

# 松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征 及其风险评价

于万辉<sup>1</sup>, 王俊杰<sup>1,2</sup>, 臧淑英<sup>1</sup>

(1. 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, 黑龙江 哈尔滨 150025;

2. 黑龙江科技学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

**摘要:** 利用地理信息系统和地统计分析技术分析了松嫩平原湖泊群湖泊底泥重金属的空间变异特征, 并绘制了6种重金属的空间分异图, 利用地累积指数法和潜在生态危害指数法对湖泊底泥重金属的污染现状和潜在生态风险进行了评价。结果表明, 松嫩平原湖泊群底泥重金属含量除Mn低于土壤背景值外, 其他元素均高于背景值2~4倍, 并且重金属含量在空间上呈东北向西南方向逐渐降低, 表现出较强的相关性; 污染现状评价表明, Zn已处于中等以上的污染程度, 其他重金属污染程度较低, 而Mn无污染, 污染程度的顺序为Zn > Cu > Ni > Pb > Sr > Mn; 潜在生态风险评价表明, 评价的重金属均处于低生态风险程度, 单项重金属的风险程度顺序为Pb > Cu > Ni > Zn; 综合污染评价与风险评价, Zn的污染程度虽然较大, 但仍处于低风险程度。

**关键词:** 地统计分析; 空间变异; 地累积指数; 潜在风险

**中图分类号:** P951      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2012)08-1000-06

自19世纪中叶工业革命以来, 世界范围30%~40%的湖库遭受不同程度的影响<sup>[1]</sup>, 许多河流、湖泊和近海都已经遭受了不同程度的重金属污染<sup>[2,3]</sup>, 大多数湖泊尤其是城市附近的湖库底泥中重金属含量大大超过当地的土壤背景值<sup>[4,5]</sup>。已有研究表明, 重金属是具有潜在风险的重要污染物, 在受污染的水体中, 底泥(沉积物)中重金属含量可达水体的数百倍至数十万倍, 并在含量上具有较明显的分布规律<sup>[6,7]</sup>。湖泊底泥中的重金属除部分来自于湖泊周围山麓岩石风化和土壤侵蚀以外, 更主要的来自于流域内工矿废水和生活污水<sup>[8]</sup>。重金属进入水体之后, 由于各种物理和化学的作用, 最终进入底泥沉积物, 但是周围环境条件发生变化时, 又会发生底泥沉积物的可逆过程, 发生这种过程的原因就是重金属在底泥中存在不同的化学形态, 不同重金属形态对生物的有效性(毒性)有很大的差异。重金属具有生物链富集效应, 不仅破坏了湖泊生态环境, 还危害到水生生物及人类健康,

各国学者也通过采用各种指数对底泥(沉积物)中的重金属潜在生态危害进行评价<sup>[9]</sup>, 以研究沉积物受到重金属污染的程度及其潜在的生态危害。

地统计学方法作为一种空间分析方法不仅可以研究空间数据分布的结构性和随机性、空间相关性和依赖性、空间格局与变异, 还可以对空间数据进行最优无偏内插, 以及模拟空间数据的离散性及波动性。如今地统计学已经被广泛用于地理学、生态学、环境科学、土壤学等诸多领域的研究中<sup>[10,11]</sup>。本文通过对底泥中的重金属元素多个指标的测定、分析, 应用该方法在解析湖泊底泥重金属空间分布规律的基础上, 评价底泥沉积物中重金属的污染现状和潜在的生态风险程度, 为区域的环境保护与治理提供一份依据。

## 1 研究区与研究方法

本文选择松嫩平原湖泊群作为研究对象。松嫩平原位于黑龙江省西南部和吉林省西北部, 是

**收稿日期:** 2011-09-09; **修订日期:** 2011-12-28

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(41030743)、教育部博士点基金项目(20092329110001)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11553015)和黑龙江省高等学校科技创新团队建设计划项目资助

