

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚婧,李颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟希,张淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳林,王信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201211091568

余杨,王雨春,周怀东,高博,赵高峰. 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征. 生态学报, 2013, 33(13): 4059-4067.

Yu Y, Wang Y C, Zhou H D, Gao B, Zhao G F. Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4059-4067.

三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其 水生食物链累积特征

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: 于 2011—2012 年在三峡库区干流水域及 7 条典型支流采集了 11 种鱼类样品, 以稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 营养等级分析为基础, 研究了三峡水库蓄水后的鱼类汞含量水平及其食物链累积特征。结果表明, 库区鱼类(以鲤为例)平均总汞含量为 57.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 与蓄水前鱼体总汞水平相当, 但在库区不同水域鱼体总汞含量差异显著: 干流入库水域(洛碛断面)鱼体总汞含量平均值为 88.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 显著高于水库腹区水域(巫山断面)的平均值 43.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。稳定同位素分析表明, 库区支流鱼体的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 -22.08‰ — -28.92‰ , 大于干流鱼体的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围(-23.11‰ — -26.87‰), 表明支流鱼类的食物来源具有更明显的湖沼型特征。同时, 支流鱼类食物链上汞的累积放大效率显著高于干流水域。水文水力差异可能是库区内汞累积等生态过程存在空间差异的重要原因。

关键词: 三峡水库; 鱼类; 汞; 食物链; 稳定同位素

Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment

YU Yang^{1,2}, WANG Yuchun^{1,2}, ZHOU Huaiddong^{1,2,*}, GAO Bo^{1,2}, ZHAO Gaofeng^{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: Three Gorges Reservoir (TGR) is a giant canyon-shaped reservoir located in the lower section of the upper reaches of the Yangtze River. After impoundment, hydrological signatures, chemical factors and species composition, had been greatly changed in TGR. The new environmental conditions could increase methylmercury (MeHg) production, and induce substantial increase of mercury concentration in the predator fish through food chain biomagnification. Concern about human consumption of fish contaminated with MeHg had been raised even before the construction of TGR. This study tried to investigate the total mercury concentrations in fish and biomagnification characters of mercury along food chains in TGR after 175m impoundment. The stable isotope analysis could be a useful method of checking and evaluating the trophic conditions of aquatic ecology. We collected eleven fish species from three main stem sections and seven typical tributaries of TGR from 2011 to 2012. Carp (*Cyprinus carpio*) was selected as a typical species to investigate the spatial distribution of mercury level in fish from TGR. Total mercury concentrations and stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of all fish samples were determined. Result showed that mercury concentrations in fishes from TGR had not obviously increased after

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179205); 国家水体污染控制与治理科技专项三峡水库水环境演化与安全问题诊断研究课题(2009ZX07104-001)

收稿日期: 2012-11-09; 修订日期: 2013-04-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hdzhou@iwhr.com

impoundment. The carp mercury concentrations in TGR were comparable to values reported for other areas of Yangtze River Basin. But spatial difference was found among different sections of main stem. Due to the enhanced sediment deposition along reservoir, there was a decreasing trend of mercury concentration in fish from upper stream to lower stream within TGR. Mercury concentrations in the fishes from Luoqi in up area of reservoir ($88.0 \mu\text{g/kg}$, average) was significantly higher than those from Wushan in middle area of reservoir ($43.1 \mu\text{g/kg}$, average) and tributaries ($57.1 \mu\text{g/kg}$, average). The mercury concentrations in fish from tributaries were comparable to those from main stem, and there were no significant difference among most tributaries. Based on the carbon and nitrogen stable isotope ratios and total mercury contents in eleven species fish, the biomagnification power of mercury in two sections and one tributary were evaluated. While log-transformed mercury contents were consistently correlated with $\delta^{15}\text{N}$ values for the fish food web in all sampling sites, the slope of the relationship with $\delta^{15}\text{N}$ (biomagnification power value) was significant higher in Shennong River than that in Wanzhou and Wushan section. This indicated that biomagnification power of mercury is greater in tributary than in main stem of TGR. Carbon and nitrogen stable isotope analysis also indicate a difference in food source of fishes between tributary and main stem. In tributary (Shennong River), the values of fish samples were -22.08‰ — -28.92‰ for $\delta^{13}\text{C}$ and 8.26‰ — 13.15‰ for $\delta^{15}\text{N}$; In main stem, the values of fish samples were -23.11‰ — -26.87‰ for $\delta^{13}\text{C}$ and 8.95‰ — 16.98‰ for $\delta^{15}\text{N}$. This indicate fishes in tributary rely more on pelagic primary production while those in main stem tend to take allochthonous materials carried by runoff. In conclusion, the body type of tributary and main stem after impoundment could be different, and this may be an important reason of different mercury bioaccumulation between tributary and main stem within TGR.

