孙德尧, 臧淑英, 孙华杰, 等. 近 150 年呼伦湖重金属污染历史及潜在生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):137-147.

SUN De-yao, ZANG Shu-ying, SUN Hua-jie, et al. Pollution history and potential ecological risk assessment of heavy metals in core sediments in Hulun Lake during the past 150 years[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(1): 137–147.

近 150 年呼伦湖重金属污染历史及潜在生态风险

孙德尧, 臧淑英, 孙华杰, 张囡囡, 张 科, 孙 丽*

(哈尔滨师范大学,黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室,哈尔滨 150025)

摘 要:针对呼伦湖演化历史研究相对不足的现状,于呼伦湖中心采集柱状岩芯沉积物样品 78个,测定分析了沉积物中 Cr、Mn、Co、Cu、Zn、Cd、As、Pb 等 8 种重金属元素的垂向分布特征。结合 210Pb 测年数据和粘土含量,采用 Pearson 相关分析和主成分分析法,判别不同沉积阶段重金属元素的可能来源,并对其进行潜在生态风险评价。结果表明:1865—1973 年各种金属元素含量相对较低,以自然输入源为主,人类活动对湖泊影响微弱;1973—1992 年重金属元素含量均呈现增加趋势,主要以工矿业和农业污水、交通源等人类活动释放源为主;1992 年后除 As、Pb 外均出现下降趋势,受自然保护区建立的影响,自然来源为首要源,但仍存在农业污水、交通源和采矿业的人为源。生态风险评价结果表明,单元素污染系数 Cd>As>Pb>Cu>Co>Cr>Mn>Zn,Cd 潜在生态风险超强,As在 1992 年以后为中等潜在生态风险,其他几种元素均属于轻微生态风险,多种污染物的潜在生态风险近年处于较高水平,Cd 和 As是主要生态风险贡献因子。呼伦湖重金属污染历史能够较好地指示人类活动,自然保护区的建立对治理污染起到了一定的积极作用,但 Cd、As 污染应予以重视,呼伦湖的环境保护及治理有待进一步加强。

关键词:重金属;沉积物;来源;风险评价;呼伦湖

中图分类号:X142 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)01-0137-11 doi:10.11654/jaes.2017-1146

Pollution history and potential ecological risk assessment of heavy metals in core sediments in Hulun Lake during the past 150 years

SUN De-yao, ZANG Shu-ying, SUN Hua-jie, ZHANG Nan-nan, ZHANG Ke, SUN Li*

(Key Laboratory of Geographical Resources and Environmental Remote Sensing, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: Understanding the evolution process of the historical environment is the foundation of lake ecosystem restoration. Heavy metals of Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Cd, As, and Pb, fine particle sizes of clay, as well as ²¹⁰Pb dating data were measured in the central core sediments of Hulun Lake, due to the scarce research of its historical pollution characteristics. The vertical distribution, possible sources, and potential ecological risk assessment of heavy metals were investigated using Pearson correlation analysis and principal component analysis. Results showed that the contents of all heavy metals were relatively low, and were derived from a natural input source from 1865—1973. Heavy metal concentrations increased from 1973—1992, while after 1994, all metals except for As and Pb showed a decreasing tendency with regard to the sources of natural and anthropogenic input. Single element pollution coefficients were in the order of Cd > As > Pb > Cu > Co > Cr > Mn > Zn, with the major and harmful ecological risk factors being mainly from Cd and As. The pollution coefficient of As ranged from 30~60 after 1992, which indicated a medium potential ecological risk, while other metals were minor ecological hazards. Therefore, heavy metals in the core sediments of Hulun Lake had potential risks, and appropriate attention must be paid to the pollution control of the lake. The current study can provide reference and basic data for the improvement of the ecological environment in Hulun Lake.

Keywords: heavy metals; sediments; sources; risk assessment; Hulun Lake

收稿日期:2017-08-22 录用日期:2017-11-27

作者简介:孙德尧(1990—),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,主要从事湖泊湿地沉积及 3S 技术应用研究。E-mail:1264891755@qq.com

*通信作者:孙 丽 E-mail: sunli_wabb@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41401589,41571199)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41401589, 41571199)

湖泊沉积物是长时间地表物质迁移的结果,连 续、精确的记录了丰富的地理信息,在恢复历史气候 和环境演化方面具有其他自然历史记录无法比拟的 优势中。它是湖泊水生态系统的重要组成部分,是多数 水生生物生存的物质基础。与此同时,沉积物也积累 了大量的污染物质,在一定程度上反映了湖泊污染状 况,是湖泊的重要指示剂。湖泊沉积物中重金属含量 在自然状态下通常处于稳定且较低水平, 近年来, 随 着农业生产和旅游业的发展、工业废弃物的排放,重 金属通过多种途径进入自然水体中,并经过一系列物 理化学变化形成各种形态的重金属化合物沉淀于沉 积物中,且不易自然降解,对湖泊环境产生持续性的 影响。当环境条件发生改变时,沉积物中的这些重金 属会从沉积物中重新释放出来,对水体造成二次污 染[2-5],并在富集的情况下会通过食物链对人类健康产 生威胁[6-9]。目前,我国湖泊如太湖[10]、洱海[1]、鄱阳 湖門、乌梁素海門等均出现了不同程度的重金属污 染。因此,识别自然演变和人类活动对湖泊的影响,已 经成为地学科研工作者对湖泊沉积研究的重要方向。

呼伦湖位于呼伦贝尔草原西部, 汇集了克鲁伦 河、乌尔逊河以及海拉尔河等河流,被称为呼伦贝尔 草原之肺。近年来由于湖泊周边经济社会发展和全球 气候变暖的影响,湖面不断萎缩、草原退化、生态环境 和水质不断恶化,渔业资源濒临枯竭,湿地生态环境 亟待保护。

