

● 地质研究与勘探工作的一种重要方法



平衡地质剖面

N. B. 伍德华特 S. E. 博耶 J. 萨普

● 中国地质大学出版社

平衡地质剖面

地质研究与勘探工作的一种重要方法

尼科拉斯·*B*·伍德华特

史蒂文·*E*·博耶

约翰·萨普

中国地质大学出版社

Balanced Geological Cross-Sections:

An Essential Technique in
Geological Research and Exploration

Nicholas B. Woodward, Steven E. Boyer
and John Suppe

American Geophysical Union

(1989)

平衡地质剖面

地质研究与勘探工作的一种重要方法

贾维民 杜秀霞 译

吴正文 宋鸿林 校

责任编辑 赵福堂

中国地质大学出版社出版

(武汉市喻家山)

中国地质大学出版社发行

中国地质大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10.875 字数 278 千字

1991 年 6 月第 1 版 1991 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—3000 册

ISBN 7-5625-0513-6/P·170 定价: 7.00 元

译 者 的 话

自加拿大学者 C·D·A·Dahlstrom 于 1969 年提出平衡剖面的概念之后,随着北美的一些国家在造山带边缘地区的油气勘探与生产工作的开展,平衡剖面技术不断发展,完善,至 1984 年于法国召开的国际推覆构造会议,推覆构造与平衡剖面理论已发展为现代构造地质学的重要成果之一。在 1989 年于美国召开的第 28 届国际地质大会上,平衡剖面技术已被认为是地质研究与勘探工作的一项重要方法,并在会议期间开办了短训课程,本书即该短训课程的教材。

这本教材除了导论及讨论部分外共分三十一讲,以对挤压变形构造的研究为主线深入浅出地介绍了平衡剖面技术的原理、应用及有待进一步开发的领域。书中文图并茂,内容丰富,包含了大量现代构造地质学研究的新思路,并且列举了大量的研究实例,是一部从事地质科研、生产及教学工作人员的难得的工具书。

本书的翻译工作分工如下:导论至第十三讲及对全部文,图稿的统一审理工作由贾维民完成,杜秀霞译第二十讲至讨论与总结部分,崔新省译第十四、十五讲;张传恒译第十六、十七讲;周洪瑞译第十八、十九讲。吴正文教授校第十四课至讨论与总结部分;宋鸿林教授校导论至第十三讲。译文中错误及欠妥之处敬请读者指正。

目 录

导 论	(1)
目 的	(1)
平衡剖面的发展—历史回顾	(2)
基本原理	(7)
平行褶皱作用	(18)
实践技术与假设	(21)
课 程	(24)
导 言	(24)
第一讲 断坡与断坪	(26)
第二讲 三维几何学	(30)
第三讲 地层断距图解	(33)
第四讲 切层线图	(37)
第五讲 断叉线图	(41)
第六讲 逆冲断层系	(44)
第七讲 变形顺序	(56)
第八讲 深部构造的标绘	(64)
第九讲 褶皱与断层的关系	(71)
第十讲 倾角谱分析	(73)
第十一讲 断层形态与褶皱形态之间的关系	(78)
第十二讲 钉线	(83)
第十三讲 波状层法	(85)
第十四讲 等面积法	(90)
第十五讲 一个断坡的复原	(93)
第十六讲 一条剖面的复原	(95)
第十七讲 简单双重构造的复原	(98)
第十八讲 多种工作假设	(102)
第十九讲 三维模式及走向剖面	(105)
第二十讲 地震的解释	(107)
第二十一讲 松线	(118)

第二十二讲	检验已发表的剖面	(122)
第二十三讲	透入性变形岩石的复原	(124)
第二十四讲	计算机应用	(127)
第二十五讲	非层饼状地层	(130)
第二十六讲	祖父山构造窗的复原	(133)
第二十七讲	加拿大落矶山剖面	(137)
第二十八讲	怀俄明的剖面	(139)
第二十九讲	阿帕拉契亚剖面	(143)
第三十讲	伸展地区	(146)
第三十一讲	对石油勘探的应用	(148)
讨论和总结		(149)
平衡他人的剖面		(149)
绘制你自己的剖面		(153)
总 结		(157)
参考文献		(159)

