

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除

张秋亚, 马晓妍, 王晓昌*, 游猛

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 针对水环境中内分泌干扰物低浓度、高风险的特点, 采用酵母菌法和酶联免疫法对 3 个污水处理工艺流程中污水的雌激素活性和雌二醇(E2) 水平进行评价。结果表明, 污水厂进水的雌二醇当量(EEQ) 和 E2 的水平分别为 $4.35 \sim 7.58 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $36.95 \sim 83.43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。雌激素活性和 E2 的去除主要发生在生物处理阶段, 如氧化沟、 A^2/O 和 $\text{A}^2/\text{O} + \text{MBR}$ 工艺, 且经以上工艺处理之后, 雌激素活性和 E2 分别降低 71.10% ~ 75.54% 和 75.88% ~ 80.72%。污泥对雌激素效应具有一定的去除作用, 通过吸附作用污泥的 EEQ 和 E2 的含量分别为 $1.84 \sim 2.43 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $8.45 \sim 12.84 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。但污水厂出水仍具有较高的雌激素活性, 其 EEQ 为 $1.06 \sim 2.19 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 对受纳水体的水生生物具有潜在的危害。酶联免疫法与酵母菌法具有很好的一致性, 并为水环境雌激素的快速筛选和评价提供了一个新方法。

关键词: 污水; 酵母菌法; 酶联免疫法; 雌激素活性; 雌二醇(E2); 去除率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1506-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607232

Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes

ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang*, YOU Meng

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Targeting at the characteristics of low concentration but high risk of endocrine disrupting compounds in the aquatic environment, the current study investigated the distribution of estrogenicity and E2 level using recombinant yeast estrogen screen (YES) and enzyme linked immunosorbent assay (ELISA) during domestic wastewater treatment processes. The results showed that the levels of estrogenicity and E2 in influents of wastewater treatment plants were $4.35 \sim 7.58 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $36.95 \sim 83.43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. It was found that biological treatment processes played a crucial role in the removal of estrogenicity and E2, such as oxidation ditch, A^2/O and A^2/O followed by MBR, where the removal of estrogenicity and E2 was 71.10% - 75.54% and 75.88% - 80.72%, respectively. The activated sludge, with an estrogenicity level of $1.84 \sim 2.43 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ and an E2 level of $8.45 \sim 12.84 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, had the function of eliminating estrogenic effect to a certain extent by adsorption. The estrogenic activity in the effluent of domestic wastewater was $1.06 \sim 2.19 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, which will pose potential risk to the aquatic life in the environment. Last but not least, ELISA had a good correlation with YES assay, which provides a new method for rapid screening and assessment of water environmental estrogen.

Key words: wastewater; yeast estrogen screen (YES); enzyme linked immunosorbent assay (ELISA); estrogenicity; E2; removal

内分泌干扰物被定义为一类能够干扰或抑制生物体内分泌、神经、免疫和生殖系统功能, 并产生可逆或不可逆性生物学效应的外源性物质^[1]。在自然界中内分泌干扰物以多种形式存在, 据报道超过 8 700 种物质具有内分泌干扰效应^[2]。内分泌干扰物主要包括固醇类激素、表面活性剂、工业合成物等。例如, 雌酮(E1)、雌二醇(E2)、雌三醇(E3)是人和动物排泄物中主要的天然雌激素。17 α -乙炔基雌二醇(EE2)作为口服避孕药的主要成分, 则是合成类固醇激素的主要形式。由于污水处理工艺并不能将内分泌干扰物完全去除, 污水处理厂出水成为自然水体中内分泌干扰物的主要来源之一^[3,4]。另外, 由于内分泌干扰物具有一定的亲脂性, 其很容易在水生生物和低泥中富集^[5], 给水生生物带来一定的危害。一些研究表明水环境中的内分泌干扰物可

导致鱼类体内卵黄原蛋白上升、雄鱼雌性化等^[6,7]。因此, 检测城市污水的雌激素水平和干扰效应, 并分析研究不同处理工艺的去除效果, 对水环境的生态安全评价具有重要意义。

通常, 人们采用化学分析法对水环境中雌激素物质进行定性或者定量分析, 例如高效液相色谱、气相色谱、高效液相色谱-质谱法等^[8]。但这些化学分析法需要较高的成本和熟练的操作技能。此外, 水环境的雌激素物质会产生拮抗、协同或者加和作用^[9], 而化学分析法无法反映化合物之间的相互作

收稿日期: 2016-07-31; 修订日期: 2016-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508449); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07305-002-01); 中国博士后科学基金项目(2015M572531)

作者简介: 张秋亚(1988~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为生态毒性在污水处理过程中的应用, E-mail: zhangqiuya258@163.com

