



构造译文集

(六)

9874

212

地质矿产部地质力学所情报网

一九八七年二月

编 者 的 话

古构造应力场的研究越来越受到人们的重视，本集主要收集了一些根据水平缝合线研究古应力场的文章，以供感兴趣的同志参考借鉴。文集中插图除最后一篇外，均由尚玲同志绘制，在此表示感谢。

目 录

一、从显微构造分析中生代以来地中海周围的古应力场及其与板 块构造资料对比.....	(1)
二、根据新生代构造方位推测突尼斯和利比亚的古应力场与现今应力场.....	(15)
三、水平缝合线所显示的裂谷作用早期阶段的应力状态.....	(23)
四、砂岩中残余应力效应的研究.....	(26)
五、模拟平移断裂上褶皱的模型.....	(38)

从显微构造分析中生代以来地中海周围的 古应力场及其与板块构造资料对比

J. 莱图泽 和 P. 特赫莫利赫等

摘 要

本方法主要建立在沉积岩中显微构造——构造缝合线、张节理、剪切面和断层等——测量的基础上。通过对土耳其、以色列、约旦、突尼斯、阿尔及利亚、摩洛哥、西班牙、法国、英格兰南部、意大利南部和西西里岛等地中生代和第三纪的不同的地层的几千次测量，给出了局部的和区域的构造挤压事件的方位，相对年代和年龄。这些资料同每一地区的构造演化进行了对比。

在欧-非-阿拉伯碰撞带，根据挤压事件推断了晚白垩世以来构造演化概况，为地中海地区建立板块构造演化模式和研究大陆碰撞提供了新的基础。

引 言

通过现场应力测量和地震断层面解，人们已认识到地中海周围地区现今的挤压应力场及其方位。为了确定古应力场，业已采用了各种各样的方法，如从板块构造的再造推导出模式；褶皱或断裂地区的经典构造研究以及变质岩中的显微构造分析等。构造应力场的研究过去主要集中在阿尔卑斯褶皱带。最近，显微构造分析已经扩展到了沉积岩。研究证明，在远离山脉数千公里沉积盆地的岩石中也记录下古应力场。

法国石油研究所的地质学家和物理学家在这一领域研究了多年，他们运用数学模拟，检验了构造分析的各种方法和构造参数。在同一时期，还就地中海的地质与地球物理的综合性研究进行了尝试。作为构造分析的一种有效方法显微构造测量进展很快，从而带来了新的一类构造资料，特别是在地中海和阿尔卑斯的大陆碰撞带。

过去曾在土耳其、以色列、西西里、法国等地进行过这方面研究，现在在约旦、意大利南部、摩洛哥、西班牙和葡萄牙正在进行中，它们将于今后几年中完成。因而，我们在这里提供的资料不是最终的，结论仅是初步的。

方 法

通过野外岩石变形研究，我们力图确定局部缩短和区域性缩短的方位，时代以及年龄。我们所确定的局部缩短平行于局部的最大压应力方位。这些缩短是由挤压构造事件造成的结果，其方位提供了一幅很好的古应力场图象。在沉积岩中主要测量岩层的走向和倾向，构造缝合线轴，平移断层、正断层和逆断层的擦面以及张节理等（图1）。

与其他方法不同，我们只测量两个块体的位移能够准确确定的剪切面。这是了解究竟存

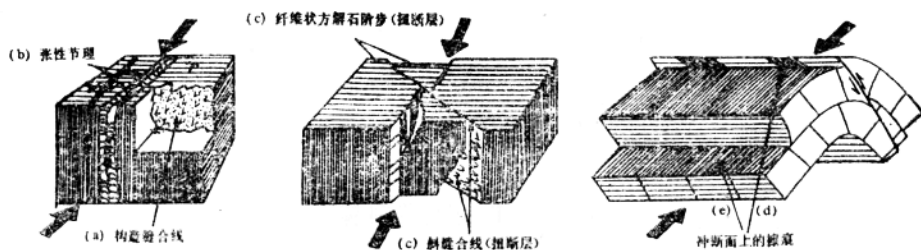


图 1 显微构造要素

a)缝合线轴，垂直于缝合面；b)平行张节理系，方解石晶体垂直于节理面；c)右旋和左旋走滑断层；d)正断层或逆断层；e)强岩层的滑动。在剪切面上，只有当斜缝合线或纤维状方解石台阶给出运动方向时，我们方进行测量。在一个地方所测得的全部数据都投在吴氏网上并以“局部缩短”这一术语来说明。当所有的显微构造要素在确定缩短方向方面达到一致时，我们即利用走滑断层来确定应力场的精确界限(参看图2至图5)。