Key Words: Three Gorges Reservoir; fish; mercury; food chain; stable isotope

三峡工程以其规模宏大、效益显著而举世瞩目,同时也对库区生态环境产生了深远影响。由于三峡处于我国地势二、三级阶梯的过渡地带,三峡水库的生态演化发育状况不仅关系到库区水生态安全,也关系到下游广大沿江及河口地区的生态环境健康。

自 20 世纪 50 年代日本“水俣病”事件后,低水平汞及其化合物(甲基汞)可通过食物链传递、累积、放大,对人体造成危害已得到普遍认同^[1-2]。研究表明,水库作为一种特殊的水生态系统,蓄水后的水体环境有利于甲基汞生成,极可能成为汞在水生生物体(如鱼类)中累积放大的“热点”^[3-5]。徐小清等^[6-7]早期根据长江流域河流、天然湖泊、水库的调查数据预测,三峡水库运行后可能出现库区鱼类肌体中汞含量显著增加的现象。但蓄水后关于三峡水库鱼类汞含量的报道较少^[8],尤其缺乏汞的食物链积累等生态过程的研究。

本研究针对三峡水库蓄水运行后,库区鱼类及水生食物链上汞累积放大生态风险这一重要问题,挑选受蓄水影响较大的重点支流和部分干流断面进行鱼类汞污染及其空间差异研究。同时,采用稳定同位素技术($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)对库区鱼类生态系统的食物链结构进行分析。稳定同位素技术分析自 20 世纪 70 年代引入生态学研究以来,已被证实是一种可以有效研究食物链结构、物质循环的技术手段^[9],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。本研究通过库区干、支流不同水域的鱼体稳定同位素数据,分析库区鱼类食物链结构特点,以此为基础研究了库区支流及干流鱼类食物链中汞的放大和累积特征。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

三峡水库位于长江中下游渝东、鄂西交界处,是重要的淡水资源库和水生生态系统。水库于 2003 年 6 月开始蓄水,并于 2010 年到达 175 m 标准蓄水位。库区内河网密集,水系发达,入库河流中大于 100 km^2 的一级河流共 42 条,大于 50 km^2 的二级河流超过 300 条。由于三峡水库属于典型的河道型水库,库区水体的水力学特征条件变化较大,干流不同断面及干支流间所受蓄水影响也不尽相同。蓄水后干流流速减慢,但总体

仍保持一维河流特征,而支流受到干流顶托,表现出更强的湖泊形态^[10]。

三峡地区鱼类资源丰富,共有鱼类 140 余种,是重要的经济鱼类的原种产地和大量鱼类栖息、摄食、产卵的重要水域。三峡成库后,受水体流速和营养状态改变的影响,库区内渔业资源种类组成发生变化:鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫(*Carassius auratus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)等鱼类种群增加,而圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、长吻鮠(*Leiocassis longirostris*)等适应流水环境的鱼类大量减少。

1.2 样品采集

2011 年 3 月与 2012 年 3 月在三峡水库洛碛至秭归段的 7 条支流及 3 个干流断面进行了采样(图 1),样品均从各干流断面及支流回水区的渔民处购买,包括鲤、鳊(*Siniperca chuatsi*)、鲇(*Silurus asotus*)、鲫、鲢、鳙(*Aristichthys nobilis*)、鲮(*Hemiculter leucisculus*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)、光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachellii*)、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)等 11 种常见经济鱼类,共计 164 尾。其中,在每个采样点都随机选取了体重体长无明显差异的至少 3 尾鲤鱼。本研究对所采集鱼类样品都进行了肌肉总汞含量与稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)测定。

样品采集后,现场测量鱼体全长、体重,并拍照;后将鱼除鳞、洗净、切取背脊肌肉(50—100 g)装入聚乙烯封口袋中,并于冷冻状态下带回实验室,置于冰箱中冷冻保存($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。所有取样工具和储存容器事先按要求清洗,以满足汞元素分析要求^[11]。由于采样时正值长江葛洲坝上游区域禁渔期,所采集样品量偏小,但基本能代表当地当月渔获物的情况。

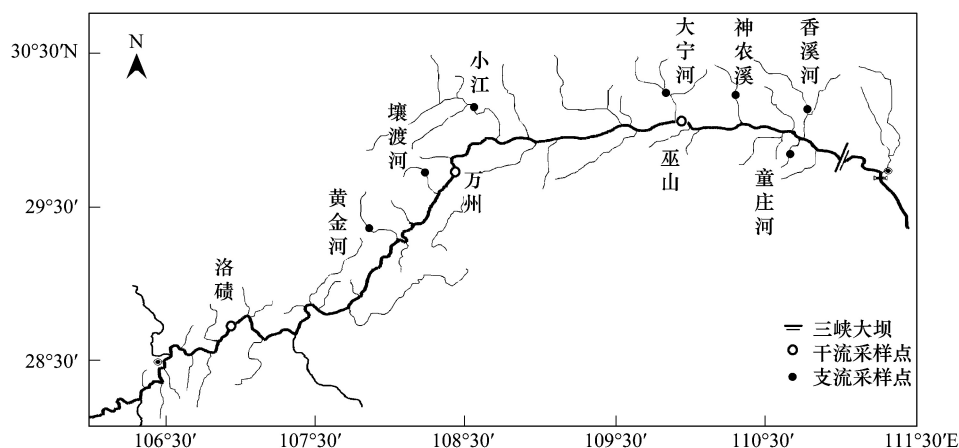


图 1 样品采样地点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 样品分析方法

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,匀浆器匀浆后冷冻干燥。干燥前后样品均准确称重(精确到 0.0001 g),计算出样品含水率。冻干后的样品用研钵研磨成粉末后分成两份,分别用来测定总汞含量和稳定同位素比率。

