



矿区生态风险 评估与防范研究

王仰麟 常 青 谢苗苗 吴健生 彭 建/著

Ecological Risk Assessment and
Prevention in Mining Areas



科学出版社



矿区生态风险 评估与防范研究

王仰麟 常 青 谢苗苗 吴健生 彭建 著



Ecological Risk Assessment and
Prevention in Mining Areas

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以保障矿区土地生态安全为目标,基于景观生态、土地复垦以及环境管理等理论,面向可持续土地管理开展适应我国国情的矿区生态风险识别、分类、评估与防范研究。

本书既有一定的理论知识,又具较强的实用性,可作为资源环境、土地资源管理、土地利用工程、矿产资源管理等专业及其相近、相关专业的本科生和研究生学习参考书,也可供广大从事土地资源与土地整治、资源环境、矿产资源管理等专业的科研工作者等参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

矿区生态风险评估与防范研究 / 王仰麟等著. —北京: 科学出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-03-048715-5

I. ①矿… II. ①王… III. ①矿区环境保护-环境生态评价-研究 IV. ①X322

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 129212 号

责任编辑: 林 剑 / 责任校对: 邹慧卿
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 320 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

王仰麟 (1963-), 男, 汉族, 陕西合阳人, 理学博士, 北京大学城市与环境学院教授, 博士研究生导师。长期从事综合自然地理学、景观生态学与区域可持续发展等领域研究; 主持国家自然科学基金重点项目 2 项、面上项目 2 项、国家科技支撑计划课题及任务 2 项、国土资源部公益性行业科研专项课题 1 项、“973” 课题子项目 1 项, 承担省部级科研项目 20 余项; 在国内外重要学术期刊发表论文百余篇; 获省部级以上科技奖励 4 次。

常青 (1978-), 女, 汉族, 内蒙古丰镇人, 理学博士, 中国农业大学观赏园艺与园林系副教授, 硕士研究生导师, 美国密西根州立大学访问学者。主要从事景观生态与土地利用、景观复育与效益评估、韧性城乡生态规划设计等领域研究。主持或参加国家自然科学基金、国土资源部公益性行业科研专项、地方委托科研项目多项; 发表学术论文 20 余篇, 参编《景观生态工程》等著作。

谢苗苗 (1982-), 女, 汉族, 河北保定人, 理学博士, 中国地质大学 (北京) 土地科学技术学院副教授, 硕士研究生导师, 奥地利萨尔茨堡大学访问学者, 任 Society of Urban Ecology 中国分会理事, 国际期刊 *Change and Adaptation in Socio-Ecological Systems* 编委。主要从事景观生态学与生态重建方面的研究; 主持国家自然科学基金、中欧生物多样性项目等多项科研课题, 发表学术论文 20 余篇, 参编《土地利用工程学》等多部著作。

吴健生 (1965-), 男, 汉族, 湖南人, 理学博士, 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院教授, 博士研究生导师, 任中国生态学会景观生态专业委员会理事, 国际景观生态学会中国分会理事。长期从事遥感与 GIS、景观生态与土地利用、数字城市与城市安全等领域教学及科研工作; 主持或参加国家自然科学基金项目、国土资源部公益性行业科研专项、国家科技支撑计划课题及任务、深圳市科技创新项目等科研项目多项; 发表学术论文 60 余篇, 参编著作 2 部; 获得省部级科技奖励 7 项。

彭建 (1976-), 男, 汉族, 四川彭州人, 理学博士, 北京大学城市与环境学院副教授。主要从事景观生态与土地利用研究; 主持国家自然科学基金 3 项、地方委托科研项目多项; 发表相关学术论文 60 余篇。

