

文章编号:1000-5641(2009)05-0075-10

崇明岛土壤重金属含量的空间分布 及污染评价

周燕¹⁻³, 李德志¹⁻³, 宋云¹⁻³, 李红¹⁻³, 柯世朕¹⁻³,
王春叶¹⁻³, 孙玉冰¹⁻³, 李立科¹⁻³, 赵鲁青¹⁻³

(1. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062; 2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程
与生态恢复重点实验室, 上海 200062; 3. 浙江天童森林生态系统国家野外科学
观测研究站, 浙江 宁波 315114)

摘要: 以上海市崇明县为研究对象, 采用 ArcGIS 中的地统计分析模块的普通克里格方法进行空间插值作图, 并运用单因子污染指数评价法和多因子污染指数评价法对崇明县土壤的重金属污染状况进行评价. 结果表明, 崇明县土壤重金属污染程度由高到低依次为 Cd>Zn>Cu>Cr>Pb. 主要重金属污染为镉, 平均单项污染指数为 1.05, 属于轻度污染. 所测的土壤重金属污染综合指数为 0.22~2.59, 平均 0.88, 污染程度达警戒级, 但总体污染状况仍属较清洁(尚清洁样点占 72.39%).

关键词: 崇明岛; 土壤重金属; 插值分析; 污染评价

中图分类号: X825 **文献标识码:** A

Distribution of soil heavy metal and pollution evaluation in Chongming Island

ZHOU Yan¹⁻³, LI De-zhi¹⁻³, SONG Yun¹⁻³, LI Hong¹⁻³, KE Shi-zhen¹⁻³,
WANG Chun-ye¹⁻³, SUN Yu-bing¹⁻³, LI Li-ke¹⁻³, ZHAO Lu-qing¹⁻³

(1. Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;
2. Shanghai Key Laboratory for Urbanization and Ecological Restoration, East China Normal
University, Shanghai 200062, China; 3. National Field Observation and Research Station in
Tiantong Forest Ecosystem of Zhejiang, Ningbo Zhejiang 315114, China)

Abstract: The distribution maps of heavy metals in soils of Chongming county were drawn using Kriging method in the geo-statistic module of ArcGIS, and the degrees of pollution were evaluated using the single-factor pollution index (SPI) and comprehensive pollution index (CPI). The results showed that the degrees of pollution of heavy metals in soils of Chongming County

收稿日期:2008-09

基金项目:上海市科委“登山行动计划”崇明生态建设重大项目(06DZ2303);国家自然科学基金(30370245,30470288);上海市生态学重点学科项目;华东师范大学 211 工程项目

第一作者:周燕,女,硕士研究生. E-mail:zhouyan999@126.com.

通讯作者:李德志,男,教授,研究方向为克隆植物生态学. E-mail:dzli@des.ecnu.edu.cn.

were $Cd > Zn > Cu > Cr > Pb$. Among the heavy metals, Cd was the major one. The average SPI of Cd in the soil samples was 1.05, reaching the light degree of pollution. The comprehensive pollution index of 5 heavy metals including all soil samples, ranged from 0.22 to 2.59 with an average of 0.88, reaching the alarm degree of pollution. However, The overall situation of heavy metals in soils were relatively clean, because there were still 72.39% of soil samples showing the cleanness.

Key words: Chongming island; heavy metal in soil; spatial interpolation; pollution evaluation

0 引言

土壤重金属污染是指由于人类活动将重金属带入土壤中,致使土壤中重金属含量明显高于其自然背景含量,并造成生态破坏和环境质量恶化的现象^[1].由于土壤重金属污染具有多源性、隐蔽性和一定程度上的长距离传输性以及污染后果的严重性^[2],故有人形象地将土壤污染称之为“化学定时炸弹”^[3].随着工业化、城市化的发展,土壤环境污染问题越来越突出.土壤中重金属不仅对植物的生长造成影响,还通过食物链危害人类健康.受重金属污染的土壤进入到大气和水中,还会造成大气污染和水污染等环境问题.对土壤中的重金属污染进行分析和评价,目前已有很多报道^[4-7].因此,土壤重金属污染以及与其相关的评价研究越来越引起人们的关注^[8].同时,近几年,国内外学者针对不同地区已进行了很多土壤环境调查及质量评价方面的研究工作^[9-13].以土壤重金属元素为例,其主要研究方法为:有针对性地野外采集土壤样品,并分析采样点土壤的污染物含量,在此基础上,采用污染指数等方法进行土壤重金属污染程度评价,并分析可能的污染源.