**作者简介:** 于万辉(1977-), 黑龙江哈尔滨人, 讲师, 主要研究方向为土地利用变化及其生态效应。E-mail: ywh1977@126.com

**通讯作者:** 臧淑英, 教授。E-mail: zsy6311@163.com

中国重要的粮食基地,松嫩平原有全国著名的石油产区,又有振兴老东北工业基地的重要城市。松嫩湖泊群是中国温带亚湿润地区的一个低平原湖泊群,在东北地区处于一个特殊而又重要的地位,湖泊区内工农业相对发达,部分湖泊出现了富营养化<sup>[12-14]</sup>和不同程度的重金属污染<sup>[15,16]</sup>,对松嫩平原的湖泊污染现状的研究是促进环境、资源、社会和谐发展,推动经济社会发展转入科学发展轨道,推进全面建设小康社会的关键。本文进行了实地采样,测定各重金属含量,利用地理信息系统和地统计技术分析6种重金属的空间变异特征,并对样地湖泊底泥重金属的污染现状和潜在生态风险进行了评价。

利用抓斗式采样器于2008年6~8月期间采集了松嫩平原湖泊群中的31个湖泊的表层底泥(图1)。在采集过程中,抓取表层底泥,重复3次,弃除动植物残体、塑料等杂物,保存于洁净塑料保鲜袋中(排出空气),所有样品迅速带回实验室放入冰箱内低温(4℃)保存,进行前处理、分析测定。用TAS-986型原子吸收分光光度计测定Cu、Ni、Mn、Pb、Sr、Zn共6种重金属元素的含量。

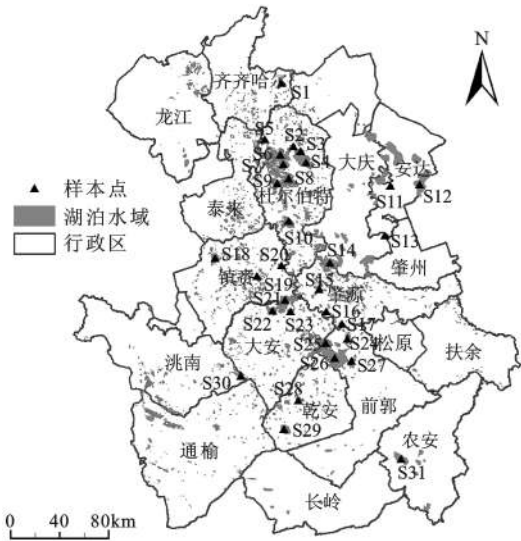


图1 松嫩平原湖泊群底泥样本分布  
Fig.1 Distribution of samples of lake sediments in the Songnen Plain

重金属的空间分布规律采用地统计分析的方法,重金属的污染评价及其潜在生态危害采用地积累指数法<sup>[17]</sup>和潜在生态危害指数法<sup>[18]</sup>。样本数据的半方差函数计算、Kriging插值和成果图件均

利用ArcGIS软件完成。  
湖泊底泥重金属污染的空间变异通过半方差函数来描述<sup>[10,11]</sup>。计算公式如下:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \tag{1}$$

式(1)中, $h$ 为样点的空间间隔距离,称为步长, $N(h)$ 为间隔距离为 $h$ 的样点数, $Z(x_i)$ , $Z(x_i+h)$ 为区域变化量 $Z(x)$ 在空间位置 $i$ 和 $x_i+h$ 处的实测值。

对重金属评价方法采用了地累积指数(Muller指数)法<sup>[17]</sup>。该方法不但要考虑到人为污染因素、环境地球化学背景值外,还考虑到了由于自然成岩作用可能引起背景值变动的因素,其表达式如下:

$$I_{\text{geo}}=\log_2\left[C_n/(K\times B_n)\right] \tag{2}$$

式(2)中, $C_n$ 为元素 $n$ 在沉积物中的含量(指质量比,实测值), $B_n$ 为沉积岩(即普通页岩)中的地球化学背景值,有时也采用当地无污染区该元素含量作为背景值; $K$ 是考虑到各地岩石的岩性差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为1.5)。依据 $I_{\text{geo}}$ 值将沉积物中重金属污染状况分7个等级<sup>[17]</sup>,见表1。

