

## 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价\*

刘新<sup>1</sup>, 蒋豫<sup>1,2</sup>, 高俊峰<sup>2</sup>, 尹洪斌<sup>2</sup>, 蔡永久<sup>2\*\*</sup>

(1: 南京林业大学, 南京 210037)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 为了解巢湖湖区及主要出入湖河流沉积物中重金属的污染特征, 对表层沉积物中重金属元素含量进行分析, 基于地积累指数法、潜在生态风险指数法和沉积物质量基准法对沉积物污染风险进行评价, 并对沉积物重金属来源进行初步分析。结果表明, 河流沉积物中重金属的平均含量显著高于湖区, 是湖区沉积物重金属含量的 1.18~5.15 倍, 其中南淝河 Cu、Zn、Pb、As 和 Hg 含量较高, 分别是背景值的 3.53、16.98、3.98、5.84 和 23.11 倍, 西半湖 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Hg 平均含量要高于东半湖, 是全湖平均的 1.04~1.45 倍。地积累指数法和 Håkanson 潜在生态风险指数法评价结果均表明, Cd 和 Hg 是主要的生态风险贡献因子, 在所调查的表层沉积物中 Cd 和 Hg 数值分别为 43.17~3870.94 和 29.96~924.57, 已处于较大风险数值。此外, 源分析结果表明, 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr、Hg 和 As 相关性显著, 具有相似的来源, 可能来自于工业废水与生活污水。

**关键词:** 巢湖; 沉积物; 重金属; 风险评价; 污染特征

## Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers

LIU Xin<sup>1</sup>, JIANG Yu<sup>1,2</sup>, GAO Junfeng<sup>2</sup>, YIN Hongbin<sup>2</sup> & CAI Yongjiu<sup>2\*\*</sup>

(1: *Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

**Abstract:** Shallow lakes are important freshwater resources and have the functions of flood control, transportation, agriculture, aquaculture, tourism, drinking and ecological protection. The environmental quality of shallow lakes is highly related to human health and sustainable development of social economy. Rapid urbanization and economic development have resulted, progressively, in deteriorating freshwater conditions. Lake Chaohu is the fifth largest freshwater lake in China. In order to characterize the pollution characteristics of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu, 33 and 7 sediment samples were collected in April 2013 from Lake Chaohu and its main tributary rivers, respectively. The contents of eight heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, As, Hg and Ni) in the samples were analyzed and the risk of heavy metal contamination was evaluated using geo-accumulation index, Håkanson potential ecological risk index and sediment quality guidelines. The mechanization level of various components or elements was analyzed. The results showed that the average contents of heavy metals in surface sediments of the main tributary rivers were higher from 1.18 to 5.15 times than the contents in the whole lake surfaces. The contents of Cu, Zn, Pb, As and Hg in surface sediments of Nanfei River were even higher than those of other rivers, and were 3.53, 16.98, 3.98, 5.84 and 23.11 times greater than the background values, respectively. The average contents of Cu, Zn, Pb, Cd and Hg in the west regions were higher than those of the east regions, and also higher from 1.04 to 1.45 times than those of the whole lake. The results using the geo-accumulation index and

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501-002-008)、国家重点基础研究发展计划“973”项目 (2012CB956100) 和江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD) 联合资助。2015-03-22 收稿; 2015-09-14 收修改稿。刘新 (1968~), 男, 副教授; E-mail: xin126mail@126.com.

\*\* 通信作者; E-mail: caiyj@niglas.ac.cn.

the potential ecological risk assessment both indicated that Cd and Hg were the main contribution of the potential ecological risk elements, and they had reached the serious risk level (43.17–3870.94 and 29.96–924.57). The results of source analysis revealed that contents of Cu, Zn, Pb, Cr, Hg and As were highly positively related each other, indicating that they have the same sources which may be from industrial and domestic sewage.

**Keywords:** Lake Chaohu; sediments; heavy metals; risk assessment; pollution characteristics

重金属元素作为主要环境污染物,具有难降解、易积累、毒性大的特性,且有通过食物链危害人类健康的潜在危险,一直是环境保护和科学研究的重点<sup>[1-4]</sup>. 沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分,进入湖泊的重金属通过絮凝或沉淀作用,多数进入沉积物中. 它一方面是水体重金属的汇,另一方面沉积物中的重金属在一定条件下会重新释放进入水体而成为潜在污染源<sup>[5]</sup>,并对湖水具有持久影响<sup>[6-7]</sup>. 因此,沉积物是水环境中重金属污染程度的“指示剂”<sup>[8]</sup>,能很好地反映湖泊受重金属污染状况.

巢湖位于安徽省中部,是我国第五大淡水湖泊. 水域面积约为 770 km<sup>2</sup>,不仅具有航运、渔业、农灌、防洪等多种功能<sup>[9]</sup>,更是合肥市及沿湖城市工农业生产和人民生活的重要水源. 然而,近些年来,流域人口剧增,工农业发展迅速,在人类活动的影响下,每年接纳周边城市排入的生活污水和工农业废水,不仅造成巢湖富营养化问题严重,而且重金属污染也日益突出. 已有许多研究报道了巢湖全湖的重金属污染状况<sup>[10-12]</sup>,但对主要出入湖河流的关注较少,杜臣昌等<sup>[13]</sup>运用富集系数法对巢湖主要出入湖河流河口区表层沉积物重金属污染状况进行了评价,发现南淝河河口重金属人为污染最重,其次是柘皋河河口,派河、白石天河、杭埠河等河口表层沉积物中重金属元素人为污染程度较弱;Shao 等<sup>[14]</sup>利用模糊综合评价法对南淝河沉积物重金属污染状况进行了评价,发现南淝河主要河道及上游支流四里河和板桥河污染严重,下游支流年埠河和店埠河污染较轻. 湖区的污染物绝大多数来自入湖河流输入<sup>[15]</sup>,因而在对巢湖全湖重金属评价的同时加入主要出入湖河流,可以从整体上对巢湖湖区和主要出入湖河流重金属污染状况进行对比分析,对巢湖流域重金属污染的治理有重要意义.

