

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 f2 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)	

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^{1,2}, 王雨春^{1,2}, 周怀东^{1,2*}, 高博^{1,2}, 赵高峰^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院水环境所, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 三峡库区蓄水后重金属在库区沉积物中累积, 为了解由此带来的鱼类重金属富集放大风险, 于2012年3月以库区支流大宁河为例, 采集16种代表性鱼类, 利用稳定同位素技术对鱼类间营养关系和Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As和Hg等重金属元素在食物链中的生物放大情况进行了研究。结果表明, 大部分重金属在鱼体中处于较低水平, 但在不同种类鱼体中含量差异显著。鱼体样品 $\delta^{13}\text{C}$ 与鱼类生活水层关系密切, 分布范围为 $-22.80\text{‰} \sim -28.97\text{‰}$, 水体上层鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低, 而水体底层鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高; 而 $\delta^{15}\text{N}$ 受鱼类食性影响明显, 范围为 $6.41\text{‰} \sim 13.88\text{‰}$ 。在食物链的传递过程中, 鱼体Hg浓度随营养等级的升高而显著增大, 但放大效率较低。除Hg外的金属元素与 $\delta^{15}\text{N}$ 的关系均不显著, 未出现明显生物放大。但小个体鱼类体内金属含量较高, 存在潜在污染风险。

关键词: 三峡; 大宁河; 重金属; 生物放大; 稳定同位素

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3847-07

Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment

YU Yang^{1,2}, WANG Yu-chun^{1,2}, ZHOU Huai-dong^{1,2}, GAO Bo^{1,2}, ZHAO Gao-feng^{1,2}

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Institute of Water Resources and China Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Heavy metals have been accumulated in sediment after impoundment in the Three Gorges Reservoir (TGR). In order to evaluate the risk of biomagnification of heavy metals, we investigated the trophic relationships and heavy metal concentrations in fish from a tributary within TGR. Sixteen fish species were collected from Daning River, and concentrations of eight heavy metal elements (Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, As, and Hg) were determined, as well as the ratios of stable carbon and nitrogen isotopes. Results showed that most heavy metal concentrations were low in TGR, but changed significantly among different species. The $\delta^{13}\text{C}$ values varied significantly among different groups ($-22.80\text{‰} \sim -28.97\text{‰}$); while the $\delta^{15}\text{N}$ values ($6.41\text{‰} \sim 13.88\text{‰}$) varied based on their feeding types. A significantly trophic level-dependent increase was found in concentrations of Hg, indicating an overall biomagnification of Hg; but the increase of Hg concentration per trophic level was lower than that in previous studies. No tendency towards trophic-level enrichment was observed for other elements studied. However, a much higher heavy metal concentration was observed in small-sized fish samples, indicating a potential risk in environment.

Key words: the Three Gorges Reservoir; Daning River; heavy metal; biomagnification; stable isotope

三峡水库作为我国重要的淡水资源库, 其生态发育演化情况不仅维系着库区水生态安全, 也对长江中下游的生态环境健康有显著影响。蓄水后, 三峡库区内水体的水文水动力条件发生巨大变化: 干流水体流速变慢, 水力滞留时间变长, 水体自净能力减弱。重金属等易累积, 难降解的污染物可能将在水库中富集, 并通过水生食物链在传递的过程中被放大, 对水生生态系统和水生态安全造成威胁^[1-3]。与干流相比, 支流的湖泊化特征更为明显, 且水深较干流更浅, 沉积在水库底部的重金属更有可能进入水生食物链^[4]。因此, 了解重金属在库区水生食物链, 尤其是支流食物链中的迁移传递规律具有重要意义。

目前研究普遍认为食物相暴露是重金属在食物链中传递的主要形式^[5,6]。通过生物间的迁移传递, 同一种金属在不同生物中的浓度往往存在巨大差别^[7]。而重金属是否随生物体营养等级的升高而被放大也因重金属种类不同而有所差异^[8,9]。曾经有研究认为只有Hg(MeHg)和Cs存在生物放大, 其他重金属并不存在这种现象^[10], 但最近研究结果表明这一结论过于简单片面, 影响生物体重金属浓度的

收稿日期: 2013-01-01; 修订日期: 2013-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179205); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-001)

作者简介: 余杨(1984~), 男, 博士, 主要研究方向为水环境学, E-mail: yuyangle@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hdzhou@iwhr.com

相关因素如:摄取食物量,重金属同化率和排出速率在各生态系统中都因环境条件的不同而变化,使得重金属的迁移传递在不同的生态系统和食物链中差别较大^[11]. 已有研究在淡水湖泊中发现了 Zn 和 Cd 的放大现象^[12],但对于水库这一特殊的生态系统,相关研究还较缺乏.

稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)技术已广泛应用于研究食物网结构,不仅能定量表征食物链上生物体的营养等级、明确食物链的摄食来源,也能部分解决生物体食杂性等问题^[13,14]. 本研究通过测定三峡库区的典型支流大宁河中各种鱼类的重金属浓度和稳定同位素数据,分析重金属在食物链中迁移传递规律,并探讨不同金属在生物体中随营养等级升高的浓度变化情况,以期对三峡水环境监测和污染风险管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 区域概况与样品采集

大宁河位于三峡库区腹心地带,为三峡库区一级支流,流域面积4 045 km²,于三峡大坝上游 125 km 处的巫峡西口汇入长江. 三峡大坝蓄水前,大宁河上下游水位落差较大,水流速度快. 截流后,大宁河河口以上约 34 km 范围内河段明显受到干流回水顶托的影响,河水流速变缓,河面增宽. 蓄水至 175

m 后,大宁河回水区达到 55 km,水深普遍加大 25 ~ 60 m.

本研究于 2012 年 3 月进行采样,所有鱼类样品均采集自回水腹心地段的大昌湖(图 1). 所采集样品均从当地渔船上购买. 共采集 16 种常见经济鱼类,共计 86 尾(表 1). 样品采集后,现场测量记录鱼体全长和体重并拍照;后将鱼除鳞、洗净,取鱼体背脊肌肉(50 ~ 100 g)装入聚乙烯封口袋中,于冷冻状态下带回实验室,置于冰箱中冷冻保存(−20℃). 所有取样工具和储存容器事先按要求清洗净化,以满足微量元素分析要求.

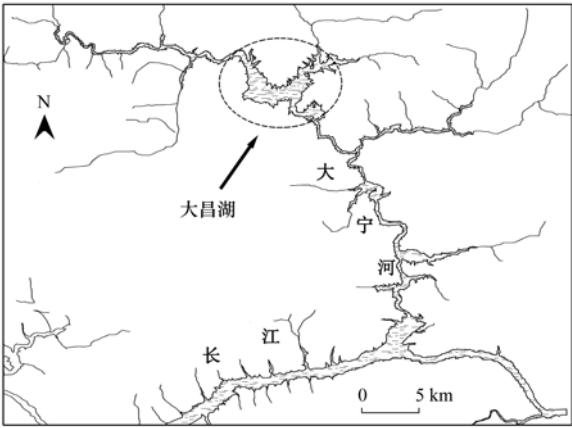


图 1 采样区域位置示意

Fig. 1 Location of sampling area

表 1 采集鱼类样品的各项参数

Table 1 Characteristics of 16 fish species sampled from Daning River

种类	拉丁名	n	食性	全长/mm	体重/g
鲢	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	4	滤食性	479(431 ~ 520)	1 355(1 103 ~ 1 564)
鳙	<i>Megalobrama amblycephala</i>	3	滤食性	529(490 ~ 592)	1 565(1 452 ~ 1 850)
草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	3	草食性	266(158 ~ 323)	298(55 ~ 392)
团头鲂	<i>Megalobrama amblycephala</i>	3	草食性	301(244 ~ 362)	465(251 ~ 706)
光泽黄颡鱼	<i>Pelteobagrus nitidus</i>	4	杂食性	156(134 ~ 183)	28(10 ~ 75)
瓦氏黄颡鱼	<i>Pelteobagrus vachellii</i>	4	杂食性	127(112 ~ 136)	11(8 ~ 15)
鲤	<i>Cyprinus carpio</i>	5	杂食性	375(252 ~ 502)	586(146 ~ 1 314)
鲫	<i>Carassius auratus</i>	4	杂食性	252(187 ~ 311)	465(330 ~ 618)
餐条	<i>Hemiculter leucisculus</i>	11	杂食性	86(78 ~ 96)	10(8 ~ 12)
蛇鮈	<i>Saurogobio dabryi</i>	12	杂食性	95(80 ~ 115)	18(15 ~ 22)
太湖新银鱼	<i>Neosalanx taihuensis</i>	18	杂食性	108(102 ~ 116)	8(6 ~ 10)
翘嘴鲌	<i>Culter alburnus</i>	3	肉食性	535(410 ~ 671)	588(436 ~ 892)
达氏鲌	<i>Culter dabryi</i>	4	肉食性	283(227 ~ 315)	175(125 ~ 266)
鲇	<i>Silurus asotus</i>	3	肉食性	493(215 ~ 749)	1 250(67 ~ 2 406)
鳊	<i>Siniperca chuatsi</i>	4	肉食性	219(173 ~ 290)	164(98 ~ 383)
长吻鮠	<i>Leiocassis longirostris</i>	1	肉食性	304	505

