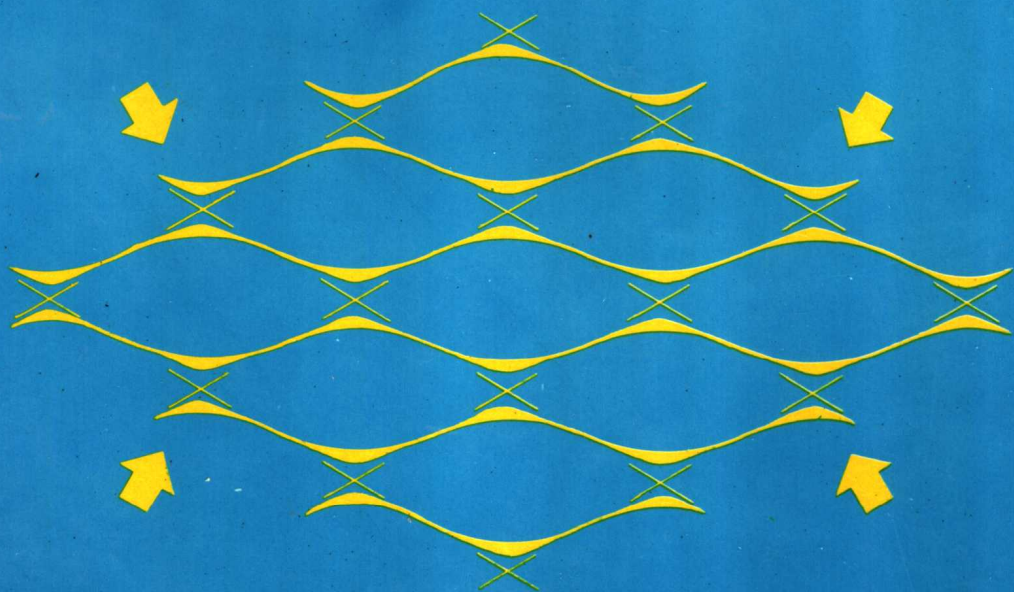




构造复合联合原理

川黔构造组合叠加分析

乐光禹 杜思清 著
黄继钧 杨武年



成都科技大学出版社

构造复合联合原理

川黔构造组合叠加分析

乐光禹 杜思清 著
黄继钧 杨武年

(国家自然科学基金资助项目)

成都科技大学出版社

(川)新登字 015 号

责任编辑:黄晓红 毕 潜

封面设计:乐光禹 钟 渝

内容简介

地壳岩石在多组构造力共同作用下,产生各种联合构造型式;经多期多幕构造变形,又产生各种复合干扰型式。本书系统地论述联合构造及其构造应力场叠加分析的理论和方法,对层状岩石中纵弯复合叠加褶皱的类型和力学机制进行定量解析,提出区域构造变形和构造应力场的遥感图像解析法以及叠加褶皱区先存节理产状恢复的新方法,均具有理论意义和实际应用价值。以构造复合—联合原理为指导,对四川盆地和贵州高原的构造组合叠加格局进行新的分析,阐明了盆地内各种复杂圈闭形态的成因,揭示了区域内多组系褶皱断裂带的递进扩展和叠加干扰过程,恢复了中新生代构造应力场。此外,还对构造联合和构造复合的控岩控矿作用提出新的分析。全书论点新颖,资料丰富,图文并茂,理论与应用并重,可供从事构造地质学、地质力学、区域地质学、矿田构造学以及油气田构造分析的科技人员和大专院校师生参考。

构造复合联合原理
—川黔构造组合叠加分析
乐光禹 杜思清 著
黄继钧 杨武年

成都科技大学出版社出版发行

成都理工学院印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18.125

1996 年 11 月第一版 1996 年 11 月第一次印刷

印数:1—500 册 字数 418 千字

ISBN 7-5616-3367-x/P·87



定价:20.00 元

前 言

在一场构造运动中,地壳或岩圈及其组成部分的各级板块、地块和岩块的动力条件常很复杂,可能存在两组或两组以上的构造动力联合作用,从而决定其复杂的变形组合型式。这些块体及其内部的岩层岩体又常受到多期多幕构造运动的影响而遗留下多次构造变形的叠加和干扰。所谓构造控岩控矿以及构造对地震地热和地壳稳定性的控制,在许多地区,实际上都是复合—联合构造在起着控制作用。因此,不论从地质力学或一般构造地质学的观点出发,构造复合和构造联合问题都具有重要的理论意义和实际意义。

对于复杂构造区或多组系构造发育区,可以说,离开了构造复合和构造联合分析,便无从阐明其构造组合规律和构造变形历史。四川盆地和相邻的贵州高原就属于这类地区。两区同属上扬子古板块的组成部分,从古生代至早中三叠世,大都为广海台地,侏罗纪时共同卷入大型陆盆之中;至中生代晚期,才发生显著的隆拗分异,分别形成高原和盆地。两区的盖层构造变形强度中等,但组系较多,方向多变,显现出多种多样的复合联合叠加型式,控制着油气及其他矿产的赋存和分布规律。笔者自60年代以来,便结合川黔以至西南广大地区的区域构造,研究构造复合和构造联合的类型及其变形机制;一些观点和材料除所发表的论文外还写入《地质力学参考》一书以及地质力学教科书的有关章节中。90年代初,在国家自然科学基金资助下,又同合作者一起做了进一步的综合研究,发表了系列论文并写成专题报告,曾获1994年四川省科技进步二等奖。以该报告为基础,补充了在国家“八·五”科技攻关项目及其他项目中完成的部分成果,改写成本书。书中阐述的基本原理和方法主要是从沉积岩及其它层状岩石发育区的构造分析中总结出来的。至于变质岩区,主要以两期或多期面理、线理和剪滑褶皱的叠加干扰所表现的各种复杂现象,国内外均有较深入的研究,有关文献甚多,本书对此未作论列。

