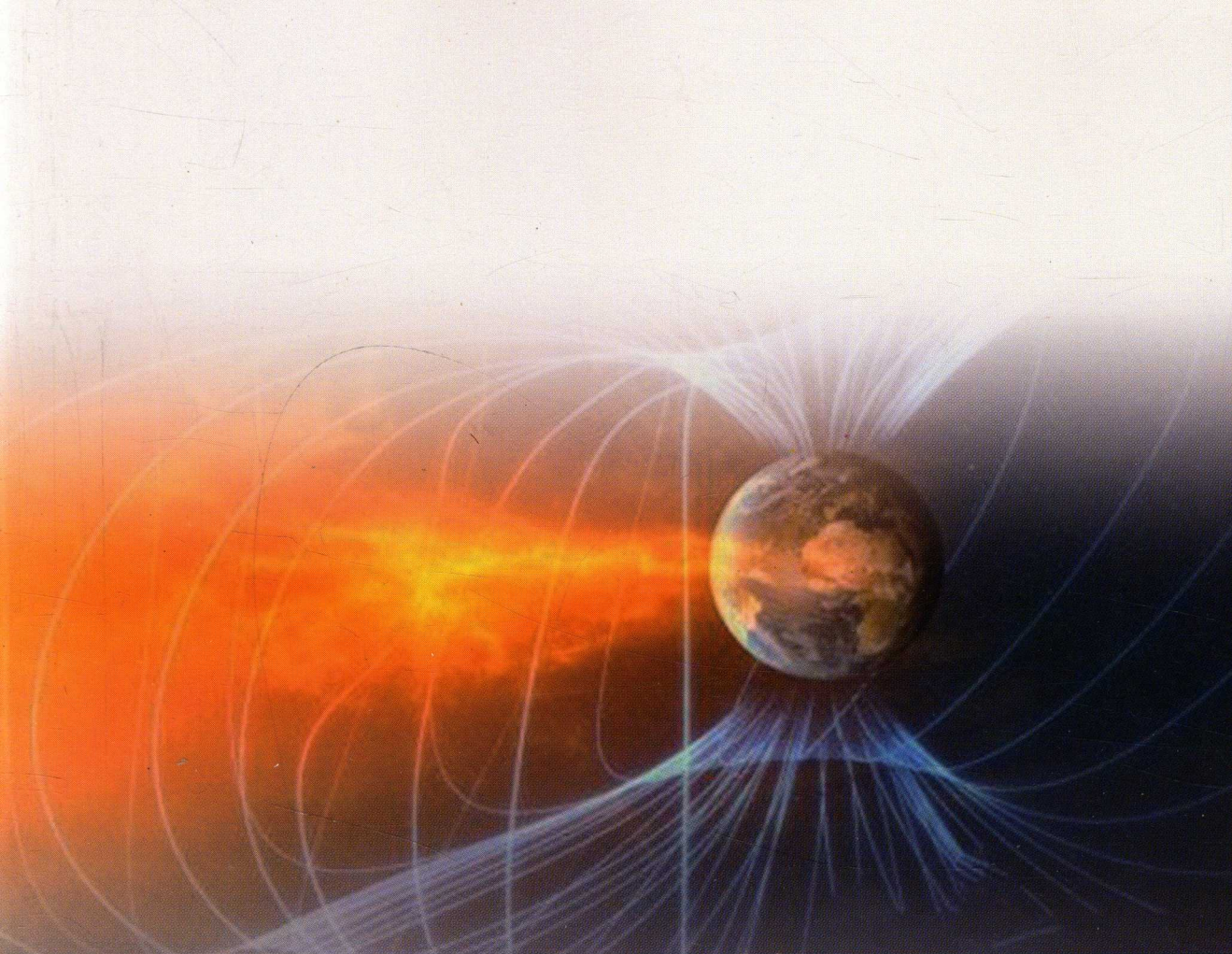




地球物理学入门

吴健生 王家林 赵永辉 于 鹏 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

地球物理学入门

吴健生 王家林 赵永辉 于 鹏 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书在固体地球物理学框架下,系统阐述地球的物理性质、物理结构和总体物理特征,地球物理学的基本概念和重要的研究。以地球物理性质为引线,粗线条地介绍应用地球物理学的方法、原理和应用,近年来地球物理学典型研究案例及应用成果。为便于组织教学和学生自学,全书共分20章,每章按一周4个课时的教学内容来组织题材以尽量保持其相对独立性。

本书可作为地球物理学专业本科生教材,亦可作为相近或有关专业的教学参考用书。对于从事相近专业或有关的科技人员和管理人员,以及有意了解地球物理基础知识的有关人员,也有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

地球物理学入门/吴健生等编著. —上海:同济大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-5608-6684-0

I. ①地… II. ①吴… III. ①地理物理学 IV. ①P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 316687 号

地球物理学入门

吴健生 王家林 赵永辉 于 鹏 编著

责任编辑 胡晗欣 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 常熟市大宏印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 17.75
字 数 443 000
版 次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6684-0

