

# 环境土壤 **重金属** 分布特征与运移规律

王圣伟 李志敏 编著



科学出版社

# 环境土壤重金属分布特征 与运移规律

王圣伟 李志敏 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书介绍了环境土壤重金属信息时空分布特征,可解析农产品产地环境污染分布状况,有助于实现农产品的安全生产与质量控制。通过对环境土壤重金属时空分布进行合理、准确的评估分析与预测,为土壤科学管理决策及农产品安全生产提供技术支撑。空间变异分析、时间变化分析、面源负荷估算、生态健康评价等技术是研究环境土壤重金属时空分布特征的有效技术手段。本书选择黄河三角洲及甘肃省临夏回族自治州的大夏河某一区域作为示范区,以该区域土壤环境为分析对象,研究环境土壤重金属的评价方法和预测模型。基于时空信息发布服务技术,构建环境土壤重金属评测信息服务系统平台。本书的主要内容为:①研究环境土壤重金属综合评价模型,提出潜在危害毒性与健康摄入毒性因子相结合的生态健康综合评价方法;②研究环境土壤重金属空间变异规律,提出空间多尺度嵌套采样方法,并以主成分分析和半变异函数来确定重金属来源;③分析环境土壤重金属时间变化趋势,建立季度时间序列中长期预测模型和年度灰度短期预测模型;④研究环境土壤重金属迁移规律和作物吸附规律,提出面源重金属总量控制指标和农田冬小麦作物吸附重金属滞后模型。

本书可供水文资源、生态环境、农业科学、农业水土工程、土壤物理、空间信息等专业的读者研究学习,也可供从事环境土壤中物质迁移研究方面的科研人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

环境土壤重金属分布特征与运移规律/王圣伟,李志敏编著. —北京:科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-060438-5

I. ①环… II. ①王… ②李… III. ①土壤污染-重金属污染  
IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 014101 号

责任编辑:霍志国/责任校对:张小霞

责任印制:吴兆东/封面设计:东方人华

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**北京九州迅驰传媒文化有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 220 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

环境污染物的分布特征与运移规律研究是现代农业信息化研究关注的热点,其中土壤及作物重金属的分布特征研究是重点关注方面。土壤重金属分布特征的核心研究内容体现在土壤重金属数据信息的评价和预测环节,合理、准确的空间分析、综合评价及作物吸附规律研究能为农田耕种管理决策及农产品安全提供技术支撑。农产品产地环境的质量决定着农产品质量的高低。当前我国农业为了应对增产压力和满足现代农业发展要求,在农产品生产过程中大量使用农药化肥及添加剂等材料,造成了农田环境污染及农产品质量的下降,引发了诸多问题。土壤是地球上各种人为污染物和自然污染物的汇集容器,地球中大部分污染物经过不同途径最终会在土壤中长时间滞留造成长期危害。土壤环境直接关系到食品安全、人体健康,甚至是影响社会经济发展和稳定的因素。随着我国城乡城镇化发展和农业发展的集约模式大力推广,处理废弃物品的工作未能及时配套,造成污染物大量进入农田环境系统,并经过汇聚、迁移、渗漏、残留等过程对土壤生态系统造成了难以恢复的污染。污染物包括各种营养盐、重金属、农药等有机污染物和各种有害微生物等,其中以重金属污染表现最为明显,引发了社会各界的广泛关注。土壤重金属具有毒性大、危害周期长、范围广、污染隐蔽、不可生物降解等特点,同时会通过各种途径对农产品、土壤、大气和水体造成较大程度的污染,最终在人体内聚集并危害人体健康。

伴随着计算机技术、遥感技术、地理信息技术和全球定位系统的应用,物质的分布特征与运移规律研究在 20 世纪 80 年代发展起来,已经取得较多研究成果。但是基于环境土壤重金属污染方面的时空分布研究则是随着近几年污染事件的增多才逐渐被人们所重视。已有的研究内容中,重金属空间评价方法分类众多,同时制定的标准不统一,目前还没有一种通用的评价方法适用于环境土壤重金属安全评价。在环境土壤重金属空间变异分析及时间变化分析方面也存在着分析不全面、研究不深入的诸多不足。本书包括环境土壤生态健康风险评估与模型、环境土壤重金属空间变异、时间变化、面源负荷估算及地理信息系统开发等关于环境土壤重金属时空信息分布特征的研究技术。

