

矿区环境

高分辨率遥感监测

及信息资源开发利用

何原荣 著



科学出版社

矿区环境高分辨率遥感监测 及信息资源开发利用

何原荣 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

随着遥感技术的快速发展及其商业数据销售的一些限制相继解除,高分辨率遥感影像已成为矿区环境信息获取的重要载体。本书结合规模化矿区高分辨率遥感监测推进中对数据分析与信息资源开发利用的迫切需求和“大数据”时代的潮流趋势,从土地破坏分析、非污染评价和污染评价三个专题进行分析方法、模型及三维集成系统研究,并基于3D GIS、ORDB、中间件技术进行了监测数据一体化集成与多元化服务系统构建,研究结果对天地一体环境监测以及地理国情监测等应用领域具有参考借鉴意义。

本书可供高等学校地理信息工程、测绘工程、矿业工程、环境工程、生态学等专业本科生、研究生学习使用,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿区环境高分辨率遥感监测及信息资源开发利用 / 何原荣

著. — 北京: 科学出版社, 2014.8

ISBN 978-7-03-041460-1

I. 矿… II. ①何… III. ①矿区-高分辨率-环境遥感-环境监测②矿区-高分辨率-环境遥感-信息资源-资源开发③矿区-高分辨率-环境遥感-信息资源-资源利用 IV. ①X87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 169116 号

责任编辑: 韩卫军 / 责任校对: 唐静仪

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年8月第一次印刷 印张: 13

字数: 300千字

定价: 80.00元



本书获厦门理工学院学术专著出版基金及国家自然科学基金项目(编号: 61070151)资助

前 言

矿产资源是工业的“血液”和“粮食”，是国民经济与社会发展的重要物质基础。然而，长期大规模和超强度的矿产资源开发，加上历史生态欠账较多及对矿产资源需求日益增加，都给当前矿区环境保护工作带来了前所未有的压力。环境监测是环境管理的耳目，是环境管理最基础、最基本的支撑力量。面对尖锐复杂的矿区环境问题，如果监测业务跟不上，就会使得保护和治理工作措手不及、应对无方、贻误时机。为了实现《先进的环境监测预警体系建设纲要(2010~2020年)》提出的“天地一体的环境监测系统，和谐统一的环境监测格局”的升级转型目标，这就对现有矿区环境监测系统的信息获取、处理、集成和综合服务等方面提出了新的要求。

进入21世纪以来，随着遥感技术的快速发展及其商业数据销售的一些限制相继解除，高分辨率遥感影像已成为矿区环境信息获取的重要载体。特别是2006年以来，高分辨率遥感调查与监测在全国主要成矿带及矿集区的工程化实施使得矿区环境监测数据的内容得到了极大丰富，数据量获得了急剧累积，但是相应的监测分析和开发利用的研究力度却存在明显的滞后和不足。为此，本书从监测分析与信息资源开发利用两个层面展开了一系列的研究工作。

首先，针对现有监测分析研究主要局限于空间信息提取与统计分析的问题，围绕矿区环境问题产生源头的土地破坏以及非污染和污染问题分别展开监测分析方法研究。具体内容包以下3方面。

(1)确定矿区土地破坏遥感分类体系，建立开采面、尾矿库、固体废弃物、工矿建筑、工矿道路这5类土地破坏的解译标志系统，在3S技术支持下进行室内解译和野外验证，构建传统二维图件难以表述的遥感三维数据模型、坡度三维数据模型、汇水三维数据模型，在多源数据支持下以土地破坏生态补偿评估为应用指向研究属性信息配赋的内容和方法，引入土地利用变化测度模型建立以三维量算面积为参数的土地破坏动态变化分析模型。

(2)设计针对矿区复合生态系统的景观分类系统，采用高分辨率遥感数据和决策树分类方法获取景观分类影像，利用Fragstats景观指数计算软件提取研究9个生态子区的LPI、LSI、MPS、PSSD、FD、CONTAG、AWMPFD和SHDI共8个景观指标，选择主成分多元统计分析模型实现矿区景观生态质量综合量化评价与主导因子分析，进行分区评价结果的差异性比较与实证研究。

(3)以大气环境、水污染、土壤污染以及生物污染地面监测数据为集成与分析内容，研究三维遥感数据模型与地面调查及监测数据可视化集成及其统计分析、综合预警的技术方法。

其次, 以提供数据与功能服务给矿区和社会研究群体为需求导向, 通过监测分析系统与服务平台开展矿区环境监测信息资源的开发利用应用研究。具体内容包括以下两方面。

(1) 借助 VRMap SDK 开发矿区土地破坏测度及非污染模型分析三维可视化系统, 开发实现地面污染监测数据与遥感监测数据集成的后台管理以及数据查询、统计分析、综合预警计算的通用化前端分析 3D GIS 工具。顾及矿区居民的主要环境利益诉求, 搭建面向社区服务的触摸式矿区环境污染信息平台。

(2) 采用 Oracle 11g 作为存储和管理技术平台, 以 MapBuilder 11g 作为空间数据的接收转化工具研究多源异构监测空间数据库构建与可用性校验方法, 设计分类编码体系和元数据描述方法, 实现矿区环境监测系列符号的 SVG 编码及其管理工具, 借助 Oracle Map 11g 实现集后台管理和前端服务为一体的矿区环境监测数据 Web 共享可视化集成系统。

