

环境科学

(HUANJING KEXUE)

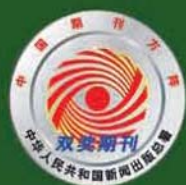
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年北京市两次红色预警期间PM _{2.5} 浓度特征	
.....程念亮,张大伟,陈添,石爱军,孙峰,刘保献,邹本东,王琴,李倩,王小菊,姜磊,孟凡(2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南,熊黑钢,葛秀秀,段鹏程,毛先如,王亚龙(2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红,饶志国,谭吉华,段晋春,马永亮,贺克斌(2428)
南京北郊冬季PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞,马嫣,亓鲁,王振,王利朋,朱麟(2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文,盛立芳,刘骞,李秀镇(2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春,塔西甫拉提·特依拜,侯艳军,高宇潇,刘芳,夏楠(2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹,王建力(2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
.....徐敬争,肖薇,肖启涛,王伟,温学发,胡诚,刘诚,刘寿东,李旭辉(2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征:以重庆市马鞍溪为例	
.....张宇,杨平恒,王建力,谢世友,陈峰,詹兆君,任娟,张海月,刘黛薇,孟元可(2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽,蒲俊兵,李建鸿,于爽,肖琼,张陶(2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征:紫外-可见吸收光谱	
.....梁俭,江韬,卢松,魏世强,王定勇,陈雪霜,王齐磊(2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征:荧光光谱	
.....梁俭,江韬,卢松,魏世强,王定勇,陈雪霜,王齐磊(2506)	
华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
.....金磊,姜蕾,韩琪,薛佳怡,叶辉,曹国民,林匡飞,崔长征(2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方,杨军,杜鹏,王琮淙,李喜青(2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛,赵兴茹,付青,郭睿,王山军(2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖,李琦,赵佳渊,王登祥(2539)
岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰,孙玉川,张媚,廖昱,江泽利,王尊波,梁作兵(2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵,刘硕,万鲁河,王宏(2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹,孙寓姣,赵轩,王蕾,郑丹阳(2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红,张汉鹏,罗专溪(2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛,杨扬,戴玉女,万翔,邹义萍,樊静静(2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强,傅学敏,刘丽君,卢小艳,张金松,刘嘉祺,曲莹(2586)
活性炭负载Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙G	王忠明,陈家斌,张黎明,李文卫,黄天寅(2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学	张黎明,陈家斌,李文卫,王忠明,黄天寅(2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞,唐柏彬,张进忠,汤民,刘江(2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究	
.....舒小铭,徐灿灿,文晓刚,朱静娜,赵远,刘锐,陈吕军(2618)	
Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究	陈思,徐灿灿,刘锐,李国华,陈吕军,郑伟(2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春,张晶,张静,陈晓轩,张磊,曹丽亚(2632)
基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究	鲍林林,陈婉秋(2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥,马航,黄勇,朱亮,杨朋兵,朱强(2646)
基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
.....陈重军,张海芹,汪瑶琪,喻徐良,王建芳,沈耀良(2652)	
NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠,仇皓雨,车昱晓,张松贺,郭照冰,张毅敏(2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞,王艳,杨期勇,汤明,刘天中(2666)
拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝,郝健,孙俊松,史吉平(2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰,李秋芬,费聿涛,张艳(2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超,蒙小俊,尹莉,张玉秀,李海波,曹宏斌(2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳,阳石页,阙治家,熊金波(2696)
磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵,贺学礼,王少杰,赵丽莉(2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢,王蕊,李如剑,杜兰兰,吴得峰,孙棋棋,高鑫,郭胜利(2714)
三峡库区消落带N ₂ O排放及其影响因素	李睿,雷利国,江长胜,柴雪思,黄哲,范志伟,郝庆菊(2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N ₂ O排放研究	高雪梅,余冬立,颜晓元,夏永秋(2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷,杨雨洽,张成,陈宏,赵秀兰,木志坚(2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞,张淑娟,杨瑞强(2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷,赵玉杰,周其文,刘潇威,张铁亮(2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢,王莲阁,唐江,慈恩,谢德体(2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞,高明,谢德体,王子芳,陈晨(2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
.....杜光辉,饶伟,李鑫,张亚楠,王代长,杨军,化党领,刘世亮,李培培,刘红恩(2779)	
组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较	
.....吴玉俊,周航,杨文骏,邹紫今,朱维,辜娇峰,彭佩钦,张平,曾敏,廖柏寒(2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒,朱能武,康乃馨,石超宏(2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ -Fe ₂ O ₃ 及其NH ₃ -SCR活性探究	徐彬,陈天虎,刘海波,朱承驻,陈冬,邹雪华,蒋阳(2807)
《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)	

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平

张华方¹, 杨军¹, 杜鹏², 王琮淙², 李喜青^{2*}

(1. 北京市城市排水监测总站有限公司, 北京 100012; 2. 北京大学城市与环境学院, 地表过程与分析实验室, 北京 100871)

摘要: 利用高效液相色谱-串联质谱联用仪 (HPLC-MS/MS) 测定了北京市生活污水和自然水体中氯胺酮及其代谢产物去甲氯胺酮的浓度水平。样品采自北京市区内全部 13 家污水处理厂和流经北京市的四条河流。结果表明, 氯胺酮和去甲氯胺酮在北京 13 家污水处理厂的进水浓度均值范围分别为 $< \text{MQL}$ (method quantification limit, 方法定量限) $\sim (19.5 \pm 5.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $< \text{MQL} \sim (6.2 \pm 2.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 由此计算的负载量均值范围分别为 $(0.1 \pm 0.0) \sim (8.6 \pm 2.4) \text{ mg} \cdot (1000 \text{ 人} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(0.3 \pm 0.1) \sim (3.2 \pm 1.1) \text{ mg} \cdot (1000 \text{ 人} \cdot \text{d})^{-1}$ 。经污水处理厂处理后, 氯胺酮和去甲氯胺酮的去除率较低, 甚至出现负值。氯胺酮在地表水中被广泛检出, 浓度范围为 $< \text{MQL} \sim 17.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 去甲氯胺酮在 4 条河流中的检出浓度均低于 MQL 。在通惠河中氯胺酮的检出浓度较大多数污水处理厂进水中的浓度高, 说明沿河可能有氯胺酮的直接倾倒或排放。

