

何甜,帅红,朱翔.长株潭城市群污染空间识别与污染分布研究[J].地理科学,2016,36(7):1081-1090.[He Tian, Shuai Hong, Zhu Xiang. Pollution Space Recognition and Pollution Distribution of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration. Scientia Geographica Sinica,2016,36(7):1081-1090.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.07.015

# 长株潭城市群污染空间识别与污染分布研究

何甜,帅红,朱翔

(湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

**摘要:**利用Arc-GIS空间分析软件对各类型污染进行空间识别和分布模拟,探究长株潭城市群污染空间分布特征。结果显示:① 该区大气环境污染以扬尘和煤烟型为主,主要污染物为可吸入颗粒物和二氧化硫,重点污染区域在长沙、株洲、湘潭三市主城区,呈点状分布;② 该区水域整体水质基本达标,水体环境污染以氨氮和各类重金属为主,且有明显的季节变化规律;③ 土壤污染覆盖范围较广,以株洲市的石峰区为代表,以镉污染最为严重,主要原因为重化工业排污累积。总之,株洲污染最严重,湘潭和长沙次之。污染空间的形成与长株潭城市群的地形地势及三类污染元素之间的转化有较大关联。

**关键词:**长株潭城市群;污染空间;识别;污染分布;污染程度

**中图分类号:**K903      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2016)07-1081-10

在城市的发展进程中,工业化是个不可逾越的时期,大量以制造、冶炼、化工为主体的第二产业占据世界经济的主体地位,伴随而来的是大量废水、废气、废渣的排放,长期积累形成污染空间(在西方文献中又被称为棕地)。国外对棕地的研究已经有几十年的历史,综合考虑各国对棕地的定义<sup>[1-4]</sup>,本研究提出“污染空间”的概念:污染空间是一个综合的概念,是因堆积、储存、处理、处置或其他方式(如迁移)承载了危害物质,可能或已经对生态系统和其周边环境产生危害的任何区域或空间,包括地表水、土壤浅层地下水以及离地面一定距离的大气等。

目前,国内外许多学者对不同区域的大气、水体、土壤等污染物的时空分布进行了研究,为更好地识别和治理污染空间提供了理论依据<sup>[5-10]</sup>。

土壤是一个时空连续的变异体,具有高度的空间异质性<sup>[11]</sup>,土壤污染物、特别是重金属的空间分布具有高复杂性,其突变区域、过渡区域异常值和偏态分布,会使方差分析的稳定性降低。模糊聚类在高空间变异数据的插值中具有独特优势,

不仅能解决土壤重金属在空间分布的渐变问题,更能解决传统方法无法解决的突变问题<sup>[12-14]</sup>。

随着空间分析技术和地统计技术的不断成熟,将GIS强大的空间分析功能应用于环境科学领域的研究也越来越多<sup>[15-18]</sup>。

现有研究大多偏重于某一类要素的污染识别和分析,而对于综合污染的探讨较少;在研究尺度上也多以城市、片区、水域断面等中微观区域为主,对于跨行政区的城市群研究较少。本文即以长沙、株洲、湘潭城市群为例,以地表水、土壤浅层地下水以及离地面一定距离的大气等综合污染为研究对象,探索性识别长株潭城市群污染空间分布与分析污染原因。

## 1 研究区域

长株潭城市群(图1)位于湖南省中东部,包括长沙、株洲、湘潭三市,面积2.8 km<sup>2</sup>,是湖南省经济发展的核心增长极。3市沿湘江呈“品”字形分布,两两相距不足40 km,结构紧凑。长株潭城市群属中亚热带季风气候,四季分明,冬寒期短,夏热期

**收稿日期:**2015-12-02;**修订日期:**2016-03-08

**基金项目:**国家“十二五”科技支撑计划子课题(2012BAJ15B06-08)资助。[Foundation: National “Twelfth Five-Year Plan” Key Technology Research and Development Program(2012BAJ15B06-08).]

**作者简介:**何甜(1986-),女,湖南常德人,博士研究生,主要从事资源开发与区域可持续发展研究。E-mail:hetian99@aliyun.com

**通讯作者:**帅红,副教授。E-mail:shuaih823@163.com

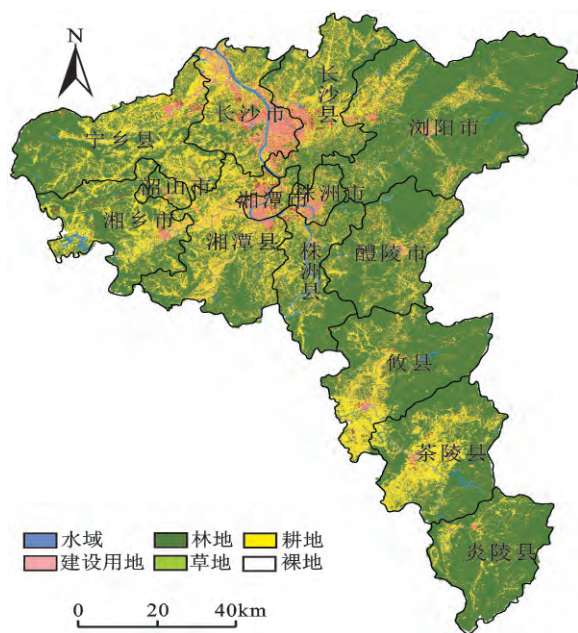


图1 长株潭城市群

Fig.1 Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration

长,降水丰沛,人均水资源拥有量 $2\,069\text{ m}^3$ ,森林覆盖率达54.7%。当地地形相对平坦,长沙市东部、湘潭市西部、株洲市南部多山,其余地区多平原和台地。长沙以电子信息、工程机械、食品、生物制药,株洲以交通运输装备制造、有色冶金、化工原料及其制造,湘潭以黑色冶金、机电与机械制造、化纤纺织、化学原料及精细化工为支柱产业。这种以传统制造工业为主的产业结构,使得长期以来积累了大量污染,留下环境隐患,对周边居民以及城市群未来发展带来严重影响。

