

述评与讨论

## 水环境中残留抗生素的消毒副产物问题最新研究进展

鲁金凤<sup>1,2,3</sup>, 王斌<sup>1</sup>, 廖洋<sup>1</sup>, 刘睿哲<sup>1</sup>, 曹轶群<sup>1</sup>, 梅园园<sup>1</sup>, 熊若萱<sup>1</sup>

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 南开大学 天津市跨介质复合污染环境治理技术重点实验室, 天津 300071; 3. 南开大学 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要:** 随着抗生素的广泛应用,由残留抗生素带来的环境污染问题已经引起研究者的广泛关注。介绍了水环境中残留抗生素和抗性基因的分布特征,分析了抗生素作为前体物的消毒副产物的生成潜能以及预处理技术对抗生素的消毒副产物生成潜能的影响,讨论了消毒副产物与抗性基因之间的关系规律,阐述了对抗生素消毒副产物和抗性基因控制的研究进展。针对当前关于水环境中抗生素消毒副产物和抗生素抗性基因研究中存在的一些难点问题,提出了今后的主要研究方向。

**关键词:** 残留抗生素; 消毒副产物; 抗性基因; 水环境; 处理技术

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)04-0006-07

### Latest Research Progress on the Disinfection By-products of Residual Antibiotics in Water Environment

LU Jin-feng<sup>1,2,3</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, LIAO Yang<sup>1</sup>, LIU Rui-zhe<sup>1</sup>, CAO Yi-qun<sup>1</sup>,  
MEI Yuan-yuan<sup>1</sup>, XIONG Ruo-xuan<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Environmental Technology for Complex Trans-Media Pollution, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria <Ministry of Education>, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** With the widespread use of antibiotics, environmental pollution caused by the residual antibiotics has attracted extensive attention of researchers. The distribution characteristics of residual antibiotics and resistance genes in water environment were reviewed, and the formation potential of disinfection by-products (DBPsFP) of antibiotics and the effect of pretreatment technology on the DBPsFP of antibiotics were analyzed. In addition, the relationship between disinfection by-products and resistance genes was discussed, and the research progress on the control of disinfection by-products and resistance genes of antibiotics were summarized. Moreover, the future research prospect relative to DBPsFP and resistance genes of antibiotics was proposed.

**Key words:** residual antibiotics; disinfection by-products; resistance gene; water

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878357); 天津市应用基础及前沿技术研究计划(18JCYBJC23200); 国家大学生创新科研资助项目(201910055809)

environment; treatment technology

抗生素是由细菌、霉菌或其他微生物产生的具有抗病原体活性的一类次级代谢产物,广泛应用于人及动物抗原性疾病的预防和治疗,其中部分也作为促生长激素应用于水产养殖业及畜牧业。自1942年,青霉素作为药品应用于临床以来,已发现千余种抗生素,而常用于临床的亦有百余种。我国每年生产抗生素约 $21 \times 10^4$  t,医疗和畜牧业用量分别占42%和48%,可见抗生素用量之大<sup>[1]</sup>。当前,抗生素滥用所带来的环境中抗生素污染和抗性基因的问题,已经成为全球广泛关注的研究热点<sup>[2]</sup>。由于环境中抗生素残留水平的不断升高,抗性基因在不同环境介质中的持久存在,使得耐药细菌和抗性基因在环境中的分布水平不断提高,进而对人类健康造成更大的威胁。

抗生素除了自身具有一定的毒理效应并会带来抗性基因问题外,在水环境中残留的抗生素还被研究者发现是消毒副产物的前驱物,能与氯、二氧化氯等消毒剂反应生成碳、氮类消毒副产物<sup>[3]</sup>。而这些消毒副产物又会对诱导抗生素耐药性和抗性基因有一定的作用。

根据当前该研究领域的最新文献报道,对抗生素及抗性基因的分布特征、抗生素的消毒副产物生成势以及消毒副产物与抗生素耐药性之间的关系、消毒副产物与抗性基因的控制方法进行了全面综述,并对该领域今后的研究方向进行了展望。