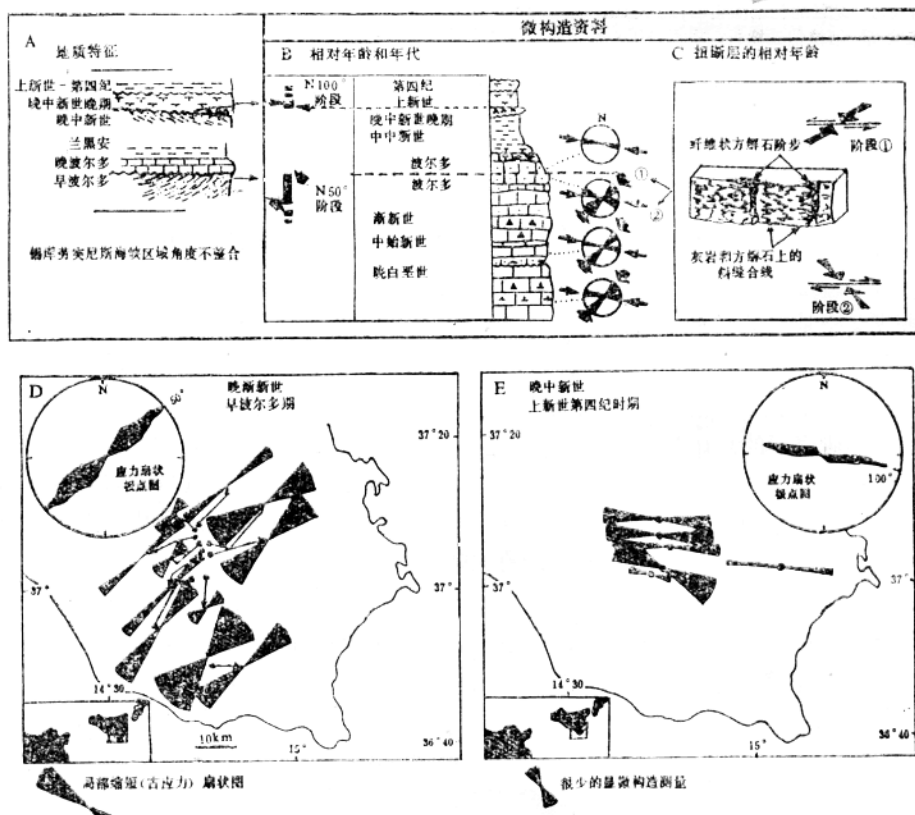


图 2 区域缩短时期确定—以西西里南部为例

四项独立的准则被用来确定缩短期之间的相对年代：1.当两个显微构造要素叠加于同一个平面上，有时有可能确定相对年代(如图2C)；2.当对不同时代的岩石进行测量，最新岩石中未见某些区域缩短的方向。这样我们就有了确定相对年代的另一种要素，便能对一个区域缩短期结束的时代作出更接近的估计；3.野外调查结果表明，除了临近高潮，古应力的方向是比较稳定的或者是连续变化的(2D—2E)，因而一般有可能把一个点上测出的局部缩短方向同时代已经完全确定的相邻点联系起来；4.每一期高潮时代是由地质结构(图2A)；褶皱，不整合等所决定的。在有利条件下，有可能测定区域缩短期之间的方位和年代及高潮与应力释放的时代，但要了解每一期的开始年代和持续的时间是相当困难的。

在一期或几期缩短的唯一方法，如果有几期缩短，我们就能够给出这些缩短的方向。通过不同年代岩石的测量，我们便可确定每一期的年代（图2）。野外观察与数学模拟表明，压力的方向一方面取决于地质体的性质和几何形态，一方面取决于它的非均质性和不连续性，特别是有大的断裂的存在。沿着这些断裂，我们要一一记下了应力的重新定向情况。因而，为了准确地确定局部应力场，我们选择一个小的岩石范围（如采石场）并在远离大断裂的一个平静构造带内进行研究。在每一地区，我们都尽量在多个点上测量，先是对同一年龄的岩石，然后是对不同年龄的岩石。

通过对相同岩层的测量，我们获得了化石区域应力场和最终的局部的或区域的重新定向；而通过不同岩层的测量，则可获得应力场在地质历史上的演化。

尽管这一方法在用于缩短（或挤压）的研究方面卓有成效，但它并不适用于张性阶段运动的研究。首先，在岩层受挤压变形弯曲时，我们能够看到，譬如背斜顶部的局部拉张；其次，在受到张力作用的不连续地质体中，我们所能测量的唯一显微构造要素是正断层。每一地块的各个界面都有自己的倾向滑动分量，要依据“区域拉伸阶段”的方位来说明它们是困难的。在本文中我们仅对区域性缩短方面运用“构造幕”这一术语，这种区域性缩短已为显微构造要素所证明并被认为是挤压作用的结果。

区域资料

在各不同地区，测定的值基本上是出露于地表的岩石的年龄和性质的一个函数。在每一

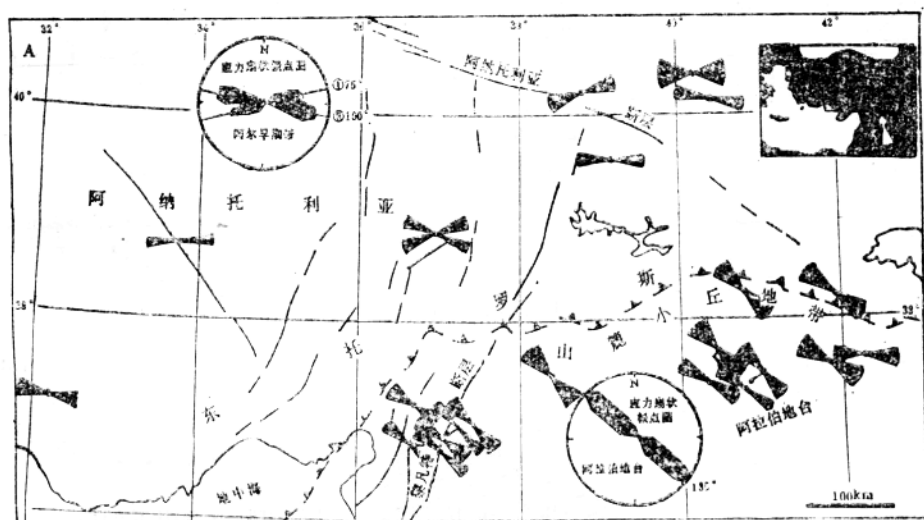


图3 土耳其东部的缩短期及古应力方位

图3A 晚白垩世

该时期的缩短影响到整个较老的岩层，直到晚美斯特里希特期甚至部分的古新世岩石，这与由美斯特里希特蛇绿岩推覆体所证实的特提斯的闭合以及阿拉伯地台以北的大陆碰撞带相符合（图9A）。构造高潮是在美斯特里希特期（K₂），而缩短作用则持续到蛇绿岩推覆体逆冲之后。有关阿尔卑斯带的少量资料说明，该带初期为N075°方向，而后转为N100°。这些方向截然不同于阿拉伯北部的平均方向N135°，如果它们被进一步证实的话。这可能与应力方位的变化相当，而应力方位的变化是由于安纳托利亚小板块在碰撞期间发生挤入作用或左旋转动所引起的。

区域性缩短期及各期之间，变形带不是一致的，且不总是位于同一地点。因而，即使有几个区域缩短期作用于一个地区，测量通常也只表示一个局部的缩短阶段。图3到图7所示的是一些区域资料，图9是对主要成果和结论的一个综合性反映。

