

太湖五里湖水域背角无齿蚌中汞的残留

刘洪波¹, 杨 健¹, 甘居利²

(1.中国水产科学研究院内陆渔业环境与资源重点开放实验室, 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081; 2.中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘 要:作为建立淡水环境下持久性污染物“背角无齿蚌观察”体系的又一尝试,利用 NIC 汞分析仪(MA-2000 型)对采自太湖污染最严重水域——五里湖代表样点的背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)及用于对照的底泥中重金属汞的残留进行了测定。结果显示,汞在背角无齿蚌和底泥样本中的浓度平均值分别为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重和 $0.135 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重;浓度范围分别为 $0.000 \sim 0.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重和 $0.063 \sim 0.227 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重。蚌样和底泥样本中汞的残留浓度均明显低于国家相关的食品卫生(GB 2762—1994)、限量标准(NY 5073—2001),或农用淤泥(GB 4284—1984)、土壤环境质量(GB 15618—1995)标准。另外,底泥样本中汞的地积累指数(Igeo)仅为-1.96。两类样本中汞的残留状况一致反映出目前太湖五里湖水域汞的污染程度很低。近年来五里湖全湖水域的清淤工程应该是导致这种现象的原因。不同样点汞浓度的地理差异仅在底泥样本中达到显著水平。

关键词:监测;背角无齿蚌;汞;残留;五里湖;太湖

中图分类号:X835 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)02-0411-05

Residues of Mercury in the Bivalve Mussels *Anodonta woodiana* from the Wulihu Area of the Taihu, China

LIU Hong-bo¹, YANG Jian¹, GAN Ju-li²

(1.Key Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Science, Wuxi 214081, China; 2.South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510300, China)

Abstract: The Taihu is the third largest freshwater lake in China, and its watershed is one of the most developed regions of China for agriculture, industry and commerce, playing a critical role on water supply, tourism, fishery and navigation. As part of a pilot study of “Freshwater Mussel Watch” on persistent toxic substances, residues of mercury (Hg) in the soft tissues of eighteen bivalve mussels (*Anodonta woodiana*) and sediment samples collected from Wulihu area of the Taihu (the most polluted area in the lake) were analyzed by a NIC Automatic Mercury Analyzer/MA-2000. The residual Hg levels of the mussels were detected and ranged $0.000 \sim 0.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry weight with an average of $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry weight. The Hg detection rate for the mussels was 83%. Those of the sediment samples ranged $0.063 \sim 0.227 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry weight with an average of $0.135 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry weight. Hg levels of the mussels and sediments were significantly lower than the corresponding national standards for limit of Hg in foods (GB 2762—1994 and NY 5073—2001), and sludges (GB 4284—1984) or soils (GB 15618—1995), respectively. Additionally, the Hg index of geoaccumulation (Igeo) in the sediments was only -1.96. The residual Hg situations of both mussels and sediments suggested the same tendency that Hg contamination now in the Wulihu area is very low. This phenomenon should be caused by recent ecological silt dredging in whole Wulihu water area. Significant geographic difference was only documented in the sediment Hg levels.

Keywords: monitoring; *Anodonta woodiana*; mercury; residue; Wulihu; Taihu

汞元素广泛存在于生物圈中,在自然水体中其浓度一般非常低。长期以来通过人类活动进入水体的汞,

经食物链的转移,被人体吸收后对健康产生毒害,在日本甚至引起了公害水俣病^[1-2]。然而,由于监测和评价的缺乏或不足,类似水俣病的汞污染后来又在伊拉克、巴西等地爆发,不断造成重大损失^[3]。

利用双壳贝类监测和预警污染已被广泛用于海洋环境的监测中^[4]。在汞的方面,吕海燕等^[5]报道浙江沿岸不同地点多种贝类生物体中汞含量的差异可以用来进行海洋环境中汞污染的监测。Kljaković-Gašpić