导 论

目 的

平衡剖面源于 50—60 年代的石油工业，而加拿大的 Calgary 是它最重要的发源地。最早出版的一批平衡剖面是由研究加拿大落矶山脉的 Bally, Gordy 和 Stewart(1966)编制的。他们所依据的逆冲带构造样式的概念，自 Peach 和 Horne(1907)有关苏格兰莫因逆冲带的经典专著发表以来一直在发展。首先，应该如何来定义一条“平衡了的”剖面呢？Dahlstrom(1969)把这一概念引进了文献，并提出了两个准则：“①对横剖面几何学合理性的一种简单检验方法就是测量岩层的长度…如果不存在间断，这些岩层的长度必定是一致的。②在一个特定的地质环境中，只可能存在一套特定的构造…”。Elliott(1983)的定义显得稍微严格一些：“…剖面上所画的构造应是能在悬崖、公路截面和山的侧面等地见到的构造。利用这些构造就能编制出一张可以接受的剖面。另外，复原剖面 and 变形剖面必须同时建立。如果一条剖面能够被复原至未变形的状态，那么它就是一条合理的剖面。按照定义，一条平衡了的剖面应当既是合理的又是可接受的…”(P101)。

如果我们真正理解了构造是如何形成的，那么就on应该能够将构造复原。因此，当岩层长度或剖面面积在变形与未变形的两种状态下相等时，剖面就平衡了。如果它们不相等，而且对这种不一致性又无法解释(应变？)，那么剖面就是不平衡的。如果仅提供了变形剖面而无复原的剖面，则无法确定它是否平衡，只有作者提供了复原剖面后才能证实它是平衡的。如果在建立横剖面时，遵循断弯褶皱被作用($F \cdot B \cdot F$)倾角谱分析的原则(Suppe, 1983)，则该剖面将能准确复原，因而也是能够退变形的。

一条具有断截褶皱(fault—truncated folding)或早期断层的剖面同样能够平衡，关键是该剖面在消除断层效应后，位于上、下盘的被截切的褶皱能够吻合。平衡的方法亦可用于伸展地区，但目前尚不够完善(Gibbs, 1983)。应变数据和面积的去应变可以作为补充资料，并可作为附加步骤加入到剖面复原过程中(Woodward 等, 1986; Ramsay 和 Huber, 1987)。

本课程的目的：①讨论平衡剖面的由来及应用②提供建立平衡剖面的练习和方法指导。第一个目的比较容易达到，而要达到第二个目的，难度则大得多。平衡剖面只是一种被严格限制的标准地质剖面，绘制任何高质量的地质剖面都需要经验和多次尝试。高质量地质剖面所需的全部信息(准确的地表地质资料，区域地层知识、对构造形态的了解等)亦是可平衡的剖面所需要的。

由于在平衡一条剖面的过程中增加了这些额外的限制，在完成平衡过程之后就很可能获得更多的有益结论。平衡剖面不一定是真实的，它只是一个模式；与未平衡的剖面相比，它满足了大量合理的限制条件，因此更接近于正确。由于平衡剖面提供了更准确的变形图象，因此有助于对勘探目标的评估。

这里讨论的实例是比较简明的，但遗憾的是，平衡剖面的一些细微差异微妙且时隐时

现，难以定规。在本课程中，我们仅希望能提供一个为将来进一步开拓平衡剖面这一课题的基础。

在大多数学科中我们用了大量时间来寻找可以识别的型式，现在我们携手利用剖面的平衡技术，也是为了在逆冲构造带寻求可预测和可识别的型式。利用计算机模拟可以对许多不同的构造样式进行快速研究。正向的构造模拟(即从未变形状态到所观察到的变形状态)比反向模拟(即变形状态的剖面可由计算机进行复原)要常见得多。正向模拟可通过变换任一重要的输入参数产生多种合理的剖面，然后，我们剩下的只不过是采用一个最适合野外问题的合理的模式。严格平衡的计算机模拟可能不完全与实际资料相符，但它们几乎总是能够对实际剖面中出现的平衡问题提供解答。

我们还应当细心区分平衡剖面问题的两个方面，即：①岩石在自然界真正的行为是怎样的？②我们的几何学限制条件在平衡剖面中所起的作用是怎样的？对平衡剖面所需的每一个几何学假设，都必须考虑其与具体实际情况的接近程度。例如，几何学方法通常是以平行或圆柱状褶皱作用为基础的，但是自然界的许多褶皱并非如此。重要的是要注意鉴别实际物理问题和平衡操作中可能出现的问题(断截褶皱和违序逆冲断层可能属实际问题，而岩层长度问题则可能是绘图粗糙的结果)，后者可能来自我们的几何学假设。

