

北太湖水、沉积物及典型水生生物样品汞的分布特征与生态风险评价

胡良锋, 王永花*, 王秋英, 陆光华, 谢正鑫, 张正华

(河海大学环境学院, 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 利用 NIC MA-800 型测汞仪对北太湖水、沉积物及典型水生生物样品的汞含量进行测定, 并用单项污染指数法和地积累指数法对其生态风险进行评价。结果表明: 北太湖三湾的水体均未受到明显的汞污染, 均低于《地表水环境质量标准》第 II 类 ($\leq 50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$); 沉积物样品, 除了竺山湖 (平均汞含量为 $150.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 稍高于《土壤环境质量标准》第 I 类 ($\leq 150 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 外, 贡湖和梅梁湖均未超标, 具体污染情况为竺山湖 (中度污染) > 贡湖 (偏中度污染) > 梅梁湖 (轻度污染), 且整个北太湖沉积物处于中度污染水平; 典型水生生物样品 (螺蛳、蚬子和鱼) 的汞含量均低于我国《农产品安全质量无公害水产品安全要求》($\leq 300 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 其污染大小顺序为鱼 (轻污染水平) > 蚬子 (正常背景水平) > 螺蛳 (正常背景水平), 且鱼、蚬子和螺蛳的汞污染空间分布特征均为竺山湖 > 贡湖 > 梅梁湖。对比以往研究结果可知, 汞含量浓度稍高且有上升的趋势, 故应加大对汞污染的监测及治理。

关键词: 北太湖; 汞; 单项污染指数; 地积累指数; 生态风险

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)06-1183-06 doi:10.11654/jaes.2014.06.019

Distribution and Ecological Risk Assessment of Mercury in Water, Sediments and Typical Aquatic Organisms from Northern Taihu Lake

HU Liang-feng, WANG Yong-hua*, WANG Qiu-ying, LU Guang-hua, XIE Zheng-xin, ZHANG Zheng-hua

(College of the Environment, Hohai University, Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taihu Lake, the second largest freshwater lake in China, has become polluted in recent years. However, there is little information about mercury pollution. In this study, mercury contents in water, sediments and typical aquatic organisms in Northern Taihu Lake were determined using a NIC MA-800 Mercury Analyzer. Single Pollution Index and Index of Geoaccumulation were used to assess ecological risks of mercury. The results showed that mercury concentrations in aqueous phase in three bays of Northern Taihu Lake were lower than the secondary-level standard of the National Surface Water Environment Quality Standard ($\leq 50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$). The average mercury concentration in sediments from Gonghu Bay and Meiliang Bay was below the primary standard of the National Soil Environmental Quality Standard ($\leq 150 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), whereas higher from Zhushan Bay. Mercury ecological risks was in order of Zhushan Bay (moderate pollution) > Gonghu Bay (partial moderate pollution) > Meiliang Bay (mild pollution). Mercury contents in typical aquatic organisms (snail, corbicula and fish) were all lower than the criteria for Agricultural Product-Safety Standards for Non-Pollution Aquatic Products of China ($\leq 300 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$). Mercury concentrations in typical aquatic organisms were fish (mild pollution) > corbicula (normal background) > snail (normal background level), with Zhushan Bay > Gonghu Bay > Meiliang Bay. Compared with the results from previous studies, mercury concentrations in Northern Taihu Lake were elevated. Greater efforts should be made to monitor mercury pollution in Northern Taihu Lake.