表1 Muller污染指数分级		
Table 1 Classification of pollution indexes		
$I_{\text{geo}}$	Muller指数分级	污染程度
$5 < I_{\text{geo}}$	VI	极强污染
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	V	强—极强污染
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	IV	强污染
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	III	中等—强污染
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	II	中等污染
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	I	无污染—中等污染
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无污染

对松嫩平原湖泊底泥重金属潜在生态风险评价采用Hakanson<sup>[18]</sup>潜在生态风险指数法评价,其计算公式为:

$$C_f^i=C_s^i/C_n^i; E_r^i=T_r^i\cdot C_f^i; RI=\sum E_r^i \tag{3}$$

式(3)中, $C_f^i$ 为重金属 $i$ 的污染指数, $C_s^i$ 为重金属 $i$ 的实测含量, $C_n^i$ 为重金属 $i$ 的计算参考值; $E_r^i$ 是重金属 $i$ 的潜在风险指数, $T_r^i$ 是重金属毒性响应系数, $RI$ 为综合潜在风险指数。 $E_r^i$ 和 $RI$ 的指数与分级标准<sup>[18]</sup>见表2。

表2 单项及综合潜在生态风险指数与分级标准

Table 2 Individual and general indices and grades of potential ecological risk assessment

$E_r^i$	单项污染物生态 风险等级	$RI$	综合潜在生态 风险等级
$E_r^i < 40$	低	$RI < 135$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$135 \leq RI < 265$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$265 \leq RI < 525$	重
$160 \leq E_r^i < 320$	重	$525 < RI$	严重
$320 \leq E_r^i$	严重		

2 结果与分析

2.1 湖泊底泥重金属的统计性描述

目前国内外对河流、湖泊底泥的环境质量标准,多采用区域土壤环境背景值<sup>[19]</sup>,本文采用松嫩平原土壤平均值为背景值<sup>[20,21]</sup>。由表3可以看出,Cu、Ni、Mn、Pb、Sr、Zn的平均值分别为29.09 mg/kg、35.07 mg/kg、306.83 mg/kg、25.57 mg/kg、134.97 mg/kg和189.79 mg/kg,与松嫩平原土壤背景值相比,Zn平均含量相当于背景值的3.6倍,且有近半数的样本含量达到背景值的4倍,已明显造成污染;与Zn相比,Mn的平均含量低于松嫩平原土壤背景值,且全部样本值均低于背景值,其他4种重金属的含量略高于土壤背景值。6种重金属的变异程度均为中等变异。

表3 松嫩平原湖泊底泥重金属的描述性统计分析(mg/kg)

Table 3 Descriptive statistics of heavy metals in sediments of lakes in the Songnen Plain

属性	样本数	最大值	最小值	标准差	平均值	背景值	变异系数(%)
Cu	31	106	8	17.79	29.09	17.78	61.16
Ni	31	52	16	10.31	35.07	23.65	29.4
Mn	31	468	30.4	115.93	306.83	484.96	37.78
Pb	31	54	7	11.22	25.57	20.23	43.88
Sr	31	257	32	45.11	134.97	113.76	33.42
Zn	31	320	65	57.33	189.79	52.02	30.21

表4 松嫩平原湖泊底泥重金属的空间变异参数

Table 4 Spatial variation parameters of heavy metals in sediments of lakes in the Songnen Plain