目前国内外评价沉积物中重金属污染的常用方法有潜在生态风险指数法、地积累指数法、沉积物重金属质量基准法、沉积物富集系数法、回归过量分析法和脸谱图法等<sup>[16-18]</sup>. 这些方法有不同的特点和适用范围,在实际应用方面也存在各自的局限性. 其中,地积累指数法、潜在生态风险指数法和沉积物重金属质量基准法是目前使用最普遍的 3 种方法. 地积累指数法可反映重金属分布的自然变化特征,同时还考虑了人类活动对环境的影响,但未考虑不同重金属毒性效应的差别. 潜在生态危害指数法全面考虑了评价区域重金属的毒性和重金属区域背景值的差异,可用于综合评价重金属对生态环境的潜在影响<sup>[19]</sup>. 沉积物重金属质量基准可以很好地反映沉积物中重金属对生物的潜在毒性<sup>[20]</sup>. 因此,综合运用这 3 种方法能较好地评价沉积物受重金属污染的程度,有助于更全面地分析和了解沉积物中重金属的毒性和潜在危害.

本文调查巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物中重金属 (Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As、Hg、Ni) 含量,分析重金属的空间分布特征,并用地积累指数法、潜在生态风险指数法、沉积物重金属质量基准法和主成分分析法对其重金属污染特征进行评价和分析,以期对巢湖重金属污染治理提供基础数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点布设与样品采集

巢湖以姥山岛为界,可以分为东、西半湖,西半湖的水质状况明显劣于东半湖,受到的氮、磷污染比东半湖严重<sup>[21]</sup>. 综合考虑巢湖入湖河流分布、人类干扰程度、湖泊水动力、水质等因素的空间特征<sup>[22-23]</sup>,在巢湖湖区和主要出入湖河流共布设 40 个采样点(图 1),其中西半湖 12 个,东半湖 21 个,主要出入湖河流 7 个. 2013 年 4 月用彼得森采泥器采集表层沉积物(0~15 cm),将泥样混匀后冷冻保存带回实验室进行处理及分析.

### 1.2 样品处理及分析

沉积物样品使用冷冻干燥机干燥,并剔除动植物残体及石块,经玛瑙研钵研磨处理后过 100 目尼龙筛后置于干燥器中待用. 沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Ni 的含量使用安捷伦 7700X 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,Hg 的含量使用 Hydra-c 型全自动测汞仪测定. 考虑到样品测定的准确度和精度,分

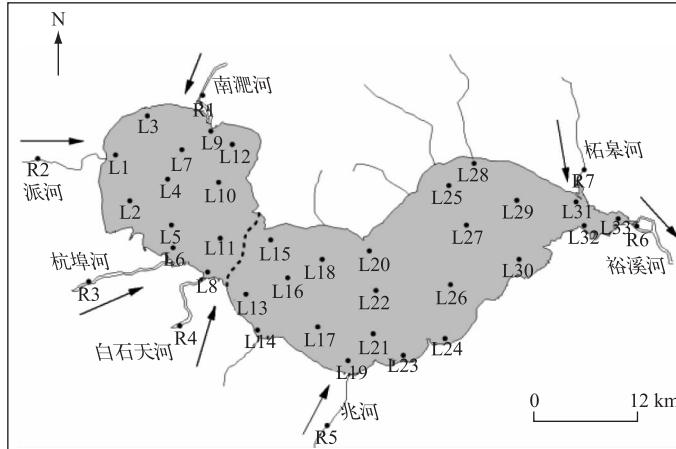


图1 巢湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Chaohu

表1 巢湖及主要出入湖河流表层沉积物的基本性质  
Tab.1 Some basic properties of the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers

水体	TN/(mg/kg)	TP/(mg/kg)	LOI/%
西半湖	1934±771	903±433	6.48±2.42
东半湖	1624±653	570±131	5.52±2.31
出入湖河流	2032±534	806±322	8.16±1.61

别对样品进行重复分析和标样分析(重复率为10%),样品分析误差均小于10%,分析结果符合质控要求. 沉积物基本性质如表1所示,总氮(TN)、总磷(TP)含量以过硫酸钾联合消解法测定,烧失量(LOI)以550℃焙烧4.5 h重量法测定.

1.3 评价方法

1.3.1 地积累指数法 地积累指数法是德国海德堡大学 Muller<sup>[24]</sup>提出来的. 此评价方法考虑了人为污染因素、环境地球化学背景值,还特别考虑到由于自然

成岩作用可能会引起背景值变动的因素,给出很直观的重金属污染级别. 计算方法为:

$$I_{geo} = \log_2(C_i/k \cdot C_n) \tag{1}$$

式中,  $I_{geo}$  为重金属  $i$  的地积累指数;  $C_i$  为重金属  $i$  在沉积物中的含量,  $C_n$  为沉积岩中所测该重金属的地球化学背景值,采用安徽省土壤重金属环境背景值<sup>[25]</sup>(表2);  $k$  为考虑到成岩作用可能会引起的背景值的变动而设定的常数,一般  $k = 1.5$ <sup>[26]</sup>.

表2 沉积物中重金属的环境背景值

Tab.2 Sediment background contents of heavy metals

重金属	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	Ni
含量/(mg/kg)	20.4	62	26.6	66.5	0.097	9	0.033	29.8

根据  $I_{geo}$  数值的大小,将沉积物中重金属的污染程度分为7个等级,即0~6级,如表3所示.

