

高等学校规划教材

应用地质力学

刘志刚 王连忠 编

煤炭工业出版社

18

/

高等学校规划教材

应用地质力学

刘志刚 王连忠 编

(京) 新登字042号

内 容 提 要

本书分为地质力学基本原理和地质力学应用实例剖析两篇,共十章。基本原理篇系统阐述了地质力学基本观点,增添了地质力学新进展内容,并应用材料力学、弹性力学基础知识回答了地质力学发展过程中遇到的很多疑难问题。实例剖析篇以典型范例和作者近30年的科研实践,深入探讨了应用地质力学、特别是地质力学新进展知识解决煤田地质、矿井地质、水文地质和工程地质等方面实际问题的方法和途径。

本书是煤炭高等学校煤田地质勘查专业的教材,也可作为矿井地质、水文工程地质、地质力学和普查找矿专业大学生的教学用书,并可供广大煤田地质、矿井地质和水文工程地质工程技术人员和有关科研人员参考。

高 等 学 校 规 划 教 材

应 用 地 质 力 学

刘志刚 王连忠 编

责任编辑:宋 德 淑

•

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

•

开本787×1092mm¹/16 印张9¹/1

字数224千字 印数1—1,185

1994年3月第1版 1994年3月第1次印刷

ISBN 7-5020-0902-7/TD·837

书号 3667 A0266 定价4.50元

前 言

本教材是根据煤炭高等学校煤田地质勘查专业《应用地质力学》教学大纲编写的。

应用地质力学是地质力学研究领域之一，它以地质力学基本原理为指导，密切结合典型实例的剖析，具体阐述地质力学在煤田地质、矿井地质和水文工程地质研究中的应用。其目的是供读者一方面掌握我国卓越地质学家李四光教授创立的地质力学基本理论，了解地质力学的新进展；另一方面学习应用该理论和新进展知识解决一系列煤田地质、矿井地质和水文工程地质问题的方法和途径。

《应用地质力学》不同于一般的地质力学教材，作者在编写程序上采取了有别于后者的作法，这是本教材的特色。例如，在地质力学基本原理篇，一开始就开门见山地直接阐述地质力学关于地壳运动起源的基本观点，并将它贯穿到以后的每个章节中去，目的是加深读者对地质力学科学理论的理解；再如，本书增添了地质力学新进展的知识，突出了应用实例的剖析。

根据教学计划，本教材是按50学时编排的。它是煤田地质勘查专业的教材，也可供水文工程地质专业使用，在使用时可各有所侧重。

参加本书编写的人员有：阜新矿业学院刘志刚教授（绪论、第一、二、三、四、五、六、七、八章）；河北煤炭建筑工程学院王连忠副教授（第九、十章）。刘志刚统一修改定稿，为本书主编。

应当指出：在编写过程中，各兄弟煤炭院校提出过宝贵的意见，为本书水平的提高起了很大作用；阜新矿业学院张平安老师的帮助，也是本书顺利出版的重要因素。作者希望借此机会，向他们表示衷心谢意。

由于编者水平所限，错误和不足之处，请读者批评指正。

编 者

1993年4月于北京

目 录

绪 论	1
-----------	---

第一篇 地质力学基本原理

第一章 地壳运动的起源	3
第一节 地壳运动的动力来源	3
第二节 地壳运动的产生和一再发动的原因	6
第二章 构造形迹力学性质鉴定	10
第一节 若干基本概念	10
第二节 断层力学性质宏观鉴定	13
第三节 断层力学性质微观鉴定	21
第三章 构造形迹的序次和等级	26
第一节 构造序次	26
第二节 构造等级	29
第三节 研究构造序次和等级的意义	30
第四章 构造体系和构造型式	31
第一节 构造体系	31
第二节 构造型式	32
第三节 确定构造体系的原则	33
第五章 构造体系介绍	34
第一节 纬向构造体系	34
第二节 经向构造体系	42
第三节 华夏系和新华夏系	45
第四节 西域系和河西系	50
第五节 北西西系和北北西系	53
第六节 山字型构造体系	56
第七节 入字型构造和棋盘格构造	61
第八节 简单旋扭构造体系	65
第九节 复杂旋扭构造体系	69
第十节 活动构造体系	76
第六章 构造体系联合与复合	79
第一节 构造体系联合	79
第二节 构造体系复合	80
第三节 研究构造体系联合、复合的意义	89

第二篇 地质力学应用实例剖析

第七章 地质力学在煤田地质研究方面的应用	91
第一节 盆地形成、演化与动力学研究	91

第二节 构造聚煤、控煤规律研究	103
第八章 地质力学在矿井地质研究方面的应用	109
第一节 矿井构造规律研究和预测	109
第二节 掘进巷道前方隐伏断层定量预测	115
第九章 地质力学在水文地质研究方面的应用	119
第一节 在基岩裂隙水研究中的应用	119
第二节 在岩溶水研究中的应用	127
第十章 地质力学在工程地质研究方面的应用	136
第一节 在区域稳定性评价中的应用	136
第二节 在岩体稳定性评价中的应用	139
参考文献	146

