

地质灾害气象预报基础

DIZHI ZAIHAI QIXIANG YUBAO JICHU

张书余 / 编著

气象出版社

地质灾害气象预报基础

张书余 编著

气象出版社

内容提要

地质灾害气象预报是地质、生态、地下水动力和气象等学科交叉发展起来的一门实用技术。全书共分八章,系统总结了地质灾害形成机制、地质灾害危险性评价、地质灾害风险评估、气象与地质灾害之间的关系、地质灾害监测仪器及方法等研究成果,较详细地介绍了地质灾害气象预报方法。

本书适用于从事地质灾害气象预报的工作者阅读,亦可供大中专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地质灾害气象预报基础/张书余编著. —北京:气象出版社, 2005. 10

ISBN 7-5029-4019-7

I. 地… II. 张… III. 地质灾害-气象预报-研究 IV. ①P694②P457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 108017 号

出版者: 气象出版社

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@263.net

责任编辑: 吴庭芳 俞卫平

封面设计: 董 渔

责任校对: 石 仁

印刷者: 北京金瀑印刷有限责任公司

装订者: 三河市海龙装订厂

发行者: 气象出版社

开 本: 787×1092 1/16 印 张: 15.25 字 数: 390 千字

版 次: 2005 年 10 月第一版 2005 年 10 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-5029-4019-7/P·1441

印 数: 1~2000

定 价: 45.00 元

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编: 100081

电 话: 总编室: 010-68407112 发行部: 010-62175925

终 审: 汪勤模

版式设计: 吴庭芳

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

序

我国气象灾害种类繁多,其诱发的其他灾害也很多,且强度大、频率高、影响范围广。作为一种严重的自然灾害,地质灾害每年都造成了重大人员伤亡和财产损失。而诱发地质灾害的主要因素又多以突发性强降水为主。因此,地质灾害的气象条件预警预报对有效地预防地质灾害、减少地质灾害的损失就显得非常重要了。

地质灾害气象预报是气象预报和地质灾害预报理论相结合而发展形成的一门新的科学技术,是地球科学系统中大气圈、岩石圈和生物圈的观测和研究的共同产物。因此,研究地质灾害预报技术,不仅要考虑地质结构和岩性,还必须研究包括大气降水、地下水运动与岩石圈的相互作用,必须研究大气降水与生物圈、人类活动的关系。

众所周知,现代科学技术的发展史是各个学科不断相互交叉、渗透并产生新学科的历史。而科学上的重大突破、新的科学技术生长点乃至新学科的产生,常常在相邻学科彼此交叉和相互渗透的过程中形成。特别是地球科学中“以问题为导向”的研究更体现了这一点。因此,拓展气象业务领域、做好专业气象预报,就要求我们去学习、理解和研究与大气科学相关的学科,包括海洋科学、地理学(如冰川、沙漠学)、地质学、水文学、地球化学、生态学等地球科学各分支学科,这样才能显著地提高气象预报的科技含量和水平。做好地质灾害气象预报更是如此。

在国务院领导下开展的中国气象事业发展战略研究提出了“公共气象、安全气象、资源气象”的新的发展理念,给新时期中国气象事业发展注入了新的活力。气象工作必须面向国家需求,面向世界科技发展前沿,为实现全面建设小康社会提供全方位、更加优质的气象服务。因此,提高各种气象灾害的预报准确率与精度、扩展气象预报的领域是当前气象工作者义不容辞的责任,也是当代气象科学技术面临的一项长期的、重要的任务。2003年,中国气象局与国土资源部签定了联合发布地质灾害气象预报的协议。在气象科技工作者和地质科技工作者的共同努力下,2003年6月1日地质灾害气象预报开始投入业务运行,对社会公众发布了地质灾害气象预报。

然而,如何提高地质灾害气象预报的科学内涵和科技水平,是摆在气象科技工作者和地质科技工作者面前的新课题、新任务。作者结合这几年在地质灾害气象预报业务服务方面的科学实践和在科学研究方面取得的成果,编写了本书。本书既有理论知识,又有实践总结,不失为一本很有科学和业务指导价值的书籍。该书的出版将进一步推动我国地质灾害气象预报的发展,促进我国地质灾害气象预报科技含量和水平的提高。在此,我也谨向作者表示深深的谢意!

