

水环境中药品和个人护理品的迁移转化、毒性效应及其风险评估

刘晓晖¹,董文平²,乔光明³,王玉番¹,王炜亮¹

1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014
2. 山东省环科院环境工程有限公司, 济南 250013
3. 淄博市环境保护局, 淄博 255030

摘要 由于药品和个人护理品(PPCPs)不断被排入水体,对生态环境和人体健康构成很大的潜在威胁,成为近年研究的热点。本文综述PPCPs的种类和来源,评述PPCPs在水体中的迁移转化、毒性效应及其水环境风险评估现状,对现有PPCPs风险评估方法的不足提出建议。

关键词 药品及个人护理品;迁移转化;毒性效应;风险评估

中图分类号 X503 **文献标志码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.008

Transport-transformation, toxic effect and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in water

LIU Xiaohui¹, DONG Wenping², QIAO Guangming³, WANG Yufan¹, WANG Weiliang¹

1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China
2. Shandong Academy of Environmental Science and Environmental Engineering Co., Ltd., Jinan 250013, China
3. Environmental Protection Association of Zibo, Zibo 255030, China

Abstract Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) have raised significant concern in recent years for their persistent input into the ecological environment and potential threat to human health. Research of PPCPs in water started late in China, and is far from extensive, compared with that in western countries. This paper reviews the sources and types of PPCPs and discusses their transport-transformation in water, toxic effect and risk assessment. Suggestions are provided for the environmental risk assessment of PPCPs at present, aiming to effectively reduce potential risks of PPCPs and provide reference for further in-depth research.

Keywords pharmaceuticals and personal care products; transport-transformation; toxic effect; risk assessment

环境中新型有机物污染加剧,对人类和生态系统健康构成了重大威胁。新型环境有机污染物指广泛使用但对生态环境有潜在危害、受到广泛关注、新出现的有机污染物。目前研究的热点主要集中在溴代阻燃剂(BFRs)、全氟类化合物(PFCs)、药品和个人护理用品(PPCPs)。PPCPs在新型有机污染物中占有很大比例。随着医药及洗化行业的大规模发展,PPCPs的生产和使用量迅猛增长,据统计,2000—2006年

全球个人护理品的年生产量超过 1×10^6 t,作为一种新型污染物日益受到关注^[1]。

PPCPs组分具有较强的生物活性、旋光性和极性,大都以痕量浓度存在于水环境,水环境中检测的质量浓度大多在 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1} \sim \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,其导入水环境的主要方式为兽类医药、农用医药、人类服用医药以及化妆品的大量使用^[2]。由于该类物质在污水处理厂中被去除的同时也在源源不断地被引入水环

收稿日期:2015-04-02;修回日期:2015-07-08

基金项目:山东省环境保护厅项目(SDHBPJ-ZB-09);山东省自然科学基金项目(ZR2012DM009)

作者简介:刘晓晖,硕士研究生,研究方向为水处理及水环境风险评估,电子邮箱:1243034429@qq.com;王炜亮(通信作者),副教授,研究方向为水污染控制,电子邮箱:sunboyhood@163.com

引用格式:刘晓晖,王炜亮,王玉番.水环境中药品和个人护理品的迁移转化、毒性效应及其风险评估[J].科技导报,2015,33(16):56-60.

境中,人们还将其称为“伪持续性”污染物。因此,PPCPs在水环境介质中的残留物及作为一种新型污染物在水环境介质中的迁移转化,给环境和人类健康带来一定的潜在风险^[3]。

河流是PPCPs排放至环境的最主要的受体之一,由于PPCPs被持续不断地输入水环境,致使水体中PPCPs的检出率较高且分布广泛,引起广泛关注。Ferguson等^[4]研究了美国密歇根湖,检测到乙酰氨基酚($5.36 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、咖啡因($31.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、卡马西平($2.23 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、可替宁($4.03 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、吉非贝齐($7.03 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、布洛芬($7.88 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)和萘普生($6.32 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)等多种PPCPs物质。中国广州珠江三角洲地带河水中普遍检出布洛芬、水杨酸及降脂药物对氯苯氧异丁酸等PPCPs类物质,最高质量浓度分别达1417、2098、248 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[5],可以看出有些污染物的质量浓度是非常高的。并且在中国的其他水系,如黄河、海河和辽河水体中也分别检测到布洛芬、三氯生等PPCPs类物质,且各监测点检出率达100%。

