

国家自然科学基金资助项目 ( 51374208 )

# 矿区复垦土壤重金属 光谱解析与迁移特征研究

董霁红 房阿曼 戴文婷 许吉仁 安英莉 著

STUDIES ON THE SPECTRAL AND MIGRATION OF HEAVY METALS IN RECLAIMED SOIL OF MINING AREAS

中国矿业大学出版社

助项目(51374208)

# 矿区复垦土壤重金属光谱解析 与迁移特征研究

董霖红 房阿曼 戴文婷 许吉仁 安英莉 著



中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书主要源于依托国家自然科学基金项目所完成的中国矿业大学优秀学位论文,是一部关于矿区复垦土壤重金属光谱解析与迁移特征的研究专著。主要内容包括七部分:第一部分,矿区复垦土壤重金属光谱特征与估算研究;第二部分,矿区土壤-小麦重金属迁移特征模拟研究;第三部分,矿区土壤-小麦重金属迁移模型构建与徐州柳新矿区重金属数值拟合;第四部分,矿区土壤-小麦重金属污染程度评估;第五部分,矿区土壤重金属修复植物初步筛选;第六部分,研究进展与情况说明;第七部分,案例研究:徐州地区土壤重金属空间分布研究。

本书可供矿区土地污染与修复、矿山生态恢复、光谱遥感测评、重金属迁移模拟、土壤质量评价、农作物污染评价等相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生和高年级本科生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿区复垦土壤重金属光谱解析与迁移特征研究 / 董  
霁红等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2018. 5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3972 - 3

I. ①矿… II. ①董… III. ①矿区—复土造田—土壤  
污染—重金属污染—研究 IV. ①X53②TD88

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 112603 号

书 名 矿区复垦土壤重金属光谱解析与迁移特征研究  
著 者 董霁红 房阿曼 戴文婷 许吉仁 安英莉  
责任编辑 褚建萍  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83884103 83885105  
出版服务 (0516)83995789 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 12.75 字数 250 千字  
版次印次 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷  
定 价 48.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

矿区复垦土壤重金属污染及其修复是当今矿山生态及我国区域性、行业性领域的研究热点,对土地可持续利用、粮食安全、矿区环境与区域生态保护具有重要意义。

本书通过场地实测及实验室分析,明确矿区复垦土壤重金属的来源及分布;借助野外和实验室的光谱采集、解析,建立矿区复垦土壤重金属原/异位监测的反演模型;设计实验室模拟方案,说明土壤-作物系统的重金属迁移特征;明确不同复垦工艺的人工土壤上种植的粮食作物的重金属分布与污染程度。研究解决了矿区复垦土壤重金属分布、迁移的理论问题,并为其监测提供了一种技术方法。研究所得出的理论方法、数学模型、试验技术、软件手段、四年4期光谱数据和实验室检测数据等对国家制定矿区复垦技术标准及复垦工程的设计实施提供数据支持和科学指导,并可为矿区污染土地修复治理措施的制定提供参考。

本书重点开展了五个方面的研究工作:

- (1) 矿区复垦土壤重金属光谱特征与估算研究;
- (2) 矿区土壤-小麦重金属迁移特征模拟研究;
- (3) 矿区土壤-小麦重金属迁移模型构建与徐州柳新矿区重金属数值拟合;
- (4) 矿区土壤-小麦重金属污染程度评估;
- (5) 矿区土壤重金属修复植物初步筛选。

董霁红

2017年12月26日

## Foreword

The heavy metal pollution and remediation of reclaimed soils in mining area is a research hotspot in current mine ecology, the regional and industry fields in China. It is significant for the sustainable land use, food security, mining area environment and regional ecological protection.

In this project, the sources and distributions of heavy metals in reclaimed soil were ascertained in mining areas by field measurement and laboratory analysis; Established the inversion model for in-situ and ex-situ monitoring of heavy metals in reclaimed soil in mining areas with the help of spectral acquisition and interpretation both in field and laboratory; Explained the sorption and migration characteristics of heavy metals in soil-plant system by designing the simulation experiment; Ascertained the distribution and contamination level of heavy metals in crops grew in the artificial soils reclaimed by different reclamation techniques. The research solved the theoretical issues of the heavy metal distribution and migration in reclaimed soils in mining area, and provided a technique for such monitoring. The outcomes, including theoretical methods, mathematical models, experimental techniques, software, the four phase spectral data and laboratory monitoring data in four years and so on, can provide data support and scientific guidance for making land reclamation technical standards and designing the reclamation project. It also can provide reference for formulating remediation measures of contaminated land in mining area.

