

# 高风险重金属污染土壤识别研究方法综述<sup>①</sup>

史文娇<sup>1</sup>, 岳天祥<sup>1</sup>, 石晓丽<sup>2,3</sup>, 宋伟<sup>1</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050016;

3 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050016)

**摘要:** 高风险的重金属污染土壤的识别和探测是土壤健康风险评价及管理的基础, 也是有效控制土壤污染、保障环境安全和农业可持续发展的重要前提。本文综述了高风险重金属污染土壤识别的方法及各自优缺点, 主要包括元素剖面分布对比、与环境标准和背景值对比、同位素示踪、探索性统计分析、GIS 制图和空间分析、多元统计分析、地统计学、空间统计分析和高精度曲面建模方法。将高精度曲面建模 (HASM) 与 GIS 空间分析、多元统计分析以及空间统计分析相结合, 不仅可为土壤和土地资源普查和污染调查提供方法和理论上的借鉴, 而且还可直接为土壤污染现状评价和风险管理、区域环境质量改善和土地利用规划等提供科学依据, 是未来高风险重金属污染土壤识别研究的重要方向之一。

**关键词:** 土壤重金属污染; 污染识别; GIS; 高精度曲面建模; 空间统计

**中图分类号:** X53

土壤是地球上各种人为和自然污染物的汇<sup>[1]</sup>, 同时也是地表水、地下水、生命有机体、沉积物和海洋的污染源<sup>[2]</sup>。由于土壤的空间异质性, 识别土壤重金属空间格局和污染热点是一个很大的挑战。了解区域是否存在污染热点的土壤, 热点污染土壤在统计上是否显著, 对区域环境管理来说至关重要<sup>[3]</sup>。因此, 高风险污染土壤的探测问题已成为环境和土壤学工作者研究的热点。

长期高强度的工业化活动、农业施肥量的快速增加等均使土壤污染逐渐成为除大气污染以外的主要环境危害之一。土壤重金属污染具有污染物的多源性、隐蔽性、一定程度上的长距离传输性和污染后果的严重性等特点<sup>[4]</sup>, 已对土地资源安全再利用和社会经济可持续发展构成威胁。因此, 高风险的重金属污染土壤的识别和探测是土壤健康风险评价及风险管理的基础, 也是有效地控制土壤污染、保障环境安全和农业可持续发展的重要前提<sup>[5]</sup>。高风险重金属污染土壤识别研究可以有效地为土壤质量控制和环境监控提供依据, 更好地为环境管理提供科学支撑, 对土壤环境质量和农产品质量安全具有重要意义。

## 1 对比方法

### 1.1 元素剖面分布对比

在土壤剖面中, 外源重金属大都富集在土壤表层而较难向下迁移。利用浅、深两层土壤元素含量关系, 可以为土壤元素异常成因判别提供重要的证据<sup>[6]</sup>。王祖伟等<sup>[7]</sup>利用土壤 A 层和 C 层中微量元素的比值来消除土壤质地的影响, 从而讨论人为活动对土壤污染的影响。Blaser 等<sup>[8]</sup>按土壤发生层次采集了瑞士森林的不同土壤, 通过计算元素的富集指数识别土壤表层元素含量的异常是人为污染还是自然来源, 并指出由于考虑了土壤元素含量的剖面分布和自然变异, 因而应用元素富集指数要优于仅仅通过表层元素是否超过最大允许浓度来判断土壤是否污染的方法。

### 1.2 与环境标准和背景值对比

将土壤样点重金属含量的实测值与该地区土壤重金属含量的背景值或国家环境质量标准相对比, 应用单因子指数法<sup>[9]</sup>、内梅罗指数法<sup>[10]</sup>、超标率和显著性检验<sup>[11-17]</sup>等对土壤重金属污染程度进行分析, 可以识别土壤样点重金属含量或区域土壤重金属的污染程度。另外, 也有很多研究根据各类土壤环境标准, 如

