图 1. 武汉东沙水系结构及采样点分布

空分布模式各不相同。东湖在春季和冬季为 IV 类水质，而夏秋为 V 类水。沙湖的水质在夏季和冬季处于劣 V 类，未达到景观用水的 V 类水质要求。城市河渠的污染情况更为严重，罗家港作为城市市政废水的尾水排放渠道，水质始终处于劣 V 类；楚河的水质自夏季变差，由 II 类水质恶化至劣 V 类；东湖港同样存在水质恶化的趋势，在秋冬季节达到劣 V 类；长江穿过武汉城区，部分河段是城市饮用水水源保护区，水质保护措施完善，且长江流量较大，更新速度快，所以水质属于较好的 II 类、III 类；青山港因工厂生产需要自长江引水，故水质与长江接近，保持较好的 III 类水质。

如图 3 所示，参与水质评价的 7 项水质指标中，pH 值和重金属几乎都满足 I 类水质标准，而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 DO 超标较严重。在所有采样点位中， $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 DO 的劣 V 类水质占比分别为 24.4%、17.3% 和 10.5%，TP 的 IV 类及更差的水质占比 52.03%。图 4 给出了主要污染物的时空分布情况，综合来看，青山港与长江的各项指标都较为接近，保持较好的水质状态，说明与长江的水系连通对改善水质具有较好的作用。DO 是反映水生生态健康的重要指标，罗家港和楚河的 DO 含量较低，尤其是夏季，可能是由于水体有机污染严重，分解消耗氧气所致[13]。罗家港全年的 TP 含量都超出 V 类水质标准，东湖港和楚河的冬季以及沙湖夏季的 TP 显著升高。东湖港和楚河的秋冬两季以及罗家港全年的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较高，超出 V 类标准。TN 虽然没有参与到本次水环境评价中，但也是一个能够反映污染状况的重要水质指标[14]。沙湖和东湖的 TN 含量大都超过了 V 类水质标准，劣 V 类点位占比分别为 100% 和 80.6%。罗家港、楚河等河道的 TN 含量更是远超湖泊含量。总体来看，除长江与青山港的水质较好，东沙水系的其他河湖都存在一定程度的污染问题，罗家港、东湖港与楚河的污染尤为严重。