This project focuses on five major research works:

(1) Study on spectral signatures and estimation of heavy metals in reclaimed soils in mining area.

(2) Simulation on the migration characteristics of heavy metals in soil-wheat in mining area.

(3) Model establishing and numerical simulation of the soil-wheat heavy metal migrations in mining area.

(4) Pollution degree estimation of heavy metals in soil-wheat in mining area.

(5) Preliminary screening of plants for soil heavy metals phytoremediation in mining area

Prof. Jihong Dong

College of Environment and Spatial Informatics,  
China University of Mining and Technology (CUMT)

## 目 录

1 矿区复垦土壤重金属光谱特征与估算研究 .....	1
1.1 研究背景与研究进展 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.1.3 国内外研究进展 .....	2
1.1.4 研究内容与方法 .....	7
1.2 研究区域概况及数据采集 .....	10
1.2.1 地理位置、气候特征、采样场地 .....	10
1.2.2 土壤样品采集与处理 .....	11
1.2.3 土壤光谱数据采集 .....	12
1.2.4 小结 .....	14
1.3 矿区复垦土壤重金属含量传统方法测评 .....	14
1.3.1 实验数据 .....	14
1.3.2 评价标准 .....	14
1.3.3 不同场地土壤重金属含量分析 .....	17
1.3.4 小结 .....	21
1.4 矿区复垦土壤重金属光谱特征 .....	22
1.4.1 室内外土壤光谱数据比较 .....	22
1.4.2 室内土壤光谱预处理及特征 .....	23
1.4.3 高危害重金属元素镉、铬胁迫敏感波段 .....	28
1.4.4 中度危害元素铜、铅胁迫敏感波段 .....	31
1.4.5 轻度危害重金属元素锌胁迫敏感波段 .....	34
1.4.6 矿区复垦土壤重金属特征波段分析 .....	36
1.4.7 小结 .....	37
1.5 矿区复垦土壤重金属高光谱估算 .....	38
1.5.1 多元线性回归估算模型 .....	39
1.5.2 广义回归神经网络估算模型 .....	41
1.5.3 系列最小优化支持向量机回归估算模型 .....	45

1.5.4	基于不同模型的重金属估测结果比较	49
1.5.5	优选模型实证——小麦镉含量估算	50
1.5.6	模型推广应用框架	54
1.5.7	小结	56
1.6	结论与建议	56
1.6.1	主要结论	56
1.6.2	认识与建议	59
<b>2</b>	<b>矿区土壤-小麦重金属迁移特征模拟研究</b>	<b>62</b>
2.1	研究背景与研究现状	62
2.1.1	研究背景与意义	62
2.1.2	土壤重金属迁移、污染评价与修复研究现状	63
2.1.3	研究目的与内容	68
2.1.4	技术路线	68
2.2	模拟实验方案设计与数据采集	69
2.2.1	野外模拟实验场地、柳新矿区场地	69
2.2.2	实验方案设计	70
2.2.3	土壤、小麦样品采集与数据处理	73
2.3	矿区土壤-小麦重金属迁移特征	78
2.3.1	土壤重金属含量分布、变化及相关性	78
2.3.2	土壤铬、铅、锌的空间分布	87
2.3.3	小麦中重金属含量变化、运移及相关性	89
2.3.4	小麦中重金属富集系数	97
2.3.5	四类场地土壤-小麦重金属迁移特征对比	98
2.4	主要结论	103
<b>3</b>	<b>矿区土壤-小麦重金属迁移模型构建与徐州柳新矿区重金属数值拟合</b>	<b>105</b>
3.1	同异反灰色关联模型	105
3.1.1	模型建立	105
3.1.2	同异反趋势划分	108
3.1.3	相关系数灰色度分析	110
3.2	曲线回归模型	111
3.2.1	基本原理	111
3.2.2	模型建立	113

