

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展

都韶婷¹, 金崇伟², 刘越¹

(1. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310035; 2. 浙江大学环境资源学院, 教育部环境修复与生态健康重点实验室, 杭州 310029)

摘要: 类固醇雌激素被认为具有极强的内分泌干扰性和生物活性, 在极低浓度下就能引起人体或动物生殖障碍、行为异常和幼体变异等。由于水体中的类固醇雌激素的生态环境效应最为直接, 因此, 本文综述了近年来关于水环境中几种常见的类固醇雌激素的基本特征、污染现状、来源及迁移过程的研究, 以期类固醇雌激素的水处理技术研究提供基础信息。

关键词: 雌酮; 雌二醇; 雌三醇; 地表水; 污水

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3358-10

A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System

DU Shao-ting¹, JIN Chong-wei², LIU Yue¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China; 2. Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education, College of Natural Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Steroid estrogens are a group of biologically active endocrine disruptors. An extremely low level of steroid estrogens is sufficient to result in reproduction and behavior disorders, and larval mutation of both human being and animals. The ecological and environmental effects of steroid estrogens should be more direct on organisms in water system as compared with those in other environment systems. Therefore, in this paper we reviewed the physical and chemical properties of some frequently-used steroid estrogens, and their contamination status, origins and transfers in water system, so as to provide a theoretical basis for developing estrogen removal strategies.

Key words: estrone; estradiol; estriol; surface water; wastewater

类固醇雌激素被认为具有最强的内分泌干扰性和生物活性。虽然, 类固醇雌激素因冠以“天然激素”的头衔被忽视多年, 仅于近年来才引起世界的关注, 但由于它对人体健康的威胁十分直接, 能导致生殖系统疾病发病率上升^[1,2], 科学家对此十分重视。研究表明, 极低浓度($10^{-12} \sim 10^{-9}$) 的类固醇雌激素就能引起人体或动物生殖障碍、行为异常和幼体变异等^[2]。基于如此高的生物活性, 婴儿性早熟、雄鱼雌化等病案的频发^[3], 近年来类固醇雌激素的环境效应及其处理对策研究备受瞩目^[4,5]。目前, 研究人员从水体、土壤、大气甚至饮用水中均检测到了类固醇雌激素^[4,6]。其中, 水体类固醇雌激素污染尤为突出。例如, 市政污水处理厂出水中往往含有一定量的类固醇雌激素(达 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1} \sim \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 畜禽粪便灌溉土壤的径流液中类固醇雌激素含量也很高, 这些类固醇雌激素最终都会进入水环境, 影响人类的生活。本文将综述水环境中几种常见类固醇雌激素的基本特征、污染现状、来源及迁移过程, 以期类固醇雌激素的环境效应及处理技术研究提供基础信息。

1 类固醇雌激素的种类及特性

类固醇雌激素可分为天然类固醇雌激素(如雌酮 E1、雌二醇 E2、雌三醇 E3)和人工合成类固醇雌激素(如乙炔雌二醇 EE2 和炔雌醇甲醚 MeEE2)^[7], 其结构式及物理化学特性详见表 1^[4,8~11]。类固醇雌激素在水中的溶解度较低, 天然雌激素 E1、E2 和 E3 的溶解度分别为 13、13 和 23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。人工合成雌激素 EE2 和 MeEE2 的溶解度则更低, 分别为 4.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这些类固醇雌激素都具有类似的分子结构, 包括如下 4 个环状结构: 1 个苯酚(图 1A)、2 个环己烷(图 1B 和 1C)和 1 个环戊结构(图 1D)。不同类固醇雌激素在结构上的区别表现在第 16、17 个碳(C)的位置上连接了不同的基团(图 1 和表 1), 如 E1 的 C17 上连接了一个羧基, E2 的 C17 连接了一个羟基, E3 的 C16

收稿日期: 2012-12-21; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(30900170); 浙江省自然科学基金项目(Y5090106)

作者简介: 都韶婷(1980~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: dushaoting@gmail.com

和 C17 均连接了一个羟基. C17 上羟基空间结构的不同, 又形成了 17 α -雌二醇 (17 α) 和 17 β -雌二醇 (E2). 两种物质虽然物理化学性质基本相同, 但其雌激素效应相差近 500 倍. 在上述几种类固醇雌激素中, EE2 的雌激素效应最强, 其次为 E2 和 E3. 按雌激素效应从大到小顺序排列, EE2、E2、E3、MeEE2、E1 和 17 α 的激素效应比值分别为 246: 100: 17. 6: 11: 1. 54: 0. 26^[4,9]. Hanselman 等^[12]指出上述类固醇雌激素的激素效应是其它常见内分泌干扰物的 10 000 ~ 100 000 倍. 它们能促进多种癌症的病发, 尤其能诱发乳腺癌和子宫癌细胞的增殖^[13], 对人体健康产生了严重的威胁. 因此, 环境中类固醇雌激素的存在不容忽视.

在自然界中, 上述游离态的雌激素还可与硫酸 (SUL) 及葡萄糖醛酸 (GLU) 结合, 形成 E1-3-SUL、E1-3-GLU、E2-3, 17-SUL 和 E2-3, 17-GLU 等物质. 由于游离态雌激素与硫酸基或葡萄糖醛基团结合后分子量大大增加, 因而结合态雌激素往往在水溶液中的溶解度更高, 如 E1-3-GLU 和 E2-3-GLU 的溶

解度分别为 303 mg·L⁻¹ 和 347 mg·L⁻¹^[4]. 结合态雌激素的生物雌激素效应极低, 仅为 E2 的 1/4 000 ~ 1/20 000^[5,14]. 但是, 环境中的结合态雌激素也会在微生物的作用下水解, 转化成高雌激素活性的游离态雌激素. 在这个相互转化的过程中, 具有水解结合态雌激素功能的酶常被称为葡萄糖醛酸酶和硫酸酶. 其中, 硫酸结合态雌激素的水解过程比葡萄糖醛酸雌激素的更加困难, 因而在环境中显得更为稳定. 因此, 在众多的污水、沉积物等样品中常能检测到硫酸结合态雌激素, 而葡萄糖醛酸雌激素却较少报道^[15].