绪 论

地质力学 (Geomechanics) 是地球科学领域里的一个新的分支, 它是我国卓越地质学家李四光教授吸取了近代地质学中活动论的合理内核, 通过大量的符合客观实际的地质资料的研究, 在总结前代地质学家孤立、零星、分散的研究成果基础上, 创立、倡导的一门边缘地质学科; 在他逝世以后, 以他的优秀学生、现任中国科学院学部委员、地质力学研究所名誉所长孙殿卿教授为首的我国地质力学工作者又为这门新兴学科的发展做出了巨大的贡献。

地质力学运用力学原理研究地壳构造和地壳运动, “它一条腿站在地质学方面, 一条腿站在力学方面” (李四光), 是地质学与力学相结合的产物; 它以地质学为基础, 同时涉及理论力学、材料力学、弹性力学、流变力学、断裂力学, 以及地球物理学、天文学、海洋学、宇宙地质学、陨石学等许多学科。所以, 它属于多边联系的学科。

一、地质力学研究对象和内容

地质力学研究的对象包括地壳运动所产生的一切地质现象, 概况起来无非是形变和形成, 即改造和建造两个方面。

形变, 即岩石圈的变形和变位, 也即地壳的结构, 它是地壳运动的直接产物。形成, 即地壳的组成, 是地壳运动产生的巨型褶皱——地向斜或拗陷, 以及断陷区域内形成的沉积岩; 是地壳运动产生的褶皱、断层引起的岩浆侵位形成的岩浆岩或喷溢形成的火山岩; 是地壳运动造成的高温、高压环境下形成的变质岩。所以, 形成是地壳运动的间接产物。从矛盾论的观点出发, 形变 (改造) 和形成 (建造) 是一对矛盾的两个方面, 而形变是矛盾的主要方面, 起支配作用, 即有了盆地才能有沉积, 有了断层、褶皱才为岩浆的侵位和喷溢提供通道和赋存空间, 有了高温、高压环境才能形成变质岩。所以, 地质力学侧重形变 (改造) 的研究, 紧紧抓住这个矛盾主要方面, 同时也不忽视形成 (建造) 的研究, 两者相互印证、互相补充, 从而得出比较正确和符合客观实际的结论。

地质力学研究地壳形变的主要内容包括以下四个方面:

(1) 研究构造形迹力学性质、变位或位移特征、构造序次。在上述研究的基础上, 进行构造组合和构造分期, 确定构造体系和构造演化, 阐明构造展布规律。

(2) 根据不同时期所形成之构造体系的构造型式 (应变图像), 结合点应力场测量, 综合考虑岩石力学性质, 返演地史时期区域构造应力场。

(3) 在构造应力场研究的基础上, 分析不同时期变形空间的边界条件, 推断区域地壳运动的方式和方向。

(4) 根据全球统一构造应力场特征, 综合研究引起地壳运动的各种因素, 探讨地壳运动的起源和地壳运动一再发动的原因。

地质力学研究地壳形成的主要内容包括以下两个方面:

(1) 研究岩浆岩体、火山岩和变质岩、各种内生矿床及矿体的赋存特征, 研究岩浆侵位、火山喷溢、变质作用和内生矿产富集的构造原因和构造控制作用。在此基础上, 一

方面从一个侧面探讨区域构造运动的方式、方向，另一方面探讨内生矿产的赋存规律。

(2) 研究盆地内沉积物的厚度变化、成因标志，岩相古地理特征和沉积环境；研究同沉积构造和外生沉积矿产聚集的原因，同沉积构造的控制作用和沉积后构造的改造作用。在上述研究的基础上，也从一个侧面探讨盆地形成、演化和地球动力学原理，同时探讨外生矿产的分布规律。

由此可知，地质力学在研究形成时，要与岩石学、矿床学等学科密切结合。

二、地质力学的研究方法

经过近70年的发展，地质力学已形成一套完整的理论体系和独特的工作方法。李四光教授系统总结出：鉴定构造形迹的力学性质；辨别构造序次和等级；确定构造体系的存在和它的范围；划分巨型构造体系鉴别构造型式；分析不同构造体系的联合和复合；探讨岩石力学性质和各类构造体系中的应力活动方式；模拟实验。

以上七个工作步骤中，前五步主要是野外和矿山井下的地质宏观调查及综合分析，并要适当配合室内研究工作，这是地质力学研究方法的重点。总的要求是从局部、个别的构造形迹的力学性质鉴定入手，然后是辨别它们的构造序次，最后是进行构造组合和构造复合研究。在这五个工作步骤中，构造形迹力学性质鉴定是最重要的基础工作，它应以宏观调查为主，同时还要配合显微镜下的显微构造研究和岩组分析工作；构造体系的确定和构造演化研究是最重要的综合分析工作，在这项工作中要特别注意叠加褶皱和断层多期活动的研究。

后两步主要是室内实验研究工作，这是对地质力学基础理论深入研究不可缺少的步骤。迄今为止，它仍是地质力学研究的薄弱环节。然而，只有加强这方面工作，才能使我们的认识更深入到事物本质中去，才能使地质力学研究达到尽善尽美的地步。

