

地质研究论文集

**The Records of
Geological Research**

北京大学地质学系

1982

北京大学出版社



地质研究论文集

北京大学地质学系

Proceedings of Research in Geology

Department of Geology

Peking University

1982

北京大学出版社

内 容 简 介

本书为纪念中国地质学会成立六十周年而编辑。书中汇集了北京大学地质学系师生近年来的部分科研成果，内容涉及我国东部的区域构造、古应力场反演、中、新生代古生物、岩石、矿物、矿床、稳定同位素及数学地质等领域。可供有关地质专业的生产、科研人员及地质院校师生参考。

地 质 研 究 论 文 集 (1982)

北 京 大 学 出 版 社 出 版

(北京大学校内)

新华书店北京发行所发行

北京 大学 印刷 厂 印 刷

787×1092毫米 16开本 13印张 320千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印

印数：1—4500册

统一书号：13209·70 定价：1.80元

目 录

北京大学地质学系的建立与发展 (代序)	乐森珥 于 洸 (1)
---------------------------	-------------

构造地质学

构造应力场的反演	王 仁 (5)
河北滦县司家营上太古界滦县群的中、粗组构与石英C轴组构的 对比分析	钱祥麟 陈亚平 (11)
论华北太行山晚中生代深成岩浆活动的大地构造背景	何国琦 王庭印 王式洸 (21)
郯庐断裂南段中新生代构造形变阶段	孙荣圭 崔广振 张瑞芝 (29)
长江中下游安徽地区的印支运动	崔广振 孙荣圭 (37)
地震构造裂缝的几何特征	金凤英 (45)

古生物地层学

北京西山门头沟群窑坡组双壳类化石	杨守仁 廖明和 (53)
江苏省丰县地区早第三纪有孔虫动物群的发现及其意义	李淑鸾 徐宝政 (64)
苏、皖白垩纪被子植物花粉及其意义	王宪曾 (70)

矿物岩石学

关于鲕粒与沉积环境的探讨	王英华 杨承运 张秀莲 (78)
高岭土的微观结构分析, 兼述无序高岭石与7 Å 埃洛石的划 分界线	任磊夫 于 众 (86)
一种特殊产状的海泡石	曹正民 (92)
华北某些深源包体的研究	谭绪荣 臧启家 (100)
卓资—阳高一带麻粒岩的矿物学和结晶的P-T 条件	崔文元 (110)
矾山杂岩体中钾长石的特征及其地质意义	閻国翰 毕于润 邵宏翔 何宗丽 (122)

矿床及地球化学

河北矾山磷铁矿床及其成因分析	牟保磊 (132)
冀东鞍山式铁矿的成因	王时麒 (142)
氧同位素和铁矿的成因	王关玉 郑淑蕙 强德美 魏菊英 (149)

数 学 地 质

数据可利用程度检验方法的讨论.....徐振邦 姜元仁(160)

实 验 方 法

铁-钛系列矿物学的初步实验研究.....曾贻善 艾瑞英 袁家铮 关贵荣(174)

碳酸盐中碳、氧同位素的分析方法.....陈成业(183)

地 热 研 究

腾冲地热区水循环中的氢氧稳定同位素研究.....沈敏子 倪祿龄 侯发高(187)

龙陵地震诱发的巴腊掌水热爆炸和间歇喷泉活动.....刘时彬(192)

编后记.....(196)

北京大学地质学系的建立与发展

(代 序)

乐森瑀 于 洸

引 言

1922年1月27日中国地质学会的成立,标志着中国地质科学发展的一个里程碑。今年是学会成立六十周年。我系学术委员会从近年来教师的部分科研成果中选编了这本《地质研究论文集》以纪念地质界的这个盛大节日。“科学的春天”到来之后,我系的科研工作也出现了新面貌,成果是多方面的。这本论文集在内容上涉及的方面虽然不少,但仍不能完全反映我系科研工作的全貌。我们希望这本不定期的论文集能够在开展地球科学的学术交流中起到一定的作用,并望得到地学界前辈和同行们的帮助和指正。

我国地质事业的发展与地质人才的培育密切相关。趁学会成立六十周年之际,对北京大学地质学系的历史作一个回顾是很有意义的。为此,我们查阅了一些资料,访问了部分老校友,写成这篇短文。虽力图准确,但资料还嫌不足。姑且作为一个初步记录,同时也是表示对学会成立六十周年的纪念。

北京大学地质学系的历史,可以分为下列几个阶段:

(一) 1909年—1937年 光绪末年中国曾派遣学生出国学习地质,但自办地质教育还是从北京大学开始的。北京大学原名“京师大学堂”,创立于1898年。1909年“京师大学堂”设置了一个“地质学门”,聘请德国人梭尔格博士(Dr. F. Solgar)及章鸿钊等人教课。1913年有二人毕业。王烈先生没有毕业即出国留学了。那时学生很少,不久就停办了。

1913年临时政府农商部创办了“地质研究所”,作为培养地质人才的临时机构,借“京师大学堂”地质学门的旧址、设备及部分教员办学。丁文江、章鸿钊先生先后任所长,章鸿钊、丁文江、翁文灏任教师。学制三年,1916年6月有22人毕业,谢家荣等十余人,被选任农商部“地质调查所”调查员。从那时起,中国的地质工作就正式展开了。

1912年3月派严复为“京师大学堂”监督,5月改校名为“国立北京大学”。1916年蔡元培任北大校长。1917年改订学制及课程,预科二年,本科四年。1918年正式恢复了北京大学地质学系,这是我国综合大学中最早的一个理科地质系。由王烈、何杰等教授任教。学生起初是从北洋大学矿业科转来的。1920年第一批毕业生八人,孙云铸、王绍文、钱声骏等三人入地质调查所工作。

