

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.086

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



新冠肺炎疫情对医院污水防控体系建设的影响及启示

熊兆锟^{1,4}, 刘文^{2,4}, 曹剑钊^{3,4}, 刘杨^{1,4}, 张恒^{1,4}, 江燕妮^{1,4}, 杨冀峰⁴, 赖波^{1,4}

(1. 四川大学 建筑与环境学院; 中德水环境与健康研究中心, 成都 610065; 2. 北京大学 环境科学与工程学院 水沙教育部重点实验室; 环境工程系; 北京市新型污水深度处理工程技术研究中心, 北京, 100871; 3. 北京大学第三医院 基建处, 北京 100871; 4. 中国医学装备协会 医院建筑与装备 分会医院水系统研究中心, 成都 610065)

摘要: 医院污水来源及成分复杂, 含有病原性微生物、药物及其代谢产物、抗性基因、重金属和造影剂等, 不经有效处理将成为一条疫病扩散的重要途径和严重的环境污染源。药物等新兴污染物在全球范围内的出现, 成为水环境和水污染控制的热点研究内容, 而医院污水又是新兴污染物重要来源之一。基于目前新冠肺炎疫情特殊时期对医疗系统防控体系的影响, 阐述了医院污水中药物和病原微生物的分布情况, 概括了医院污水处理技术的进展及问题, 提出了医院污水处理技术的未来发展方向。在新冠肺炎疫情的特殊情况下, 医院污水防控体系的建设需要更高的要求 and 标准。其中, 药物降解与病原微生物同步杀灭将是未来医院污水处理技术及装备开发的“热土”。

关键词: 医院污水; 药物; 病原微生物; 防控体系; 同步消毒降解

中图分类号: TU703.1 **文献标志码:** R **文章编号:** 2096-6717(2020)06-0134-09

The influence and inspiration of COVID-19 epidemic on the construction of hospital sewage prevention and control system

Xiong Zhaokun^{1,4}, Liu Wen^{2,4}, Cao Jianzhao^{3,4}, Liu Yang^{1,4},
Zhang Heng^{1,4}, Jiang Yanni^{1,4}, Yang Jifeng⁴, Lai Bo^{1,4}

(1. College of Architecture & Environment; Sino-German Centre for Water and Health Research, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China; 2. The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering; Department of Environmental Engineering; Beijing Engineering Research Center for Advanced Wastewater Treatment, Peking University, Beijing 100871, P. R. China; 3. Department of Infrastructure Construction, Peking University Third Hospital, Beijing 100871, P. R. China; 4. Research Center of Hospital Water System, Chapter of Hospital Building and Equipment, China Association of Medical Equipment, Chengdu 610065, P. R. China)

Abstract: The sources and components of hospital sewage are complex, including pathogenic microorganisms, drugs, metabolites, antibiotic resistant genes, heavy metals, contrast agents, etc. It will become an important way of epidemic spread and a serious source of environmental pollution without

收稿日期: 2020-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51878423)

作者简介: 熊兆锟(1990-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事水污染控制技术研究, E-mail: scuxzk@scu.edu.cn.

赖波(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: laibo@scu.edu.cn.

Received: 2020-05-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51878423)

Author brief: Xiong Zhaokun (1990-), PhD, associate researcher, master tutor, main research interest: water pollution control technology, E-mail: scuxzk@scu.edu.cn.

Lai Bo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: laibo@scu.edu.cn.

effective treatment. Moreover, the emerging contaminants, such as drugs, have become a hotspot in water environment and water pollution control, and the hospital sewage is one of important sources of these contaminants. Based on the impact of COVID-19 on the prevention and control system of the medical system during the current epidemic period, this review illustrated the distribution of drugs and pathogenic microorganisms in hospital sewage, summarized the progress and problems of domestic and foreign hospital sewage treatment technology, and also proposed the future development direction of hospital sewage treatment technology. More importantly, under the special circumstances of COVID-19 epidemic, higher requirements and standards are needed for the construction of hospital sewage control system. Specifically, the simultaneous degradation of drugs and disinfection of pathogenic microorganisms may be the "hotspot" for the development of hospital sewage treatment technology and equipment in the future.

Keywords: hospital sewage; drugs; pathogenic microorganisms; prevention and control system; simultaneous disinfection and degradation

医院污水来源及成分复杂,含有病原性微生物、药物及其代谢产物、抗性基因、重金属和造影剂等^[1-6],不经有效处理将成为一条疫病扩散的重要途径和严重的环境污染源。尤其是在“非典”(SARS)和“新型冠状病毒”(COVID-19)疫情爆发的特殊时期,病原微生物通过污水途径传染(即粪口传播)带来的危害会远超正常时期,同时,超常的药物及其代谢产物会给水环境带来超常的污染和危害,存在严重的病原微生物传染和二次污染风险,严重危害生态环境和人类健康。因此,医院污水中的典型药物和病原微生物的同步消毒降解深度处理极其重要。