属性	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C_1$	变程 $\alpha$ (km)	块金值/基台值 $C_0/C_0+C_1$	决定系数 ( $R^2$ )	分布形态
Cu	球状模型	0.15	0.39	25.63	0.38	0.77	对数正态
Ni	高斯模型	91.33	145.25	25.63	0.63	0.91	正态分布
Mn	对数模型	6.13	13.24	25.63	0.46	0.78	BOX-COX 正态
Pb	对数模型	0.19	0.26	25.63	0.73	0.87	对数正态
Sr	高斯模型	1387.4	3445.3	25.63	0.4	0.92	正态分布
Zn	球状模型	2599.7	3567.9	18.2	0.73	0.98	正态分布

2.2 湖泊底泥重金属的空间变异特征与分布格局

表4反映的是湖泊底泥不同重金属含量的半方差函数理论模型及其相关参数。

由表4可知,6种重金属的分布形态基本为正态或者经变换呈正态分布,符合地统计分析的数据要求,且除Cu和Pb的半方差函数理论模型拟合的决定系数(分别为0.77和0.78)较小外,其他重金属的决定系数拟合度均在0.8以上,说明函数的理论模型选取基本符合要求。通过重金属块基比( $C_0/C_0+C_1$ )可知,6种重金属具有中等空间相关性,其中Cu、Mn和Sr的空间相关性较其他3种的相关性强些。对6种重金属的含量进行空间插值,结果见图2。6种重金属的空间分布状况比较相似,即由东北向西南逐渐降低。其中Cu的含量在大庆和安达境内的湖泊底泥中含量最高,在34 mg/kg以上,高于全区平均水平(29.09 mg/kg),Mn的含量在安达和杜尔伯特境内最高,在370 mg/kg以上,高于全区的平均水平(306.8 mg/kg),Ni的含量主要是大庆、杜尔伯特、安达和肇源的境内较高,均在34 mg/kg以上,Pb的含量在杜尔伯特和农安境内最高,含量在30 mg/kg以上,Sr在齐齐哈尔和杜尔伯特的含量达到最高,在165 mg/kg以上,其余地区的含量低于90 mg/kg,Zn的含量高于全区平均水平的地区有大庆、安达、杜尔伯特、肇源、农安和齐齐哈尔等地。