目前,对呼伦湖重金属的研究主要集中于含量分 布、污染评价等,而对垂直分布特征及风险评价研究 相对较少[13-14]。本文通过对呼伦湖柱状岩芯中重金属 的沉积特征及与人为历史记录进行对比分析,结合测 年数据、相关分析及主成分分析,初步分析得到呼伦 湖历史污染特征并判别各阶段污染源。通过来源判读 及潜在生态风险进行评价,以期为相关部门今后进一 步探究湖泊环境演化过程及其对流域人类活动的响 应机制提供参考。

材料与方法

1.1 研究区概况

呼伦湖位于内蒙古自治区呼伦贝尔市西端,东经 117°00′10″~117°41′40″,北纬 48°30′40″~49°20′40″。呼 伦湖湖盆东边是大兴安岭山脉,西边及南边是蒙古高 原。湖面呈不规则斜长方形,长轴为东北至西南方向, 长度为 93 km, 最大宽度为 41 km, 湖周长 447 km, 湖 水面积 2339 km²。平均水深 5.7 m,最大水深 10 m,是

我国北方第一大淡水湖,1992年被批准为国家级湿 地自然保护区。湖区属于温带大陆性半干旱气候,平 均气温为-0.24 ℃, 多年平均降水量为 268 mm, 76% 的降水集中在6-9月。湖水依赖湖面降水、地表径流 和地下水补给,主要入湖河流为克鲁伦河、乌尔逊河、 新开河[15]。湖泊周边海拉尔盆地位于阿尔泰-萨彦-蒙 古-鄂霍茨克构造-成矿带与巴尔喀什-兴安构造-成 矿带交界处东北部,断裂构造发育,地质时期岩浆活 动活跃, 蕴藏丰富的 Cu、Zn、Pb、Mn、Ag、Fe 等金属矿 产资源[16-21]。

1.2 样品采集

2016年8月对呼伦湖进行了调查采样,由于湖 泊东部水深较浅,多为沙质淤泥,故将采样点设在水 深较深、受人类活动影响较小、且能最大程度反映汇 水的中心位置(48°58′32.48″N、117°25′42.67″E),应 用活塞式柱状采样器采集了3根柱状沉积岩芯 HL1 (图1),长均介于 75~78 cm 之间,选取一根长 78 cm 沉积柱,测定粒径、金属元素(Cr、Mn、Co、Cu、Zn、Cd、 As、Pb)及年代序列。采集岩芯过程中沉积岩芯保持 完好,悬浮层未受到扰动,上层水保持清澈透明。沉积 岩芯为灰黑色粉砂状淤泥, 在野外现场按 1 cm 间隔 连续切割分样,随即放入聚乙烯自封袋中密封保存, 带回实验室利用美国 Virtis 公司生产的 Advantage EL-85 真空冻干机进行冻干,去除里面的砾石、植物 残体等杂质,混合均匀、研磨、过120目筛,放入聚乙 烯塑封袋中保存备用。

1.3 样品指标测定

取 0.1 g 过筛后样品,采用 HCl-HNO₃-HF-H₂O₂ 消解法, 应用奥地利安东怕公司生产的 Aton-aar 微 波消解仪对沉积样品进行消解, 直至溶液清澈无残 渣,消解后赶酸,定容到 100 mL,采用美国生产的电 感耦合等离子质谱仪 ICP-MS(7500 Series, Agilent Technologies)进行测定,采用土壤成分分析标准土进 行对照(由地球化学勘测研究所提供),标准采用美国 Agilent 随机标准溶液(Environmental Calibration Standard),并以5%稀硝酸进行空白分析(扣除超纯水本 底),质量控制样品标准误差不超过5%。共测得Cr、 Mn、Co、Cu、Zn、Cd、As、Pb等8种元素。粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪 进行分析测定,将粒度机械组成分为粘土(<4 µm)、 细粉砂(4~16 µm)、粗粉砂(16~64 µm)和沙砾(>64 μm),样品平行分析误差<5%。年代测定采用²¹⁰Pb法, ²¹⁰Pb 测定与分析采用美国阿美特克公司生产的高纯



Figure 1 Location of sampling sites in Hulun Lake

锗γ能谱仪,应用 ORTEC 高压保护模式,γ能谱仪的 测定范围为 10 keV~10 MeV, 能量峰效率刻度为 46.84 keV,测定时间在 24 h 以上,测量误差小于 5%。 标样由中国原子能研究所提供。本实验全部在哈尔滨 师范大学地理环境遥感监测重点实验室分析完成。

1.4 潜在生态风险评价法

为了能够反映重金属污染状况,运用潜在生态风 险评价法对呼伦湖的重金属污染进行评价。潜在生态 风险评价法由瑞典学者 Hakanson^[2]于 1980 年提出, 该方法对沉积物中重金属的毒性、生态效应与环境效 应进行了综合考虑,能够消除不同来源污染物的污染 和不同区域地域差异的影响。具体公式如下:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C^i} \tag{1}$$

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$
(2)

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{3}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{m} E_r^i \tag{4}$$

式中: C_i 为单体重金属元素污染系数; C_i 为所测样品 污染物 i 的所测含量: C_i 为污染物 i 背景参照值: C_i 为综合污染系数;E为污染物i的潜在风险指数;T为 污染物 i 的毒性系数;RI 为综合潜在生态风险指数。 C_i 评价某种污染物污染程度, C_d 评价多种污染物的污 染程度。E评价某种污染物的潜在生态风险程度,RI评价多种污染物的潜在生态风险程度(表 1)[23]。

结果与讨论

 $E_r^i \ge 240$

2.1 沉积岩芯 ²¹⁰Pbex 年代序列建立及沉积速率的确定

沉积速率在某种程度上反映了湖泊沉积过程及 与人类活动的关系。210Pb 是一种天然放射性核素,其 半衰期为 22.3 a,已被广泛应用于沉积物百年尺度上 的定年,并在示踪流域内沉积速率、平均沉积速率和 沉积通量等方面具有重要意义[23-29]。本研究年代时间 序列的测定采用²¹⁰Pbex,进而确定湖泊沉积物的沉积