所论述的构造复合—联合原理和分析方法提出后,已产生实际的社会效益。四川和贵州的一些地质队用以指导区域构造分析和区调报告编写,油气部门也参考和应用了川南三角形格局和川东北联合—复合构造及构造应力场分析的成果,豫西地质队应用“收敛双弧”原理指导成矿规律的研究。成都理工学院科研开发队应用复合—联合原理指导找矿,已找到和扩大了一批受复合—联合构造控制的矿床,如云南宁蒗铜矿和重晶石矿、浙江武义萤石矿以及川东天青石矿等。看来,这一理论在实际应用方面,还是很有前景的。

本书包括基本原理、区域构造和构造控岩控矿三部分,分列为十四篇,在结构上各篇既有相对的独立性,又密切结合为统一的整体。前六篇主要论述构造复合和构造联合的基本原理和研究方法,第七至十二篇分析四川盆地和贵州高原的中新生代构造变形组合及复合—联合叠加问题,最后两篇分别综论构造联合和构造复合的控岩控矿作用。各篇的分工执笔如

下：一、绪论(乐光禹)，二、构造复合叠加的基本原理和叠加方式(杜思清)，三、纵弯褶皱复合叠加作用(杜思清)，四、联合构造及其构造应力场的叠加分析(乐光禹)，五、叠加褶皱地区先存节理产状变化规律与恢复(黄继钧)，六、区域构造组合和构造应力场的遥感图像解析法(杨武年)，七、川东北地区纵弯叠加褶皱的类型和构造应力场分析(黄继钧、乐光禹)，八、川南环套三角形构造格局及其对气田的控制(乐光禹)，九、四川盆地中新世代构造变形及其组合叠加规律(乐光禹)，十、金佛山地区菱形—弧形叠加构造特征(杜思清)，十一、郎岱三角形构造及其形成机制(乐光禹)，十二、贵州中西部构造格局及其形成和演化(乐光禹)，十三、构造联合的控岩控矿作用(乐光禹)，十四、构造复合的控岩控矿作用(乐光禹)。全书由乐光禹统编修改定稿。此外，张时俊、杨庚、田作基和余定成参加了部分野外调查和室内综合研究，王道永也短期参加过野外工作。

本书的初稿(即自然科学基金项目成果报告)写成后承马宗晋院士，李东旭、郑亚东、徐开礼教授和陈世瑜研究员评审并提出许多宝贵意见，书稿付印前又承林茂炳教授审阅，特此一并致以深切的谢意。

构造复合和构造联合涉及的理论和实际问题较多，本书的论述还是很不够的，书中疏漏和谬误之处在所难免，敬祈读者和专家们给予指正。

乐光禹

1996 年秋于成都

目 录

一、绪 论	(1)
(一) 两类构造叠加现象—复合叠加和联合叠加	(1)
(二) 沉积岩区构造分析刍议	(2)
(三) 研究思路和主要成果	(4)
二、构造复合叠加的基本原理和叠加方式	(5)
(一) 概 述	(5)
(二) 构造复合叠加的基本原理	(6)
(三) 构造复合叠加的主要机制	(8)
三、纵弯褶皱复合叠加作用	(15)
(一) 概述及研究现状	(15)
(二) 纵弯褶皱的几何学和运动学分析	(18)
(三) 正纵弯叠加褶皱时早期褶皱的迁移	(20)
(四) 正纵弯叠加褶皱的基本类型	(26)
(五) 正纵弯叠加褶皱的力学模拟	(32)
(六) 纵弯叠加褶皱作用的一般性问题	(34)
(七) 小 结	(41)
四、联合构造及其构造应力场的叠加分析	(43)
(一) 联合构造的意义和研究状况	(43)
(二) 联合构造型式和控制线分析法	(44)
(三) 关于构造力的联合作用问题	(47)
(四) 应力状态的叠加和应力场的叠加	(48)
(五) 直线型联合构造与均匀叠加应力场	(59)
(六) 弧形联合构造与非均匀叠加应力场	(62)
(七) 联合双弧和网眼状联合弧系	(66)
(八) 三角形联合弧系及其构造应力场分析	(73)
(九) 构造的生长扩展与构造联合和构造复合的统一模式	(79)
五、叠加褶皱地区先存节理产状的变化规律与恢复	(83)
(一) 问题的提出	(83)
(二) 早期褶皱过程中先存节理产状变化	(84)
(三) 叠加褶皱对先存节理产状的改造	(85)

