

## 南太湖区域表层沉积物中有机氯化合物及重金属污染现状\*

曹源<sup>1,2</sup>, 仇雁翎<sup>1,2\*\*</sup>, 杨晓红<sup>3</sup>, 李力<sup>1,2</sup>, 朱志良<sup>1,2</sup>, 赵建夫<sup>1,2</sup>, 程炳宏<sup>1,2</sup>, 陈江<sup>3</sup>, 张海燕<sup>3</sup>, 姚玉鑫<sup>3</sup>

(1: 同济大学环境科学与工程学院长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

(2: 同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

(3: 浙江省湖州市环境保护监测中心站, 湖州 313000)

**摘要:** 对南太湖水域表层沉积物中的 19 种有机氯化合物及 6 种重金属的含量、分布及其生态风险进行了研究和评价。所测样品中有机氯农药 (OCPs) 和多氯联苯 (PCBs) 含量范围分别为 0.51 - 4.98、1.49 - 15.15 ng/g(dw), 与国内其它水域沉积物中 OCPs、PCBs 的含量相比处于较低水平。OCPs 中的主要污染物是  $\alpha$ -六六六, PCBs 中含量最高的是八氯联苯 CB194 和三氯联苯 CB28。所采沉积物样品中 6 种重金属的含量水平分别为 Cu: 14.4 - 79.7 mg/kg, Zn: 69.3 - 214 mg/kg, Cr: 65.0 - 99.5 mg/kg, Ni: 24.8 - 48.7 mg/kg, Pb: 12.3 - 39.2 mg/kg 及 Cd: 0.015 - 0.563 mg/kg。用风险评估低值 (ERL) 和风险评估中值 (ERM) 对有机氯化合物进行了生态风险效应评价, 发现所测沉积物中滴滴涕 (DDTs) 的值 90% 处于 ERL 值以下,  $\gamma$ -六六六与 PCBs 的值 100% 小于 ERL。利用潜在生态危害指数法对研究区沉积物进行生态危害评价, 结果表明, 沉积物中重金属的生态危害程度都较小, 单项生态危害指数相对较高的重金属是 Cd, 各采样点中 XMK-0 重金属的潜在生态危害相对较高。总体而言, 南太湖表层沉积物中上述有机氯化合物和重金属的含量水平较低, 未对生态构成严重威胁。但考虑到这两类污染物的生物积累性和毒性, 仍需注意预防此类污染。

**关键词:** 南太湖; 沉积物; 有机氯化合物; 重金属; 风险评价

## Pollution status of organochlorines and heavy metals in surface sediment of southern Lake Taihu

CAO Yuan<sup>1,2</sup>, QIU Yanling<sup>1,2</sup>, YANG Xiaohong<sup>3</sup>, LI Li<sup>1,2</sup>, ZHU Zhiliang<sup>1,2</sup>, ZHAO Jianfu<sup>1,2</sup>, CHENG Binghong<sup>1,2</sup>, CHEN Jiang<sup>3</sup>, ZHANG Haiyan<sup>3</sup> & YAO Yuxin<sup>3</sup>

(1: Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

(2: State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

(3: Huzhou Environmental Monitoring Center, Huzhou 313000, P. R. China)

**Abstract:** Concentration and distribution of 19 organochlorines and 6 heavy metals in the surface sediment of southern Lake Taihu were studied and the relevant risk assessment was carried out. The results showed the concentrations of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) detected ranged from 0.51 - 4.98 ng/g(dw) and 1.49 - 15.15 ng/g(dw), respectively, which was at a low contamination level compared to other fresh water sediments in China. The congener of  $\alpha$ -hexachlorocyclohexane ( $\alpha$ -HCH) was the dominant pollutant among OCPs and CB194, and CB28 were the dominant PCBs. The concentration ranges of Cu, Zn, Cr, Ni, Pb and Cd in the surface sediments of southern Lake Taihu were 14.4 - 79.7 mg/kg, 69.3 - 214 mg/kg, 65.0 - 99.5 mg/kg, 24.8 - 48.7 mg/kg, 12.3 - 39.2 mg/kg and 0.015 - 0.563 mg/kg, respectively. Effects range low

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07421-002)和污染控制与资源化研究国家重点实验室自主研究课题项目(PCRRY09009)联合资助。2010-08-19 收稿; 2010-12-17 收修改稿。曹源, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: becky8667@163.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: ylqiu@tongji.edu.cn.

