

# 基于空间分析技术的城市土壤污染评价

严加永<sup>1,2</sup>, 吕庆田<sup>1</sup>, 葛晓立<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;  
3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘要:** 结合地理信息系统技术, 提出了空间分析技术评价城市土壤污染的技术路线并探讨了与之相关的数据处理方法、评价单元的划分、评价指标体系的建立以及各指标的权重设定, 借助 GIS 软件 Arcview 的空间分析模块, 编程实现了用空间分析方法对城市土壤污染的评价。利用该方法对北京市城区及近郊区土壤污染进行了评价, 结果表明, 空间分析技术是一种在可视化条件下对城市土壤污染进行评价分析的有效方法, 评价结果真实可信。

**关键词:** 城市土壤污染; 空间分析; 评价; 地理信息系统

**中图分类号:** X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)03-0321-05

## Urban Soil Pollution Assessment Based on Spatial Data Analysis

YAN Jia yong<sup>1,2</sup>, LÜ Qing tian<sup>1</sup>, GE Xiao li<sup>3</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;  
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
3. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

**Abstract** Integrating with Geographic Information System (GIS), the technical course of spatial data analysis (SDA) for the assessment of urban soil pollution is brought forward. The data processing method, assessment unit dividing, assessment index determination and the weight for each index are also discussed. With the module of spatial extension of Arcview, a method for the assessment of urban soil by spatial data analysis is realized by program. This method is applied in the assessment of soil pollution in Beijing. It proves that the spatial data analysis is an effective method for the assessment of urban soil pollution in visual environment.

**Key words:** urban soil pollution; spatial data analysis; assessment; GIS

## 0 引言

城市土壤是城市生态环境系统的有机组成部分, 对城市的可持续发展有着重要的意义<sup>[1]</sup>。城市化和工业化进程的加快, 造成城市土壤污染、酸化和硬化以及土壤生物和植被退化等一系列较为严重的城市环境问题, 已经直接危及城市居民的健康和安全<sup>[2]</sup>。近年来, 城市土壤污染问题开始引起人们的高度重视, 因此, 必须对城市土壤污染进行真实客观的评价。由于城市土壤组成的复杂性, 与农

用地评价的差别很大, 使准确评价城市土壤污染程度变得十分困难。此外, 在城市土壤污染评价中, 中国目前还没有系统的评价规范和准则, 因此, 在正确选择采样位置和精确测试分析的基础上, 还需要快速有效的评价手段。GIS 空间分析技术在对与空间地理位置有关的信息操作方面有着非常强大的能力。笔者将空间分析方法运用在城市土壤污染中, 提出了对城市土壤污染的现状及来源进行评价的思路和实现方式, 并利用此方法对北京市城区及其近郊区土壤进行了评价, 取得了真实客观的

收稿日期: 2006 09 19

基金项目: 中国地质调查局项目(20001DIA10021)

作者简介: 严加永(1977), 男, 云南丽江人, 博士研究生, 从事地球探测信息技术和 GIS 研究。E-mail: yanjy@163.com

评价结果。

# 1 空间分析评价城市土壤的实现

## 1.1 空间分析概述

空间分析也称空间数据分析(Spatial Data Analysis, 简称 SDA)是基于地理对象空间布局的地理数据分析技术,它与传统统计分析的根本差异是 SDA 的结果依赖于事件的空间分布<sup>[3]</sup>。通过 SDA 可以发现隐藏在空间数据之后的重要信息或一般规律,因此, GIS 也可以看作是一个空间知识发现和挖掘的过程。对空间信息的提取和传输,已使 GIS 成为区别于一般信息系统的主要功能特征,也是评价 GIS 功能强弱的重要指标之一<sup>[4]</sup>。

SDA 功能的实现分为几个层次:

### 1.1.1 认知

对空间数据进行有效获取和科学的组织描述,利用空间数据来再现事物本身,例如污染元素的空间分布等值线图。

### 1.1.2 解释

理解并解释空间数据的背景过程,认识事件的本质规律,例如加油站一类的点源污染分布规律。

### 1.1.3 预报

了解、掌握事件发生的规律后,运用预测模型对未来状况作出合理推测。例如预测某污染物在土壤中运移扩散趋势。

### 1.1.4 宏观决策和调控

根据 SDA 结果做出合理决策,调控地理空间上发生的事件,如合理污染治理等。

SDA 可以分为基于矢量的空间分析和基于栅格的空间分析。前者包括缓冲区分析、查询等,当前大部分 GIS 软件都有现成的模块进行操作;后者以栅格为单元,可以进行跨图层的计算,为城市土壤的综合评价和调查污染来源提供了便利,这里着重从栅格空间分析对城市土壤污染进行评价。

## 1.2 评价技术路线

城市土壤环境是多种要素组成的一个综合体,仅仅从一种污染元素进行评价得出的结果往往不具有代表性,因此,必须采用综合评价的方法对城市土壤污染进行评价。在评价方法上结合 GIS 技术,利用栅格数据空间分析技术进行评价,评价技术路线见图 1。

## 1.3 数据处理

目前,在城市土壤污染评价中,大都按规则网

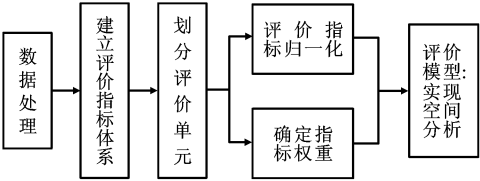


图 1 空间分析法评价城市土壤污染技术路线  
Fig.1 Technical Sketch of Urban Soil Pollution Assessment by Spatial Data Analysis

格采样进行采样设计,在每个网格中取一个点或者多个点组合来采样。网格越小,评价精度越高,但是花费也随着增大,因此,网格大小选取应该与土壤污染调查的比例相对应<sup>[5]</sup>。本研究按 1 km<sup>2</sup> 为一个网格采样单元,在每个网格中又划分成 4 个小矩形,在 4 个小矩形中和网格单元中心一共取 5 个子样组合成一个大样进行化学分析。分析所得到的数据都是离散的点数据,通过转换后一般为矢量数据,在 GIS 中形成一个点图层(或者叫点文件)。由于矢量数据在评价模型空间耦合方面不如栅格数据方便<sup>[6]</sup>,因此,需对矢量数据栅格化。通过 GIS 的常规空间插值方法形成栅格数据,一般选用克里格插值方法。栅格的大小应根据评价的精度要求和矢量数据的数据量并结合研究区的实际情况而定,在本研究中,栅格大小取网格的 1/10。

## 1.4 评价指标体系的建立

城市土壤是一个综合系统,土壤质量的好坏,对人居环境的影响,需要从总体来评价,得出合理真实的评价结果<sup>[7]</sup>。评价指标的选择有赖于土壤专家针对某一具体问题进行具体的选择组合,比如要考察重金属污染情况,就需要有目的的选择几种污染元素组合,每种元素对人体的影响程度不尽相同,因此,需要给出一定的权重,重新组合打分,给出评价结果。如果要考察污染来源,比如区分某些有机物污染是因为燃煤造成的还是燃油造成的,就需要选择不同的评价指标进行判定。评价指标体系的建立应该根据研究目的和土壤及环境学家的建议来构建。

## 1.5 评价单元划分

评价单元是城市土壤环境评价的基本单位,其划分应能客观反映土壤质量的空间差异。为了充分利用 GIS 快速计算和强大的空间耦合分析功能,研究采用栅格划分评价单元。栅格的大小在矢量数据经 Kriging 网格化成栅格的时候设置,其大小

应视研究区采样网度进行设置。

1.6 评价指标的量化与归一化

各评价指标可能存在量纲上的差异, 因此需要按照一定的标准进行指标的量化、归一化处理<sup>[8]</sup>。例如在对城市土壤重金属进行综合评价时, 每种元素超过污染标准不但不相同, 有的甚至差 3 个数量级, 因此, 必须将这些评价指标归一化到一个单位尺度来, 才能进行总体土壤重金属的污染评价<sup>[9]</sup>。研究采用评分法进行归一化: 首先进行各单项指标评价, 划分组分所属污染级别。然后对各类别按表 1 分别确定某一单一元素组分评价分值  $F_i$ 。