最后, 总结了本书的研究成果, 并展望后续研究工作, 主要集中在: ①在矿区土地破坏监测数据的基础上进一步叠加非污染、污染的监测成果并进行统计分析与空间分析, 为达成环境问题致因分析的清晰化以及源头控制的应用目标提供更高层次的决策信息。进一步区分研究区域矿产资源开发和矿业旅游开发对土地利用变化及其环境的影响分析。②进一步分析多时相景观生态质量变化以及各景观指数变化对矿区环境所造成的影响。③在污染监测管理与分析 3D GIS 工具中集成无线传输的污染自动监测及野外调查数据 PAD 采集数据, 提升自动测报能力。④集成在线监测分析模型库并且提供监测数据在线模型处理服务, 提升监测数据的在线处理以及多学科协同 e-Science 研究能力, 构建矿区环境遥感监测虚拟研究中心。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 我国矿区环境面临的压力	1
1.1.2 矿区生态破坏与环境污染现状分析	2
1.1.3 矿区环境监测系统升级转型的需求与对策	4
1.2 矿区环境遥感监测国内外研究综述	8
1.2.1 矿区环境高分辨率遥感监测研究现状与趋势	8
1.2.2 高光谱遥感在矿区环境监测中的应用研究进展	12
1.2.3 微波遥感在矿区环境监测中的应用研究进展	14
1.2.4 存在问题分析	16
1.3 研究内容	17
第2章 基于多源空间数据的矿区土地破坏遥感监测分析	19
2.1 研究概况	19
2.2 基于多源空间数据的矿区土地破坏遥感监测信息提取	20
2.2.1 矿区土地破坏遥感解译	20
2.2.2 野外验证与精度评价	27
2.3 矿区土地破坏遥感监测分析	32
2.3.1 矿区土地破坏三维数据建模	32
2.3.2 矿区土地破坏生态补偿量建模	38
2.3.3 矿区土地破坏动态变化模型分析	41
2.4 本章小结	47
第3章 基于景观生态学和 PCA 模型的矿区非污染环境监测分析	48
3.1 研究概况	48
3.2 基于决策树自动分类器的矿区景观分类遥感制图	51
3.2.1 矿区景观生态分类系统的建立	51
3.2.2 基于决策树分类器的景观生态遥感分类制图	53
3.2.3 景观分类精度评价	60
3.3 基于 Fragstats 的矿区景观指数提取	65
3.3.1 Fragstats3.3 软件及其运行配置	65
3.3.2 矿区景观评价指数的选择	66
3.3.3 基于 Fragstats 的矿区景观指数提取	68

3.4 基于 PCA 模型的景观生态质量评价	70
3.4.1 矿区景观质量评价模型的选择	70
3.4.2 矿区景观评价 PCA 模型构建及算法实现	71
3.4.3 评价结果与分析	73
3.5 本章小结	82
第4章 基于三维 GIS 的矿区环境污染监测分析及其社区信息服务	83
4.1 研究概况	83
4.2 多源矿区环境监测数据的三维集成	84
4.2.1 三维数据模型的显示与视图操作	84
4.2.2 地面站点观测数据的三维集成	87
4.3 矿区环境污染监测分析通用工具开发与社区服务平台构建	93
4.3.1 矿区环境污染监测分析通用工具开发	94
4.3.2 面向社区的矿区环境污染监测分析信息服务平台搭建	102
4.4 本章小结	104
第5章 基于 ORDB 的矿区环境监测数据集成化管理与 Web 共享	105
5.1 研究概况	105
5.2 基于 ORDB 的矢量空间数据库的构建	109
5.2.1 基于 Map Builder 的 Oracle 矢量空间数据接收转化	109
5.2.2 矢量空间数据库构建及其可用性校验	114
5.3 基于 ORDB 的栅格空间数据库的构建	116
5.3.1 基于 Map Builder 的 Oracle 栅格空间数据接收转化	116
5.3.2 栅格空间数据库构建及其可用性校验	123
5.4 基于 Oracle Map 的矿区环境监测数据的 Web 可视化集成系统	124
5.4.1 矿区环境监测数据库分类编码及其 Web 可视化	124
5.4.2 矿区环境监测数据 Web 可视化符号库构建	131
5.4.3 矿区环境监测数据库元数据描述及其 Web 集成	138
5.5 本章小结	142
第6章 结论与展望	144
6.1 研究工作总结	144
6.2 后续研究展望	145
附件 Oracle Spatial 矿区监测数据可视化 SVG 符号编码实现	146
参考文献	191
索引	199

第1章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 我国矿区环境面临的压力

矿产资源是工业的“血液”和“粮食”，是国民经济与社会发展的重要物质基础。矿业为国家建设提供了 95% 左右的能源，80% 的工业原材料、70% 的农业生产资料与矿产资源有关^[1]。新中国成立以来，随着社会主义现代化建设事业的展开，在大规模勘查工作取得丰硕成果的基础上，我国矿业获得了高速的发展，使我国由一个矿业弱国跃入世界矿业大国的行列。新中国刚成立时，比较完整的矿山仅 300 多座，探明有储量的矿产仅有 2 种^[2]。到 2007 年，我国已有矿山企业 10 万多个，已探明矿产资源总量约占世界的 12%，仅次于美国和俄罗斯，居世界第 3 位^[3]。我国矿产开发总规模居世界第 3 位，煤炭、水泥、钢、磷、硫铁矿和 10 种有色金属以及原油产量已跃居世界前列^[4]。