(*ERL*) and effects range median (*ERM*) were used to evaluate the ecological risk of organochlorines. It was found that 90% of the sampling sites had a dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs) value lower than the *ERL*, and the  $\gamma$ -HCH and PCBs values of all sites were lower than the *ERL*. The risk assessment was completed on heavy metals in sediments by using the potential ecological risk index (*RI*). The results indicated that the overall ecological risk caused by heavy metals was low. The potential ecological risk index of Cd was relatively higher, and the *RIs* of several heavy metals in XMK-0 were relatively higher than that in other sites. Although the concentration levels of the above organochlorine and heavy metal pollutants in the surface sediments of southern Lake Taihu were low and no serious threat has been observed to the ecological system, the prevention to these contaminations should not be ignored for their accumulative effect and toxicity in the environment.

**Keywords:** Southern Lake Taihu; sediment; organochlorines; heavy metal; risk assessment

沉积物是水体中污染物的主要蓄积场所,也是水体的潜在污染源.由于持久性有机污染物(POPs)和重金属的特性,容易吸附在悬浮颗粒物上,进而沉降在水体底部<sup>[1-2]</sup>.受到污染的沉积物,可能会对水生生物(如:植物、底栖动物)构成威胁,甚至可以通过食物网对其它生物(如:鱼类、鸟类)产生影响<sup>[3]</sup>.由于POPs和重金属具有毒性,并且在环境中不易去除,是影响湖泊质量的两个重要的环境问题.因此对沉积物中的POPs和重金属含量进行分析,能够对其潜在的生态危害获得认识.

太湖是我国第三大淡水湖,平均水深2m,湖泊面积2427.8km<sup>2</sup>,是典型的浅水淡水湖.该湖泊位于江苏省和浙江省的交界处<sup>[4]</sup>,对于周边城市,该湖泊在航运、旅游、灌溉以及提供饮用水源等方面发挥着重要的作用.由于太湖流域人口稠密、工农业发展迅速,导致太湖水环境不断恶化,富营养化污染严重,局部区域有机污染严重<sup>[5]</sup>,对当地的生态环境和居民的生活用水安全构成潜在威胁.

近年来,有学者对太湖流域沉积物质量进行了大量调查研究<sup>[1,5-7]</sup>.然而这些研究区域主要集中在北太湖,对于太湖入湖河流流量最大、近年来越来越多地出现春季全湖首次蓝藻暴发的南太湖区域,则鲜有研究.本文研究南太湖地区的沉积物中有机氯农药(OCPs)、多氯联苯(PCBs)等有机氯化物(OCs)以及重金属的含量与分布情况,并对本区域沉积物的生态风险进行评价.

## 1 材料与方法

### 1.1 沉积物样品的采集

2009年8月,在靠近浙江省湖州的南太湖区域采集10个表层沉积物样品(1-10cm),采样点分布见图1.分别在夹浦、新塘、小梅口和新港口等四个主要的河流入湖口处及距离河口一定距离的湖面上布设采样点,以考察入湖河流和距离河口远近对本区域表层沉积物中污染物含量的影响.其中小梅口是太湖最大的人湖河流苕溪的入湖口之一,周边建有南太湖旅游度假区;新港口也是苕溪的入湖口之一,邻近市区;夹浦港和新塘港的入湖口位于长兴县.在夹浦、新塘、小梅口三处按距离河口0、5、10km分别设置采样点.所采集样品经自然阴干、研磨除杂、过40目筛,处理完毕后在-20℃保存,待分析使用.

### 1.2 有机氯化物含量分析

取4.0g沉积物粉末,加入1.5g活化铜片除去硫,加入替代标CB53与CB200,用30ml正己烷和丙酮混合液(体积比为1:1)进行微波萃取(Milestone ETHOS).消解条件为:120℃,20min,800W.冷却的萃取液过脱脂棉承托的无水硫酸钠后过GPC(GPC ULTRA, LC Tech)去除大分子杂质且浓缩定容;然后将提取液过经活化的Florisor小柱(Supelco-LC-18, 57100-U),用正己烷与丙酮的混合液(体积比为9:1)重复洗脱三次,提取液再转移至GC样品瓶继续浓缩,最后定容为100 $\mu$ l,加入内标CB189待分析.