表 1 生态风险评价法指数及分级标准

Table 1 Index and classification standard of ecological risk assessment

E_r^i	污染程度	RI	生态风险等级
$E_r^i < 30$	轻微	<i>RI</i> <150	轻微
$30 \le E_r^i < 60$	中等	150≤ <i>RI</i> <300	中度
$60 \le E_r^i < 120$	强	300≤ <i>RI</i> <600	强
$120 \le E_r^i < 240$	超强	600≤ <i>RI</i>	超强

极强

谏率[30]。

由图 2 可以看出, 呼伦湖沉积岩芯 210Pbex 的比 活度随深度增加总体上呈衰减趋势。由于湖泊沉积物 的沉积速率随着时间的变化而发生变化, 本研究选 定 CRS 模式计算柱状岩芯年代并建立年代序列。公 式如下:

$$t = \lambda^{-1} \frac{\sum C_0}{\sum C_Z} = Z/S \tag{5}$$

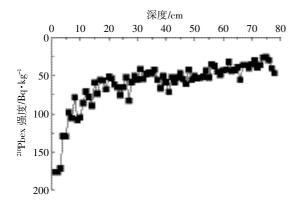
式中:t 为沉积物某一层的沉积年代;λ 为 210Pb 的衰 变常数(λ =0.031 14·a⁻¹; ΣC_z 为深度 Z 以下各层沉积 物中²¹⁰Pbex 的累计量,Bq·cm⁻²;C₀为沉积物岩芯中 ²¹⁰Pbex 的总累计输入量,Bq·cm⁻²;Z为沉积柱某一层 深度,cm;S 为沉积速率,cm·a⁻¹。

经计算整个沉积岩芯的平均沉积速率为 0.52 cm·a⁻¹,HL1 采样时间为 2016 年 8 月,因此把沉积岩 芯的最上层年代定为 2016 年,由 210Pb CRS 模式计算 得出沉积年代的初始年代为1865年,即深度为78 cm 对应的质量深度 HL1 记载了 150 年的沉积历史。 从结果中可以看出(表 2),呼伦湖的沉积速率经历了 一个比较复杂的过程,从总体上看沉积速率随着年代 的增加大体上经历了一个从慢到快的历史过程,20 世纪90年代以前沉积速率呈现缓慢增加的过程,初 步推测,呼伦湖沉积速率的变化可能与人类大规模开 垦草原及资源开发导致草原沙化、水土流失加剧有

表 2 呼伦湖沉积岩芯沉积速率

Table 2 Sedimentation rate in Hulun Lake

沉积物段/cm	沉积年份/年	平均沉积速率/cm·a-1
48~78	1865—1973	0.28
28~48	1973—1992	1.05
0~28	1992—2016	1.17



关。20世纪90年代至今,由于国家退耕还林还草措 施的实施,保护措施的加强,草原沙化和水土流失状 况有所改善,沉积速率增加趋势放缓。

2.2 沉积岩芯重金属统计及历史演化特征

湖泊沉积物垂向分布特征被认为是地理环境历 史沉积的记录,岩芯元素含量的垂直变化反映了不同 历史时期的沉积条件,可了解研究区域重金属的累积 叠加历史,反映不同历史阶段人类活动对所研究区域 重金属的影响情况[29]。根据图 3、表 3 可以看出,各重 金属含量变化明显呈现出阶段性变化特征。结合湖泊 周边经济发展历史,可以将沉积物大致分为3个不同 历史阶段,第一阶段为稳定沉积阶段(L1),第二阶段 为剧烈波动阶段(L2),第三阶段为缓解下降阶段(L3)。 通过对沉积物柱状岩芯3个阶段重金属元素含量进 行方差分析表明,Cr、Mn、Co、Cu、Zn、Cd、As、Pb 等 8 种重金属在三段不同的沉积深度均呈现显著性差异 (P<0.05),说明 3 段深度湖泊沉积物具有不同的沉积 环境。第一阶段为 1865—1973 年,此阶段重金属含量 增加较少,多种重金属均低于土壤环境背景值,变异 系数较小,属于相对稳定阶段。此阶段处于我国改革 开放以前,本区多以畜牧业为主,湖区周围人类活动 对湖泊环境的影响相对较小,各种重金属多为自然状 况下沉积。第二阶段为1973—1992年,8种重金属均 出现增加趋势,且波动较大,除 Pb 以外其他几种重金 属变异系数均大于 0.1,其中 Zn、As 的变异系数都达 到 0.37, Mn、Co 含量增加趋势尤为明显。推测此阶段 重金属含量增加可能是强烈人类活动增加引起的。该 阶段我国开始改革开放,周边地区工农业迅速发展,城 市化加速推进,根据阎任沛四、任铁军等四的研究结 果,此阶段大量工业废水和生活污水等未经处理直接 输入到湖泊中,从而导致了重金属元素含量的增加[31-32]。

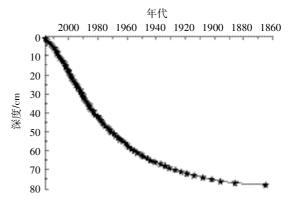


图 2 呼伦湖沉积柱 210Pbex 比活度、年代序列垂直分布图

Figure 2 Result of the vertical ²¹⁰Pbex dating indexes in Hulun Lake

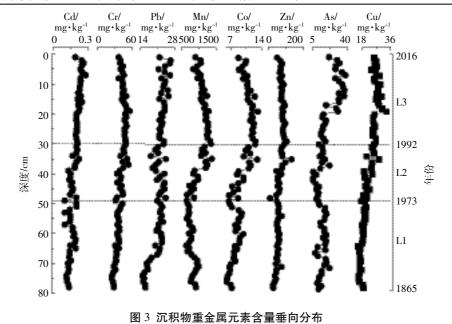


Figure 3 Vertical profile of heavy metal concentrations in the sediment core

表 3 柱状沉积物主要重金属含量统计特征(n=78)

Table 3 The characteristics of heavy metal concentrations in core sediments (n=78)

