

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险

吴乾元¹, 邵一如¹, 王超², 孙艳³, 胡洪营^{1,3*}

(1. 清华大学深圳研究生院深圳市环境微生物利用与安全控制重点实验室, 深圳 518055; 2. 香港高等科技教育学院科技学院, 香港; 3. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 以城市污水为水源的再生水中含有一定量的雌激素类内分泌干扰物, 其在无计划间接补充饮用水过程中存在潜在健康风险。针对再生水经河流补给湖库型水源地的典型场景, 研究了再生水中雌酮、雌二醇、17 α -乙炔基雌二醇、双酚 A、壬基酚和辛基酚在水体中的变化规律, 评价了雌激素的健康风险。结果表明, 再生水(二级出水)中雌激素类物质的质量浓度多分布在 0.1~100 ng·L⁻¹ 水平; 双酚 A 和壬基酚的浓度较高, 可达到 1~10 μ g·L⁻¹ 水平。再生水间接补充饮用水过程中, 雌激素的浓度受到上游来水稀释、河道湖库自然降解和饮用水处理工艺去除等作用的影响。雌酮、雌二醇、双酚 A、壬基酚和辛基酚的非致癌风险较小, 都低于规定值 1。当湖库型水源地的水力停留时间大于 30 d 时, 再生水中 17 α -乙炔基雌二醇对人体的非致癌风险值大多小于 1; 当停留时间小于 10 d 且再生水占饮用水比例达 50% 以上时, 16%~47% 样品的 17 α -乙炔基雌二醇的非致癌风险值大于 1, 其健康风险需优先关注。

关键词: 再生水; 无计划间接补充饮用水; 雌激素; 健康风险评价; 非致癌风险; 水源

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1041-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.032

Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater

WU Qian-yuan¹, SHAO Yi-ru¹, WANG Chao², SUN Yan³, HU Hong-ying^{1,3}

(1. Shenzhen Laboratory of Microorganism Application and Risk Control, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Faculty of Science and Technology, Technological and Higher Education Institute of Hong Kong, Hong Kong, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control (SMARC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The estrogenic endocrine disruptors in reclaimed water from domestic wastewater may induce health risks to human being, when reclaimed water is used for augmentation of drinking water unplannedly and indirectly. This study investigated changes in concentrations of estrone, estradiol, 17 α -ethinyl estradiol, bisphenol A, nonylphenol and octylphenol in reclaimed water during the reuse of reclaimed water for augmentation to water source such as lakes and reservoir via river. Thereafter, health risk induced by estrogens during the reuse of reclaimed water was evaluated. The concentration of estrogen in secondary effluent ranged 0.1-100 ng·L⁻¹. The highest concentrations of bisphenol A and nonylphenol reached up to 1-10 μ g·L⁻¹. During the indirect reuse of reclaimed water as potable water, the dilution and degradation in river and lake, and the removal by drinking water treatment process could change the concentrations of estrogen. The non-carcinogenic risks of estrone, estradiol, bisphenol A, nonylphenol and octylphenol were lower than 1. When the hydraulic retention time of 17 α -ethinyl estradiol (EE2) in lakes and reservoir was higher than 30 days, the non-carcinogenic risk of EE2 was lower than 1 in most cases. When the hydraulic retention time of EE2 in lakes and reservoir was less than 30 days and the percentages of reclaimed water in drinking water were higher than 50%, the non-carcinogenic risk induced by EE2 was higher than 1 in 20%-50% samples. This indicated that the risks of EE2 should be concerned.

Key words: reclaimed water; recharge potable water unplannedly and indirectly; estrogens; health risk assessment; non-carcinogenic risk; water source

随着我国水资源压力的不断增大, 再生水补充饮用水将逐步成为一种重要的城镇污水再生利用途径。再生水补充饮用水分为 3 种方式: 直接补充、无计划间接补充和有计划间接补充^[1]。由于受水质健康和公众接受度等方面的限制, 国内外有关再生水直接补充饮用水的案例并不多。再生水有计划间接

收稿日期: 2013-07-07; 修订日期: 2013-09-24

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109015); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA065205); 香港高等科技教育学院科技学院项目

作者简介: 吴乾元(1984~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为再生水水质安全保障技术, E-mail: wuqianyuan@tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

补充饮用水是指将城市污水经深度处理后,与地表水源水或地下水水源水混合,再进入饮用水取水管网^[1]. 无计划间接补充饮用水是指上游城市向河流、湖库中排放处理后的污水,下游城市从接纳污水的河流、湖库中取水作为饮用水源,这种方式在国内外许多河流、湖库流域普遍存在^[2~6]. 澳大利亚昆士兰东南部的 Wivenhoe 水库从城市污水处理厂接纳约 $1.15 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的再生水补充饮用水^[4]. 我国的主要河流、湖库流域,如长江^[5]、嘉陵江^[6],都存在下游城市直接从接纳上游污水处理厂排水的水体中取水,作为饮用水源的现象. 未经处理的生活污水和污水厂二级出水中污染物在经过上游来水的稀释,非生物降解和生物降解等一系列作用后,进入下游城市的饮用水处理系统. 如果污染物在经过饮用水处理工艺后,仍没有达到饮用水水质的要求,则会对下游城市的居民健康存在潜在威胁. 因此,评估再生水补给对饮用水水质的影响及其潜在健康风险对保障饮用水安全具有重要意义.

内分泌干扰物 (endocrine disrupting chemicals,

EDCs) 是一类干扰生物体内维持自稳定性、调节生殖发育和其他行为的荷尔蒙的合成、分泌、输送、结合、作用和排泄的外源性物质^[7]. 在各种内分泌干扰物中,类固醇类雌激素和酚类雌激素由于在自然界中分布广泛和雌激素活性强而备受广泛关注^[8~10]. 这两类物质在生物毒性实验中都对生物生殖和发育系统产生不良影响^[11~14]. 另外,小鼠注入过量的类固醇类雌激素,会引起一些器官肿瘤发生率上升^[11],一定量的双酚 A (BPA) 会增加哺乳动物患乳腺癌、卵巢癌及子宫内膜癌的风险^[15].