郑国光

中国气象局副局长

2005. 9. 1

目 录

第一章 总 论	(1)
1.1 地球科学展望	(1)
1.1.1 思维方式的变化	(2)
1.1.2 研究对象的变化	(2)
1.1.3 研究内容的变化	(3)
1.1.4 研究形式的变化	(3)
1.1.5 组织形式的变化	(3)
1.1.6 信息交流的变化	(4)
1.1.7 方法手段的变化	(4)
1.2 地质灾害研究进展	(6)
1.2.1 地质灾害过程模拟和过程控制研究	(7)
1.2.2 建立和完善了针对复杂地质结构的地质建模理论与方法	(7)
1.2.3 建立和发展了地质灾害过程模拟与过程控制的理论与方法	(8)
1.2.4 将上述理论和方法用于工程实践中	(8)
1.2.5 地质灾害信息系统	(9)
1.3 环境地质科学研究进展	(9)
1.3.1 沿海经济发达地区及城市环境地质研究取得进展	(12)
1.3.2 水资源开发引起的环境的地质问题受到了重视	(12)
1.3.3 地质灾害防治工程取得了很大进展	(13)
1.3.4 土壤侵蚀和沙漠化的防治是一项多学科多部门长期工作,取得了长足进步	(14)
1.3.5 南方岩溶石山与地质环境保护取得了进展	(15)
1.4 地质灾害气象预报技术研究进展与展望	(16)
第二章 地质基本知识	(20)
2.1 地球的物理特征	(20)
2.1.1 地形特征	(20)
2.1.2 地球的温度	(21)
2.1.3 地球的内部圈层	(21)
2.1.4 地壳演变的地质作用	(22)
2.2 地球岩石的形成及特征	(22)
2.2.1 岩浆岩的形成及特征	(22)
2.2.2 岩石的结构与特征	(23)
2.3 沉积岩的形成及特征	(24)

2.3.1	外动力地质作用	(24)
2.3.2	沉积岩的形成	(24)
2.3.3	沉积岩的特征	(24)
2.3.4	沉积岩的构造	(25)
2.4	变质岩的形成及特征	(25)
2.4.1	变质岩的形成	(25)
2.4.2	变质岩的结构及特征	(26)
2.4.3	岩石的演化	(26)
2.5	地质年代	(27)
2.5.1	地质年代的确定	(27)
2.5.2	地质年代表	(28)
2.6	地质构造	(29)
2.6.1	岩层的产状	(29)
2.6.2	褶皱	(30)
2.6.3	断裂	(32)
2.7	风化作用	(33)
2.8	风的地质作用	(35)
2.8.1	风的剥蚀作用	(35)
2.8.2	风的搬运作用	(36)
2.8.3	风的沉积作用	(36)
2.9	河流的地质作用	(37)
2.9.1	片流、洪流和河流	(37)
2.9.2	河流的侵蚀作用	(37)
2.10	地下水的地质作用	(38)
2.10.1	地下水的类型	(39)
2.10.2	地下水的地质作用	(39)
2.10.3	地下水的沉积作用	(41)
2.11	块体运动	(41)
2.11.1	崩落、潜移和滑动作用	(41)
2.11.2	流动作用	(42)
第三章	地质灾害	(44)
3.1	滑坡	(45)
3.1.1	滑坡形成的机制及因素	(45)
3.1.2	滑坡的分类	(53)
3.1.3	不同地区滑坡成因	(60)
3.1.4	滑坡的识别与判断	(62)
3.2	泥石流	(66)
3.2.1	泥石流的形成条件	(67)
3.2.2	泥石流的发育特点	(73)

3.2.3 泥石流的分类	(74)
3.2.4 泥石流的特征量计算方法	(75)
3.2.5 暴雨型泥石流的动力学特征及形成机制	(78)
3.3 崩塌	(81)
3.3.1 崩塌的形成条件	(82)
3.3.2 崩塌的动力过程	(83)
3.4 地面塌陷	(88)
3.4.1 岩溶塌陷	(88)
3.4.2 土体湿陷	(92)
3.5 地裂缝	(96)
第四章 地质灾害危险性评价	(98)
4.1 泥石流危险性评价	(98)
4.1.1 表征泥石流危险性的因素	(98)
4.1.2 泥石流危险区的确定	(101)
4.1.3 泥石流危险性评价	(104)
4.2 滑坡危险性评价	(108)
4.2.1 区域滑坡地质灾害危险性评价规则	(108)
4.2.2 滑坡危险性评价范围与评价单元	(115)
4.2.3 滑坡危险性评价指标体系	(117)
4.2.4 滑坡危险性评价模型与方法	(123)
4.3 地质灾害危险性综合评价	(127)
4.3.1 地质灾害点的危险性评价	(127)
4.3.2 地质灾害危险性区域综合评价	(129)
第五章 气象与地质灾害	(132)
5.1 暴雨的气候特征和主要形势特点	(132)
5.1.1 暴雨的气候特征	(132)
5.1.2 产生暴雨的主要天气形势特点	(135)
5.1.3 不同尺度天气系统在强降雨中的作用	(138)
5.1.4 地形对暴雨的作用	(140)
5.2 气象要素与滑坡	(140)
5.2.1 降雨与滑坡	(140)
5.2.2 气温与滑坡	(144)
5.3 气象与泥石流	(145)
5.3.1 泥石流的水平分布	(145)
5.3.2 泥石流的时间分布	(147)
5.3.3 降雨与泥石流	(147)
5.4 气象与崩塌	(149)
5.5 气候变化与地质灾害	(150)
5.6 诱发地质灾害的降雨量临界值	(152)