Keywords: Northern Taihu Lake; mercury; Single Pollution Index; Index of Geoaccumulation; ecological risk

收稿日期: 2013-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51109062); 中国博士后基金(2012M511194); 中国博士后特别基金(2013T60496); 河海大学中央高校业务费(b110-20087); 河海大学博士后基金(411102)

作者简介: 胡良锋(1989—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学分析。E-mail: hlf2012pm@163.com

* 通信作者: 王永花 E-mail: mgflora@hhu.edu.cn

近年来,以汞或其化合物作为原材料的产品,大规模应用于化工、油漆、电子、塑料、仪器、制药及含汞农药等工业中,给我们的生存环境造成严重的危害。进入环境中的汞在水、沉积物及水生生物体(如底栖生物、鱼等)中富集,并通过食物链使人和其他动物中毒。汞进入人体后,不仅会引起脑障碍,还会引起肝炎、肾炎、蛋白尿和尿毒症等症状^[1-2]。

太湖,位于江苏省南部,长江三角洲东部,是中国第二大淡水湖。近年来,由于北太湖周边工业城市无锡、常州、苏州等的发展,湖泊水环境急剧恶化,给当地人民的生存、生活带来了严重影响^[3]。迄今,太湖汞污染的研究尚不多,对北太湖水域水、沉积物及水生生物的汞残留的系统研究更少。徐泽新等^[4]研究了太湖流域湖荡湿地表层沉积物中汞的分布特征和污染情况,结论为:宜兴>苏州>无锡>湖州>常州,其中除常州地区为轻污染外,其余四个地区均为偏中度污染。陈春晓等^[5]研究太湖不同区域表层沉积物中汞的分布结果显示:汞含量在 23~168 ng·g⁻¹ 范围,平均含量为 55 ng·g⁻¹。本研究选择污染严重的北太湖贡湖、梅梁湖和竺山湖为研究区域,确定采样点如图 1 所示,采集表层水、沉积物及典型水生生物(螺蛳、蚬子和鱼)样品。通过测定各样品的汞含量,得到汞污染的分布特征,并通过单项污染指数和地累积指数分析得出汞的污染水平并作出生态风险评价,为北太湖水域汞污染的

预警提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

样品采集于 2013 年 5 月中旬,共选取 8 个采样点,如图 1 所示,其中:贡湖 3 个采样点,分别为 S1(120°24.297' E, 31°26.593' N)、S2(120°20.316' E, 31°26.615' N)和 S3(120°15.204' E, 31°23.775' N);梅梁湖亦 3 个点,分别为 S4(120°10.172' E, 31°25.88' N)、S5(120°12.403' E, 31°31.043' N)和 S6(120°09.012' E, 31°29.567' N);竺山湖因湖湾面积较小而设 2 个点,分别为 S7(120°03.010' E, 31°27.717' N)和 S8(120°02.600' E, 31°25.91' N)。

表层水样(水面下约 20 cm)用 500 mL 的深色聚乙烯瓶采集;表层沉积物(0~20 cm)用彼得森采泥器采集^[4],用塑料勺取其中央未受干扰的 0~2 cm 的表层泥样^[6],并用聚乙烯自封袋封装;生物样品用孔径为 1~3 cm 的底拖网获取,并用聚乙烯自封袋封装,采集的生物样品主要包括螺蛳、蚬子和鱼类,其种类和大小见表 1。所有采样点均重复采集两份样品,且采集的样品低温保存并送回实验室前处理。