1.2 重金属含量测定

分析前将样品在室温下解冻,剥离鱼肉中的鱼刺,后用去离子水冲洗两遍后擦干. 再将肌肉用不锈钢剪刀剪碎,匀浆后冷冻干燥. 干燥前后样品均

准确称重(精确到0.000 1 g),计算出样品含水率. 冻干后的样品在用研钵研磨成粉末后分成两份,分别用来测定重金属含量和稳定同位素. 对于个体较小的鱼类,研磨时将 3 ~ 4 条鱼体汇集成一个样品用

于测定。

总汞含量的测定按 Chasar 等^[15]的方法,根据原子吸收光谱法用直接测汞仪 DMA-80(Milestone, Italy)进行分析。为满足实验质量要求,测定时所有样品均有平行样测定。同时每测定 10 个样品,设一空白样以保证实验的精密性。

其余重金属含量的测定根据 Mendil 等^[16]的方法,称取0.500 0 g冻干后样品于 PFA 消解罐中,加入 6 mL HNO₃ 和 2 mL H₂O₂,浸泡 1h 后,拧紧罐盖,置于恒温电热板上 120℃ 进行消解 24 h,消解结束后打开罐盖将消化液中的酸蒸干,冷却后加入 0.5 mL HNO₃ 转移至 50 mL 容量瓶中,用适量超纯水洗涤消解罐内壁多次,合并洗液后定容混匀待测。利用 ICP-MS(Perkin-Elmer)测定样品中的 Cr、Cd、As、Pb、Ni、Cu 和 Zn 浓度。实验所用 HNO₃ 和 H₂O₂ 均为优级纯,实验过程中测定黄鱼成份分析标准物质(GBW08573)中 Cr、Cd、As、Pb、Ni、Cu、Zn 和 Hg 的含量,回收率为 92%~99%,满足质量要求。测定时所有样品平行样测定,以保证实验的精密性。各种目标重金属的相对标准偏差均小于 5%。

1.3 稳定同位素测定

稳定同位素的测定使用 Carlo Erba EA-1110 元素分析仪和 Delta Plus Finigan 同位素比率质谱仪(Finnigan, USA)。δ¹³C 和 δ¹⁵N 的标准物质分别为美

洲拟箭石(PDB)和大气中的 N²。结果表示为:

$$\delta X = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000$$

式中, X 为 ¹³C 或 ¹⁵N, R 代表 ¹³C/¹²C 或 ¹⁵N/¹⁴N。样品分析精度 δ¹³C < 0.20‰, δ¹⁵N < 0.30‰。

1.4 数据处理

数据采用 SPSS 15.0 软件进行统计和处理,差异显著性采用 ANOVA 分析方法, P < 0.05 时认为差异有显著性。

2 结果与分析

2.1 不同种类鱼体重重金属含量

本研究中所有种类鱼体中均可检测出 8 种重金属,结果见表 2。在所检测的 16 种鱼体肌肉中,Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 的平均含量范围分别为 0.17~0.30、0.016~0.095、0.14~0.40、3.56~12.17、0.005~0.110、0.002~0.009、0.011~0.098 和 0.018~0.115 mg·kg⁻¹。其中,Cr 和 Cu 在所有鱼类中平均含量的变化范围较小,最高值仅分别为最低值的 1.8 和 2.9 倍。而 Pb 在所有鱼类中平均含量的变化范围最大,最高值为最低值的 22 倍。在 16 种鱼类中,Cr 和 Ni 平均含量最高的均为瓦氏黄颡鱼,Cu 和 Pb 平均含量最高的分别为鲫和太湖新银鱼,Zn 和 Cd 平均含量最高的鱼种均为餐条,As 和 Hg 平均含量的最高值均出现在长吻鮠中。