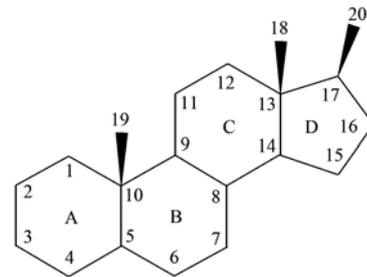


图 1 通用结构式 C 位置编号

Fig. 1 Basic steroid hormone structure with carbon labeled

表 1 几种类固醇雌激素的物理化学特征^[4,8-11]

Table 1 Physical and chemical properties of steroid estrogens

名称	化学式	结构式	溶解度 /mg·L ⁻¹	辛醇/水分配系数 /lgK _{ow}	蒸气压 /Pa	pK _a	雌激素效应 相对值
雌酮 (E1)	C ₁₈ H ₂₂ O ₂		13.0	3.43	3.07 × 10 ⁻⁸	10.3 ~ 10.8	2.54
雌二醇 (E2)	C ₁₈ H ₂₄ O ₂		13.0	3.94	3.07 × 10 ⁻⁸	10.71	100
雌二醇 (17 α)	C ₁₈ H ₂₄ O ₂		13.0	3.94	3.07 × 10 ⁻⁸	10.46	0.26
雌三醇 (E3)	C ₁₈ H ₂₄ O ₃		32	2.81	8.9 × 10 ⁻¹³	10.4	17.6
乙炔雌二醇 (EE2)	C ₂₀ H ₂₄ O ₂		4.8	4.15	6 × 10 ⁻⁹	10.4	246
炔雌醇甲醚 (MeEE2)	C ₂₁ H ₂₆ O ₂		0.3	4.67	10 × 10 ⁻⁸	13.1	11

2 水体类固醇雌激素污染现状

水体中的类固醇雌激素含量状况近年来备受关注,影响最为直接,无论是人类亦或动物产生的雌激素终会经一系列迁移转化过程进入地表水. 因此,大多数研究以江、河、溪流及近海等地表水为研究对象进行了E1、E2、E3和EE2含量的检测. 另外,城市污水处理厂的进水及出水含一定量的类固醇雌激素,其出水往往直接排放进入当地河流等水域,因而污水处理厂的类固醇雌激素含量的高低也将直接影响水体雌激素水平. 因此,本文拟从地表水及污水处理厂两方面来展开水体类固醇雌激素污染现状的讨论.

2.1 地表水类固醇雌激素污染现状

近十年来,地表水中的类固醇雌激素水平受到了较多关注. 一些研究纷纷报道了各地地表水中的类固醇雌激素含量状况. 如我国天津地区的某3条河流检测到了E1、E2、E3和EE2,最高浓度分别达55.3、32.4、46.4和35.6 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [16]. 对太湖梅梁湾水域4处取样测定发现E2浓度为5.5~15.5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,E3浓度低于检测限,EE2浓度为5.7~30.8 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [17]. 对我国南部珠江地区的珠江和贡江共31个水样测定发现E1和E2浓度范围分别为LOD~8.2 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和LOD~1.5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [18]. 这些报道均认为我国地表水中的类固醇雌激素来源与未经处理的农业和生活污水的排放有关. 其中,EE2主要来源于女性避孕药物的使用. 另外,各国相关报道也较多(表2). 如有研究在日本109条河流中采集了256个样品,并于其中的222个样品中检测到了类固醇雌激素,夏季和秋季的E2平均浓度分别为2.1

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和1.8 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [19]. Kawaguchi等[20]调查了日本著名水系多摩川的类固醇雌激素污染状况,结果显示主要为E1和E2污染,EE2低于检测限. 针对德国南部某污水处理厂周围河流上下游取样后发现,E1、E2和EE2浓度为200 $\text{pg}\cdot\text{L}^{-1}$ ~5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [21]. 另一研究在荷兰的11个沿海、河口及湖泊样品中检测到7处含E1,平均值为0.3 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 并且,所有样品中仅3~4处检测到了E2和EE2,且低于1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [22]. Kolpin等[23]调查了美国93处溪流的雌激素水平,发现E1、E2、E3和EE2浓度均值分别为27、9、19和73 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 意大利某河流中检测到E3浓度为0.33 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,而E2和E1的浓度分别为0.11 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和1.5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [24]. 另外,法国、瑞士、比利时和韩国河流类固醇雌激素污染相关报道中也均检测到了一定含量的E1、E2和E3,EE2浓度低于检测限[25~27]. 就上述报道而言,各国地表水类固醇雌激素含量存在较大差异. 相比较,欧洲国家地表水中类固醇雌激素含量较低,而美国地表水中类固醇雌激素含量较高. 尤其是EE2,欧洲国家大部分水样中EE2低于检测限,而在美国却检测到了较高水平的EE2. 目前虽然尚鲜见相关类固醇污染成因的统计学报道,但推测这可能与各国的农业污染物排放政策及污水处理体制有关. 如美国的农业政策规定若粪污农用时不直接进入水体,可允许其不经处理直接施用,这就大大增加了类固醇雌激素进入水体的总量. 虽然,各国地表水类固醇雌激素含量存在一定差异,但其浓度水平仍已临近甚至超过了毒理试验的风险临界值. 如5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 的E2就能诱导日本青鳉雄鱼产生雌性特有蛋白[19]. 1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 的EE2能使新西兰泥螺胚

表2 各国河流中类固醇雌激素数值¹⁾

Table 2 Concentration of steroid estrogens in surface water

位置	采样时间	采样点数	浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$				文献
			雌酮	雌二醇	雌三醇	乙炔雌二醇	
中国天津	2007	38	0.64~55.3	LOD~32.4	LOD~46.4	LOD~35.6	[16]
中国太湖	1999	4	—	5.5~15.5	LOD	5.7~30.8	[17]
中国珠江	2007	31	LOD~8.2	LOD~1.7	—	—	[18]
日本	—	3	8.7~19.7	4.2~5.3	—	LOD	[20]
德国	2000	31	0.1~4.1	0.15~3.6	—	0.1~5.1	[21]
意大利	1999	2	1.5	0.11	0.33	0.04	[24]
荷兰	1997	11	0.1~3.4	0.3~5.5	—	0.1~4.3	[22]
美国	1999~2000	93	27	9	19	73	[23]
韩国	2007~2008	21	14.7±3.6	4.3±1.1	—	LOD	[25]
法国	2000	2	LOD~2.7	LOD	LOD~7.1	LOD	[26]
瑞士	2000	5	LOD~1.6	LOD~3.8	LOD~1.4	LOD	[26]
比利时	2002~2004	7	0.37~10	LOD	—	LOD	[27]

1) LOD代表低于检测限;“—”代表未说明或未检测,下同

胎数量大增^[28]. 浓度为 $10 \sim 300 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 E1 和 E2 能改变苜蓿体内植物性激素的合成, 当浓度升高至 $5 \sim 500 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 后便能促进苜蓿快速增长^[29, 30]. 目前, 虽未有相关人体健康试验数据, 但从类固醇雌激素对动植物的影响试验来看, 地表水类固醇雌激素污染亟须重视.