2003年SARS爆发,国家环保总局组织编制了《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466—2005);而为应对新冠肺炎疫情,生态环境部于2020年2月1日印发《关于做好新型冠状病毒感染的肺炎疫情医院污水和城镇污水监管工作的通知》,均强调医院污水深度处理和消毒的重要性^[7-8]。2008—2013年瑞士与德国、法国、荷兰、英国、苏格兰、卢森堡等合作对医院污水和制药废水为代表的药物污染情况和处理进行研究,并制定 Pharmaceutical Input and Elimination from Local Sources(PILLS)项目,重点关注医药和医院污水中的药物来源及处理的研究和应用^[6, 9-11]。同时,美国、日本、澳大利亚等发达国家在医院污水中药物残留、耐药病原微生物以及导致环境风险和人类健康风险方面做了大量研究^[12-14]。然而中国的研究主要集中在市政污水、养殖污水和环境水体中典型药物(如抗生素)的迁移转化和模型污染物去除技术上^[15-17],缺少关于医院污水中典型药物和病原微生物的同步消毒降解深度处理技术的研究。在新冠肺炎疫情的特殊情况下,对医院污水

防控体系的建设提出了更高的要求 and 标准。因此,需要对目前医院污水的组成和分布进行分析,总结现有处理技术及其存在的问题,提出医院污水处理技术的未来发展方向。

1 药物和病原微生物的来源和去向

如图1所示,制药厂生产的药物主要包括人用和兽用药物,通过人和动物的代谢后进入环境水体,带来一系列的潜在生态环境风险^[18]。其中,人用药物很大一部分是通过医院污水的形式进入环境水体,具体途径包括:1)医院污水进入市政管网后通过渗漏直接进入环境水体;2)污水处理厂(WWTPs)传统的生物处理技术很难完全分解污水中的某些药物类污染物,尤其是痕量级别的活性药物,导致其随污水处理厂出水进入环境水体。有研究表明医院污水对全社会药物等新兴污染物的贡献高达15%~38%^[19]。



图1 药物类污染物的来源和去向^[18]

Fig. 1 Sources and destinations of pharmaceutical contaminants^[18]

近年来,新兴污染物在中国的关注程度日益增加,各水系、流域中新兴污染物检出的报道层出不穷。最新调查研究显示,长三角地区约40%孕妇尿液中检出抗生素,近80%儿童尿液中检出兽用抗生素,部分检出抗生素已在临床中禁用,有可能严重损害人体免疫力^[20]。国家环境分析测试中心对北京4

家医院污水中不同种类和浓度的抗生素药物残留进行了测试,建立了针对我国较为常见、消耗量较大的 12 种磺胺、4 种喹诺酮、3 种四环素以及罗红霉素和甲氧苄氨嘧啶等 21 种抗生素的分析方法。这 21 种抗生素在医院尾水中均有检出,质量浓度分别为 5.9~11.9 $\mu\text{g/L}$,明显高于中国河水和海水中的浓度水平^[21]。

医院污水水质受其规模大小、医院类型、住院部、门诊部等影响,不同医院的污水水质指标可能存在较大差异。医院污水综合水质类似生活污水,但成分比生活污水更复杂(通常含有重金属、有机溶剂、消毒剂、放射性同位素等)。因医院人均排水量较大,其生化需氧量(BOD)和化学需氧量(COD)指标一般低于城市生活污水,粪大肠菌含量与生活污水相近。传染病医院污水中的病原性微生物比综合性医院种类更多,数量更高。

医院污水不仅仅带来药物类污染物的环境风险,同时也是病原微生物主要风险来源,尤其是在疫情爆发的特殊时期,传染病医疗的病原微生物通过污水途径传染(即粪口传播)带来的危害会远超正常时期。一般情况下,医院污水按组成可分为 4 类:1) 传染病菌污水。医疗废水中的病原微生物主要有:病原性细菌、肠道病毒、蠕虫卵和原虫 4 类;2) 一般带菌污水。主要是医疗器械的洗涤污水及肠道病菌污水;3) 放射性废水。该类废水含有因医用途而产生的放射性元素;4) 普通生活污水,含医院厨房、职工厕所和盥洗废水等,此类废水中包含的特殊污染物有药物、消毒剂、诊断用剂、洗涤剂、纳米颗粒及放射性物质等。将未经处理的污水浇灌于生食蔬菜上,会引起伤寒、霍乱、蛔虫病、阿米巴痢疾、细菌性痢疾。

此外,医院污水中常被忽视的污染物是用于 X 射线观察的碘制造影剂。如图 2 所示,医院污水中的主要成分是造影剂,包括碘普罗胺、碘美普尔和碘必乐等,其浓度达到了医院污水出水污染物的 98.677%,其余成分主要为药物类污染物,占比较大的包括止痛/消炎药物、抗生素和酶抑制剂等^[18]。