5.6.1 地质灾害的临界雨量的计算	(153)
5.6.2 我国不同临界雨量区的特征	(155)
第六章 地质灾害监测	(165)
6.1 地质灾害监测现状及展望	(165)
6.2 滑坡、泥石流监测的内容	(166)
6.2.1 水文、气象数据的获取	(166)
6.2.2 渗流场监测	(166)
6.2.3 化学场及波动力场的监测	(166)
6.2.4 形变场的变形监测	(167)
6.2.5 群测群防	(167)
6.3 滑坡监测技术	(168)
6.3.1 滑坡常规监测	(168)
6.3.2 滑坡的遥感监测	(170)
6.3.3 滑坡的 GPS 监测	(173)
6.3.4 利用 GPS 技术进行滑坡监测的优缺点	(174)
6.4 泥石流监测技术	(178)
6.4.1 泥石流自动化监测	(178)
6.4.2 泥石流遥感监测	(184)
第七章 地质灾害气象预报	(189)
7.1 滑坡预报方法	(190)
7.1.1 滑坡的时间预测预报	(190)
7.1.2 滑坡的空间预测预报	(201)
7.2 泥石流预报方法	(203)
7.2.1 泥石流的预报分类	(203)
7.2.2 泥石流预报和警报方法	(204)
7.3 地质灾害综合预报方法	(205)
7.3.1 地质灾害气象预警方法	(205)
7.3.2 基于 GIS 的地质灾害气象预报流程	(209)
7.3.3 一个简单网格叠加的地质灾害气象预报方法	(213)
7.3.4 地质灾害气象预报数学模型方法	(219)
7.4 地质灾害数值预报方法	(221)
7.4.1 地质灾害数值预报方法的思路概述	(221)
7.4.2 中尺度气象数值模式原理	(224)
7.4.3 地下水运动数值模式	(226)
7.4.4 岩体地质变形破坏数值模式	(229)
第八章 地质灾害风险评估	(232)
8.1 地质灾害风险的概念	(232)
8.2 地质灾害风险评价方法	(233)
8.3 基于 GIS 技术的地质灾害风险分析	(234)

第一章 总论

地质灾害气象预报是预测由于气象因素作用,使地质和生态环境遭受破坏,从而导致人类生命、物质财富造成损失的一门技术。它是气象、地质灾害预报结合逐步发展形成的一种技术,是大气圈、岩石圈和生物圈相互作用的产物。它涉及的学科分别是气象学、天气学、数值天气预报、地质学和生态学等。气象因素导致地质灾害主要包括崩塌、滑坡、泥石流、水土流失、地面塌陷、地面沉降、地裂缝、冻融、土地沙漠化等。

1.1 地球科学展望

1830年,英国地质学家莱伊尔发表了《地质学原理》一书,使地质科学成为一支独立的学科^[1]。地质科学是研究地球、地壳构成的岩石圈及其演化规律的科学。具体来说,是研究地球、地壳岩石圈的成分、结构、构造与历史,各类岩石及矿床形成的规律,岩石圈的空间分布和时间顺序;研究古地理环境的更替和生物在地球上的进化史的科学。1840年鸦片战争发生以后,地质科学从西方传入我国,具体来讲地质科学最早是在1892年在我国出现的,当时江南有一学堂设置了地质矿物学科课程^[2],从此在我国有了地质科学的教育。从国家机构设置来讲是在1913年^[2],北洋政府农商部设立了我国第一个地质调查研究所,由丁文江教授出任第一任所长。1916年,我国开始进行有组织的地质调查^[2]。直到1949年解放,由于内乱外患,我国真正从事地质科学研究的工作者还只有290多人。这一时期涌现了许多著名的地质学家,如章鸿钊、丁文江、李四光、翁文灏等,他们从事研究的领域有岩石、地层、大地构造、古生物、矿藏学等,奠定了我国地质科学发展的基础,并且从此开始培养了一批又一批的地质学家。1949年解放后到文化大革命以前,由于我国经济建设和社会发展对矿藏资源和水资源的需要,促进了全国范围的地质调查工作,使我国地质科学获得了有史以来空前规模的发展。20世纪70年代文化大革命结束以后,由于改革开放政策的实施,通过国际学术交流,我国地质科学界发生了很大的改变,迎来了我国地质科学发展的新时期,这一时期可以说是我国地质科学发展的转折点。

20世纪初中期地球科学发展的重大进展主要包括^[3]:在地球及其各个圈层(岩石圈、生物圈、水圈、大气圈)的起源、结构、演化和运动规律等方面,经过几个世纪的努力取得了基础理论上突破性的进展,并取得了很大的社会经济效益。20世纪一些重大事件的发生,标志着地质科学取得了重大的进展。例如,1905年,地质界揭示了大气电离层的存在,为无线电通讯提供了发展的前提条件;石油地质科学领域在20世纪也取得了很多成就,使化石能源成为世界经济发展的血液;另外固体地球科学的发展推动了矿产资源的巨大发展。矿产资源包括金属矿产和非金属矿产,金属矿产大家都很熟悉,如金、银、铅、锌以及贵金属等;非金属矿产包括许多建筑材料、宝石等,这些都是固体矿产资源。因此固体地球科学的进展推动了固体矿产工业的巨大发展;20世纪大气科学中短期和长期天气预报的发展。现在天气预报已