## 2 研究方法

针对大气、水体和土壤这3类不同性质的污染

元素,应采取不同的方法进行分析。大气和水体污染在长株潭城市群并不具备典型性,可选择污染分指数叠加法、综合水质标识指数等常用方法。长期发展重化工企业导致的土壤重金属污染是长株潭城市群污染空间的主要形成原因。单元素重金属污染虽有发生,但在自然界中土壤重金属的污染多为伴生性或综合性,由于各元素的含量呈显著相关,元素之间的交互作用使得某种元素的生理效应和化学行为较之其在单体系中发生很大变化。目前,一般都是在单元素评价的基础上采用内梅罗综合指数法来评价重金属对土壤的复合污染。前述文献中也指出,模糊聚类在解决土壤重金属空间分布的突变问题上具有突出优势(图2)。

### 2.1 克里格插值空间分析

克里格方法又称空间局部插值法,是以空间自相关性和变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域变化量进行无偏最优估计的一种地统计学方法,其优点在于能最大限度地利用空间取样所提供的各种信息。本文采用的普通克里格方法是一种区域变化量的线性估计,它假设数据变化成正态分布,认为区域变化量 $Z$ 的期望值是未知的。公式如下:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中, $Z(x_0)$ 为未知点的值, $Z(x_i)$ 为未知样点周边已知样点的值, $\lambda_i$ 为第 $i$ 个已知样本点对未知样点的权重, $n$ 为未知样本点的个数。

### 2.2 大气污染综合指数评价

本文采用污染综合指数法即污染分指数叠加法对大气环境质量进行评价。公式如下:

$$P_n = \sum_{i=1}^n P_i, \text{ 其中, } P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

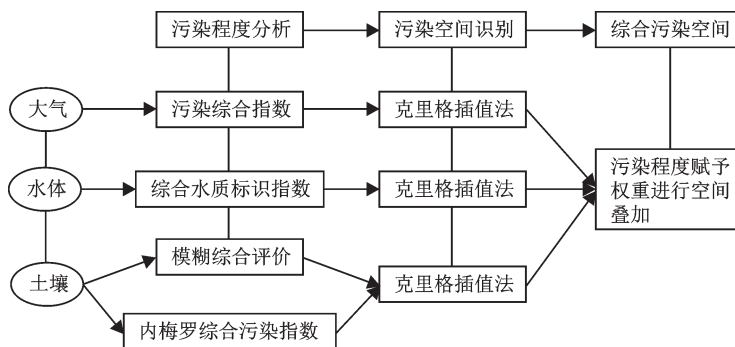


图2 研究技术路线

Fig.2 Research technical route

式中,  $P_n$  表示  $n$  项污染物的综合污染指数,  $P_i$  是污染物  $i$  的污染指数,  $C_i$  表示第  $i$  项污染物的监测浓度值,  $S_i$  表示与第  $i$  项污染物的对应的标准浓度限值。

反映各项大气污染物在大气环境质量中贡献率大小的等标污染负荷系数  $F$  的计算公式如下:

$$F_i = \frac{P_i}{P_n} \quad (3)$$

式中,  $F_i$  是污染物  $i$  的污染负荷系数。

### 2.3 综合水质标识指数评价

综合水质标识指数法是根据现行国家《地表水环境质量标准》相关标准,在单因子水质标识指数法基础上建立起来的一种全新的水质评价方法<sup>[19]</sup>。该指数由整位数和3位或4位小数组成,表达式为:

$$W_{\text{WPI}} = X_1 X_2 X_3 X_4 \quad (4)$$

式中,  $W_{\text{WPI}}$  为综合水质标识指数,  $X_1$  为各监测点总体的综合水质类别,  $X_2$  为综合水质在  $X_1$  类水质变化区间所处的位置,  $X_3$  为参与整体水质评价的指标中劣于功能区目标标准的水质指标个数,  $X_4$  为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果,体现综合水质的污染程度。

综合水质标识指数的核心是综合水质指数  $X_1 X_2$  的计算,单因子水质标识指数的权重分配对综合水质指数的精度有很大影响。本文对以往所采用的方法进行改进,并比较选择,方案定为以下2种:

$$\text{方案一: } X_1 X_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

式中,  $n$  为参加综合水质评价的单因子水质标识指数的数目,  $P_i$  为单因子水质标识指数。

$$\text{方案二: } X_1 X_2 = \frac{1}{2} (\bar{P} + P_{\max}) \quad (6)$$

式中,  $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ ,  $\bar{P}$  和  $P_{\max}$  权重各取0.5。

若所有参与评价的水质指标均达到水环境功能区目标,则  $X_3 = 0$ ;若综合水质类别好于或达到功能区类别目标,则  $X_4 = 0$ 。

### 2.4 土壤污染模糊综合评价法

模糊综合评价法是基于模糊数学原理建立起来的一种方法,它以隶属度来划分事物的模糊界限,充分考虑每个因子对综合评价结果的贡献,并把贡献按权重分配,经过模糊变换和综合运算得到综合隶属度,以此确定土壤的污染级别<sup>[20]</sup>。该方法的步骤为:建立评价因子集和评价等级集→建立隶属度函数和模糊矩阵→建立权重集→综合评估。

### 2.5 土壤污染内梅罗综合指数评价法

内梅罗污染综合指数法是一种兼顾极值的综合方法,既考虑了单因素的作用,又突出了污染最严重元素的重要性<sup>[21]</sup>,计算公式为:

$$P = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right)^2 + [\max(P_i)]^2 \right\}} \quad (7)$$