定 价 52.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

本书的编写受益于参与同济大学“地球物理学”课程教与学的多位师生的实践。同济大学于1975年成立海洋地质系,增设了海洋地球物理勘探专业,1984年将其更名为勘查地球物理专业,开始了“地球物理学”课程的教学活动。先后选用了王家映先生编写的《地球物理学》,张少泉先生编写的《地球物理学概论》(1986版),藤吉文先生编写的《固体地球物理学概论》(2003版)和史謩先生编著的《地球物理学基础》(2002版)作为教材。2003年,为适应学生对地球物理学知识不同广度和深度的需要,“地球物理学”课程被调整为“地球物理学概论”和“固体地球物理学”两门,前者作为学院平台课,授课对象是全院3个专业(地球物理学,地质学和地球信息科学与技术)一年级学生。2005年,“地球物理学概论”(后改名为“地球物理趣谈”)成为全校各专业的通识选修课。结合“上海市精品课程建设”和学校“卓越课程行动计划”,“地球物理学”课程开展了以“注重实践,以学生为主体,以培养兴趣为起点”为目标的教学改革和课程建设。树立“知识学习—能力训练—创新精神”并重培养的教学目标,建设以学生为中心的课程教学方式。将教学传授方式分割为基础教学板块,讨论式教学板块,探究式教学板块,启发式、参与式教学板块和案例式教学板块。强调学生自主学习,锻炼实践技能,全面激发创新意识和兴趣,培养学生对知识融会贯通的能力、创新能力和创新素质,以满足地球科学高级人才培养的迫切需要。

为了适应这一教学需要我们编写了本书,在结构安排上围绕每一周的学习内容独立成章。碎片化过程以场源物理性质为纽带,从概念、总体地球物理特征到相应的异常、资料处理、解释和地质应用来安排前后章节内容;重在引导学生自主学习,通过交互式、案例式教学方式的引入和教材内容的调整,突出重点,让学生在掌握地球物理学基本概念、方法和原理的同时,激发对地球科学的兴趣,能从物理学角度对地学现象进行观察、形象思维、合理建模、演绎推理和科学分析,从而增强对实际问题的处理能力,实现为兴趣而学,学有所思,学有所用。

在本书的编写过程中,编者主要参阅了张少泉先生编写的《地球物理学概论》、史謩先生编著的《地球物理学基础》、刘天佑先生编著的《地球物理勘探概论》,同时也参阅了相关的国内、外出版的教材和论著、论文,有些经典部分被直接引用;在编写本教材过程中,同济大学教务处和同济大学出版社编辑同志给予了大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

由于编写者水平有限,书中的缺点和不足之处在所难免,敬请读者赐教。

编者

2016年11月11日

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 地球的物理特性和地球物理场	1
1.2 地球的物理过程和物理演变	3
1.3 地球物理场的影响和地球物理应用	5
1.4 地球物理观测展示事物的多面性	9
2 地球介质和弹性波传播	12
2.1 地球介质	12
2.2 应力和形变,弹性模量	14
2.3 案例剖析	15
2.4 地震波的类型	17
3 天然地震和远震传播	20
3.1 天然地震	20
3.2 球对称介质中远震地震波的传播	25
4 体波震相和(地球)圈层结构	34
4.1 体波震相	34
4.2 地球内部的分层结构	38
4.3 案例:南海北部陆缘地壳层状结构	45
5 地震探测的反射波法	52
5.1 地震波的反射和反射系数	52
5.2 反射波时距曲线	54
5.3 地震探测的野外工作方法	56
5.4 静校正和动校正处理	59
5.5 反射地震资料的解释	61

6 折射波法和面波探测	67
6.1 折射波法	67
6.2 瑞利波法探测	71
7 地球形状和正常重力	78
7.1 地球形状和大小	78
7.2 地球的重力场和重力位	79
7.3 地球参考椭球体和大地坐标系	81
7.4 正常重力公式	84
8 重力观测和重力异常	85
8.1 重力的观测	85
8.2 全球重力网和国家重力网	87
8.3 重力测量工作方法	88
8.4 重力异常	89
9 重力勘探原理和应用	95
9.1 岩(矿)石的密度	95
9.2 不同阶段重力勘探	96
9.3 重力异常正演计算	97
9.4 重力异常的分离和提取	101
9.5 重力异常的反演	104
9.6 重力资料的地质解释和应用	108
10 地球转动和日、月引力	113
10.1 天球坐标系	113
10.2 地球转动与时间的确定	114
10.3 地球在空间的运动	115
10.4 引潮力和引潮力位	117
10.5 海洋潮汐、大气潮汐和固体潮	122
11 地球密度和均衡补偿	127
11.1 地球密度	127
11.2 地球表层均衡补偿现象	131
11.3 局部补偿的均衡改正和均衡异常	133

11.4 区域均衡和实验均衡	137
12 点电流场、大地导电和观测	141
12.1 均匀各向同性半空间点电流源的电场	141
12.2 矿物、岩石的电阻率和影响因素	143
12.3 地下电阻率的观测	147
13 大地电磁场和自然电场	156
13.1 电离层和磁层	156
13.2 大地电磁场	158
13.3 局部电场(自然电场)	164
14 大地电磁测深和应用	167
14.1 一维层状介质平面电磁波传播特性	168
14.2 各向异性介质平面电磁波传播特性	172
14.3 大地电磁测深资料的采集	173
14.4 大地电磁测深资料的解释和应用	176
15 磁场理论与地磁特征	184
15.1 磁场强度和磁势	184
15.2 地心轴向磁偶极子场	187
15.3 地磁场和地磁要素	188
15.4 地磁场的构成	190
15.5 主磁场的长期变化	194
15.6 地磁场的成因	199
16 地磁观测和磁力异常	202
16.1 地磁场观测	202
16.2 磁力异常	205
16.3 磁性体的磁场	209
17 岩石磁性和(磁)异常解释	217
17.1 岩(矿)石的磁性	217
17.2 磁异常的处理和反演	219
17.3 磁异常的解释和磁法探测的应用	225