碘化物造影剂具有很强极性,在水溶液中稳定性强,是污水中可吸附有机卤素(AOX)的主要来源,AOX 在天然水体中很难被降解。有研究表明,去除水中的碘化物造影剂主要有生物降解法和高级氧化技术法,处理污水中的痕量碘化物造影依然还

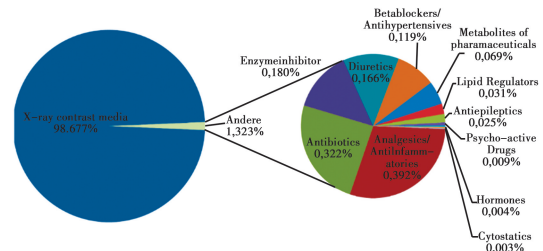


图 2 医院污水中污染物种类及比例^[18]

Fig. 2 Types and proportions of pollutants in hospital wastewater^[18]

有很大的研究空间^[22]。在污水处理过程中,碘化物造影剂易与消毒剂产生副产物,如碘代三卤甲烷(iodo-THM)和碘消毒副产物(iodo-DBPs),这两类副产物对哺乳动物具有很高的遗传毒性和细胞毒性^[23]。其中,医院用量最多的碘普罗胺和碘美普尔等造影剂通过高级氧化技术处理后亦难得到有效降解,其降解中间产物极其复杂。如图 3 所示,钴活化过一硫酸盐(Co/PMS)系统对碘美普尔的降解主要通过脱碘、脱氢反应、酰胺水解、氨基氧化、羟基取代、烷基芳香族酰胺转化为芳香族氨基甲酰、脱水、氧化伯醇生成羧酸盐等 8 个途径^[24]。由此可见,在医院治疗活动中使用量较大的造影剂是医院污水中的主要成分,而且造影剂结构非常稳定,属于难降解有机污染物,在一般的医院污水处理系统中基本无法去除。因此,亟需开发高效的选择性吸附或降解技术对医院污水中含量最高的造影剂类污染物进行有效处理。

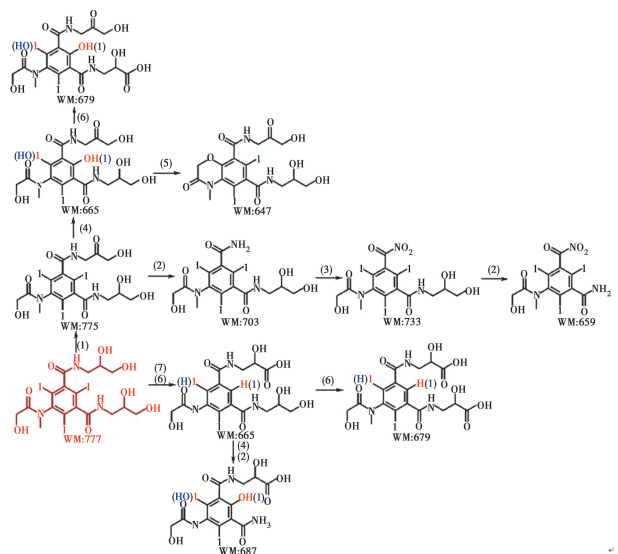


图 3 Co/PMS 系统降解碘美普尔的可能路径图^[24]

Fig. 3 Proposed iomeprol transformation pathways in the Co/PMS system^[24]

2 其他国家医院污水处理技术的进展及问题

发达国家对医院污水的深度处理技术和工艺已有广泛研究。如图4所示, Kovalova 等对瑞士Baden镇医院(346个床位,水量为240 m³/d)进行水质分析和连续一年的中试处理研究^[25]。从该医院污水中定性定量分析到56种药物、10种代谢产物和2种防腐剂,其中,抗生素环丙沙星浓度高达32 μg/L(比市政污水中的浓度高约70倍),X射线造影剂的浓度高达约2 600 μg/L(比市政污水中的浓度高数百倍),造影剂含量达到污水中污染物总量的约80%。中试研究采用膜生物反应器(MBR)工艺(平板膜、污泥浓度2 g/L,泥龄30~50 d,DO为1~5 mg/L),经过连续一年的运行和研究,发现污水中仅有16种药物的去除率达到80%,并且总药物和代谢产物的去除率仅为22%。即传统的生物法对医院污水的药物类污染物降解能力非常有限,研究发现MBR出水中95%的污染物为碘化物造影剂。在此基础上对比研究了O₃、O₃/H₂O₂、PAC、UV/TiO₂等技术对MBR出水的深度处理效果。增加后续臭氧化深度处理,医院污水中药物和代谢物的去除能够达到90%以上,但其对造影剂的深度处理效率仍然较差(去除效率仅能达到约60%)^[26]。因此,迫切需要开发经济高效的医院污水深度处理技术,如以强氧化性自由基攻击为核心的高级氧化技术(类芬顿技术、催化臭氧技术等)。