剖面是平面图资料的常规解释方法，其质量只能取决于我们的原始资料。在侵蚀深度达到足以将可能存在的顶板断面侵蚀掉的情况下，要想确定叠瓦扇与双重逆冲构造之间的不同，即便有可能也是很困难的。此外，对露头差的地区的解释取决于我们对区域背景及良好露头区的了解，因此正如 Hossack(1979)所说，我们所能获得的只是非常有用的最小复原结果。

总之，我们希望这次课程能有助于初学者理解为什么需要和如何进行平衡剖面研究。由于作者都是北美学者，而且多数有关逆冲构造及平衡剖面的早期研究也是在北美开展的，因此在我们所选的实例中有明显的侧重。实际上在其它地方也存在许多类似构造的良好实例(有不少例子来自台湾)。然而已有一些研究者指出，北美的构造多比其它地方的简单。即便如此，我们的讨论也需要在简单模式的基础上开始，从而能使其他的研究者将这些方法应用于更复杂的情况。本课程不可能涉及过多的细节，而且不同研究区的情况不同，可能需要某些新的地区性准则，或者废弃某些准则。

平衡剖面的发展——历史回顾

平衡剖面概念的发展可归因于科学的探索与勘探需求的结合。Dahlstrom(1969)首先较详细地讨论了平衡剖面的概念。然而 Bally, Gordy 和 Stewart 的剖面(1966)表明，其他加拿大勘探地质学家于 50 年代中期就在使用平衡剖面。虽然我们现在已经掌握了现代的处理技术及先进的探测方法，但是地震资料仍然留出了很大的推测余地。60 年代的地震数据的质量一般比现在要差，但是与原地寒武系及下伏基底有关的反射事件通常是可以识别出来的(图 1-2)。在加拿大落基山，寒武纪事件和下伏基底的地震反射面与地表地质条件清楚地限定了编制构造剖面的边界，严格地制约了对落基山脉深部构造的推断(Bally, Gordy 和 Stewart, 1966)。