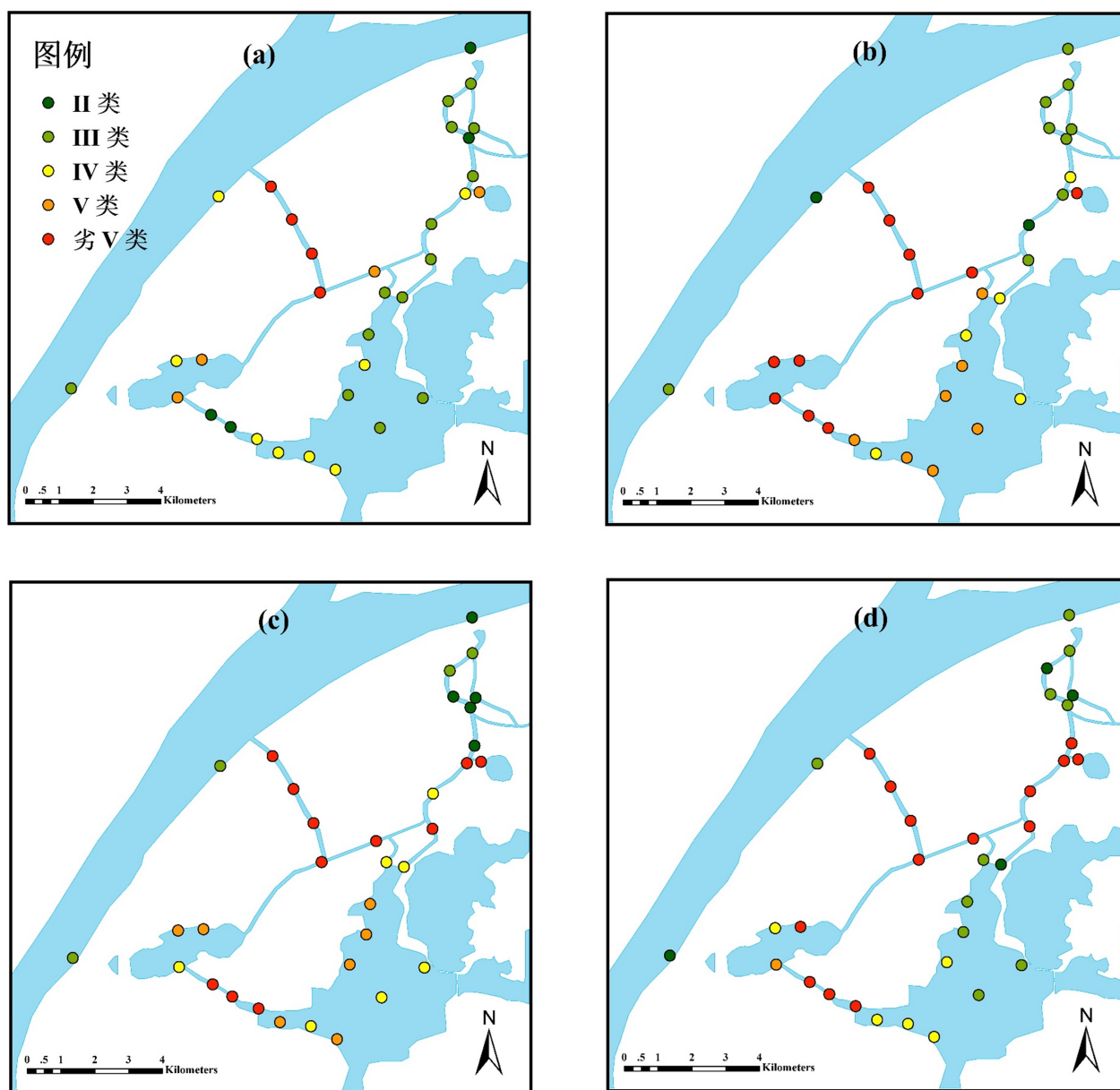


Figure 2. Distributions of water environment assessment results in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter

图2. (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季以及(d) 冬季的水环境评价结果分布图

3.2. 武汉东沙水系水环境主要影响因素

综合水环境评价结果与汇水区实际情况，可以看出东沙水系的水环境与众多城市水体存在着许多共性特征及相似的影响因素。大多城市河湖都存在较高浓度的 TP、TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以及较低浓度的 DO，这主要来源于城市生活污水和工业废水的排放[15][16][17]。罗家港是城市污水的尾水排放渠道，汇水区人口密度高，城市生活污水和内源污染是导致其全年水质较差的主要原因。楚河是联系东湖与沙湖的人工河渠，周边是密集的居民区和商业区，水质受到居民生活污水和商业污水排放及垃圾入河等因素的影响。楚河的水污染呈现春夏较轻、秋冬季节较重的规律，这可能是由于春夏季节降雨量增加，楚河与东湖、沙湖的水力循环加强，而秋冬季节水系连通减弱、水环境容量下降。东湖港的部分点位污染物含量在冬季显著升高，可能是周边建筑工地废水排放的