采用Hewlett-Packard 5890型气相色谱与5973型质谱联用系统对有机氯化物进行定性定量.采用扫描模式.色谱条件为:色谱柱为Agilent HP-5+HT-5(45m $\times$ 300 $\mu$ m $\times$ 0.22 $\mu$ m);载气(高纯氦气)恒压为10Psi;柱温初始为80℃(保持1.35min),以40℃/min的速率升至195℃(保持1min),继续以1℃/min的速率升至210℃,然后以40℃/min的速率升温至300℃(保持2min);进样口和离子源温度分别为260℃和360℃;无分流自动进样1 $\mu$ l.利用标准样品和化合物的质谱图保留时间定性,内标峰面积法定量.

本研究所分析的6种滴滴涕(DDT)同系物(*p,p'*-DDT、*o,p'*-DDT、*p,p'*-DDE、*o,p'*-DDE、*p,p'*-DDD和*o,p'*-DDD)、4种六六六异构体( $\alpha$ -HCH、 $\beta$ -HCH、 $\gamma$ -HCH和 $\delta$ -HCH)、9种多氯联苯(PCB)(CB18,28,31,44,

52,138,153,183,194)、2种用作替代标的PCB(CB53,200)和1种PCB内标(CB189)均购自AccuStandard(New Haven,CT,USA)。

采用空白样、平行样、空白加标和基质加标,以控制分析流程的回收率,方法空白样品中未检出目标污染物。各标准工作曲线的线性相关系数都在0.99以上,各标样的平均回收率为68.8%–79.1%,以目标化合物浓度对照峰高做线性回归分析,以三倍的基线噪声作为方法的最低检出量,计算得出每克样品中最低检出浓度为0.03ng。

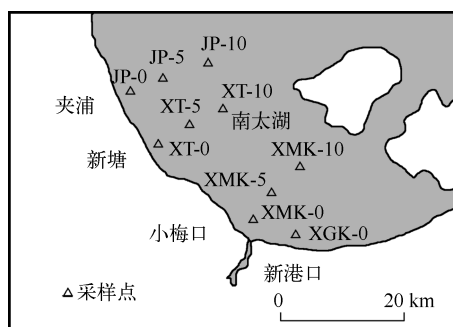


图1 南太湖表层沉积物采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites for surface sediment in southern Lake Taihu

### 1.3 重金属含量分析

取3.0g样品于消解罐中,加入5ml浓HNO<sub>3</sub>、3ml HF、0.5ml HClO<sub>4</sub>进行消解。消解条件为:5min升温至150℃,保持10min;然后5min上升到190℃,保持10min。每个样品必须消解两次到无色。将消解好的溶液在170℃电热板上加热到小体积以去除酸。最后,在样品中加入1ml HNO<sub>3</sub>,用蒸馏水定容,进ICP光谱(Perkin Elmer Optima 2100 DV)分析。设置空白样,消除分析过程中污染物混入的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 南太湖表层沉积物中有机氯化合物的含量及分布

2.1.1 有机氯农药 南太湖表层沉积物中有机氯农药(OCPs)的含量显示,有机氯农药中主要的污染物是 $\alpha$ -HCH,检出率为100%;在所有样品中, $\beta$ -HCH、 $\gamma$ -HCH、*o,p'*-DDT、*p,p'*-DDT、*p,p'*-DDE、*o,p'*-DDD等OCPs均低于检出限;只在一个样点检出了少量*o,p'*-DDE和*p,p'*-DDD(表1),结果表明沉积物中所检出的部分有机氯农药主要为历史残留,没有发现新近使用的迹象。另外,夹浦三个采样点的OCPs含量高于其它采样点,其原因可能是该区域离市区较远,周边土地以农田为主,因此有较高的农药残留随地表径流输入湖中。其它入湖河流河口处及其延伸线的沉积物中OCPs的含量与距河口远近并无明显的相关性(表1)。

与2006年赵中华等<sup>[5]</sup>对太湖表层沉积物中有机氯农药残留的报道值(4.22–460.99ng/g(dw))相比,本研究所得南太湖区域沉积物中OCPs的浓度要低很多,但与该研究小梅口处的OCPs检出浓度相似。洪湖<sup>[8]</sup>表层沉积物中HCHs浓度范围为0.54–16.36ng/g(dw)、DDTs为0.89–7.91ng/g(dw),高于本研究结果;黄宏等<sup>[9]</sup>对淮河流域沉积物中有机氯农药的残留进行测定,16种有机氯农药的总含量水平为8.88–16.22ng/g(dw)。综上可知,和国内其他水体相比,南太湖水域OCPs的污染较轻。