前 言

我国矿产资源丰富，是世界矿业大国。矿产资源的开采与利用有效地促进了我国社会经济的快速发展，但同时也不可避免地带来了自然资源耗竭、生态系统退化、环境污染及地质灾害等矿区资源环境问题，直接威胁到区域生态安全与可持续发展。受矿藏位置不可选择性的影响，矿区生态环境保护及生态风险规避显得尤为重要。生态风险评估和防范在欧美等国家（地区）矿区土地复垦与环境管理中地位突出，是矿业开采区域解决资源环境问题的决策基础，并已在法律层面得到认可。开展矿区生态风险评估与防范研究，既是生态风险研究的重要趋势，也是符合我国矿区生态环境保护与可持续发展的实践需求。

为了满足矿区生态风险管理的需要，作者基于多年来已开展的矿区生态风险识别、分类、评估与防范研究成果，编著《矿区生态风险评估与防范研究》一书。全书共分为6章。第1章绪论和第2章矿区生态风险研究体系，以矿区土地复垦与生态环境治理为目标，基于景观生态、土地复垦以及环境风险管理等多学科理论，结合国内外生态风险研究成果，构建面向可持续土地管理的矿区生态风险评估与防范研究体系与技术框架。第3章矿区生态风险识别与分类，针对我国矿区的主要生态环境问题，综合多种信息源、技术与管理手段，提出矿区土地损毁生态风险的识别流程与分类体系，设定生态风险识别指标与流程。第4章矿区生态风险评估，在矿区生态风险识别与分类的基础上，围绕生态脆弱性、景观生态风险及综合生态风险建立多层次、多指标的评估模型，构建基于土地损毁的矿区综合生态风险评价技术体系。第5章矿区生态风险防范和第6章全国矿区生态风险类型与防范，结合我国矿区的分布特点以及土地复垦、管理目标，提出我国矿区生态风险防范技术体系；并针对典型矿区构建生态风险过程防范与分级防范模式，最终形成我国矿区生态风险评估与防范框架与技术体系。

本书主要完成人包括王仰麟、常青、谢苗苗、吴健生、彭建。各章主要完成人员如下：第1章，王仰麟、常青、刘丹、张月朋；第2章，王仰麟、常青、潘雅婧；第3章，王仰麟、刘小茜、韩忆楠、宋治清、谢苗苗、彭建；第4章，常青、吴健生、彭建、李雪、宗敏丽、乔娜；第5章和第6章，谢苗苗、孙琦、马萧、高云、张泽民、郑悦。全书由常青统稿、编排和校核。

本书既有一定的理论知识，又有较强的实用性，可作为高等院校矿产资源管

理、土地资源管理、资源环境等专业的本科生和研究生的学习参考书，也可供广大从事矿产资源、土地资源与资源环境管理专业的工作者参考阅读。

本书中的部分阶段成果已在国内外刊物上先行发表，还有部分成果没有公开发表，我们以此作为承担国土资源部公益性行业科研专项（200911015-2）的部分成果，不妥之处，请各位同行和读者批评指正。

作 者

2016 年 3 月

目 录

1	绪论	1
1.1	从矿区生态环境问题到矿区生态风险管理	1
1.2	矿区生态风险研究进展	2
1.3	矿区生态风险研究目的与意义	12
2	矿区生态风险研究体系	14
2.1	矿区生态风险的特殊性与研究视角	14
2.2	矿区生态风险研究体系	18
3	矿区生态风险识别与分类	22
3.1	采矿对生态系统的影响	22
3.2	矿区生态风险识别方法	24
3.3	矿区生态风险识别	27
3.4	矿区生态风险分类	37
4	矿区生态风险评估	42
4.1	矿区生态风险评估概述	42
4.2	矿区生态脆弱性评估及案例	46
4.3	矿区景观生态风险评估及案例	56
4.4	矿区土地损毁生态风险评估及案例	67
5	矿区生态风险防范	89
5.1	矿区生态风险防范内涵	89
5.2	矿区生态环境问题防治与区域生态风险防范的启示	92
5.3	矿区生态风险防范理论框架	102
5.4	矿区生态风险多层次防范途径	105
5.5	矿区生态风险过程防范与分级防范	129
6	全国矿区生态风险类型与防范	137
6.1	矿区基本情况	137
6.2	矿产聚集区生态风险要素分析	155