然而，由于长期大规模和超强度的矿产资源开发，加上矿山环境保护工作受重视较晚，导致历史生态欠账较多，增加了当前矿山环境治理的成本与压力。

对于矿山环境，国外主要的采矿国家较早建立了完善和严格的法律保障，而且拥有专用资金和专职的研究机构，使得开采者对环境责任明确，对矿山环境的控制与恢复效果也比较好。例如，1791 年，英国萨默塞特煤矿租约明确提到，在煤矿关闭时要对矿井进行回填，并平整土地^[5]。美国自 1918 年开始在印第安纳州试验矿山复垦工作，1920 年通过《矿山租赁法》明确要求采矿人保护土地和自然环境。德国也从 20 世纪 20 年代开始在煤矿废弃地上植树。此后，1969 年英国颁发了《矿山采矿法》，提出采矿者在开矿时必须同时进行生态重建及生态重建地的管理工作，明确按国家农林标准进行生态重建。1977 年，美国通过《露天开采控制和生态重建法案》，明确要求在破坏的土地上必须把生态系统的资源组成部分恢复到开发前的环境状态^[6]。

我国在计划经济时期建立起来的大中型企业，在当年的矿山生产中既没有认识到矿山环境问题的严重性，也没有在成本中提留治理费用，积累了大量矿山环境问题，所需治理资金巨大，企业根本无法承担治理恢复责任。20 世纪 80 年代中后期，受“大矿大开，小矿放开，有水快流”错误思想的影响，放宽了准入条件，矿山数量大幅增加，全国开矿大潮兴起，群采滥挖加剧了矿山环境的破坏，进一步给矿山环境治理留下了沉重的包袱。此后，随着社会主义市场经济体制的建立，利益分配方式发生变革^[7]，一些地方政府盲目追求政绩、财政收入和 GDP，忽视矿区环评、环保的管理工作，甚至对生态破坏、环境污染

严重的矿山企业视而不见。

近年来,我国虽然逐步建立了矿山环境法律、法规,并加强监督管理,但矿山环境恶化的趋势未得到有效的遏制,占矿山总数 59.06% 的乡镇矿山其环保水平较低,更为严重的是占总数 36.80% 的个体采矿点的环保工作几乎是空白^[3]。此外,一些交通不发达、信息闭塞的矿区往往是矿政管理的盲区或薄弱区,一些开采者受经济利益驱使宁愿铤而走险偷采、偷炼,不惜以损害环境为代价牟取暴利,造成了资源的极大浪费和环境的恶劣破坏。

中国是世界矿产消费大国。据报道^[8],2004 年我国对铁、铜、钢铁、燃煤的消费量居全球第一,燃煤的需求增量达 157%,铁的需求增量为 107%;石油、铝、镍的消费量居全球第二,镍的需求增量达 100%。2000 年以来,随着我国西部大开发、东北振兴、中部崛起、东部新跨越等区域发展战略的全面推进,加上未来 10 年内面临着以“实现到 2020 年比 2000 年人均 GDP 翻两番(超过 3000 美元)”为根本标志的全面小康社会建设的历史任务,必然要求矿业进一步发展,矿产资源需求量的持续增加势必带来前所未有的矿山环境压力。

1.1.2 矿区生态破坏与环境污染现状分析

当前我国生态与环境问题的复杂性是历史上任何国家所不曾遇到过的^[9]。《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》(国发〔2005〕39 号)文件指出,发达国家上百年工业化过程中分阶段出现的环境问题,在我国近 20 多年来集中出现,呈现结构型、复合型、压缩型的特点。2009 年 7~8 月,媒体相继报道了多起严重的环境污染事件,包括内蒙古赤峰自来水污染致 4000 余人就医,湖南浏阳镉污染事件,陕西凤翔、湖南武冈、昆明市东川区共有近千名儿童血铅超标。矿区长期积存并不断产生的环境问题不仅关乎矿区人地系统的和谐关系与局部生态系统的健康,更对我国本身就十分沉重的环境保护工作增添了较大负担,体现在以下几个方面。

(1)在矿区生态破坏方面。我国露天煤矿挖损和排土场每年破坏占地 0.8 万 hm^2 ,冶金矿业每年破坏土地近 1000 hm^2 ,每年积存的废石、尾矿库占地 6.7 万 hm^2 ^[10]。据推算,全国矿山开发占用耕地面积占全国耕地面积的 1.04%^[6],而我国人均耕地不到 0.1 hm^2 ,不足世界平均水平的 1/3^[11],矿山占用耕地使得人多地少的矛盾更加突出。全国矿山开发所占用林地是全国林地面积的 0.79%^[3],而据第六次全国森林资源清查结果显示我国森林覆盖率仅为 18.21%,居世界第 130 位,人均森林面积不到世界平均水平的 1/4,居世界第 134 位^[12],矿山占用林地给保护和发展森林资源工作增加了难度。