关键词: 氯胺酮; 去甲氯胺酮; 北京; 污水; 地表水

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2522-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.07.014

Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing

ZHANG Hua-fang¹, YANG Jun¹, DU Peng², WANG Cong-cong², LI Xi-qing^{2*}

(1. Beijing Urban Drainage Monitoring Center Co., Ltd., Beijing 100012, China; 2. Laboratory of Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Concentrations of ketamine (KET) and its metabolite, norketamine (NK) in sewage water and surface water in Beijing were examined by HPLC-MS/MS. Samples were collected from all the thirteen sewage treatment plants in the urban area and four rivers flowing through the city. Average influent concentrations of KET and NK in 2013 summer ranged from $< \text{MQL}$ to $(19.5 \pm 5.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $< \text{MQL}$ to $(6.2 \pm 2.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The calculated loads of KET and NK ranged from (0.1 ± 0.0) to $(8.6 \pm 2.4) \text{ mg} \cdot (1000 \text{ inh} \cdot \text{d})^{-1}$ and (0.3 ± 0.1) to $(3.2 \pm 1.1) \text{ mg} \cdot (1000 \text{ inh} \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. The removal rate during treatment was low and even negative at some plants for KET and NK. KET was widely detected in surface waters ($< \text{MQL}$ to $17.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$), whereas NK was below MQL in all surface water samples. Concentration of KET in Tonghui River was higher than those in most of the STPs, indicating direct disposal of KET and/or direct discharge of sewage into the river.

Key words: ketamine; norketamine; Beijing; sewage; surface water

违禁药物由于使用的非法性而很难估算其用量和滥用趋势。近年来, 欧美等发达国家发展了一种叫做污水流行病学的方法来估算违禁药物的用量。这种方法的原理是采集城市污水, 测定其中违禁药物或其代谢产物的浓度, 再根据污水的流量和违禁药物/代谢产物的排泄率反推污水厂服务区违禁药物的用量。这种方法最早由美国环境保护署 (USEPA) 的科学家 Daughton 提出^[1,2], 由 Zuccato 等最早实施^[3,4]。相对于传统的社会调查方法, 该方法具有客观、快速、成本低等优点, 过去 10 年在欧洲^[5-8]、北美^[9,10]和澳大利亚^[11,12]得到了广泛的应用。另外, 城市生活污水并不能完全去除违禁药物^[9,13,14], 因而违禁药物将不可避免地进入环境, 特别是地表水体。因此违禁药物和其他药物一样被认为是一种新型污染物。污水处理厂在控制违禁药物进入环境方面起了关键作用。

氯胺酮 (ketamine, KET) 是一种麻醉、镇痛剂, 通过抑制神经传递素 *N*-甲基-D-天门冬氨酸 (NMDA) 受体及中枢和外围类胆碱功能传递, 达到麻醉效果^[15]。氯胺酮对人体副作用较强, 易引起用药者精神错乱, 出现幻觉, 大剂量可导致痉挛和死亡^[16]。氯胺酮在人体内的主要代谢产物为去甲氯胺酮 (norketamine, NK)。但氯胺酮在人体内不能完全代谢, 仅有部分被代谢转化为去甲氯胺酮。经人体服用后, 氯胺酮最终主要以氯胺酮母体和去甲氯胺酮两种形式排出人体。

20 世纪末, 氯胺酮开始作为违禁药物被使用。之后, 其非医疗目的的使用量不断增长^[17]。氯胺酮

收稿日期: 2015-11-16; 修订日期: 2016-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371442)

作者简介: 张华方 (1970 ~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为城市污水监测, E-mail: 13811364231@139.com

* 通讯联系人, E-mail: xli@urban.pku.edu.cn

滥用最严重的地区是东南亚. 其在东南亚地区的缉获量占世界总缉获量的 86.2%^[17]. 在过去十多年里,氯胺酮作为毒品在中国也逐渐流行起来,在毒品市场上占有越来越大的比例. 到 2011 年,氯胺酮已成为第 3 常用的违禁药物^[18].

最近有研究发现,在中国台湾、香港及深圳等地,氯胺酮广泛地存在于污水中,且浓度较高^[19~22]. Khan 等^[19]在北京的污水处理厂中也发现了氯胺酮的存在,但浓度较低. 氯胺酮地表水中也被广泛检出,但浓度均也较低,通常在几纳克到几百纳克每升的范围内^[7,20]. 然而,以上研究只采集了某个城市的少数几家污水厂,并没有针对一个城市市区内所有污水处理厂进行全面采样和分析检测,不能准确反映一个城市氯胺酮的滥用情况;同时,已有研究中关于地表水中氯胺酮浓度的报道很少,国内则完全没有. 因此目前还无法评价氯胺酮的环境影响.