6.3 矿区生态风险识别与分区防范	178
6.4 特定矿区生态风险防范技术	190
参考文献	202
附表	215
索引	235

1 绪 论

1.1 从矿区生态环境问题到矿区生态风险管理

中国是矿产资源大国（周锦华等，2007）。矿产资源是我国国民经济发展的重要支柱。目前，我国95%以上的能源、80%以上的工业原料、70%以上的农业生产资料都来自矿产资源（阎敬等，1999；王广成和闫旭骞，2006）。矿产资源的开采利用，在促进我国社会经济快速发展的同时，不可避免地引发了一系列的生态环境问题（彭建等，2005；常青等，2012）。

由于矿产资源分布特征及其不可移动性的限制，矿业生产往往限定在特定区域内进行，地表或地下挖损是矿产资源开发的第一步。长期大量的地表及地下挖掘活动已对矿区土地资源产生严重破坏。据统计，目前我国因矿产资源开发而损毁的土地资源约2亿亩^①，每年还在以数十万公顷的速度在毁坏（刘立艳，2012）。其中，沉陷地面积已累计达1200万亩，并且每一年新增约60万亩；矸石山堆放总量超过60亿t，占地105万亩以上^②，这些被损毁的土地中40%~60%是耕地^③。我国人多地少，人均耕地只有0.11hm²。大量可利用土地资源的损毁与占用，使得我国人地矛盾更加尖锐。加之我国矿区多位于生态脆弱区或敏感区（白中科等，1999），长期土地损毁不仅直接改变了区域生态系统中光、热、水、气、土等结构要素，破坏了动植物区系，强烈干扰甚至打破区域生态平衡，进而引发诸如土壤退化与污染、大气及水环境污染、水土流失、土地荒漠化等生态环境问题（王玉平等，2002；李秋元等，2002；徐友宁等，2007，2008；翟丽梅等，2008；朱丽和秦富仓，2008；常青等，2012；姚峰等，2013），危及当地居民的人身安全、健康及生存质量。

① 1亩≈666.7m²。数据来源于：中国土地矿产法律事务中心2010年编写的《低碳发展与土地复垦政策法律研究报告》。

② 2014北京国际土地复垦与生态修复研讨会中国工程院院士、煤矿生态环境保护国家工程实验室主任袁亮发言稿。

③ 2014北京国际土地复垦与生态修复研讨会国土资源部耕地保护司副司长刘仁英发言稿。

这些矿区生态环境问题也曾发生于世界发达国家。20 世纪 70 年代,环境风险管理在欧美各国发展迅速,并已成为保障人群健康与生态系统安全的重要手段(周平和蒙吉军,2009)。从 20 世纪末期,欧美、澳大利亚等发达国家(地区)开始在矿产资源开发与生产过程中引入生态风险管理手段,并将其作为矿业开采区域生态系统管理的重要工具,且具有法律条例依据(付在毅和许学工,2001)。矿区风险管理的核心是对探矿、施工和开采到最终关闭整个过程中可能产生的环境影响进行研究,有针对性地提出相应措施帮助采矿公司尽可能地减少采矿施工、作业和报废过程中所造成的环境影响(邵霞珍,2005)。

作为一门年轻、不断发展的实用技术,中国矿区生态风险研究工作正处于起步阶段。在中国现行的生态环境管理体制中,对污染物的生态风险控制还没有具体的、可操作的规定。

生态风险评价在建设项目管理中的应用往往仅限于具体个例(王仰麟等,2011)。在中国现行的《土地复垦条例》中,虽然要求编制土地复垦方案并纳入采矿许可和用地审批中,土地复垦方案要求必须进行土地损毁预测,但对于土地损毁引发的潜在生态环境问题发生风险并没有明确规定。党的十八大提出,“节约资源和保护环境是我国的基本国策”,要把资源消耗、环境损害和生态效益纳入经济社会发展评价体系,坚持预防为主、综合治理,从源头上扭转生态环境恶化趋势,解决损耗群众健康的环境问题。这进一步明确了矿区生态风险研究工作的重要性和必要性。矿区生态环境、土地复垦管理工作及相关基础研究要从事后的恢复和治理向事前风险预防转变,最大限度地减少矿业开发对原生生态系统的扰动,避免生态系统向不可逆转生态系统状态的转化。