(2)在矿区环境污染方面。我国每年因采矿产生的废水、废液的排放总量约 3.6 亿 t,约占全国工业废水排放总量的 10% 以上,处理率仅为 4.23%^[6]。而我国人均水资源占有量仅有 2400 m^3 ,为世界人均水量的 25%,居世界第 119 位,是全球 13 个贫水国之一^[11],矿区造成的水污染不仅造成了极大浪费,并使本来不丰富的水资源更加短缺,而且成为水质污染的主要来源。我国矿山开采排放的废气最高达 5414 万 m^3 ,仅煤矿行业排放废气量

每年在 3954m^3 以上^[6]。2003 年我国二氧化硫排放量达到 2120 万 t, 居世界第一, 酸雨影响区占国土面积的 30%^[3], 2005 年二氧化碳的排放量为 27.80 亿 t, 居世界第二^[13], 矿区废气的大量排放加剧了大气污染恶化的趋势。我国黑色金属矿山每年排放的废石尾矿约 6.2 亿 t, 有色金属矿山每年排出的废石尾矿达 11 500 万 t, 煤矸石约 1.3 亿 t。这些废石、尾矿的大量排放严重破坏了土地资源的自然生态环境, 不仅侵占大量土地, 破坏自然景观, 而且因其成分十分复杂, 含有多种有害成分甚至放射性物质, 污染了矿区和周围环境^[14]。

(3) 在社会影响方面。我国的矿区不仅是矿产赋存、生产和应用基地, 而且还具有社区的功能, 矿区是社会经济发展的一个基本单元, 这是由中国的国情所决定的^[15]。一个典型矿区中不仅具有矿业, 而且还有农林牧副渔等产业, 不仅有企业, 而且有由家庭和团体组成的村庄和城镇。矿区生态破坏与环境污染会影响到矿区社区群体的生存空间和发展机会, 造成不良的社会影响。矿区生态破坏与环境污染不仅量多面广, 而且还通过各种影响源在时间上以及空间上多种途径的相互叠加与交叉渗透的累积效应加大了危害程度和传播面, 成为影响我国国民经济发展和社会和谐的重大问题。矿区的生态破坏与环境污染具有很强的累积性, 一些在开采初期没有表征或是不易观察到的现象在表现出来之后, 其危害已经很严重了。因此, 欧洲地质调查联盟将“对矿观测”(MINEO)课题组形象地称之为“定时炸弹”(time bombs)^[16]。

以位于贵州西北部的赫章县妈姑镇为例, 当地人具有的传承了三百多年的祖传炼锌技艺, 加上当地的锌矿及煤炭资源丰富, 使得自 20 世纪 50 年代以来, 从国家到地方的各级政府都在妈姑镇及周边地区创办了不同级别的炼锌企业。20 世纪 80 年代开始, 在发展乡镇企业的口号下, “土法炼锌”一度得以大力倡导。赫章县粗锌产量一度居全国前五位, 占全国的 1/6 左右^[17]。由于缺乏环境保护意识和手段, 当地为此付出了沉重代价。土法炼锌不仅严重污染了土壤、地表水和地下水, 也造成了河道淤塞。该镇的河床平均抬高了 1m 多, 小河上的 5 座桥梁也因此先后被迫拆除改建。水体悬浮物、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、化学需氧量(COD)、铅、镉均超标。特别是镉污染给矿区人民的生产生活带来严重的危害。贵州省环境科学研究设计院通过对比 2006 年和 1988 年的监测数据分析表明: 采样点的土壤中镉含量与 1988 相比平均高 55 倍左右, 严重的采样点达到了 189 倍; 生活用水镉含量高出对照区 8 倍; 主要食物中镉含量水平平均高于对照区, 其中污染严重区域的大白菜高出对照区 15 倍, 市场销售的主要食物中镉含量水平也远高于对照区; 当地居民镉负荷远远高于对照区, 其中有些区域高出对照区达 8 倍之多。由于环境污染严重, 该地已成为癌症的高发区。该镇有关学校学生体检结果显示, 50% 的学生体内铅含量大大超过国家标准。1986~1996 年, 妈姑镇没有一个合格兵员, 应征青年的血液里, 铅、镉等重金属含量严重超标。据省环保部门测算, 要彻底治理妈姑镇的环境污染, 需要 3 亿~7 亿元巨资。而此前 50 年中, 妈姑镇炼锌上交的税收总共不到 5000 万元^[18,19]。

早在 1962 年, 可持续发展理论的奠基人、美国学者雷切尔·卡逊在其所著的《寂静的春天》一书中曾向人类发出警告: 人类要正视由于自身生产活动所导致的严重后果。矿产资源开发造成的一系列环境问题则是普遍存在的世界性难题, 不管是发达国家还是发展

中国，在矿区环境保护与治理重要性的认识上已达成广泛共识。英国地质调查局遥感中心主任 Stuart Marsh 在 MINEO 的项目报告^[20]中指出：当前欧洲地质调查工作的关键课题越来越倾向于如何管理采矿产生的废弃物而不是探索新的远景储量。对我国而言，作为一个拥有 13 亿多人口的发展中国家，没有发展就意味着没有保护环境的本钱和能力，经济社会的快速发展对矿产资源的需求扩张进而对矿区环境产生的压力是不可避免的。减缓这种压力，就对平衡矿业经济发展与矿区环境保护的关系所迫切需要的技术支撑体系提出了更高的要求。

