

地震地磁学概论

A Brief Treatise on Seismomagnetism



丁鉴海

卢振业 编著

余素荣

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学

校友文库

地震地磁学概论

A Brief Treatise on Seismomagnetism

丁鉴海

卢振业 编著

余素荣

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了国内外震磁研究的最新进展,总结了利用地磁预报地震的实践与理论研究成果,对初步形成的地震地磁学进行了科学总结。全书分4篇,共12章:第一篇(第一至第四章)地磁场与空间电磁环境的基础知识;第二篇(第五、第六章)地磁观测技术与震磁理论;第三篇(第七至第九章)地震电磁现象与地震预报方法,包括基本磁场、变化磁场、空间电磁异常现象与地震预报方法;第四篇(第十至第十二章)地震电磁前兆与震例研究,包括震磁前兆与场源理论、渐进式与跨越式地震预报方法,并以1975年海城7.3级、1976年唐山7.8级地震为例反映震磁预报的全过程,以1998年张北6.2级、2008年汶川8.0级地震为例介绍天基与地基地震电磁前兆,探索地震预报新途径。

本书既适合从事地震地磁学、地震预报研究的人员使用,亦可以作为大专院校地球物理和空间物理相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地震地磁学概论 / 丁鉴海, 卢振业, 余素荣编著. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011. 5

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书; 中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02625-6

I. 地… II. ①丁… ②卢… ③余… III. 地震学—地磁学—概论
IV. P318.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第064603号

出版发行 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路96号, 230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经 销 全国新华书店

开 本 710 mm × 1000 mm 1/16

印 张 31.25

彩 插 2

字 数 517 千

版 次 2011年5月第1版

印 次 2011年5月第1次印刷

定 价 98.00 元

编 委 会

顾问 吴文俊 王志珍 谷超豪 朱清时

主编 侯建国

编委 (按姓氏笔画为序)

王 水 史济怀 叶向东 朱长飞

伍小平 刘 兢 刘有成 何多慧

吴 奇 张家铝 张裕恒 李曙光

杜善义 杨培东 辛厚文 陈 颢

陈 霖 陈初升 陈国良 陈晓剑

郑永飞 周又元 林 间 范维澄

侯建国 俞书勤 俞昌旋 姚 新

施蕴渝 胡友秋 骆利群 徐克尊

徐冠水 徐善驾 翁征宇 郭光灿

钱逸泰 龚 昇 龚惠兴 童秉纲

舒其望 韩肇元 窦贤康

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。鲜为

人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

序

感谢《中国科学技术大学校友文库》编辑部热情来函约稿,并遵编辑部建议,在《地震地磁学》基础上增加补充了近 20 年来国内外震磁研究的最新进展,特别是作者最新地震电磁研究成果,改以《地震地磁学概论》名称出版。

地磁学与地震学的交叉融合逐步发展成为一个比较独立的边缘学科——“地震地磁学”(丁鉴海,卢振业,黄雪香,1994)。地震预报问题的解决有待于地震孕育发生规律的科学揭示,需要长期不懈的探索和科学积累。《地震地磁学概论》虽然部分章节大体沿用原来的基本构架,但内容明显得到更新与扩充。章节由原来的 8 章增加到 12 章,并归纳为 4 篇。本书较全面地总结了目前利用地磁预报地震的实践与理论研究成果,给出了伴随地震孕育发生过程地磁场变化的时空分布图像。

提取震磁前兆异常须排除正常背景场和各种非震异常的干扰。震磁前兆现象相当复杂,有存在震中附近 100~200 km 的近场前兆,有距震中数百千米的远场前兆,甚至有距震中数千千米的大范围、大尺度的动态前兆。这就要求,须从震源孕育过程及其与震源所在的区域应力场变化,以及孕震内(地体环境)、外(日地空间)环境因素相互耦合等方面,深入研究震磁前兆及其机制。

