ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

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33卷 第6期
2012年6月15日

目 次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 …… 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)
基于"源""汇"景观格局指数的海河流域总氮流失评价 …… 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 …… 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 …… 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 …… 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 …… 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 …… 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 …… 赵建刚,乔永民(1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 …… 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 …… 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统水产品中多环芳烃含量水平分析 …… 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)
四溴双酚A在5种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 …… 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)
五氯酚对稀有鮈鲫卵黄蛋白原及p53的诱导效应 … 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)
全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原mRNA水平的影响 …… 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 …… 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉宪(1871)
MIEX中试实验对二级出水中有机物去除的3DEEM解析 …… 杨建,高金华,常江(1878)
XDLVO理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 …… 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)
栅藻LX1在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 …… 马红芳,李鑫,胡洪营,于茵,巫寅虎(1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 …… 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究 …… 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 …… 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 …… 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 …… 袁光环,周兴求,伍健东(1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 …… 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 …… 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 …… 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)
南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 …… 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)
深圳市郊区大气中$PM_{2.5}$的特征分析 …… 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析 …… 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)
$Fe\text{-}MnO_x\text{-}CeO_2/ZrO_2$低温催化还原NO性能研究 …… 刘荣,杨志琴(1964)
自然型氨基酸及其钾盐的CO_2吸收和再生特性 …… 晏水平,陈竞翱,徐明亮,艾平,张衍林(1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统CH_4和N_2O排放的影响 …… 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 …… 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)
添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N_2O排放的影响 …… 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 …… 余立风,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 …… 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 …… 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)
废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 …… 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)
铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 …… 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 …… 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)
增施CO_2对C3和C4植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 …… 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 …… 乔琳,赵宏,王建龙(2052)
A/O MBR处理生活污水效率与菌群多样性的关系 …… 邝斌宇,史青,Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 …… 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 …… 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 …… 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)
ToxTell生物传感器在Cu^{2+}、Cd^{2+}冲击活性污泥系统分析中的应用 …… 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制 …… 盛建武,何苗,施汉昌(2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 …… 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 …… 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 …… 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)
处理垃圾渗滤液的Fe/C空气阴极MFC性能研究 …… 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 …… 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 …… 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)
《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统水产品中多环芳烃含量水平分析

陈冠秋[1,2], 李耀初[1*], 黄晋沐[1], 南燕[3], 林茂宏[4]
(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 广东省环境监测中心, 广州 510308; 3. 广东省环境保护工程职业学院环境科学系, 广州 510655; 4. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要: 为了掌握滩涂红树林种植-养殖耦合系统中水产品中多环芳烃的污染情况, 保证系统中水产品的品质和食用安全, 采用高效液相色谱仪检测了系统中秋茄、桐花树和木榄等养殖塘罗非鱼、鲻鱼和牡蛎体内的 13 种多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)[Fluorene(Flu)、Phenanthrene(Phe)、Anthracene(Ant)、Fluoranthene(Fla)、Pyrene(Pyr)、Benz[a]anthraces(BaA)、Chrysene(Chr)、Benzo[b]fluoranthene(BbF)、Benzo[k]fluoranthene(BkF)、Benzo[a]Pyrene(BaP)、Dibenzo[a,h]anthercene(DahA)、Benzo[g,h,i]perylene(BghiP)、Indeno[1,2,3-c,d]pyrene(InP)], 分析研究其污染水平并进行食品安全评价. 结果表明, 牡蛎体内的 TPAHs 含量最高, 干重浓度范围在 89.79 ~ 98.49 μg·kg^{-1}之间; 鲻鱼次之, 干重浓度范围在 25.97 ~ 34.64 μg·kg^{-1}之间; 罗非鱼的 TPAHs 含量最低, 干重浓度范围在 12.31 ~ 14.41 μg·kg^{-1}之间. 3 环 PAHs 是主要组成成分, 占 TPAHs 的 41.58% ~ 83.35%. 脂肪含量是影响不同种类水产品间 TPAHs 浓度水平的因素. 与国内其它地区相比, 研究区域水产品内 PAHs 污染处于轻度的污染水平. 3 类水产品的湿重等效 $\sum$BaP 浓度值在0.068 9 ~ 1.037 3 μg·kg^{-1}之间, 符合欧盟对苯并[a]芘的限值要求. 研究区域水产品内 PAHs 在安全食用范围内.