表 2 采集的 16 种鱼类样品肌肉中重金属含量¹⁾(湿重)/mg·kg⁻¹

Table 2 Concentrations of heavy metals in 16 fish species (wet weight)/mg·kg⁻¹

种类	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
鲢	0.17 ± 0.05	0.060 ± 0.014	0.20 ± 0.11	4.75 ± 1.12	0.023 ± 0.007	0.002 ± 0.001	0.041 ± 0.012	0.029 ± 0.011
鳙	0.18 ± 0.03	0.050 ± 0.022	0.15 ± 0.05	3.56 ± 0.98	0.016 ± 0.003	0.003 ± 0.001	0.020 ± 0.008	0.036 ± 0.004
草鱼	0.20 ± 0.02	0.052 ± 0.015	0.18 ± 0.03	3.88 ± 0.87	0.013 ± 0.004	0.002 ± 0.002	0.011 ± 0.005	0.018 ± 0.006
团头鲂	0.19 ± 0.08	0.048 ± 0.012	0.26 ± 0.11	5.28 ± 1.65	0.036 ± 0.012	0.005 ± 0.003	0.032 ± 0.012	0.064 ± 0.022
光泽黄颡鱼	0.25 ± 0.03	0.035 ± 0.018	0.20 ± 0.03	4.11 ± 1.39	0.005 ± 0.003	0.002 ± 0.001	0.033 ± 0.020	0.066 ± 0.023
瓦氏黄颡鱼	0.30 ± 0.08	0.095 ± 0.032	0.27 ± 0.12	6.55 ± 2.23	0.035 ± 0.012	0.007 ± 0.003	0.046 ± 0.013	0.109 ± 0.019
鲤	0.21 ± 0.10	0.034 ± 0.021	0.23 ± 0.09	6.15 ± 1.09	0.024 ± 0.008	0.004 ± 0.002	0.050 ± 0.034	0.078 ± 0.032
鲫	0.20 ± 0.11	0.062 ± 0.033	0.40 ± 0.12	9.75 ± 3.34	0.016 ± 0.010	0.004 ± 0.001	0.025 ± 0.018	0.059 ± 0.021
餐条	0.24 ± 0.03	0.078 ± 0.019	0.24 ± 0.06	12.17 ± 3.82	0.022 ± 0.013	0.009 ± 0.003	0.037 ± 0.016	0.059 ± 0.017
蛇鮈	0.26 ± 0.04	0.052 ± 0.012	0.18 ± 0.07	6.78 ± 2.03	0.014 ± 0.005	0.004 ± 0.002	0.039 ± 0.010	0.061 ± 0.015
太湖新银鱼	0.26 ± 0.02	0.082 ± 0.022	0.16 ± 0.04	6.61 ± 2.33	0.110 ± 0.022	0.004 ± 0.002	0.048 ± 0.027	0.067 ± 0.021
翘嘴鲌	0.18 ± 0.03	0.054 ± 0.027	0.22 ± 0.05	5.75 ± 1.46	0.016 ± 0.012	0.002 ± 0.002	0.068 ± 0.022	0.093 ± 0.023
达氏鲌	0.22 ± 0.04	0.041 ± 0.013	0.24 ± 0.06	4.25 ± 2.21	0.037 ± 0.015	0.007 ± 0.002	0.083 ± 0.039	0.088 ± 0.038
鲇	0.18 ± 0.07	0.016 ± 0.006	0.14 ± 0.02	4.45 ± 5.30	0.015 ± 0.006	0.002 ± 0.001	0.013 ± 0.004	0.099 ± 0.039
鳊	0.19 ± 0.09	0.050 ± 0.020	0.27 ± 0.03	4.00 ± 1.87	0.013 ± 0.005	0.002 ± 0.002	0.087 ± 0.023	0.112 ± 0.028
长吻鮠	0.27	0.054	0.15	4.94	0.026	0.002	0.098	0.115

1) 黑体数字为重金属含量均值最高的鱼类品种体内含量

为进一步了解重金属在不同生活习性鱼类体中的分布特征,本研究比较了不同食性鱼类的重金属水

平。部分重金属元素在不同食性的鱼体内水平存在显著差别。其中,Cr、Zn 和 Cd 在杂食性鱼类中的含

量显著高于其他食性的鱼类($P < 0.05$), Hg 和 As 在肉食性鱼类中含量最高, 其次是杂食性与滤食性鱼类, 在草食性鱼类中含量最低. Ni 和 Cu 在各种食性鱼类中无显著差别. Pb 只在太湖新银鱼中的含量显著高于其它鱼类($P < 0.05$), 除太湖新银鱼外的杂食性鱼类 Pb 含量也与其它鱼类无显著差别.

鲤鱼作为一种广泛分布的杂食性鱼类, 食物来源多样且活动范围较小. 本研究以鲤鱼为代表种, 将大宁河鱼类重金属含量与其他水域进行比较, 结果见表 3. 可以看出, 三峡水库蓄水后的大宁河鱼体

重金属含量与文献报道的其他水域中水平相当. 其中, Hg、Cr、As 和 Ni 的含量高于其他文献报道值, 而 Pb、Cd 和 Cu 的含量低于大部分水域中的鱼体含量. Zn 的含量与其他水域中水平接近, 但明显低于长江中上游中的鱼体含量. 根据 GB 2762-2005 和 NY 5073-2006 中水产品重金属的限量, 鱼体内 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 的含量分别不得高于 50、50、0.5、0.1、2.0、0.1 和 0.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 本研究所采集鱼类样品重金属含量均在限定范围内, 未发生重金属污染.

