

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f ₂ 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价

刘洋¹, 付强¹, 高军^{2*}, 徐网谷², 殷波¹, 曹亚乔¹, 秦卫华²

(1. 盐城工学院江苏省环境保护海涂生态与污染控制重点实验室, 盐城 224051; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 为初步了解江苏盐城地区水产品重金属污染现状及摄入风险, 于2012年5月采集了该地区海水鱼类、淡水鱼类、甲壳类、贝类、头足类5类22种主要水产品, 采用原子吸收分光光度法检测肌肉中Cd、Cu、Zn、Pb、Cr等5种重金属含量, 并采用单因子污染指数(P_i)、重金属污染指数(MPI)、每周可耐受摄入量(PTWI)及致癌与非致癌年风险($R_{\text{总}}^c$ 、 $R_{\text{总}}^n$ 、 $R_{\text{总}}'$)指标分别评价其污染程度、食用安全性和健康风险。结果表明, 目前盐城地区水产品均受到一定程度的重金属污染, 其中Cd、Pb、Cr超标较为严重, 超标率分别为31.8%、31.8%、40.9%; P_i 结果显示, 各水产品Cd、Pb、Cr含量均超过轻污染水平, 其中淡水鱼类Cd、Pb含量, 贝类Pb、Cr含量, 头足类Cr含量达到重污染水平, Cu、Zn含量尚处于正常范围内; MPI结果显示, 贝类、甲壳类重金属污染高于淡水鱼类、头足类和海水鱼类, 污染程度为贝类>甲壳类>淡水鱼类>头足类>海水鱼类; 总体而言, 盐城地区水产品重金属的食用安全性尚在可接受范围内, 但贝类和头足类的Cr摄入量已接近PTWI值, 个别海水鱼类Cr的摄入量已超过PTWI值, 存在较高风险; 健康风险模型结果显示, 各类水生生物总重金属摄入健康风险数值($R_{\text{总}}'$)均未超过国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受水平 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 但贝类和头足类的Cr摄入健康风险均已接近该数值, 值得关注。当前, 盐城地区水产品存在较严重的重金属污染, 尤其是Cr污染, 其污染等级、摄入风险和健康风险均较高, 需引起高度重视。

关键词: 重金属; 水产品; 盐城; 含量; 安全评价

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4081-09

Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province

LIU Yang¹, FU Qiang¹, GAO Jun², XU Wang-gu², YIN Bo¹, CAO Ya-qiao¹, QIN Wei-hua²

(1. Key Laboratory for Ecology and Pollution Control of Coastal Wetlands (Environmental Protection Department of Jiangsu Province), Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: Current status and intake risk of heavy metal pollution in aquatic products were studied in Yancheng, Jiangsu Province. Twenty-two kinds of aquatic products were sampled in May 2012, and the concentrations of Cd, Cu, Zn, Pb and Cr in muscles were measured using atomic absorption spectroscopy. Single factor pollution index (P_i) and metal pollution index (MPI) were used to evaluate the degree of pollution, and provisional tolerable weekly intake (PTWI) and carcinogenic risks were used to assess the edible safety and health risk, respectively. We found all the aquatic products were contaminated, and the pollutions by Cd, Pb and Cr were more serious, with the exceeding rates of 31.8%, 31.8% and 40.9%, respectively. P_i indices indicated the contents of Cd, Pb and Cr exceeded the allowable criteria of "Light Pollution", while Cd and Pb in freshwater fish, Pb and Cr in shellfish, and Cr in cephalopoda reached the criteria of "Heavy Pollution". The MPI results showed that heavy metal pollution in shellfish was the most severe, followed by crustacean, freshwater fish, and cephalopoda, while it was slight in marine fish. At present, the edible safety of heavy metals in aquatic products was acceptable in Yancheng, but the Cr intake of shellfish and cephalopoda was approaching PTWI and that of a minority of marine fishes even exceeded the PTWI value. The model estimation for health risk indicated that the health risk value of heavy metal ingestion was still below the maximal acceptable level ($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), recommended by International Commission on Radiation Protection (ICRP), but the values of Cr for shellfish and cephalopoda were approaching the criterion. In summary, heavy metal pollution in aquatic products in Yancheng is rather severe, especially for Cr pollution, and more attention should be paid to the pollution status, edible safety and health risk.

Key words: heavy metal; aquatic products; Yancheng; concentration; safety evaluation

收稿日期: 2013-01-12; 修订日期: 2013-04-18

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201209028); 江苏省自然科学基金项目(BK2011079); 盐城工学院人才引进项目(kjc2012021, kjc2012020)

作者简介: 刘洋(1982~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: ly2002wo20@126.com

* 通讯联系人, E-mail: gaojun@nies.org

重金属由于其高毒性、持久性及生物富集与放大性而备受关注^[1,2],其污染已成为我国最重要的环境问题之一^[3,4]. 海洋、河流、鱼塘等水体及其沉积物中的重金属可经食物链传递作用而逐渐富集于水生生物体内,作为终极消费者的人类如果食用这些受重金属污染的水产品,健康将会受到直接威胁. 我国是水产品消费大国,据统计,目前我国人均水产品占有量达到 39.02 kg,水产蛋白消费占动物蛋白消费的三分之一以上^[5],通过水产品途径摄入人体的重金属安全问题不容忽视.