## 1 水环境中残留抗生素及抗性基因的分布

### 1.1 水环境中残留抗生素的分布特征

抗生素的滥用和一些难以被生物体吸收而最终以排泄的方式释放到环境中的抗生素,使得环境中的残留抗生素不断富集。当前,土壤、大气等各类环境介质中均检出了残留抗生素。而抗生素大多具有水溶性,易经过各类环境介质转移到水环境介质中。在污水处理厂、畜禽养殖废水、地表水、地下水、饮用水等环境中均检出了多种抗生素,不同的水环境中主要抗生素的分布种类和浓度也不相同<sup>[4-6]</sup>。

沈群辉等<sup>[7]</sup>调查了黄浦江水及底泥中的四环素类、磺胺类和氯霉素三类抗生素的分布情况,发现三类抗生素的总含量平均值在水中和底泥中分别达到了 $2.3 \mu\text{g/L}$ 和 $104.27 \mu\text{g/kg}$ 。郭睿等<sup>[8]</sup>对嘉兴市水源及河网的抗生素分布情况进行了采样调查,

发现抗生素污染水平在 $330 \sim 660 \text{ ng/L}$ 区间内,其中,氟喹诺酮类抗生素是主要的抗生素污染物,浓度在 $160 \sim 400 \text{ ng/L}$ 之间;氟苯尼考是占比最大的单体抗生素,浓度在 $121 \sim 259 \text{ ng/L}$ 之间。Luo等<sup>[9]</sup>对海河及其6条支流的12种抗生素分布和迁移规律进行了研究,发现磺胺类抗生素的平均浓度最高,达 $24 \sim 385 \text{ ng/L}$ 。Yang等<sup>[10]</sup>基于WOS数据库对世界范围内湖泊的典型抗生素进行了分布统计,发现磺胺类抗生素和四环素类抗生素在所有湖泊的湖水和底泥中均处于较高的浓度,且许多湖泊的抗生素浓度由几年前的“低于检测限”迅速增加至 $\text{ng/L}$ 级或 $\mu\text{g/L}$ 级,可见近年来全球湖泊受抗生素污染的严重程度。

由以上研究可知,全球范围内的水体普遍受到了严重的抗生素污染,而我国的水系受污染程度相当高。因此,如何应对当前严重的水体抗生素污染是亟待解决的问题。

### 1.2 水环境中抗性基因的分布特征

环境中持续存在的抗生素不仅可以选择性抑杀一些环境微生物,而且能够诱导一些耐药菌群或抗性基因(Antibiotic resistance genes, ARGs)的产生,从而导致其特殊的生态毒理效应。ARGs在环境中的持久性残留以及菌群间的迁移、转化和传播,比抗生素残留本身对环境生态的危害更大,已被世界卫生组织认定为21世纪威胁人类健康的最重大挑战之一。

Pan等<sup>[11]</sup>对珠江三角洲污水灌溉区的土壤和水体进行了抗生素抗性基因的分布研究,发现了多种四环素类和磺胺类抗生素的抗性基因,其中 $tetA$ 、 $tetC$ 、 $tetM$ 、 $tetO$ 、 $tetS$ 和两种 $sul$ 基因的丰度最高,其平均值处于 $1.70 \times 10^{-4} \sim 5.31 \times 10^{-1}$ 之间。Pruden等<sup>[12]</sup>检测出美国南拉普特河从上游至下游中 $sul1$ 抗性基因的含量大幅度增加,深入研究后发现 $sul1$ 含量与上游河岸的动物养殖场及污水处理厂数目呈正相关。高新磊等<sup>[13]</sup>选用深圳市某污水处理厂作为研究对象,结果显示,在污水处理厂空气样品中8种ARGs的检出率均超过50%,其中 $tetC$ 、 $sul1$ 、 $sul2$ 和 $ermB$ 检出率为100%。Liang等<sup>[14]</sup>研究发现在某鱼塘中的大肠杆菌菌群中有91.5%的大肠杆菌都含有抗性基因,86.1%的大肠杆菌含有两种以上的