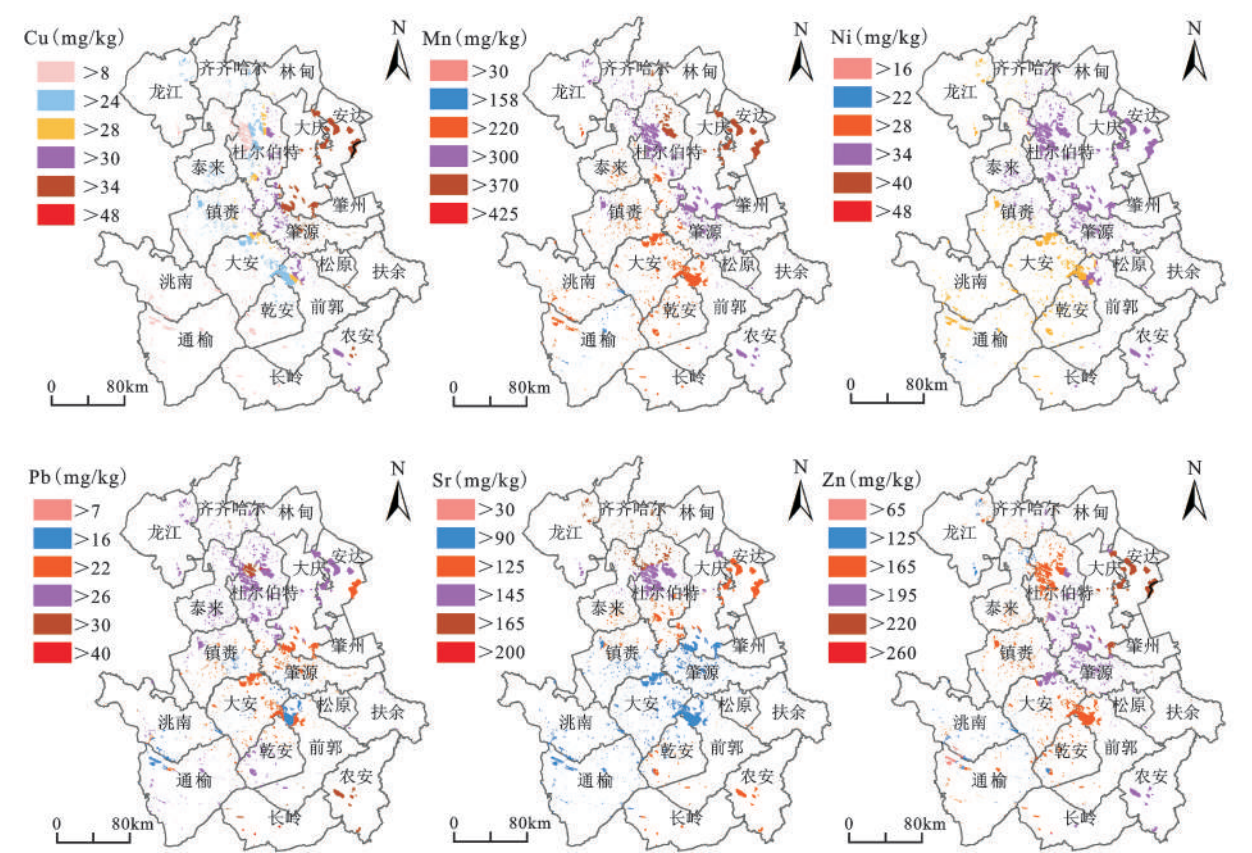


图2 松嫩平原湖泊群底泥重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in sediments of lakes in the Songnen Plain

2.3 湖泊底泥重金属潜在生态风险评价

在6种重金属中,Pb、Cu、Ni和Zn对生态环境危害较大,Mn和Sr在本区含量较少且生态危害不大,因此,选取此4种重金属元素对松嫩平原湖泊底泥重金属潜在生态风险进行评价,结果见表5,该区域的底泥重金属潜在的生态风险低,单项污

染物的风险顺序为Pb>Cu>Ni>Zn,其中样本S11处的Cu的单项生态风险指数接近40,风险等级偏中,其余样本的单项生态风险等级均为低级程度,4种重金属的综合潜在生态风险值小于135,所以松嫩平原湖泊的潜在生态风险等级均处于低级程度,情况良好。

表5 各样本单项与综合潜在生态风险指数

Table 5 Individual and general indices of potential ecological risk, and risk grades assessment at each samples

样本	单项潜在风险指数 $E_r^i$				综合潜在风 险指数 RI	样本	单项潜在风险指数 $E_r^i$				综合潜在风 险指数 RI
	Cu	Ni	Pb	Zn			Cu	Ni	Pb	Zn	
S1	9.12	5.92	12.24	4.13	26.38	S17	12.48	6.44	9.76	4.1	23.35
S2	8.76	5.4	7.92	3.48	37.72	S18	5.4	4.04	8.72	4.61	26.04
S3	10.14	7.44	15.04	4.23	30.14	S19	9.42	6.6	6.48	3.01	32.59
S4	10.44	7.56	8.08	3.16	15.54	S20	9.12	5.52	12.16	5.18	35.36
S5	4.02	3.04	6.32	1.85	42.07	S21	9.78	6.44	14.24	4.25	27.07
S6	8.76	7.44	21.36	3.54	28.4	S22	10.8	7.8	4.32	3.54	22.89
S7	6.42	6.2	12.4	2.77	29.79	S23	9.78	5.08	4.32	3	40.35
S8	8.1	5.92	10.32	4.65	19.5	S24	21.96	7.12	6.32	4.27	24.35
S9	3.36	3.72	10.32	1.88	29.83	S25	4.74	3.4	12.64	3.15	20.96
S10	9.42	7.12	9.12	3.77	58.8	S26	8.76	5.6	3.52	2.45	27.45
S11	35.76	4.56	11.44	6.15	24.8	S27	6.72	4.32	11.68	4.11	11.46
S12	7.44	7.2	5.52	3.88	38.92	S28	2.7	2.72	3.92	1.92	41.51
S13	10.14	8.24	16.32	3.4	17.13	S29	11.82	8.8	16.08	3.93	20.85
S14	8.76	3.88	2.8	1.25	29.83	S30	2.7	3.4	11.84	2.65	43.16
S15	10.44	5.76	7.52	5.54	43.01	S31	13.5	8.44	15.84	4.5	32.26
S16	13.5	8.8	15.04	4.75	33.56	平均	9.81	5.93	10.12	3.65	30.16