环境土壤重金属分布特征可解析农产品产地环境污染分布状况,有助于实现农产品的安全生产与质量控制。本书以农田环境土壤重金属为例,通过对农田土壤环境重金属分布特征及运移规律进行合理、准确的评估分析与预测,为农田科学管理决策及农产品安全生产提供技术支撑。空间变异分析、时间变化分析、面

源负荷估算等技术是研究土壤重金属分布特征及运移规律的有效技术手段。本书选择黄河三角洲某一区域作为示范区,以该区域农田土壤环境为分析对象,研究农田土壤重金属的评价方法和预测模型,主要研究内容包括以下几个部分:①环境土壤重金属空间变异分析;②环境土壤重金属时间变化分析;③环境土壤重金属面源负荷估算;④环境土壤重金属生态健康评价;⑤环境土壤重金属污染区域评价;⑥环境土壤重金属作物吸附相关研究;⑦环境土壤重金属空间信息系统。

本书查阅、分析相关研究的文献,拓展研究思路;对研究区域进行土样和环境调查,了解农田区域目前土壤质量和周边附属状况;对综合评价理论和风险评价模型进行研究;对土壤养分和重金属含量进行时间变化分析,掌握土壤环境的规律特性。根据系统建模理论,建立评测信息系统平台。根据风险管理方法,面源污染和健康风险之间存在的问题,对重金属生态风险、健康风险和面源污染等方面进行循环研究,通过反馈调整问题的模型,以求得系统模型最优。

本书由西北师范大学王圣伟副教授主编。李志敏、赵学茂、张畅、张月、王苗、娄天沅、薛飞扬、杨慧英、王欣、冀豪等参加了本书的编写工作。

本书得到了国家自然科学基金(61563047)的资助,在此表示衷心感谢。同时也感谢对本书出版给予帮助的各位老师和学者。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2018年12月

# 目 录

## 前言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 环境土壤重金属空间变异分析 .....     | 1  |
| 1.1 土壤重金属空间变异研究综述 .....       | 1  |
| 1.2 环境土壤重金属空间变异成因分析 .....     | 3  |
| 1.2.1 结构性因子(自然因子) .....       | 4  |
| 1.2.2 随机性因子(人文因子) .....       | 4  |
| 1.3 环境土壤重金属空间变异研究趋势分析 .....   | 6  |
| 1.3.1 环境土壤重金属空间变异研究方法趋势 ..... | 6  |
| 1.3.2 环境土壤重金属空间变异成因分析趋势 ..... | 6  |
| 1.4 空间变异分析技术 .....            | 6  |
| 1.4.1 土壤重金属空间变异与预测 .....      | 7  |
| 1.4.2 理论合理采样数 .....           | 7  |
| 1.4.3 空间自相关法 .....            | 8  |
| 1.4.4 半方差函数及模型 .....          | 8  |
| 1.4.5 分维数 .....               | 11 |
| 1.4.6 主成分分析 .....             | 11 |
| 1.5 多嵌套尺度空间变异研究 .....         | 13 |
| 1.5.1 研究区域与概况 .....           | 13 |
| 1.5.2 样本采集与检验分析 .....         | 13 |
| 1.5.3 数据统计分析方法 .....          | 14 |
| 1.5.4 结果与分析 .....             | 14 |
| 1.6 土壤重金属的分形曲面插值 .....        | 25 |
| 1.6.1 分形曲面插值 .....            | 25 |
| 1.6.2 土壤重金属分形曲面插值比对 .....     | 27 |
| 1.7 本章小结 .....                | 30 |
| 参考文献 .....                    | 31 |
| 第 2 章 环境土壤重金属时间变化分析 .....     | 36 |
| 2.1 时间序列预测模型研究概述 .....        | 36 |
| 2.1.1 基本概念及预测模型框架 .....       | 36 |
| 2.1.2 国内外研究现状 .....           | 37 |

