

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南京工业区夏冬季节二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 ..... 刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 ..... 梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 ..... 高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 ..... 金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 ..... 段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 ..... 梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 鄢晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 ..... 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 ..... 姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 ..... 武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例 ..... 姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 ..... 董小芳, 邓黄月, 张杰, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 ..... 张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 ..... 张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 ..... 王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 ..... 孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 ..... 肖骁, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 ..... 李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 ..... 陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 ..... 姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 ..... 李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 ..... 丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 ..... 刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 ..... 徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 ..... 王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)

树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 ..... 陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 ..... 朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 ..... 桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 ..... 周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 ..... 金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)

Fe<sup>(0)</sup>-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 ..... 吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 ..... 李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 ..... 闰刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 ..... 范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 ..... 杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 ..... 徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 ..... 万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 ..... 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 ..... 许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 ..... 曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 ..... 秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 ..... 田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N<sub>2</sub>O 的排放特征 ..... 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 ..... 熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 ..... 孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 ..... 张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 ..... 王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 ..... 李秋言, 赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 ..... 吴志娟, 毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 ..... 王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 的吸附特性 ..... 杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)

C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 ..... 鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

# 北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险

张盼伟, 周怀东, 赵高峰\*, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 采集北京城区河流 34 个表层水样和 23 个沉积物样品, 采集后海、前海和西海这 3 个城市湖泊 10 个表层水样和 5 个沉积物样品, 应用 HPLC-MS/MS 技术对表层水样及沉积物样品中 10 种药物及个人护理品 (PPCPs) 进行检测分析, 发现河流表层水样和城市湖泊表层水样中 PPCPs 的浓度范围分别为 N. D.  $\sim 655 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和 N. D.  $\sim 252 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 在河流表层水样中, 10 种 PPCPs 的检出率范围为 0 ~ 100%, 其中咖啡因的检出率为 100%, 磺胺甲噁唑、地尔硫卓和泰乐菌素均未检出; 在湖泊表层水样中, 10 种 PPCPs 的检出率范围为 0 ~ 100%, 其中对乙酰氨基酚、林可霉素、咖啡因和阿奇霉素的检出率为 100%, 磺胺甲噁唑、地尔硫卓、泰乐菌素及卡马西平均未检出; 河流沉积物和城市湖泊沉积物中 PPCPs 的含量范围分别为 N. D.  $\sim 1709 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和 N. D.  $\sim 35.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 在河流表层沉积物中, 10 种 PPCPs 的检出率范围为 4% ~ 96%, 其中甲氧苄啶的检出率最高, 泰乐菌素的检出率最低; 在湖泊表层沉积物中, 10 种 PPCPs 的检出率范围为 0 ~ 100%, 其中地尔硫卓的检出率最高, 咖啡因、泰乐菌素和卡马西平均未检出. 从各河流看, 永定引水渠、凉水河、通惠河及坝河表层水体及沉积物中 PPCPs 的含量较高, 永定河、昆玉河表层水体中 PPCPs 的含量较低. 应用风险商值 (RQ) 模型评价北京城区各河流及湖泊表层水体与沉积物中 PPCPs 残留对生态环境的影响, 发现北京城区河流及湖泊表层水体中的 10 种 PPCPs 的 RQ 值均低于 0.1, 对河流生态环境具有低风险. 城区河流及湖泊沉积物中, 对乙酰氨基酚对永定引水渠、通惠河及坝河底栖生态环境具有中等风险; 林可霉素对永定引水渠、温榆河、通惠河、护城河、坝河、凉水河及后海底栖生态环境具有中等风险; 甲氧苄啶对永定引水渠、清河、温榆河、通惠河、护城河、坝河、亮马河、凉水河及后海底栖生态环境具有中等风险; 阿奇霉素对亮马河及凉水河底栖生态环境具有中等风险, 对永定引水渠、清河、温榆河、通惠河、坝河及后海底栖生态环境具有高风险.

**关键词:** 北京; 河流; 药物和个人护理品; 分布特征; 潜在风险

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1852-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201610073

## Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China

ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng\*, LI Kun, ZHAO Xiao-hui, LIU Qiao-na, REN Min, ZHAO Dan-dan, LI Dong-jiao

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Thirty-four water samples and twenty-three sediment samples from the urban rivers, ten water samples and five sediment samples from urban lakes were collected in Beijing. Ten PPCPs (acetaminophen, lincomycin, caffeine, trimethoprim, azithromycin, sulfamethoxazole, diltiazem, tylosin, carbamazepine, fluoxetine) were extracted from water samples by solid-phase extraction (SPE) and from sediment samples by ultrasonic extraction, and then analyzed by high-performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS). The ranges of geometric mean values were 0-655  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$  and 0-252  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$  in water samples from urban rivers and lakes, respectively. The range of detection ratio was 0-100% for 10 PPCPs in river water samples, caffeine was the dominant pollutant in water samples and the detection ratio was 100%, whereas sulfamethoxazole, diltiazem and tylosin were not detected in river samples. The range of detection ratio was 0-100% for 10 PPCPs in lake water samples. The detection ratios of acetaminophen, lincomycin, caffeine and azithromycin were 100%, whereas sulfamethoxazole, diltiazem, tylosin, carbamazepine were not detected in lake water samples. The ranges of geometric mean values were N. D.  $\sim 1709 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  and N. D.  $\sim 35.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  in sediment samples from urban rivers and lakes, respectively. The ranges of detection ratio were 4% -96% and 0-100% for 10 PPCPs in river and lake sediment samples, respectively. The detection ratio of trimethoprim was 96% and that of tylosin was 4% in river sediment, the detection ratio of diltiazem was 100% and caffeine, tylosin, carbamazepine were not detected. The concentrations of PPCPs in water and sediment samples from Yongyin River, Liangshui River, Tonghui River, Bahe River were higher than those in other rivers. The concentrations of PPCPs in water and sediment samples from Yongding River, Kunyu River were lower than those in other rivers. Further risk assessment results showed that the overall risk was not high in water of rivers and lakes and the RQ values were below 0.1, which showed low risk to microorganisms. But the condition was not the same in sediment from rivers and lakes. The RQ values of acetaminophen were between 0.1 and 1 in sediments from Yongyin River, Tonghui River, Bahe River. The RQ values of lincomycin

收稿日期: 2016-10-14; 修订日期: 2016-11-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07203-006); 北京市科技重点研发计划项目 (Z171100000717010)

作者简介: 张盼伟 (1987 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境中有机物的迁移转化, E-mail: zhangpanwei1987@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhaogf@iwhr.com

were between 0.1 and 1 in sediments from Yongyin River, Wenyu River, Tonghui River, Hucheng River, Bahe River, Liangshui River, Houhai Lake. The RQ values of trimethoprim were between 0.1 and 1 in sediments from Yongyin River, Qinghe River, Wenyu River, Tonghui River Hucheng River, Bahe River, Liangma River, Liangshui River and Houhai Lake. The RQ values of azithromycin were between 0.1 and 1 in sediments from Liangma River, Liangshui River, which all showed medium risk to microorganisms in sediments. The RQ values of azithromycin exceeded 1 from Yongyin River, Qinghe River, Wenyu River, Tonghui River, Bahe River and Houhai Lake, which showed high risk to microorganisms in sediments.