总汞含量的测定按 Chasar 等^[12]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。实验过程中测定黄鱼成份分析标准物质(GBW08573),回收率为 92%。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,就设空白样以保证实验的精密度。测定结果根据样品含水率折算成湿重后用于结果与讨论。

稳定同位素的测定按 Xu 等^[13]方法,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)。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的标准物质分别为美洲拟箭石(PDB)和大气中的 N_2 。结果表示为: $\delta X = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 1000$,式中 X 为 ^{13}C 或 ^{15}N , R 代表 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。样品分析精度 $\delta^{13}\text{C} < 0.20\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} < 0.30\text{‰}$ 。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 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 鱼体汞含量水平的区域分布

在三峡库区的不同水域中,以数量较多的鲤鱼为对象,分析水库内的鱼体汞含量的区域差异。本研究在 10 个采样水域共采集鲤鱼样品 46 尾,样品年龄多为 1—3 龄,体长主要集中在 20—35 cm (91.3%),且各采样点的鲤鱼体长体重之间无显著差异。如图 2 所示,在所有干、支流采样水域中,鲤鱼肌肉汞含量最高的是干流中的洛碛(平均 112.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$),最低的为支流中的童庄河(平均 38.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。其中干流 3 个采样点中的洛碛的鱼体汞含量显著性地高于万州和巫山($P<0.05$),从高到低依次为洛碛>万州>巫山。各支流样点中,总汞含量最高为大宁河(65.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$),最低为童庄河(38.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$),从高到低的次序依次为大宁河>黄金河>小江>香溪河>神农溪>壤渡河>童庄河,除大宁河鱼体汞含量显著高于童庄河外,其余各支流之间无显著差异($P>0.05$)。本研究所有采自干流与采自支流的鲤鱼相比,体内汞含量无显著差异($P>0.05$),多数支流与巫山和万州段干流中的鱼体汞含量相当。

2.2 碳稳定同位素值分析

如表 1 所示,本研究中鱼类样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -22.08‰ — -28.92‰ 。其中,万州段鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -23.11‰ — -26.87‰ ,巫山段鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -23.36‰ — -25.57‰ ,神农溪鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -22.08 — -28.92‰ 。

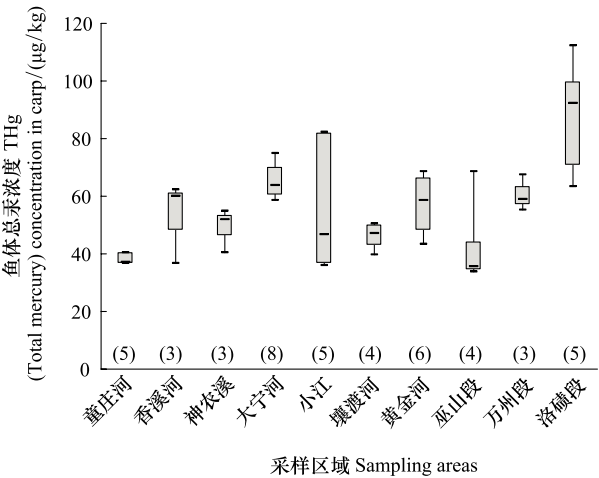


图 2 三峡库区内不同水域鲤鱼总汞含量
Fig. 2 Total mercury concentrations in carp from different areas within TGR

表 1 不同水域鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值
Table 1 $\delta^{13}\text{C}$ values of fishes from different areas

种类 Species	$\delta^{13}\text{C}$ (平均值 Average $\pm$ 标准差 SD, ‰)		
	万州	巫山	神农溪
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	-23.76 ± 0.93 (3)	-24.19 ± 1.23 (4)	-24.67 ± 0.61 (3)
鲫 <i>Carassius auratus</i>	-24.13 ± 0.87 (4)	-24.52 ± 0.57 (2)	-22.46 ± 0.41 (4)
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	-25.22 ± 0.67 (5)	-25.10 ± 0.37 (3)	-28.12 ± 0.43 (3)
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachellii</i>	—	-24.58 ± 0.85 (2)	-27.57 ± 0.34 (2)
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	-25.88 ± 0.70 (2)	—	-27.72 ± 0.51 (2)
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	-26.87 (1)	-25.06 ± 1.36 (3)	-28.75 ± 0.55 (2)
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	—	-25.12 (1)	-26.10 ± 0.24 (3)
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	-24.67 ± 1.02 (3)	—	-25.26 ± 0.29 (3)
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	—	-24.91 ± 0.46 (2)	-25.23 ± 0.26 (2)
鲇 <i>Silurus asotus</i>	-24.37 (1)	-24.15 ± 1.42 (3)	-25.79 ± 0.30 (3)
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	-24.34 ± 0.38 (2)	-23.92 (1)	—

