ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第10期
2014年10月15日

目 次

基于虚拟撞击原理的固定源 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 采样器的研制 …… 蒋靖坤,邓建国,段雷,张强,李振,陈小彤,李兴华,郝吉明(3639)
1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素…… 郑秋萍,王宏,陈彬彬,隋平,林文(3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 … 陈晓静,祁建华,刘宁,张翔宇,申恒青,刘明旭(3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 …… 李嫣,王浙明,宋爽,徐志荣,许明珠,徐威力(3663)
烧结过程 NO_x 和 SO_2 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 …… 任重培,朱天乐,朱廷钰,吕栋(3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 …… 宋磊,张彬,邓文(3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 …… 苏永中,杨晓,杨荣(3683)
海河流域河流生态系统健康评价 …… 郝利霞,孙然好,陈利顶(3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 …… 刘树元,郑晨,袁琪,王先兵,王秫炎(3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 …… 包静玥,鲍建国,李立青(3709)
岩溶地下河水文地球化学对降雨的响应:以重庆雪玉洞地下河系统为例 …… 王凤康,梁作兵,于正良,江泽丽(3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 … 蓝家程,孙玉川,田萍,卢丙清,师阳,徐昕,梁作兵,杨平恒(3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的污染特征与生态风险 ……
…… 陈宣宇,薛南冬,张石磊,李发生,龚道新,刘博,孟磊(3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 …… 王瑞霖,程先,孙然好(3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 …… 杨福霞,简慧敏,田琳,姚庆祯(3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究…… 邵田田,赵莹,宋开山,杜嘉,丁智(3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 …… 刘丹丹,李正魁,叶忠香,张万广(3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 …… 陈娇,白晓慧,卢宁,王先云,章永辉,吴潘成,郭心驰(3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 …… 白静,赵勇胜,孙超,秦传玉,于凌(3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中Pb(Ⅱ)的性能 …… 万顺利,薛瑶,马钊钊,刘国斌,余艳霞,马明海(3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 …… 王文东,王亚博,范庆海,丁真真,王文,宋珊,张银婷(3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 …… 彭娜,王开峰,刘国光,曾令泽,姚锟,吕文英(3794)
二氧化钛(P25)光催化降解二苯砷酸的研究 …… 王阿楠,滕应,骆永明(3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 …… 谭冲,刘颖杰,王薇,邱珊,马放(3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 …… 佟娟,王元月,魏源送(3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 …… 韦燕莉,鲍恋君,巫承洲,曾永平(3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 …… 杜宝玉,王琼,罗遥,段雷(3830)
应用X射线吸收近边结构谱研究东北农耕土壤中的氯种态及含量……
…… 李晶,郎春燕,马玲玲,徐殿斗,郑雷,路雨楠,崔丽瑞,张晓萌(3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 …… 李俊超,党廷辉,郭胜利,薛江,唐骏(3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 …… 唐冰培,杨世杰,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集(3851)
外生菌根真菌对 Al^{3+} 胁迫和低钾土壤的响应…… 张薇,黄建国,袁玲,李阳波,何林卫(3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 …… 黄福义,李虎,韦蓓,欧阳纬莹,苏建强(3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 …… 左继超,高婷婷,苏小娟,万田英,胡红青(3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 …… 郑家传,张建荣,刘希雯,许倩,施维林(3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 …… 李鹏,廖晓勇,阎秀兰,崔骁勇,马栋(3888)
O_3 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 …… 杨田田,张巍巍,胡恩柱,王效科,田媛,冯兆忠(3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响 …… 李睿达,张凯,苏丹,逯非,万五星,王效科,郑华(3903)
$^{13}CO_2$ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 …… 陈展,王效科,尚鹤(3911)
表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解…… 陈少毅,张静,汪涵,任源(3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 …… 信欣,姚力,鲁磊,冷璐,周迎芹,郭俊元(3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 …… 吴松,肖勇,郑志勇,郑越,杨朝晖,赵峰(3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 …… 王敏,赵阳国,卢珊珊(3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测:基于生物配体模型 …… 王万宾,陈莎,吴敏,赵婧(3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 …… 马秀娟,沈建忠,王腾,王海生,黄丹,孙广文,龚成(3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究 …… 张铃松,王业耀,孟凡生,周岳溪,于海斌(3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 …… 李鹏,杨从巧,金军,王英,刘伟志,丁问微(3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 …… 牟真,麻春艳,程杰,李进军(3977)
$CuO(-CeO_2)/Al_2O_3$ 催化剂对萘催化氧化性能研究 …… 查键,周宏仓,何都良,单龙,张露,谢婕(3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用 …… 徐建英,赵春桃,魏东斌(3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 …… 周羽化,卢延娜,张虞,朱静,雷晶,申晨,武雪芳(3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估 …… 范育鹏,陈卫平(4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 …… 王琳,吕永龙,贺桂珍,王铁宇(4009)
环境损害评估:构建中国制度框架 …… 张红振,王金南,牛坤玉,董璟琦,曹东,张天柱,骆永明(4015)
《环境科学》征稿简则(3887) 《环境科学》征订启事(4008) 信息(3730,3739,3774,3895)

生物毒性检测在水质安全评价中的应用

徐建英[1],赵春桃[1,2],魏东斌[2]*

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100049; 2. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085)