土耳其东部，阿拉伯地台北部（图3）

研究区被划分为若干不同的构造单元，涉及的岩层从白垩纪到晚中新世，我们从大约115个地点测量了2000个以上的显微构造数据。

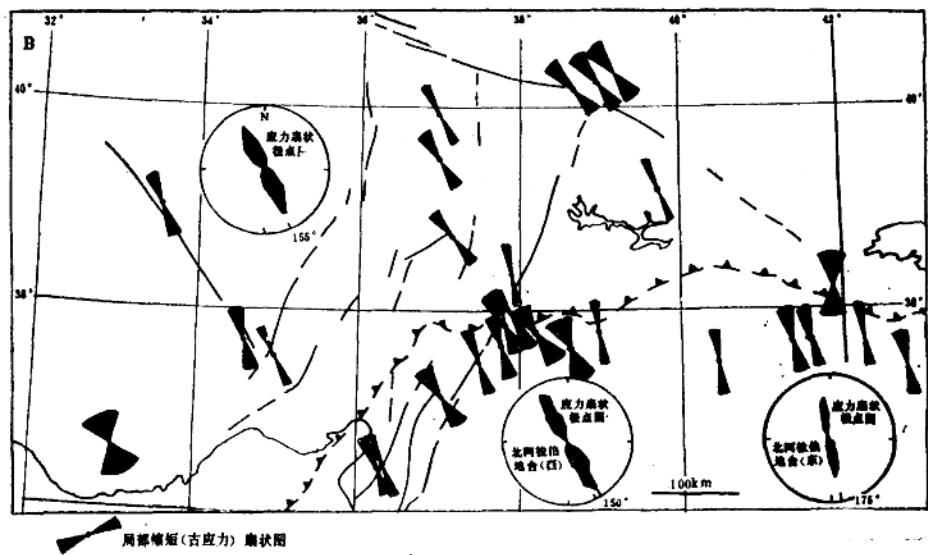


图 3B 晚始新世—早渐新世

第二期缩短在时代上发生在中渐新世以前，其高潮期可能与本都山，托罗斯山和塞浦路斯北部山脉的晚始新世到早渐新世的构造事件相当。在阿拉伯北部地台的西界与东界，应力方位同三维数学模型相比有 20° 的变化，这可能主要是由于阿拉伯板块的北部边界的形态及方位所决定的。板块的几何形态还影响到下一期的应力方位。

以色列（图4）

测量主要在白垩纪和早-中始新世的石灰岩中进行，测量地点17处，搜集到大约450个数据。

约旦

在约旦，一NW—SE向缩短影响到晚白垩世的岩石，以色列测量点附近的情况表明，这一缩短与以色列所记录到的第一个缩短期吻合。（图4）。

实尼斯（图5）

我们在中白垩世到早中新世的岩石中搜集了大约600个显微构造测量数据，并对晚白垩世以来的三个主要构造期进行了研究。

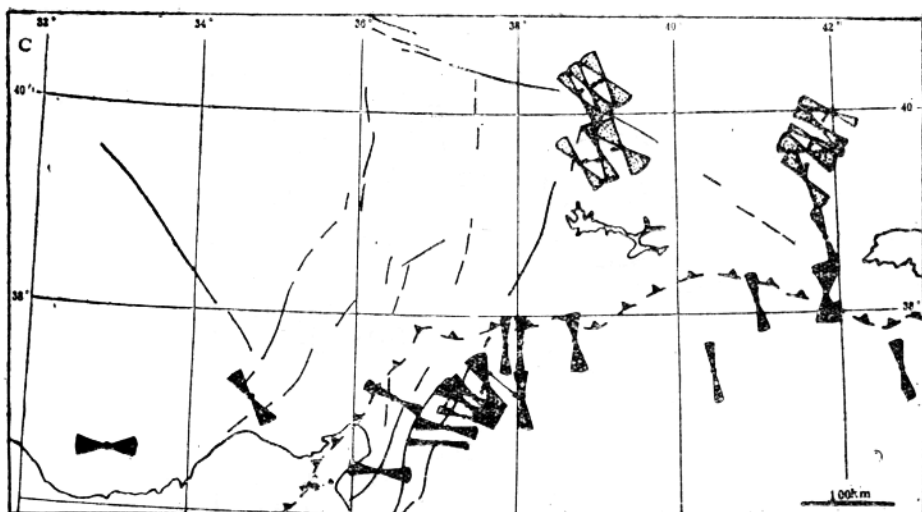


图 3C 晚中新世

第三期缩短影响到研究区的所有的直至最新的岩层，其时代属托尔顿期。高潮是在晚中新世，而在中新世缩短可能业已开始。在不同构造区，应力场方位有着大的变化。在安纳托里亚断层以北地区，就有两个缩短方向作用于中新世岩层，这两个方向时代上没有资料。阿拉伯板块以北的挤入作用引起大陆块的褶皱，逆冲和断裂。