抗性基因。Gao 等<sup>[15]</sup>在天津地区的水产养殖场中检测出多种抗性基因(*tetM*、*tetO*、*tetT*、*tetW*、*sul1* 及 *sul2*)。此外,磺胺甲基恶唑抗性细菌占63.3%,四环素抗性细菌占57.1%,这说明有一部分细菌呈多重抗性。

由以上研究可知,水环境中 ARGs 的研究主要集中于不同种类抗生素在养殖场废水、污水处理厂出水 and 地表水中的污染情况;土壤环境中的 ARGs 主要分布于蔬菜地、养殖场土壤及粪便等环境介质,还有污水厂中的活性污泥和河流底泥等。在各类养殖场的水体中大量存在的 ARGs,通过食物链进入人体,会对人体健康造成严重的损害,若不加以控制和处置后果难以想象。

## 2 抗生素的消毒副产物生成潜能

### 2.1 原始抗生素的消毒副产物生成潜能

消毒副产物(DBPs)是消毒剂与水中有机物前驱物反应产生的一类特殊有机物。水环境中常规 DBPs 前驱物主要是天然有机物(NOM)。DBPs 种类繁多,到目前已查明的种类达700种,但仅占水中实际 DBPs 总数的30%。其中,所占浓度最高的三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)两类含碳类消毒副产物和卤乙腈(HANs)、卤代硝基甲烷(HNMs)、二甲基亚硝胺(NDMA)等一些含氮类消毒副产物均为 DBPs 生成潜能研究中的热点关注对象。近年来,研究者发现一些抗生素也是 DBPs 的前驱物,由于很多抗生素自身为含氮有机物,对一些毒性更高的 N-DBPs 的贡献也更高。

郭洪光等<sup>[16]</sup>考察了水中环丙沙星在不同氯化条件下的 DBPs 生成潜能,发现氯化环丙沙星能够生成包括三氯甲烷、三氯乙烷、二氯乙腈、三氯硝基甲烷、三氯丙酮等多种氯代消毒副产物,其中三氯甲烷为主要生成产物,氯化5 d后其值达到了167.07  $\mu\text{g/L}$ ,远远高于其他四种 DBPs。Zhou 等<sup>[17]</sup>对四种四环素类抗生素进行氯化处理,发现能生成多种 DBPs,且生成量最大的三氯甲烷浓度达0.452  $\mu\text{mol/L}$ 。Wang 等<sup>[3]</sup>研究了三种磺胺类抗生素的 DBPs 生成潜能,发现经氯化反应后共产生了38种 DBPs,其中28种至少含有1个氯原子的副产物均显示出了明显的毒性。Dong 等<sup>[18]</sup>对紫外/氯联合处理氯霉素后卤代硝基甲烷的生成势进行了探究,发现氯霉素经紫外/氯处理后生成了一氯硝基甲烷(MCNM)、二氯硝基甲烷(DCNM)、三氯硝基甲烷

(TCNM)三种卤代硝基甲烷,其浓度随着处理时间的变化而变化,反应24 h后三种 DBPs 的浓度分别达0.1、5.6和77.4  $\mu\text{g/L}$ 。

从以上研究结论可以看出,抗生素作为有机大分子和氯反应后具有很大的 DBPs 生成潜能,广泛分布于水环境中的抗生素经过常规氯消毒反应后会转化为毒性更强的 DBPs,对环境的危害效应会进一步加大。

### 2.2 抗生素经处理后消毒副产物的生成潜能

为了解决抗生素在水环境中大量残留的问题,对抗生素的降解也一直是研究领域的热点。此外,各类水处理过程也均会对水环境中残留抗生素产生不同程度的影响。一些研究者也关注了经处理后的抗生素其 DBPs 的生成潜能。