摘要: 水质安全不仅关乎生态系统的健康,更关乎人类的生存与发展. 借助水质标准浓度限值的传统方法评价水质安全存在一定不足,生物毒性测试能直观反映水体中所有共存污染物的综合毒性特征,已逐渐发展成为水质安全评价的重要补充. 在大量文献资料调研、整理的基础上,首先从污染物的生物效应出发,总结了常用的致死毒性、遗传毒性、内分泌干扰性等效应的生物毒性测试方法; 其次,讨论了水质毒性评价中常用的生物毒性测试方法和相应的毒性评价指标; 最后,归纳总结了基于生物毒性测试的水质安全评价方法,包括潜在毒性法、毒性单位分级评价法、潜在生态毒性效应指数法、基于成组生物毒性测试的水质安全评价等,并讨论了各种方法的优缺点. 本文既系统梳理了毒性测试在水质安全评价领域的研究进展,也为该领域后续的发展奠定了基础.

关键词:毒性; 水质; 指标; 评价; 安全

中图分类号: X131 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)10-3991-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.10.049

Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality

XU Jian-ying[1], ZHAO Chun-tao[1,2], WEI Dong-bin[2]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100049, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The safety of water quality has important impacts not only on the health of ecological system, but also on the survival and development of human beings. The conventional assessment methods for water quality based on the concentration limits are not reliable. The toxicity tests can vividly reflect the whole adverse biological effects of multiple chemicals in water body, which has been regarded as a necessary supplement for conventional water quality assessment methods based on physicochemical parameters. Considering the chemical pollutants usually have various adverse biological effects, the ecotoxicity testing methods, including lethality, genotoxicity, endocrine disrupting effects, were classified according to the different toxicity types. Then, the potential applications of toxicity testing methods and corresponding evaluation indices in evaluating the toxicity characteristics of ambient water samples were discussed. Particularly, the safety assessment methods for water quality based on the toxicity tests, including potential toxicology, toxicity unit classification system, potential ecotoxic effect probe, and safety assessment of water quality based on toxicity test battery, were summarized. This paper not only systematically reviewed the progress of toxicity tests and their application in safety assessment of water quality, but also provided the scientific basis for the further development in the future.

Key words: toxicity; water quality; index; assessment; safety

水是生命之源,洁净而优良的水质不仅是生态系统安全的基石,也是人类健康的保障,水质安全与否直接关系到人类的生存和发展[1]. 然而,近年来随着人类活动的加剧,越来越多的化学污染物被直接或间接地排入环境水体,造成严重污染. 这些污染物不但包括有毒有害的无机、有机污染物,也包括氮磷等营养元素. 尤其是水体中医药品和个人护理用品等新型污染物的增多,使水体呈现新的复合污染特征[2~6]. 因此,水体污染特征检测、水质安全评价越来越受到人们的重视. 截至目前,传统的水质安全评价主要是通过测试水体的一些物理化学指标,并与水质标准进行比对. 国际上有代表性的水质标准主要包括欧盟(EC)的水环境标准体系、日本的《新日本水质标准》、我国的《地表水环境质量标准》等. 其它多数国家或地区的水质标准也与此大致相似[7].

目前国内外的水质标准多由单一指标(如砷、镉、铬、铅、汞等)和综合指标(如总有机碳、化学需氧量、生化需氧量等)构成. 现行水质指标虽能直观反映水体中某一种或某几种污染物含量是否超标,但利用单一指标判断水质是否安全尚存在一定不足. 首先,单一指标的制订主要考虑污染物对人类健康的影响,对生态系统的影响考虑较少. 其次,目前很多污染物的毒性数据并不充分,而且水体中往往存在大量未知污染物,很难制订合理的水质标

收稿日期: 2014-03-05; **修订日期**: 2014-04-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAJ24B01); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA0652051)

作者简介: 徐建英(1975~),女,博士,副教授,主要研究方向为生态毒理学,E-mail:xu-jianying@163.com

* 通讯联系人,E-mail:weidb@rcees.ac.cn

准. 第三,由于水体中污染物种类繁多,多种污染物共存时往往产生拮抗、协同等复合毒性作用,而单一指标不能反映多种污染物之间的联合作用. 第四,伴随着有毒有害物质种类的增加,水质标准中的新指标不断增补,但往往是滞后的[8]. 第五,随着水质指标数量的不断增加,且污染物浓度较低,增加了分析检测费用.

传统水质评价方法仅测定污染物的含量,不能直接、全面地反映其对环境的综合影响[9]. 生物毒性测试方法弥补了传统方法的不足,可有效检测水体中所有共存污染物的综合生物效应,能直观评价水质的安全性,被广泛应用于饮用水[10~12]、工业废水[13,14]、生活污水[15]及其他环境水体[16~18]等,逐渐发展为传统水质评价方法的有效补充. 可见,生物毒性测试和相关的评价方法成为水质安全评价的基础,对保护水质安全具有重要意义. 本文在文献调研的基础上,总结常用的生物毒性测试方法,并讨论其在环境水体毒性测定、水质安全评价中的应用,以期为该领域的发展奠定基础.