目前我国饮用水水质标准和污水排放标准中还没有关于这两类雌激素的相关限值,但是这两类雌激素已经在饮用水、地表水和城市污水中广泛被检出,浓度范围在 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1} \sim \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[16~20]. 该浓度水平的雌激素对人体健康的影响尚不明确. 本文的目的是以典型类固醇类雌激素和酚类雌激素为研究对象,基于现有文献中的数据,评价污水处理厂二级出水无计划间接补充饮用水对人体健康造成的风险,以期为再生水补充饮用水提供依据.

表 1 类固醇类雌激素和酚类雌激素毒性

Table 1 Toxicity of steroid endocrine disruptors and phenolic endocrine disruptors

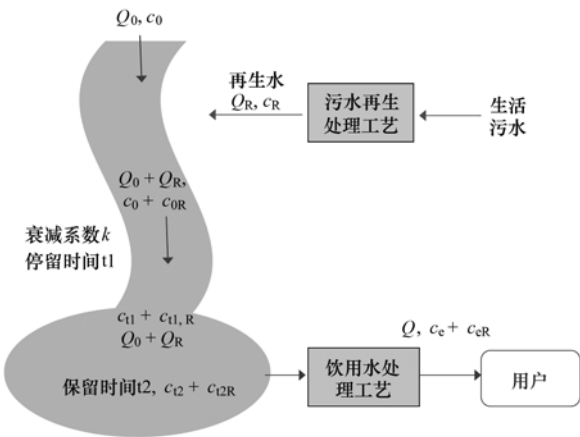
污染物	内分泌干扰性	致癌效应
雌酮 (E1)、雌二醇 (E2)、雌三醇 (E3)	人体内产生激素 ^[11]	小鼠乳腺、垂体、子宫、阴道、睾丸、淋巴等器官肿瘤发生率增加 ^[11]
乙炔基雌二醇 (EE2)	小鼠细胞分裂减慢,影响小鼠发育 ^[11]	无相关报道
双酚 A (BPA)	引起小鼠体重降低,生殖、免疫器官异常 ^[12]	诱导癌细胞的表达并促进癌细胞增殖,使乳腺癌、卵巢癌及子宫内膜癌等与雌激素相关的肿瘤发病率呈现上升趋势 ^[15]
壬基酚 (NP)	引起小鼠体重下降,小鼠进食量和食物消化能力降低 ^[13]	无相关报道
辛基酚 (OP)	引起小鼠体重和进食量降低,怀孕母鼠胚胎流产率升高 ^[14]	无相关报道

1 材料与方法

1.1 再生水无计划间接补充饮用水场景

图 1 为再生水无计划间接补充饮用水示意. 雌激素浓度为 c_r 的再生水排入湖库型水源地上游河流中使得河水中的雌激素浓度由 c_0 变为 $c_0 + c_{0R}$, c_{0R} 为再生水补给引起的污染物浓度变化. 雌激素在河流输配和湖库储存过程中由于生物降解等作用而自然衰减,其在湖库型水源地中的浓度降至 $c_{12} + c_{12R}$. 雌激素在饮用水处理过程中被进一步去除,饮用水中雌激素浓度为 $c_e + c_{eR}$,其中 c_{eR} 为再生水补给引起的饮用水雌激素浓度变化值. 利用雌激素浓度增量 c_{eR} 便可计算再生水间接补充饮用水所导致的人体健康风险.

1.2 健康风险评价方法



c_{0R} 、 c_{11R} 、 c_{12R} 和 c_{eR} 为再生水补给引起的污染物浓度变化

图 1 再生水无计划间接补充饮用水示意

Fig. 1 Schematic of unplanned and indirect reuse of reclaimed water for supplying potable water

再生水无计划间接补充饮用水健康风险评价方法框架如图 2 所示. 本研究在再生水补充水源地的风险计算过程中, 考虑污染物在自然水体和饮用水

处理工艺的降解和迁移转化, 主要包括上游来水稀释、水体底泥吸附、阳光降解、水解、挥发、生物降解和饮用水处理工艺降解等的影响.

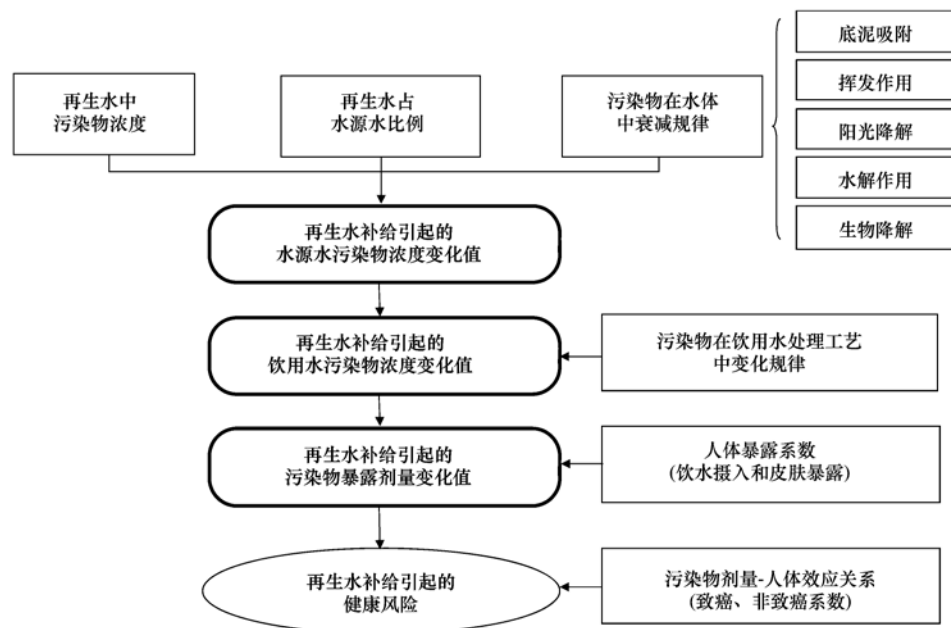


图 2 再生水补充饮用水健康风险评价方法框架

Fig. 2 Health risk assessment methodology of using reclaimed water to supply potable water