近年来,重金属在水产品中的残留已成为我国环境科学和食品安全领域的研究热点^[6~8]. 刘平等^[9]研究了北京市主要淡水鱼体内重金属残留,发现 Pb、Cd 和 As 均有超标;顾佳丽等^[10]分析了辽宁沿海常见海鱼和贝类重金属含量,发现部分样品 Cd、Pb 超标;秦春艳等^[11]测定了珠江口伶仃洋海域常见鱼类、甲壳类、双壳类和头足类体内重金属含量,发现各类水生生物均已受到不同程度的重金属污染,部分样品甚至达到重污染水平,大部分海洋生物体内重金属含量严重超过食用标准,有的甚至超标数十倍. 近年来大量的研究结果^[10~12]显示,我国沿海地区海水和淡水水产品目前均受到巨大的重金属污染压力,有必要开展进一步的深入研究.

江苏盐城地区是我国重要的淡水水产品养殖基地和海水水产品捕捞基地,海水和淡水水产品的产量逐年增加,2010 年的产量分别达到 354 842 t 和 632 067 t,人均占有水产品 165.2 kg. 随着沿海大开发的推进,工业园区的兴建以及滨海农业的进一步发展,盐城地区的水产业同样面临巨大的重金属污染威胁. 盐城海水和淡水水产品重金属污染现状如何? 是否存在食用安全隐患? 可能的健康风险有哪些? 相关的研究却鲜见报道. 本研究选取该地区常见的 5 类 22 种海水和淡水水产品,分析肌肉中的 5 种重金属含量,并采用多种方法评价了其污染等级、食用安全性及健康风险. 本研究结果不但可填补相关研究的空白,而且可为合理规划该地区水产业的发展、有效控制重金属污染提供相关依据.

1 材料与方法

1.1 实验方法

1.1.1 样品采集与处理

样品采集于 2012 年 5 月,共分为 5 类 22 种,其中海水鱼类 9 种,淡水鱼类 4 种,甲壳类 3 种,贝类 4 种,头足类 2 种(表 1),种类均经过水产专家鉴定.

海水鱼类、头足类、中国对虾取自黄沙港渔港渔船冰库中,样品均为当天捕捞;贝类取自黄沙港渔港陆上冷库中,均为鲜样;泥螺、天津厚蟹取自射阳海边潮间带,均为鲜样;淡水鱼类、克氏螯虾采自黄沙港镇周边鱼塘,由鱼塘塘主赠送. 样品随机采集,大小基本一致,样品数根据实际情况和测定要求从一只至十数只不等. 样品放入聚乙烯塑料袋中,密封并做好标记,置于冰盒中运回实验室,测定体长、体重后于 -20℃ 中冷冻保存至处理. 样品详细信息如表 1 所示.

样品解冻后,用去离子水反复清洗,不锈钢刀和镊子取相应可食部肌肉,去离子水冲洗肌肉表面,吸水纸吸干水分. 取部分肌肉样品置于称量瓶中,称其湿质量,然后将样品放于有盖培养皿中,110℃ 烘至恒重^[13],称其干质量,计算干/鲜比. 其它肌肉组织立即进行消解测定.

1.1.2 仪器及试剂

硝酸(GR, 上海展云化工有限公司),高氯酸(GR, 上海申翔化学试剂有限公司),Cd、Cu、Zn、Pb、Cr 标准溶液(国标样品,国家有色金属及电子材料分析测试中心),实验用水为二次去离子水.

TAS-990F 原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司),LWY84B 型远红外消煮炉,3D101-2AS 型恒温干燥箱,FA 2004 型电子天平. 实验所用器皿均用 20% 硝酸浸泡 48 h 以上,去离子水洗净,烘干备用.

1.1.3 分析方法

重金属消解和测定方法按照有关标准和规范方法进行,并加以改进. 取适量样品, $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 湿法消解,火焰原子吸收分光光度计测定 Cd、Cu、Zn、Pb、Cr 含量. 具体过程及分析参考 GB/T 5009-2010^[14]和 GB 17378.6-2007^[15]进行.

测定过程中同时测定试剂空白,分析过程采用国家标准物质(贻贝,GBW 08571) 进行质量控制,标准物质各测定值和标准值相对偏差均小于 10%,符合要求.

1.2 评价方法

1.2.1 污染程度评价

采用单因子污染指数法评价不同种类水产品重金属污染状况^[9,11,16,17]. 计算公式如下:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为第 i 种重金属的质量分指数(单因子污染指数); C_i 为第 i 种重金属实测值的均值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为第 i 种重金属限量标准

表 1 海水和淡水水产品基本信息

Table 1 Basic information of seawater and freshwater aquatic products					
品种	来源	种类	样品状态	检测部位	干/鲜比 ¹⁾
小黄鱼(<i>Pseudosciaena polyactis</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.250
日本须鲷(<i>Paraplagusia japonica</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.337
棘头梅童鱼(<i>Collichthys lucidus</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.231
刀鲚(<i>Coilia ectenes</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.209
黄鲚(<i>Coilia mystus</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.254
中国对虾(<i>Penaeus orientalis</i>)	海洋捕捞	甲壳类	冷冻样	背部肌肉	0.175
瘤背石磺(<i>Onchidium struma</i>)	海洋捕捞	贝类	鲜样	肌肉组织	0.419
文蛤(<i>Meretrix meretrix</i>)	海洋捕捞	贝类	鲜样	斧足肌肉	0.141
曼氏无针乌贼(<i>Sepiella maindroni</i>)	海洋捕捞	头足类	冷冻样	背部肌肉	0.226
日本枪乌贼(<i>Loligo japonica</i>)	海洋捕捞	头足类	冷冻样	背部肌肉	0.133
泥螺(<i>Bullacta exarata</i>)	海边采集	贝类	鲜样	足部肌肉	0.196
海鳗(<i>Muraenesox cinereus</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.184
鮫鲛(<i>Lophius litulon</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.138
银鲳鱼(<i>Pampus sinensis</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.269
带鱼(<i>Trichiurus haumela</i>)	海洋捕捞	海水鱼类	冷冻样	背部肌肉	0.257
四角蛤蜊(<i>Macra veneriformis</i>)	海洋捕捞	贝类	鲜样	斧足肌肉	0.134
天津厚蟹(<i>Helice tientsinensis</i>)	海边采集	甲壳类	鲜样	背甲内组织及螯内肌肉	0.225
克氏螯虾(<i>Procambarus clarkii</i>)	河沟	甲壳类	鲜样	背部肌肉	0.182
鲫鱼(<i>Carassius auratus</i>)	鱼塘养殖	淡水鱼类	鲜样	背部肌肉	0.385
鲢鱼(<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	鱼塘养殖	淡水鱼类	鲜样	背部肌肉	0.155
鲤鱼(<i>Cyprinus carpio</i>)	鱼塘养殖	淡水鱼类	鲜样	背部肌肉	0.200
鳊鱼(<i>Carnis megalobrama</i>)	鱼塘养殖	淡水鱼类	鲜样	背部肌肉	0.371