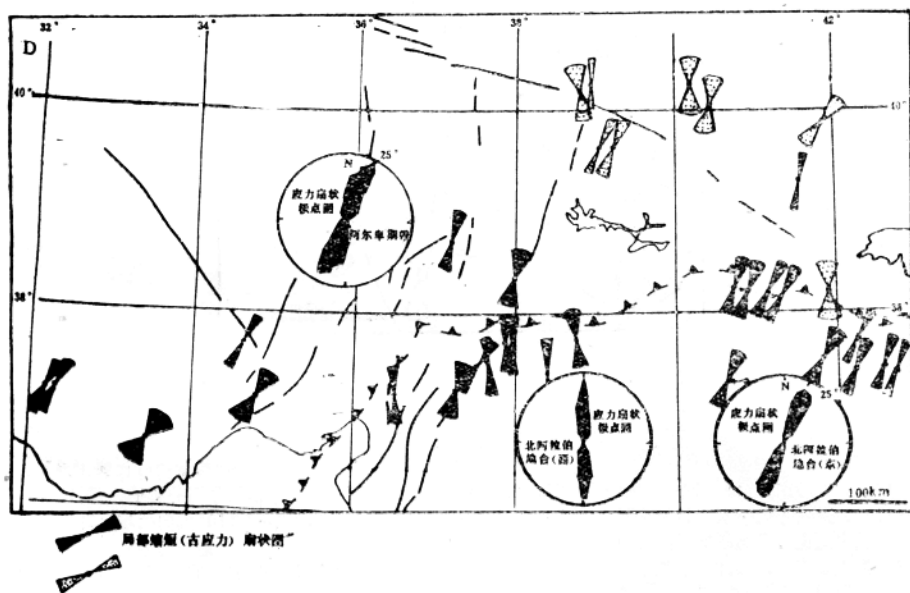


图 3D 上新世—第四纪

这一缩短期影响到的岩层与上一期相同，而相对时代则靠后。它是中新世大陆块破裂之后构造事件的继续。断裂、褶皱、冲断等作用在阿拉伯地台北部地区继续进行。大的扭断层，如黎凡特断层和安纳托里北部断层，引起大陆块运动。这些陆块至今仍在以相同的方向运动着，这为地震所证明。

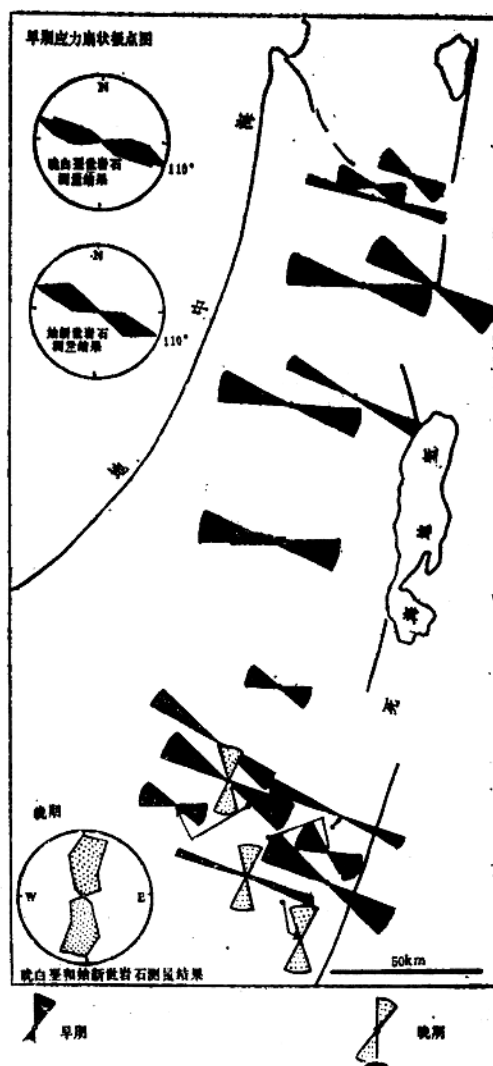


图 4 以色列的缩短期及古应力方位

如极图所示,在白垩纪和始新世的岩层中,存在着两个相同的古应力方向。显微构造的时代要素显示, $N110^{\circ}$ 方向的主缩短期在先, $N-S$ 向的在后。在以色列,始新世石灰岩受到褶皱作用的影响,褶皱轴与 $N110^{\circ}$ 的缩短方向一致。相反,死海裂谷的张开方向则与此方向不同。这一 $N110^{\circ}$ 方向的缩短期可能开始于晚白垩世,在始新世时,严格地按照同一方向继续缩短。在土耳其的黎凡特盆地边缘附近,于晚中新世缩短期,存在着与此期很相似的应力方位(图3C)。我们认为,这个 $N110^{\circ}$ 方向的缩短期很可能是在中新世,如同在土耳其所观察到的第三个缩短期(图3D);而较次要的 $N-S$ 方向的缩短阶段则相当于土耳其的上新世—第四纪缩短期(图3D)。这使得黎凡特断层具有左行扭动的性质,从而亚喀巴湾和死海裂谷的张开也就有了可能(图E)。

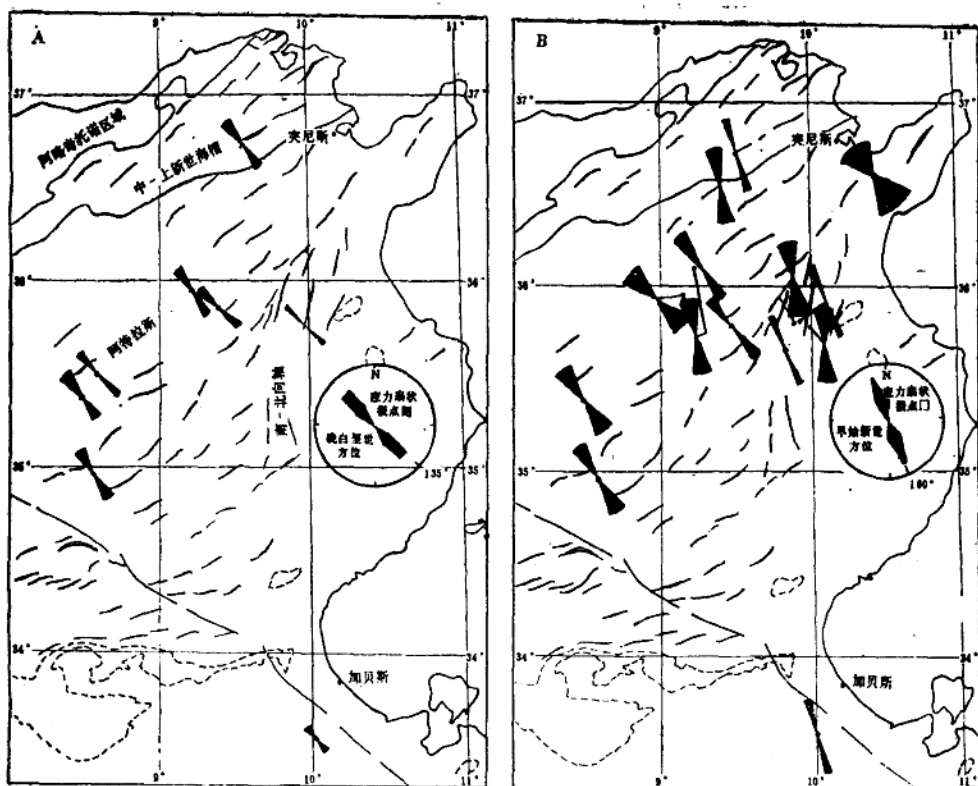


图 6 突尼斯的缩短期及古应力方位

图5A与图5B 晚白垩世—早始新世

从晚白垩世到早或早一中始新世是缩短的第一期。上白垩统岩层中的平均古应力方位是 $N140^{\circ}$ (图5A), 始新统岩层中为 $N160^{\circ}$ (图5B)。没有显微构造和地质的论据使我们认为这一应力方位的变化是由于两个独立的现象。作为缩短的结果是相的变化, 阿特拉斯山脉的增厚与褶皱。