式中,  $P$  为土壤综合指数;  $n$  为评价因子个数;  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$  为元素污染指数的平均值;  $\max(P_i)$  为元素污染指数的最大值。

## 3 数据来源

本文大气数据来自于3市环境监测中心站检测报告,共23个监测点;监测时间是2012年1~12月,使用数据为年均数据;监测项目包括二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、二氧化氮( $\text{NO}_2$ )、可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )及一氧化碳( $\text{CO}$ )。

水体数据来自于2012年3市水质监测年报,共9个断面。根据《地面水环境标准》(GB 3838-2002)和《地表水环境质量评价办法》(试行),结合长株潭城市群水体特征,均采集表层水样,选取汞、镉、砷、铅、氨氮、高锰酸盐指数、挥发酚、石油类和铜共9项指标。

土壤数据来自于2012年3市土壤监测报告,共25个采样点。每个采样点位在耕作层(0~20 cm)取一个样,在采样点半径15 m范围内,用5点采样法分别采样,混合为一个样,然后反复按四分法分取。监测项目包括pH值、铜、铅、锌、镉、汞、铬、砷共8项指标。

以上大气、水体、土壤污染采样点多布局在3市市区(水体为湘江断面),选取较为有代表性的工业集中区、人口密集区、河流排污口下游与河水基本混匀处,以单一农业面源为主的农村地区在本研究中暂不考虑(图3)。

## 4 结果分析

### 4.1 长株潭大气污染空间识别

将大气监测数据年均值带入公式(2~3),以《环境空气质量标准》(GB3095-1996)中二级标准浓度限值为基准,计算出长株潭空气综合污染指数(表1)。将计算结果运用普通克里格插值法进行空间模拟,得到长株潭综合污染指数空间分布情况(图4)。



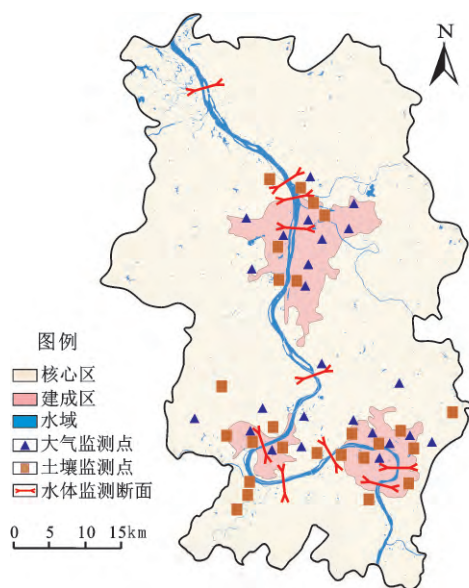


图3 研究区污染监测点布局

Fig.3 Distribution of pollution monitoring stations in study area

从图4可看出,长株潭城市群的大气污染程度整体较低,3个市区形成3个主要的污染集聚区。具体可分为以下几类:极度污染区,主要是株洲市清水塘工业区、株洲市高新区、长沙市芙蓉区;重度污染区,主要是株洲市石峰区、长沙市芙蓉区和天心区混合区、湘潭市岳塘区;中度污染区,主要是长沙市岳麓区和开福区混合区、望城区建成区、长沙县建成区、株洲市荷塘区、株洲市芦淞区、湘潭市雨湖区、湘潭县建成区;轻度污染区,城市群核心区大部分区域;清洁区,城市群中部绿心。

究其原因,湖南省大气环境污染以扬尘和煤烟型为主,主要污染物为可吸入颗粒物和二氧化硫,主要分布区域为重化工业区,如株洲清水塘、湘潭竹埠港、湘钢工业区等。与清水塘工业区隔湘江而望的株洲高新区位于湘江南岸,处于清水塘工业区的下风向,受高架大气污染源的影响,空

表1 大气监测点综合污染指数

Table 1 Comprehensive pollution index of atmospheric monitoring points

监测点	SO <sub>2</sub>		NO <sub>2</sub>		PM <sub>10</sub>		CO		综合 指数	
	污染分指 数	负荷系数 (%)	污染分 指数	负荷系数 (%)	污染分 指数	负荷系 数(%)	污染分 指数	负荷系数 (%)		
株洲市	市监测站	0.800	30.27	0.625	23.65	0.830	31.41	0.388	14.66	2.643
	株冶医院	1.450	41.61	0.575	16.50	1.060	30.42	0.400	11.48	3.485
	株洲火车站	0.700	31.01	0.475	21.04	0.640	28.35	0.443	19.60	2.258
	天台山庄	0.783	30.38	0.450	17.45	0.980	38.01	0.365	14.16	2.578
	市 四 中	0.633	27.74	0.450	19.71	0.820	35.91	0.380	16.64	2.283
	大京风景区	0.117	7.56	0.163	10.52	0.910	58.93	0.355	22.99	1.544
	云田中学	0.801	32.27	0.625	23.65	0.830	31.53	0.378	13.56	2.225
湘潭市	市监测站	1.440	43.21	0.575	16.40	1.060	27.42	0.400	2.48	2.865
	江麓	0.700	31.01	0.475	21.04	0.640	28.35	0.443	19.60	2.452
	岳塘	0.783	30.38	0.450	17.45	0.980	38.01	0.365	14.16	2.371
	板塘	0.633	27.74	0.450	19.71	0.820	35.91	0.380	16.64	2.253
	科大	0.117	7.56	0.163	10.52	0.910	58.93	0.355	22.99	1.542
	韶山	0.800	30.27	0.625	23.65	0.830	31.41	0.388	14.66	2.634
长沙市	沙坪	1.450	41.61	0.575	16.50	1.060	30.42	0.400	11.48	3.458
	天心区	0.700	31.01	0.475	21.04	0.640	28.35	0.443	19.60	2.254
	雨花区	0.783	30.38	0.450	17.45	0.980	38.01	0.365	14.16	2.587
	湖南中医大	0.633	27.74	0.450	19.71	0.820	35.91	0.380	16.64	2.280
	湖南师大	0.117	7.56	0.163	10.52	0.910	58.93	0.355	22.99	1.575
	长沙火车站	1.450	41.61	0.575	16.50	1.060	30.42	0.400	11.48	3.458
	经开区	0.700	31.01	0.475	21.04	0.640	28.35	0.443	19.60	2.271
	高开区	0.783	30.38	0.450	17.45	0.980	38.01	0.365	14.16	2.598
	伍家岭	0.633	27.74	0.450	19.71	0.820	35.91	0.380	16.64	2.238
	马坡岭	0.117	7.56	0.163	10.52	0.910	58.93	0.355	22.99	2.376

