

图们江流域湿地土壤重金属污染特征

杨亮^{1,2}, 朱卫红^{1,2*}, 熊琪^{1,2}, 曹光兰^{1,2}, 金日²

(1. 延边大学长白山生物资源与功能分子教育部重点实验室, 延吉 133002; 2. 延边大学理学院地理系, 延吉 133002)

摘要:以中国一侧图们江流域为研究区, 选取该流域湿地为研究对象, 采集 85 个表层土壤样本, 对 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 这 7 种重金属含量进行测定。利用主成分分析法探索污染来源, 通过地质累积指数与内梅罗指数相结合的综合指数法 (GNI) 及潜在生态危害指数法 (RI) 并结合 GIS 技术对土壤重金属污染程度及空间分布特征进行分析。结果表明, 图们江流域湿地土壤 7 种重金属中 Cu、As、Cd 和 Pb 污染情况显著。Cu、Zn、As 和 Pb 主要受人为因素影响, Cr、Ni 和 Cd 主要由自然因素影响。图们江流域湿地土壤重金属新综合污染指数评价总体上基本处于偏中度到中度, 其中 As 污染较为严重; 潜在生态危害污染评价总体上处于轻度; 其中 Cd 污染较为严重。从整体流域分界上看, 污染程度表现为中游>下游>上游; 从整体空间分布上看, 污染程度由西向东表现为先升高在降低, 由北向南表现为降低。

关键词: 图们江流域; 湿地; 土壤重金属; 污染评价; 主成分分析; 空间分布

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)04-0677-07

Characteristics of heavy metal pollution in wetland soil in Tumen River Basin

YANG Liang^{1,2}, ZHU Weihong^{1,2}, XIONG Qi^{1,2}, CAO Guanglan^{1,2}, JIN Ri²

(1. Key Laboratory of Natural Resources of the Changbai Mountain & Functional Molecules, Ministry of Education, Yanbian University, Yanji 133002;

2. Department Geography, College of Science, Yanbian University, Yanji 133002)

Abstract: Eighty-five surface soil samples were collected from the Tumen River Basin of China and seven heavy metals including Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb were determined. Principal component analysis (PCA) was used to explore the pollution sources of heavy metals. The level and spatial distribution of heavy metals pollution were evaluated using the comprehensive index method (Geoaccumulation index and Nemerow index, GNI) and the potential ecological hazard index method (RI) via GIS. Result showed that in this region, Cu, As, Cd and Pb pollution was significant. Pollutions of Cu, Zn, As and Pb were affected by human factors, while pollutions of Cr, Ni and Cd were affected by natural factors. The level of pollution from moderate to partial in GNI, in which As pollution was significant. The pollution level was slight in RI, but Cd pollution was significant. In the whole watershed boundary, the midstream was the most polluted area, followed by the downstream. According to the spatial distribution of the pollution, the level of pollution increased first and then decreased from west to east, while the pollution decreased continuously from north to south.

Key words: Tumen River basin; wetland; soil heavy metals; pollution evaluation; principal component analysis; spatial distribution

湿地生态系统因其拥有巨大的物质供给功能和强大的环境调节功能等, 而与海洋、森林合称为全球三大生态系统^[1]。21 世纪以来, 伴随经济增长的城市化导致了湿地土壤重金属污染, 严重制约了人

类对于湿地的可持续开发利用及湿地生态系统保护和恢复^[2-3]。国内外对于有关重金属的研究已经达到了一个较高的层次, 尤其是在重金属的污染评价上, 此类的评价方法较多也较为成熟, 如地累积指数法、

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41361015) 资助。

作者简介: 杨亮, 硕士研究生。E-mail: 756839019@qq.com

* 通信作者: 朱卫红, 教授。E-mail: whzhu@ybu.edu.cn

内梅罗指数法、富集因子法和潜在生态危害指数法等^[4]。同时,相关模型的应用加深了重金属研究的层次,如王维等^[5]利用耦合模型对贵溪市污染土地植物修复效益进行空间差异评价并筛选适宜的修复植物类型;李飞等^[6]基于三角模糊数建立了寺庄顶污灌区土壤重金属污染综合评价模型。随着遥感的兴起,重金属的空间分布逐渐成为环境领域研究的热点。Wang等^[7]通过克里金插值得出广东省柘林湾西北沿海区域重金属污染程度较高;刘亚纳等^[8]和刘硕等^[9]也利用该方法得出单个重金属的污染空间分布。