**Key words:** Beijing; river; PPCPs; distribution characteristics; potential risk

药物及个人护理品(PPCPs)在人类和动物的疾病治疗及个人卫生方面的使用已经有很多年的历史,然而这类“新兴污染物”在近年来越来越受到人们的关注<sup>[1,2]</sup>. PPCPs(如:药物、个人护理品、表面活性剂、显影剂等)在人类的日常生活、畜牧业养殖及水产养殖业中使用非常广泛,导致其广泛分布在各个环境介质中<sup>[3]</sup>,PPCPs 在环境中有许多来源,人类污水及医院废水的排放是水环境中 PPCPs 的重要来源,污水进入污水处理厂后可以消除一部分 PPCPs,没有被消除的部分将随着污水处理厂出水进入地表水环境中;畜牧养殖业和水产养殖业也会大量使用药物特别是抗生素等药物用于动物疾病治疗及增加产量,畜牧养殖产生的粪便会当做肥料进入农田环境,经过下渗及地表径流等作用,粪便中残留的 PPCPs 会进入地下及地表水环境中<sup>[4]</sup>;水产养殖业中直接将抗生素等药物施用于水体,造成抗生素等药物在水体及沉积物中的蓄积<sup>[4]</sup>. PPCPs 已经在世界范围内被广泛地检出,美国、英国、西班牙、日本、韩国、哥斯达黎加及泰国等国水环境中都有检出,其浓度范围从  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,且其在水环境中的来源和分布相当广泛<sup>[5-10]</sup>. 中国是抗生素最大的生产和消费国,每年消费的抗生素就达到 25 000 t<sup>[11]</sup>;同时中国也是仅次于美国和日本的世界第三大个人护理产品的消费大国,在中国许多城市污水处理厂、城市水环境和河流中检测出 PPCPs 物质的存在<sup>[12]</sup>.

随着药物和个人护理品的大量使用,越来越多的研究开始关注其在环境中的迁移转化和降解机理. 由于药物和个人护理品的数量庞大,成分复杂,其物理化学特性也各有不同,如水溶性、辛醇-水分配系数和酸解常数等,这些性质将导致药物和个人护理品会存在于不同环境介质中. Kümmerer<sup>[3]</sup>指出,PPCPs 在各个国家的地表水及沉积物中处于同一数量级污染水平,但不同地表水体中的浓度有一定差异,总体来说,地表水中污染较高的是医院废水及其沉积物,市政污水中 PPCPs 的浓度较低;不同水环境介质中 PPCPs 浓度

有一定的差别,如,地表水、地下水和海洋等不同水体中其污染水平不同<sup>[3]</sup>;在水产养殖区的沉积物中 PPCPs 特别是抗生素含量较高,因为在水产养殖中会大量使用抗生素用于水产品疾病的治疗或促进水产品的生产,这将直接导致水体及沉积物中的抗生素的蓄积<sup>[3]</sup>.

北京是我国的政治、经济和文化中心,常住人口已经突破 2 千万人,众多的人口导致 PPCPs 物质的使用量巨大,北京已经成为我国乃至世界上 PPCPs 物质年消费量最大的城市. 北京每天的污水排放量已经超过 300 万 t,但是北京污水处理厂的处理能力有限,市区和郊区的污水处理率分别为 83% 和 50%,污水处理厂没有处理掉的及人类直接排入水环境中的 PPCPs 物质,造成北京城区水环境中 PPCPs 广泛存在. 对北京周边北运河表层水环境中 PPCPs 的来源及分布已有相关报道<sup>[13]</sup>,然而对流经北京城区河流及北京城区湖泊中的 PPCPs 的赋存状况、来源及其潜在的生态风险研究相对较少. 本文对北京城区主要河流及湖泊表层水体及沉积物中 PPCPs 进行研究,以期为北京城区水环境中 PPCPs 的赋存状况、来源及存在的潜在生态风险提供数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

实验中使用的甲醇、乙腈、乙酸乙酯、二氯甲烷均为农残级(J. T. Baker, Phillipsburg, USA);甲酸(色谱纯, DIKMA);  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  (分析纯); 盐酸( $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 分析纯); 实验用水均为超纯水(经 MilliQ 系统纯化,电阻率不低于  $18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ ).

高效液相色谱-三重四极杆质谱联用仪 Agilent 1290/6460 HPLC-MS/MS (Jet stream ESI 源), 配有 ZORBAX Eclipse Plus C18 反相柱( $100\times 2.1\text{ mm}$ ,  $3.5\ \mu\text{m}$ ). SPE 固相萃取装置 (Supelco, USA), Waters Oasis HLB 固相萃取柱, SAX 阴离子交换柱 (DIKMA), 旋转浓缩仪 (Heidolph, Germany), 氮吹仪 (Organomation N-EVAP-12, USA).

## 1.2 样品采集与处理

样品采集于2013年12月,共采集北京城区河流及湖泊中的44个水样品及28个沉积物样品,其中在北京城区河流中共采集34个水样品,23个沉积物样品;在城区湖泊中共采集10个水样品,5个沉积物样品,如图1所示.使用采水器采集水面0~50 cm的水样品,每个采样点采集不少于1.5 L水样品,样品于4℃环境中保存并尽快用0.45 μm 过滤处理.使用采泥器采集河流及湖泊表层0~10 cm的沉积物,城区硬化河道没有采集沉积物样品,将采集到的沉积物样品取约500 g装入PE密封袋,置于冰盒中保存,运回实验室后于-20℃冰箱中保存,并尽快进行处理分析.

水样处理:将1 L经过滤的水样加入100 ng回收率指示物(Atrazine d5).使用HLB固相萃取小柱直接进行富集、净化及洗脱,最后将洗脱液在40℃水浴中缓和氮吹至近干,用甲醇准确定容至1 mL,待测.

沉积物样品运送回实验室经过冷冻干燥处理,过200目筛.准确称取5 g经过冷冻干燥过筛后的沉积物样品到50 mL洁净的三角烧瓶中,并加入100 ng Atrazine d5作为内标,加入30 mL甲醇,30℃水浴中超声萃取20 min,超声萃取后将上清液转移到50 mL的离心管中,在5 000 r·min<sup>-1</sup>离心机中离心5 min,然后将上清液转移至100 mL圆底烧瓶中;再重复上述步骤两次,合并上清液.将经过离心处理的上清液在旋转浓缩仪上浓缩至10 mL左右,将其转移至200 mL超纯水中.将阴离子交换柱(SAX)(3 mL,200 mg,DIKMA)和HLB(Waters Oasis)串联使用,SAX柱主要去除沉积物样品中的腐殖酸的干扰,避免HLB小柱吸附太多的杂质而使其吸附容量超限<sup>[14]</sup>.调节流速约为10 mL·min<sup>-1</sup>,样品富集完成后用5 mL超纯水清洗富集柱,继续抽真空10 min,然后用10 mL甲醇对富集小柱进行洗脱,收集洗脱液,并将洗脱液在40℃水浴中缓和氮吹至近干,用流动相准确定容至1 mL,待测.

