

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.974>



铜官山 S 状背斜构造综合解析

李东旭¹, 谭以安²

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国国际工程咨询公司, 北京 100044

摘要: 通过褶皱、断裂、节理、线理等构造形迹的系统观测对铜官山 S 状背斜的形成过程和机制进行了综合构造解析, 发现该背斜经过了 3 次构造变形, 2 次构造叠加复合。早期 NE 向褶皱的 S 状弯曲是由于前期 EW 向断裂限制的结果; 晚期 S 状弯曲是由于新华夏构造应力场导致轴近水平的麻花状旋扭的结果; 还通过物理模拟和数字模拟验证了限制型及麻花型 S 状构造形成机制。值得注意的是, 通过铜官山 S 状背斜的综合构造解析可以扩大到整体下扬子台褶带的构造演化力学解析, 从而证明根据局部地区的构造综合解析才是认识区域大地构造运动方式、方向及其变化最直接、最可靠的证据。

关键词: S 状背斜; 构造综合解析; 限制型 S 状褶皱; 麻花状褶皱; 构造模拟; 构造地质。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1511-15

收稿日期: 2019-01-20

Structural Synthesis Analysis of S-Shaped Anticline in Tongguanshan

Li Dongxu¹, Tan Yi'an²

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100044, China

Abstract: In this paper, comprehensive structural analysis of the formation process and formation mechanism of the S-shaped anticline of Tongguanshan is carried out through systematical observation of folds, faults, joints and lineation. It is found that there have been three stages of structural deformation and two structures superimposed and compounded. The S-bend of the early NE-fold is due to the limitation of the EW-direction faults. Late S-shaped bending is the result of the near-horizontal twisting due to the Newcathaysian tectonic stress field. It also verifies the formation mechanics of restricted and twisted S-shaped structures by physical simulation and numerical simulation. It is worth noting that the structural synthesis analysis of the S-shaped anticline of Tongguanshan can be expanded to the geomechanics analysis of the formation and evolution of the whole Lower Yangtze platform fold belt, showing that the detailed structural synthesis analysis of the local typical structures is the scientific basis for studying the manner and direction of the movements.

Key words: S-shaped anticline; structural synthesis analysis; restricted S-shaped fold; twist-shaped fold; structural simulation; tectonics.

0 引言

长期以来在地质学的分支学科划分中, 一致将中小尺度的构造变形内容列为构造地质学 (structure geology), 而区域大地构造乃至全球构造的研

究称为大地构造学 (tectonics)。虽然大地构造学研究涉及领域较广, 具有较强的综合性, 但还是将其归入构造地质学一大类。由此可见, 无论从地层古生物学、沉积学、同位素年代学等方面研究大地构造; 还是从岩浆活动、地幔活动、地球化学、热力学等方面

研究大地构造;还是从地球物理、各种物理场(特别是磁场)等方面解析地壳结构构造;乃至从宇宙太空不同层次天体力场对地球影响方面研究,归根结底,这些不同方面的研究最终的落脚点还是要回答地壳表层的构造规律对人类生活产生的影响。这也许就是人们把大地构造或全球构造列入构造地质学范畴的理由。但是,在国内外诸多构造地质教科书和一些专著中(Billings, 1972; Hobbs *et al.*, 1976; Hancock, 1983; 杨森楠和杨巍然, 1985; Spencer, 1988; Ramsay and Huber, 1989; 朱志澄, 1999),很少见到讲述中小尺度的构造地质要素与宏观板块运动之间的联系。似乎构造地质学与大地构造学、地球动力学之间是互不相关的。对于构造运动方向与方式的判断,并不是从客观存在的中小型构造形迹的事实按照自身的力学原理推导出的结论,而是借助其他学科测试数据间接地推演论证,于是造成大地构造研究失去了最基础的构造要素根基,也是造成大地构造学一直是最有争议的学科的原因之一。

李四光先生建立的地质力学(geomechanics; 李四光, 1947, 1973)的最大特色,就是通过构造应力场理论建立构造体系,将同一时期的不同尺度、不同性质的各类构造形迹组成的强变形带(构造带)和弱应变域(地块)看作是一个具有成生联系(genetic relation)的整体,即所谓的构造体系(tectonic system)。也就是将小构造、显微构造和大构造乃至全球性构造看作是同一构造应力场的产物。据此才可以取得构造运动方式、方向的科学依据。

马杏垣教授编著的《解析构造学》(Analytical Tectonics; 马杏垣, 1983, 2004),曾指出:“所谓解析就是一种思维方法,就是把整体分解为部分,把复杂的事物分解为简单的要素加以研究的方法。解析的目的在于透过现象掌握本质”。“然而解析方法也有其局限性,必须把握客观构造本身的辩证法,把解析和综合统一起来”。

由此不难看出,两位前辈学者对于构造地质学的研究方法极为重视,都注意到个别构造形迹研究和整体构造综合的关系。细心比较他们的方法还是有所区别,《解析构造学》比较侧重于个体构造形迹的详细解析,而《地质力学》则比较侧重于构造形迹的群体的综合。如果我们把它们上升到科学方法论的高度考量,无非是对研究对象侧重于“还原论”还是“整体论”的思维方法的差别。如果我们将 2 个方面同时顾及到,既认真细致地观测局部构造要素几何学和力学特征,同时将其置入大区域构造背景,并

且把它们有机的综合集成起来进行解析,即可达到微观构造与宏观构造的统一(李政道, 2001),也就是钱学森先生所提倡的对于复杂系统要进行“从定性到定量的综合集成的方法”(钱学森, 2007)。采用这种工作方法必将让我们对复杂地质构造研究有更加全面、更加深刻的认知。这种工作方法可称为“构造综合集成解析法”,简称“构造综合解析”(Structural Synthesis Analysis; 李东旭, 2015; 李东旭和龙长兴, 2016)。

本文就是按这种思路对铜官山 S 状背斜进行的研究,文中资料取材于谭以安博士 1980 年的一篇硕士论文,鉴于此项研究是迄今为止采用构造综合解析方法研究褶皱构造最为翔实、全面、罕见的一个典型范例。虽然由于种种原因未能及时发表,但保留下来的构造资料及多种构造模拟成果,至今未失去其珍贵的科学价值。从方法学的角度看,这种研究方法非常符合马杏垣先生提倡的构造解析的工作思路,而且当时还得到马老师的赞赏。为此我们将此文推出,用以缅怀尊敬的恩师马杏垣先生。

1 铜官山复杂 S 状背斜区域构造背景

铜官山 S 状背斜位于下扬子台褶带中(杨森楠和杨巍然, 1985)。从图 1 中不难看出:走向 NE 的下

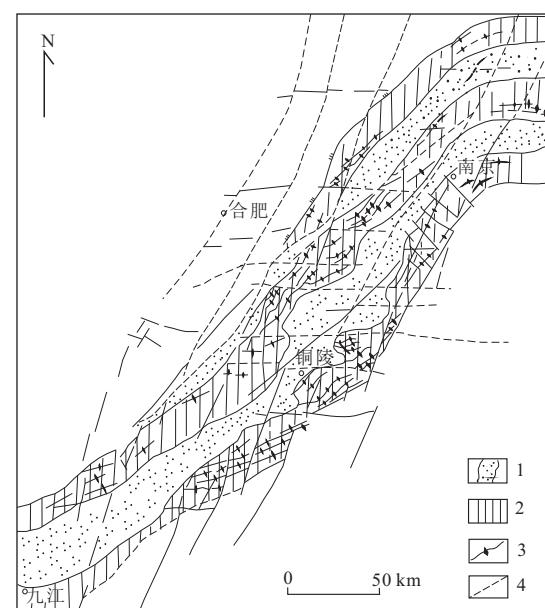


图 1 下扬子构造带简图

Fig.1 Sketch map of Lower Yangtze River tectonics

1.坳陷带;2.隆褶带;3.褶皱轴线;4.断裂

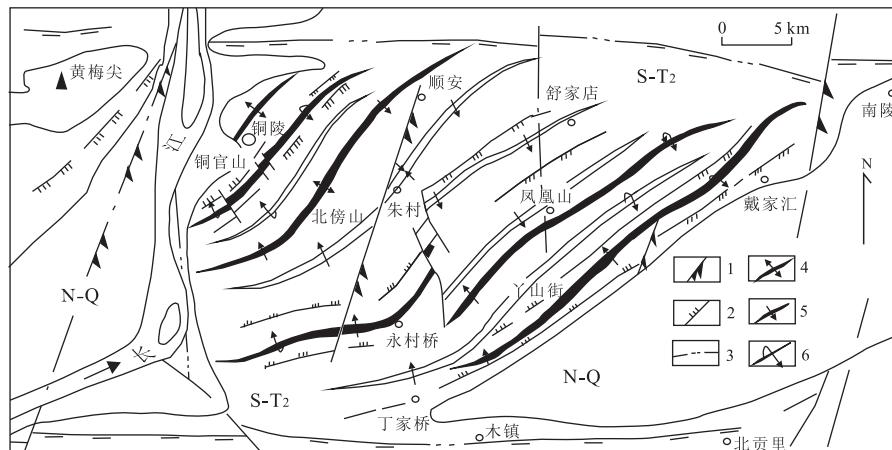


图2 铜陵地块中S状褶皱群

Fig.2 S-shaped folds within Tongling massif

1. 北北东向断裂; 2. 北东向断裂; 3. 东西向断裂; 4. 直立褶皱; 5. 歪斜褶皱; 6. 倒转褶皱

表1 铜陵地块中S状背斜的形态及产状

Table 1 Morphology and attitude of the S-shaped anticlines in Tongling massif

褶皱名称	褶皱轴面产状			褶皱形态		
	北段	中段	南段	北段	中段	南段
铜官山背斜	走向 NE45°, 倾向 SE, 倾角 72°	走向 NE30°, 倾向 SE, 倾角 72°	走向 NE65°, 倾向 NW, 倾角 60°	倒转	直立	倒转
背山背斜	走向 NE60°, 倾向 SE, 倾角 62°	走向 NE35°, 倾角 90°	走向 NE70°, 倾向 NW, 倾角 60°	斜歪	直立	斜歪
永村桥背斜	走向 NE70°, 倾向 SE, 倾角 72°	走向 NE50°, 倾角 90°	走向 NE85°, 倾向 NW, 倾角 60°	斜歪	直立	斜歪
仙水冲背斜	走向 NE65°, 倾向 SE, 倾角 82°	走向 NE40°, 倾角 90°	走向 NE65°, 倾向 NW, 倾角 82°	斜歪	直立	斜歪
丫山背斜	走向 NE60°, 倾向 SE, 倾角 62°	走向 NE50°, 倾角 90°	走向 NE75°, 倾向 NW, 倾角 40°	倒转	直立	倒转