阿 尔 及 利 亚

通过对中生代岩石的短期野外研究, 进一步证实:

一在晚白垩世到早始新世时期有一N-S向缩短;

一在这之后, 缩短方向为 100° (与突尼斯的情况相似)及NE-SW向, 但缺少其具体时代。

在摩洛哥所搜集到的第一性资料显示, 有一 $N160^{\circ}$ — 170° 方向的缩短期, 在阿特拉斯山中部的应力场曾发生重新定向。这一构造事件的高潮期似乎是在中-晚始新世。晚白垩世时期的古应力方向不同于始新世, 但未观察到。

在摩洛哥北部的原生岩层中还见一 $N070^{\circ}$ 方向的缩短, 其时代尚未最后确定, 可能与里夫地区发生在早中新世构造条件(努末底亚推覆体冲断层)相当。

最重要的一次缩短是在中新世的末期, 其方向为 $N25^{\circ}$ — $N30^{\circ}$ 。

西班牙和葡萄牙 (图 6)

在西班牙北部, 我们进行了重要的构造研究工作, 对数千个显微构造特征作了测量。在

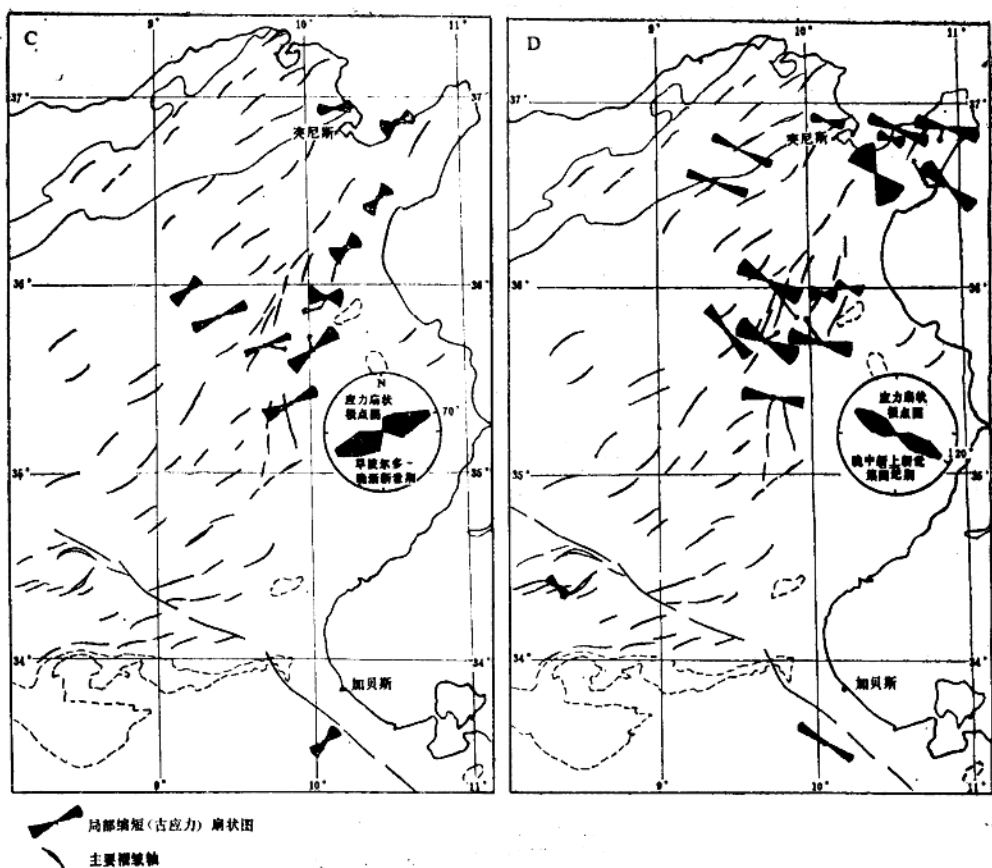


图 5C 晚渐新世—早波尔多期

这是第二个缩短期，应力方位 $N65^{\circ}-N70^{\circ}$ 。晚波尔多期岩层未受到影响，而是以角度不整合位于受侵蚀的较老岩层之上。这一缩短期的应力方位表明了这一时期的大构造变化与古地理变化。

图 5D 晚中新世—上新世—第四纪

这是最后一个缩短期，应力方位 $N115^{\circ}-N120^{\circ}$ ，似乎与两个高潮期相一致：一是中新世末，一是第四纪。这两个时期又相当于阿特拉斯山的主要褶皱期，根据地震与现今断层活动，其现今应力方位似乎是 $NNW-SSE$ 。

西班牙的南部和东南部，最晚期缩短的时代目前尚不清楚。

意大利南部

阿普利亚高原与加尔加诺被认为是亚得里亚板块的原地构造单元。我们搜集了白垩纪到晚中新世岩石中的350个测量数据。由于缺少显微构造要素的年代和岩石年龄以及测点位置在分布上的不合理，所以这一缩短期的时代是含糊不清的。

现在在白垩纪岩层中发现了 $N-S$ 到 $NW-SE$ 方向上的缩短，这可能是由晚白垩世到始新世的构造作用所引起的。在阿普利亚北部，有几个地点我们清楚地观察到应力场曾发生从 132°

