



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

张建民 等 著

Authored by Zhang Jianmin et al.

中国地下煤火 研究与治理

**Underground Coal Fires in China:
Origin, Detection, Fire-Fighting,
and Prevention**

煤炭工业出版社

CHINA COAL INDUSTRY PUBLISHING HOUSE

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国地下煤火研究与治理

UNDERGROUND COAL FIRES IN CHINA:
ORIGIN, DETECTION, FIRE - FIGHTING, AND PREVENTION

著 者 张建民 管海晏 曹代勇 余明高 陈维民
文 虎 蔡忠勇 王 梅 郇中丹 张辛亥
邬剑明 杨 波 相亚玲 王 军 张润泉
马 洁
总审定 张建民

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

中国地下煤火研究与治理/张建民等著. —北京: 煤炭工业出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-5020-3260-9

I. 中… II. 张… III. 煤田-内因火灾-治理-研究-中国 IV. TD76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 002643 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京盛兰兄弟印刷装订有限公司 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 35¹/₄ 插页 8
字数 809 千字 印数 1—2,000
2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
社内编号 6064 定价 100.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

地下煤火主要指煤层自然形成的煤田火和矿井火。本书系统地总结了我国近 50 余年来的地下煤火研究与治理方面的进步和成果,阐明了地下煤火研究的地质研究方法、各种探测与监测方法、煤火专题信息提取方法、煤火信息集成与三维可视化技术等;通过对地下煤火调查、预防和治理方面的大量典型案例的研究分析,提出了适用于我国地下煤火环境条件的探测技术体系和治理方法,首次建立了地下煤火研究与治理技术体系,地下煤火三维时空发展模型、煤火反演和三维成像方法、煤火三维可视化技术具有较高的理论水平和实用价值。

本书适合于从事煤炭资源开发、煤火治理、矿井火防治的工程技术人员、科研人员及高校师生参考,也可作为政府有关部门、社会公益界组织与人士、企业管理人员了解煤火问题的重要参考书。

Synopsis

Underground coal fire means the fire caused by spontaneous combustion of coal seam, including the coalfield fire and the mine fire here. The book systematically sums up the progress and results on research and fire-fighting on the underground coal fire in recent nearly 50 years. It elaborates specially on the geological techniques for coal fire research and investigation, diversified methods for coal fire detection and monitoring, the data processing method for the extraction of coal fire features, the data integration about coal fire information and 3D modeling technology for coal fire visualization, and so on. Through introduction of typical cases in the detection, prevention and treatment of both coalfield fire and mine fire, it puts forward the technology system for coal fire detection and treatment methods in the prevention and fire-fighting, applicable to the environmental conditions and the management of underground coal fire in China. It establishes the first technological supporting system in coal fire research and management, in which the 3D space-time model describing coal fire development, 3D inversion and imaging method, 3D visualization technology, certainly contributes to the theory research and fire-fighting practices of underground coal fire.

The book has important functions for opening up horizons and enhancing the role of thinking in coal fire circle. It will be a valuable reference to improve the coal fire understanding, either for researchers, teachers and students, who are interested in coal fire, and engineers engaging the prevention and treatment of underground coal fire, also for the public sector, social welfare sector organizations and the people, enterprise managers.



序

地下煤火是由于煤炭自燃而产生的一种特殊自然灾害，在中国、美国、澳大利亚、印度、印度尼西亚等国家普遍存在。在我国，伴随煤炭资源的大规模开发，地下煤火已经成为涉及煤炭资源保护、安全生产管理和生态环境保护的重大灾害之一，特别是煤炭资源大规模开发产生的地下煤火，将给后人留下无穷的后患。

地下煤火是全球共同面临的灾害问题，也是我国煤炭资源可持续发展中面临的难题。地下煤火的研究一直受到国际组织、我国政府和国内外同行的高度重视，并被列为国家和行业的科技攻关重点，也取得了一批科研成果。本书正是基于作者在地下煤火方面的长期研究和治理实践，吸收国际煤火研究的最新成果，围绕我国地下煤火治理和预防的实践需要，以煤火研究、治理和预防为主线，通过我国重点地区的地下煤火研究与治理实践，全面系统地论述了地下煤火形成过程、地下煤火的探测、地下煤火信息的认识、地下煤火的治理方法，突出了地下煤火的地质成因、探测方法、治理技术、信息管理技术等内容，提出了一系列适用于我国地下煤火探测与监测、煤田火区治理和矿井火防治的方法，初步形成具有中国特色的地下煤火研究与应用技术体系。这表明人类对地下煤火的认识和治理水平有了进一步提高，也为中国乃至世界各国的地下煤火及环境的有效治理提供了科学方法和宝贵的实践经验，必将进一步推动中国地下煤火的治理进程。