计算人体对水中污染物的摄入量, 主要考虑饮用水摄入和洗浴接触两种暴露途径. 计算公式分别为^[21]:

$$CDI_{\text{饮用}} = c_w \times IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \quad (1)$$

$$CDI_{\text{洗浴}} = I \times A_{\text{sd}} \times EF \times FE \times ED / (BW \times AT \times f) \quad (2)$$

$$I = 10^{-3} \times k \times c_w \times ET \quad (3)$$

式中, CDI 为长期日摄入量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; c_w 为水中污染物浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); IR 为日饮用水量 ($\text{L} \cdot \text{a}^{-1}$); EF 为暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), 取值 365 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$); ED 为暴露时长 (a); A_{sd} 为人体表面积 (cm^2); BW 为平均体重 (kg); FE 为洗澡频率 ($\text{次} \cdot \text{d}^{-1}$); AT 为平均暴露时间 (d); I 为每次洗澡时皮肤的污染物渗透量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{次})^{-1}$]; ET 为洗澡时间 (h); f 为肠道吸收率; k 为皮肤渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$).

根据污染物的致癌性一般将健康风险评价分为致癌和非致癌两类. 文献[11, 15]表明雌酮、雌二醇和双酚 A 都可使小鼠肿瘤发生率升高, 但是 WHO 和 U. S. EPA 都没有给出这些物质的致癌强度系数. 因此, 本研究主要评价雌激素对人体的非致癌风险. 非致癌风险评价采用商值法^[22].

$$HQ = CDI / (RfD \text{ 或 } ADI) \quad (4)$$

式中, HQ 为人体暴露某污染物的危险系数, $HQ \geq 1$ 表示有风险, $HQ < 1$ 表示风险较小; CDI 为污染物的长期日摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD 为污染物的非致癌参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; ADI 为污染物日容许摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

RfD 可以在 U. S. EPA 综合风险信息系统 (integrated risk information system, IRIS) 上查询, 而 ADI 的计算公式为:

$$ADI = NOAEL / UF \quad (5)$$

式中, $NOAEL$ 为无明显有害影响浓度, UF 为不确定因子. $NOAEL$ 一般通过动物实验或者流行病学调查获得^[22], UF 受动物实验的种内差异、与人之间的中间差异、实验设定的污染物暴露时间、实验样本数等因素影响, 目前较为成熟的评价体系一般都会考虑种内差异和种间差异, 默认值各为 10. 很多物质对动物或人体的无明显有害影响浓度 ($NOAEL$) 很难通过实验获得, 只能用最小有害影响浓度 ($LOAEL$) 除以系数进行推导. U. S. EPA 将该系数默认值定为 10, 而 European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC) 和 U. S. EPA IRIS 的推荐值为 3. 因此, 有害物质 UF 的取值多为

300 或1 000,最大不会超过10 000^[23~25]。

1.3 数据来源与分析

本研究选择雌酮(E1)、雌二醇(E2)、17 α -乙炔基雌二醇(EE2)这3种固醇类雌激素和双酚A(BPA)、壬基酚(NP)、辛基酚(OP)这3种酚类雌激素作为研究对象,城市污水处理厂二级出水中类固醇类雌激素和酚类雌激素的数据主要来自文献[26]中引用数据和近5年新增文献数据^[27~36],公式中用到的参数主要来自U.S.EPA网站数据库和中国卫生部推荐值。利用Excel和Origin 8.0对数据进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 再生水中溶解态雌激素浓度分布

图3为6种雌激素在再生水(二级出水)中的浓度-累积频率分布。再生水中6种雌激素浓度分布在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1} \sim \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中EE2在再生水中的浓度最低,最高浓度不超过 $10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;E1、E2和OP在再生水中的浓度水平相近,分布在 $0.1 \sim 100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;BPA和NP在再生水中的浓度水平较高,可达到 $1\,000 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上。

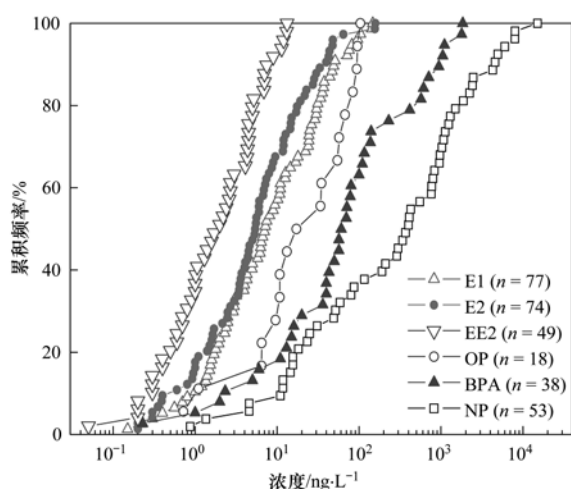


图3 再生水中雌激素浓度-累积频率分布^[23~33]

Fig. 3 Concentration-cumulative frequency distribution of EDCs in reclaimed water

2.2 上游来水对雌激素的稀释作用

再生水间接补充饮用水时,再生水与上游河水混合后污染物浓度将发生变化。再生水补给导致河水中雌激素浓度的变化量根据式(6)计算:

$$c_{0R} = (Q_0 c_0 + Q_R c_R) / (Q_0 + Q_R) - c_0 \quad (6)$$

式中, Q_0 、 c_0 分别为上游河水的流量和雌激素浓度; Q_R 、 c_R 分别为再生水的流量和雌激素浓度。

再生水在饮用水源中占的比例受季节、气候等因素的影响。美国加利福尼亚州南部的水源地科罗拉多河,在正常情况下有5.5%~17%的水来自污水处理厂二级出水;而在干旱情况下,这个比例会增加到23%^[2]。U.S.EPA的一项调查表明,20世纪80年代在美国,旱季大约有1500万人口将含有10%以上二级出水的河水作为饮用水源,其中有400万人口甚至直接将100%二级出水作为饮用水源^[2]。参考美国再生水补充饮用水的比例^[2,3]和人们能接受的范围,设定再生水在饮用水中所占的比例,即 $Q_R / (Q_0 + Q_R)$ 为2%、5%、10%、50%和100%,并假定上游来水中污染物浓度为0,则 c_{0R} 为 c_R 的2%、5%、10%、50%和100%。