* 通信作者, E-mail: xcwang@xauat.edu.cn

用,故其不能表明水环境雌激素物质的潜在效应。生物检测可反映水环境中化合物的综合生物效应。因此,有必要利用生物毒性检测法对水环境的雌激素效应进行评价。重组酵母菌法是常用的检测水环境雌激素活性的手段。其基本原理是雌激素物质能够和酵母菌携带的人体雌激素受体形成复合物,通过促进报告基因 *LacZ* 的表达,产生 β -半乳糖苷酶,测定 β -半乳糖苷酶的活性即可反映样品的雌激素活性,它具有灵敏度高、省时、成本低等优点。重组酵母菌法被广泛用于水样、污泥、底泥以及家庭灶炉等燃烧过程中排放的污染物的雌激素活性。酶联免疫吸附法 (enzyme linked immunosorbent assay, ELISA) 则是基于抗原-抗体的特异性反应的原理,通过酶作用于底物后的显色来进行定量。传统上其主要用来检测细胞和血液中雌激素含量。酶联免疫吸附法需要的样品量少,不需要复杂的预处理^[10],具有操作简单、节约时间和成本、可用于多种毒性指标检测的优点^[11]。目前,ELISA 逐渐被用于水环境、土壤和低泥中雌激素物质的检测^[12,13]。因此,本研究的主要目的是利用重组酵母菌法和酶联免疫法分别对不同处理工艺的生活污水的雌激素活性和 E2 水平进行检测和评价,并将两个检测方法进行比较,以期为进一步保障受纳水体的生态安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验试剂

雌二醇 (E2) 以及邻硝基酚 β -D-半乳糖苷 (ONPG) 购自 Sigma 公司。SD 培养基 (Synthetic dropout medium) 所需的硫酸腺嘌呤购于美国 MP 公司,葡萄糖购于阿拉丁。无氨基酵母氮碱、DO、SD/-Leu/-His 所用的各种氨基酸购于 Difco 公司。二甲基亚砜 (DMSO)、HPLC 级甲醇和乙酸乙酯购于天津科密欧公司。ELISA 检测试剂盒购于德国 DRG (EIA-2693)。

1.2 样品采集和前处理

2015 年 8 ~ 10 月分别对 3 个污水处理厂 (A、B、C) 各流程出水进行采集。水样的采集及标号如下:A-1 ~ A-6 依次为以氧化沟工艺为主的 A 污水处理厂对应处理单元的出水,A-S 为氧化沟污泥样品;B-1 ~ B-6 依次为以 A^2/O 工艺为主的 B 污水处理厂对应处理单元的出水,B-S 为好氧污泥样品;C-1 ~ C-3 依次为以 $A^2/O + MBR$ 为主的 C 污水处理厂主要处理单元的出水,C-S1 和 C-S2 分别为好氧池

污泥和 MBR 膜池污泥样品。各污水厂处理流程及采样点如图 1 所示。

每个采样点采集 2 L 水样或 1 L 污泥混合液放入对应编号的棕色玻璃瓶中,并立即带回实验室。水样经玻璃纤维膜 (0.7 μm , Millipore, GF/B) 过滤后用 HLB 柱子 (Oasis HLB 200 mg Cartridge, Waters) 富集。具体操作如下:依次用 10 mL 乙酸乙酯、10 mL 甲醇和 10 mL 超纯水活化 HLB 柱子。取调节 pH 为 3 的水样 2 000 mL 以 10 mL $\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速过柱,随后用 10 mL 超纯水-甲醇 (9:1) 洗柱,继续真空干燥 1 h。最后用 10 mL 乙酸乙酯以 1 mL $\cdot\text{min}^{-1}$ 流速洗脱到 10 mL 的试管中,40 $^{\circ}\text{C}$ 水浴下用微氮气吹干。萃取物用 1 mL DMSO 进行溶解,均分成两份,一份用 DMSO 梯度稀释用于雌激素活性检测,另一份用超纯水稀释 100 倍用于 ELISA (E2) 检测。

污泥混合液经中速定性滤纸过滤后,收集滤纸上污泥,真空冷冻干燥 2 ~ 3 d。之后准确称取 1.0 g 污泥并研磨成粉状。将研磨好的污泥放入 10 mL 磨口俱塞试管中,进行超声萃取 4 次,萃取剂分别为 5 mL 甲醇、5 mL 甲醇、2 $\times$ 3 mL 丙酮,每次萃取时间为 15 min。每次萃取完,上清液经 0.45 μm 针头式样品 PTFE 过滤器过滤后用氮气吹至 500 μL ,加入超纯水,并用超纯水多次洗涤定容至 500 mL。固相萃取步骤同水样。