1920年地质学家李四光教授自英国回国,到地质系执教。同年,美籍地质、古生物学家

葛利普 (A. W. Grabau) 教授也应聘到北大任教, 使教师阵容有很大加强。在课程设置方面, 起初受采矿、冶金学科的影响较大, 后来逐渐转为以地质、古生物为主, 到1931年完成这种转变。

从1917年至1937年, 先后任系主任的有何杰、王烈、李四光、谢家荣等。王烈教授任结晶学与矿物学方面的课程。何杰教授任普通地质学、经济地质学和采矿学等课程。李四光教授教岩石学、构造地质学和野外地质测量学。1928年中央研究院地质研究所成立, 李四光任所长, 1930年以后, 虽以研究院工作为主, 但仍继续讲课, 直到1937年还指导学生野外实习。谢家荣教授任矿床学等课程。葛利普教授则担任无脊椎古生物学、世界地史学和中国地层学等多种课程。先后在北大教课或兼课的有袁复礼、章鸿钊、丁文江、谭锡畴、叶良辅、斯行健、杨钟健、尹赞勋、孙云铸、高振西等。他们对北大地质学系的建设和人才培养都做出了重要的贡献。

地质学系起初设在景山东街第二院, 1931年在沙滩松公府夹道一号筹建地质馆, 1934年落成一座四层楼的建筑。从此, 房舍、教具、图书、标本、仪器等日臻完善, 成为我国综合大学培养地质矿产综合调查研究人才的重要基地。据章鸿钊先生记载, 到1936年为止, 各大学地质系毕业生共264人, 其中北大毕业生188人, 占71%。现据北京大学文书档案记载, 从1913年到1937年, 共毕业226人。1936年拟定了增设地质研究部的计划, 因抗日战争爆发未能实现。

(二) 1937年—1946年 七七抗战以后, 本系随校南迁。1937年11月先在长沙称临时大学, 1938年到昆明, 北大与清华、南开组成西南联合大学, 我系与清华大学地学系联合组成地质地理气象学系。由孙云铸教授任系主任, 袁复礼、冯景兰、张席禔、王炳章、张寿常、王烈、王恒升、谭锡畴等教授任课程, 还聘请了德国人米斯 (Peter Misch) 授课。

抗战期间, 虽部分图书、仪器遗留北京, 教学设备较差, 但师生抗战热情很高, 同时, 利用云南的地质条件, 并与当地的工矿机构配合, 注重野外实习, 仍然培养出许多优秀的地质人才, 而且对云南全省的地质调查及矿产勘探工作作出了不少的贡献。

从1938年至1942年, 在西南联大期间, 北大地质学系的毕业生有28人, 1942年至1946年西南联大地质地理气象学系毕业生有57人 (包括地理及气象)。后期, 已开始招收研究生, 有的没有读完即出国学习。

(三) 1946年—1948年 抗战胜利后, 各校复员, 我系也随校迁回北京, 仍在地质馆办学。孙云铸教授为系主任。1947年—1948年毕业生共21人。

解放前北大地质学系的毕业生以古生物地层方面见长。

(四) 1949年—1952年 北京解放以后, 为适应国家经济建设的需要, 学生人数增多, 图书、教具、仪器等均有增添, 并进行了教学改革, 努力使教学工作的方向与国家建设的实际相结合。从1949学年度开始, 设立岩矿及地质两组, 教学计划有所不同。同时接受东北长春地质调查所的委托, 增收了二年制地质专修科一班; 接受中央燃料工业部的委托, 增招四年制学生两班, 专门训练煤田及石油地质人才。这样, 在校学生由1948学年度的75人, 激增到1949学年度的160余人。这一阶段, 系主任仍由孙云铸教授担任, 教授及副教授有王烈、王嘉荫、王鸿祯、潘钟祥、马杏垣、张炳熿、董申保、陈光远等。1949年—1952年, 共有毕业生117人, 其中1952年毕业的就有74人 (包括专修科17人)。刚解放时, 我国地质人员只有200多人。因此这些毕业生立即补充到各地质部门中去, 对我国地质事业的发展, 起了很

重要的作用。

(五) 1952年— 1952年院系调整, 北大地质学系与清华地学系地质组、天津大学地质系、唐山铁道学院采矿系地质组等合并, 组建了北京地质勘探学院(现改为武汉地质学院), 我系教师、图书、标本、仪器等全部调出, 学生转入北京地质勘探学院学习。北大设地质地理学系, 但没有地质专业的学生。

随着地质科学的发展, 迫切需要加强培养理科地质人才, 教育部决定, 1955年北大地质地理学系恢复招收地质专业的学生。乐森瑛、王嘉荫两位教授调来北大, 主持恢复工作。当时, 只有两位助教协助, 图书、仪器、标本等等, 一切从零开始, 工作是相当困难的。这两位教授从专业基础课讲到专业课, 如普通地质学, 普通古生物学、地史学、岩石学、生物地层学等。此外, 还聘请校外专家兼课, 并逐步补充年轻教师, 采取多种措施, 加以培养。在党的领导下, 在学校和有关方面的支持下, 克服了许多困难, 使恢复工作不断取得进展。1955年仅设一个地质学专业, 1956年设地质学和地球化学两个专业, 学制五年。到1958年, 分设古生物地层学、构造地质学、地球化学三个专业。1957年至1959年入学的为六年制, 1960年及1961年入学的为五年半学制, 其他年份入学的均为五年制。北大地质学系第二次恢复招生以后的第一届学生在1960年毕业。从1960年到1970年毕业生共707人。