到 $N145^{\circ}$ 的右旋转动。

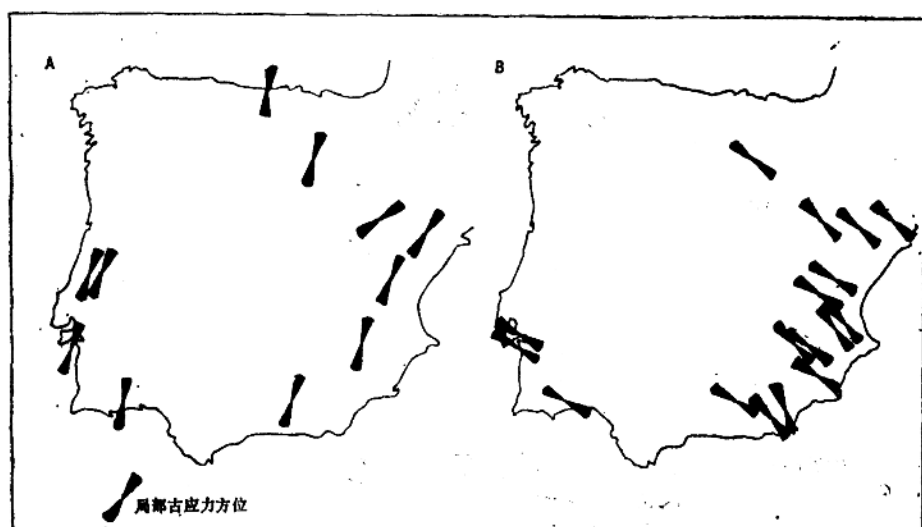


图6 西班牙和葡萄牙的缩短期及古应力方位

图6A 晚白垩世—始新世

在整个地区，清楚地表现出N—S方向的缩短，它可能起始于森诺期。有意义的是沿着大的NE—SW向构造(加泰罗尼亚山链，里斯本断层)出现了局部的应力重新定向。

图6B 波尔多期后期

这一缩短期影响了一些中新世岩层。而对晚中新世岩石露头研究表明，有一复杂的构造作用现象，因而在南部和东南部地区开展进一步的工作是必要的。注意在有着丰富测量数据的佩宁苏拉的北部和西北部缺少NW—SE向的缩短。

在加尔加诺有一NE—SW向的缩短，影响到始新世岩层。它可能归属于早中新世的亚平宁构造期。

在同一地点，晚中新世岩层却受到 140° 方向上的缩短，这大概与中新世末期或上新世—第四纪的构造事件有关。

西西里岛(图2)

非洲地台延伸到西西里岛南部伊布莱奥地区的北部。在晚白垩世到墨西拿灰岩中搜集了大约300个显微构造数据。

如果我们把南西西里岛(图2)与突尼斯(图5)作一比较，就会发现，这两者的晚期缩短阶段是完全一致的，它们有着相同的年代和相同的方位。但如果二者的角度不是相同而只是相近似，西西里岛相对于突尼斯则有一 15° 的左旋转动。这可从西西里岛在上新世—第四纪时期由于沿潘泰莱里亚地堑扩展速率的差异而发生旋转得到说明。

法国和英国南部(图7)

在法国，测得了10000以上的显微构造数据。在许多地点都进行了研究，因而一般来说，其变形机制已众所周知。

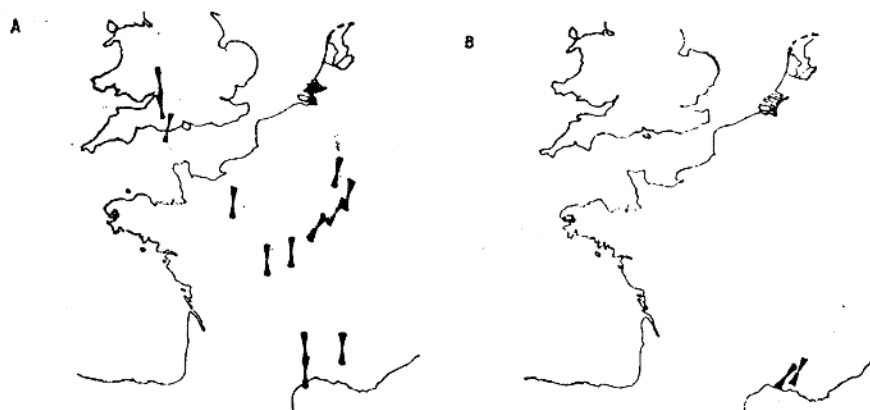


图 7 法国和英国南部的缩短期古应力方位

图 7A 晚白垩世—始新世

在整个地区清楚地显示出N—S方向的缩短，有时渐新世初期的岩层也受到影响，在西班牙，我们注意到应力的重新定向平行于NE—SW向主要构造线（勃干第、塞文尼斯断层）。

图 7B 波尔多期

在法国东南部，清楚地观察到NE—SW向的挤压事件影响到下波尔多阶灰岩。



图 7C 晚中新世至今

第三缩短期发生在晚波尔多期的岩层沉积之后，其应力方位为NW—SE，但仅在靠近阿尔卑斯褶皱带的法国东部和东南部有所显示。在这些地区，它影响到托尔顿期的岩层，其时代可能是晚中新世到现代。在英国，于侏罗系岩层中见E—W向挤压，但其与始新世的N—S向挤压的关系不清楚。

结 论 与 讨 论

把由实际资料所推断出的挤压构造期放在较大的欧洲—非洲—阿拉伯碰撞构造格架内和重视上述方法在认识地中海的构造演化及碰撞现象方面所起的作用，看来是有益的。图9概略地表示了晚白垩世以来地中海地区的演化情况。它被用来验证古应力测量结果和大陆块的相对运动及碰撞和变形带之间是否存在着一致性。为了绘制这一简图，考虑了下述几个方面：大陆或刚性块体产生碰撞的地质结构及碰撞的必然性；碰撞会造成挤压事件，这一点已被我们通过构造分析所观察到。对于每一阶段，我们都从大陆块的原始位置—平行于测量方位或区域缩短方向一出发，尽量使这些大陆块紧贴在一起（图8）。