中国是药品及个人护理品生产和使用的大国,而且最近的数据表明其产量和用量仍在呈增长的态势。但是,中国对于PPCPs的研究依然还处于起步阶段,没有完善的理论体系,有关PPCPs在水环境中的迁移转化规律和环境健康风险等方面的研究不是很多^[6],尤其体现在PPCPs类物质在水环境中复合污染的风险评估上。本文评述PPCPs在水体中的迁移转化、毒性效应及风险评估。

1 水环境中的PPCPs种类、来源及其迁移转化

1.1 PPCPs的种类

随着检测技术和分析方法的进步,水中很多药品和个人护理品被检测出来,种类主要有抗生素类、血脂调节药、止痛消炎药、消毒剂杀菌剂、麝香和激素类等^[7-10],十分繁杂。并且在中国众多的PPCPs类物质中,抗生素受到特别关注,因为抗生素占中国药物产量的比例很大,在检测中也发现其质量浓度和种类也是最多的。同时抗生素的危害十分严重,若持续暴露在抗生素环境中,人体会产生耐药菌株,提高发病率。

1.2 PPCPs的来源

环境中PPCPs的来源十分广泛,主要包括生活污水、畜禽和水产养殖业和垃圾填埋场等。

城市生活污水是PPCPs最主要的汇集源^[11],主要包括被随意丢入下水道的不用和过期药物污染的污水,人体摄入药物经人体排泄或沐浴产生的污水等,这些污水进入排污管网,随后进入污水处理厂,而目前的污水处理厂常规工艺对PPCPs的去除率有限,仅为20%~30%^[6,10-12],致使大量PPCPs类物质排入河流湖泊,造成水体污染。

畜禽和水产养殖业也是水环境中PPCPs的一个重要来源,尤其在大型的集中型饲养场,药物的使用种类和剂量都很大。有研究报道,对肉用动物使用的药物50%以上以母体药物的形式通过粪便排出体外^[13],一部分药物随农家肥进入农田,经渗透污染土壤及地下水,另一部分进入河流湖泊。

垃圾填埋场是将PPCPs引入水环境的另一个源头。Holm等^[14]在1995年率先报道了垃圾填埋场的渗滤液中含有PPCPs成分,在丹麦一个垃圾填埋场附近采集的渗出液样品中检测到了高质量浓度药物残留。城市固体废物中的PPCPs大多通过填埋的方式进行处理,因此可以随着垃圾产生的渗滤液进入土壤环境中,进而通过渗透进入水环境。

除上述来源以外,PPCPs的制造企业在生产过程中产生的大量废水也是水体中PPCPs类物质的重要来源之一。中国对PPCPs的认识较晚,缺乏先进的监测手段和严格的排放标准,生产过程中的大量PPCPs伴随着废水排入水环境中。Lin等^[15]对国内3家药厂进行调查,发现医院和药厂废水含有高浓度的扑热息痛,同时在医院和药厂集中区域的河流中扑热息痛浓度也显著高于其他河段,因此指出制药厂是造成该地区地表水污染最主要的原因。

几十年来,不断有文献证实PPCPs类物质可以通过多种途径进入水环境,对生物群落产生不良的生态效应。因此,识别地表水环境中PPCPs来源,对从源头控制排放,减少PPCPs向地表水环境的排放,降低PPCPs对环境 and 生态造成的危害,有着重要的意义。

1.3 水体中PPCPs的迁移转化及其影响因素

探究水体中PPCPs的迁移转化规律及其影响因素有助于进一步了解PPCPs的转化机制,为研究其对人体和环境的风险奠定基础。

PPCPs类物质进入水环境后,一部分会与水体中的悬浮物质结合而随其沉淀于底泥,在水量大时沉积物会发生再悬浮,但这部分进入水体的量较少。另一部分随水流迁移,有些会被水生动植物吸收,在其体内积累,在食物链中传递,最终进入人体,一部分被人体吸收,其余部分排出体外,进行再循环;有些会随水流的迁移发生降解转化。研究表明,进入水环境中的PPCPs类物质,有的可以通过生物作用或光照作用在水中降解为 CO_2 和水,但有些具有亲水性,这些物质具有不挥发性和持久性,最后基本滞留在水环境中^[16]。另外,大多数的药物在释放到水环境之前会经过氧化、还原或水解和共轭反应等过程^[17],转化为小分子物质。