重金属	阶段	最大值/mg·kg ⁻¹	最小值/mg·kg ⁻¹	平均值/mg·kg-1	标准偏差	变异系数
Cr	L1	43.50	25.34	33.67c	4.51	0.13
	L2	53.71	34.01	42.57b	5.40	0.13
	L3	55.48	36.96	45.76a	4.26	0.09
Mn	L1	1159	641.7	$818.42\mathrm{c}$	153.04	0.19
	L2	1376	641.7	886.89b	203.74	0.20
	L3	1352	661.3	1 002.76a	130.60	0.11
Co	L1	9.84	6.15	7.83c	1.07	0.14
	L2	12.98	6.61	9.68b	1.69	0.17
	L3	13.12	8.74	11.22a	1.10	0.10
Cu	L1	20.30	15.16	17.57c	1.54	0.09
	L2	28.58	18.26	22.78b	2.79	0.12
	L3	33.42	23.71	26.83a	2.15	0.08
Zn	L1	76.03	27.40	51.50c	11.08	0.22
	L2	130.50	10.00	67.54b	24.69	0.37
	L3	173.40	50.56	86.28a	25.31	0.29
Cd	L1	0.33	0.10	0.15c	0.04	0.29
	L2	0.22	0.13	0.17b	0.03	0.15
	L3	0.28	0.03	0.22a	0.04	0.19
As	L1	21.96	7.71	15.21b	3.49	0.23
	L2	21.81	5.78	11.60e	4.35	0.37
	L3	37.52	11.40	25.01a	0.43	0.34
Pb	L1	23.20	14.91	19.92e	2.87	0.14
	L2	24.38	18.33	21.74b	1.84	0.08
	L3	26.36	21.40	23.38a	1.39	0.06

注:a、b、c表示平均值由大到小。

第三阶段为1992—2016年,除了Pb、As、Cd以外其他 几种重金属含量整体上都出现下降的趋势,其中 Mn、 Co下降趋势明显。这可能与此阶段国家建立了呼伦湖 国家自然保护区,加强污染治理及湖泊环境保护的力 度有关。

将呼伦湖表层沉积物含量与全国其他主要湖泊 和水库相比(表 4), 呼伦湖几种重金属含量均低于梁 子湖、洪泽湖和官厅水库, Mn 含量高于其他湖泊和水 库,Co、Cu 含量高于扎龙湿地和太湖,Cr 含量高于鄱 阳湖,远低于洪泽湖。说明呼伦湖与其他主要湖泊相 比重金属污染较轻,但 Cr、Mn、Co、Cu 的污染问题仍 不容忽视。

2.3 沉积岩芯重金属相关分析及来源分析

沉积物重金属来源复杂多样,总结起来主要分为 两大类:一类是人类生产生活过程中产生的污染物 质;另一类是来源于自然环境[33-35]。在没有人为污染的 情况下,沉积物中的重金属含量值一般很低,不会对 人体健康造成危害[35]。对重金属的不同来源进行判 读,一方面可以为重金属在沉积物中的地球化学行为

及其与环境的关系等方面提供重要的证据,另一方面 则是准确、有效治理污染的前提的。本文采取相关分 析结合主成分分析对湖泊沉积物重金属来源进行定 性定量分析。

2.3.1 沉积岩芯成分相关性分析

已有研究结果表明,在自然状态下湖泊沉积物中 的粘土含量与重金属元素的含量表现为较好的正相 关关系,但是人为因素的污染可能会改变重金属元素 与粒度的相关性,使相关性降低[29,37-38]。从表 5、表 6、 表 7 可以看出,1865—1973 年,除了 Mn、Cd 外其他 6 种重金属元素均与粘土正相关,且元素间也呈现了较 好的相关性,在某种程度上表明了这个阶段6种重金 属在沉积物中有相似或相同的存在形式,是次生的黏 十矿物,日含量相对较低,说明此阶段湖泊重金属多 为自然状态下沉积,其主要来源可能为矿物、岩石的 自然风化,人类对湖泊的影响相对较小[39]。1973— 1992 年各种金属成分与粘土的相关性均较低,说明 人类活动严重干扰了湖泊的自然沉积,在此阶段各种 重金属均受到不同程度的人为活动干扰。1992—2016

表 4 呼伦湖沉积物重金属含量与其他湖泊含量对比

Table 4 Comparison of heavy metals in the surface sediments in Hulun Lake and other regions

湖泊 采样年份 样点数	长上粉	重金属表层平均含量/mg·kg-1								文献来源	
	件从奴	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	Cd	As	Pb	又 瞅木你	
呼伦湖	2016	1	37.07	903.2	8.74	25.36	50.56	0.19	21.44	21.84	本研究
梁子湖	2014	6	_	_	20	50	124	0.8	_	29	[49]
扎龙湿地	2010	1	_	210.18	2.17	4.31	12.8	0.25	88.86	21.45	[29]
太湖	2012	30	_	_	_	22.24	57.35	0.45	_	38.27	[10]
鄱阳湖	2012	51	29.08	_	_	43.76	89.7	1.56	_	68.55	[11]
洪泽湖	2008	10	57.6	_	_	35.0	72.4	3.24	23.7	18.8	[38]
官厅水库	2014	5	_	_	_	36.1	104	0.205	_	33.5	[3]

表 5 1865—1973 年沉积物重金属含量的相关系数(n=30)

Table 5 1865—1973 correlation analysis among various heavy metals(*n*=30)

	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	As	Cd	Pb	粘土
Cr	1								
Mn	-0.468**	1							
Co	0.603**	-0.379*	1						
Cu	0.690**	-0.312	0.541**	1					
Zn	0.548**	-0.270	0.551**	0.326	1				
As	0.335	0.284	0.499**	0.368*	0.592**	1			
Cd	0.683**	-0.183	0.405*	0.359	0.452*	0.345	1		
Pb	0.869**	-0.699**	0.772**	0.607**	0.654**	0.253	0.536**	1	
粘土	0.600**	-0.632**	0.580**	0.401*	0.636**	0.261	0.362*	0.765**	1

注:**.在 0.01 水平(双侧)上显著相关。*.在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

表 6 1973—1992 年沉积物重金属含量的相关系数(n=20)