1.3 重组酵母菌检测

雌激素活性采用中科院生态环境中心建立的酵母双杂交雌激素活性评价方法^[14]。每个样品按梯度稀释 8 个浓度 (浓缩液稀释倍数:1、1/2、1/4、1/8、1/16、1/32、1/64、1/128)。将酵母菌置于 SD 培养基中,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 、130 r $\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下培养 36 h。用 SD 培养液稀释菌液至其在 600 nm 的吸光度值为 0.75 左右,吸取菌液 995 μL 于 1.5 mL 灭菌离心管中,加入 5 μL 稀释的样品并混匀,每个浓度设置 3 个平行。将 200 μL 的混合菌液转移到 96 孔板中,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 、800 r $\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下暴露 4 h。测定菌悬液在 600 nm 的吸光度值,随后每孔弃去 150 μL ,加入 120 μL 测试缓冲液和 20 μL 氯仿,于 1 200 r $\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡破壁 15 min,加入 40 μL ONPG,于 30 $^{\circ}\text{C}$ 、800 r $\cdot\text{min}^{-1}$ 下培养显色 60 min。显色结束后,每孔加入 100 μL 碳酸钠溶液,终止反应。吸取上清液 200 μL 至新 96 孔板中,测定 420 nm 处吸光度。同时,以 DMSO 做阴性对照,以 E2 为阳性对照。 β -半乳糖苷酶活性 (U) 按公式 (1) 计算。

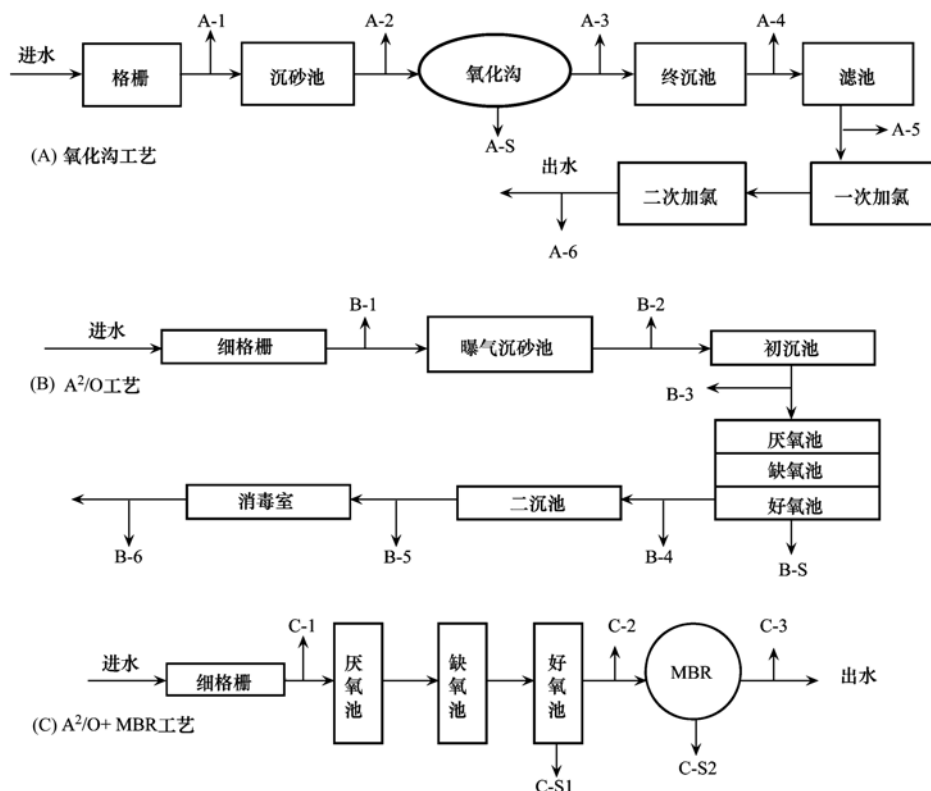


图1 各污水处理厂主要工艺流程及采样点

Fig. 1 Main technology and sampling points in wastewater treatment plants

$$U = \frac{(A_{420} - A'_{420}) \times D}{t \times V \times A_{600}} \quad (1)$$

式中, t 为加入 ONPG 到溶液显色时的反应时间, 60 min; V 为菌液体积, 0.2 mL; A_{600} 、 A_{420} 分别为菌液在 600 nm、420 nm 处的光密度值; A'_{420} 为空白对照在 420 nm 处的光密度值; D 为稀释因子 6.6.

由剂量效应曲线得出 β -半乳糖苷酶活性后, 根据最小二乘法如公式(2)计算水样的 EC_{50} .

$$y = \frac{A - D}{1 + (C/X)^B} + D \quad (2)$$

式中, y 为 β -半乳糖苷酶活性; X 为水样浓缩倍数; A 为最大 β -半乳糖苷酶活性; B 为回归曲线中点的斜率; C 为半数最大 β -半乳糖苷酶活性时水样的浓缩倍数 (EC_{50}); D 为本底 β -半乳糖苷酶活性.