2.2 污水处理厂中的类固醇雌激素现状

近几年来, 关于我国城市污水处理厂进水和出水中类固醇雌激素状况的报道日益增多. 本文列举的我国 4 处污水处理厂中, 进水中 E1、E2、E3 和 EE2 的最高值分别达 171、140、830 和 $330 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水浓度最高值分别为 74.2、8.6、6.6 和 $11.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[31-33]. 就进水浓度而言, 我国污水处理厂进水中各类固醇雌激素含量普遍高于表 3 中列举的其他国家数据. 就出水浓度而言, 我国污水处理厂出水中各类固醇雌激素含量高于德国、法国和西班牙等国, 与另外一些国家出水值较为接近. 就去除效率而言, 我国污水处理厂的类固醇雌激素去除效率与其他国家较为接近, 基本可达 80% 以上.

各国关于城市污水厂进水和出水中的类固醇雌激素水平的报道也较多, 详见表 3. 如意大利 6 家污水处理厂进水中 E1、E2、E3 和 EE2 的平均含量分别为 52、12、80 和 $3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[24]. 与中国较为类似, 其进水中 E3 的浓度较高. 对德国多个污水处理厂的调查研究表明, 进水 E2 和 EE2 浓度较低, 最高值分别为 $19 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 相比而言 E1 的浓度范围波动较大, 可达 $27 \sim 280 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[34-36]. 上述德国污水处理厂对雌激素的去除效率也较高, 经处理后有部分样品出水的 E1、E2 和 EE2 低于检测限. 荷兰 5 家污水处理厂的调查报告中 also 显示该污水处理厂雌激素去除效率较高, 出水浓度较低, E1、E2 和 EE2 的浓度分别为 $0.4 \sim 47$ 、 $0.1 \sim 5.0$ 和 $0.2 \sim 7.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[22]. 英国污水处理厂的出水中各类固醇雌激素含量也较低, E1 和 E2 浓度分别为 $1.4 \sim 76 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.7 \sim 48 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, EE2 浓度均小于 $7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3]. 针对法国的污水处理厂调查显示, 某污水厂进水 E1、E2、E3 和 EE2 浓度分别为 $6 \sim 97$ 、 $13 \sim 28$ 、 $35 \sim 111$ 和 $0.2 \sim 20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 E3 浓度在各国中也属较高水平. 就出水而言, 除 E2 外, 部分样品中未检出其它雌激素. 尤其是 E3, 所有出水样品中均未检出^[26, 37]. Ternes 等^[34] 报道了巴西污水处理厂进水 E1、E2 和 EE2 平均浓度为分别 40、21 和 $6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 在加拿大, 某污水处理厂检测到出水 E1 和 E2 的最高浓度为 $48 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $64 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

EE2 检测到的比例较高, 在调查的 10 个出水样品中就有 9 个检出了 EE2, 最高浓度达 $42 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[34]. 加拿大另一污水处理厂中, 出水 E1 和 E2 平均浓度分别为 $49 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $15.6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[38]. 日本某污水处理厂中, 其进水类固醇雌激素含量也较高. 尤其是进水 E1 和 E3 浓度, 相较其他国家属较高值. 而且, 其出水 E2 浓度含量也高达 $0.49 \sim 16.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[39]. 相比而言, 在德国、意大利、荷兰、瑞士、西班牙及美国的污水处理厂出水中, E2 的浓度却较低, 均小于 $7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[22, 24, 34, 40, 41].

从表 3 可知, 污水处理厂的进水中含有一定量的类固醇雌激素. 它们绝大部分来源于人类的排泄物, 并且这些排泄物中的类固醇雌激素大部分是低活性的硫酸和葡萄糖醛酸结合物, 但在进入污水处理系统后这些结合态的雌激素经微生物的作用发生了裂解, 部分被完全降解, 部分将以活性的形态进入水环境^[24, 34]. 在整个污水处理过程中, 污水处理厂实现了含雌激素污水的集体处理, 如意大利某污水处理厂的 E1、E2、E3 和 EE2 的去除效率分别为 61%、87%、95% 和 85%^[24]; 巴西某污水处理厂, E1、E2 和 EE2 处理效率分别为 67%~83%、92%~99.9% 和 64%~78%^[34]; 日本某污水处理厂, 秋季和夏季 E2 处理效率分别为 99% 和 7%~99%^[46]. 上述研究也表明, 污水处理厂中最常见的活性污泥处理系统十分适用于类固醇雌激素的去除. Johnson 等^[47] 综述了活性污泥处理中雌激素去除效率的相关研究, 并总结指出 E2、E3 和 EE2 经活性污泥处理后基本能去除 85%, 但 E1 的去除效率要低一些且差异较大(20%~85%^[5]). 其中, 类固醇雌激素的去除可主要归因于微生物的降解及污泥的吸附作用. 虽然污水处理厂能实现雌激素的一定量的降解, 但其出水雌激素含量仍较高, 随着出水进入当地地表水, 引起地表水雌激素浓度的升高. 不仅如此, 部分类固醇雌激素降解后并未完全矿化, 而形成了一系列代谢产物. 研究表明, 很多代谢产物仍然具有一定的雌激素活性, 甚至与 E1 和 E2 的活性相当^[5]. 因此, 这些代谢产物也对环境生态安全产生了威胁.