地理信息系统(GIS)技术作为迅速发展的空间信息分析技术,具有强大的空间分析功能^[14],它能够在可视化环境下,对大量的空间数据进行分析.近年来,ArcGIS中的地统计学(geostatistics)分析模块被广泛地应用于环境调查和污染物的空间分析工作中,并被用来预测未采样点的属性.通过地理信息系统软件,可以分析制作相应的地图来直观表达空间数据的分布趋势或污染程度^[15-17].根据国家和上海市的总体规划,崇明岛将被规划、建设成为世界级的生态岛.为了搞好崇明岛的生态建设,深入了解和分析该岛的土壤状况,特别是重金属含量在全岛的分布状况,无疑是十分重要的.本项目以崇明岛为研究对象,通过对全岛土壤中Cd,Cu,Pb,Cr和Zn等5种重金属的调查采样和分析测试,综合分析了土壤重金属含量在全岛的分布状况,并采用ArcGIS中的地统计学分析模块,对土壤重金属含量分布的空间分异性特征进行了分析,同时采用Kriging插值方法作图进行直观表示.

1 研究区概况和实验方法

1.1 研究区概况

崇明岛是我国仅次于台湾岛和海南岛的第三大岛,也是世界上最大的河口冲积岛之一^[18].目前崇明岛由崇明、长兴和横沙等三岛组成.三岛陆域总面积1 411 km².崇明县目前辖有13个镇和3个乡.2006年底全县户籍人口为69.98万人,全岛三面环江,一面临海,西接滚滚长江,东濒浩瀚东海,南与浦东新区、宝山区及江苏省太仓市隔水相望,北与江苏省海门市和启东市一衣带水.

崇明岛成陆已有 1 300 多年历史,岛上地势平坦,无山岗丘陵,西北部和中部稍高,西南部和东部略低,90%以上的土地标高(以吴淞标高 0 m 为参照)在 3.21~4.20 m 之间。地理位置在东经 121°09'30"~121°54'00",北纬 31°27'00"~31°51'15"。地处北亚热带,气候温和湿润,年平均气温 15.2℃,日照充足,雨水充沛,四季分明。岛上水土洁净,空气清新,生态环境优良。三岛的土壤发育于河湖江海沉积,经历了盐渍化、草甸化和沼泽潜育过程,有水稻土,潮土和盐土 3 个亚类 8 个土属 35 个土种。土壤有机质平均含量 1.18%,pH 平均 8.3,含盐量 77‰~4.1‰。适宜粮、棉、油、蔬菜和瓜果等多种作物栽培。崇明岛内地势低平,河网密布。有市级河道 1 条,县级骨干河道 32 条,总长 467.58 km,镇级河道 447 条,总长 1 191 km,浜沟 1 万多条。全岛水面积约占总耕地面积的 9.7%。

1.2 样品采集

在 2007 年 7-12 月,采用 GPS 定位,在崇明三岛范围内,根据崇明县土地利用现状,采集 0~20 cm 土壤样点 134 个,采样点见图 1。具体采样原则为:(1) 采样点选择在有利于该土壤类型特征发育的环境,如地形平坦、自然植被良好的区域;(2) 不在住宅周围、路旁、沟渠或粪堆附近等人为干扰明显地点或水土流失严重以及表土破坏明显的地点采样;(3) 采样时选取有代表性的地点,并以该点为中心,在其周围 100 m 的区域内采集 3~5 个土壤样品,将样品混匀后用四分法取约 1 kg 作为该点的土壤样品;(4) 采样时,尽量使采样点涉及所有土地利用类型,并详细记录样点周围土地利用和土地覆被情况以及农药化肥施用情况^[19]。