扬子台褶带被NNE向及近EW向2组大断裂切割,构成菱形网状地块,表明本区至少有3组大型构造体系复合.EW向断裂隶属于区域性纬向构造体系,NNE向断裂隶属于新华夏构造体系,下扬子台褶带相当于淮阳山字型东翼与华夏系联合构造(李东旭,1980;李自堃,1985)。

铜陵地块位于南京—九江隆褶带中段.地块北部边界为铜陵—南陵EW向断裂带,南部边界为木镇—北贡里EW向断裂带;地块西部边界为NNE向沿江断裂带,东部边界为戴家汇NNE向断裂带.地块东西长约为58 km,南北宽约为30 km.卷入古生界—三叠系总厚度约为3 000 m.地块内部发育隔档式褶皱(ejective folds),约有5个向斜和5个背斜(图2,表1).铜官山背斜是位于该地块西部的一个规模最小的背斜构造.

2 S状背斜形态特征与力学性质变化

铜官山背斜(图3)呈NE-SW向延长约18 km.

背斜核部由志留纪、泥盆纪长石石英砂岩组成,两翼由石炭纪、二叠纪、三叠纪地层组成.石炭系—二叠系以厚层白云岩、灰岩为主,底部和顶部分别为薄层—中厚层砂岩、砂页岩、硅质岩.三叠系以薄层泥质灰岩为主.背斜中段有铜官山、马山、虎山等花岗闪长岩体侵入,也是驰名的铜矿赋存部位(李东旭等,1988;刘文灿和李东旭,1993).

据图3可知背斜北段宽约3 km,中段宽约5~6 km,南段宽约4 km.据图4中7条剖面各段波长(A)与波幅(λ)比值A/ λ 由北而南分别是:0.40、0.44、0.25、0.35、0.50、0.54、0.56(Ramsay, 1967; Ramsay and Huber, 1983).S状背斜的褶皱几何形态中段主体部位为同心褶曲,向南北两头弯转部位变为相似褶曲(图4);用赤平投影π圆法,求得背斜北段枢纽走向NE40°~NE50°,轴面倾向SE,倾角70°~72°;中段枢纽走向NE28°,轴面倾向SE,倾角85°;南段枢纽走向NE48°~NE60°;轴面倾向NW,倾角52°~70°.总体来看背斜轴面三维形态呈麻花状弯转(李东旭,1980;谭以安和李东旭,1987;李东旭和谭以安,1989).

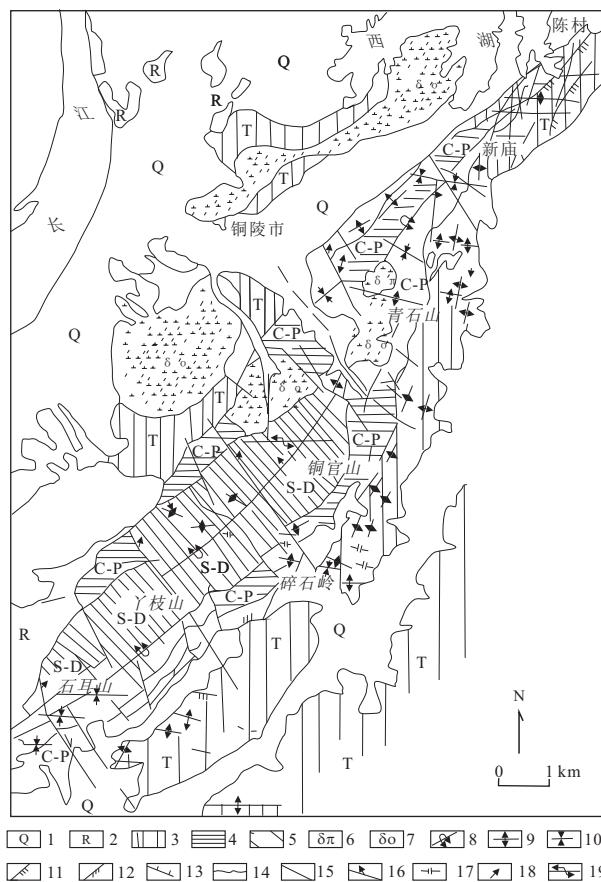


图 3 铜官山背斜地质图

Fig.3 Geological map of Tongguanshan anticline

1.第四系;2.第三系;3.三叠系;4.二叠系—石炭系;5.泥盆系—志留系;6.闪长斑岩;7.石英闪长岩;8.倒转背斜轴线;9.背斜轴线;10.向斜轴线;11.NE 向逆冲断层;12.斜冲断层;13.正断层;14.东西向冲断层;15.平推断层;16.撕裂断层;17.挤压带;18.NE 向小褶皱;19.膝状挠曲

就形成机制而言,通过 7 条横切背斜层间的牵引褶皱观测(图 5a,5b),发现背斜中段两翼的顺层牵引褶曲方向相反,一侧是 S 型,一侧为 Z 型,为典型弯滑机制,但是向南北两头弯转部位由于背斜倒转,两翼向一个方向倾斜,于是两翼的顺层牵引褶曲轴面倾向一致,结合层面擦线产状(图 5c,图 6),表明 S 状背斜北段向北西方向倒转;南段向南东倒转。褶皱弯滑机制逐渐变为弯流机制;就力学性质而言,可知中段属于压性结构面,两头弯转部位属压扭性结构面。

3 旋扭剪刀式断裂

在背斜两翼发育的逆冲—斜冲断裂与褶皱轴线大致平行,也略成 S 状,但靠近背斜中段压性特征明

显,两头显示压扭性。近垂直背斜轴线发育 4 条张性横断层,走向 NW 320° (图 7)。这组断裂有 2 次明显活动,早期张性角砾岩被晚期旋扭撕裂断层切断(谭以安和李东旭,1987)。过去称其为枢纽断层,作者称为剪刀式断层(scissor-type fault),即断层两盘沿一个支点发生剪刀式转动(图 8)。在背斜北段,断层向 NW 方向延伸,断距逐渐加大,相反方向断距减小,以致尖灭;在背斜南段,断层向 SE 方向断距逐渐加大,相反方向断距减小,乃至尖灭。断裂力学称其为撕开型断裂,其演化过程见图 8。从这种断层表现,不难看出整体背斜曾沿水平轴发生麻花状扭转。

4 EW 向叠加褶皱

从下扬子台褶皱带整体构造格局不难看出:走向 NE 的褶皱带被走向近 EW 的大型断裂切割(图 1),具体到铜陵地区内 NE 向的褶皱(图 2)也被 EW 向断裂所限制。但是,在详细观测铜官山背斜枢纽产状时,发现其呈波状起伏,构成舒缓的背向斜(图 9),它们的轴向都近于东西向,由此可以确定在前期 NE 走向的主背斜形成之后,曾有一期走向近 EW 的微弱褶皱发生。特别是将在后面介绍的旋扭叠加现象,更加证明这期构造变形的存在(李东旭和温长顺,1983;李东旭,2009)。此外,还有走向 EW 的叠瓦逆冲断层(图 10)和挤压破碎带(图 11)伴生,可为佐证。

5 旋扭构造叠加

在铜官山背斜中段北西翼二叠系龙潭组砂岩中,发现一个极为罕见、极为珍贵的旋扭构造现象(李东旭,1980,2003;谭以安和李东旭,1987),在南北长约 30 m 的斜坡见有 5 个连续的小背斜(图 12a,图 12b,表 2),它们一致向西稍偏北倾伏。有趣的是,这 5 个小背斜的枢纽形状各异,居中的③号小背斜的枢纽比较平直,产状是 $305^{\circ} \angle 24^{\circ}$;其北面的①②号小背斜的枢纽形状是向上凸出的弧形,②号背斜的枢纽产状是 $275^{\circ} \angle 20^{\circ} \sim 50^{\circ}$,呈向上突出的弧形;再向北①号小背斜的枢纽倾角变得更陡,为 $\angle 78^{\circ}$ 。而③号小背斜的南面④⑤号小背斜的枢纽是向下凹的弧形,④号小背斜枢纽产状是 $300^{\circ} \angle 50^{\circ} \sim 30^{\circ}$,呈向下凹的弧形;最南边⑤号小背斜产状是 $278^{\circ} \angle 46^{\circ}$,枢纽也略向下凹。这一奇异的现象给人的