1) 数据为 3 次测定平均值

($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在本研究中,Cd、Cu、Pb、Cr 采用文献[18]中的限量标准,Zn 采用文献[19]中的限量标准.

采用文献中常用的方法进行评价^[9,11,20]: $P_i < 0.2$ 为正常背景值水平; $0.2 \leq P_i < 0.6$ 为轻污染水平; $0.6 \leq P_i < 1$ 为中污染水平; $P_i \geq 1$ 为重污染水平,即超标.

采用重金属污染指数(MPI)比较不同种类水产品之间重金属污染的总体差异^[21,22]. 计算公式如下:

$$\text{MPI} = (C_1 \times C_2 \times C_3 \times \cdots \times C_n)^{1/n} \quad (2)$$

式中, C_n 指第 n 种重金属实测值的均值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

1.2.2 食用安全性评价

世界卫生组织(WHO)/联合国粮农组织(FAO)食品添加剂联合专家委员会(JECFA)制定了污染物每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)作为食用安全性评价依据^[23]. 本研究中根据水产品重金属含量以及我国居民每周水产品消费量,计算成人每周实际重金属摄入量,并与 PTWI 值比较,评价其食用安全性. 评价方法如下:

$$\text{AWI} = C_i \times \text{WC} \quad (3)$$

式中,AWI 为成人每周实际重金属摄入量(actual

weekly intake, mg); C_i 为水产品重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); WC 为人均每周水产品消费量(weekly consumption, kg),根据 2000 年中国总膳食研究^[24],以 $0.182 \text{ kg}\cdot\text{周}^{-1}$ 计.

$$\text{PTWI(成人)} = \text{PTWI} \times \text{成人体重} \quad (4)$$

式中,PTWI 为 JECFA 制定的污染物每周可耐受摄入量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其数值参考文献[10]; PTWI(成人)为成人每周可耐受摄入量(mg);成人体重以 70 kg 计.

以 AWI 占 PTWI(成人)的百分比即 $\text{AWI}/\text{PTWI}(\text{成人}) \times 100\%$ 对食用安全性进行评价,所占比例越高,其食用安全性越低^[23].

1.2.3 健康风险评价

不同类型污染物通过食入途径进入人体后所引起的健康风险包括致癌物所导致的健康风险和非致癌物所导致的健康风险^[25~27].

致癌物所导致的健康风险模型:

$$R_{ig}^c = [1 - \exp(-D_{ig} \cdot q_{ig})]/70 \quad (5)$$

式中, R_{ig}^c 为重金属 i 经食入途径所产生的平均个人致癌年风险(a^{-1}); D_{ig} 为重金属 i 经食入途径的单位体重日均暴露剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; q_{ig} 为重金属 i 经食入途径的致癌强度系数($\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$),其数值

来自 U. S. EPA 整合的风险数据系统 (IRIS)^[28,29]; 70 为人类平均寿命(a).

非致癌物所导致的健康风险模型:

$$R_{ig}^n = (D_{ig} \cdot 10^{-6}) / (P_{ig} \cdot 70) \tag{6}$$

式中, R_{ig}^n 为重金属 i 经食入途径所导致的非致癌年风险(a^{-1}); P_{ig} 为重金属 i 经食入途径的调整剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$].

重金属 i 经食入途径的单位体重日均暴露剂量 D_{ig} 通过如下公式计算:

$$D_{ig} = m_{ig} \cdot C_i / 70 \tag{7}$$

式中, m_{ig} 为成人平均每日摄入的水产品肌肉的量 (mg), 根据 2000 年中国总膳食研究^[24], 以 0.182 $kg \cdot 周^{-1}$ 计, 即 0.026 $kg \cdot d^{-1}$; C_i 为水产品肌肉重金属含量 ($mg \cdot kg^{-1}$); 70 为成年人平均体重 (kg).

调整剂量 P_{ig} 通过如下公式计算:

$$P_{ig} = R_f D_{ig} / A \tag{8}$$

式中, $R_f D_{ig}$ 为重金属 i 经食入途径的参考剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], 其数值来自 U. S. EPA 整合的风险数据系统 (IRIS)^[28,29]; A 为安全因子, 本研究中取 10.