Table 6 1973—1992 correlation analysis among various heavy metals (n=20)

	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	As	Cd	Pb	粘土
Cr	1								
Mn	0.705**	1							
Co	0.675**	0.995**	1						
Cu	0.580**	0.820**	0.829**	1					
Zn	0.664**	0.773**	0.762**	0.804**	1				
As	0.805**	0.661**	0.616**	0.677**	0.655**	1			
Cd	0.580**	0.765**	0.752**	0.813**	0.580**	0.731**	1		
Pb	-0.180	-0.145	-0.090	0.194	0.019	-0.133	0.170	1	
粘土	-0.143	-0.104	-0.090	0.039	0.043	-0.014	-0.120	0.458*	1

表 7 1992—2016 年沉积物重金属含量的相关系数(n=28)

Table 7 1992—2016 correlation analysis among various heavy metals (n=28)

	Cr	Mn	Co	Cu	Zn	As	Cd	Pb	粘土
Cr	1								
Mn	0.836**	1							
Co	0.896**	0.967**	1						
Cu	0.458*	0.199	0.377*	1					
Zn	0.686**	0.765**	0.757**	0.148	1				
As	-0.304	-0.486**	-0.335	0.548**	-0.379*	1			
Cd	-0.273	-0.454*	-0.338	0.357	-0.213	0.796**	1		
Pb	-0.010	-0.071	0.012	0.490**	-0.039	0.636**	0.784**	1	
粘土	0.472*	0.640**	0.622**	-0.054	0.573**	-0.375*	-0.521**	-0.398*	1

年 Cr、Co、Zn、Mn 与粘土间呈现显著相关, 其他重金 属与粘土相关性较低,说明 Cr、Co、Zn、Mn 此阶段可 能主要为自然源,Pb、As、Cu、Cd 相关性显著,说明此 阶段这四种重金属不同程度受到了人类干扰,人类活 动可能是其主要来源。

2.3.2 沉积岩芯重金属主成分分析

相关性分析结果表明在不同阶段重金属元素与 粘土以及相互之间呈现了不同的相关性,且具有明显 的阶段性,为了进一步分析呼伦湖沉积物中重金属的 污染来源,采用主成分分析法进行源解析。

对重金属元素含量进行主成分分析,可以定量了 解沉积岩芯中不同来源的重金属在该元素含量中占 据的贡献率[29]。如表 8 所示,第一阶段(1865—1973) 主成分分析得出了2组主成分,2组因子的累计方差 贡献率为70.16%,分别可以解释总方差的50.91%、 19.25%。Cr、Co、Pb、Cu、Zn、As 和粘土在第一主成分 上占有较高的主成分载荷,是控制呼伦湖表层沉积物 重金属来源及分布的最重要因子,Mn、Cd 在第二主 成分上占有较高的主成分载荷。由于此阶段该区以畜 牧业为主,沉积速率较低,呈现缓慢的上升趋势,表明 8种重金属元素可能多为自然沉积,人类对于湖泊重 金属含量影响较为微弱。第二阶段(1973—1992)主 成分分析得出了2组主成分,2组因子的累计方差贡 献率为71.47%,分别可以解释总方差的52.13%、 19.34%。Cr、Mn、Co、Cu、Zn、Cd、As 在第一主成分上 占有较高的主成分载荷,Pb 在第二主成分上占有较 高的主成分载荷,粘土在两个主成分上载荷均较低。 说明此阶段湖泊重金属元素沉积以人类活动输入为 主,湖泊重金属元素沉积环境受到人类的强烈干扰。 呼伦湖附近地区属东乌旗-大兴安岭北段 Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Au-Ni-Mn-Cr-CoⅢ级成矿带[16-21],20世 纪70年代后,呼伦湖周围铅锌矿以及煤炭等矿产资 源大规模开采,由于技术限制 Cd、Zn、Cu 等重金属在 湖底累积[40-41]。Cd 一般来源于使用农药和化肥等农 业活动[42-43], As 主要来源于农药和有机肥料等人类 活动[44-45],70~80年代呼伦湖周边地区农田开始大量 使用除草剂、肥料和农药[31],因此,第一主成分可认定 为工矿业及农业污水。此外呼伦湖附近的满洲里是 重要的边贸城市,交通运输快速发展,可以认定橡胶 轮胎磨损、润滑油耗损及汽车尾气等交通源是 Pb 的

744 农业环境科学学报 第 37 卷第 1 期

表 8 沉积物岩芯中各重金属元素的不同年代主成分分析结果

Table 8 Principal component analysis of heavy metal elements in sediment cores

	因子载荷										
重金属	I	.1	I	.2	L3						
_	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC3				
Cr	0.857	-0.060	0.788	-0.169	0.886	0.290	-0.038				
Co	0.859	-0.051	0.922	-0.125	0.955	0.243	0.021				
Mn	-0.526	0.657	0.945	-0.148	0.956	0.074	0.053				
Cu	0.695	-0.012	0.509	0.605	0.160	0.855	-0.287				
Zn	0.754	0.464	0.833	0.137	0.231	0.331	0.763				
Cd	0.307	0.754	0.790	0.302	-0.313	0.237	0.578				
Pb	0.938	-0.206	-0.263	0.764	-0.221	0.800	-0.049				
As	0.555	0.577	0.851	0.113	-0.601	0.697	-0.171				
粘土	0.706	-0.367	0.236	-0.711	0.812	-0.126	-0.122				
方差贡献率	50.91%	19.25%	52.13%	19.34%	42.85%	24.30%	11.67%				
累积方差贡献率	50.91%	70.16%	52.13%	71.47%	42.85%	67.15%	78.81%				