肖子捷<sup>[19]</sup>考察了高级氧化前处理对甲氧苄啶(TMP)、卡马西平和金霉素消毒副产物生成势的影响,研究发现经  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{PS}$  和  $\text{UV}/\text{PMS}/\text{Fe}^{2+}$  三种高级氧化法处理后,三种抗生素生成 DBPs 的种类和浓度都大幅降低,其中经过  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$  前处理后,三种抗生素的 DBPs 生成势为零;TMP 经预处理后仅生成少量的三氯甲烷,未检测出任何 N-DBPs,由此可见三种高级氧化技术的前处理作用对抗生素为前驱物的消毒副产物生成具有良好的控制效果。Zhang 等<sup>[20]</sup>探究了  $\text{H}_2\text{O}_2$  与  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$  两种预氧化手段对氯霉素 DBPs 生成势的影响,发现  $\text{H}_2\text{O}_2$  预氧化虽然能显著降低三氯甲烷和三氯硝基甲烷的产生,但会促进二氯乙腈的产生;在氯消毒条件下,  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$  预氧化能够显著降低三氯甲烷的产生,但会导致三氯硝基甲烷和二氯乙腈产生量的增加,然而氧化剂浓度的增加会逐渐降低以上两种 DBPs 的产生。Chu 等<sup>[21]</sup>研究了过硫酸盐预氧化与过硫酸盐/紫外预氧化分别对三种氯霉素类抗生素典型 DBPs 生成势的影响,发现在氯胺消毒条件下,过硫酸盐预氧化可以显著抑制三种氯霉素的 N-DBPs 的生成,但会明显促进三氯甲烷的生成;在氯消毒条件下,过硫酸盐/紫外预氧化可以显著降低三种氯霉素的三氯甲烷和卤代硝基甲烷的生成量,但会对二氯乙腈的生成产生微弱的促进作用。总体而言,过硫酸盐/紫外预氧化由于其强烈的氧化作用导致抗生素大分子结构破坏比较彻底,因此对三种氯霉素的典型 DBPs 生成具有有效的抑制作用。Zhang 等<sup>[22]</sup>采用光催化氧化对氯霉素进行前处理,



发现氯霉素单独在氯消毒作用下产生了多种 C-DBPs 和 N-DBPs,其中生成量最大的三氯甲烷、三氯丙酮和二溴乙腈的浓度分别达到了 1.04、0.46 和 0.13  $\mu\text{g/L}$ ,经光催化氧化前处理后生成量较大的 DBPs 浓度均出现了不同程度的下降,其中三氯甲烷的生成量减少了 84%,而三氯丙酮和二溴乙腈的生成量也分别减少了 51% 和 37%,由此可见前处理对 DBPs 的控制效果十分明显。

从以上研究可以看出,经高级氧化和光催化等手段处理后抗生素的 DBPs 生成潜能普遍得到了抑制,这可能是因为前处理技术均具有强烈的氧化性,对抗生素大分子的结构和特征官能团造成了不同程度的破坏或者使抗生素发生了不同程度的碳化,从而降低了抗生素和氯反应生成 DBPs 的几率。

### 3 消毒副产物对细菌抗生素抗性基因影响

近年来,研究者发现消毒副产物在全球抗生素耐药性传播中可能起到了非常重要的作用,尤其是在抗生素浓度很低的饮用水中。在抗生素浓度极低的情况下,细菌很难产生抗生素耐药性,而如果存在具有诱变活性的消毒副产物,细菌就会产生抗生素耐药性,甚至是多重耐药性。

吕露等<sup>[23]</sup>研究了 3 种典型 DBPs 对常见条件病原微生物 *P. aeruginosa* 和病原微生物指示菌 *E. coli* 的抗生素抗性的影响,发现经 DBPs 染毒后,受试菌对多种抗生素的单一抗性 & 多重抗性均有不同程度的提高,单一抗性提高倍数在 1.48 ~ 12.01 之间,多重抗性可提高 1.55 倍。Li 等<sup>[24]</sup>研究发现,即使水中的抗生素浓度低于最低抑菌浓度 1 ~ 2 个数量级,消毒副产物的存在也会促使大肠杆菌对这些抗生素产生耐药性。Lü 等<sup>[25]</sup>研究了 N-DBPs 对 *Pseudomonas* PAO1 指示微生物抗性基因的影响,发现溴乙酰胺、三溴硝基甲烷和三氯乙腈分别使 PAO1 抗性基因数量增长了 5.3、6.6 和 4.7 倍,同时 *Cip*、*Rif*、*Tet*、*Pol*、*Gen* 这 5 种抗生素抗性基因在 N-DBPs 的影响下诱变率分别提升了 8.5、7.8、4.6、4.0 和 2.6 倍。此外,有研究在染毒体系中加入活性氧物质猝灭剂 (ROS) 后,卤代羟基咪唑酮 (MX) 及二氯乙腈对抗性的提高作用几乎消失,说明抗性的提高作用是 M-DBPs 诱导细菌产生 ROS 的结果,而这也正是基因诱变的主要机制;进一步对 M-DBPs 诱导出的抗性菌的抗性相关基因测序,结果表明细菌因发生基因突变导致抗生素靶位点改变或外