地震预报是跨多领域的边缘学科,地磁预报地震的方法与物理

基础深入研究必然涉及多学科的交叉与相互渗透。本书结合 21 世纪最新发展成果,力图把固体地球物理与空间物理相关知识结合起来,研究地震信息向空中传播的机制及其产生的地震电离层前兆异常;研究日地空间各圈层的耦合以及日地空间能量及其扰动对地震孕育发生直接或间接的影响。在加强地面观测基础上,需要建立地震立体监测体系,探索震磁预报方法与理论进一步发展、创新的科学途径。

地震预报是当今世界一大科学难题。目前的困难,一是对地震发生机制缺乏必要的认识,二是受观测技术手段的严重制约,尚未积累长期与地震孕育、发生相关联的全时空连续动态观测资料。因此,本书对学科框架和本质的阐述乃是初步的,不当乃至错误之处还请读者提出宝贵意见,以助于尚不成熟的学科进一步发展。

本书得到国家科技支撑计划课题(2008BAC35B00)资助。

作 者

2010 年 6 月

目 次

总序	(i)
序	(iii)
绪论	(1)

第一篇 地磁场与空间电磁环境的基础知识

第一章 地磁场结构	(14)
第一节 地磁要素与地磁场构成	(14)
第二节 地磁场空间分布表示方法	(17)
第三节 非偶极子磁场和地磁异常	(21)
第二章 地球基本磁场与长期变	(24)
第一节 麦克斯韦方程与高斯理论	(24)
第二节 基本磁场数学表达式与国际地磁参考场	(31)
第三节 内外源磁场的分离及多极子表示	(33)
第四节 地磁场的长期变化	(40)
第五节 地磁场起源	(48)

第三章 地球变化磁场	(51)
第一节 变化磁场的分类	(51)
第二节 太阳活动和磁情指数	(53)
第三节 地磁场的太阳静日变化	(64)
第四节 地磁太阳日变化 L	(71)
第五节 地磁场的扰动变化	(75)
第四章 日地空间电磁环境	(83)
第一节 日地空间结构	(83)
第二节 大气层、电离层与磁层	(88)
第三节 电离层物理简介	(95)
第四节 电磁辐射与电磁波谱——遥感技术基础	(102)

第二篇 地磁观测技术与震磁理论

第五章 地磁观测	(110)
第一节 地磁台网	(110)
第二节 地磁测量与仪器	(122)
第三节 流动地磁测量及通化处理	(138)
第四节 空间对地观测	(146)
第六章 震磁实验与理论	(152)
第一节 岩石磁学概述	(152)
第二节 压磁效应	(159)
第三节 感应磁效应	(181)
第四节 动电磁效应	(189)
第五节 壳幔滑脱电磁扰动效应	(207)

第六节 其他磁效应	(217)
第七节 各种磁效应评述	(220)

第三篇 地震电磁异常现象与地震预报方法

第七章 地球基本磁场与地震	(226)
第一节 基本磁场正常变化的分析方法	(226)
第二节 基本磁场长期变化与地震	(234)
第三节 中国地磁图与区域地震活动	(246)
第四节 提取地震前兆异常的方法与震例	(258)
第八章 地球变化磁场与地震	(274)
第一节 地磁场内外源场的分离方法	(275)
第二节 地磁日变化异常与地震	(280)
第三节 地磁短周期变化与地震	(299)
第四节 地磁日变低点位移地震预报方法	(315)
第九章 空间电磁异常现象与地震	(339)
第一节 空间对地观测与地震信息向空中传播的机制	(339)
第二节 地基观测大震前电离层异常	(346)
第三节 GPS 观测与地震电离层异常	(352)
第四节 卫星、地基观测与地震电离层异常	(354)
第五节 震前电磁辐射异常	(359)
第六节 高能粒子观测及其与地震的关系	(364)
第七节 地震电离层异常特征概述	(370)

第四篇 地震电磁前兆与震例研究

第十章 震磁前兆与地震预报	(374)
第一节 震磁前兆特征	(374)
第二节 渐进式预报方法	(379)
第三节 跨越式预报方法	(389)
第四节 震磁效应与场源理论	(397)
第五节 科学思路与技术途径	(402)
第十一章 1976 年唐山 7.8 级地震的震磁效应	(407)
第一节 孕震区地下的电磁结构	(408)
第二节 震磁中期趋势性前兆异常	(418)
第三节 震磁短临前兆异常	(426)
第四节 震磁前兆特征与机制探讨	(433)
第五节 唐山地震的月相效应	(444)
第十二章 天基与地基地震电磁前兆与震例	(449)
第一节 1998 年张北 6.2 级地震卫星热红外与电磁异常	(449)
第二节 2008 年汶川 8.0 级地震电离层与电磁异常	(457)
结束语	(467)
参考文献	(469)