2.3 雌激素在自然水体中的衰减作用

(1) 雌激素在河流和湖库中的衰减模型

污染物在自然水体中的浓度受底泥吸附、挥发、阳光降解、水解和生物降解等作用的影响会逐渐降低。本研究主要研究溶解态雌激素在水中的浓度分布和健康风险,因此不考虑底泥吸附的雌激素的量。根据文献[37],雌激素在水体中的衰减符合一级动力学方程。污染物在河流中的衰减视为平推流式反应器、在湖库中的衰减视为完全混合流反应器,则雌激素在河流和湖库中的衰减方程分别如式(7)和式(8)所示。

$$c_{i1} + c_{i1R} = (c_0 + c_{0R}) e^{-k \cdot t1} \quad (7)$$

式中, $c_{i1} + c_{i1R}$ 为河水在进入湖库前的雌激素浓度, $c_0 + c_{0R}$ 为上游河水与再生水混合后的雌激素浓度(0时刻), c_{i1R} 和 c_{0R} 为再生水补给引起的浓度变化, k 为降解系数, $t1$ 为雌激素在河流中的停留时间。

$$c_{i2} + c_{i2R} = (c_1 + c_{1R}) / (1 + k \cdot t2) \quad (8)$$

式中, $c_{i2} + c_{i2R}$ 为湖库中取水口的雌激素浓度, $c_1 + c_{1R}$ 为河水在进入湖库前的雌激素浓度, c_{i2R} 和 c_{1R} 为再生水补给引起的浓度变化, k 为降解系数, $t2$ 为雌激素在湖库中的停留时间。

其中,降解系数 k 的值可以根据污染物在河水中的半衰期确定,如表2所示。

表2 类固醇类雌激素和酚类雌激素在河水中的半衰期

Table 2 Half-lives of steroid endocrine disruptors and phenolic endocrine disruptors in river

项目	河水中半衰期/d	降解系数/ $k \cdot d^{-1}$	文献
E1	2.0~3.0	0.231~0.347	[38]
E2	2.0~3.0	0.231~0.347	[38]
EE2	4.0~6.0	0.116~0.173	[38]
BPA	3.0~6.0	0.116~0.231	[39]
NP	1.6	0.433	[37]
OP	2.4	0.289	[37]

(2) 污染物在河流、水库中的停留时间估算

根据“集中式饮用水水源环境保护指南”中对水源保护区内潜在风险源的规定,假设再生水排水口离水源地的距离为 20 km; 根据文献[40,41],取水流速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 则雌激素在河流中的水力停留时间为 0.46 d.

图 4 给出了我国东部平原地区部分湖库的换水周期分布特征. 我国东部湖库换水周期分布在 10 ~ 60 d^[42~51] 之间, 根据湖库的真实情况, 设定污染物在湖库中的停留时间最长不会超过 60 d. 此外, 在部分人工调控的湖库中, 为了防止水库富营养化, 换水周期可能设为 3 d.

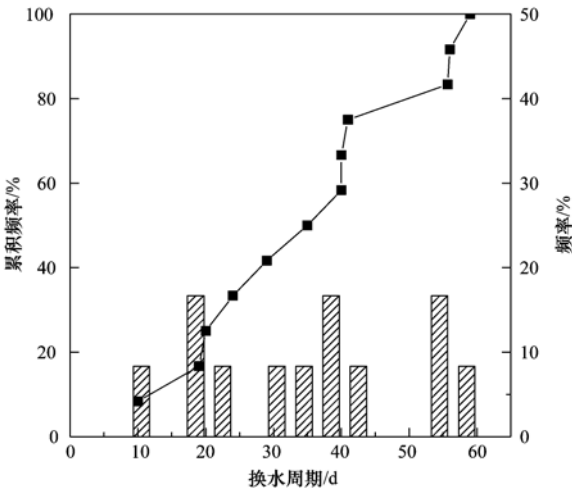


图 4 东部地区湖库换水周期频率分布
Fig. 4 Water update periods of lakes in the East

(3) 污染物在水体中的衰减特性

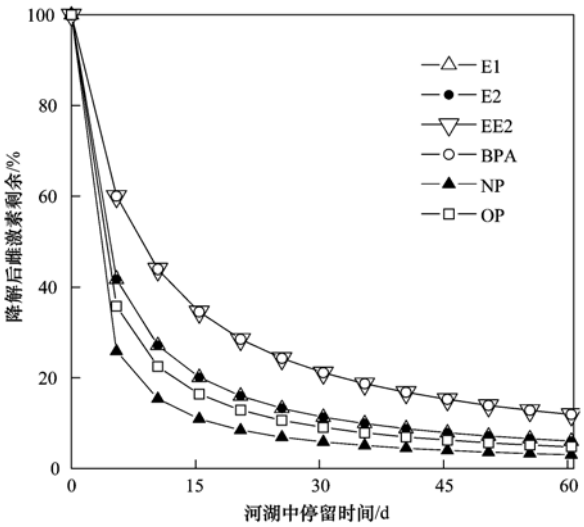
根据表 2 的降解系数最小值计算得到的雌激素在河流湖库中的衰减曲线(剩余百分比)如图 5 所示. 在 6 种雌激素中, NP、E1、E2、OP 降解最快, 当河流和湖库的停留时间分别为 0.46 d 和 30 d 时, NP、OP、E1、E2 的降解率达到 90% 以上. EE2 和 BPA 在河流湖库中较难被降解, 当湖库中停留时间达到 30 d 时, 仍有 20% 的 EE2 和 BPA 剩余.