《中国地下煤火研究与治理》是我国煤火研究与治理实践的重要里程碑，对于世界煤火的研究和实践也具有积极的贡献。它不仅是第一部中国地下煤火的研究与应用方面的专著，也是世界上第一部系统研究煤火问题的专著。愿该书的面世使世人对于我国煤火和世界煤火问题有一个全面的了解，对我国从事煤炭资源开发、灾害研究的广大科技工作者有所裨益，对实现我国煤炭可持续发展战略目标、保护资源和人类生存环境有所贡献。

中国工程院院士

韩德馨

2008年6月11日于北京



Preface

This monograph, the first about coal fires in China, is the culmination of over 10 years of collaborative research between Chinese scientists and engineers with researchers and organizations from abroad. The contents contained herein deals with the detection and data interpretation and processing necessary to develop a successful fire-fighting plan, while preventing future fires. As such, the material presented will be useful to anyone wishing to learn about coal fires in China and the efforts put forth at both local and national levels by China and her citizens to combat and prevent such fires from occurring.

China is the world's largest coal-producing nation, and about three-fourths of China's total energy consumption is from coal. The proliferation of coal fires is correlative with ever-increasing coal-mining activities in response to industrialization. In addition to destroying a valuable natural resource in China, toxic fumes from coal fires are responsible for respiratory illnesses and other human diseases such as fluorine, arsenic, and carbon monoxide poisoning, all of these frequently resulting in death. Toxic gas and particulate matter from coal fires produce water, air, and soil pollution while destroying floral and faunal habitats as well as people's homes and businesses. They are also responsible for dangerous subsidence, leaving roads and rail lines inoperable. Consequently, the focus of this monograph is important because by developing a successful fire-fighting plan and preventing future fires, China's valuable energy resource is preserved and the health of humans, flora, fauna, and the environment in general are all preserved.

The book is divided into six parts. The first presents geologic research about underground coal fires. Topics include spontaneous combustion, influences on coal fires, models of coal fires, and the classification of underground fires. The second part is devoted to detection methodologies for coal fires including geological and geophysical. Part three presents imaging and data processing methods for studying coal fires including flammability analysis, remote sensing, magnetic and conduction data, and 3D thermal imaging. The fourth part considers 3D visualization methods supported by Geographic Information Systems (GIS) data. Part five, is devoted to the detection and monitoring of underground coal fires both overseas and in China. Part six, examines fire-fighting technologies as well as fire prevention.



The publication of this monograph is financially supported by the Chinese National Fund for the Monograph of Science and Technology and the China Shenhua Energy Company Ltd., both headquartered in Beijing. Commissioned by the author, I thank the organizations and individuals who made contributions to coal-fires research and fire-fighting in China and the world over. They include (alphabetically):

Government and Personal Support for Research:

European Economic Cooperation (EEC), Brussels, Belgium

Former Coal Industry Ministry, Beijing, China

Ministry of Land Resources (MLR), Beijing, China

Ministry of Science and Technology (MOST), Beijing, China

Science and Education Ministry, Berlin, Germany

State Administration of Coal Mine Safety, Beijing, China

State Development Planning Commission (SDPC), Beijing, China

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France

Chen Shupeng, Academician of the Chinese Academy of Science, Institute of Remote Sensing Application (IRSA), Chinese Academy of Science, Beijing, China

Fan Weitang, Academician of the Chinese Academy of Engineering; former President of the China National Coal Association (CNCA), Beijing, China

Fu Jianhua, State Administration of Coal Mine Safety, Beijing, China

Glenn B. Stracher, Division of Science and Mathematics, East Georgia College, Swainsboro, Georgia, USA

Gu dazhao, General Manager, Research and Development, Shenhua Group, Beijing, China

Han Dexin, Academician of the Chinese Academy of Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing) (CUMTB), Beijing, China

Li Dong, Vice General Manager, Shenhua Group, Beijing, China

Ling Wen, President, China Shenhua Energy Company Ltd., Beijing, China

Ning Shunian, China University of Mining and Technology, Beijing, China

Shao Liqin, The National Remote Sensing Center of China (NRSCC), Beijing, China

Xu Guanhua, Academician of the Chinese Academy of Science; former Minister of Ministry of Science & Technology, China

Zhang Xiwu, General Manager, Shenhua Group, Beijing, China

Collaborating Scientists and Engineers:

Andries Rosema, Environmental Remote Sensing Company (ERSC), Delft, the Netherlands

Anupma Prakash, Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, USA

Christian Buhrow, U. Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany

Hartwig Gielisch, Deutsche Montan Technologie GmbH, Am Technologiepark 1, Essen, Germany