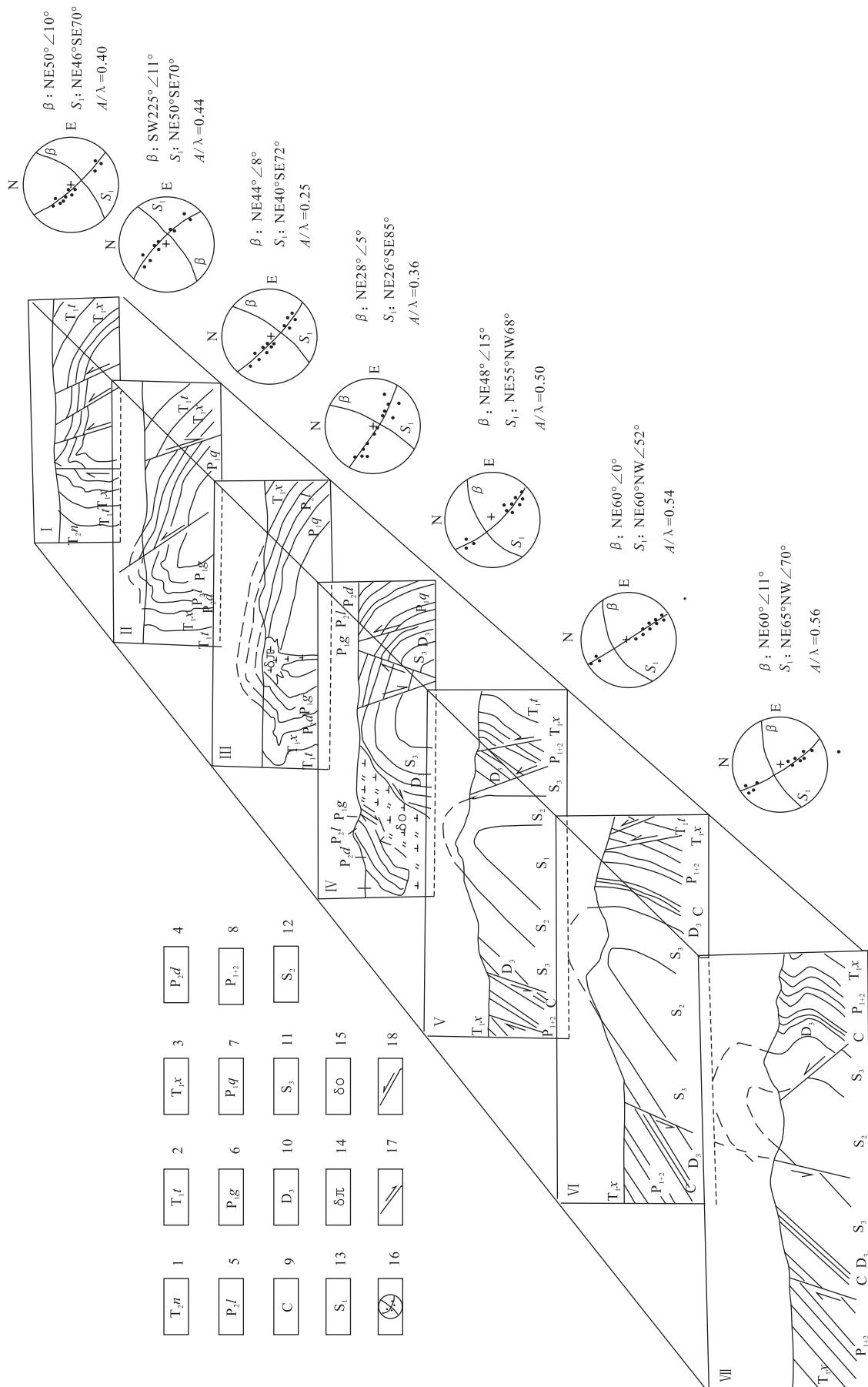


图4 铜官山S状背斜联合横剖面图及π圆图解数据

Fig. 4 United cross sections of the TGS S-shaped anticline and graphic solution date of π circle

1.三叠系南陵湖组;2.塔山组;3.小凉亭组;4.二叠系五通组;5.龙潭组;6.孤峰组;7.栖霞组;8.二叠系;9.石炭系;10.泥盆系五通组;11.茅山群;12.坟头组;13.高家边组;14.闪长斑岩;15.石英闪长斑岩;16.π圆(β :轴面∠;S₁:轴面产状;A/λ:波幅/波长);17.正断层;18.断层

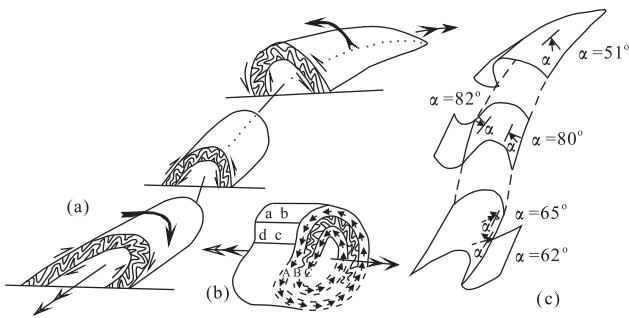


图 5 两翼层间同向牵引褶皱(a)、剪力流(b)和层面斜向擦线(c)

Fig.5 The same form drag folds plane in both limbs (a), shear flow (b) and oblique striation on the bending (c)

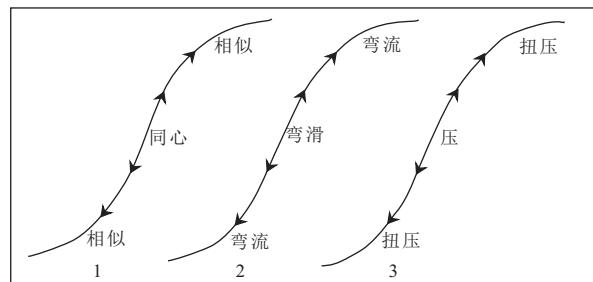


图 6 铜官山 S 背斜不同段落褶皱形态、形成机制及力学性质

Fig.6 Geometric shape, formation mechanism and mechanical properties of different sections of S-shaped anticline in TGS

直观感觉,就是这些向西偏北的小褶皱形成以后,又受到了沿着近水平轴扭转的结果。这个现象绝对是构造叠加复合理论中罕见实例。

半定量估算扭转量。若按该地段龙潭组地层平均倾角 60° 计算, 北端向左下扭转了 18° , $\phi = 78^\circ \sim 60^\circ$; 南端向右上扭转了 14° ($\phi = 60^\circ \sim 46^\circ$); 若以③号枢纽倾角 24° 视作未经扭动, 则北端反时针扭转了 54° ($\phi = 78^\circ \sim 24^\circ$); 南端顺时针扭转了 22° ($\phi = 46^\circ \sim 24^\circ$)。总扭转角 $\Sigma\phi = 54^\circ + 22^\circ = 76^\circ$ 。虽然这种估算不准确, 但结合前述各种扭动迹象, 确定这种扭转趋势是无疑的。

6 节理分期配套及构造应力场反演

根据剪切节理的共轭性、不同时期节理充填物及其相互切割关系等标志, 可将节理划分出不同期次; 然后将不同期次的共轭剪节理利用赤平投影网求出最大主应力(σ_1)、中间主应力(σ_2)和最小主应力(σ_3)方位; 在一个地区较均匀布置若干节理观测点, 分别将每一点同一时期的最大、最小主应力方位连线,

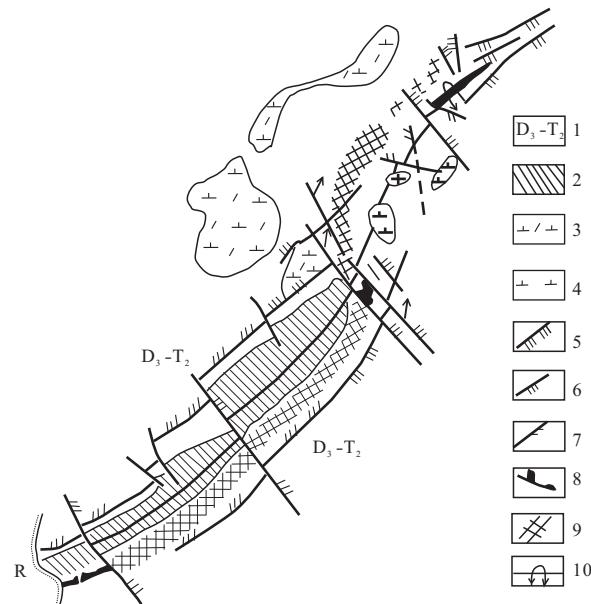


图 7 铜官山 S 状背斜伴生断层

Fig.7 Associated faults of Tongguanshan anticline

1.泥盆系—三叠系中统; 2.志留系; 3.石英闪长岩体; 5.压—压扭性断层; 6.张性断层; 7.扭性断层; 8.剪刀式断层; 9.断层密集度; 10.倒转背斜