关键词: 多环芳烃; 水产品; 种植-养殖耦合系统; 污染水平; 食品安全评价
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)06-1846-06

PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System

CHEN Guan-qiu[1,2], LI Yao-chu[1], HUANG Jin-mu[1], NAN Yan[3], LIN Mao-hong[4]
(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Environmental Monitoring Center of Guangdong Province, Guangzhou 510308, China; 3. School of Environmental Science, Vocational and Technological School of Guangdong Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In order to know about the PAHs concentration in aquatic products from mangrove planting-aquaculture ecological system and to make sure of food quality and food safety, HPLC was used to determine concentrations of 13 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the *Tilapia mossambica*, *Mugil cephalu* and *Concha ostreae* from coupled mangrove planting-aquaculture ponds, food safety in aquatic products was also evaluated. The 13 PAHs were Fluorene (Flu), Phenanthrene (Phe), Anthracene (Ant), Fluoranthene (Fla), Pyrene (Pyr), Benz[a]anthraces (BaA), Chrysene (Chr), Benzo[b]fluoranthene (BbF), Benzo[k]fluoranthene (BkF), Benzo[a]Pyrene (BaP), Dibenzo[a,h]anthercene (DahA), Benzo[g,h,i]perylene (BghiP) and Indeno[1,2,3-c,d]pyrene (InP). Concentrations of PAHs were the highest in *Concha ostreae* which were in the range of 89.79-98.49 μg·kg^{-1} dry weight, while those were in the range of 25.97-34.64 μg·kg^{-1} in *Mugil cephalu* and 12.31-14.41 μg·kg^{-1} in *Tilapia mossambica*. The content of fat affected the levels of PAHs content in different aquatic products. The individual composition of PAHs was characterized by 3 rings in samples with the range of 41.58%-83.35%. Comparing with other areas, PAHs pollution of aquatic products in the studied area was in the mild level. Values of the total BaP_{eq} concentration ranged from 0.068 9 μg·kg^{-1} to 1.037 3 μg·kg^{-1}, which were lower than the maximum level set by European Union.

Key words: PAHs; aquatic product; mangrove planting-aquaculture ecological system; pollution level; food safety evaluation

多环芳烃是一种具有致癌、致畸、致突变作用的持久性有机污染物, 在环境中难降解, 易于富集在生物体内. 多环芳烃广泛存在于环境各介质, 可通过大气干湿沉降、陆地污染源和石油污染输入等多种途径进入养殖环境, 在沉积物和生物体中富集, 进而危害养殖生态环境或人类健康. 水体和沉积物中的 PAHs 污染研究一直是热点, 国内外有大量的研究

收稿日期: 2011-08-10; **修订日期**: 2011-12-02
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)重点项目(2007AA091703)
作者简介: 陈冠秋(1986 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境生态学, E-mail: 200_cgq@163.com
* 通讯联系人, E-mail: eeslyc@mail.sysu.edu.cn

成果[1~8]. 沉积物、土壤和水体中 PAHs 的生态风险评价在国内文献[9~20]中常见，水产品的 PAHs 研究仅见少量关于 PAHs 浓度分析和生物富集[21~25]，对水产品进行安全评价未见报道.

近年来，食品安全受到人们的极大关注，鱼类等养殖水产品作为人类的主要食品之一，其品质的好坏关系着人类的健康. 据学者统计，PAHs 是我国长江流域、黄河流域、珠江三角洲、松花江流域和婺江流域五大流域水体的主要有机污染物之一[26, 27]. 深圳海上田园滩涂红树林种植-养殖耦合系统构建于 2007 年，该系统通过将红树植物引入到海水养殖塘，从而达到净化水质、提高水产品品质的目的[28~30]. 由于养殖区上游的工业废水和废气来源广泛，伴随工业而产生 PAHs 污染物极易输入到养殖系统中. 因此，本研究系统分析了养殖周期内水产品的 PAHs 污染状况，并进行食品安全评价，以期为该耦合系统养殖产品的市场输入提供参考数据.

1　材料与方法

1.1　养殖塘的构造

研究地点位于深圳海上田园生态公园(113°45′53.0″E, 22°43′14.4″N)内，滩涂红树林种植-养殖耦合系统构建于 2007 年. 耦合系统的养殖塘分布在 2 条河涌之间(见图 1)，每个养殖塘内构建 2 个种植岛，种植面积占养殖塘总面积的 15%. 种植岛上分别种植不同的红树植物(见表 1). 塘内养殖水由海水直接排入，养殖过程不换水. 本次采样在第二养殖周期之内(2009 年 3 月 ~2010 年 3 月).