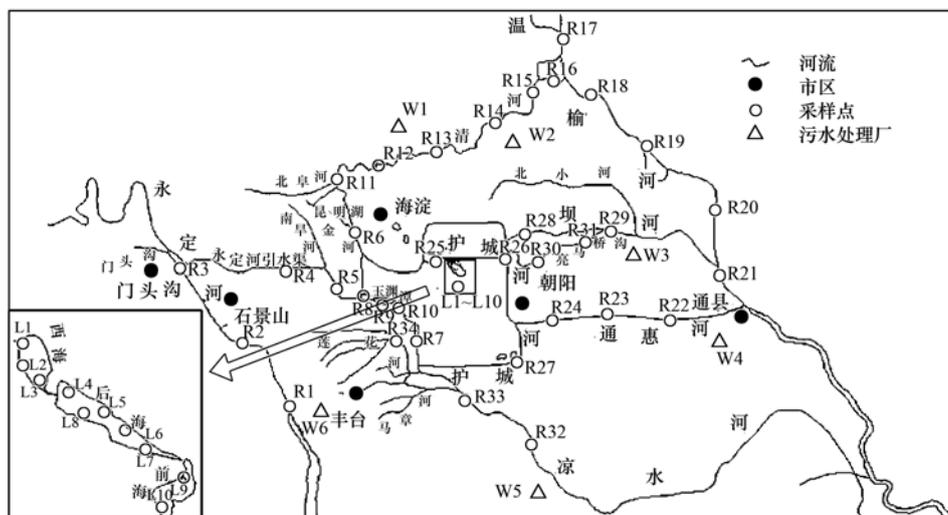


图1 北京城区河流及湖泊样品采集位置示意

Fig. 1 Sampling sites for surface water and sediments in rivers and lakes in Beijing

## 1.3 仪器分析

Agilent 1290/6460 HPLC-MS/MS 高效液相色谱-三重四极杆质谱分析,载气为高纯N<sub>2</sub>,进样量为10 μL.毛细管电压为4 000 V,干燥气温度与流速分别为300℃和11 L·min<sup>-1</sup>,雾化器压力为45 psi,离子源采用电喷雾离子源(ESI+),多反应监测(MRM)模式分析.10种PPCPs的质谱条件见表1,Atrazine d5作为回收率内标,其定量离子对m/z为221.0>179.0、221.0>137.0和221.0>101.0.流动相(A):0.1%甲酸:超纯水,流动相(B):乙腈,梯

度洗脱程序为:8% B保持6 min,流速从0.2 mL·min<sup>-1</sup>增加至0.3 mL·min<sup>-1</sup>,在10 min内由8% B增加至30% B,流速从0.3 mL·min<sup>-1</sup>增加到0.35 mL·min<sup>-1</sup>,随后在14 min内由30% B增加至100% B.

## 1.4 质量保证与控制

玻璃器皿依次使用洗涤剂、重铬酸钾洗液、自来水、去离子水和丙酮漂洗,再用烘箱烘干.每10个样品添加一个溶剂空白和程序空白,避免背景污染(保证空白无污染后方可进行实验).PPCPs定量标准曲

线的浓度范围包括 5.0、10.0、20.0、50.0、100.0、200.0  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 线性相关系数  $r^2 > 0.99$ . 样品的最低检测限 (LOD) 以 3 倍信噪比 (S/N) 来计算. 10 种 PPCPs 化合物加标回收率数据如表 2 所示.

表 1 10 种 PPCPs 的基本信息及质谱条件

Table 1 Basic information and mass spectrometry conditions of 10 PPCPs

化合物	CAS 号	$\lg K_{ow}^{1)}$	$m/z$		裂解电压/V	碰撞能量/eV
			母离子	子离子		
对乙酰氨基酚	103-90-2	0.46	152	110	90	15
				65	90	35
林可霉素	154-21-2	0.56	407	359.1	110	15
				126	110	25
咖啡因	58-08-2	-0.07	195	138	110	15
				110	110	25
甲氧苄啶	738-70-5	0.91	291	261	110	25
				230	110	25
阿奇霉素	83905-01-5	4.02	749.5	591.2	130	30
				158	130	35
磺胺甲噁唑	723-46-6	0.89	254	156	110	15
				92	110	25
地尔硫卓	42399-41-7	2.79	415	178	130	25
				150	130	25
泰乐菌素	1401-69-0	1.63	916.3	772	110	35
				174	110	35
卡马西平	289-46-4	2.45	237	194	110	15
				179	110	35
氟西汀	54910-89-3	3.96	310	148	110	5

1) 使用 EPI Suite 软件 (USEPA) 计算

表 2 10 种 PPCPs 化合物加标回收率

Table 2 Recovery test of 10 PPCPs

化合物	添加浓度 (水样) $100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ( $n=5$ )			添加含量 (沉积物) $50.0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ( $n=5$ )		
	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	相对标准偏差/%	回收率/%	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	相对标准偏差/%	回收率/%
对乙酰氨基酚	85.2	0.953	85.2	40.3	0.563	79.5
林可霉素	145	1.98	145	80.9	1.58	160
咖啡因	94.7	0.784	94.7	42.8	0.354	92.7
甲氧苄啶	107	1.66	107	58.7	1.02	117
阿奇霉素	142	2.65	142	74.3	1.86	149
磺胺甲噁唑	95.6	1.36	95.6	48.4	0.881	96.3
地尔硫卓	94.4	1.45	94.4	44.1	0.764	92.2
泰乐菌素	82.7	1.86	82.7	38.4	1.98	71.1
卡马西平	93.5	0.762	93.5	47.8	0.352	94.2
氟西汀	94.9	1.54	94.9	45.7	1.24	91.3

## 2 结果与讨论

### 2.1 PPCPs 在北京城区水体中的分布

PPCPs 在北京城区水体中的浓度见表 3, 河流表层水体中 10 种 PPCPs 的总浓度的几何均值范围为 N. D.  $\sim 98.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其检出率为 0  $\sim$  100%. 湖泊中 10 种 PPCPs 的总浓度的几何均值范围为 N.

D.  $\sim 165.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其检出率为 0  $\sim$  100%. 在各条河流表层水体中, 磺胺甲噁唑、地尔硫卓和泰乐菌素均未检出, 其余 7 种 PPCPs 的检出率范围为 68%  $\sim$  100%. 湖泊表层水体中磺胺甲噁唑、地尔硫卓、泰乐菌素和卡马西平均未检出, 其余 6 种 PPCPs 的检出率范围为 60%  $\sim$  100%, 其中对乙酰氨基酚、林可霉素、咖啡因和阿奇霉素的检测率都为 100%.

在各条河流和城区湖泊水体中,咖啡因的检出含量的几何均值最高,分别为  $98.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $165.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 总体来说,城区河流与城区湖泊表层水体中的 PPCPs 含量差别不大.