1966年起, 连续六年没有招生, 1972年又开始招生。1972年—1976年的五届学生为三年半制。1977年起, 学制改为四年。从1976年至1982年1月止共有毕业生574人。

1964年上级决定地质、地理分别设系, 直到1978年, 地质学系才单独设系, 乐森瑛教授为系主任。现有教职员工171人, 其中教授2人, 副教授15人, 讲师62人, 工程师6人, 助理研究员2人, 助教24人。目前设古生物及地层学、岩矿及地球化学、构造地质及地质力学、地震地质学四个专业和地热学研究室。在校大学生334人。从1957年开始招收研究生, 到1981年底已有20人毕业, 目前在校研究生共45人。最近几年, 计划每年招收大学生120人, 研究生20—30人。

二

北京大学地质学系有着悠久的历史。如果从京师大学堂算起, 已有73年; 如果从1918年算起, 也有64年了。她的建立与发展, 是与我国地质事业和地质教育的发展联系在一起的。正如黄汲清教授所说, 在我国地质工作的草创时期, 地质机构只有北京地质调查所和北京大学地质学系, 地质工作人员大部集中在这里。1927年以后, 其它地质调查机构及大学地质学系相继成立, 但北大地质学系仍不失为人才荟萃的地方。1955年再次恢复以来, 在克服困难中不断前进, 在培养目标、专业设置、教学计划、人才培养等方面, 逐步形成了自己的一些特点。通过以上简单的回顾, 我们深深体会到, 办好北京大学地质学系是国家赋予我们的光荣任务, 我们要认真地总结历史经验, 发扬优良的传统, 吸取有益的教训, 以做出更大的成绩。

北京大学地质学系对我国地质事业的贡献, 一个重要的方面就是培养了一批又一批的毕业生。到1982年1月为止, 累计大学毕业生1730人(其中解放前332人, 解放后1398人), 研究生20人。在他们中间涌现出了许多知名的地质学家和杰出人才, 有些同志正担负着党和国家的负责工作。五十年代的毕业生很多已成为学术研究的带头人, 六十年代以来的毕业生, 不少已成为工作中的骨干, 有些人已崭露头角, 被作为地质科学工作的接班人培养。所有这些

都说明了，北大地质学系在我国地质教育事业和地质科学的发展中有着重要的作用，同时也鼓舞着我们坚定信心。我们要努力提高教育质量，继续为培养高质量的地质人才而努力。

地质人才的培养，必须重视打好基础，并且与地质实践密切结合。许多老校友说，在培养学生方面，既重视基础课和地质基础课的教学，又重视野外实习和独立工作能力的培养，是北大地质学系的一个传统。在理论学习方面，我们充分利用综合大学的有利条件，数学、物理学、化学、生物学等基础课，针对各专业的不同情况，安排了较多的学时；有的还针对地质学系的特点单独开课。同时注意新理论、新技术、边缘科学的介绍，开设选修课，学生可以根据自己的情况，经过批准，选修一些研究生课程或文、理科各系的某些课程，以扩大知识领域。在外语教学方面，指导三年级学生进行专业阅读，四年级学生结合毕业论文，培养其阅读能力。在结合实际方面，建系初期，北大地质学系与地质调查所的调查工作配合得非常紧密。解放以后，指导思想更加明确，在加强基础和兼顾长远需要的前提下，力求使学校教育与国家建设的实际相结合，努力办出理科地质学系的特色。在现行四年学制中，我们安排了17周的野外实习和一次毕业论文训练，以培养学生分析问题和解决问题的能力。我们要继续实践，总结经验，把培养人才的工作做得更好。

繁荣的科学研究和活跃的学术空气，对提高教学质量、培养人才是重要的一环。李四光教授一直倡导这一点，在他主持系的工作期间，学术工作是有声有色的。过去，教师的研究成果，除在各杂志发表外，系里还出版《研究录》，至1951年已出至33号。今后，我们准备恢复起来。1955年以来，我们定期举行学术讨论会，鼓励教师进行科学研究；同时，不断聘请国内外专家、学者，为研究生或高年级学生讲课或作讲演，学生也举行科学讨论会。建系以来，教师的研究成果，难以全面统计，仅最近四年不完全统计，提交国际学术会议和刊物发表的论文25篇，提交国内学术会议的论文240多篇，国内杂志发表的论文80多篇，正式出版的教材、教学参考书、专著、译著15本。氧、碳、氢稳定同位素实验室的建立和开展的工作，地热地质的调查研究，地球构造动力学的研究，寒武、奥陶系牙形石和华南泥盆系分层、分带的研究，前寒武纪地质和古藻演化的研究等，近几年来，也都做出了较好的成绩。我们要花气力把科学研究工作组织好，经过一段时间的努力，争取作出一些重大成果。

培养高质量的学生，必须要有一支高质量的教师队伍。院系调整之前，北大地质学系的教师阵容是大家所熟知的。1955年以来，我们办系的主要困难之一就是师资力量不足，缺乏一个合理的层次。可喜的是，二十多年来，师资力量不断成长。中年教师是我们的骨干力量，近几年已有12位教师出国进修和进行学术交流，我们既要充分发挥中年教师的作用，又要抓紧对他们的培养，以期在他们中间涌现出更多的学术带头人。老教师是我们的宝贵财富，要很好地发挥他们的作用。充实新生力量，也是急需解决的一个问题。总之，我们要下力量，采取多种措施，提高教师的水平，建设一支老、中、青结合的师资队伍，以适应科学发展和人才培养的需要。