本研究在北京市市区内 13 家污水处理厂和 4 条流经北京的河流分别采集污水和河水水样,通过 HPLC-MS/MS 测定了污水和河水中氯胺酮及去甲氯胺酮的浓度,探究了其随季节和空间的变化以及污水处理厂对这两种物质的去除率,推算了污水处理厂服务区域内氯胺酮的千人负荷量. 本研究还考

察了地表水中氯胺酮及其代谢产物去甲氯胺酮的存在情况. 本研究在国内第一次将污水流行病学应用于估算一个城市氯胺酮的用量,考察了污水和地表水中氯胺酮存在的相关关系,以期监测氯胺酮的滥用情况、评估氯胺酮的环境风险提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 试剂

氯胺酮、去甲氯胺酮、氯胺酮-氘 4 (Ketamine-d₄,KET-d₄)、去甲氯胺酮-氘 4 (Norketamine-d₄,NK-d₄) 购自 Cerilliant 公司(美国);乙腈(HPLC 级)购自 Fisher Scientific 公司;超纯水由 Mili-Q 超纯水系统(Millipore 公司,美国)制备;盐酸(分析纯)、无水甲醇(优级纯)、氨水(分析纯)购自北京化学试剂厂;醋酸铵(HPLC 级)购自 CNW 公司.

1.2 样品采集

1.2.1 污水样品

污水样品采自北京市市区内全部的 13 家污水处理厂,如图 1(d)所示:高碑店污水处理厂(GBD)、清河污水处理厂(QH)、小红门污水处理厂(XHM)、北小河污水处理厂(BXH)、酒仙桥污水处理厂(JXQ)、方庄污水处理厂(FZ)、吴家村污

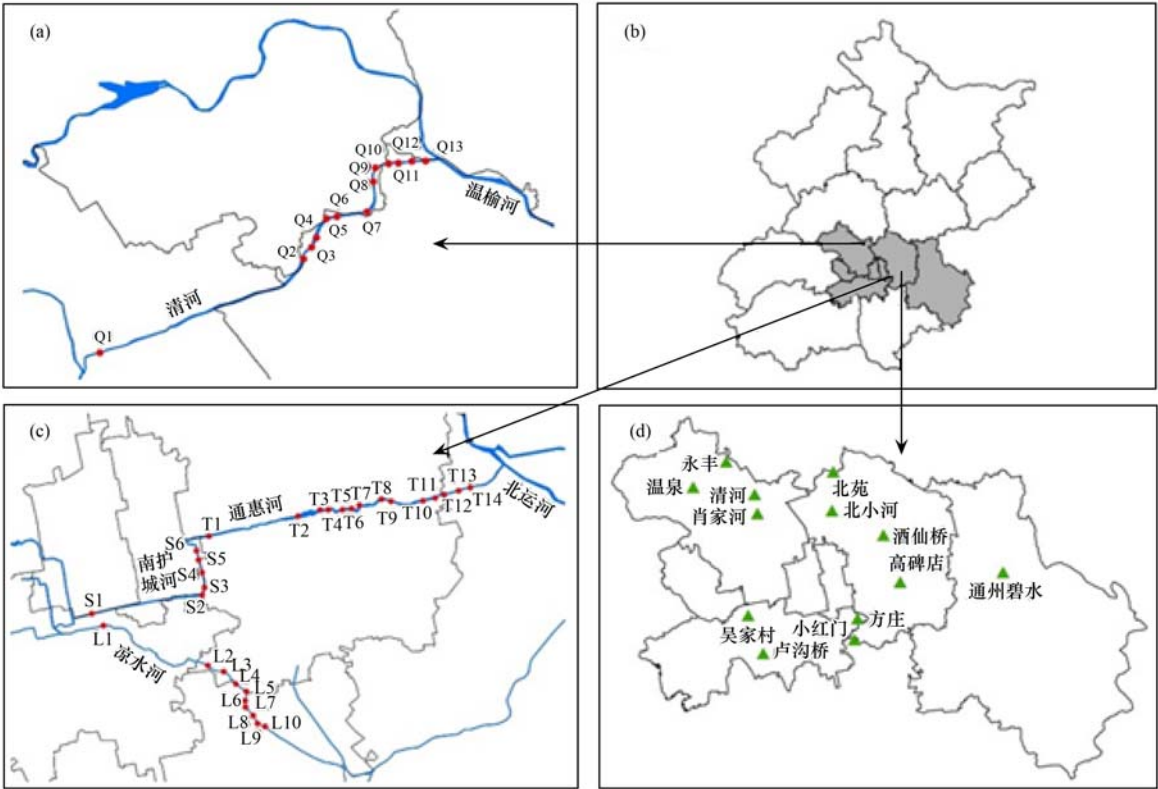


图 1 地表水采样点位置及北京市区 13 家污水处理厂位置
Fig. 1 Location of sampling points at the four rivers and 13 STPs in Beijing

水处理厂(WJC)、卢沟桥污水处理厂(LGQ)、通州碧水污水处理厂(TZBS)、肖家河污水处理厂(XJH)、北苑污水处理厂(BY)、永丰污水处理厂(YF)、温泉污水处理厂(WQ). 其中包括 13 家污水处理厂在夏季、早冬季的进水样品和 3 家污水处理厂(XHM、XJH 和 JXQ)夏季的出水样品.

全部污水样品均使用格雷普斯 FC-9624 型便携式自动水质采样器采集(格雷普斯科技开发公司,北京). 将采样器设置为每小时采样一次,每次采集水样 100 mL,采集 24 h 混合水样. 采样包括两个阶段:夏季采样于 2013 年 6 月至 2013 年 8 月进行,每个污水处理厂采集 4 d;冬季采样于 2013 年 11 月进行,每个污水处理厂采集两天. 为防止溢流引起的目标化合物损失,选择了非强降水和非风暴天气进行采样. 样品装入 1.5 L 高聚乙烯样品瓶,用浓盐酸($6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)调至 $\text{pH} = 2$,在 -20°C 条件下冷冻保存.