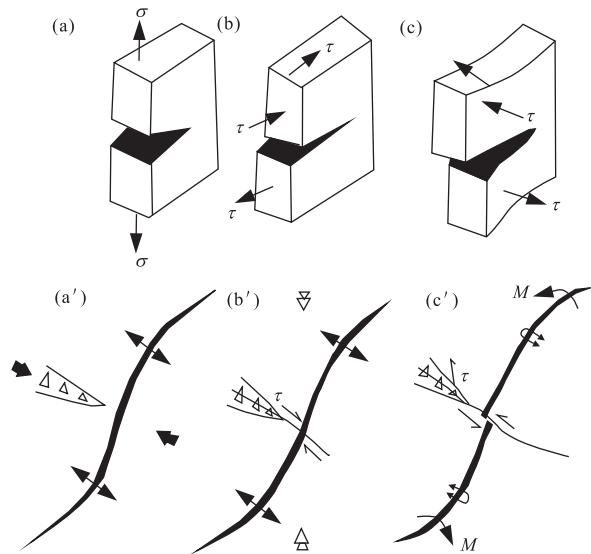


图 8 撕开型剪刀式断层生长演化过程示意

Fig.8 Tear-off scissor-type fault growth evolution process
a. 张开型; b. 滑开型; c. 撕开型

就可获得那个时期的构造应力轨迹图, 从而可以反演出不同时期古构造应力场(Gzovsky, 1975; 李东旭和周济元, 1986; 李东旭和谭以安, 1989)。

研究区面积约为 80 km^2 , 选择了 67 个观测点进行了节理分期、配套、测量、统计。解析结果发现铜官山背斜主要经过了 3 期不同构造应力场作用。

第 1 期为北东向构造期, 这期的共轭剪节理特

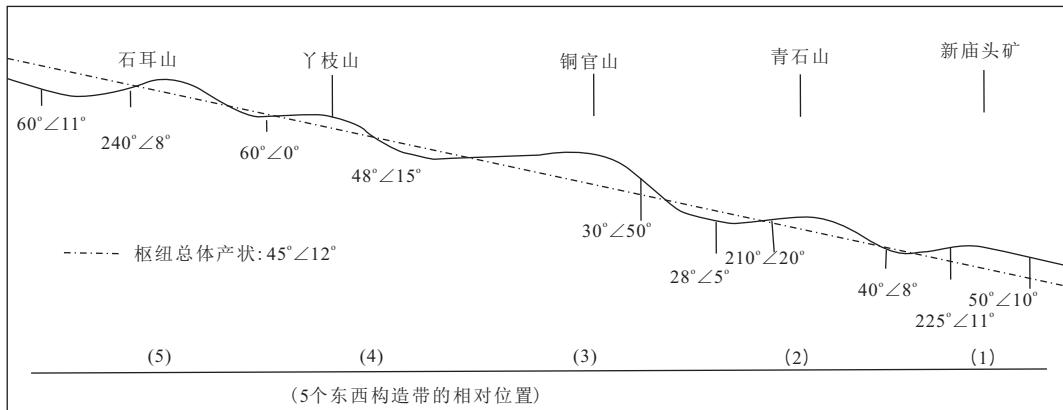


图9 铜官山背斜枢纽起伏示东西向褶皱叠加

Fig.9 The hinge of anticline is wavy and the axis in EW direction

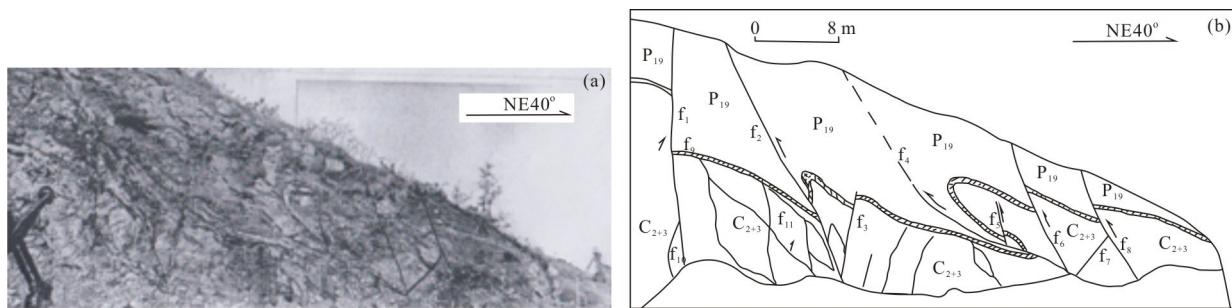


图10 灰岩采场走向EW的叠瓦状逆冲断层野外照片(a)和灰岩采场走向EW的叠瓦状逆冲断层素描图(b)

Fig.10 The photo of EW strike imbricate thrust (a) and the sketch of EW strike imbricate thrust (b)

C₂₊₃.黄龙、船山组灰岩;P₁₉g.栖霞灰岩;f₁,f₃,f₇.扭性断层 NW330°∠80°;f₂,f₄,f₅,f₆,f₈.压性断层;f₉.白色燧石层;f₁₀.黄铁矿、闪锌矿、方铅矿;f₁₁.透镜状构造

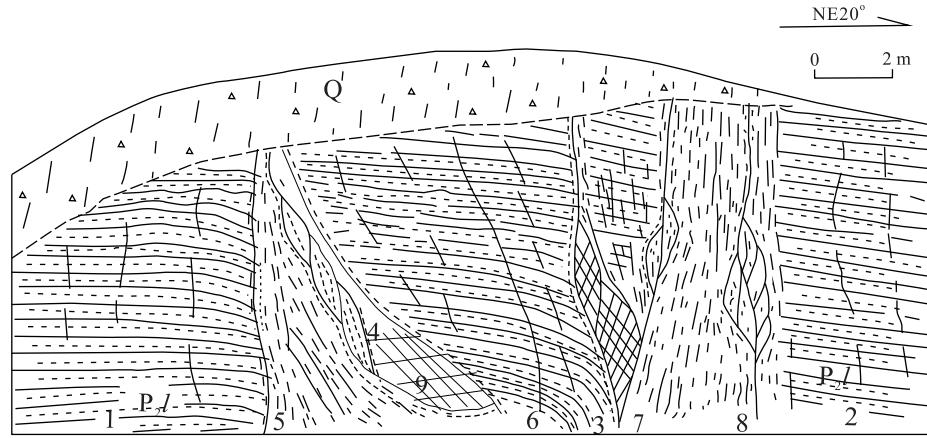


图11 碎石岭近EW向压性破碎带

Fig.11 EW strike pressure fracture zone

Q.第四系;P₂l.二叠系龙潭组;1~3.扭性断裂 NE45°∠85°;4~8.压性断裂 NWW280°∠85°;9.透镜状构造

点是裂隙较细密，在灰岩区充填有乳白色方解石脉，在砂岩中节理面上覆有硅铁质薄膜，共轭节理产状随S状背斜枢纽的弯曲而变化(图13a)。

背斜北段共轭节理产状：NW345°SW∠75°，NW295°NE∠78°；中段：NW330°SW∠72°，NW27°

NE∠75°；南段：NW340°SW∠80°，NW290°NE∠75°。据灰岩中19个点统计共轭角φ₁=66°，砂岩中共轭角φ₂=62°。鉴于本期是主要褶皱期，岩层的初始节理产状随着岩层的弯曲而变化，因此还要进一步通过赤平投影旋转展平操作，恢复初始应力场方

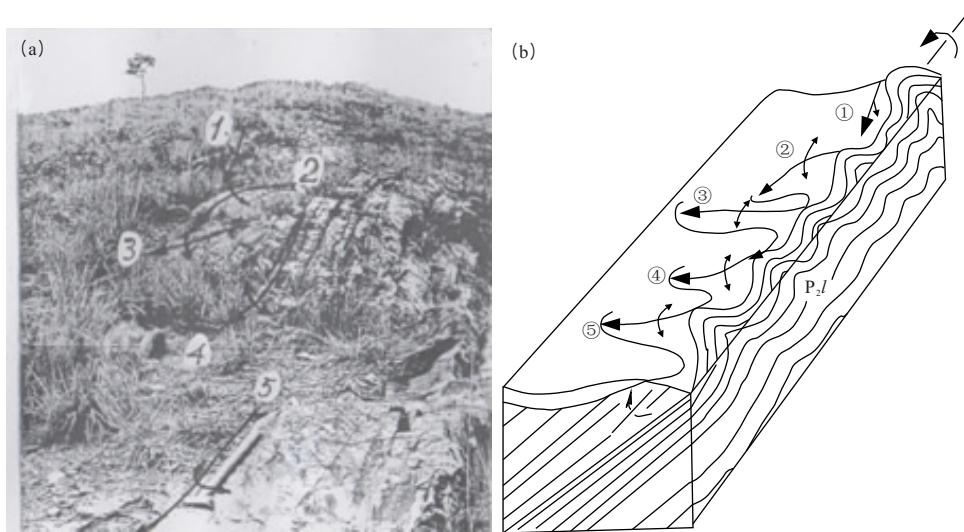


图 12 近 EW 向叠加小褶皱被轴近水平旋扭(a)和沿 NNE 向轴旋扭的近 EW 向小褶皱(b)

Fig.12 Nearly EW to the small folds (a) and nearly EW-trending small folds twisting along the axis of NNE (b)

①②③④⑤表示 5 个倾伏小褶皱(表 2)