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 2.2   | 土壤重金属时间变化分析与预测  | 39 |
| 2.3   | 灰色 GM(1,1) 模型   | 40 |
| 2.3.1 | 灰色系统            | 40 |
| 2.3.2 | GM(1,1) 模型      | 41 |
| 2.3.3 | 灰色预测土壤重金属应用     | 44 |
| 2.4   | 时间序列 ARIMA 模型预测 | 48 |
| 2.4.1 | 时间序列预测模型        | 48 |
| 2.4.2 | 时间序列趋势分析        | 54 |
| 2.4.3 | 时间序列周期谱分析       | 56 |
| 2.5   | 时间序列土壤重金属建模及应用  | 58 |
| 2.5.1 | 研究区域概况和采样       | 59 |
| 2.5.2 | 土壤重金属趋势分析和周期检验  | 59 |
| 2.5.3 | 土壤重金属时间序列建模     | 64 |
| 2.6   | 本章小结            | 72 |
|       | 参考文献            | 72 |
| 第 3 章 | 环境土壤重金属面源负荷估算   | 76 |
| 3.1   | 面源污染概念和特征       | 76 |
| 3.2   | 面源污染的危害         | 76 |
| 3.3   | 面源污染的来源和分类      | 77 |
| 3.4   | 国内外研究现状         | 78 |
| 3.4.1 | 国外研究进展          | 78 |
| 3.4.2 | 国内研究进展          | 79 |
| 3.5   | 面源污染模型研究        | 79 |
| 3.6   | 土壤面源负荷估算方法      | 80 |
| 3.6.1 | 土壤重金属静态容量       | 80 |
| 3.6.2 | 土壤重金属动态容量       | 80 |
| 3.6.3 | RUSLE 土壤通用流失方程  | 81 |
| 3.6.4 | 输出系数模型          | 81 |
| 3.7   | 面源负荷估算研究和试验结果   | 82 |
| 3.7.1 | BCR 连续分级提取法     | 82 |
| 3.7.2 | 土地利用类型分类        | 83 |
| 3.7.3 | 线性规划确定土壤侵蚀模数    | 87 |
| 3.7.4 | 面源负荷估算结果        | 89 |
| 3.8   | 本章小结            | 92 |
|       | 参考文献            | 92 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第4章 环境土壤重金属生态健康评价 .....        | 94  |
| 4.1 环境土壤重金属的特性 .....           | 94  |
| 4.1.1 环境土壤重金属的危害 .....         | 94  |
| 4.1.2 环境土壤重金属的分布 .....         | 95  |
| 4.2 环境土壤重金属的评价方法 .....         | 96  |
| 4.2.1 单因子指数法 .....             | 97  |
| 4.2.2 内梅罗综合污染指数法 .....         | 97  |
| 4.2.3 地质累积指数法 .....            | 98  |
| 4.2.4 Hakanson 潜在风险指数法 .....   | 98  |
| 4.3 环境重金属生态健康综合评价法 .....       | 99  |
| 4.3.1 评价方法的提出 .....            | 99  |
| 4.3.2 研究区域概况与采样 .....          | 103 |
| 4.3.3 结果与分析 .....              | 105 |
| 4.4 本章小结 .....                 | 111 |
| 参考文献 .....                     | 112 |
| 第5章 环境土壤重金属污染区域评价 .....        | 115 |
| 5.1 环境土壤环境风险评价 .....           | 115 |
| 5.1.1 环境土壤生态风险评价 .....         | 116 |
| 5.1.2 环境土壤健康风险评价 .....         | 116 |
| 5.1.3 综合土壤质量评价 .....           | 117 |
| 5.2 纳污能力和不确定性分析 .....          | 118 |
| 5.2.1 纳污能力 .....               | 118 |
| 5.2.2 河流不确定性分析 .....           | 119 |
| 5.3 纳污能力计算模型 .....             | 120 |
| 5.3.1 纳污能力计算原理 .....           | 120 |
| 5.3.2 纳污计算模型 .....             | 121 |
| 5.3.3 纳污能力计算 .....             | 123 |
| 5.4 盲数理论 .....                 | 124 |
| 5.4.1 盲数定义及运算法则 .....          | 124 |
| 5.4.2 盲数优势 .....               | 127 |
| 5.5 基于盲数理论的河流纳污能力计算模型 .....    | 128 |
| 5.5.1 河流水环境系统纳污盲参数的定义 .....    | 128 |
| 5.5.2 大夏河流域水体重金属纳污能力计算模型 ..... | 129 |
| 5.6 大夏河流域重金属纳污能力 .....         | 129 |
| 5.6.1 河段划分 .....               | 129 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 5.6.2 | 盲信息下大夏河流域水体纳污能力计算模型 .....         | 131 |
| 5.6.3 | 参数盲信息化 .....                      | 132 |
| 5.6.4 | 盲参数运算 .....                       | 134 |
| 5.6.5 | 盲数理论水环境容量计算结果及其分析 .....           | 136 |
| 5.7   | 土壤重金属污染评价 .....                   | 137 |
| 5.7.1 | 地积累指数法评价 .....                    | 137 |
| 5.7.2 | 构建基于大夏河流域土壤重金属纳污能力的模糊综合评价模型 ..... | 140 |
| 5.7.3 | 大夏河流域重金属污染评价 .....                | 143 |
| 5.8   | 本章小结 .....                        | 145 |
|       | 参考文献 .....                        | 146 |
| 第 6 章 | 环境土壤重金属作物吸附相关研究 .....             | 149 |
| 6.1   | 研究背景和意义 .....                     | 149 |
| 6.2   | 环境土壤重金属作物系统污染治理研究现状 .....         | 150 |
| 6.2.1 | 工程措施 .....                        | 150 |
| 6.2.2 | 生物措施 .....                        | 150 |
| 6.2.3 | 化学措施 .....                        | 150 |
| 6.2.4 | 生态措施 .....                        | 151 |
| 6.3   | 环境土壤重金属作物系统中重金属的生物有效性 .....       | 151 |
| 6.3.1 | 环境土壤特性对重金属生物有效性的影响 .....          | 151 |
| 6.3.2 | 有机质对环境土壤中重金属的活化作用 .....           | 151 |
| 6.3.3 | 根际环境对环境土壤重金属生物有效性的影响 .....        | 151 |
| 6.3.4 | 环境土壤重金属交互作用对生物有效性的影响 .....        | 152 |
| 6.3.5 | 植物种类和农业活动对环境土壤重金属生物有效性的影响 .....   | 152 |
| 6.4   | 环境土壤重金属污染评价 .....                 | 152 |
| 6.4.1 | 评价标准的选择 .....                     | 152 |
| 6.4.2 | 环境土壤重金属评价方法 .....                 | 153 |
| 6.5   | 冬小麦生长田间试验 .....                   | 155 |
| 6.5.1 | 分布滞后模型 .....                      | 156 |
| 6.5.2 | 模型的应用实践 .....                     | 158 |
| 6.6   | 本章小结 .....                        | 162 |
|       | 参考文献 .....                        | 163 |
| 第 7 章 | 环境土壤重金属空间信息系统 .....               | 165 |
| 7.1   | 系统平台框架介绍 .....                    | 166 |
| 7.1.1 | Flex 技术框架 .....                   | 167 |