因此,加强矿区生态风险研究,分析适合中国国情的矿区生态风险评估技术与防范体系,对于提升矿区土地复垦效果、促进矿区生态环境管理工作具有重要意义,是保障未来矿区生态安全,提高矿区可持续发展能力的当务之急。

1.2 矿区生态风险研究进展

1.2.1 基本内涵

生态风险是一定区域内由外界自然变化或人类活动引起的生态系统结构、功能与生态过程,甚至生态系统稳定性和可持续性的可能损伤或不利影响(付在毅和许学工,2001;殷贺等,2009;张思锋和刘晗梦,2010)。

作为以矿山生产作业区为核心的一个相对独立区域,矿区的辐射范围包

括矿山职工及矿区农民所在地，甚至包括依托矿业演替而形成的乡镇、县市及工业小区（李晋川和白中科，2000）。结合矿区特点与生态风险概念，矿区生态风险可理解为“由矿业生产活动直接或间接引发该区域内生态系统发生不利变化的可能性”（常青等，2012）。这些不利变化包括对矿区内各类生态系统结构与功能上的损伤或影响，其发生与发展过程会威胁到矿区甚至外围更大区域内的人类及其他生物的生存和发展。

1.2.2 研究概况

1.2.2.1 发展概况与地位

通过在数据库 Web of Science（包含 SCI，SSCI，CPCI，BP 和 DII 等）中以“ecological risk”为主题词进行期刊论文检索，截至 2015 年 2 月，相关文献已达 8150 篇。其中来自中国地区（不含台湾省）的有 2902 篇，占总数的 35.6%。在中国知识基础设施工程（China National Knowledge Infrastructure, CNKI）数据库中，以“生态风险”为主题词进行检索，截至 2015 年 2 月，相关的期刊论文共有 13808 篇文献，其中来自核心期刊的有 8381 篇，占总数的 60.7%。通过分析以上论文数量的年际变化发现，国内外生态风险研究相关论文数量自 1980 年以来一直保持逐年增加趋势，尤其从 20 世纪 90 年代开始增长幅度十分明显（图 1-1），这表明生态风险研究已十分活跃。但我国生态风险研究起步相对较晚，基本于 90 年代末期起步，2000 年以后才有较为迅速的发展，相关论文研究成果数量增长明显。

在 Web of Science 数据库中，以“ecological risk”为主题词，检索与“min-”或者“mining”或者“mine”相关的期刊论文，截至 2015 年 2 月有 226 篇，其中来自中国地区的有 141 篇，所占比重为 62.4%。在 CNKI 数据库中，以“生态风险”主题词，检索与矿区相关论文，截至 2015 年 2 月，共检索到文献 524 篇。总体来看，国外矿区生态风险研究占国外生态风险研究的 1.6%，而中国矿区生态风险研究论文的比例已超过国外，占到 3.8%（图 1-1）。

进一步统计分析矿区生态风险相关文献显示，国外矿区生态风险研究始于 20 世纪 90 年代，而我国矿区生态风险研究始于 90 年代末期，并于 2004 年开始明显超过国外，呈逐年增加的趋势（图 1-2）。进一步对我国矿区生态风险文献数量进行统计，以四年为一个时间段，发现 1999～2002 年这一时期内发表论文数仅占总量的 3%，2003～2006 年、2007～2010 年发表论文数分别占到 8% 和 32%，2011～2014 年发表论文数量比例增长至 57%（图 1-2），可见国内矿区生态风险研究成果主要集中在近五年。