排泵活性提高,进而获得抗生素抗性,直接证明了 M-DBPs 的致突变作用是抗生素抗性基因提高的诱因。

上述研究表明,典型 DBPs 对细菌抗性的提高作用具有一定的普遍性,且对抗性的提高作用与其致突变性强弱呈正相关,其作用机制是通过氧化胁迫作用诱发细菌的抗性基因突变,从而使细菌产生抗性基因。

### 4 残留抗生素消毒副产物及抗性基因控制

为了控制抗生素消毒副产物的产生,研究人员大致通过以下几种途径进行了相关研究:控制残留抗生素的浓度、开发新型消毒工艺替代氯消毒、使用多种组合工艺直接降解 DBPs 等<sup>[26]</sup>。采用控制残留抗生素浓度的方式,旨在从源头进行控制,从而减少 DBPs 的生成。目前,常规工艺对抗生素的处理效率有限,而高级氧化工艺的处理效果十分明显,高级氧化处理水经消毒后各类 DBPs 的生成量均明显下降。新型消毒工艺使用较多的是紫外线消毒或者臭氧消毒,对 DBPs 的产生控制效果很好,但在一定条件下不可避免地会产生少量 DBPs。直接降解 DBPs 的工艺常采用 UV、 $\text{H}_2\text{O}_2$  和臭氧的组合技术、光催化剂技术、芬顿法以及生物法。各种处理方法均有各自的特点和不足,处理技术的选择要根据实际情况而定。

目前对抗生素抗性基因的研究中,控制 ARGs 的技术主要包括消毒、高级氧化、人工湿地等<sup>[27]</sup>。消毒处理技术虽然具备无腐蚀性、无残留等优点,但它对 ARGs 的去除效果并不稳定,容易受 ARGs 种类、消毒剂剂量、水质等条件的影响,并不能完全有效减少所有的 ARGs。另外,消毒剂的使用还存在产生多种 DBPs 的风险,这将加大 ARGs 对环境 and 人体的危害<sup>[28-29]</sup>。高级氧化技术对 ARGs 的处理效果取决于氧化剂/催化剂的种类、浓度、溶液 pH 值和外界条件等因素,目前的研究表明该技术对 ARGs 的控制十分有效<sup>[30-31]</sup>。人工湿地对 ARGs 的处理也十分有效,通过调整湿地的各项参数,对目标 ARGs 的平均去除率可达 60% ~ 95%,去除效果较好<sup>[32-33]</sup>。但是人工湿地技术面临如何维持长期稳定运行的问题,这也是将来重点研究的内容之一。总体而言,针对于去除 ARGs 的处理技术普遍具有较好的去除效能,但报道相对较少,典型处理技术的效能还需进一步验证。

## 5 结语

巨大的抗生素用量促进了抗生素生产行业的快速发展,也同时造成了世界各地严重的抗生素污染。通过研究发现,现如今残留抗生素“无处不在”,广泛分布于各类水体、底泥和土壤中。抗生素的较高残留增加了环境选择压力,诱导细菌产生单一或多重耐药性,形成大量携带抗性基因的抗性细菌。同时,在常规氯消毒条件下,这些残留抗生素可以产生多种具有严重“三致”效应的消毒副产物。而产生的消毒副产物可以和环境中的微生物相互作用,通过诱导基因突变进一步促进微生物体内抗性基因的产生。为了降低残留抗生素及其衍生的消毒副产物和抗性基因对环境和人体的危害,研究人员尝试用多种单一或组合技术对上述污染物进行处理,取得了不错的控制效果。