---

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 7.1.2 REST 技术架构 .....     | 167 |
| 7.2 系统设计 .....            | 168 |
| 7.2.1 系统开发环境 .....        | 168 |
| 7.2.2 系统功能设计 .....        | 169 |
| 7.2.3 数据库设计 .....         | 169 |
| 7.3 系统实现 .....            | 170 |
| 7.3.1 生态健康综合评价 .....      | 171 |
| 7.3.2 作物冬小麦适应性评价 .....    | 172 |
| 7.3.3 土壤重金属时间序列预测 .....   | 173 |
| 7.3.4 土壤重金属区域面源负荷估算 ..... | 174 |
| 7.4 本章小结 .....            | 174 |
| 参考文献 .....                | 174 |

# 第1章 环境土壤重金属空间变异分析

研究环境土壤重金属空间变异分布状况是土壤重金属评价和制定土地利用措施的重要基础。合理的采样间隔和准确的元素属性估计值能够提高评价模型的精准性。不同的重金属元素空间分布特征具有差异性。本章运用地统计学技术对示范区棕壤土的农业典型地块进行重金属的多尺度嵌套空间变异和结构来源分析。选取土壤重金属中的5种反映土壤污染水平的典型元素 Pb、Cd、Hg、Cu、Cr 及类重金属元素 As 进行采样检测。利用克里格法插值拟合,选取最优的拟合模型,确定合理的采样间距。研究结合半方差和分维数分析,确定合理的采样尺度。以主成分分析和半方差分析方法相结合,确定土壤重金属来源,进而指导农业管理措施。最后,利用几何分形曲面对区域进行了空间曲面拟合。

## 1.1 土壤重金属空间变异研究综述

土壤并非一个均质体,而是一个时空连续的变异体,具有高度的空间异质性。土壤性质的空间变异包括土壤水分特征及状态参数、物理性质、化学性质、土壤重金属及其他元素等性质的变异。土壤重金属具有一定的空间分布特点,并表现出一定的结构性和随机性,是各种人类活动及气候、地形和母质等因素综合影响的结果。土壤重金属空间变异的研究是对土壤中重金属元素含量的高低变化特征、趋势走向及不同方向差异性等空间结构特征的探讨,它既是土壤化学特性空间变异性的研究内容,又是土壤重金属污染及环境质量评价的重要基础。