1.1.3 矿区环境监测系统升级转型的需求与对策

环境监测是环境管理的耳目，是环境管理最基础、最基本的支撑力量。针对我国当前面临的环境压力与现状，2006 年第六次全国环境保护大会在总结我国多年环境管理经验和教训的基础上，提出了要建立先进的环境监测预警体系的要求。2009 年环境保护部在开展深入学习实践科学发展观活动中，进一步提出环境监测要实现从“传统到现代、从粗放到精准、从地面到天地一体化、从分散封闭到集成联动、从现状监视到预测预警的全面而深刻的历史性转型”的细化要求。《先进的环境监测预警体系建设纲要(2010~2020 年)》明确提出构建“天地一体的环境监测系统，和谐统一的环境监测格局”的建设任务。现有的矿区环境监测系统在数据获取、管理、分析与服务能力方面与实际的应用需求差距很大。环境监测系统升级转型的新要求为改变这一现状提供了发展的契机与指导方向。近年来，我国信息化和数字化进程的加快及以“3S”(RS、GIS、GPS)为主体构成的空间信息技术的不断进步为缩短这些差距提供了广阔的研究思路与进步空间，体现在以下几方面。

1. 对监测信息获取的升级作用

我国的矿区一般处于边远农村地区，由于与矿业经济发展相匹配的环保管理体制没跟上，国家没有专项费用用于农村的环保设施建设和环保投入，公益性环境监测力量薄弱。此外，相当一部分矿山企业既无环保机构，也无环保专职人员，还有一部分矿山即使设立环保机构，大多也因重视程度不够或者资金、技术、人员素质不到位，使得矿区环境监测项目少、频次低，发挥作用非常有限。遥感技术在监测时间的可选择性、监测范围的完整性以及监测内容的富集程度等多方面具有综合优势，对常规的矿区环境监测信息获取具有改进和补充作用。

(1) 在环境信息获取的内容上，遥感影像是地表状况的缩影，同一幅图像可能包含着土、水、气、植被等多种环境要素的叠加信息，并且详细、全面、客观地记录矿区地表物体的形态、结构、空间关系和特征，能够比较清晰地表达各种生态破坏与环境污染的分布及其源汇关系。遥感技术 50 年来的发展历史表明，空间分辨率以约 13 年为一个循环周期在不断提高，促进了可监测项目的增加以及监测精度的提高。特别是 21 世纪以来，随着遥感技术的快速发展及其商业数据销售的一些限制相继解除，高分辨率遥感技术已成为矿区环境信息获取的重要载体。针对矿区开采对地表破坏的遥感监测研究实验^[21]表明，

QuickBird 的融合数据最小监测面积可达 18m^2 , 而空间分辨率为 2.5m 的 SPOT-5 的融合数据最小监测面积也可达 312m^2 , 可为矿区地表环境破坏及污染源的细分类制图与变化分析提供可靠的数据源。主动微波遥感在记录电磁波的振幅信号的同时提供了相位信息, 通过数次同侧观测得到数据, 计算出针对地面每一点的相位差, 进而计算每一点的高程, 可监测环境目标在三维方向的变化情况。高光谱影像因含有较细致且丰富的光谱信息 (AVIRIS 空载成像光谱仪具有 224 个连续波段), 可充分反映环境目标所特有的理化性状, 提供更为丰富的环境信息。因此, 遥感技术在精确获取一些地表环境指标方面是常规手段无法比拟和完成的, 能够弥补一些监测项目的缺失, 比常规方法具有优越性。

在环境污染一些指标项目的监测方面, 遥感监测的精度虽然不能达到常规监测的精度水平, 但是所能获取的定性或半定量污染监测结果能满足环境分析宏观层面上的信息需求, 对于地处偏僻的、监测资源不充足的矿区而言, 在一定程度上具有弥补的作用。

(2) 在环境信息获取的空间覆盖上, 遥感影像覆盖面积大, 覆盖范围全, 可完成大面积同步监测。单景 SPOT 影像可覆盖约 $60\text{km} \times 60\text{km}$ 区域, 获取一景影像就能完整地反映整个矿区和附近地表的全貌。遥感技术用高空鸟瞰的形式进行探测, 可以跨越交通的阻隔和视野的限制, 能覆盖地面调查难以达到的禁区或死角。微波遥感能透过植被、冰雪和干沙土获得近地面以下的信息, 能够监测受植被、冰雪和风沙遮蔽等不利条件影响的区域。因此, 遥感监测的覆盖范围比常规手段更全面。

(3) 在环境信息获取的时间序列上, 遥感具有较好的时效性且便于重复观测和历史回溯, 能满足矿区环境监测时间的可选择性。遥感卫星重访周期短 (如 SPOT-5 能在每 5 天内重访同一地点), 微波遥感可在夜间工作, 不受云、雨、雾的影响, 具备全天候、全天时的监测能力, 无人机航空遥感在人为选择获取时间上的机动灵活性, 能够保证监测信息获取的时效性。一个矿业基地的生命周期一般是几十年, 通过多期影像可实现对同一环境监测目标进行多次重复观测, 进而获取环境变化信息, 通过收集过去的遥感图像能够弥补矿区环境历史状况记录缺失从而为分析环境损益及未来变化趋势提供本底数据。