Horst Rueter, HarbourDom GmbH, Köln, Germany

Jhon van Genderen, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, the Netherlands

Li Jing, Beijing Normal University, Beijing, China

Stefan Schlomer, Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover, Germany

Stefan Voigt, Remote Sensing Data Center, German Aerospace Center (DLR), Wessling, Germany

Ulrich Krause, Federal Institute for Material and Testing, Berlin, Germany

Zhou Xinquan, College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, China

Contributing Organizations in China:

Aerial Geologic Remote Sensing (AGRS), National Geological Investigation Bureau, Beijing, China

Aerophotogrammetry and Remote Sensing Bureau, Xi'an, China

Beijing Normal University, Beijing, China

China Coal Research Institute, Beijing, China

China National Administration of Coal Geology, Beijing, China

China University of Mining and Technology, Beijing, China

Coal Fire Fighting Department of the Xinjiang Uygue Autonomous Region, Urumuqi, China

Henan Polytechnic University, Jiaozuo, China

Shendong Mining Company, China Shenhua Energy Company Ltd., Yulin, China

Shenhua Group Company, Beijing, China

Shenhua Ningxia Coal Company, Yinchuan, China

Shenhua Remote Sensing Exploration Company, Beijing, China

Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China

The National Remote Sensing Center of China, Beijing, China

Wuda Mining Company, Shenhua Group, Wuhai, China

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China

Contributing Organizations in Other Countries:

Deutsche Montan Technologie GmbH, Am Technologiepark 1, Essen, Germany

Environmental Remote Sensing Company, Delft, the Netherlands

Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover, Germany

Freiberg University of Mining Technology, Freiberg, Germany

German Aerospace Center, Wessling, Germany

Institute of Applied Geosciences, Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Utrecht, the Netherlands

International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, the Netherlands

Micromine Pty Ltd., Nedlands, Australia

I hope that this monograph will be of value to people the world over concerned with all aspects of coal fires, and I welcome correspondence from all such individuals.

Glenn B. Stracher

Professor Dr. Glenn B. Stracher

Chair and JTPC Representative

Coal Geology Division, Geological Soc. America

Division of Science and Mathematics

East Georgia College, Swainsboro, Georgia, USA

E-mail: stracher@ega.edu

前言

地下煤火是煤田开发和利用中存在的一种发生灾害,目前在中国、印度、美国、俄罗斯、澳大利亚、印度尼西亚等国家和地区普遍存在。中国北方地区的煤炭资源十分丰富,是中国主要的煤炭开发与综合利用基地,为中国的经济发展和社会进步作出了巨大贡献。然而,由于大部分煤层很厚,赋存很浅,处于干旱和半干旱的环境中,煤层极易氧化自燃,形成大面积煤田火区和矿井火。随着煤田大规模开发,煤层的大面积揭露,煤田火区也迅速发展。据估计每年直接烧失煤炭储量超过 2000 万吨,间接破坏煤炭资源 2 亿吨,并且直接危害煤矿的安全生产。地下煤火已成为涉及资源保护、生态环境、经济发展、人口的问题,也是困扰中国煤炭资源持续开发与矿区可持续发展的重要问题。

世界环境与发展大会(1992 年)后,地下煤火已经成为各国政府和国际组织关注的突出问题之一。中国政府也十分重视,并将中国北方煤田火区及其相关的环境治理问题列入“中国 21 世纪议程”(1994 年)。由于中国地下煤火的普遍性和在世界上的特殊性,中国地下煤火的研究一直受到中国政府和行业的高度重视,多次将地下煤火的研究列为国家和行业的科技攻关重点。这也引起国外的高度关注。近 20 年来,由我国煤炭企业、科研院所与高等院校相结合的科技队伍联合进行攻关,取得了一大批理论研究与实践方面的科研成果,对我国地下煤火的治理发挥了重要的推动作用。

(一)

国外有关煤田火区遥感调查方法研究始于 20 世纪 40 年代。中国地下煤火的研究始于 20 世纪 50 年代,“七五”~“十五”期间,相继在山西、陕西、内蒙古、新疆、宁夏等地开展了系统的调查与研究。