目前,国内外关于抗生素消毒副产物及抗性基因的研究仍然很少,也存在一些问题亟待解决,今后需针对以下几方面进行重点研究:

① 深入研究抗生素与消毒副产物生成势之间的关联性,重点研究多种前处理技术对抗生素消毒副产物生成势的影响,开发出同步高效去除抗生素及其消毒副产物的新型处理技术。

② 开展残留抗生素和 ARGs 的环境迁移转化及相关性研究,针对不同种类抗生素和 ARGs 之间的相关性差异,进一步揭示其原因和机理。

③ 充分探究环境中消毒副产物促进 ARGs 产生的普适性规律和机理,并进一步评估 ARGs 的生态健康风险。

④ 开发新型高效的消毒副产物及抗性基因控制技术,进一步丰富残留抗生素的控制手段,降低抗生素的环境和健康风险。

## 参考文献:

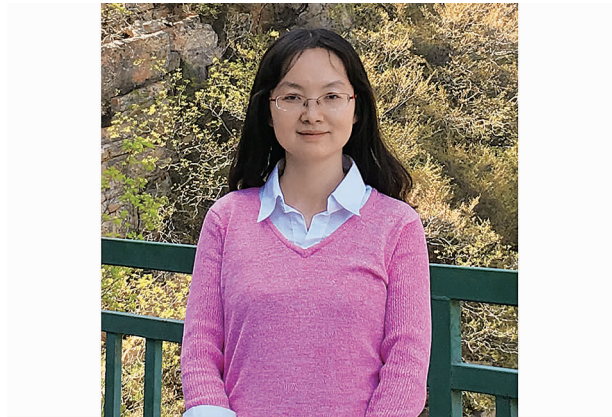
- [1] Luo Y, Mao D Q, Rysz M, *et al.* Trends in antibiotic resistance genes occurrence in the Haihe River, China [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(19): 7220 – 7225.
- [2] 谢冰. 环境中抗生素抗性基因的传播及其机理[J]. *工业微生物*, 2017, 47(1): 68.  
Xie Bing. The transmission and mechanism of antibiotic resistance genes in the environment [J]. *Industrial Microorganisms*, 2017, 47(1): 68 (in Chinese).
- [3] Wang M, Helbling D E. A non-target approach to identify disinfection by-products of structurally similar sulfonamide antibiotics [J]. *Water Res*, 2016, 102: 241 – 251.
- [4] 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 等. 北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5074 – 5080.  
Chen Weiping, Peng Chengwei, Yang Yang, *et al.* Distribution characteristics and risk analysis of antibiotic in the groundwater in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5074 – 5080 (in Chinese).
- [5] Li N, Zhang X B, Wu W, *et al.* Occurrence, seasonal variation and risk assessment of antibiotics in the reservoirs in north China [J]. *Chemosphere*, 2014, 111: 327 – 335.
- [6] Chen H, Liu S, Xu X R, *et al.* Antibiotics in the coastal environment of the Hailing Bay region, south China sea: Spatial distribution, source analysis and ecological risks [J]. *Mar Pollut Bull*, 2015, 95(1): 365 – 373.
- [7] 沈群辉, 冀秀玲, 傅淑珺, 等. 黄浦江水域抗生素及抗性基因污染初步研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(10): 1717 – 1723.  
Shen Qunhui, Ji Xiuling, Fu Shujun, *et al.* Preliminary studies on the pollution levels of antibiotic and antibiotic resistance genes in Huangpu River, China [J]. *Ecology and Environmental Science*, 2012, 21(10): 1717 – 1723 (in Chinese).
- [8] 郭睿, 王山军, 昌盛, 等. 嘉兴市饮用水源及城市河网抗生素分布特征[J]. *环境化学*, 2016, 35(9): 1842 – 1852.  
Guo Rui, Wang Shanjun, Chang Sheng, *et al.* Distribution characteristics of antibiotics in Jiaxing drinking water source and urban river [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(9): 1842 – 1852 (in Chinese).
- [9] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River basin, China [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(5): 1827 – 1833.
- [10] Yang Y Y, Song W J, Lin H, *et al.* Antibiotics and antibiotic resistance genes in global lakes: A review and meta-analysis [J]. *Environ Int*, 2018, 116: 60 – 73.
- [11] Pan M, Chu L M. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in soils from wastewater irrigation areas in the Pearl River Delta region, southern China [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 624: 145 – 152.
- [12] Pruden A, Arabi M, Storteboom H N. Correlation between upstream human activities and riverine