经是家喻户晓,并且对人类工农业和社会生活的发展具有深远的影响;遥感技术、卫星技术、地理信息系统等高科技的发展。这些技术现在已经应用于许多科技领域、军事、林业、农业等;海洋科学在 20 世纪的发展促进了新兴海洋产业在新世纪的崛起。特别值得指出的是 20 世纪 60 年代后期,板块构造理论的提出。板块构造理论是地球科学理论发展上的创新,引起了地球科学理论思维的重大变革,为认识地球岩石圈的演化历史、结构构造和演化规律奠定了坚实的基础。板块理论的提出是地球科学发展过程中的根本性的变化。

从 20 世纪后期到 21 世纪初,地球科学从学科纵向深入发展转到了学科交叉、横向发展时代,从固体地球科学转向了行星地球的地球系统科学时代;从增加地球知识、侧重于资源开发的时代转向了增进地球认识、为人类社会、经济可持续发展服务的时代;科学研究的时空尺度在扩大,局地、区域、全球的认识彼此联系;高新技术在分析测试、观测监测、计算机模拟中得到了日益广泛的应用,地球科学作为大科学研究的舞台愈加宽阔。

20 世纪 80 年代以来,地球科学有了更加迅猛的发展。空间探测、航空航天遥感、大陆科学深钻、地震层析成像技术、深部找矿、大规模海洋观测、深海钻探与大洋钻探、南、北极与青藏高原科学考察等给人们认识我们所居住的地球提出了许多问题,也给地球科学的发展带来了新的机遇。地球科学正受到人类社会前所未有的重视。地球科学研究正在发生不以人的意志为转移的变化。

1.1.1 思维方式的变化

在传统地学以学科分化研究为主的基础上,更加强调了地球科学的“系统论”思想,即把地球作为宇宙中太阳系的一个行星来认识,研究整个地球的结构、演化过程和动力学;视地球为地核、地幔、地壳以及岩石圈、大气圈、水圈、生物圈各部分组成并相互作用的一个整体系统,提出了“地球系统科学”,这是一种高度综合的整体化研究思路。传统的理论思维模式是以观察材料和事实为基础,从相互关系中去认识和阐述规律、概括理论。新的思维模式是具有整体观念,更多地从系统整体出发,注意发展从理论假设出发进行演绎,使分析与综合、归纳与演绎互相补充、辩证统一;综合的内容更加深广,包括空间与时间、质量与数量、静态与动态、内部与外部、自然和人文等方面,深入研究系统的结构功能及动态演变过程;综合的方法更具有逻辑性和精确性,多通过结构分析、功能评价、过程监测与动态预测等途径来解决,并且可能用形式化语言、图解模式、数学模式等来表达综合的结果。理论思维模式的这种逐渐转变,必将把现代地球科学研究推向多学科相结合、系统综合集成的新水平。

1.1.2 研究对象的变化

由于系统论的哲学基础和“整体性研究”方法的出现,以及复杂系统理论和非线性科学的发展,地学研究对象的时空尺度相对地变大了。对地球上发生的各种自然现象的认识,逐步由各个时段的研究串联起来,既面向过去,也面对未来,从其过去的历史、现在的状态推向未来可能趋势的预测,形成一条“了解地球系统的过去、现今和未来的行为”的时间链。在空间方面,由过去侧重于局地现象的认识,转向对该现象区域性、全球性的表现、影响、过程与动力学机制的模拟研究。地球科学的思维和方法论正在从局部观向整体观拓展,由线性思维走向复杂性思维,从注重分析转变为分析与系统集成相结合,研究者的视野越来越宽阔。

1.1.3 研究内容的变化

地学研究从自然现象的物理过程、化学过程扩展到生物过程,特别是人类活动对地球环境与气候的影响和反馈,以及人与自然关系(人地关系)的协调。近几十年来,一些全球性重大问题如人口剧增、资源过度消耗、环境污染、生态破坏、南北差距扩大等日益突出,严重阻碍着经济的发展和人民生活质量的提高,继而威胁着全人类的未来生存和发展。于是在过去以学科为导向的研究的同时,出现了以问题为导向的跨学科研究。研究重点、学科结构也发生了变化,如全球变化的研究,由于大气中 CO_2 及其他温室气体浓度的增加可能导致全球变暖,已引起公众和各国政府的密切关注。针对气候变化、臭氧层耗减、生物多样性保护以及荒漠化等全球环境变化问题,已分别制订了有关国际公约,开展合作,以促进人类社会的可持续发展。地球和地表自然界是有机的整体,全球各个圈层之间的相互作用密切。随着人口增长、社会发展和科技进步,人类活动对地理环境的影响愈加强烈。人类对某一地区施加的影响,会对其他地区产生作用,而今天的措施又将对未来产生影响。当今瞩目的全球环境变化问题是与长期以来人类活动影响的缓慢累积过程有着密切的关系。全球环境变化研究在过去、目前和未来,都是地学的重要研究领域。在国际地圈生物圈计划(IGBP)和国际全球变化人文因素计划(IHDP)的推动下,不断开拓新的研究领域。全球环境变化及其区域响应涉及古地理环境演变、土地利用和土地覆被变化、减轻自然灾害、典型区域环境定位研究以及全球环境变化的对策等众多领域。其中,全球环境变化的社会经济对策涉及自然地带推移变化、土地利用与农林牧业的结构与布局、能源结构调整、海岸带的防御措施,以及自然资源合理利用和自然灾害防治等。