注:根据各监测点污染分指数及负荷系数,SO<sub>2</sub>和PM<sub>10</sub>为研究区主要污染物。

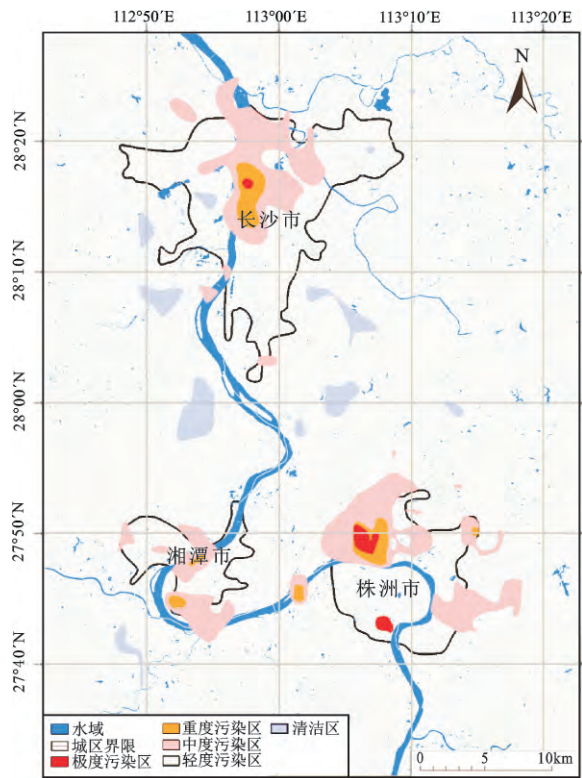


图4 长株潭城市群大气污染分布

Fig.4 Distribution of air pollution in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration

气质量长期达不到二级标准。长沙市芙蓉区、天心区等地由于中心城区人口密集,居民家庭和餐饮业产生大量的油烟污染,且机动车数量大幅增加,运输繁忙,排放大量尾气造成污染。株洲市位于罗霄山脉与雪峰山脉之间的湘江谷地,属于气流交汇地区,大气污染物沿南北走向的湘江谷地扩散,形成长株潭三市大气污染物的互相叠加。

## 4.2 长株潭水体污染空间识别

1) 开展单因子水质标识指数评价。把水体监测数据带入公式(2),得到各监测断面单因子水质标识指数 $P_i$ (表2)。按照《地表水环境质量标准》,除氨氮外的其他水质污染指标均处于Ⅰ类水标准,水质状况较好。

2) 开展综合水质标识指数评价。根据各监测断面单因子水质标识指数计算出综合水质指数 $X_1X_2$ (表3)。可以看出,方案一中各监测断面综合水质指数较小,这是因为方案一中所有的因子被赋予相同的权重,而方案二考虑了最差指标(氨氮)对水环境的影响,因此方案二的结果更科学。

根据方案二计算出各监测断面综合水质指数 $X_1X_2$ 均符合Ⅲ类水质标准,没有超标项目,因此 $X_3$ 、 $X_4$ 的值都为零,从而求出 $W_{\text{WPI}}$ 的值。按照综合水质级别评价标准,长株潭各监测断面水质类别均为Ⅱ类,达到水环境功能区目标。

总体来看,长株潭水域整体水质基本达标,其中浓度较高的污染物是氨氮,氨氮也是最普遍及受影响最大的有机污染物指标,来源主要为生产污水和生活污水中含氮有机物受微生物作用的分解产物。湘江水域不同季节的氨氮浓度变化非常明显,水体中浓度随季节变化峰值出现在第一季度,这是由于第一季度为湘江枯水期,水量小,故氨氮浓度大。除水量原因之外还与不同季节温度影响有关,较高的温度有利于水中的氨转化为亚硝酸盐或硝酸盐。

其次,长株潭水域重金属污染较突出,株洲市和湘潭市老工业区过去排放的工业废水大多未达标排放,工业废渣未全部得到安全处置,历经长年

表2 各监测断面单因子水质标识指数

Table 2 Single factor water quality identification index of each monitoring section

断面	汞	镉	砷	铅	氨氮	高锰酸盐指数	挥发酚	石油类	铜
株洲朱亭水质监测断面	1.4	1.6	1.1	1.0	3.0	1.9	1.1	1.5	1.1
株洲霞湾水质监测断面	1.4	1.6	1.1	1.0	2.6	1.9	1.1	1.5	1.2
湘潭马家河水质监测断面	1.4	1.8	1.2	1.1	2.6	1.9	1.1	1.5	1.2
湘潭水质监测断面	1.2	1.1	1.1	1.1	2.6	1.9	1.1	1.5	1.3
湘潭昭山水质监测断面	1.4	1.8	1.1	1.0	2.6	1.9	1.1	1.5	1.7
长沙新港水质监测断面	1.2	1.1	1.1	1.1	2.6	1.9	1.1	1.5	1.3
长沙施家港水质监测断面	1.4	1.8	1.2	1.1	2.6	1.9	1.1	1.5	1.2
长沙岳华水质监测断面	1.4	1.6	1.1	1.0	3.0	1.9	1.1	1.5	1.1
铜官水质监测断面	1.4	1.6	1.1	1.0	2.6	1.9	1.1	1.5	1.2
均值	1.36	1.56	1.12	1.04	2.69	1.90	1.10	1.50	1.26