表格中“—”代表无相应数据

在各采样水域中,鲢、鳙等滤食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低(-28.92‰ — -24.67‰),而鲤、鲫等底栖杂食性鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高(-25.02‰ — -22.08‰)。这与不同鱼类食物来源差异有关,滤食性鱼类主要摄食微型藻类、浮游动物等 $\delta^{13}\text{C}$ 值低的饵料,而底栖鱼类食物来源中外来碎屑、软体动物等 $\delta^{13}\text{C}$ 值高的饵料比例更大。

对 3 个采样水域共有的鲤、鲫和鲮的 $\delta^{13}\text{C}$ 进行分析,结果见图 3。3 个水域鲤鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为:万州>巫山>神农溪,但各样点间的鲤鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著性差异($P>0.05$)。鲫鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 3 个水域中的分布为:神农溪>万州>巫山,且神农溪鲫鱼 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于万州和巫山段的鲫鱼($P<0.05$)。鲮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在三采样水域中表现为:巫山>万州>神农溪,其中神农溪鲮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于万州和巫山段的鲮($P<0.05$)。

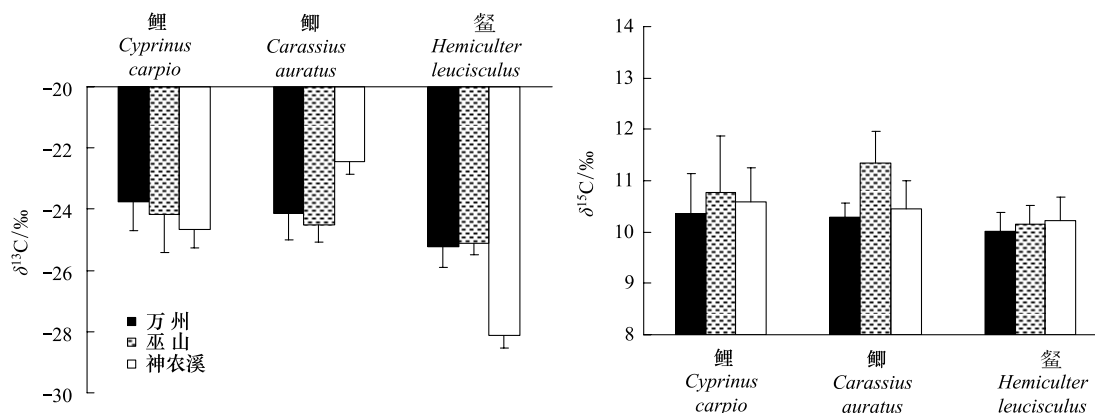


图 3 不同水域鲤、鲫、鲮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布

Fig. 3 Difference of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ among different areas for *Cyprinus carpio*, *Carassius auratus* and *Hemibarbus leuciscus*

2.3 氮稳定同位素值分析

如表 2 所示,本研究中鱼类样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 8.26‰—16.98‰。其中,万州段鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 8.95‰—14.43‰,巫山段鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 9.37‰—16.98‰,神农溪鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 8.26‰—13.15‰。氮稳定性同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 因分馏作用伴随着生物体营养等级的增加而不断增加,不同营养级间的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集值的平均值为 3.4‰^[14]。因此,可以根据水域中不同鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值来确定相应的营养等级,具体公式如下^[15]:

$$\text{TL}_{\text{consumer}} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / 3.4\text{‰} + \lambda$$

式中, $\text{TL}_{\text{consumer}}$ 为消费者营养等级,当 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 取初级消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 值时, $\lambda=2$ 。以此推算,万州、巫山和神农溪 3 个水域中采集鱼类的营养等级跨度分别为 1.6、2.2 和 1.4。

表 2 不同水域鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Table 2 $\delta^{15}\text{N}$ values of fishes from different areas

种类 Species	$\delta^{15}\text{N}$ (平均值 Average $\pm$ 标准差 SD)/‰		
	万州	巫山	神农溪
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	10.36 $\pm$ 0.77 (3)	10.29 $\pm$ 1.08 (4)	10.01 $\pm$ 0.67 (3)
鲫 <i>Carassius auratus</i>	10.78 $\pm$ 0.28 (4)	11.34 $\pm$ 0.63 (2)	10.16 $\pm$ 0.56 (4)
鲮 <i>Hemibarbus leuciscus</i>	10.59 $\pm$ 0.38 (5)	10.44 $\pm$ 0.37 (3)	10.23 $\pm$ 0.46 (3)
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachellii</i>	—	12.43 $\pm$ 0.27 (2)	10.16 $\pm$ 0.23 (3)
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	13.06 $\pm$ 0.60 (2)	—	12.20 $\pm$ 0.59 (2)
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	8.95 (1)	9.78 $\pm$ 0.54 (3)	8.86 $\pm$ 0.68 (2)
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	—	10.06 (1)	9.75 $\pm$ 0.23 (2)
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	13.32 $\pm$ 0.94 (3)	—	12.24 $\pm$ 1.04 (3)
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	—	13.78 $\pm$ 0.39 (2)	12.76 $\pm$ 0.35 (2)
鲇 <i>Silurus asotus</i>	14.43 (1)	16.35 $\pm$ 0.95 (3)	12.73 $\pm$ 0.62 (3)
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	9.86 $\pm$ 0.25 (2)	10.41 (1)	—