17.4 利用区域磁异常研究东海陆架区基底构造	230
18 剩磁原因和古地磁学	234
18.1 岩石的剩余磁性	234
18.2 不同类型的剩磁	236
18.3 古地磁学的原理和方法	237
18.4 古地磁学的应用	239
19 地温场的外冷内热	244
19.1 地温场和热力学两定律	244
19.2 地壳和岩石层的温度分布	246
19.3 地幔温度分布	249
19.4 地核温度分布	252
19.5 地球温度及热力学参数分布	253
19.6 地热能	254
20 热流测量和热流分布	259
20.1 地表热流概念	259
20.2 地表热流的测量原理	260
20.3 全球地表热流场	262
20.4 热源分布	264
20.5 传热机制	269
参考文献	273

1 绪 论

地球物理学是观测和认识与地球有关的物理现象,研究地球的物理性质,追索地球的物理演变,实践地球物理的应用性学科。或者说,地球物理学是以地球为研究对象的一门现代应用物理学。这里提到的地球物理现象包括地球自身及其与之有相互作用的太阳以及太阳系的行星引发的物理现象。

作为一级学科的地球物理学包含了空间物理学和固体地球物理学两个二级学科。固体地球物理学自 20 世纪初就已自成体系,尤其是 20 世纪 60 年代以后,发展极为迅速。固体地球物理学包含地震学、地磁学、重力学、电磁学及地热学等多个分支学科,涉及海、陆、空三个领域,是天文、物理(尤其是力学)、数学(包括计算数学)、化学和地质学之间的一门交叉学科,在地球科学领域里占有极为重要的地位,故又被当成狭义的地球物理学。本书将在这一范畴下展开。将地球作为一个天体来研究,这便确定了固体地球物理学和空间物理学之间的关系;在研究地球本身的结构和发展时,固体地球物理学又和地质学及地球化学有着密切的联系。

固体地球物理学的研究领域很宽广,它是以现代物理学、力学和数学为基础;在观测技术方面必须以现代电子学、计算技术、空间观测等高科技成就的应用为先导;同时又必然涉及大陆、海洋以及空间科学的发展和相互作用。由于它是用物理的方法解决或解释地学问题,故又与地质构造、地球化学有着密切的关系。在地球的运动和内部物质的迁移中,大气物理、空间物理、天文物理和海洋物理均对地球科学的发展有着重要的影响。

1.1 地球的物理特性和地球物理场

物理学上,若在某一空间定义了一个物理量,就称在这一空间存在着这一物理场。如在海洋中定义了海水速度这一个物理量,就称海洋中存在着海水速度场。

组成地球的物质具有密度这一物理性质,宏观上,地球表现出有质量的特性。在地球表面一个单位质量的物体,一方面随地球自转受到离心力的作用,同时也受到地球质量体对它的引力作用,两者的合力称为重力。在地球周围空间,物体都要受到地球的重力作用,也就是说在地球周围空间存在着重力场。

在地球物理学研究中,地球的物理特性包括密度、弹性、导电性、导热性、磁性、放射性等物理性质。相应地,在地球表面存在着重力场、地震弹性波场、地下电流场、地球电磁场、地下温度场、磁场、辐射场等物理场。

地球的物理性质由组成物质本身的材料(元素)、结构、温度、压力等环境因素所决定。

不同元素的物理特性,是由原子的内外电子轨道结构、电子壳层的特点和原子核的质量,以及核的结构等决定。如密度和弹性取决于原子核和电子层的结构,磁性、电性和热性取决于电子层的结构及电子的运动状态,而放射性取决于原子核的结构。在宏观研究方面,物质的物理特性随不同的空间和时间变化而变化。如岩石物性随着岩石所处构造部位的不同而不同:构造破碎带中的岩石和围岩相比,常常表现为破碎带岩石的密度、磁性和弹性波传播速度值的相对降低,而当破碎带含水时,电阻率值也相应明显下降。

地球的表层岩石具有弹性,伴随某处构造应力的突然释放,将会在周围岩石层中引起机械振动,产生地震波并往外传播。大的地面振动将引起建筑物的破裂、倒塌,在海区诱发海啸,给人类带来生命财产的巨大损失。另一方面,通过地面若干台站的观测记录,可定位出发生应力释放的地点——震源位置。图 1-1 是利用国际地震中心(ISC)提供的资料制作的 1990—2000 年全球地震分布图。地震具有成带分布特点,这些地震带与板块构造的板块边界十分吻合。

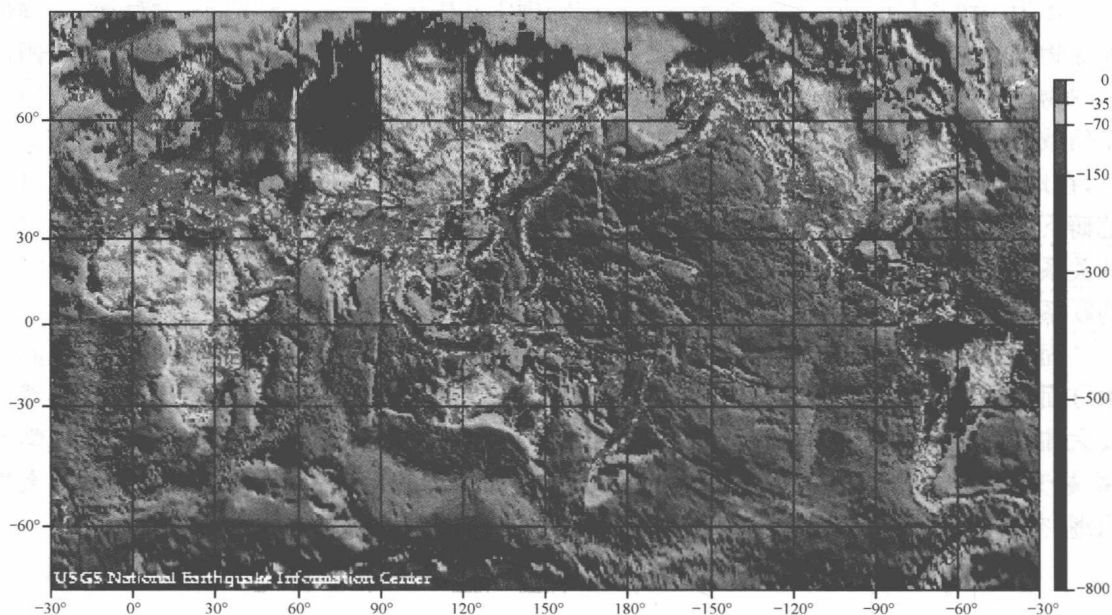


图 1-1 1990—2000 年全球地震分布图(由 ISC 提供的资料制作)