2.1.2 多氯联苯 多氯联苯(PCBs)在样品中的含量表明,PCBs在10个采样点均有检出,含量最高的是CB194和CB28。PCBs含量最高的点位于小梅口0km处(表2)。陈静生等<sup>[10]</sup>报道,我国河流沉积物中的多氯联苯主要是四、五和六氯联苯,本研究中三氯代至六氯代联苯占PCBs总量的63.4%,是PCBs的主要组成部分。同时南太湖表层沉积物中PCBs模式组成有着自己的特点:八氯代CB194在所有的沉积物样品中均检出,这可能与该地区的工业类型有关,但造成这一现象的原因还有待进一步研究。同时PCBs在沉积物中的浓度分布与采样点距河口的距离没有明显规律。

本研究所得 PCBs 总量与陈燕燕等<sup>[6]</sup>关于太湖的报道值(1.35 - 13.8ng/g(dw))较接近,计勇<sup>[7]</sup>等研究了太湖北部湾表层沉积物中多氯联苯的分布特征,夏季 10 种 PCBs 的残留浓度为 2.52ng/g(dw). 与国内闽江口(15.14 - 57.93ng/g(dw), 均值 34.49ng/g(dw))<sup>[11]</sup>、珠江口(11.13 - 23.23ng/g(dw), 均值 16.9ng/g(dw))<sup>[12]</sup>等工业发达地区相比较,南太湖表层沉积物中 PCBs 总量相对较低.

表 1 沉积物样品中 OCPs 含量(ng/g(dw))

Tab. 1 Concentrations of OCPs in sediment samples(ng/g(dw))

采样点	<i>o,p'</i> -DDE	<i>p,p'</i> -DDE	<i>o,p,p'</i> -DDD	<i>p,p,p'</i> -DDD	<i>o,p,p'</i> -DDT	<i>p,p,p'</i> -DDT	∑DDTs	α-HCH	β-HCH	γ-HCH	δ-HCH	∑HCHs	OCPs
JP-0	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	2.93	<0.03	<0.03	<0.03	2.93	2.93
JP-5	2.29	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	2.29	0.46	<0.03	<0.03	0.52	0.98	3.27
JP-10	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.52	<0.03	<0.03	<0.03	0.52	0.52
XT-0	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.23	<0.03	<0.03	<0.03	0.23	0.23
XT-5	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.30	<0.03	<0.03	<0.03	0.30	0.30
XT-10	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.53	<0.03	<0.03	<0.03	0.53	0.53
XMK-0	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.59	<0.03	<0.03	<0.03	0.59	0.59
XMK-5	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.14	<0.03	<0.03	<0.03	0.14	0.14
XMK-10	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.51	<0.03	<0.03	<0.03	0.51	0.51
XGK-0	<0.03	<0.03	<0.03	0.44	<0.03	<0.03	0.44	0.15	<0.03	<0.03	<0.03	0.15	0.59

表 2 沉积物样品中 PCBs 含量(ng/g(dw))

Tab. 2 Concentrations of PCBs in sediment samples(ng/g(dw))

采样点	CB18	CB31	CB28	CB52	CB44	CB153	CB138	CB183	CB194	∑PCBs
JP-0	1.26	<0.03	2.02	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	1.21	1.21	5.70
JP-5	<0.03	4.3	0.92	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.60	5.82
JP-10	<0.03	<0.03	0.22	1.43	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.84	2.49
XT-0	<0.03	0.07	0.24	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	1.18	1.49
XT-5	<0.03	<0.03	2.60	0.76	0.38	<0.03	0.13	<0.03	0.93	4.80
XT-10	1.55	<0.03	0.38	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	2.07	4.00
XMK-0	<0.03	<0.03	1.65	2.62	<0.03	<0.03	3.62	0.68	6.58	15.15
XMK-5	<0.03	<0.03	0.60	<0.03	<0.03	<0.03	1.33	<0.03	1.08	3.01
XMK-10	<0.03	<0.03	3.10	4.62	<0.03	0.26	<0.03	0.75	1.39	10.12
XGK-0	<0.03	<0.03	0.88	<0.03	<0.03	<0.03	2.24	<0.03	2.95	6.07