对于重金属 i 所引起的整体健康风险, 假设其对人体健康危害的毒性作用呈加和关系而不是协同或拮抗关系, 则重金属 i 总的食入健康风险 ($R_{i总}$) 为:

$$R_{i总} = R_{ig}^n + R_{ig}^c \tag{9}$$

表 2 重金属含量范围、平均值、检出率与超标率¹⁾

Table 2 Heavy metal concentration range, mean value, detection rate and over-proof rate

重金属	范围/ $mg \cdot kg^{-1}$	$\bar{x} \pm SE / mg \cdot kg^{-1}$	检出率/%	超标率/%	标准/ $mg \cdot kg^{-1}$
Cd	nd ~ 0.165	0.071 $\pm$ 0.012	77.3	31.8	0.1 ^[18]
Cu	0.176 ~ 19.880	3.058 $\pm$ 1.050	100.0	0.0	50 ^[18]
Zn	1.506 ~ 8.459	5.273 $\pm$ 0.400	100.0	0.0	150 ^[19]
Pb	nd ~ 4.053	0.497 $\pm$ 0.187	63.6	31.8	0.5 ^[18]
Cr	nd ~ 2.721	1.433 $\pm$ 0.198	95.5	40.9	2 ^[18]

1) nd: 未检出; 重金属含量以湿重计; $\bar{x} \pm SE$: 平均值 $\pm$ 标准误差

2.1.2 不同水产品重金属含量

不同水产品重金属含量如表 3 所示, 不同种类水产品乃至同一种类水产品的不同品种之间重金属含量差异较大, 最高含量是最低含量的数十倍.

就同种水产品体内的重金属含量而言, 海水鱼类中, 鲛鳔重金属含量相对较低, 而海鳗则相对较高; 各淡水鱼之间以及头足类之间重金属含量相差不大; 各甲壳类和贝类水产品由于生境不同及对不同重金属的富集差异, 各重金属含量差异较大, 相对而言, 天津厚蟹、文蛤和泥螺重金属含量相对较高. 就不同种类水产品体内的重金属含量均值而言, Cd、Zn 含量

为比较不同种类水产品对人体健康风险的差异, 同样假设各重金属对人体健康危害的毒性作用呈加和关系而不是协同或拮抗关系, 则不同种类水产品总的食入健康风险 ($R'_{总}$) 为:

$$R'_{总} = \sum_{i=1}^n R_{i总} \tag{10}$$

式中, n 为检测的重金属数.

1.3 数据处理与统计分析

采用 Origin 7.5 软件对数据进行整理, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准误差 ($\bar{x} \pm SE$). 利用 SAS. JMP. v7.0 软件进行统计分析. 采用 Student's t -test 进行多重比较, 显著性水平 $\alpha = 0.05$.

2 结果与分析

2.1 重金属含量

2.1.1 重金属总体污染状况

水产品重金属含量范围、平均值、检出率与超标率如表 2 所示, Cd、Cu、Zn、Pb、Cr 这 5 种重金属均有检出, 且检出率均超过 50%. 5 种重金属在水产品肌肉中的平均含量表现为 $Zn > Cu > Cr > Pb > Cd$. 以文献[18,19]为参照, 盐城地区所研究的各类水产品中有 1/3 的样品 Cd、Pb、Cr 均有一定程度超标, 超标率分别为 31.8%、31.8%、40.9%, 表明该地区水产品已受到较重的重金属污染.

表现为淡水鱼类最高, 海水鱼类最低; Cu、Pb 含量均表现为贝类最高, 海水鱼类和头足类最低; Cr 则表现为贝类和头足类最高, 淡水鱼类最低.

2.2 污染程度评价

采用 P_i 对重金属污染程度进行评价, 并利用 MPI 对不同种类水产品之间重金属污染状况进行比较. 评价结果如表 4 所示, 各水产品 Cu、Zn 的 P_i 值均小于 0.2, 表明该地区水产品 Cu、Zn 含量尚处于正常的背景值范围内. 除淡水鱼类 Cr 及头足类 Pb 的 P_i 值小于 0.2, 为正常背景值范围外, 各水产品 Cd、Pb、Cr 的 P_i 值均大于 0.2, 其中海水鱼类 Cd

为轻污染水平,甲壳类、贝类和头足类为中污染水平,淡水鱼类 Cd 达到重污染水平;海水鱼类 Pb 为轻污染水平,甲壳类为中污染水平,淡水鱼类和贝类均达到重污染水平;海水鱼类和甲壳类 Cr 均为中污染水平,而贝类和头足类 Cr 均达到重污染水平.以上结果显示,Cd、Pb 和 Cr 在盐城海水和淡水水产品中的污染较为严重,均有部分样品达到重污染水平.

表 3 不同海水和淡水水产品体长、体重及重金属含量均值¹⁾

Table 3 Mean values of body length, body weight and heavy metal content of different seawater and freshwater aquatic products

种类	品种	体长/cm	体重/g	含量/mg·kg ⁻¹				
				Cd	Cu	Zn	Pb	Cr
海水鱼类	小黄鱼	12.2	37.8	nd	0.209	3.218	nd	0.280
	日本须鲷	21.5	66.6	0.073	0.208	2.158	1.022	0.192
	棘头梅童鱼	10.3	20.1	nd	3.780	5.557	nd	1.630
	刀鲚	10.8	18.8	nd	0.313	5.530	0.636	2.276
	黄鲚	11.5	8.9	nd	0.416	4.646	nd	2.170
	海鳗	33.5	40.1	0.165	2.759	6.995	0.217	2.721
	鮫鯨	25.5	411.6	nd	0.176	1.506	nd	nd
	银鲳鱼	11.5	34.4	0.025	0.485	2.869	nd	1.305
	带鱼	18.6	11.7	0.062	0.538	6.253	nd	1.812
淡水鱼类	鲫鱼	18.3	119.6	0.129	1.226	8.459	0.834	0.323
	鲢鱼	39.5	485.0	0.124	0.996	4.526	0.139	0.174
	鲤鱼	21.5	164.1	0.142	0.976	8.167	0.692	0.358
	鳊鱼	20.5	108.9	0.144	1.204	5.749	0.456	0.342
甲壳类	中国对虾	11.2	10.7	0.041	1.638	6.117	nd	2.065
	克氏螯虾	12.5	52.6	0.149	6.526	6.695	0.448	0.736
	天津厚蟹	2.4	9.2	0.096	5.162	6.251	0.856	2.148
贝类	瘤背石磺	4.8	11.2	0.039	14.250	2.417	0.406	2.327
	文蛤	4.2	12.4	0.096	0.235	5.102	4.053	2.280
	泥螺	2.2	1.7	0.135	19.880	7.185	1.072	1.754
	四角蛤蜊	3.0	7.8	0.019	0.804	5.416	nd	1.889
头足类	曼氏无针乌贼	14.9	124.8	0.041	3.706	5.168	0.020	2.271
	日本枪乌贼	13.2	42.6	0.086	1.786	6.022	0.091	2.476