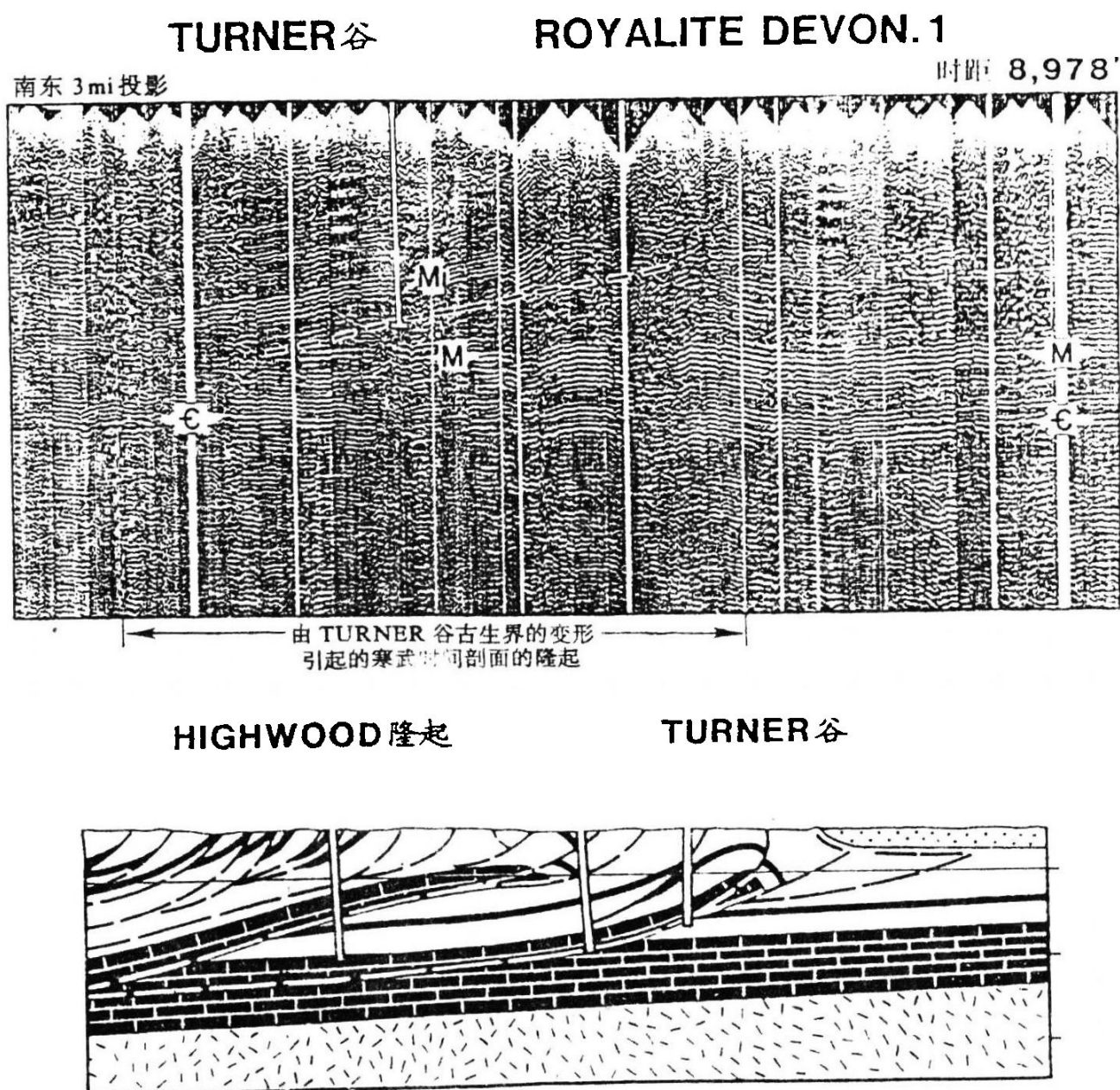


图 1 地震资料证实，主要岩层(反射层)在一未变形界面之上的变形呈可复原的构造型式。(a)地震剖面 (b)构造解释(据 Bally 等，1966)。

尽管有了上、下边界所给出的限制条件，仍然可有许多不同的方案来填补中间空白区。Dahlstrom(1969)提出了可以用来评价这些方案合理性的平衡技术。他的工作最初主要侧重于逆冲带构造地质的几何学研究，他的一段引语(1970, P333)不仅说明了他注重几何学研究，而且说明了地质学家为什么应当注重平衡问题：“严谨地说，讨论集中于所观测到的构造和能合理地推测出来的构造的几何学问题。这是‘它是什么？’水平上的地质工作通过这步工作可以建立理论家必须要去解释及勘探工作者必须试图采用的模式。我们希望本文对勘探工作者有用，他们必须名符其实地去分析零散的资料，并尽早地识别出潜在生产性构造的性质、形态及方位。”

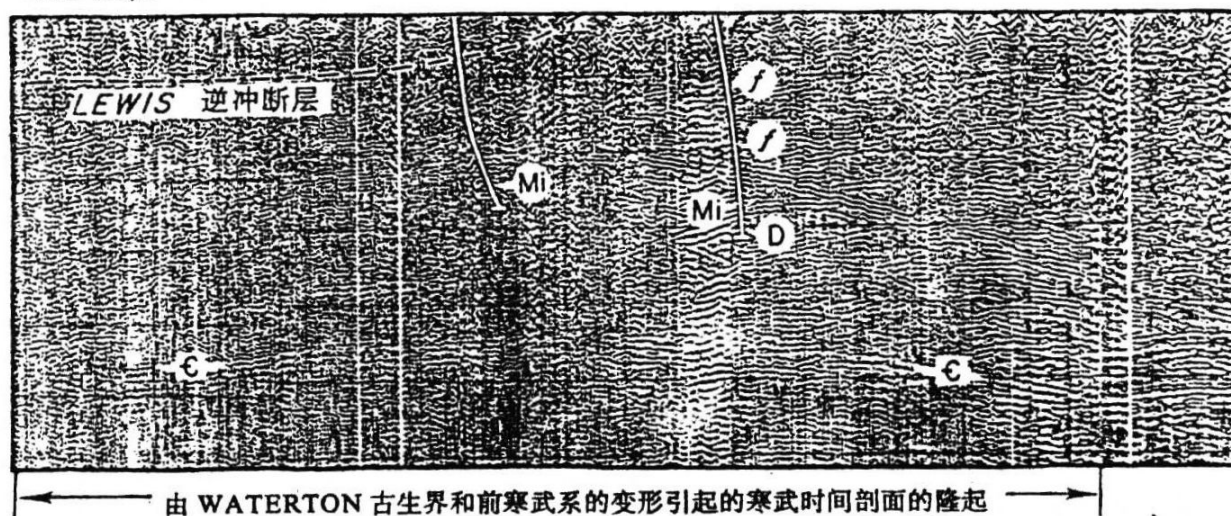
“能合理地推断出来”这一用语是关键。在建立平衡剖面过程中全部的目的就是将未知限制到在地质上被认为是合理的地步。剖面平衡技术对石油勘探的重要性可见于 Bally、Gordy 和 Stewart(1966)，Dahlstrom(1969, 1970)，Royse、Warner 和 Recse(1975)，Lamerson(1982)等人的著作。