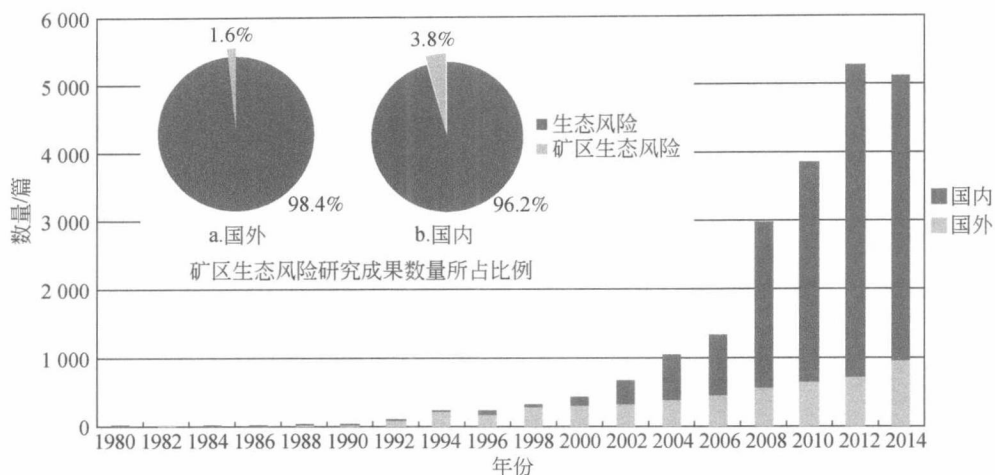


图 1-1 生态风险研究成果数量年代分布

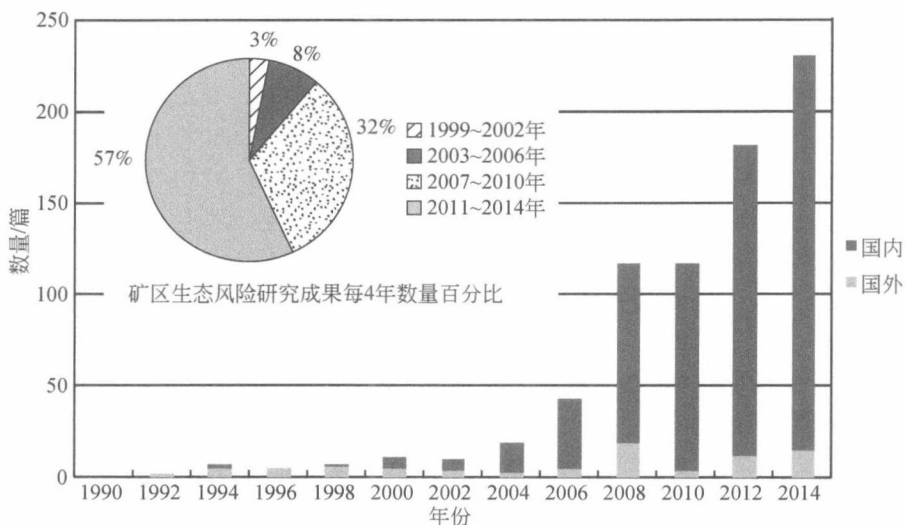


图 1-2 矿区生态风险研究成果数量年代分布

1.2.2.2 研究领域及相关学科

利用文献分析法对以上文献的关键词进行分类统计, 结果发现国内外生态风险研究涉及的热点包括“自然保护区”“城市”“森林/草地”“河流/湖泊”“生态脆弱区”以及“矿区”(图 1-3)。其中, 研究比重处于前三位的有河流、湖泊

等水环境 (45%)、城市 (24%) 及森林、草地等植被环境 (14%)，而矿区生态风险研究占到 11%。进一步分析矿区生态风险的研究领域发现，金属矿和煤矿的生态风险研究占绝对优势，分别为 64% 和 23%，两者共占矿区生态风险研究文献总数的 87%；而稀土与其他矿产等生态风险研究比例分别为 5% 和 8%，均不足 10% (图 1-3)。可见，目前矿区生态风险研究的热点区域仍是金属矿和煤矿。