### 3 结 论

1) 通过对松嫩平原湖泊群的底泥重金属含量的测定得出, Mn 的含量较低, 低于区域土壤背景值, 可能与本区域没有相应的 Mn 工业有关; Zn 的含量较高, 高于背景值近 4 倍; 其他 4 种重金属的含量略高于该区域的背景值。

2) 通过半方差函数分析和 Kriging 插值得出, 6 种重金属在空间分布上呈东北向西南逐渐降低, 其中大庆、安达、杜尔伯特、肇源、齐齐哈尔和农安等地的湖泊底泥重金属含量在全区域最高, 与这些城市是石油化工基地、重工业基地和农业基地有关, 表明该地区在一定程度上受到人类活动的影响。

3) 采用地累积指数法评价 6 种重金属的污染程度, 除 Zn 的污染程度属中等或以上, 其余 5 种金属均污染不大, 其中 Mn 为无污染或者低污染; 而潜在生态风险评价中, 对毒性较大的 Pb、Cu、Ni 和 Zn 评价后得出, 松嫩平原的湖泊底泥生态风险很低, 4 种金属的风险顺序为  $Pb > Cu > Ni > Zn$ ; 综合两种评价方法, 虽然 Zn 的含量较大, 污染较重, 但由于毒性不大, 使得其潜在的生态风险很低, 但 Cu (S11 处) 的生态风险指数较大, 接近中度风险。