收稿日期:2008-04-06

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2006030);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(6-115043);农业部渔业生态环境重点开放实验室开放基金课题(2007-1)

作者简介:刘洪波(1968—),女,江苏常州人,工程师,从事渔业生态环境监测与保护研究。

通讯联系人:杨 健 E-mail:jiany@ffrc.cn

等^[6]根据其移殖无污染的紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)到曾受汞污染的水域发现,汞在污染水体中长期存在,且贝软组织中汞的含量接近水域悬浮物及底泥中的含量。然而,针对淡水渔业生态环境尚无类似的研究报道。

太湖是我国的第三大淡水湖,既是传统的渔业水域,还具有供水、航运、旅游等多重生态功能。然而,近 20 年来,各类污染物的排放导致其富营养化及污染日益加重。这不仅制约着周边地区包括渔业在内的经济的发展,还有可能危及当地居民的健康。迄今,太湖汞污染的研究尚不多,主要涉及表层沉积物中汞含量和残留历史^[7-9]等,尚缺乏对水生生物体内汞残留的研究。五里湖是太湖污染最严重的水域^[9-10]。笔者研究室曾筛选和利用太湖中广为分布的背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)为指示生物,对五里湖等水域重金属^[11]、有机氯农药^[12]、多氯联苯^[13]进行了有效监测和评价。在此基础上,本研究将继续利用该蚌进行五里湖水域汞残留的研究,并评价汞污染水平、地理差异以及汞残留对该蚌食品卫生质量的影响程度。为更好地掌握和解释该水域背角无齿蚌的监测结果,并和前人的底泥研究结果相比较,笔者还采样和分析了该水域表层底泥中汞的含量。本研究期望能在提供汞污染背景资料的同时,为拟建立的淡水环境持久性污染物的“背角无齿蚌观察”体系提供进一步的理论依据。

1 材料与方法

表层底泥样(彼得生采泥器,参照 GB12998—1991 采样技术指导)于 2003 年 2—3 月采自太湖五里湖的蠡湖宾馆、石塘、犊山水域(图 1)。分别位于或接近五里湖的东、南、西端,水深不足 2 m。每个水域各采样 5 份。泥样风干后研磨成粉末状,过 20 及 80 目的滤筛,再置于干燥器中待用。

背角无齿蚌(蚌耙采集)于 2003—2004 年间采自环五里湖 4 个采样点:蠡湖宾馆、石塘、犊山和威尼斯花园水域(图 1)。活蚌先在经曝气的水中暂养数天,使其排空肠内杂物,再测量基本生物学性状(表



图 1 太湖五里湖采样点(☆)示意图

Figure 1 Sketch map of sampling location(☆)in Wulihu of the Taihu Lake

1),然后解剖获取软组织,称重后于-20℃冰箱内保存。解冻后用 Milli-Q 水冲洗 6 遍,于 80℃的干燥箱中烘 24 h 至恒重。将蚌干样研磨成粉末均一化,置于干燥器中待用。

分别取底泥(0.05 g)和背角无齿蚌(0.1 g)干样,直接用汞分析仪(日本仪器株式会社, NIC MA-2000)测量汞的残留浓度^[14]。国际标准样品 DORM2 确认了研究方法的可靠(汞回收率为 94%)。本方法的检测限为 $2 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于检测限的浓度值定义为 0。

2 结果与讨论

2.1 五里湖水域背角无齿蚌样本中汞的浓度

采自太湖五里湖不同水域共计 18 个样本中,有 15 个检出了汞的残留,检出率为 83%,总体平均浓度为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重,范围为 $0.000 \sim 0.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重。Mann-Whitney 的 *U* 测验表明五里湖的石塘、犊山、蠡湖宾馆各点间残留浓度差异亦不明显,均处于较低的水平($P > 0.05$)(表 2)。