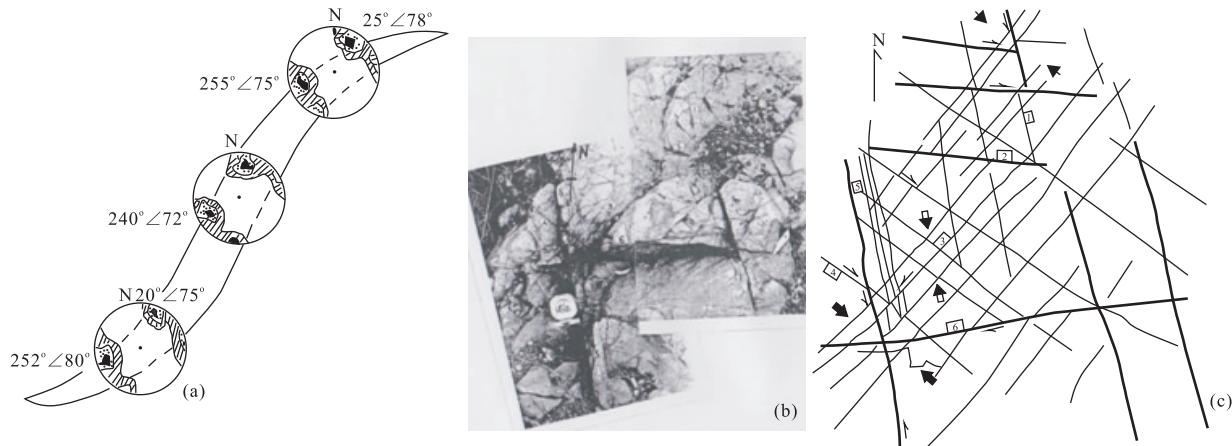


图 13 铜官山 S 状背斜共轭节理等密图(a)、石耳山节理分期配套照片(b)和石耳山节理分期配套素描图(c)

Fig.13 Conjugate shear joint density diagram of the Tongguanshan S-shaped anticline (a), the photo of joints division period division and matching (b) and the sketch of joints period and matching (c) in Shiershan

1.NW340°SW∠82°;2.NW295°NE∠82°;3.NE50°NW∠60°;4.NW320°NE∠82°;5.NW345°SW∠85°;6.NW273°SW∠84°

表 2 旋扭叠加小褶皱枢纽形状及产状

Table 2 Morphology and attitude of small fold hinge with rotating compound

编号	倾向(°)	倾角(°)	形态
①	302	78	向上凸
②	275	20~50	向上凸
③	305	24	较平直
④	300	30~50	向下凹
⑤	278	46	向下凹

位。从图 14 中可看出本期最大主应力(σ_1)轨迹大体呈 NE-SW 向,略有 S 状弯曲趋势。

第 2 期为 EW 向构造期,该期剪节理明显切割

早期节理,多充填铁质脉体;两组共轭剪节理产状分别是:右行剪切 NW330° SW∠72°;左行剪切 NE35° SE∠75°。共轭角平均值为 72°。图 15 中可明显看出最大主压应力为近 SN 向,最小主应力轴为东西向。

第 3 期为新华夏构造期,这期节理尺度明显加大,且清楚地切穿前两期节理(图 13b,13c)。在灰岩中的节理多充填黄色方解石脉及含矿细脉。两组节理产状分别是: NW340°~350° SW 或 NE∠70°~∠80°, NE75°~90° NW 或 SE∠65°。前者具张扭性特征,后者具压扭性特征。灰岩中 19 个点统计共轭角 $\varphi_1=84^\circ$,砂岩中 16 个点统计共轭角 $\varphi_2=91^\circ$ 。从图

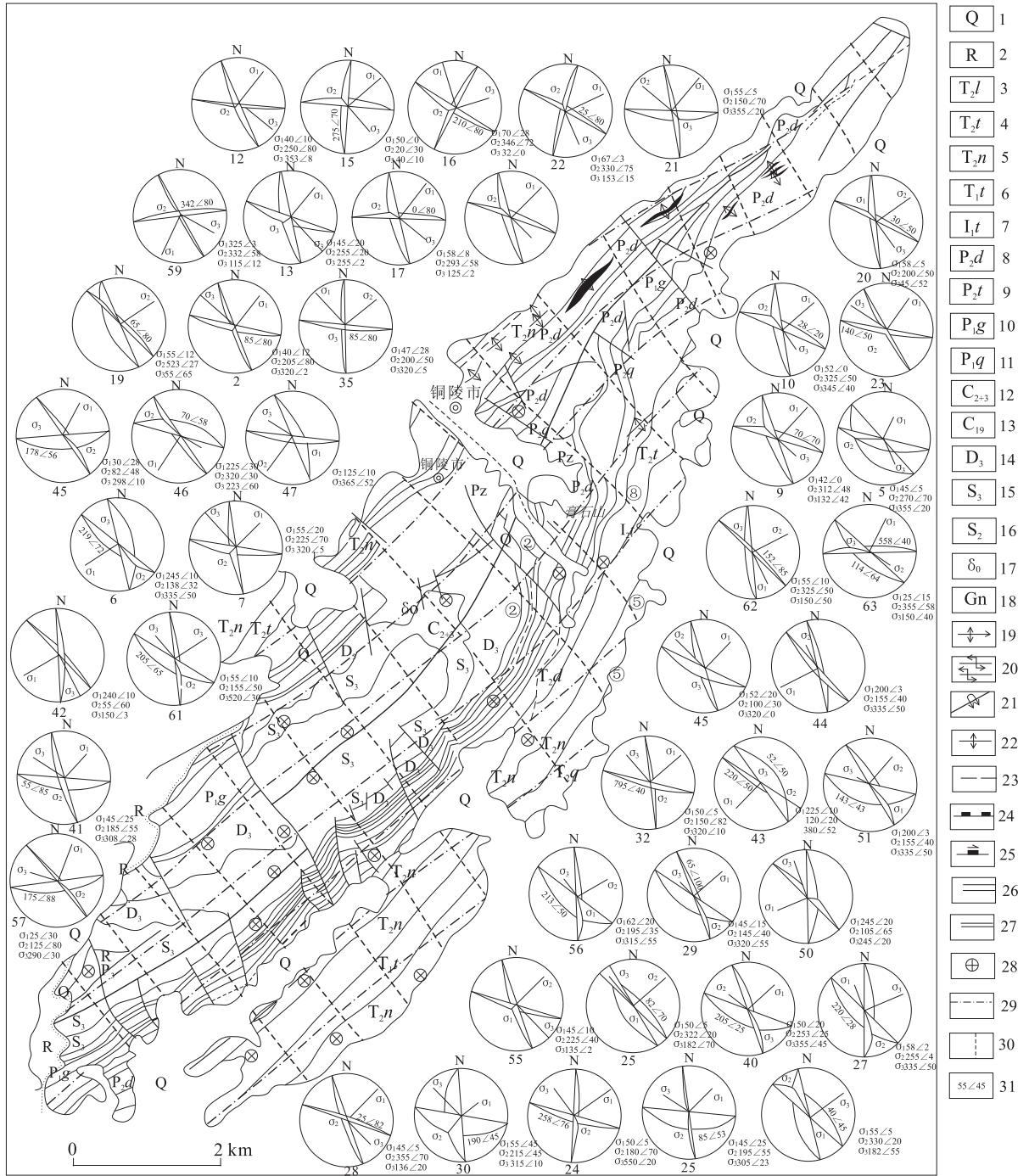


图 14 NE 向构造期主应力轨迹线

Fig.14 The map showing principal stress trajectories of NE tectonic period

1.第四系;2.第三系;3.中三叠统头山组;4.中三叠统分水岭组;5.中三叠统南陵湖组;6.下三叠统塔山组;7.下三叠统小凉亭组;8.上二叠统大隆组;9.上二叠统龙潭组;10.下二叠统孤峰组;11.下二叠统栖霞组;12.下石炭统黄龙船山组;13.泥盆系上统五油组;14.泥盆系上梵五通组;15.茅山群;16.坟头组;17.石英闪长岩;18.铁帽;19.倾伏背斜;20.背向形挠曲;21.倒转背斜;22.小背斜;23.压性,压扭性断层;24.张性断层;25.扭性断层;26.陡立及直立岩层带;27.劈理带;28.节理统计点;29.最大主应力(σ)连线;30.最小主应力(σ)迹线;31.产状(°)

16 可看出,最大主应力轴 σ_1 大体呈 NNE-SSW 向,略成 S 状弯曲;最小主应力轴 σ_3 呈 NWW-SEE 向。值得注意的是:本期(新华夏系)构造应力场的最大主应力轨迹与铜官山 S 状背斜枢纽并不一致。偏差