表 3 本研究中鲤鱼重金属污染含量与文献报道值的比较¹⁾ (湿重)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Comparisons of heavy metals in carp from selected studies (wet weight)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

地区	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg	文献
珠江三角洲	nd	nd	4.58	6.27	0.08	0.014	0.19	0.003	[17]
太湖	nd	—	nd	5.00	0.035	0.004	—	—	[18]
汉江	—	—	0.30	6.14	0.013	0.002	0.037	0.008	[1]
乌江	—	—	0.30	5.54	0.010	0.005	0.044	0.019	[1]
长江上游	—	—	0.39	29.83	0.12	0.015	0.031	0.015	[19]
长江中下游	0.18	—	1.04	7.39	0.51	0.012	0.022	0.020	[20]
三峡大宁河	0.21	0.034	0.23	6.15	0.024	0.004	0.050	0.078	本研究

1) 太湖、汉江和乌江中数据是由于干重中含量转化而来, 假设鱼体肌肉含水率 80%; “—”表示未见相关数据; “nd”表示未检出

2.2 鱼类食物链特征

所采集的 16 种鱼类样品肌肉组织的碳、氮稳定同位素比值列在表 4 中. 整个大宁河回水区的鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 的范围分别为 $-22.80\text{‰} \sim -28.97\text{‰}$. 其中, 鳊的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低 (-28.75‰), 其次是鲢、光泽黄颡鱼和瓦氏黄颡鱼. 而鲫鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高 (-23.16‰), 其次是鲤、蛇鮈等鱼类. 总体来说, 主要以浮游生物为食的滤食性鱼类和以水生植物为食的草食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 较低, 杂食性鱼类, 尤其是刮食和以碎屑为食的杂食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 最高. 肉食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值处于滤食性鱼类和杂食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间. 值得注意的是, 光泽黄颡鱼和瓦氏黄颡鱼虽然属于杂食性鱼类, 但其 $\delta^{13}\text{C}$ 却显著低于其他杂食性鱼类, 与滤食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 相当.

所有鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围为 $6.41\text{‰} \sim 13.88\text{‰}$, 在所有鱼类中, 草鱼的平均 $\delta^{15}\text{N}$ 最低 (6.56‰), 其次是鲢、团头鲂和鳊. 长吻鮠的 $\delta^{15}\text{N}$ 最高 (13.88‰), 其次是太湖新银鱼、鳊和鲢. 所有鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 与其食性紧密相关, 各种食性鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值从高到低依次为: 肉食性 > 杂食性 > 滤食性 > 草食性. 根据报道相邻营养级间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异约为 3.4‰ ^[21], 本研究所涉及的 16 种鱼类在营养等级上的跨度约为 2.

2.3 重金属的生物放大

生物放大主要指金属含量随食物链水平的增加

表 4 采集的 16 种鱼类样品肌肉中的碳、氮稳定同位素比值

Table 4 Stable carbon and nitrogen isotopic compositions in 16 fish species collected

种类	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
鲢	-27.72 ± 0.51	8.87 ± 0.67
鳊	-28.75 ± 0.25	9.76 ± 0.43
草鱼	-26.27 ± 0.33	6.56 ± 0.15
团头鲂	26.72 ± 0.85	9.59 ± 0.46
光泽黄颡鱼	-27.57 ± 0.34	10.12 ± 0.03
瓦氏黄颡鱼	-28.12 ± 0.43	12.61 ± 0.39
鲤	-24.67 ± 0.61	10.82 ± 0.57
鲫	-23.16 ± 0.41	10.17 ± 0.26
餐条	-25.26 ± 0.29	10.34 ± 0.26
蛇鮈	-24.10 ± 0.32	10.62 ± 0.23
太湖新银鱼	-25.04 ± 0.26	13.22 ± 0.20
翘嘴鲌	-26.10 ± 0.24	12.25 ± 0.34
达氏鲌	-25.67 ± 0.31	12.34 ± 0.46
鲢	-25.83 ± 0.30	12.74 ± 0.09
鳊	-25.13 ± 0.26	12.77 ± 0.33
长吻鮠	-25.92	13.88

而升高, 而鱼类在食物链中相对水平的高低可用 $\delta^{15}\text{N}$ 表示. 本研究所采集的 16 种鱼类体内的重金属含量与氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 的回归分析列在表 5 中, 根据回归拟合线的斜率是否大于零可以判断金属含量在食物链上的变化情况. 结果显示鱼体中的 Cr、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 含量随营养等级的升高而增加, 其中只有 Hg 与 $\delta^{15}\text{N}$ 呈显著正相关 ($P < 0.05$).

Ni 和 Cu 则表现出随营养等级的升高而降低的趋势,但其含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 的相关性均不显著.