1.1.4 研究形式的变化

现代科学技术的发展史是各个学科不断相互交叉、渗透并产生新学科的历史。而科学上的重大突破,新的生长点乃至新学科的产生,常常在相邻学科彼此交叉和相互渗透的过程中形成。特别是地学中“以问题为导向”的研究更体现了这一点。比如,对于气候变化的最新认识表明,气候变化不仅仅是由大气层的内部热力、动力过程而产生,还包括了大气圈、水圈、冰雪圈和岩石圈所构成的地球气候系统中各圈层相互作用的结果,而且与生物圈、人类活动有很大关系。因此,气候系统动力学与气候预测的研究将涉及到大气科学、海洋科学、地理学(如冰川、沙漠学)、水文学、地球化学、生态学等地学各分支学科,同时与物理学、化学、生物学、计算数学等也有密切关系。

1.1.5 组织形式的变化

由于地球科学大尺度、综合性的特点,一些重大的地球科学研究的突破,已不是个别的科学团体、个别的国家可以实现的,它必须要联合多个分支学科、多个科学团体,甚至多个国家共同攻关,因此出现了地球科学新的组织形式,这就是建立国际性研究计划。在这方面,已有以全球环境变化为对象的“世界气候研究计划”、“国际地圈生物圈计划”、“国际全球变化人文因素计划”、“国家生物多样性计划”,以及研究岩石圈物理过程的“国际岩石圈计划”和“国际减灾十年计划”等。世界上还有 50 多个国家专门成立了负责组织与实施全球变化研究

的国家委员会或领导机构。近年来,中国科学院先后建立的一些联合研究中心,如水问题研究中心、区域持续发展研究中心、灾害问题研究中心等也是这种跨研究所的多部门联合研究组织形式的具体体现。

1.1.6 信息交流的变化

首先,信息(交流)已与物质(迁移)、能量(交换)一道成为地学现象过程研究的主要问题之一。数据与信息系统的建设和地球信息系统的开发已被各个国家计划视为必不可少的支撑条件、能力建设和现代研究手段。其次,地球信息科学这一新概念的出现,标志着在地学范围内形成了由测绘学、摄影测量与遥感、地图学、地理信息系统、计算机图像图形学、卫星定位技术、专家系统技术及现代通讯技术等有机结合的又一跨学科优先研究领域。

地球科学发展中所涉及的上述两个方面,目的是用各种现代方法获取、存贮、处理、显示、传播和应用与地理和空间分布有关的地学数据,包括提示地球信息传输机理,建立地球信息管理系统和分析模型,如动态基本信息因子确定、分类体系与数据形式的规范化和标准化、图形与图像动态数据自动采集与开发、遥感地学动态分析模型、知识库和专家系统等。这方面的信息虽多为数据信息,但也给地学研究提出了许多新问题、新挑战与发展机遇。

1.1.7 方法手段的变化

高新技术特别是空间技术的应用,已能三度空间、动态地探测地球环境的结构和运动形态,使地球科学的理论研究以丰富的实测资料为基础。如现代海洋研究手段,包括设备先进的调查船、海洋遥感卫星、浮标观测系统、深潜探测技术、高性能大容量计算机和先进的实验室等。同时,地球科学对于科技进步与现代设备的依靠程度也愈来愈高。在探测方面,航空航天遥感、超深钻技术、深潜技术、地球层析成像、全球数字地震台网和全球定位系统等共同构成了向海、陆、空和地下深部进行全面探测的技术体系。在模拟与实验方面,现在已经具备了利用高温高压(包括超高温、超高压)大腔体设备、同步辐射技术、精密测定技术、模拟分析方法及计算机技术等全面描述和研究地球介质的物理、化学性质及条件的能力。在测试与分析方面,正在向由电脑控制的高灵敏度、高分辨率、自动化仪器分析的技术方面发展。纳米地质学、纳米矿物学也是得益于隧道扫描技术的发展而发展的。在数据计算与信息处理方面的发展尤为引人注目,大型计算机设备都是首先运用到大气科学研究中;GPS、RS、GIS一体化使地球上许多现象的定量、定点、实时研究或建立全球模型成为可能;特别是自动化、数字化处理数据的能力,使地学信息网络迅速发展,实现全球资源共享。这些方法手段的变化,不仅使地学研究取得第一性资料的质量、效率大大提高,为认识和解释地学问题提供了更多事实依据,而且会因此而促使一些新思想和新理论的诞生。