1 生物毒性测试方法

生物毒性测试是基于生态毒理学发展起来的检测方法,主要研究有毒有害污染物对生态系统中生物(动物、植物、微生物)所引发的分子、细胞、器官、个体、群落等不同水平的损害. 水生生物长期生活在水环境中,其健康状况可反映水环境的污染程度. 在一定条件下,水生生物生理行为的改变可以作为评估水环境安全与否的重要指标[19~21]. 位于不同营养级水平、生物学背景资料充分、遗传学性能稳定、对化学污染物敏感的生物,如鱼类、蚤类、藻类以及微生物类等,通常被选作受试生物,评价化学污染物的毒性效应. 金小伟等[22]利用处于早期生命阶段的青鱼和细鳞斜颌鲴,评价了2,4-二氯酚、2,4,6-三氯酚和五氯酚的急性毒性效应. 结果显示,3 种氯酚类化合物对青鱼和细鳞斜颌鲴的 96 h-LC_{50} 值分别为:4.01、1.22、0.10 mg·L^{-1} 和 2.48、1.10、0.09 mg·L^{-1}. 裴国凤等[23]以近头状伪蹄形藻和斜生栅藻为受试物种,测定了三聚氰胺对藻类的生长抑制效应,三聚氰胺抑制近头状伪蹄形藻和斜生栅藻生长的 72 h-EC_{50} 值分别是 537.67 mg·L^{-1} 和 485.17 mg·L^{-1}. 魏东斌等[24]利用发光菌测定了 17 种取代苯系列化合物的急性毒性,EC_{50} 值的范围为 2.05 ~ 6.03 mg·L^{-1},并讨论了取代基种类、数量、取代位置对化合物毒性大小的影响.

除致死效应外,很多环境污染物还可能有三致(致畸、致癌、致突变)效应等,对水生生物乃至人体健康可能造成潜在危害. 根据致癌物损伤 DNA 的原理,已经开发了 50 余种快速测试遗传毒性的方法[25]. 瞿建宏等[26]采用 SOS/umu 方法研究了 4-甲基苯酚、4-乙基苯酚、4-辛基苯酚和 4-壬基苯酚分别在 0、50、100、250 μg·L^{-1} 等浓度下的致突变性,发现当 4 种物质浓度达到 50 μg·L^{-1} 或 100 μg·L^{-1} 时均可诱发 SOS 阳性反应,且响应强度随浓度增大而增强,呈明显的剂量-效应关系. 此外,近年来随着人们对环境安全和健康意识的提高、以及现代分析检测技术的发展,越来越多的具有内分泌干扰效应的污染物在环境介质中被检出. 针对环境内分泌干扰物也已开发多种生物检测方法,如双杂交酵母法、鱼类内分泌干扰试验、生物标志物法、细胞增殖方法、转染 ERE 及荧光素酶报告基因的 MCF-7 细胞方法、Hershberger 测试[27]等. 刘芸等[28]采用重组人雌激素受体基因片段(hER)及共激活因子(GRIP1)双杂交酵母检测体系,检测了 9 种酚类物质的类雌激素和抗雌激素效应. 发现 3 种表现出雌激素诱导与抑制活性,2 种表现出雌激素诱导活性,1 种仅表现出雌激素抑制活性.

2 环境水质的生物毒性评价方法

由于环境中污染物种类多,采用传统的物理化学方法,仅测定部分污染物的浓度,不能反映共存污染物间的复合生物效应,难以直接评价环境水体的毒性特征,以及对生态系统的影响[29]. 由于生物毒性测试能直观反映水体中所有共存污染物的整体生物学效应,近年来被广泛用于评价环境体的毒性特征和水处理单元的毒性去除效果[30].

2.1 抑制/致死率法

早期针对水样的毒性评价多采用对受试生物的抑制率、致死率等指标,水样对生物的抑制率越高表明水质越差. 通过测定水处理前后抑制率/致死率等指标的变化评价水处理单元/工艺的效率. 例如孙晓怡等[31]使用鱼类、发光菌、蚕豆根尖等生物毒性试验对辽宁省 21 家工业废水进行了研究,发现废水对发光菌的抑制率范围为 3% ~100%,仅 4 家企业废水对发光菌的抑制率小于 30%,而 81% 企业排放废水的毒性等级在中等以上. 王丽莎等[32]采用发光细菌毒性测试法研究了某污水再生处理工艺中生物毒性的变化,进水抑制率为 63%,二沉池出水降低至 0%,氯消毒后增强至 93%,说明二级生物

处理能显著降低污水的毒性效应,但氯消毒处理反而导致出水毒性升高,提示消毒处理中副产物的生成增加了出水的潜在风险[32].

2.2 浓缩/稀释倍数法

由于环境水样的毒性大小差异很大,有些水样毒性太强或太弱,无法直接检测 LC_{50} 或 EC_{50},需进行一定倍数的稀释或浓缩处理以实现准确检测. 因此,为了便于比较水体毒性,通常采用达到半数致死效应所对应的稀释或浓缩倍数表征水样毒性大小,稀释倍数越大、浓缩倍数越小表明原始水样的生物毒性越强. 查金苗等[33]利用日本青鳉鱼胚胎和幼鱼对北京市污水、工业废水及其经生物处理后的排水进行了毒性测试. 暴露 96 h 使幼鱼达到半数致死时污水处理厂进厂水、二沉出水、超滤工艺出水、超滤/反渗透联合工艺出水等水样的稀释度(原水样体积与稀释后水样体积的百分比)依次为: 33.7%、62.9%、60.0%、ND,说明污水处理厂进水有大量急性毒性物质,同时活性污泥二级处理和超滤/反渗透联合工艺等深度处理能有效去除这些物质,而超滤处理效果并不明显.