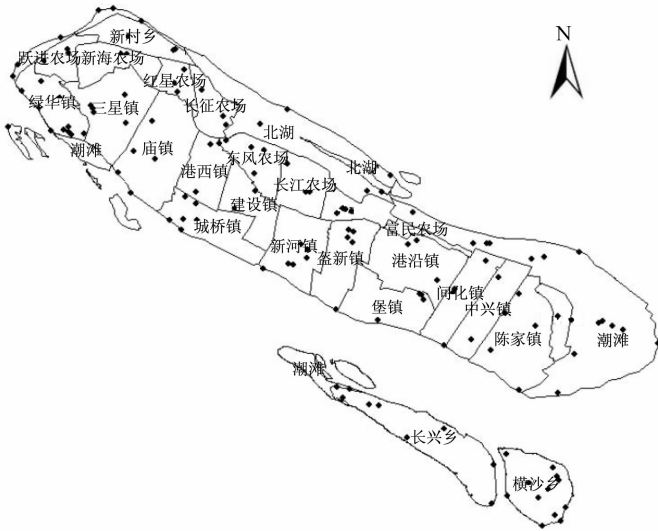


图 1 土壤样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

1.3 样品处理和化学分析

把采集到的土壤样品置于实验室内自然风干,剔除植物残体和石块,磨碎后过 100 目筛,并保存于塑料瓶中备用。在进行样品分析时,共选择 Cd, Cu, Pb, Cr, 和 Zn 等 5 种重金属元素进行含量测定。方法如下:经过 100 目筛的土壤按照要求分别加入强酸等试剂进行消解(硝酸-高氯酸-氢氟酸全量消解法^[20]),后定容到 50 mL 后待测。分析过程中采用双平行样,整个过程所用试剂均为优级纯。用原子吸收光谱仪(M 系列 650292v 1.23)测定土壤中的

Cd, Cu, Pb, Cr, 和 Zn 等重金属的含量.

2 数据处理和分析方法

2.1 数据处理

土壤重金属的平均值、标准差、变异系数、偏度、峰度、正态分布检验和相关分析采用统计软件 SPSS 13.0 计算, 克里格插值采用 ESRI 的 ArcGIS 9.0 的地统计模块进行分析.

2.2 克里格空间插值方法

克里格空间插值法步骤包括:(1) 计算土壤重金属含量的半方差函数, 选择模型进行拟合;(2) 确定土壤重金属含量的空间分布特性(各向同性, 或者各向异性);(3) 选择克里格法进行空间插值分析;(4) 进行模拟值与实际值的交叉验证, 确定最佳的空间插值结果.

2.3 污染程度评价方法

评价标准采用国家颁布的《土壤环境质量标准》(GB15618-95)见表 1.

表 1 土壤重金属污染的评价标准

Tab. 1 Evaluation criteria for heavy metals in soils

级别	一级	二级	三级		
pH 值	自然背景值	<6.5	6.5 - 7.5	>7.5	>6.5
Cd \leq /(mg \cdot kg $^{-1}$)	0.20	0.30	0.30	0.60	1.0
Cu \leq /(mg \cdot kg $^{-1}$)	35	50	100	100	400
Pb \leq /(mg \cdot kg $^{-1}$)	35	250	300	350	500
Cr \leq /(mg \cdot kg $^{-1}$ 水田)	90	250	300	350	400
Cr \leq /(mg \cdot kg $^{-1}$ 旱地)	90	150	200	250	300
Zn \leq /(mg \cdot kg $^{-1}$)	100	200	250	300	500

土壤重金属污染评价采用指数法, 指数法分单因子污染指数法和综合污染指数法. 单因子污染指数评价即对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价. 通过单因子评价, 确定单个土壤质量参数的污染情况, 它是多因子综合评价的基础. 单因子指数法是目前国内普遍采用的方法之一, 其计算公式为^[21]

$$P_i = C_i/S_i.$$

式中: P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测值(单位: mg \cdot kg $^{-1}$); S_i 为污染 i 的评价标准(单位: mg \cdot kg $^{-1}$).

污染程度划分及环境评价: 根据 P 数值的大小, 把污染程度划分为未污染($P \leq 1$)、轻污染($1 < P \leq 2$)、中度污染($2 < P \leq 4$)、重污染($4 < P \leq 6$)和极重污染($P > 6$).