PPCPs的迁移转化受到诸多因素的影响,其中最主要的为PPCPs的性质结构(如化学特性、水溶性等)和外界环境(如水环境组成成分、温度等)^[18]。PPCPs分子通常有很多官能团,例如羧基、醛基和氨基等,这就使得其迁移转化的过程会受到温度或其他的固相基质组分的影响^[19]。Zhou等^[20]考查研究了黄河等海域的总有机碳和pH值对常用抗生素的吸附影响,研究表明:黄河沉积物低TOC及高含沙量的特点使得其对抗生素的吸附较少,而且抗生素在酸或者碱性条件下的降解速率明显加快,因此得出沉积物中有机物的含量及水环境的pH值是影响抗生素迁移转化的重要因素之一;Jiang等^[21]在研究黄浦江中抗生素季节变化时指出,夏季抗生素质量浓度明显降低的原因除了稀释作用外,主要是高温条件下微生物活性较强,提高了抗生素的生物降解速率。

目前,对于水体中PPCPs的迁移转化的研究,缺乏相关的模型,但是PPCPs类物质的迁移转化与某些物质(如重金属)具有相似性,因此可以借鉴研究PPCPs。温智皓等^[22]以氯贝酸、酮洛芬、萘普生、双氯芬酸和布洛芬为目标物研究了PPCPs的迁移转化,结果表明:PPCPs残余及其未被代谢的活性组分被排出后,排污口下游水体中目标物质量浓度普遍高于上游,支流污染程度大于干流。由于排污口下游水体中目标物质量浓度普遍高于上游,支流污染程度大于干流的规律,与重金属迁移转化有相似之处,因此,对于水中PPCPs迁移转化,可以借鉴窦明等^[23]建立的研究重金属迁移转化的一维重金属模型,研究其在水中的迁移转化。

对于水环境中PPCPs的迁移转化,应该综合考虑,深入研究,有助于加深对PPCPs类物质在环境中的行为的认识,以便在对其进行风险评估时得出更加符合实际的结果。

2 PPCPs的毒性及水环境健康风险评估

2.1 PPCPs的毒性效应

PPCPs具有很强的持久性和潜在的生物累积性^[24],一旦进入水环境中,可以诱发生物水生栖物发生物化或生化功能的改变,对生态环境和生物健康的危害风险较大。

有研究表明,即使水体中含有低剂量($1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)的人工合成雌激素17 α -乙炔基雌二醇(EE2)也会干扰鱼类正常的内分泌,并导致鱼类的雌性化^[25]。麝香类物质对动物和人类也具有生态毒性作用,硝基麝香具有较强的生物富集作用,易渗入人体细胞,产生致癌作用;合成麝香类化合物是一类半挥发性有机物,极性较小,有较强的亲脂憎水性,易生物富集^[26]。Han等^[27]研究了水体环境中的咖啡因,发现其能影响海马的神经系统,导致海马反应缓慢并逐渐失去行为控制能力。PPCPs还具有潜在的生态毒性或人类健康风险。最近的研究表明,长时间接触一种或多种化合物的细胞群可能会在生长参数或信号反射途径中受到不利影响。另外,水环境中的PPCPs会污染饮用水,从而影响人体健康,增加人类病原菌耐药性,造成肠道菌群失调,甚至引起慢性中毒,带来“三致”作用^[28]。越来越多的证据表明,残留在水环境介质中的PPCPs正在以各种方式影响着水体中的非目标生物体^[29]。