2.3 当量浓度法

为了比较不同水样的毒性效应,近年逐渐有研究者选用致毒机制明确的物质作为毒性测试的阳性参照物,将待测水样的毒性测试结果转换为产生与之相当效应的阳性参照物的当量浓度. 王春花等[34]将每皿 50 μg 的敌克松作为阳性参照,使用 Ames 试验检测某城市回用水中有机物的遗传毒性. 数据显示,该城市污水处理厂进水和出水中有机污染物在相当于原水每皿1 000 mL的剂量下,分别诱发 TA98 的菌落数为 29.7 ± 1.2 和 117.0 ± 3.6,分别诱发 TA100 的菌落数为 314.3 ± 9.0 和 980.0 ± 211.2,而阳性对照诱发 TA98 和 TA100 的菌落数分别为 302.7 ± 66.9 和 411.3 ± 42.4,说明该城市回用水的有机提取物具有一定致突变作用. Wei 等[35]分别以 Hg^{2+} 和 4-硝基喹啉-*N*-氧化物(4-NQO)作为发光菌急性毒性试验和 SOS/umu 遗传毒性试验的阳性参照物,比较研究了北京某再生水处理厂进水和不同处理工艺出水的急性毒性和遗传毒性效应. 发现传统的污水二级生物处理工艺、以及臭氧氧化工艺、臭氧活-性炭工艺等再生处理工艺均能有效降低污水的急性毒性(C_{Hg}^{2+} 降低幅度 15% ~79%)和遗传毒性($C_{4\text{-NQO}}$ 降低幅度 47% ~80%),而氯化消毒单元导致水体生物毒性升高,如臭氧氧化和氯化工艺使 C_{Hg}^{2+} 从 1.09 μg·L^{-1} 增加到 2.03 μg·L^{-1},$C_{4\text{-NQO}}$ 从 3.45 μg·L^{-1} 增加到 4.35 μg·L^{-1},说明氯消毒处理过程中生成了生物毒性较大的消毒副产物. 马军等[36]以雌二醇作为阳性参照物,利用酵母双杂交实验评价了某污水厂内分泌干扰性随季节的变化及不同处理单元的去除效果,结果显示污水及初沉池出水的雌二醇当量值分别为 16.13 ~21.65 ng·L^{-1} 和 17.10 ~22.85 ng·L^{-1},而二沉池出水的内分泌干扰活性降至 3.37 ~6.76 ng·L^{-1},表明二级生物处理能显著降低污水的内分泌干扰性.

上述 3 种水质毒性特征评价方法各有优缺点以及使用范围,具体列于表 1.

表 1　3 种毒性评价方法的比较

Table 1　Comparison of three toxicity assessment methods

项目	抑制/致死率法	浓缩/稀释倍数法	当量浓度法
适用范围	适用于对环境水体、废水、再生水毒性特征的评价,以及对工艺/单元/技术的处理效率评价	适用于对废水、再生水毒性特征的评价,以及对工艺/单元/技术的处理效率评价	适用于对环境水体、废水、再生水、饮用水毒性特征的评价,以及对工艺/单元/技术的处理效率评价
优缺点	方法简便,但结果往往存在一定的不确定性; 一般适用于急性致死性毒性效应	方法简便,但结果往往存在一定的不确定性; 一般适用于急性致死性毒性效应	方法较复杂,但结果比较准确、可靠; 适用于水样多种毒性效应的评价

3　基于毒性测试的水质安全评价方法

生物毒性测试不仅能检测单一污染物的负面生物效应,也能检测水样中共存的为数众多污染物的综合生物效应,为水质安全评价奠定了基础. 近年来研究人员逐步尝试采用生物毒性测试方法评价水质的安全性[37, 38],已经建立了数种基于生物毒性的水质安全评价方法. 比如,Krebs[39]提出 pT 指数评价废水生物毒性,Persoone 等[40]提出基于毒性体系的评价方法,Costan 等[41]提出 PEEP (potential ecotoxic effects probe)指数评价水体毒性,Wei 等[42]提出基于成组生物毒性的水质安全分级方法. 本文着重综述如下 4 种水质安全评价方法.

3.1 潜在毒性法(potentia toxicologiae, pT)[39]

潜在毒性法(pT)是 Krebs 提出的一种简单有效的污水毒性效应评估方法. 基本原理是对水样按照 2 倍的比例依次稀释,对所有稀释后的水样进行毒性测试,直到水样对受试生物不产生效应时稀释的总次数记为 pT,用阿拉伯数字表示. pT 指数用罗马字母表示. 例如:某废水样品经 7 次稀释后毒性测试发现无显著负面效应,则 pT 值为 7,对应的 pT 指数为Ⅶ. 当选择多种生物进行毒性测试时,采用最敏感的生物测试结果计算水样的 pT 值. 潜在毒性法具有通俗易懂、方法简便、应用灵活、无需复杂数据分析等优点. 但在实验中仅选一种生物进行毒性测试,容易受试验生物自身健康状况等因素的影响,导致结果不可靠.