表3 各监测断面综合水质指数评价结果

Table 3 Comprehensive water quality index evaluation results of each monitoring section

断面	综合水质指数 $X_i X_i$		$W_{WPI}$	水环境功能目标	水质类别
	方案一	方案二			
株洲水质监测断面	1.5	2.3	2.300	Ⅲ	Ⅱ
株洲霞湾水质监测断面	1.5	2.0	2.000	Ⅲ	Ⅱ
湘潭马家河水质监测断面	1.5	2.1	2.100	Ⅲ	Ⅱ
湘潭水质监测断面	1.4	2.0	2.000	Ⅲ	Ⅱ
湘潭昭山水质监测断面	1.6	2.1	2.100	Ⅲ	Ⅱ
长沙新港水质监测断面	1.5	2.3	2.300	Ⅲ	Ⅱ
长沙施家港水质监测断面	1.4	2.1	2.100	Ⅲ	Ⅱ
长沙岳华水质监测断面	1.5	2.2	2.200	Ⅲ	Ⅱ
铜官水质监测断面	1.5	2.0	2.000	Ⅲ	Ⅱ

累积沉淀,使湘江区域内的霞湾港、老霞湾港、铜塘港及部分水塘中底泥沉积大量的镉、铅、汞等重金属,据测算分别达到42.7、97.5、5.3 t。同时,长株潭水域水体中重金属的浓度也具有明显的季节变化,汞、铅、镉3类重金属浓度峰值也出现在第一季度,这时大气降水少,河流为枯水期;而石油类、铜、砷3类重金属峰值出现在第二三季度,该时段湘江为丰水期,航运等人类活动频繁,石油类污染物排放量大。

#### 4.3 长株潭土壤污染空间识别

1) 土壤质量评价。参照国家土壤环境质量标准(GB15618-1995)建立评价集,按照模糊综合评价法的原理,采取最大隶属度原则得到各监测点的土壤污染分级。评价结论认为,除株洲党校、双板桥、岳麓山、谷山菜地、陈家渡菜地外,其余各点土壤评价等级为Ⅲ级,均超出功能区Ⅱ级标准,表明长株潭三市土壤污染较严重。

2) 土壤质量分级。本文采用内梅罗综合污染指数全面分析铜、铅、锌、镉、汞、铬、砷7种重金属的综合污染程度,单项污染指数越高的元素对综合污染指数的贡献率和影响就越大。将长株潭土壤监测数据带入公式(7),得到各监测点土壤污染指数(表4)。

参照《区域生态地球化学评价指南》中土壤污染等级划分标准( $P \leq 1$ 为清洁,  $1 < P \leq 2$ 为轻度污染,  $2 < P \leq 3$ 为中度污染,  $3 < P \leq 6$ 为重度污染,  $P > 6$ 为极度污染),从表4各监测点的内梅罗污染指数可以看出,株洲市污染最严重。长石村、建设村、栗雨谷、何家湾、大栗山、卢家山公路旁等的综合污染指数 $P$ 都大于6,属于极度污染,其中建设

村污染指数最高为28.3。从各监测点单因子污染指数来看,元素镉、砷、锌的污染指数最高,对综合指数的贡献最大,特别是建设村单因子污染指数达到39.4。

3) 土壤污染空间分布。将上述计算得出的综合污染指数运用普通克里格插值法进行空间插值,得到长株潭城市群土壤污染空间分布。

图5可看出,整个长株潭城市群区域土壤环境堪忧,污染蔓延较严重。具体分布可分为以下几类:极度污染区,主要是3市核心城区,覆盖面较广,且有相连趋势。重点为株洲市的石峰区和天元区、湘潭市岳塘区、湘潭县建成区;重度污染区,主要是极度污染区扩散区域,重点为长沙市开福区、长沙市芙蓉区、长沙市天心区、株洲市荷塘区、株洲市芦淞区、湘潭市雨湖区;中度污染区,基本覆盖整个长株潭核心区域,多为土壤污染源扩散污染;轻度污染区,长沙县、望城区和岳麓区等小块面积。

土壤重金属污染是长株潭城市群的污染重点,究其原因,主要在于3市尤其是株洲、湘潭长期以冶金、化工、火电等高排污产业为主,历年累积排放的废气、废水、废渣经过沉降造成周围土壤的严重污染。如冶炼行业主要涉及铅、锌冶炼,冶炼烟气制酸及稀贵金属综合回收,铅锌冶炼过程中会产生大量含工业粉尘、汞、镉、铅、砷等重金属,  $SO_2$  的浓度也较高;化工行业主要涉及石油化工、基础化工及化学化纤,产品包括聚氯乙烯、烧碱制造,合成氨、纯碱制造,硫酸锌制造,黄药、松醇油等选矿药剂等。

老工业区的历史遗留问题也是重要因素,如



表4 监测点土壤污染指数(P)

Table 4 Soil pollution index of each monitoring points (P)