现在关于PPCPs类物质的毒性效应的研究还大多停留在单一物质的毒性,而水环境是复杂的,往往是多种物质共存^[30-32],极有可能与重金属离子或同类物质之间产生协同或拮抗,从而改变PPCPs的毒性,一些研究也证实了这个观点。董玉瑛等^[33]测定了阿司匹林、盐酸环丙沙星和阿奇霉素3种常见药物对发光菌的单一毒性以及二元的联合毒性,结果表明:阿司匹林-环丙沙星二元混合体系为部分相加作用;陈翠红等^[34]研究了佳乐麝香和吐纳麝香与重金属铬的联合毒性及机制,发现这两种物质与铬组成的复合污染对小麦根伸长抑制的 EC_{50} 值为 $0.530 \text{ TU}_{\text{mix}}$ 和 $0.614 \text{ TU}_{\text{mix}}$,显著低于 $1 \text{ TU}_{\text{mix}}$,多环麝香和铬复合污染对小麦根伸长的抑制表现为协同作用,即多环麝香和铬共同存在时二者发生交互作用且可

增强彼此的毒性。Schnell等^[35]研究了11种不同的医疗药物和硝基麝香之间的复合毒性效应,结果表明:大部分的药品和麝香的混合对肝脏RTL-W1细胞表现为协同毒性,即增加了单一物质的毒性效应,加大了对环境和人体健康的风险。Ppetersen等^[36]研究了PPCPs、消毒剂、多环芳氢与烷基酚之间的混合毒性,结果显示为协同效应,建议对于这几种物质混合的水域的风险应多加关注。

因此,单一物质本身的毒性效应风险评估指数会产生偏差,应该深入研究PPCPs在水环境中同源和异源物质之间的复合污染,以此建立其生态和人体健康的风险评估模型具有现实意义。

2.2 PPCPs的环境风险评估研究

2.2.1 国外PPCPs的环境风险评估研究

国外对水体中PPCPs的环境风险评估起步较早,很早就认识到了PPCPs的潜在风险。瑞典曾采用Stockholm模型对药物残留在水环境中的危害进行评估。评估结果表明:在160种药物中,几乎所有的药物都是不可生物降解,约1/3的药物具有潜在生物富集性,约2/3药物具有高或非常高的生物毒性^[37]。在欧盟,监管机构正努力构建由人类活动所释放的PPCPs类物质的风险性和危害性评估的和谐系统。尽管有些PPCPs已做了特殊的法规,但是按照环境风险评估的独立性原理不应互相冲突,可以根据各物质的特性和用途在法规上作出让步;20世纪90年代后期,美国环境保护署(EPA)和美国地质勘探局(USGS)开始研究水环境中PPCPs的出现、来源、环境行为和对人类健康的潜在风险,发现PPCPs类物质虽然半衰期短,但具有生物累积性,对人体健康和环境具有潜在风险。随后,2006年,为了控制水环境中药物残留量的持续增加和加强水环境中药物的风险等级评定,美国成立了由国家科学与技术理事会(NSTC)、环境与自然资源委员会(CENR)和毒性风险小组委员会组成的工作小组。

国外对PPCPs的环境风险的认识较早,其环境风险评估的机制比中国完善。当前,国外除了在全国范围内建立PPCPs的常规监测,得到它们的检测环境浓度(MECs)外,还就PPCPs的预测环境浓度(PECs)方面做了大量研究,建立了对于水环境中PPCPs的预测系统,更为精确地预测水体中PPCPs的浓度变化,为制定水体中PPCPs的污染的应急预案提供了数据支持。

2.2.2 国内PPCPs的环境风险评估研究

中国对水体中PPCPs的环境风险认识较晚,20世纪90年代才开始对其环境风险进行评估。

目前对于PPCPs的风险评估大多依据常规风险评价中的风险熵法。温智皓等^[22]以5种PPCPs(氯贝酸、酮洛芬、萘普生、双氯芬酸和布洛芬)为目标物,运用风险熵对其在受纳水体中的生态风险进行了初步评估,发现受纳水体中双氯芬酸存在高生态风险,而酮洛芬、萘普生、氯贝酸和布洛芬的生态风险相对较低。王丹等^[38]采用固相萃取-高效液相色谱/串联质谱(SPE-HPLC-MS/MS)分析上海市黄浦江流域7种典型