对于样品的雌二醇当量用 EEQ 表示, 计算方法根据公式(3).

$$EEQ = \frac{EC_{50, E2}}{EC_{50, 样品}} \quad (3)$$

1.4 酶联免疫吸附检测 (ELISA-E2)

取 25 μ L 标准品 (试剂盒中自带的 E2 的标准溶液分别为 0、25、100、250、500、1 000、2 000 $ng \cdot L^{-1}$)、质控品 (实验室自配的 E2 浓度: 200 $ng \cdot L^{-1}$) 和浓缩的样品加入相应微孔中. 在每一微

孔中加入 200 μ L 酶联物, 充分混匀 10 s, 室温孵育 120 min. 快速弃去孔内反应物, 每孔用 400 μ L 洗涤液洗板 3 次, 在吸水纸上拍干. 每一微孔中加入 100 μ L 底物液, 室温孵育 15 min. 加 50 μ L 终止液到每个检测孔中终止酶反应, 在 10 min 之内测定 450 nm 的吸光度值. 所有的标准品、质控品和样品设置 3 个平行. 按照以上步骤对 E2 标准溶液进行测定, 并以每个浓度的吸光度的平均值作为此浓度的吸光度 B . 用公式(4)计算吸光率. 以浓度对数 $\lg c$ 对吸光率对数 $\lg(B/B_0)$ 绘制标准曲线图.

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\text{标准品 } A_{450}}{\text{空白 } A_{450}} \quad (4)$$

式中, A_{450} 为 450 nm 处的吸光度; 空白为 0 $ng \cdot L^{-1}$ 的 E2.

2 结果与讨论

2.1 污水中雌激素活性的分析

以 DMSO 为溶剂配置一系列 E2 标液, 按上述方法测定 β -半乳糖苷酶诱导活性值, 得出 E2 的剂量-活性效应关系如图 2 所示. 从中可以得出 E2 的 EC_{50} 为 $6.73 \times 10^{-11} mol \cdot L^{-1}$, 与马军等^[15]的研究结果 ($5.95 \times 10^{-11} mol \cdot L^{-1}$) 具有一致性, 说明了该方

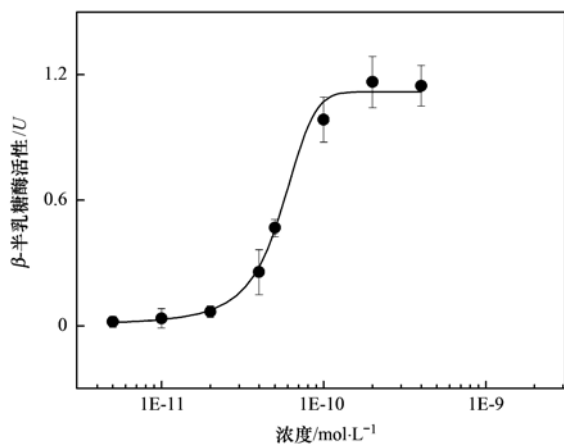


图2 E2 的雌激素活性剂量-效应曲线

Fig. 2 Dose-response curve of estrogenic activity of E2

法的可行性.

各污水处理厂主要单元出水的雌激素活性如图3所示. A、B和C污水处理厂进水均表现出较强的雌激素活性, EEQ 分别为 7.58、7.29、4.35 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. C 污水处理厂进水的 EEQ 低于其它两个污水处理厂. 产生这种现象的原因可能是污水来源不同, C 污水处理厂污水来源是校园污水, 污水成分简单, 而其余两个污水处理厂污水来源则是城市污水, 承接污水比较广泛, 雌激素活性较强. Shore 等^[16]也指出污水来源影响污水厂进水的雌激素活性. 经氧化沟工艺、A²/O 工艺和 A²/O + MBR 工艺处理之后, 出水的 EEQ 降低为 2.19、1.89、1.06 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 孙庆峰等^[17]采用 ER-CALUX 方法将雌激素活性作为饮用水水质指标时, 得出最大无剂量效应的 EEQ 为 0.4 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 因此, 本研究中的 3 个污水厂出水仍具有很高的风险性.

由图3(A)和3(B)可知, 曝气沉砂池单元对雌激素活性的去除能力非常有限, 去除率 $\leq 11\%$. 这可能是由于曝气沉砂池主要用于去除污水的无机颗粒物、油脂类以及少量的有机污染物等^[18]; 另一方面, 雌激素物质, 如 E1、E2、E3 和 EE2, 具有较低的亨利常数^[19], 在常温常压下很难挥发^[20], 导致曝气作用对雌激素活性的去除效果不佳. 由图3(B)可以看出污水经初沉池处理之后, 雌激素活性基本没有变化. 初沉池主要是通过重力沉降作用去除大颗粒物质, 而污水的雌激素物质主要存在于液相^[15], 单纯的物理沉降作用无法显著降低污水的雌激素活性.