1.2 样品的前处理

水样先经 0.45 μm 滤膜除去大颗粒的杂质;沉积物样品先置于 -80 °C 超低温冰箱冷冻,再经冷冻干燥

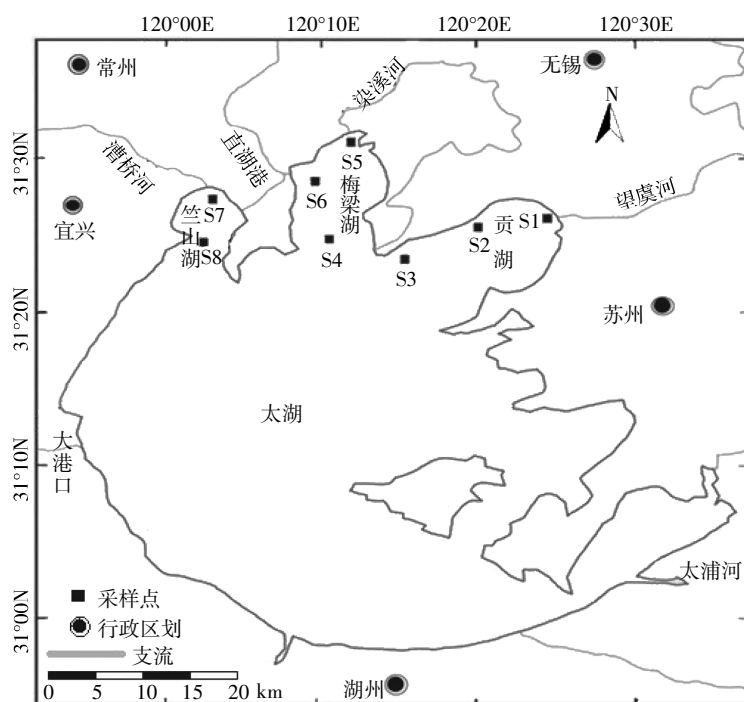


图 1 采样点分布图

Figure 1 Map for sampling points

表1 生物样品的种类和大小

Table 1 Species and size of aquatic organisms in Northern Taihu Lake

生物样品	螺蛳	蚬子	鱼
种类	环棱螺	黄蚬子和花蚬子	鲫鱼、鲤鱼和旁皮鱼等
大小	直径 2~4 cm	直径 2~4 cm	体长 5~15 cm

仪处理至近干,用玛瑙研钵将其研碎并过 150 目尼龙筛备用;螺蛳和蚬子去壳取软体组织,鱼样则取其肌肉,置于 -80°C 超低温冰箱冷冻,再经冷冻干燥仪处理至近干,先用剪刀剪碎,再用玛瑙研钵研磨为粉末备用。为防止样品被污染,取样及碎样等工具及器皿均先经净化处理^[6]。

1.3 样品的测量

分别取经处理过的各采样点水样(5 mL),沉积物(0.1 g)、螺蛳(0.1 g)、蚬子(0.1 g)和鱼(0.1 g)干样各两份,直接用汞分析仪(日本仪器株式会社, NIC MA-800)测量汞的浓度^[7-8],其测定原理是美国 EPA 认可的双光束冷原子吸收法,采用的工作原理是物理法,即金汞齐方法。本方法测水样的检测限约为 $5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,测固体样的检测限约为 $0.1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.4 评价标准

本文采用的评价标准:水样采用《地表水环境质量标准》第Ⅱ类^[9];沉积物采用《土壤环境质量标准》第Ⅰ类^[10];螺蛳、蚬子和鱼样采用《农产品安全质量无公害水产品安全要求》^[11]。

2 结果与讨论

2.1 水样中汞的污染分析

2.1.1 水样中汞的分布特征

北太湖各采样点的水样中汞含量见表2。可以看出,各水样中汞的含量没有显著性差异,仅S1点(望虞河入湖口)稍高,与王少峰等^[12]的研究结果(汞平均含量为 $30\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)基本吻合,均低于《地表水环境质量标准》第Ⅱ类(汞含量 $\leq 50\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[9]。尽管如此,其含量也比较接近Ⅱ类水质标准值($50\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$),北太湖作为无锡、苏州等城市的重要饮用水、渔业用水等水源地,其水质安全应得到足够重视。

2.1.2 水样中汞的生态风险评价

本研究对水样的汞污染生态风险评价采用单项污染指数法^[13],计算公式如下:

$$I_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: I_i 表示某污染物的单项污染指数; C_i 表示某污

表2 水样汞含量($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 2 Mercury concentrations in water sample($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)

采样区域	采样点	各点汞平均含量	各湖域汞平均含量
贡湖	S1	31	27.7
	S2	24	
	S3	28	
梅梁湖	S4	25	26
	S5	26	
	S6	27	
竺山湖	S7	26	26.5
	S8	27	