“七五”期间,由中国煤田地质总局开展的山西省西山矿区煤田火区调查、陕西省神府地区烧变岩调查,拉开了我国煤矿区开展系统的煤火调查的序曲;“八五”期间,主要针对煤田火区研究与探测技术开展了合作研究,也取得了初步的成果。中国与欧共体合作开展的“中国新疆地区煤田火区环境监测与治理”项目是以中国科技部与欧共体科技合作的形式,由中国煤田地质总局航测遥感局(ARSC)与荷兰国际航天遥感与地球科学学院(ITC)合作承担,重点完成了地面、航空、航天遥感调查和方法试验,开发了新疆地区煤田火区的基础数据库,初步建立了煤田火区的认识模型和区域调查方法技术体系;“九五”期间,重点在典型煤田的成因、高精度综合探测方法与灭火工程方法等方面开展了研究,也取得了积极的进展。中国与荷兰政府合作开展的“中国宁夏汝箕沟煤田火区环境监测与治理”项目是由北京市国土资源遥感公司(BRSC)、宁夏煤炭厅灭火工程处与荷兰环境遥感公司(EARS)、荷兰地质调查局(NITG)、荷兰国际航天遥感与地球科学学院(ITC)合作承担。主要完成了地下、地面、航空、航天四层空间遥感同步试验,煤

田火区燃烧中心、燃烧带、燃烧区的系列研究, 灭火工程及火区环境治理试验, 初步开发了基于 GIS 的煤田火区动态监测系统 (CoalMan) 软件, 进一步提高了对煤层自燃倾向性、地下煤火的起因、发展过程和地质环境条件的认识水平, 初步建立了煤田火区探测方法技术体系和火区治理方法, 促进了煤田火区的治理; “十五” 期间, 以超大规模煤田地下煤火的防御体系为目标, 结合新疆、宁夏、内蒙古等矿区的特点, 对各种地下煤火的成因机理、高精度探测技术、三维可视化技术、数据采集与集成技术、治理技术等问题进行综合研究。863 计划项目“地下煤层自燃遥感与地球物理探测关键技术”项目针对地下煤火治理与防治的需求, 选择我国北方地区煤田火区环境条件复杂、煤火严重、采用综采工艺的内蒙乌达矿区作为试验区, 充分利用高分辨率遥感与地球物理技术、3D-GIS 技术、地质建模技术、三维可视化技术等, 围绕地下煤火的高精度探测关键技术, 重点研究地下煤火的地质条件和采空区煤火条件、煤火数据采集和信息提取方法、三维建模和反演方法、基于 3D-GIS 的煤火动态监测系统方案等新内容, 从技术适用和现场实用角度提出了面向地下煤火的预警和防治的技术支持体系和适用的解决方案。中国与德国政府开展的“中国地下煤火的探测、灭火与监测新技术”国际科技合作项目, 也引入了高精度测量方法, 进行了详细的煤火探测方法研究。

在煤田火区治理方面, 我国相继在新疆、宁夏汝箕沟煤田、内蒙古拉本矿区、内蒙古乌达矿区开展了灭火工程和火区治理工作, 逐步取得实质性进展和实效。矿井防灭火技术研究与应用也取得重大突破, 防灭火新材料、防治新方法研究都取得了实质性的进展, 显示了较强的使用价值和工程效果。特别是通过“十五”期间的科研攻关和防灭火工程实践, 人们对地下煤火的成因和发展有了比较系统的认识, 同时提出了适用于区域调查、煤田火区调查和火区监测的高分辨率地下煤火探测技术体系, 这些成果总体技术水平达到了 21 世纪初的国际先进水平。

近 20 年来, 我国地下煤火的研究与技术应用经历了由个体到群体、由初级到高级、由案例到系统研究与实践的几个重要阶段, 目前已积累了大量的研究成果和资料, 并取得了具有世界先进水平的技术创新。在探测技术方面已初步形成地下煤火的形成机理、高精度探测方法、三维 GIS 应用技术等为主要内容的方法技术体系。在地下煤火的治理方面已在成因机理、防治方法、预测预报等方面取得重要的理论研究与成功实践的成果, 地下煤火治理技术水平有了较大的提高。目前, 已经基本具备了建立我国地下煤火应用技术体系的基础。针对我国煤田普遍发生的地下煤火灾害和煤炭资源快速开发中遗留的潜在地下煤火隐患, 基于现代科技成果和应用技术, 建立具有中国特色的地下煤火研究、探测和动态监测、火区治理的方法技术体系是十分必要的。

(二)

《中国地下煤火研究与治理》全面系统地论述了中国地下煤火的研究方法与治理技术, 是在作者长期研究与实践和系统总结与提升基础上形成的具有特色的第一部中国地下煤火研究专著。本专著具有以下主要特点:

(1) 将地下煤火理论与方法研究和大量的工程实践相结合, 研究了地下煤火的地质学问题, 地下煤火的地质、遥感、地球物理和地球化学探测方法、矿井火探测方法、专题信息提

取与预测方法,基于三维 GIS 的地下煤火数据集成方法与可视化技术,地下煤火的防灭火工艺和治理技术,创建了国内外第一个地下煤火研究与应用方面完整和独立的技术体系。