图们江是我国重要的国际性河流之一,目前该流域湿地面积为 577.72 km²,人工湿地面积占 51%,河流湿地面积占 38%,其余为湖泊湿地和沼泽湿地等^[10]。朱卫红等^[11]研究发现图们江流域湿地生态系统在 1976—2010 年处于中度预警状态,并预测未来 40 年有向重度预警发展趋势。同时,随着粮食污染问题以及将重金属污染防治纳入“十三五”规划中,土壤重金属问题已成为国内聚焦热点^[12]。有关图们江流域土壤重金属的污染情况已有研究,秦雷等^[13]研究发现图们江流域河岸带土壤重金属污染程度处于向中度污染发展的过度阶段。姚艳红^[14]研究表明图们江中游表层沉积物污染程度较高,基本处于强生态风险状态。杨亮等^[15]研究得出图们江下游典型湖泊湿地污染程度较低。然而,针对整个图们江流

域湿地土壤重金属污染空间分布特征的研究还鲜为报道。

因此,本研究以图们江流域湿地为主要研究对象,对人工湿地与河流湿地表层土壤进行采样,采集 85 个表层土壤样本,对 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 这 7 种重金属含量进行测定。利用主成分分析法探索污染来源,通过地质累积指数与内梅罗指数相结合的综合指数法(GNI)及潜在生态危害指数法(RI)并结合 GIS 技术对土壤重金属污染程度及空间分布特征进行分析,并结合 ArcGIS10.2 软件对污染空间分布进行可视化,为图们江流域开展湿地土壤重金属防治工作重点提供了一定的数据参考与理论支撑,具有一定的理论和实践意义。

1 研究区概况

图们江流域位于延边朝鲜族自治州境内(图 1),经纬度范围在 41°59'47"~44°30'42" N, 127°27'43"~131°18'33" E 之间,地处中、俄、朝 3 国交界处,整体地势西高东低。整个地貌呈山地、丘陵、盆地 3 个梯度,山岭多分布在周边地带,丘陵多分布在山地边沿,盆地主要分布在江河两岸和山岭之间^[16]。主要土壤类型有灰棕壤、暗棕壤、白浆土、草甸土和水稻土等,土壤质地为粉砂土或粉砂质粘壤土^[17-18]。该流域属于中温带湿润季风气候,年均降水为 400~650 mm,平均气温 2~6℃,结冰