1.3.2 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法综合考虑了重金属的毒性、评价区域对重金属污染的敏感性以及重金属区域背景值的差异,可以综合反映沉积物中重金属的潜在生态影响<sup>[27]</sup>. 计算公式如下:

1) 单项重金属污染指数:

$$C_f = C_i / C_n \tag{2}$$

式中,  $C_f$  为重金属  $i$  的污染指数,  $C_i$  为重金属  $i$  的实测含量,  $C_n$  为重金属  $i$  的评价参比值(表2).

2) 单项重金属  $i$  的潜在生态风险指数:

$$E_r = T_r \cdot C_f \tag{3}$$

式中,  $E_i$  为单项金属  $i$  的潜在生态风险指数;  $T_i$  为重金属毒性响应系数, 反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度. 各重金属的  $T_i$  分别为:  $Hg = 40$ 、 $Cd = 30$ 、 $As = 10$ 、 $Cu = Pb = Ni = 5$ 、 $Cr = 2$ 、 $Zn = 1$ <sup>[28]</sup>.

3) 多项金属的综合潜在生态风险指数  $RI$  为单项金属潜在生态风险指数之和, 即:

$$RI = \sum E_i \quad (4)$$

$E_i$ 、 $RI$  和潜在生态风险等级如表 4 所示.

1.3.3 沉积物重金属质量基准法 在缺乏生物毒性试验数据时, 应用生物效应数据库的沉积物质量基准对重金属的毒性做出判断可以对水体沉积物污染进行评价, 加拿大、美国佛罗里达、澳大利亚、新西兰和中国香港等部分国家和地区都利用生物效应数据库法建立了沉积物重金属质量基准. 由于巢湖是淡水湖, 因此本文将沉积物中  $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cd$ 、 $As$ 、 $Hg$ 、 $Ni$  等重金属含量与加拿大淡水沉积物基准<sup>[29]</sup>(表 5) 进行比较. 当某种重金属污染物浓度低于临界效应浓度 ( $TEL$ ) 时, 意味着负面生物毒性效应几乎不会发生; 高于必然效应浓度 ( $PEL$ ) 时, 负面生物毒性效应将频繁发生; 如果污染物浓度介于  $TEL$  值和  $PEL$  值之间, 负面生物毒性效应会偶尔发生.

表 4 单项及综合潜在生态风险评价指数与分级标准

Tab.4 Individual and general indices and grades of potential ecological risk assessment

$E_r$	单项污染物生态风险等级	$RI$	综合潜在生态风险等级
$E_r < 40$	低	$RI < 150$	低
$40 \leq E_r < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重
$160 \leq E_r < 320$	重	$RI \geq 600$	严重
$320 \leq E_r$	严重		

表 5 加拿大淡水沉积物重金属质量基准

Tab.5 Freshwater sediment quality criteria of heavy metals in Canada

基准	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	Ni
$TEL / (mg/kg)$	36	123	35	37	0.6	5.9	0.17	18
$PEL / (mg/kg)$	197	315	91	90	3.5	17	0.49	36

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中重金属的总量分布特征

巢湖沉积物中重金属分布具有明显的空间差异性(图 2): 河流沉积物中重金属的平均含量显著高于湖区, 是湖区沉积物重金属的 1.18~5.15 倍, 且各出入湖河流沉积物中  $Zn$ 、 $Cd$  含量差异较大. 其次, 西半湖  $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Pb$ 、 $Cd$  和  $Hg$  的平均含量要高于东半湖, 是全湖平均的 1.04~1.45 倍. 从整体上看, 巢湖西半湖重金属含量相对较高, 污染相对严重, 这说明巢湖沉积物中重金属含量较高的区域主要与沿湖经济的迅猛发展及人类活动使排入湖泊的污染物含量增加有关, 这与王永华等<sup>[30]</sup>对巢湖底泥污染物的研究结果一致. 王金等<sup>[31]</sup>对巢湖流域产业结构与水污染程度的关系进行研究, 发现合肥市拥有机械、电子、化工、轻纺、冶金等 34 个工业行业, 这些工业企业所排放的污水通过南淝河、十五里河、派河进入西半湖, 所以西半湖承接了合肥市大部分污水, 导致重金属含量相对偏高,  $Cd$ 、 $Hg$  污染严重. 同时, 王金等<sup>[31]</sup>还发现巢湖市产业以食品、牧业、渔业为主, 相比于化工、冶金等重工业产生的污染较少, 所以巢湖市境内的东半湖重金属污染较轻.

表 3 重金属污染程度与  $I_{geo}$  的关系

Tab.3  $I_{geo}$  and contamination grades of heavy metals

$I_{geo}$	级数	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	清洁
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	偏中度
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	偏重度
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	重度
$I_{geo} > 5$	6	严重

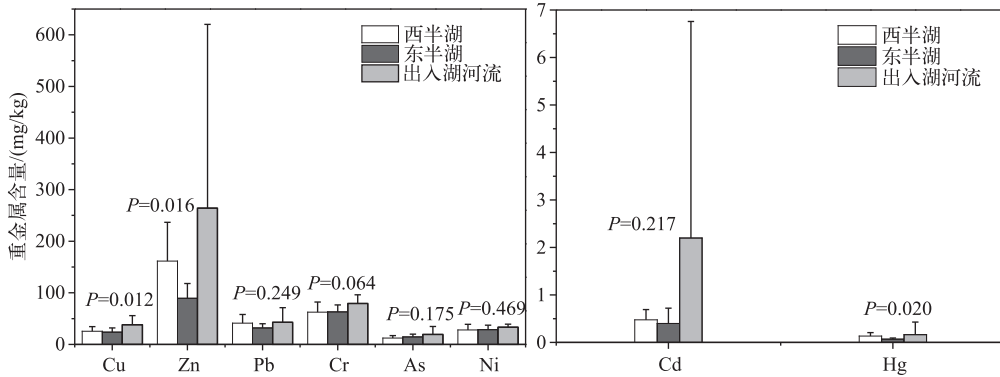


图2 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属含量平均值  
(Cu、Cr、As 使用方差分析, Zn、Pb、Cd、Hg、Ni 使用非参数检验)