绪 论

地震学和地磁学都是地球物理学中比较成熟的学科,地震地磁学则是 20 世纪中期特别是 20 世纪 60 年代以来,随着地震预报的实践与震磁关系研究的深入,逐步发展起来的一门新兴的边缘学科。建立与发展这门学科的目的是,通过研究震磁前兆的特征、预报地震的方法及其物理基础,充分发挥地震地磁学在地震预报中的作用。

地震地磁学是地震预报学科的重要组成部分,进一步扩展震磁观测到日地空间地震电磁观测,加强震例总结,深化实验和理论研究,必将促进地震地磁学的发展,丰富地震预报学科的内容。

一、地震地磁学的由来

地震地磁学是研究震磁关系,特别是研究与地震有关的地磁现象的科学。它的萌生与地磁学和地震学近代的发展有着密切的联系。

众所周知,我国是世界上最早发现磁石与地磁现象的国家,指南针是我国古代四大发明之一。远在公元前 1 000 多年我国就已发现磁石的极性,几个世纪后磁铁的性质和应用才被欧洲人所注意;到公元 11 世纪,北宋沈括发现磁偏角的存在;1600 年吉尔伯特(Gilbert)提出地磁场成因的论述,指出“地球本身是一个大磁铁”;1839 年高斯(Gauss)创造了地磁场的数学理论,提出了地磁场的定量分析方法;1858 年洪波特(Humboldt)发现地磁场随时间的大幅度变化特征,并将其命名为磁暴;1882 年斯图尔特(Stewart)提出地磁场成因的发电机制论;19 世纪 20 年代人们建立了第一批地磁台,

并开始在大范围内进行连续的地磁测量。从 19 世纪初地磁学科形成以来,人们对地磁场的时空分布特征、成因以及地磁场与太阳活动的关系等进行了大量研究工作。到 20 世纪中期地磁学逐渐发展成为一门成熟学科,观测技术也有了明显的改善,为研究地震引起的微小的地磁变化奠定了观测、实验与理论基础。

我国也是世界上研究地震最早的国家之一,震史记载丰富,已有 3 000 余年的历史;张衡发明的“候风地动仪”可谓开了地震观测的先河。和地磁学一样,地震学同样经历过漫长的发展过程,直到 19 世纪末发明了近代地震仪后,地震科学才具有近代科学的形态。到 20 世纪,地震学得到了很大发展。地震波理论、地震成因、地震现象的固体地球物理学等方面的研究进展以及地震学在地震勘探、地球内部和地壳构造研究、核探测等方面的快速进展,说明地震学已发展成为一门成熟的学科。在地震灾害研究,例如地震区划、工程地震学等方面也取得了相应进展。

近百年来,对社会有影响的巨大地震不断发生,促使人们考虑地震预报的问题。例如,1891 年日本浓尾 8.0 级地震、1906 年美国旧金山 8.3 级地震、1923 年日本关东 8.2 级地震,促使这些国家成立地震研究机构,探索地震预报的可能性。前苏联也以 1948 年阿斯哈巴德 7.3 级地震、1949 年塔吉克 7.5 级地震为契机加强了地震研究工作。20 世纪 60 年代以来,全球有 30 余次 7 级以上强震发生在大城市或工业中心附近,给人类造成了重大灾难和损失,从而再次引起人们对地震预报的关注。中、日、美、前苏联等多地震国家先后制定并逐步实施了较全面的地震预报研究计划,推进了地震预报研究的开展。对中国邢台、日本东海、前苏联加尔姆、美国沿圣安德烈斯断层等地区地震预报的系统研究,引起了人们的广泛关注。20 世纪后期至 21 世纪初,板块构造、地震黏滑、膨胀多种理论的提出,关于地震预报的物理基础和包括地震电磁多时段、多时空尺度在内的地震前兆预报方法的探索尤为活跃。人们认真总结了 1975 年中国海城 7.3 级地震预报的成功经验,特别是 1976 年中国唐山 7.8 级地震、2004 年印尼苏门答腊 9.0 级地震、2008 年中国汶川 8.0 级地震惨痛教训,从正反两方面提高了对地震预报当今科学难题的认识;现代地震观测技术的提高,也促使地震预报研究取得了较快的进展。地震的地磁前兆观测以及在此基础上所开展的震磁关系和震磁预报研究,即是在国际地震预报研究工作得以全面推进这一背景上发展起来的;经过 40 余年的