三、关于应用地质力学

地质力学发展至今已形成四大研究领域，即理论地质力学、应用地质力学、区域地质力学和实验地质力学。这些研究领域远远不是地质力学的全部内容，随着地质资料的积累和其它多边联系学科的发展，地质力学研究领域必将进一步扩大。

地质力学强调理论结合实际，而且它也是一门实用性很强的学科，并在生产实践中得到广泛的应用，取得了丰硕成果。其中，包括我国的石油普查勘探、内生金属和非金属矿床的找矿勘探、煤矿床和其它沉积矿床预测和勘探、水文地质及工程地质方面应用、地震预测预报和地热资源开发等许多方面，地质力学都作出了突出的贡献。因此，作为地质力学研究领域之一的应用地质力学已经形成许多分支。

地质力学在煤矿地质学的应用方面，主要包括煤田勘探和远景预测、老矿区的挖潜和保有储量的扩大、煤矿井田构造规律研究和矿井中小构造预测预报、煤矿开发和生产中的水文地质和工程地质方面的研究……等。

第一篇 地质力学基本原理

第一章 地壳运动的起源

对全球地壳构造的认识和地壳运动起源的看法,在地质科学研究史中长期处于众说纷纭云状态,也是目前地学界争论最激烈的问题。综合国内外地学界的观点,主要有:地台地槽学说、多旋回构造学说、地洼学说、板块构造学说、断块构造学说、波浪相嵌构造学说和地质力学学说等七个大构造学派。它们实际上是关于全球地壳构造和地壳运动的七种假说,这是个复杂问题,看来在不久的将来也很难取得一致的意见。

任何大地构造学派和地壳运动的假说,它能否成立,除了要看它的立论依据是否可靠、论据是否充分、能否解决生产实践中提出的大量地质问题外,还有一个重要方面是它能否对各种地质现象——大到天体、小到显微形迹的成因和相互之间的联系提出合理的解释。正是从上述认识出发,地质力学提出地壳运动的起源和主因是地球自转速率变化的基本观点。

第一节 地壳运动的动力来源

地球是个围绕其自转轴高速旋转的扁球体,在地球赤道上,其自转线速度高达1600 km/h。在探讨地球动力学原理时,地质力学认为引起地壳运动的主要动力来源是在重力控制下的地球自转速率变化产生的离心惯性力经向水平分力和纬向惯性力。

一、离心惯性力经向水平分力

当一个物体围绕旋转中心作匀速圆周运动时,将产生向心力和离心力,两个力的大小相等、方向相反。假设地球围绕其自转轴也作匀速旋转,那么地球表面上任何一点A也将在垂直于自转轴的平面内作匀速圆周运动,并产生沿运动平面垂直指向自转轴的向心力和背向自转轴的离心力,其大小

$$f = m r \omega^2 \quad (1-1)$$

式中 f ——离心力,

m ——A点质量,

r ——A点在旋转平面内的半径,

ω ——地球自转角速度。

离心力 f 是矢量,它可以分解为平行地表的切向分力 f_1 和垂直地表的铅直分力 f_2 (图1-1a)。其中, f_2 的方向与地心引力 T 的方向相反,可以抵消一部分地心引力,所以A点的重量(即重力) $P = T - f_2 = mg$ (g 为重力加速度),而离心力的切向分力 f_1 总是呈水平状态沿经向方向由高纬度指向低纬度,因此又称为离心力经向水平分力,其大小

$$f_1 = f \sin \varphi$$

将式(1-1)代入上式,则

$$f_1 = m r \omega^2 \sin \varphi$$

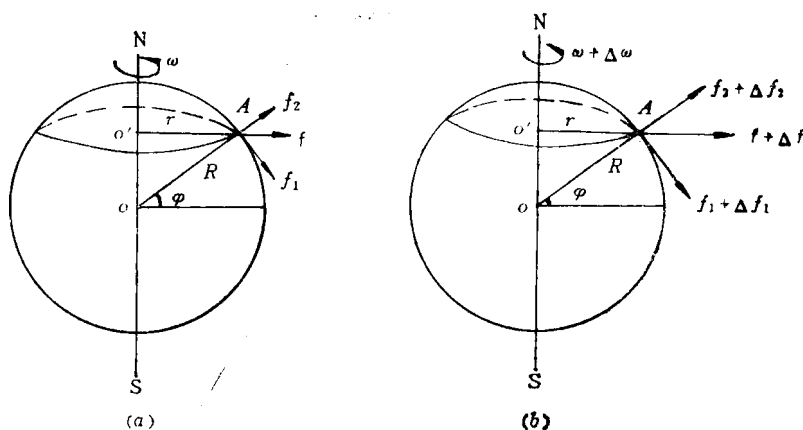


图 1-1 地球自转产生的离心力 (a) 和自转加快产生的离心惯性力 (b)

f —离心力, f_1 —离心力经向水平分力, f_2 —离心力铅直分力, Δf —离心惯性力, Δf_1 —离心惯性力经向水平分力

由于
所以

$$r = R \cos \varphi$$

$$f_1 = mR\omega^2 \sin \varphi \cos \varphi$$

即

$$f_1 = \frac{1}{2} mR\omega^2 \sin 2\varphi \quad (1-2)$$

式中 φ ——A点的纬度;