Fig.2 Average contents of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu and its main tributary rivers

从巢湖主要出入湖河流沉积物中重金属含量的比较情况来看(图3),几乎所有出入湖河流沉积物中重金属含量都超出了安徽省土壤重金属环境背景值,其中南淝河污染较严重,沉积物中Cu、Zn、Pb、As和Hg的含量明显高出其它几条河流,分别是背景值的3.53、16.98、3.98、5.84和23.11倍。另外,裕溪河沉积物中Cd含量最高,为12.52 mg/kg,高出背景值129.03倍;7条河流中Cr、Ni含量相差不大。合肥市分布着较多的化工、电镀、冶金、轻纺等行业,这些行业排放的工业废水大都进入南淝河,导致南淝河沉积物中重金属含量偏高。出湖河流裕溪河河口处Cd含量偏高主要是因为河口处不同物理化学性质水体交汇混合,原有水环境如河水pH值、电导率、悬浮物浓度等以及水动力条件都会发生明显变化,导致无机物的絮凝和悬浮颗粒的沉淀等<sup>[32]</sup>,引起此处沉积物中Cd含量偏高。

## 2.2 地积累指数法评价

巢湖湖区及主要出入湖河流沉积物中Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As、Hg和Ni的 $I_{geo}$ 范围分别为-1.39~1.23、-1.24~3.50、-1.45~1.41、-2.05~0.13、-0.06~6.43、-1.40~1.96、-1.00~3.95和-2.34~-0.05,西半湖的 $I_{geo}$ 要略高于东半湖。除了Ni处于清洁状态外,其它各重金属都处于污染状态,其中Cd和Hg是最主要的污染物,西半湖已受到较严重的Cd、Hg污染,另外南淝河的污染也较严重,Hg、Zn达到偏重度污染程度,Cd为中度污染,Cu、Pb、As处于偏中度污染水平,Cr处在轻度污染水平(图4)。南淝河的重金属污染主要与合肥市的工业废水和生活污水排放有关,而巢湖西半湖重金属污染主要通过南淝河输入,来自合肥等城市的废水是主要的污染源。

## 2.3 潜在生态风险评价

重金属单项潜在生态风险评价结果显示(图5),除Cd、Hg、As外均为低风险程度,西半湖Cd处于中等-重生态风险水平,Hg处于低-重生态风险水平;东半湖Cd处于中等-严重生态风险水平,Hg处于低-较重生态风险水平;南淝河Cd、Hg为严重生态风险水平,As处在中等生态风险水平;裕溪河Cd处于严重生态风险水平,Hg为较重生态风险水平;派河Cd、Hg达到较重生态风险水平;兆河、柘皋河Cd处于较重生态风险水平,杭埠河、白石天河则为中等生态风险水平;兆河、柘皋河、杭埠河、白石天河Hg处于中等风险水平。由此可见,Cd和Hg是主要的生态风险贡献因子。

另外,由重金属综合潜在生态风险等级(图6)可以看出,西半湖生态危害较东半湖严重,基本上处于重生态风险水平;南淝河和裕溪河存在严重生态风险;派河、杭埠河、兆河、柘皋河达到中等生态风险水平;白石天河则处在低生态风险水平。这种区域差异与巢湖流域社会经济发展的空间格局相符,体现了湖泊沉积物重金属污染程度与流域内人类活动的方式以及强度之间的密切关系。与南淝河、裕溪河相比,南部入湖河流杭埠河、白石天河、兆河处于经济欠发达地区,流域内人口相对较少,城市化进程相对较低,人类活动方式以农业、渔业为主,所以这些河流的生态风险相对较低。