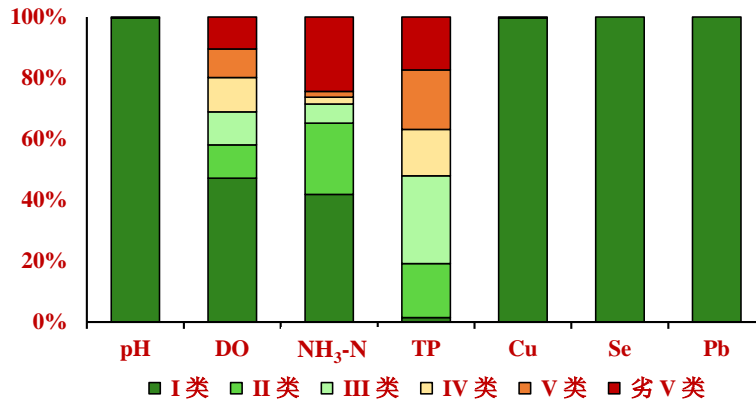


Figure 3. Proportions of assessment classes of each parameter
图 3. 各指标评价等级占比

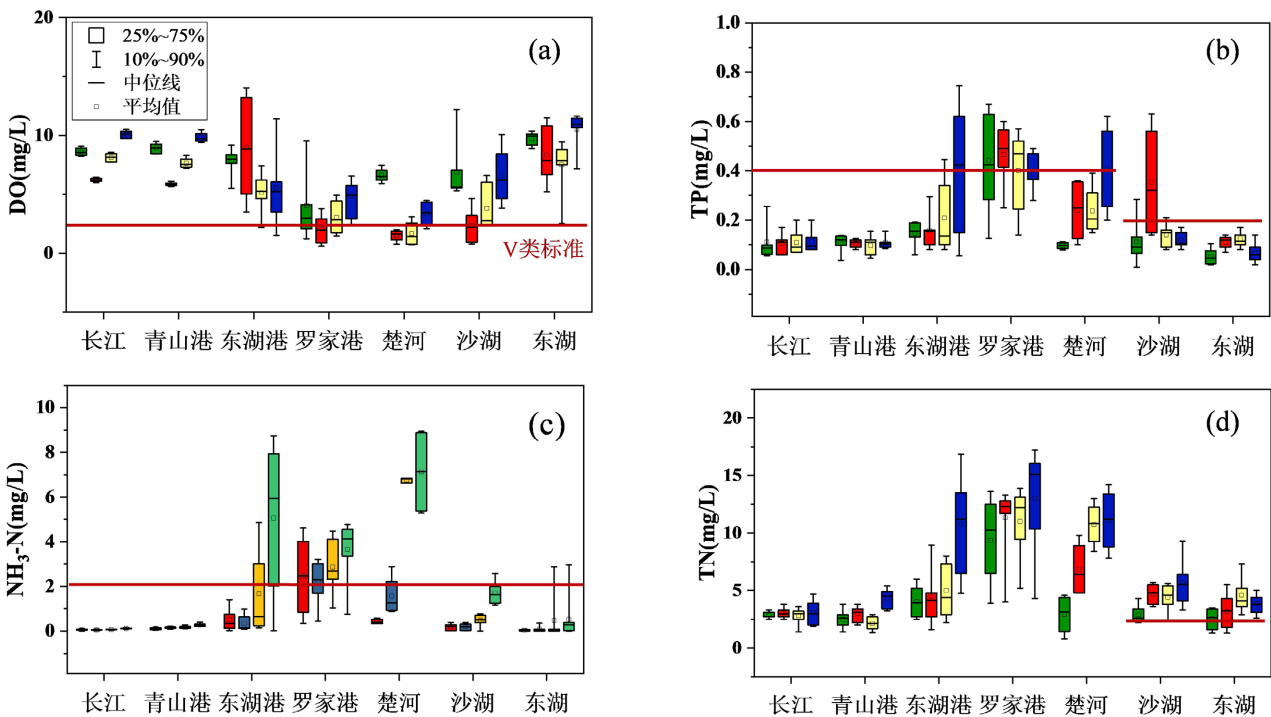


Figure 4. Box plots of main pollutants ((a) DO, (b) TP, (c) NH₃-N and (d) TN))
图 4. 主要污染物((a) DO、(b) TP、(c) NH₃-N、(d) TN)的箱线图

影响。沙湖和东湖的水质在夏季变差,可能与面源污染及底泥内源释放有关[18]。由于东湖和沙湖位于城市中心,汇水区下垫面多为建筑、硬质路面、道路等不透水面,暴雨发生时易形成严重的面源污染,并且产生合流制溢流现象,进而造成湖泊水质恶化。青山港是从长江引水的工业用水河渠,未受到显著污染。总之,东沙水系的水质状况受到点源污染、面源污染以及内源污染的共同影响,其中生活污水的影响最大,在旱季尤为突出。