2.4 饮用水处理工艺对雌激素浓度的影响

混凝-过滤-消毒工艺、臭氧-活性炭工艺等饮用水处理工艺可部分去除雌激素. 因此, 在评价雌激素的健康风险时, 需考虑饮用水处理工艺对雌激素的去除作用, 如式(9)所示.

$$c_e + c_{eR} = (c_{i2} + c_{i2R}) \times (1 - r) \quad (9)$$

式中, $c_e + c_{eR}$ 为经过饮用水处理工艺出水中的雌激素浓度, $c_{i2} + c_{i2R}$ 为取水口的雌激素浓度, r 为饮用水



根据表 2 的降解系数最小值计算
图 5 再生水补给河流和湖库时雌激素经降解后的剩余量
Fig. 5 Residual amounts of EDCs after degradation in rivers and lakes recharged by reclaimed water

工艺对雌激素的去除率.

由于我国大部分饮用水处理厂仍采用混凝-过滤-消毒的传统工艺^[52~57], 只有少部分处理厂采用先进的臭氧-活性炭工艺. 因此, 本研究评价雌激素的健康风险时, 选取常见的混凝-过滤-消毒工艺作为研究对象. 混凝-过滤-消毒工艺对雌激素的去除率如图 6 所示.

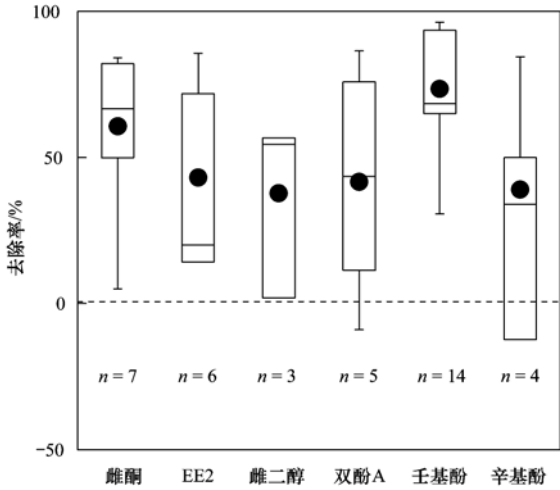


图 6 雌激素在混凝-氯消毒饮用水处理工艺的去除率
Fig. 6 Removal rates of EDCs in the coagulation-chlorine disinfection process

2.5 人体暴露参数选取与雌激素剂量-效应参数

(1) 人体暴露参数

表 3 为计算人体通过饮水和洗浴暴露于污染物中的相关参数值, 数据来源于 U. S. EPA^[58] 和中国

卫生部推荐值^[59].

(2) 雌激素剂量效应参数

根据表 1,类固醇类雌激素和 BPA 对肿瘤有一定的诱发作用,但必须在高浓度的剂量下. 其在低剂量下对水生动物和人体的内分泌系统有较强的干扰性,所以本研究将重点放在雌激素的非致癌风险

评价.

通过 U. S. EPA 综合风险信息系统 (integrated risk informtion system, IRIS) 只能查询到 BPA 的非致癌参考剂量 RfD,其他污染物的非致癌效应系数引用 WHO 报告等文献中的 ADI 值. 目标污染物的 RfD 和 ADI 具体数据取值见表 4.

表 3 人体暴露参数取值¹⁾

Table 3 Values of human exposure parameters								
IR/L·d ⁻¹	ED/a	A _{sd} /cm ²	BW/kg	FE/次·d ⁻¹	AT/d	ET/h	<i>f</i>	<i>k</i> /cm·h ⁻¹
2 ^[58]	74 ^[59]	16600 ^[59]	57.3 ^[59]	0.3 ^[59]	27 010	0.29 ^[59]	0.5 ^[59]	0.001 ^[59]

1) IR 为日饮水量(L·d⁻¹); EF 为暴露频率(d·a⁻¹); 取值 365 (d·a⁻¹); ED 为暴露时长(a); A_{sd} 为人体表面积(cm²); BW 为平均体重(kg); FE 为洗澡频率(次·d⁻¹); AT 为平均暴露时间(d); *I* 为每次洗澡时皮肤的污染物渗透量[μg·(cm²·次)⁻¹]; ET 为洗澡时间(h); *f* 为肠道吸收率; *k* 为皮肤渗透系数(cm·h⁻¹)

表 4 雌激素的非致癌参考剂量(RfD) 和日容许摄入量(ADI)

Table 4 RfD and ADI of EDCs			
污染物	RfD/mg·(kg·d) ⁻¹	ADI/mg·(kg·d) ⁻¹	剂量效应终点
雌酮(E1)	— ¹⁾	8.67×10 ⁻⁷ ^[60]	—
雌二醇(E2)	—	5×10 ⁻⁵ ^[11]	子代小鼠体重下降 ^[11]
17α-乙炔基雌二醇(E2)	—	4.3×10 ⁻⁸ ^[60]	—
双酚 A(BPA)	0.05 ^[11]	—	小鼠体重下降 ^[12]
壬基酚(NP)	—	0.15 ^[60]	对小鼠生殖系统有影响 ^[60]
辛基酚(OP)	—	0.015 ^[60]	使人体皮肤褪色 ^[60]

1) —表示无相关数据或资料

2.6 再生水间接补充饮用水雌激素非致癌风险评价

选取再生水间接补充饮用水的典型场景:再生水从污水处理厂排水口进入河流,混合后随河流进入湖库,再经饮用水处理工艺处理后被人体摄入. 风险评价中的主要假设如下.

(1) 再生水中雌激素的浓度采用 2.1 节中全部数据.

(2) 再生水占饮用水的比例按照 2.2 节中的设定,为 2%、5%、10% 和 50%. 同时列出在最不利条件下,再生水直接作为饮用水的情况作参考,即再生水占饮用水比例为 100%.

(3) 为反映在最不利情况下雌激素风险,雌激素在河流和湖库中的衰减系数选取表 2 中的最小值.