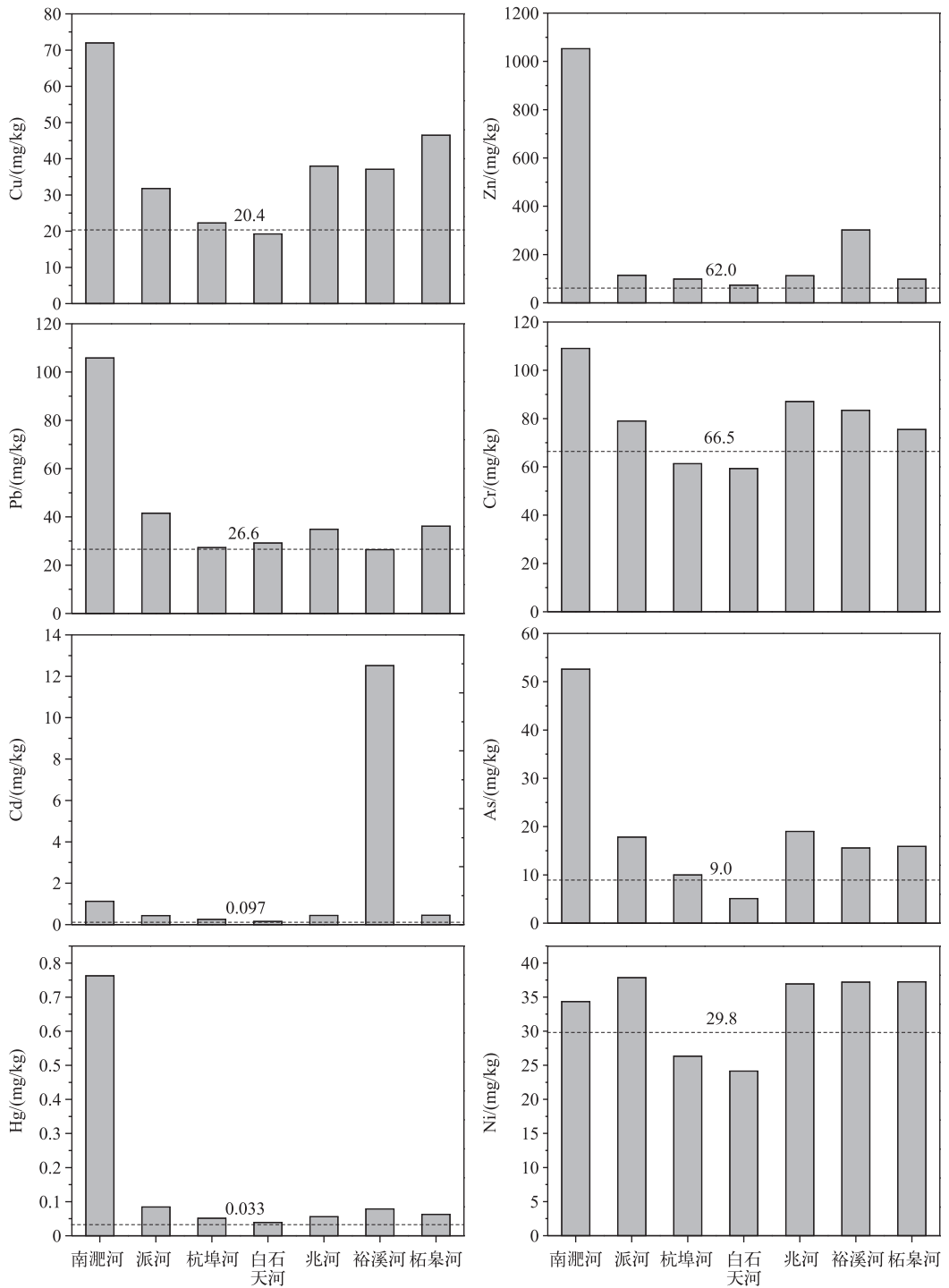


图3 巢湖主要出入湖河流沉积物重金属含量的比较(虚线代表安徽省土壤重金属环境背景值)

Fig.3 Contents of heavy metals in surface sediments of main tributary rivers in Lake Chaohu

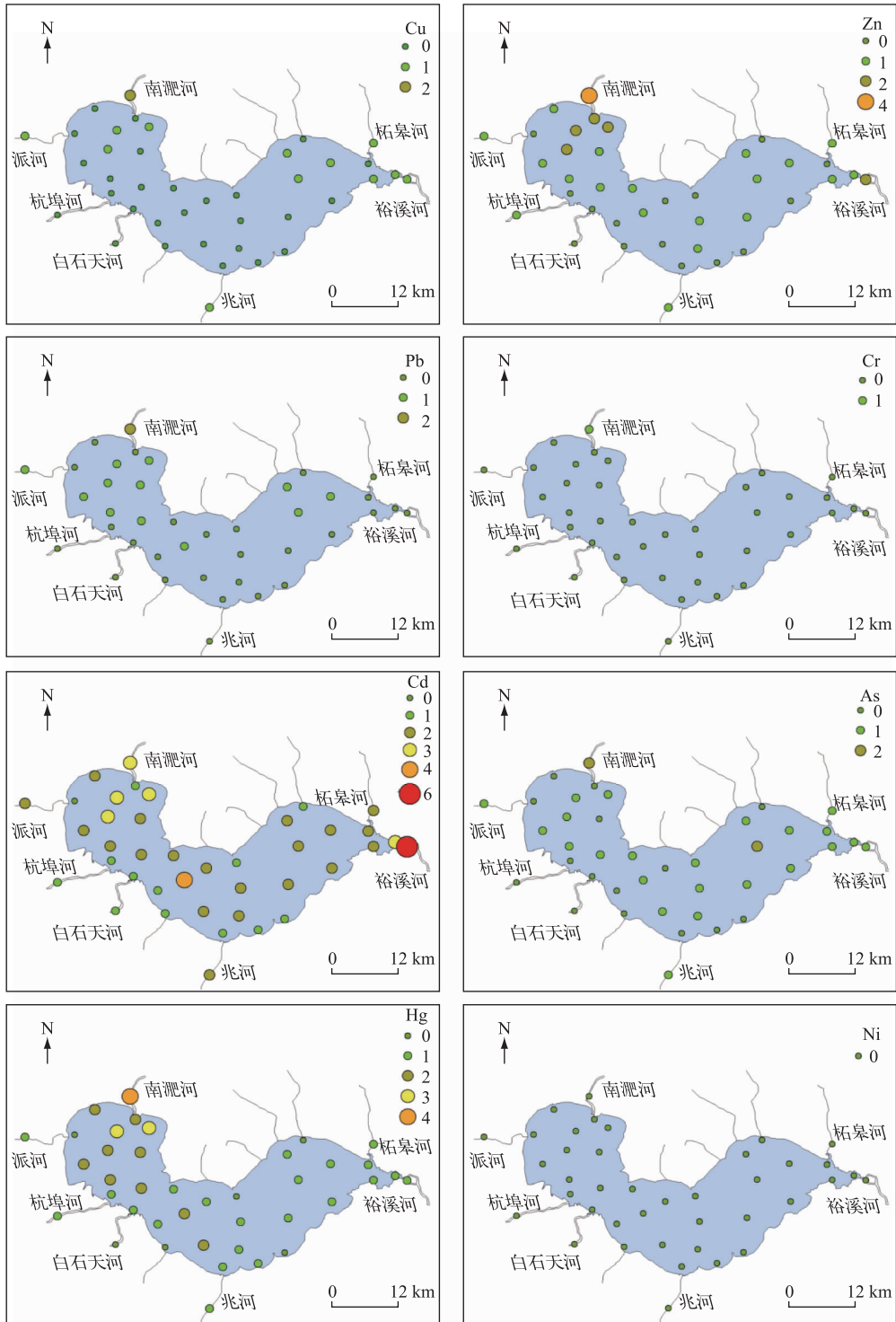


图 4 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物的重金属污染等级分布

Fig.4 Contamination grades of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu and its main tributary rivers