	监测点	铜	铅	锌	镉	汞	铬	砷	综合指数
株洲市	合花村	0.5	0.4	1.1	13.8	0.3	0.4	0.8	9.9
	关口村	0.7	0.3	1.0	6.9	0.2	0.7	0.7	5.0
	新塘坡村	0.8	0.3	0.9	4.4	0.2	0.3	1.2	3.2
	长石村	0.6	0.6	2.2	15.2	0.2	0.2	1.2	10.9
	建设村	0.7	1.3	4.1	39.4	0.4	0.4	2.0	28.3
	株洲党校	0.5	0.7	0.7	5.1	0.5	0.3	0.9	3.7
	石峰公园	0.3	0.9	1.4	13.3	0.4	0.3	1.0	9.6
	线江村	0.7	0.2	0.5	4.5	0.3	0.6	0.2	3.3
	栗雨谷	0.3	0.9	1.7	23.5	1.3	0.3	1.4	16.9
	新马村	0.7	0.4	1.0	16.4	0.4	0.2	0.6	11.8
湘潭市	何家湾	0.4	1.4	0.6	29.8	0.7	0.3	12.1	21.6
	大栗山	0.4	0.8	1.2	17.6	0.4	0.3	10.3	12.8
	大坟坪	0.4	1.3	0.2	6.2	0.3	0.2	1.3	4.5
	双板桥	0.4	0.2	0.3	4.3	0.6	0.1	1.2	3.1
	姜畲镇	0.4	0.2	1.9	0.1	0.4	0.3	1.4	2.0
	卢家山公路旁	0.4	1.8	0.2	9.0	0.4	25.0	0.0	25.3
	清亭村	0.4	0.2	2.1	0.1	0.3	0.3	1.3	2.1
	二环线公路旁	0.4	0.3	1.5	0.2	1.2	0.2	7.8	7.9
长沙市	四十八所	0.4	0.1	2.6	0.1	0.7	0.1	10.0	3.0
	坪塘连山村	0.3	0.2	1.8	0.1	0.4	0.2	1.6	1.8
	黑石渡大桥南	0.3	0.1	2.7	0.0	0.2	0.2	1.3	2.7
	捞刀河下游	0.3	0.1	2.5	0.1	0.2	0.3	0.5	2.5
	谷山菜地	0.6	0.2	3.3	0.1	0.5	0.1	4.8	3.5
	岳麓山	0.2	0.1	2.0	0.1	0.2	0.3	0.8	2.0
	陈家渡菜地	0.5	0.2	3.1	0.1	0.5	0.1	3.9	3.2

株洲市清水塘工业区是湖南省乃至全国重金属污染最为严重的地区之一,经测算,区域内重金属镉、汞、铅及类金属砷均超标严重,其中镉的超标率达到100%,平均监测值超过国家标准值3.67倍,最大超标倍数达230倍;汞和铅的超标率为80%以上,最大超标倍数分别为6.57倍和262倍;砷的超标率为47%,最大超标倍数为6.6倍。湘潭市老工业区主要污染物依次为镉、铅、砷、汞、锌、锰等重金属,如竹埠港工业区土壤监测结果显示,镉含量最高达53.2 mg/kg,高出国家标准176倍;砷、铅等也有不同程度的超标。

#### 4.4 长株潭综合污染空间识别

按照本文对污染空间的定义,在研究长株潭的大气、水体及土壤等环境要素的污染分布后,通过赋予其相应的权重借助Arc-GIS软件进行叠加,采用自然断点法将污染等级分为5类,得到最终的

污染空间分布图(图6)。需要指出的是,前文分析中各水体监测断面的水质均为Ⅱ级,并未超过其规定的Ⅲ类水质标准,认为不存在水体污染问题,故加权时赋予其权重为0。

从图6看出,长株潭城市群整体环境尚可,污染空间主要集中在3个节点城市的中心位置,其中株洲市的污染空间范围较大,且集中连片;长沙和湘潭有分散的污染斑块。具体可以分为以下几类:极度污染区,主要分布在长株潭城市群东南部,重点为株洲市石峰区、株洲市天元区、湘潭市岳塘区、湘潭县建成区;重度污染区,主要为极度污染区扩散区域,包括株洲市芦淞区、株洲县建成区、湘潭市雨湖区、长沙市开福区、长沙市天心区;中度污染区,主要分布在株洲市荷塘区、湘潭县混合区、长沙市雨花区、望城区建成区;轻度污染区,长株潭城市群核心区大部分区域;清洁区,长株潭中部绿

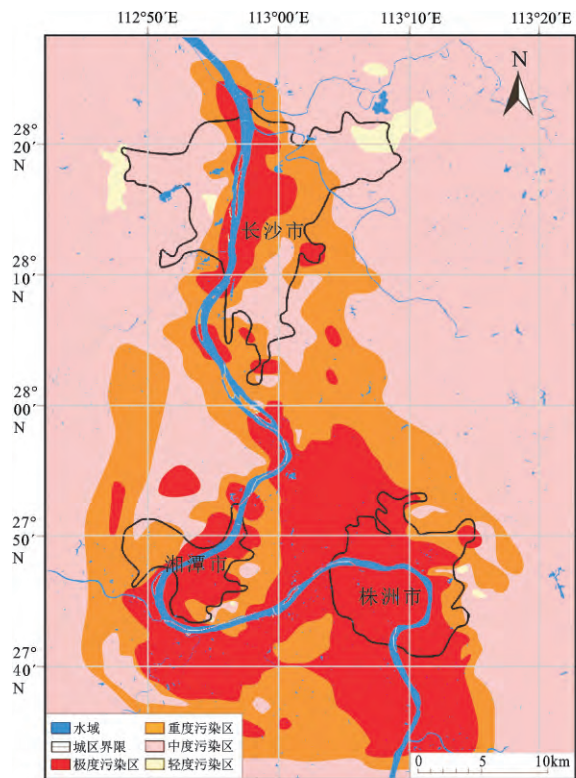


图5 长株潭城市群土壤污染空间分布

Fig.5 Spatial distribution of soil pollution in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration

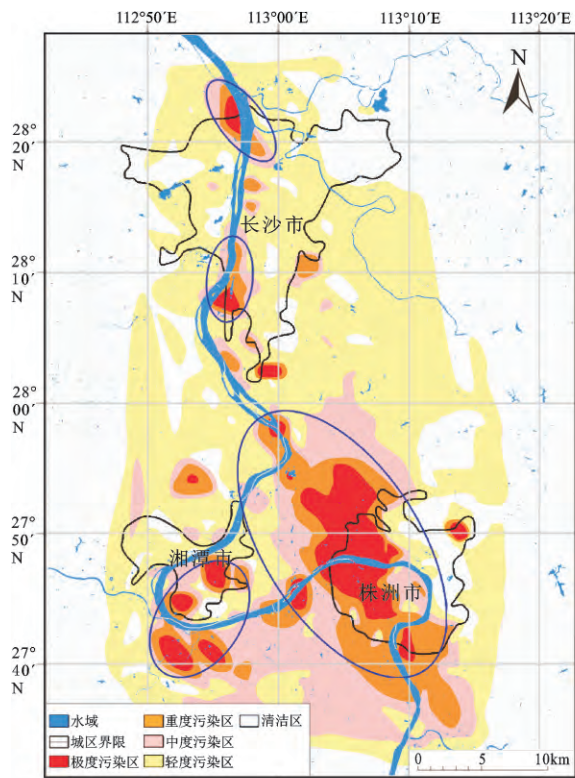


图6 长株潭城市群综合污染空间分布

Fig.6 Spatial distribution of comprehensive pollution in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration

心、长沙市望城区、岳麓区和长沙县部分区域。

长株潭城市群综合污染空间的分布与土壤污染空间的分布有较为相似的趋势,原因在于大气和水体具有流动性,与季节和盛行风向也有很大关联,不如土壤污染具有相对固定和历史积累的特点。同时,大气、水体和土壤之间的污染元素也可相互转化和影响。流水通过渗透可将污染元素固定在土壤里,也可通过蒸发进入大气循环;土壤污染通过冲刷进入水体,土壤颗粒也可以通过空气中的湍流交换作用直接进入到大氣中,成为污染物来源之一。

长株潭城市群综合污染空间与地形也有很大关联,核心区内地形相对平坦,有利于污染物的蔓延和相互影响。湘江纵贯3市,干流从南至北流程不足200 km,均以湘江为饮用水水源和纳污体,上游工业区排放的废水由于重金属和有机物排放总量均较大,危及下游的湘潭、长沙等地。长沙市东部、湘潭市西部、株洲市南部多山,污染相对较少,主要的清洁区和轻度污染区多分布于此。长株潭绿心的规划设计使得城市群中部形成自然生态隔

离带,对污染的扩散起到了一定的阻隔作用。

## 5 结论

1) 本文根据污染物的特性和长株潭城市群的实际,综合运用大气综合污染指数、综合水质标识指数、土壤污染模糊综合指数和内梅罗污染指数对研究区域内各类型污染进行评价,并利用Arc-GIS空间分析软件对污染空间进行识别和分布模拟。结果显示:该研究方法是可行的,符合长株潭实际情况,揭示了一定规律和趋势。

2) 长株潭城市群大气环境污染以扬尘和煤烟型为主,主要污染物为可吸入颗粒物和二氧化硫。受自然条件限制,长株潭地区大气环境容量十分有限,区域整体空气质量未达标,重点污染区域在长沙、株洲、湘潭3市主城区,呈点状分布。

3) 长株潭水域整体水质基本达标,水体环境污染以氨氮和各类重金属为主,且有明显的季节变化规律。一般来说,第一季度为湘江枯水期,氨氮浓度大,汞、铅、镉3类重金属浓度也出现峰值,而石油类、铜、砷3类重金属峰值出现在第二三季度。



4) 长株潭城市群土壤污染较为严重,以株洲市的石峰区为代表,以镉污染最为严重。这与长株潭3市长期以来偏重化工产业的产业结构有关,冶金、化工、火电、炼钢等行业历年累计排放的废气、废水、废渣经过沉淀造成了土壤污染。

5) 综合来看,长株潭城市群中株洲污染最严重,湘潭和长沙次之。株洲曾是中国十大工业污染城市之一,长沙属于典型的酸雨污染城市,湘潭的重化工业污染也很突出。城市群污染空间的形成与3类污染元素的相互转化及其区域内的地形地势有较大关联,尽管有绿心阻隔,3市之间的蔓延仍较为严重。

针对长株潭山水相依、一水相连、城镇密集、污染物排放相互影响、层层迭加的特点,应特别重视区域环境协调,今后在污染物排放总量、行政区交界断面的环境质量等方面应建立严格的目标责任制,按照国家产业政策进行产业结构、工业结构和能源结构调整。加快城市生活污水收集处理系统建设,工业企业煤炭燃烧设备应按规定进行消烟,除尘和脱硫,努力治理老污染源,坚决阻止新污染源的产生。加大生态环境整治力度,尤其是注重重点区域的生态治理,全面改善区域生态环境。