染物的实测浓度; S_i 表示某污染物的评价标准。

$I_i > 1$ 表示该污染物超标, I_i 值越大,表示受该污染物污染越严重;如果 $I_i \leq 1$,则表示该污染物未超标。

参照表2的数据及《地表水环境质量标准》第Ⅱ类汞含量的限值($\leq 50\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[9],通过公式(1),可得到评价结果如表3:贡湖、梅梁湖、竺山湖及整个北太湖的单项污染指数均小于1,且数值十分相近。这表明北太湖水样汞污染程度较轻,且三湖湾的水体汞污染情况相似,没有明显差异。

2.2 沉积物的汞污染分析

2.2.1 沉积物中汞的分布特征

北太湖各采样点的沉积物中汞含量见表4和图2。除了竺山湖(S7、S8)相对较高之外,其他点的汞含量变化不大(S1望虞河口汞含量稍高),只有竺山湖的平均汞含量超过了《土壤环境质量标准》第Ⅰ类(汞

表3 水样汞污染单项污染指数评价结果

Table 3 Assessment results of mercury pollution in water by Single Pollution Index

考察湖域	贡湖	梅梁湖	竺山湖	北太湖
汞的平均含量/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	27.7	26	26.5	26.73
第Ⅱ类地表水标准/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50
单项污染指数(I_i)	0.554	0.52	0.53	0.535

表4 沉积物汞含量($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)Table 4 Mercury concentrations in sediment samples($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)

采样区域	采样点	各点汞平均含量	各湖域汞平均含量
贡湖	S1	95	68.7
	S2	68	
	S3	43	
梅梁湖	S4	56.5	63
	S5	74	
	S6	58.5	
竺山湖	S7	156.5	150.5
	S8	144.5	

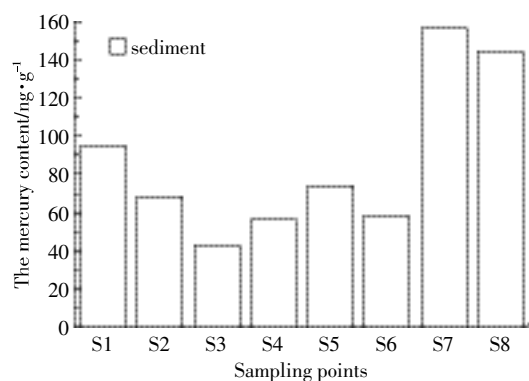


图2 各采样点的沉积物中汞含量

Figure 2 Contents of mercury in sediments from each sampling point

含量 $\leq 150 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[10]。本研究与 Chen 等^[5]的结果基本一致,但总体高于其研究结果:竺山湖($116 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)>梅梁湖($71 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)>贡湖($54 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$),尤其竺山湖汞含量增加明显,可能源于太湖最大的支流——漕桥河流入竺山湖带来的污染^[14]。贡湖的汞含量高于梅梁湖,可能是由于 S1 采样点(望虞河入湖口)的汞污染加重所导致的。

2.2.2 沉积物中汞的生态风险评价

本研究沉积物的汞污染的风险评价采用地累积指数(I_{geo})法^[15],它是一种研究环境沉积物中重金属污染的定量指标,近年来被国内外学者广泛应用于重金属对沉积物污染的评价^[16]。计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{k B_n} \right] \quad (2)$$

式中: C_n 表示样品中某元素的浓度; B_n 表示该元素的地球化学背景浓度,太湖沉积物汞含量背景值约为 $22 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[17]; k 为修正指数,通常用来表征沉积特征、岩石地质及其他影响因素^[18],一般取值为 1.5。

I_{geo} 的范围与污染程度的对应关系分别是: $I_{\text{geo}} \leq 0$ (清洁), $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ (轻度污染), $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ (偏中度污染), $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ (中度污染), $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ (偏重污染), $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ (重污染)和 $I_{\text{geo}} > 5$ (严重污染)^[16]。

通过公式(2),可得到评价结果如表5:竺山湖的沉积物汞污染最重,达到中度污染的程度;其次是贡湖,处于偏中度污染;然后是梅梁湖,属于轻度污染。对于整个北太湖而言,沉积物汞的污染程度达到了偏中度污染的程度,应得到足够重视。