3.2 毒性单位分级评价法(toxicity unit classification system)

Persoone 等[40]提出的毒性单位分级评价方法是在生物毒性测试的基础上,将测试结果 EC_{50} 值或 LC_{50} 值转换成 TU 值以评价水质. 该方法分为以下 6 个步骤:① 对水样进行生物毒性测试,并将引起半数抑制效应的废水浓度(EC_{50} 或 LC_{50})记为 1TU;② 若原始废水毒性大于半数抑制效应,则 TU = [1/L(E)C_{50}] ×100%,[式中 L(E)C_{50} 是达到半数毒性效应时,原水的稀释比例,即原水体积与稀释后体积的比];③ 若原水毒性较低不能产生半数效应,TU 值可按 50% 的部分计算. 比如,若原水只产生 20% 效应,20/50 = 0.4,其毒性为 0.4TU;④ 多个生物毒性试验进行综合评价时,分别计算出每个实验的 TU 值,取所有实验 TU 值的平均数作为最终 TU 值;⑤ 根据 TU 值将废水分为 5 个等级:等级Ⅰ(TU < 0.4 无毒),等级Ⅱ(0.4 ≤ TU < 1 微毒),等级Ⅲ(1 ≤ TU < 10 中毒),等级Ⅳ(10 ≤ TU < 100 高毒),等级Ⅴ(TU ≥ 100 剧毒);⑥ 根据生物毒性测试的结果,基于毒性分级体系,进行环境水样的安全性评价. 该方法综合利用了多种生物毒性测试的结果,方法简单.

邹叶娜等[13]用藻、蚤和发光细菌为指示生物,对常州市 6 种工业废水进行了综合评价. 结果显示,都表现出较强的急性毒性,毒性等级分别为:电镀厂和电子厂废水的毒性等级为Ⅴ级,化工厂和污水处理厂为Ⅳ级,印染厂和食品厂为Ⅲ级. 而处理出水的毒性等级分别为:电镀厂和污水处理厂为Ⅰ级,食品厂为Ⅱ级,电子厂为Ⅳ级,化工厂和印染厂为Ⅴ级,表明电镀厂、污水处理厂和食品厂这 3 种废水毒性削减都较明显,污水处理工艺对相应废水毒性有明显的去除效果. 电子厂废水处理前、后毒性无明显变化,而化工厂和印染厂废水处理后毒性反而增强,说明在水处理过程中生成了毒性更强的污染物,造成二次污染[13].

3.3 潜在生态毒性效应指数法(potential ecotoxic effects probe, PEEP)

潜在毒性效应指数综合了多种生物毒性测试结果,是一种评价工业废水潜在毒性效应的指标[31]. 其计算方法如下:

$$PEEP = \log\left[1 + n\left(\sum_{1}^{n}\frac{T_i}{N}\right)Q\right]$$

$$T_i = \frac{100}{EC_{50}} 或 \frac{100}{LC_{50}}$$

式中,T_i 为有害物质 i 的毒性单位; N 为参与评价的生物毒性指标数; n 为各生物测定结果的阳性结果测定数; Q 为排水流量($m^3 \cdot a^{-1}$),LC_{50} 为生物半数致死浓度,EC_{50} 为生物半数抑制浓度.

废水风险评估的 PEEP 分级标准为:PEEP 值≤1.99,无毒; 2≤PEEP 值≤2.99,微毒; 3≤PEEP 值≤3.99,中毒; 4≤PEEP 值≤4.99,高毒; PEEP 值≥5,剧毒.

与其他水质评价方法相比,PEEP 法既综合采用了多种生物毒性的平均值评价水质,同时也考虑了流量等因素,为水体中污染物的排放控制提供参考. 该方法中评价指标意义明确、使用简单,具有高区别性,考虑了生物可利用性及污染物间的复合效应,是传统工业废水管理中物理化学指标的重要补充[41]. PEEP 法在国际上被广泛用于评价水质的安全性[41, 43, 44]. 由于该方法计算时需要排水量,更适于对工业废水排放和污水处理厂进出水的监测与评价,不适合于环境水体的安全评价.

邹叶娜等[45]采用发光细菌急性毒性试验、大型蚤急性毒性试验和单细胞凝胶电泳实验对常州市 7 种典型工业废水进行了毒性检测,并将发光菌 15 min-EC_{50} 值(原水范围为:0% ~ 56.5%,出水范围为:0% ~ 0.22%)、大型蚤 48 h-LC_{50} 值(原水范围为:0% ~ 58.6%,出水范围为:0% ~ 3.37%)和彗星实验 LOEC 测试值(原水范围为:6.25% ~ 25%,出水范围为:12.5% ~ 50%)换算为 PEEP 值,发现电镀、电子、食品和污水处理厂出水的综合生物毒性(分别为:1.25、2.58、2.15 和 2.35)明显低于原水(5.42、5.50、2.93 和 4.45),说明企业废水经处理后不仅理化指标达标,生物毒性也显著降低. 化工厂和印染厂出水(PEEP 值分别为 4.55 和 5.73)毒

性明显高于原水(PEEP 值分别为 3.28 和 4.00),说明处理后理化指标达标,但生物毒性效应反而增强,需进一步进行毒性污染物的鉴别,以确定毒性物质及其来源,进而改进处理工艺,实现废水的安全排放[45]. 孙晓怡等[31]采用蚕豆微核实验、发光细菌急性毒性试验和鱼类急性毒性试验对抚顺市 10 家典型企业 11 个排水口废水进行了毒性测试,然后将蚕豆根尖污染指数(1.88 ~ 6.77)、发光菌 EC_{50} 值(0% ~ 99.74%)以及斑马鱼胚胎和仔鱼 96 h-LC_{50} 值(20.4% ~ 100%)转换为 PEEP 值,发现 11 个排水口废水的 PEEP 值范围为 6.85 ~ 9.75,均超过了排放标准(PEEP = 6),说明 10 家企业均需进一步采取措施,削减污染物排放.