单因子污染指数, 只能反映单个污染物的污染程度. 在多种污染物在某一区域同时存在时, 不能全面、综合地反映多种污染物的整体污染水平. 因此, 需要一种同时考虑多种污染物综合污染水平的多因子评价方法, 即将单因子污染指数按一定方法进行综合. 常用的方法有综合污染指数法, 它兼顾了单因子污染指数的平均值和最高值, 能较全面地反映环境质量, 而且可以突出污染较重的污染物的作用, 其计算公式为^[21]

$$P_{\text{综}} = \{[(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2\}^{1/2}.$$

式中: $(C_i/S_i)_{\text{max}}^2$ 为土壤污染中污染指数的最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}^2$ 为土壤污染中污染指数的平均值.

综合污染指数法的计算公式中含有评价参数中最大的单项污染分指数,其突出了污染指数最大的污染物对环境的影响和作用,克服了平均值法各个污染物分担的缺陷,但是其没有考虑土壤中各污染物对作物毒害的差别,而且最大值对所得结果的影响很大,有些时候可能会人为夸大一些因子的影响作用.如果根据公式综合污染指数 = $\{[(\text{平均单项污染指数})^2 + (\text{最大单项污染指数} + \text{次大单项污染指数})^2] \div 2\}^{1/2}$ 计算综合污染指数,可能能够更接近实际地反映整个区域的土壤环境质量状况^[22].但关于这方面的研究没有系统的分级标准,所以文章还是采用普通的综合污染指数公式.

综合污染指数分级标准见表 2^[23].

表 2 土壤综合污染指数分级标准

Tab. 2 Classification standards for comprehensive pollution indices in soils

污染等级	污染指数	污染程度	污染状态描述
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级	尚清
3	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻度污染	土壤污染物超过背景值
4	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中度污染	土壤受到中度污染
5	$P_{\text{综}} > 3$	重度污染	土壤受污染相当严重

3 结果与分析

3.1 土壤重金属的描述性统计分析

五种重金属元素的平均含量是进行污染评价的基础(详见下文).变异系数反映了采样总体中各采样点之间的平均变异程度.从重金属含量的描述性统计分析(见表 3)来看,样点之间含量差异最大的是锌(CV, 1.05),最小的是铜(CV, 0.39).五种重金属元素含量的总体平均变异程度由大到小排列顺序为:锌、铅、镉、铬和铜.重金属含量的描述性统计分析主要反映的是其含量变化的全貌,并不能反映出局部的变化特征,即不能反映重金属含量的结构性、随机性和独立性,因此,需要进一步采用地统计学方法描述重金属含量的空间分布的变异特征.

表 3 土壤重金属空间变异统计特征值

Tab. 3 Statistic features of spatial variability of heavy metals in soils

元素	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数	偏度	峰度	分布类型
Cd	0.04	2.11	0.63	0.34	0.54	1.52	3.71	偏态
Cu	7.83	88.05	30.94	11.95	0.39	1.83	6.54	偏态
Pb	6.13	198.18	45.61	26.11	0.57	3.14	13.69	偏态
Cr	15.89	275.75	67.57	35.52	0.53	3.08	12.86	偏态
Zn	38.83	974	167.63	175.84	1.05	2.87	8.17	偏态

土壤样品中,5种重金属含量的极差普遍较大(见表 3),表明崇明岛土壤重金属在不同地点存在明显的空间分布差异.其中,锌的样品极差最大,而铜的样品极差最小.统计特征值中的偏度反映了正态分布双尾特征,标准正态分布偏度为 0.峰度是用来衡量分布的集中程度或分布曲线的尖峭程度的指标,反映了样本的集中程度,标准正态分布峰度为 3.当峰度大于 3 时,表示分布的形态比正态分布更尖峭,为尖峰分布,当峰度小于 3 时,比正态分布更

平缓,为平峰分布.表3表明,5种重金属含量分布均属于正偏斜分布(偏度大于0),表明5种重金属含量偏高的样点多、偏低的样点少.5种重金属的峰度都大于3,表明样点数据比较集中.

为了在进行地统计分析时能够获得更好的插值效果,对呈现偏态分布的重金属含量数据进行对数转换,使其接近于正态分布(表4为对数转换后的统计特征值).Cd,Cu,Pb,Cr和Zn含量经对数转换后,其偏度和峰度均变小(数据更接近正态分布).