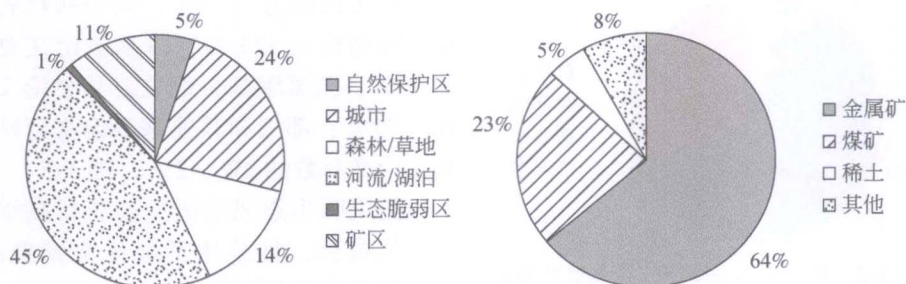


图 1-3 生态风险研究领域的关键词统计

利用文献分析方法对以上文献涉及的相关学科进行分类统计，发现国外矿区生态风险研究涉及学科比例较为均衡。国外文献发表以“ecological risk”为主题词并与“min-”或者“mining”或者“mine”相关的论文，涉及学科比例最高的为“Environmental sciences & Ecology”，比例达到 34%；其次为“Engineering”和“Toxicology”，两者比例分别为 13% 和 11%， “Mining & Mineral Processing”比例约 7% (图 1-4)。国内发表文献与矿区生态风险有关的论文涉及学科比例最高的为“环境科学与资源利用”，其比例占到 53%；其次为矿业工程 (21%)，

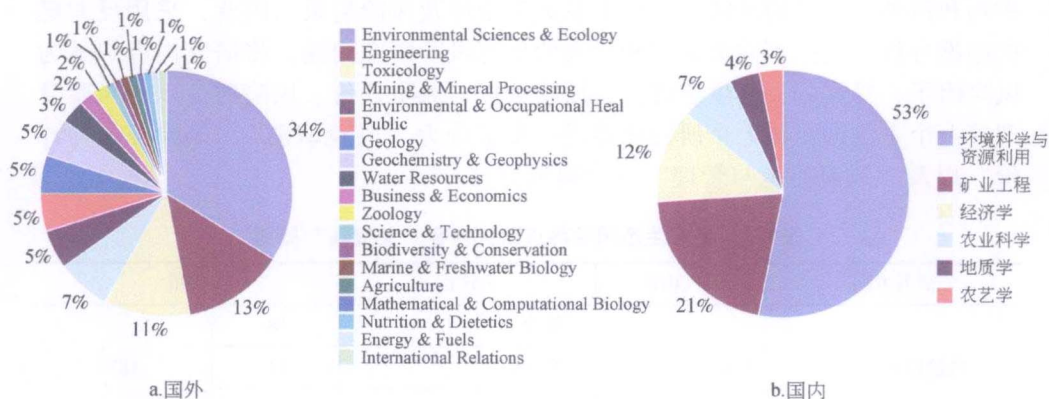
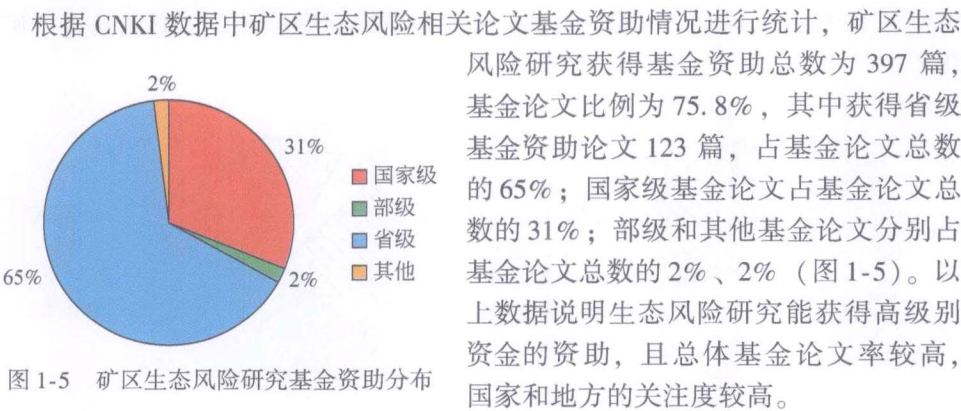