注:百分数为各因子(各主成分)在总变量中的贡献率。

重要来源,因此,第二主成分可以认定为交通源。第 三阶段(1992—2016)主成分分析得出了3组主成分, 3组因子的累计方差贡献率为78.81%,分别可以解 释总方差的 42.85%、24.30%、11.67%, Cr、Mn、Co 与 粘土在第一主成分上具有较高的主成分载荷,Pb、 Cu、As 在第二主成分上具有较高的主成分载荷,Zn、 Cd 在第三主成分上具有较高的主成分载荷。由于自 然保护区建立,保护措施的加强,此阶段 Cr、Mn、Co 有相同来源为自然沉积,第一主成分为自然源。As 和 Cu 普遍存在于化肥和农药中,2000年国家实行退耕 还林还草工程, As、Cu 与耕地变化相一致, 因此可以 认定 As、Cu 含量与生活排污和化肥农药的流失有着 密切联系[46-48]; Pb 延续了上一阶段的变化趋势, 随着 汽车保有量的增加,汽车等交通源是 Pb 的主要来 源[3]。因此,第二主成分是生产生活污水废水及交通 源。Zn、Cd与第二阶段一致,主要源于自然矿产资源 的开采与冶炼, 因此第三主成分为矿产资源开发及 金属冶炼。

2.4 沉积物重金属潜在生态风险评价

本次呼伦湖沉积物岩芯中重金属单元素潜在生态危害系数及综合重金属潜在生态危害指数如图 4 所示。

由重金属单元素潜在生态危害系数可以看出,呼 伦湖柱状沉积物中潜在生态危害最大的重金属为 Cd,其次为 As。由于 Cd 毒性响应系数相对较高,其在 1992 年后的潜在生态危害为超强,以前为强污染程 度,平均指数为 113.17。As 在 1992 年之前危害系数 基本小于 30,处于轻微生态风险,1992 年以后系数基本在 30~60 之间,属于中等潜在生态风险。其他几种元素生态风险系数均小于 30,属于轻微生态危害。潜在生态危害由大到小排序为 Cd>As>Pb>Cu>Co>Cr> Mn>Zn。这与张晓晶等临研究基本一致。由多种重金属潜在生态危害指数 RI 评价结果可知,1992 年以前,属于中等风险强度,部分年份出现强生态风险,1992 年后多数年份为强生态风险,有些年份超过了120,属于超强的污染强度。各深度 RI 值中 Cd 的贡献率最大,As 次之,Cd、As 为主要贡献因子。因此,对呼伦湖的 Cd、As 污染应予以重视,呼伦湖的环境保护及治理有待进一步加强。

3 结论

- (1)呼伦湖沉积岩芯沉积速率自 1865—2016 年 以来呈现了由慢到快到加速趋势变缓的过程,初步认 定,沉积速率的变化趋势与呼伦湖流域人类活动和国 家水土保持政策相吻合。
- (2)重金属元素含量变化呈现了明显的阶段性特征,其垂直分布的变化与人类活动影响存在着密切的相关性。1973年以前含量较低,主要为自然状态下沉积;1973—1992年,含量明显增加,人类活动源是重金属的主要来源;1992—2016年,Cr、Mn、Co、Cu、Zn含量出现明显下降趋势,人类活动和自然源构成了重金属的共同来源。呼伦湖与其他主要湖泊相比重金属含量较低,污染较轻。
 - (3)生态风险评价结果表明,As、Cr、Mn、Co、Cu、

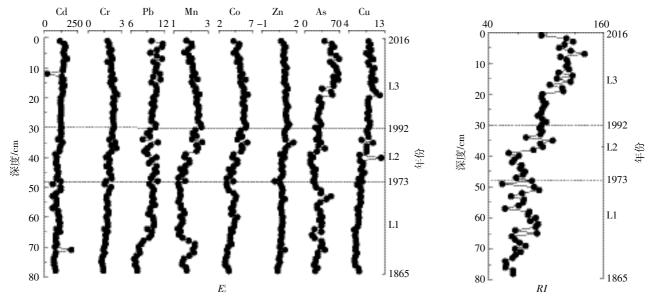


图 4 重金属单元素潜在生态危害系数(E))及综合潜在生态风险指数(RI)变化

Figure 4 Potential pollution risk index of heavy metal element (E_r^i) and potential ecological risk index (RI)

Zn、Pb长时间为轻微生态风险。1992年后 As 为中等潜在生态风险,Cd 为超强生态风险,1992年以前 Cd 主要为强生态风险。多种重金属潜在生态风险近年来处于偏高的水平状态,研究区域沉积物样品的生态风险以 Cd、As 为主。

参考文献:

- [1] 陈敬安, 万国江, 黄荣贵. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染 历史研究[J]. 地质地球化学, 1998, 26(2):1-8. CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, HUANG Rong-gui. Geochemical
 - phases and pollution history of heavy metals in sediments of lake Erhai [J]. Geology–geochemistry, 1998, 26(2):1–8.
- [2] Arnason J G, Fletcher B A. A 40+ year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA[J]. Environmental Pollution, 2003, 123(3):383-391.
- [3] 张伯镇,王 丹,张 洪,等. 官厅水库沉积物重金属沉积通量及沉积物记录的生态风险变化规律[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2):458-465
 - ZHANG Bo-zhen, WANG Dan, ZHANG Hong, et al. The flux of sedimentary heavy metals and variation of ecological risks recorded by sediments from Guanting Rervoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2):458-465.
- [4] Loska K, Wiechua D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(8):723– 733.
- [5] Singh K P, Malik A, Sinha S, et al. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River(India) using principal component analysis[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 6166(1/2/3/4): 321–341.

- [6] 贾 英,方 明,吴友军,等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1):147-153.
 - JIA Ying, FANG Ming, WU You–jun, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in river sediments of Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(1):147–153.
- [7] 谢 婷, 罗东霞, 杨瑞强. 西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2014, 35(11):4135-4142. XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang. Vertical distribution pattern and ecological risk assessment of heavy metals in a sediment core from Pumoyum Co, Tibet[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(11): 4135-4142.
- [8] 蒋 豫,刘 新,高俊峰,等. 江苏省浅水湖泊表层沉积物中重金属 污染特征及其风险评价[J].长江流域资源与环境, 2015, 24(7):1157-1162
 - JIANG Yu, LIU Xin, GAO Jun-feng, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of shallow lakes in Jiangsu Province, China[J]. Resources ang Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7):1157–1162.
- [9] Yan X D, Zhang F, Zeng C, et al. Relationship between heavy metal concentrations in soils and grasses of roadside farmland in epal[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9 (9):3209–3226.
- [10] 秦延文、张 雷, 郑丙辉, 等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析 及污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12):4291-4299. QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, et al. Speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Taihu Lake
- [11] 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 等. 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响[J]. 环境科学, 2014, 35(5):1750–1758. LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, et al. Influence of the river-lake relation change on the distribution of heavy metal and eco-

[J]. Environmental Science, 2012, 33(12):4291-4299.