PPCPs的含量水平,结果表明:其下游污染比上游严重,支流污染程度大于干流。李丽娜等^[39]对上海市河流中的PPCPs污染物进行环境风险评估的研究,结果表明:上海市地表水中普遍含有三氯生,环境风险较大。张盼伟等^[40]对海河流域中PPCPs污染物进行了环境风险研究,分析了海河流域13条主要支流表层沉积物及海河流域主要城市——北京城区水体样品中PPCPs的分布状况,并就PPCPs对生物体存在的健康风险进行了分析,结果表明:PPCPs在海河流域主要支流及北京城区主要河流中都有较高含量检出,说明海河流域已经受到了PPCPs污染。通过风险熵风险研究表明,中国长江和珠江水体中PPCPs也具有相对较高的环境风险,如双氯芬酸和布洛芬^[41,42]。中国的各大水系基本都受到了PPCPs的污染,且有些物质的质量浓度较高、风险较大,相关部门应该引起注意,加强对PPCPs类物质的治理力度。

目前,中国对于PPCPs风险评价的研究尚未形成完善的风险评估体系,缺乏环境基准,对于吸附在沉积物中的PPCPs在适当的条件下还是有可能被解析释放到水环境中的风险也未被考虑。而且通过表1^[22]可以看出,PPCPs类物质的环境风险评估过于片面化,药品及个人护理用品污染种类的选择太少,大部分仅考虑PPCPs本身的单一毒性风险。

表1 受纳污水河流中5种PPCPs组分的风险熵
 Table 1 Risk entropy of the five PPCPs in the wastewater receiving river

目标药物	预测无效应质量 浓度/(ng·L ⁻¹)	最大检测质量 浓度/(ng·L ⁻¹)	风险熵
酮洛芬	15600	7.55	0.0005
萘普生	20000	13.7	0.0007
氯贝酸	1000	27.8	0.0278
双氯芬酸	100	103.8	1.0300
布洛芬	2000	113.4	0.0567

由表1可以看出,双氯芬酸的风险熵为1.03,存在高度风险;酮洛芬、萘普生、氯贝酸和布洛芬的风险熵均小于0.1,表明处于较低风险程度。该结果可能会导致有关部门作出错误的判断,在防范和治理上倾向于注重双氯芬酸而忽略酮洛芬、萘普生、氯贝酸和布洛芬。

3 结论

PPCPs的水环境污染是一个世界性的问题,在各国河流湖泊中均有不同程度的检出,而中国对于PPCPs的研究起步较晚,因此需深入研究PPCPs产生的环境效应和在水中的迁移转化;进一步了解PPCPs引起的毒理学效应,建立针对低质量浓度、长期毒性和复合污染的毒性效应评价方法;制定基于人体健康和生态环境安全的公认评价基准,避免风险评价结果的不确定性。

参考文献(References)

[1] 贾媛,胡建英,孙建仙,等. 环境中的医药品与个人护理品[J]. 化学进

展, 2009, 21(2): 389-399.

Jia Ai, Hu Jianying, Sun Jianxian, et al. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in environment[J]. Journal of Progress in Chemistry, 2009, 21(2): 389-399.

[2] 刘印平,祝凌燕,李敬光. 药品与个人护理用品的生态与健康影响研究进展[J]. 卫生研究, 2009, 38(2): 237-240.

Liu Yinping, Zhu Lingyan, Li Jingguang. Research progress of pharmaceutical and personal care products on ecological and human health[J]. Journal of Hygiene Research, 2009, 38(2): 237-240.

[3] 乔铁军,张锡辉,欧慧婷. 药品和个人护理用品在水环境中污染状况的研究与展望[J]. 给水排水, 2009(7): 121-130.

Qiao Tiejun, Zhang Xihui, Ou Huiting. Advances and prospects on pharmaceuticals and personal care products in aquatic environment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009(7): 121-130.

[4] Ferguson P J, Bernot M J, Doll J C, et al. Detection of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in near-shore habitats of southern Lake Michigan[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458: 187-196.

[5] 邹艳敏,吴向阳,仰榴青. 水环境中药品和个人护理用品污染现状及研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2010(6): 14-19.

Zou Yanmin, Wu Xiangyang, Yang Liuqing. Current situation and research progress on the pollution of pharmaceuticals and personal care products in water environment[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2010(6): 14-19.

[6] 代朝猛,周雪飞,张亚雷,等. 环境介质中药物和个人护理用品的潜在风险研究进展[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(2): 77-80.

Dai Zhaomeng, Zhou Xuefei, Zhang Yalei, et al. Research advancements in potential risk of PPCPs of environmental media[J]. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(2): 77-80.