①基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41001057)、国家杰出青年科学基金项目 (40825003) 和地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金项目 (2011-KF-06) 资助。

作者简介: 史文娇 (1982—), 女, 辽宁葫芦岛人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤肥力和土壤质量的空间分析、全球变化与区域农业研究。E-mail: shiwj@lreis.ac.cn

欧盟“土壤环境质量建议标准”<sup>[18]</sup>、土壤环境质量标准<sup>[10, 12]</sup>、农业土壤环境质量标准<sup>[19]</sup>等对土壤重金属含量及其污染程度进行评价。

## 2 地球化学方法

同位素示踪研究是地球化学领域经典的研究方法。地球化学领域根据稳定同位素的分馏原理,常用各种元素的同位素成分来区分各种地质体的物质来源。其中 Pb 同位素的研究较多,它在环境检测中的应用始于 20 世纪 60 年代,20 世纪 90 年代以来被广泛用于环境样品,以监测和示踪 Pb 的来源变化<sup>[20]</sup>。在国外这种方法多被应用于土壤地球化学领域污染物的来源研究,并能对自然来源和人为污染进行有效区分<sup>[21-22]</sup>。

## 3 统计分析方法

### 3.1 探索性统计分析

利用描述性统计分析、直方图、Q-Q 图、数据变换、异常值探测、累积概率分布图(CDF 图)等进行土壤重金属元素含量的探索性统计分析,可以对具有高值重金属含量的土壤样点进行识别<sup>[23]</sup>。描述性统计分析用来分析土壤环境元素的基本特征,包括最小值、中值、最大值、5%、10%、25%、75%、90%、95%、变异系数、平均值、标准差和绝对中位差、偏度、峰度等;直方图和 Q-Q 图用来检验数据是否符合正态分布;将数据进行对数变换或 Box-Cox 变换等,将原始数据和变换的数据作 Q-Q 图,通过图上的离群值对异常值进行探测<sup>[24]</sup>。对于高异常值,在原始数据和对数变换数据的 Q-Q 图上的离群值的点均被看作是异常值;低异常值仅是在对数变换数据的 Q-Q 图上的离群值的点<sup>[24]</sup>。CDF 图的优点是能够看到每个单独的点,数据的范围清晰可见,距离大部分数据较远的点便作为异常值可被探测出来,在图上可以直接数出异常值的个数,并可观察到异常值与其他点的距离;另外,它还可直接用来探测不同来源的数据<sup>[25-26]</sup>。

### 3.2 地理信息系统(GIS)制图和空间分析

GIS 制图方法可以被应用于通过空间格局的可视化来判断高风险重金属污染的土壤<sup>[3]</sup>,结果通过 GIS 可视化,对区域污染物来源分析具有指示和检验作用<sup>[27]</sup>。如 Imperato 等<sup>[28]</sup>对意大利那不勒斯市土壤 Cu、Cr、Pb 和 Zn 的空间分布研究表明,重金属含量高的样点主要分布于重工业和石油精炼厂周围,Cu 则在铁路和电轨线附近区域有明显积累。国内大量的调查资料也表明,某些重金属类污染元素异常与城镇、工业

和农业区等在空间分布上往往具有很好的对应性,通过 GIS 的空间分析和成图,可以初步判定高风险重金属污染物的分布<sup>[29]</sup>。

### 3.3 多元统计分析

运用多元分析方法研究元素的组合特征及分布规律,有助于高风险重金属污染土壤的识别,并有助于区分人为和自然污染<sup>[30-31]</sup>。主成分分析(PCA)和聚类分析(CA)经常用作研究变量内部信息的统计工具<sup>[32]</sup>。PCA 及其一些派生的方法已被广泛应用在地球化学应用的识别污染物来源和区分自然和人为的贡献中,这些方法在土壤<sup>[33-34]</sup>、沉积物<sup>[35-36]</sup>和水<sup>[37]</sup>方面的应用都有报道。CA 经常与 PCA 连用来检查土壤<sup>[2]</sup>和沉积物<sup>[38-40]</sup>中重金属的聚类结果、并可帮助单个参数和变量的分组。