3.2.3	模型拟合验证 .....	114
3.3	分配估计模型 .....	118
3.3.1	基本原理 .....	119
3.3.2	模型构建 .....	119
3.3.3	拟合验证 .....	121
3.4	较优模型选择 .....	122
3.5	徐州柳新矿区重金属数值拟合 .....	123
3.5.1	煤矸石复垦场地 .....	123
3.5.2	粉煤灰复垦场地 .....	125
3.5.3	正常对照场地 .....	126
3.6	主要结论 .....	128
<b>4</b>	<b>矿区土壤-小麦重金属污染程度评估 .....</b>	<b>130</b>
4.1	土壤-小麦重金属污染评价模型建立 .....	130
4.2	低限值添加实验重金属污染程度分析 .....	131
4.2.1	Cr 添加场地 .....	131
4.2.2	Pb 添加场地 .....	133
4.2.3	Zn 添加场地 .....	134
4.2.4	正常对照场地 .....	136
4.3	土壤-小麦重金属污染评价结论 .....	137
<b>5</b>	<b>矿区土壤重金属修复植物初步筛选 .....</b>	<b>138</b>
5.1	筛选方案设计 .....	138
5.2	筛选实验实施 .....	141
5.3	实验结果分析 .....	142
5.3.1	Cr 修复植物筛选 .....	142
5.3.2	Pb 修复植物筛选 .....	143
5.3.3	Zn 修复植物筛选 .....	145
5.4	筛选结果 .....	147
<b>6</b>	<b>研究进展与情况说明 .....</b>	<b>148</b>
6.1	研究进展、重要结果及科学意义 .....	148
6.2	存在问题、建议及需要说明的情况 .....	148

<b>7 案例研究:徐州地区土壤重金属空间分布研究</b> .....	151
7.1 徐州地区概况 .....	151
7.2 数据来源与研究方法 .....	151
7.3 七种土壤重金属空间插值分析 .....	152
7.3.1 土壤重金属含量描述统计 .....	152
7.3.2 土壤重金属半变异函数拟合特征 .....	155
7.3.3 土壤重金属分布特征 .....	156
7.4 污染相对严重的 Cr 元素分布特征 .....	162
7.4.1 Cr 元素的分布 .....	162
7.4.2 影响因素分析 .....	163
7.5 基于最小二乘法 Cr 回归模拟 .....	164
7.5.1 模型介绍 .....	164
7.5.2 数据处理 .....	164
7.5.3 回归模拟及分析 .....	165
7.6 主要结论 .....	170
<b>参考文献</b> .....	172

# Contents

<b>1 Study on Spectral Signatures and Estimation of Heavy Metals in Mine Reclamation Soils</b> .....	1
1.1 Research Background and Research Progress at Home and Abroad .....	1
1.1.1 Research Background .....	1
1.1.2 Research Significances .....	2
1.1.3 Research Progress at Home and Abroad .....	2
1.1.4 Research Contents Methods .....	7
1.2 General Situation of Research Area and Data Collection .....	10
1.2.1 Geographical Location, Climatic Characteristics and Sampling Site .....	10
1.2.2 Soil Samples Collection and Processing .....	11
1.2.3 Spectral Data of Soil Samples Collection .....	12
1.2.4 Summary .....	14
1.3 Analysis and Evaluation of Mine Reclaimed Soil Heavy Metals Concentration by Conventional Methods .....	14
1.3.1 Raw Experiment Data .....	14
1.3.2 Evaluation Standard .....	14
1.3.3 Analysis of Heavy Metals Concentration in Soil of Different Sites .....	17
1.3.4 Summary .....	21
1.4 Spectral Signature of Mine Reclaimed Soil Heavy Metals .....	22
1.4.1 Comparative Analysis of Indoor and Outdoor Spectroscopy Data of Mine Reclaimed Soils .....	22
1.4.2 Indoor Spectroscopy Data Pretreatment and Signature Analysis of Mine Reclaimed Soils .....	23
1.4.3 Stress Sensitive Band of High Harmful Elements Cd and Cr .....	28
1.4.4 Stress Sensitive Band of Moderate Harmful Elements Cu and Pb .....	31
1.4.5 Stress Sensitive Band of Slight Harmful Elements Zn .....	34
1.4.6 Analysis of Heavy Metals Signature Spectral Wave Bands of Mine Reclaimed Soils .....	36