表 5 鱼体重金属含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 之间的回归分析

Table 5 Regression analysis for the heavy metal concentrations and $\delta^{15}\text{N}$ values in fish samples

项目	斜率	截距	<i>r</i>	<i>P</i>
$\log_{10}$ Cr	0.014	-0.821	0.345	0.191
$\log_{10}$ Ni	-0.003	-1.263	-0.035	0.899
$\log_{10}$ Cu	-0.006	-0.606	-0.104	0.703
$\log_{10}$ Zn	0.006	0.671	0.080	0.769
$\log_{10}$ Pb	0.057	-2.310	0.375	0.153
$\log_{10}$ Cd	0.009	-2.579	0.075	0.782
$\log_{10}$ As	0.092	-2.434	0.643	0.007
$\log_{10}$ Hg	0.105	-2.351	0.902	<0.001

3 讨论

3.1 重金属含量分布

三峡水库蓄水后,支流水体流速减慢,沉积作用加强,水体中的重金属被悬浮物吸附后进入沉积物中,导致沉积物中重金属含量上升,并呈现出从上游至下游逐渐升高的趋势^[22]. 安立会等^[23]研究显示,重金属在大宁河中的分布也符合这一规律,回水区中的沉积物重金属含量低于河口中的含量,但高于上游沉积物中的含量. 同时,大昌湖沉积物中不同金属含量差异较大,Zn 的含量最高,其次为 Cu 和 Cr,Cd 的含量最低^[23],这与所采集鱼类样品中含量特征基本一致,印证了环境介质中重金属水平对鱼体水平的显著影响.

但各种重金属在不同种类鱼体中的分布规律存在很大差异. 其中,Cr、Cu 在不同鱼体中的含量差别较小,这可能是鱼体主动调控的结果. Cu、Zn 和 Cr 是机体的必需金属元素,参与机体的胰岛素和脂类代谢^[24]. 有研究者认为生物体内存在着对必需金属元素的主动调控机制,使必需金属元素在生物体内保持在某个较稳定的浓度范围内^[25]. 而 Pb、As 等毒性较强的重金属受到鱼种摄食行为以及代谢活性的影响,在不同种类鱼体中含量差异较大^[26]. 杂食性鱼类,如鲤、鲫和餐条等,主要摄食螺、虾、昆虫幼虫等底栖生物或有机碎屑,这类物质往往具有较高的重金属含量,从而使得杂食性鱼类的部分重金属含量偏高^[8]. 对于 Hg 等有生物放大潜力的重金属,肉食性鱼类因为位于食物链顶端而具有最高的含量.

3.2 食物链特征

许多研究表明鱼类在水生生态系统中普遍存在食杂性,即便在营养关系相对稳定的淡水湖泊中,也

几乎没有鱼类的饵料固定为某一种食物^[27]. 传统方法往往通过分析鱼类中未消化完全的食物来分析鱼类的食物组成,但该方法存在一定的偶然性且费时费力. 利用稳定同位素技术可以有效地解决鱼类食杂性的问题,水体中外源性有机碳(例如陆源有机碎屑)往往比内源性有机碳(例如浮游植物)有更高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[28],通过测定鱼体 $\delta^{13}\text{C}$ 可以分析出鱼类的食物来源和所占比例. Xu 等^[29]研究表明,淡水湖泊中浮游生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,而沉积物中碎屑和底栖动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高. 参照这一规律,本研究中鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围与食性特征基本相符:滤食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 集中在 $-28\text{‰} \sim -27\text{‰}$,与 Xu 等^[29]在东湖的研究结果一致,可以认为其主要食物来源为浮游生物. 而底栖杂食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 较高,接近底栖动物和沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这表明底层鱼类的有机碳源主要为沉积物中的各种生物和碎屑. 值得注意的是瓦氏黄颡鱼和光泽黄颡鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显低于其他底层杂食鱼类,这可能与它们夜间到中上层觅食的生活习性有关.

3.3 重金属的食物链放大

早期的金属食物链传递研究通常认为,只有 Hg 和 Cs 能被生物放大,其它金属并不存在这一现象^[10]. 与之一致的是,本研究所涉及的重金属中只有 Hg 的浓度与 $\delta^{15}\text{N}$ 呈显著的正相关关系,说明只有 Hg 在大宁河食物链上被鱼类生物放大. Hg 的含量(经 $\log_{10}$ 转化)与 $\delta^{15}\text{N}$ 回归线斜率为 0.105,低于美国及加拿大等地的报道(0.17 ~ 0.29)^[30~32],表明汞在三峡水库食物链中放大效率偏低. 与北美等地湖泊或水库不同,三峡库区的土壤有机质含量较低,不利于水体中的微生物将无机汞转化为生物体易于吸收的甲基汞. 同时,库区水体不同程度的富营养化状态也可能加快了鱼类的生长速度,从而稀释了鱼体中的重金属含量.