(2) 加强了地下煤火相关的理论研究与关键技术创新,特别是世界煤火学术界关注的地下煤火三维时空地质模型、三维反演理论、信息提取技术(电导、磁导、热导、气体追溯)等理论与方法热点,煤火工程界关注的高精度探测与动态监测技术、矿井生产与安全三维可视化信息管理系统、矿井灭火方法和工艺等实用技术,进一步拓展了专著的认识的深度和实践的广度。

(3) 围绕中国地下煤火治理的实践需要,有机地集成了地下煤火的地质模型、探测技术、信息分析、信息管理与可视化、预测方法、防灭火工艺与治理方法等,结合中国地下煤火探测与治理和管理的典型案例实践,初步建立了地下煤火的探测与监测、防灭火工程应用体系,提高了专著的实用性。

(4) 围绕地下煤火基本问题,在体系结构上以煤火研究、治理和防治为主线,综合了煤田火区的形成过程、地下煤火探测、地下煤火信息认识、地下煤火治理方法、地下煤火治理等内容,重点突出了地下煤火的形成机理、动态发展模型、高精度探测方法、三维成像方法、三维可视化技术和近代矿井防灭火方法新进展和重要案例等,形成了整体技术结构协调、应用特色显著的结构。

(三)

《中国地下煤火的研究与治理》是由张建民教授提出并总体构思,在国内外煤火研究与治理方面的有关专家支持下完成的。其中执笔者分别为(以篇章为序):前言:张建民;第一章:张建民、曹代勇、马洁;第二章、第三章:曹代勇、樊新杰;第四章、第五章:曹代勇、管海晏;第六章、第七章:张建民;第八章:曹代勇、管海晏;第九章:杨波、张建民;第十章:张建民;第十一章:张建民、邬剑明、余明高;第十二章:张建民、Rosema;第十三章:杨波、张建民;第十四章:管海晏、张建民;第十五章、第十六章:张建民;第十七章:郇中丹、张建民;第十八章:张建民、郇中丹;第十九章:余明高、张建民;第二十章~第二十三章:王梅、张建民;第二十四章:张建民、马洁;第二十五章、第二十六章:张建民、蔡忠勇、王军、相亚玲;第二十七章:管海晏、张建民;第二十八章:张建民;第二十九章:文虎、张辛亥;第三十章:张建民、王军、蔡忠勇、张润泉、马贵来等;第三十一章:张辛亥、文虎;第三十二章:余明高、张建民;第三十三章:陈维民;结束语:张建民;全书插图编辑:相亚玲。全书由张建民总审定。

《中国地下煤火研究与治理》作为第一部系统地阐述地下煤火问题专著,涉及了地下煤火的理论和方法技术的诸多方面,由于水平有限,若有不足之处,希望得到读者们的指正和帮助,不断发展和完善。未来几十年内,煤炭资源仍然是我国经济发展的主要能源,地下煤火则是伴随资源开发过程中产生的必然问题。我们希望《中国地下煤火研究与治理》的出版,不仅能为中国煤火工作者提供一部研究与实践中可借鉴成果,同时也为中国乃至世界煤火研究与治理实践有所贡献。