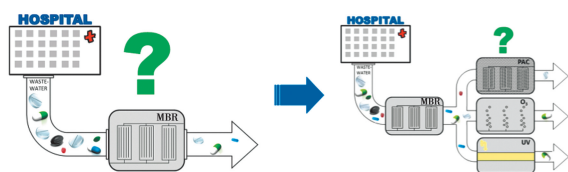


图4 瑞士Baden镇医院污水处理工艺与概况

Fig. 4 Treatment technology and overview of hospital sewage in Baden town hospital, Switzerland

在PILLS项目的背景下,2011年7月建成的德国玛丽安医院污水处理厂(医院有1 200名职工,每年病人约7.5万人,污水量约200 m³/d)是欧洲第一个重点关注医院污水中微污染物去除的污水处理厂(图5)。采用了“膜生物反应器+催化臭氧+粉末活性炭吸附”(MBR+O₃+PAC)的组合处理工艺,其中,催化臭氧和粉末活性炭是作为物理化学深度处理单元,重点深度去除污水中的药物类污染

物^[18, 27]。该工程项目的实施,对于去除医院污水中的药物类污染物具有重要意义和推广价值。



图5 德国玛丽安医院污水处理厂

Fig. 5 Maryam hospital sewage treatment plant in Germany

虽然,欧洲在医院污水中药物类污染物深度处理方面做了大量工作,但并未重点关注医院污水中病原微生物的有效消杀处理。尤其遇到重大疫情特殊时期,杀灭医院污水中的病原微生物是首要任务,防止病原微生物通过污水途径传染(即粪口传播)能够有效地控制疫情的发展速度。因此,开发医院污水中典型药物和病原微生物同步消毒降解深度处理技术是未来研究的一个重要方向。

3 中国医院污水处理技术的进展及问题

长期以来,医院污水处理一直是中国水污染防治工作的薄弱环节,处理水平整体较低。但中国也在医院污水处理方面逐步进行了新的尝试,如针对传染病通过污水传播已经建立了三级防护体系:1)病房内病人的排泄物进行消毒处理后,再与其他废物一起,进入医院危险废物处理体系;2)在各级医院,特别是传染病医院均建立了医院污水处理系统;3)医院污水由城市下水道进入城市污水处理厂,城市污水处理厂根据标准均设置了不同类型的消毒设施^[28]。根据《医院污水处理工程技术规范》(HJ 2029—2013)的设计要求,医院污水处理设施根据传染病医院和非传染病医院污水性质的不同可分为两类工艺流程(如图6所示)^[29]。一般常规的工艺流程包括格栅、调节池、水解池、生化反应处理池、二沉池和消毒池等。但随着目前对出水水质要求的不断提高,特别是针对医院污水中药物残留、耐药病原微生物等的同步去除需求,后端的深度处理工艺显得尤为重要。开发具备同步降解药物类污染物和杀灭病原微生物的深度处理技术和装备能够满足出水水质要求不断提高的需求,特别是以高级氧化为基础

的深度处理技术,是未来医院污水处理科研工作研究的重点方向。

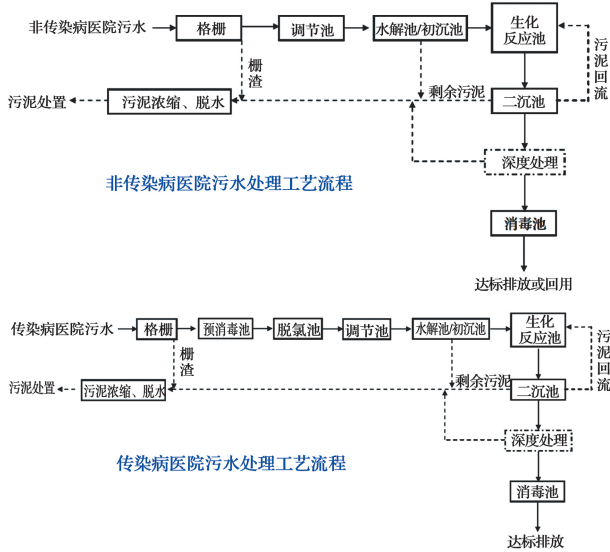


图 6 《医院污水处理工程技术规范》(HJ 2029—2013)中规定的污水处理工艺流程

Fig. 6 The sewage treatment process as stipulated in Technical specifications for hospital sewage treatment projects (HJ 2029-2013)