1.4.7	Summary	37
1.5	Quantitative Estimating the Heavy Metals Concentration of Mine Reclaimed Soil by Using Hyperspectral Data	38
1.5.1	Quantitative Estimating the Heavy Metal Concentration Based on Multiple Linear Regression	39
1.5.2	Quantitative Estimating the Heavy Metal Concentration Based on Generalized Regression Neural Network	41
1.5.3	Quantitative Estimating the Heavy Metal Concentration Based on Sequential Minimal Optimization-Support Vector Machines Regression	45
1.5.4	Results Analysis of the Heavy Metals Concentration Estimation Based on Different Models	49
1.5.5	Optimizing Model Demonstration—Estimating the Cd Concentration in Wheats Planted on Mine Reclaimed Soil	50
1.5.6	Model Extend and Application Framework	54
1.5.7	Summary	56
1.6	Conclusion and Suggestion	56
1.6.1	Main Conclusions	56
1.6.2	Awareness and Suggestions	59
<b>2</b>	<b>Simulation on the Migration Characteristics of Heavy Metals in Soil-Wheat in Mining Area</b>	<b>62</b>
2.1	Research Background and Status	62
2.1.1	Research Background and Significances	62
2.1.2	Research Status of Migration, Pollution Assessment and Remediation for Soil Heavy Metals	63
2.1.3	Research Target and Contents	68
2.1.4	Technique Route	68
2.2	Simulation Experiment Program Design and Data Collection	69
2.2.1	Field Simulation Experimental Site and Liuxin Mining Area	69
2.2.2	Experiment Program Design	70
2.2.3	Soil and Wheat Sample Collection and Data Treatment	73
2.3	Analysis on Heavy Metal Migration Characteristics of Soil-Wheat in Mining Area	78
2.3.1	Content Distribution, Change and Relevance of Heavy Metals in Soil	78
2.3.2	Spatial Distribution of Cr, Pb and Zn in Soil	87

2.3.3	Content Change, Migration and Relevance of Heavy Metals in Wheat	89
2.3.4	Enrichment Coefficient of Heavy Metals in Wheat	97
2.3.5	Characteristics Comparison of Soil-Wheat Heavy Metals among Four Experimental Sites	98
2.4	Main Conclusions	103
<b>3</b>	<b>Migration Model Establishment and Numerical Simulation of the Soil-Wheat Heavy Metals in Mining Area</b>	<b>105</b>
3.1	Grey Relational Model Based on Identical-Discrepancy-Contrary	105
3.1.1	Model Construction	105
3.1.2	Trend division of Identical-Discrepancy-Contrary	108
3.1.3	Grayness Analysis of Correlation Coefficient	110
3.2	Curvilinear Regression Model	111
3.2.1	Theory	111
3.2.2	Model Construction	113
3.2.3	Model Fitting Verification	114
3.3	Apportion Estimation Model	118
3.3.1	Theory	119
3.3.2	Model Construction	119
3.3.3	Fitting Verification	121
3.4	Model Comparison and Optimization Selection	122
3.5	Numerical Simulation of Liuxin Mining Area in Xuzhou	123
3.5.1	Coal Ganguge Reclamation Site	123
3.5.2	Fly Ash Reclamation Site	125
3.5.3	Control Site	126
3.6	Main Conclusions	128
<b>4</b>	<b>Pollution Degree of Soil and Wheat Heavy Metals in Mining Area</b>	<b>130</b>
4.1	Pollution Assessment Model Establishment for Heavy Metals in Soil-Wheat	130
4.2	Analysis on Pollution Degree of Heavy Metals in Low-Limited Value Adding Experiment	131
4.2.1	Cr Experimental Site	131
4.2.2	Pb Experimental Site	133
4.2.3	Zn Experimental Site	134

4.2.4	Control Site .....	136
4.3	Evaluation Conclusion of Heavy Metal Pollution in Soil-Wheat .....	137
<b>5</b>	<b>Phytoremediation Screening Preliminary of Soil Heavy Metals in Mining Area .....</b>	<b>138</b>
5.1	Screening Scheme Design .....	138
5.2	Screening Experiment Implementation .....	141
5.3	Experimental Result Analysis .....	142
5.3.1	Cr Phytoremediation Screening .....	142
5.3.2	Pb Phytoremediation Screening .....	143
5.3.3	Zn Phytoremediation Screening .....	145
5.4	Screening Results .....	147
<b>6</b>	<b>Research Progress and Description .....</b>	<b>148</b>
6.1	Progress, Result and Significance .....	148
6.2	Question, Suggestion and Description .....	148
<b>7</b>	<b>A Case: Distribution of Soil Heavy Metals in Xuzhou .....</b>	<b>151</b>
7.1	Situation on Study Area .....	151
7.2	Data Collection and Research Methods .....	151
7.3	Spatial Interpolation Analysis of Heavy Metals in Soil .....	152
7.3.1	Description Statistics of Heavy Metal Content in Soil .....	152
7.3.2	Fitting Characteristics of Semi-Variance Function of Heavy Metals in Soil .....	155
7.3.3	Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soil .....	156
7.4	Distribution Characteristics of Relativistic Serious Pollution Cr .....	162
7.4.1	Spatial Distribution of Cr Content .....	162
7.4.2	Influence Factor Analysis .....	163
7.5	Regression Simulation Based on Partial Least Squares of Cr .....	164
7.5.1	Model Introduction .....	164
7.5.2	Data Processing .....	164
7.5.3	Regression Simulation and Analysis .....	165
7.6	Main Conclusions .....	170
<b>References</b>	.....	<b>172</b>