R ——地球半径。

万有引力使地球成为一个圆球体, 地球自转产生的离心力经向水平分力又有使地球从一个圆球体变成一个两极半径短、赤道半径长的扁球体的趋势。当上述两个力所产生的应力场达到平衡时, 便使地球成为一个具有一定扁度的旋转椭球体或称扁球体。在地球从形成到现在的几十亿年地史时期中, 如果地球自转速度一直保持不变, 那么地球的外形和地球内部物质的分布、地壳的结构早已达到平衡, 大规模的地壳运动就不应一再发生。换句话说, 如果地球作匀速自转, 它产生的离心力经向水平分力对大规模地壳运动的产生将不再发生作用。

在地球自转速度不断发生变化条件下, 如当地球自转速度加快时, 自转角速度将从 ω 变成 ω' , 即 $\omega' = \omega + \Delta\omega$, 离心力经向水平分力将由 f_1 变成 f'_1 , 产生一个增量 Δf_1 , 即产生水平惯性力, 称为离心惯性力经向水平分力 (图1-1b), 其大小

$$\Delta f_1 = f'_1 - f_1$$

由于

$$f_1 = \frac{1}{2} mR\omega^2 \sin 2\varphi$$

所以

$$\begin{aligned} f'_1 &= \frac{1}{2} mR\omega'^2 \sin 2\varphi = \frac{1}{2} mR(\omega + \Delta\omega)^2 \sin 2\varphi \\ &= \frac{1}{2} mR(\omega^2 + 2\omega\Delta\omega + \Delta\omega^2) \sin 2\varphi \end{aligned}$$

省略二阶无穷小 $\Delta\omega^2$ 之后

$$f'_1 = \frac{1}{2} m R \omega^2 \sin 2\varphi + m R \omega \Delta\omega \sin 2\varphi$$

所以

$$\Delta f_1 = f'_1 - f_1 = m R \omega \Delta\omega \sin 2\varphi$$

即

$$\Delta f_1 = m R \sin 2\varphi \omega^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right) \quad (1-3)$$

显然，当地球自转角速度加快时， $\Delta\omega$ 、 Δf_1 均为正值，方向沿经向由两极指向赤道；反之，自转减慢时， $\Delta\omega$ 、 Δf_1 均为负值，方向则沿经向由赤道指向两极。即是说，地球自转角速度加快，离心力经向水平分力因有一个增量（ Δf_1 与 f_1 方向一致）而增加，就可把地球表层物质（包括水圈）由高纬度再度推向低纬度的趋势；反之，自转减慢时，离心力经向水平分力因有减量（ Δf_1 与 f_1 方向相反）而减少，虽然它的方向仍指向赤道，但还可以使地球水圈向两极回流，地球的岩石圈应产生弹性反跳。当然，在推动地球表层物质沿经向方向运动的强度和幅度上，由于前者 Δf_1 （正值）受到离心力经向水平分力 f_1 的叠加，表现得更大、更明显；而后者 Δf_1 （负值）受到离心力经向水平分力 f_1 的抵消（因 f_1 永远指向低纬度），虽然也能使地球表层产生回流和反跳，但强度、幅度应远远小于前者。上述两种情况都可打破地球原有的平衡，而使自己不得不改变扁度和进行内部物质的再分配，不得不改变原有的地壳结构产生地壳运动。所以，离心惯性力经向水平分力可以成为地壳运动的动力来源之一。

由式（1-3）看出：当A点位于地球两极时，则 $\varphi = 90^\circ$ ， $\sin 2\varphi = 0$ ， $\Delta f_1 = 0$ ；A点位于地球中纬度时， $\varphi = 45^\circ$ ， $\sin 2\varphi = 1$ ， Δf_1 最大；A点位于地球赤道时， $\varphi = 0^\circ$ ， $\sin 2\varphi = 0$ ， $\Delta f_1 = 0$ 。由此说明，离心惯性力经向水平分力在地球两极和赤道几乎不起作用，并向着中纬度的方向增大。如果地球是个圆球体，其最大值恰好位于 45° 纬线。由于地球是个两极半径稍短（6356.8km）、赤道半径稍长（6378.2km）的扁球体，所以离心惯性力经向水平分力最大值所处纬线应小于 45° ，李四光教授计算的结果是 $44^\circ 57' 04''$ 。

二、纬向惯性力

地球自转速度的变化除了产生离心惯性力之外，由于地球围绕其自转轴自西向东旋转，还将产生沿纬线方向的切向水平惯性力，简称纬向惯性力。当地球自转加快时，其角速度由 ω 变成 ω' ，即 $\omega' = \omega + \Delta\omega$ ，地球表面上任何一点（恰好位于自转轴上的点除外），由于切向线速度 v 的加快，必将产生切向加速度 a ，同时产生纬向惯性力（图1-2），其大小

$$f_s = ma$$

由于

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$v = r\omega'$$

$$r = R \cos \varphi$$

$$\text{所以} \quad f_s = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d(R \cos \varphi \omega')}{dt}$$