表 3 北京城区河流及湖泊表层水体中 10 种 PPCPs 的浓度<sup>1)</sup>/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Concentrations of 10 PPCPs in surface water of rivers and lakes from Beijing/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

化合物	河流 ( $n=34$ )				湖泊 ( $n=10$ )			
	浓度范围	中值	几何均值	检出率/%	浓度范围	中值	几何均值	检出率/%
对乙酰氨基酚	N. D. ~200	4.5	2.32	71	2.97 ~ 38.77	13.7	15.04	100
林可霉素	N. D. ~10.8	2.17	1.65	71	1.53 ~ 2.65	2.23	2.21	100
咖啡因	1.75 ~ 655	176.6	98	100	41.8 ~ 252	181.8	165.8	100
甲氧苄啶	N. D. ~60.3	2	2.1	74	N. D. ~6.47	1.3	1.43	60
阿奇霉素	N. D. ~13.8	7.03	5.3	77	7.2 ~ 8.71	7.73	7.95	100
磺胺甲噁唑	N. D.	N. D.	N. D.	0	N. D.	N. D.	N. D.	0
地尔硫卓	N. D.	N. D.	N. D.	0	N. D.	N. D.	N. D.	0
泰乐菌素	N. D.	N. D.	N. D.	0	N. D.	N. D.	N. D.	0
卡马西平	N. D. ~49.0	1.06	1.06	68	N. D.	N. D.	N. D.	0
氟西汀	N. D. ~1.34	2.46	1.24	71	N. D. ~1.34	1.27	1.12	80

1) N. D. : 未检出,下同

## 2.2 PPCPs 在北京城区水体沉积物中的分布

PPCPs 在北京城区沉积物中的含量见表 4, 河流沉积物中 10 种 PPCPs 的总含量的几何均值范围为  $1.3 \times 10^{-3} \sim 8.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其检出率为 4% ~ 96%. 湖泊沉积物中 10 种 PPCPs 的总含量的几何均值范围为 N. D. ~  $2.07 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其检出率为 0 ~ 100%. 在各条河流沉积物中, 泰乐菌素、咖啡因和卡马西平的检出率低于 50%, 分别为 4%、26% 和 44%, 其余 7 种

PPCPs 的检出率范围为 57% ~ 96%. 城区湖泊表层沉积物中泰乐菌素、咖啡因和卡马西平均未检出, 氟西汀的检出率为 20%, 其余 6 种 PPCPs 的检出率范围为 60% ~ 100%. 在各条河流和城区湖泊沉积物中, 阿奇霉素的检出含量的几何均值最高, 分别为  $8.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $2.07 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 且其检出率较高, 分别为 87% 和 80%. 总体来说, 城区河流与城区湖泊表层沉积物中的 PPCPs 含量差别不大.

表 4 北京城区河流与湖泊表层沉积物中 10 种 PPCPs 的含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 4 Concentrations of 10 PPCPs in sediments of rivers and lakes from Beijing/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

化合物	河流 ( $n=23$ )				湖泊 ( $n=5$ )			
	含量范围	中值	几何均值	检出率/%	含量范围	中值	几何均值	检出率/%
对乙酰氨基酚	N. D. ~2.03	0.306	0.19	87	N. D. ~1.22	0.414	0.05	60
林可霉素	N. D. ~47.8	1.95	0.72	83	N. D. ~14.6	2.36	0.184	60
咖啡因	N. D. ~1.74	N. D.	$3.6 \times 10^{-3}$	26	N. D.	N. D.	N. D.	0
甲氧苄啶	N. D. ~5.02	0.794	0.74	96	N. D. ~5.92	1.22	0.39	80
阿奇霉素	N. D. ~1709	12.4	8.10	87	N. D. ~35.9	10	2.07	80
磺胺甲噁唑	N. D. ~0.35	0.0435	0.016	61	N. D. ~0.407	0.1	0.023	60
地尔硫卓	N. D. ~2.73	0.406	0.24	87	0.559 ~ 2.09	0.637	0.8	100
泰乐菌素	N. D. ~0.431	N. D.	$1.3 \times 10^{-3}$	4	N. D.	N. D.	N. D.	0
卡马西平	N. D. ~1.12	N. D.	$9.1 \times 10^{-3}$	44	N. D.	N. D.	N. D.	0
氟西汀	N. D. ~8.62	0.899	0.082	57	N. D. ~6.12	N. D.	$5.7 \times 10^{-3}$	20

## 2.3 北京城区各河流及湖泊水体中 PPCPs 的分布情况

PPCPs 的空间分布受人类活动、畜牧养殖和水产养殖的影响, 总的来说主要是受人为影响和畜牧养殖业的影响. 对乙酰氨基酚、咖啡因、地尔硫卓和卡马西平等都是人类使用药, 泰乐菌素是畜牧业使用药, 阿奇霉素、林可霉素、甲氧苄啶和磺胺甲噁

唑是人和动物都能使用的药物<sup>[3, 14, 15]</sup>. 许多 PPCPs 化合物水溶性较强, 但是有些 PPCPs 还是可以通过吸附、络合、共沉淀等方式从水体迁移至沉积物中<sup>[16]</sup>.

咖啡因在北京城区河流及湖泊表层水体中的含量及检出率较高, 为这 10 种 PPCPs 中的优势污染物, 10 条河流及 3 个湖泊中咖啡因的含量如图 2 所

示. 咖啡因是一种常见的中枢兴奋药, 对大脑皮层具有选择性兴奋作用, 常在咖啡、茶、巧克力及可乐型饮料中用作兴奋剂、苦味剂和香料; 咖啡因也是一种重要的解热镇痛药, 复方阿司匹林的主要成分之一. 咖啡因在当今社会使用非常广泛, 每年生产含有咖啡因的商品达到成千上万吨<sup>[17]</sup>. 人类不合理的生活方式: 如生活污水直接排入河流, 过期的药物直接丢入下水道或者直接丢入环境中, 经过雨水冲刷和直接排入河流进入水环境, 造成水体中咖啡因的含量较高. 由于咖啡因较高的水溶解性 ( $21.7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 及难挥发性, 人类直接或间接丢弃在水环境中的咖啡因会在水环境中长时间的存在<sup>[18]</sup>.

各条河流表层水样中, 坝河和通惠河中咖啡因的含量较高, 可能是由于坝河接收来自 W2 和 W3 污水处理厂的出水, 通惠河接收来自 W4 污水处理厂的出水, 生活污水经过污水处理厂没有被完全去除, 随污水处理厂出水进入坝河和通惠河中. 各条河流沉积物中咖啡因的含量较低, 可能是由于咖啡因具有较高的水溶解性, 大部分咖啡因都溶解于水中, 在沉积物中的分布较少.

其余 9 种 PPCPs 在 10 条河流及 3 个湖泊中的含量如图 3 所示, 永定引水渠、坝河和西海中的

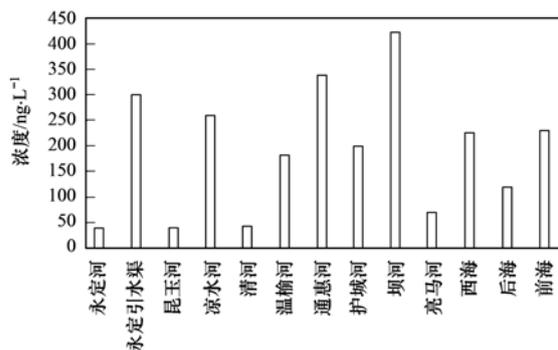


图 2 咖啡因在各条河流及湖泊表层水中的浓度

Fig. 2 Concentrations of caffeine in surface water of rivers and lakes from Beijing

PPCPs 含量较高, 永定引水渠周边居民区非常集中, 周边存在许多生活污水排放口, 增加了永定引水渠表层水体中 PPCPs 的含量; 其周边还有北京肿瘤医院及北京定慧医院, 医院废水可能是永定引水渠表层水体 PPCPs 的另一来源. 坝河表层水体中 PPCPs 含量较高, 可能是由于坝河接收了来自 W2 和 W3 污水处理厂出水, 污水处理厂没有完全去除污水中的 PPCPs, 造成坝河表层水体中 PPCPs 含量较高. 西海中 PPCPs 含量较高, 这可能是由于西海接收了附近居民生活污水排放和部分医院废水.