表 1 各组分评分

Tab.1 Grade Table of Apiece Suit

评价分值	清洁	较清洁	轻污染	中污染	重污染
$F_i$	0	1	3	6	10

1.7 指标权重的确定

由于各评价指标对综合评价所产生的影响不同, 因此需要合理确定各评价指标权重。确定评价指标权重的方法主要有特尔菲法、模糊聚类分析和层次分析法等。研究采用层次分析法, 对土壤中镉、银、铅、铬、铜、锌、砷等 7 种重金属的权重计算结果为:  $W = \{0.24, 0.18, 0.1, 0.07, 0.09, 0.12, 0.2\}$ , 计算判断矩阵一般一致性指标参数<sup>[10]</sup>为 0.109, 然后计算判断矩阵的随机一致性比率为 0.083, 随机一致性比率小于 0.10, 说明本判断矩阵满足一致性要求, 权重向量设置合理。

1.8 空间分析的实现

空间分析的实现采用栅格数据运算来实现, 一般商业 GIS 软件中都具有空间分析模块, 栅格数据的运算也是空间分析模块的重要组成部分之一。通过栅格数据运算可以方便地实现跨图层计算和查询, 从而实现 GIS 强大的空间分析功能。跨图层计算指不同图层的栅格数据逐网格按一定的数学法则或逻辑判断进行运算, 从而得到新的栅格数据系统的方法, 通过此功能, 将各评价指标的所在图层按照给定的评价模型进行计算, 就可得出评价结果。跨图层查询可以同时多个图层中查询出满足条件的结果, 例如, 铅、土地利用和土壤类型分别是 3 个不同的图层, 利用跨图层查询, 就可以查询出满足形如:  $[(Pb > 98 \text{ mg/kg}) \text{ and } (\text{土地利用} = \text{工业区}) \text{ and } (\text{土壤类型} = \text{棕壤})]$  的结果来, 并将几个以 0 和 1 表示, 1 代表满足条件的区域, 而 0 代表不满足条件的区域。通过不同图例或者不同的颜

色, 将评价结果以直观的图形显示出来, 从而完成城市土壤质量的评价。

2 评价实例

2.1 研究区概况

研究区选择北京市及其近郊区, 地理位置为: 北纬  $39.71^{\circ} \sim 40.04^{\circ}$ , 东经  $116.20^{\circ} \sim 116.53^{\circ}$ 。选择规则网格采样方法, 布置 255 个采样点(图 2)。

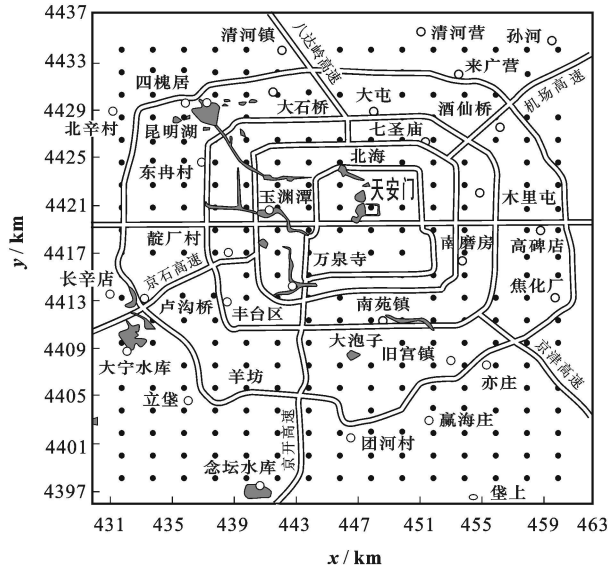


图 2 研究区域及采样点分布

Fig.2 Sample Location of Research Area

2.2 土壤重金属综合评价

研究中选取镉、银、铅、铬、铜、锌、砷等 7 种重金属作为评价指标对北京市及近郊区中的土壤重金属污染总体质量进行了评价。评价模型采用模糊层次法建立, 其基本思想为<sup>[11]</sup>:

设  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  是参与决策的群体集合,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  是  $m$  个备择方案即意见集。对  $Y$  中每一备择方案  $y_i (i = 1, 2, \dots, m)$  都可将  $X$  中的元素排成一个线性序称为第  $i$  个意见。令  $B_i(x_k) (k = 1, 2, \dots, n)$  表示  $y_i$  中排在  $x_k$  前面的元素个数, 如有  $m$  种排序, 则  $B_i(x_k) = \sum B_i(x_k)$  称为  $x$  的 Borda 数。如若各意见重要性不同, 可以赋予权重, 再求 Borda 数  $B(x) = \sum w_i B_i(x_k)$  (其中,  $\sum w_i = 1$ ), 则  $X$  中元素按 Borda 数的大小得到一个新的排序, 既最优线性序, 由此分成污染级别。

根据以上原则, 取  $X = \{Cd, Pb, Hg, As, Cu, Cr, Zn\}$ , 而意见集  $Y$  为每种元素对应的评价标准, 评价标准依据国家环境保护局科技标准司提出的

土壤环境质量标准<sup>[12]</sup>。再根据前述建立判断矩阵的方法,确定了这 7 种重金属元素的权重为:  $W = \{0.24, 0.18, 0.1, 0.07, 0.09, 0.12, 0.2\}$ 。将土壤重金属质量分为清洁、尚清洁、轻污染、中污染和重污染 5 个级别。

根据上述评价方法对北京市及其近郊区的土壤重金属综合质量进行了评价(图 3),从评价结果发现,四环内及北五环以外地区为轻污染,南苑镇—天安门—北海—玉渊潭—靛厂村—大石桥出现带状的中污染区域,在北辛村和清河营南分别出现两块中污染区域,其他地方未出现污染。总体来看,北京市北部土壤重金属总体污染情况要比南部大。经过实地考察,由于北京市北部发展比南部快,工业区和各类科技园区较多,居民区比较集中,人为干扰大,因此,北京城区及北郊区的土壤重金属污染主要来自工业点源污染、公路线源污染和人口密集区面源污染。

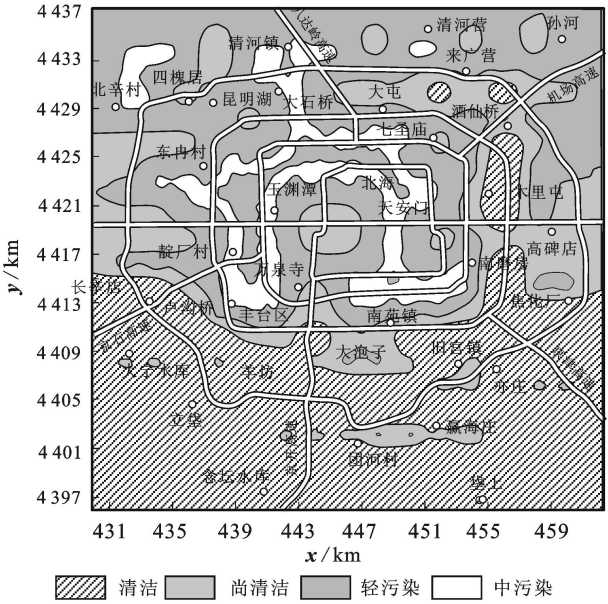


图 3 北京市土壤重金属污染评价结果

Fig. 3 Assessment Result of Heavy Pollution in Beijing Soil

2.3 有机物污染来源分析

土壤中多环芳烃(PAHs)污染来源主要可以分为石油因素和燃煤因素,根据土壤环境学家的研究,总结出判断污染来源为石油的评价模型是:  $[\rho(\text{Ph}/\text{An}) > 15 \text{ and } \rho(\text{Flu}/\text{pyr}) < 1]$ 。根据前面所述方法,先将菲、蒽、荧蒽和芘通过 Kriging 方法按照相同大小的网格分别插值生成 4 个栅格图层,然后利用美国 ESRI 公司的 GIS 软件 ArcView 中的空间分析模块编程进行栅格计算,得出了北