(四) 两期纵弯褶皱叠加时先存节理产状的恢复	(93)
(五) 断层面在叠加褶皱过程中的产状变化	(99)
(六) 川东北叠加褶皱地区先存节理产状的恢复	(100)
六、区域构造组合和构造应力场的遥感图像解析法	(106)
(一) 理论依据与主要特点	(106)
(二) 研究步骤与程序	(108)
(三) 实例分析	(109)
(四) 结论和讨论	(116)
七、川东北地区纵弯叠加褶皱的类型及构造应力场分析	(119)
(一) 构造分带与分期	(119)
(二) 复合叠加褶皱的类型和特征	(122)
(三) 区域构造应力场概论	(135)
(四) 各区段构造应力场分析	(138)
(五) 有限应变分析	(145)
(六) 构造组合叠加对含油气构造的控制	(150)
八、川南环套三角形构造格局及其对气田分布的控制作用	(152)
(一) 直角三角形块体及其边界断裂	(152)
(二) 直角三角形联合构造格局	(155)
(三) 行列状复合构造格局	(157)
(四) 节理组系与局部构造应力场	(159)
(五) 区域构造应力场与联合—复合构造的发展	(165)
(六) 川南气田的环套三角形分布规律	(168)
九、四川盆地中新世代构造变形及其组合叠加规律	(172)
(一) 中新世代构造运动及其对盆地隆拗的控制作用	(172)
(二) 构造组合格局和构造叠加作用	(178)
(三) 褶皱机制、分层变形与滑脱作用	(187)
(四) 基底断裂对盆地构造变形的控制作用	(195)
(五) 构造运动和构造变形的运移扩展	(196)
(六) 全盆地构造应力场分析	(197)
(七) 晚中生代以来的构造变动对古构造的继承和改造	(199)
(八) 联合—复合叠加对含油气构造的控制	(201)
十、金佛山地区菱形—弧形叠加构造特征	(204)
(一) 概述	(204)

(二) 地层简介及岩性组合	(205)
(三) 金佛山联合构造的基本特征	(206)
(四) 金佛山地区的南北向和北东向构造	(211)
(五) 南北向构造变形剖面上的不协调性	(213)
(六) 构造复合的相对先后顺序	(214)
(七) 节理系统及有关构造应力场	(221)
(八) 构造变形时期及边界条件	(225)
(九) 小 结	(226)
十一、郎岱三角形构造型式及其形成机制	(228)
(一) 褶皱断层组合及其竞争生长	(228)
(二) 节理组合及相关的构造应力场	(230)
(三) 数学模拟和物理模拟	(232)
(四) 古构造背景	(235)
十二、贵州中西部构造格局及其形成和演化	(237)
(一) 象限联合构造格局分析	(237)
(二) 复合叠加构造格局分析	(244)
(三) 区域构造格架的演化及构造动力作用方式的转变	(248)
十三、构造联合的控岩控矿作用	(253)
(一) 直线形联合构造与雁行矿脉型式	(253)
(二) 弧形联合构造控矿	(254)
(三) 复杂联合弧系控岩控矿	(256)
十四、构造复合的控岩控矿作用	(262)
(一) 复合叠加褶皱及其控岩控矿	(262)
(二) 复合叠加断裂及其控岩控矿	(265)
(三) 大型构造带的复合及其控矿作用	(275)
(四) 构造叠加与成矿叠加	(276)
英文目录	(278)

一、绪 论

(一) 两类构造叠加现象—复合叠加和联合叠加

地壳构造变形中存在两类叠加现象^[2]：一类是同地同时发生的两个或两个以上应力场、应变场、位移场及有关构造的叠加，即构造联合叠加，所产生的综合构造即为联合构造；另一类是同地不同时的应变场、位移场及有关构造的叠加，即构造复合叠加，所产生的综合构造为复合构造。地壳各部分的受力变形及其历史是很复杂的，简单受力和一次性(单幕)变形的情况比较局限。一个地区往往同时受到不同方式或不同方向的多组构造力共同作用，由此决定联合叠加现象；一个地区又往往先后受到不同方式或不同方向的构造力分别作用，由此决定复合叠加现象。区别和分析这两类构造叠加对阐明区域构造动力学，确定构造变形机制和恢复构造变形历史是十分重要的，它们对成矿规律、地壳稳定性以及地震和地热的分布等都有重要的控制作用。

自然界的各种构造复合现象，如断裂交切、面理线理的穿插、褶皱的叠加干扰等早为地质学者所关注^[6,7,8]，由于这类现象的普遍性和复杂性，至今仍是构造地质学和地质力学研究的重要内容。李四光^[4,5]根据他所倡导的地质力学理论和方法，较早研究构造复合和构造联合问题。他认为“构造复合现象的一般概念颇为广泛，它不仅适用于同一构造体系中两种极其接近的成分彼此符合、结合、联合或合并的关系，而是广泛地包括着同一地域中属于不同构造体系的各种构造成分依各种方式互相干扰和联合的一切现象。”这里所说的显然是构造复合的广义概念，它不仅包括了系内复合和系间复合，而且把联合也包括在内。他接着又说“在实现工作中为了便于解析问题，构造联合现象和复合现象应分别处理。”现在一般论及构造复合，大都是指它的狭义概念，它同构造联合既有密切联系又有重要区别^[3]。正是由于对两者的联系和区别缺乏统一的认识，导致某些概念上或具体现象辨识上的混乱。

构造复合与构造联合的联系主要是：

(1) 联合构造可能又同早期或晚期的其他构造相复合，须注意区分，勿使混淆。

(2) 某些大型或区域性构造体系、构造带往往是长期发展或多期活动的。在同一区域内可能有两个或多个构造体系、构造带交替地活动，交替活动中又可能有一段或长或短的重叠时期，即共同活动的时期，从而发生两个或多个构造体系既复合又联合的复杂情况。野外观察可能发现这些构造体系的成分有的互相交切，互有先后；有的又发生联合，形成具有折衷性质的联合构造。分析这些复杂的复合—联合现象，就可能恢复区域构造的成生发展过程，为重建造构造变形史提供重要证据。

(3) 复合的早期构造可以作为联合的晚期构造的约束边界，即复合可以是联合的控制因素。现以中国东部常见的，与纬向构造带及北东或北北东向构造带有关的弧形或S形联合构造为例来讨论(图1—1)。产生这种构造型式的应力场可以看做是两种应力场的联合叠加，一种是北西—南东向挤压应力场(主压应力为 σ_3)；另一种是南北向挤压应力场(主压应力为 σ_1)。有关地块西边朝南，东边朝北的运动决定前一种应力场，产生雁列式构造C—D；地块朝