对比 3 个污水处理厂的主要工艺发现, 雌激素活性的降低主要依赖污水处理的氧化沟工艺、A²/O 工艺和 A²/O + MBR 工艺. 经过这些工艺处理之

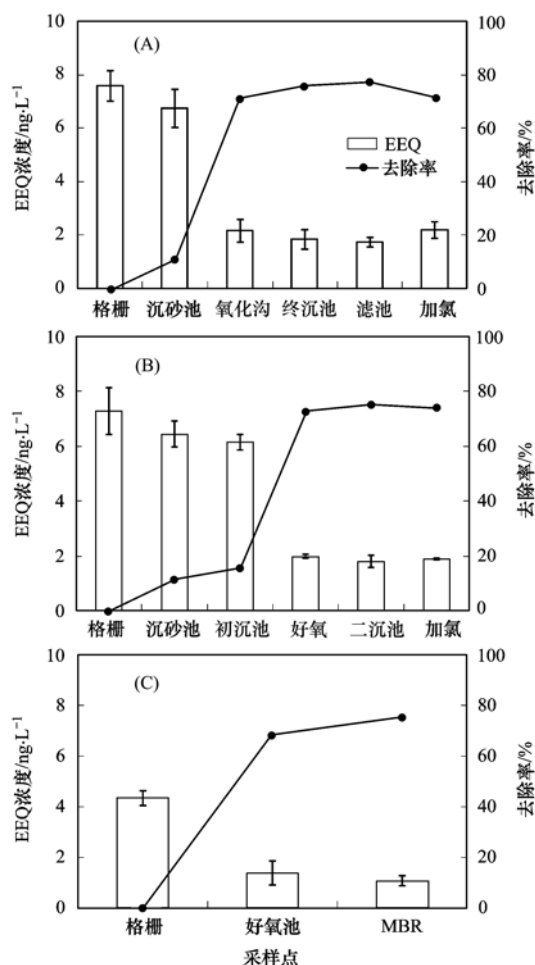


图3 雌激素当量(EEQ)和去除率在各工艺中的变化

Fig. 3 Variations of EEQ and its removal of each treatment process

后, EEQ 分别降低 71.10%、74.07% 和 75.54%. 另外, 3 个污水处理厂出水的氨氮浓度均低于 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到一级 A 排放标准, 总磷的浓度低于 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到一级 B 排放标准. 这说明 3 个污水厂的生物处理单元具有良好的脱氮除磷效果和较好的菌落结构. 而固醇类雌激素如 E1、E2、E3 和 EE2 主要是通过氨氧细菌共代谢作用和异养菌作用得到降解, 当污水处理过程中具有良好的硝化作用时, 这些物质可得到很好地去除. 例如, Khunjar 等^[21]指出氨氧化菌将 EE2 降解为某中间产物如羟基 EE2, 而异养菌可将 EE2 的中间产物继续降解为更简单的结构甚至碳化. 同时, 本实验检测到 3 个污水处理厂活性污泥的雌激素活性, 如图 4 所示. 氧化沟污泥、A²/O 工艺好氧池污泥、A²/O + MBR 工艺的好氧池污泥和 MBR 膜池污泥的 EEQ 分别为 1.84、1.85、2.16、2.43 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 物质的 $\lg k_{ow}$ 值决定了其与污泥的吸附能力, 当化合物的 $\lg k_{ow}$ 介于 2.5~4.0 时表现出中度的吸附能力; 大于 4.0 时, 表现出高的

吸附能力^[19]. 而水环境中主要的雌激素物质如 E1、E2、E3 和 EE2 的 $\lg k_{ow}$ 分别为 3.43、3.94、2.81 和 4.15^[22]. 因此,活性污泥可通过吸附作用去除部分的雌激素活性.

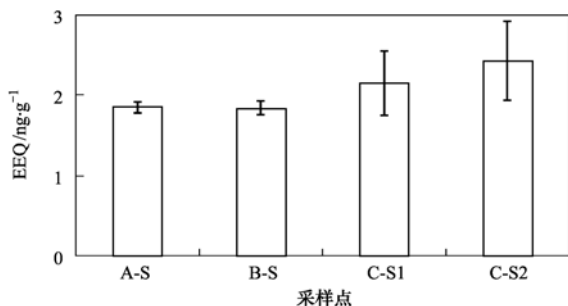


图4 各污水处理厂污泥样品的雌激素当量

Fig. 4 EEQ values of sludge samples in each wastewater treatment plant

由图3(A)和3(B)可知加氯消毒之后,污水出水的雌激素活性基本没有变化. 这可能由于消毒过程产生的消毒副产物具有一定的雌激素活性,导致出水的 EEQ 比较恒定. 一些研究指出 E1、E2 和 EE2 的消毒副产物,如 2,4 二氯雌酮、2,4 二氯雌二醇以及 4-氯乙炔雌二醇,具有和母体相当的雌激素活性^[23,24]. 由图3(c)看出,经 MBR 处理之后,污水的 EEQ 降低了 22.62%. 膜生物反应是结合膜分离和生物处理方法的处理技术,能够强化有机物的去除.