张建民

2008年6月于北京



图 1-2-3 美国宾夕法尼亚州火区及其环境影响

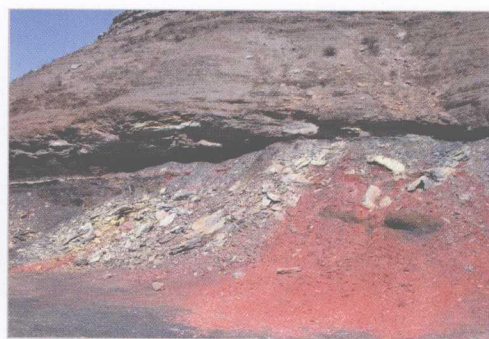


图 2-3-4 乌达矿区高硫煤露头自然发火



图 1-3-2 新疆地区典型火区景观

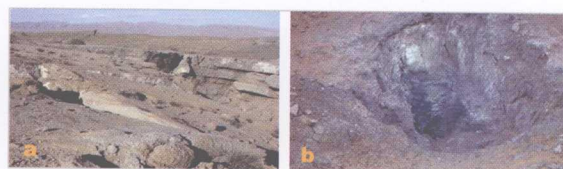


a 典型的构造燃烧裂隙
b 受构造裂隙控制的塌陷
c 卫星影像显示的节理型燃烧裂隙

图 3-2-3 与构造裂隙有关的燃烧裂隙和塌陷裂隙



图 1-3-3 宁夏汝箕沟煤田典型火区景观



a 大矿采空区 b 小煤窑

图 3-2-4 与大矿采空区和小煤窑有关的地表塌陷



图 3-3-1 煤层自燃造成的地面塌陷和裂隙



图 1-3-4 内蒙古乌达煤田火区景观



a 夏季景观 b 冬季景观
图 3-3-2 煤田火区烟气排放景观



a 正常区 b 燃烧区 c 燃烧区与远处非燃烧区植被差异
图 3-3-4 火区植被与远处绿色植被对照



a 芒硝和硫磺 b 硫磺和煤焦油
图 3-3-3 煤燃烧生成的硫磺、芒硝和煤焦油



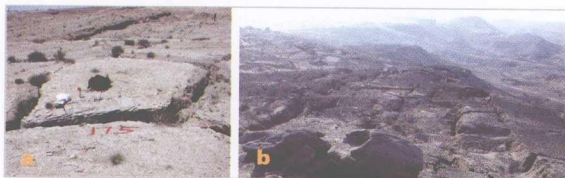
图 4-4-1 芒硝和硫磺析出的燃烧点



图 4-3-2 乌达地下煤火发展的十二个燃烧递进期景观现象



图 4-4-2 发火点形成的燃烧线



a 龟裂状燃烧裂隙 b 裂隙交错型燃烧系统

图 4-4-3 裂隙交错形成的燃烧面

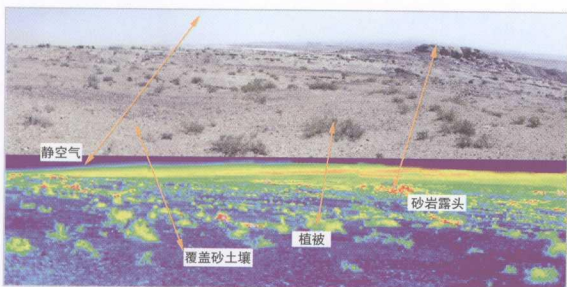


图 6-1-8 乌达矿区 10 号火区地表不同岩性的热辐射特征图
(测量时间: 2005 年 10 月 2 日 9:00)

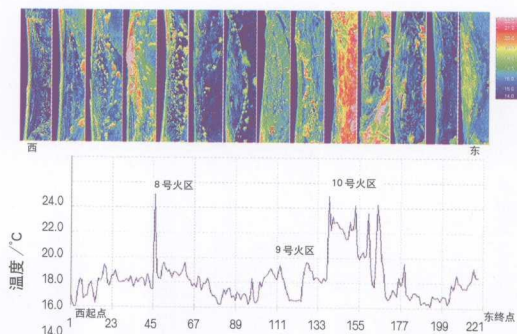


图 9-3-2 乌达矿区火区研究基准剖面热红外成像和温度异常分布



图 10-1-2 近地表土壤接触式测量方法示意图

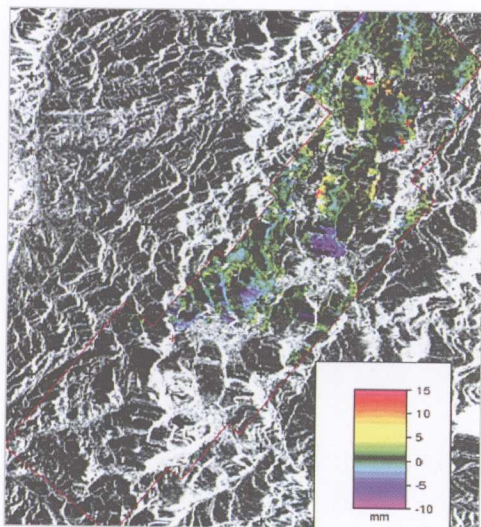


图 9-1-2 宁夏汝箕沟煤田基于 InSAR 方法的地面沉降
(1995-1996 年)分析影像
(A.Prakash et al.,2001)