京城区及近郊区土壤中 PAHs 来自燃烧石油因素的污染(图 4a)。分析结果发现,北京市土壤中由燃油因素造成的 PAHs 污染区域主要集中在主要交通干道上,如北四环沿线、西四环东冉村附近和京开高速与南五环相交处等地带,都为交通密度较大的地段。通过类似方法,根据有机物污染来源为燃煤的模型,评价得出北京市土壤中 PAHs 来自燃煤因素的污染分布(图 4b),燃煤造成的土

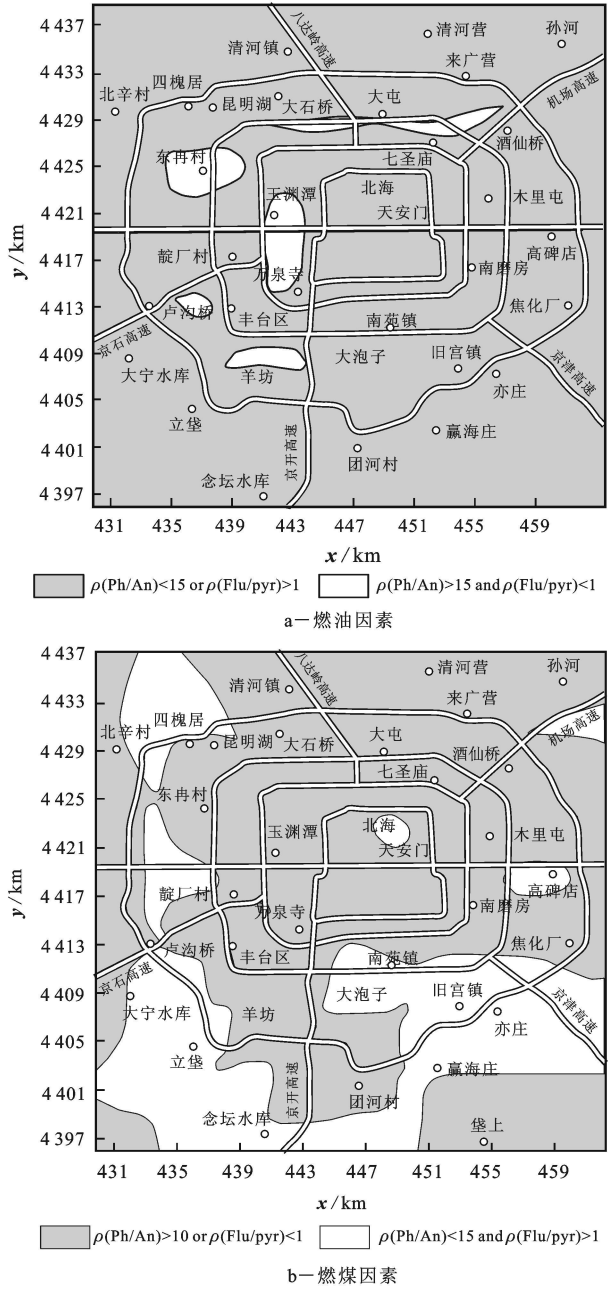


图 4 北京土壤中 PAHs 污染来源分析结果

Fig. 4 Analyse Result of PAHs Pollution Origin in Beijing Soil

壤中 PAHs 污染主要分布在研究区南部和西部, 在高碑店、北海和机场高速附近局部地区也由燃煤造成。在北京市西部和南部 PAHs 污染来源也主要由燃煤因素造成, 而在团和村、北四环、东冉村和玉渊潭到万泉寺之间 PAHs 污染来源主要由燃油因素造成。

3 结语

- (1) GIS 是资源环境综合评价的有效手段, 采用 GIS 手段进行环境质量调查和评价, 改变了以往花费大量人力和物力为代价获取环境背景数据的传统做法, 具有数据获取相对容易、信息丰富、分析快速的优点。
- (2) 采用栅格作为评价单元, 利用空间分析方法对城市土壤环境进行评价是一种快速高效的方法, 在可视化环境下, 不但可以对土壤污染现状进行快速准确评价, 还可以对污染来源进行识别, 而且降低了传统评价方法中的主观性, 为城市土壤环境的治理提供科学准确的依据。
- (3) 结合土壤学家提出的其他土壤污染评价模型, 空间分析还能实现更多的评价方法并将会在土壤污染评价分析中发挥更大的作用。

参考文献:

[ 1 ] 赵其国. 90 年代的土壤科学[ J ]. 土壤通报, 1992, 23( 1 ): 4 8.