表4 对数转换后土壤重金属空间变异统计特征值

Tab.4 Statistic features of spatial variability of heavy metals after logarithmic conversion

元素	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数	偏度	峰度	分布类型
Cd	-3.22	0.75	-0.46	-1.08	-0.62	0.42	1.31	对数正态
Cu	2.06	4.48	3.43	2.48	-0.94	0.60	1.88	对数正态
Pb	1.81	5.29	3.82	3.26	-0.56	1.14	2.62	对数正态
Cr	2.77	5.62	4.21	3.57	-0.63	1.12	2.55	对数正态
Zn	3.66	6.88	5.12	5.17	0.05	1.05	2.1	对数正态

3.2 土壤重金属含量的空间分布特征分析

Kriging模型及其参数的合适程度需要进行综合评价.评价标准包括:(1)预测值的平均误差(ME)的绝对值最接近于0;(2)标准化平均误差(MSE)最接近于0;(3)平均标准误差(ASE)与均方根误差(RMSE)最接近,RMSE越小,模拟的效果越好;(4)标准化均方根误差(RMSSE)最接近于1.按照上述标准,表5的结果表明所选择的Kriging模型参数对土壤重金属的空间插值结果很好.其中,土壤Pb和Zn预测值的均方根误差较大,可能与土壤Pb和Zn的空间分布变幅较大有关.

表5 克里格法空间插值的预测误差

Tab.5 Prediction errors by Kriging

元素	ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE
Cd	-0.011 76	1.293	1.52	-0.032 61	1.031
Cu	-0.056 55	12.43	12.69	-0.050 62	1.045
Pb	-0.016 05	27.79	32.13	-0.006 68	0.999 9
Cr	0.087 8	5.32	6.87	0.068 6	1.232
Zn	-0.007 26	41.324	43.23	-0.006 7	0.991

注:ME为平均误差;RMSE为均方根误差;ASE为平均标准误差;MSE为标准化平均误差;RMSSE为标准化均方根误差.

利用ArcGIS地统计模块进行普通克里格插值计算后,土壤中5种重金属含量和综合污染指数的插值结果由图2表征.在研究区土壤中,Cd的高含量区主要位于中部的城镇地区,而在周边的农场地区,Cd含量都比较低.研究区土壤中Cu和Pb的含量都比较低,三星镇、庙镇和东风农场的含量相对较高.研究区土壤中Cr含量都比较低,但中部地区的城桥镇、港西镇、东风农场、长江农场、北湖和新河镇的含量相对比较高.研究区土壤中Zn的总体含量也比较低,但西北部和中北部含量相对较高.总的来说,五种重金属的含量在城镇地区比农场高.

3.3 崇明岛土壤重金属污染评价结果与分析

把计算出的各重金属元素的单因子污染指数按照国家土壤环境质量二级标准进行衡量结果表明,崇明三岛的重金属污染主要以镉污染比例最高,达44.8%,镉的平均污染指数为

1.05,属于轻度污染.在镉污染样品中,达中度污染者占6%,轻度污染者占38.8%.锌污染比例为11.9%,锌的平均污染指数为0.56.在锌污染样品中,达中度污染者占5.2%,轻度污染者占6.7%.铬的污染比例为0.7%,铬的平均污染指数为0.25.在铬污染样品中,达轻度污染者占0.7%.铜和铅的平均污染指数分别为0.31和0.13.