角度在北段为 35° 左右,中段为 10°~15°,南段为 35° 左右,这种偏差正是造成麻花状扭转叠加的动力。

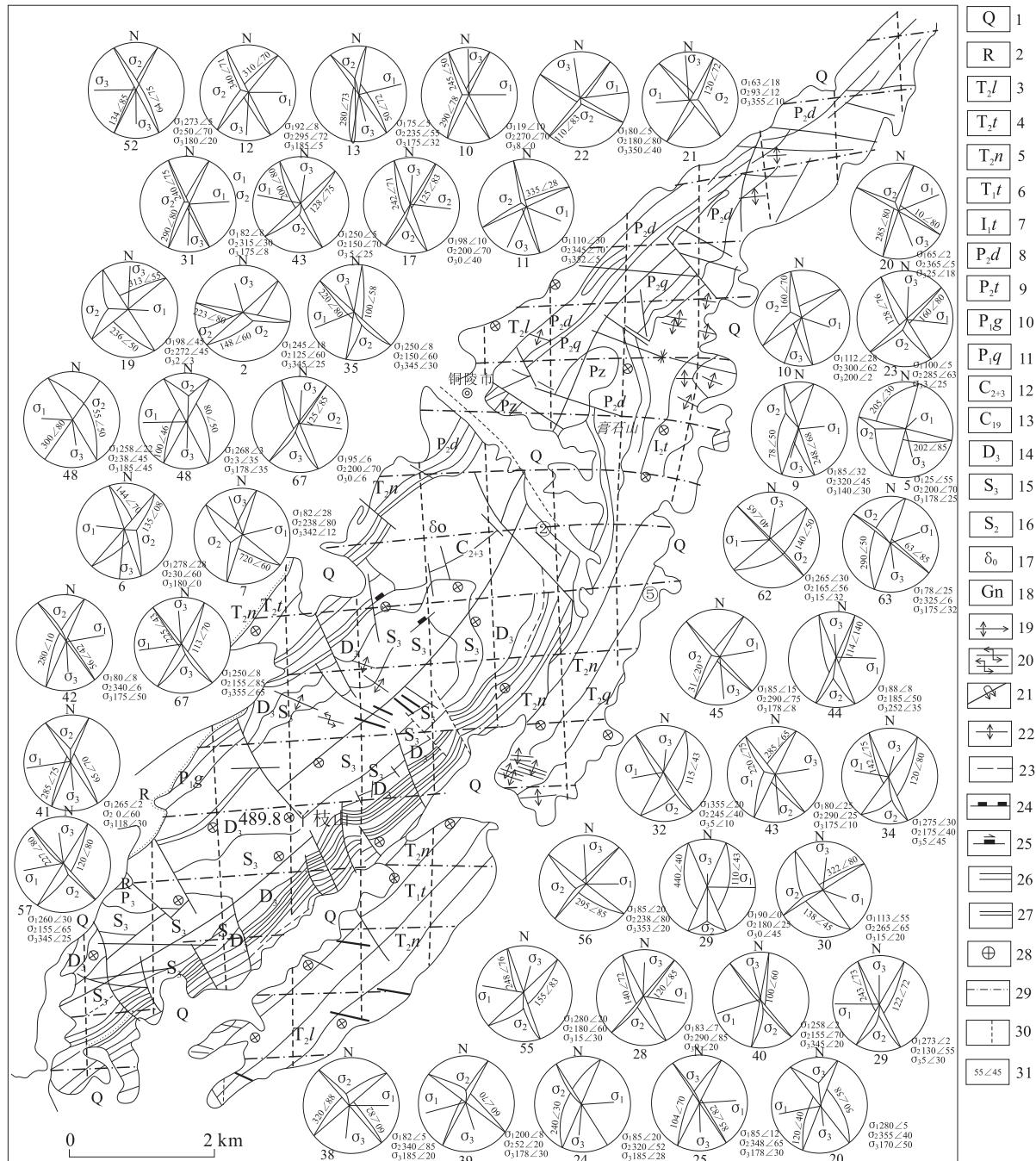


图 15 EW 向构造期主应力轨迹

Fig.15 The map showing principle stress trajectories of E-W tectonic period

1.第四系;2.第三系;3.中三叠统头山组;4.中三叠统分水岭组;5.中三叠统南陵湖组;6.下三叠统塔山组;7.下三叠统小凉亭组;8.上二叠统大隆组;9.上二叠统龙潭组;10.下二叠统孤峰组;11.下二叠统栖霞组;12.下石炭统黄龙船山组;13.泥盆系上统五油组;14.泥盆系上统五通组;15.茅山群;16.坟头组;17.石英闪长岩;18.铁帽;19.倾伏背斜;20.背向形挠曲;21.倒转背斜;22.小背斜;23.压性, 压扭性断层;24.张性断层;25.扭性断层;26.陡立及直立岩层带;27.劈理带;28.节理统计点;29.最大主应力(σ)连线;30.最小主应力(σ)迹线;31.产状($^{\circ}$)

7 构造模拟及力学解析

根据上述铜官山 S 状背斜构造观测和解析, 得知铜官山背斜呈 S 状主要是 2 种构造叠加复合作用的结果(李东旭, 1980; 李东旭和温长顺, 1983). 轴面

扭曲是 2 种机制或类型叠加的结果. 一种为限制型 S 状扭曲(李东旭和谭以安, 1989); 另一种为轴近水平的麻花状扭曲(李东旭和谭以安, 1989; 李东旭, 2003), 并采用递进变形方式分别进行了简要的物理模拟和数字模拟加以证明(Ramsay and Huber, 1989).

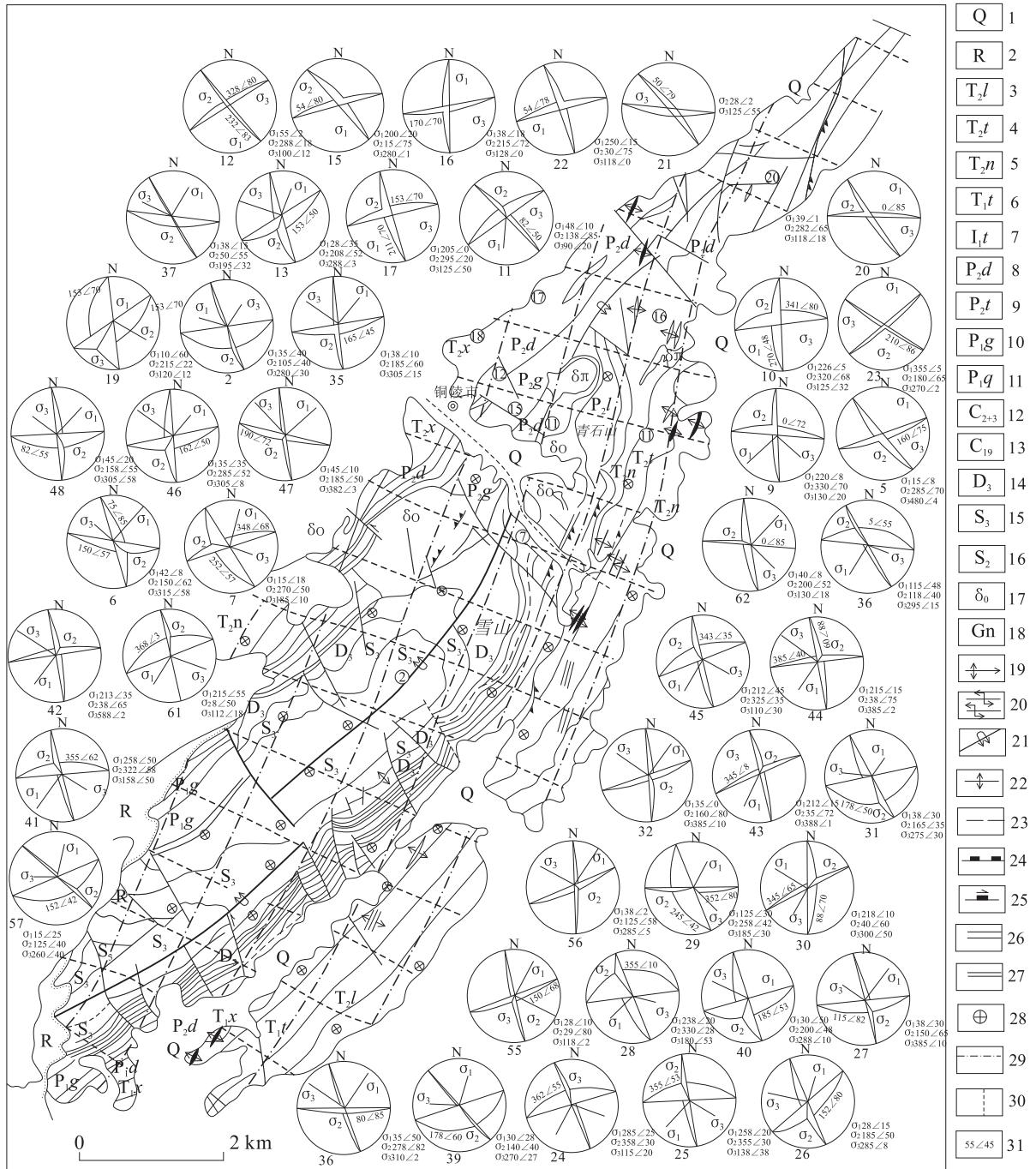


图 16 新华夏系主应力轨迹

Fig.16 The map showing principal stress trajectories of Neocathaysian

1.第四系;2.第三系;3.中三叠统头山组;4.中三叠统分水岭组;5.中三叠统南陵湖组;6.下三叠统塔山组;7.下三叠统小凉亭组;8.上二叠统大隆组;9.上二叠统龙潭组;10.下二叠统孤峰组;11.下二叠统栖霞组;12.下石炭统黄龙船山组;13.泥盆系上统五油组;14.泥盆系上统五通组;15.茅山群;16.坟头组;17.石英闪长岩;18.铁帽;19.倾伏背斜;20.背向形挠曲;21.倒转背斜;22.小背斜;23.压性,压扭性断层;24.张性断层;25.扭性断层;26.陡立及直立岩层带;27.劈理带;28.节理统计点;29.最大主应力(σ)连线;30.最小主应力(σ)迹线

7.1 限制型 S 状褶皱递进变形模拟

对于铜陵地块的限制扭曲作用进行了 2 种递进变形模拟实验 (Ramsay and Huber, 1989; 刘文灿等, 1996; 李东旭, 2003), 根据受力地块的边界形状及边界的作用方式 (图 17a), 制作长宽比为 56 : 30

的平行四边形活动框架, 平置于工作台。用滑石粉、黏土和水, 以 1 : 1 : 0.6 配比, 制成均匀泥料, 填满框架, 表面抹平, 同样模型制做 2 个。一个表面铺一张均质软纸, 另一个不铺纸, 但要印上 4 行 7 列应变圆圈。在模具左右两侧施加反时针力偶, 在模具的上