- logical risk assessment in the surface sediment of Poyang Lake[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5):1750–1758.
- [12] 赵胜男, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海沉积物重金属生物活性及环境污染评估[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3):481-489.
 - ZHAO Sheng-nan, LI Chang-you, SHI Xiao-hong, et al. Bioavailability and environment pollution evaluation of sediments heavy metals in Wuliangsuhai Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(3):481–489.
- [13] 张晓晶, 李畅游, 张 生, 等. 呼伦湖沉积物重金属分布特征及生态 风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):157-162.
 - ZHANG Xiao-jing, LI Chang-you, ZHANG Sheng, et al. Distribution features and ecological risk assessment of heavy metals in superficial sediments of Hulun Lake[J]. *Journal of A gro-Environment Science*, 2010, 29(1):157–162.
- [14] 都达古拉, 何 江, 吕昌伟, 等. 呼伦湖水-沉积物系统中重金属的含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):118-123.
 - Dudagula, HE Jiang, LÜ Chang-we, et al. Distribution of heavy metals in water-sediment system of Hulun Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):118–123.
- [15] 梁丽娥, 李畅游, 史小红, 等. 2006—2015 年内蒙古呼伦湖富营养 化趋势及分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6):1265-1273.
 - LIANG Li-e, LI Chang-you, SHI Xiao-hong, et al. Analysis on the eutrophication trends and affecting factors in Lake Hulun, 2006—2015 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(6):1265–1273.
- [16] 陈炳蔚, 陈廷愚. 横贯亚洲巨型构造带的基本特征和成矿作用[J]. 岩石学报, 2007, 23(5); 865-876.
 - CHEN Bing-wei, CHEN Ting-yu. Trans-Asian Tectonic Mega-Belt: Its principal characteristics and metallogeny[J]. *Acta Petrologica Sini-ca*, 2007, 23(5):865-876.
- [17] Distanov E G, 吴素珍. 西伯利亚元古宙黄铁矿-多金属矿床和热液-沉积作用在其形成中的作用[J]. 国外前寒武纪地质, 1987 (3):25-32.
 - Distanov E G, WU Su–zhen. The role of Proterozoic pyrite polymetallic deposits and hydrothermal sedimentation in the formation of Siberia[J]. *Geological Survey of Finland*, 1987(3):25–32.
- [18]王 雄. 大兴安岭中北段白井山地区铅锌矿综合信息成矿预测[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
 - WANG Xiong. Synthetic information prediction of lead-zinc deposit in Baijingshan Area, middle-north part of Da Hinggan Mountains[D]. Changchun; Jilin University, 2016.
- [19] 祝洪臣, 张炯飞, 权 恒. 大兴安岭中生代两期成岩成矿作用的元素、同位素特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(4):436-442.
 - ZHU Hong-chen, ZHANG Jiong-fei, QUAN Heng. Two stages of meso-zoic lithogenesis and mineralization in Daxing' anling mountains [J]. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition), 2005, 35(4):436–442.
- [20] 李宪臣, 秦克章. 内蒙古甲乌拉-查干银铅锌铜矿床主成矿元素分布规律及意义[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999(6):512-516.
 - LI Xian-chen, QIN Ke-zhang. Distribution pattern of major ore-forming elements and its significance in the Jawula-Chagan Ag-Pb-Zn-Cu

- ore field, Inner Mongolia[J]. Geological Exploration for Non-ferrous Meyals, 1999(6):512–516.
- [21] 孙 钧. 大兴安岭成矿带中金矿找矿前景的探讨[J]. 有色金属矿产与勘查, 1996(1): 3-9.
 - SUN Jun. On the prospecting prospect of gold deposits in the Daxinganling Metallogenic Belt[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Meyals*, 1996(1):3–9.
- [22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control; A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975–1001.
- [23] 刘 永, 余俊清, 张丽莎, 等. 近 60 年来星云湖沉积物中重金属污染记录[J]. 盐湖研究, 2012, 20(2):1-10 LIU Yong, YU Jun-qing, ZHANG Li-sha, et al. Heavy metal pollution
 - record of Xingyun Lake in the past 60 years[J]. Journal of Salt Lake Research, 2012, 20(2):1–10.
- [24] 曾令晗, 宁栋梁, 毛 欣, 等. 近 60 年大治市三里七湖重金属污染沉积记录[J]. 地球环境学报, 2014(4): 252–260.

 ZENG Ling-han, NING Dong-liang, MAO Xin, et al. A 60-year sedimentary record of heavy metal pollution in Sanliqi Lake in Daye City[J].

Journal of Earth Environment, 2014(4):252-260.

- [25] 郑 煌, 杨 丹, 邢新丽, 等. 洪湖沉积柱中重金属的历史分布特征及来源[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7):2139-2145.

 ZHENG Huang, YANG Dan, XING Xin-li, et al. Historical records, distribution characteristics and sources of heavy metals from sediment core in Honghu Lake, China[J]. China Environmental Science, 2016, 36(7):2139-2145.
- [26] 王小雷, 杨 浩, 赵其国, 等. 利用 ²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 和 ²⁴¹Am 计年法测算云南抚仙湖现代沉积速率[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1):136-142. WANG Xiao-lei, YANG Hao, ZHAO Qi-guo, et al. Radionuclide dating (²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am) and modern sedimentation rate in Lake Fuxian [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1):136-142.
- [27] 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 等. 东平湖沉积物 ²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 垂直分布及年代学意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5);981–987.