### 3.4 地统计学

传统的统计分析,其结果反映离散分布状况,不能建立区域性的连续整体的概念,不能反映各指标含量的结构性和随机性、相关性和独立性。基于半方差函数的地统计学能够给出有限区域内区域化变量的线性无偏最优估计,运用克里格插值法对土壤重金属元素进行研究,更有助于了解研究区内的土壤重金属元素含量状况<sup>[29]</sup>。郑袁明等<sup>[41-42]</sup>通过地统计学方法分析了北京市土壤中 Cr、Ni 的空间结构与分布特征,并探索其主要成因,为全面了解北京市的土壤环境质量和开展大规模的土壤环境质量评价研究等提供方法学借鉴和参考。

### 3.5 空间统计分析

已有研究提出了很多空间统计分析的指数用来研究污染热点或空间聚集的识别,如 Getis's G 指数<sup>[43]</sup>、空间扫描统计<sup>[44]</sup>和 Tango's C 指数<sup>[45-46]</sup>等,其中 Moran's I 指数似乎是使用最多的<sup>[47-48]</sup>。全局 Moran's I<sup>[49-50]</sup>是一个量测空间自相关的全局性的参数,局部 Moran's I 指数可以检查单独位置,在对比周围样点的基础上识别污染热点的一种方法<sup>[3]</sup>。

## 4 存在问题及发展趋势

由于土壤重金属分布的空间异质性以及它们之间的相互关系,高风险重金属污染土壤的识别一直是环境科学中的热点和难点。尽管前人已对土壤和农产品的重金属污染做了大量的研究,但大多数研究均忽视了高风险污染土壤的探测问题,而这正是土壤修复和环境整治的基础。如何有效识别高风险重金属污染的土壤,至今仍不清楚。在高风险污染土壤探测的研究中,有两个方面很重要:①是否存在高风险;②高风

险在统计上是否显著。因此，识别土壤是否受到污染首先要相对高的浓度；其次自然起源的元素需具有不同的多元变量关系；最后，土壤重金属的空间分布特点需要与污染源有关。目前，高风险重金属污染土壤的各种识别方法均存在各自的优缺点。

#### 4.1 存在问题

**4.1.1 对比方法** 应用元素剖面对比分析进行高风险污染土壤的识别有许多不确定因素。这是因为多种因素可导致污染，而元素剖面对比分析并不能提供必要的污染源信息，比如一些自然因素也会导致一些元素的表层富集；另外，采集不同地区土壤剖面既费时又费力。

与环境标准和背景值进行对比存在一定的局限性。由于土壤重金属污染的复杂性，制定土壤环境质量标准应以当地的土壤重金属背景值作为依据<sup>[41]</sup>。但目前常用的一些土壤环境质量标准并未对不同地区的实际情况加以区别对待，导致土壤重金属背景值较高的地区探测出“污染”，使得实际上已有污染的背景值较低的地区却认为是“清洁”土壤<sup>[41]</sup>。另一方面，虽然同一个地区具有相同的土壤重金属背景值，由于土壤重金属的空间异质性，采用统一的土壤背景值标准进行污染程度评价显然也不合适。

**4.1.2 地球化学方法** 同位素分析法既要采集多种环境样品，又受到测定仪器条件的限制；另外，这种方法仅对少数土壤重金属元素应用较多，并且比较耗费物力和财力，使得这种方法不适合大面积推广和使用。

**4.1.3 统计分析方法** 探索性统计分析虽然可以直接对土壤重金属含量的高值进行检测，但在识别高风险重金属污染土壤方面具有一些显而易见的缺点。一方面，它不能描述污染的空间分布格局和污染区的边界，缺乏直观的土壤重金属高值分布的空间展示，使宏观、整体的高值区的空间分布特点未知；另一方面，单纯的土壤重金属高值的识别并不是判断是否为高风险重金属污染土壤的充分条件，这是由于土壤重金属的背景值或本底值不同，使得每一个空间样点的污染定义也不同，因此，仅凭探索性统计分析对高风险重金属污染土壤的识别是片面的。