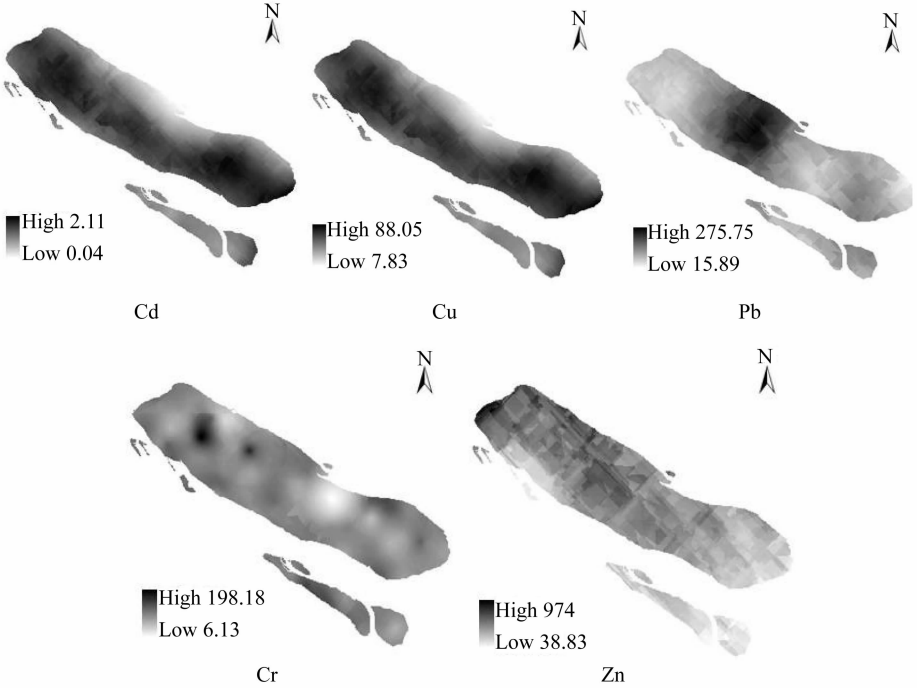


图 2 土壤重金属含量(单位:mg · kg⁻¹)的克里格空间插值图

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal contents (unit:mg · kg⁻¹) in soils using Kriging interpolation method

对比图 3 中镉的单因子污染指数分布图和图 4 中的综合污染指数分布图,可以发现二者间有很强的相似性,表明镉对研究区土壤重金属污染的贡献率很大,是崇明岛土壤重金属污染的首要污染因子,这可能与该区长期使用含镉的化肥有关.在目前使用的化肥中,含镉磷肥的施用影响最为严重(施用磷肥的类型以过磷酸钙为主).据西方国家估计,在人类活动对土壤的贡献中,磷肥占 54%~58%.全球磷肥中平均含镉量为 7 mg · kg⁻¹,这样给全球土壤带来 66 000 kg 的镉^[24],可见,长期施用含镉磷肥会给土壤带来极为严重的污染问题.

表 6 土壤重金属污染单因子评价结果

Tab. 6 Single factor evaluation index of heavy metals in soils

金属	范围(P _i)	平均值(P _i)	非污染样品数	轻度污染样品数	中度污染样品数
Cd	0.07~3.52	1.05	74(55.2%)	52(38.8%)	8(6.0%)
Cu	0.08~0.88	0.31	134(100%)		
Pb	0.02~0.57	0.13	134(100%)		
Cr	0.05~1.10	0.25	133(99.3%)	1(0.7%)	
Zn	0.13~3.25	0.56	118(88.1%)	9(6.7%)	7(5.2%)

注: P_i 为重金属单因子污染指数;括号内结果为非污染或污染样品占总样品数的百分比.

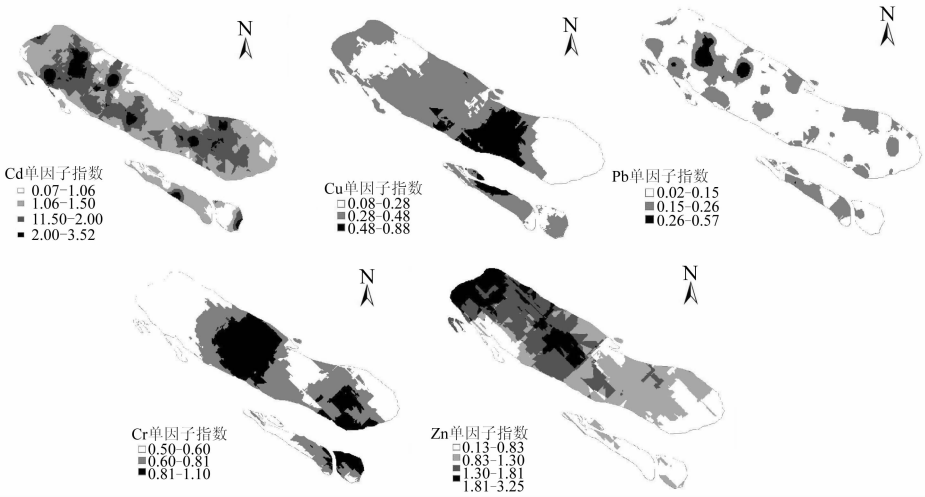


图3 研究区土壤重金属单因子污染指数的克里格空间插值图

Fig. 3 Spatial distribution of single-factor pollution indices of heavy metal in soils using Kriging interpolation method

从图4的综合污染指数的插值结果图可以看出,综合污染指数的范围为0.22~2.59,平均为0.88.污染状况为清洁或尚清洁的样点占72.39%,轻度污染样点占24.63%,中度污染样点占2.98%,未检测出有严重污染的样点.