1.2　样品采集及处理

2009 年 11 月，在各养殖塘随机采集 3 ~5 尾鱼或 5 ~7 个牡蛎. 其中罗非鱼采集于秋茄、桐花树和木榄养殖塘；鲻鱼采集于秋茄、桐花树和秋茄-桐花树混种养殖塘；牡蛎采集于桐花树、秋茄-桐花树、木榄和木榄-红海榄养殖塘.

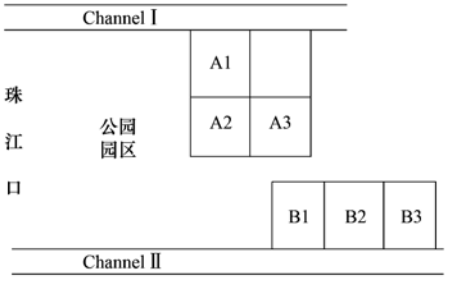

图 1　红树林种植-养殖耦合系统示意

Fig. 1　Sketch map of mangrove planting-aquiculture coupling system

表 1　红树种植-养殖耦合系统构建表

Table 1　Construction of mangrove planting-aquiculture system

种植塘代号	红树植物种类	面积/hm^2
A1	桐花树 *Aegicerascorniculatum*	0.67
A2	秋茄 *Kandeliacandel*	1.33
A3	秋茄-桐花树 *K. candel-A. corniculatum*	2.13
B1	木榄 *Bruguieragymnorhiza*	1.47
B2	红海榄 *Rhizophorastylosa*	1.67
B3	木榄-红海榄 *B. gymnorhiza- R. stylosa*	1.47

1.3　材料与仪器

主要仪器：微波萃取仪(ETHOS-1)，意大利 MILESTONE 公司；真空冷冻干燥仪；旋转蒸发仪，无锡星海生化仪器有限公司；氮吹仪；涡旋振荡仪. 主要溶剂：二氯甲烷、正己烷和乙腈(均为农残级，Sigmaaldrich, Germany)，丙酮(色谱纯，天津). 100 ~200 目硅胶(农残级，Silicycle, Canada). 中性氧化铝(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)和佛罗里土(农残级，Riedel-deHaen, USA).

PAHs 混合标样(2 000 $mg \cdot L^{-1}$，Supelco, USA)：芴-Flu、菲-Phe、蒽-Ant(3 环)，荧蒽-Fla、芘-Pyr、苯并[a]蒽-BaA、䓛-Chr(4 环)，苯并(b)荧蒽-BbF、苯并(k)荧蒽-BkF、苯并(a)芘-BaP、二苯并[a, h]蒽-DahA(5 环)，茚苯[1, 2, 3]芘-InP、苯并[ghi]苝-BghiP(6 环).

1.4　PAHs 提取和检测

1.4.1　PAHs 提取

罗非鱼和鲻鱼在实验室解剖，取其肉；牡蛎取全体. 样品经冷冻干燥机干燥，用粉碎机粉碎. 称取 2 g 样品，加入到微波萃取罐中，分别加入 15 mL 甲醇(KOH 1 moL)和 15 mL 正己烷，放到微波辅助萃取仪萃取. 萃取液放至室温，经过 0.2 μm 微孔滤膜抽滤，转移至分液漏斗，分液收集有机层，弃掉无机层.

将收集到的有机层液体旋蒸至约 1 mL，加入 10 mL 正己烷，再旋蒸至约 1 mL. 将样品全部转移到佛罗里土层析柱中，先用 100 mL 正己烷淋洗(F1)，再以 100 mL(正己烷∶二氯甲烷 = 4∶1)淋洗出 PAHs(F2)[31]. 将收集到的 F2 旋蒸至约 1 mL，转移到 2 mL 棕色进样瓶，准确加入 400 ng 内标 *m*-三联苯，高纯氮柔和吹至干，以乙腈定容至 0.2 mL，上高效液相色谱仪待测.

1.4.2　PAHs 的仪器分析

利用带荧光检测器的 Agilent1100 系列的高效液相色谱仪，手动进样 0.2 μL，配备 Inertsil ODS-P, 5 μm, Columns 4.6 mm ×250 mm 色谱柱，柱温保持

在30℃. 洗脱程序:60% 高纯水, 40% 乙腈, 0.5 mL·min^{-1}保持5 min; 100% 乙腈, 1.2 mL·min^{-1}保持45 min. FID 检测条件设置参考文献[32]的方法.