SHELL WATERTON 14

SHELL WATERTON 6

时距 12,348'

时距 13,202'



WATERTON

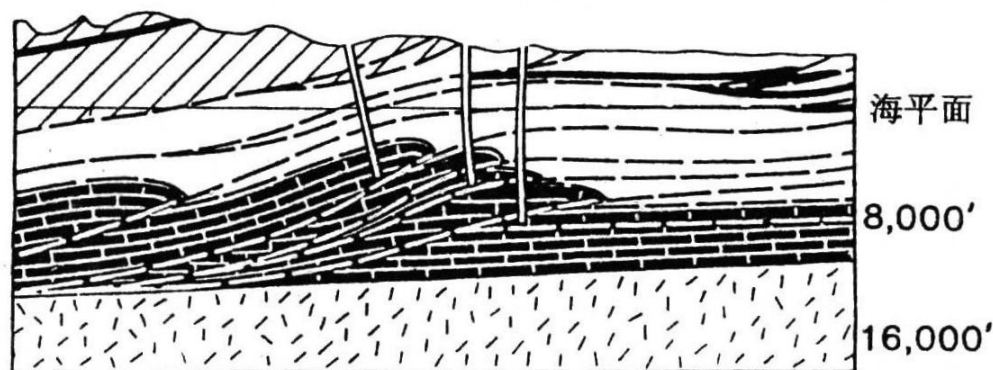
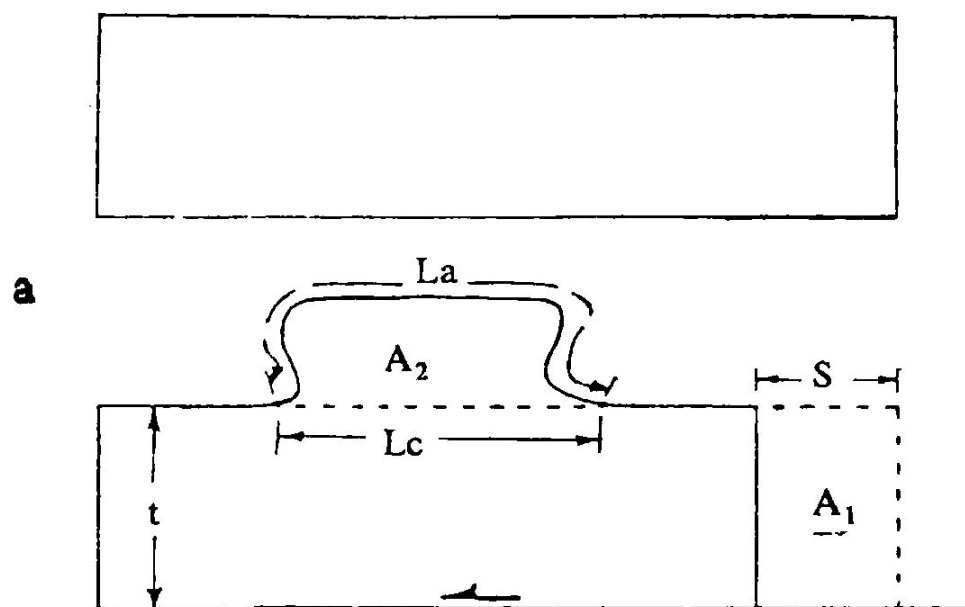