探索,初步形成了地震地磁学这门相对独立的新学科。

二、震磁关系研究的发展

地震的孕育、发生是一个极其复杂的过程,由于影响因素众多,伴随这一过程产生的异常现象也就更加复杂。地震预报(本书着重地震预测研究,除1975年海城7.3级地震外,并非对公众发布的地震预报,地震预报方法则泛指地震预测方法)的最终目的则是通过研究与地震孕育、发生过程有关的各种前兆现象,对地震进行科学预报。很早以前,人们就注意到地磁异常变化与地震的关系,至今已有百余年的历史。但真正开展以磁报震的探索与实践却是在20世纪60年代以后的事情。

1. 震磁现象的观测

震磁现象的观测发展史可分为三个阶段:

(1) 20世纪50年代以前 此期间所报道的与地震有关的地磁场变化异常,多数是由地震波引起的机械振动效应。以后虽然注意了排除这种机械振动的假象,但由于使用的磁力仪观测精度低,长期稳定性差,同时也由于未形成研究规模,研究水平较低,因此多数观测结果是粗略的、不可靠的。

(2) 20世纪50~60年代 此期间人们发明了质子旋进磁力仪。这种仪器可直接测量地磁场的绝对值,而且很少受温度、湿度等环境的影响,只与原子常数有关。它的观测精度高,稳定性好,同时,还具有操作简便的优点。20世纪60年代之后,质子旋进磁力仪的广泛应用,从根本上改变了震磁观测的状况,从而获得了一些较为可信的震磁观测结果。

(3) 20世纪六七十年代至今 中、日、美、前苏联等国相继把地震预报纳入国家规划,均把地磁作为地震预报的重要手段加以运用,震磁观测与研究有了很大的发展。多数国家的野外观测主要集中在地震活动区与构造活动带等试验场上,在那里布设了比较密集的地磁观测网,以固定台站的连续观测与巡回野外地磁测量相结合,研究震磁信息的时、空、强动态变化。例如,前苏联在中亚地震活动区的塔什干、费尔干纳和克兹勒-库姆以及乌拉尔和喀尔巴阡地区建立了试验场或监测网;日本在松代震区和伊豆半岛开展震磁效应和构造磁效应的研究;美国在圣安德烈斯断层附近建立了地磁观测系统,实现了卫星数据传输和实时处理,当时是世界上监测能力最