由于地球物理场的存在,地球物理研究人员通过仪器观测获得大量地球物理场数据,经过模型简化,物理和数值模拟,资料处理和反演对地球内部和整体进行定量研究。根据观测的地球物理场不同,固体地球物理学的研究领域大体上可以分为以下 6 个方面:

(1) 地震波场研究:有天然地震学和地震勘探(探测),后者研究人工源地震波场,涉及地震反射波(宽角反射和近垂直反射)、折射波、首波、转换波、面波和地球的自由振荡及脉动。

(2) 位场研究:有重力学和重力勘探(探测),地磁学和磁法勘探(探测),以及古地磁研究。

(3) 电磁场研究:指直流电场,天然电磁场和人工源电磁感应场的研究和勘探(探测)。

(4) 地热场研究:指地下温度场和大地热流研究和利用。

(5) 物理化学场研究:即放射性场的研究和应用。

(6) 地球运动学和动力学研究:指综合地球物理场和地球动力学研究,即通过综合地球物理场分析来研究地球系统及其深部的介质结构与物质组成、状态及物质的运动,特别是深部圈层耦合、物质与能量的交换及其深层动力过程。

1.2 地球的物理过程和物理演变

作为太阳系中的一颗行星,地球有它整体的自转和公转等运动状态,这是一种物理现象,也是地球演变史上一个物理过程。在地球物理研究史上,为了证实地球自转,法国物理学家傅科(Foucault)设计了一个特殊的摆,这个摆的结构同普通摆一样,悬挂摆的架子固定在地面上,架子与摆之间通过可以在任意方向旋转的旋钮加以联结。傅科采用了 67 m 的长绳和重达 27 kg 的摆锤,有效地增大了摆动的持续时间和摆的惯性。傅科于 1851 年在法国巴黎的一个圆顶大厦成功地进行了这个摆的摆动试验(图 1-2)。试验结果证实了地球向东旋转。

地球自转速度相当稳定,长期以来作为时间和记年的标准。以太阳为参考点,地球上同一子午面连续两次通过该点的时间记为 1 个太阳日。地球不但自转,而且绕日公转,公转的轨道是椭圆,所以在一年之中每天的太阳日是不等的,取一年之内诸太阳日之平均值,就得一个平均太阳日,即日常生活中所用的日。

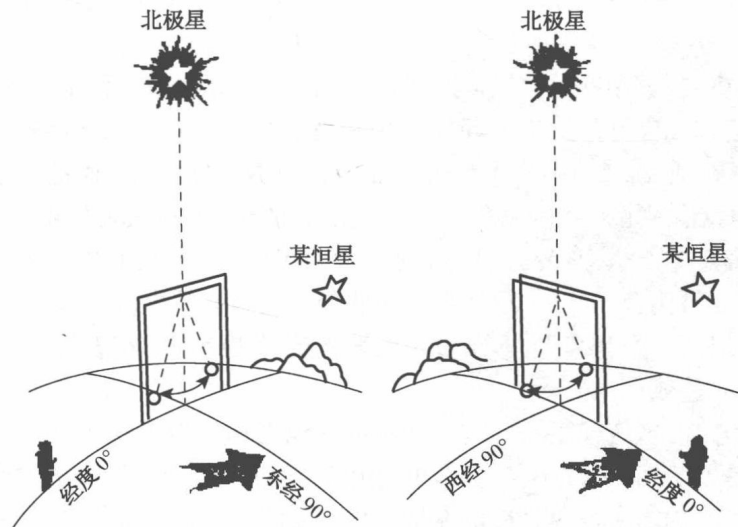


图 1-2 证实地球自转的摆动试验

地球绕太阳公转,自转轴与公转轨道的法线之间有 $23^{\circ}23'$ 的夹角,导致一年的不同季节间地球同一表面接收到的太阳光照大不相同,出现四季的变化和大地万物的生息相应。显然,这种物理周期过程现象十分明显。

气候变化也是一种物理现象。在正常年份,热带西太平洋被高温(中心超过 29°C)的“暖池”水覆盖,东太平洋则由温度较低($20^{\circ}\text{C}\sim 26^{\circ}\text{C}$)的“冷水”所盘踞。但这种格局每过

2~7 年就被厄尔尼诺(El Niño)现象的出现打乱一次。厄尔尼诺现象是指发生在热带太平洋的海温异常增暖的一种气候现象,一旦这个状态维持 6 个月以上就会被认定是发生了厄尔尼诺事件。厄尔尼诺事件发生时,南半球强劲的西北季风削弱了秘鲁西海岸的离岸风——东南信风,使南太平洋东部秘鲁寒流(沿南美洲西海岸自南向北流动)冷水上泛减弱甚至消失,并且吹拂着水温较高的赤道暖流南下,使秘鲁寒流的水温反常升高,太平洋广大水域的水温升高,可比常年高出 $3^{\circ}\text{C}\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。这改变了传统的赤道洋流和东南信风,导致全球性的气候反常,太平洋沿岸一些地区迎来反常降水,另一些地方则干旱严重。如 1986—1987 年的厄尔尼诺事件,使赤道中、东太平洋海水表面水温比常年平均温度偏高 2°C 左右。同时,热带地区的大气环流也相应地出现异常,热带及其他地区的天气出现异常变化;南美洲的秘鲁北部、中部地区暴雨成灾;哥伦比亚境内的亚马孙河河水猛涨,造成河堤多次决口;巴西东北部少雨干旱,西部地区炎热;澳大利亚东部及沿海地区雨水明显减少;中国北方地区、南亚至非洲北部大范围地区均少雨干旱。