3 类固醇雌激素的来源及迁移

3.1 来源

人类每天都在不断分泌天然类固醇雌激素, 是环境类固醇雌激素的主要来源之一. 女性每日 E1 的分泌量为 $3 \sim 20 \text{ } \mu\text{g}$, E2 分泌量达 $2 \sim 12 \text{ } \mu\text{g}$. 孕期

表 3 各国污水处理厂进出水中的类固醇雌激素数值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 3 Concentration of steroid estrogens in influents and effluents of sewage treatment plants/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

位置	采样时间	污水处理厂数量	主要工艺	进/出水	雌酮	雌二醇	雌三醇	乙炔雌二醇	文献
中国北京	2006-10 ~ 2007-10	1	A ² O	进	11.6 ~ 110	3.7 ~ 140	LOD ~ 760	LOD ~ 330	[31]
				出	0.2 ~ 74.2	LOD ~ 8.4	LOD ~ 6.6	LOD ~ 5.1	
	2005-05 ~ 2005-12	2	A ² O	进	171	46.6	830	15.0	[32]
				出	2.5	1.0	1.3	2.2	
中国武汉	2004-12 ~ 2005-08	1	A ² O	进	120	7.2	120	16.2	[33]
				出	4.3	LOD	LOD	11.4	
意大利	1999-10 ~ 2000-03	6	—	进	38.6	21.4	53.9	LOD	[33]
				出	7.2 ~ 31.5	0.5 ~ 8.6	LOD	LOD	
荷兰	1997-10 ~ 1997-12	5	曝气池/氧化沟	进	25 ~ 132	4 ~ 25	24 ~ 188	0.40 ~ 13	[24]
				出	2.5 ~ 82	0.44 ~ 3.3	0.43 ~ 18	LOD ~ 1.7	
德国	1997-11	16	曝气池 + FeCl ₃ /FeCl ₂	进	0.4 ~ 47	0.1 ~ 5.0	—	0.2 ~ 7.5	[22]
				出	27	15	—	—	
德国	2001	1	A ² O	进	9	<LOD	—	1	[34]
				出	55 ~ 77	12 ~ 19	—	6 ~ 10	
德国	2002	1	—	进	LOD ~ 1	LOD ~ 1	—	LOD ~ 1	[35]
				出	188 ± 92	11.8 ± 5.1	—	8.8 ± 8.0	
法国	2004 ~ 2005	1	A ² O	进	12.6 ± 7.0	0.8 ± 0.3	—	1.7 ± 1.3	[36]
				出	6 ~ 97	13 ~ 28	35 ~ 111	0.2 ~ 20	
英国	2001	2	活性污泥	进	LOD ~ 10.2	1.3 ~ 9.8	LOD	LOD ~ 5.3	[26]
				出	1.4 ~ 76	2.7 ~ 48	—	LOD ~ 7	
巴西	1997-06	1	曝气池/滴滤池	进	40	21	—	6	[34]
				出	LOD ~ 48	LOD ~ 64	—	LOD ~ 42	
加拿大	1997-11	10	曝气池 + NaClO	进	19 ~ 78	2.5 ~ 26	—	—	[38]
				出	1 ~ 96	0.2 ~ 14.7	—	—	
日本	2001 ~ 2003	5	活性污泥	进	30 ~ 200	10 ~ 30	80 ~ 300	—	[39]
				出	2.8 ~ 110	0.49 ~ 16.7	0 ~ 0.84	—	
美国	1997	4	—	进	—	0.477 ~ 3.66	—	LOD ~ 0.759	[40]
				出	49.8 ± 1.7	44.6 ± 1.9	22.1 ± 3.0	55.9 ± 3.0	
美国	—	2	曝气池	进	9.0 ± 0.7	1.0 ~ 0.4	4.0 ± 0.7	32.7 ± 2.6	[42]
				出	57.8 ~ 83.3	LOD ~ 161.2	LOD ~ 259.2	LOD ~ 1.2	
澳大利亚	—	3	滴滤池/活性污泥	进	6.3 ~ 49.1	LOD ~ 5.4	LOD ~ 3.9	LOD ~ 0.6	[43]
				出	29 ~ 670	14 ~ 125	23 ~ 660	3 ~ 70	
瑞士	2002 ~ 2003	13	活性污泥	进	LOD ~ 72	LOD ~ 30	LOD ~ 275	LOD ~ 5	[44]
				出	1 ~ 617	1 ~ 24	—	—	
西班牙	1999 ~ 2000	3	活性污泥	进	2.0 ~ 50.5	LOD ~ 6.4	LOD ~ 17.5	LOD ~ 2.8	[26]
西班牙	2002	1	活性污泥	进	2.4	3	—	<1	[41]

女性分泌量则更高, E1、E2 和 E3 分泌量分别达 600、259 和 6 000 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ [48]。还有报道甚至指出孕期女性的 E2 分泌量可高达 5 $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$ [49]。除了女性能每日分泌雌激素, 男性也能分泌雌激素。例如, 男性尿液中 E1、E2 和 E3 分泌量分别为 3.9、1.6 和 1.5 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ [48]。在女性及男性的尿液中, E2 属于初级代谢产物具有较高的生物活性。17 α 和 E1 则属于次级代谢产物, 活性相对降低。而 E3 为末级代谢产物, 活性最低[5]。Combalbert 等[4]根据 2009 年美国人口调查局的相关数据, 计算得出每百万人口每年向环境排泄输入的一类固醇雌激素量高达 4.4 kg。

另外, 服用口服避孕药后的人体尿液中还将含人工合成雌激素 EE2 (EE2 是口服避孕药的主要成分之一), 分泌量可达 35 $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。Stuer-Lauridsen 等[50]指出药用雌激素年消耗量可高达 20 kg (每百万人口)。当 6 千万妇女使用这些药物时, 按 60% 分泌计, 则每年人工合成雌激素分泌量将达 720 kg[4]。虽然, 上述雌激素均将随尿液等排泄物进入城市污水处理厂, 其大部分将被降解, 但污水处理厂出水中仍将含一定量的雌激素, 最终进入水环境, 给人类及动植物的健康带来威胁 (图 2)。