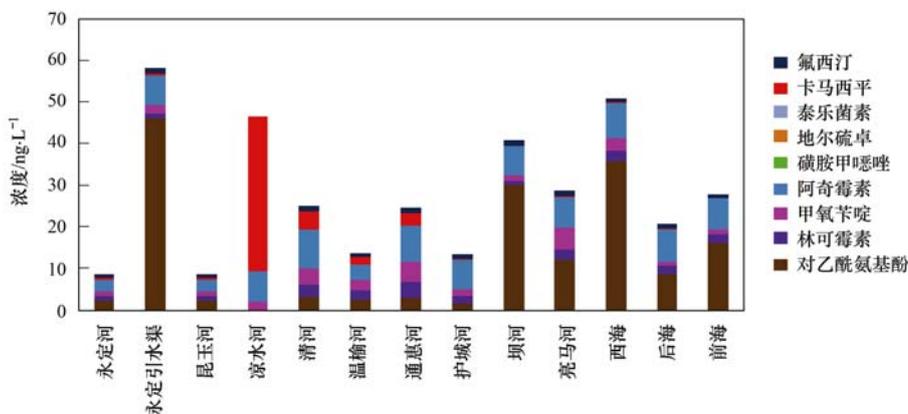


图 3 9 种 PPCPs 在各条河流及湖泊表层水中的浓度

Fig. 3 Concentrations of 9 PPCPs in surface water of rivers and lakes from Beijing

#### 2.4 北京城区各个河流表层沉积物中 PPCPs 的分布情况

阿奇霉素在北京城区河流及湖泊表层沉积物中的含量及检出率较高, 为表层沉积物中 10 种 PPCPs 的优势污染物, 10 条河流及 3 个湖泊中阿奇霉素的含量如图 4 所示. 阿奇霉素为大环内酯类抗生素, 主要用于治疗呼吸道及生殖道感染. 可治疗多种病原体引起的儿童及成人的呼吸道感染、生殖道沙眼及衣原体感染等, 并被多个国家(中国、美国、日本

等)的医学指南推荐作为上述感染的一线治疗药物. 阿奇霉素的水溶性较差, 故其在水环境中的存在大部分会随颗粒物的吸附进入沉积物中. 尽管阿奇霉素在几天之内就能降解<sup>[19]</sup>, 但是由于其大量持续性的使用, 仍然造成北京城区河流及湖泊中有较高的检出. 在各条河流和湖泊沉积物中, 清河、坝河和通惠河中阿奇霉素的含量较高, 这可能是由于清河和坝河会接收 W1、W2 和 W3 等污水处理厂出水, 通惠河接收来自 W4 污水处理厂出水造成的.

9 条河流和 3 个湖泊沉积物中的 9 种 PPCPs 的

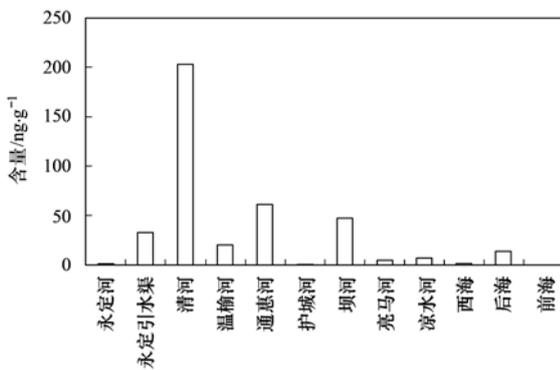


图 4 阿奇霉素在各条河流样品中的分布情况

Fig. 4 Concentrations of azithromycin in surface sediments of rivers and lakes from Beijing

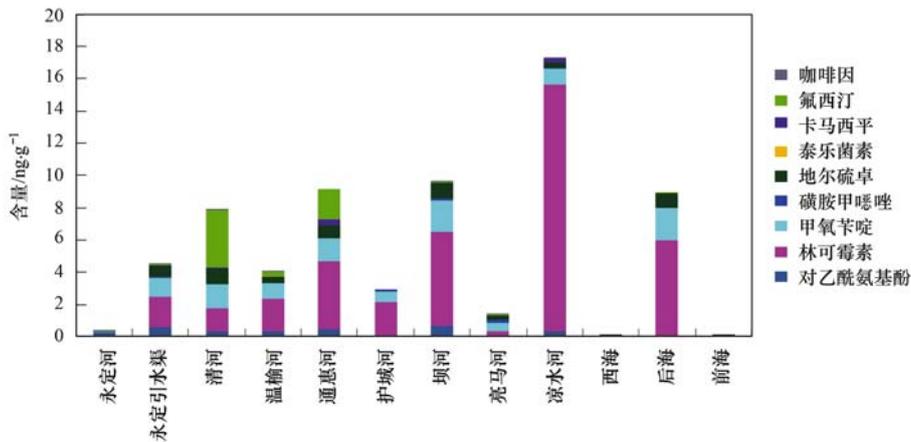


图 5 9 种 PPCPs 在各条河流沉积物中的含量

Fig. 5 Concentrations of 9 PPCPs in surface sediments of rivers and lakes from Beijing

## 2.5 PPCPs 在北京城区水及沉积物中的分配情况

污染物在水及沉积物中的分配受多种因素的影响,如温度、pH、水体扰动及污染物的  $\lg K_{ow}$  等,其中  $\lg K_{ow}$  是影响污染物在水及沉积物中分配的十分重要的因素。北京城区河流及湖泊水环境中 PPCPs 的浓度除咖啡因外,其他 9 种 PPCPs 的含量均为沉积物中高于水体中。咖啡因在北京城区河流及湖泊表层水体中的浓度最高,检出率也高,为水体中的优势污染物,这可能是由于咖啡因的  $\lg K_{ow}$  (-0.07) 较小,具有极强的亲水性,所以其在河流及湖泊水体中的浓度较高,而在沉积物中的含量较低。地尔硫卓和泰乐菌素在北京城区河流和湖泊表层水体中均没有检出,这 2 种 PPCPs 的  $\lg K_{ow}$  分别为 2.79 和 1.63,具有一定的憎水性,所以其在水体中的检出浓度和检出率都很低。阿奇霉素在沉积物中的含量最高,其  $\lg K_{ow}$  为 4.02,具有很强的憎水性,所以其在沉积物中的含量较高,而在北京城区河流和湖泊表层水

总量如图 5 所示,在各条河流沉积物中,坝河、通惠河及凉水河沉积物中 9 种 PPCPs 的含量较高,可能是由于坝河、通惠河及凉水河分别接收来自 W3、W4 及 W5 污水处理厂的出水造成的。9 种 PPCPs 中,林可霉素在各条河流中的含量较高,林可霉素可用于治疗由葡萄球菌、化脓性链球菌、肺炎球菌及厌氧菌所致的呼吸道感染、皮肤软组织感染、女性生殖道及盆腔感染和厌氧菌所致的腹腔感染等。在凉水河中林可霉素的含量最高,可能是由于其接收来自 W5 污水处理厂出水造成的,并且凉水河是从西北向东南方向流出北京,在北京城区可能也接收了大量生活污水及医院废水,导致其沉积物中林可霉素含量较高。