1) 数据为 3 次测定平均值;贝类长度以壳长计;曼氏无针乌贼、日本枪乌贼、天津厚蟹等体长不包括足部;重金属含量以湿重计;nd:未检出

MPI 值反映了不同种类生物之间重金属污染程度的差异,计算结果表明,贝类重金属污染程度最高,海水鱼类污染程度最低,其顺序为贝类>甲壳类>淡水鱼类>头足类>海水鱼类.

表 4 水产品重金属单因子污染指数(P_i)与重金属污染指数(MPI)¹⁾

Table 4 Heavy metal single factor pollution index (P_i) and heavy metal pollution index (MPI) for aquatic products

种类	P_i					MPI
	Cd	Cu	Zn	Pb	Cr	
海水鱼类	0.361	0.020	0.029	0.417	0.688	0.535
淡水鱼类	1.348	0.022	0.045	1.061	0.150	0.692
甲壳类	0.953	0.089	0.043	0.869	0.825	1.141
贝类	0.723	0.176	0.034	2.766	1.031	1.556
头足类	0.635	0.055	0.037	0.111	1.187	0.663

1) P_i 采用不同种类水产品重金属平均值进行计算;Cd、Cu、Pb、Cr 采用文献[18]进行评价,Zn 采用文献[19]进行评价

2.3 食用安全性评价

根据所检测的水产品中重金属的含量以及我国居民每周水产品消费量,计算成人每周实际重金属摄入量,并与 PTWI 比较,评价其食用安全性.评价结果如表 5 所示,以各类水产品重金属平均含量计,5 种重金属摄入量均未超过 PTWI 值,表

明目前成人每周摄入该地水产品暂时是安全的.不过,进一步的分析表明,通过食入贝类和头足类所摄入的 Cr 已接近 PTWI 值,个别海水鱼类(海鳗)甚至已超过 PTWI 值,这表明尽管总体上摄入该地水产品是安全的,但 Cr 摄入的风险性较大,存在食用安全隐患.

表 5 重金属摄入安全性评价

Table 5 Safety evaluation on heavy metal intake

重金属	种类	PTWI ¹⁾ /mg·kg ⁻¹	PTWI(成人) ²⁾ /mg	AWI ³⁾ /mg	AWI 占 PTWI(成人)的百分数/%
Cd	海水鱼类	0.007	0.49	0.007(0.030)	1.34(6.12)
	淡水鱼类			0.024(0.026)	5.01(5.35)
	甲壳类			0.017(0.027)	3.54(5.53)
	贝类			0.013(0.025)	2.68(5.01)
	头足类			0.012(0.016)	2.36(3.19)
Cu	海水鱼类	3.5	245	0.180(0.688)	0.07(0.28)
	淡水鱼类			0.200(0.223)	0.08(0.09)
	甲壳类			0.808(1.188)	0.33(0.48)
	贝类			1.600(3.618)	0.65(1.48)
	头足类			0.500(0.674)	0.20(0.28)
Zn	海水鱼类	7.0	490	0.783(1.273)	0.16(0.26)
	淡水鱼类			1.224(1.539)	0.25(0.31)
	甲壳类			1.156(1.218)	0.24(0.25)
	贝类			0.915(1.308)	0.19(0.27)
	头足类			1.018(1.096)	0.21(0.22)
Pb	海水鱼类	0.025	1.750	0.038(0.186)	2.17(10.63)
	淡水鱼类			0.097(0.152)	5.51(8.67)
	甲壳类			0.079(0.156)	4.35(8.90)
	贝类			0.252(0.738)	14.38(42.15)
	头足类			0.010(0.017)	0.58(0.95)
Cr	海水鱼类	0.006 7	0.469	0.282(0.495)	60.08(105.59)
	淡水鱼类			0.054(0.065)	11.61(13.89)
	甲壳类			0.300(0.391)	64.02(83.36)
	贝类			0.375(0.501)	80.04(90.30)
	头足类			0.432(0.451)	92.11(96.08)

1) JECFA 制定的每周可耐受摄入量 (mg·kg⁻¹)^[10]; 2) 成人每周可耐受摄入量 (mg), 以成人体重 70 kg、水产品摄入量 0.182 kg·周⁻¹计; 3) 成人每周实际重金属摄入量 (mg), 以各类水生生物重金属平均含量计算, 括号内数据以各类水生生物中重金属最大含量计算

2.4 健康风险

盐城地区水产品通过食入途径所产生的潜在个人健康危害年风险如表 6 所示, 5 种重金属中, 以 Cr 的致癌风险最大, Cd 和 Pb 次之, Cu 和 Zn 无致癌风险; 非致癌风险中, 以 Cr 和 Pb 最大, Cd 次之, Cu 和 Zn 最低, 5 种重金属总的健康危害年风险表现为 Cr > Cd > Pb > Cu > Zn. 不同种类水产品之间进行比较, 通过食入途径所产生的个人健康危害年风险表现为头足类 > 贝类 > 甲壳类 > 海水鱼类 > 淡水鱼类.