GIS 空间分析方法多只是简单地把工厂、土壤类型图、土地利用类型图、成土母质分布图、地质图、道路分布图等专题图件与重金属含量插值分布图对比，定性对比较多，定量的分析与统计较少；另外，GIS 制图技术可以帮助从可视化的角度而非统计上识别热点。

多元统计分析识别污染源需采集足够多的样品并测定较多的项目，而只针对少数几种土壤重金属的研究不能实现地统计学定性分析结果和多元统计方法定量结果的相互校验<sup>[5]</sup>。

地统计学多用于污染程度相对较低的区域，母质对土壤重金属的贡献大于或接近于外界污染源的贡献；而高风险重金属污染土壤的污染状况、污染源分布等条件具有特殊性，可能导致土壤重金属空间变异特征呈现出不同于污染程度较低的土壤的研究规律，如果采样密度不足，会导致样点间的变异函数值的随机成分增加，小尺度结构特征被掩盖<sup>[5]</sup>。

局部 Moran's I 指数对污染热点土壤探测及区分热点类型（空间聚类和空间异常）来说是一个有用的工具<sup>[3]</sup>，但其结果会受权重因素定义、数据转换和异常值存在的影响<sup>[3]</sup>。

#### 4.2 发展趋势

根据高风险重金属污染土壤的特点，在总结已有方法优缺点的基础上，可将高风险重金属污染土壤识别的难度归纳为两点：①高精度的土壤重金属插值是准确判别区域土壤重金属污染程度和范围的基础；②污染原因的识别对于分析土壤重金属污染的空间分布、迁移和转化具有重要意义。

随着高精度曲面建模（high accuracy surface modeling, HASM）方法的不断完善，土壤属性的高精度曲面建模方法从精度<sup>[51-54]</sup>、速度<sup>[55-58]</sup>、尺度<sup>[59-60]</sup>各个方面得到了长足发展<sup>[61]</sup>。例如，在精度方面，Shi 等<sup>[53]</sup>将 HASM 方法应用在土壤 pH 的插值中，获得了比传统土壤属性插值方法（Kriging、IDW、Spline）更高的精度；在此基础上，Shi 等<sup>[54]</sup>又提出了结合土地利用类型作为辅助信息的改进的 HASM 模型（HASM\_LU），该方法不仅提高了土壤属性的插值精度，而且提供了更多的细节信息和更准确的空间结构信息。在速度方面，基于多重网格（MG）解法的 HASM 方法（HASM-MG），在保证精度的基础上，同时也提高了土壤属性插值的运算速度<sup>[58]</sup>。在尺度方面，李启权等<sup>[59-60]</sup>应用 HASM 模拟了中国全国范围内土壤表层有机质和全氮的空间分布，得到了较为合理的插值图。将高精度曲面建模与 GIS 空间分析、多元统计分析以及空间统计分析相结合是今后高风险重金属污染土壤识别方法的研究方向之一<sup>[61]</sup>，它可以直接服务于污染土壤的诊断、管理、修复和无公害农业发展，对推动区域环境质量改善和流域污染控制等环境保护的理论和科技进步将起到重要推动作用。一方面可以为土壤和土地资源普查和污染调查提供方法和理论上的借