有关太湖(甚至我国湖泊)水域水生生物体内汞的残留和污染的研究尚很少。董元华等^[15]对在靠近本研究水域的鼋头渚 1999 年所捕夜鹭(*Nycticorax nycticorax*)幼鸟的研究发现,其羽毛、脑、肝脏和肌肉组织

表 1 背角无齿蚌样本的生物学性状

Table 1 Biometric characteristics of *Anodonta woodiana*

采样地	采样时间	样本个数	壳宽/cm	壳高/cm	壳长/cm	带壳贝质量/g	软组织质量/g
石塘	2003-03	5	5.48±0.24	10.03±0.46	14.61±0.73	329.84±43.37	113.34±9.56
犊山	2003-03	5	5.23±0.68	9.03±0.56	13.25±1.09	260.22±93.63	72.7±7.49
蠡湖宾馆	2003-03	5	6.04±0.31	10.65±0.85	15.32±0.45	419.98±70.41	133.24±24.43
威尼斯花园	2004-10	3	4.22±0.54	11.17±0.35	11.07±0.12	130.65±24.20	52.00±4.27

表 2 背角无齿蚌样中汞的残留浓度

Table 2 The residual mercury levels in the soft tissues
of *Anodonta woodiana*

采样水域	样本数/ 个	汞浓度/mg·kg ⁻¹ 干重	
		平均值±标准差	范围
石塘	5	0.006±0.003	0.002~0.011
犍山水域	5	0.006±0.002	0.004~0.010
蠡湖宾馆	5	0.007±0.002	0.005~0.011
威尼斯花园	3	0.000±0.000	0.000~0.000
总体	18	0.005±0.003	0.000~0.011
*GB 2762—1994	—	≤0.3 mg·kg ⁻¹ 湿重(鱼类和其他水产食品)	
**NY 5073—2001	—	≤1.0 mg·kg ⁻¹ 湿重(贝类及肉食性鱼类)	

注:* 食品中汞含量卫生标准,** 无公害食品水产品中有毒有害物质限量标准。

中均有明显的汞残留,反映出周边水环境中汞的存在。本研究蚌和底泥的结果同样反映出这一点。苏秋克等^[6]曾报道武汉远郊、城乡结合部和市区具有代表性湖泊鱼类肌肉内的汞平均含量为:鲢 0.002~0.169 mg·kg⁻¹ 湿重, 鲫 0.029~0.195 mg·kg⁻¹ 湿重, 乌鱼 0.011~0.676 mg·kg⁻¹ 湿重。背角无齿蚌软组织干重/湿重的比率约为 1:7^[11]。按此比率,换算出本研究中各采样点蚌中汞的残留量范围约为 0~0.002 mg·kg⁻¹ 湿重。由此可见,本研究的最高结果仅位于其下限。国标《GB 2762—1994 食品中汞含量卫生标准》中规定:鱼类和其他水产品中汞允许限量指标为 0.3 mg·kg⁻¹ 湿重,行标《NY 5073—2001 无公害食品水产品中有毒有害物质限量标准》规定:鱼贝类及肉食性鱼类中汞允许限量指标为 1.0 mg·kg⁻¹ 湿重。本研究的结果也远低于这些限量标准。由此可见五里湖各调查水域目前背角无齿蚌中汞的污染程度很低,即使食用也不会导致汞中毒。环境中汞的不同形态中以甲基汞毒性最强^[17]。太湖靠近五里湖的梅梁湾所采鱼、蚌样肌肉和沉积物中均明显检出了甲基汞^[18]。Malley 等^[19]发现甲基汞甚至可以占到淡水蚌 *Pyganodon grandis* 全身总汞的 63%。但本研究的结果尚不能反映出背角无齿蚌体内汞的形态,有待于今后的进一步研究。