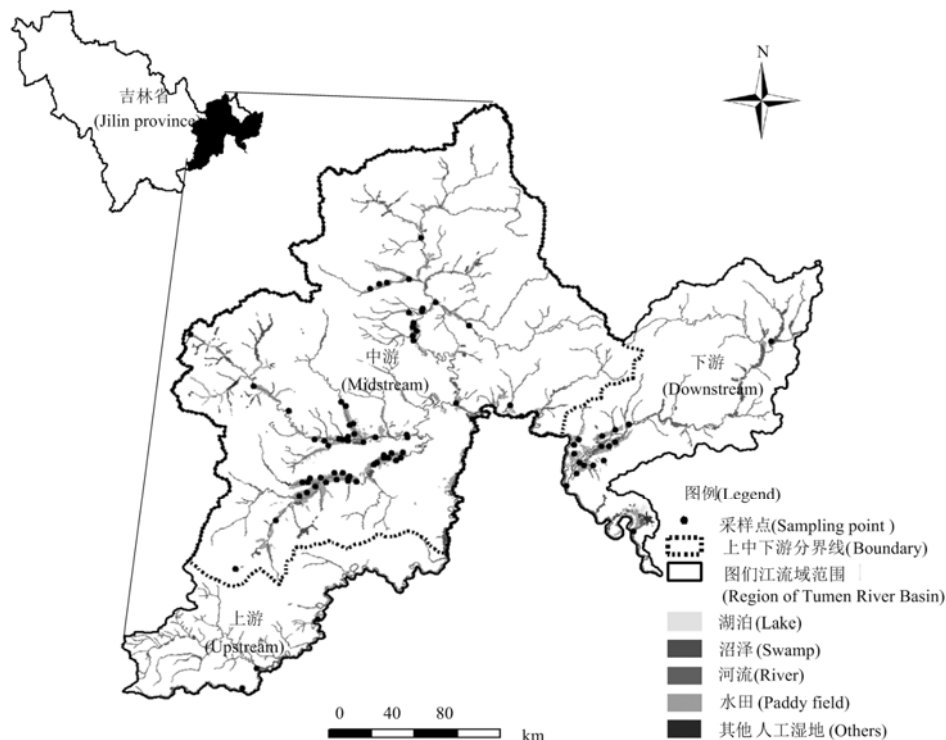


图 1 研究区与土壤采样点位置

Figure 1 Location of the study area and soil samples

期为 10 月中旬, 化冻期为 3 月中旬。该地区湿地类型多样, 主要有人工湿地、河流湿地、湖泊湿地和沼泽湿地等。主要湿地植被有灰脉苔草 (*Carex appendiculata*)、大穗苔草 (*Carex rhynchophylla*)、菰 (*Zizania latifolia*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、长芒稗 (*Echinochloa caudata*) 和小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 等^[19]。

2 数据与方法

2.1 样品采集与分析

在充分分析研究区土地利用现状和地质背景的基础上, 以“十一五”期间在图们江干流及主要支流(图们江干流、珲春河、嘎呀河、布尔哈通河、海兰河和汪清河)上布设国控、州控及省控的 25 个监测断面为采样依据, 采样时必须考虑区域湿地土壤重金属污染的普遍性、代表性和客观性。2014 年 7 月和 8 月分别采集监测断面河岸带主要河流湿地土样 25 个, 及其附近主要的人工湿地(水稻田)土样 60 个。各样点按梅花采样法采集深度为 0~15 cm 的表层土壤 5 份, 采集土样时, 剔除土壤中大粒径石砾、杂草、植物根系等杂物, 将 5 份土样均匀混合后利用四分法缩减至 1 kg 装入聚乙烯塑料袋中, 贴好标签, 记录样方周围环境和植被覆盖等情况, 地理坐标用精度为 10 m 的手持 GPS 确定。

将采集的样品在室温自然风干并去除石块和植物组织等杂物, 研磨、过筛, 装袋备用。土壤样品 $\text{HN}_3\text{-HCl-HClO}_4$ 进行微波消解^[20], 利用 ICP-MS 电感耦合等离子体仪 (Agilent 7 500a) 检测重金属元素含量。实验过程所用酸均为优级纯, 实验用水为超纯水。测试过程中, 采用土壤成分分析标准物质 GBW07405(GSS-5)进行质量控制, 同时所有样品做 3 次平行性实验, 相对误差控制在 $\pm 5\%$ 以内, 回收率在 95%~105% 之间。

2.2 重金属污染评价方法

2.2.1 新综合污染指数法 以地质累积指数为基础, 结合内梅罗综合污染指数计算公式形成新的评价方法, 该评价方法能够具体反映地区各重金属的污染程度, 同时还凸显了重金属的富集程度^[21]。

$$I_{geo} = \log_2[C_n / (k \times B_n)] \quad (1)$$

$$P_i = \sqrt{[(I_i)_{\max}^2 + (I_i)_{\text{ave}}^2] / 2} \quad (2)$$

式(1)中, C_n 为元素 n 在沉积物中的含量; B_n 为元素的土壤背景值, 选取 1990 年图们江流域土壤重金属背景值 ($\text{Cr}=54.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Ni}=24.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu}=17.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn}=108.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、