表格中“—”代表无相应数据

在各采样水域中,食性不同的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异明显,从滤食性、草食性向杂食性和肉食性逐渐升高。鱼

类的 $\delta^{15}\text{N}$ 直接取决于摄食对象的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,鲇、鳊等肉食性鱼类主要捕食其他小型鱼类, $\delta^{15}\text{N}$ 值最高,而鲢、鳙等以浮游生物为食的滤食性鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低。光泽黄颡鱼与瓦氏黄颡鱼虽然同为杂食性鱼类且生活习性和活动范围类似,但光泽黄颡鱼的食物组成中动物性饵料所占比例更大, $\delta^{15}\text{N}$ 值更高。

对比 3 个采样水域鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值发现,万州和巫山段的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 均高于神农溪的同种鱼类。以三水域共有的鲤、鲫和鳊为例(图 3), 3 个水域鲤鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 值表现为:万州>巫山>神农溪,但各样点间的鲤鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著性差异($P>0.05$)。鲫鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 在 3 个水域中的分布为:巫山>万州>神农溪,且巫山段鲫鱼 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于神农溪的鲫鱼($P<0.05$)。鳊的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在三采样水域中表现为:万州>巫山>神农溪,其中各样点间的鳊的 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异($P>0.05$)。

2.4 干、支流鱼类食物链的汞累积放大效率

本研究将采样水域鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与鱼体汞浓度(经 $\log_{10}$ 转化)做回归分析,结果见图 4。其中,万州段和神农溪的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值与鱼体汞浓度呈正相关,而巫山段的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值与汞浓度相关性不显著,这说明汞在万州和神农溪的水生食物链上有明显的累积放大作用。生物体 $\delta^{15}\text{N}$ 值与体内汞浓度的回归曲线斜率往往被用来指示食物链对汞累积放大能力的大小^[16-18],本研究中神农溪的回归曲线斜率显著性高于万州段和巫山段($P<0.05$),而万州段和巫山段的回归曲线斜率之间无显著差别($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 库区鱼类汞含量的时空变化

三峡水库蓄水前徐小清等^[7]预测:水库蓄水后,库区干流中鲤鱼汞含量平均值将达到 110 $\mu\text{g}/\text{kg}$,而各支流中鲤鱼汞含量平均值为 130—140 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。本研究中鲤鱼肌肉总汞含量明显低于蓄水前的预测值,仅稍高于蓄水前水平,与蓄水 1—2 a 后的水平相近。与长江水系及其他支流相比(表 3),蓄水后三峡水库的鲤鱼总汞含量也无明显差异。

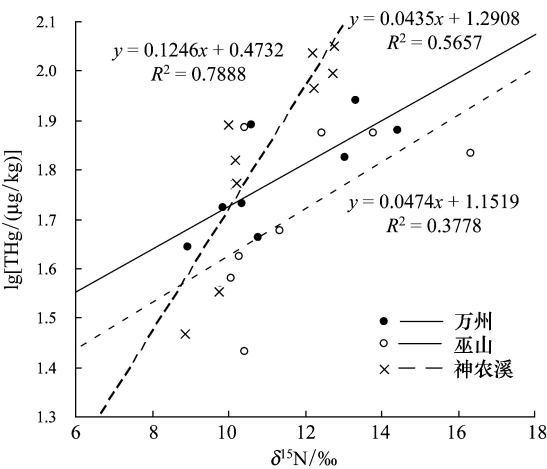


图 4 不同水域鱼类总汞含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 的关系

Fig. 4 Relationships between mercury contents and $\delta^{15}\text{N}$ values of fishes from different areas

表 3 长江水系不同水域鲤鱼肌肉总汞含量对比 ($\mu\text{g}/\text{kg}$, 湿重)

Table 3 Comparison of mercury contents in carp from different areas of Yangtze River Basin ($\mu\text{g}/\text{kg}$, wet weight)

采样地点 Area	采样时间 Sampling time	平均值 Average	范围 Range	文献 References
长江干流 Main stem of the Yangtze River	1997	66	—	[19]
长江水系 The Yangtze River system	1997	44	—	[19]
汉江 Hanjiang River	1997	40	—	[6]
湘江 Xiangjiang River	1997	68	—	[6]
资水 Zishui River	1997	78	—	[6]
青弋江 Qinyi River	1997	56	—	[6]
三峡库区 TGR (Three Gorges Reservoir)	1994. 11	47	28—53	[20]
三峡库区干流 Main stem in TGR	2004-12—2005-07	61.6	37.8—90.8	[5]
三峡库区干流 Main stem in TGR	2011-03—2012-03	66.2	33.8—112.4	本研究
三峡库区支流 Tributaries in TGR	2011-03—2012-03	53.9	35.8—82.3	本研究

表格中“—”代表文献中无相应数据

Xu 等^[21]研究发现,三峡水库蓄水后库区水体类型存在空间差异:三峡水库首次成库后干流水体以河流型和过渡型为主;支流库湾则主要表现为过渡型和湖泊型水体。三峡水库蓄水位到达 175 m 后,支流库湾水