ICRP 推荐的最大可接受水平为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ^[30,31], 5 种重金属在各水产品中无论致癌风险、非致癌风险还是总风险均未超过 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 表明盐城地区海水和淡水水产品经食入途径所导致的健康危害年风险均处于可接受范围之内. 尽管如此, 从表 6 中可以看出头足类 Cr 所导致的致癌风险已与 ICRP 推荐的最大可接受水平处于同一数量级 (10^{-5} a^{-1}), 贝类和头足类由 Cr 较高的致癌风险而导致的总风险 ($R_{\text{总}}$ 、 $R'_{\text{总}}$) 也与 ICRP 推荐的最大可

接受水平处于同一数量级 (10^{-5} a^{-1}), 说明食入贝类和头足类相对风险较高, 这与食用安全性 (PTWI) 结果基本一致.

3 讨论

目前针对不同地区海水和淡水水产品重金属含量已进行了大量研究^[11,32,33]. 研究显示, 不同地区、不同种类水产品其重金属含量可能相差数十倍^[2,6,10,34,35], Deb 等^[36]和 Asuquo 等^[37]发现不同水生生物重金属含量差别甚至高达 100 倍. 因此进行比较时要充分考虑地点、物种、生长阶段等各种因素. 与报道的数据^[2,6,10,34,35]相比, 盐城地区海水和淡水水产品 5 种重金属中, Cd、Cu、Zn、Pb 均在文献数据范围之内. 但是, Cr 含量明显高于其他地区, 超过文献值数倍. Cr 含量高可能是盐城地区水产品重金属分布的一个特征, 其原因目前尚不清楚, 须进一步调查研究.

盐城地区水产品重金属含量的另一个重要特征是变异性较大, 体现在不同重金属之间、不同种类

表 6 重金属通过食入途径所产生的个人健康危害年风险¹⁾/a⁻¹

Table 6 Personal health hazard risk caused by heavy metal intake/a⁻¹

种类	重金属	R_{ig}^c	R_{ig}^n	$R_{i总}$	$R'_{总}$
海水鱼类	Cd	7.28×10^{-8}	1.92×10^{-9}	7.47×10^{-8}	6.76×10^{-6}
	Cu	/	1.31×10^{-9}	1.31×10^{-9}	
	Zn	/	7.61×10^{-10}	7.61×10^{-10}	
	Pb	9.40×10^{-9}	7.89×10^{-9}	1.73×10^{-8}	
	Cr	6.64×10^{-6}	2.43×10^{-8}	6.67×10^{-6}	
淡水鱼类	Cd	2.72×10^{-7}	7.15×10^{-9}	2.79×10^{-7}	1.78×10^{-6}
	Cu	/	1.46×10^{-9}	1.46×10^{-9}	
	Zn	/	1.19×10^{-9}	1.19×10^{-9}	
	Pb	2.39×10^{-8}	2.01×10^{-8}	4.40×10^{-8}	
	Cr	1.44×10^{-6}	5.29×10^{-9}	1.45×10^{-6}	
甲壳类	Cd	1.92×10^{-7}	5.06×10^{-9}	1.97×10^{-7}	8.23×10^{-6}
	Cu	/	5.89×10^{-9}	5.89×10^{-9}	
	Zn	/	1.12×10^{-9}	1.12×10^{-9}	
	Pb	1.96×10^{-8}	1.65×10^{-8}	3.61×10^{-8}	
	Cr	7.96×10^{-6}	2.92×10^{-8}	7.99×10^{-6}	
贝类	Cd	1.46×10^{-7}	3.83×10^{-9}	1.50×10^{-7}	1.03×10^{-5}
	Cu	/	1.17×10^{-8}	1.17×10^{-8}	
	Zn	/	8.90×10^{-10}	8.90×10^{-10}	
	Pb	6.24×10^{-8}	5.24×10^{-8}	1.15×10^{-7}	
	Cr	9.96×10^{-6}	3.65×10^{-8}	9.99×10^{-6}	
头足类	Cd	1.28×10^{-7}	3.37×10^{-9}	1.31×10^{-7}	1.16×10^{-5}
	Cu	/	3.64×10^{-9}	3.64×10^{-9}	
	Zn	/	9.89×10^{-10}	9.89×10^{-10}	
	Pb	2.50×10^{-9}	2.10×10^{-9}	4.61×10^{-9}	
	Cr	1.15×10^{-5}	4.20×10^{-8}	1.15×10^{-5}	

1)/:无致癌风险; Cr 致癌风险均以 Cr⁶⁺ 计

生物之间,同种生物不同品种之间重金属含量差异较大,这与文献结果基本一致^[7,10,35]. Rainbow^[38]指出水生生物对重金属的积累取决于生物体对金属的吸收和排泄速率,相对速率变化决定了生物对特定金属的积累程度,水生生物对重金属的积累可以从调节型一直排列到强的净积累型,各类型之间都有过渡形式.此外,重金属在水生生物组织中的吸收和积累还取决于暴露时间、暴露浓度、重金属种类、生物有效性,同时还受水化学性质和生物生理代谢活性等因子的影响^[39].盐城地区水产品重金属含量的差异可能是由于不同水生生物的食性、生存环境和对特定重金属累积能力不同所导致^[16].