$\text{As}=5.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cd}=0.1351 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及 $\text{Pb}=26.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[13], k 值取 1.5 进行计算。式(2)中, $(I_i)_{\text{ave}}$ 为各元素地质累积指数的平均值; $(I_i)_{\max}$ 为地质累积指数最大值。在分级标准上, 以地质累积指数污染标准为基础进行重新调整, 共有 8 个污染等级分别为无污染 ($P < 0$)、轻污染 ($0 \leq P < 0.5$)、偏中污染 ($0.5 \leq P < 1$)、中污染 ($1 \leq P < 2$)、偏强污染 ($2 \leq P < 3$)、强污染 ($3 \leq P < 4$)、偏极强污染 ($4 \leq P < 5$) 和极强污染 ($P \geq 5$)。

2.2.2 潜在生态危害指数法 潜在生态风险指数法 (RI) 考虑土壤重金属含量的同时, 将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起^[22]。该方法是国际上土壤(沉积物)中重金属研究的先进方法之一。

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_s^i / C_n^i \quad (4)$$

式中: C_s 为某一重金属的污染系数 ($C_r = C_s / C_n$); C_s 为第 i 个采样点土壤单元元素含量实测值; C_n 为该元素评价标准(背景值); T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, 由 Hakanson 研究得出 ($\text{Cr}=2$ 、 $\text{Ni}=5$ 、 $\text{Cu}=5$ 、 $\text{Zn}=1$ 、 $\text{As}=10$ 、 $\text{Cd}=30$ 和 $\text{Pb}=5$)^[23]; E_r^i 为某一重金属的潜在生态危害系数; RI 为某一点综合潜在生态危害指数。重金属潜在生态危害程度划分标准分别为轻微 ($E_r^i < 40$ 或 $RI < 150$)、中等 ($40 \leq E_r^i < 80$ 或 $150 \leq RI < 300$)、强 ($80 \leq E_r^i < 160$ 或 $300 \leq RI < 600$)、很强 ($160 \leq E_r^i < 320$ 或 $RI > 600$)、极强 ($E_r^i > 320$)。

2.3 数据分析

数据采用 SPSS 18.0 统计软件进行相关系数和主成分分析。采用 ArcGIS 10.2 软件分析图们江流域湿地土壤重金属污染空间分布特征。

3 结果与分析

3.1 图们江流域湿地土壤重金属含量

重金属 Cu、As、Cd 和 Pb 高于图们江流域土壤背景值; 单个采样点土壤重金属 Cu、As、Cd 和 Pb 超标率大于 50%, 以上结果表明图们江流域湿地的 Cu、As、Cd 和 Pb 重金属含量较高, 对当地农业生产和人体健康可能会造成较大危害, 需要引起重视。同时, 7 种重金属含量平均值虽然均未超过国家《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)^[24]的一级标准, 但其含量范围仍存在超过一级标准的情况, 这说明其他重金属污染状况不容忽视。

与标准差相比, 变异系数可消除重金属含量不

同量纲影响,反映7种重金属含量数据的离散性^[25]。由表1可知,7种重金属含量的变异离散程度差别较大: Pb(93.91%) > As(70.88%) > Ni(67.51%) > Cd(66.70%) > Cr(63.76%) > Zn(57.40%) > Cu(46.46%)。

根据 Wilding 对变异程度的分类^[26],湿地重金属均处于高等变异(变异系数>36%),这表明7种重金属变异程度较高,样本含量数据空间分布离散性比较大,且分布不均匀,差异性大。

表1 图们江流域湿地土壤重金属含量 (n=85)

Table 1 Concentrations of soil heavy metals in wetland of Tumen River Basin (n=85)

元素 Element	含量范围/ mg·kg ⁻¹ Content range	X±S/ mg·kg ⁻¹	变异系数/ % Variation coefficient	样本超标率/ % Over standard rate	背景值/ mg·kg ⁻¹ Background value	参照值 [#] Reference value
Cr	5.85~189.97	40.97±26.12	63.76	16.47	54.38	90.00
Ni	3.52~112.69	20.84±14.07	67.51	27.06	24.16	40.00
Cu	3.21~58.01	18.81±8.74	46.46	58.82	17.58	35.00
Zn	11.47~185.98	67.50±38.75	57.40	20.00	108.01	100.00
As	0.83~44.58	11.16±7.91	70.88	74.12	5.75	15.00
Cd	0.001~0.711	0.20±0.13	66.70	68.24	0.14	0.20
Pb	3.22~195.43	33.71±31.66	93.91	41.18	26.72	35.00

注: # 为国家《土壤环境质量标准》的一级标准》(GB15618-19952001)。Note: # is the standard of GB15618-19952001.