好的地区之一。在这一时期,我国开展了更为广泛和系统的震磁观测与研究。

2. 震磁效应物理机制的研究

与震磁现象观测相辅相成的是地震磁效应物理机制的研究。

1922年,英国人威尔逊(Wilson)首先开展了静压力作用下磁铁矿磁化率变化的实验。他认为,压缩效应是与构造活动相关的地磁场异常变化的科学基础。在20世纪50年代初,前苏联卡拉什尼柯夫和卡皮查等(Kalashnikov等,1952;Kapitsa,1955)做了几个成功的岩石磁性的压缩实验,获得了岩石磁性变化与压力和温度的关系,发展了压磁理论。根据实验结果,他们认为,岩石磁性的压缩效应可应用于观测地壳应力的变化,在实验室内确立了岩石磁性对应力的依赖关系。随后,永田(Nagata等,1969)进一步对压力实验与压磁效应进行了深入研究,并提出了构造磁学的概念。斯特西(Stacey,1963)与行武等人(Yukutake等,1967)应用压磁实验的结果,在简化模型的条件下,计算了地震发生时地下岩石所产生的压磁学效应,指出在地震时可观测到 $2\sim 10\text{ nT}$ 的变化。郝锦绮和斯特西等人进行了三维压磁模型计算,得到的地震磁效应变化量较小。后来郝锦绮等(1985)又发现压磁效应异常的幅度和波及范围不仅与地震的应力降、震级及岩石磁性有关,还和震源机制关系密切,在某些构造条件下,震磁异常幅度可以超过 10 nT 。总的来说,压磁效应的研究历史较长,实验工作与理论研究比较充分,因此压磁学说是多数学者所接受的一种地震磁效应的物理机制。然而,不少观测事实与压磁说并不相符,所以,后来人们又提出了作为地震磁异常物理机制的感应磁效应、动电磁效应(在此基础上还提出“膨胀”磁效应)、热磁效应和相变磁效应等。在本书中我们提出一种新的“壳幔滑脱电磁扰动效应”的机制,这种效应能够解释目前我国震磁预报中常用的空间大尺度、时间上跨越式地震预报方法的机制。

震例与野外实验的观测结果也显示出在地震孕育、发展的各个阶段中都有程度不等的地磁异常现象。震磁效应可能与地下构造、岩石性质、震源机制、孕震过程等多种因素有关。理论计算上也注意到物理模型应更接近实际发震的状况。同时震磁工作者还积极开展震磁实验与理论研究,以及进行诸如断层蠕动、火山活动、水库注水控制实验、地下核爆炸野外实验观测,这非常有助于震磁效应的深入研究。

3. 地震预报的实践

20 世纪六七十年代以来,中国、美国、日本和前苏联等多地震国家,在震磁现象的野外观测、实验与理论研究结果的启示下,积极探求利用地磁预报地震的方法,并直接用于地震预报的实践,在少数地震之前进行了一两个要素(时间、地点或震级)较为成功的预测,显示出地磁方法在地震预报探索方面的良好前景。在地震预报实践中,震磁效应和众多的震磁相关现象的发现和研究,为探索建立预报地震三要素的具体方法提供了事实依据,从而把长期统计预报推进到根据地磁等前兆现象进行以物理为基础的短临预报探索阶段,并取得了一定数量的预报实例。丰富的地震前兆现象和成熟的地磁学理论知识又推进了对孕震过程中的震磁效应的实验与理论研究的深入发展,使震磁关系的研究迈出了坚实的一步。至此,地震地磁学科的框架日趋明显,地震地磁学作为一门相对独立的学科已初见端倪。

三、中国震磁关系研究

1966 年以来,我国逐步建成了较完善的地磁观测系统,在震磁理论研究和地震预报方面取得了较大进展;并坚持边观测、边预报、边研究。在实践中探索预报方法是我国震磁研究的特色。20 世纪 60 年代,首先研究了变化磁场在震前的异常变化,适应了短临预报的需要;20 世纪 60 年代末至 70 年代初,质子旋进磁力仪的引进,使我国在利用变化磁场做地震短临预报的同时,重视和发挥了基本磁场在中期地震预报中的作用。20 世纪 70 年代后,取得了部分中强以上地震的地磁前兆资料。1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震前,有关单位曾在大连台观测到地磁异常变化,并把它作为中期预报依据之一。利用变化磁场的异常变化,通过跨越式预报方法,到目前为止曾较好地预报了 30 余次 6 级以上强震的发震时间,在地震综合预报中起到一定实效。经过多年实践与研究,地磁已成为地震预报不可缺少的手段之一。

1976 年唐山地震后,我国震磁效应及以磁报震的理论研究取得了可喜的进展。开展了“压磁效应”、“感应磁效应”、“动电磁效应”(膨胀磁效应)、“热磁效应”等研究工作。1977 年,祁贵仲、侯作中等(1977;1981)建立了三维电磁感应数值方法的基本方程和求解方法,并估算了地震感应磁效应量级、空间分布特征和频率特征。之后祁贵仲(1978)又提出“膨胀磁效应”理