体中的含量较低。对乙酰氨基酚、林可霉素和磺胺甲噁唑的  $\lg K_{ow}$  分别为 0.46、0.56 和 0.89,其具有较强的亲水性,但是其在沉积物中也有较高的检出,可能是这 3 种 PPCPs 通过吸附、络合、共沉淀等方式从水体迁移至沉积物中<sup>[16]</sup>。卡马西平和氟西汀的  $\lg K_{ow}$  分别为 2.45 和 3.96,具有较强的憎水性,但是其在北京城区河流及湖泊表层水体中也有检出,可能是由于河流及湖泊水体扰动等原因,造成沉积物中的卡马西平及氟西汀再次释放到表层水体中。

## 2.6 北京城区水及沉积物中 PPCPs 的组成情况

为了更好地说明北京城区表层水体及沉积物中 PPCPs 的组成情况,对本研究的结果与其他国家研究的相关报道进行对比(表 5),结果显示,从 PPCPs 的数量看,本研究检测出 PPCPs 的数量相比以往许多研究处于中等水平,例如,在美国科罗拉多河流域,有四环素类、磺胺类和大环内酯类等 3 类 15 种抗生素检出<sup>[20]</sup>;在欧洲一些国家,如英国的塔夫河

和伊利河,有四环素类、磺胺类及二氨基嘧啶类等 3 类 5 种抗生素检出<sup>[21]</sup>,法国的塞纳河,有喹诺酮类、磺胺类、硝基咪唑类和二氨基嘧啶类等 4 类 17 种抗生素检出<sup>[22]</sup>,且其环境中 PPCPs 大部分都来自于人类的排放;然而在韩国内麟川,有 4 种抗生素被检出,这些抗生素大部分都是比较廉价的,而且其主要来源是畜牧业养殖<sup>[23]</sup>;本研究选取了 10 种 PPCPs,其中有大环内酯类抗生素、磺胺类抗生素、精神兴奋剂、抗惊厥药及甲氧苄啶等药物,并且这 10 种 PPCPs 在北京城区河流和湖泊表层水体或沉积物中大部分有检出,其中污水处理厂出水排放、人类医

学用药排放、畜牧业养殖和水产养殖对北京城区河流及湖泊表层水体及沉积物中的 PPCPs 都有较大的贡献,这表明北京城区水环境中的 PPCPs 是受多种复合污染源共同作用的结果. 在发展中国家,农业、畜牧业和水产养殖业是重要的经济活动,畜牧业和水产养殖业所产生的废水是当地水环境中 PPCPs 的潜在输入源;在发达国家,人类用药排放是环境中 PPCPs 的主要污染源<sup>[24]</sup>. 中国是生产和消费抗生素的大国<sup>[25]</sup>,污水处理厂出水、人类医学用药排放、畜牧业和水产养殖业废水排放等对北京城区水环境中的 PPCPs 污染都可能有一定的贡献.

表 5 世界其他地区水体沉积物中 PPCPs 研究数量、种类及主要用途

Table 5 Number, classes and main origin of PPCPs in Taihu Lake and other water bodies around the world

研究区域	PPCPs 数量	PPCPs 种类	主要用途	文献
科罗拉多河流域,美国	15	四环素类、大环内酯类抗生素	人、动物	[20]
塔夫河和伊利河,英国	5	大环内酯类、磺胺类抗生素及甲氧苄啶	人	[21]
珠江三角洲,中国	9	四环素类、磺胺类抗生素	人类、动物	[26]
玄武湖,中国	4	$\beta$ -内酰胺类抗生素	人类、动物	[27]
内麟川,韩国	6	四环素类、磺胺类抗生素	动物	[23]
太湖,中国	15	大环内酯类、磺胺类、喹诺酮类、四环素类抗生素、甲氧苄啶	人、动物	[28]
太湖,中国	9	大环内酯类、磺胺类抗生素、中枢兴奋剂、抗抑郁药及甲氧苄啶	人、动物	[29]
北京城区河流,中国	10	大环内酯类、磺胺类抗生素、中枢兴奋剂、抗抑郁药及甲氧苄啶	人、动物	本研究

## 2.7 北京城区表层水体及沉积物中 PPCPs 存在的潜在风险

为研究北京表层水体及沉积物中 PPCPs 对水生生态系统的影响,采用风险商值(RQ)评价 PPCPs 残留对水生生态系统存在的潜在风险<sup>[30-33]</sup>,其计算公式如下:

$$RQ_{\text{water}} = MEC/PNEC_{\text{water}} \quad (1)$$

$$RQ_{\text{sediment}} = MEC/PNEC_{\text{sediment}} \quad (2)$$

$$PNEC_{\text{water}} = LC_{50}/AF \text{ 或 } EC_{50}/AF \quad (3)$$

$$PNEC_{\text{sediment}} = PNEC_{\text{water}} \times K_d \quad (4)$$

$$K_d = K_{oc} \times F_{oc} \quad (5)$$

$$\lg K_{oc} = 0.623 \lg K_{ow} + 0.873 \quad (6)$$

式中,MEC 为环境实测浓度,单位为  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $PNEC_{\text{water}}$  为水体中预测无效应浓度,是在现有的认知下不会对环境中微生物或生态系统产生不利效应的最大药物浓度,单位为  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $LC_{50}$  为半致死浓度,  $EC_{50}$  为半最大效应浓度,单位为  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $LC_{50}$  和  $EC_{50}$  均由文献中取得,当存在多个值时,取最小值; AF 为评价因子,取欧盟 Water Framework Directive 的推荐值(1 000);  $PNEC_{\text{sediment}}$  为沉积物中预测无效应含量,单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $K_d$  为沉积物-水分配系数;

$K_{oc}$  为有机化合物吸着系数,单位为  $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $F_{oc}$  为有机碳在沉积物中的吸着系数( $F_{oc} = 0.03 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ );  $K_{ow}$  为水/辛醇分配系数,单位为  $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 当  $0.01 \leq RQ < 0.1$  为低风险;  $0.10 \leq RQ < 1.00$  为中风险;  $RQ \geq 1.00$  为高风险.

本研究根据已有报道,计算得到本研究中目标化合物的预测无效应浓度,再根据风险商值计算公式,得到北京城区河流及湖泊表层水及沉积物中 10 种 PPCPs 的风险商值,结果见表 6、表 7. 可以看出,北京城区河流及湖泊表层水体中的 10 种 PPCPs 的 RQ 值均低于 0.1,对河流水生生态环境具有低风险. 城区河流及湖泊沉积物中,对乙酰氨基酚对永定引水渠、通惠河及坝河底栖生态环境具有中等风险;林可霉素对永定引水渠、温榆河、通惠河、护城河、坝河、凉水河及后海底栖生态环境具有中等风险;甲氧苄啶对永定引水渠、清河、温榆河、通惠河、护城河、坝河、亮马河、凉水河及后海底栖生态环境具有中等风险;阿奇霉素对亮马河及凉水河底栖生态环境具有中等风险,对永定引水渠、清河、温榆河、通惠河、坝河及后海底栖生态环境具有高风险.