2.3 水生生物的汞污染分析

2.3.1 水生生物中汞的分布特征

北太湖的各采样点的水生生物中汞的含量见表6和图3。从生物种类来看,鱼体中汞的富集最大,蚬子

表5 沉积物汞污染地累积指数评价结果

Table 5 Assessment results of mercury pollution in sediment by

Index of Geoaccumulation				
考察湖域	贡湖	梅梁湖	竺山湖	北太湖
汞的平均含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	68.7	63	150.5	94.07
太湖沉积物汞含量背景值/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	22	22	22	22
地累积指数(I_{geo})	1.06	0.93	2.19	1.51
污染程度	偏中度污染	轻度污染	中度污染	偏中度污染

表6 典型水生生物中汞的含量

Table 6 Contents of mercury in typical aquatic organisms

生物种类	采样区域	采样点	各点汞平均含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	各湖域汞平均含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$
螺蛳	贡湖	S1	38	28.3
		S2	28.5	
		S3	18.5	
	梅梁湖	S4	27.5	23.7
		S5	18.5	
		S6	25	
	竺山湖	S7	37	30.5
		S8	24	
蚬子	贡湖	S1	77	52.3
		S2	49.5	
		S3	30.4	
	梅梁湖	S4	38.5	29
		S5	17.5	
		S6	31	
	竺山湖	S7	61.1	57.8
		S8	54.5	
鱼	贡湖	S1	85	68.8
		S2	72	
		S3	49.5	
	梅梁湖	S4	52.3	62.8
		S5	38	
		S6	98	
	竺山湖	S7	81	80.5
		S8	80	

次之,螺蛳的最小。这是由于鱼的营养级高于蚬子和螺蛳,可能是由于汞通过食物链积累富集的结果^[9],而底栖生物蚬子和螺蛳除了个别几个点外,污染情况差别不大。从采样区域来看,汞的污染程度依次为竺山湖>贡湖>梅梁湖,与沉积物中汞含量的变化趋势结果一致。本研究得出水生生物中的汞含量的范围为 $23.7 \sim 80.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,与范丽丽等^[20]对苏州太湖水生生物的汞含量的研究结果($15 \sim 84 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)基本一致,而且明显低于我国《农产品安全质量无公害水产品安全要

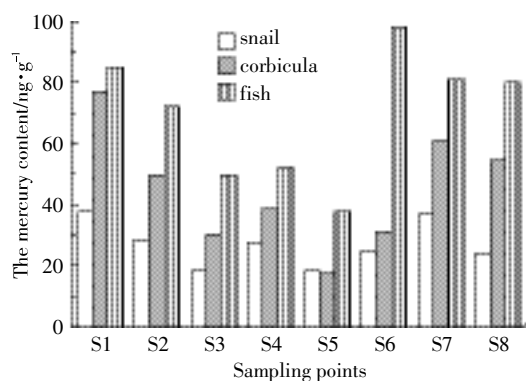


图3 各采样点的水生生物中汞含量

Figure 3 Contents of mercury in aquatic organisms from each sampling point

求》总汞限量标准(汞含量 $\leq 300 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[11]和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)对水产品的总汞限量标准(汞含量 $\leq 500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[21],可见目前北太湖水域水生生物的汞的污染程度相对较低。

2.3.2 水生生物中汞的生态风险评价

本研究水生生物的汞污染的风险评价采用单项污染指数法^[22],计算公式同式(1)。单项污染指数 I 与污染程度的对应关系分别为: $I \leq 0.2$ (正常背景水平), $0.2 < I \leq 0.6$ (轻污染水平), $0.6 < I \leq 1.0$ (污染水平)和 $I > 1.0$ (重污染水平)^[23]。