北和朝南的运动又受到作为边界的早期纬向构造带的约束,导致后一种应力场,产生东西向构造线 $\overline{AB}$ 和 $\overline{EF}$ 。两者的叠加地段形成联合弧 BC 和 DE ,贯连起来就构成 S 形弧系。在这里, S 形弧系作为统一的体系是联合构造,也可以说是北东向和东西向构造的联合。参与联合的是以 $\overline{AB}$ 和 $\overline{EF}$ 为代表的东西向构造,而不是作为边界的早期纬向构造带。后者与弧形或 S 形联合构造的关系是一种复合关系(限制关系),即构造复合控制了构造联合。

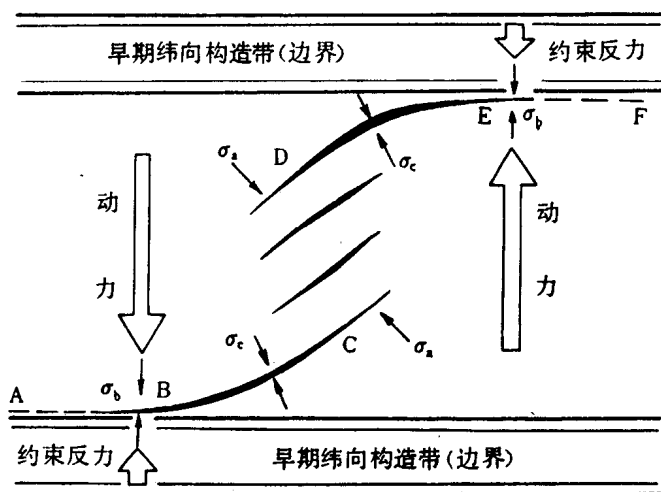


图1—1 早期构造带作为约束边界对晚期联合构造的控制

构造复合和构造联合的区别主要是:

(1)构造力(外力)作用的时空关系方面 构造复合是两种或多种构造力在同一地区先后独立作用的结果(同地不同时),构造联合则是两种或多种构造力同地同时联合作用的结果。

(2)构造应力场的叠加方面 相复合的两期构造所代表的构造应力场是先后发生的,早期应力场消失后,经过一段或长或短的时间,才又有后期应力场出现;因此,对构造复合来说,一般不存在应力叠加问题,不会形成统一的应力场。构造联合必然会发生应力叠加,形成统一的联合构造应力场。

(3)变形和位移的叠加方面 构造复合或构造联合都可以表现为两种或多种变形或位移的叠加。对构造复合来说,早期应力场虽已消失,而岩层中的永久变形或变位却保留下来,后来发生的变形变位遂与之叠加。构造联合所表现的变形变位的叠加,从一开始就是以综合的,折衷的形式出现的。复合叠加和联合叠加的几何效应有时难以区别,但就变形过程和位移过程(位移路径)来说则是不相同的。

(4)地质构造方面 相复合的两个或两个以上构造体系虽然互相干扰,发生构造形迹的交切、穿插和局部迁就等现象,但并不改变各个构造体系在总体上的独立性,不会铸成统一的构造体系。而构造联合的结果必然会铸成统一的,折衷的新型构造体系,即联合构造体系。

(二)沉积岩区构造分析刍议

沉积岩和其他层状岩石分布区,特别是弱—中等变形强度的地台区和过渡区,其构造变

形特点和构造组合规律与变质岩区及强变形的造山带均有所不同;通常为大中尺度的浅层次构造(以脆性断裂及弯滑褶皱为主),缺乏伴生的面理线理等透入性小尺度构造;节理组系较多,同褶皱断层的关系也较复杂。因此,对沉积岩和其他层状岩石区的构造分析一般不如变质岩区研究的精密和成熟。解析构造学已作为一种新体系被提出^[1],根据我们多年来在扬子地台区所作构造研究的经验,对在这类地区进行构造分析的主要内容初步概括如下:

(1)构造形态的组合分析

主要涉及褶皱断层的性质、构造形态及其区域性集合。Hobbs 等^[8]所讨论的15种构造组合基本上属于形态组合范畴,如推覆构造组合,断块和裂谷构造组合,平移断层及伴生构造组合等;其中也包括某些变质构造组合。此外,还有各种特征显著的褶皱形态组合也需要做更详细的划分。

(2)构造系统的组合分析

地台区或过渡区的盖层构造变形虽不很强烈,但褶皱断裂的组系多,方向变化大,须对其构造线和构造系统进行组合分析。首先应确定区域性主干构造线的力学性质、方向变化和展布规律,再进一步划分为不同类型的构造体系或构造型式。对构造体系和构造型式的概念应予扩展,由于实际控制边界和受力方式的复杂性,构造体系或构造型式的类型繁多,当然不限于教科书中已定型化的少数几种,分布广泛的各种联合构造体系或联合构造型式尤应引起特别的注意。

(3)构造级序和伴生派生关系分析

表征各构造组系或各构造体系的主干构造并不是孤立的,一般都有同序次的伴生构造(力学性质相同或不同,级别一般较低)存在,共同组合为统一的构造系统;也经常有序次和级别都较低的派生构造发育于其旁侧或内部。根据级序和伴生派生关系的分析,可以说明主干构造的性质及其各部分相对运动状况,并可作为反演构造应力场和构造动力的地质基础。