拉尼娜(La Niña)指发生在赤道太平洋东部和中部海水大范围持续异常变冷的现象(海水表层温度低出气候平均值 0.5°C 以上,且持续时间超过 6 个月以上),是厄尔尼诺现象的反相,故又被称为“反厄尔尼诺”或“冷事件”。从 20 世纪初到 1992 年期间,拉尼娜现象共发生了 19 次,每 3~5 年发生一次,但也有时间间隔达 10 年以上的。20 世纪 80 年代以来,先后在 1984—1985 年、1988—1989 年和 1995—1996 年出现过拉尼娜现象。拉尼娜多数是跟在厄尔尼诺之后出现的,在前述 19 次拉尼娜现象中,有 12 次发生在厄尔尼诺年的次年。

拉尼娜现象出现时印度尼西亚、澳大利亚东部、巴西东北部、印度及非洲南部等地降水偏多。相反,在赤道太平洋东部和中部地区、阿根廷、赤道非洲、美国东南部等地易出现干旱。

有关资料分析表明,在发生拉尼娜期间,西太平洋(包括南海)活动的台风和影响我国的台风都比较多,而在发生厄尔尼诺期间却出现相反的情况。在拉尼娜年份,西太平洋(包括南海)台风总数平均为 26.2 个,登陆我国大陆的台风数为 7.4 个,而厄尔尼诺年份平均为 21.4 个和 5.2 个。拉尼娜对我国东北夏季气温和华北汛期降水都有影响:在拉尼娜年份,沈阳、长春和哈尔滨夏季气温为偏高,而在厄尔尼诺年份,夏季气温往往偏低;在拉尼娜期间,华北汛期降水量容易偏多,而厄尔尼诺年份华北降水量容易偏少。

如果将厄尔尼诺称为“暖”事件,则可相应地将拉尼娜称为“冷”事件。一“暖”一“冷”,相互修正事件发生时造成气候失衡。

按照板块构造理论,地球表层(即岩石层,包括地壳和上地幔约 100 km 厚,具有较大强度的地层)并不是整块,而是被一些如海沟、洋中脊、转换断层等活动构造所割裂,形成若干个大小有限的单元,称之为板块。板块不是静止不动的。它们在地幔物质的对流带动下,每年以几个厘米的速度由洋中脊向两旁扩张;在海沟处沉入地下,通过软流层完成对流循环。威尔逊进一步归纳总结了从大陆裂谷、新生洋盆,无海沟的大洋、有海沟的大洋到陆内缝合带的出现这一板块演化过程,称为威尔逊旋回。其时间周期可达几十到上百个百万年。板块构造运动出现在地球演变历程中一个重要的构造时期,其本身也是一种物理过程。在板块汇聚处(俯冲带或缝合带),应力不断积聚,达到岩石破裂的极限时地震就可能发生。地震现象属于自然界中的一类突变现象,即系统从一种稳态经过极短暂的失稳运动发展为另一种稳态,其中失稳态的时间长短可能只有几分钟。虽然地震发生的时间很短,可给人类带来

的灾难是巨大的,它可能使城市和古建筑成为废墟,千万人丧生于几秒、十几秒的瞬间(图 1-3、图 1-4)。这些活动一方面给人类带来灾难,另一方面也是地球充满活力的象征。