1.2.2 地表水样品

地表水样品于 2014 年 5 月采自流经北京市市区的 4 条河流:通惠河(Tonghui River)、清河(Qinhe River)、凉水河(Liangshui River)和南护城河(South Moat). 其中,通惠河沿河设置了 14 个采样点(T1~14),清河设置了 13 个采样点(Q1~13),凉水河设置了 9 个采样点(L1~9),南护城河设置了 6 个采样点(S1~6),采样点具体位置见图 1(a)和 1(c). 为防止溢流引起的目标化合物损失,地表水采样选择在非强降水和非风暴天气进行. 采集瞬时水样,样品装入 1.5 L 高聚乙烯样品瓶,用浓盐酸($6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)调至 $\text{pH} = 2$,于 -20°C 条件下冷冻保存.

1.3 样品分析

1.3.1 样品前处理

使用固相萃取法(SPE)进行样品前处理:依次用 6 mL 无水甲醇,4 mL 超纯水,4 mL 酸化至 $\text{pH} = 2$ 的超纯水活化 Oasis-MCX 固相萃取柱(Waters 公司,美国);将 50 mL 水样用玻璃纤维滤膜(上海红光实业有限公司,中国)过滤(以除去样品中较大的固体颗粒物)后以 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通过 SPE 柱;样品

加载完成后,用 5 mL 超纯水通过固相萃取柱,以冲洗杂质;以缓和的空气流将 SPE 柱柱床填料彻底干燥后,用 4 mL 甲醇,4 mL 甲醇/氨(19:1,质量比)溶液进行洗脱;收集洗脱液至 15 mL 试管中,室温下用均匀、缓和的氮气流将洗脱液吹干;用 400 μL 乙腈/水溶液(19:1,体积比)重新溶解干燥后的残留物;用有机相离心过滤管(VWR 公司,美国)离心过滤. 将上述滤液转移入 1.5 mL HPLC-MS/MS 专用的螺纹口透明进样瓶中,待上机测定.

1.3.2 样品测定

目标化合物使用岛津高效快速液相色谱(Prominence UFLCXR,日本)和菲罗门(Phenomenex,美国)Gemini C18 液相色谱柱($50 \text{ mm} \times 2.00 \text{ mm}$, $3 \mu\text{m}$)进行分离,进样量为 5 μL . 流动相由 5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸铵水溶液(A)和乙腈(B)组成. 洗脱梯度为:0~0.5 min: 5% B; 0.5~2.0 min: 30% B; 2.0~6.5 min: 45% B; 6.5~6.6 min: 90% B; 6.6~8.5 min: 90% B; 8.5~8.6 min: 95% B; 8.6~14 min: 95% B. 流动相流速为 $0.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 目标化合物的浓度使用 API-4000 三级四重杆串联质谱仪(包括一台 DGU-20A3 脱气装置,两台 LC-20AD 泵,一台 SIL-20AC 自动进样器,一台 CTO-20AC 型柱温箱)(AB Sciex,美国)采用多反应监测模式(multiple reaction monitoring,MRM)进行测定,质谱参数与目标物保留时间如表 1 所示.

1.3.3 分析方法验证

通过回收率、基质效应和流程空白来验证分析方法的准确性. 回收率:分别向 50 mL 超纯水中注入 20 ng 目标物,用 2.3 节所述方法来进行前处理并上机测定;基质效应:以含有目标物浓度较低的污水作为基质,用 2.3 节所述方法处理基质,处理完成后,分别加入 20 ng 目标物和不加标上机测定,测得结果相减,所得结果除以加标量来评价基质效应;流程空白:每 20 个实际样品中加做一个流程空白,以评价前处理过程中是否有污染. 分析方法验证结果如表 2 所示,回收率、基质效应和流程空白均符合分析要求.

表 1 目标物质离子对及相应质谱参数

Table 1 MS parameters of monitored chemical residues

化合物	保留时间 /min	母离子 m/z	去簇电压 /V	定量离子		定性离子	
				子离子 (m/z)	碰撞电压/V	子离子 (m/z)	碰撞电压/V
氯胺酮	4.20	238.1	55	207.1	20	125.1	38
氯胺酮- d_4	4.14	242.1	60	129.1	37	—	—
去甲氯胺酮	3.79	224.1	40	125.1	32	207.1	16
去甲氯胺酮- d_4	3.76	228.1	45	129.1	30	—	—

表 2 方法验证参数：回收率、基质效应和流程空白 (n=3)

Table 2 Method validation parameters: recovery, matrix effect and procedure blank (n=3)				
化合物	回收率/%	基质效应/%	流程空白/ng·L ⁻¹	方法定量限/ng·L ⁻¹
氯胺酮	81.6±7.6	43.9±5.4	未检出	0.8
去甲氯胺酮	67.8±7.3	61.0±7.4	未检出	4.0

1.4 负载量估算和去除率计算

用下面公式计算进入污水处理厂的氯胺酮及去甲氯胺酮的千人日均负荷量：

负荷量[$\text{mg} \cdot (1\,000 \text{ 人} \cdot \text{d})^{-1}$] =
$$\frac{\text{残留物浓度}(\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{进水流量}(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})}{\text{服务区人口} / 1\,000} \times \frac{1}{10^6} \times \left(\frac{\text{mg}}{\text{ng}}\right) \quad (1)$$

使用公式(2)计算污水处理厂对氯胺酮和去甲氯胺酮的去除率：

去除率(%) =
$$\frac{\text{进水残留物浓度} - \text{出水残留物浓度}}{\text{进水残留物浓度}} \quad (2)$$

其中,进水样品中化学残留物的浓度($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)用 2.3 节中所述分析方法测得。每个采样日的进水量是每个污水处理厂分别测得的数据。各污水厂服务区域人口数据也由各污水处理厂提供。

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂进水中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度