图 2 根据所有岩层均可复原拼合的假设，一些并未出露地表的深部叠瓦构造也可以被推断出来。(a)地震资料 (b)构造解释(据 Bally 等 1966)。

虽然上述著作中非常清楚地阐明了平衡技术的原理，但其概念却孕育于 20 世纪初就已发展起来的其它构造分析技术中。Hossack(1979)指出，平衡剖面的概念首先被 Chamberlain(1910, 1919)用于计算滑脱面的深度。Chamberlain 假定在一个滑脱面之上的变形过程中剖面的面积是守恒的，并以此为前提估算出了滑脱面的深度(图 3a)。后来 Bacher(1933), Goguel(1962), Laubscher(1962), Dahlstrom(1969)以及许多其他研究者都应用过这一技术(图 3b)。

Hossack(1979)还指出，如果滑脱面的深度是已知的，Chamberlain 的技术可反过来用于计算造山带的缩短作用。这种方法——结合面积平衡原理——已被 Gwinn、Price 和 Mountjoy(1970)所应用(图 4)。Dennison 和 Woodward(1963), Royse、Warner 和 Reese(1976)利用长度平衡方法计算了造山带的缩短作用(图 5)。



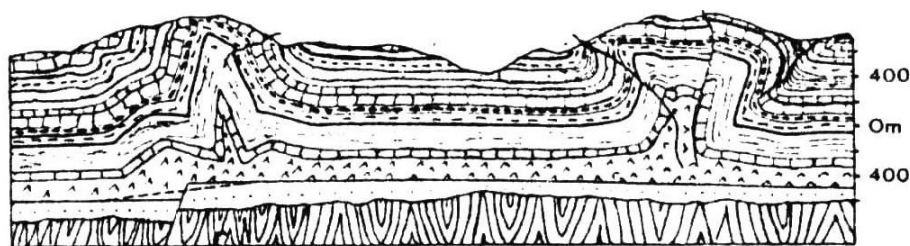
t = 变形剖面的厚度

平面应变: $A_1 = A_2$

线缩短量: $S = L_a - L_c$

$A_2 = A_1 = t \cdot s = t(L_a - L_c)$

$$s = \frac{A_2}{L_a - L_c}$$



b

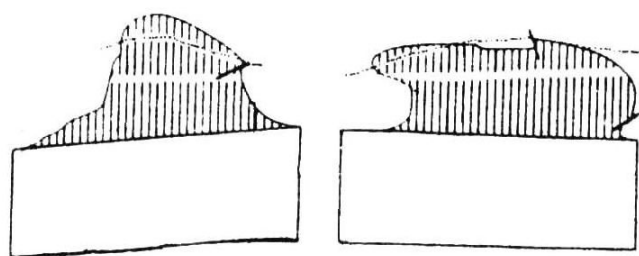


图 3-a 在假设平面应变和纯剪变形的前提下，利用面积平衡方法估算造山缩短作用，缩短量可由多余的面积 A_2 计算出来。

图 3-b 当基底滑脱面较平直时，对多数研究来说，这些假设可以使问题得到简化(据 Laubscher 1962 原图修改)