体滞留时间均进一步延长,湖泊型水体特征更加明显^[10]。徐小清^[7]等根据各水域水文特征参数计算出支流的汞活化指数高于干流,并预测蓄水后支流鱼体汞含量将高于干流鱼体。

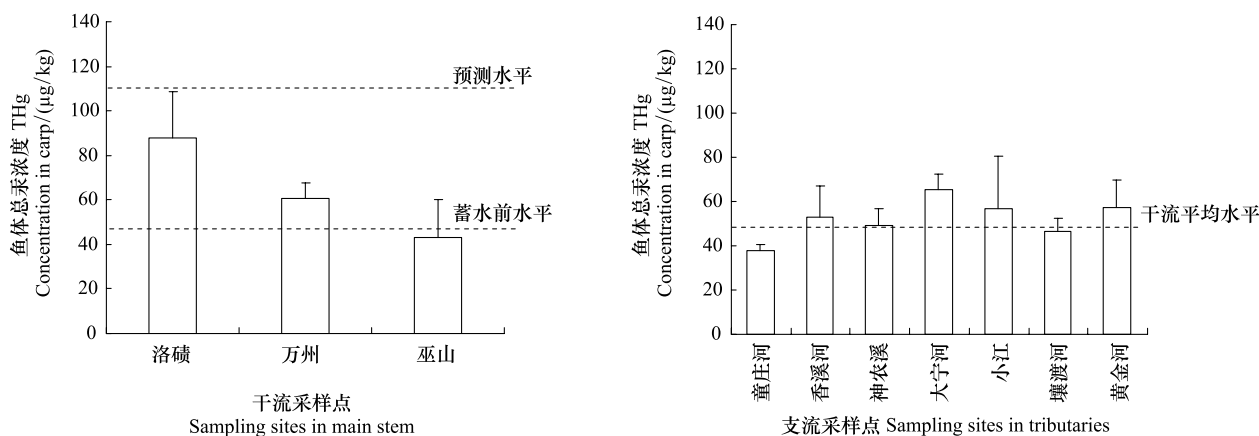


图5 库区内不同水域鲤鱼总汞含量比较

Fig.5 Comparison of mercury content in carp from different areas within TGR

然而通过比较库区内各水域的鲤鱼汞含量,发现从库尾的洛碛到库中的巫山,干流中鲤鱼汞含量逐渐降低(图5),这与之前的预测不同。根据祁俊生等^[22]的研究结果,三峡水库蓄水前干流长寿、万州、巫山段鲤鱼汞含量平均值分别为 55, 49, 45 $\mu\text{g/kg}$, 同样呈逐渐降低的趋势。与蓄水前相比,蓄水后鱼体汞含量在洛碛段上升幅度较大,万州段上升幅度较小,巫山段基本无变化。三峡水库成库后,水流速度减慢,大量悬浮物在进入水库后沉淀。王健康等^[23]证实三峡水库中的重金属因易于吸附在悬浮颗粒物上而被沉降下来,发生澄清作用。这也可以解释水库干流中鱼体汞含量分布变化趋势。支流中的鱼体汞含量也普遍低于预测值,这之前研究结果一致^[8]。同时,支流鱼体汞含量并没有明显高于干流鱼体,大部分支流仅与万州、巫山段相当,甚至显著低于洛碛段鱼体中含量(图5)。王健康等^[23]对三峡库区 13 条支流进行沉积物重金属污染研究发现,所涉及支流都没有受到汞污染。所以,库区支流较低的汞输入可能是导致鱼体汞含量不高的原因。三峡水库蓄水后,支流水体环境变化较大,除改变水体无机汞负荷外,还影响了水体甲基化速率,鱼类摄食关系等决定鱼体汞含量的关键因素^[24]。这些都可能使鱼体汞含量低于预期。此外,库区支流受回水顶托,不同程度的富营养化状态和水华也可能降低鱼体中的汞含量^[25-27]。

3.2 干、支流鱼类食物来源的差异

水生生态系统中的碳源既包括藻类、浮游动物和大型水生植物等 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低的内源性碳源,也包括陆地植物碎屑、工业生活排放物等 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高外源性碳源^[28]。本研究中采样水域鱼类碳稳定同位素的变化反映了三峡库区不同水域鱼类食物来源的空间多样性,其中干流受上游降雨冲刷和排放物影响,水体中外源性有机物量较大,并且干流中较大的流速限制了浮游生物的生长,导致内源性有机物的比例偏低,水体中 POM(颗粒有机物)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高。并且,以往研究表明库区干流的不同断面之间 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也有差异^[28],但本研究中万州和巫山段鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异不明显,这说明两地鱼类食物来源比较相似。与干流相比,支流神农溪水流较缓,库湾中浮游植物所占比重较大,导致鲮等鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于干流中的同种鱼类。而鲫鱼属于底栖鱼类,与干流相比,支流中较浅的水深使得鲫鱼易于摄食底层沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高的食物。