1.4.3 质量保证与质量控制

本实验的方法空白中检出目标污染物,目标污染物的浓度值范围是0.025 9 ~0.358 6 μg·kg^{-1},远远低于加标样品中目标物的浓度,说明整个实验流程中没有人为因素污染及操作过程是准确可靠的. PAHs 的方法回收率是 63.61% ~129.56%. 基质加标的回收率均值是 56.67% ~118.69%,相对标准偏差是 0.36% ~29.79%. 多环芳烃的方法检出限是0.11 ~0.29 μg·kg^{-1}.

1.5 水产品脂肪的测定

取 1.000 g 样品进行微波辅助萃取(萃取液为正己烷与丙酮1∶1混合液),将萃取液过滤,并将滤液旋转蒸发至1 mL 以下,转移至已经精确称量过的氮吹管中,用高纯柔和氮气吹干,称量氮吹管质量变化,即为脂肪含量.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 在水产品中的含量及组成特征

系统中各类红树种植-养殖塘罗非鱼、鲻鱼和牡蛎的3 ~6 环 PAHs 及 TPAHs 的含量(干重)见图2,牡蛎体内的 TPAHs 含量最高,浓度范围在 89.79 ~98.49 μg·kg^{-1}之间; 鲻鱼次之,浓度范围在 25.97 ~34.64 μg·kg^{-1}之间; 罗非鱼的 TPAHs 含量最低,浓度范围在 12.31 ~14.41 μg·kg^{-1}之间.

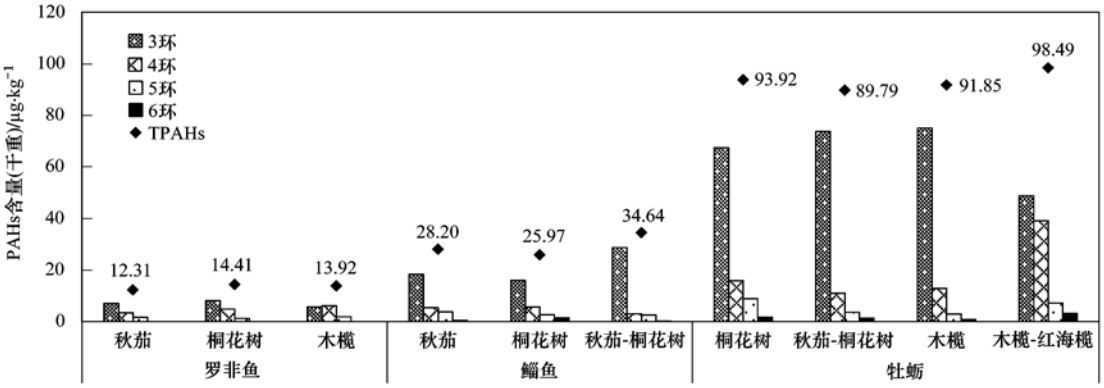

图2 各类养殖塘的水产品中3 ~6 环 PAHs 及 TPAHs 的含量

Fig. 2 Content of total PAHs and components with different rings in aquatic product

4 环 PAHs 是木榄-罗非鱼的主要成分,占 TPAHs 的41.58%; 对于其他水产品, 3 环 PAHs 是主要成分,占 TPAHs 的比例范围为 56.81%(桐花树-罗非鱼) ~83.35%(秋茄-桐花树鲻鱼). 6 环 PAHs 化合物在罗非鱼中均未检出. 强致癌化合物苯并[a]芘(BaP)在桐花树养殖塘的鲻鱼中未检出,致癌物质 DahA 在罗非鱼、桐花树养殖塘的鲻鱼以及木榄养殖塘的牡蛎中未检出.

各水产品中的脂肪含量见表2. 同种水产品中,脂肪含量对 TPAHs 的浓度影响不明显. 不同水产品之间,脂肪含量水平高的其水产品的 TPAHs 含量水平也会相应高,脂肪含量是影响不同种类水产品间 TPAHs 浓度水平的因素.

2.2 水产品 PAHs 的含量与其他地区的比较

将研究区域水产品的 PAHs 含量与国内其他地区鱼类和贝类中 PAHs 的含量相比,结果如表3 所示. 本研究区域的3 种水产品受到 PAHs 的污染较轻. 由于本研究的3 种水产品中有2 种是鱼类,而牡蛎是吊养于养殖塘中, 5 环和6 环的高环 PAHs 化合物的含量较低. 其他地区,由于是以沉积物为主要进食来源,贝类中高环 PAHs 含量较高[21~25].