早期的土壤特性空间变异性研究始于土壤水分、容重等物理特性的空间变异,逐渐扩展到土壤化学性质及其他性质的空间变异研究,而对土壤重金属的研究主要是背景值调查和污染状况评价。例如,1961年美国地质勘探局在美国大陆本土开展土壤元素背景值调查,1984年发表了《美国大陆土壤及其地表物质中的元素浓度》专项报告;日本于1978~1984年在全国范围内开展了表土和底土元素背景值调查,共测定了As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Mn等8种元素,并提出了元素背景值的表示方法,我国于20世纪70年代中期开展元素背景值调查,至80年代开展了区域土壤和粮食作物重金属元素背景值的调查,并且研究了影响土壤重金属元素背景值的因素(如土壤母质等),土壤背景值的调查研究为重金属污染研究提供了一定意义上的参比标准,同时为土壤环境质量评价奠定了基础。

20世纪80年代后期,国内外学者在研究重金属背景值和污染评价的基础上,

对土壤重金属污染空间变异性的研究逐渐起步,但研究的侧重点和范围有所不同。例如, Arrouays 等地统计学方法研究了短距离土壤重金属,包括铅、铜和铬的空间变异,结果表明如果采样方案不恰当,重金属含量的空间变异可能会掩盖其变化,故在研究中针对研究区域具体情况布设采样方案十分重要; White 等对美国土壤中锌含量的分布进行了半方差分析,发现其空间的自相关距离为 470km,虽然模型的拟合程度不高,但仍可用克里格插值作出美国土壤锌的分布图; Andronikov 等也运用地统计学和半方差函数研究了不同采样方案下的污染土壤中重金属的空间分布状况; Ersoy 等利用地统计学方法研究了土耳其南部亚达纳市受采矿业污染土壤的性质; Imperato 等对意大利那不勒斯市的表层土壤中的重金属铜、锌、镉、铅含量及其形态进行了研究,并利用克里格法绘制了等值线图来描述 Cu、Zn、Cd、Pb 在表层土壤中的空间分布特征。国内的土壤重金属污染空间变异性研究起步相对较晚,直到 90 年代才有一些学者将地统计学的方法应用在不同尺度土壤重金属空间变异性的研究中。王学军和席爽在小区域( $0.38\text{km}^2$ )污灌农田土壤重金属污染的空间分析中,在半方差函数分析的基础上,对比了条件模拟、克里格和趋势面分析方法的优劣;张庆利等利用地统计学和地理信息系统(geographic information system, GIS)相结合的方法,从小尺度区域角度上研究了南京城郊土壤中铅、锌、铜和锡 4 种重金属有效态含量的空间分布特征及其主要影响因子,结果表明将 GIS 的空间分析功能与地统计学相结合用于城郊土壤重金属污染方面的研究,不仅能更好地了解土壤中重金属含量空间分布状况,而且能够更好地揭示其影响因子;陈同斌等利用地统计学方法研究了北京市郊区土壤中镍的空间分布特征,并利用克里格插值绘制了镍的空间分布图。此外,张乃明等在较大尺度范围内利用地统计学方法分析了太原污灌区( $270\text{km}^2$ )农田土壤重金属的空间变异特征,并揭示了其与污染排放的关系;赵永存等采用经典统计学与半方差函数拟合相结合的方法,研究了吉林公主岭土壤中砷、铬和锌含量的空间变异性及分布规律,弥补了经典统计学的不足;张朝生等利用地统计学方法研究了长江水系沉积物中 11 种重金属元素含量的空间分布特征,采用变异函数定量描述空间分布结构特征和克里格法进行最优插值,并制作出含量分布图。

进入 20 世纪 90 年代, GIS、全球定位系统(global positioning system, GPS)的快速发展及地统计学模型集成技术的应用,为研究相对较大尺度上土壤的重金属空间变异性及实现土壤重金属含量从点到面的精确估值提供了理论基础和便捷工具。Korre 等在统计学和地统计学基础上结合 GIS,利用统计学的主成分和主因子分析法研究了希腊 Lavrio 矿区重金属污染状况及污染源分布,结果表明将地统计学方法与 GIS 工具结合起来,能有效地对土壤重金属污染及其来源进行预测与评估;Goovaerts 和 Webster 分析了苏格兰高地不同尺度下土壤表层中重金属元素铜和钴的空间变异、污染程度及主要污染区,确定了土壤和植被的重金属污染与沉