图 1-4 矿区生态风险研究成果涉及的学科

两者占到总数的 74%，因此说明国内生态风险研究相对集中于环境科学和矿业工程领域，仍未形成多学科交叉、平衡发展的综合研究体系。

1.2.2.3 科研资助来源



1.2.3 热点方向

根据文献数据库中检索到的相关论文的关键词，梳理矿区生态风险研究的热点方向。具体来讲，将检索的矿区生态风险相关论文导入 Endnote 文献分析软件中，提取其关键词。经关键词出现次数统计发现，重金属、煤矸石、分布及来源、土壤、沉积物和污染等关键词出现频率较高（表 1-1），其中重金属、煤矸石、分布及来源等关键词综合反映了矿区生态风险源研究及特征，土壤、沉积物和污染等关键词反映了矿区生态风险受体及风险后果。因此，采用反向层次递推分析，根据不同关键词所代表的生态风险研究内涵，将研究内容归纳为风险因子、暴露分析、生态终点、风险分析、风险评价、风险防范以及风险管理等七个主题词；将七个研究内容进一步整合为“风险识别”“风险分析与评价”以及“风险防范与管理”三个研究方向。

表 1-1 矿区生态风险热点研究内容“关键词”概览

研究方向	研究内容	关键词	数量	
风险识别	风险因子	重金属	88	187
		煤矸石	11	
		矿区	25	

续表

研究方向	研究内容	关键词	数量	
风险识别	风险因子	铅锌锰矿	13	187
		煤矿	14	
		粉煤灰	5	
		分布	11	
		来源	14	
		源解析	6	
	暴露分析	土壤	23	38
		沉积物	15	
	生态终点	土壤污染	8	20
		污染	12	
风险分析与评价	风险分析	潜在生态风险	16	20
		风险	4	
	风险评价	GIS	8	80
		生态风险评价	30	
		评价	21	
		潜在生态风险评价	14	
风险防范与管理	风险防范	景观格局	3	3
		生态修复	6	
	风险管理	充填复垦	4	10

经关键词数量统计，矿区生态风险识别相关研究比例占到 68%（图 1-6），说明目前矿区生态风险研究主要集中在风险因子、暴露分析、生态终点的定性识别分析方面，其中与风险因子有关的关键词数量占到 52%。以风险分析与评价为代表的定量研究数量约为 28%，而风险防范与管理实践相关研究数量只有 4%。可见，目前矿区生态风险研究热点主要集中在“风险识别”和“风险分析与评价”方面，风险防范与管理研究相对较弱。

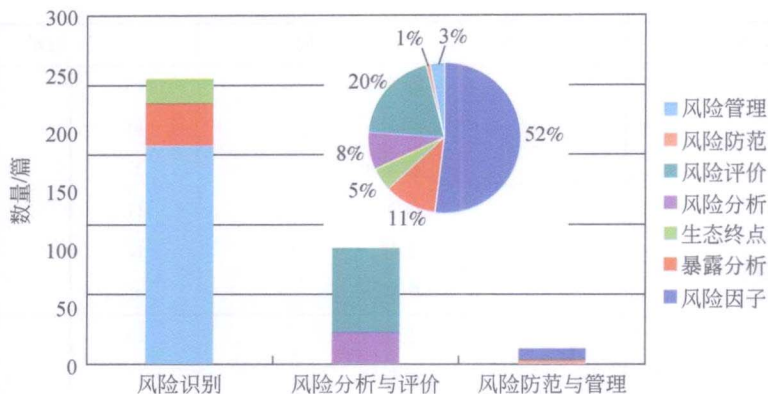


图 1-6 不同矿区生态风险研究方向成果数量

1.2.3.1 矿区生态风险识别

(1) 生态风险识别研究现状

生态风险识别是在进行评价前,认识并确定区域内存在的危险源,查找、列举和描述风险事件、风险源、风险后果等风险要素的过程,包括风险源识别、风险受体识别、暴露—响应过程识别和生态终点识别(孙洪波等,2009;王仰麟等,2011;韩忆楠等,2013)。