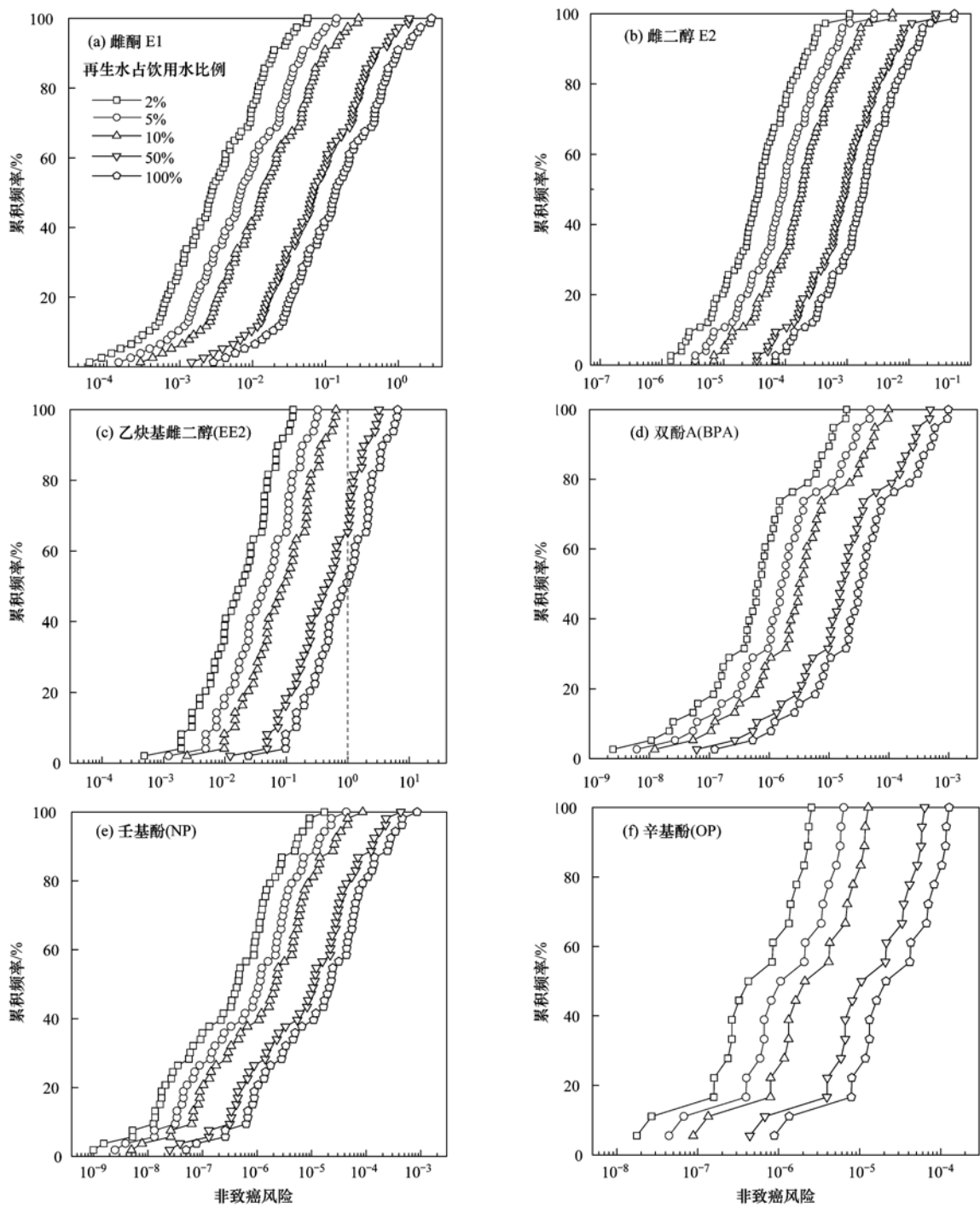
(4) 雌激素在湖库中停留时间选定为 3、10、30 d,雌激素在河流中的停留时间设定为 0.46 d.

(5) 饮用水处理厂采用我国最常用的混凝-沉淀-过滤-氯消毒工艺. 饮用水工艺对 6 种雌激素的去除率选用 2.4 节中去除率分布的最小值.

基于以上假设,评价再生水间接补充饮用水过程中雌激素所引发的非致癌风险. 图 7 给出了再生

水中的雌激素在湖库停留时间较低时(3 d)的情况下所引起的非致癌风险. 与 E1、E2、BPA、NP 和 OP 相比,EE2 的非致癌风险较高;当再生水占饮用水比例达到 50% 或 100% 时,再生水中的 EE2 浓度达到 4.3 ng·L⁻¹ 以上或 2.2 ng·L⁻¹ 以上(占总样品数的 33% 和 47%),就会出现 EE2 非致癌风险值高于规定值 1 的情况,再生水补充饮用水存在非致癌风险. 因此,需要对其潜在健康风险进行控制.

由于 EE2 的潜在健康风险较大,进一步评价其在不同湖库停留时间下的潜在风险. 图 8 为再生水在湖库中停留 10 d 或 30 d 并经过饮用水工艺处理后 EE2 对人体的非致癌风险. 当 EE2 在湖库停留时间为 10 d、再生水在饮用水中的比例为 50% 或 100% 时,当再生水源水中 EE2 浓度达到 6.9 ng·L⁻¹ 或 4.1 ng·L⁻¹ 以上(占总样品数的 16% 和 35%),EE2 非致癌风险值超过 1,再生水补充饮用水存在非致癌风险. 而停留时间延长到 30 d 时,再生水在饮用水中的比例为 50% 时,EE2 的非致癌风险值下降到 1 以下,无明显的健康风险;再生水直接回用为饮用水,当再生水原水中 EE2 浓度超过 6.9 ng·L⁻¹ 时,才存在非致癌风险.



湖库停留时间 3 d

图 7 再生水间接补充饮用水过程中雌酮、雌二醇、乙炔基雌二醇、双酚 A、壬基酚和辛基酚的非致癌风险
Fig. 7 Non-carcinogenic risk of E1, E2, EE2, BPA, NP and OP in potable water recharged by reclaimed water

3 结论

(1)再生水间接补给饮用水过程中,雌激素浓度受稀释作用、生物降解作用和饮用水工艺除去作用的影响较大. E1、E2、NP、OP 在河流和湖库中易被降解,而 BPA 和 EE2 半衰期较长,较难被降解.