表2 图们江流域湿地土壤重金属相关系数

Table 2 Correlation coefficient of soil heavy metals in wetland of Tumen River Basin

元素 Element	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Cr	1						
Ni	0.857**	1					
Cu	0.472**	0.469**	1				
Zn	0.563**	0.473**	0.608**	1			
As	0.383**	0.368**	0.519**	0.551**	1		
Cd	-0.173	-0.042	-0.013	-0.198	-0.230	1	
Pb	0.213	0.111	0.374**	0.708**	0.443**	-0.222	1

注: *、**分别为0.05及0.01水平上的显著性差异。

Note: "*" and "**" refer to the different significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表3 主成分分析的主要计算结果

Table 3 Main calculation results of principal component analysis (PCA)

项目 Project	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2
Cr	0.785	0.470
Ni	0.727	0.600
Cu	0.755	0.068
Zn	0.871	-0.218
As	0.724	-0.226
Cd	-0.266	0.460
Pb	0.622	-0.612
特征值 Characteristic value	3.454	1.269
贡献率/% Contribution rate	49.347	18.127
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	49.347	67.474

3.2 图们江流域湿地土壤重金属源解析

为进一步探究图们江流域湿地土壤层超标重金属污染源,首先对湿地各重金属因子进行 Pearson 相关性分析。结果显示(表2), Cr-Ni-Cu-Zn-As 和 Pb-Cu-Zn-As 显著正相关,说明这几种重金属同源;

Cd 与其他元素相关系数为负,说明 Cd 与其他元素不同源。KMO 效度检验值为 0.724, Bartlett 球度检验的 P 值为 0.000, 小于显著性水平 0.05, 所以本研究中的数据适合做因子分析。

表 4 土壤重金属污染评价
Table4 Assessment of the heavy metals pollution in soil

元素 Element	单因子地累积污染程度 Single factor for GNI					单因子潜在生态危害污染程度 Single factor for RI		
	无 None	轻度 Slight	偏中度 Moderate	中度 Medium	偏强度 Near severe	轻度 Slight	中度 Medium	重度 Severe
	Cr	80	4	1	0	0	85	0
Ni	79	5	1	0	0	85	0	0
Cu	72	12	1	0	0	85	0	0
Zn	84	1	0	0	0	85	0	0
As	36	33	14	1	0	79	6	0
Cd	45	36	3	0	0	38	38	9
Pb	65	16	3	1	0	85	0	0
新综合污染程度(GNI)	0	10	42	30	3			
综合潜在生态危害污染程度(RI)						83	2	0