NASA 在介绍对地观测一号遥感卫星 “TERRA” 的意义时采取比喻: “如果把地球比作一位从来没有做过健康检查的中年人的话, TERRA 就是科学家对具有 45 亿年历史的地球的健康状况第一次进行全面检查和综合诊断的科学工具”^[22]。矿区环境遥感监测的意义则更像国家为体现尊重和爱护劳动模范而定期进行组织身体健康体检一样, 体现出了对为国民经济做出突出贡献而又承载尖锐复杂环境压力的矿区的生态补偿与环境伦理关怀, 也使得环境监测这一公益性技术资源产生的服务趋向更加合理地均等化。

2. 对监测信息管理的升级作用

环境遥感监测这门新技术正处于发展状态, 也有一定的局限性。以水环境监测为例, 由于水的光学透射波长带很窄, 仅为 $0.005\mu\text{m}$, 这给遥感在区分水中化学物质时造成困难, 对 COD、DO、重金属等水质项目精确监测尚未成熟^[23]。对于 “水能不能达到饮用水的标准, 土壤和植物是否会对人体健康带来危害” 之类的精确问题运用遥感技术目前还难以回答。因此, 常规监测数据仍然是矿区监测系统必不可少的监测信息来源。不同监测方

法、不同监测时间和不同部门获取矿区环境监测数据具有载体与存在形式多样性,包括:①以数字图像格式存储的遥感数据、数字栅格图像(digital raster graphic, DRG);②以 GIS 图层存储的遥感提取监测信息以及矿权、矿规、地形、矿产地质、土地利用等辅助分析资料;③以纸质媒介或电子表格形式保存的污染物质排放以及各种资源因子(水体、大气、土地、植物等)受污染情况的监测数据;④实地调查中获取的记录表格、图片、视频等多媒体数据。所有这些多源异构的监测数据的割裂、松散、封闭的落后保存状态,给数据的组织、管理与联用带来了很大困难,成为了构建“天地一体”的矿区环境监测系统的瓶颈问题。

数字矿区的核心是在统一时间坐标与空间框架科学、合理地组织各类矿山信息,将海量异质的矿山信息资源进行全面、高效和有效的管理和整合^[24]。考虑到这些数据都与空间位置信息紧密相关,利用 GPS 和 GIS 充当遥感监测信息与常规监测信息融合的媒介,将 GPS 定位的地面污染监测和地面调查数据转成集成文本与多媒体属性信息的点图层,与遥感和 GIS 数据建立统一的坐标系统,把多源异构监测数据纳入统一管理平台并实现整合信息的整体性、层次性和结构性。对象关系空间数据库以及三维可视化等 GIS 数据管理的新技术日益成熟,进一步为在开矿前、开矿中、闭矿后各个监测时段,分布在地质环境监测、政府或企业环保等多个部门的监测数据进行一体化管理与优化整合提供了集成手段。构建完整的数据库满足了各种实际应用需求并为建立数字矿山信息基础设施^[25,26]储备了充足的信息资源。

3. 对监测信息处理的升级作用

环境监测数据要实际应用于各个方面,仅靠孤立的数据是远远不够的,而应在获取数据的基础上,进一步进行加工、整理、综合概括等信息处理得到环境监测结果^[23]。矿区监测信息处理涉及综合分析、误差分析、时序分析、预警分析等多类复杂的模型。这些模型的计算参数多、计算量大而且过程繁多,传统的计算方法对于研究人员来说是个比较大的工作负担。而矿区环境监测由于人手、人员业务水平和工作量失衡,往往对监测数据分析提炼不够,要么直接提供原始数据,要么为了减轻数据处理负担而减少监测项目,直接影响了矿区环境监测效果。

因此,有必要开发通用的环境监测分析模型程序以减轻研究人员在处理和解释数据时的工作负担。同时,由于这些模型之间往往相互联系、互为补充,要完成特定的监测分析任务往往要组合使用这些程序,因此有机集成这些模型程序开发集成化的监测分析软件工具平台更有利于让研究人员在实际工作中逾越这道鸿沟。GIS 作为各类数据源和各类模型融合的公共载体,其应用可贯穿矿区环境监测的数据管理、处理与呈现的全过程,采用 GIS 集成矿区环境监测分析模型实现监测分析软件工具平台,主要的优势在于:①GIS 管理的矿区环境遥感监测和常规监测的一体化数据库可以直接为集成的分析模型提供参数,提高模型运行效率与操作的便捷性;②GIS 本身具有的空间量算和空间分析功能与监测分析模型互为补充,这使得监测数据处理功能更加强大;③GIS 对数据可视化与制图输出的功能使得监测分析结果表达更加直观,更有利于监测分析结果的理解与传播。

遥感、GIS在矿区环境监测分析领域应用的发展在很大程度上将取决于环境应用模型的结合与应用程度^[27]。随着“数字地球”的提出和实施,要求针对不同的应用领域,建立相应的模型库,其基础就是模型与GIS的结合^[28]。因此,利用GIS融合矿区环境监测的各类数据源和各类分析模型,在满足专业应用需求集成的同时,能够推动GIS与数字矿区等研究领域自身的发展。