采用单因子污染指数法对水生生物重金属污染程度进行评价是目前国内相关研究常用的方法^[2,4,11,17].由于目前国内尚无明确的污染等级划分标准,因此本研究采用文献^[9,11,20]中推荐的划分标准进行评价.研究显示,盐城地区水产品 Cu、Zn 含量均处于背景范围之内,表明目前该地区尚未受到 Cu、Zn 污染.而 Cd、Pb、Cr P_i 值均大于

0.2,表明该地区已受到这 3 种重金属的污染.淡水鱼类 Cd 和 Pb 含量达到重污染水平,远高于海水鱼类,这可能与金属离子在淡水水体的渗透压和水体中 Ca²⁺、Mg²⁺ 的含量有关^[39].而 Cr 在海水生物中的含量远高于淡水生物,其原因尚不清楚,据估计可能与海水养殖及陆源污水排放有关. MPI 反映了不同种类水产品总体的污染状况^[8,21,22,33].本研究显示,盐城地区贝类重金属污染程度最高,而海水鱼类污染程度最低,其顺序为贝类>甲壳类>淡水鱼类>头足类>海水鱼类,这可能与不同种类生物的生活习性和所处环境有关.贝类和甲壳类重金属含量最高可能与其底栖性和滤食食性有关,它们通常生活在受污染的河口及沿岸,在滤食大量底质颗粒过程中吸附在颗粒上的重金属也被吸收进入体内,从而累积了更多的重金属^[11],而鱼类和头足类主要从重金属含量较低的水中累积重金属,因此重金属总体含量相对较低.

PTWI 结果显示总体上摄入盐城地区水产品是安全的,Cd、Pb、Cu、Zn 其 AWI 占 PTWI(成人)的

比例不足 10%, 食用风险很小. 然而通过食入贝类和头足类所摄入的 Cr 已接近 PTWI 值, 个别海水鱼类如海鳗甚至已超过 PTWI 值, 这表明 Cr 摄入的风险性较大, 存在食用安全隐患, 这与顾佳丽等^[10]对辽宁沿海海水生物食用安全性评价结果一致. 因此有必要降低贝类、头足类和海鳗在食品总摄入量中的比例.

健康风险评价结果与食用安全性评价结果基本一致. 5 种重金属中 Cr 致癌风险和总风险最高, 5 种水产品中, 头足类和贝类风险最高. 尽管 MPI 显示贝类、甲壳类重金属污染大于头足类, 但其健康风险却小于头足类, 这主要是因为头足类致癌物 Cr 含量更高所致. 5 种重金属在各水产品中无论致癌风险、非致癌风险还是总风险均未超过 ICRP 推荐的最大可接受水平为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 表明盐城地区海水和淡水水产品经食入途径所导致的健康危害年风险均处于可接受范围之内. 但头足类 Cr 所导致的致癌风险已与 ICRP 推荐的最大可接受水平处于同一数量级, 贝类 Cr 也已接近这一数量级, 两者的 Cr 总风险也处于该数量级, 说明食入贝类和头足类相对风险较高, 其 Cr 可能会影响人体健康.

需要指出的是, 在致癌风险评价中, Cr 均按致癌性最强的 Cr^{6+} 来进行的计算, 这可能高估了水产品中 Cr 的致癌风险和总风险, 因为在生物体内不可能全部以 Cr^{6+} 的形式存在. 此外, 水产品的肌肉在膳食烹饪过程中会损失部分重金属, 在被食用后, 肌肉中所有重金属元素也并不是都被人体所吸收, 并且被人体吸收的重金属沉积在人体组织中后, 还随时间被人体部分代谢排出体外, 风险模型中假设各重金属元素对人体健康危害的毒性作用呈加和关系而不是协同或拮抗, 这可能也高估了重金属的致癌、非致癌以及总风险^[3]. 但无论怎样, 盐城地区海水和淡水水产品重金属尤其是 Cr 的安全性和风险值得关注.

另外, 本研究中所涉及的评价指标基本基于总量或外剂量, 而非直接导致生物或人体毒副作用的内剂量. 重金属暴露风险与其赋存形态、摄入量以及体内代谢动力学、动态学及环境影响因素等密切相关^[37]. 因此本研 究所述及的暴露风险只是一种潜在的可能性, 还需要进一步结合代谢动力学、动态学及流行病学调查数据加以支持和验证.

4 结论

(1) 盐城地区海水与淡水水产品均受到一定程

度的重金属污染, 其中 Cd、Pb、Cr 超标, 超标率分别为 31.8%、31.8%、40.9%.

(2) Cd、Pb、Cr 含量均超过轻污染水平, 部分样品达到重污染水平, Cu、Zn 含量尚处于正常的背景值范围内, 重金属污染程度为贝类 > 甲壳类 > 淡水鱼类 > 头足类 > 海水鱼类.

(3) 总体而言盐城地区海水与淡水水产品重金属食用安全性和健康风险均在可接受范围内, 但贝类和头足类 Cr 成人每周实际重金属摄入量占 PTWI 的比例以及健康危害年风险均已接近限量, 值得高度重视.

致谢: 感谢盐城工学院化学与生物工程学院黄金田教授在物种鉴定方面给予的帮助.

参考文献:

- [1] Bocher P, Caurant F, Miramand P, et al. Influence of the diet on the bioaccumulation of heavy metals in zooplankton-eating petrels at Kerguelen archipelago, Southern Indian Ocean [J]. Polar Biology, 2003, 26(3): 759-767.
- [2] 孙维萍, 刘小涯, 潘建明, 等. 浙江沿海经济鱼类体内重金属的残留水平[J]. 浙江大学学报(理学版), 2012, 39(3): 338-344.
- [3] 夏泽惠, 王兴明, 楼巧婷, 等. 合肥市场 6 种淡水鱼体内 Cu、Pb 和 Cd 的分布及食用风险[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3): 311-315.
- [4] 蔡深文, 倪朝辉, 李云峰, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区鱼体肌肉重金属残留调查与分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(6): 1351-1357.
- [5] 李振龙. 全国渔业发展第十一个五年规划(2006 年—2010 年)[J]. 中国水产, 2006, (12): 1-2.
- [6] 谢文平, 陈昆慈, 朱新平, 等. 珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1917-1923.
- [7] 肖明松, 王松, 鲍方印, 等. 淮河蚌埠段采样点鱼虾贝类重金属的富集[J]. 环境科学研究, 2011, 24(8): 942-948.
- [8] 黄长江, 赵珍. 湛江港海域海产品中重金属残留及评价[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2007, 22(1): 30-36.
- [9] 刘平, 周益奇, 臧利杰. 北京农贸市场 4 种鱼类体内重金属污染调查[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2062-2068.
- [10] 顾佳丽, 赵刚. 辽宁沿海城市海鱼和贝类中重金属含量的测定及评价[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 63-67.
- [11] 秦春艳, 方展强, 唐以杰, 等. 珠江口伶仃洋习见水生动物体内重金属含量测定与评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2010, 1(3): 104-109, 114.
- [12] 李磊, 王云龙, 蒋玫, 等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2607-2613.
- [13] Nicholson S, Szefer P. Accumulation of metals in the soft tissues, byssus and shell of the mytilid mussel *Perna viridis* (Bivalvia: Mytilidae) from polluted and uncontaminated locations in Hong Kong coastal waters [J]. Marine Pollution

- Bulletin, 2003, **46**(8): 1040-1043.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 (GB/T 5009-2010) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第6部分: 生物体分析 (GB 17378.6-2007) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 祝云龙, 姜加虎, 黄群, 等. 大通湖及东洞庭湖区生物体重金属的水平及其生态评价 [J]. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 690-697.
- [17] 祝惠, 阎百兴, 张凤英. 松花江鱼体中重金属的富集及污染评价 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(5): 492-496.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 农产品安全质量无公害水产品安全要求 (GB 18406.4-2001) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [19] Anon G. Report on revised standard for metals in food. Appendix I-V [R]. Canberra: Commonwealth Government Printers, 1979. 60-70.
- [20] 魏泰莉, 杨婉玲, 赖子尼, 等. 珠江口水域鱼虾类重金属残留的调查 [J]. 中国水产科学, 2002, **9**(2): 172-176.
- [21] Usero J, Gonzalez-Regalado E, Gracia I. Trace metals in the bivalve molluscs *Ruditapes decussatus* and *Ruditapes philippinarum* from the Atlantic coast of southern Spain [J]. Environment International, 1997, **23**(3): 291-298.
- [22] Yap C K, Ismail A, Tan S G. Background concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in the green-lipped mussel *Perna viridis* (Linnaeus) from Peninsular Malaysia [J]. Baseline/Marine Pollution Bulletin, 2003, **46**(8): 1043-1048.
- [23] 叶海媚, 吴永宁. 鱼及加工产品中重金属指标的比较 [J]. 中国食品卫生杂志, 2009, **21**(3): 273-276.
- [24] 高俊全, 李筱薇, 赵京玲. 2000 年中国总膳食研究——膳食铅、镉摄入量 [J]. 卫生研究, 2006, **35**(6): 750-754.
- [25] U. S. EPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food: a user's guide [R]. U. S. Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs, 2000.
- [26] Wang X L, Sato T, Xing B S, *et al.* Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish [J]. Science of the Total Environment, 2005, **350**(1-3): 28-37.
- [27] Qiu Y W, Lin D, Liu J Q, *et al.* Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, **74**(3): 284-293.
- [28] 马挺军, 林炳荣, 贾昌喜. 再生水养殖鱼体内重金属残留及食用风险分析 [J]. 中国农学通报, 2010, **26**(5): 332-336.
- [29] 侯千. 开封市饮用水源水及食鱼健康风险评价 [D]. 开封: 河南大学, 2011.
- [30] 于沛芬. 松花江水系鱼体中痕量重金属锌、铜、铅、镉的监测 [J]. 水产学杂志, 1994, **7**(2): 96-97.
- [31] 乔胜英, 蒋敬业, 向武, 等. 武汉市湖泊中重金属污染状况 [J]. 水资源保护, 2007, **23**(1): 45-48.
- [32] 郭建东, 祝茜, 于静涛, 等. 威海海域文昌鱼的重金属含量 [J]. 海洋环境科学, 2007, **26**(2): 121-125.
- [33] 李丽娜, 陈振楼, 许世远, 等. 铜锌铅铬镍重金属在长江口滨岸带软体动物体内的富集 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2005, **1**(3): 65-70.
- [34] 聂湘平, 蓝崇钰, 魏泰莉. 珠江入海河口经济鱼类重金属含量分析 [J]. 上海环境科学, 2000, **19**(10): 485-488.
- [35] 杨丽华, 方展强, 郑文彪, 等. 广州市场食用鱼和贝类重金属含量及评价 [J]. 环境科学与技术, 2002, **25**(6): 15-16, 34.
- [36] Deb S C, Santra S C. Bioaccumulation of metals in fishes: An in vivo experimental study of a sewage fed ecosystem [J]. The Environmentalist, 1997, **17**(1): 27-32.
- [37] Asuquo F E, Ewa-Obobo I, Asuquo E F, *et al.* Fish species used as biomarker for heavy metal and hydrocarbon contamination for cross river, Nigeria [J]. The Environmentalist, 2004, **24**(1): 29-37.
- [38] Rainbow P S. The significance of trace metal concentrations in marine invertebrates [A]. In: Dallinger R, Rainbow P S (Eds.). Ecotoxicology of Metals in Invertebrates [M]. Boca Raton: Lewis Publisher, 1993. 4-23.
- [39] 吴益春, 赵元风, 吕景才, 等. 水生生物对重金属吸收和积累研究进展 [J]. 生物技术通报, 2006, (S1): 133-137.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行