(2)在湖库停留时间为 3 d 的情景下,再生水中的雌激素经“河流-湖库型水源地-饮用水厂-人体摄入”所引发的非致癌风险在 $10^{-9} \sim 10^1$ 水平. 其中, E1、E2、NP、OP 和 BPA 的非致癌风险值都远低于可能对人体健康造成危害的非致癌风险值 1.

(3)当湖库停留时间为 3 d 或 10 d 时,再生水

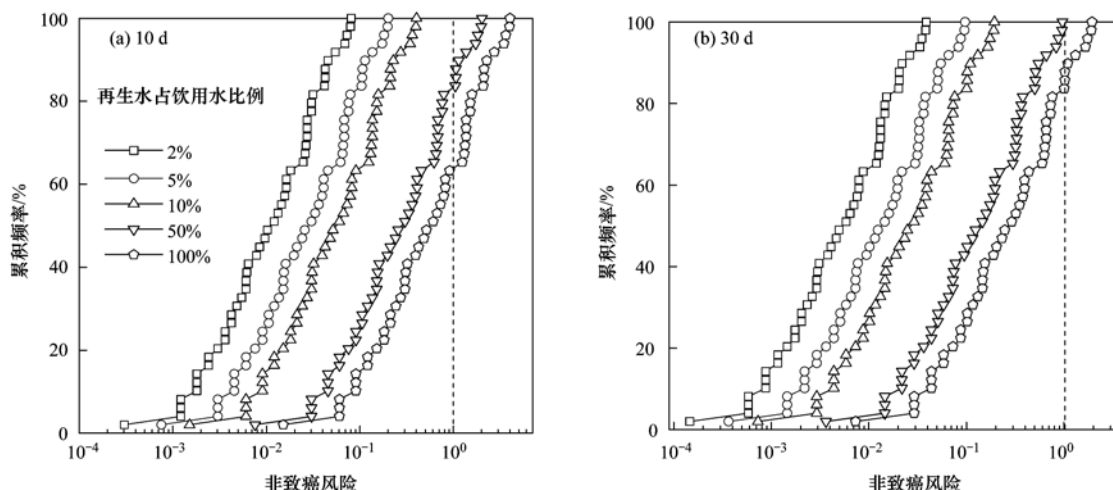


图8 再生水间接饮用过程中湖库中停留时间为10和30 d时EE2的非致癌风险

Fig. 8 Non-carcinogenic risk of EE2 in potable water recharged by reclaimed water

占饮用水中的比例只要达到50%以上,都会出现部分EE2的非致癌风险值高于规定值1,需要优先控制.当湖库的停留时间达到30 d以上时,再生水占饮用水中的比例达到100%,再生水中EE2浓度达到 $6.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,才会出现EE2的非致癌风险值高于规定值1.

参考文献:

- [1] 杨扬, 胡洪营, 陆韵, 等. 再生水补充饮用水的水质要求及处理工艺发展趋势[J]. 给水排水, 2012, **38**(10): 119-122.
- [2] Loraine G A, Pettigrove M E. Seasonal variations in concentrations of pharmaceuticals and personal care products in drinking water and reclaimed wastewater in southern california [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(3): 687-695.
- [3] Swayne M D, Boone G H, Bauer D, *et al.* Wastewater in receiving waters at water supply abstraction points [R]. Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 1980.
- [4] Cao Q M, Yu Q M, Connell D W. Fate simulation and risk assessment of endocrine disrupting chemicals in a reservoir receiving recycled wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(24): 6243-6250.
- [5] 朱宏. 长江流域城市水源水、自来水水质变化趋势及其改进对策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [6] 张韵. 重庆市城镇饮用水水源地水安全调查与评价[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [7] 余楠, 舒为群. 环境雌激素与人类疾病[J]. 国外医学临床生物化学与检验学分册, 2002, **23**(2): 97-98.
- [8] Błazej K, Jacek N. Environmental fate of endocrine disrupting compounds-analytical problems and challenges [J]. Analytical Chemistry, 2008, **38**(4): 242-258.
- [9] Benoit R, Wissem M, Aziza I H H, *et al.* Endocrine disrupting chemicals and human health risk assessment; A critical review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013, **21**(4): 2297-2351.
- [10] Falconer I R, Chapman H F, Moore M R, *et al.* Endocrine-disrupting compounds; A review of their challenge to sustainable and safe water supply and water reuse [J]. Environmental Toxicology, 2006, **21**(2): 181-191.
- [11] Toxicological Evaluation of Certain Veterinary Drug Residues in Food. WHO Food Additive Series: 43. Estradiol- 17 β , Progesterone, and Testosterone. Geneva [R]. World Health Organization, International Programme on Chemical Safety, 2000. Available: <http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v43jec01.htm>.
- [12] United States Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System: Bisphenol A. (CASRN 80-05-7) [Z]. <http://www.epa.gov/iris/subst/0356.htm>.
- [13] European Chemicals Bureau. European Union Risk Assessment Report: 4-N Nonylphenol (Branched) and Nonylphenol [R]. United Kingdom, European Commission Joint Research Centre, 2002.
- [14] Akira H, Makoto E. Effects of 4-tert-octylphenol on initiation and maintenance of pregnancy following oral administration during early pregnancy in rats[J]. Toxicology Letters, 2001, **119**(1): 79-84.
- [15] 任东升, 周志俊. 双酚A生殖与发育毒性研究现状[J]. 环境与职业医学, 2012, **29**(11): 722-726.
- [16] 胡建英, 杨敏. 自来水及其水源中的内分泌干扰物质[J]. 净水技术, 2001, **20**(3): 3-6.
- [17] 程晨, 陈振楼, 毕春娟, 等. 中国地表饮用水水源地有机类内分泌干扰物污染现状分析[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(6): 446-450.
- [18] 陈明, 任仁, 王子健, 等. 北京工业废水和城市污水环境激素污染状况调查[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(6): 1-7.
- [19] 宋明伟. 北江流域水体环境中EDCs 污染物环境风险研究 [D]. 广州: 中山大学, 2010.