正是因为有了岩石层这一载体的存在,每年只有几厘米速度的板块运动这种渐变式的地球演变产生的应力和能量,逐渐积累,最终以地震、火山喷发等突变现象来释放。



图 1-3 台湾 1999 年集集大地震造成桥梁倒塌

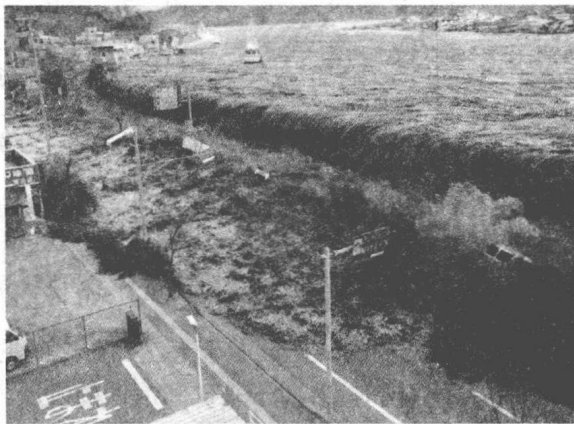


图 1-4 2011 年日本大地震引发的海啸

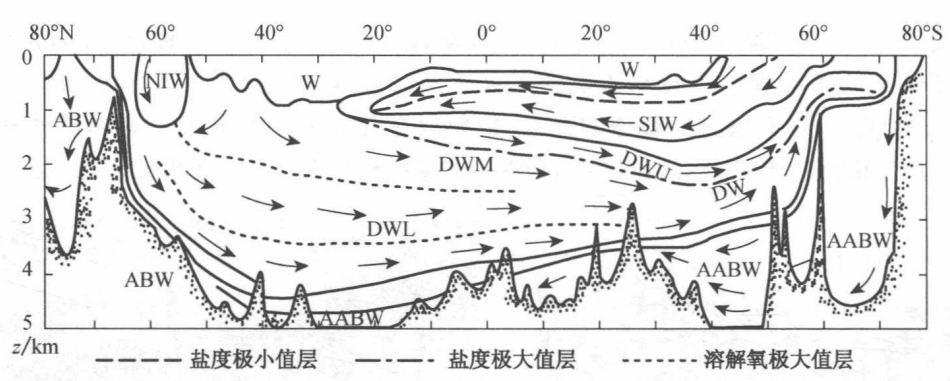
1.3 地球物理场的影响和地球物理应用

地球重力场的影响,表现为物体受到重力作用和具有势能。江河上游的水体在回归大海的旅程中,随着高度的降落,势能转变为动能,浩荡的江水携带大量的泥沙,将其搬运到入海口处沉积(图 1-5)。日积月累,慢慢地高山变平原。在海洋、极地附近的冷水密度增大,下沉海底,势能转变为动能,浩荡的水流构成大洋的深层水或底层水,成为大洋传输带的一个组成部分(图 1-6)。

重力的作用使我们有“脚踏实地”的感觉,也导致海水随深度加大水压急增,使得人们在没有深潜设备时无法在海洋深处自由翱翔。要使人造卫星环绕地球运动,最小发射速度需达到 7.9 km/s ,称为第一宇宙速度(环绕速度);要使物体挣脱地球引力的束缚,最小发射速度需达到 11.2 km/s ,称为第二宇宙速度(脱离速度);要使物体挣脱太阳引力的束缚,最小发射速度需达到 16.7 km/s ,称为第三宇宙速度(逃逸速度)。同样,要准确击中目标,瞄准时要考虑到重力的影响。



图 1-5 东海近长江口区水体颜色的变化



W—暖水系; NIW—亚北极中层水; SIW—亚南极中层水; DW—深层水; DWU—上深层水; DWM—中深层水; DWL—下深层水; ABW—北极底层水; AABW—南极底层水

图 1-6 大西洋西部南北向剖面的水团分布

人们对磁场的认识始于天然磁石之间的相互吸引现象。早在公元前 770 年至公元前 221 年春秋战国时期,由于采矿和冶铁的发展,在中国《管子·地数》中就有“上有慈石者,下有铜金”,如同“母子相恋”的记载。古代的“慈石”后来被改称为“磁石”。公元前五六世纪,希腊哲学家泰勒斯(公元前 640?—公元前 546 年?)和柏拉图(公元前 427?—公元前 347 年?)论述过磁石相互吸引和磁石与铁块相互吸引的现象。严格地说,这些认识应该属于一般物理学中的磁学范畴,但它们为地磁学研究奠定了基础。

真正属于地磁学研究内容的地磁场是中国人最先发现并加以应用的。公元前 250 年左右战国末年的《韩非子·有度》记载了指南针的先驱——司南的应用:“先王立司南以端朝夕”。汉代王充(公元 27—97 年)在他所著的《论衡·是应》中描述司南形同水勺,勺柄自动指南(图 1-7)。到公元 300—400 年的晋代,出现了指南船,这是最早发明的航海罗盘。指南针在航海中应用的记载,首见于北宋朱彧所著的《萍州可谈》(1119 年),其中提到“舟师识地理,夜则观星,昼则观日,阴晦观指南针”。北宋著名学者沈括在《梦溪笔谈》(11 世纪末)中详细记载了磁针指向特点和磁针制作的方法:“方家以磁石磨针锋,则能指南,然常微偏东,不全南也。”这里,不仅说明了磁针的指南特性,而且明确地记载了磁偏角的存在。他在该书中总结的制作指南针的 4 种方法至今仍在使用。

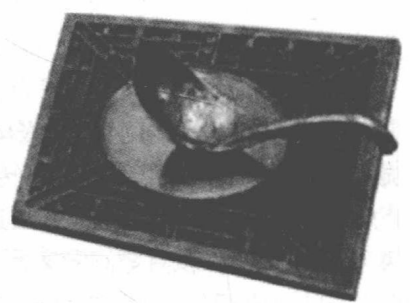


图 1-7 司南

随着航海技术的发展,在中国和欧洲,罗盘逐渐成为广泛应用的定向工具。可以说,没有指南针,就没有我国明代郑和(1371—1433 年)的“七下西洋”,就没有意大利人哥伦布(1451—1506 年)的发现新大陆,就没有葡萄牙人达·伽马(1497—1498 年)的远航印度,也没有葡萄牙人麦哲伦的环球航行。

岩石具有磁性,因为岩石中的磁性矿物会在地磁场中被磁化而具有磁性(感应磁性和剩磁磁性)。自然界中火成岩的磁性最强,变质岩次之,沉积岩很弱。火成岩是地下深处的岩浆熔流上升到地面后冷凝而成。岩浆熔流很热,当其到达地面时,温度仍然可达到 1 000 ℃ 以上。当温度下降到居里点(400 ℃~500 ℃)时,便受到地磁场的磁化作用,获得强磁性。

随着温度下降,岩浆逐渐冷却,磁化仍在进行,强度不断减弱。降到常温之后,保持有热剩磁,从而得到永久磁性。很明显,经过这样过程所得到的磁性,含有其生成时代的磁场信息。例如:它的磁化方向就是当时地磁场的方向;同时,因为岩石的位置受构造运动的影响,因而又含有构造运动的信息。把这两种情况结合起来,就可以通过磁化方向的分布和变化,研究板块构造运动。这便是利用古地磁研究构造运动的基本依据。