今后，我们要进一步贯彻党的方针政策，进行必要的调整 and 改革，大力加强思想政治工作，振奋精神，团结一致，埋头苦干，为使北京大学地质学系的工作有一个较大的发展，为培养高质量的又红又专的地质人才而努力奋斗。

构造应力场的反演

王 仁

一、地应力与构造应力

地壳或岩石圈中存在的应力状态称为地应力。它可以分为动态的和静态的。前者指那些作短期变化的应力，如地震波和全球自由振荡引起的应力波动，还可以包括日、月引潮力、极移、短时期内自转速率变化等引起的应力变动。它们积累不起来，对于构造运动可能有触发作用，但并不足以推动构造运动。所谓静态的是指由重力引起的和那些与长时期构造运动有关的应力。

由重力引起的应力状态，按弹性理论，其铅直应力分量为：

$$\sigma_z = \int_0^z \rho g dz \approx \rho g z$$

其中 z 垂直地面向下， ρg 为地壳物质容重（这里以压应力为正）；水平应力分量为：

$$\sigma_x = \sigma_y = \nu \sigma_z / (1 - \nu)$$

其中 ν 为泊松比。在实际地壳中，经长时期重力作用，由于地球介质的流变性，应力发生松弛（松弛时间随深度变化，有人估计从大范围地壳运动来讲，地壳上部的松弛时间在 10^8 年以上^[1]），应力差渐趋消失。因此通常假设原始地应力为静岩压力，即 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \rho g z$ ，在构造地质学中称之为标准应力状态。在地应力中偏离这个状态的部分则称为构造应力。它又包括当前推动力所引起的和由过去构造运动遗留下来（称为残余应力）的两个部分。

在一个空间范围内构造应力的分布叫做构造应力场，研究构造应力场对探讨地震活动性，对分析地下工程的稳定性，都是很重要的。由于它探讨构造运动的动力和规律，对于认识资源、矿产的分布也是十分重要的。另外，它也有助于探讨地壳的结构、组成、演化历史，具有理论上的意义。

至于寻求构造应力场的方法，由于我们所知道的是构造运动的结果，能测到的是现在地表现象，需要进行反演，那就是从运动结果反过来求运动的力源和过程，从地表的测值推论地下的状况。这种反演，从理论上来说，其解不是唯一的，只能认为和尽量多的事实拟合，会给予所求的解愈来愈多的限制。同时由于我们对地壳内部物质的组成、力学性质、推动力源、残余应力状态等都知道得不很清楚，这就更增加了困难。关于数据不充分和不精确的反演理论还在探讨中^[2]。近年来由于观测技术的提高，资料的迅速积累，加上高速大型计算机的应用，有限元计算方法的发展，应力场的反演工作有很大进展，本文先简要地总结实际测量构造应力的方法，然后再讨论反演的问题。

二、现场应力测量 (In-situ Stress Measurement)

这是指一些直接测量地应力的方法。常用的方法叫套孔应力解除法，即先在地表钻一小

孔, 装进一组测量孔径变化的元件, 然后在小孔外, 再钻出一个同心圆槽, 使中心部分与外界隔离, 也即将作用在它上面的外界应力解除掉。从小孔内元件上发生的变化, 根据当地岩石的弹性性质, 按弹性理论可推算出原来作用在垂直于钻孔轴的平面内的应力, 即当时当地的地应力。若要求空间应力状态, 通常需要在三个不同方向的钻孔上进行解除, 一般在不很复杂的构造部位, 可设 σ_z 就是一个主应力。

另一种方法叫应力恢复法, 其大意是在这些隔离槽内放入可以充气的“压力枕”或扁千斤顶, 用它们对槽壁施加压力, 使得元件的读数恢复到开挖隔离槽以前的值, 则压力枕内的压力就是原来垂直于此槽的地应力。

这些解除方法不能钻进很深, 人们在深矿井下做解除, 得较深处的地应力, 目前发表的最深资料是在南非矿井下, 约2500米。

再一种方法叫水压致裂法, 可以测得更深一些, 它设法将某一深度处的钻孔从上和下封住一段, 增加其中水压, 直到岩壁发生破裂, 水压突然下跌, 最高水压 P_c 就是形成破裂时的压力, 另外记下封闭压力 P_f , 它是使破裂保持张开的压力。由这两个读数和设法观察到的垂直破裂的方位, 就可以求出水平面内的主应力大小和方向, 这种方法利用石油钻井, 最深的在美国做到5300米, 精度为10—20%, 关于现场地应力测量方法的具体介绍可参看岩石力学的书^[3]。

这些测量方法受地下岩石状况的影响很大。岩石的各向异性性质, 钻孔附近的节理面, 孔隙水等对结果都会有很大影响, 在选择钻孔地点和解释所得结果时都需注意这些因素。

全球各处地应力测量的结果表明^[3], 在结晶基岩和许多褶皱带中, 水平应力常大于垂直的覆盖压力, 而在沉积盖层和碎裂的岩体中, 则水平应力常小于覆盖压力。这些结果对构造区域性或全球性现代应力场, 是很好的引导, 不过如何将浅部测值和深部构造应力联系起来, 仍是一个问题。

三、间接推测地应力的一些方法

(一) 震源机制解 按照震源力学的点源模型, 从不同地点的台站地震记录中, 根据 P 波初动波是压还是拉, 可以定出两个可能的破裂面和最大压应力和最小压应力(拉应力)的方位。这些信息直接来自震源的深度, 人们一般就用来作为地应力的主方向, 不过严格说来, 它们只是地震应力释放过程中应力降的信息, 而不是地应力本身, 两者是可以不一致的。就单个地震来说, 应力降的主方向和地应力本身的主方向可能差 $10^\circ-20^\circ$, 但一般认为某区域内大量震源机制解的平均方向是接近主应力方向的, 震源机制解曾被用来证实转换断层的性质, 定出压力是垂直于褶皱带走向的, 证明这种推测的可靠性。至于如何利用地震波波谱以及地震前兆和后效的信息, 以估算震源及附近地区地应力的大小, 则是当前研究的一个课题。