展望新世纪,地球科学将会得到更加突飞猛进的发展,行星地球演化和变化的基本过程和规律将会在更广泛的空间尺度和时间尺度上被揭示和阐明。地球科学研究的主要趋向、热点与重点问题是:

(1)突出地球系统科学,关注全球变化与地球各圈层相互作用及其变化的研究,以及人类活动引发的重大环境变化研究。地球系统观、地球系统科学是地球科学研究的主导方向。全球变化研究充分体现了跨学科、跨部门、国际化、全球化和日益重视在高层次上综合集成

的大科学研究特点。地球各圈层相互作用的研究包括了气圈、水圈、冰冻圈、生物圈、岩石圈、地壳、地幔、地核相互作用的物理过程、化学过程、生物过程以及人地关系、人类与环境相互影响、相互作用的研究。如岩石圈的研究,当前以至将来一段时间,对岩石圈的研究是统一于“板块构造理论”框架之下。与板块的构造、运动、演化相关的岩石圈乃至整个地球中的许多现象,如大型构造地貌(高原、平原、山系等)的产生、地震与火山爆发、岩浆与矿产的形成,以及由构造运动引起的海平面升降导致的沧海桑田变化,或直接或间接与岩石圈板块有关。特别是全球变化,它就是在陆圈-水圈-大气圈-生物圈(包括人类)的相互联系、相互作用中产生的,在这个开放的巨系统中,岩石圈这个子系统在全球变化中占有独特的地位,不仅岩石圈内部变化对全球变化有影响,而且在岩石圈-水圈界面,岩石圈-气圈界面,岩石圈-生物圈界面的相互作用,更为全球变化研究者所特别关注。

(2)突出地球演化的动力过程研究,地球内部深层过程与岩石圈动力学、气候系统动力学与气候预测、生态系统动力学与生态环境的保护和建设。1974年美国著名的第四纪地质学家 F. R. Flint 教授将 19 世纪的达尔文进化论与 20 世纪 60 年代出现的海底扩张—板块构造学说以及预测将会出现“气候变迁理论”统称为关于地球动力学三个方面的科学,即“生物圈动力学理论”、“岩石圈动力学理论”和“大气圈动力学理论”^[4]。生物圈动力学理论是通过生物与其化石祖先的延续关系,重建古气候、古环境,揭示其进化史;岩石圈动力学理论乃是地质时代中岩石圈演变、洋陆更迭的历史进程,是通过板块的形成、运动和消亡来认识的。这两项基本理论都是通过进行的过程去认识问题、总结规律的,把地球视为一个具有长期演化历史的、活动的、发展和变化的地球内部各种因子之间以及地球与外部各种因子之间相互作用的行星,这是发展地球科学基本理论的必由之路。对于探索“大气圈动力学理论”也必然要采用这样的科学观点。

(3)突出地球信息科学,关注数字地球、3S(GIS、RS 和 GPS)一体化和地球科学定量化的研究趋势。在地球系统科学与全球变化研究的方法论中,是以观测监测采集数据,分析评价和解释判断,概念化并建立数值模型,进行验证、改善模型并提供预报这样的循环方式进行的,这也就是提供数据,评价整理数据,建立模型,验证模型、提供分析结果的数据信息流动、处理、加工过程,每一环节都与数据信息系统密不可分。当前,地球科学数据的规范化整理与信息资源的共建共享已经成为潮流。数据信息系统与地球信息科学的发展也带来地球科学研究观念的改变。例如,数据信息作为科研基础的时代转向数据信息作为科学驱动力的时代;以遥感、地理信息系统和全球卫星定位技术作为重要的高科技已经进入科学普及时代;地球科学研究方法论的改进使地球科学研究进入综合模型时代。

(4)突出地球管理科学,关注减灾、环境保护治理、资源合理开发利用以及碳循环、水资源、食物与纤维、能源战略等问题

地球科学及其各分支学科的目标,是在人类增加对地球认识的基础上,维持其足够的资源供给及其持续利用,减轻自然灾害造成的损失,保护与改善环境,促进生态系统良性循环,协调人与自然关系,从整体上为经济和社会的发展、提高人类生活质量、增强科学能力做出重大贡献。因此,控制人类活动的规模、程度,从人—地关系的角度审视环境的变化,为社会与自然的协调发展提出科学建议,促使人类在减缓和适应全球变化方面尽快采取相应的措施,从而保护地球的可居住性,实现可持续发展。

(5)突出地球科学跨学科研究进展与创新,关注经济社会发展对地球科学的影响与需求、地球科学在自然科学内部与其他学科的交叉融合以及高新技术在地球科学中的应用。展望 21 世纪,地球系统科学的新思维和地球观测新技术的发展,必将对地球科学的发展和增强人类管理地球能力的提高继续产生革命性的影响。