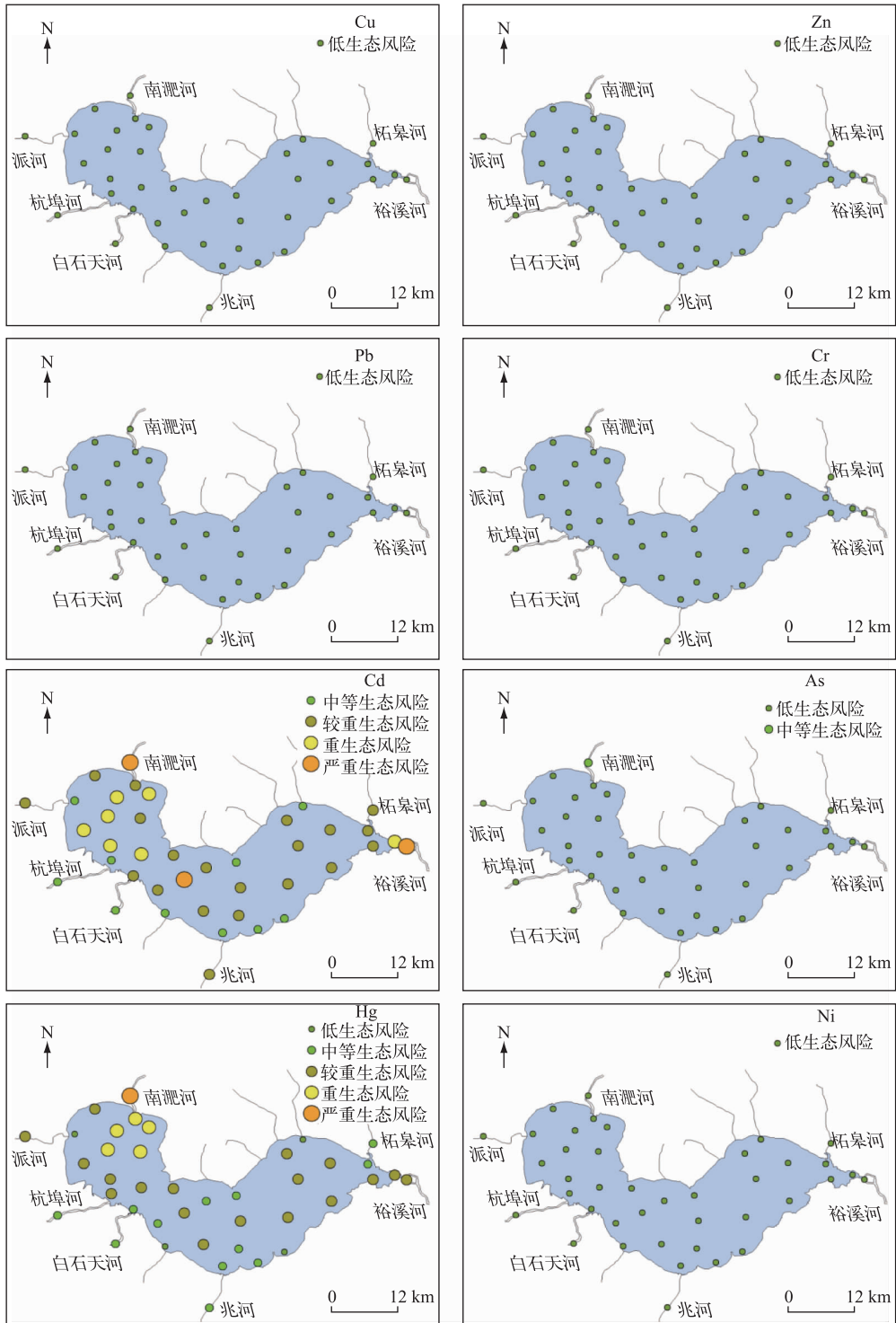


图 5 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物的重金属单项潜在生态风险等级分布

Fig.5 Individual grades of potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu and its main tributary rivers



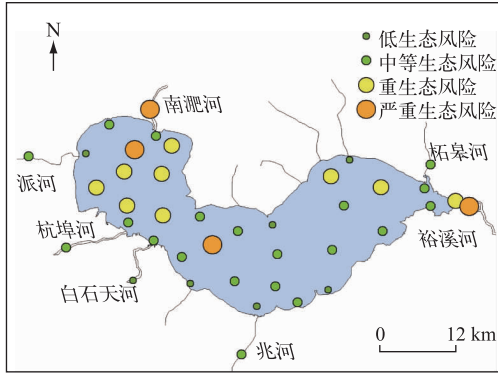


图6 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物的重金属综合潜在生态风险等级分布  
Fig.6 General grades of potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu and its main tributary rivers

2.4 沉积物重金属质量基准评价

40个采样点表层沉积物中8种重金属的潜在毒性顺序为: Ni>As>Cr>Pb>Zn>Cd>Hg>Cu. 在这些采样点中, Ni、As、Cr、Pb、Zn、Cd、Hg和Cu含量高于PEL的百分比分别是35%、22.5%、2.5%、2.5%、2.5%、2.5%、2.5%和0%, 在TEL与PEL之间的百分比分别是50%、72.5%、95%、42.5%、30%、15%、7.5%和15%. 通过进一步分析发现, Ni元素的潜在生物毒性很大, 负面生物效应频繁发生的样点主要分布在西半湖、东半湖的东北湖区以及兆河、裕溪河、柘皋河; As除在L1、R4采样点的潜在生物毒性较小, 其它采样点的潜在生物毒性均较大, 负面生物效应将频繁发生或偶尔发生; Cr在表层沉积物中的潜在生物毒性相对较大, 负面生物效应偶有发生; Pb、Zn在西半湖表层沉积物中的潜在生物毒性较东半湖大, 负面生物效应将偶尔发生; Cu、Cd和Hg除在个别点位表层沉积物中潜在生物毒性较大, 负面生物效应偶有发生外, 其它点位的

潜在生物毒性均很小, 可能不会发生明显的负面生物效应.