- antibiotic resistance genes [J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(21): 11541–11549.
- [13] 高新磊, 邵明非, 贺小萌, 等. 污水处理厂空气介质抗生素抗性基因的分布 [J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(5): 89–94.
- Gao Xinlei, Shao Mingfei, He Xiaomeng, *et al.* Distribution of airborne antibiotic resistance gene in wastewater treatment plant [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(5): 89–94 (in Chinese).
- [14] Liang S S, Li J Q, Shi L, *et al.* Detection and analysis of antibiotic resistance genes and integron of *Escherichia coli* isolated from fish pond ecological constellation by multiplex PCR [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(23): 2012–2023.
- [15] Gao P P, Mao D Q, Luo Y, *et al.* Occurrence of sulfonamide and tetracycline-resistant bacteria and resistance genes in aquaculture environment [J]. *Water Res*, 2012, 46(7): 2355–2364.
- [16] 郭洪光, 刘洪位, 张永丽, 等. 水中环丙沙星 (CPFX) 氯化消毒副产物生成潜能分析 [J]. *净水技术*, 2016, 35(1): 38–42.
- Guo Hongguang, Liu Hongwei, Zhang Yongli, *et al.* Analysis of disinfection byproducts formation potential in chlorination of ciprofloxacin (CPFX) in water [J]. *Water Purification Technology*, 2016, 35(1): 38–42 (in Chinese).
- [17] Zhou S Q, Shao Y S, Gao N Y, *et al.* Chlorination and chloramination of tetracycline antibiotics: Disinfection by-products formation and influential factors [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2014, 107(9): 30–35.
- [18] Dong H Y, Qiang Z M, Hu J, *et al.* Degradation of chloramphenicol by UV/chlorine treatment: Kinetics, mechanism and enhanced formation of halonitromethanes [J]. *Water Res*, 2017, 121: 178–185.
- [19] 肖子捷. 几种水中典型 PPCPs 的高级氧化降解及其消毒副产物的生成研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2015.
- Xiao Zijie. Study on the Removal of Several Typical Pharmaceuticals and Personal Care Products from Water and Production of Disinfection Byproducts [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [20] Zhang Y M, Chu W H, Xu T, *et al.* Impact of pre-oxidation using  $H_2O_2$  and ultraviolet/ $H_2O_2$  on disinfection byproducts generated from chlor(am)ination of chloramphenicol [J]. *Chem Eng J*, 2017, 317: 112–118.
- [21] Chu W H, Chu T F, Bond T, *et al.* Impact of persulfate and ultraviolet light activated persulfate pre-oxidation on the formation of trihalomethanes, haloacetonitriles and halonitromethanes from the chlor(am)ination of three antibiotic chloramphenicols [J]. *Water Res*, 2016, 93: 48–55.
- [22] Zhang W, Zhou L, Deng H P. Ag modified g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites with enhanced visible-light photocatalytic activity for diclofenac degradation [J]. *J Mol Catal A: Chem*, 2016, 423: 270–276.
- [23] 吕露, 张梦露, 王春明, 等. 3 种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响 [J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2525–2531.
- Lü Lu, Zhang Menglu, Wang Chunming, *et al.* Effect of three typical disinfection byproducts on bacterial antibiotic resistance [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7): 2525–2531 (in Chinese).
- [24] Li D, Zeng S Y, Miao H, *et al.* Water disinfection byproducts induce antibiotic resistance-role of environmental pollutants in resistance phenomena [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(6): 3193–3201.
- [25] Lü L, Yu X, Xu Q, *et al.* Induction of bacterial antibiotic resistance by mutagenic halogenated nitrogenous disinfection byproducts [J]. *Environ Pollut*, 2015, 205: 291–298.
- [26] 张金松, 卢小艳. 饮用水消毒工艺及副产物控制技术发展 [J]. *给水排水*, 2016, 42(9): 1–3.
- Zhang Jinsong, Lu Xiaoyan. Development of disinfection technology and by-product control technology for drinking water [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(9): 1–3 (in Chinese).
- [27] 王双玲, 王礼, 周贺, 等. 饮用水系统中抗生素抗性基因的研究进展 [J]. *环境化学*, 2017, 36(2): 229–240.
- Wang Shuangling, Wang Li, Zhou He, *et al.* An overview on antibiotic resistance genes in drinking water systems [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(2): 229–240 (in Chinese).
- [28] Zhang Y Y, Zhuang Y, Geng J J, *et al.* Inactivation of antibiotic resistance genes in municipal wastewater effluent by chlorination and sequential UV/chlorination disinfection [J]. *Sci Total Environ*, 2015, 512/513: 125–132.
- [29] McKinney C W, Pruden A. Ultraviolet disinfection of antibiotic resistant bacteria and their antibiotic resistance