参照表 6 的数据及我国《农产品安全质量无公害水产品安全要求》总汞限量标准(汞含量 $\leq 300 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[11],可得到评价结果如表 7:贡湖、梅梁湖及竺山湖的螺蛳和蚬子的汞含量都是正常背景水平,而鱼的汞含量都处于轻污染水平;竺山湖的污染最严重,其次是贡湖,污染最轻的是梅梁湖,与 2.3.1 的分析结果相一致。同时,对于整个北太湖而言,螺蛳和蚬子的汞含量都是正常背景水平,鱼的汞含量处于轻度污染水平。

表 7 水生生物单项污染指数评价结果

Table 7 Assessment results of mercury pollution in aquatic organisms by Single Pollution Index

考察湖域		贡湖	梅梁湖	竺山湖	北太湖
螺蛳	平均汞含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	28.3	23.7	30.5	27.5
	单项污染指数(I)	0.094	0.079	0.102	0.092
	污染程度	正常背景水平	正常背景水平	正常背景水平	正常背景水平
蚬子	平均汞含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	52.3	29	57.8	46.4
	单项污染指数(I)	0.174	0.097	0.193	0.155
	污染程度	正常背景水平	正常背景水平	正常背景水平	正常背景水平
鱼	平均汞含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	68.8	62.8	80.5	70.7
	单项污染指数(I)	0.229	0.209	0.268	0.236
	污染程度	轻污染水平	轻污染水平	轻污染水平	轻污染水平

3 结论

(1)总体而言,三个湖湾的水样的汞污染差别不大,都在《地表水环境质量标准》第Ⅱ类要求之内;沉积物的汞含量,除了竺山湖的平均汞含量超过了《土壤环境质量标准》第Ⅰ类的限值外,贡湖和梅梁湖都在此标准范围之内,且污染分布情况是依次为竺山湖>贡湖>梅梁湖;对于水生生物的汞含量,无论是鱼,还是软体动物螺蛳和蚬子,均低于我国《农产品安全质量无公害水产品安全要求》的限值。汞污染程度为鱼>蚬子>螺蛳,而汞污染分布情况依次为竺山湖>贡湖>梅梁湖。

(2)采用单项污染指数法和地累积指数法对水样、沉积物及水生生物进行生态风险评价:北太湖水样未受到明显的汞污染,且三个湖湾的单项污染指数数值相近,汞污染的情况相似;北太湖三个湖湾的沉积物受到汞污染程度各异,竺山湖中度污染,贡湖偏中度污染,而梅梁湖为轻度污染,整个北太湖的沉积物的汞污染平均水平为偏中度污染;北太湖三个湖湾三种水生生物中,鱼的汞污染相对严重,属于轻污染水平,螺蛳和蚬子汞含量处于正常背景水平,这与整个北太湖三种水生生物的汞污染的平均水平的结果基本一致,同时从单项污染指数数值可以得出三个湖湾生物汞污染程度为竺山湖>贡湖>梅梁湖。

参考文献:

- [1] 李 静, 梁嘉琳. 我国汞污染防治面临巨大挑战[N]. 经济参考报, 2011-10-24(3).
- LI Jing, LIANG Jia-lin. Mercury pollution prevention in China is facing a huge challenge[N]. *Economic Information Daily*, 2011-10-24(3).
- [2] Grandjean P. Methylmercury toxicity and functional programming [J]. *Reproductive Toxicology*. 2007, 23(3): 414-420.
- [3] 舒卫先, 李世杰. 北太湖沉积岩芯中有机氯农药 HCH 和 DDT 残留