即

$$f_s = m R \cos \varphi \frac{d\omega'}{dt} \quad (1-4)$$

式中 a ——切向加速度，

v ——切向线速度，

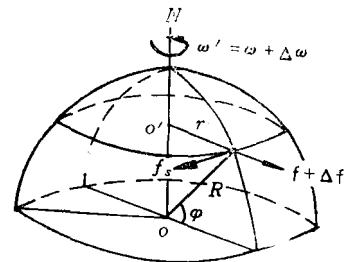


图 1-2 地球自转加快产生
纬向惯性力

f_s —纬向惯性力， Δf —离心惯性力

ω' ——地球自转加快后的角速度。

同样, 当地球自转加快时, $\frac{d\omega'}{dt}$ 为正值, f_s 为正值, 方向由东向西; 反之, 自转减慢时, $\frac{d\omega'}{dt}$ 为负值, f_s 为负值, 方向由西向东。换句话说, 当地球自转加快时, 纬向惯性力将把地球表层物质由东向西推挤; 反之, 纬向惯性力将使地球表层物质产生由西向东的回流或反跳。当然, 地球表层物质沿纬向运动的强度和幅度, 前者与地球自转方向相反, 其强度和幅度要大; 后者与地球自转方向相同, 运动幅度受其抵消一部分, 因此强度较弱显得不明显。它们也都能打破地球原有的平衡, 改变地壳结构, 产生地壳运动。所以, 纬向惯性力也可成为地壳运动的另一个动力来源。

由式 (1-4) 看出: 当 A 点位于地球两极时, $\varphi = 90^\circ$, $\cos \varphi = 0^\circ$, $f_s = 0$; A 点位于地球中纬度时, $\varphi = 45^\circ$, $\cos \varphi \approx 0.7$, f_s 较大; A 点位于地球赤道时, $\varphi = 0^\circ$, $\cos \varphi = 1$, f_s 最大。所以, 纬向惯性力同样在两极几乎不起作用, 但在地球赤道地区表现最大。

第二节 地壳运动的产生和一再发动的原因

在把地球自转速率变化作为地壳运动起源和主因时, 先探讨一下地壳运动发生和发动的可能性, 再研究在地史时期中地壳运动一再发动的原因。

一、地壳运动的产生和发动

当地球在自转速率变化引起的离心惯性力经向水平分力 Δf_1 的长期作用下, 首先地球本身在整体形状上要改变自己的扁度——当自转加快时增加扁度, 减慢时减小扁度。扁度的改变主要通过地球表层——地壳内物质再分配加以调整, 特别是通过地壳上层物质的层间或各部分之间的滑动来实现。自转速率变化引起的离心惯性力经向水平分力和纬向惯性力将在地壳, 特别在岩石圈中形成地应力场或构造应力场, 为适应这个应力场, 地壳或岩石圈原有结构平衡将遭到破坏, 地壳或岩石圈内的原有构造将改变。上述理论分析说明, 地球自转速率变化为地壳运动的发生、发动提供了可能的条件。

有人认为地球自转速率变化产生的离心力仅为 $n \times 10^{-5} \text{N/cm}^2$ 的数量级, 因而对能否推动构造运动持否定态度。

但赛钦斯基曾计算地球自转速率每年变化为 0.0012s 时, 所产生的能量比全年地震能量的总和还大 2 倍。根据现代石英钟、原子钟测量的结果, 地球自转速率不规则变化每年达 $0.004 \sim 0.005\text{s}$, 它所产生的能量可相当每年地震能量总和的 6~8 倍。若以不规则变化的最大值每年 1.6s (1910~1913 年) 计, 那么所产生的能量相当于全年地震能量总和的 2000 多倍。

地球岩石圈是个具有弹性的物体, 材料力学和弹性力学指明, 弹性物体具有积累应力的本能。在漫长的地史时期中, 岩石圈在地球自转速率变化形成的离心惯性力经向水平分力和纬向惯性力的长期作用下, 地应力将得到不断的积累。若以自转速率变化 $\frac{\Delta \omega}{\omega} = 2 \times 10^{-10}/\text{年}$ 计算, 赤道地带东西向压应力 $\sigma_s = 39.8 \times 10^{-5} \text{N/cm}^2$, 如果上述速率变化持续 500 年, 即使考虑长期地应力积累的松弛, 其东西向的挤压应力也可以达到 200kg/cm^2 , 仍有可能达到发动地壳运动的外力数量级 (王仁, 1978 年)。王仁教授 (1980 年) 还用简单线性

流变物质缓慢变形的地球模型,在轴对称情况下进行分析并指出,地球自转速率在 $10^6 \sim 10^7 a$ 的长时期、单向变化条件下,则由离心惯性力变化就可以在地壳中积累 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 量级的东西向和南北向正应力。何况地球是个非均质物体,它比均质物体造成的自转速率变化要大几个数量级(马宗晋,1991年)。根据地壳中现代应力量级的理论计算和实测结果,多在 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 量级以上。

上述事实说明,地球自转速率变化本身就具备了产生和发动地壳运动的充分条件。

二、地壳运动的一再发动

如果地壳运动的产生和发动是地球自转速率变化的结果,那么从地球形成到现在的漫长地史时期中,地壳运动时起时伏地一再发动、甚至第三纪和第四纪还会发生的原因,将归结于地史时期中地球自转速率不断地、周期性变化。产生这种变化的原因很多,归纳起来有外因和内因两个方面,即来自与地球有密切联系的外界天体和来自地球自身的内部。其中,内因是主要的。