(二) 构造地质学的分析 构造地质学通过对构造变形的遗迹, 断层错动方向等宏观考察结果的分析, 古生物化石、砾石等形变的有限变形分析, 以及岩石中保留下来的微观变形机理的研究, 能够定出当初变形时构造应力的主方向。近年来还在发展利用显微构造的形成条件, 推算构造应力的大小的方法^[4]。在地貌学中也有人利用对河流走向的统计分析, 假定河流沿剪断裂前进, 将共轭剪切面的锐角平分线定为主压应力方向, 结果也能和由震源机制

解定出的方向一致^[5]。

(三) 大地重复测量 它被用来测量地表形变的进程,从水准测量可得高程变化,从三角网测量可得水平位移和应变,采用一些力学模型(例如弹性位错模型)进行反演,可以估算出重复测量期间的应力变化。人们目前开始利用人造地球卫星或月球,发展相距数千公里的长基线测量,以测定不同板块的相对运动量,其结果对反演现今应力场将是很有用的。

以上方法所得资料一般均限于局部地区,且多限于浅部,为得到应力场的全貌,需要通过物理实验或数学模拟进行反演,用前述方法所得资料对指导这种反演是有用的。

四、用物理模拟进行反演

这是指采用一定模型材料,如光弹性材料,明胶冻等做成某一地区的模型,根据宏观考察结果,在上面刻出一些断裂构造。有的模型还可以分区用不同材料以模拟不同岩性。然后在边界上施加外力或位移,观测内部变形和应力分布。为了模拟地震还可以在断层间加润滑剂,使它能产生相对滑动,然后比较滑动前后的变形和应力场。模型材料、断层分布以及边界条件等均可改变,做多种方案的比较,使得在有实测资料的地点和实测结果符合。目前,这种模拟在决定材料性能的模型律上还有困难,只能作定性的探讨,其优点在于能够看到全区域的情况,有助于决定进一步深入探讨的方案。

五、用数学模拟进行反演

这是指用数学力学方法进行应力场的计算。早期的工作有十九世纪后期的达尔文、开尔文,二十世纪初期的勒夫、列宾逊等。他们都做了全球自转,极移等应力场分析。当时由于计算工具的限制,只能采取十分简单的模型,如把整个地球看成是一个均匀球体,岩层是均匀弹性或线性粘性流体等。60年代高速计算机的应用,特别是后来有限元计算方法引进到地质构造分析后,应力场的计算才有很大的进展。

全球应力场方面,进行过弹性的分层轴对称快速模型(指由地震波反演得出的模型)的潮汐应力场等。然而对于长期的地质构造运动来说,需要用缓变模型。这方面最早是荷兰的 Vening Meinez^[6] 在1947年做过30公里厚,内部为不可压缩液体的弹性薄壳,在自转速率减慢和极移情况下的应力场。前几年作者等^[7]曾用不同厚度的分层壳体进行过在自转速率变化时的粘弹性应力场计算。以上这些是在给定的极移或自转减速率情形下所做的正面演算。Richardson^[8]等人最近用有限元方法将整个地壳看作一个等厚度弹性薄壳,在壳内洋脊、俯冲带及板块底部等处施加不同外力、计算全球构造应力场,并用前几节提到的实测结果进行校核,以决定何种加力方式较为合理。

在区域应力场方面,李四光^[9]1945年曾用弹性平面应变方案计算过山字型构造的应力场,由于当时缺乏计算工具,未能采取不同方案和实测结果对比。另如对芬兰斯堪的那维亚曾进行过冰川融化后的反演模型工作,人们采用不同的粘弹性层状结构,将计算结果与冰川融化后地面抬升过程进行比较,来确定更合理的地壳上地幔的力学性质。1975年前后Molnar等^[10]用理想塑性平面应变的滑移线场理论,分析过印度板块和欧亚板块碰撞后的变形场,用断层的分布和错动方向来检验计算方案。汪素云等^[11]用弹性有限元方法也算了同样的命

题, 以华北地区的地震活动性来决定何种边界外力分布更为合理。

六、线性有限参量问题的反演

对于线性弹性或粘弹性体在小变形情况下, 问题是线性的, 可以引用迭加原理。如果供校核的实测资料是有限个, 设为 N , 所要反演的参量通过组合减为 M 个。若 $M < N$, 则可用最小二乘法选择最好的 M 个参量。若 $M = N$, 则可通过求解 N 个联立方程解出, 如下述例题所示。

设在 $A_1 \cdots A_N$ 各点的实测资料为 $Q_1 \cdots Q_N$ 。令 $B_1 \cdots B_M$ 各点为所要反演的加力点。可以在 B_1 点先加单位力进行正问题的演算, 得到在 $A_1 \cdots A_N$ 处的反应 (例如, 实测资料为垂直位移) 为 a_{i1} , $i=1 \cdots N$ 。对于线性问题, 应用迭加原理, 则若在 B_1 点加的力是 P_1 , 反应就应为 $a_{i1}P_1$ 。依次在 $B_2 \cdots B_M$ 点加单位力进行正问题的演算, 得在 $A_1 \cdots A_N$ 处的反应分别为 a_{ij} (其中 $i=1 \cdots N$, $j=1 \cdots M$)。若在 B_j 处加的力是 P_j , 则在 A_i 点的反应为 $a_{ij}P_j$ 。为了拟合实测资料, P_j 应该满足:

$$\sum_{j=1}^M a_{ij}P_j = Q_i, \quad i=1 \cdots N$$

一共是 N 个方程, 求解 N 个未知量 P_j , 参考文献[12]就是这样寻求俯冲带上的作用力来拟合实测水准资料的。Richardson^[8]所做的全球应力场问题也可以这样做。