(4)构造变形机制分析

沉积岩及其他层状岩石区的褶皱作用主要为纵弯机制,也有横弯机制或两种机制的结合。断裂主要为脆性或脆韧性,有时也可见到经隆升剥露的韧性断裂或其他机制的深层次构造。此外,褶皱断裂的相关性,粘性不同的岩层组合对构造变形特征的控制及接触应变和滑脱作用等都是构造变形机制分析的重要内容。沉积岩及其他层状岩石区在垂向上常可划分出若干不同的“变形层”,在各有关变形机制的控制下,导致分层变形现象。

(5)构造复合叠加分析

沉积岩或其他层状岩石区的褶皱作用主要为纵弯机制,褶皱的叠加也主要为纵弯叠加。断层叠加常表现为各种交切限制关系,并常导致同一断层的多次活动及其力学性质的改变;生长型同沉积复合断层也很常见,需结合沉积相和沉积厚度进行分析。

(6)构造应力场和构造动力学分析

区域构造应力场的反演主要依据区域构造构造系统的组合分析结果。不同性质的主干构造和伴生构造分别反映不同方式和方向的应力作用,而整个构造系统和构造型式则反映总体的区域构造应力场。野外观测中也常根据对张节理和剪节理的分期、配套和优选,通过赤平投影处理以确定各测点的主应力轴产状。对构造应力场的半定量或定量解析可借助有限元数值模拟或光弹模拟,也可采用本书所阐述的应力叠加法。由区域构造应力场又可进一步反演区域构造动力的性质、作用方式和方向以及多组构造动力联合作用或先后作用的情

况并推演动力来源。

(三)研究思路和主要成果

本书主要从沉积岩及其它层状岩石区的构造组合规律出发,试图初步建立起构造变形的复合—联合叠加理论,并应用这一理论具体分析川黔区域构造组合叠加格局以及构造控岩控矿规律。现就六个方面简述我们的研究思路和取得的主要成果:

(1)构造复合方面

从成因机制划分复合类型,在此基础上较深入地研究纵弯褶皱的复合叠加作用。一般采用的剪滑叠加模式不适合分析纵弯叠加问题,本书另辟蹊径,提出翘曲公式,对纵弯叠加机制和叠加褶皱类型进行定量解析;发现早期褶皱几何要素的迁移是实现正纵弯叠加并保持各部分变形协调和相容的重要途径。

(2)构造联合方面

重新探讨了构造联合的概念,阐明在复杂动力联合作用下的构造组合规律,提出联合构造分类的新方案;推导出应力叠加公式,通过对均匀和非均匀构造应力场的叠加分析,获得各类联合构造应力场的主应力迹线网络和联合差应力的数值分布。

(3)节理产状的恢复处理方面

纵弯叠加褶皱地区的岩层经多次转动,初始节理产状较难恢复。用赤平投影方法,通过正演和反演的对比研究,绘制了误差校正曲线,可以正确而简便地恢复节理的初始产状,并据以分析早期构造变形和构造应力场。

(4)遥感方法的应用方面

应用遥感影像解析方法筛分构造复合—联合地区的多期横张大节理和剪切大节理,阐明节理分布与区域性复合—联合构造的关系,并据以恢复构造应力场。

(5)川黔区域构造组合叠加方面

应用构造复合—联合原理,具体分析四川盆地和贵州高原的中新生代构造组合叠加格局,阐明了在构造运移扩展过程中,既联合又复合的复杂规律;对川黔地区的区域构造应力场和构造动力作用方式作出了新的分析。

(6)构造控岩控矿方面

应用构造复合—联合理论,结合典型实例分析了各类复合构造和联合构造的控岩控矿作用;结合四川盆地构造分析,阐明了复合—联合对含油气构造的形成、圈闭特征和分布规律的控制。应用构造复合—联合理论指导找矿,成效显著。

参 考 文 献

- [1] 马杏垣,1983,解析构造学刍议,地球科学,第3期。
- [2] 乐光禹、杜思清,1986,应力叠加和联合构造,中国科学(B辑),第8期。
- [3] 乐光禹、杜思清,1989,联合构造理论的若干问题,地质力学文集(第九集),北京,地质出版社。
- [4] 李四光,1945,地质力学之基础与方法,上海,中华书局。
- [5] 李四光,1973,地质力学概论,北京,科学出版社。
- [6] Billings, M. P., 1972, Structural Geology, 3 ed. Prentice—hall, Inc.
- [7] De Sittle, L. U., 1956, 构造地质学, 中译本, 1964, 北京, 科学出版社。
- [8] Hobbs, T. P., 1976, 构造地质学纲要, 中译本, 1982, 北京, 石油工业出版社。

二、构造复合叠加的基本原理和叠加方式

(一) 概 述

构造复合是地壳构造变形中一种常见的重要现象。李四光^[6]较早就提出过复合的概念和具体方式,后来又把复合方式归纳为归并、交接(包括重接、斜接、反接和截接)、包容和重叠四类^[7,9]。此外,构造变形中的限制现象也曾被先后提出^[6,3],并被列为构造复合的一种具体方式^{①[10]}。构造复合现象和复合方式是地质力学研究的一项重要内容。构造地质学中的多期变形叠加和置换等问题也属于复合范畴^[2]。Ramsay^[22,23]对褶皱的叠加问题作了系统的总结,提出以剪切模式为依据的叠加方式以及基本的叠加类型,对纵弯褶皱的叠加变形也提出了较中肯的看法。另一些研究者^[12,16,17,24]作了纵弯褶皱叠加的模型试验和地质研究,并提出了一些新的看法。在构造置换方面,Turner 和 Weiss^[26]用褶皱变形的轴面片理置换原生层理的过程说明了后期构造变形对早期面状构造的置换原理。早期线理或面理在晚期褶皱变形中形态方位的变化和变化了的早期线理面理原始产状形态的恢复问题的讨论,实际上也是复合构造问题^[22]。对构造复合叠加的研究不能只停留在复合方式和叠加构造的综合形态上,还需进一步从复合叠加的机制和过程方面进行考查。研究复合叠加构造的主要目的在于提供恢复构造变形历史的基础资料和依据。这对经多期或长期构造变形而又无显著地层不整合的地区来说尤其显得重要。