# 1 矿区复垦土壤重金属光谱特征与估算研究

## 1.1 研究背景与研究进展

### 1.1.1 研究背景

我国是世界上矿产资源总量丰富、矿种比较齐全、配套程度较高的国家之一,矿产资源已经成为我国经济可持续发展的重要物质基础<sup>[1]</sup>。矿产资源的开发,改变了矿区生态系统的物质循环和能量流动,导致严重的生态破坏和环境污染,其中,矿区土壤污染是最为严重的问题之一<sup>[2,3]</sup>。采矿过程排放的大量有害矿井水、选矿厂排放的含有重金属离子和化学药剂的废水以及尾矿渣中通过矿物风化溶解的重金属通过沉降、淋溶进入土壤,最终在土壤中积累<sup>[4,5]</sup>。

我国的矿区土地复垦后被优先用于农业生产<sup>[6]</sup>,由于复垦工艺的特殊性以及复垦环境的复杂性,充填物料所携带的包括 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 等重金属元素在内的外来污染物和矿区环境要素都会造成土壤重金属污染。一方面,由于土壤重金属污染具有普遍性、累积性、间接危害性、滞后性和不可逆性,矿区复垦土壤中重金属的存在不仅造成了土壤质量的下降、生态系统的破坏,更会通过接触、食物链等途径污染农产品,间接威胁人体健康<sup>[7-9]</sup>。另一方面,土壤复杂的空间异质性使得对土壤重金属的空间分布及空间相关性进行定量化检测难度较大,传统的通过现场取样、实验室化学分析和仪器分析等方法进行土壤重金属含量检测不仅费时、费力,而且不利于进行大面积动态监测<sup>[10-12]</sup>。因此,快速、准确、动态监测土壤重金属污染成为国内外学者关注热点。

反射光谱特征是土壤的基本特征之一, Malley 和 Williams 利用近红外反射光谱估测湖泊沉积物重金属含量,首次证明了利用反射光谱估测重金属含量的可行性<sup>[13]</sup>。运用遥感光谱分析方法估测土壤重金属含量,能够克服传统采样方法的不足,达到动态、快速、大尺度地监测土壤重金属污染的目的。

综上所述,在我国矿区复垦土壤环境亟待改善,土壤监测手段需要更新的背景下,研究矿区复垦土壤光谱特征,提出利用矿区复垦土壤光谱进行重金属快速监测的方法是值得研究的重要课题。

### 1.1.2 研究意义

我国是一个农业大国,土壤是农业生产赖以生存的基础,但同时又面临耕地紧缺的基本国情,加之我国矿区生态环境不容乐观,矿区土地复垦对缓解土地供需矛盾、改良矿区环境、提高矿区生活质量具有重要意义。大多数矿区复垦土壤被作为农业用地进行粮食作物耕作,开展矿区复垦土壤环境质量监测研究,及时发现复垦土壤重金属污染,保障粮食安全十分必要。土壤的光谱特征与土壤的重金属含量具有响应关系,研究土壤光谱特征,利用高光谱遥感进行矿区复垦土壤重金属污染监测,研究矿区复垦土壤潜在风险对促进复垦土壤环境质量监测技术发展和矿区粮食安全调控具有重要理论和实践意义。

(1) 理论意义。通过系统的采样与化学分析研究,结合高光谱技术监测矿区复垦土壤的重金属污染情况,从土壤光谱特征与重金属之间的关系来研究场地污染机理,从而丰富土壤反射光谱研究重金属污染的理论。目前在这方面的研究不多,相关技术和分析方法还不成熟,已有研究虽然能够提供借鉴,但其中的理论方法、数学模型并不具有通用性,鲜有针对矿区复垦土壤进行的研究。本研究所得结果可为矿区复垦土壤环境质量调查和评价的新技术提供理论依据。