若 $M > N$, 则需要进行试算, 所得的解是不唯一的。

七、非线性情况及残余应力场的反演

若考虑地壳介质的应力-应变关系不是线性的 (例如是弹塑性的), 或者要考虑大变形, 则问题就成为非线性的, 迭加原理不再适用, 反演就困难了。构造运动是一种不可逆运动, 若考虑短于松弛时间的过程, 忽略时间因素, 就成为弹塑性问题。否则, 需考虑时间因素, 就是粘塑性问题。应力与应变之间都是非线性的关系。另外正是由于这种塑性变形, 在地壳中造成了残余应力状态, 由外界推动力所引起的应力场是发生在这个应力状态之上的, 要加上残余应力状态, 才得出真实的应力场。它直接影响到对构造运动的分析。于是, 在反演应力场时, 需要先求得残余应力场。

由于非线性问题不能进行迭加, 我们将采用试算法。另外为了求得残余应力场, 我们将利用历史上一系列的变形过程, 逐次反演它们所对应的应力场, 整个反演过程可用框图说明如下, 见图 1。

我们首先要根据构造地质学和地球物理学对本区域的初始构造骨架做出估计, 设当时的残余应力状态为零 (或理解为它对后期的构造运动的影响可以忽略); 再根据各种现有知识, 给定介质的力学性质和推动力, 后者可以作用在区域内部, 也可以作用在周界或底部。有了这些资料, 就可以按照连续介质力学理论计算一个正问题, 求出变形场和应力场。由于地质问题的复杂性, 一般只能采用有限单元的数值计算方法, 而且目前大多只做二维问题, 即平面的或剖面上的问题。将所得变形场和应力场, 按照事先制定的合格标准和历史资料进行比较, 若能够通过这些标准就认为合格, 可以进行下一个历史阶段的计算, 保留前一阶段

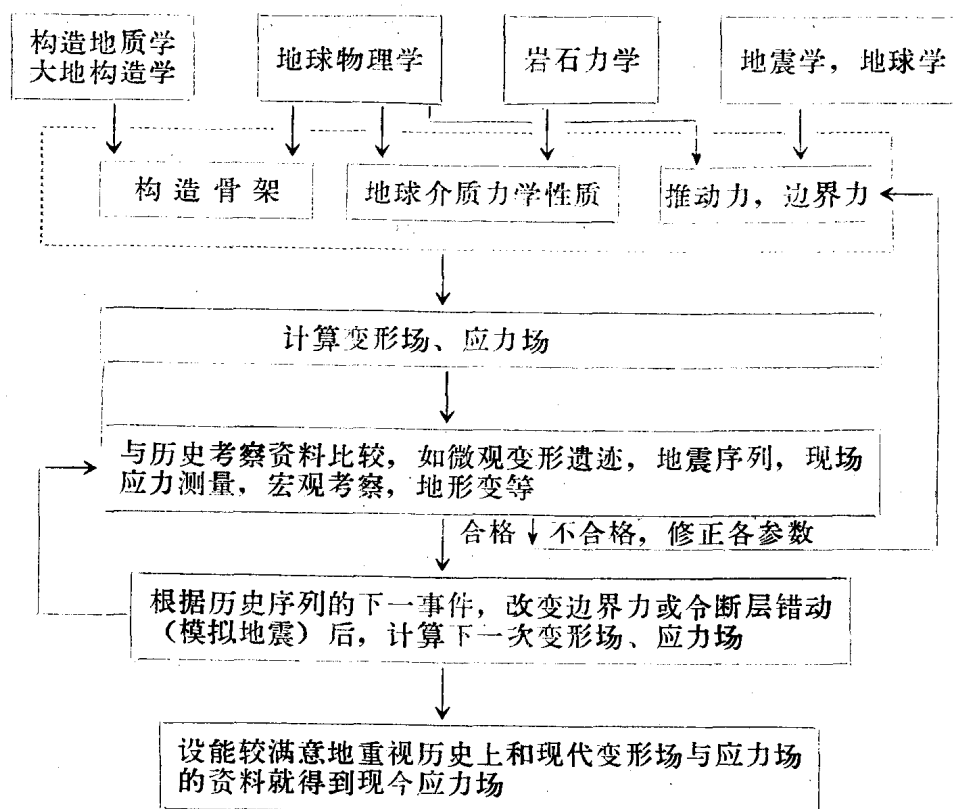


图1 应力场反演框图

遗留下来的变形和残余应力场。若这种比较不合格,则需要修改原始选定的那些参数,其中以改变作用力的大小、方向和分布最简单,修改力学参数其次,修改构造骨架最麻烦。如何在允许的变化范围内,用最少的修改来使前述比较得到最好的解决,乃是一个值得探讨的数学问题。

按上述步骤经过多次计算和修改,逐次拟合地质历史资料,直到现今变形场和应力场。由于历史事件不易确定,事实上只能用一些最主要的和公认为确定的构造运动来进行反演,更多的校核还是靠现今的变形场和应力场。

我们^①试用华北地区700年来七级以上的地震记录,逐次模拟地震区的迁移,最后求出唐山地震后的应力场,其目的在求今后的地震危险区。通过反演还对区内的力学性质加上一定限制。利用历史资料是为了考虑残余应力分布,因此所进行的不但是空间上的反演,还有时间上的反演。