一般说来,复合叠加构造的研究有三个要点,即识别复合叠加构造的存在,辨别复合双方的相对先后顺序,分析叠加机制并恢复叠加过程。

1. 识别复合叠加构造的存在

这是研究复合叠加构造的首要问题。复合叠加构造是两期或多期构造变形的综合结果,其形态多种多样,取决于许多因素。通常对一种叠加构造的综合形态或一种复合方式的识别都是从实际地质构造现象中概括总结出来的,然后又据以指导对同类复合叠加现象的鉴别和认识。但是自然界可能还有一些新的叠加综合形态类型或新的复合方式未被认识,有待继续深入观察、鉴别和总结。

2. 辨别复合双方的相对先后顺序

这是研究复合叠加构造的一个难点,但又是一个不可回避的问题。发生复合叠加的构造变形的相对先后有不同情况:双方分别发生在地质时期间隔很长的两次构造运动,属于不同构造旋回的产物;或分别发生在同一构造旋回中先后两期变形幕。也可以是在一个递进变形过程中的不同变形阶段发生的;还可能只是由于构造变形发展的不平衡而先后涉及同一地点或地域的同时形成和发展的构造形迹。复合双方的形成时期的上下限可以通过一般地质方法确定,特别是当先后两期变形为角度不整合时还可以确定相对先后的时期。如果复合双方涉及同一构造层,复合构造的分析便成为划分相对先后的一种重要方法。已被认识的复合

① 乐光禹,1974,地质力学参考

叠加构造中,有些叠加综合形态或复合关系是可以用来辨别相对先后的,例如,早期褶皱轴面或轴面片理和两翼岩层一起再次褶皱而形成的重褶叠加褶皱或共轴重褶叠加褶皱(即 Ramsay 划分的第2型和第3型叠加褶皱)。但是,也有些叠加综合形态或复合关系并不能说明双方的相对先后。例如,两组轴迹近于直线状、枢纽大致垂直两轴面交线的褶皱形成的横跨褶皱或斜跨褶皱(即相当于 Ramsay 的第1型叠加褶皱)的褶皱型式就不能提供相对先后的依据,复合双方中一组显著、另一组隐蔽主要取决于相对强度,而与相对先后无关。又如,一条断层或一个构造带两侧的另一方向构造是被切割的或是被限制的,仅就其在某一露头面上的露头形态看是很难准确判断的,而不同的判断所得的先后顺序恰好是相反的。

3. 分析叠加构造的叠加机制并恢复叠加过程

在识别了叠加构造并辨别了相对先后的情况下,这方面的研究可以进一步提供与叠加变形有关的变形历史。在识别叠加构造和辨别相对先后有困难时,这方面的研究还可以提供一些线索或依据。特别是通过叠加机制的研究,把两个或两组构造以同一先后顺序相复合时引起的多种叠加现象联系起来,使认识和判断能做到利用多种构造现象进行综合分析。叠加机制的核心是叠加变形的成因,是控制叠加构造综合形态和叠加过程的主要因素。而叠加机制又是由多种因素控制和影响的,主要有:复合叠加的双方的变形类型、性质、规模、强度,两者的方位关系,两期变形的相互影响,叠加构造的三维空间形态和它在不同切面上的露头形态等。过去,我们总是把从被动褶皱叠加作用的研究中得到的认识用来观察分析沉积岩区的纵弯叠加褶皱。但由于对纵弯叠加褶皱缺乏较深入认识,常常遇到许多困难。其中主要困难就是如何辨别复合双方的先后和是否同时,这种困难反过来又常常动摇我们原有的认识。困难迫使我们重新研究纵弯褶皱叠加作用的成因机制。现有研究取得一些新认识,也发现许多由于纵弯褶皱本身固有特征所带来的问题。新的认识对分析纵弯叠加褶皱是有益的,问题又指出应该注意的地方和进一步研究的方向。总之,叠加机制的研究是研究叠加构造的核心,是复合叠加构造理论研究的一项基础工作。因此,有必要从叠加构造的成因机制方面对构造复合叠加作用作一分析,下面我们将从复合叠加的基本原理和主要叠加机制予以简要说明。

(二)构造复合叠加的基本原理

为了分析问题方便,我们把复合叠加构造中依次发生的构造分别叫做第一期构造、第二期构造、第三期构造等。相对而言,把复合叠加的先后两期构造称为早期构造和晚期构造。每一期构造都与某种方式、方向构造力控制的应力场、应变场有关,其中的球形部分和偏斜部分的比例,决定了主干构造的性质,不同性质构造成分的发育程度^[4,11]。不同时期的构造变形都是一个力学过程,但力学过程的边界条件和变形特征是不相同的。早期构造变形初期,岩石结构构造较简单,均匀连续性相对较好。这时在一定方式方向的构造力作用下所形成的应力场和应变场以及相应的各种构造变形也相对较规则较简单。后来发生的构造变形,或者是在另一方式方向构造力作用下发生的,或者仍然是在原来的构造力作用下发生的,但与早期构造变形相比,晚期构造变形时的岩石结构、构造、产状、形态,岩石的均匀性和连续性等都和早期变形时不相同,即既成几何边界条件和岩性条件更复杂了。