### 参考文献:

- [1] 联合国环境署. 水体富营养化[R]. 中国学术期刊(光盘版)电子出版社, 2002.
- [2] Rona V, Horst B, Wim S. Development of the heavy metal pollution trends in several European rivers: an analysis of point and diffuse sources[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(12): 215-223.
- [3] Mudroch A, Azcue D J M. *Manual of Aquatic Sediment Sampling*[M]. Boca Raton: Lewis Publications, 1995.
- [4] Taylor S E, Birch G F. The Environmental Implications of Readily Resuspended Contaminated Estuarine Sediments[C]. 30th International Geological Congress Abstracts, 1996, (13): 424.
- [5] Singh M, Muller G, Singh B. Heavy Metals in the Sediments of the Ganga River system, India: Natural Background and Anthropogenic Input[C]. 30th International Geological Congress Abstracts. 1996, (3): 446.
- [6] 施加春, 刘杏梅, 于春兰, 等. 浙北环太湖平原耕地土壤重金属的空间变异特征及其风险评价研究[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(5): 824-830.
- [7] 王铁宇, 罗 维, 吕永龙, 等. 官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 225-231.
- [8] 黎秉铭, 万国江, 江成忠, 等. 滇池、洱海水体及沉积物中重金属元素的行为[J]. *环境科学*, 1995, **16**(2): 50-53.
- [9] 范栓喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(17): 310-315.
- [10] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全的空间变异特征[J]. *地理研究*, 2004, **23**(1): 63-70.
- [11] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西省兴国县土壤全氮和机质的空间变异及其分布格局[J]. *应用与环境生物学*, 2004, **10**(1): 64-67.
- [12] 张艳红, 邓 伟, 翟金良. 松嫩平原西部湖泊水环境问题、成因与对策[J]. *干旱区资源与环境*, 2001, **15**(1): 31-36.
- [13] 王俊杰, 朱德清, 臧淑英. 松嫩平原中西部湖泊底泥营养盐的空间变异特征[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, **27**(2): 92-95.
- [14] 岳 勇, 程红光, 杨胜天, 等. 松花江流域非点源污染负荷估算与评价[J]. *地理科学*, 2007, **27**(2): 231-236.
- [15] 孙 丽, 臧淑英, 肖海丰, 等. 连环湖他拉红泡重金属和营养元素的沉积记录[J]. *地理与地理信息科学*, 2010, **26**(4): 99-103.
- [16] 张仲胜, 王起超, 邵志国, 等. 哈达山水利枢纽对第二松花江下游地区汞污染的影响[J]. *地理科学*, 2008, **28**(2): 291-295.
- [17] 李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 等. 应用地累积指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. *中国安全科学学报*, 2006, **16**(12): 135-139.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [19] 余国营, 吴燕玉. 土壤环境中重金属元素的相互作用及其对吸附特性的影响[J]. *环境化学*, 1997, **16**(1): 31-36.
- [20] 刘兴久, 赵雅玲. 松嫩平原区域土壤中 8 种重金属元素的背景值及其相关因素[J]. *东北农学院学报*, 1987, **18**(2): 113-118.
- [21] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

## The Spatial Variability Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals of Lake Sediments in the Songnen Plain

YU Wan-hui<sup>1</sup> WANG Jun-jie<sup>1,2</sup> ZANG Shu-ying<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of remote sensing monitoring of geographic environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China;

2. Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China)

**Abstract:** Geostatistics is useful for characterizing and mapping spatial variability of heavy metal. The geostatistics method combined with geographic information system (GIS) was applied to the spatial variability of heavy metal in lake sediments in the Songnen Plain, then drawing the map of heavy metals by Kriging method. The geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ) and the potential ecological risk index were applied for assessing the status of sediment heavy metal pollution and the extent of potential ecological risk. The results indicated that the content of Mn (30.4–468 mg/kg) was lower than soil environmental background values of the Songnen Plain (484.96 mg/kg), but other five heavy metals were higher than the background values. The mean contents of Cu, Zn, Ni, Pb and Sr in lake sediments were 29.09 mg/kg (soil environmental background value was 17.78 mg/kg), 189.79 mg/kg (52.02 mg/kg), 35.07 mg/kg (23.65 mg/kg), 25.57 mg/kg (20.23 mg/kg) and 134.97 mg/kg (113.76 mg/kg). The spatial distribution map of heavy metal demonstrated that the distribution pattern of heavy metal in lake sediments was that the northeast region was higher than the southwest in the Songnen Plain, the contents of heavy metals in the city of Daqing, Zhaoyuan, Anda, Qiqihar, Dorbod and Nong'an were higher than others areas.  $I_{geo}$  indicated that the pollution extent of heavy metals followed the order that  $Zn > Cu > Ni > Pb > Sr > Mn$ , Mn was non-pollution and the pollution of Zn had been above mid-level ( $1 < I_{geo} \leq 2$ ), but others were at low-level pollution ( $I_{geo} \leq 1$ ). The single potential ecological risk of heavy metals indicated all elements were in low-level risk ( $E_r^i < 40$ ), the order was  $Pb > Cu > Ni > Zn$ . Combined the geo-accumulation index with the potential ecological risk index, Zn was in mid-level pollution, but in low-level potential ecological risk. The results showed that the Songnen Plain was affected by human activities.

**Key words:** geostatistics; spatial variation; geo-accumulation index; potential ecological risk