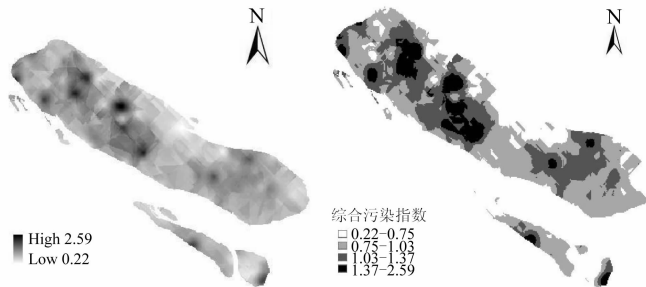


图4 研究区土壤重金属综合污染指数的克里格空间插值图

Fig. 4 Spatial distribution of comprehensive pollution indices of heavy metal in soils using Kriging interpolation method

4 结 论

通过将布点采样和分析测试获得的原始数据用克里格插值法绘制 Cd, Cu, Pb, Cr 和 Zn 等 5 种重金属含量的空间分布图谱,直观地呈现了 5 种重金属在崇明县空间分布特征.分析认为崇明岛土壤重金属含量可能与样点所在位置离工业区、主要交通干道的距离等因素有密切联系.

在崇明岛土壤重金属中, Cd, Cu, Pb, Cr 和 Zn 的平均含量分别为 0.63, 30.94, 45.61, 67.57 和 167.63 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 重金属污染程度由高到低依次为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb}$. 对比综合污染指数与镉单因子污染指数分布图,发现二者间有很强的相似性,表明镉对研究区土

壤重金属污染的贡献率很大,是崇明岛土壤重金属污染的首要污染因子.镉的平均单项污染指数为1.05,属于轻度污染.所测土壤重金属污染综合指数在0.22~2.59之间,平均为0.88,属于警戒级,但总体污染状况仍属较清洁(尚清洁样点占72.39%).

[参 考 文 献]

- [1] 周建利,陈同斌.我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状与展望[J].湖北农学院学报,2002,22(5):476-480.
ZHOU J L, CHEN T B. Situation and prospect of research on heavy metal pollution in vegetables and soils for vegetable cultivation in urban areas of China[J]. Hubei Agricultural College Journal, 2002, 22(5):476-480.
- [2] 陈怀满,郑春荣.中国土壤重金属污染现状与防治对策[J].人类环境杂志,1999,28(2):130-134.
CHEN H M, ZHENG C R. Heavy metal pollution in soils in China: Status and counter measures[J]. Journal of the Human Environment, 1999, 28(2): 130-134.
- [3] 宁茂岐,刘洪斌,武伟.两种取样尺度下土壤重金属空间变异特征研究[J].中国生态农业学报,2007,15(3):86-91.
NING M Q, LIU H B, WU W. Determination of the characteristics of soil heavy metal spatial variability with two soil sampling scales[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 86-91.
- [4] BURT R, WILSON M, MAYS M D, et al. Major and trace elements of selected pedon in the USA[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32: 2109-2121.
- [5] 刘红樱,谢志仁,陈德友,等.成都地区土壤环境质量初步评价[J].环境科学学报,2004,24(2):297-303.
LIU H Y, XIE Z R, CHEN D Y, et al. Primary assessment of environmental quality of soils in Chengdu Area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(2): 297-303.
- [6] ANDERSON M K, REFGAARD A, RAULUND-RASMUSSEN, et al. Content, distribution, and solubility of Cadmium in arable and forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66:1829-1835.
- [7] WONG C S C, WU S C, DUZGOREN-AYDIN N S, et al. Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China[J]. Environmental Pollution, 2007, 145(2): 434-442.
- [8] 赵其国,孙波,张桃林.土壤质量与持续环境[J].土壤,1997,29(3):113-120.
ZHAO Q G, SUN B, ZHANG T L. Soil quality and sustainable environment[J]. Soils, 1997, 29(3):113-120.
- [9] 孙丽娜.碧流河上游金矿开发环境地球化学及其生态影响[D].沈阳:东北大学,2002.
SUN L N. The environment geochemistry of gold mining and ecological effects in upper Biliu River[D]. Shenyang: Northeastern University, 2002.
- [10] 朱桂珍.北京市东南郊灌区土壤环境重金属污染现状及防治对策[J].农业环境保护,2001,20(3):164-166,182.
ZHU G Z. Pollution of heavy metals on soils in East-South area of Beijing and its remediation[J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(3):164-166,182.
- [11] RAPANT S, RAPOSOVA M, BODIS D, et al. Environmental-geochemical mapping program in the Slovak Republic[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 66(2): 151-158.
- [12] LI X D, POON C S, LIU P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 1361-1368.
- [13] SPONZAA D, KARAOGLU N. Environmental geochemistry and pollution studies of Aliaga metal industry district[J]. Environment International, 2002, 27: 541-553.
- [14] 孔金玲,王文科,翁晓鹏,等.基于GIS的地下水及其环境问题分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,36(5):771-774.
KONG J L, WANG W K, WENG X P, et al. Analysis of groundwater and environment problems based on GIS [J]. Journal of Jiling University (Earth Science Edition), 2005, 36(5): 771-774.
- [15] MCGRAPH D, ZHANG C S, CARTON O. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silver-