作为典型的城市复杂水网,东沙水系的污染模式也受到水网连通的显著影响。青山港和东湖港的污染程度在春季和夏季较轻,可能是受到长江引水的影响。而秋冬季节青山港与东湖港之间的闸门关闭,切断了二者的连通,东湖港的水质因接收较多的支流污染而恶化。东湖港的入湖口处与东湖水质差别较大,也是受到此处闸门关闭的影响,故秋冬两季东湖港的污染未能进入东湖。东湖与罗家港通过溢流堰连接,但相较于东湖,罗家港的污染程度更为严重,说明东湖流入罗家港的水量较小,未能对污染物产生明显的稀释作用。东沙水系虽然

实施了长江引水工程，但由于闸坝的控制未能实现东沙水系的完全流通，引入东湖的水量过小，对东湖水质的改善作用较小。可见，城市复杂水网的污染迁移过程受到自然水网连通以及人为闸坝调控的双重影响，水污染能否明显改善取决于引入水源的污染状况和引入的水量。在连通条件下，足量的清洁水源输入可以在一定范围内优化水质，而水质较差的水源携带的污染物超出下游水体的自净能力时，会造成污染范围进一步扩大。非连通条件可能会影响水体循环对水质的净化作用，但有时也可阻止污染物进入水体。因此，城市复杂水网的人为调控要依据具体的水质情况和水网结构对连通条件进行灵活调整，从而有效控制水污染。

4. 武汉东沙水系水环境治理措施

武汉市的水环境存在如下问题：水污染来源复杂、水质污染严重、合流制溢流现象严重、河道淤积、水生态脆弱。武汉市政府颁布了多项条例进行法规制度保障，并实施了多项工程举措以整治水体污染[19]。武汉市在东沙水系实施的治理举措主要包括以下四个方面：一、建立多个污水处理厂和污水处理设施，提高污水处理效率。二、控源截污，在东湖、沙湖禁止渔业养殖，限制燃油船只通行。三、进行河道生态改造，整治河湖岸线。四、推进大东湖生态水网连通工程，修复生态水网，促进水量交换。在一系列治理举措下，东沙水系的黑臭水体消失，部分水体如青山港、东湖、楚河已经有了较明显的水质提升，但水环境状况仍不稳定，生态系统还较为脆弱[20]。此外，生态水网的连通程度不高，在夏季对东湖港的水质有明显的改善作用，但对东湖水质的改善却不明显。总体而言，本次水环境调查的结果表明，东沙水系的水污染问题仍较为严重，水环境治理有待加强。

武汉市多年发展所累积的水环境污染已成为城市的“顽疾”，短期内难以修复。在东沙水系水环境治理的过程中，应因地制宜，对症下药，建立起水质改良的长效机制。在东沙水系的污染现状及原因剖析的基础上，提出如下治理建议：一、对污染严重的城市河道进行清淤疏浚，减少底泥的内源污染。二、加强源头控制，通过严格监管、改进污水处理技术以及加大环保宣传力度，削减生活污水及工业废水的污染排放量，提高居民环保意识，减少污染物入河。三、改造老旧的雨污管网，推进雨污分流建设，减少污水渗漏及合流制溢流。四、推进海绵城市建设，通过雨水花园、雨水桶、透水铺装等设施促进雨水下渗以及雨水储存，减少面源污染进入城市水体。五、优化生态水网引水调度方案，结合水系的连通情况和水质状况，制定符合现状的生态补水方案。在此基础上，对河道形态进行生态化改造，构建稳定的生态系统。总之，东沙水系的水环境治理需要多种举措并行，源头控制为主，水系连通为辅。政府、企业、人民应通力合作，积极承担责任，共同恢复健康的城市水生态环境。

5. 结论

本文在水环境调查的基础上，考虑了污染源、河湖水系结构、汇水区下垫面特征等多种影响因素，对武汉市东沙水系的水环境状况和水污染成因进行了较全面的分析。分析结果表明东沙水系与长江联系密切的河渠的水质状况较好，季节变化不显著；流经人口密度高的居住区和商业区的河渠水质较差，旱季污染更为严重。湖泊水质普遍优于河渠，东湖夏秋两季的水质差于春冬两季，沙湖的水污染情况更为严重，尤其是夏季。