由地积累指数法和潜在生态风险指数法的分析结果可以看出,  $I_{geo}$ 与E对Cd、Hg的评价结果基本一致, 都指出Cd和Hg是巢湖湖区及主要出入湖河流沉积物中主要的重金属污染物, 且对巢湖造成了严重的生态危害. 这与之前的研究结果相似, 程杰等<sup>[10]</sup>及石志芳等<sup>[33]</sup>分别认为Cd和Hg是巢湖的主要生态风险贡献因子. 但是, 通过沉积物重金属质量基准法(TEL-PEL)分析, 却得出了相反的结果, Ni元素的潜在生物毒性较大, 居于8种重金属之首, 负面生物效应频繁发生, 这与Yin等<sup>[34]</sup>运用TEL-PEL标准对巢湖湖区沉积物重金属的评价结果一致. 有文献表明<sup>[35]</sup>, TEL-PEL标准存在一定的局限性, 它是基于某一地区大量的沉积物化学与相应生物效应数据的统计分析, 而本文采用的是加拿大的TEL-PEL标准, 可能并不适用于巢湖, 有待进一步研究分析.

2.5 重金属来源分析

表6 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属主成分分析  
Tab.6 Principal component analysis of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu and its main tributary rivers

项目	第1主成分	第2主成分
Cu	0.956	0.127
Zn	0.867	-0.359
Pb	0.939	-0.197
Cr	0.898	0.375
Cd	0.217	0.576
As	0.898	-0.123
Hg	0.857	-0.469
Ni	0.717	0.592
特征值	5.456	1.242
贡献率/%	68.21	15.53
累积贡献率/%	68.21	83.74

主成分分析在沉积物中重金属的源解析中被广泛应用, 本研究采用SPSS 20.0软件对巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物中重金属进行主成分分析(KMO检验值为0.724, 大于0.5, 适合做主成分分析), 发现沉积物中8种重金属所代表的全部信息可用前2个主成分(其中, 特征值: 5.456+1.242=6.698个变量, 累积贡献率: 83.74%)来体现(表6). 因此, 通过对前2个主成分的分析, 基本上能够反映数据所代表的大部分信息.

第1主成分的贡献率为68.21%, 其中Cu、Zn、Pb、Cr、As和Hg表现出较高的载荷(>0.8), Pearson相关分析(表7)表明Cu、Zn、Pb、Cr、As和Hg之间相关性显著, 具有相似的来源, 而且这6种元素主要来自于电镀、金属冶炼、采矿等工业企业以及生活污水<sup>[34]</sup>, 所以第1主成分代表着工业废水和生活污水对沉积物的重金属污染. 此外, Ni在第1主成分上也表现出中等载荷, 且与Cu、Pb、Cr、As相关性显著, 可知第1主成分

也部分支配着 Ni 的来源. 第 2 主成分的贡献率为 15.53%, Cd 表现出中等载荷(0.576), 在第 1 主成分上载荷较低, 由 Cd 的地积累指数结果可以看出, 裕溪河、南淝河及西半湖 Cd 的污染程度较高, 而南部入湖河流 Cd 的污染程度较低, 并且低于湖区表层沉积物, 这说明 Cd 可能来源于其它的工业源, 有待进一步研究. 因此, 第 2 主成分主要表征了其它工业源对表层沉积物中 Cd 含量的影响.

表 7 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物中重金属元素之间的相关系数

Tab.7 Correlation coefficients between heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu and its main tributary rivers

重金属	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	Ni
Cu	1.000							
Zn	0.773 **	1.000						
Pb	0.848 **	0.842 **	1.000					
Cr	0.904 **	0.587 **	0.789 **	1.000				
Cd	0.238	0.241	0.005	0.264	1.000			
As	0.826 **	0.793 **	0.803 **	0.760 **	0.095	1.000		
Hg	0.748 **	0.970 **	0.898 **	0.565 **	0.051	0.775 **	1.000	
Ni	0.762 **	0.293	0.623 **	0.927 **	0.226	0.561 **	0.289	1.000

\*\* 表示显著相关,  $P < 0.01$ .

### 3 结论

1) 巢湖表层沉积物中重金属分布具有明显的空间差异性: 河流沉积物中重金属的平均含量显著高于湖区, 是湖区沉积物重金属的 1.18~5.15 倍; 其中, 南淝河沉积物中 Cu、Zn、Pb、As 和 Hg 含量较高, 分别是背景值的 3.53、16.98、3.98、5.84 和 23.11 倍, Cd 含量最高值出现在裕溪河, 为 12.52 mg/kg, 7 条河流沉积物的 Cr、Ni 含量相差不大. 其次, 西半湖 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Hg 的平均含量要高于东半湖, 是全湖平均的 1.04~1.45 倍.

2) 地积累指数法评价结果显示, Cd 和 Hg 是巢湖湖区及主要出入湖河流沉积物中最主要的重金属污染物. 污染最严重的是南淝河, Hg 和 Zn 达到偏重度污染程度, Cd 为中度污染, Cu、Pb 和 As 处于偏中度污染水平, Cr 处在轻度污染水平.

3) 通过 Hakanson 潜在生态风险指数法评价得知, Cd 和 Hg 是主要的重金属生态风险贡献因子. 其次, 西半湖生态危害较东半湖严重, 基本上处于重生态风险水平; 南淝河和裕溪河存在严重生态风险.

4) 源分析结果表明, 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr、Hg、As 具有相似的来源, 可能来自于工业废水与生活污水.

致谢: 感谢丁胜荣、高金山等协助完成野外采样, 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室对本文样品分析提供的支持.