在假定古地磁场与今天地磁场结构相同(同为偶极场,两极连线与地理极连线一致)的情况下,可推断等效的古磁极位置。如果不同样品(不同地点)所得古磁极位置不同,则表明存在非偶极场部分。它们的离散性可以作为古磁场偏离偶极场的一种量度,通常给出一个平均方向和一个置信椭圆作为最后结果。英国人兰康(S. K. Runcom)在1962年根据欧洲和北美岩石样品做出地磁极迁移轨迹,如图1-8所示,由单线给出欧洲资料计算结果,虚线给出美洲资料计算结果。两条轨迹很相似,但是不重合。

很显然,欧洲和美洲不可能各有各的磁极。由于只有一个共同的磁极,那么北美和欧洲的位置必将发生相对移动。事实上,将图1-8中北美洲轨迹相对于欧洲轨迹做 30° 的旋转,可以看到两条轨迹基本重合,并且两条轨迹线在时间上也能联结起来。

从图1-8可以看出,中生代以前,大西洋还不存在,欧洲与北美洲是连在一起的。而现在的北美洲与欧洲被大西洋隔开,当始于中生代。那么,从古生代到中生代这漫长的岁月里,正是北美漂离欧洲的过程。

地磁极倒转是古地磁学的另一贡献。布容(Brunhes)在1906年首先发现这一现象。他在野外岩浆岩中观测得到的岩石磁化方向,与现在的磁场方向相反。这个现象不是局部和偶然的,之后世界各地都发现这种例子。据统计,在测量的岩石样品中(包括不同地质时期的样品),正向磁化(与现在磁场方向一致)和反向磁化(与现在磁场方向相反)的数量大体上各占一半。岩石的磁化方向是正向还是反向,在时间上应该是全球一致的。而现在却有50%对50%的比例发生反向现象,这种现象不可能是“自发”的反向,唯一的解释是地磁场本身在地质年代里曾多次转换方向,且转换的时间间隔很不规则,但转向的时间却是确定的。因此,可以按照地磁场的方向(极性)和岩石样品的放射性年龄测定建立一个年表,称为地磁岩石极性年表,简称地磁岩性年表(图1-9)。

海上磁力测量资料表明,大洋地区的磁异常分布有明显的特征,与大陆地区磁异常分布全然不同。在洋中脊两边,正异常区和负异常区都呈条带状交替出现,与洋中脊的走向平行。在与洋中脊垂直的各条测线上,磁异常剖面彼此密切相关,相应的变化可以连成一线。值得注意的是,磁异常分布是关于洋中脊对称的,尤其是洋中脊附近更为明显。条带状的线性排列可以延伸到很远的距离。这种磁异常特征被认为是海洋地壳中的玄武岩被正反交替的磁场磁化的结果。

这些线性磁异常在世界上普遍存在,并发现现有深海底的50%是在最近70百万年期间

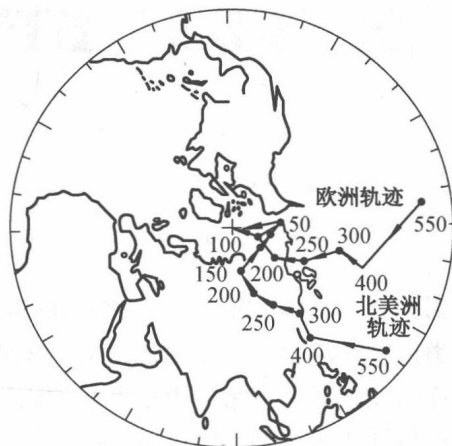


图1-8 欧洲和北美洲磁极迁移曲线(宋仲和等,1981)

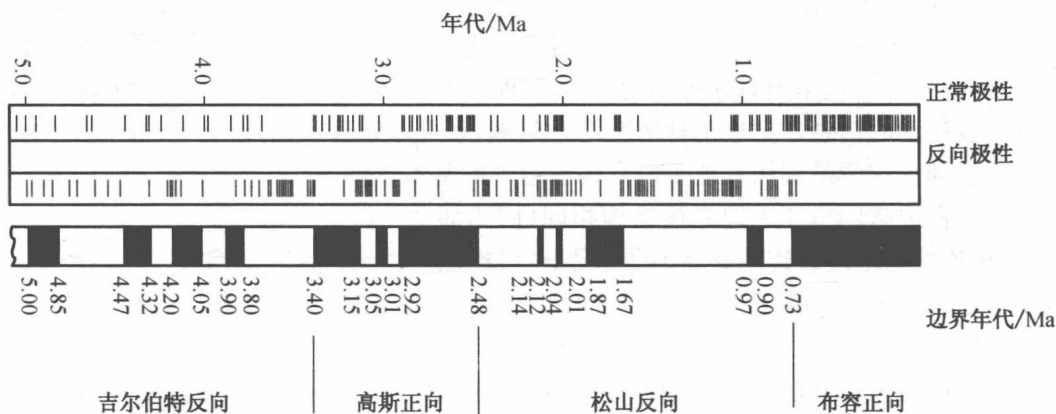


图 1-9 由大陆岩石磁性导出的地磁极性年表(地磁岩性年表)

形成的。有趣的是,海底从海岭向两侧扩展的概念与地磁场的倒转现象结合在一起,会形成类似于测震学中记录地面振动的地震图一样的天然“地磁”记录,它将海底扩张和磁场转向完整地记载了下来。再根据线性磁异常出现的位置,得到它们与洋中脊的距离,并配合由地磁极性年表得到的时间,从而可以算出海底扩张的速度为每年 $1\sim 5\text{ cm}$ 。