要把这样一个反演工作做好,首先要尽量准确地确定地质构造骨架,把影响构造运动的主要构造包括进来,并以适当形式代表之。还需要尽量多的变形历史证据和实测资料来作为验证的标准。因此前几节所述的宏观地质考察,实测记录等都是十分重要的。细致的岩石力学实验将限制力学参数的修改幅度,它也使反演工作易于进行。事实上在反演应力场的过程中,若某些参数已达到其合理范围的边缘,为拟合实际资料必需修改其它因素。于是,反过来对构造骨架,力学参数,外力等参数的合理性,也给出一些限制。开尔文当初反演地球应力场时,曾得出地球的总体刚度要和钢相似的限制。

从力学工作的角度,需要研究地壳、岩石圈介质的流变性能,地震断裂的力学过程,提

① 王仁、孙荀英、蔡永恩, 1982, 华北地区近七百年地震序列的数学模拟。中国科学, 8期, 745—753。

出更切实际的力学模型, 发展更有效的计算非线性问题的计算方法等。从地球物理学的角度, 研究地震波、压磁、压电效应, 可以提出更多的检验变形场、应力场的可靠标准。对地球内部物理过程的研究, 可以增进它们对地壳构造运动影响的了解。把这些方面综合起来, 将对构造运动的力学过程有更好的了解。

参 考 文 献

- [1] Turcotte, D.L., Oxburgh, E.R., 1976, Stress Accumulation in the Lithosphere, *Tectonophysics*, 35, 183-199.
- [2] Backus, G., 1970, Inference from Inadequate and inaccurate data I, II, III, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 65, 1-7, 281-287, 67, 282-289.
- [3] Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1979, Fundamentals of Rock Mechanics, 3rd. edition, Chapman and Hall, London. 中译本, 岩石力学基础, 科学出版社, 1981, 14及15两章.
- [4] Tullis, J.A., 1979, High temperature deformation of rocks and minerals, *Rev. Geophys. Space Phys.* 17, 1137-1146.
- [5] Ai, N.S. (艾南山), Scheidegger, A.E., 1981, Valley trends in Tibet, *Z. Geomorph. N.F.*, 25, 203-212.
- [6] Vening Meinesz, F.A., 1947, Shear patterns of the Earth's crust, *Trans. Am. Geophys. Union*, 28, No. 1.
- [7] 王仁, 丁中一, 轴对称情形下地球自转速率变化及引潮力引起的全球应力场, 《天文地球动力学文集》, 上海天文台出版社, 1979.
- [8] Richardson, R.M., Solomon, S.C., Sleep, N.H., 1979, Tectonic stress in the plates, *Rev. Geophys. Space Phys.* 17, 981-1019.
- [9] 李四光, 《地质力学的基础与方法》, 中华书局, 1945.
- [10] Molnar, P., Tapponnier, P., 1975, Cenozoic tectonics of Asia, Effects of a continental collision, *Science*, 189, 419-426.
- [11] 汪素云, 陈培善, 1980, 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟, 地球物理学报, 23, 35-45.
- [12] Shimazaki, K., 1974, 日本北海道东部太平洋板块俯冲作用引起的地震前地壳变形, *Phys. Earth Planetary Int.*, 8, 148-157.

ON THE INVERSION OF TECTONIC STRESS FIELD

Wang Ren

Abstract

The tectonic stress is defined first. The different methods of measuring and estimating crustal stress are then briefly reviewed. The paper mainly describes the scheme about how to use the finite-element method in continuum mechanics to simulate the history of tectonic development, by repeatedly adjusting the crustal framework, mechanical properties of the Earth media and boundary tractions. Researchers can take into account the residual stress field, thus getting a closer inversion of the present tectonic stress field.

河北滦县司家营上太古界滦县群的中、粗组构与石英C轴组构的对比分析

钱祥麟 陈亚平

一、前言

冀东前震旦纪结晶基底岩系由大单斜构造改为强烈褶皱构造的认识,最先于首钢迁安铁矿的宫店子区获得证实^①。1976年作者对冀东深变质岩系用中、粗组构要素进行了研究和系统测量,首次提出了冀东前震旦系中明显有两期强烈迭加褶皱构造存在^②,同时又确定这两期构造是晚太古代产物,并探讨了它们在区域构造演化及铁矿分布规律中的意义。

冀东太古界普遍发育的两期褶皱构造及其运动学的成因特征均甚明显,开展对褶皱构造的岩组学的对比分析,进一步证实构造迭加关系,对研究古老结晶基底岩系构造演化很有意义。为此,作者首先选择冀东晚太古代两期复合迭加褶皱构造关系最清晰的滦县司家营北区为例,得到了与中、粗组构要素分析基本一致的结果,从而进一步证实两期构造复合迭加的宏观认识。

二、滦县司家营区地质构造

(一) 地层

冀东前震旦纪结晶基底的上太古界滦县群主要出露在滦县、卢龙县一带,为角闪岩相岩石。其下部岩层以斜长角闪岩为主,间夹黑云角闪变粒岩,见于卢龙县东部的仙景山、府君山及阳山一带;上部岩层在滦县一带主要为沉积特征明显的黑云变粒岩、黑云二长变粒岩,并夹有厚层磁铁石英岩层,与围岩变粒岩构成滦县硅铁建造,如滦县司家营铁矿区、张庄铁矿区^③。滦县群的混合岩化作用强烈而不均匀,大致可分为两期,先期以渗透和注入交代为主的灰白色钠(钾)质混合岩化为主,形成各种条带状混合岩,局部为片麻状混合岩,如卢龙阳山;晚期为注入交代及异地肉红色钾质混合岩化作用,伴有花岗质伟晶岩脉体穿插,在强烈混合岩化地段构成混合化中心,如滦县马城。滦县群的铷锶年龄测定,滦县司家营区为 2523 ± 135 百万年,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.7028 ± 0.0027 ,属上太古界^[1]。