(一) 外因

综合各家对引起地球自转速率周期性变化的天文因素的看法,主要是太阳运动的不均匀性对地球的影响造成的。

地球一方面围绕太阳公转,另一方面作为太阳系的一员还要和太阳一起围绕银河系中心(简称银心)公转,因此从空间上看,地球运动的轨迹是个螺旋状的轨道。太阳围绕银心公转具有不均匀性,当太阳从远银心点向近银心点运动时,其运动速度就要加快,由于惯性,地球与太阳的距离要加大、变远,地球要赶上太阳的进程则必须增加自己前进速度即增加围绕太阳的公转速度,在这种条件下,地球自转速度必然要放慢;反之,当太阳从近银心点向远银心点运动时,可使地球自转速度加快。这种天体运动规律,就使地球自转速率出现长期的、周期性的变化。

太阳与银心距离变化时,即太阳从近银心点向远银心点运动或从远银心点向近银心点运动时,都将引起地球质量的变化。太阳系的运动速度(围绕银心公转速度)在 $210 \sim 300\text{km}/\text{s}$ 范围内变化,根据相对论,物体运动质量 m 与静止质量 m_0 有如下关系:

$$m = \frac{m_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1-5)$$

式中 v ——物体的运动速度;

c ——光速。

当 $v = 210\text{km}/\text{s}$ 时, $m = 1.00000245m_0$; 当 $v = 300\text{km}/\text{s}$ 时, $m = 1.0000005m_0$; 质量变化值为 $2.55 \times 10^{-8}m_0$ 。

地球质量的增加引起重力增加,可使地球收缩;反之,地球就膨胀。地球收缩,自转速度加快;膨胀,自转速度变慢。于是,上述天体运动规律同样能使地球自转速率出现长期的、周期性变化。

当然,在引起地球自转变化的外因中,太阳而特别是月球对地球的潮汐作用也是不可忽视的,但它的主要作用是使地球自转速度减慢。

(二) 内因

地球自转速率周期性变化的主要内因是地球作为一个封闭系统要遵守角动量守恒

定律。

1. 地球自转角动量守恒定律

在物理学中，角动量守恒定律表述为：无力矩作用或一个旋转物体在外力对旋转轴力矩之和为0 ($M=0$) 时，角动量是常量。这样的动力系统称封闭系统，地球即属于一个封闭系统，它遵守角动量守恒定律，用公式表示如下：

$$\omega I = c \quad (1-6)$$

式中 ω ——地球自转角速度；

I ——整个地球（所有质点）对自转轴的转动惯量；

c ——角动量，为常量。

由式 (1-6) 可知，地球自转角速度与转动惯量成反比。当 I 变小时， ω 变大； I 变大时， ω 变小。

依据垂直轴转动惯量定理：一个平面刚体薄板相对于垂直轴的转动惯量，等于薄板平面内与垂直轴相交的两个任意正交轴的转动惯量之和（图1-3）。其公式为

$$I_z = I_x + I_y = \sum m_i (x_i^2 + y_i^2)$$

即

$$I_z = \sum m_i r_i^2 \quad (1-7)$$

式中 I_z ——垂直轴转动惯量；

I_x 、 I_y ——转动薄板内任意正交轴转动惯量；

m_i ——整个薄板的质量；

r_i ——整个薄板所有质点距垂直旋转轴转动半径平均值。

如果把整个地球看作是围绕自转轴转动的无数个平面薄板的集合，那么式 (1-7) 表示为

$$I = \sum m r^2 \quad (1-8)$$

式中 I ——整个地球的转动惯量；

m ——整个地球的质量；

r ——地球全部质点距自转轴转动半径平均值。

由式 (1-8) 可知， m 、 r 与 I 成正比。在地球总质量不变或变化很小的前提下，转动惯量主要与转动半径平均值有关； r 增大，则 I 变大； r 减小，则 I 变小。

2. 地球自转速率变化的内因

从地球自转角动量守恒定律看出，地球自转速率变化与转动惯量 I 有关，而转动惯量又取决于地球各质点围绕其自转轴转动半径的平均值 r 。

对于地球来说， r 的大小主要由地球内部物质分配情况来决定；地球内部物质在地心引力作用下向地心集中（这是地球恒存的因素）时，整个地球会发生整体收缩；地球内部某些较重物质向地心集中时，地壳发生大规模沉降；地球内部物质发生重力分异或物质对流，使比重小的物质向上部移动，比重大物质向地球内部渗透，从而使地球质量更向地心集中。上述三个方面的结果达到一定程度，都会使地球质量总计起来向着它的中心收敛，其转动半径随之减小，并造成地球转动惯量的减小。这样，地球要保持其角动量不变就必