2.3 水产品中 PAHs 的食品安全评价

研究者对"用毒性等效系数(toxic equivalency factors, TEFs)将各单体 PAH 折算为 BaP 的等效浓度"的评价方法投入了大量研究,由最初"致癌与非致癌"分别为"1"与"0"的简单分类[33]发展得到多

表2 各水产品中的脂肪含量

Table 2 Content of fat in aquatic products

项目	罗非鱼			鲻鱼			牡蛎			
	秋茄	桐花树	木榄	秋茄	桐花树	秋茄-桐花树	桐花树	秋茄-桐花树	木榄	木榄-红海榄
TPAHs	12.31	14.41	13.92	28.20	25.97	34.64	93.92	89.79	91.85	98.49
脂肪含量/%	4.15	2.45	2.77	2.79	6.40	9.42	10.98	12.77	13.52	11.37

表 3　与其他地区的比较情况

Table 3　Comparison of PAHs concentration in aquatic products from different areas

地理位置	产品种类	PAHs 种数	浓度范围/μg·kg^{-1}	组成特征	文献
深圳海上田园	罗非鱼、鲳鱼、牡蛎	13	12.31 ~ 98.49(干重)	3 环为主, 4 环次之	本研究
天津高沙岭潮间带	底栖泥螺	10	713.5 ~ 2 526.0(干重)	2 环为主, 3 环次之	[21]
台州湾	蓝园鲹、红点园趾蟹、海鳗、日本沙蚕、棱鲳	15	74.02 ~ 224.30(湿重)	3 环和 4 环为主	[22]
九龙江口红树林	6 种底栖动物	16	34.07 ~ 49.47(干重)	4 环为主, 2 环次之	[23]
淮河中下游	予蚌	16	1 342.61 ~ 1 623.08(干重)	5 环和 6 环为主	[24]
太湖梅梁湾	河蚬	16	991.4 ~ 1 210.9(干重)	2/3/4 环为主	[25]

套系数[33~35]. 大量研究采用该方法进行 PAHs 的风险评价[36~43]和食品安全评价[44~48]. 本研究采用 EPA 制定的 7 种致癌 PAHs(BaA、Chr、BkF、BbF、BaP、DahA、InP)的食物摄入毒性等效系数值[34]对致癌物质进行计算和评价,另外 6 种 PAHs 化合物采用 Nisbet 等[35]提出的毒性等效系数对非致癌物质进行计算和评价. 将海产品体内各单体 PAH 的湿重浓度折算为苯并[a]芘的等效浓度并加和,以欧盟(No. 1881/2006)[49]对特定食品中苯并[a]芘(benzo[a]pyrene)(湿重)的规定限值作为标准,对水产品进行食用安全评价,结果见图 3.

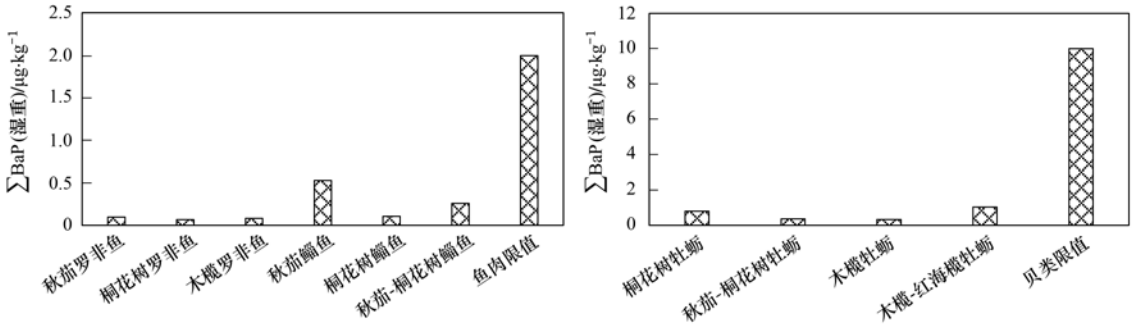

图 3　水产品的等效 ∑BaP 浓度值

Fig. 3　Total BaPeq concentration of PAHs in aquatic products

罗非鱼中 13 种 PAHs 的等效 ∑BaP 浓度值最低,鲳鱼次之,牡蛎体内的等效 ∑BaP 浓度最高;但是秋茄养殖塘的鲳鱼的等效 ∑BaP 浓度比较高,达0.531 8 μg·kg^{-1},因为致癌物质 BaP 和 DahA 的含量较高,这与水产品的浓度值评价有所不同的.