Kljaković-Gašpić 等^[6]通过移殖监测试验,证实了野外蚌体内累积的汞与周边底泥和悬浮物的含量有显著正相关。Riisgård 等^[20]也证明,暴露在长期污染工厂边水域蚌的汞积累程度明显高于受短期汞泄漏事故影响和对照水域中的蚌。背角无齿蚌是底栖动物,五里湖水域蚌样中的汞残留的浓度值均较低(表 2),应该与其生境水体底泥中汞的残留量较低相一致。

2.2 五里湖水域底泥样本中汞的残留浓度

本研究中五里湖水域所有底泥样本中汞的总体浓度范围为 0.063~0.227 mg·kg⁻¹ 干重,平均为 0.135 mg·kg⁻¹ 干重(表 3)。对采样点间浓度数据的差异性检验表明,其浓度的地区差异十分显著。各采样点底泥样本中汞的平均浓度高低顺序为蠡湖宾馆>石塘>犍山水域,但蠡湖宾馆与犍山和石塘间有极显著差异($U=25.000, P<0.01$),犍山和石塘间也有显著差异($U=23.000, P<0.05$)。

表 3 底泥中汞的残留浓度(mg·kg⁻¹ 干重)Table 3 The residual mercury levels in the sediment samples
(mg·kg⁻¹ dry weight)

采样水域	标本名	浓度
石塘	2003STS-1	0.110
	2003STS-2	0.151
	2003STS-3	0.090
	2003STS-4	0.136
	2003STS-5	0.124
平均值±标准差		0.122±0.023
犍山	2003XWLHS-1	0.063
	2003XWLHS-2	0.084
	2003XWLHS-3	0.107
	2003XWLHS-4	0.079
	2003XWLHS-5	0.094
平均值±标准差		0.085±0.016
蠡湖宾馆	2003ZQS-1	0.227
	2003ZQS-2	0.162
	2003ZQS-3	0.210
	2003ZQS-4	0.198
	2003ZQS-5	0.185
平均值±标准差		0.196±0.025
总体		0.135±0.052
GB 4284—1984*		≤ 15
GB 15618—1995**		≤0.15(一级), ≤0.3~1.0(二级), ≤1.5(三级)

注:*《中华人民共和国农用污泥中污染物控制标准(在中性和碱性土壤上)》(mg·kg⁻¹ 干重);

**《中华人民共和国土壤环境质量标准》(mg·kg⁻¹ 干重)。

前人的研究曾报道五里湖底泥的汞污染较为明显^[9,21],平均浓度可高于全太湖平均值的 0.76 倍^[9]。本研究中环五里湖各样点底泥中汞的残留浓度远低于常用于评价沉积物污染程度的国标 GB4284—1984(农用淤泥, 15 mg·kg⁻¹)的限定值,接近 GB 15618—1995 一级标准(维持自然背景土壤环境质量)的限制值 0.15 mg·kg⁻¹。本研究底泥中汞的地积累指数 Igeo

($I_{\text{geo}} = \log_2 [(C_{\text{Hg}} / (K \times B_{\text{Hg}}))]$), 式中: C_{Hg} 为实测汞的浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重; K 为计算设定常数 1.5; B_{Hg} 为普通页岩中汞的地球化学平均值 (0.35) 为 -1.96, 低于前人报道的 0.81 (轻度污染水平), 可以认为是清洁水平^[9]。另外, 犊山样点的浓度值 ($0.085 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 亦明显低于张于平等^[7]2000 年在附近西五里湖样点底泥样本的浓度值 ($0.132 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这种状况可能与该水域持续的清淤效果有关。五里湖于 2002 年 10 月至 2003 年 3 月实施了全水域的表层底泥清淤工程, 深度 0.2~0.7 m, 较明显地降低了五里湖底泥中包括汞在内的重金属浓度 (降幅达 40%~50%)^[22]。所有这些结果反映出, 总体上目前五里湖水域底泥中汞的污染程度很低。这和 2.1 中背角无齿蚌结果所反映出的趋势相一致。