[7] Chang H, Wan Y, Wu S, et al. Occurrence of androgens and progestogens in wastewater treatment plants and receiving river waters: Comparison to estrogens[J]. Water Research, 2011, 45(2): 732-740.

[8] Chang X, Meyer M T, Liu X, et al. Determination of antibiotics in sewage from hospitals, nursery and slaughter house, wastewater treatment plant and source water in Chongqing region of Three Gorge Reservoir in China[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1444-1450.

[9] Chen D, Zeng X, Sheng Y, et al. The concentrations and distribution of polycyclic musks in a typical cosmetic plant[J]. Chemosphere, 2007, 66(2): 252-258.

[10] Besse J P, Garric J. Human pharmaceuticals in surface waters: implementation of a prioritization methodology and application to the French situation[J]. Toxicology Letters, 2008, 176(2): 104-123.

[11] 安婧,周启星. 药品及个人护理用品(PPCPs)的污染来源、环境残留及生态毒性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1878-1890.

An Jing, Zhou Qixing. Pollution sources, environment residues, and ecological toxicity of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1878-1890.

[12] 唐玉霖,高乃云,庞维海,等. 药物和个人护理用品在水环境中的现状与去除研究[J]. 给水排水, 2008, 34(5): 116-121.

Tang Yulin, Gao Naiyun, Pang Weihai, et al. Research on status and removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic environment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(5): 116-121.

[13] Ellis J B. Pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in urban receiving waters[J]. Environmental Pollution, 2006, 144(1): 184-189.

[14] Holm J V, Ruegge K, Bjerg P L, et al. Occurrence and distribution of pharmaceutical organic compounds in the groundwater downgradient