[ 2 ] 蒋海燕, 刘 敏, 黄沈发, 等. 城市土壤污染研究现状与趋势[ J ]. 安全与环境学报, 2004, 4( 5 ): 72 77.

[ 3 ] 王瑞萍. GIS 空间分析技术应用研究[ J ]. 油气田地面工程, 2003, 22( 6 ): 14 12.

[ 4 ] 赵鹏祥, 郝红科. GIS 空间分析在退耕还林中的应用研究[ J ]. 水土保持通报, 2005, 25( 5 ): 44 49.

[ 5 ] 刘少军, 何政伟, 黄润秋, 等. 区域开发环境评价中人工智能扩展 GIS 在累积过程分析中的应用[ J ]. 地球科学与环境学报, 2005, 27( 1 ): 76 79.

[ 6 ] Catherine Thums, Margaret Farrago. Investigating Urban Geochemistry Using Geographical Information Systems[ J ]. Science Progress, 2001, 84( 3 ): 183 204.

[ 7 ] 颜卫忠. 环境预警指标体系研究[ J ]. 长沙电力学院学报, 2002, 17( 3 ): 87 90.

[ 8 ] 杨胜科, 王文科, 张 威, 等. 砷污染生态效应及水土体系中砷的治理对策研究[ J ]. 地球科学与环境学报, 2004, 26( 3 ): 69 73.

[ 9 ] 李亚兰, 陈志新, 王佳运. 多级模糊模式识别模型在地质环境质量评价中的应用[ J ]. 地球科学与环境学报, 2004, 26( 4 ): 89 93.

[ 10 ] 马农乐, 赵中极. 基于层次分析法及其改进对确定权重系数的分析[ J ]. 水利科技与经济, 2006, 12( 11 ): 732 736.

[ 11 ] 刘树枫, 袁海林. 环境预警系统的层次分析模型[ J ]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2001, 29( 5 ): 132 135.

[ 12 ] GB15618 1995, 土壤环境质量标准[ S ].

( 上接第 311 页 )

参考文献:

[ 1 ] 章家恩. 灾害生态学——生态学的一个重要发展方向[ J ]. 地球科学进展, 2002, 17( 3 ): 452 456.

[ 2 ] 殷跃平, 康宏达, 陈 波. 三峡工程移民迁建区灾害地质体改造与利用研究[ J ]. 工程地质学报, 2000, 8( 1 ): 73 80.

[ 3 ] 叶正伟. 长江新滩滑坡的历史分析、趋势预测与启示[ J ]. 灾害学, 2000, 15( 3 ): 30 34.

[ 4 ] 汪 洋, 殷坤龙. 新滩滑坡稳定性的有限元分析[ J ]. 安全与环境工程, 2002, 9( 1 ): 1 4.

[ 5 ] 胡高社, 门玉明, 刘玉海, 等. 新滩滑坡预报判据研究[ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7( 增刊 ): 67 72.

[ 6 ] 况仁杰, 曹新菊, 赵 城. 新滩滑坡后两岸边坡的位移监测及变形趋势[ J ]. 地壳变形与地震, 1992, 13( 2 ): 40 47.

[ 7 ] 王尚庆. 回顾新滩滑坡预报[ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7( 增刊 ): 11 26.

[ 8 ] 夏元友, 朱瑞赓. 新滩滑坡滑动机理及稳定性评价研究[ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7( 3 ): 49 54.

[ 9 ] 湖北省秭归县国土资源局. 屈原新滩土地复垦整理项目可行性论证报告[ R ]. 湖北秭归: 秭归县国土资源局, 2002.