畜禽养殖过程产生的粪污中也含有大量类固醇

雌激素,是环境类固醇雌激素的另一主要来源. 例如,猪粪干重 E2 含量可达 $14 \sim 533 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ [2]. 牛尿液中 E2 平均浓度可达 $13 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ [51]. 有报道指出,在美国畜禽的类固醇雌激素年贡献量可达 48.5 t (按 E2 等价计)[52]. 其中,牛、猪和鸡养殖业的贡献量分别为 45、0.8 和 2.7 t. 而 E2 和 E1 又占了其中的 95%. 英国一研究报道指出进入水体的雌激素有 15% 来自畜禽[53]. 由此可见,畜禽粪污中的类固醇雌激素不可忽视. 此外,不同畜禽品种粪污中的类固醇雌激素不仅在含量上存在较大差异,而且其激素类型也不同. 如奶牛可分泌 17α 、E2、E1 和 E3,其中 17α 量大于 E2. Zheng 等[54] 在新鲜牛排泄物中检测到 E1、 17α 和 E2 的含量分别达 535、1 416 和 $153 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 而其它一些动物主要分泌 E1、E2 和 E3,基本不含 17α [5]. 此外,各畜禽之间分泌雌激素的途径也不一致,如牛和羊分泌的雌激素主要在粪便中,其比例分别为 50% ~ 70% 和 96%. 而猪和禽类分泌的主要在尿液中,分别为 90% ~ 96% 和 69% [4,55]. Larsson 等[56] 指出畜禽尿液中的雌激素主要以硫酸及葡萄糖苷结合态为主,而粪便中则以游离态为主. 因此,牛和羊产生的大部分雌激素将以游离的形态随粪便进入环境. 而猪和禽类产生的大部分雌激素主要以结合态随尿液进入环境. 另外,基于养殖目的(如控制发情周期、治疗生殖障碍或诱发流产等),饲料中往往添加了一些类固醇雌激素药物,使畜禽粪污中的类固醇雌激素含量大增[57]. 这些饲料添加剂的广泛使用,不可避免地加剧了畜禽粪便中类固醇雌激素的污染[58].

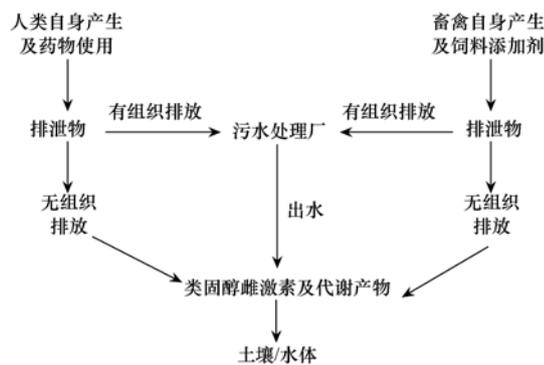


图2 类固醇雌激素的来源

Fig. 2 Sources of steroid estrogens

3.2 类固醇雌激素向水体的迁移

类固醇雌激素向水体的迁移途径主要有两个:一是人体或动物产生的类固醇雌激素随排泄物进入污水处理厂,部分被污水系统降解,部分随出水进入水体;二是畜禽粪便农用或随意堆放引起的类固醇

雌激素向土壤迁移,部分被土壤吸收降解,部分随土壤径流等形式进入水体. 就第一个途径而言,寻求强化污水处理厂中类固醇雌激素高效去除的方法,有望减轻该途径引起的雌激素污染. 由于微生物在污水处理厂去除类固醇雌激素的过程中发挥了主要作用,因而强化微生物作用的工艺对去除雌激素更具优势. 在污水处理中,活性污泥法、生物膜法及厌氧生物处理法是应用最广的生物处理技术. 与生物膜法和厌氧生物处理法相比,活性污泥系统具有更强的雌激素去除能力. 其中,水力停留时间(HRT)和污泥停留时间(SRT)是影响污水处理中类固醇雌激素去除效率的两个重要因素. 提高 HRT 和 SRT 将有利于雌激素的去除. 另外,污水及活性污泥的特性(如 pH、水温、悬浮颗粒物浓度、雌激素初始浓度、泥龄及污泥微生物群落结构等)也将影响雌激素的去除效率[5]. 因此,在污水处理厂可根据当地的设备、进水的特点等技术指标选取合适的工艺流程以强化微生物的作用,从而降低出水中类固醇雌激素的浓度. 另外,一些大型养殖场也往往配备了粪污处理设施. 处理后粪污的雌激素含量及总活性均有大幅度下降[59]. 就第二个途径而言,土壤,尤其是施用了粪污的土壤,其部分雌激素将随着土壤径流等迁移过程,逐步转移至地表水,甚至地下水. 土壤雌激素水平、粪污农用状况与当地地表水的雌激素水平密切相关. 例如,有报道发现当施用猪粪用量为 $5\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤径流液中的 E2 可达 $3\ 500 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ [60]. Shore 等[61] 也指出某地溪水中浓度为 $5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 E2 就来源于周围的土壤. Kjaer 等[62] 指出粪污农用后雌激素由土壤迁移至水体的速度十分迅速. 他们在施用粪污的 3 个月后就 在农田沟渠中检测到 E1 和 E2 达 $68.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 因此,粪污农用中引起的土壤雌激素含量升高对地表水的影响极其关键. 我国是一个典型的农业大国,粪污农用是一种传统的耕作手段. 因此,在今后的政策制定中,也应适当考虑类固醇雌激素污染粪污的合理处置. 即使在发达国家,粪污农用后产生的雌激素污染问题也不可忽视. 如美国的政策规定若粪污农用时不直接进入水体,可允许其不经处理直接施用. 1999 ~ 2000 年的一份调查研究显示,美国 30 个州的 139 处水体含 E2 和 E1 高达 $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $112 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ [23]. 因此,无论是发达国家还是发展中国家,畜禽粪污农用对地表水类固醇雌激素的影响均值得重视. 虽然,进入地表水体的类固醇雌激素,将经历吸附、降解等物理化学及生

物转化过程最终被去除,但仍将有一部分残留于地表水体. 甚至,部分形成的中间代谢产物仍具有较强的雌激素活性. 因此,地表水中富集的一类固醇雌激素及其代谢物的生物效应引起了科学家的极大重视. 利用重组酵母雌激素筛检法(YES法)或幼鱼等水生生物以检测环境样品的雌激素活性的报道很多^[19,28,63,64]. 此外,还有部分研究开始关注雌激素在生物体内的累积效应. Liebig等^[65]报道了水生寡毛纲丝蚓能够吸收¹⁴C标记的EE2,并累积于体内,最终被食物链上一级如鱼类捕食,引起幼鱼变态等问题(如一些斑马鱼、红鳟鱼的报道)^[5,66]. 但是,目前有关自然环境中雌激素的生物累积的基础数据仍然较少,在今后尤其应给予关注.