鉴, 另一方面也可直接为土壤污染现状评价和风险管理、区域环境质量改善、土地利用规划、农业和城市发展等提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] Wang X. Application of multivariate spatial analysis in scale-based distribution and source study of PAHs in the topsoil: An example from Tianjin, China. *Environmental Geology*, 2006, 49(8):1 208-1 216
- [2] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 313-324
- [3] Zhang CS, Luo L, Xu WL, Ledwith V. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland. *Science of the Total Environment*, 2008, 398(1/3): 212-221
- [4] 陈煌, 郑袁明, 陈同斌. 面向应用的土壤重金属信息系统 (SHMIS)——以北京市为例. *地理研究*, 2003, 22(3): 272-280
- [5] 张长波, 李志博, 姚春霞, 尹雪斌, 吴龙华, 宋静, 滕应, 骆永明. 污染场地土壤重金属含量的空间变异特征及其污染源识别指示意义. *土壤*, 2006, 38(5): 525-533
- [6] 周国华, 刘占元. 区域土壤环境地球化学研究——异常成因判别·环境质量·污染程度评价的思路与方法. *物探与化探*, 2003, 27(3): 223-226
- [7] 王祖伟, 徐利淼, 张文具. 土壤微量元素与人类活动强度的对应关系. *土壤通报*, 2002, 33(4): 303-305
- [8] Blaser P, Zimmermann S, Luster J, Shotyk W. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils. *The Science of the Total Environmental Geochemistry and Health*, 2000, 249(1/3): 257-280
- [9] 史文娇, 汪景宽, 边振兴, 王秋兵. 黑龙江北部土壤中主要重金属和微量元素状况及其评价. *土壤通报*, 2005, 36(6): 880-883
- [10] 朱程, 马陶武, 周科, 刘佳, 彭巾英, 任博. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险. *生态学报*, 2010, 30(15): 3 982-3 993
- [11] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 黄泽春, 罗金发, 刘洪禄, 吴文勇, 陈玉成. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1 175-1 181
- [12] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 郑国砥, 黄泽春. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 64-72
- [13] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 郑国砥, 罗金发. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累. *地理学报*, 2005, 60(5): 791-797
- [14] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 陈煌, 罗金发, 吴泓涛, 周建利. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响——以北京市为例. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 690-696
- [15] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 黄泽春, 罗金发. 北京市不同土地利用方式下土壤铬和镍的积累. *资源科学*, 2005, 27(6): 162-166
- [16] 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 黄泽春, 郑国砥, 罗金发. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征. *地理研究*, 2005, 24(4): 542-548
- [17] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 郑国砥, 吴泓涛, 周建利. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征. *地理研究*, 2005, 24(2): 229-235
- [18] 郑袁明, 余轲, 吴泓涛, 黄泽春, 陈煌, 吴晓, 田勤政, 范克科, 陈同斌. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价. *地理研究*, 2002, 21(4): 418-424
- [19] 翟丽梅, 廖晓勇, 阎秀兰, 陈同斌, 刘宏斌. 广西西江流域农业土壤镉的空间分布与环境风险. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 661-667
- [20] 路远发, 杨红梅, 周国华, 马丽艳, 梅玉萍, 陈希清. 杭州市土壤铅污染的铅同位素示踪研究. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 355-362
- [21] Wong S, Li X, Zhang G, Qi S, Min Y. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, 2002, 119: 33-44
- [22] 杨元根, 刘丛强, 张国平, 吴攀, 朱维晃. 土壤和沉积物中重金属积累及其 Pb、S 同位素示踪. *地球与环境*, 2004, 32(1): 76-81
- [23] 史文娇. 基于高精度曲面建模的土壤环境元素空间信息分析——以南方红壤丘陵区为例 (博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院, 2009
- [24] Zhang C, Fay D, McGrath D, Grennan E, Carton OT. Statistical analyses of geochemical variables in soils of Ireland. *Geoderma*, 2008, 146(1/2): 378-390
- [25] Reimann C, Filzmoser P. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: Death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 2000, 39(9): 1 001-1 014
- [26] Reimann C, Filzmoser P, Garrett RG. Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 2005, 346(1/3): 1-16
- [27] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 王茹, 徐艳. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征. *环境科学学报*, 2004, 24(3): 463-468