(二) 构造

滦县群位于由震旦系(按指蓟县层型剖面)沉积盖层组成的东西向开阔褶皱之下,二者

① 长春地质学院、武汉地质学院、华北地质科学研究所、首都钢铁公司地质勘探队、天津冶金地质调查所,1975,河北省迁安铁矿区地质构造含矿岩系特征及成矿规律探讨。

② 北京大学地质地理系冀东富铁研究队,1977.1,冀东滦县一带基底构造特征及铁矿分布的规律性研究。

③ 北京大学地质系富铁矿科研队,1978,冀东滦县一带前震旦纪基底构造特征及铁矿分布规律性研究。《富铁矿科研论文集》,中国科学院富铁矿科研论文集编辑组。科学技术文献出版社。第153—164页。

呈明显角度不整合接触。本区滦县群主要为近南北走向的紧密同斜褶皱，构成连续的东侧阳山复背斜和西侧司（家营）马（城）长（凝）复向斜，同属褶皱轴面西倾的倒转褶皱，褶皱枢纽均向南平缓倾伏。在各个次级向斜构造内，常见有强烈紧密褶皱的磁铁石英岩层，在转折端核部有局部增厚的磁铁石英岩贫矿层（图1）。

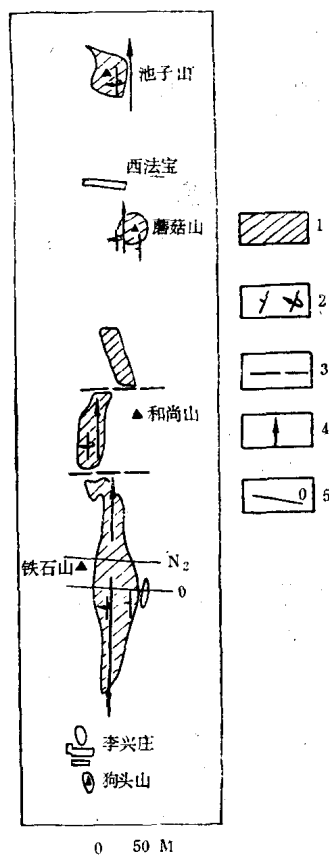


图1 滦县司家营区滦县群出露示意图

图例 1. 上太古界滦县群磁铁石英岩层露头；2. 层理的正常和倒转产状；3. 断层；4. 晚太古代晚期褶皱枢纽位置及倾伏方位；5. 矿区勘探线及编号。

对滦县群中最普遍发育的中、粗组构要素的分析研究，特别是对滦县司家营区等地的研究，确定了冀东近南北走向同斜倒转褶皱是在滦县群形成之后的晚太古代末期的构造运动产物，并迭加在一次先存的近东西走向强烈褶皱构造之上^[2]。由滦县群硅铁建造的原岩组分及区域性厚度变化总趋势，还初步求得滦县群具近东西走向延伸的原始沉积盆地形态。由此推知，在晚太古代大致在年龄30至25亿年期间，控制冀东滦县群形成的构造环境在一些地段内主要是近东西走向构造线。由太古代区域构造演化分析，这一时期近东西向的构造线很可能是继承前滦县期的构造方向。而晚太古代末，阜平运动在冀东形成了近南北走向的褶皱构造，并迭加在早期先存的近东西向褶皱构造之上。晚太古代末的这一重要构造演化，不仅使近东西向的构造改造为近南北向的构造，而且使冀东太古代构造固结硬化，形成统一的硅铝古陆块。进入元古代构造演化阶段，冀东太古代统一古陆块因北东向线性断裂构造的形成而崩裂，但对太古代褶皱构造基本特征无重大影响^[3, 4]。

三、滦县司家营区中、粗组构要素

冀东太古代变质程度较深，缺乏野外标志性岩层，因而磁铁石英岩层常被当作形态构造的标志层。由构造的几何形态和运动学成因特征研究，对中、小型构造中与褶皱作用伴生的中、粗组构要素：褶皱枢纽、布丁（石香肠）、窗槛、流劈理和层理的面交线及拉伸线理五类，按桑德尔的几何形态坐标系和运动学坐标系概念进行成因分析，在认识区域构造特征方面有重要意义^[5, 6]。

滦县司家营区是冀东上太古界滦县群中的中、粗组构出露最好、复合迭加关系最明显的地区。那里磁铁石英岩层内强烈多变的褶皱形态，因其褶皱枢纽与普遍出露在磁铁石英岩层理面上的平行线理，即流劈理与层理的面交线，二者产状完全一致，证实了这些层内褶皱是构造成因的^[2]（图2）。司家营区的磁铁石英岩层顶底面的判别和中、粗组构要素的系统测量发现，有一组B或b轴线理：褶皱枢纽、布丁、窗槛、流劈理与层理的面交线这四类组构要素，普遍被另一组B或b轴线理所复合迭加改造。这两组构造系列均系褶皱作用的伴生构造，且晚期迭加的褶皱构造形态明显，因而判定有两期褶皱构造序列的迭加。它们都具剪滑褶皱兼弯滑褶皱类型特征。消除了晚期褶皱构造后，得知太古代末的近南北走向的晚期褶皱构造迭加于近东西走向褶皱构造之上，二者的方位交角在滦县出露各点上均为72°—74°^[2]。