(2) 实践意义。复垦土壤质量的好坏对耕地能否有效利用、农作物产品质量具有重要影响。明晰矿区复垦土壤光谱特征,通过反演模型的建立,快速准确地获取矿区复垦土壤重金属含量及分布信息,是及时制定治理措施,保障粮食安全的关键。近年来,食品安全水平一再被列为发展现代农业的首要任务。持续出现的“镉大米”事件,也使人们更加关注于土壤中重金属的存在状况,同时,由国土资源部主持绘制的土壤重金属“人类污染图”也正在进行中。以上都说明利用高光谱技术快速监测矿区复垦土壤重金属污染情况,对于及时制定相应的治理措施、改善土壤环境质量状况具有重要的经济、社会和生态的实践意义。

### 1.1.3 国内外研究进展

#### 1.1.3.1 土壤重金属污染传统检测方法

重金属(heavy metal)一般是指密度大于  $6.0 \text{ g/cm}^3$ 、原子序数大于 20 的金属元素<sup>[14]</sup>。土壤重金属污染(heavy metal pollution of soils)是指由于人类活动,土壤中的微量金属元素在土壤中的含量超过背景值,过量沉积而引起的含量过高的现象<sup>[15]</sup>。由于重金属不能被土壤微生物分解,却可以被生物体富集,某些重金属还可转变成毒性更强的甲基化合物,加之它可以通过食物链在人体内蓄积,严重危害人体健康,因此,土壤重金属污染的问题在世界各国都受到了广泛的关注,自 20 世纪 50 年代开始,世界各国根据自身情况制定了土壤环境质量

标准,并提供了重金属含量检测方法指南。

国内外对重金属污染研究较多的元素包括 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Hg、Ni 和 Zn<sup>[16-24]</sup>。从重金属的生物特性来看,部分元素在动植物中的存在本身就是有害的,如 Cd、As、Hg 等,另外部分则当其含量未超过限值时可作为被人体或植物所吸收的营养元素,过量则会造成威胁。土壤重金属污染程度主要通过测定重金属总量值和分析重金属在土壤中存在形态。根据研究对象划分,主要对工业用地和农业用地土壤展开研究;从研究方法来看,以传统的化学分析手段为主,即通过野外实地采集土壤样品,进行实验室测定重金属含量,分析其形态变化和迁移转化规律。测定方法主要有原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、分光光度法等以光学类仪器为基础的分析法及电感耦合等离子体发射光谱法、电感耦合等离子体质谱法等光学和电化学仪器联用的分析法<sup>[25]</sup>。

利用传统检测方法对土壤重金属污染展开研究的时间较长,涉及多个方面,研究成果丰硕<sup>[26-35]</sup>,但并非本研究重点,故不再赘述。但需要指出的是,传统的土壤检测方法主要是采取现场取样后实验室化学和仪器分析的方法进行,耗时长、耗费人力大、难以进行大面积动态监测,利用土壤反射光谱特征对土壤重金属含量进行估测则可以避免上述不足。

### 1.1.3.2 土壤反射光谱特征

土壤同其他地物一样对太阳辐射有着不同的光谱反射率。不同地物光谱反射曲线是地物对电磁波反射或发射差异的集中体现。地物光谱是遥感技术的基础,是建立地面与空间两种信息之间关系的桥梁。在遥感中,地物的光谱至少有三个方面的作用:① 传感器波段选择、验证及评价;② 可以建立地面、航空和航天遥感数据的关系,并对传感器进行校正;③ 建立地物相关模式或应用模型<sup>[36,37]</sup>。

物质在电磁波相互作用下,由于电子跃迁,原子、分子振动与转动等复杂作用,会在某些特定的波长位置形成反映物质成分和结构信息的光谱吸收和反射特征。物质的这种对不同波段光谱的响应特性称为光谱特征(spectral characteristics)。光谱特征是遥感方法探测各种物质性质和形状的重要依据。

土壤的反射光谱特征是土壤的基本性质之一,它和其他理化性状(如土壤质地、土壤颜色、土壤的含水量、有机质含量以及重金属含量等)有着密切关系。土壤在发育过程中,由于不同母质、气候、区域地形、生物等成土环境不同和成土时间长短的差异,再加上人类活动的影响,其理化特性如机械组成、元素含量、有机质含量、黏土矿物类型等有着明显差别。土壤组成物质的多样性以及土壤中每种组成物质独特光谱特性使得各类土壤的光谱都具有自己的特点。

国内外学者对土壤光谱特征展开了大量的研究,早期研究主要集中在土壤分类以及土壤光谱影响因素分析。如 Condit<sup>[38]</sup>分析了美国 160 种土壤在 320~1 000