氯胺酮在 13 家污水处理厂的夏季进水中,除吴家村、永丰和温泉污水处理厂外,其余 10 家污水处理厂均有检出[$< \text{MQL} \sim (19.5 \pm 5.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,方法定量限,method quantification limit];在 11 家污水处理厂的早冬季进水中只有北苑污水处理厂未检出,其余各厂浓度均高于 MQL,最高浓度为 $9.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。共有 3 家污水处理厂采集了夏季出水,且出水中氯胺酮全

部检出,分别为小红门污水处理厂[$(4.3 \pm 0.9) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]、北小河污水处理厂[$(13.4 \pm 6.8) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]和酒仙桥污水处理厂[$(11.2 \pm 3.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]。除方庄、通州碧水、北苑和温泉污水处理厂外,去甲氯胺酮在其余污水处理厂夏季进水中均有检出[$(4.5 \pm 1.6) \sim (6.2 \pm 2.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$],而在冬季进水中仅有 3 个污水厂有检出,分别为小红门污水处理厂[$(2.5 \pm 0.4) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]、北小河污水处理厂[$(2.4 \pm 0.0) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]和酒仙桥污水处理厂($3.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$);在 3 家污水处理厂的夏季出水中去甲氯胺酮全部检出[$(4.4 \pm 1.6) \sim (5.2 \pm 1.4) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]。

清河、方庄、肖家河、小红门、高碑店、卢沟桥、北苑、通州碧水和酒仙桥等 9 家污水处理厂中氯胺酮浓度[$(1.0 \pm 0.0) \sim (16.8 \pm 4.7) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]与 Khan 等^[19]和 Du 等^[23]的研究结果一致[$(1.8 \pm 1.6) \sim (15.2 \pm 3.5) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$]。氯胺酮浓度范围与 Nuijs 等^[24]报道的比利时污水处理厂中氯胺酮浓度范围($10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)、Bijlsma 等^[25]报道的荷兰污水处理厂中氯胺酮的浓度($< 10 \sim 17 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)以及 Huerta-Fontela 等^[26,27]报道的西班牙污水处理厂中的浓度($< 1 \sim 50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)相当;高于西班牙、捷克和美国俄勒冈地区的污水处理厂中氯胺酮的浓度($< \text{MDL}$)^[28~30];远低于 Baker 等^[31]以及 Lin 等^[32]报道的英国和台湾污水处理厂中氯胺酮的浓度($52 \sim 79 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $223 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)。

如表3所示,北京污水处理厂的夏季进水中氯

表 3 北京 13 家污水处理厂进、出水中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度/ng·L⁻¹

STP	夏季进水		冬季进水	
	氯胺酮	去甲氯胺酮	氯胺酮	去甲氯胺酮
XHM	5.2±1.6	5.3±2.0	3.0±0.0	2.5±0.4
BXH	19.5±5.1	5.7±2.3	9.4±4.5	2.4±0.0
JXQ	16.8±4.7	6.2±2.1	9.7	3.9
GBD	7.5±0.5	5.5±0.3	8.2±6.2	< MQL
QH	3.7±1.0	5.6±1.9	2.2±0.9	< MQL
FZ	3.6±0.7	< MQL	2.0±0.0	< MQL
WJC	< MQL	5.0±3.2	6.0±6.4	< MQL
LGQ	1.4±0.3	4.6±1.6	1.3±0.0	< MQL
TZBS	7.9±6.5	< MQL	1.9±0.0	< MQL
XJH	1.0±0.0	4.5±1.6	1.5±1.1	< MQL
BY	1.8±0.3	< MQL	< MQL	< MQL
YF	< MQL	5.7±3.3	—	—
WQ	< MQL	< MQL	—	—

胺酮和去甲氯胺酮浓度高于冬季进水. 这可能是由于氯胺酮是各种娱乐场所和聚会中常用的违禁药物,而夏季的娱乐和社交活动通常要明显高于冬季. 因此,夏季氯胺酮的滥用要高于冬季. 相应地,夏季污水中的氯胺酮及去甲氯胺酮的浓度水平高于冬季.

各污水处理厂中氯胺酮的浓度与去甲氯胺酮的浓度的比值在 0.16 ~ 3.8 之间,这一比率比氯胺酮经人体代谢后所残留的氯胺酮的量与代谢主要产物去甲氯胺酮的量的比值(0.272 ~ 2.1)略高^[33]. 这可能是因为存在氯胺酮的直接弃置情况,导致污水中氯胺酮的浓度总体上高于去甲氯胺酮.

2.2 氯胺酮和去甲氯胺酮的去除率

公式(2)计算表明,北京市区内污水处理厂对氯胺酮(5.5% ~ 36.2%)和去甲氯胺酮(28.7% ~ 30.1%)的平均去除率较低,如图 2 所示. 这一结果说明有大量的氯胺酮被排入到自然水体中,可能会对体健康和水生生态系统造成潜在的威胁. 一些污水处理厂甚至出现了负去除的情况,如:小红门污水厂第二、第三采样日的去除率分别为 -9.7% 和 -0.5%,与已有文献报道相符合^[10,32,34~36]. 目前,相关研究普遍认为出现负去除率主要有两种原因:①可能是由于这些物质在代谢中与葡萄糖醛酸共轭结合,这些葡萄糖醛酸结合物在通过污水处理厂的工艺流程(如生物处理)时,可能被裂解为目标物质,使得检出浓度上升,导致负的去去除率^[38];②也可能是混合体系特征、流速流量及目标物质浓度的变异性导致的^[31]. 另一种解释是,北京市的污水处理厂普遍使用活性污泥法处理污水,污水在污水厂有数小时的停留时间,而采样是在污水厂进水口和

出水口同时进行的,这样导致所采集的进水和出水样品存在一个数小时的时间差. 如果采样前数小时出现氯胺酮的高排放,由于氯胺酮的去除率较低,会出现数小时后开始采样时出水中氯胺酮和去甲氯胺酮浓度大于进水中浓度的情况,从而导致表观去除率呈现为负值.