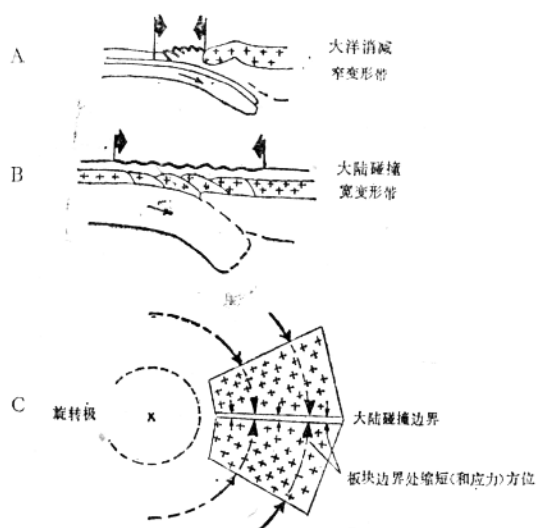


图 8 缩短期与板块聚合

我们通过显微构造分析所测定的缩短期是板块聚合和大陆碰撞现象的一个结果。

图 8A 如果聚合板块中至少有一个是洋型的，那末变形带将是很窄的，这已由活动边缘和表层地震带上的地震反射所证实。

图 8B 在大陆碰撞的情况下，变形带将是很宽的。欧—非碰撞的结果是目前存在一个大于1000公里宽的地震带，这是由陆壳或过渡壳的浮力所造成的。

图 8C 示意模型说明，如果两个聚合大陆之间的界线垂直于板块的相对运动方向，那末界线附近的缩短方向很可能就代表了两个板块之间相对运动的方向。因此，我们通过构造分析测出的方向可能平行于环绕两个板块的旋转极的小圆并使这些方向保留下来。如果我们知道每一缩短期沿碰撞边界的缩短速率，我们就会获得有关聚合板块相对运动的相当精确的近似值。



图 9 地中海盆地演化和古应力场方位简图

在图中，欧洲是随意确定的，古应力方位处在古位置。

1—陆壳；2—洋壳；3—过渡壳；4—板块界线；5—大洋清减带；6—蛇绿岩逆冲带；7—大陆碰撞，主要变形地区；8—由构造分析得出的区域缩短方位；9—相对运动；10—陆缘海的张开。

图 9A 晚白垩世

晚白垩世缩短期与特提斯海的闭合阶段相当，这由出现在阿尔卑斯带东部，托罗斯山和本都山的含蛇绿岩和深水沉积的推覆体所证明。非洲—阿拉伯板块北部的缩短方位相对于欧洲主要呈NW—SE向。在西部地区，晚白垩世时期的一些构造变形已作过描述，但显微构造测量结果未显示出不同于始新世时期特有方位。因而我们不能肯定该区的缩短与大陆碰撞开始在晚白垩世。地中海东部是中生代南特提斯的残海。由于这一海域的存在，西西里岛，也许还有以色列，在白垩纪和始新世时期缩短的量并不大（这一带无大陆碰撞）。NW—SE向的苏尔特地堑系在这一缩短阶段之后发生沉陷。

实际上，我们是从大陆的现在位置开始，然后适当地移动，使其与我们所观察到区域挤压作用的最近一次方向平行。照这样一个阶段一个阶段的进行，我们便获得了大陆块在每一时期的相对位置。显然，那最小限定因数即是大陆块的缩短和变形量。

在整个地中海地区，挤压时期似乎是同时的，但就高潮而言，情形并非如此。为了简化作图，我们把区域缩短的方向分为五个时期来说明，即晚白垩世，始新世，晚渐新世—早中新世，晚中新世和上新世—第四纪（图9A，B，C，D，E）。



图 9B 始新世

从晚白垩世到始新世，我们在几个地区观察到，古应力方位由NW—SE向NNW—SSE变化。在整个地中海地区，始新世是主要缩短期之一，然而沿碰撞带的高潮期不都是一致的。莱茵，罗纳，撒丁西部地槽系在这一缩短期之后发生沉陷。

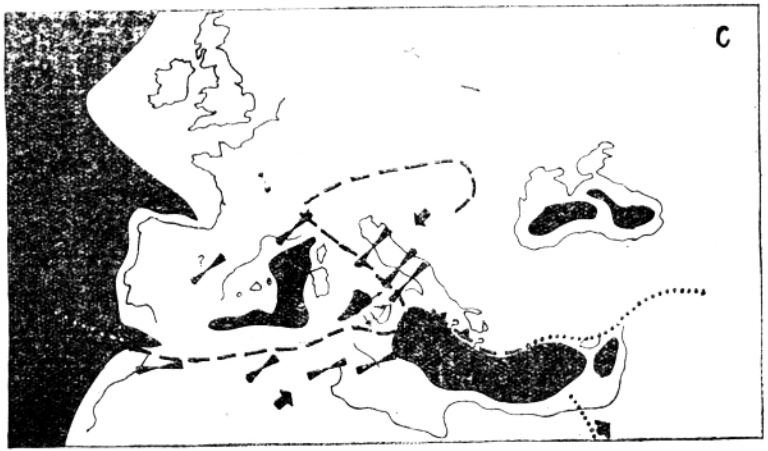


图 9C 晚渐新世—早中新世

在晚渐新世和早中新世，地中海中部地区周围的古应力方位为NE—SW，它完全不同于上述的古应力方位。

侏罗纪岩层中所作的测量结果表明，晚白垩世以前不曾有过缩短。在侏罗纪或早白垩世运动被充分论述过的地区，如迪纳里德斯和黑伦尼德斯，摩洛哥，巴尔干半岛等，进行这类测量必然是很有意义的。