1.2 地质灾害研究进展

地质灾害概念是前国际工程地质协会主席 Arnould 教授^[5]在 1976 年发表的题为“地质灾害-保险和立法及技术对策”一文中提出来的。以后逐渐被各国采用,我国大概是在 20 世纪 80 年代末采用,到 1990 年代以后“地质灾害”这个名词才频繁出现在专业论文和新闻报道中。1987 年联合国第 42 届大会,决定从 1990 年开始,开展世界范围的“减轻自然灾害十年”活动。我国原国家科学技术委员会社会发展科技司组织原国家地震局、原国家气象局、国家海洋局、水利部、原地质矿产部、农业部、原林业部的专家对严重危害我国的地震、气象、海洋、洪涝、地质、农业及森林等重大自然灾害的灾情、特点、规律、对策进行了综合的、系统的、全面的调查研究,并在此基础上成立了国家科学技术委员会、国家计划委员会、国家经济贸易委员会自然灾害综合研究组。正是在这种情况下,我国才真正开展了地质灾害研究。在 1990~2000 年国际减轻自然灾害十年活动(IDNDR)期间,我国对地质灾害调查、研究、监测和防治等开展了大量工作,对全国地质灾害进行了全面的调查和综合评价,编制了以地质灾害为主的全国环境地质图系和各省地质灾害现状调查图,初步调查了我国地质灾害发育现状和分布规律,并对主要地质灾害发展趋势进行了预测。开展了三峡链子崖危岩体、黄腊石滑坡体等 200 余处重点地质灾害的防治工作,为减轻地质灾害对我国重点地区的危害做出了重要贡献。

在“八五”和“九五”计划期间,组织了地质灾害防治和监测预报的科技攻关,系统地解决了我国地质灾害减灾防灾的技术难题,地质灾害防治初步形成了一套基于地质工程理论和方法的地质灾害防治思路和技术方法体系,为实现将自然灾害造成的损失减轻 30%的目标提供了有力的技术支撑。随着在复杂地质体中进行重大工程建设的情况日益增多,遭遇到的灾害地质体不仅在规模上越来越巨大,而且结构更加复杂,对它的变形破坏过程的了解更加模糊,原有的以一般岩(土)体为研究对象的岩土工程理论与方法已不能满足要求,地质工程研究迅速发展,它是工程地质继岩土工程后的一个新拓展。地质工程面对的是正在变形破坏过程中的复杂地质体,研究的主题是工程场址山体稳定性和区域地壳稳定性评价、控制和改造,其核心是对不良地质体进行工程改造与控制。

长江三峡链子崖危岩体防治工程是地质灾害防治工程的杰作。链子崖危岩体防治工程的基本特点是:灾害地质体结构复杂,设计、施工均存在模糊性;危岩体稳定性差,施工风险大;紧邻长江边,场地施工条件差;位于长江黄金水道最窄处,距三峡大坝仅 27 km,社会责任大。通过 8 年努力,终于成功地完成了防治任务,其成功经验是:以地质工程理论和技术为指导;具有阵容雄厚的专家组支撑;科研单位与施工单位形成联合体共同攻关;勘察、设计、施工形成较为统一的整体,设计是工程全过程的核心;建立了立体的实时监控系统。

随着我国社会经济飞速发展,愈来愈要求在地质灾害防治的基础上开发利用灾害体,如

在举世瞩目的三峡工程库区移民迁建中,由于地质环境复杂,建设用地严重不足,因此,在地质灾害防治基础上,开始利用滑坡体,使灾害向兴利方面转化,并强调了地质灾害防治工程的环境协调性。

1.2.1 地质灾害过程模拟和过程控制研究

建立和完善了针对复杂地质结构的地质模型和岩体稳定性分析的理论与方法,并分别针对二维边坡地质模型的建立与稳定性分析、三维节理岩体建模与稳定性分析以及复杂地质结构三维可视化等问题,开发了三套计算机软件系统。建立和发展了地质灾害过程模拟与过程控制的理论与方法。涉及的关键技术包括:

(1)复杂地质结构三维地质建模的理论与方法。包括:多元信息的描述与数据融合技术、数据库管理及其与图形系统的接口、地质体的三维数学模型描述、复杂块体模型建模理论、三维图形可视化技术等。

(2)复杂地质性态、复杂地质过程及复杂地质环境的数值模拟理论与方法。包括:复杂地质结构模拟、动力作用过程模拟、水-岩作用过程模拟、水-热作用过程模拟、热-力作用过程模拟及开挖卸荷过程模拟等。

(3)复杂地质灾害的过程模拟与过程控制。选择不同类型的滑坡地质灾害和边坡稳定性问题,对本项研究的理论成果进行实际应用验证,通过过程模拟和过程控制,为相关工程实际问题的解决和地质灾害防治提供依据。作为系列成果,本研究系统解决了地质灾害过程模拟与过程控制领域的诸多关键理论与技术问题,并取得了以下主要研究成果。