2.2 酶联免疫吸附法(ELISA)检测 E2 的浓度

以 E2 浓度对数 $\lg c$ 和吸光率对数 $\lg(B/B_0)$ 作标准曲线,线性回归方程为:

$$\lg(B/B_0) = -0.36 \lg c + 2.528$$

该方程的相关系数为 0.989. 根据标准曲线得到各污水处理厂主要工艺出水的 E2 浓度,如图5所示. 从中可知,A、B 和 C 污水厂进水中 E2 浓度分别为 64.83、83.43 和 36.95 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 以校园污水为来源的 C 污水处理厂进水的 E2 浓度低于其余两个污水厂,该结果和雌激素活性具有一致性. B 污水处理厂经曝气沉砂池和初沉池处理之后,E2 的浓度并没有明显的降低. 3 个污水厂进水分别经氧化沟工艺、A²/O 工艺和 A²/O + MBR 工艺处理之后,污水厂出水 E2 的浓度分别为 6.47、16.82、4.48 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

生物处理阶段对 E2 的去除起着主导作用. 氧化沟工艺、A²/O 工艺和 A²/O + MBR 对 E2 的去除率分别为 75.88%、77.84 和 80.72%. B 污水处理厂对 E2 的去除效果稍高于 A 污水厂,这可能是由

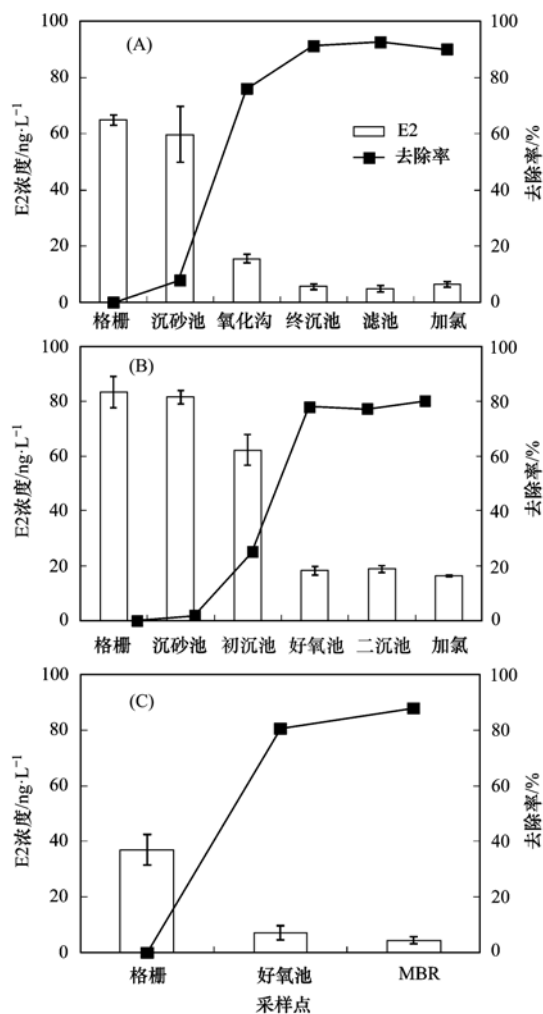


图5 各工艺流程出水中 E2 的浓度

Fig. 5 Concentrations of E2 in the effluent of each treatment process

于 E2 在厌氧、缺氧和好氧条件下均可以被微生物降解^[26],而 A²/O 工艺具有延长生物处理作用的特点. 另外,良好的硝化过程有利于雌激素的去除^[27],A²/O 工艺的脱氮除磷效果高于氧化沟工艺. C 污水厂二级出水经 MBR 工艺处理后,E2 的浓度降低 37.16%,这可能是 MBR 单元具有良好的泥水分离效果,使污泥浓度增大,微生物活性增强,强化了有机物的去除. 由图5可知,加氯消毒对 E2 的去除效果并不明显. 加氯消毒的效果与消毒剂量有关,而市政污水存在较多消毒副产物的前驱物如腐殖质、富里酸和腐殖酸等影响加氯消毒对 E2 的去除. 此外,A、B 和 C 污水处理厂活性污泥中 E2 含量分别为 11.70、12.84、9.8 和 8.45 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$,如图6所示. 如前所述,E2 具有一定的亲脂性,容易被污泥吸附. 雌激素物质被污泥吸附之后,通过污泥回流进一步实现脱附和降解,但最终通过剩余污泥带走的雌激素总量不超过进水的 5%^[25]. 因此,污泥