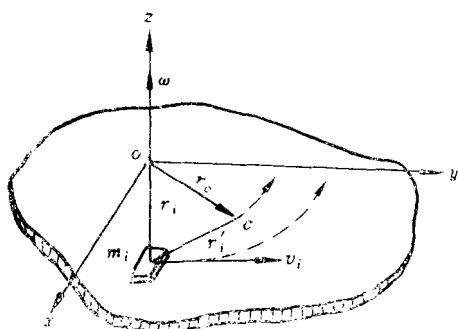


图 1-3 平板在它自身的平面内 (xy 平面) 绕 O 转动，每一点在它自身的圆周上以速率 $v_i = \omega r_i$ 运动
(据 C. 基特尔等)

然要改变自转速率，加快自转速度。

如果引起地球自转速率变化的内因和外因都使地球自转加快，当其加快到一定程度时，地球整体形状就要增加扁度，由于地球表层、特别是地壳上层抗拒这种变化的强度远小于地球内部，一定强度的水平力量就会推动地壳上层物质运动；由于伴随地球自转加快产生的离心惯性力经向水平分力和纬向惯性力可在岩石圈内部产生应力积累，并在一定地史时期内能够达到推动地壳运动的外力数量级。由此说明，上述两方面都决定一场剧烈的大规模的地壳运动必将发生。

大规模剧烈地壳运动的发生，在地壳内形成褶皱、断层甚至超壳断层，壳下大量岩浆而特别是基性、超基性岩浆等比重大的物质在高压下迅速向地球外层侵位或喷出地表。如我国西南部及世界一些地区二叠纪时期大量玄武岩流的溢出；又如我国东南地区在燕山运动时期大量花岗岩浆的侵位等……。这样就造成了地球内部物质，特别是重物质向地球外层的迁移，地球质量总计将由地心向外扩散，其结果是地球膨胀、平均转动半径增大，转动惯量随之增加，地球自转速度则由快变慢。此外，在大规模剧烈地壳运动进行过程中，由于上部圈层与底层、地块内部或地块之间的滑动摩擦，地块或岩层的变形都将大量消耗地球长期积累的能量，直接减少了地球围绕自转轴旋转的动能，其结果也使地球自转速度减慢。因此，地壳运动而特别是大规模的、剧烈的地壳运动对地球自转起着自动刹车的作用，李四光教授称其为“大陆车闸”。

（三）大规模地壳运动的周期性发动

地球自转速度减慢到一定程度，同样可以产生地壳运动。但是，正如本章第一节所述的那样，由地壳自转速度减慢而产生的外力在其推动地球表层物质运动的强度和幅度上与地球自转角速度加快相比较，远远小于后者，虽然也能造成水圈回流，但对于具有相当大强度的岩石圈来说，通常只能引起反跳。所以，地球自转减慢所造成的地壳运动一般是缓慢的和大面积的抬升、拗陷，或缓慢的、局部的断陷，地壳运动的强度和规模要小得多。

在地球自转减慢的过程中，已孕育着加快的因素，而当地球质量总计再次缓慢地向地心收敛时，其自转速度又将逐渐地加快，在其达到一定程度时，特别是在某一次地球自转速度明显加快时，将会再次引发一场新的大规模地壳运动。

从引起地球自转速率变化的原因上看，无论是太阳从近银心点向远银心点运动或从远银心点向近银心点运动的外因，还是地球质量总计向地心收敛或从地心向外扩散的内因，都是相互交替进行的，而地球自转加快到能够发动大规模地壳运动的机率也必将周期性地出现。所以在地史时期中，大规模的地壳运动具有周期性、一再发动的特点。

通常这个周期很长，常以数百万年甚至更长时间的地史时间来计算。究其原因，从外因上说，太阳围绕银河系中心公转的不均匀运动的周期应是很长的，从内因上说，地球自转加快的过程，即地球质量总计向地心收敛的过程是缓慢的，同时岩石圈内应力的积累过程通常也以数百万年计。所以，一场大规模剧烈的地壳运动本身虽然常常可以在较短时期内完成，但这种地壳运动产生的周期却很长，需要经过一个由量变到质变、由量的积累到质的飞跃这样一种漫长的地史过程。

第二章 构造形迹力学性质鉴定

构造形迹力学性质鉴定是地质力学研究中最重要基础工作。这是因为构造形迹是地壳运动的直接产物,它与对应的应力作用有紧密关系,是不同应力作用方式、方向的表征;此外,根据构造形迹的力学性质可以追索应力活动形式,并在此基础上才能进行地质力学研究方法中的其它步骤。

第一节 若干基本概念

一、结构要素 (Structural elements)

李四光教授在《地壳运动》一文中提到:“每一种具有形态特征而且普遍存在的由于永久形变而形成的构造迹象——亦即结构单元——都可称结构要素”。所以,结构要素既表征岩层、岩体原来形成的构造迹象(如岩层层理、不整合面、火成岩的流面、流线),又表征它们形变之后而形成的构造迹象(如褶皱、断层、节理、劈理)。前者称原生结构要素;后者称次生结构要素。

原生结构要素不是地质力学研究的主要对象,但它仍是地质力学研究不可忽视的方面;次生结构要素则是地质力学研究的重点。两者互相配合,才能更好地进行地质力学工作。

二、构造形迹 (Structural feature)

构造形迹是岩层、岩体在地应力作用下由于构造变动产生的永久形变,是岩层、岩体变形和变位的总称。前者如褶皱;后者如断层。因此,构造形迹实际上主要是指次生结构要素。

三、结构面 (Structural plane)