4. 在监测信息的服务转型方面

监测数据的获取、管理与处理能力的不足,使得政府、公众、企业和环境科研部门对环境信息掌握极不对称,应用面与服务范围很窄,这与各种应用群体对矿区环境信息的广泛需求不相适应,主要体现在以下3方面。

(1)企业无论要完成开矿前生态环境保护工程设计,开矿中环境保护与控制,还是闭矿后生态环境恢复、植被重建及土地复垦生态工程的各项任务都离不开环境信息。此外,尾矿、废弃土地等矿区二次资源、矿业旅游资源开发利用及其他后续产业多元化发展的规划、管理、经营过程都需要环境信息作为保障。

(2)环境科学本身是涉及十几个细分学科的交叉学科,环境问题研究需要这些细分学科人员的参与。同时,矿区环境问题综合性和复杂性还需要国土资源、生物学、园林工程以及经济学、法学和社会学等多学科领域专家的研究与指导。各科研群体进行并行或交叉研究都需要获取与所要研究专题相关的环境信息及其他背景信息。特别是矿区环境承载力、生态系统管理、生态系统健康等前沿研究领域从系统高度进行矿区环境治理,更需要有充足的、多学科的综合信息作为研究支撑。

(3)矿区环境状况与当地社会群体的生产生活密切相关,矿区公众对环境信息知情权意愿强烈。需要开发容易理解和获取途径方便的信息系统来满足他们对环境信息的诉求,并达到最好的公众参与监督效果。

通过空间信息技术实现对矿区环境监测数据的获取、管理与处理等技术环节升级产生的快速信息流,为满足不同层次需求提供信息基础。进一步采用3D GIS、WebGIS先进集成技术以及先进触摸屏、网络等现代化信息传播工具方便获取、理解以及共享协作,能够最大限度地满足各类群体对矿区环境监测的多元化信息需求,达成监测效益最大化的目的。同时,能广泛调动对矿区环境问题的反馈、监督以及资源贡献,进一步扩充、积累和完善必要的信息资源,扩充获取环境信息的渠道,同时促进矿区监测系统本身的完善和发展。

从压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)链式关系的视角对我国矿区环境的压力、现状及矿区环境监测系统升级转型的需求与对策等三个方面的分析可见,过多的历史欠账以及当前经济社会快速发展使得我国矿区环境面临前所未有的压力,已成为了制约环境保护的难点问题和影响群众健康的重点问题,矿区环境监测是提高对矿区环境问题的重视程度以及作为减缓压力、改变现状的恢复治理措施、管理决策的最前端响应支撑,空间信息技术为矿区环境监测系统的全面构建与升级转型提供了广阔的研究空间。

为此,在充分顾及矿区自身的环境特征及其对技术特殊需求的基础上,借助GIS、RS

和监测模型三者的结合,以现代空间新技术集成技术体系与服务创新为研究手段,围绕矿区环境监测系统在信息获取、集成、处理的升级以及综合服务转型这一新要求,开展基于空间信息技术的矿区环境监测分析与信息资源开发利用研究,对平衡当前矿区开发与保护所迫切需要的矿区环境监测体系建设具有实际应用价值,对开展环境监测系统的升级转型以及数字矿区构建等前沿科学技术命题的研究具有重要理论与实际意义。

1.2 矿区环境遥感监测国内外研究综述

1.2.1 矿区环境高分辨率遥感监测研究现状与趋势

在英美等发达国家,矿区环境监测遥感技术应用起步较早。19世纪60年代,美国密歇根大学和加州理工学院首先采用航空影像热红外影像数据对地下煤火进行监测^[29,30]。美国土地保护部矿山处在1969年利用遥感技术对煤矿开采产生的煤矸石堆进行动态监测,以防止煤矸石堆发生爆炸,同时对煤矿区土地复垦效果进行遥感动态监测,为土地复垦管理提供了客观的资料,提高了资源环境管理部门的执法力度^[31,32]。1974年,英国纽卡斯尔大学研究人员利用1971年拍摄的航空影像热红外影像数据对新西兰Wingen附近火山的煤火进行监测^[33]。

美国于20世纪70年代在气象卫星的基础上研制并发射了分辨率为80m的第一代试验型地球资源卫星(Landsat-1、2、3),80年代发射的分辨率为30m的第二代试验型地球资源卫星(Landsat-4和5),为早期的矿区环境卫星遥感监测研究提供数据条件。1994年,苏格兰邓迪大学的Mansor和Cracknell^[34]采用Landsat-5 TM和NOAA-9 AVHRR卫星数据对当时印度唯一一个家用燃煤主产区Jharia的地下煤火进行监测试验研究,并且通过与航空对外数据反演以及实地测量的温度对比评估结果表明:Landsat-5 TM短波红外数据波段3、波段5可以用来推断火区的位置,分辨率较粗的波段6可以实现对监测调查的区划,同时也显示NOAA-9 AVHRR数据的波段3具有探测地下煤火位置的潜力。1997年,印度Roorkee大学的Prakash和Gupta^[35]利用Landsat TM数据不同波段组合分别对印度Jharia矿区地表和地下的煤火进行综合监测,研究结果表明:TM卫星数据能够同时用于地面和地表煤火区划,可作为煤火区制定灭火措施和环境管理计划的有效工具。1999年,Prakash等^[36]在荷兰ITC“中国煤火监测与灭火应对系统的设计与实现”项目的资助下,采用3个时相的夜间拍摄Landsat-5 TM的热红外数据对位于中国西北地区的宁夏汝箕沟煤矿进行煤火动态监测,获取1989年、1995年、1997年三个时相煤火的分布以及扩展和蔓延情况,将监测结果叠加数字高程模型(digital elevation model, DEM)高程分级图以及空间分辨率为5.8m的IRS-1C用于直观显示包括煤火区的地形走向以及主要的道路和水源等重要信息,为制定经济、便捷的灭火作战计划提供决策依据。