## 2.2 南太湖表层沉积物中重金属的含量及分布

样品中重金属含量分布表明,其中沉积物中 Cu、Pb 和 Cd 的最高值出现在 XMK-0,同时 Zn 浓度的次高值也出现在该样点(图 2),此处的 PCBs 含量也最高(表 2). 另外,XGK-0 处各重金属污染物的浓度也较高. 原因可能是由于这两个采样点位于太湖最大的入湖河流苕溪入湖口. 东苕溪发源自天目山,流经临安、余杭、德清、湖州,在湖州与西苕溪会合后由小梅口、新港口等注入太湖. 河水沿途携带的城市污水、工业废水中的重金属污染物和 PCBs 浓度相对较高,而经过湖水稀释后,在距离入湖口较远处污染物浓度下降. 由于

水中的污染物会随悬浮颗粒物沉降下来,因此湖泊表层沉积物中污染物浓度呈现出在苕溪入湖口处高,远离入湖口的地方低的现象.而这一规律在夹浦港和新塘港及其延伸线上并无体现,原因可能是因为这两条河流流经区域主要为郊区,携带污染物含量相对低所致.此外,由于太湖是浅水湖泊,采样时间为夏季,降雨、台风频繁,入湖径流量较大,沉积物易被扰动,从而也会导致这些采样点的污染物浓度分布与距河口远近没有明显相关性.

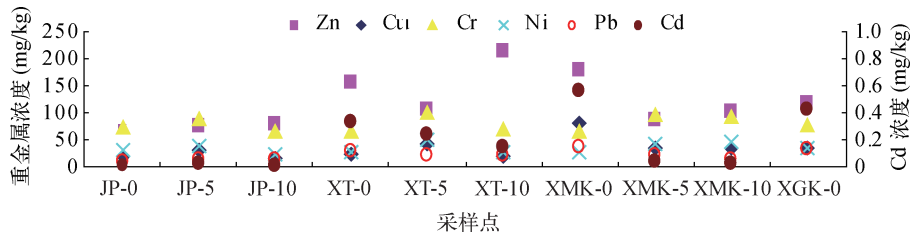


图2 沉积物样品中重金属含量分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal concentrations in sediment samples

本研究结果与向勇等<sup>[13]</sup>所做的太湖底泥中7种重金属的含量水平相似;除Cr外,其它5种重金属含量均略低于焦伟等<sup>[14]</sup>对于环太湖主要进出河流河口表层沉积物中重金属含量的浓度水平;所测样品中Cr的浓度较高,是中国湖泊沉积物重金属含量平均值67.55mg/kg<sup>[15]</sup>的1.18倍,其余重金属含量均低于平均值.由此可见,南太湖沉积物中重金属的含量和国内其它水域相比总体处于中低水平.

### 2.3 南太湖表层沉积物生态风险评价

由于沉积物中的组构成受区域地质背景的影响较大,且环境污染物种类繁多,生物效应有差异,因此很难确定统一的沉积物污染标准并基于这样的标准对沉积物进行生态风险评估.到目前为止,虽然人们在沉积物污染的生态风险评价方面做了大量研究,但是仍未建立起统一的标准<sup>[16]</sup>.本研究选取了文献报道中比较有代表性的两种方法对南太湖表层沉积物的有机氯化物和重金属的生态风险进行评价.

2.3.1 有机氯化物 采用Long等<sup>[17]</sup>提出的风险评估低值 $ERL$ (Effects Range Low)和风险评估中值 $ERM$ (Effects Range Median)来评价沉积物中有机氯化物的生态影响风险程度.该方法认为,若污染物质量分数小于 $ERL$ ,则极少产生负面生态效应;若污染物质量分数在两者之间,则会偶尔发生负面生态效应;若污染物质量分数大于 $ERM$ ,则会经常出现负面生态效应.

本研究所得OCPs和PCBs含量与 $ERL$ 、 $ERM$ 值的比较可知,研究区DDTs的值90%处于 $ERL$ 值以下, $\gamma$ -HCH与PCBs7<sup>[17]</sup>的值100%小于 $ERL$ 值(表3).表明南太湖表层沉积物中OCPs与PCBs对水生生物造成不利影响的可能性较小.虽然南太湖地区沉积物中OCs含量不高,但由于存在生物积累效应,生物中的OCs尤其是PCBs和DDTs的含量会高于周围介质中含量<sup>[18]</sup>,因此仍需注意预防有机污染.