值得注意的是, 虽然经过清淤, 但五里湖某些样点间底泥样本的汞浓度有显著的地域差异。这可能反映出 >0.7 m 底泥中汞的残留浓度仍残留有历史沉积的地理特征。汞的浓度蠡湖宾馆水域的最高, 可能与其离市区最近, 四周曾受市区排入废水影响最大有关; 犊山水域次之, 而相对远离市区的石塘水域的最低。然而, 底泥的这些差异尚不能从本研究相应水域中采集的蚌样中发现, 且蚌样中的浓度甚至普遍低于底泥样本。这种现象的机理尚不清楚, 但至少显示出清淤不仅可有效降低湖泊汞的负荷量, 而且能减轻水生动物受重金属汞污染和胁迫的程度。

3 结论

(1) 采自五里湖四处不同水域 18 个背角无齿蚌样中, 汞的检出率为 83%, 浓度范围为 $0.000 \sim 0.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重。各采样点间蚌样中汞残留浓度无明显的水域差异。

(2) 蚌样反映出太湖五里湖汞污染的程度很低, 并和底泥反映出来的污染程度的趋势相一致。显示出了利用背角无齿蚌作为汞污染监测的生物指示物的可行性。

(3) 蚌样和底泥样本中汞残留浓度均明显低于国家相关的食品卫生、限量标准, 或农用淤泥、土壤环境质量标准, 显示出目前五里湖汞的污染程度很低。五里湖全湖的清淤工程应该是导致本研究的两类样本中汞残留浓度很低的原因。

参考文献:

- [1] Mertz, W. 人和动物的微量元素营养[M]. 朱莲珍, 译. 青岛: 青岛出版社, 1994: 341-349.
- Mertz, W. Trace elements in human and animal nutrition [M]. translated

- by Lianzhen Zhu. Qingdao: Qingdao Publishing House, 1994: 341-349.
- [2] Ullrich S M, Tanton T W, Abdrashitova S A. Mercury in the aquatic environment: a review of factors affecting methylation[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2001, 31(3): 241-293.
- [3] Gochfeld M. Cases of mercury exposure, bioavailability, and absorption[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, 56(1): 174-179.
- [4] Tanabe S, Subramanian A. Bioindicators of POPs: monitoring in developing countries[M]. Kyoto: Kyoto University Press & Melbourne: Trans Pacific Press, 2006: 40.
- [5] 吕海燕, 曾江宁, 周青松, 等. 浙江沿岸贝类生物体中 Hg、Cd、Pb、As 含量的分析[J]. 东海海洋, 2001, 19(3): 25-31.
- LV Hai-yan, ZENG Jiang-ning, ZHOU Qing-song, et al. Study on Hg, Cd, Pb and As in the shellfish along the coast of Zhejiang[J]. *Donghai Marine Science*, 2001, 19(3): 25-31.
- [6] Kljaković-Gašpić Z, Odžak N, et al. Biomonitoring of mercury in polluted coastal area using transplanted mussels[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(1): 199-209.
- [7] 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义[J]. 岩矿测试, 2001, 20(1): 34-36.
- ZHANG Yu-ping, QU Wen-chuan. Determination of heavy metal contents in the sediments from Taihu Lake and its environmental significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2001, 20(1): 34-36.
- [8] 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 113-119.
- LIU En-feng, SHEN Ji, ZHU Yu-xin, et al. Source analysis of heavy metals in surface sediments of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(2): 113-119.
- [9] 顾岗, 陆根法. 太湖五里湖水环境综合整治的设想[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 56-60.
- GU Gang, LU Gen-fa. On the integrated control of water environment of Wuli Lake, Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(1): 56-60.
- [10] 沈亦龙, 何晶晶, 邵立明, 等. 太湖五里湖底泥污染特性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(6): 73-77.
- SHEN Yi-long, HE Pin-jing, SHAO Li-ming, et al. Characteristics of contaminated sediments in Wuli Lake of Tai Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(6): 73-77.
- [11] 杨健, 王慧, 朱宏宇, 等. 背角无齿蚌在五里湖中的重金属富集[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 362-366.
- YANG Jian, WANG Hui, ZHU Hong-yu, et al. Bioaccumulation of heavy metals in *Anodonta woodiana* from Wulihu area of Taihu Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(3): 362-366.
- [12] 边学森, 刘洪波, 甘居利, 等. 五里湖背角无齿蚌体内滴滴涕和六六六的生物富集[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 52-56.
- BIAN Xue-sen, LIU Hong-bo, GAN Ju-li, et al. DDT and HCH residues in *Anodonta woodiana* in Wuli Lake of the Taihu Lake[J]. *Journal of Ecological and Rural Environment*, 2007, 23(2): 52-56.
- [13] 边学森, 刘洪波, 甘居利, 等. 太湖背角无齿蚌中多氯联苯的残留[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 767-772.
- BIAN Xue-sen, LIU Hong-bo, GAN Ju-li, et al. Residues of PCBs in

- Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):767-772.
- [14] Legrand M, Sousa Passos C J, Mergler D, et al. Biomonitoring of mercury exposure with single human hair strand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(12):4594-4598.
- [15] 董元华, 龚钟明, 王 辉, 等. 无锡鼋头渚夜鹭体内重金属残留与分布特征[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(2):213-216.
- DONG Yuan-hua, GONG Zhong-ming, WANG Hui, et al. Residue and distribution of heavy metals in tissues of night heron chick bred in Yuantouzhu, Wuxi[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2):213-216.
- [16] 苏秋克, 祁士华, 蒋敬业, 等. 武汉城市湖泊汞的环境地球化学评价[J]. *地球化学*, 2006, 35(3):265-270.
- SU Qiu-ke, QI Shi-hua, JIANG Jing-ye, et al. Environmental geochemistry assessment of mercury from lakes in Wuhan City, Hubei Province, China[J]. *Geochimica*, 2006, 35(3):265-270.
- [17] Goyer R A, Clarkson T W. Toxic effects of metals[M]//Klaassen CD, editor. *Casarett and Doull's toxicology*, 6th edn. New York:McGraw-Hill, 2001: 811-867.
- [18] 史建波, 廖春阳, 王亚伟, 等. 气相色谱和原子荧光联用测定生物和沉积物样品中甲基汞[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(2):336-339.
- SHI Jian-bo, LIAO Chun-yang, WANG Ya-wei, et al. Determination of methylmercury in biological and sediment samples by capillary gas chromatography on-line coupled with atomic fluorescence spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(2):336-339.
- [19] Malley D F, Stewart A R, Hall B D. Uptake of methyl mercury by the floater mussel, *Pyganodon grandis* (Bivalvia, Unionidae), caged in a flooded wetland[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, 15(6):928-936.
- [20] Riisgård H U, Kjørboe T, Møhlenberg F, et al. Accumulation, elimination and chemical speciation of mercury in the bivalves *Mytilus edulis* and *Macoma balthica*[J]. *Marine Biology*, 1985, 86(1):55-62.
- [21] 袁旭音, 陶于祥. 城市化对湖泊和港湾环境的影响 [J]. *火山地质与矿产*, 2001, 22(2):102-114.
- YUAN Xu-yin, TAO Yu-xiang. Impacts of urbanization on lake and bay[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2001, 22(2):102-114.
- [22] 沈亦龙. 太湖五里湖清淤效果初步分析 [J]. *水利水电工程设计*, 2005, 24(2):23-26.
- SHEN Yi-long. Preliminary analysis on Wulihu dredging effect for Lake Taihu[J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(2):23-26.

致谢: 日本东京大学海洋研究所宫崎信之教授、新井崇臣副教授对本研究的开展给予了技术支持, 在此深表谢意。