相比普通岩石而言,磁铁矿的磁性很强,以至在磁铁矿附近,指南针不再指向地磁南北。基于这一特点,1870 年泰朗(Thalen)和铁贝尔(Tiberg)制成了能够寻找磁铁矿的万能磁力仪,揭开了磁法勘探的序幕。随后,磁力仪精度不断提高,磁法理论也不断完善,使得磁法勘探在金属矿勘查中取得极大成功。如今在区域和深部地质调查、能源勘探、考古勘探等领域都能找到磁法的应用。图 1-10 展示了磁法探测在井中,用来探查桩基钢筋笼长度。

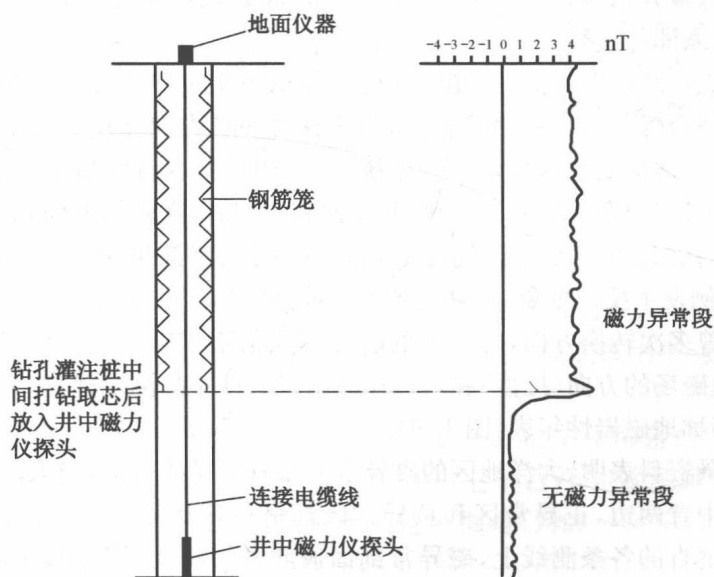


图 1-10 井中磁力仪探查桩基钢筋笼长度示意图

应用磁法寻找磁铁矿和探查桩基钢筋笼长度是应用地球物理的一个方面。地球物理应用就是应用地球物理原理来探测地下地质构造和结构,直接用于资源探查、环境保护、灾害防治。

1.4 地球物理观测展示事物的多面性

应用地球物理来解决地质问题,如揭示地层、岩石圈底界面等,前提是对象体之间和对象体与背景之间存在物性上的差异,同时由这种差异在地面上产生的地球物理场特征明显,能被识别出来。由于物性与岩性不是严格意义下的一对一关系,组成地下岩层物质成分的复杂性和多相态的共存现象,地球物理方法的多样性,导致用地球物理方法对事物的观测给出的结果具有多样性。

地球物理学教科书明确定义了地球的圈层结构,研究中引入的固体和液体概念,主要是根据地震波场中纵波和横波的传播特征给出的。因为地球外核不能通过横波,即不能发生剪切变形,故认为是液体。显然,这种对物态的定义,远不是那种“固体有一定的形态和体积,液体有一定的体积没有一定的形状,气体既没有一定的体积也没有一定的形状”的定性描述。物质的液态(液体)与固态(固体)还可以用剪切模量 Π 的数值来定义:当 $\Pi < 10^9$ Pa 时,为液态;当 $\Pi > 10^9$ Pa 时,为固态。考虑到组成地下岩层物质的多样性和温、压环境的不同,上述三种界定液态(液体)与固态(固体)的方案给出的液态(液体)与固态(固体)的界线已失去绝对的含义,体现了地球物理概念的相对性。

板块构造理论的基础模型是刚性岩石圈在软流圈上面“漂浮”并滑动,可见岩石圈是板块构造学中最主要的概念。另外,岩石圈也是地球动力学中的主要概念之一。在地球动力学中,岩石圈被描述为地球最外面固体热传导的表壳层,它包裹着对流的地幔。在实际研究中,岩石圈厚度分布信息是进行大尺度地球科学研究非常重要的一个参数。

一般认为,岩石圈包括地壳和上地幔高速盖层(lid),或者说是上地幔软流圈之上的地球表层部分。虽然这个岩石圈定义本身很简单且很容易理解,但当我们真正对岩石圈进行定量研究的时候,就会觉得它很复杂且具有明显的不确定性。这个不确定性主要来源于对岩石圈厚度的定量定义没有一个统一的标准,而不同的定义所采用的岩石圈物理性质不同,利用不同的物理性质就有不同的确定岩石圈的方法。如:

(1) 等效弹性厚度:岩石圈在板块间的相互作用下,在较长时间尺度里是基本稳定的,而其下面的软流圈则表现出了流动性。据此,人们常用等效弹性板模型从力学的角度来估计岩石圈的厚度。上覆在软流圈上的岩石圈对地质时间尺度($>10^5$ a)的负载(包括地形,岩石圈内部负载、下部负载)所做出的响应,可以由浮在流体层上的薄弹性板来研究。这个薄弹性板的厚度就被称为岩石圈的有效弹性厚度(或称等效弹性厚度 T_e)。

(2) 热学厚度:地球动力学的岩石圈是从热力学的角度来定义的。岩石圈是地球最外面的热传导层,除了浅部的空隙流体的对流外不存在热对流。地幔下部由于长时间尺度和高温的影响而表现出对流等流动性质。岩石圈下面的软流圈并不是液态的,但从岩石圈板块在软流圈上运动和地幔对流运动的角度来看,岩石圈底边界应该是达到或接近某种程度的(部分)熔融。而发生(部分)熔融的条件主要决定于岩石的成分、压力和温度等。考虑到地幔对流等原因,一般可以认为地幔的矿物成分较均匀简单。由于压力是基本知道的(可以根据密度来估计),那么(部分)熔融发生就主要取决于温度的分布。如果得到了上地幔的温度场分布,那么就可以根据地幔岩石熔融有关的温度来直接估计岩石圈与软流圈的边界。