 CHEN Shi-yue, WANG Su-min, CHEN Ying-ying, et al. Vertical distribution and chronological implication of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in sediments of Dongping Lake, Shandong Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5);981–987.
- [28] 王小雷, 杨 浩, 丁兆运, 等. 云南抚仙湖近现代沉积速率变化研究 [J]. 地理学报, 2011, 66(11):1551–1561.

 WANG Xiao-lei, YANG Hao, DING Zhao-yun, et al. Modern sedimentation rates of Fuxian Lake by ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11):1551–1561.
- [29] 苏 丹, 臧淑英, 叶华香, 等. 扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别[J]. 环境科学, 2012, 33(6):1816–1822. SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, et al. Character and sources identification of heavy metals contamination in sediment from the core sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland[J]. Environmental Science, 2012, 33(6):1816–1822.
- [30] 柴社立, 高丽娜, 邱殿明, 等. 吉林省西部月亮湖沉积物的 ²⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 测年及沉积速率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43 (1):134-141.
 - CHAI She-li, GAO Li-na, QIU Dian-ming, et al. 210Pb and 137Cs dating

- of the sediment core and its recent accumulation rates in Yueliang Lake in West Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 2013, 43(1):134–141.
- [31] 阎任沛. 呼伦贝尔市农业面源污染的现状与对策[C]//中国农学会. 全国农业面源污染与综合防治学术研讨会论文集. 2004:3.
 - YAN Ren-pei. Present situation and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Hulun Buir City[C]//Chinese Agricultural Association. Proceedings of the symposium on agricultural non-point source pollution and integrated control in China. 2004;3.
- [32] 任铁军, 包立军, 雷大光, 等. 中蒙边界河湖水质现状及其评价[J]. 内蒙古环境保护, 1998, 10(4):35–38.

 REN Tie-jun, BAO Li-jun, LEI Da-guang, et al. The current status and evaluation of water quality in the rivers and lakes of Sino-Mongolia border[J]. Inner Mongolia Environmental Protection, 1998, 10(4):35–38.
- [33] 刘 伟, 陈振楼, 许世远, 等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学, 2000, 27(3):535-543.

 LIU Wei, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Pollution character of heavy metals in river sediments from small towns, Shanghai[J]. Environmental Science, 2000, 27(3):535-543.
- [34] Spencer K J, De Carlo E H, McMurtry G M. Isotopic clues to sourcenatural and anthropogenic lead in sediments and soils from O' ahu Hawai'i[J]. Pacific Science, 1995, 49(4):492-510.
- [35] 毛 欣, 陈 旭, 李长安, 等. 大冶市城市湖泊表层水体中重金属的分布特征及其来源[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(5):33–37, 84.

 MAO Xin, CHEN Xu, LI Chang-an, et al. Distribution of heavy metal elements in surface water from Three Lakes in Daye City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(5):33–37, 84.
- [36] 翟雨翔, 卢新卫, 黄 静, 等. 渭河(咸阳段)表层沉积物中重金属形态分布特征[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3):145-148.

 ZHAI Yu-xiang, LU Xin-wei, HUANG Jing, et al. Distribution of heavy metal speciation in surface sediment of Weihe River at Xianyang Section[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3):145-148.
- [37] 林 琳, 吴敬禄. 太湖梅梁湾沉积岩芯元素地球化学记录的多元统计分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1):76-82.

 LIN Lin, WU Jing-lu. Application of multivariate statistical analysis to elemental geochemical records of lacustrine sediment of Meiliang Bay in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(1):76-82.
- [38] 张文斌, 余 辉. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 399-406.

 ZHANG Wen-bin, YU Hui. Vertical distribution characteristics of nutrients and heavy metals in sediments of Lake Hongze[J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 399-406.
- [39] 敖 亮, 雷 波, 王业春, 等. 三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析[J]. 环境科学, 2014, 35(1):179–185.

 AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, et al. Sediment risk assessment and heavy metal source analysis in typical country water Level Fluctu-

- ated Zone (WLFZ) of the Three Gorges [J]. Environmental Science, 2014, 35(1):179–185.
- [40] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律[J]. 矿物学报, 2009, 29(4):471-480.

 ZHOU Jia-xi, HUANG Zhi-long, ZHOU Guo-fu, et al. The occurrence states and regularities of dispersed elements in Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(4):471-480.
- [41] 张华俊, 陈修康, 韩博平, 等. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析[J]. 环境科学, 2012, 33(4):1167–1175.

 ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, et al. Distribution and pollution characteristics of nutrients and heavy metals in sediments of Hedi Reservoir[J]. Environmental Science, 2012, 33(4):1167–1175.
- [42] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, 54(3):267-277.
- [43] 方 明, 吴友军, 刘 红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2):563-569. FANG Ming, WU You-jun, LIU Hong, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2):563-569.
- [44] 魏大成. 环境中砷的来源[J]. 国外医学地理分册, 2003, 24(4): 173-175.
 - WEI Da-cheng. The source of arsenic in environment[J]. Foreign Medical Sciences (Section of Medgeography), 2003, 24(4):173–175.
- [45] Hudson-Edwards K A, Houghton S L, Osborn A. Extraction and analysis of arsenic in soils and sediments[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2004, 23(10/11):745-752.
- [46] 何振立, 周启星, 谢正苗. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1998: 244-276.

 HE Zhen-li, ZHOU Qi-xing, XIE Zheng-miao. Soil-chemical bal-ances of pollution and beneficial elements[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998: 244-276.
- [47] Garcia R, Maiz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis of road soils and grasses from Gipuzkoa (Spain) [J]. Environ Technol, 1996, 17 (7):763-770.
- [48] Gray C W, Mclaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroe –* cosystems, 1999, 54(3):267–277.
- [49]王 丹,孟 鑫,张 洪,等.梁子湖沉积物重金属污染现状分析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6):1901-1909.
 WANG Dan, MENG Xi, ZHANG Hong, et al. Pollution analysis and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Liangzi Lake
 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(6):1901-1909.