- genes in water and wastewater [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(24): 13393 – 13400.
- [30] 庄耀. 污水中抗生素抗性基因的深度净化技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- Zhuang Yao. Study on Advanced Purification of Antibiotics Resistance Genes in Sewage[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014 (in Chinese).
- [31] Guo C S, Wang K, Hou S, *et al.* H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and/or TiO<sub>2</sub> photocatalysis under UV irradiation for the removal of antibiotic resistant bacteria and their antibiotic resistance genes[J]. J Hazard Mater, 2016, 323: 710 – 718.
- [32] Chen H, Zhang M M. Effects of advanced treatment systems on the removal of antibiotic resistance genes in wastewater treatment plants from Hangzhou, China[J]. Environ Sci Technol, 2013, 47(15): 8157 – 8163.
- [33] 郑加玉, 刘琳, 高大文, 等. 四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3102 – 3107.
- Zheng Jiayu, Liu Lin, Gao Dawen, *et al.* Removal and

accumulation of the tetracycline resistance gene in vertical flow constructed wetland [J]. Environmental Science, 2013, 34(8): 3102 – 3107 (in Chinese).



作者简介: 鲁金凤(1980 – ), 女, 山西朔州人, 博士, 副教授, 研究方向为水的深度处理技术。

E-mail: lujinfeng@nankai.edu.cn

收稿日期: 2019 – 04 – 18

(上接第5页)

- Xia Wenlin, Zeng Xiangwen, Zhang Zhiliang, *et al.* Key point of planning for construction of wastewater treatment project in Dongguan City [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(11): 31 – 33 (in Chinese).
- [3] 黄泽慧. 浅谈东莞市城市道路暴雨积水的应对措施[J]. 建材与装饰, 2019(18): 278 – 279.
- Huang Zehui. Discussion on the countermeasures of rain water in urban road of Dongguan [J]. Construction Materials & Decoration, 2019(18): 278 – 279 (in Chinese).
- [4] 陈玮, 徐慧伟, 高伟, 等. 基于产污系数法测算城镇污水处理系统的主要污染物削减效能提升潜力[J]. 给水排水, 2018, 44(7): 24 – 29.
- Chen Wei, Xu Huiwei, Gao Wei, *et al.* Calculating potential in enhancing major pollutants' removal efficiency in urban wastewater treatment system based on pollutants producing coefficient[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(7): 24 – 29 (in Chinese).
- [5] 魏忠庆. 排水系统截污纳管存在的问题及对策[J]. 中国给水排水, 2017, 33(18): 14 – 16.

Wei Zhongqing. Discussion about the problems and solutions of wastewater interception in combined sewer system[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(18): 14 – 16 (in Chinese).



作者简介: 戴永康(1991 – ), 男, 广东东莞人, 硕士, 从事污水处理工程的技术研发和运营工作。

E-mail: 594762303@qq.com

收稿日期: 2019 – 08 – 12