- 垂直分布特征及沉积环境意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 683–689.
- SHU Wei-xian, LI Shi-jie. Vertical distribution characteristics of HCHs and DDTs in two sediment cores from northern Taihu Lake and their sedimentary environment significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 683–689.
- [4] 徐泽新, 张敏. 太湖流域湖荡湿地沉积物砷汞的空间分布及污染评价[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 626–632.
- XU Ze-xin, ZHANG Min. Spatial distribution and pollution assessment of As and Hg in sediments from Taihu Lake watershed[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(5): 626–632.
- [5] Chen C X, Zheng B H, Jiang X, et al. Spatial distribution and pollution assessment of mercury in sediments of Taihu Lake, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(2): 316–325.
- [6] 徐勇, 马绍赛, 陈聚法, 等. 大沽河湿地表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1209–1216.
- XU Yong, MA Shao-sai, CHEN Ju-fa, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in Dagu River wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1209–1216.
- [7] 刘洪波, 杨健, 甘居利. 太湖五里湖水域背角无齿蚌中汞的残留[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 411–415.
- LIU Hong-bo, YANG Jian, GAN Ju-li. Residues of mercury in the bivalve mussels *Anodonta woodiana* from the Wulihu area of the Taihu, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 411–415.
- [8] 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.
- [9] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration, State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 3838—2002 The surface water environment quality standards[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [10] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 18668—2008 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- Ministry of Environmental Protection, State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 18668—2008 Soil environmental quality standard[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18406.4—2001 农产品安全质量无公害水产品安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB/T 18406.4—2001 Agricultural product safety and quality pollution-free aquatic products safety requirements[S]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [12] Wang S F, Xing D H, Jia Y F, et al. The distribution of total mercury and methyl mercury in a shallow hypereutrophic lake (Lake Taihu) in two seasons[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27: 343–351.
- [13] 杜韶娟. 珠江出海口门水环境中砷、汞、铅、镉的测定及评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- DU Shao-xian. Determination and evaluation of arsenic, mercury, lead and cadmium in water environment of the Pearl River Estuaries[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] Zhang Y, Hu X N, Yu T. Distribution and risk assessment of metals in sediments from Taihu Lake, China using multivariate statistics and multiple tools[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, 89: 1009–1015.
- [15] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of Rhine River[J]. *Geographical Journal*, 1969, 2: 108–118.
- [16] 洪志方. 合肥市南淝河水体重金属元素污染分析与评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- HONG Zhi-fang. Analyse and investigation on heavy metal contamination in water of the Nanfei River in Hefei[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [17] 黄顺生, 范迪富, 陈宝, 等. 太湖北部沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 江苏地质, 2005, 29(1): 43–45.
- HUANG Shun-sheng, FAN Di-fu, CHEN Bao, et al. A temporal assessment on ecological risk caused by heavy metals in North Taihu basin[J]. *Jiangsu Geology*, 2005, 29(1): 43–45.
- [18] 弓晓峰, 尹丽, 崔秀丽. 鄱阳湖湿地汞污染的评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1250–1252.
- GONG Xiao-feng, YIN Li, CUI Xiu-li. Evaluation on mercury pollution in Poyang Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1250–1252.
- [19] 姚刚. 鄱阳湖水生生物中痕量元素砷硒汞的环境和生物效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- YAO Gang. Studies on environmental and biological effects of trace elements of arsenic, selenium, and mercury in aquatic organism in Poyang Lake, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [20] 范丽丽, 傅春玲, 丁薇薇. 苏州地产水生蔬菜和太湖水产品总汞含量分析[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 273–275.
- FAN Li-li, FU Chun-ling, DING Wei-wei. Analysis of total mercury in aquatic vegetables cultivated in Suzhou and aquatic products in Taihu Lake[J]. *Food Science*, 2012, 33(12): 273–275.
- [21] United National Environment Program Chemicals. Global mercury assessment[R]. Geneva: UNEP Chemicals, 2002.
- [22] 苗利军, 王静, 刘 晓. 我国海产品的汞含量分布及安全性评价[J]. 现代食品科技, 2013, 29(3): 687–691.
- MIAO Li-jun, WANG Jing, LIU Xiao. The distribution of the mercury content in Chinese marine products and their safety evaluation[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(3): 687–691.
- [23] 贾晓平, 林 钦, 李纯厚, 等. 广东沿海牡蛎体 Pb 含量水平及时空变化趋势[J]. 水产学报, 2000, 24(6): 527–532.
- JIA Xiao-ping, LIN Qin, LI Chun-hou, et al. Concentrations and temporal-spatial variation trend of Pb in the oysters from Guangdong coastal waters[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2000, 24(6): 527–532.