2.3.2 重金属 采用瑞典学者Hakanson的潜在生态危害指数法对本区沉积物中重金属的潜在生态危害进行评价<sup>[19]</sup>.该法不仅考虑沉积物中重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用具有可比的、等价属性指数分级法进行评价.潜在生态危害系数涉及到单项污染系数、重金属毒性响应系数以及单项潜在生态危害系数,可用如下等式表示:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_{\text{表层}}^i / C_n^i$$

式中: $RI$ 为潜在生态危害系数; $E_r^i$ 为单项潜在生态危害系数(表4); $T_r^i$ 为某一种金属的毒性响应系数; $C_r^i$ 为

单项污染系数;  $C_{\text{表层}}^i$  为表层沉积物中重金属浓度实测值;  $C_n^i$  为参比值. 本文以太湖流域土壤中重金属的自然本底值作为参比值进行评价<sup>[14]</sup>, Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 元素的  $C_n^i$  分别为 71.80、15.40、65.10、15.70、1.99、19.80mg/kg, 对应的  $T_r^i$  分别为 2、5、1、5、30、5.

表 3 南太湖表层沉积物中 OCPs 和 PCBs 的风险值评价结果

Tab. 3 Comparison of sediment quality guidelines with concentrations of OCPs and PCBs in sediment from southern Lake Taihu

污染物	ERL(ng/g(dw))	ERM(ng/g(dw))	本研究(ng/g(dw))	<ERL(%)	ERL-ERM(%)	>ERM(%)
DDE	2.2	27	<0.03-2.29	90	10	0
DDD	2	30	<0.03-0.44	100	0	0
DDT	1	7	<0.03	100	0	0
ΣDDTs <sup>1)</sup>	1.58	46.1	<0.03-2.73	90	10	0
γ-HCH	2.37	4.99	<0.03	100	0	0
PCBs <sup>7)2)</sup>	22.7	180	0.25-7.98	100	0	0

1): ΣDDTs 包括 DDT, DDE, DDD; 2): PCBs7 包括 CB-28, 52, 101, 118, 138, 153, 180.

表 4 沉积物中重金属生态危害程度划分标准  
Tab. 4 Criteria of degrees of the ecological risk of heavy metals in sediments

生态危害系数或指数	生态危害程度
$E_r^i < 40$ 或 $RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$ 或 $150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$ 或 $300 \leq RI < 600$	较强
$160 \leq E_r^i \leq 320$ 或 $600 < RI$	很强

根据上述公式计算了 6 种重金属的  $RI$  值(图 3); 重金属污染系数生态危害指数分级标准见表 4<sup>[19]</sup>, 根据此标准对沉积物中重金属的潜在生态风险进行评价. 结果表明南太湖地区湖泊沉积物中重金属生态危害程度都较小, 其中单项生态危害系数较高的是 Cu, 在 XMK-0 的危害系数达到 25.9, 远高于其它采样点; 按照生态危害系数的大小, 本研究中重金属元素的生态危害排序为: Cu > Ni > Pb > Cd > Cr > Zn. 湖泊沉积物中多种重金属的潜在危害生态指数  $RI$  显示: XMK-0 处沉积物的生态危害相对最高, 其次是 XT-5 和 XGK-0.

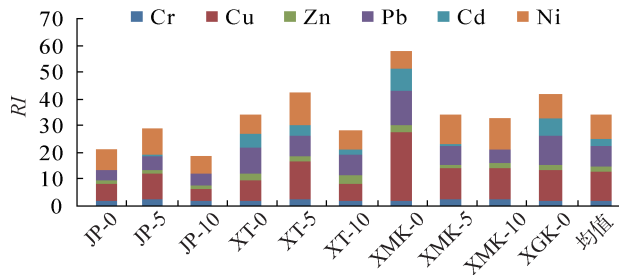


图 3 南太湖表层沉积物中重金属的潜在生态风险评价结果  
Fig. 3 Result of potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of southern Lake Taihu

### 3 结论

本文对南太湖表层沉积物中的有机氯化合物及重金属的含量、分布及其生态风险进行了探讨, 主要结论如下:

(1) 南太湖表层沉积物中 PCBs 总浓度与其它水体相比处于中等水平; OCPs 总浓度低于国内其它水体, 处于低污染水平. DDTs 和 HCHs 的低检出率和低检出量表明, 由于这两类农药的禁用, 近期并无明显的

污染输入. 样品中重金属的含量与国内湖泊沉积物中重金属含量相比,除 Cr 外,Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cd 均低于国内的平均值. 位于河口附近的两个采样点 XMK-0 和 XGK-0,OCs 和重金属的含量与其他采样点相比均处于较高水平,说明入湖河流所携带的工业废水、生活污水会对湖泊沉积物中污染物的含量水平产生影响. 由于太湖属于浅水湖,夏季台风、降雨频繁,湖水易被搅动,因此采样点距河口的远近与污染物浓度之间的关系并不明显.