- mines, area Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 127: 239-248.
- [16] SABY N, ARROUAYS D, BOTTOLONE L, et al. Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France [J]. *Science of Total Environment*, 2006, 367: 212-221.
- [17] LIU X, WU J, XU J. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141: 257-264.
- [18] 张修桂. 崇明岛形成的历史过程[J]. *复旦学报(社会科学版)*, 2005(3): 57-66.
ZHANG X G. The historical formation of Chongming island[J]. *Fudan Journal (Social Sciences)*, 2005(3): 57-66.
- [19] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(4): 109-113.
LIU Q, WANG J, SHI Y X, et al. On the spatial distribution of heavy metal in the cropland based on GIS[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(4): 109-113.
- [20] 魏复盛, 齐文启. 原子吸收光谱及其在环境分析中的应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
WEI F S, QI W Q. *Atomic Absorption Spectrometry and its Application in Environmental Analysis*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988.
- [21] 丁桑岚. 环境评价概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
DING S L. *Environment Assessment*[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2001.
- [22] 唐书源, 李传义, 张鹏程, 等. 改进土壤综合污染指数计算公式的设想[J]. *农业环境与发展*, 2003(4): 41-42.
TANG S Y, LI C Y, ZHANG P C, et al. A vision of Improve the comprehensive soil pollution index formula[J]. *Agro-Environment and Development*, 2003(4): 41-42.
- [23] 李其林, 黄郡, 骆东奇, 等. 重庆市农作物基地土壤中重金属含量及其污染特征[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(34): 270-273.
LI Q L, HUANG J, LUO D Q, et al. Contents of heavy metals in soils of the crop bases of Chongqing[J]. *Soil and Environment*, 2000, 9(34): 270-273.
- [24] 高志岭, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥施用与镉污染的研究现状及防治对策[J]. *河北农业大学学报*, 2001, 24(3): 90-99.
GAO Z L, LIU J L, LIAO W H, et al. Situation of cadmium pollution caused by application of phosphate fertilizer and the countermeasure of prevention and control of cadmium[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2001, 24(3): 90-99.

(上接第 36 页)

- [11] 吴金坤. 高分子材料的阻燃抑烟技术[J]. *化工新型材料*, 1997, 25(7): 10-16.
WU J K. Flame retardant and smoke suppression technique of macromolecular materials[J]. *New Chemical Materials*, 1997, 25(7): 10-16.
- [12] 高海霞, 程国峰, 成荣明, 等. 基于纳米 ZnO/聚氯乙烯复合材料的光催化性能研究[J]. *无机化学学报*, 2006, 22(5): 872-876.
GAO H X, CHENG G F, CHENG R M, et al. Photocatalytic property of composite of nanometer ZnO/PVC[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2006, 22(5): 872-876.
- [13] 郭小汾, 杨雪莲, 李海滨, 等. 聚氯乙烯燃烧特性及 HCl 的生成机理[J]. *燃烧化学学报*, 2000, 28(1): 68-70.
GUO X F, YANG X L, LI H B, et al. Combustion characteristics of PVC[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2000, 28(1): 68-70.