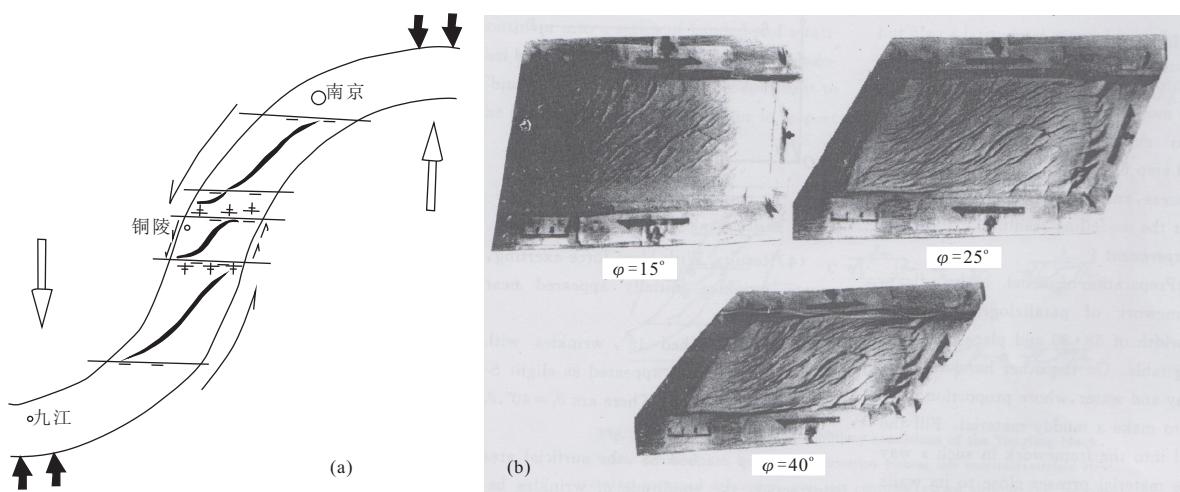


图 17 铜陵地块边界条件(a)和递进变形模拟(1)(b)

Fig.17 Boundary conditions of Tongling land mass (a) and model experiment of progressive deformation (1) (b)

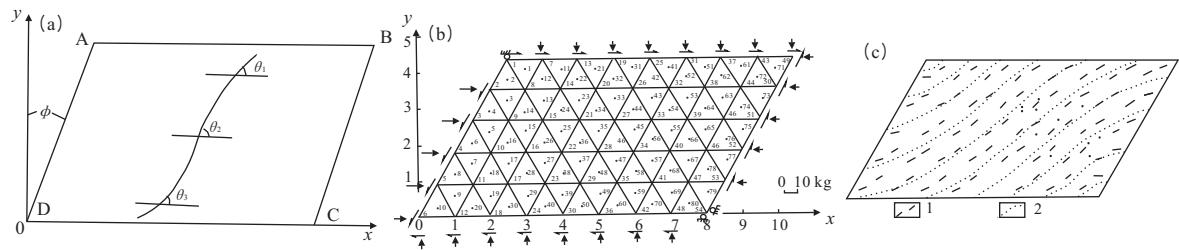


图 18 模拟边界条件及应变主轴线位变(a)、有限单元模型(b)和最大主应变速线(据有限单元法)(c)

Fig.18 Simulation of boundary conditions and geometrical parameters of fold axis changes (a), finite element model (b) and trajectory of maximum strain (by finite element method) (c)

图 c:1.最大主应变方向;2.最大主应变线

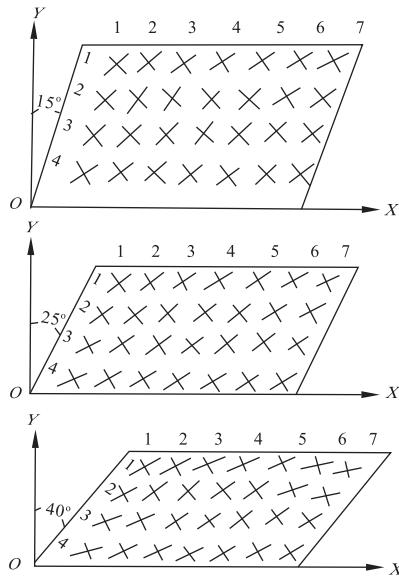


图 19 递进变形模拟(2)

Fig.19 Model experiment of progressive deformation (2)

下边框,则由于剪切互等原理,出现顺时针剪切作用,与此同时上下边框距离逐渐缩短,转变为边界压

力。于是随着左右逆时针方向剪切力逐步增大,铺纸的模型出现走向北东的皱纹在南北两端逐渐向相反方向弯曲的现象,最终形成 S 状皱纹(图 17b)。

另一个模型利用递进变形的应变圆长轴(σ_1)长度与方向变化验证(Ramsay and Huber, 1989),在南北扭动过程中,随着扭动角的偏转($0^\circ \sim 15^\circ \sim 25^\circ \sim 40^\circ$),主应变轴线北、中、南 3 段方位角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 发生不同变化,最终也构成 S 状弯转(图 18a, 图 19)。最后,还采用了有限单元数字模拟,获得同样结果(图 18b, 图 18c)。

7.2 麻花状构造旋扭模拟

从前述野外实地构造观测资料可知,铜官山 S 状背斜初始主体形态是同心褶曲,形似等厚层半圆筒状,扭转动力为新华夏系逆时针力偶作用。据此作者企图进行三维模拟探索(谭以安和李东旭,1987; 李东旭,2003)。限于当时计算机技术尚未发达至今日水平,只能用明胶制作圆筒,半边印上应变花(图 20a); 筒的北端逆时针旋转,南端顺时针旋转(图 20b)。扭转

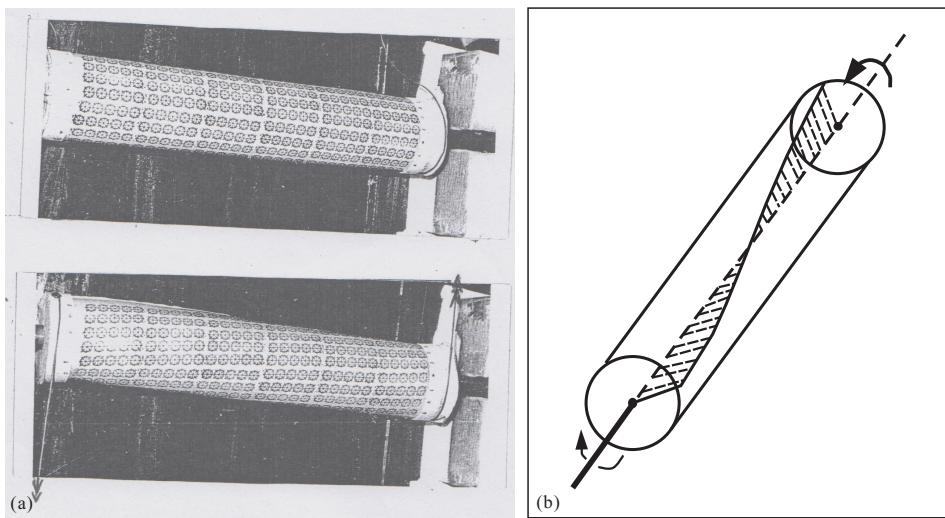


图 20 网格法扭转前后应变花(a)和扭转后轴面形态(b)

Fig.20 Strain flower grids before and after deformation (a) and axial surface shape after twisting (b)

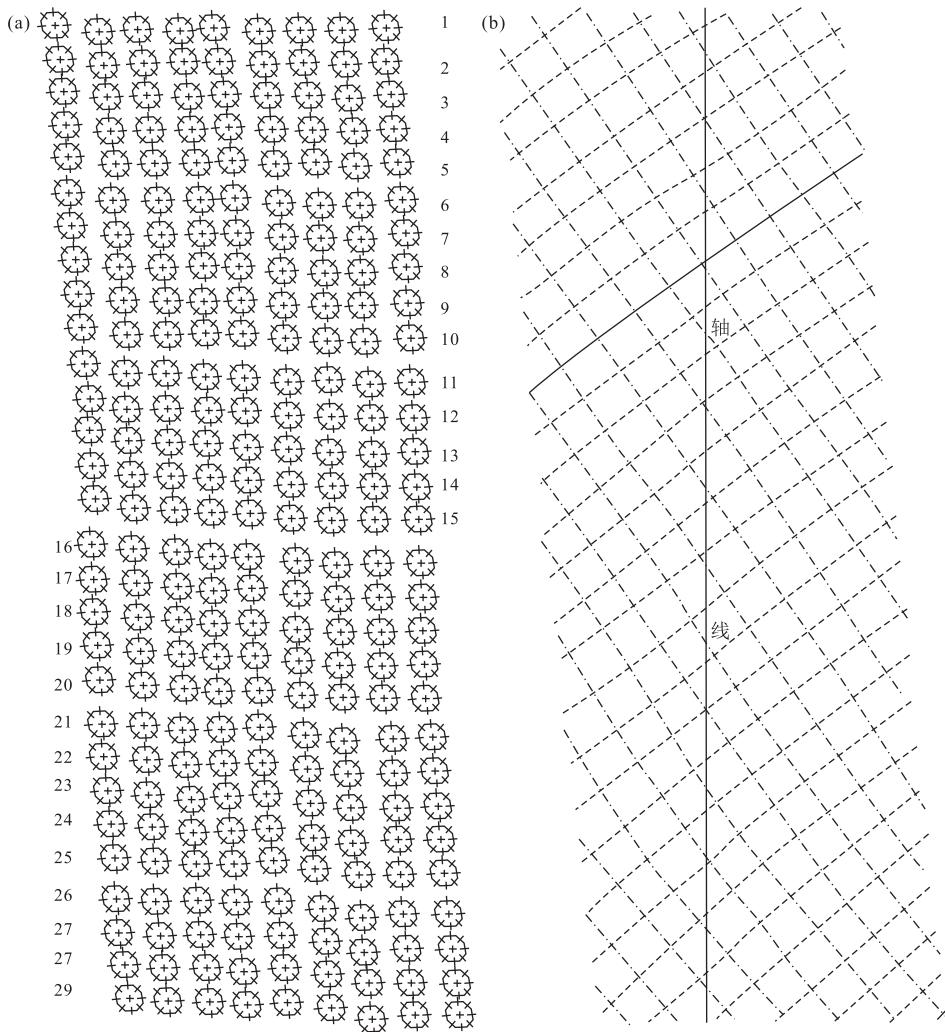


图 21 扭转变形后的展平(a)和展平后的主应力迹线(b)