- [28] Imperato M, Adamo P, Naimo D, Arienzo M, Stanzione D, Violante P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples City (Italy). *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 247-256
- [29] 史文娇, 魏丹, 汪景宽, 迟凤琴, 李双异. 双城市土壤重金属空间分异及影响因子分析. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 59-64
- [30] 廖晓勇, 陈同斌, 武斌, 阎秀兰, 聂灿军, 谢华, 翟丽梅, 肖细元. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例. *地理研究*, 2006, 25(5): 843-852
- [31] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 黄泽春, 罗金发, 刘洪禄, 吴文勇, 陈玉成. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1175-1181
- [32] Zheng YM, Chen TB, He JZ. Multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils from Beijing, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(1): 51-58
- [33] Ratha DS, Sahu BK. Source and distribution of metals in urban soils of Bombay, India, using multivariate statistical techniques. *Environmental Geology*, 1993, 22(3): 276-285
- [34] Garcia R, Maiz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis of road soils and grasses from Gipuzkoa (Spain). *Environmental Technology*, 1996, 17(7): 763-770
- [35] Tuncer G, Tuncel S, Tuncel G, Balkas T. Metal pollution in the Golden Horn, Turkey - Contribution of natural and anthropogenic components since 1913. *Water Science and Technology*, 1993, 28(8/9): 59-64
- [36] Fernandez HM, Conti LFC, Patchineelam SR. An assessment of the pollution of heavy metals in the Jacarepagua Basin, Rio de Janeiro, Brazil - A statistical approach. *Environmental Technology*, 1994, 15(1): 87-94
- [37] Cave M, Reeder S. Reconstruction of in-situ compositions obtained by aqueous leaching of drill core: An evaluation using multivariate statistical deconvolution. *The Analyst*, 1995, 120: 1341-1351
- [38] Huang W, Campredon R, Abrao J, Bernat M, Latouche C. Variation of heavy metals in recent sediments from Piratininga Lagoon (Brazil): Interpretation of geochemical data with the aid of multivariate analysis. *Environmental Geology*, 1994, 23(4): 241-247
- [39] Kalogeropoulos N, Karayannis M, Vassilaki-Grimani M, Grimanis A. Application of trace elements determination and multivariate statistics to a pollution study of Lake Pamvotis, N. W. Greece. *Fresenius Environmental Bulletin*, 1994, 3(3): 187-192
- [40] Ruiz F, González-Regalado ML, Borrego J, Morales JA, Pendón JG, Muñoz JM. Stratigraphic sequence, elemental concentrations and heavy metal pollution in Holocene sediments from the Tinto-Odiel Estuary, southwestern Spain. *Environmental Geology*, 1998, 34(4): 270-278
- [41] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 吴泓涛, 周建利, 罗金发, 黄泽春. 北京市近郊区土壤镍的空间结构及分布特征. *地理学报*, 2003, 58(3): 470-476
- [42] 郑袁明, 陈煌, 陈同斌, 郑国砥, 吴泓涛, 周建利. 北京市土壤中 Cr、Ni 含量的空间结构与分布特征. *第四纪研究*, 2003, 23(4): 436-445
- [43] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24: 189-206
- [44] Ishioka F, Kurihara K, Suito H, Horikawa Y, Ono Y. Detection of hotspots for three-dimensional spatial data and its application to environmental pollution data. *Journal of Environmental Science for Sustainable Society*, 2007, 1: 15-24
- [45] Tango T. A class of test for detecting 'general' and 'focused' clustering of rare diseases. *Statistics in Medicine*, 1995, 14(21/22): 2323-2334
- [46] Zhang T, Lin G. A supplemental indicator of high-value or low-value spatial clustering. *Geographical Analysis*, 2006, 38(2): 209-225
- [47] Anselin L. Local indicators of spatial association-lisa. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115
- [48] Getis A, Ord J. Local spatial statistics: An overview//Lorgley PA, Batty M. *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*, USA: Wiley, 1997
- [49] Cliff AD, Ord J. *Spatial Processes: Models & Applications*. London: Taylor & Francis, 1981
- [50] Zhang C, Selinus O, Schedin J. Statistical analyses for heavy metal contents in till and root samples in an area of southeastern Sweden. *The Science of The Total Environment*, 1998, 212(2/3): 217-232
- [51] Yue TX, Du ZP, Song DJ, Gong Y. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology*, 2007, 91(1/2): 161-172
- [52] Yue TX, Du ZP, Song DJ, Gong Y. High-accuracy surface modelling and its application to DEM generation. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(8): 2205-2226
- [53] Shi WJ, Liu JY, Du ZP, Song YJ, Chen CF, Yue TX. Surface modelling of soil pH. *Geoderma*, 2009, 150(1/2): 113-119
- [54] Shi WJ, Liu JY, Du ZP, Stein A, Yue TX. Surface modelling of soil properties based on land use information. *Geoderma*, 2011, 162(3/4): 347-357
- [55] Yue TX, Du ZP, Song YJ. Ecological models: Spatial models