在国内,最早的矿区环境监测研究工作同样是基于航空影像的热红外数据,监测目标集中在煤矿(矸石)自燃现象和矿山环境的热污染两个方面。1984~1986年,康高峰^[37]通过陕北神木侏罗纪煤田航空遥感地质调查试验研究,研究了一套圈定煤层地下自燃造成的

死火区与活火区的方法, 1989 年利用普通黑白航空影像对神府煤田新矿区煤层自燃造成的烧变岩分布区进行了圈定, 取得了较好效果。1993 年, 盛业华等^[38]以航空遥感热红外和彩红外图像为基本信息源, 采用目视解译和等密度分割方法, 以及影像的拉伸变换和合成技术, 结合地面实测辐射温度数据, 在 S600 系统的支持下获得了陕西铜川矿区大气污染分布、影响范围、扩散方式及主要污染源等重要数据。1994 年, 盛业华等^[39]以山西省晋城市航空热红外图像为基础数据, 通过扫描方法获取了两个时相图像像元值按辐射能量进行图像量化的信息, 建立了地面同步辐射温度测量数据与图像像元值的线性关系, 并得到了城市的地面热场强度与大气污染的关系。1994 年, 盛业华和郭达志^[40]利用地物光谱测试数据、少量常规大气监测数据及彩红外航空像片, 建立了地物光谱数据与大气质量综合指数相关关系的模型, 并利用遥感数据对晋城矿区的大气环境质量进行了定性的分析。

航空遥感和卫星遥感所获得的信息形象直观, 能客观地反映矿区景物的形态、结构和空间关系, 能综合反映大气、水体、土壤、植被等多种环境信息^[41]。因此, 我国学者开始逐步地尝试将监测目标扩展到矿区建筑物分类、塌陷区分类、土地利用分类、水体污染分级、植被分类、地表坍塌、岩溶陷落柱、固体废弃物等多个方面。1993 年, 盛业华等^[42]以山西省晋城市航空彩红外图像、地形图为基础数据, 结合野外实地调查数据, 采用目视解译方法, 成功地制作了晋城市建筑分布图, 并进一步对建筑物进行了分类并对各类建筑的面积进行了统计, 计算了各类建筑总面积及其人均占有量, 对该市建筑物现状进行了评价。1993 年, 郭志达等^[43]以遥感彩红外图像、热红外图像为基础数据, 利用辐射能量大小与物体的性质、表面粗糙度、温度等因素的关系, 获取了反映山西晋城矿区陷落柱可能存在的位置, 进一步综合物探手段对陷落柱进行探测数据并利用 PC-ARC/INFO 复合分析功能, 绘制了矿区陷落柱的分布情况图, 并对矿区陷落柱做了定性和定量的分析。1994 年, 郭志达等^[44]以开滦范各庄矿航空像片和彩红外图像为基础数据, 通过目视解译和投影转绘方法, 定性和定量地提取了矿区四类不同塌陷区的图斑, 并绘制出了反映矿区塌陷情况的专题图。2002 年, 雷利卿等^[45]以山东肥城矿区两期 TM 遥感影像为基础数据, 通过不同波段融合技术、主成分分析方法和影像增强对遥感影像进行预处理, 采用目视解译的方法, 提取了矿区受污染植被和水的两期信息, 并对解译结果做了定性和定量的分析。陈龙乾等^[46-49]采用 TM 影像对徐州矿区土地利用变化进行遥感监测。杜培军等^[50-53]以工矿区陆面演变遥感动态监测为研究目标, 针对图像运算、图像变换、分类统计、模型分析 4 个层次的遥感动态监测应用体系做了大量研究工作。

20 世纪, 遥感技术应用于矿区环境监测积累了丰富的经验, 但主要集中于航空遥感和 Landsat-5 TM 等中等空间分辨率的卫星遥感。然而, 由于矿山地物除大型尾矿库、露天石灰岩矿和大型固体废弃物占地面积大, 可在中等分辨率的遥感图像上有清晰显示外, 其他环境要素多为弱目标信息, 很难从混杂的区域背景中区分出来, 非高分辨率卫星图像都难以发现和提取细节信息, 对于环境精准监测和规模化实施受制于卫星数据源分辨率低的瓶颈。随着“冷战”的结束, 20 世纪 90 年代后俄罗斯和美国克林顿政府相继解除对高分辨率卫星遥感影像数据商业销售的一些限制。1999 年 9 月 IKONOS 卫星发射成功使得商业数据的分辨率从 10m (SPOT-4) 跳跃性地提高到 1m, 揭开了 21 世纪高分辨率商业遥感大发