通过将东沙水系水污染变化与汇水区下垫面特点相结合，分析发现导致东沙水系水污染的主要因素包括生活污水、面源污染、底泥释放和水系连通结构等。城市生产生活带来大量生活污水和面源污染，高密度居民区和商业区附近的河湖受到的影响尤为严重，其中生活污水影响的季节变化不显著，而面源污染的影响在汛期较为突出。其次，湖泊以及长期污染的河渠受到底泥污染物释放的影响较大，通常在夏季最为显著。此外，城市复杂水网的水系连通性对水污染分布特征有显著影响，当水系连通性增强时，水环境容量变大，会在一定程度上减轻水污染。若上游输入的水源水质较好，会产生较强的稀释作用，达到较好的净化下游水质的效果；若上游输入的污染物超出下游水体的自净能力，则会扩大污染范围。基于此，对东沙水系的水环境治理提出合理建议，应以源头控制为主，水系连通为辅，制定调水方案时必须综合考虑水系结构与水质状况，建立起水环境治

理的长效机制。

本文基于水质采样分析,并结合河湖水系结构、汇水区下垫面特征等因素,对武汉市东沙水系的水污染成因进行了较全面的研究,可为武汉市东沙水系水环境治理提供科学依据。在今后的研究中,可进一步结合稳定同位素等技术,开展河湖水量交换和污染物溯源的深入分析,并建立东沙水系的水动力水质模型,为科学制定水环境治理方案提供决策依据。

基金项目

国家自然科学基金重大项目(41890823);中国科学院 A 类战略性先导科技专项(No. XDA23040304);湖北省技术创新专项重大项目(No. 2019ACA154)。

参考文献

- [1] 厉帅,周凌,郝新宇. 海绵城市规划中不同类型城市水环境整治策略[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 31-36.
LI Shuai, ZHOU Ling, and HAO Xinyu. Water environment renovation strategies of different types of cities in sponge city planning. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(12): 31-36. (in Chinese)
- [2] 许秋瑾,赖承钺,丁瑶,等. 成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 1-17.
<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202103156>
XU Qiujin, LAI Chengyue, DING Yao, et al. Natural water chemistry change in the surface water of Chengdu and impact factors. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 1-17. (in Chinese) <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202103156>
- [3] KUHLEMANN, L., TETZLAFF, D., and SOULSBY, C. Urban water systems under climate stress: An isotopic perspective from Berlin, Germany. *Hydrological Processes*, 2020, 34(18): 3758-3776. <https://doi.org/10.1002/hyp.13850>
- [4] 吴伟勇,许高金,王旭航,等. 芜湖中心城区初期雨水径流面源污染特征研究[J]. 人民长江, 2020, 51(S1): 27-29.
WU Weiyong, XU Gaojin, WANG Xuhang, et al. Characteristics of urban non-point source pollution from initial rainwater runoff in downtown of Wuhu. *Yangtze River*, 2020, 51(S1): 27-29. (in Chinese)
- [5] 赵杨,车伍,杨正. 中国城市合流制及相关排水系统的主要特征分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 18-28.
ZHAO Yang, CHE Wu, and YANG Zheng. Analysis of characteristics of China urban combined sewer system and related other sewer system in China. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(14): 18-28. (in Chinese)
- [6] 朱亮,蔡金榜,陈艳. 城市缓流水体污染成因分析及维护对策[J]. 水科学进展, 2002(3): 383-388.
ZHU Liang, CAI Jinbang, and CHEN Yan. Analysis on polluted causes and their maintainable strategies of municipal slow-flow water bodies. *Advances in Water Science*, 2002(3): 383-388. (in Chinese)
- [7] 严以新,蒋小欣,阮晓红,等. 平原河网区城市水污染特征及控制对策研究[J]. 水资源保护, 2008(5): 1-3+29.
YAN Yixin, JIANG Xiaoxin, RUAN Xiaohong, et al. Water pollution characteristics and control measures in cities of plain river network area. *Water Resources Protection*, 2008(5): 1-3+29. (in Chinese)
- [8] 汤钟,张亮,俞露,等. 深圳福田区水环境综合治理方案探索与实践[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 7-12.
TANG Zhong, ZHANG Liang, YU Lu, et al. Exploration and practice of comprehensive treatment scheme of water environment in Futian District of Shenzhen. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(18): 7-12. (in Chinese)
- [9] RAO, K., TANG, T., ZHANG, X., et al. Spatial-temporal dynamics, ecological risk assessment, source identification and interactions with internal nutrients release of heavy metals in surface sediments from a large Chinese shallow lake. *Chemosphere*, 2021, 282: 131041. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131041>
- [10] 毛欣,陈旭,李长安,等. 大冶市城市湖泊表层水体中重金属的分布特征及其来源[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(5): 33-37+84.
MAO Xin, CHEN Xu, LI Chang'an, et al. Distribution of heavy metal elements in surface water from three lakes in Daye City. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 20(5): 33-37+84. (in Chinese)
- [11] 朱红伟,尚晓,赵天彪. 感潮河段污染底泥疏浚扰动对水质影响研究[J]. 人民长江, 2013, 44(21): 108-111+116.
ZHU Hongwei, SHANG Xiao, and ZHAO Tianbiao. Research on influence of dredging-caused bottom mud disturbance on water quality in tidal reach. *Yangtze River*, 2013, 44(21): 108-111+116. (in Chinese)
- [12] 吴青梅,罗慧东,孙国萍,等. 典型感潮内河涌水质污染特征调查研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2210-2216.
WU Qingmei, LUO Huidong, SUN Guoping, et al. Investigation on polluted water quality of the typical tidal urban river. *Journal of Environmental Science*, 2011, 31(10): 2210-2216. (in Chinese)
- [13] KIRCHNER, J. W., FENG, X., and NEAL, C. Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments. *Nature*, 2000, 403(6769): 524-527. <https://doi.org/10.1038/35000537>