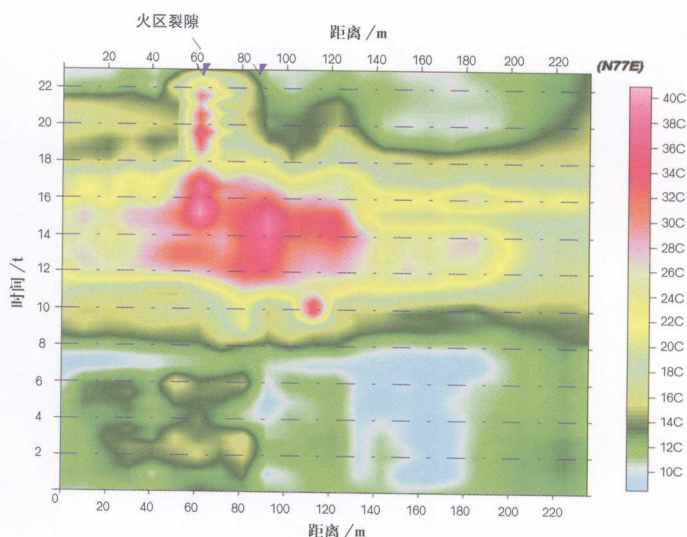


图 10-1-4 汝箕沟煤田大峰矿区黑头寨火区热红外测量温度日变纵剖面图

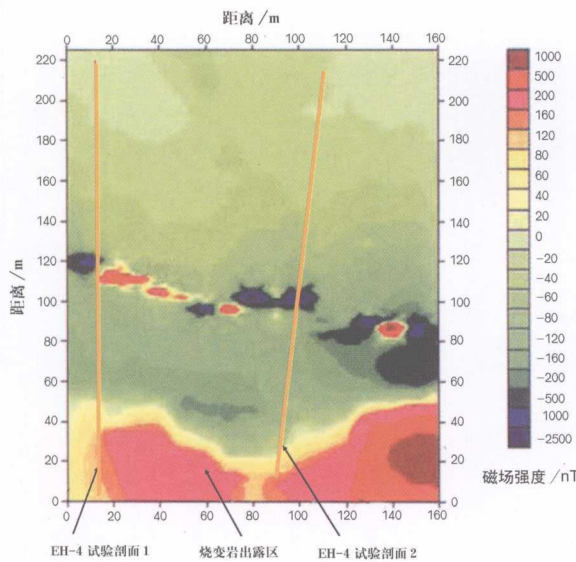


图 10-2-1 汝箕沟煤田大峰井试验区高精度
磁场强度等值线图

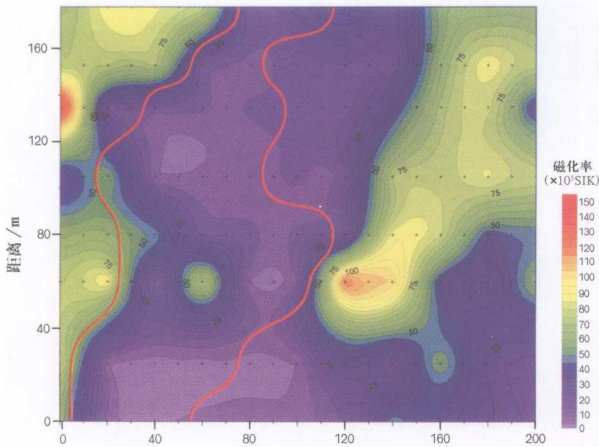


图 10-2-3 内蒙乌达矿区 8 号火区地表磁化率测量
结果图 (AGRS, 2006)