表 6 北京城区表层水体中 PPCPs 的  $PNEC_{water}$  及风险商值Table 6 Values of  $PNEC_{water}$  and RQ of PPCPs in surface water from rivers and lakes of Beijing

化合物	$PNEC_{water}$ / $ng \cdot L^{-1}$	$RQ_{water}$						
		永定河	永定引水渠	昆玉河	凉水河	清河	温榆河	通惠河
对乙酰氨基酚	$9.2 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-4}$	0	$3.6 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$
林可霉素	$3.5 \times 10^4$	$3.6 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-5}$	0	$8.2 \times 10^{-5}$	$6.5 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-4}$
咖啡因	$8.7 \times 10^4$	$4.9 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$5.4 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-3}$
甲氧苄啶	$2.6 \times 10^3$	$3.8 \times 10^{-4}$	$7.8 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$8.2 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$9.9 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-3}$
阿奇霉素	$1.5 \times 10^2$	$1.9 \times 10^{-2}$	$4.8 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-2}$	$4.8 \times 10^{-2}$	$6.3 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-2}$	$5.7 \times 10^{-2}$
磺胺甲噁唑	$2.0 \times 10^4$	0	0	0	0	0	0	0
地尔硫卓	$6.0 \times 10^3$	0	0	0	0	0	0	0
泰乐菌素	$3.4 \times 10^2$	0	0	0	0	0	0	0
卡马西平	$3.5 \times 10^4$	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-5}$	$8.8 \times 10^{-5}$
氟西汀	$3.8 \times 10^3$	$2.7 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$	0	$3.4 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$

化合物	$PNEC_{water}$ / $ng \cdot L^{-1}$	$RQ_{water}$						
		护城河	坝河	亮马河	西海	后海	前海	
对乙酰氨基酚	$9.2 \times 10^3$	$1.8 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$9.4 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-3}$	
林可霉素	$3.5 \times 10^4$	$5.5 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$7.4 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-5}$	$6.1 \times 10^{-5}$	$5.9 \times 10^{-5}$	
咖啡因	$8.7 \times 10^4$	$2.3 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-3}$	$8.3 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	
甲氧苄啶	$2.6 \times 10^3$	$5.8 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-4}$	
阿奇霉素	$1.5 \times 10^2$	$4.7 \times 10^{-2}$	$4.7 \times 10^{-2}$	$4.9 \times 10^{-2}$	$5.6 \times 10^{-2}$	$5.2 \times 10^{-2}$	$4.9 \times 10^{-2}$	
磺胺甲噁唑	$2.0 \times 10^4$	0	0	0	0	0	0	
地尔硫卓	$6.0 \times 10^3$	0	0	0	0	0	0	
泰乐菌素	$3.4 \times 10^2$	0	0	0	0	0	0	
卡马西平	$3.5 \times 10^4$	$8.0 \times 10^{-6}$	$4.1 \times 10^{-6}$	$7.6 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$	
氟西汀	$3.8 \times 10^3$	$2.8 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-4}$	

表 7 北京城区水体表层沉积物中 PPCPs 的  $PNEC_{sediment}$  及风险商值Table 7 Values of  $PNEC_{sediment}$  and RQ of PPCPs in surface sediments from rivers and lakes of Beijing

化合物	$PNEC_{sediment}$ / $\mu g \cdot kg^{-1}$	$RQ_{sediment}$						
		永定河	永定引水渠	清河	温榆河	通惠河	护城河	
对乙酰氨基酚	4.00	$5.7 \times 10^{-2}$	0.135	$6.6 \times 10^{-2}$	$7.8 \times 10^{-2}$	0.110	$3.8 \times 10^{-3}$	
林可霉素	17.3	0	0.109	$8.3 \times 10^{-2}$	0.116	0.243	0.122	
咖啡因	17.5	0	$6.3 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-6}$	$6.6 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-6}$	
甲氧苄啶	2.15	$2.4 \times 10^{-2}$	0.544	0.704	0.450	0.673	0.310	
阿奇霉素	10.8	$1.0 \times 10^{-3}$	3.12	18.8	1.89	5.73	$6.6 \times 10^{-3}$	
磺胺甲噁唑	16.2	$2.0 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-4}$	$6.2 \times 10^{-5}$	$7.4 \times 10^{-4}$	
地尔硫卓	73.8	$8.4 \times 10^{-5}$	$9.1 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$5.1 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-4}$	
泰乐菌素	0.796	0	0	0	$4.2 \times 10^{-3}$	0	0	
卡马西平	257	0	$7.2 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-5}$	
氟西汀	249	0	$2.4 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^{-3}$	0	

化合物	$PNEC_{sediment}$ / $\mu g \cdot kg^{-1}$	$RQ_{sediment}$						
		坝河	亮马河	凉水河	西海	后海	前海	
对乙酰氨基酚	4.00	0.153	$3.0 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-2}$	$6.1 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$5.1 \times 10^{-3}$	
林可霉素	17.3	0.337	$1.6 \times 10^{-2}$	0.885	0	0.344	0	
咖啡因	17.5	$1.9 \times 10^{-5}$	$9.2 \times 10^{-7}$	$5.1 \times 10^{-5}$	0	$2.0 \times 10^{-5}$	0	
甲氧苄啶	2.15	0.922	0.251	0.467	0	0.927	$1.5 \times 10^{-2}$	
阿奇霉素	10.8	4.49	0.468	0.706	$1.0 \times 10^{-2}$	1.36	0	
磺胺甲噁唑	16.2	$8.1 \times 10^{-3}$	$9.5 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-3}$	0	
地尔硫卓	73.8	$1.3 \times 10^{-2}$	$3.8 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^{-3}$	$3.7 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-4}$	
泰乐菌素	0.796	0	0	0	0	0	0	
卡马西平	257	0	0	$9.4 \times 10^{-4}$	0	0	0	
氟西汀	249	$2.8 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-4}$	0	0	$7.3 \times 10^{-5}$	0	

### 3 结论

(1) 北京城区河流及湖泊表层水体中 PPCPs 的浓度范围分别为 N. D.  $\sim 655 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和 N. D.  $\sim 252 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 沉积物中 PPCPs 含量范围分别为 N. D.  $\sim 1709 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和 N. D.  $\sim 35.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . 其中咖啡因在水体中的浓度及检出率较高, 为水体中 10 种 PPCPs 的优势污染物, 阿奇霉素在沉积物中的含量及检出率较高, 为沉积物中 10 种 PPCPs 的优势污染物.

(2) 永定引水渠、凉水河、通惠河及坝河表层水体及沉积物中 PPCPs 的含量较高, 这可能是由于河流两岸人口集中, 并且有污水处理厂出水的汇入, PPCPs 持续不断地排入这几条河流中. PPCPs 通过吸附、络合及共沉淀等方式从水体迁移至沉积物中, 造成这几条河流表层沉积物中 PPCPs 的含量较高.