医院污水处理系统中最重要的工艺是消毒池。在处理医院污水中比较常用的消毒技术主要包括氯制剂消毒、臭氧消毒和紫外消毒 3 种,3 种方式各有利弊(如表 1 所示)^[30]。目前,在废水消毒领域应用得最多的消毒方式仍然是氯制剂消毒,主要采用的氯制剂为液氯、二氧化氯和次氯酸钠 3 种。以消毒效果最佳为目标,可以按以下顺序确定消毒方式:臭氧消毒>二氧化氯消毒>液氯消毒>次氯酸盐消毒。如以时间进度和操作方便为目标,则可以按以下顺序确定消毒方式:次氯酸钠消毒>液氯消毒>二氧化氯消毒>臭氧消毒^[31]。但近年来由于消毒耐受菌的出现,以及上述消毒工艺对原虫类致病微生物杀灭效果欠佳,逐渐开发出了一系列组合式消毒工艺用于医院污水的消毒。目前,研究较多的主要包括超声-紫外联合消毒技术、超声-臭氧联合消毒技术和紫外-过硫酸盐联合消毒技术。其中,由于紫外-过硫酸盐联合消毒技术能够产生具有强氧化性的羟基自由基和硫酸根自由基^[32],在杀灭病原微生物方面有着良好的发展前途。当过硫酸盐与紫外连用时,可以对致病菌孢子实现高效灭活。此外,异相催化剂的使用也能提高过硫酸盐同步杀菌和去除污染物的能力^[33-36]。

表 1 医院污水常用消毒工艺

Table 1 Hospital sewage disinfection process

消毒剂	消毒效果	优点	缺点	适用条件
液氯	能够有效杀灭细菌,但是杀灭病毒效果较差	具有持续消毒作用,工艺简单,技术成熟,操作简单	产生三致氯化物,处理出水有氯味,氯气腐蚀性强	远离人口聚居区的规模较大的医院污水处理系统
次氯酸钠	能够有效杀灭细菌,但是杀灭病毒效果较差	无毒,运行管理无危险性	产生三致氯化物,使出水 pH 升高	规模小于 300 床的经济欠发达地区医院污水处理系统
二氧化氯	较 Cl ₂ 杀菌效果好	不产生有机氯化物,投加方便,不受 pH 影响	运行管理有一定的危险性,只能就地产生和使用,操作管理要求高	适用于各种规模医院污水的消毒处理,管理水平要求较高
臭氧	杀菌和杀灭病毒的效果都很好	有强氧化能力,接触时间短,不产生有机氯化物,不受 pH 影响	运行管理有一定的危险性,操作复杂,电能消耗大,基建投资大,运行成本高	传染病医院污水优先采用臭氧消毒,处理出水再生回用或排入水体对环境造成不良影响时应首选臭氧消毒
紫外线	效果好,但对悬浮物浓度要求	无有害残留物质,操作简单,运行管理和维修费用低	电耗大,对处理水的水质要求较高,无后续杀菌作用	特殊条件下可采用紫外消毒方式
过硫酸盐	氧化性强,杀菌和杀灭病毒效果较好	投加方式灵活,用量少,无残余,可结合紫外或催化剂提高消毒效果	成本高,出水 pH 降低	大型医院或对余氯要求较高的医院污水处理系统

此外,不同的消毒方式对医院污水中的细菌与病毒产生的效果也有所差别。液氯、二氧化氯、漂白粉、次氯酸钠等消毒剂较为常用,也有少数医院污水采用臭氧、紫外线等消毒方式。二氧化氯与病原体接触时,会先吸附在细胞壁上,再透过细胞壁,通过氧化还原反应使得胞内氨基酸分解而被破坏,使蛋白质变性,从而达到灭菌的目的。臭氧可以通过吸附在细菌壁表面,扩散到胞内,再通过氧化胞内物质

的方式达到杀菌的效果,因臭氧的氧化性仅次于氟气和羟基自由基,其消毒效果优于二氧化氯,对生命力较强的病原体(如病毒)有更好的灭活作用。革兰氏阳性菌较革兰氏阴性菌具有更厚而致密细胞壁,因此,当化学消毒剂通过细胞壁扩散作用灭菌时,革兰氏阳性菌具有更强的抵抗性,需要更大的剂量或者更长的时间。紫外线消毒与化学消毒的原理不同,主要是通过紫外光子产生的辐射达到杀菌效果。细菌的核酸物质对紫外波段有特别强的吸收,紫外光可以直接裂解细菌核酸,从而使细菌失活。

武汉火神山和雷神山医院作为疫情特殊时期专门收治确诊新冠病毒肺炎患者的定点医院,其废水处理设施和技术也具有更高要求,以充分保证出水水质达标和新冠病毒的杀灭。火神山和雷神山医院的污水处理工艺较为相似。以雷神山为例,雷神山医院污水来源复杂,含有活性药物、化学药剂(如造影剂等)、新冠病毒、细菌及常规有机污染物等。如图 7 所示,院区污水经专用管网收集后,需经过预消毒池、化粪池、提升泵站、调节池、移动床生物膜工艺消毒(MBBR)池、高效混凝沉淀池和折流消毒池 7 道严格的处理工序。其核心工序为折流消毒池,消毒工艺中除加大投药量外,还将停留时间从《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466—2005)中规定的 1.5 h 提升到 4.5~5 h,确保新冠病毒的高效灭活。再者,预消毒和折流消毒的两级强化消毒措施,也能保障新冠病毒和其他致病微生物的高效杀灭。此外,MBBR 池不同于传统的 MBR 工艺,该反应池通过向生化反应器中投加一定量的悬浮载体,可有效增加池中微生物(好氧、兼性好氧和厌氧菌)的生物量和种群丰度,从而提高反应器的处理效率,实现多种有机物和活性药物的有效去除。此外,火神山医院病区污水处理构筑物按两组并联设计。每组处理规模为 40 m³/h,两组并联设计处理水量为 80 m³/h,最高日污水处理量为 1 920 m³/d^[37]。武汉火神山和雷神山医院污水处理按照传染病医院的相关标准,要求出水达到《医疗机构水污染物排放标准》(GB 18466—2005)中传染病医院的相关规定,肠道致病菌、肠道病毒、结核杆菌等病原体不得检出,才能排入市政管网,污水处理过程中产生的污泥经浓缩脱水后由危废处理公司集中处理。