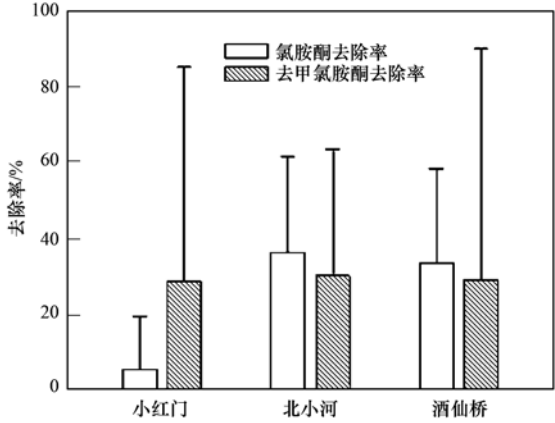


图 2 氯胺酮及去甲氯胺酮在 3 家污水处理厂中的去除率
Fig. 2 Removal of KET and NK at three STPs

2.3 氯胺酮的负荷量

公式(1)计算表明,在北京 13 个污水处理厂夏季和冬季的进水样品中(表 4),氯胺酮的负荷量为(0.1 ± 0.0) ~ (8.6 ± 2.4) mg · (1 000 人 · d)⁻¹,其中最高值出现在酒仙桥污水处理厂[8.6 ± 2.4 mg · (1 000 人 · d)⁻¹],次高值出现在北小河污水处理厂[(6.8 ± 1.8) mg · (1 000 人 · d)⁻¹],其余各厂负荷量普遍低于 1 mg · (1 000 人 · d)⁻¹,研究结果与 Quibell 等^[16]和 Khan 等^[19]的报道相一致. 北京市市区污水处理厂服务区域的氯胺酮的负荷量远低于中国华南地区氯胺酮的负荷量^[16]和香港污水处理

表 4 氯胺酮及去甲氯胺酮在 13 家污水处理厂的质量负荷量/mg · (1 000 人 · d)⁻¹
Table 4 Mass loads of KET and NK at the 13 STPs/mg · (1 000 inh · d)⁻¹

STP	氯胺酮		去甲氯胺酮	
	夏季	早冬季	夏季	早冬季
GBD	2.0 ± 0.1	2.2 ± 1.7	1.5 ± 0.1	0.7 ± 0.0
QH	1.4 ± 0.4	0.8 ± 0.3	2.0 ± 0.7	0.7
XHM	0.9 ± 0.3	0.5 ± 0.0	1.0 ± 0.4	0.4 ± 0.1
BXH	6.8 ± 1.8	3.3 ± 1.6	2.0 ± 0.8	0.9 ± 0.0
JXQ	8.6 ± 2.4	4.9	3.1 ± 1.1	2.0
FZ	0.9 ± 0.2	0.5	0.8 ± 0.2	0.0
WJC	0.3 ± 0.0	1.9 ± 2.0	1.6 ± 1.0	0.5
LGQ	0.2 ± 0.1	0.2	0.7 ± 0.2	0.3
TZBS	1.4 ± 1.1	0.3	0.6 ± 0.2	0.5
XJH	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.3
BY	0.2 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.3 ± 0.1	0.2
YF	0.2 ± 0.0	—	1.3 ± 0.8	0.3
WQ	0.2 ± 0.0	—	0.9 ± 0.0	—

厂中氯胺酮的负荷量 ($290 \text{ mg} \cdot (1000 \text{ 人} \cdot \text{d})^{-1}$)^[18]; 但与比利时污水处理厂中氯胺酮的负荷量相当 [$2 \sim 16 \text{ mg} \cdot (1000 \text{ 人} \cdot \text{d})^{-1}$]^[4]; 高于西班牙、捷克、美国俄勒冈地区污水处理中氯胺酮的负荷量^[22,24~26].

氯胺酮在北小河和酒仙桥污水厂中的负荷量明显高于在其他污水处理厂. 酒仙桥污水厂收集并处理来自于三里屯地区(北京城区中酒吧、夜店等娱乐场所的集中地)的污水, 而氯胺酮常被用于在以上场所进行的狂野派对和其他类似活动中^[29], 所以在三里屯地区的各类娱乐场所中非法使用的氯胺酮经污水管网进入酒仙桥污水厂是导致其进水中氯胺酮负荷量较高的主要原因; 北小河污水厂主要处理奥运村周边地区的污水, 因奥运村周边集中了大量体育场馆, 经常举办体育赛事、商业演出和娱乐活动, 在活动举办期间会出现非法使用毒品的情况, 其中可能包括氯胺酮的使用, 从而导致北小河污水厂进水中氯胺酮负荷量较高.

2.4 地表水

北京市 4 条河流中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度如图 3 所示, 氯胺酮在 4 条河流中的检出率分别为: 清河(10/13)、通惠河(12/14)、凉水河(5/9)和南护城河(6/6); 去甲氯胺酮在 4 条河中均未检出 ($< \text{MOL}$). 氯胺酮在 4 条河流中的检出率较高, 且检出浓度高于去甲氯胺酮, 这与已有报道的结果相似^[35].

北京市河流中氯胺酮、去甲氯胺酮的检出浓度较英国一条河中氯胺酮($21.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)与去甲氯胺酮($5.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)的检出浓度的均值低^[37], 较西班牙 Llobregat 河在自来水厂进水口处的河流水样 ($< \text{MDL}$)^[27,38,39]和台湾省高雄市屏东县的一条河流中氯胺酮及去甲氯胺酮的检出浓度高(分别为 $< \text{MDL} \sim 2.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $< \text{MDL} \sim 4.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)^[20].