## 参考文献(References):

- [1] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa with in the genus *Silene* L (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. *Plant and Soil*, 1983, 73(3):377-385.
- [2] Chaney R L, Malik M, Li Y M et al. Phytoremediation of soilmentals[J]. *Current Opinions in Biotechnology*, 1997,(8): 279-284.
- [3] Wanekaya A K, Sadik O A. Pressurized extractions for the remediation of heavy metal contaminants in soil and sediments[J]. *Journal De Physique IV*, 2003, 10 (7): 415-418.
- [4] Swartjes F A. Insight into the variation in calculated human exposure to soil contaminants using seven different European models[J]. *Integrated Environmental Assessment Management*, 2007, 3(3): 322-332.
- [5] Winkler R, Rosner G. Seasonal and long-term variation of  $^{210}\text{Pb}$  concentration in air atmospheric deposition rate and total deposition velocity in south Germany[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 263(1-3): 57-68.
- [6] Gupta I, Kumar R. Trends of particulate matter in four cities in India[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(14): 2552-2566.
- [7] 王英,金军. 北京大气污染区域分布及变化趋势研究[J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2008, 17(1): 59-65. [Wang Ying, Jin Jun. Study on distribution and changes regularity of the air pollution in Beijing. *Journal of the CUN (Natural Sciences Edition)*, 2008, 17(1): 59-65.]
- [8] 朱万森,陈红光,刘志荣,等. 应用因子分析法对地面水质污染状况的研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2003, 42(3): 501-505. [Zhu Wansen, Chen Hongguang, Liu Zhirong et al. Study on pollution conditions of surface water by factor analysis. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2003, 42(3): 501-505.]
- [9] 云逸,邹志红. 灰色聚类法在三峡库区城市江段水质综合评价中的应用[J]. *数学的实践与认识*, 2007, 37(12): 65-172. [Yun Yi, Zou Zhihong. Application of the gray clustering method on water quality evaluation in city sections of the Three Gorges Reservoir Area. *Mathematics in Practice and Theory*, 2007, 37(12): 65-172.]
- [10] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33 (3): 321-325. [Xu Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33 (3): 321-325.]
- [11] Goovaerts P, Webster R, Dubois J P. Assessing the risk of soil contamination in the Swiss Jura Sing indicator geostatistics[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(2): 227-234.
- [12] Amini M, Afyuni M, FathianPour N et al. Continuous soil Pollution mapping using fuzzy Logic and spatial interpolation[J]. *Geoderma*, 2005, 124 (3-4): 223-233.
- [13] 舒冬妮. 用模糊聚类分析评价惠民及淄博地区土壤环境质量[J]. *山东农业大学学报*, 1989, (1): 78-81. [Shu Dongni. Evaluation of soil-environment quality areas Huimin and Zibo with fuzzy clustering analysis. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1989, (1): 78-81.]
- [14] 檀满枝,陈杰,徐方明,等. 基于模糊集理论的土壤重金属污染空间预测[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 389-396. [Tan Manzhi, Chen Jie, Xu Fangming et al. Spatial prediction of soil heavy metal pollution based on fuzzy set theory. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 389-396.]
- [15] 于万辉,王俊杰,臧淑英. 松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征及其风险评价[J]. *地理科学*, 2012,32(8):1000-1005. [Yu Wanhui, Wang Junjie, Zang Shuying. The spatial variability characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals of lake sediments in the Songnen Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2012,32(8):1000-1005.]
- [16] 陈飞香,程家昌,胡月明,等. 基于RBF神经网络的土壤铬含量空间预测[J]. *地理科学*, 2013,33(1):69-74. [Chen Feixiang, Cheng Jiachang, Hu Yueming et al. Spatial prediction of soil properties by RBF neural network. *Scientia Geographica Sinica*, 2013,33(1):69-74.]
- [17] 李建国,濮励杰,廖启林,等. 无锡市土壤重金属富集的梯度效应与来源差异[J]. *地理科学*, 2014, 34(4): 496-504. [Li Jianguo, Pu Lijie, Liao Qilin et al. The sources and gradient effect of soil heavy metal concentrations in Wuxi City. *Scientia Geographica Sinica*, 2014,34(4):496-504.]

- [18] 李勇, 余天虹, 赵志忠, 等. 珠三角土壤镉含量时空分布及风险管理[J]. 地理科学, 2015, 35(3): 373-379. [Li Yong, Yu Tianhong, Zhao Zhizhong et al. Prediction and risk management on geochemical accumulation of soil cadmium based on time-space model in Zhujiang River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(3): 373-379.]
- [19] 张欢, 纪桂霞. 综合水质标识指数法在公园湖泊水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 146-150. [Zhang Huan, Ji Guixia. Application of comprehensive water quality identification index method to water quality assessment of park lakes. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2012, 23(2): 146-150.]
- [20] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用(第三版) [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001. [Yang Lunbiao, Gao Yingyi. The principle and application of fuzzy mathematics(the third edition). Guangzhou: South China University of Technology Press, 2001.]
- [21] 张建东, 范舟, 赖健清, 等. 综合指数质量评价模型在太原市土壤重金属污染评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 240-243. [Zhang Jiandong, Fan Zhou, Lai Jianqing et al. Application of comprehensive index quality evaluation model of soil heavy metal pollution in Taiyuan. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(4): 240-243.]

## Pollution Space Recognition and Pollution Distribution of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration

He Tian, Shuai Hong, Zhu Xiang

(College of Resource and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, Hunan, China)

**Abstract:** By ArcGIS spatial analysis software, this study aimed to carry out the space recognition and distribution simulation for each pollution type (i.e., air pollution, water pollution, soil pollution) and comprehensive pollution within Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, and discussed their characteristics. It can be concluded that: 1) The atmospheric environment pollution is given priority to fugitive dust and coal smoke with the main pollutants as  $PM_{10}$  and  $SO_2$ , and the key pollution areas are the central downtowns of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan City, exhibiting dots distribution; 2) The whole water quality basically reaches the standard, and water environment pollution mainly resulted from ammonia, nitrogen and various heavy metals with the significant seasonal variation; 3) Soil pollution is rather serious with a wide coverage. Taking Shifeng District of Zhuzhou City as a representative, Cadmium pollution is the most serious one, which is caused by the accumulation of heavy chemical industry pollution; 4) Overall, Zhuzhou is the most polluted, which is followed by Xiangtan and Changsha. The formation of pollution space is greatly related with the terrain and topography of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, and influenced by the transformation among these three kinds of pollution elements.

**Key words:** Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration; pollution space; recognition; pollution distribution; pollution degree