一般情况下,检测污水中的病原体有两种途径,一是直接检测,二是寻找水中病原体的指示微生物。

目前,常见的病原微生物的检测方法包括培养法、免疫法和分子生物法等。培养法最为常用,但比较费时费力,部分病原体难被培养或不能被培养是其弊端之一。免疫学法和分子生物法较培养法更高效,但免疫学法中使用的抗体容易受到环境中其他物质和微生物的限制,因而该方法的普适性有限。聚合酶链反应(PCR)及其衍生技术具有高度灵敏性、特异性和准确性等特点,已被广泛应用于水环境病原体的检测^[38]。

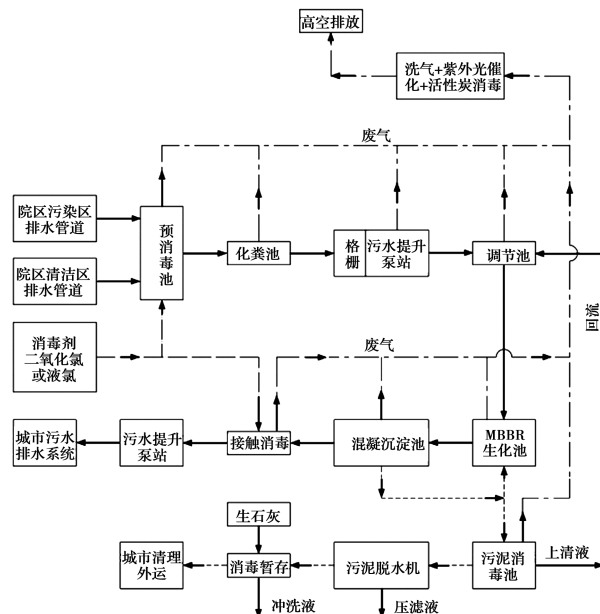


图 7 武汉火神山、雷神山医院污水处理工艺流程
Fig. 7 The sewage treatment process of Huoshenshan and Leishenshan Hospitals

4 医院污水处理技术的未来发展方向

现代社会医院作为药物最主要的消耗场所,通过医院污水向所在地市政管网释放药物类等新兴污染物的现象普遍存在。尽管现有医院污水排放标准中并未涉及药物类污染物排放指标,相信随着国家生态文明建设的进一步深化,在流域生态环境治理、城市水提标改造、新兴污染物防控等合力的驱动下,医院污水处理系统的升级,特别是针对抗生素等药物类新兴污染物的强化监管与控制势在必行。另外,在新冠肺炎疫情的特殊情况下,也对医院污水防控体系建设提出了更高的要求 and 标准,在未来医院污水防控体系建设方面需要重点考虑以下几个方面:

1) 针对目前医院污水成分复杂的现状,定性定

量分析医院污水中药物、化学药剂、病原微生物及抗性基因等污染物,评估污染物环境健康风险。

2) 针对目前单一消毒技术对病原微生物杀灭效果欠佳的问题,开发针对传染性病原微生物的新型消毒药剂和组合工艺技术,检测和评价病原微生物在水体中的耐久性和消毒灭活效果。

3) 特殊疫期污水中超常的病原微生物及其代谢 RNA 水平的监控及风险评估,并以高级氧化深度处理技术为基础,研发特殊疫期污水中超常的药物类污染物和病原微生物的同步强化去除技术及装备。

4) 以实际医院污水处理工程为目标,开发具备同步药物降解和病原微生物杀灭功能的医院污水处理工艺技术及集成装备,研发医院污水处理污泥的无害化处置技术及装备。在大部分医院无法提供污水处理设施改造或建造场地的情况下,一体化医院污水处理装备应具有集成度高、模块化强、场地适应性强、空间利用率高、安装运行简便等特点,且处理工艺能够满足出水达标排放。

5) 综合前期的各项研究基础,开发集水、泥、固、气一体化的全过程处理工艺技术,以保证医院污水处理处置各个环节可能造成的环境和健康风险最低,达到医院污水无害化处理的目标。

参考文献:

- [1] WIELENS BECKER R, IBÁÑEZ M, CUERVO LUMBAQUE E, et al. Investigation of pharmaceuticals and their metabolites in Brazilian hospital wastewater by LC-QTOF MS screening combined with a preliminary exposure and in silico risk assessment [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 699: 134218.
- [2] BUELOW E, RICO A, GASCHET M, et al. Hospital discharges in urban sanitation systems: Long-term monitoring of wastewater resistome and microbiota in relationship to their eco-exposome [J]. *Water Research X*, 2020, 7: 100045.
- [3] CAHILL N, O'CONNOR L, MAHON B, et al. Hospital effluent: A reservoir for carbapenemase-producing Enterobacterales [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 672: 618-624.
- [4] PÉREZ-ALVAREZ I, ISLAS-FLORES H, GÓMEZ-OLIVÁN L M, et al. Determination of metals and pharmaceutical compounds released in hospital wastewater from Toluca, Mexico, and evaluation of their toxic impact [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 330-341.
- [5] SZEKERES E, BARICZ A, CHIRIAC C M, et al. Abundance of antibiotics, antibiotic resistance genes and bacterial community composition in wastewater effluents from different Romanian hospitals [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 304-315.
- [6] HOCQUET D, MULLER A, BERTRAND X. What happens in hospitals does not stay in hospitals: antibiotic-resistant bacteria in hospital wastewater systems [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2016, 93 (4): 395-402.
- [7] 国家环境保护总局. 医疗机构水污染物排放标准: GB 18466—2005[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005. State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Discharge standards of water pollutants for medical organization GB 18466-2005 [S]. Beijing: China Environment Science Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 生态环境部办公厅. 关于做好新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗污水和城镇污水监管工作的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/02/content_5473898.htm, 2020-02-02. General Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on the supervision of medical sewage and urban sewage caused by novel coronavirus pneumonia [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/02/content_5473898.htm, 2020-02-02. (in Chinese)
- [9] SÖRENGÅRD M, CAMPOS-PEREIRA H, ULLBERG M, et al. Mass loads, source apportionment, and risk estimation of organic micropollutants from hospital and municipal wastewater in recipient catchments [J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 931-941.
- [10] DAOUK S, CHÈVRE N, VERNAZ N, et al. Dynamics of active pharmaceutical ingredients loads in a Swiss university hospital wastewaters and prediction of the related environmental risk for the aquatic ecosystems [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 547: 244-253.
- [11] SVEN L, HERMAN E, ENRICO B, et al., Pharmaceutical input and elimination from local sources [R]. Final Report of the European Cooperation Project PILLS, 2012.
- [12] AZUMA T, ARIMA N, TSUKADA A, et al. Detection of pharmaceuticals and phytochemicals

- together with their metabolites in hospital effluents in Japan, and their contribution to sewage treatment plant influents [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 548/549: 189-197.
- [13] KRISTELL C L, MOHAMMAD K, HELEN S, et al. Hospital wastewater [R]. *Urban Water Security Research Alliance Technical Report*, 2012.
- [14] CASTILLO MEZA L, PIOTROWSKI P, FARNAN J, et al. Detection and removal of biologically active organic micropollutants from hospital wastewater [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 700: 134469.
- [15] 陈姗, 许凡, 张玮, 等. 磺胺类抗生素污染现状及其环境行为的研究进展[J]. *环境化学*, 2019, 38(7): 1557-1569.
- CEHN S, XU F, ZHANG W, et al. Research progress in pollution situation and environmental behavior of Sulfonamides[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(7): 1557-1569.
- [16] 申立娜, 张璐璐, 秦珊, 等. 白洋淀喹诺酮类抗生素污染特征及其与环境因子相关性研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(11): 3888-3897.
- SHEN L N, ZHANG L L, QING S. The occurrence and distribution of quinolones (QNs) and correlation analysis between QNs and physical-chemical parameters in Baiyangdian Lake, North China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(11): 3888-3897.
- [17] ZHENG W L, WEN X H, ZHANG B, et al. Selective effect and elimination of antibiotics in membrane bioreactor of urban wastewater treatment plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 1293-1303.
- [18] NAFO I, LYKO S. Full-scale plant for the elimination of pharmaceuticals in hospital wastewater -Comparison of advanced treatment technologies [C]//16 th International EWA Symposium, IFAT 2012, Munich, 8th -9th May, 2012.
- [19] PAPAGEORGIOU M, ZIORIS I, DANIS T, et al. Comprehensive investigation of a wide range of pharmaceuticals and personal care products in urban and hospital wastewaters in Greece [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133565.
- [20] 凌军辉, 秦华江, 陆华东. 长江流域抗生素污染调查 [EB/OL]. http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/lwxinhuanetcom/2020-04/25/c_139006481htm, 2020-04-25.
- LING J H, QING H J, LU H D. Investigation of antibiotic pollution in Yangtze river basin [EB/OL]. http://big5.xinhuanet.com/gate/big5/lwxinhuanetcom/2020-04/25/c_139006481htm, 2020-04-25. (in Chinese)
- [21] 张秀蓝, 张焜, 董亮, 等. 固相萃取/液相色谱-串联质谱法检测医院废水中 21 种抗生素药物残留[J]. *分析测试学报*, 2012, 31(4): 453-458.
- ZHANG X L, ZHANG T, DONG L, et al. Determination of antibiotics in hospital wastewater using HPLC-MS/MS coupled with solid phase extraction [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2012, 31(4): 453-458. (in Chinese)
- [22] REAL F J, JAVIER BENITEZ F, ACERO J L, et al. Kinetics of the chemical oxidation of the pharmaceuticals primidone, ketoprofen, and diatrizoate in ultrapure and natural waters [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(7): 3380-3388.
- [23] GROS M, CRUZ-MORATO C, MARCO-URREA E, et al. Biodegradation of the X-ray contrast agent iopromide and the fluoroquinolone antibiotic ofloxacin by the white rot fungus *Trametes versicolor* in hospital wastewaters and identification of degradation products [J]. *Water Research*, 2014, 60: 228-241.
- [24] WANG X X, WANG Z H, TANG Y Z, et al. Oxidative degradation of iodinated X-ray contrast media (iomeprol and iohexol) with sulfate radical: an experimental and theoretical study [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 368: 999-1012.
- [25] KOVALOVA L, SIEGRIST H, SINGER H, et al. Hospital wastewater treatment by membrane bioreactor: performance and efficiency for organic micropollutant elimination [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(3): 1536-1545.
- [26] KOVALOVA L, SIEGRIST H, VON GUNTEN U, et al. Elimination of micropollutants during post-treatment of hospital wastewater with powdered activated carbon, ozone, and UV [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7899-7908.
- [27] ANONYMOUS. Hospital wastewater: Hospital wastewater treatment plant installs MBR [J]. *Filtration+Separation*, 2012, 49(5): 45.
- [28] 王凯军, 常丽春, 杨美娟, 等. 从非典到新冠肺炎疫情_我国医疗污水疫情三级防护体系建设与思考 [J/OL]. *给水排水*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/>