为了描述和制图方便,各种面状结构要素在三度空间的位置和方位要用平面或曲面来表示,这些平面或曲面称为结构面。

表示面状构造形迹的结构面,称变形结构面。变形结构面按其表现形式分为两类:一类是分划性结构面,它破坏了岩层或岩体的连续性,所以又称破裂面,如断层面、节理面、劈理面等;另一类是标志性结构面,它表征连续性的构造形迹,是一种有几何意义的假想面,如褶皱轴面等。

按变形结构面的力学性质,即按应力作用形式分为以下五类:

1. 压性结构面 (Compressive structural plane)

压性结构面的走向线垂直最大压应力,它主要包括多数褶皱轴面、各类逆断层、片理、流劈理、压节理、挤压破碎带和极少数正断层等;此外,还包括地背斜、地向斜和平行展布的拗陷型盆地。

2. 张性结构面 (tensile structural plane)

张性结构面的走向线与最大张应力或最小压应力垂直。它主要包括绝大多数正断层、张节理、张裂隙等,还包括张裂谷和平行展布的断陷型盆地。

3. 扭性结构面 (torsion structural plane)

扭性结构面是在扭应力作用下产生的, 与最大剪应力作用面近于平行, 所以其走向线往往与最大压应力、最大张应力或最小压应力斜交。它主要包括平移断层、剪节理、剪裂隙、破劈理等。

4. 压扭性结构面 (Compresso-sheor structural plane)、扭压性结构面

这是一种介于压性结构面和扭性结构面之间的一种变形结构面。压扭性结构面以压性为主, 兼扭性; 扭压性结构面则以扭性为主, 兼压性。它主要包括平移逆断层、逆平移断层、部分旋扭断层和部分节理、裂隙, 还包括呈雁行状斜列展布的褶皱和拗陷型盆地。

5. 张扭性结构面 (Tenso-shear stputural plane)、扭张性结构面

它是一种介于张性结构面和扭性结构面之间的一种变形结构面。张扭性结构面以张性为主, 兼扭性; 扭张性结构面以扭性为主, 兼张性。它主要包括平移正断层、正平移断层、部分旋扭断层和部分节理、裂隙等, 还包括呈雁行状斜列展布的断陷型盆地。

在变形结构面分类当中, 需注意以下几个问题:

(1) 任何一类变形结构面都与三度空间的应力状态有关。但是, 地质力学在详细研究地应力状态之后, 认为水平应力占主导地位, 铅直应力很小, 可以忽略不计。所以地质力学始终强调平面应力, 强调“平面问题分析原则”, 将三度空间的形变问题简化为平面形变问题, 对变形结构面的分类和命名也遵循“平面问题分析原则”。这样各类逆断层、各类正断层和部分节理、裂隙尽管在剖面上都是在扭应力作用下、在剪切基础上发生的, 属于剖面上的扭性结构面, 仍依断层面走向线与最大压应力和最大张应力或最小压应力的关系, 分别命名为压性结构面和张性结构面。

(2) 关于压节理。材料力学认为, 试件在外力作用下, 只能产生剪裂和张裂, 不能产生压裂, 即岩石破裂理论不承认压节理的存在。但是, 压节理在各类岩石中都可见及, 室内实验也可以做出。实验表明, 这类节理是试件挤压载荷瞬间减少或撤消后由于弹性反跳引起的, 所以又称释压节理。在岩石中, 压节理多呈微波状弯曲, 产状陡立, 裂缝紧闭; 有的是由一系列弯曲裂面断续组合而成。

(3) 关于极少数正断层属于压性结构面的问题, 它实际上主体仍是逆断层。由于断层面产状陡立, 断层面在深部与地表倾向相反造成的——即这类断层在地表看上去是正断层, 而地下深部的主体部分仍为逆断层。(图2-1)。

(4) 断层多期活动是地壳中普遍存在的现象。这是由于不同地史时期地应力场常不相同, 所以同一条断层在不同时期的力学性质和位移方式也常常有不同的表现。大量的实际资料证实: 大到如斜切我国东部的郯庐断裂, 小到落差大于 2 m 甚至 1 m 的小型断层, 除了晚近地史时期形成的断层外, 几乎都有过若干次活动。因此, 一条断层在不同时期常常是正、逆断层或平移断层交替出现。换句话说, 在自然界中, 除晚近地史时期形成的断层外, 几乎很少存在单纯的逆断层、正断层、平移断层、正平移或平移正断层, 以及逆平移

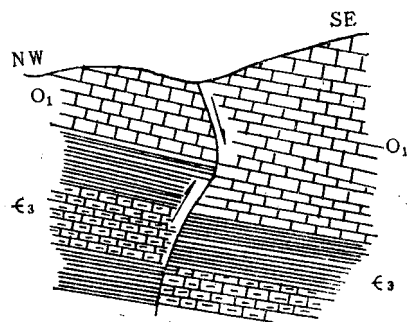


图 2-1 地表为正断层, 主体 (深部) 为逆断层之特殊断层
O₁—下奥陶统; C₂—上寒武统;
箭头示两盘位移方向