牡蛎体内 PAHs 的等效 ∑BaP 浓度值远大于罗非鱼中的浓度值,这与其浓度值分析结果一致. 在罗非鱼中,秋茄-罗非鱼的 PAHs 等效 ∑BaP 浓度值最高,为0.098 0 μg·kg^{-1}. 在鲳鱼中,秋茄-鲳鱼的 PAHs 等效 ∑BaP 浓度值最高. 在牡蛎体内,木榄-红海榄-牡蛎中的 PAHs 等效 ∑BaP 浓度值高达 1.037 3 μg·kg^{-1}; 桐花树-牡蛎次之,为 0.806 2 μg·kg^{-1}. 从食品安全的角度来讲, 3 种海产品体内 PAHs 的等效 ∑BaP 浓度值均小于评价标准的限值,位于安全范围内.

3　结论

(1)牡蛎的 13 种 PAHs 含量最高,鲳鱼次之,罗非鱼最低. 3 类水产品以 3 环 PAHs 为主要组成成分. 脂肪含量是影响不同种类水产品间 TPAHs 浓度水平的因素.

(2)与国内相比,水产品的 PAHs 污染处于低污染水平.

(3) 3 类水产品的湿重等效 ∑BaP 浓度值范围为0.098 0 ~ 1.037 3 μg·kg^{-1},在安全范围内.

参考文献:

[1] Bols N C, Brubacher J L, Ganassin R C, *et al*. Ecotoxicology and innate immunity in fish [J]. Developmental and Comparative Immunology, 2001, **25**(8-9): 853-873.

[2] Viganò L, Camoirano A, Izzotti A, *et al*. Mutagenicity of sediments along the Po River and genotoxicity biomarkers in fish from polluted areas [J]. Mutation research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2002, **515**(1-2): 125-134.

[3] Clark R B. Marine pollution [M]. (3rd ed.). Oxford: Clarendon Press, 1992. 62.