(3) 运用 RQ 模型对 10 种 PPCPs 在北京城区河流及湖泊表层水体及沉积物中的残留对水生生态系统潜在风险进行评价, 发现北京城区河流及湖泊表层水体中的 10 种 PPCPs 的 RQ 值均低于 0.1, 对河流水生生态环境具有低风险. 部分河流及湖泊沉积物中的对乙酰氨基酚、林可霉素、甲氧苄啶和阿奇霉素对底栖水生生物具有中等风险; 阿奇霉素对永定引水渠、清河、温榆河、通惠河、坝河及后海底栖生态环境具有高风险.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Smital J, Wolf J, De Sousa L L. Estimation of genetic parameters of semen characteristics and reproductive traits in AI boars[J]. *Animal Reproduction Science*, 2005, **86**(1-2): 119-130.
- [ 2 ] Jjemba P K. Excretion and ecotoxicity of pharmaceutical and personal care products in the environment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **63**(1): 113-130.
- [ 3 ] Kümmerer K. Antibiotics in the aquatic environment—a review—part I[J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(4): 417-434.
- [ 4 ] Kim S C, Carlson K. Occurrence of ionophore antibiotics in water and sediments of a mixed-landscape watershed [J]. *Water Research*, 2006, **40**(13): 2549-2560.
- [ 5 ] Kolpin D W, Skopec M, Meyer M T, *et al.* Urban contribution of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants to streams during differing flow conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **328**(1-3): 119-130.
- [ 6 ] Kasprzyk-Hordern B, Dinsdale R M, Guwy A J. The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK[J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3498-3518.
- [ 7 ] Fernández C, González-Doncel M, Pro J, *et al.* Occurrence of pharmaceutically active compounds in surface waters of the Henares-jarama-Tajo River system ( Madrid, Spain ) and a potential risk characterization [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(3): 543-551.
- [ 8 ] Yoon Y, Ryu J, Oh J, *et al.* Occurrence of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in the Han River ( Seoul, South Korea ) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(3): 636-643.
- [ 9 ] Spongberg A L, Witter J D, Acuña J, *et al.* Reconnaissance of selected PPCP compounds in Costa Rican surface waters [J]. *Water Research*, 2011, **45**(20): 6709-6717.
- [ 10 ] Tewari S, Jindal R, Kho Y L, *et al.* Major pharmaceutical residues in wastewater treatment plants and receiving waters in Bangkok, Thailand, and associated ecological risks [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(5): 697-704.
- [ 11 ] Richardson B J, Lam P K S, Martin M. Emerging chemicals of concern: pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Asia, with particular reference to Southern China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(9): 913-920.
- [ 12 ] Bu Q W, Wang B, Huang J, *et al.* Pharmaceuticals and personal care products in the aquatic environment in China: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 189-211.
- [ 13 ] Dai G H, Wang B, Huang J, *et al.* Occurrence and source apportionment of pharmaceuticals and personal care products in the Beiyun River of Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1033-1039.
- [ 14 ] Jacobsen A M, Halling-Sørensen B, Ingerslev F, *et al.* Simultaneous extraction of tetracycline, macrolide and sulfonamide antibiotics from agricultural soils using pressurised liquid extraction, followed by solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, **1038**(1-2): 157-170.
- [ 15 ] Luo Y L, Guo W S, Ngo H H, *et al.* A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **473-474**: 619-641.
- [ 16 ] Chen Y S, Yu S, Hong Y W, *et al.* Pharmaceutical residues in tidal surface sediments of three rivers in southeastern China at detectable and measurable levels [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8391-8403.
- [ 17 ] Gardinali P R, Zhao X. Trace determination of caffeine in surface water samples by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry (LC-APCI-MS) [J]. *Environment International*, 2002, **28**(6): 521-528.
- [ 18 ] Seiler R L, Zaugg S D, Thomas J M, *et al.* Caffeine and pharmaceuticals as indicators of waste water contamination in wells [J]. *Ground Water*, 1999, **37**(3): 405-410.
- [ 19 ] Tong L, Eichhorn P, Pérez S, *et al.* Photodegradation of azithromycin in various aqueous systems under simulated and natural solar radiation: kinetics and identification of photoproducts [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(3): 340-348.
- [ 20 ] Kim S C, Carlson K. Temporal and spatial trends in the occurrence of human and veterinary antibiotics in aqueous and river sediment matrices [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(1): 50-57.
- [ 21 ] Kasprzyk-Hordern B, Dinsdale R M, Guwy A J. The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters [J]. *Water Research*, 2009, **43**(2): 363-380.

- [22] Tamtam F, Mercier F, Le B B, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics in the Seine River in various hydrological conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **393**(1): 84-95.
- [23] Awad Y M, Kim S C, Abd El-Azeem S A M, *et al.* Veterinary antibiotics contamination in water, sediment, and soil near a swine manure composting facility [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(3): 1433-1440.
- [24] Scheurer M, Michel A, Brauch H J, *et al.* Occurrence and fate of the antidiabetic drug metformin and its metabolite guanylurea in the environment and during drinking water treatment [J]. *Water Research*, 2012, **46**(15): 4790-4802.
- [25] Liu J L, Wong M H. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a review on environmental contamination in China [J]. *Environment International*, 2013, **59**: 208-224.
- [26] Liang X M, Chen B W, Nie X P, *et al.* The distribution and partitioning of common antibiotics in water and sediment of the Pearl River Estuary, South China [J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(11): 1410-1416.
- [27] Jiang M X, Wang L H, Ji R. Biotic and abiotic degradation of four cephalosporin antibiotics in a lake surface water and sediment [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(11): 1399-1405.
- [28] Xu J, Zhang Y, Zhou C B, *et al.* Distribution, sources and composition of antibiotics in sediment, overlying water and pore water from Taihu Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **497-498**: 267-273.
- [29] 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 等. 太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3348-3355.
- Zhang P W, Zhou H D, Zhao G F, *et al.* Spatial, temporal distribution characteristics and potential risk of PPCPs in surface sediments from Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3348-3355.
- [30] EC (European Commission). European commission technical guidance document on risk assessment in support of commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances and commission regulation (EC) No. 1488/94 on risk assessment for existing substance, Part II [R]. Ispra, Italy: EC (European Commission), 2003: 100-103.
- [31] 朴海善, 陶澍, 胡海瑛, 等. 根据水/辛醇分配系数( $K_{ow}$ )估算有机化合物的吸着系数( $K_{oc}$ ) [J]. *环境科学与技术*, 1999, (4): 8-13.
- Piao H S, Tao S, Hu H Y, *et al.* Estimation of sorption coefficients of organic compounds with  $K_{ow}$  [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, (4): 8-13.
- [32] Vryzas Z, Alexoudis C, Vassiliou G, *et al.* Determination and aquatic risk assessment of pesticide residues in riparian drainage canals in northeastern Greece [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(2): 174-181.
- [33] Zhu S C, Chen H, Li J N. Sources, distribution and potential risks of pharmaceuticals and personal care products in Qingshan Lake basin, Eastern China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **96**: 154-159.

## CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District .....	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing .....	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province .....	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China .....	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City .....	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing .....	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant .....	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma .....	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng .....	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou .....	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai .....	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle .....	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China .....	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method .....	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas .....	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill .....	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater .....	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark .....	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production .....	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells .....	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters .....	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus .....	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values .....	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water .....	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms .....	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network .....	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System .....	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process .....	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe <sup>(0)</sup> -activated Carbon and Its Influencing Factors .....	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies .....	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR .....	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe .....	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater .....	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 .....	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization .....	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge .....	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region .....	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin .....	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N <sub>2</sub> O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping .....	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N <sub>2</sub> O Emissions from Soils of Different Surface Conditions .....	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China .....	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China .....	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake .....	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil .....	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil .....	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar .....	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch .....	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar .....	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr Composite Photocatalyst .....	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)