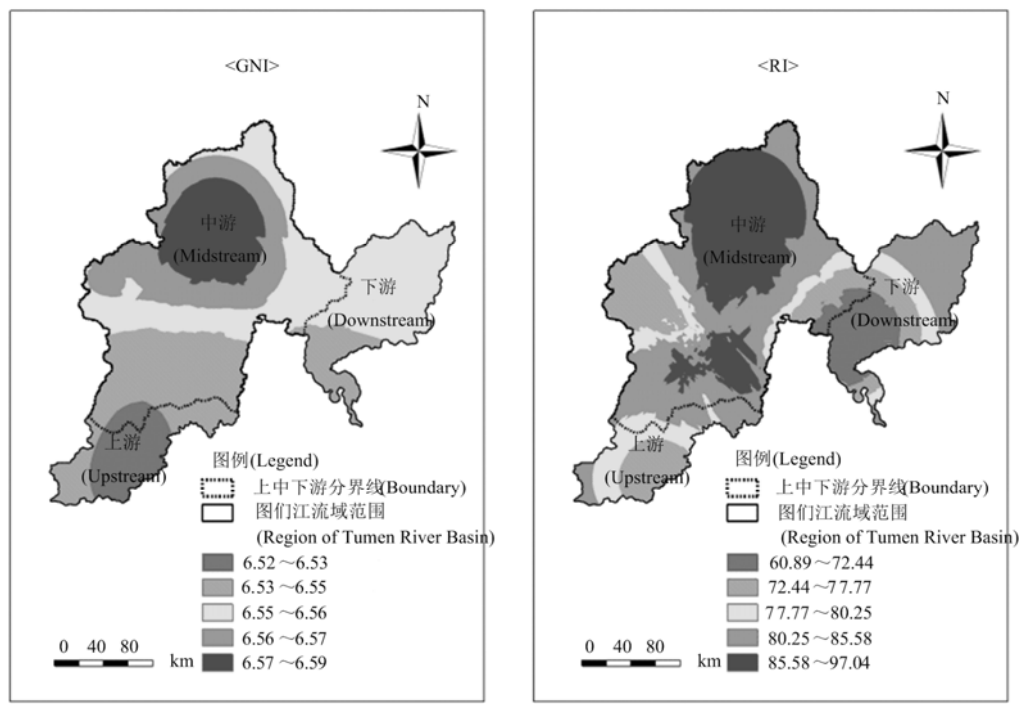


图 2 图们江流域湿地土壤重金属污染空间分布
Figure 2 Spatial distribution of heavy metal pollution in wetland soil of Tumen River Basin

主成分分析计算结果显示(表 3), 土壤中 7 种污染物的全部信息基本可有 2 个主成分(特征值: $3.454+1.269=4.723$ 个变量)反映 67.474%, 即对前 2 个主成分进行分析已经基本能够反映全部数据的大部分信息。第一主成分的贡献率为 49.347%, 特点表现在 Cu、Zn、As 和 Pb 的含量上有较高的正载荷。Cu、Zn 污染主要来源于矿山的开采, 金属冶炼及电镀^[27]; As 污染主要来源于农业中农药化肥的使用^[28], 同时农药化肥也含有 Cu、Zn 等重金属^[29]; Pb 是城市土壤受机动车污染的标识性元素, 因为该元素主要来源于含 Pb 汽油燃烧尾气的排放, 同时

机动车轮胎和刹车片等在磨损中也会在路面产生 Cu、Zn 和 As 等污染^[30-31]。据 2015 年延边州统计年鉴显示^[18], 2014 年图们江流域规模以上采矿业和制造业总产值分别为 124.14 亿元和 34.60 亿元; 农业总产值为 54.87 亿元, 各类化肥使用量为 11.77×10^4 t; 公路里程为 7 031 km, 客运量和货运量分别为 $1 897 \times 10^4$ 人和 $3 403 \times 10^4$ t。所以, 第一主成分反映的是工、农业和交通运输队土壤的污染, 可认为是“人为因子”。同时第一主成分也支配着 Cr 和 Ni 的含量。第二主成分贡献率为 18.127%, Cr、Ni 和 Cd 的载荷分别为 0.47、0.6 和 0.46, 其含

量分别为背景值的 0.75、0.86 和 1.41 倍。其含量一般认为受地球化学影响。秦雷等^[13]通过对图们江流域河岸带土壤中金属研究也未发现 Cr、Ni 和 Cd 受人为因素影响。Cr 和 Ni 是城市土壤中污染程度最低的重金属，这与其他学者的研究结果较为一致^[32-33]。同时 Cd 主要有自然和人为活动两个来源，

前者来源于土壤和岩石的本底值，后者来源于工业“三废”和磷肥的施用^[34]。而本研究发现 Cd 与其他元素不同源。且我国磷肥生产所需原料主要集中在四川、云南和贵州^[34]，距离本研究区较远。所以，第 2 主成分可认为是“自然因子”。