- [14] ZHANG, X., WU, Y., and GU, B. Urban rivers as hotspots of regional nitrogen pollution. *Environmental Pollution*, 2015, 205: 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.05.031>
- [15] PETERS, M., GUO, Q., STRAUSS, H., et al. Contamination patterns in river water from rural Beijing: A hydro-chemical and multiple stable isotope study. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 226-236. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.423>
- [16] 张万顺, 张紫倩, 彭虹, 等. 粤港澳大湾区典型城市河湖水质变化规律研究——以金山湖流域为例[J/OL]. *水资源保护*, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210316.1109.002.html>
ZHANG Wanshun, ZHANG Ziqian, PENG Hong, et al. Study on water quality variations of typical urban rivers and lakes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: A case study of Jinshan Lake Basin. *Water Resources Protection*, 1-10. (in Chinese) <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210316.1109.002.html>
- [17] 徐袞檬, 潘兴瑶, 苏遥, 等. 北方典型城市地区水质评价及污染源分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(3): 78-84.
XU Jiameng, PAN Xingyao, SU Yao, et al. Water quality assessment and pollution source analysis of typical urban areas in northern China. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(3): 78-84. (in Chinese)
- [18] YI, Q., CHEN, Q., SHI, W., et al. Sieved transport and redistribution of bioavailable phosphorus from watershed with complex river network to lake. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(18): 10379. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02710>
- [19] 马亚斌. 政府主导下的武汉市水环境综合治理对策研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2014.
MA Yabin. Research on countermeasure of government-led water environment comprehensive treatment in Wuhan. Master's Thesis, Wuhan: Hubei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [20] 徐灿, 赵潜宜. 武汉市水环境治理实践与探索[J]. *长江技术经济*, 2021, 5(1): 20-24.
XU Can, ZHAO Qianyi. Practice and exploration of urban water environment management in Wuhan. *Technology and Economy of Changjiang*, 2021, 5(1): 20-24. (in Chinese)