降关系; Amblard-Gross 等研究了 8100km<sup>2</sup> 湿地不同尺寸格网单元 (30km×30km, 10km×10km, 3km×3km) 下微量金属元素 (As、Ba、Cd、Co、Cu 和 Ti 等) 的空间变异性, 并指出 30km×30km 格网是最佳的取样单元; 同期, 国内在重金属空间分异方面的研究也有新的进展, 不再局限于小尺度的研究。Lin 利用地统计学分析方法研究了中国台湾彰化县土壤重金属 (Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn) 空间变异性并绘制空间变异图, 结果表明区域化土壤重金属变化主要依赖于空间尺度的大小。汪景宽等在 GIS 技术的支持下结合地统计学方法研究了黑龙江省海伦县土壤铜、铬、铅、锡、汞、砷含量的空间变异性及分异规律, 为今后更大范围研究重金属空间变异提供参考; 胡克林等研究了北京市大兴区面积为 1039km<sup>2</sup> 的表层土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni、As、Hg 和 Co 相关性, 采用克里格内插法得到了表层土壤重金属含量空间分布图, 发现土壤重金属含量与土壤质地和有机质含量关系密切。

可见, 为了更直观地表示研究区域未采样点土壤的重金属含量值, 一些学者已经把空间插值方法应用到土壤重金属污染分布的研究, 但多数是采用较单一的半方差图和克里格插值。从目前国外研究进展来看, 土壤特性的空间插值方法有多种, 国外一些学者如 Webster、Wollenhaupt、Gotway 等对一些方法的空间插值效果进行对比研究。20 世纪 90 年代以后, 国内的学者也开始采用多种空间插值方法对比研究土壤特性并绘制空间分布图, 但相关研究多以土壤养分特性的空间分布为基础进行多种插值方法的对比研究, 而有关土壤重金属的多种空间插值方面研究报道相对较少, 如胡克林等应用普通克里格法 (ordinary Kriging, OK)、简单克里格法 (simple Kriging, SK)、对数正态克里格法 (logistic normal Kriging, LNK)、泛克里格法 (universal Kriging, UK)、析取克里格法 (disjunctive Kriging, DK) 和距离反比权重法 (inverse distance weighted, IDW) 等 6 种内插方法对非平稳型区域土壤汞含量进行了估值, 综合比较了各种内插方法的预测误差、统计特征值及插值结果分布图, 对比出最好的插值方法。朱求安等在基于 GIS 的空间插值方法研究中指出在运用空间插值方法时, 要得到理想的空间插值效果, 必须针对不同研究区的实际情况, 对实测数据样本点进行充分分析, 反复试验比较, 以选择最佳的方法。

## 1.2 环境土壤重金属空间变异成因分析

环境土壤重金属的分布和含量不仅与环境土壤中重金属本身的属性有关, 还与重金属所处的环境的土壤类型、成土母质、地貌地形等自然因素, 以及交通运输、产业布局、土地利用及人为因素有关。所以, 研究环境土壤重金属的空间变异的因素影响, 可为环境土壤的监测与治理及生态评估提供合理的依据。通常,

可以将环境土壤空间变异的影响因子分为两类，一类是结构性因子(自然因子)，另一类是随机性因子(人为因子)。

### 1.2.1 结构性因子(自然因子)

#### 1. 地形地貌

因为地形地貌与环境土壤中水分传输的关系非常紧密，并且物质能量的转移经常伴随着水分传输，所以环境土壤的地形地貌会影响环境土壤的空间分布状况。例如，通过对黄土高原的小流域在不同地形地貌条件下土壤中微量元素的分布特征进行研究，表明环境土壤的地形地貌在一定程度上影响着 Mg 及部分养分元素的空间变异。通过对重庆市江津吴滩镇做环境土壤养分空间分布研究，分析出环境土壤的养分含量与地形地貌的空间分布有显著的相关性。不同地形地貌下的环境土壤的吸附态微量元素是不相同的。