(2) 运用 *ERL* 和 *ERM* 对沉积物中有机污染物进行生态风险效应评价,发现研究区 DDTs 的值 90% 处于 *ERL* 值以下,  $\gamma$ -HCH 与 PCBs 的值 100% 小于 *ERL* 值;利用生态危害指数对湖泊沉积物重金属风险进行评价,发现南太湖区域重金属元素生态危害排序为  $\text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Zn}$ ,XMK-0 的 *RI* 值最高. 总体来看,南太湖沉积物中有机氯化合物和重金属生态危害程度都较小,但考虑到这两类污染物的难降解性、生物蓄积性和毒性,仍然要注意预防此类污染.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] 范成新,朱育新,吉志军等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征. 湖泊科学,2002,14(3):235-241.
- [ 2 ] Bakan G, Ariman S. Persistent organochlorine residues in sediments along the coast of mid-Black Sea region of Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(11-12): 1031-1039.
- [ 3 ] Gómez-Gutiérrez A, Garmacho E, Bayona JM *et al.* Screening ecological risk assessment of persistent organic pollutants in Mediterranean sea sediments. *Environment International*, 2007, 33(7): 867-876.
- [ 4 ] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制. 北京:科学出版社,2001:1-15.
- [ 5 ] 赵中华,张路,于鑫等. 太湖表层沉积物中有机氯农药残留及遗传毒性初步研究. 湖泊科学,2008,20(5): 579-584.
- [ 6 ] 陈燕燕,尹颖,王晓蓉等. 太湖表层沉积物中 PAHs 和 PCBs 的分布与风险评价. 中国环境科学,2009,29(2): 118-124.
- [ 7 ] 计勇,陆光华,吴昊等. 太湖北部湾多氯联苯分布特征及生态风险评价. 生态环境学报,2009,18(3):839-843.
- [ 8 ] 苏秋克,祁士华,吴辰熙等. 洪湖特色水产品对湖水及沉积物中有机氯农药的积累模式. 地质科技情报,2007,26(4):85-90.
- [ 9 ] 黄宏,肖乾芬,王连生. 淮河沉积物中有机氯农药的残留与风险评价. 环境科学研究,2008,21(1):41-45.
- [ 10 ] 陈静生,高学民. 我国东部河流沉积物中的多氯联苯. 环境科学学报,1999,19(6):614-617.
- [ 11 ] Zhang ZL, Hong HS, Zhou JL *et al.* Fate and assessment of persistent organic pollutants in water and sediment from Minjiang River Estuary, Southeast China. *Chemosphere*, 2003, 52: 1423-1430.
- [ 12 ] Nie X, Lan C, Wei T *et al.* Distribution of Polychlorinated biphenyls in the water, sediment and fish from the Pearl River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(5): 537-546.
- [ 13 ] 向勇,缪启龙,丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价. 南京气象学院学报,2006,29(5):700-705.
- [ 14 ] 焦伟,卢少勇,李光德等. 环太湖主要进出河流重金属污染及其生态风险评价. 应用与环境生物学报,2010,16(4):577-580.
- [ 15 ] 滑丽萍,华璐,高娟等. 中国水库底泥的重金属污染评价研究. 土壤,2006,38(4):366-373.
- [ 16 ] McCauley DJ, DeGrave GM, Linton TK. Sediment quality guidelines and assessment: overview and research needs. *Environmental Sciences and Policy*, 2000, 3: 133-144.
- [ 17 ] Long ER, Macdonald DD, Smith SL *et al.* Incidence of adverse biological effects with ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 1995, 19(1): 81-97.
- [ 18 ] Bayen S, Wurl O, Karupiah S *et al.* Persistent organic pollutants in mangrove food webs in Singapore. *Chemosphere*, 2005, 61: 303-313.
- [ 19 ] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.