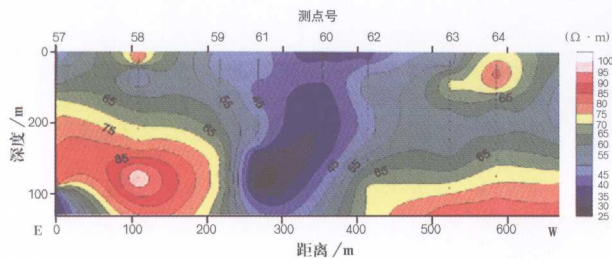


图 10-3-3 内蒙古乌达 8 号火区航空地球物理 TEM
视电阻率剖面图

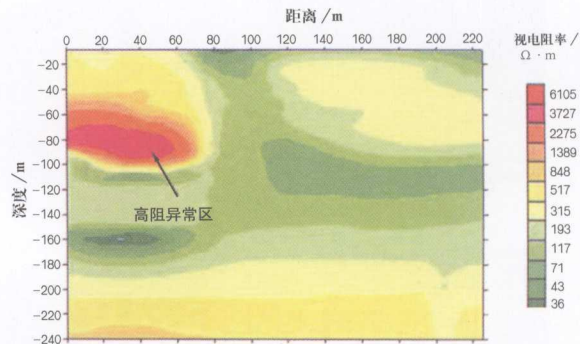


图 10-3-5 宁夏汝箕沟煤田北三火区 B 段
视电阻率剖面图



图 10-4-3 内蒙古乌达矿区 8 号火区有害气体现场测量

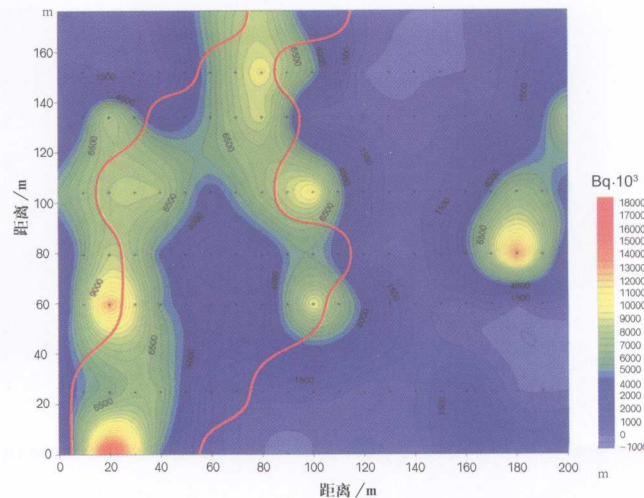


图 10-4-10 内蒙古乌达矿区 8 号火区地表氧气浓度图
(AGRS, 2006)

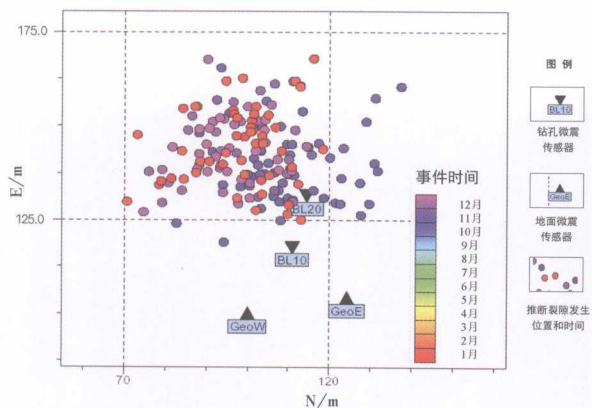


图 10-5-6 乌达矿区实验点微震测量裂隙发生位置与时间

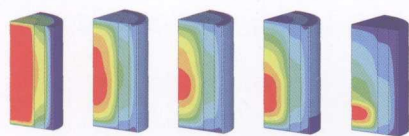


图 12-2-2 大煤样自燃发展规模动态变化示意图

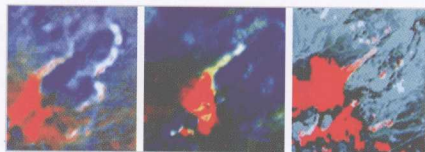
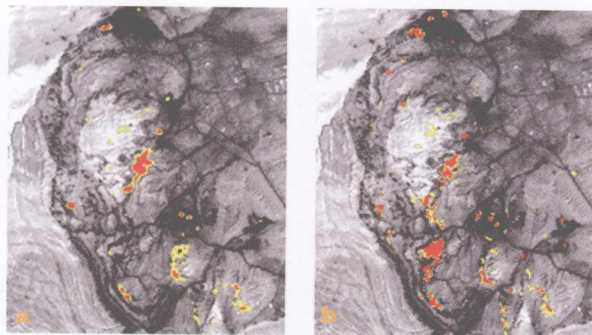


图 13-1-1 新疆奇台北山火区假彩色影像热异常



a 1997年 b 2002年
图 13-2-1 乌达煤田火区信息提取结果



图 14-3-4 乌达煤田井田边界特大煤柱燃烧裂隙影像

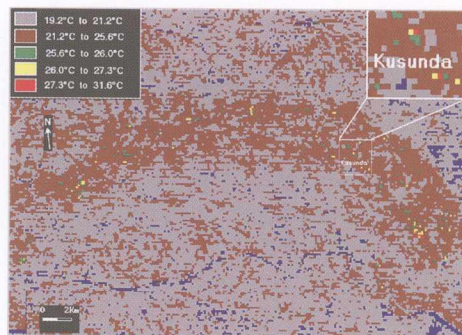
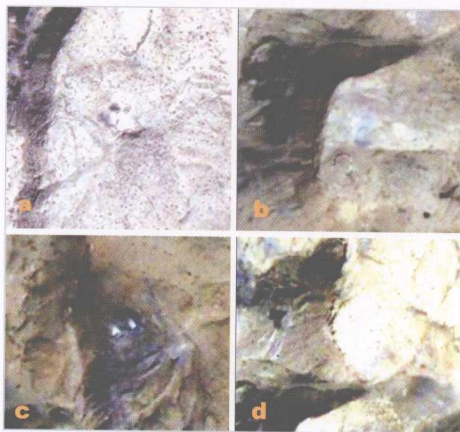


图 13-2-2 印度 Jharia 煤田尝试法提取的煤火信息 (Prakash et al., 1995)



a I 类燃烧中心 b II 类燃烧中心
c III 类燃烧中心 d IV 类燃烧中心

图 14-3-14 类燃烧中心信息识别与提取



图 14-3-3 采空塌陷型燃烧裂隙影像