- of a landfill (Grindsted, Denmark) [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(5): 1415-1420.
- [15] Lin A Y C, Tsai Y T. Occurrence of pharmaceuticals in Taiwan's surface waters: Impact of waste streams from hospitals and pharmaceutical production facilities[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(12): 3793-3802.
- [16] Halling-Sørensen B, Nielsen S N, Lanzky P F, et al. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment: A review [J]. *Chemosphere*, 1998, 36(2): 357-393.
- [17] Daughton C G, Ternes T A. Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1999, 107(6): 907-911.
- [18] 方齐乐, 陈宝梁. 新型环境污染物高氯酸盐的环境化学行为、食品安全及健康风险[J]. *科学通报*, 2013, 58(26): 2626-2642.
Fang Qile, Chen Baoliang. Environmental transport behaviors of perchlorate as an emerging pollutant and their effects on food safety and health risk[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(26): 2626-2642.
- [19] Pan B, Ning P, Xing B S. Adsorption of pharmaceuticals and personal care products[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2009(16): 106-116.
- [20] Zhou L J, Ying G G, Zhao J L, et al. Trends in the occurrence of human and veterinary antibiotics in the sediments of the Yellow River, Hai River and Liao River in northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(7): 1877-1885.
- [21] Jiang L, Hu X, Yin D, et al. Occurrence, distribution and seasonal variation of antibiotics in the Huangpu River, Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(6): 822-828.
- [22] 温智皓, 段艳平, 孟祥周, 等. 城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险[J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 927-932.
Wen Zhihao, Duan Yanping, Meng Xiangzhou, et al. Occurrence and risk assessment of five selected PPCPs in municipal wastewater treatment plant and the receiving water[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 927-932.
- [23] Dou M, Bao S, Ma C, et al. Health hazard assessment under the Cd pollution accident scenarios in Longjiang River[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2: 14-19.
- [24] 周世兵, 周雪飞, 张亚雷, 等. 三氯生在水环境中的存在行为及迁移转化规律研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(10): 71-74.
Zhou Shibing, Zhou Xuefei, Zhang Yalei, et al. The research for occurrence, transport and transformation rules of triclosan in water environment[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(10): 71-74.
- [25] 孙艳, 黄璜, 胡洪营, 等. 污水处理厂出水中雌激素活性物质浓度与生态风险水平[J]. *环境科学研究*, 2010(12): 1488-1493.
Sun Yan, Huang Huang, Hu Hongying, et al. Concentration and ecological risk level of estrogenic endocrine-disrupting chemicals in the effluents from wastewater treatment plants[J]. *Research of Environmental Science*, 2010(12): 1488-1493.
- [26] 周启星, 王美娥, 范飞, 等. 人工合成麝香的环境污染, 生态行为与毒理效应研究进展[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 1-11.
Zhou Qixing, Wang Meie, Fan Fei, et al. Research progress in environmental pollution, ecological behavior and toxicological effects of synthetic musks[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1): 1-11.
- [27] Han M E, Park K H, Baek S Y, et al. Inhibitory effects of caffeine on hippocampal neurogenesis and function[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2007(356): 976-980.
- [28] 杨忠霞. 个人护理品对人类健康以及环境安全影响的研究进展[J]. *科技风*, 2012(10): 1-3.
Yang Zhongxia. Research progress of effects on pharmaceuticals and personal care products for human health and environmental safety[J]. *Technology Wind*, 2012(10): 1-3.
- [29] Pascoe D, Karntanut W, Müller C T. Do pharmaceuticals affect freshwater invertebrates A study with the cnidarian *Hydra vulgaris*[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(6): 521-528.
- [30] Yan Z, Li X, Chen J, et al. Combined toxicity of cadmium and copper in *Avicennia marina* seedlings and the regulation of exogenous jasmonic acid[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 113: 124-132.
- [31] Lee W M, Yoon Y, An Y J. Combined toxicities of methyl tert-butyl ether and its metabolite tert-butyl alcohol on earthworms via different exposure routes[J]. *Chemosphere*, 2015, 128: 191-198.
- [32] Tang Y, Tian J, Li S, et al. Combined effects of graphene oxide and Cd on the photosynthetic capacity and survival of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 154-161.
- [33] 董玉瑛, 朱行翠, 仇春华. 3种常见医药品对发光菌联合毒性作用研究[J]. *大连民族学院学报*, 2013, 15(1): 4-7.
Dong Yuying, Zhu Xingcui, Zhang Chunhua. Joint toxicity research on three common pharmaceuticals to photobacterium phosphoreum[J]. *Journal of Dalian Nationalities University*, 2013, 15(1): 4-7.
- [34] 陈翠红. 土壤典型PPCPs污染与重金属Cd的联合毒性及机理[D]. 天津: 南开大学, 2010.
Chen Cuihong. Joint toxicity and mechanisms of typical PPCPs and Cd in soil[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [35] Schnell S, Bols N C, Barata C, et al. Single and combined toxicity of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) on the rainbow trout liver cell line RTL-W1[J]. *Aquatic Toxicology*, 2009, 93(4): 244-252.
- [36] Petersen K, Heiaas H H, Tollefsen K E. Combined effects of pharmaceuticals, personal care products, biocides and organic contaminants on the growth of *skeletonema pseudocostatum*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2014, 150: 45-54.
- [37] 吕妍, 袁涛, 王文华. 个人护理用品生态风险评估研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2007, 24(8): 650-653.
Lü Yan, Yuan Tao, Wang Wenhua. A critical review of ecological risk assessment on personal care products[J]. *Journal of Environmental Health*, 2007, 24(8): 650-653.
- [38] 王丹, 隋倩, 赵文涛, 等. 中国地表水环境中药物和个人护理品的研究进展[J]. *科学通报*, 2014(9): 743-751.
Wang Dan, Sui Qian, Zhao Wentao, et al. Pharmaceutical and personal care products in the surface water of China: A review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014(9): 743-751.
- [39] 李丽娜. 上海市河流水体中OPs和PPCPs污染物的风险评估[D]. 上海: 同济大学, 2010.
Li Lina. Risk assessment of OPs and PPCPs in river of Shanghai[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [40] 张盼伟. 海河流域PPCPs污染状况与健康风险研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
Zhang Panwei. Distribution and health risk assessment on PPCPs in Hai River Basin, China[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [41] Zhou X F, Dai C M, Zhang Y L, et al. A preliminary study on the occurrence and behavior of carbamazepine (CBZ) in aquatic environment of Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 173(1): 45-53.
- [42] Zhao J L, Ying G G, Liu Y S, et al. Occurrence and a screening-level risk assessment of human pharmaceuticals in the Pearl River system, South China[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, 29(6): 1377-1384.

(责任编辑 王媛媛)