### 4 参考文献

- [1] Ikem A, Egiebor NO, Nyavor NO. Trace element in water, fish and sediment from Tuskegee Lake, Southeastern USA. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, **149**: 51-75.
- [2] 王颖雪, 王沛芳, 王超等. 太湖浮游植物中重金属含量的季节变化特征及湖区差异. *湖泊科学*, 2015, **27**(2): 258-265. DOI 10.18307/2015.0209.
- [3] 简敏菲, 弓晓峰, 游海等. 鄱阳湖水环境及其水生维管束植物重金属污染. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(6): 589-593.
- [4] 简敏菲, 游海, 倪才英. 鄱阳湖饶河段重金属污染水平与迁移特性. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 127-133. DOI 10.18307/2006.0205.
- [5] 刘红磊, 尹澄清. 城市湖泊表层沉积物中的重金属污染现状及其稳定性分析——以武汉墨水湖为例. *生态毒理学报*, 2007, **2**(2): 214-219.
- [6] 贾振邦, 赵智杰, 杨小毛等. 洋涌河、茅洲河和东宝河沉积物中重金属的污染及评价. *环境化学*, 2001, **20**(3):

- 212-219.
- [ 7 ] 尚英男, 倪师军, 张成江等. 成都市河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 生态环境, 2005, **14**(6): 827-829.
- [ 8 ] Tylmann W. Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake Pusty Staw, northern Poland). *Journal of Paleolimnology*, 2005, **33**: 313-325.
- [ 9 ] Shang GP, Shang JC. Spatial and temporal variations of eutrophication in western Chaohu Lake, China. *Environ Monit Assess*, 2007, **130**: 99-109.
- [ 10 ] 程 杰, 李学德, 花日茂等. 巢湖水体沉积物重金属的分布及生态风险评价. 农业环境科学学报, 2008, (4): 1403-1408.
- [ 11 ] 郑志侠, 潘成荣, 丁 凡. 巢湖表层沉积物中重金属的分布及污染评价. 农业环境科学学报, 2011, (1): 161-165.
- [ 12 ] 余秀娟, 霍守亮, 管逢宇等. 巢湖表层沉积物中重金属的分布特征及其污染评价. 环境工程学报, 2013, (2): 439-450.
- [ 13 ] 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价. 湖泊科学, 2012, **24**(1): 59-66. DOI 10.18307/2012.0108.
- [ 14 ] Shao SG, Xue LQ, Liu C *et al.* Assessment of heavy metals in sediment in a heavily polluted urban river in the Chaohu Basin, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, **33**: 1-13.
- [ 15 ] 陈 洁, 李升峰. 巢湖表层沉积物中重金属总量及形态分析. 河南科学, 2007, **25**(2): 303-307.
- [ 16 ] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法. 海洋地质动态, 2005, (8): 31-36, 38.
- [ 17 ] 李朝奎, 王利东, 李 吟等. 土壤重金属污染评价方法研究进展. 矿产与地质, 2011, (2): 172-176.
- [ 18 ] 张 鑫, 周涛发, 杨西飞等. 河流沉积物重金属污染评价方法比较研究. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, (11): 1419-1423.
- [ 19 ] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价. 环境科学, 2006, (4): 732-736.
- [ 20 ] MacDonald DD, Ingersoll CG, Berger TA. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environment Contamination and Toxicology*, 2000, **39**: 20-31.
- [ 21 ] 管逢宇, 霍守亮, 席北斗等. 巢湖近代沉积物及其间隙水中营养物的分布特征. 环境科学学报, 2010, **30**(10): 2088-2096.
- [ 22 ] Shang GP, Shang JC. Causes and control countermeasures of eutrophication in Chaohu Lake, China. *Chinese Geographical Science*, 2005, **15**(4): 348-354.
- [ 23 ] Xu MQ, Gao H, Xie P *et al.* The temporal and spational distribution, composition and abundance of Protozoa in Chaohu Lake, China; Relationship with eutropication. *European Journal of Protistology*, 2005, **41**(3): 183-192.
- [ 24 ] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [ 25 ] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [ 26 ] Christophoridis C, Dedepeidid D, Fytianos K. Occurrence and distribution of selected heavy metals in the surface sediments of Thermaikos Gulf, N. Greece. Assessment using pollution indicators. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2): 1082-1091.
- [ 27 ] 冯慕华, 龙江平, 喻 龙等. 辽东湾东部浅水区沉积物中重金属潜在生态评价. 海洋科学, 2003, **27**(3): 52-56.
- [ 28 ] 徐争启, 倪师军, 虞先国等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- [ 29 ] Smith SL. The development and implementation of Canadian sediment quality guidelines. Development and progress in sediment quality assessment; rational, challenge, techniques & strategies. Amsterdam; SPB Academic Publishing, 1996: 233-249.
- [ 30 ] 王永华, 钱少猛, 徐南妮等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价. 环境科学研究, 2004, (6): 22-26.
- [ 31 ] 王 金, 李进华, 陈 来等. 巢湖流域产业结构与水污染程度的关系研究——基于灰色关联分析法. 资源开发与市场, 2009, (7): 606-609.
- [ 32 ] 宁 彤. 巢湖流域土壤和河、湖沉积物汞的分布特征、成因及生态风险[学位论文]. 南京: 南京大学, 2012.
- [ 33 ] 石志芳, 姜 霞, 杨苏文等. 巢湖表层沉积物中重金属污染的时空变化特征及潜在生态风险评价. 农业环境科学学报, 2010, (5): 948-954.
- [ 34 ] Yin HB, Deng JC, Shao SG *et al.* Distribution characteristics and toxicity assessment of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **179**(1/2/3/4): 431-442.
- [ 35 ] 王立新, 陈静生, 洪 松等. 水体沉积物重金属质量基准研究新进展——生物效应数据库法. 环境科学与技术, 2001, (2): 4-8.