3.4　基于成组毒性测试的水质安全分级法

考虑到水体中污染物种类多、每种污染物所引起的生物效应复杂,Wei 等[42]从水生生态系统的营养级出发,选择位于不同营养级的敏感物种作为受试生物,建立了一种新的评价水质生物安全性的方法. 基本思路是选择敏感的藻类,蚤类和鱼类为试验生物,同时对水样进行 3 种毒性效应的检测. 通过对传统风险外推方法的改进,提出了毒性得分指标,毒性得分值分为 1、2、3、4,其中 1 表示毒性最低,4 表示毒性最强. 根据水样引起显著毒性效应的最低浓度,将水样的毒性测试结果转化为毒性得分. 在此基础上,对水样的 3 个毒性得分进行综合,提出水质安全分级指标,分为 A、B、C、D 这 4 个等级,从 A ~ D,水质的安全性降低,分别赋以蓝色、黄色、橙色、红色等颜色. 根据 3 种毒性测试中最差的毒性得分值确定水质的安全性等级,比如 3 个毒性得分中最差的是 4,则安全分别为 D 级. 同时,为了直观描述水质的毒性得分值和安全分级结果,设计了一个三角形图(如图 1),3 个轴分别表示 3 种毒性测试的毒性得分值,由 3 个毒性得分值连线围成的区域,赋以与水质安全等级相应的颜色,表示水质的安全分级. 该方法简便、易理解、无需昂贵的仪器设备,便于推广普及.

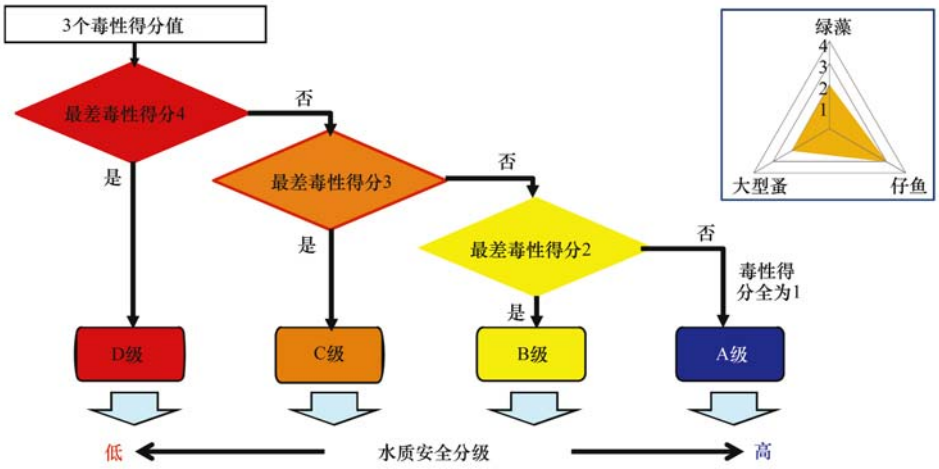

图 1　水质安全分级方法

Fig. 1　Safety ranking method for water quality

基于这一水质安全分级方法,Wei 等[46]对北京某公园水系的水质安全性进行了评价. 发现污水再生处理厂出水的水质安全性为 C 级,经过叠水花台、人工湿地、氧化塘等生态再生处理环节,水质的生物安全级别升为 A 级.

4　结论与展望

(1)环境水体中污染物种类繁多,每种污染物往往具有多种生物效应,因此,本文从污染物所引起的生物毒性效应出发,主要介绍了环境污染物所引起的几种主要生物毒性效应(致死/抑制效应、遗传毒性效应、内分泌干扰效应)的检测方法. 在此基础上,归纳总结了毒性测试在环境水样生物毒性评价中的应用,特别综述了基于生物毒性测试的水质安全评价方法. 经过本文的讨论,不仅梳理了生物毒性测试在水质安全评价领域的发展现状,同时也思考了该领域今后进一步发展的方向.

(2)首先,在生物毒性测试方法方面,由于污染物的生物学效应复杂,建议今后还需要针对其他更多效应,如神经毒性、生殖毒性等,开发稳定可靠、可标准化的检测方法. 其次,还需要进一步针对更多类型的生物毒性效应,研究开发致毒机制明确的生物毒性测试方法,并尽量实现检测的高通量,便于更全面、更准确地检测污染物的负面生物学效应.

在此基础上,将毒性测试方法与风险评价技术相结合,开发更多简便可行的水质安全评价、分级方法.目前已有的方法在评价、分级标准的确定等环节上存在较多不确定因素,建议将来在污染物的风险评价方法方面开展更多研究,降低评价的不确定性,为保障环境水质安全奠定坚实的基础.

参考文献:

[1] 王晓燕, 尚伟. 水体有毒有机污染物的危害及优先控制污染物[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2002, **23**(3): 73-78.