- detail/11.4972.TU.20200223.2333.003.html
WANG K J, CHANG L C, YANG M J, et al. From SARS to 2019-nCoV: Construction and thinking of three-level protection system for medical sewage in China [J/OL]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4972.TU.20200223.2333.003.html> (in Chinese)
- [29] 中华人民共和国环境保护部. 医院污水处理工程技术规范: HJ 2029—2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical specifications for hospitalsewage treatment: HJ 2029-2013[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2013. (in Chinese)
- [30] 范峻雨, 丁昭霞, 赵志伟, 等. 医院废水消毒技术研究进展[J]. *当代化工*, 2018, 47(9): 1932-1935, 1941.
FAN J Y, DING Z X, ZHAO Z, et al. Research progress in the disinfection technology of hospital wastewater [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2018, 47(9): 1932-1935, 1941. (in Chinese)
- [31] 王洪臣. 关于疫情防控期间医疗污水和城镇污水处理若干问题的建议 [J/OL]. *给水排水*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4972.TU.20200218.1945.002.html>
WANG H C. Suggestions on the treatment of medical sewage and urban sewage during the prevention and control of the epidemic [J/OL]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4972.TU.20200218.1945.002.html> (in Chinese)
- [32] XIAO R Y, LIU K, BAI L, et al. Inactivation of pathogenic microorganisms by sulfate radical: Present and future [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 371: 222-232.
- [33] LI Y J, LI J, PAN Y T, et al. Peroxymonosulfate activation on FeCo₂S₄ modified g-C₃N₄ (FeCo₂S₄-CN): Mechanism of singlet oxygen evolution for nonradical efficient degradation of sulfamethoxazole [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 384: 123361.
- [34] LAI L D, ZHOU H Y, ZHANG H, et al. Activation of peroxydisulfate by natural titanomagnetite for atrazine removal via free radicals and high-valent iron-oxo species [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 387: 124165.
- [35] ZHOU H Y, LAI L D, WAN Y J, et al. Molybdenum disulfide (MoS₂): a versatile activator of both peroxymonosulfate and persulfate for the degradation of carbamazepine [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 384: 123264.
- [36] WANG W J, WANG H N, LI G Y, et al. Visible light activation of persulfate by magnetic hydrochar for bacterial inactivation: Efficiency, recyclability and mechanisms [J]. *Water Research*, 2020, 176: 115746.
- [37] 李传志, 张帆, 刘斌. 火神山新冠肺炎传染病医院污水处理工程生化处理工艺设计探讨[J]. *给水排水*, 2020, 46(4): 25-31.
LI C Z, ZHANG F, LIU B. Discussion on biochemical treatment process design of sewage treatment of Huoshenshan COVID-19 infectious disease hospital[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(4): 25-31.
- [38] YAN W F, XIAO Y, YAN W D, et al. The effect of bioelectrochemical systems on antibiotics removal and antibiotic resistance genes: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 358: 1421-1437.

(编辑 王秀玲)