4 展望

人类及畜禽的自身代谢产生的天然类固醇雌激素,以及来源于药物和饲料的人工类固醇雌激素将随着排泄物进入土壤及水体环境. 虽然部分雌激素将被土壤及水体吸附或降解,部分随污水处理去除,但是仍有一部分会进入人类生活环境,给人类的健康产生潜在的威胁(图3). 进入水体的类固醇雌激素主要来源于畜禽养殖业和污水处理厂. 养殖业产生的类固醇雌激素总量很大,但除一些粪污堆肥条件影响类固醇雌激素降解效率的研究外^[67],尚未见合理的应对措施提出. 另有少量报道研究了养殖业污水处理中类固醇雌激素的去除情况,结果表明养

殖废水集中处理中常用的厌氧发酵模式也能使废水中的雌激素含量及总活性大幅度下降^[59]. 随着集约式养殖业的发展,养殖废水的集中处理更易实行,有利于降低养殖业产生的雌激素的环境负担. 对于农民小规模养殖产生的粪污,笔者也建议在排放或农用前设置一个简易的发酵池以进行简单的预处理. 因此,在今后的研究中,从污染源头着手进行有关如何合理处置畜禽粪污、如何在粪污农用之前进行预处理等相关技术及粪污处理过程中类固醇雌激素的转化过程及机理的研究应值得重视.

再次,城市生活污水厂外排的雌激素问题仍然存在,目前污水处理厂的工作重心仅在氮、磷的去除,而许多类固醇雌激素的研究仅是检测其数值,如何在保证氮、磷高效去除的基础上提高雌激素的去除效率显得十分重要. 一般观点认为,污水处理厂中实现类固醇雌激素去除的最主要途径是微生物的作用^[68,69]. 筛选、强化具有高效类固醇雌激素去除能力的微生物、优化以微生物作用为主的工艺不失为一个很好的途径. 例如市政污水处理厂污泥中常见的大肠杆菌、荧光假单胞菌、苏云金芽胞杆菌株具有较高的类固醇雌激素降解能力,增加这些微生物的数量及活性应有利于雌激素的去除^[70]. 膜生物反应器具有较长的停留时间及复杂的微生物群落结构,十分利于类固醇雌激素的降解. 微滤膜(MF)、纳滤膜(NF)、超滤膜(UF)和反渗透膜(RO)等也适用于类固醇雌激素的去除. 在污水处

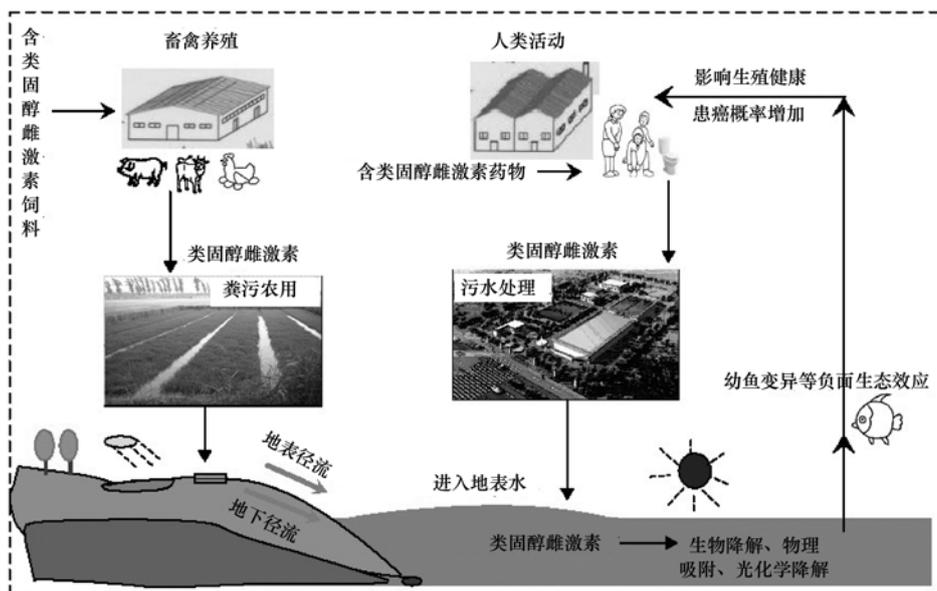


图3 类固醇雌激素的来源及迁移过程

Fig. 3 Sources and transportation of steroid estrogens

理过程中结合上述技术也能提高雌激素的去除效率^[71,72]。此外,利用氧化的方式去除污水中的类固醇雌激素也是近年来的研究热点,研究对象主要包括光、臭氧、氯、二氧化锰等氧化剂及 TiO₂ 等催化剂^[72]。类固醇雌激素的氧化去除虽然快捷且有效,但是其代谢产物大多仍具有较强的雌激素效应。开展后续研究以明确其氧化过程的机制,评估代谢产物的环境效应,从而合理利用上述手段以配合生物降解、吸附等手段来提高类固醇雌激素的去除效果显得十分重要。总之,类固醇雌激素的研究刚刚起步,越来越多的科学家对此重视,笔者相信类固醇雌激素相关研究的开展有望为今后污水处理厂同步去除类固醇雌激素奠定良好的基础。

参考文献:

- [1] 包国章,董德明,李向林,等. 环境雌激素生态影响的研究进展[J]. 生态学杂志, 2001, **20**(5): 44-50.
- [2] Campbell C G, Borglin S E, Green F B, *et al.* Biologically directed environmental monitoring, fate, and transport of estrogenic endocrine disrupting compounds in water: a review [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(8): 1265-1280.
- [3] Desbrow C, Routledge E J, Brighty G C, *et al.* Identification of estrogenic chemicals in STW effluent: 1. chemical fractionation and in vitro biological screening[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(11): 1549-1558.
- [4] Combalbert S, Hernandez-Raquet G. Occurrence, fate and biodegradation of estrogens in sewage and manure[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **86**(6): 1671-1692.
- [5] Khanal S K, Xie B, Thompson M L, *et al.* Fate, transport, and biodegradation of natural estrogens in the environment and engineered systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(21): 6537-6546.
- [6] Jiang J Q, Yin Q, Zhou J L, *et al.* Occurrence and treatment trials of endocrine disrupting chemicals (EDCs) in wastewaters [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(4): 544-550.
- [7] 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.
- [8] Lai K M, Johnson K L, Scrimshaw M D, *et al.* Binding of waterborne steroid estrogens to solid phases in river and estuarine systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(18): 3890-3894.
- [9] Bovee T F H, Helsdingen R J R, Rietjens I, *et al.* Rapid yeast estrogen bioassays stably expressing human estrogen receptors alpha and beta, and green fluorescent protein; a comparison of different compounds with both receptor types[J]. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2004, **91**(3): 99-109.
- [10] Quintana J B, Carpinterio J, Rodríguez I, *et al.* Determination of natural and synthetic estrogens in water by gas chromatography with mass spectrometric detection[J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, **1024**(1-2): 177-185.
- [11] Kim D G, Jiang S F, Jeong K, *et al.* Removal of 17 α -ethinylestradiol by biogenic manganese oxides produced by the *Pseudomonas putida* strain MnBI [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2012, **223**(2): 837-846.
- [12] Hanselman T A, Graetz D A, Wilkie A C. Manure-borne estrogens as potential environmental contaminants: A review[J]. *Environmental Science Technology*, 2003, **37**(24): 5471-5478.
- [13] Feigelson H S, Henderson B E. Estrogens and breast cancer[J]. *Carcinogenesis*, 1996, **17**(11): 2279-2284.
- [14] Pillon A, Servant N, Vignon F, *et al.* In vivo bioluminescence imaging to evaluate estrogenic activities of endocrine disrupters [J]. *Analytical Biochemistry*, 2005, **340**(2): 295-302.
- [15] D'Ascenzo G, Di Corcia A, Gentili A, *et al.* Fate of natural estrogen conjugates in municipal sewage transport and treatment facilities[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **302**(1-3): 199-209.
- [16] Lei B L, Huang S B, Zhou Q Y, *et al.* Levels of six estrogens in water and sediment from three rivers in Tianjin area, China[J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(1): 36-42.
- [17] Shen J H, Gutendorf B, Vahl H H, *et al.* Toxicological profile of pollutants in surface water from an area in Taihu Lake, Yangtze Delta[J]. *Toxicology*, 2001, **166**(1-2): 71-78.
- [18] Gong J, Ran Y, Chen D Y, *et al.* Occurrence and environmental risk of endocrine-disrupting chemicals in surface waters of the Pearl River, South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **156**(1-4): 199-210.
- [19] Tabata A, Kashiwada S, Ohnishi Y, *et al.* Estrogenic influences of estradiol-17 β , p-nonylphenol and bis-phenol-A on Japanese Medaka (*Oryzias latipes*) at detected environmental concentrations[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(2): 109-116.
- [20] Kawaguchi M, Ishii Y, Sakui N, *et al.* Stir bar sorptive extraction with in situ derivatization and thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry in the multi-shot mode for determination of estrogens in river water samples [J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, **1049**(1-2): 1-8.
- [21] Kuch K M, Ballschmiter K. Determination of endocrine-disrupting phenolic compounds and estrogens in surface and drinking water by HRGC-(NCI)-MS in the picogram per liter range [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(15): 3201-3206.
- [22] Belfroid A C, van der Horst A, Vethaak A D, *et al.* Analysis and occurrence of estrogenic hormones and their glucuronides in surface water and waste water in The Netherlands[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **225**(1-2): 101-108.
- [23] Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, *et al.* Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams, 1999-2000, a national reconnaissance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1202-1211.
- [24] Baronti C, Curini R, D'Ascenzo G, *et al.* Monitoring natural and synthetic estrogens at activated sludge sewage treatment plants

- and in a receiving river water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(24): 5059-5066.
- [25] Duong C N, Ra J S, Cho J, *et al.* Estrogenic chemicals and estrogenicity in river waters of South Korea and seven Asian countries[J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(3): 286-293.
- [26] Aerni H R, Kobler B, Rutishauser B V, *et al.* Combined biological and chemical assessment of estrogenic activities in wastewater treatment plant effluents [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2004, **378**(3): 688-696.
- [27] Noppe H, Verslycke T, De Wulf E, *et al.* Occurrence of estrogens in the Scheldt estuary: a 2-year survey [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, **66**(1): 1-8.
- [28] Jobling S, Casey D, Rodgers-Gray T, *et al.* Comparative responses of molluscs and fish to environmental estrogens and an estrogenic effluent[J]. *Aquatic Toxicology*, 2003, **65**(2): 205-220.
- [29] Shore L S, Kapulnik Y, Ben-Dor B, *et al.* Effects of estrone and 17 β -estradiol on vegetative growth of *Medicago sativa* [J]. *Physiologia Plantarum*, 1992, **84**(2): 217-222.
- [30] Shore L S, Kapulnik Y, Gurevich M, *et al.* Induction of phytoestrogen production in *Medicago sativa* leaves by irrigation with sewage water[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, **35**(3): 363-369.
- [31] 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, **18**(11): 6799-6813.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Ternes T A, Stumpf M, Mueller J, *et al.* Behavior and occurrence of estrogens in municipal sewage treatment plants-I. Investigations in Germany, Canada and Brazil[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **225**(1-2): 81-90.
- [35] Andersen H, Siegrist H, Halling-Sorensen B, *et al.* Fate of estrogens in a municipal sewage treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(18): 4021-4026.
- [36] Zuehlke S, Duennbier U, Heberer T. Determination of estrogenic steroids in surface water and wastewater by liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Separation Science*, 2005, **28**(1): 52-58.
- [37] Muller M, Rabenoelina F, Balaguer P, *et al.* Chemical and biological analysis of endocrine-disrupting hormones and estrogenic activity in an advanced sewage treatment plant[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(8): 1649-1658.
- [38] Servos M R, Bennie D T, Burnison B K, *et al.* Distribution of estrogens, 17 β -estradiol and estrone, in Canadian municipal wastewater treatment plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **336**(1-3): 155-170.
- [39] Nakada N, Tanishima T, Shinohara H, *et al.* Pharmaceutical chemicals and endocrine disruptors in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment [J]. *Water Research*, 2006, **40**(17): 3297-3303.
- [40] Snyder S A, Keith T L, Verbrugge D A, *et al.* Analytical methods for detection of selected estrogenic compounds in aqueous mixtures [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(16): 2814-2820.
- [41] Carballa M, Omil F, Lema J M, *et al.* Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant[J]. *Water Research*, 2004, **38**(12): 2918-2926.
- [42] Esperanza M, Suidan M T, Marfil-Vega R, *et al.* Fate of sex hormones in two pilot-scale municipal wastewater treatment plants: conventional treatment [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(8): 1535-1544.
- [43] Chimchirian R F, Suri R P S, Fu H. Free synthetic and natural estrogen hormones in influent and effluent of three municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Environment Research*, 2007, **79**(9): 969-974.
- [44] Clara M, Kreuzinger N, Strenn B, *et al.* The solids retention time: a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants[J]. *Water Research*, 2005, **39**(1): 97-106.
- [45] Leusch F D L, Chapman H F, Van den Heuvel M R, *et al.* Bioassay-derived androgenic and estrogenic activity in municipal sewage in Australia and New Zealand [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **65**(3): 403-411.
- [46] Nasu M, Goto M, Kato H, *et al.* Study on endocrine disrupting chemicals in wastewater treatment plants[J]. *Water Science and Technology*, 2000, **43**(2): 101-108.
- [47] Johnson A C, Sumpter J P. Removal of endocrine-disrupting chemicals in activated sludge treatment works[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(24): 4697-4703.
- [48] Johnson A C, Belfroid A, Di Corcia A. Estimating steroid oestrogen inputs into activated sludge treatment works and observations on their removal from the effluent[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **256**(2-3): 163-173.
- [49] Duguet J P, Bruchet A, Mallevalle J. Pharmaceuticals and endocrine disruptors in the water cycle [M]. *IWA Yearbook*, 2004. 41-46.
- [50] Stuer-Lauridsen F, Kjølholt J. Identification of selected hydrophobic organic contaminants in wastewater with semipermeable membrane devices (SPMDS) [J]. *Water Research*, 2000, **34**(13): 3478-3482.
- [51] Erb R E, Chew B P, Keller H F, *et al.* Effect of hormonal treatments prior to lactation on hormones in blood plasma, milk, and urine during early lactation [J]. *Journal of Dairy Science*.