[2] Zhou R B, Zhu L Z, Yang K, *et al*. Distribution of organochlorine pesticides in surface water and sediments from Qiantang River, East China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **137**(1): 68-75.

[3] Yang R Q, Lv A H, Shi J B, *et al*. The levels and distribution of organochlorine pesticides (ocps) in sediments from the Haihe River, China[J]. Chemosphere, 2005, **61**(3): 347-354.

[4] 史熊杰, 刘春生, 余珂, 等. 环境内分泌干扰物毒理学研究[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 340-349.

[5] Van Wijngaarden R P, Brock T C M, Van Den Brink P J. Threshold levels for effects of insecticides in freshwater ecosystems: A review[J]. Ecotoxicology, 2005, **14**(3): 355-380.

[6] Zhao J L, Ying G G, Liu Y S, *et al*. Occurrence and a screening - level risk assessment of human pharmaceuticals in the Pearl River system, South China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, **29**(6): 1377-1384.

[7] 张锡辉, 李福志. 国外水质安全性评价体质及方法[J]. 中国建设信息(水工业市场), 2006, (4): 46-49.

[8] 胡洪营, 魏东斌, 董春宏. 污/废水的水质安全性评价与管理[J]. 环境保护, 2002, (11): 37-38.

[9] 王晓辉, 金静, 任洪强, 等. 水质生物毒性检测方法研究进展[J]. 河北工业科技, 2007, **24**(1): 58-62.

[10] 向伦辉. 武汉市饮用水有机提取物富集技术及其遗传毒性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009. 29-40.

[11] 刘秀. 饮用水生物毒性分析及控制技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011. 16-44.

[12] 金永堂, 王伟琴, 孙肖瑜. 饮用水源水中典型有机污染物健康风险与遗传毒性评价[J]. 环境卫生学杂志, 2011, **1**(1): 4-10, 24.

[13] 邹叶娜, 蔡焕兴, 薛银刚, 等. 常州市典型工业废水综合急性毒性评估[J]. 环境科学与管理, 2012, **37**(7): 167-169.

[14] 唐景春, 王敏, 郑先强, 等. 化工园区污水特征分析及生物毒性研究[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(1): 20-24.

[15] 王敏, 唐景春, 朱文英, 等. 大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(14): 4535-4543.

[16] 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 等. 基于生物毒性的松花江氨氮水质评价[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(12): 1344-1350.

[17] 范文宏, 唐戈, 段勇, 等. 运用主成分分析法评价北京市代表性河流的水质与毒性状况[J]. 生态毒理学报, 2007, **2**(1): 69-77.

[18] 陈瑞瑞, 蔡晓妍, 杨波, 等. 典型城市黑臭河道水体生物毒性研究[J]. 生态毒理学报, 2012, **7**(2): 201-208.

[19] 孟紫强. 关于生态毒理学与环境毒理学几个基本概念的见解[J]. 生态毒理学报, 2006, **1**(2): 97-104.

[20] 高世荣, 许永香. 水生生态毒理学方法在环境卫生研究中的应用[J]. 中国环境卫生, 2004, **7**(2): 40-46.

[21] 高小辉, 杨峰峰, 何圣兵, 等. 水质的生物毒性检测方法[J]. 净水技术, 2012, **31**(4): 49-54.

[22] 金小伟, 查金苗, 许宜平, 等. 氯酚类化合物对青鱼和细鳞斜颌鲴幼鱼的毒性[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(6): 1235-1242.

[23] 裴国凤, 刘国祥. 三聚氰胺对藻类的毒性效应研究[J]. 水生生物学报, 2010, **34**(5): 973-978.

[24] 魏东斌, 翟丽华, 董春宏, 等. 取代苯化合物对发光菌急性毒性的测定及预测[J]. 环境科学, 2002, **23**(S1): 1-5.

[25] Helma C, Mersch-Sundermann V, Houk V S, *et al*. Comparative evaluation of four bacterial assays for the detection of genotoxic effects in the dissolved water phases of aqueous matrices[J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(3): 897-907.

[26] 瞿建宏, 吴伟. 应用 SOS/Umu 试验评价烷基酚类化合物的致突变性[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2003, **22**(4): 332-335.

[27] 李剑, 马梅, 王子健. 环境内分泌干扰物的作用机理及其生物检测方法[J]. 环境监控与预警, 2010, **2**(3): 18-22, 25.

[28] 刘芸, 李娜, 马梅, 等. 酚类化合物雌激素效应的比较研究[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(8): 873-878.

[29] Lee C M, Allen H E. The ecological risk assessment of copper differs from that of hydrophobic organic chemicals[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 1998, **4**(3): 605-617.

[30] 马梅. 新的生物毒性测试方法及其在水生态毒理研究中的应用[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2002. 1-3.

[31] 孙晓怡, 王毓军, 巩宗强, 等. 抚顺市工业废水生物毒性评价[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(5): 546-549.

[32] 王丽莎, 胡洪营, 魏杰, 等. 城市污水再生处理工艺中发光细菌毒性变化的初步研究[J]. 安全与环境学报, 2006, **6**(1): 72-74.

[33] 查金苗, 王子健. 利用日本青鳉鱼早期发育阶段暴露评估排水的急慢性毒性和内分泌干扰效应[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1682-1686.