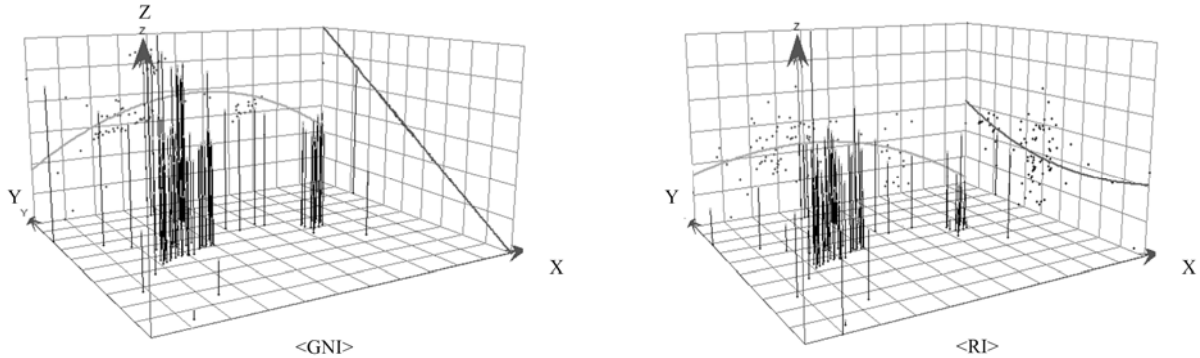


图 3 图们江流域湿地土壤重金属综合趋势分析

Figure 3 Trend analysis of heavy metal pollution in wetland soil of Tumen River Basin

3.3 图们江流域湿地土壤重金属污染评价分析

由新综合污染指数评价法可知，图们江流域湿地基本处于偏中度到中度污染程度，其中 As 污染较为严重，污染样本超过总样本的一半，其他重金属都有不同程度的污染；由综合潜在生态危害指数评价法可知，图们江流域湿地基本处于轻度污染程度，其中 Cd 污染较为严重，重金属 Pb 重度污染程度样本 9 个，中度污染程度样本 38 个，同时重金属 As 不容忽视。

3.4 图们江流域湿地土壤重金属污染空间分布特征分析

以研究所得的新综合污染指数（GNI）和潜在生态危害指数（RI）为数据源，利用 ArcGIS10.2 软件进行 Kriging 插值（图 2），并通过该软件中 Geostatistical Analyst 模块下的 Trend Analysis 工具综合得分进行趋势分析，得到综合趋势分析图（图 3）。

该流域新综合污染指数与潜在生态危害指数空间趋势大致相似且均具有一定的规律性。从整体流域分界上看，污染程度表现为中游>下游>上游。这是由于中游地区人类活动较为频繁以及城市化水平较高。下游地区临近朝鲜民主主义人民共和国，主要受该国采矿业污水排放的影响，同时下游地区的珲春市污水处理率和生活垃圾处理率最低^[18]；新综合污染指数上，由于中游处汪清县矿产资源最为丰富^[35]，所以污染由该处向四周扩散；潜在生态危害指数上，污染最高在中游处汪清县和延吉市，这

主要由于汪清县矿产资源最为丰富以及延吉市工业及生活污水排放最高所导致^[18,35]，因此不容忽视。从整体空间分布上看，变化趋势较为平稳，污染指数由西向东表现为先升高在降低，由北向南表现为降低。

4 结论

图们江流域湿地土壤 7 种重金属分布不均，差异性较大。且 Cu、As、Cd 和 Pb 污染情况严重，超过背景值且超标率大于 50%。

Cu、Zn、As 和 Pb 污染主要由人类活动影响，Cr、Ni 和 Cd 主要来源于自然。

图们江流域湿地土壤重金属新综合污染指数评价总体上基本处于偏中度到中度，其中 As 污染较为严重；潜在生态危害污染评价总体上处于轻度，其中 Cd 污染较为严重。

从整体流域分界上看，污染程度表现为中游>下游>上游；从整体空间分布上看，污染程度由西向东表现为先升高在降低，由北向南表现为降低。

综上所述，图们江流域湿地土壤重金属污染现状虽然较为理想，但仍需重视重金属的防治，因此当地政府应给予高度关注，点面结合针对图们江流域重金属污染情况重点治理中游内部污染，改善下游外界污染，维护上游自然状况。