同样,三峡库区鱼体中 $\delta^{15}\text{N}$ 值也在不同水域中有明显差异。通常认为,陆地碎屑,生活污水等外源性有机物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比藻类等内源性有机物更高,库区内不同水体 POM 中各种有机物所占比重的差异将影响其 $\delta^{15}\text{N}$ 值,并沿食物链传递到鱼体后导致鱼体 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间差异。本研究中万州和巫山段的鱼体 $\delta^{15}\text{N}$ 普遍高于神农溪中的同种鱼体,反映出库区干流受外来物质的影响大于支流。

3.3 汞累积放大效率

由于食物链及生物自身的复杂性,不同水域食物链对汞的累积放大能力存在明显差异。本研究中神农溪

的鱼类食物链表现出显著高于干流的汞累积放大能力。徐小清等^[7, 29]在三峡水库蓄水前提出,由于受蓄水后干流顶托作用的影响,各支流淹没水域的流速减缓,可视为小水库群。考虑到库区干流及其主要支流水文特征参数的不同,蓄水后干、支流以及各支流之间的汞活化效应指数将有所差异,其中支流受到的可能影响更大。虽然干、支流鲤鱼汞含量未出现明显差异,但支流中较高的汞放大效率仍可能导致其中的高营养等级鱼类汞含量高于干流中的同种鱼类。此外,三峡库区鱼类汞含量与稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 的回归方程斜率为 0.04—0.13, 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富集效率总体偏低。考虑到三峡水库到达 175m 蓄水位仅两年,生态系统还未达到平衡,环境变化一定程度上改变了鱼类食物来源和摄食习惯,这可能导致食物网结构不稳定,汞通过食物链放大的效率低于其他水体。

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。

References:

- [1] Mason R P, Reinfelder J R, Morel F M M. Uptake, toxicity, and trophic transfer of mercury in a coastal diatom. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(6): 1835-1845.
- [2] Bodaly R A, Jansen W A, Majewski A R, Fudge R J P, Strange N E, Derksen A J, Green D J. Postimpoundment time course of increased mercury concentrations in fish in hydroelectric reservoirs of northern Manitoba, Canada. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 53(3): 379-389.
- [3] Feng X B, Jiang H M, Qiu G L, Yan H Y, Li G H, Li Z G. Geochemical processes of mercury in Wujiangdu and Dongfeng reservoirs, Guizhou, China. *Environmental Pollution*, 2009, 157(11): 2970-2984.
- [4] Jiang H M, Feng X B. Developments in the biogeochemical cycle of mercury in reservoirs. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 462-467.
- [5] Zhang L, Zang X, Xu J, Xie P, Zhu Z, Su J. Mercury bioaccumulation in fishes of Three Gorges Reservoir after impoundment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 78(3/4): 262-264.
- [6] Xu X Q, Qiu C Q, Deng G Q, Hui J Y, Zhang X H. Prediction of fish mercury bioaccumulation in reservoirs. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1998, 22(3): 244-250.
- [7] Xu X Q, Zhang X H, Jin L J, Qiu C Q. Effect of mercury reactivity on fish mercury contents in the Three-Gorge Reservoir after impoundment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, 8(2): 198-204.
- [8] Yu Y, Wang Y, Gao B, Hong Y, Wan X, Zhou H. Assessment on pollution risk of mercury in fishes of Three Gorges Reservoir after 175m impoundment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(5): 547-551.
- [9] Vander Zanden M J, Rasmussen J B. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, 1999, 80(4): 1395-1404.
- [10] Cai Q, Sun Z. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: progress and prospects. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 169-177.
- [11] Yan H Y, Feng X B, Shang L H, Tang S L, Qiu G L. Speciation analysis of ultra trace levels of mercury in natural waters. *Journal of Instrumental Analysis*, 2003, 22(5): 10-13.
- [12] Chasar L C, Scudder B C, Stewart A R, Bell A H, Aiken G R. Mercury cycling in stream ecosystems. 3. Trophic dynamics and methylmercury bioaccumulation. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(8): 2733-2739.
- [13] Xu J, Zhang M, Xie P. Stable isotope changes in freshwater shrimps (*Exopalaemon modestus* and *Macrobrachium nipponensis*): trophic pattern implications. *Hydrobiologia*, 2008, 605(1): 45-54.
- [14] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods and assumptions. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [15] Vander Zanden M J, Cabana G, Rasmussen J B. Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) and literature dietary data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1997, 54(5): 1142-1158.
- [16] Kidd K A, Bootsma H A, Hesslein R H, Lockhart W L, Hecky R E. Mercury concentrations in the food web of Lake Malawi, East Africa. *Journal of Great Lakes Research*, 2003, 29(S2): 258-266.
- [17] Rypel A L, Arrington D A, Findlay R H. Mercury in southeastern U. S. riverine fish populations linked to water body type. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(14): 5118-5124.
- [18] Cossa D, Harmelin-Vivien M, Mellon-Duval C, Loizeau V, Averty B, Crochet S, Chou L, Cadiou J F. Influences of bioavailability, trophic position, and growth on methylmercury in hakes (*Merluccius merluccius*) from Northwestern Mediterranean and Northeastern Atlantic. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 4885-4893.
- [19] Xu X Q, Qiu C Q, Deng G Q, Hui J Y, Jin L J, Zhang X H. Characteristics of element contents in carp (*Cyprinus carpio* L.) from the Changjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1998, 7(3): 267-273.