- and geographic information systems // Jørgensen SE, Fath BD. Encyclopedia of Ecology. England: Elsevier, 2008: 3 315-3 325
- [56] Yue TX, Song YJ. The YUE-HASM method // Li D, Ge Y, Foody GM. Proceeding of the 8th international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences Shanghai, June 25-27, 2008. Liverpool: World Academic Union Ltd., 2008: 148-153
- [57] 范泽孟, 岳天祥, 宋印军. 基于 YUE-HASM 方法的气温与降水时空变化趋势. 地理研究, 2009, 28(3): 643-652
- [58] 史文娇, 杜正平, 宋印军, 岳天祥. 基于多重网格求解的土壤属性高精度曲面建模研究. 地理研究, 2011, 30(5): 941-950
- [59] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 杜正平. 中国表层土壤有机质空间分布模拟分析方法研究. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1 385-1 399
- [60] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 杜正平, 陈传法, 卢毅敏. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析. 地理研究, 2010, 29(11): 1 981-1 992
- [61] Yue TX. Surface Modelling: High Accuracy and High Speed Methods. New York: CRC Press, 2011
- [62] Zhang CS. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. Environmental Pollution, 2006, 142(3): 501-511

## Identification Methods of Soil Pollution for High Risk Heavy Metals: A Review

SHI Wen-jiao<sup>1</sup>, YUE Tian-xiang<sup>1</sup>, SHI Xiao-li<sup>2,3</sup>, SONG Wei<sup>1</sup>

*(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

*2 College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China;*

*3 Key Laboratory of Environmental Evolvement and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050016, China)*

**Abstract:** The identification and detection for soil heavy metal pollution with high risk is the foundation of risk evaluation and management for soil health, and it is also the important premise of soil pollution control, environmental security insurance and agricultural sustainable agricultural development. This paper reviewed the methods of identification and detection for soil heavy metal pollution with high risk and introduced their advantages and disadvantages. The methods included exploratory statistical analysis, element distribution comparison in soil profile, comparison with environmental criterion or background of soil heavy metals, isotopic tracer, GIS and spatial analysis, multiple statistical analysis, geostatistics and spatial statistical analysis. Combining high accuracy surface modeling with spatial analysis in GIS, multiple statistical analysis and spatial statistical analysis, can not only be helpful for providing the methods for soil and land resource investigation, but also be for supporting soil pollution evaluation, risk management, regional environment quality improving, land use plan, and agriculture and urban development.

**Key words:** Soil heavy metal pollution, Pollution identification, GIS, HASM, Spatial statistics