参考文献：

- [1] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 等. 湿地退化研究进展[J]. 生

- 态学报, 2012, 32(4): 289-303.
- [2] 赵庆龄, 路文如. 土壤重金属污染研究回顾与展望—基于 web of science 数据库的文献计量分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 105-111.
- [3] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [4] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
- [5] 王维, 张金婷, 王伟, 等. 基于耦合模型的重金属污染土壤植物修复效益空间差异分析[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 547-554.
- [6] 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 等. 基于三角模糊数和重金属化学形态的土壤重金属污染综合评价模型[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 432-439.
- [7] WANG Y, WEI Y N, GUO P R, et al. Distribution variation of heavy metals in maricultural sediments and their enrichment, ecological risk and possible source—A case study from Zhelin bay in Southern China[J]. Mar Pollut Bull, 2016, 113: 240-246.
- [8] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2322-2328.
- [9] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 270-279.
- [10] 朱卫红, 郭艳丽, 孙鹏, 等. 图们江下游湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6609-6618.
- [11] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.
- [12] 孙宁, 卢然, 王兆苏. 重金属防控区域整治进展及“十三五”思路研究[J]. 环境保护科学, 2016, 42(2): 42-45.
- [13] 秦雷, 解东昊, 朱卫红, 等. 图们江流域河岸带土壤重金属污染特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 120-125.
- [14] 姚艳红. 图们江中游表层沉积物的重金属污染特征与生态风险评价[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2014, 40(3): 253-256.
- [15] 杨亮, 田玮, 杨萌, 等. 图们江下游典型湖泊湿地土壤重金属污染特征研究[J]. 延边大学农学学报, 2016, 38(3): 185-191.
- [16] 南颖, 吉喆, 冯恒栋, 等. 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4790-4798.
- [17] 王初亮. 延边不同类型土壤微生态环境及其对烟叶质量影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.
- [18] 延边州统计局. 延边统计年鉴[M]. 香港: 中国国际图书出版社, 2015.
- [19] 秦雷. 图们江下游湿地土壤微生物群落特征及其影响因素分析[D]. 延吉: 延边大学, 2016.
- [20] 吴燕明, 吕高明, 周航, 等. 湘南某矿区蔬菜中 Pb, Cd 污染状况及健康风险评估[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2146-2154.
- [21] 刘衍君, 汤庆新, 白振华, 等. 基于地质累积与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 174-178.
- [22] 蔡怡敏, 陈卫平, 彭驰, 等. 顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1763-1770.
- [23] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, 14(8): 975-1001.
- [24] 国家环境保护局科技标准司. 土壤环境质量标准: GB15618-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [25] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 1-11.
- [26] WILDING L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil survey [C]// Nielsen D R, Bouma J. In Soil Spatial Variability Pudoc Wageningen, 1985, 166-193.
- [27] 潘科, 朱艾嘉, 徐志斌, 等. 中国近海和河口环境铜污染的状况[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(4): 618-631.
- [28] 侯李云, 曾希柏, 张杨珠. 客土改良技术及其在砷污染土壤修复中的应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 20-26.
- [29] 黄琳, 蔡鲁最, 贾莹. 我国环境中有害重金属的来源与分布及防治对策[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(7): 189-190.
- [30] 赵丽红, 李素霞, 柯滨, 等. 铅污染现状及其修复机理研究进展[J]. 武汉生物工程学院学报, 2006, 2(1): 43-46.
- [31] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1937-1945.
- [32] LV J S, LIU Y, ZHANG Z L, et al. Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. Ecotox Environ Safe, 2014, 107: 140-147.
- [33] SUN C Y, LIU J S, WANG Y, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China[J]. Chemosphere, 2013, 92 (5): 517-523.
- [34] 柳絮, 范仲学, 张斌, 等. 我国土壤福污染及其修复研究[J]. 山东农业科学, 2007(6): 94-97.
- [35] 延边朝鲜族自治州环境资源评估与保护对策编纂委员会. 延边朝鲜族自治州环境资源评估与保护对策[M]. 延吉: 延边人民出版社, 2014.