在国内外生态风险研究中,风险识别通常作为风险评价体系和方法的一个或几个环节,很少单独提出进行研究(韩忆楠等,2013)。例如,Hunsaker等(1990)提出的区域生态评价概念模型中,将风险评价总结为五个环节,虽然没有明确提出风险识别的概念,但其中“终点选取”和“风险源的定性和定量描述”两个环节即属于风险识别内容。PETAR(procedure for ecological tiered assessment of risks)方法中提出“三级风险评价”:初级评价(即定性评价)、半定量评价和局地定量评价,其中“初级评价”即是对风险源、风险受体和评价区域的识别(Rosana and Sverker, 2004)。同样,Landis构建的相对风险评价模型所包含的9项内容中,也并未提出“识别”的概念,而是将区域选择、划分和风险源、受体与评价终点等风险识别内容直接融合到风险评价模型中(Landis, 2005)。

国内学者也通常将风险识别作为生态风险评价的前期准备工作。例如,付在毅等(2001)在辽河三角洲湿地生态风险评价研究中,进行风险受体识别、生态终点识别、风险源识别以及暴露和危害分析,构建生态风险评价模型;姚兰(2010)针对洞庭湖区域生态环境风险,将环境风险因子识别与风险评价指标选

取相结合；但他们均未明确界定生态风险识别的具体概念。焦锋（2011）提出了较为具体的风险识别概念模型以及构建方法，采用加权打分法来对驱动力、风险源、风险因子和评价终点进行分析，确定其危害强度，但这一方法极易与风险评价相混淆。

由此可见，生态风险识别被认为是生态风险研究的第一步，对于生态风险评价以及后期的风险管理极为关键。然而，目前风险识别在生态风险研究中通常被作为风险评价的前期准备工作，或直接融入风险评价过程中，对于风险识别的内涵尚缺乏共识的界定，单独的风险识别仍缺乏系统性研究。

（2）矿区生态风险识别研究的紧迫性

目前，针对矿区生态系统而言，对单一生态风险源的研究目前已趋于成熟和完善，且研究多围绕风险的治理和防范这一重心进行，如重金属污染的监测和治理、采矿塌陷区的监测和治理、边坡的修复技术等。对矿区单一风险源的识别以风险源的空间定位和定量监测为主，而综合性的生态风险识别研究仍然较少，并多以生态风险定性分析（马喜君等，2006）为主。高铁军等（2005）在采矿塌陷区进行风险识别时，将塌陷区修复中可能遇到的风险进行分类和分析，以此作为风险识别的研究内容。常青等（2012）针对矿区土地破坏生态风险构建了风险因果链作为风险评价的基础，并探讨了风险源、风险受体和生态终点的选取和定量表征方法，在矿区生态风险综合识别与评价方面做出了有益的拓展。

因此，矿区生态风险识别内容往往体现在单一风险源的识别中，仍缺乏系统性和针对性。而进行科学、有效的风险识别是开展矿区风险研究的基础，对矿区风险评价研究至关重要。同时，由于自身生态环境的脆弱性、矿业生产过程的复杂性和特殊性，矿区生态风险识别往往包含多种风险源、风险受体，比单一环境中的风险识别更为复杂，因此提高对多风险源的综合风险识别的关注度和研究力度非常必要。加之目前生态风险识别缺乏系统、独立的研究体系，进一步凸显了矿区生态风险识别研究的紧迫性。

1.2.3.2 矿区生态风险评价

矿区生态风险评价旨在一定的地域范围内，描述和评估矿业活动对生态系统结构、功能乃至生态过程产生的不利作用的可能性和大小。目前开展的矿区生态风险评价研究，主要包括单一生态风险评价和综合生态风险评价两个方面，特别是煤矿区和土壤重金属污染分别是两者关注的热点。