#### 2. 土壤类型

因为成土过程和利用方式的不同，不同环境土壤的类型也会导致环境土壤重金属的吸附不同。李其林等通过研究三峡库区不同土壤类型对环境土壤重金属元素的吸附存在的差异，表明同库区下的环境土壤类型中重金属含量差异比较明显，Cu、Pb、Cd、Cr 4 种元素的平均含量在黄壤中最高；As 元素平均含量最大的为紫壤，Zn 和 Hg 元素平均含量最大的为水稻土。

#### 3. 成土母质

不同区域之间的环境土壤重金属背景值的含量不同，是由于不同区域成土母质发育程度存在差异。目前在环境土壤重金属空间变异解析当中，涉及成土母质的具体研究报道较少。通常认为环境土壤元素在大尺度上的空间分布具有相关性特征多数是由于成土母质的影响。Facchinelli 等在研究意大利 Piemonte 地区土壤重金属污染状况时发现，Cr、Co、N 3 种元素的区域性分布和它们在大尺度上的变异主要是受成土母质的影响。

### 1.2.2 随机性因子(人文因子)

#### 1. 土地的利用

不同土地利用，主要包含环境土壤的利用程度和利用方式，都会产生不同的环境土壤重金属分布格局。例如，孙亚乔等通过研究秦岭山前研究区内旱地、水稻土和荒地三种类型的环境土壤的利用方式对环境土壤重金属含量的影响，得出

在这三种土地利用方式下, Cr、Cu 和 Zn 元素差异最大, 从大到小排列为旱地、荒地、水稻土; Pb 含量的差异也较大, 分别是水稻土>玉米地土壤>荒地。商海荣等在研究天津市滨海新区部分农田、果园、菜地和湿地的重金属含量时, 发现湿地的污染指数最高, 达到 90%; 菜地污染指数为 80%; 农田为 37.5%, 属于轻度污染。耕地在长期施肥的条件下, 也会产生环境土壤重金属的富集, 而且随着时间的推移, 富集的重金属会越来越多。

## 2. 工矿企业的分布

土壤作为工矿企业污染物排放的汇集地, 各种各样的污染物, 特别是重金属非常容易在土壤中不断地积累汇集, 对所在区域的环境土壤产生日益严重的影响。张孝飞等研究发现, 炼焦厂周边容易累积的元素是 Zn, 磷肥厂则是 Cu、Pd、Cd、Hg 和 As 元素, 炼油厂主要是 Ni, 钢铁厂则是 Pb、Cd 和 Hg 元素。

## 3. 交通道路的规划

多项研究表明, 交通道路两旁的环境土壤中 Pb、Cd、Zn、Cr 和 As 等重金属元素与相对于距离道路两边较远的土壤都会呈现出不同程度的富集。张志红等对汽车排出尾气的化学成分进行分析发现: 汽车排放尾气中 Pb 和 Zn 的含量较高, 并且还伴随着少量的 Cr、Cd 和 Mn 元素; 而 Zn 作为汽车轮胎硬度添加剂, 在汽车轮胎磨损过程中会产生粉尘。张满等对道路两侧环境土壤中重金属进行分析, 发现重金属在道路两侧的水平分布呈带状, 且环境土壤中重金属含量随着距离的增加呈现指数形式递减, 在超过了环境土壤重金属的污染区域范围后, 土壤中重金属含量便向背景值靠近。

## 4. 其他的随机因子

环境土壤重金属污染, 除了受人为因子(即上述几个方面)影响还有很多其他的不确定随机因子的影响。例如, Lin 采用指示克里格法与 GIS 相结合的方法, 通过图层信息叠加, 分析了中国台湾彰化县北部地区的重金属污染状况, 结果表明环境土壤重金属中 Cd、Cr 和 Cu 元素分布与灌溉系统的位置具有明显的相关性, 同时与灌溉渠布设也呈现出很高的相关性; 张鹏岩等发现在黄河下游滩区内外重金属分异与居民点分布的情况有关。

## 1.3 环境土壤重金属空间变异研究趋势分析

### 1.3.1 环境土壤重金属空间变异研究方法趋势

环境土壤重金属的空间变异研究过程中,运用 GIS 技术,在 GIS 技术支持下的地统计学与传统统计学相结合的方法,取得了快速的发展。首先通过将环境土壤资源信息与 GIS 有机地结合起来,建立 GIS 数据库,然后利用计算机对具有空间特征的环境土壤数据信息进行检索、统计等操作,通过利用 GIS 技术,以及采用传统统计学和地统计学结合的方法对信息化后的数据进行分析,既可以提高环境土壤资源管理的效率,又可增加环境土壤重金属空间变异准确性分析。例如,赵永存等通过采用经典统计学与半方差函数相结合的方法,对吉林公主岭环境土壤中的 As、Cr 和 Zn 含量的空间结构变异特征和规律进行了分析研究,获取了这些元素空间变异特征。张淑娟和何勇通过采用传统统计学和地统计学结合的方法,结合 GPS 和 GIS 技术研究环境土壤特性空间变异,发现了研究区域环境土壤特性均服从正态分布,土壤容重等具有中等空间相关性,环境土壤特性的相关距变化范围为 246.8~426.8m。