[4] 邱耀文, 周俊良, Maskaoui K, 等. 大亚湾海域水体和沉积物中多环芳烃分布及其生态危害评价 [J]. 热带海洋学报, 2004, **23**(4): 72-80.
[5] 江锦花. 台州湾围塘养殖水体中多环芳烃的浓度及来源 [J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(1): 47-50.
[6] 王岚云. 天津地区鱼塘沉积物中多环芳烃污染浅析 [J]. 天津科技, 2006, (4): 35-36.
[7] 冯承莲, 雷炳莉, 王子健. 中国主要河流中多环芳烃生态风险的初步评价 [J]. 中国环境科学, 2009, **29**(6): 583-588.
[8] Oros D R, Ross J R M, Spies R B, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) contamination in San Francisco Bay: a 10-year retrospective of monitoring in an urbanized estuary [J]. Environmental Research, 2007, **105**(1): 101-118.
[9] 汤智, 廖海清, 张亮, 等. 成渝经济区河流表层沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 [J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2639-2644.
[10] 刘亮, 张俊海, 胡莹莹, 等. 大连湾表层沉积物中多环芳烃的生态风险评估 [J]. 海洋环境科学, 2011, **30**(4): 477-480.
[11] 袁红明, 叶思源, 高茂生, 等. 黄河三角洲南部湿地表层土壤中多环芳烃的分布特征及生态风险评价 [J]. 海洋地质前沿, 2011, **27**(2): 24-28.
[12] 郑曦, 温洪宇, 韩宝平, 等. 京杭大运河扬州段表层沉积物中多环芳烃的分布及风险评价 [J]. 中国环境监测, 2011, **27**(4): 66-70.
[13] 刘楠楠, 陈鹏, 朱淑贞, 等. 辽河和太湖沉积物中 PAHs 和 OCPs 的分布特征及风险评估 [J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 293-300.
[14] 廖书林, 郎印海, 王延松. 辽河口湿地土壤多环芳烃的分布与生态风险评价 [J]. 环境化学, 2011, **30**(2): 424-429.
[15] 郭建阳, 廖海清, 韩梅, 等. 密云水库沉积物中多环芳烃的垂直分布、来源及生态风险评估 [J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 626-631.
[16] 冯胜, 段雪梅, 朱广伟. 厦门市不同城市化区域水体表层沉积物多环芳烃的含量、分布、来源及生态风险评价 [J]. 环境化学, 2011, **30**(8): 1520-1521.
[17] 聂海峰, 李括, 彭敏, 等. 松花江底积物中多环芳烃生态风险评价 [J]. 中国地质, 2011, **38**(4): 1102-1110.
[18] 李玉美, 班睿. 我国水环境中持久性有机污染物污染的现状及研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2011, **39**(1): 231-235.
[19] 姜林, 钟茂生, 张丹, 等. 污染场地土壤多环芳烃 (PAHs) 生物可利用浓度的健康风险评价方法 [J]. 生态环境学报, 2011, **20**(6-7): 1168-1175.
[20] 罗庆, 孙丽娜, 张耀华. 细河流域地下水中多环芳烃污染健康风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 959-964.
[21] 聂利红, 刘宪斌, 降升平, 等. 天津高沙岭潮间带泥螺体内多环芳烃的质量分数及富集特征 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2008, **47**(增刊): 106-110.
[22] 江锦花, 丁理法. 台州湾五种海洋生物体内多环芳烃的浓度、富集特征及环境效应 [J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(5): 394-397.
[23] 蔡立哲, 马丽, 袁东星, 等. 九龙江口红树林区底栖动物体内的多环芳烃 [J]. 海洋学报, 2005, **27**(5): 112-118.
[24] 赵彩平, 丁毅, 叶云, 等. 淮河中下游干流贝类体中多环芳烃的分布及风险评价 [J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(3): 1263-1265.
[25] 李天云, 黄圣彪, 孙凡, 等. 河蚬对太湖梅梁湾沉积物多环芳烃的生物富集 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(11): 2354-2360.
[26] 郭旭强, 王大建, 王秀霞, 等. 影响水产食品安全因素的分析 [J]. 齐鲁渔业, 2009, **26** (12): 49-51.
[27] 邱志群, 舒为群, 曹佳. 我国水中有机物及部分持久性有机物污染现状 [J]. 癌变·畸变·突变, 2007, **19**(3): 188-193.
[28] 黄凤莲, 陈桂珠, 夏北成, 等. 滩涂海水养殖生态模式研究 [J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(1): 16-20.
[29] 彭友贵, 陈桂珠, 佘忠明, 等. 红树林滩涂海水种植-养殖生态耦合系统初步研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2004, **43**(6): 150-154.
[30] 佘忠明, 林俊雄, 彭友贵, 等. 红树林与水产养殖系统初步研究 [J]. 生态学杂志, 2005, **24**(7): 837-840.
[31] Koh C H, Khim J S, Kannan K, *et al*. Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs), biphenyls (PCBs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and 2, 3, 7, 8-TCDD equivalents (TEQs) in sediment from the Hyeongsan River, Korea [J]. Environmental Pollution, 2004, **132**(3): 489-501.
[32] Williamson K S, Petty J D, Huckins J N, *et al*. HPLC-PFD determination of priority pollutant PAHs in water, sediment, and semipermeable membrane devices [J]. Chemosphere, 2002, **49**(7): 703-715.
[33] Petry T, Schmid P, Schlatter C. The use of toxic equivalency factors in assessing occupational and environmental health risk associated with exposure to airborne mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Chemosphere, 1996, **32**(4): 639-648.
[34] Environmental Protection Agency (EPA). Provisional guidance for quantitative risk assessment of PAH [EB/OL]. http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/superfund_toxicity.htm, EPA/600/R-93/089, 1993.
[35] Nisbet I C T, LaGoy P K. Toxic Equivalency Factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992, **16**(3): 290-300.
[36] Vu V T, Lee B K, Kim J T, *et al*. Assessment of carcinogenic risk due to inhalation of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{10} from an industrial city: a Korean case-study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(1-2): 349-356.
[37] Froehner S, Maceno M, Luz E C D, *et al*. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments and their potential toxic effects [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **168**(1-4): 205-213.
[38] Zhang H, Huang P, Song M W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediments of Beijiang River, China: Characteristics, sources and toxicity evaluation [A]. In:

International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering [C]. NJ: IEEE, 2011.4.

[39] Cheung K C, Leung H M, Kong K Y, *et al*. Residual levels of DDTs and PAHs in freshwater and marine fish from Hong Kong markets and their health risk assessment [J]. Chemosphere, 2007, **66**(3): 460-468.

[40] Fang G C, Chang K F, Lu C S, *et al*. Estimation of PAHs dry deposition and BaP toxic equivalency factors (TEFs) study at Urban, Industry Park and rural sampling sites in central Taiwan, Taichung [J]. Chemosphere, 2004, **55**(6): 787-796.

[41] Halek F, Nabi G, Kavousi A. Polycyclic aromatic hydrocarbons study and toxic equivalency factor (TEFs) in Tehran, IRAN [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **143**(1-3): 303-311.

[42] Cao Z G, Liu J L, Luan Y, *et al*. Distribution and ecosystem risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Luan River, China [J]. Ecotoxicology, 2010, **19**(5): 827-837.