对 E2 的去除效果是微弱的。

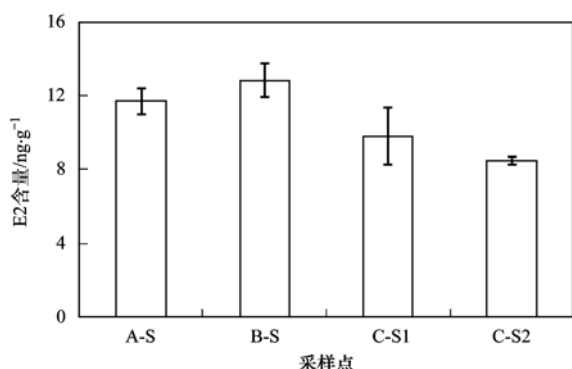


图 6 各污水处理厂污泥样品中 E2 的含量

Fig. 6 Levels of E2 in the sludge of each wastewater treatment plant

2.3 重组酵母菌法和酶联免疫法的比较

将用 ELISA 检测的 E2 值与用酵母菌法检测的 EEQ 相比, ELISA 检测的 E2 值偏低. Valitalo 等^[28]研究也发现 ELISA 检测的水体目标物浓度水平 (E2) 比 ER α -CALUX[®] 检测的 EEQ 要高. 环境水样中存在和 E2 结构非常相似的其他雌激素, 如 E1、E3 和 EE2. 这些物质可以与微孔板上包被的 E2 抗体发生交叉反应, 从而使 ELISA 检测结果偏高^[12]. 另一方面, 由于污水成分复杂, 一些抗雌激素物质的存在以及物质之间存在拮抗作用^[29], 可导致检测的雌激素活性相应较低. 因此, 两种检测结果具有一定的差异性. 通过统计学对 ELISA 检测的 E2 值和酵母菌检测的 EEQ 进行分析, 得出两者具有很好的一致性, 如图 7, 相关系数为 0.837. 这表明两指标在结果评价上整体趋势的一致, ELISA 检测技术为水环境雌激素的快速筛选和诊断提供了一个新方法.

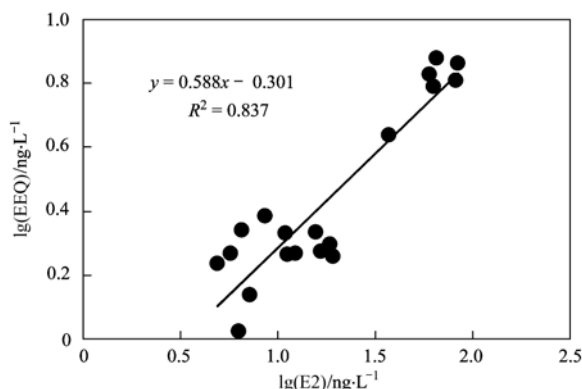


图 7 样品的 EEQ 与 E2 的浓度水平的相关关系

Fig. 7 Correlation between EEQ and E2 level in all the samples

3 结论

(1) 原污水的雌激素活性雌二醇当量为 4.35

$\sim 7.58 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水中雌二醇当量降至 1.06 ~ 2.19 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 71.10% ~ 75.54%. 雌激素活性的去除主要发生在生物处理阶段, 如氧化沟和 A²/O 处理单元.

(2) 原污水的 E2 浓度为 36.95 ~ 83.43 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 氧化沟、A²/O 和 A²/O + MBR 处理单元对 E2 具有很好的去除效果, 去除效能分别为 75.88%、77.84 和 80.72%, MBR 工艺能够强化 E2 的去除.

(3) 污泥中雌二醇当量和 E2 的含量分别为 1.84 ~ 2.43 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 8.45 ~ 12.84 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥可通过吸附作用去除一定的雌激素活性和 E2.

(4) 酶联免疫法与酵母菌法具有很好的一致性, 并为水环境雌激素的快速筛选和诊断提供了一个新的方法.

参考文献:

- [1] Colborn T, Saal F S V, Soto A M. Developmental effects of endocrine-disrupting chemicals in wildlife and humans [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1993, **101** (5): 378-384.
- [2] Komesli O T, Muzb M, Ak M S, *et al.* Occurrence, fate and removal of endocrine disrupting compounds (EDCs) in Turkish wastewater treatment plants [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **277**: 202-208.
- [3] 王晓伟, 张哲海, 胡伟, 等. 利用报告基因试验检测饮用水源水的内分泌干扰活性 [J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(5): 669-674.
Wang X Y, Zhang Z H, Hu W, *et al.* Endocrine-disrupting effects of drinking source water with the reporter gene assay [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, **4**(5): 669-674.
- [4] Sharma V K, Anquandah G A K, Yngard R A, *et al.* Nonylphenol, octylphenol, and bisphenol-A in the aquatic environment: a review on occurrence, fate, and treatment [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2009, **44** (5): 423-442.
- [5] Viganò L, Benfenati E, van Cauwenberge A, *et al.* Estrogenicity profile and estrogenic compounds determined in river sediments by chemical analysis, ELISA and yeast assays [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(7): 1078-1089.
- [6] Jobling S, Nolan M, Tyler C R, *et al.* Widespread sexual disruption in wild fish [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(17): 2498-2506.
- [7] Pal A, Gin K Y H, Lin A Y C, *et al.* Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: review of recent occurrences, sources, fate and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(24): 6062-6069.
- [8] Wang L S, Hu H Y, Wang C. Effect of ammonia nitrogen and dissolved organic matter fractions on the genotoxicity of wastewater effluent during chlorine disinfection [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(1): 160-165.
- [9] Leusch F D L, Chapman H F, Körner W, *et al.* Efficacy of an