1.2.2 建立和完善了针对复杂地质结构的地质建模理论与方法

(1)结合溪洛渡水电站工程和长江三峡水电站地下厂房工程,开发了“复杂岩体结构建模系统”。该系统采用多元信息的融合技术,实现了复杂地质信息的数据库管理。所开发的系统具有地形图的绘制、剖面图的生成和交互式修改、平硐结构面三维扩展及其交互式修改、三维地质实体模型的建立等功能。该系统为地质勘探资料管理及工程地质问题分析评价提供了重要的工具。

(2)提出了全新的复杂块体建模理论——“切割法”。以此为基础,开发了“边坡块体稳定性分析系统(SASW version1.2)”。该系统克服了复杂形态(如五面体、六面体等)块体建模的困难,可以根据组成块体的各结构面的产状和位置自动建立块体的几何模型;可以自动判断滑动面和滑动方式,以及各种工况条件下块体的稳定性状况以及相应的加固处理方案。程序提供了动力分析法和等效静力法两种地震影响分析方法,动力分析法中提供了地震波模拟功能。程序界面友好,操作简便,所有图形都可以通过旋转和缩小、放大从任意角度观察。

(3)开发了“边坡二维建模及治理方案计算机辅助设计系统(Slope-CAD version1.0)”。该系统具有交互式地质建模功能,可以利用系统所提供的功能强大的建模工具箱,方便、直观地建立任意复杂的二维地质模型。该系统采用特殊的算法,实现了坡体的自动条分和条块参数的自动采集;并可以实现治理方案的智能化设计。

1.2.3 建立和发展了地质灾害过程模拟与过程控制的理论与方法

(1)结合边坡地质灾害发育的地质—历史过程及动力学机理,综合采用当前数学-力学及岩土数值模拟的最新成果,建立了边坡地质灾害全过程模拟的数学-力学理论及相关的模拟技术。其特点是:充分考虑了边坡地质灾害形成机理及其变形破坏过程的特点,并针对复杂地质结构建模和复杂地质过程、复杂介质性态及复杂地质环境模拟与“仿真”等关键理论与技术问题,建立了一套理论严谨、实际操作可行、适用性较强的分析理论与方法,开发了配套的模拟技术。

(2)针对边坡地质灾害中地下水作用的特点和边坡的介质特性,从地下水在复杂介质中流动的基础理论问题研究出发,建立了复杂介质条件下边坡渗流场的分析方法及基于水—岩力学作用的边坡地质过程行为模拟理论。提出了节理岩体概化为EPM模型的判据,对应的渗流模型及渗流场与应力场耦合的力学模型;基于离散单元法,建立了块体介质系统中地下水流动及其作用的离散元模型及固—液耦合数值计算方法,开发了考虑水—岩相互作用的离散单元程序。

(3)针对高地震烈度地区边坡岩体的失稳分析及数值模拟,本研究发展了离散单元法和传统的地震动力分析方法;提出了动力离散元方法的基本思想,建立了相应的数值计算基本方程,并与可变形块体相结合,开发了通用的动力离散元分析程序(DDDEM)。

(4)从岩石热学及温度应力场效应出发,建立了边坡热-力耦合作用数值模拟理论和方法,并根据温度变化的周期性致使热应力具有的交变特性,提出了边坡浅表部岩体在交变热应力作用下,疲劳破坏的论点及其相应的理论判据。进一步将岩石热学与渗流场模拟相结合,提出了边坡水-热耦合作用的数值分析方法。

(5)结合边坡工程实践,提出了几类常见的复杂介质或介质性态的模拟理论与方法;针对节理岩体的优势组成特性,提出了节理岩体正交各向异性模拟理论,建立了正交各向异性岩体的弹塑性分析模型和数值计算方法;针对节理的不连续性和断续延伸特点,提出了模拟这类结构面的“虚拟节理法”;针对开挖卸荷过程中岩体所表现的复杂工程特性,通过对开挖卸荷过程的物理模拟试验,揭示了卸荷情况下岩体力学特性的变化;表明在开挖卸荷条件下,岩体的强度和变形特性较通常的加载情形,会有很大程度的降低,且下切或开挖卸荷速率越快,变形和强度特性的降低程度越大。

1.2.4 将上述理论和方法用于工程实践中

(1)以攀枝花矿山营盘山高陡边坡为例,提出和深化了边坡变形稳定性的概念,并从变形稳定性的角度对营盘山高陡开挖边坡在各开挖阶段的稳定性状况进行了模拟和评价,所得结论已应用于矿山设计和生产。

(2)以康定白土坎滑坡为例,重点研究了边坡岩体在地震条件下的动力响应与动力失稳过程,分析计算了白土坎滑坡在地震动力作用下的变形破坏过程、稳定性状况以及整治处理措施。

(3)以香港深基座滑坡为主要研究对象,重点研究了不同水文地质结构的边坡在暴雨条件下的水-力相互作用方式、边坡的稳定性状况和变形破坏模式。从而为这类滑坡的预报和