[34] 王春花, 何宁, 刘克明, 等. 城市回用水有机提取物遗传毒性分析[J]. 中国公共卫生, 2008, **24**(1): 81-82.

[35] Wei D B, Tan Z W, Du Y G. Toxicity-based assessment of the treatment performance of wastewater treatment and reclamation processes[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(6): 969-978.

[36] 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.

[37] Kusui T, Blaise C. Ecotoxicological assessment of Japanese industrial effluents using a battery of small-scale toxicity tests

[A]. In: Impact Assessment of Hazardous Aquatic Contaminants: Concepts and Approaches [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1999. 161-181.

[38] Mankiewicz-Boczek J, Nałęcz-Jawecki G, Drobniewska A, *et al*. Application of a microbiotests battery for complete toxicity assessment of rivers [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(3): 830-836.

[39] Krebs F. Small-scale freshwater toxicity investigations[M]. New York: Springer-Verlag, 2005. 115-137.

[40] Persoone G, Marsalek B, Blinova I, *et al*. A practical and user - friendly toxicity classification system with microbiotests for natural waters and wastewaters[J]. Environmental Toxicology, 2003, **18**(6): 395-402.

[41] Costan G, Bermingham N, Blaise C, *et al*. Potential ecotoxic effects probe (PEEP): A novel index to assess and compare the toxic potential of industrial effluents [J]. Environmental Toxicology and Water Quality, 1993, **8**(2): 115-140.

[42] Wei D B, Kisuno A, Kameya T, *et al*. A new method for evaluating biological safety of environmental water with algae, daphnia and fish toxicity ranks [J]. Science of the Total Environment, 2006, **371**(1-3): 383-390.

[43] Birkholz D A, Belton K L, Guidotti T L. Toxicological evaluation for the hazard assessment of tire crumb for use in public playgrounds [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, **53**(7): 903-907.

[44] Blaise C, Férard J F. Small-scale freshwater toxicity investigations[M]. New York: Springer-Verlag, 2005. 69-87.

[45] 邹叶娜, 蔡焕兴, 薛银刚, 等. 成组生物毒性测试法综合评价典型工业废水毒性[J]. 生态毒理学报, 2012, **7**(4): 381-388.

[46] Wei D B, Tan Z W, Du Y G. A biological safety evaluation on reclaimed water reused as scenic water using a bioassay battery [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(10): 1611-1618.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 10

Oct. 15, 2014

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM_{10} and $PM_{2.5}$ Sampling ····· JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, *et al.* (3639)

Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012 ····· ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, *et al.* (3644)

Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region ····· CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, *et al.* (3651)

Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry ····· LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, *et al.* (3663)

NO_x and SO_2 Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO_x Emissions ····· REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, *et al.* (3669)

Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification ····· SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)

Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin ····· SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)

Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China ····· HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)

Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province ····· LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, *et al.* (3702)

Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake ····· BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)

Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing ····· WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, *et al.* (3716)

Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment ····· LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, *et al.* (3722)

Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area ····· CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, *et al.* (3731)

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin ····· WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)

Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary ····· YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, *et al.* (3748)

Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River ····· SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, *et al.* (3755)

Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake ····· LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, *et al.* (3764)

Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai ····· CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, *et al.* (3769)

Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well ····· BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, *et al.* (3775)

Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(Ⅱ) in Water ····· WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, *et al.* (3782)

Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids ····· WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, *et al.* (3789)

UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts ····· PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, *et al.* (3794)

Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO_2(P25) ····· WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)

Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor ····· TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, *et al.* (3807)

Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge ····· TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region ····· WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, *et al.* (3821)

Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China ····· DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, *et al.* (3830)

Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure ····· LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, *et al.* (3836)

Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump ····· LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, *et al.* (3842)

Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil ····· TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, *et al.* (3851)

Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil ····· ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, *et al.* (3862)

Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil ····· HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, *et al.* (3869)

Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product ····· ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, *et al.* (3874)

Bioremediation of Chromium(Ⅵ) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium ····· ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, *et al.* (3882)

Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures ····· LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, *et al.* (3888)

Effects of Elevated O_3 Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China ····· YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, *et al.* (3896)

Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in *Eucalyptus* Plantations with Different Soil Organic Carbon Content ····· LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, *et al.* (3903)

Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ^{13}C Isotope Labeling ····· CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)

Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants *Burkholderia xenovorans* LB400 Based System ··· CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, *et al.* (3918)

Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities ····· XIN Xin, YAO Li, LU Lei, *et al.* (3926)

Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment ····· WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, *et al.* (3933)

Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria ····· WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)

Predicting Copper Toxicity to *Hypophthalmichthys molitrix* and *Ctenopharyngodon idellus* Based on Biotic Ligand Model ····· WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, *et al.* (3947)

Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows ····· MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, *et al.* (3952)

Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life ····· ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, *et al.* (3959)

Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area ····· LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, *et al.* (3970)

Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene ····· MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, *et al.* (3977)

Catalytic Degradation of Naphthalene by $CuO(-CeO_2)/Al_2O_3$ ····· ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, *et al.* (3984)

Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality ····· XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)

Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China ····· ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, *et al.* (3998)

Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing ····· FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)

Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China ····· WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, *et al.* (4009)

Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China ····· ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, *et al.* (4015)

《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 10 月 15 日　第 35 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 10　Oct. 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