- 1977, **60**(4): 557-565.
- [52] Lange I G, Daxenberger A, Schiffer B, *et al.* Sex hormones originating from different livestock production systems: Fate and potential disrupting activity in the environment [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2002, **473**(1-2): 27-37.
- [53] Johnson A C, Williams R J, Matthiessen P. The potential steroid hormone contribution of farm animals to freshwater, the United Kingdom as a case study [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **362**(1-3): 166-178.
- [54] Zheng W, Yates S R, Bradford S A. Analysis of steroid hormones in a typical dairy waste disposal system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(2): 530-535.
- [55] Ivie G W, Christopher R J, Munger C E, *et al.* Fate and residues of[4-¹⁴C]estradiol-17 β after intramuscular injection into holstein steer calves [J]. *Journal of Animal Science*, 1986, **62**(3): 681-690.
- [56] Larsson D G J, Adolfsson-Erici M, Parkkonen J, *et al.* Ethinyloestradiol-an undesired fish contraceptive? [J]. *Aquatic Toxicology*, 1999, **45**(2-3): 91-97.
- [57] Refsdal A O. To treat or not to treat; a proper use of hormones and antibiotics [J]. *Animal Reproduction Science*, 2000, **60-61**: 109-119.
- [58] Bartelt-Hunt S L, Snow D D, Kranz W L, *et al.* Effect of growth promotants on the occurrence of endogenous and synthetic steroid hormones on feedlot soils and in runoff from beef cattle feeding operations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(3): 1352-1360.
- [59] Furuichi T, Kannan K, Suzuki K, *et al.* Occurrence of estrogenic compounds in and removal by a swine farm waste treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(24): 7896-7902.
- [60] Nichols D J, Daniel T C, Edwards D R, *et al.* Use of grass filter strips to reduce 17 β -estradiol in runoff from fescue-applied poultry litter [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, **53**(1): 74-77.
- [61] Shore L S, Correll D L, Chakraborty P K. Relationship of fertilization with chicken manure and concentration of estrogens in small streams [A]. In: Steele K (ed.). *Animal waste and the land-water interface* [C]. Boca Raton: Lewis Publisher, 1995. 49-56.
- [62] Kjaer J, Olsen P, Bach K, *et al.* Leaching of estrogenic hormones from manure-treated structured soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(11): 3911-3917.
- [63] 张晖, 孔繁翔, 忘世和, 等. 4 种环境雌激素对淡水鱼卵黄蛋白原诱导的混合物效应研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 2005-2011.
- [64] 周海东, 黄霞, 王晓琳, 等. 北京市城市污水雌激素活性的研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3590-3595.
- [65] Liebig M, Egeler P, Oehlmann J, *et al.* Bioaccumulation of ¹⁴C-17 α -ethinylestradiol by the aquatic oligochaete *Lumbriculus variegatus* in spiked artificial sediment [J]. *Chemosphere*, 2004, **59**(2): 271-280.
- [66] Fenske M, Van Aerle R, Brack S, *et al.* Development and validation of a homologous zebrafish (*Danio rerio* Hamilton-Buchanan) vitellogenin enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) and its application for studies on estrogenic chemicals [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2001, **129**(3): 271-232.
- [67] Derby N E, Hakk H, Casey F X M, *et al.* Effects of composting swine manure on nutrients and estrogens [J]. *Soil Science*, 2011, **176**(2): 91-98.
- [68] Lee H B, Liu D. Degradation of 17 β -estradiol and its metabolites by sewage bacteria [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2001, **134**: 353-368.
- [69] Fujii K, Kikuchi S, Satomi M, *et al.* Degradation of 17 β -estradiol by a gram-negative bacterium isolated from activated sludge in a sewage treatment plant in Tokyo, Japan [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(4): 2057-2060.
- [70] Yu Z Q, Huang W L. Competitive sorption between 17 α -ethinyl estradiol and naphthalene/phenanthrene by sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(13): 4878-4885.
- [71] McCallum E A, Hyung H, Do T A, *et al.* Adsorption, desorption, and steady-state removal of 17 β -estradiol by nanofiltration membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, **319**(1-2): 38-43.
- [72] Silva C P, Otero M, Esteves V. Processes for the elimination of estrogenic steroid hormones from water: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **165**: 38-58.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jiao, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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