- [20] 吴世闽, 贾瑗, 彭辉, 等. 辽东湾海水中甾体雌激素的检测及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1904-1909.
- [21] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评价中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [22] 胡建英, 安伟, 曹红斌, 等. 化学物质的风险评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [23] USEPA. Methodology for deriving ambient water quality criteria for the protection of human health [R]. EPA-822-B-00-004 Washington, DC: Office of Water. USEPA, 2000.
- [24] ECETOC. Derivation of assessment factors for human health risk assessment Technical Report No. 86[R]. Brussels, ECETOC, 2003.
- [25] Stedeford T, Hsu C H, Zhao Q J, *et al.* The application of non-default uncertainty factors in the U. S. EPA's Integrated Risk Information System (IRIS). Part I: UF(L), UF(S), and "other uncertainty factors" [J]. *Journals of Environmental Science and Health. Part C, Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, 2007, **25**(3): 245-279.
- [26] 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, 2012, **23**(12): 1488-1493.
- [27] 郝瑞霞, 梁鹏, 赵曼, 等. 城市污水再生处理过程中壬基酚的迁移转化行为研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, **7**(2): 66-70.
- [28] Jin S W, Yang F X, Liao T, *et al.* Seasonal variations of estrogenic compounds and their estrogenicities in influent and effluent from a municipal sewage treatment plant in China[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(1): 146-153.
- [29] 王宇, 袁涛, 胡江泳. 生活污水中环境雌激素的厌氧消化行为特征及环境风险评价[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1716-1721.
- [30] Zhou H D, Huang X, Wang X L, *et al.* Behaviour of selected endocrine-disrupting chemicals in three sewage treatment plants of Beijing, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **161**(1-4): 107-121.
- [31] 张照韩. 城市水体中雌激素的去除机制及复合污染效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [32] Zhou Y Q, Zha J M, Wang Z J. Occurrence and fate of steroid estrogens in the largest wastewater treatment plant in Beijing, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(11): 6799-6813.
- [33] 黄斌. 类固醇类内分泌干扰物分析方法及其在滇池水环境化学行为研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [34] Zhou Y Q, Zha J M, Xu Y P, *et al.* Occurrences of six steroid estrogens from different effluents in Beijing, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(3): 1719-1729.
- [35] 王凌云, 张锡辉, 陶益. 城市污水处理厂内分泌干扰物浓度分布和去除规律[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2741-2747.
- [36] Jin P K, Jin L, Wang X C, *et al.* An analysis of the chemical safety of secondary effluent for reuse purposes and the requirement for advanced treatment[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(4): 558-562.
- [37] Zhang Y Z, Tang C Y, Song X F, *et al.* Behavior and fate of alkylphenols in surface water of the Jialu River, Henan Province, China[J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(4): 559-565.
- [38] Ying G G, Kookana R S, Ru Y J. Occurrence and fate of hormone steroids in the environment [J]. *Environment International*, 2002, **28**(6): 545-551.
- [39] Klecka G M, Gonsior S J, West R J, *et al.* Biodegradation of bisphenol a in aquatic environments: river die-away [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, **20**(12): 2725-2735.
- [40] 陈月, 何连生, 席北斗, 等. 流速对河道系统截留氮、磷的影响[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(4): 99-103.
- [41] 韩言柱, 翟素军, 孙洪涛. 由河流流速、COD 浓度估计河流 COD 衰减系数的经验模型[J]. 中国环境监测, 1998, **14**(5): 40-42.
- [42] 杨清心, 李文朝. 东太湖围栏养殖及其环境效应[J]. 湖泊科学, 1995, **7**(3): 256-262.
- [43] 吴庆龙, 陈开宁, 边文冀. 骆马湖渔业资源利用探讨[J]. 资源科学, 1999, **21**(6): 22-24.
- [44] 梁文斌, 张合平, 何平. 南洞庭湖区域经济植物资源与开发利用[J]. 经济林研究, 2000, **18**(2): 48-49.
- [45] Ruley J E, Rusch K A. An assessment of long-term post-restoration water quality trends in a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake[J]. *Ecological Engineering*, 2002, **19**(4): 265-280.
- [46] 顾岗, 陆根法. 太湖五里湖水环境综合整治的设想[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 56-60.
- [47] 于少鹏, 孙广友, 窦素珍, 等. 东平湖水生植物的衰退及南水北调工程对其影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(2): 200-204.
- [48] 臧小平, 吴国平, 徐敏. 长江流域湖泊水库水华防治对策[J]. 人民长江, 2009, **40**(21): 5-8.
- [49] 吴雪峰, 程曦, 李小平. 淀山湖浮游植物营养限制因子的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(3): 292-298.
- [50] 战雯静, 张艳, 马蔚纯, 等. 长江口大气重金属污染特征及沉降通量[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 900-905.
- [51] 王洪道. 我国东部平原湖泊水资源分析[J]. 自然资源, 1986, (2): 77-83.
- [52] 邵兵, 胡建英, 杨敏. 重庆流域嘉陵江和长江水环境中壬基酚污染状况调查[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(1): 12-16.
- [53] Westerhoff P, Yoon Y, Snyder S, *et al.* Fate of endocrine-disruptor, pharmaceutical, and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment processes [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(17): 6649-6663.
- [54] 原盛广. 北京市自来水中痕量有毒有机污染物的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [55] 邵晓玲, 马军, 文刚. 松花江流域某自来水厂中内分泌干扰

- 物的调查[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2723-2728.
- [56] 李青松, 高乃云, 马晓雁, 等. 南方某水厂处理工艺过程中甾体雌激素的变化规律[J]. 四川环境, 2011, **30**(3): 1-4.
- [57] 郑永红. 淮南市平山头水厂中分泌干扰物的去除特征研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
- [58] U. S. EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (PartA) [R]. EPA/540/1-89/002, Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response. U. S. EPA, 1989.
- [59] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. <http://www.moh.gov.cn/publicfiles/business/htmlfiles/zwgkzt/ptjnj/year2008/8.htm>
- [60] Australian Guildlines for Water Recycling Managing Health and Environmental Risks (Phase 2)-Augmentation of Drinking Water Supplies [R]. Natural Resource Management Ministerial Council/Environment protection and Heritage Council./National Health and Medical Research Council, 2008. 36-37.
-

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2013年9月27日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续12次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行