- [20] Jin L J, Xu X Q. Methylmercury distribution in surface water and fish in the Three Gorge Reservoir Area. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 1997, 6(4): 324-328.
- [21] Xu Y Y, Zhang M, Wang L, Kong L H, Cai Q H. Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China. *Quaternary International*, 2011, 244(2): 272-279.
- [22] Qi J S, Fu C, Huang X S, Tan J. Transfer of trace elements in water area ecology systems of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2002, 25(1): 17-20.
- [23] Wang J K, Gao B, Zhou H D, Lu J, Wang Y C, Yin S H, Hao H, Yuan H. Heavy metals pollution and its potential ecological risk of the sediments in Three Gorges Reservoir during its impounding Period. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1693-1699.
- [24] Hu S W. Evaluation of Pollution and Fate of Mercury in Water Column of Chongqing District and Three Gorges Reservoir Region after Impoundment [D]. Chongqing: Southwest University, 2006.
- [25] Chen C Y, Folt C L. High plankton densities reduce mercury biomagnification. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(1): 115-121.
- [26] Yan H Y, Feng X B, Liu T, Shang L H, Li Z G, Li G H. Present situation of fish mercury pollution in heavily mercury-contaminated Baihua reservoir in Guizhou. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 27(8): 1357-1361.
- [27] He T R, Wu Y Y, Pan L S, Feng X B. Distribution of mercury species and their concentrations in fish in Hongfeng Reservoir. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2010, 32(7): 78-82.
- [28] Zhang L. A Stable Carbon and Nitrogen Isotope Study of Fishes from the Three Gorges Riverine Section of the Yangtze River [D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [29] Xu X Q, Qiu C Q, Deng G Q, Hui J Y, Zhang X H. Chemical-ecological effects of mercury pollution in the Three Gorge Reservoir Area. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, 23(3): 197-203.
- [30] Wyn B, Kidd K A, Burgess N M, Curry R A. Mercury biomagnification in the food webs of acidic lakes in Kejimikujik National Park and National Historic Site, Nova Scotia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2009, 66(9): 1532-1545.
- [31] Lavoie R A, Hebert C E, Rail J F, Braune B M, Yumvihoze E, Hill L G, Lean D R S. Trophic structure and mercury distribution in a Gulf of St. Lawrence (Canada) food web using stable isotope analysis. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(22): 5529-5539.
- [32] Zhang L, Campbell L M, Johnson T B. Seasonal variation in mercury and food web biomagnification in Lake Ontario, Canada. *Environmental Pollution*, 2012, 161: 178-184.

参考文献:

- [4] 蒋红梅, 冯新斌. 水库汞生物地球化学循环研究进展. *水科学进展*, 2007, 18(3): 462-467.
- [6] 徐小清, 丘昌强, 邓冠强, 惠嘉玉, 张晓华. 水库鱼体汞积累的预测. *水生生物学报*, 1998, 22(3): 244-250.
- [7] 徐小清, 张晓华, 靳立军, 丘昌强. 三峡水库汞活化效应对鱼汞含量影响的预测. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(2): 198-204.
- [8] 余杨, 王雨春, 高博, 洪宇宁, 万晓红, 周怀东. 三峡水库 175m 蓄水运行后鱼类汞污染风险研究. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(5): 547-551.
- [10] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 169-177.
- [11] 闫海鱼, 冯新斌, 商立海, 汤顺林, 仇广乐. 天然水体中痕量汞的形态分析方法研究. *分析测试学报*, 2003, 22(5): 10-13.
- [19] 徐小清, 丘昌强, 邓冠强, 惠嘉玉, 靳立军, 张晓华. 长江水系河流与水库中鲤鱼的元素含量特征. *长江流域资源与环境*, 1998, 7(3): 267-273.
- [20] 靳立军, 徐小清. 三峡库区地表水和鱼体中甲基汞含量的分布特征. *长江流域资源与环境*, 1997, 6(4): 324-328.
- [22] 祁俊生, 傅川, 黄秀山, 谭君. 微量元素在三峡库区水域生态系统中的迁移. *重庆大学: 自然科学版*, 2002, 25(1): 17-20.
- [23] 王健康, 高博, 周怀东, 陆瑾, 王雨春, 殷淑华, 郝红, 袁浩. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价. *环境科学*, 2012, 33(5): 1693-1699.
- [24] 胡尚伟. 三峡成库后重庆及三峡水中典型有毒重金属汞的污染状况分析及环境行为初步研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [26] 闫海鱼, 冯新斌, 刘霆, 商立海, 李仲根, 李广辉. 贵州百花湖鱼体汞污染现状. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1357-1361.
- [27] 何天容, 吴玉勇, 潘鲁生, 冯新斌. 红枫湖鱼体中汞形态分布特征. *西南大学学报: 自然科学版*, 2010, 32(7): 78-82.
- [28] 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.
- [29] 徐小清, 丘昌强, 邓冠强, 惠嘉玉, 张晓华. 三峡库区汞污染的化学生态效应. *水生生物学报*, 1999, 23(3): 197-203.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元