晚期变形时,形成早期构造的构造应力场或应变场已经不存在了,或者已经是晚期构造

应力场或应变场中的一部分联合叠加成分不再独立存在。由于这时岩石几何边界条件和岩性条件较复杂,加上构造力可能也发生了变化,晚期构造应力场和应变场都将比早期的要复杂。晚期构造应力场和应变场的作用有两方面,一是作用在既成早期构造形迹使其发生新的变形或遭受改造;二是作用在岩石上使其产生新的构造变形,形成晚期构造形迹。晚期变形也会不同程度受到早期变形影响,具有比早期变形更复杂的特点。另一方面,早期变形也会受到晚期变形影响或改造。这就是早晚两期构造变形的相互影响。

由上述分析可知,在晚期构造变形期间早期构造应力场和应变场已不存在或不再单独存在,但却存在着早期既成构造变形、晚期构造应力场应变场和晚期新生构造变形三方面的相互影响。三个方面中只有早期和晚期构造变形是第一性的,能直接观察测量的。

在上一节中已经指出叠加机制受到多种因素控制和影响,现对其中主要的说明如下:

1. 早晚两期构造变形的类型和性质

构造变形的类型主要指构造变形的表现形式,即构造地质学中的褶皱、断层、节理、面理、线理和其他大型区域构造变形等,还包括不同机制的褶皱变形,不同力学特征或位移特征的断层等。不同类型和不同性质的构造变形复合叠加具有不同特点并形成不同特点的叠加构造现象。例如,晚期断层与其它早期构造复合的特点不同于褶皱与褶皱相复合的特点。不同机制的褶皱变形间的复合特点也是不相同的,例如我们将详细说明了纵弯叠加褶皱与被动褶皱叠加褶皱的特点的不同。

2. 早晚两期构造变形的规模和强度

构造变形的规模主要指构造形迹的大小,延伸的长度和延伸的深度,变形所涉及的宽度等。构造变形强度即变形的强弱程度,如褶皱构造的紧闭程度,即正交剖面上的剖面形态。在复合叠加的两构造中变形规模和强度都是相比而言的。不同规模的构造相叠加会有不同的叠加方式和叠加过程,而且还受相对先后关系不同的影响,例如早期褶皱与后期区域性节理的复合方式就与早期节理与后期褶皱的复合方式是不相同的。不同强度的构造相叠加自然会有不同的叠加效应,更主要的是某些早期构造如纵弯褶皱的强度还会直接影响晚期褶皱的特点和叠加褶皱的类型。

3. 复合叠加构造的方位关系

相复合的两期构造间的方位关系是指两期构造形迹或两组大型构造带间的三度空间的关系。在其它情况都相同的条件下,复合构造间的不同空间关系会形成不同特征的叠加构造,甚至可能形成不同类型的叠加构造。例如无论是被动褶皱的复合叠加还是纵弯褶皱的复合叠加,两期褶皱轴面和枢纽的不同方位关系将形成不同类型的叠加褶皱。不同空间关系复合叠加形成的复合叠加构造的综合几何形态也是三度空间的,而一个三维几何形态的叠加构造在某一露头面上的二维干扰型式又取决于露头面与叠加构造的空间关系。

4. 复合叠加构造综合几何形态的演变

复合叠加构造的几何形态是早晚两次变形的综合结果。按前述,早期构造在晚期构造变形中已不再独立地按早期变形规律发展,但在晚期变形中可能得到加强、改造,有时甚至削弱或消失,与此同时晚期变形又同时形成和发展。显然,随晚期构造变形由弱到强的逐渐发展,复合叠加构造的几何形态也会逐渐变化,复合叠加机制也是变化的。下面我们将大体上按晚期变形由相对较弱向相对较强的发展趋势讨论不同的叠加机制。

(三)构造复合叠加的主要机制

依照上述原则,我们将构造叠加机制分为如下几种:

1. 场干扰

在晚期构造变形期间,在已经构造变形的岩石中存在着形成晚期构造的应力场和应变场。这时早期既成构造变形,特别是破裂型断层、节理等的存在相当于在原来较均匀连续的介质或层状介质中置入了力学性质有较大差异的界面或实体,使岩石变得更不均匀连续,这时构造力在岩石中形成的应力场和应变场便和没有这些既成构造时不相同了。岩石中既成早期构造对应力作用和应变作用的影响叫做场干扰。这种干扰包括应力和应变的大小和方向。严格讲,场干扰存在于一次或一期构造变形的不同阶段,发生较早的构造变形对后来的应力场和应变场都有干扰。场干扰的特点还与介质的变形性质有关,在塑性变形和脆性变形都有。通常,场干扰最初产生于晶格尺度,介质变形为非均匀的塑性变形。如果应力作用继续增大并达到破裂界限时,脆性破裂便从介质内部的软弱点开始,并沿最大剪切方向或其附近产生。当介质进入不连续变形后,应力干扰会更加集中,并常集中于已有破裂面的两侧或其端点附近,在这些地方形成新的变形。

断裂的存在对应力场的干扰,在力学上就是应力集中问题。这种干扰的特点是在断裂附近主应力减小,而在断裂两端增加;当断裂面与原来主应力斜交时,断裂面附近主应力方向将变得接近垂直和平行断裂面,这时断裂附近的主应力轨迹变弯曲,甚至在断裂两侧互不相连。这时新的断裂将会在断裂两端或两侧附近发生,分布不均匀,局部集中。一些地质学者^[13,14,18,19]从不同角度讨论了这类问题,尽管在一些认识上有不同,但在早期断层对后期应力分布和变形有影响这一点上是一致的。Гзовский^[28]也研究了断裂对应力的影响。刘小汉^[5]论述了“应力扰乱”概念,并通过许多地质实例来解释古构造应力场中会存在局部应力方向与区域应力方向的差异。对场干扰的研究是以地质研究为基础,从地质实例中提出力学问题,建立分析应力干扰的理论模型,进行模拟计算,还可以采用各种模型试验方法进行研究。