- advanced sewage treatment plant in southeast Queensland, Australia, to remove estrogenic chemicals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(15): 5781-5786.
- [10] Hirobe M, Goda Y, Okayasu Y, *et al.* The use of enzyme-linked immunosorbent assays (ELISA) for the determination of pollutants in environmental and industrial wastes [J]. *Water Science & Technology*, 2006, **54**(11-12): 1-9.
- [11] Caron E, Sheedy C, Farenhorst A. Development of competitive ELISAs for 17 β -estradiol and 17 β -estradiol + estrone + estril using rabbit polyclonal antibodies [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 2010, **45**(2): 145-151.
- [12] 张明辉, 吴蔓莉, 杨瑞, 等. 利用酶联免疫测定水中雌二醇 [J]. *分析试验室*, 2015, **34**(1): 27-30.
Zhang M H, Wu M L, Yang R, *et al.* Study on determination of estradiol in water using enzyme-linked immunoassay [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2015, **34**(1): 27-30.
- [13] Pasquet C, Vulliet E. Utilisation of an enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) for determination of alkylphenols in various environmental matrices. Comparison with LC-MS/MS method [J]. *Talanta*, 2011, **85**(5): 2492-2497.
- [14] Ma M, Li J, Wang Z J. Assessing the detoxication efficiencies of wastewater treatment processes using a battery of bioassays/biomarkers [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, **49**(4): 480-487.
- [15] 马军, 文刚, 邵晓玲. 城市污水处理厂各工艺阶段内分泌干扰物活性变化规律研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(1): 63-67.
Ma J, Wen G, Shao X L. Investigation on the estrogenicity of different processes in a sewage treatment plant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(1): 63-67.
- [16] Shore L S, Shemesh M. Naturally produced steroid hormones and their release into the environment [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2003, **75**(11-12): 1859-1871.
- [17] 孙庆峰, 邓述波, 余刚. 雌激素活性作为饮用水水质指标的探讨 [J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(12): 105-108.
Sun Q F, Deng S B, Yu G. Discussion on use of estrogenic activity as indicator for drinking water quality [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, **23**(12): 105-108.
- [18] 王栋, 达书峰, 张敬军, 等. 曝气沉砂池运行管理经验谈 [J]. *中国科技信息*, 2006, (19): 60-61.
- [19] Rogers H R. Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges [J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **185**(1-3): 3-26.
- [20] 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.
- [21] Khunjar W O, Mackintosh S A, Skotnicka-Pitak J, *et al.* Elucidating the relative roles of ammonia oxidizing and heterotrophic bacteria during the biotransformation of 17 α -ethinylestradiol and trimethoprim [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(8): 3605-3612.
- [22] 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]. *Environment Science & Technology*, 2000, **34**(18): 3890-3894.
- [23] Moriyama K, Matsufuji H, Chino M, *et al.* Identification and behavior of reaction products formed by chlorination of ethynylestradiol [J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(6): 839-847.
- [24] Hu J Y, Cheng S J, Aizawa T, *et al.* Products of aqueous chlorination of 17 β -estradiol and their estrogenic activities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5665-5670.
- [25] Andersen H, Siegrist H, Halling-Sørensen B, *et al.* Fate of estrogens in a municipal sewage treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(18): 4021-4026.
- [26] Vader J S, van Ginkel C G, Sperling F M G M, *et al.* Degradation of ethinyl estradiol by nitrifying activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(8): 1239-1243.
- [27] Forrez I, Carballa M, Noppe H, *et al.* Influence of manganese and ammonium oxidation on the removal of 17 α -ethinylestradiol (EE2) [J]. *Water Research*, 2009, **43**(1): 77-86.
- [28] Väilitalo P, Perkola N, Seiler T B, *et al.* Estrogenic activity in Finnish municipal wastewater effluents [J]. *Water Research*, 2016, **88**: 740-749.
- [29] 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.
Zhou H D, Huang X, Wang X L, *et al.* Evaluation of estrogenicity of sewage samples from Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(12): 3590-3595.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)