与 Hg 相反,Pb、Cr 等重金属在一些环境条件下趋向于被生物减少^[33,34]. 本研究中鱼体 Pb、Cr 浓度与 $\delta^{15}\text{N}$ 的相关性不显著,与 Ikemoto 等^[8]的研究结果一致. 而 Cu、Ni、Cd、As 和 Zn 也未表现出与 $\delta^{15}\text{N}$ 显著的相关性,类似的情况也出现在其他水域食物链的研究中^[34]. 部分金属元素如 Ni、Cu 出现随鱼类营养级的升高而降低的趋势,这可能与鱼类对金属的同化率低而排出速率较高有关^[11],这也表明生物中金属的含量并不完全取决于营养级水平,而是与生物的储存方式、生理过程等有关,具体的形成机制还需要进一步深入研究.

此外,简单根据食物链中生物体内金属浓度与营养等级($\delta^{15}\text{N}$)的关系来定论金属的食物传递是否存在生物放大,存在一定的局限性.一方面,没有考虑到食物网的复杂性,食物网中的生物体的营养关系错综复杂,相同营养等级的生物可能分别处于不同的食物链中,每条食物链的食物来源,对重金属的传递效率等可能都不尽相同^[35];另一方面,不同的环境、生理、生化条件均可很大程度上影响到生物体的摄食速率、对金属的同化率和排泄率等参数^[5,11].本研究中,鲢、鳙等生活在水体中上层的滤食性鱼类与鲤、鲫等底层杂食性鱼类的处于不同的食物链中.除 Hg 以外的多数重金属通过浮游生物食物链传递到浮游动物时,由于浮游动物对重金属的高排泄率使其被生物减少.而底栖双壳类,腹足类由于具有极高的同化率可以对重金属进行高度富集,导致底栖食物链中的鲤、鲫等鱼类部分重金属浓度高于浮游食物链中的鲢、鳙等鱼类,甚至高于鲇等肉食性鱼类.另外,有研究发现,小个体的鱼摄食速率、对金属的同化率远高于大体型鱼类,其中小个体黑鲟(*Acanthopagrus schlegeli*)甚至可以对 Zn 进行生物放大^[36],这可能也是本研究中太湖新银鱼和餐条体内部分重金属含量偏高的原因.

4 结论

(1)三峡库区大宁河 16 种鱼体肌肉中, Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg 的平均含量范围分别为 0.17 ~ 0.30、0.016 ~ 0.095、0.14 ~ 0.40、3.56 ~ 12.17、0.005 ~ 0.110、0.002 ~ 0.009、0.011 ~ 0.098 和 0.018 ~ 0.115 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 鱼体重金属含量处于较低水平,但在不同种类鱼体中含量差异显著.

(2)鱼体样品 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为 -22.80‰ ~ -28.97‰, 鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其生活水层关系密切,生活在水体中上层以浮游植物为食的鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 较低,而在水体底层摄食的鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 较高. $\delta^{15}\text{N}$ 值分布范围为 6.41‰ ~ 13.88‰, 不同鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 受食性影响明显,总体表现为肉食性 > 杂食性 > 滤食性 > 草食性.

(3)鱼体中 Hg 含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 呈显著的正相关关系, Hg 在大宁河食物链中被鱼类生物放大,但与其他水域相比,放大效率偏低.除 Hg 外的金属元素与 $\delta^{15}\text{N}$ 的关系均不显著,但在小个体鱼类中表现出较高的含量.

致谢:感谢中国科学院水生生物研究所徐军博士在稳定同位素分析及讨论方面给予的帮助.

参考文献:

- [1] 徐小清, 丘昌强, 邓冠强, 等. 长江水系河流与水库中鲤鱼的元素含量特征[J]. 长江流域资源与环境, 1998, 7(3): 267-273.
- [2] Zhang Z, He L, Li J, *et al.* Analysis of heavy metals of muscle and intestine tissue in fish in Banan Section of Chongqing from Three Gorges Reservoir, China [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2007, 16(6): 949-958.
- [3] 王文义. 三峡库区蓄水前重庆段鱼类中重金属含量水平调查[J]. 水资源保护, 2008, 24(5): 34-37.
- [4] 余杨, 王雨春, 高博, 等. 三峡水库 175m 蓄水运行后鱼类汞污染风险研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 547-551.
- [5] 王文雄, 潘进芬. 重金属在海洋食物链中的传递[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 599-604.
- [6] Amiard-Triquet C, Jeantet A Y, Berthet B. Metal transfer in marine food chains: bioaccumulation and toxicity [J]. Acta Biologica Hungarica, 1993, 44(4): 387-409.
- [7] Eisler R. Trace metal concentrations in marine organism [M]. New York: Pergamon Press, 1981.
- [8] Ikemoto T, Tu N P C, Okuda, N, *et al.* Biomagnification of trace elements in the aquatic food web in the Mekong Delta, South Vietnam using stable carbon and nitrogen isotope analysis [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 54(3): 504-515.
- [9] Jara-Marini M E, Soto-Jiménez M F, Pérez-Osuna F. Trophic relationships and transference of cadmium, copper, lead and zinc in a subtropical coastal lagoon food web from SE Gulf of California [J]. Chemosphere, 2009, 77(10): 1366-1373.
- [10] Gray J S. Biomagnification in marine systems: the perspective of an ecologist [J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 45(1-12): 46-52.
- [11] 王文雄. 微量金属生态毒理学和生物地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 96-100.
- [12] Quinn M R, Feng X H, Folt C L, *et al.* Analyzing trophic transfer of metals in stream food webs using nitrogen isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2003, 317(1-3): 73-89.
- [13] 曾庆飞, 孔繁翔, 张恩楼, 等. 稳定同位素技术应用于水域食物网的方法学研究进展[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 13-20.
- [14] 万祎, 胡建英, 安立会, 等. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次[J]. 科学通报, 2005, 50(7): 708-712.
- [15] Chasar L C, Scudder B C, Stewart A R, *et al.* Mercury cycling in stream ecosystems. 3. Trophic dynamics and methylmercury bioaccumulation [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(8): 2733-2739.
- [16] Mendil D, Ünal O F, Tüzen M, *et al.* Determination of trace metals in different fish species and sediments from the River Ye? ilirmak in Tokat, Turkey [J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(5): 1383-1392.
- [17] 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.
- [18] Chi Q Q, Zhu G W, Langdon A. Bioaccumulation of heavy metals in fishes from Taihu Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(12): 1500-1504.
- [19] 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.
- [20] Yi Y, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2575-2585.
- [21] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions [J]. Ecology, 2002, **83**(3): 703-718.
- [22] 肖尚斌, 刘德富, 王雨春, 等. 三峡库区香溪河库湾沉积物重金属污染特征[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(8): 983-989.
- [23] 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 等. 三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2592-2598.
- [24] 曾乐意, 闫玉莲, 谢小军. 长江朱杨江段几种鱼类体内重金属铅、镉和铬含量的研究[J]. 淡水渔业, 2012, **42**(2): 61-65.
- [25] Farkas A, Salónki J, Specziár A. Age-and size-specific patterns of heavy metals in the organs of freshwater fish *Abramis brama* L. populating a low-contaminated site[J]. Water Research, 2003, **37**(5): 959-964.
- [26] Meador J P, Don Ernest W, Kagley A N. A comparison of the non-essential elements cadmium, mercury, and lead found in fish and sediment from Alaska and California [J]. Science of the Total Environment, 2005, **339**(1-3): 189-205.
- [27] 张亮. 长江三峡江段鱼类碳、氮稳定性同位素研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007. 31-34.
- [28] 徐军. 应用碳、氮稳定性同位素探讨淡水湖泊的食物网结构和营养级关系[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005. 33-36.
- [29] Xu J, Xie P. Studies on the food web structure of Lake Donghu using stable carbon and nitrogen isotope ratios [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2011, **19**(4): 645-650.
- [30] Lavoie R A, Hebert C E, Rail J F, *et al.* Trophic structure and mercury distribution in a Gulf of St. Lawrence (Canada) food web using stable isotope analysis [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(22): 5529-5539.
- [31] Wyn B, Kidd K A, Burgess N M, *et al.* Mercury biomagnification in the food webs of acidic lakes in Kejimikujik National Park and National Historic Site, Nova Scotia [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2009, **66**(9): 1532-1545.
- [32] Zhang L, Campbell L M, Johnson T B. Seasonal variation in mercury and food web biomagnification in Lake Ontario, Canada [J]. Environmental Pollution, 2012, **161**: 178-184.
- [33] Chen C Y, Stemberger R S, Klaue B, *et al.* Accumulation of heavy metals in food web components across a gradient of lakes [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(7): 1525-1536.
- [34] Cui B S, Zhang Q J, Zhang K J, *et al.* Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(5): 1297-1306.
- [35] Croteau M N, Luoma S N, Stewart A R. Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium biomagnification in nature [J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(5): 1511-1519.
- [36] Zhang L, Wang W X. Effects of Zn pre-exposure on Cd and Zn bioaccumulation and metallothionein levels in two species of marine fish [J]. Aquatic Toxicology, 2005, **73**(4): 353-369.

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 $\delta^{18}\text{O}$ 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