[43] Ma Y G, Cheng J P, Jiao F, *et al*. Distribution, sources, and potential risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water resources from Henan Province in middle of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **146**(1-3): 127-138.

[44] Andrée S, Jira W, Schwind K H, *et al*. Chemical safety of meat and meat products [J]. Meat Science, 2010, **86**(1): 38-48.

[45] Patrolecco L, Ademollo N, Capri S, *et al*. Occurrence of priority hazardous PAHs in water, suspended particulate matter, sediment and common eels (*Anguilla anguilla*) in the urban stretch of the River Tiber (Italy) [J]. Chemosphere, 2010, **81**(11): 1386-1392.

[46] Nakata H, Sakai Y, Miyawaki T, *et al*. Bioaccumulation and toxic potencies of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in tidal flat and coastal ecosystems of the Ariake Sea, Japan [J]. Environmental Science Technology, 2003, **37**(16): 3513-3521.

[47] Yoon E, Park K, Lee H, *et al*. Estimation of excess cancer risk on time-weighted lifetime average daily intake of PAHs from food ingestion [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2007, **13**(3): 669-680.

[48] Nwaneshiudu O C, Autenrieth R L, McDonald T J, *et al*. Risk of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) exposure from ingested food: The Azerbaijan case study [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B-pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes, 2007, **42**(2): 201-209.

[49] COMMISSION REGULATION (EC) No. 1881/2006 of 19 December 2006, Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs (Text with EEA relevance) [S]. Official Journal of the European Union.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 6

Jun. 15, 2012

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China ····· CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, *et al.* (1777)

Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China ····· SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, *et al.* (1784)

Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed ····· MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)

Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline ····· CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, *et al.* (1795)

Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone ····· DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, *et al.* (1801)

Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River ····· XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, *et al.* (1808)

Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland ····· SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, *et al.* (1816)

Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China ····· ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)

Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea ····· HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, *et al.* (1832)

Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current ····· WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, *et al.* (1839)

PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System ····· CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, *et al.* (1846)

Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu ····· YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, *et al.* (1852)

Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (*Gobiocypris rarus*) ····· XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, *et al.* (1858)

Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (*Brachydanio rerio*) ····· CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, *et al.* (1865)

Relationship Between Electron Transfer Capacity and *Fluorescence Characteristics* of Dissolved Organic Matter ····· TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, *et al.* (1871)

Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM ····· YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)

Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach: Effect of Calcium Ions ····· YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, *et al.* (1884)

Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of *Scenedesmus* sp. LX1 in Aquaculture Wastewater ····· MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, *et al.* (1891)

Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process ····· WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, *et al.* (1897)

Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process ····· LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, *et al.* (1902)

Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor ····· LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, *et al.* (1907)

Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters ····· LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, *et al.* (1913)

Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment ····· YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)

Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition ····· SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, *et al.* (1923)

Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability ····· HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, *et al.* (1930)

Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China ····· LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, *et al.* (1936)

Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City ····· ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, *et al.* (1944)

Characterization of Atmospheric $PM_{2.5}$ in the Suburb of Shenzhen ····· DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, *et al.* (1952)

Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission ····· TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, *et al.* (1958)

Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO_x-CeO_2/ZrO_2 Catalyst ····· LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)

CO_2 Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt ····· YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, *et al.* (1971)

Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil ····· ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, *et al.* (1979)

Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows ····· SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, *et al.* (1987)

Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N_2O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers ····· SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, *et al.* (1994)

Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production ····· YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, *et al.* (2000)

Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil ····· LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, *et al.* (2006)

Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain ····· ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, *et al.* (2013)

Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings ····· SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, *et al.* (2021)

Effect of Cr(Ⅵ) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake ····· WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, *et al.* (2028)

Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi ····· YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, Liang Shi-chu, *et al.* (2038)

Effect of CO_2 Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant ····· MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, *et al.* (2046)

Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis ····· QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)

Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR ····· KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, *et al.* (2061)

Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil ····· WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)

Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City ····· HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, *et al.* (2075)

Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose ····· BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, *et al.* (2083)

Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor ····· WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, *et al.* (2090)

Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples ····· SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)

Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma ····· ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, *et al.* (2104)

Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis ····· WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, *et al.* (2110)

Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill ····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)

Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate ····· TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, *et al.* (2125)

Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis ····· LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, *et al.* (2131)

Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis ····· CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, *et al.* (2139)

《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）

2012 年 6 月 15 日　33 卷　第 6 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 6　Jun. 15, 2012

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：70.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行