Fig.21 Main stress traces after flattening (a) and flattening after twisting deformation (b)

后,每个应变花形状都有微弱变化,用读数显微镜细心地测出数据(图 21a),将最大(σ_1)、最小(σ_3)应力变化值连线,作出主应力轨迹线图(图 21b).结果主应变线略呈 S 状,轴面形态与背斜轴面相似;背斜各段最大、最小主应力方位与新华夏系构造应力场主应力方位皆有 $10^\circ \pm$ 误差.虽然模拟结果不理想,但对后来的研究仍有参考价值.

8 结论

这项研究的突出科学价值有下列 3 点:(1)通过 7 条横剖面的仔细观测、大量节理测试数据的处理、多种模拟实验方法探索,充分论证了铜官山 S 状背斜构造的变形过程及其形成机理.时至今日,在国内外构造文献中很少见到对一个背斜构造进行如此详尽的系统研究.限于篇幅文中删减了大量构造素描图.(2)“见微而知著”,通过铜官山 S 状背斜叠加复合精细解析,可扩大到下扬子台褶带整体构造格局的解析,甚至对我国东部所有的北东走向的 S 状褶皱型式的认识都有参考价值.从而说明通过中小尺度构造研究建立起的构造模式可为分析大区域构造规律提供科学依据.(3)此项研究还为地质力学建立限制型 S 状构造型式和麻花状 S 状构造型式提供了可靠论据.特别是发现的精彩的旋扭构造叠加现象极为可贵.它之所以难得,是因为这个现象可以无可辩驳地让人们直观见到麻花旋扭构造现象;从而在构造叠加复合理论系统中增添了旋扭构造复合的新类型.

致谢:本文之所以能发表,承蒙索书田教授、胡道功研究员、叶宝莹副教授从不同方面的大力协助,在此表示衷心感谢!

References

- Billings, M. P., 1972. Structural Geology. Prentice-Hall International, Inc., London.
- Gzovsky, M. V., 1975. Bases of Tectonophysics. Institute of Physics of the Earth, Moscow, 81—102.
- Hancock, P. L., 1983. Foundations of Structural Geology. *Journal of Structural Geology*, 5(2): 221. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90047-0](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90047-0)
- Hobbs, B. E., Means, W. D., Williams, P. E., 1976. An Outline of Structural Geology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Lee, J. S., 1947. The Basis and Method of Geomechanics. Zhonghua Book Company, Beijing (in Chinese).
- Lee, J. S., 1973. Introduction to Geomechanics. Science Press, Beijing, 13—120 (in Chinese).
- Li, D. X., 1980. On S-Shaped Structure. *Proceedings of Structural Geology*, (1): 111—124 (in Chinese).
- Li, D. X., 2003. Dynamics of Rotation-Shear Structures: Theory, Method and Application. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, D. X., 2009. System Classification and System Analysis of Compounding of Structures. In: Commemorating Li Siguan's 120th Birthday Conference Proceedings. Institute of Geomechanics, Beijing, 109—112 (in Chinese).
- Li, D. X., 2015. Synthetical Analyses of the Formation and Deformation of the Beiling Syncline in Fangshan, Beijing. *Geoscience*, 29(3): 481—493 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. X., Deng, Z. L., Lei, S. H., 1988. Control of Ore Deposits by Compounding of Structures and Neocathaysian Structural System in Tongguanshan. Collected Works of Geomechanics (7). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, D. X., Long, C. X., 2016. J. S. Lee: Earth System Science Pioneer. *Journal of Geomechanics*, 22(4): 1062—1066 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. X., Tan, Y. A., 1989. S-Shaped Structures of Restrictive Type & Its Simulating Experiment—Taking the Tongling Area as an Example. *Geoscience*, 3(3): 309—318 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. X., Wen, C. S., 1983. System Analysis of Compounding of Structures. *Earth Science*, (3): 33—42 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. X., Zhou, J. Y., 1986. Textbook to Geomechanics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, Z. D., 2001. New Century: The Unification of Micro and Macro. *Science News Weekly*, (12): 1 (in Chinese).
- Li, Z. K., 1985. Introduction of Major Tectonic Systems in Anhui Province. Geological Publishing House, Beijing, 169—190 (in Chinese).
- Liu, W. C., Li, D. X., 1993. The Deformation Characteristics of Folding Structures and Their Interfering Depths in the Tongling Area of Anhui. *Geology of Anhui*, 3(4): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W. C., Li, D. X., Gao, D. Z., 1996. Analysis of the Time Sequence of Compounding of Structural Deformation Systems and the Resulting Effects in Tongling Area. *Journal of Geomechanics*, 2(1): 42—48 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. Y., 1983. On Analytical Tectonics. *Earth Science*, (3): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. Y., 2004. Analytical Tectonics. Geological Publishing House, Beijing, 10—18 (in Chinese).
- Qian, X. S., 2007. Building Systems Science. Shanghai Jiaotong

- University Press, Shanghai (in Chinese).
- Ramsay, J. G., 1967. Folding and Fracturing of Rocks. McGraw-Hill Book Company, New York, 391—429, 519—553.
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., 1983. The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 1: Strain Analysis. Academic Press, Cambridge, 96—112, 135—179.
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., 1989. The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 2: Folds and Fracture. Academic Press, Cambridge, 27—31.
- Spencer, E. W., 1988. Introduction to the Structure of the Earth (Third Edition). McGraw-Hill Book Company, New York,
- Tan, Y. A., Li, D. X., 1987. Twisted S-Type Folds and Its Model Experiment with the Tongguanshan Anticline as an Example. *Geoscience*, 11(1): 114—122 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. N., Yang, W. R., 1985. China Regional Geotectonics. Geological Publishing House, Beijing, 106 (in Chinese).
- Zhu, Z. C., 1990. Structural Geology. China University of Geosciences Press, Wuhan, 81—126, 128—141 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 李四光, 1947. 地质力学之基础与方法. 北京: 中华书局.
- 李四光, 1973. 地质力学概论. 北京: 科学出版社.
- 李东旭, 1980. 论S状构造. 构造地质论丛, (1): 111—124.
- 李东旭, 2003. 旋扭构造动力学——理论、方法及应用. 北京: 地质出版社.
- 李东旭, 2009. 构造复合系统分类及系统解析. 见: 纪念李四光诞辰120周年会议论文摘要集. 北京: 地质力学研究所, 109—112.
- 李东旭, 2015. 北京房山北岭向斜形成与形变综合解析. 现代地质, 29(3): 481—493.
- 李东旭, 邓兆伦, 雷世和, 1988. 铜官山矿田构造复合及新华夏系控矿意义. 地质力学文集(七). 北京: 地质出版社.
- 李东旭, 龙长兴, 2016. 地球系统科学的先驱——李四光. 地质力学学报, 22(4): 1062—1066.
- 李东旭, 谭以安, 1989. 限制型S状构造及其模拟: 以铜陵地区为例. 现代地质, 3(3): 309—318.
- 李东旭, 温长顺, 1983. 构造复合系统分析. 地球科学, (3): 33—42.
- 李东旭, 周济元, 1986. 地质力学导论. 北京: 地质出版社.
- 李政道, 2001. 新世纪: 微观与宏观的统一. 科学新闻, (12): 1.
- 李自堃, 1985. 安徽省主要构造体系概论. 北京: 地质出版社, 169—190.
- 刘文灿, 李东旭, 1993. 安徽铜陵地区褶皱变形特征及其影响深度探讨. 安徽地质, 3(4): 1—9.
- 刘文灿, 李东旭, 高德臻, 1996. 铜陵地区构造变形系统复合时序及复合效应分析. 地质力学学报, 2(1): 42—48.
- 马杏垣, 1983. 解析构造学刍议. 地球科学, (3): 1—9.
- 马杏垣, 2004. 解析构造学. 北京: 地质出版社, 10—18.
- 钱学森, 2007. 创建系统学. 上海: 上海交通大学出版社.
- 谭以安, 李东旭, 1987. 麻花状S型褶皱及其模拟实验: 以铜官山背斜为例. 现代地质, 1(1): 114—122.
- 杨森楠, 杨巍然, 1985. 中国区域大地构造学. 北京: 地质出版社, 106.
- 朱志澄, 1999. 构造地质学. 武汉: 中国地质大学出版社, 81—126, 128—141.