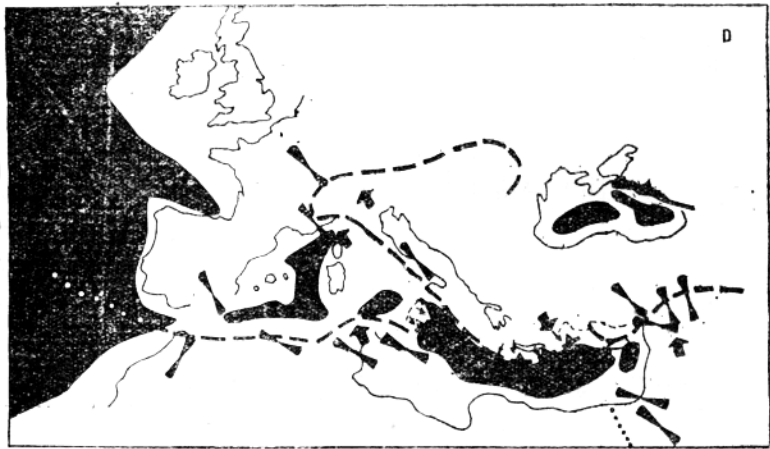


图 9D 晚中新世

晚中新世是第二个主要缩短期。应力方位的快速变化其对本区的作用可能与下列现象相一致：欧—非运动的中断；阿拉伯大陆岬北部的挤入作用；大陆块体的断裂和相对运动的重新定向。这一构造事件使得地中海，大西洋和波斯湾之间的海峡闭合，这可能是引起墨西哥盐浓度变化的因素之一。突尼斯与西西里岛之间的潘泰莱里亚地垒系在这一缩短期之后处于活动状态。这一地带在上新世—第四纪时期扩展速率的差别可用来解释由古应力测量推断出的西西里岛相对于突尼斯呈现的左旋转动。

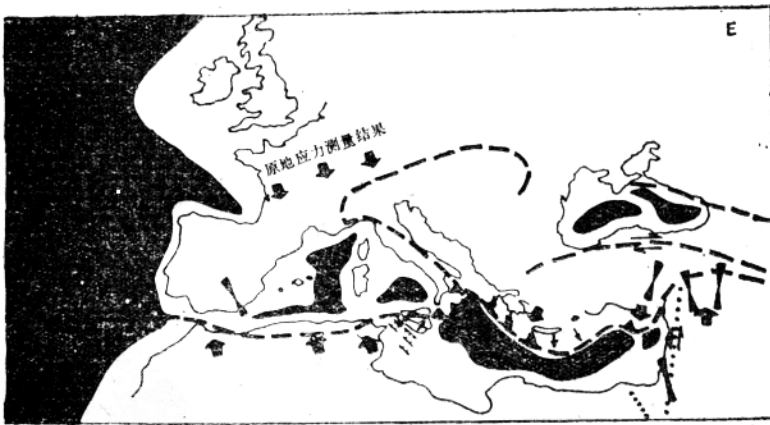


图 9E 上新世—第四纪

在土耳其和以色列，测量证实了沿黎凡特断层的运动。在其它地区，运动太新近或规模过小，不能运用显微构造方法进行解释。地震断面解与原地应力测量结果显示，欧—非之间似乎有一近N—S的相对运动。

图9表示了自晚白垩世至今与地中海构造演化有关的古应力变化的情况。根据古应力测定结果，得出如下看法：

一新产生的具洋壳或过渡壳性质的小盆地，诸如西地中海盆地和第勒尼安海盆，似乎传递了作用在它们边界上的构造应力，其作用就像刚性块体一样。这一情况对于具有厚层沉积物的古老洋盆或其边缘，如黑海盆地和塞浦路斯以南的黎凡特海盆也同样适用。这些盆地中的深震剖面很少显示出沉积物发生过变形，而大的变形则出现于盆地的边缘和其附近的陆地上。

一构造分析表明，地堑的沉陷和区域缩短不是同时的，但在地堑的正断层方向与沉陷前区域缩短方向之间存在着密切的关系，如同构造分析所推断的那样。

一与缩短期相应的各种规模的变形，在克拉通内盆地中观察到，它们远离碰撞带，但与沿碰撞带所见到的变形又是相联系的并且是同期的。有时，显微构造分析还显示，变形在远离褶皱带不同距离的地方消失。

一在研究区范围内，尤其是在地质上均匀稳定的地区，古应力的方向在区域缩短时期是相对不变的。应力的重新定向总是局限在不连续面，如盆地边缘、断层带、板块边界等附近。

一尽管存在有这些局部的重新定向，所测出的年代和古应力方向仍然为地中海盆地周围的板块和块体自碰撞发生以来的相对运动提供了相关的运动学模式。

用这种构造研究方法所获得的资料给先前用其它方法建立的模式带来了某些新的限制因素，那些方法包括地中海地区的地质与地球物理研究、刚体可塑性模拟模式、古地磁与大西洋磁异常。

由古应力测定推断出的板块相对运动的时间与方向和碰撞事件有的时候并不同于由大西洋磁异常推导出的刚性板块和运动模式，任何人都可以具体地指出如下的区别：

一阿拉伯北部、安纳托利亚和欧洲大陆之间在晚白垩世时的距离较许多模式中所提出的要小得多，这是因为在那时安纳托利亚的以北和以南产生了大陆碰撞。

一在始新世期间，板块运动的方向是不同的，且缩短量要大得多。

一早中新世期间的NE—SW向挤压尚未被认识。受变形地区的范围包括一大部分远离碰撞带的陆地；如果板块或小板块是具有固定几何形状的刚性体，那就不能解释所观察到的在一定时期内古应力的方向何以发生变化。

这些事实似乎证实了刚一塑性碰撞理论的某些结论。然而我们并未观察到这一理论所予见的在大陆内部最大压应力规迹的大变化。应力的重新定向主要局限在碰撞带附近，而由构造分析得出的古应力方向在大陆上的广大地区显得非常稳定。此外，地质时期中古应力方向的显著变化也与所提出的地中海模式中的所谓应力方向的递进变化相矛盾。

我们根据古应力测定提出的地中海地区的构造演化图式仅是初步的，它以后必将按照新的测量结果加以修改，而且如果可能，将对缩短量作出更好的估算。

然而这种估算常常可能是很粗略的，所以板块的相对运动也就不能精确地加以测定。为了获得地中海地区构造演化的更好的图式，我们想采用两个方面的成果，一是构造分析资料，它带进了新的限制因素；一是由大西洋磁异常推断出的运动。

(李中坚译自 Rock Mechanics, Suppl. 9. 任希飞校)