去甲氯胺酮在地表水中检出浓度均低于定量限, 可能是由于其定量限较高, 加之其在污水处理厂中的检出浓度较低(低于或略高于定量限), 经河流的稀释效应及自然降解后, 低于定量限. 氯胺酮在通惠河中的检出浓度最高, 且未检出去甲氯胺酮, 说明氯胺酮可能未经过人体代谢, 而被直接倾倒入通惠河.

3 结论

(1) 北京市污水中能够普遍检出氯胺酮和去甲氯胺酮, 但整体浓度水平不高.

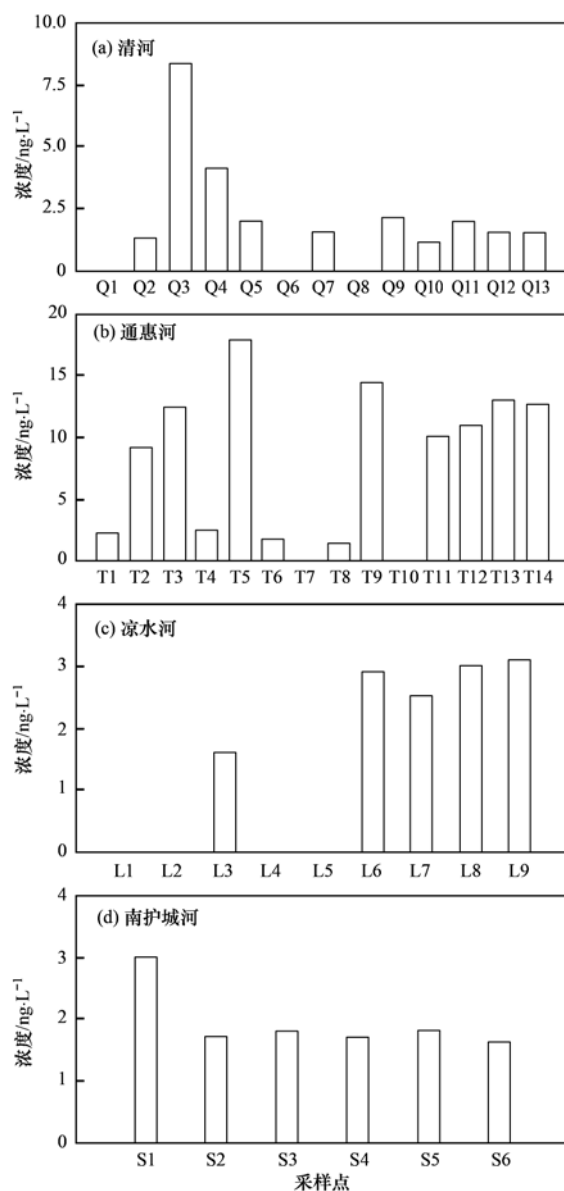


图3 清河、通惠河、凉水河和南护城河中氯胺酮浓度

Fig. 3 Concentrations of KET in Qinghe, Tonghui, Liangshui River and South Moat

(2) 氯胺酮与去甲氯胺酮在污水处理厂中的去除率较低 ($< 40\%$); 污水在污水处理厂的停留时间可能是造成氯胺酮低去除率的重要原因之一.

(3) 北京市市区氯胺酮的负载量远低于中国华南地区, 略高于美国和欧洲部分国家; 北小河污水处理厂和酒仙桥污水处理厂中氯胺酮负荷量明显高于其他污水处理厂, 说明氯胺酮在娱乐场所和体育场馆附近有较多的非法滥用.

(4) 流经北京市的 4 条河流中氯胺酮的检出率较高, 通惠河中氯胺酮的浓度普遍高于污水处理厂进水浓度, 说明在通惠河取样点周边可能存在氯胺酮直接倾倒和排放的情况.

参考文献:

- [1] Daughton C G. Emerging pollutants, and communicating the science of environmental chemistry and mass spectrometry: pharmaceuticals in the environment[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2001, **12**(10): 1067-1076.
- [2] Daughton C G. Illicit drugs: contaminants in the environment and utility in forensic epidemiology[A]. In: Whitacre D M (Ed.). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 210*[M]. New York: Springer, 2011. 59-110.
- [3] Zuccato E, Chiabrando C, Castiglioni S, *et al.* Cocaine in surface waters: a new evidence-based tool to monitor community drug abuse[J]. *Environmental Health*, 2005, **4**(1): 14.
- [4] Zuccato E, Chiabrando C, Castiglioni S, *et al.* Estimating community drug abuse by wastewater analysis[J]. *Environmental Health Perspective*, 2008, **116**(8): 1027-1032.
- [5] Petrie B, Barden R, Kasprzyk-Hordern B. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring[J]. *Water Research*, 2014, **72**: 3-27.
- [6] van Nuijs A L N, Mougél J F, Tarcomnicu I. A one year investigation of the occurrence of illicit drugs in wastewater from Brussels, Belgium[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(4): 1008-1016.
- [7] van Nuijs A L N, Castiglioni S, Tarcomnicu I, *et al.* Illicit drug consumption estimations derived from wastewater analysis: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 3564-3577.
- [8] Andrés-Costa M J, Rubio-López N, Suárez-Varela M M, *et al.* Occurrence and removal of drugs of abuse in Wastewater Treatment Plants of Valencia (Spain) [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **194**: 152-162.
- [9] Bartelt-Hunt S L, Snow D D, Damon T, *et al.* The occurrence of illicit and therapeutic pharmaceuticals in wastewater effluent and surface waters in Nebraska[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(3): 786-791.
- [10] Yargeau V, Taylor B, Li H X, *et al.* Analysis of drugs of abuse in wastewater from two Canadian cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **487**: 722-730.
- [11] Irvine R J, Kostakis C, Felgate P D, *et al.* Population drug use in Australia: a wastewater analysis [J]. *Forensic Science International*, 2011, **210**(1-3): 69-73.
- [12] Lai F Y, Ort C, Gartner C, *et al.* Refining the estimation of illicit drug consumptions from wastewater analysis: co-analysis of prescription pharmaceuticals and uncertainty assessment [J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4437-4448.
- [13] Boleda M R, Galceran M T, Ventura F. Monitoring of opiates, cannabinoids and their metabolites in wastewater, surface water and finished water in Catalonia, Spain [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 1126-1136.
- [14] Castiglioni S, Zuccato E, Crisci E, *et al.* Identification and measurement of illicit drugs and their metabolites in urban wastewater by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2006, **78**(24): 8421-8429.
- [15] Peck T E, Hill S A. *Pharmacology for anaesthesia and intensive care* (4th ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [16] Quibell R, Prommer E E, Mihalyo M, *et al.* Ketamine [J]. *Journal of Pain and Symptom Management*, 2011, **41**(3): 640-649.
- [17] United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC). *World drug report 2013* [R]. Vienna: UNODC, 2013.
- [18] 国家禁毒委员会办公室. 2011 年中国禁毒报告 [R]. 北京: 国家禁毒委员会办公室, 2012.
- [19] Khan U, van Nuijs A L N, Li J, *et al.* Application of a sewage-based approach to assess the use of ten illicit drugs in four Chinese megacities[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **487**: 710-721.
- [20] Lin A Y C, Lee W N, Wang X H. Ketamine and the metabolite norketamine: persistence and phototransformation toxicity in hospital wastewater and surface water [J]. *Water Research*, 2014, **53**: 351-360.
- [21] Lai F Y, Bruno R, Leung H W, *et al.* Estimating daily and diurnal variations of illicit drug use in Hong Kong: a pilot study of using wastewater analysis in an Asian metropolitan city [J]. *Forensic Science International*, 2013, **233**(1-3): 126-132.
- [22] Gao J F, O'Brien J, Lai F Y, *et al.* Could wastewater analysis be a useful tool for China? -a review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **27**: 70-79.
- [23] Du P, Li K Y, Li J, *et al.* Methamphetamine and ketamine use in major Chinese cities, a nationwide reconnaissance through sewage-based epidemiology[J]. *Water Research*, 2015, **84**: 76-84.
- [24] van Nuijs A L N, Gheorghe A, Jorens P G, *et al.* Optimization, validation, and the application of liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the analysis of new drugs of abuse in wastewater [J]. *Drug Testing and Analysis*, 2014, **6**(7-8): 861-867.
- [25] Bijlsma L, Emke E, Hernández F, *et al.* Investigation of drugs of abuse and relevant metabolites in Dutch sewage water by liquid chromatography coupled to high resolution mass spectrometry[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1399-1406.
- [26] Huerta-Fontela M, Galceran M T, Martín-Alonso J, *et al.* Occurrence of psychoactive stimulatory drugs in wastewaters in north-eastern Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **397**(1-3): 31-40.
- [27] Huerta-Fontela M, Galceran M T, Ventura F. Stimulatory drugs of abuse in surface waters and their removal in a conventional drinking water treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(18): 6809-6816.
- [28] Bueno M J M, Uclés S, Hernando M D, *et al.* Development of a solvent-free method for the simultaneous identification/quantification of drugs of abuse and their metabolites in environmental water by LC-MS/MS[J]. *Talanta*, 2011, **85**(1): 157-166.

- [29] Baker D R, Očenášková V, Kvalova M, *et al.* Drugs of abuse in wastewater and suspended particulate matter—further developments in sewage epidemiology [J]. *Environment International*, 2012, **48**: 28-38.
- [30] Chiaia A C, Banta-Green C, Field J. Eliminating solid phase extraction with large-volume injection LC/MS/MS: analysis of illicit and legal drugs and human urine indicators in US wastewaters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(23): 8841-8848.
- [31] Baker D R, Kasprzyk-Hordern B. Spatial and temporal occurrence of pharmaceuticals and illicit drugs in the aqueous environment and during wastewater treatment: new developments [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **454-455**: 442-456.
- [32] Lin A Y C, Wang X H, Lin C F. Impact of wastewaters and hospital effluents on the occurrence of controlled substances in surface waters[J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(5): 562-570.
- [33] Moore K A, Sklerov J, Levine B, *et al.* Urine concentrations of ketamine and norketamine following illegal consumption [J]. *Journal of Analytical Toxicology*, 2001, **25**(7): 583-588.
- [34] Majewsky M, Gallé T, Bayerle M, *et al.* Xenobiotic removal efficiencies in wastewater treatment plants: residence time distributions as a guiding principle for sampling strategies [J]. *Water Research*, 2011, **45**(18): 6152-6162.
- [35] Ort C, Lawrence M G, Rieckermann J, *et al.* Sampling for pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and illicit drugs in wastewater systems: are your conclusions valid? A critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(16): 6024-6035.
- [36] Ternes T A. Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers[J]. *Water Research*, 1998, **32**(11): 3245-3260.
- [37] Baker D R, Kasprzyk-Hordern B. Multi-residue analysis of drugs of abuse in wastewater and surface water by solid-phase extraction and liquid chromatography-positive electrospray ionisation tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, **1218**(12): 1620-1631.
- [38] Huerta-Fontela M, Galceran M T, Ventura F. Ultrapformance liquid chromatography-tandem mass spectrometry analysis of stimulatory drugs of abuse in wastewater and surface waters[J]. *Analytical Chemistry*, 2007, **79**(10): 3821-3829.
- [39] Thomas K V, Bijlsma L, Castiglioni S, *et al.* Comparing illicit drug use in 19 European cities through sewage analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **432**: 432-439.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行