### 1.3.2 环境土壤重金属空间变异成因分析趋势

目前环境土壤重金属空间变异成因分析主要呈现出以下两个趋势特征:一是研究多样化的环境土壤重金属影响因子方法;二是探讨环境土壤重金属空间变异筛选的影响因子的多样化。探讨方法的多样化是为了更好地筛选出环境土壤重金属空间变异的影响因子。例如,刘琼峰通过采用地理加权回归模型探讨了长沙城郊农田土壤中 Pb 和 Cd 含量与哪些影响因子具有相关性。雷宝佳通过讨论环境土壤湿度对土壤元素的空间变异影响,得出湿度是影响环境土壤的非常重要的因子。

## 1.4 空间变异分析技术

土壤重金属的空间分布具有一定的随机性和结构性,它受地形、地质、气候及人类活动等各种因素共同的影响。对土壤重金属的空间变异性进行研究,是对研究区域内土壤各重金属含量时空变化趋势及空间及时间分布特征的探讨。以农田土壤重金属为例,农田土壤重金属含量对农田作物的影响日益受到研究者的关注,对农产品安全生产具有重要的研究价值。土壤重金属的空间变异性是指在不同空间位置,重金属值存在明显差异变化,并且土壤重金属的空间变异是普遍存在的。近年来,越来越多的研究显示土壤重金属的变异可造成作物产量降低,甚

至使得作物品质改变。耕层土壤重金属含量的空间变异受成土母质和人为活动影响较多。人类耕作活动对土壤变异的影响越来越大,但对能准确分析土壤重金属空间变异状态的嵌套尺度方式研究较少。本章采用传统统计学与地统计学方法相结合的研究路线,分析空间嵌套多尺度农田土壤重金属含量的空间变异特征,研究采样点合理分布和采样数目,通过地统计分析和空间结构分析,探讨农田土壤重金属的来源特征。

### 1.4.1 土壤重金属空间变异与预测

空间变异研究中,采用半方差函数对区域化变量进行分析是地统计学的基础。地统计学广泛应用于同时表现出结构特征、随机特征的空间分布研究对象。由于各种原因样本数据的测量检验及获取手段存在一定的局限性,而空间插值方法提供了空间预测的解决办法。通常在空间插值研究中常采用最佳线性无偏估计的克里格法进行土壤环境变量的空间预测,进而实现视图化呈现效果。地统计学理论可用于分析土壤重金属的空间分布特性、变异方式及来源方向解析等,为研究污染空间的重金属迁移变化规律提供理论依据。

土壤污染物的空间分布由于受到输入来源或者系统动力循环等因素影响,通常都会具有普遍的空间变异性及数据倾向特征。对于偏度和峰度值高的变量而言,不连续和不规则的数据会造成在半方差模型拟合中呈现块金值较高的现象,使得空间相关性无法体现,造成空间克里格方法的预测精度和结果失准。所以通常需要对不满足正态分布的变量数据进行正态变换或对数变换来降低数据的偏倚性,然后将预测结果恢复为数据原始形式。为了降低数据采集和测试成本,通常会采用辅助变量推导其他变量的相关性方法来实现分析方法的替换,同时在空间统计中使用协同克里格等方法进行这种替换式的空间预测。为反映真实准确的变量空间部分特征,空间变异分析理论与方法仍有进一步研究的必要性。

### 1.4.2 理论合理采样数

对于空间随机分布基础的经典统计学而言,合理采样数值是计算满足一定置信水平要求的抽样样本容量的方法。在样本满足正态分布的情况下,本书采用 Cochran 提出的区域随机合理采样公式。

$$N = t^2(C_v / k)^2 \quad (1-1)$$

式中, $N$ 为区域随机合理采样数, $t$ 为一定置信水平下的 $t$ 分布值, $C_v$ 为变异系数, $k$ 为要求的相对误差。