2. 迁就利用

早期既成构造,尤其是不连续性破裂构造的存在会影响后期应力场和应变场,另一方面早期构造本身又作为一个构造软弱面或软弱带存在又受到晚期构造应力作用发生新的应变。早期构造可以发生再次活动,形成多期活动的构造形迹。新生构造可以利用若干早期构造的局部段落形成追踪断层,也可以利用早期构造继续扩展。晚期构造应力和应变控制下,早期构造再次活动即是晚期构造利用早期构造,这一现象叫做迁就利用。

迁就利用现象在一次构造变形的过程中和在多期构造叠加的情况下都会存在。构造变形在晚期所受的应力作用或发生的增量应变的性质和方位和早期所受的有较大变化时,才使其力学性质、应变特征、错移方向发生较显著变化,迁就利用才能被认识。在构造复合叠加条件下,再次活动的早期构造和利用早期构造形成的晚期构造是同一构造形迹,其中迁就利用的部分具有先后发生的不同性质的应变特征。这就是所谓复合叠加的复性构造形迹。

迁就利用是形成归并复合方式的主要原因,李四光^[9]指出“一个构造体系的某些成分,或者一部分的所有成分,有时经过轻微改变,卷入另一个构造体系,或者成为同一体系的不同序幕的成分,这种现象,都可称为归并”。这里所指的“改变”显然包括力学性质、应变特征

的改变,是晚期构造应力场和应变场作用的结果。

迁就利用现象可以发生在小型构造间,也可以发生在中型和大型构造间,还可以在巨型构造带间。李四光曾以四川北碚乳花洞小型追踪断层和东非大裂谷大型追踪断层来说明归并和迁就现象。大型或巨型构造的迁就利用虽然不如小型的容易被认识,但其存在是肯定无疑的,例如我国东部郯庐断裂自中生代以来就有过几次不同性质的应变和不同方向的错动,虽然对这种多期活动有不同解释,但很可能仍然与大区域范围内不同方式方向的构造变形有关,是不同方式方向的构造运动控制下的构造应力场和应变场先后作用的结果,也是一种归并现象。另外,我国和国外都有不少大型或巨型构造带,不仅地质历史长久,而且在不同时期发生过地质、地球物理特征和相对运动方式不同的构造变形,说明曾经处于极不相同的地质环境,发生过或多次发生过不同性质的变形和位移。从板块构造看,它们可能是经历过不同变形特征的板块边界构造,或者是板内构造。这种不同类型的边界构造的转变或不同性质内部构造的更替实际上都是不同时期不同性质的构造运动在同一构造形迹或构造带上的表现。这些构造显然也是一种迁就利用的复合叠加构造。

3. 限制

当晚期构造力所形成的应力和应变还不很强的时候,晚期构造变形一方面迁就利用早期构造使其再次活动或继续发展,另一方面在被干扰的应力场和应变场控制下,在早期构造的旁侧形成新生构造。由于新生构造相对较弱,规模较小,故分别发育在早期构造的一侧或两侧,可以与之相交但不穿过早期构造。这种复合叠加叫做限制。

早在1945年李四光^[6]曾把一些局部褶皱称为限制褶皱(non—sequent folding),当时他主要指的是陷落于两大正断层间的地层,因物理性质和负荷的差异而导致差异软化流动引起的褶皱,以及软硬相间的岩层中因强硬层褶皱而在软弱层中引起的局部褶皱。马宗晋、邓起东^[3]在香溪大峡口奥陶纪灰岩中发现一组节理被局限在另一组节理之间,他们把这种现象也称为限制。后来,限制被正式作为一种复合叠加类型,广泛应用于地质构造研究中。

限制构造的几何特征是一组规模较小、强度较弱的构造分别发育在规模较大、变形较强的另一方向构造的旁侧,既不穿过也无对应性。当然,如果其它地质资料证明发育在旁侧的构造的形成时期早于隔开它们的另一方向构造,那么即使具有这种几何特征的构造组合也不能作限制构造处理。

晚期构造被限制的原因主要有两种。第一,早期构造是一个或一组断裂面,它把两侧岩石自然地分割成两个不连续断块。后来在两侧分别发育的规模和强度都较小的晚期构造便也自然地互不相连,也不对应。发育在贵州中部普定县内东西向大窑背斜核部一带的东西向正断层就是以这种作用对大窑背斜两侧的北北东向梅子关背斜和龙场背斜发生限制(图12—8)。岩层层面和断裂面一样,对两侧较小规模的层间构造也可起限制作用。第二,岩层中早期形成的陡带也可以起限制作用。陡带是相对两侧的平缓岩层而言的,例如挠曲中的陡立地带,倒转褶皱中的陡翼,紧闭褶皱的两翼都是。陡立岩层与平缓岩层相比不易褶皱,多表现为其它类型变形(如塑性变形和断裂),而平缓岩层相对容易褶皱,因此陡带两侧岩层将分别褶皱,新的褶皱在陡带两侧也不相连。一翼较陡的早期不对称背斜的缓翼容易发生与背斜轴线相交的晚期褶皱,它可以一直延伸过背斜核部中止在另一翼的陡带之前。在陡翼的陡带之外较缓岩层中也容易形成新褶皱,也延至陡带之前中止消失,新背斜与陡带间可能形成沿陡带分布的新断层,也可能急剧倾伏,倾伏部分与陡带的一部分形成一沿陡带分布的向斜,