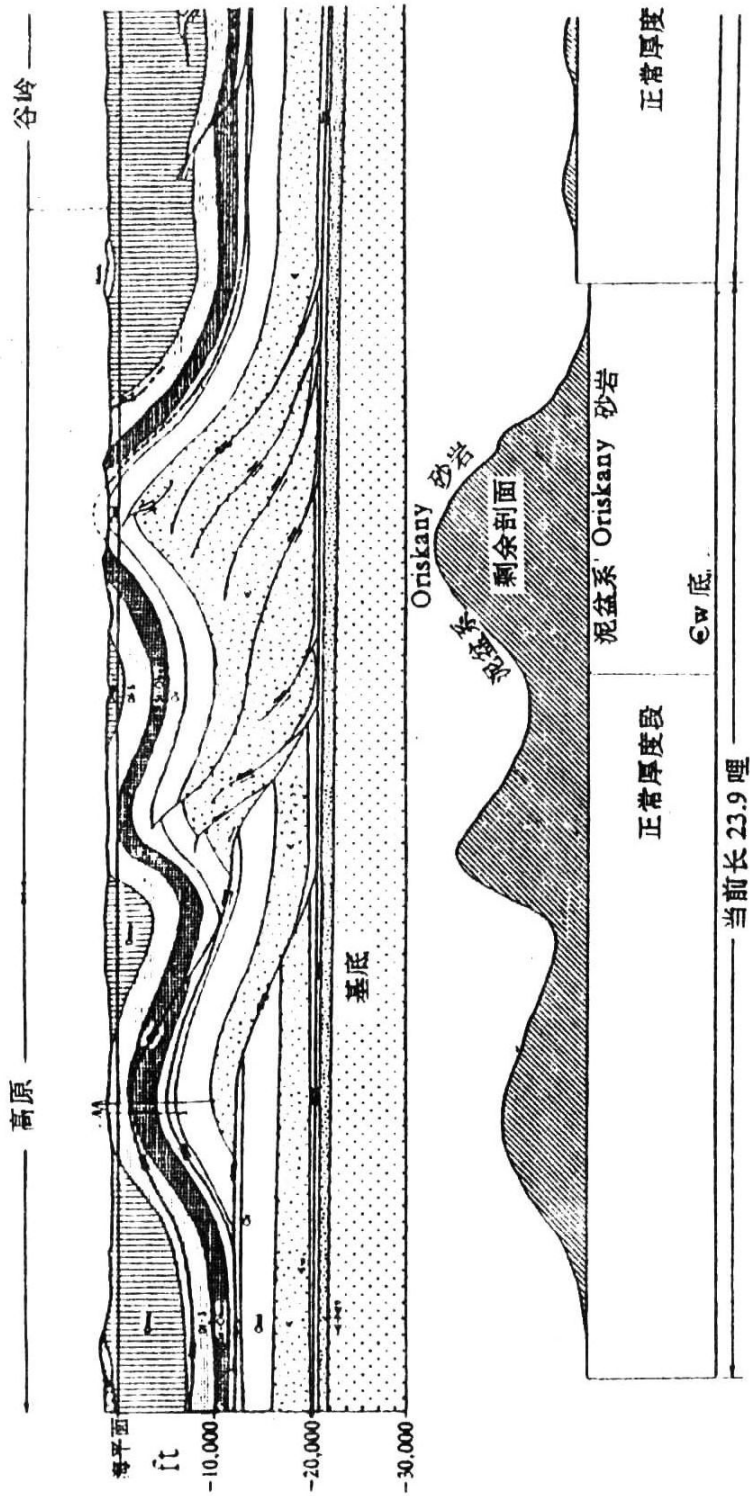


图 4 Gwinn 同时利用波状层复原法和多余面积复原法对中阿巴拉契亚带的缩短作用进行了估算。对造山缩短作用的估算与为了勘探而需查明局部构造的几何特征这一目的相比显然要简单的多。(据 V.E.Gwinn, 1970)

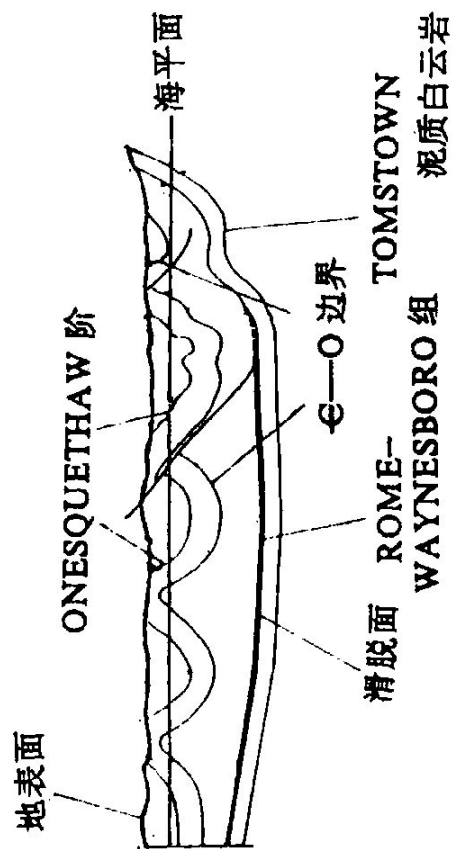


图 5 褶皱复原的波状层法(测量沿圆柱状褶皱的岩层长度)是 Dennison 和 Woodward(1963)建立中阿巴拉契亚带复原再造图的基本方法 Dennison 和 Woodward, (1963)

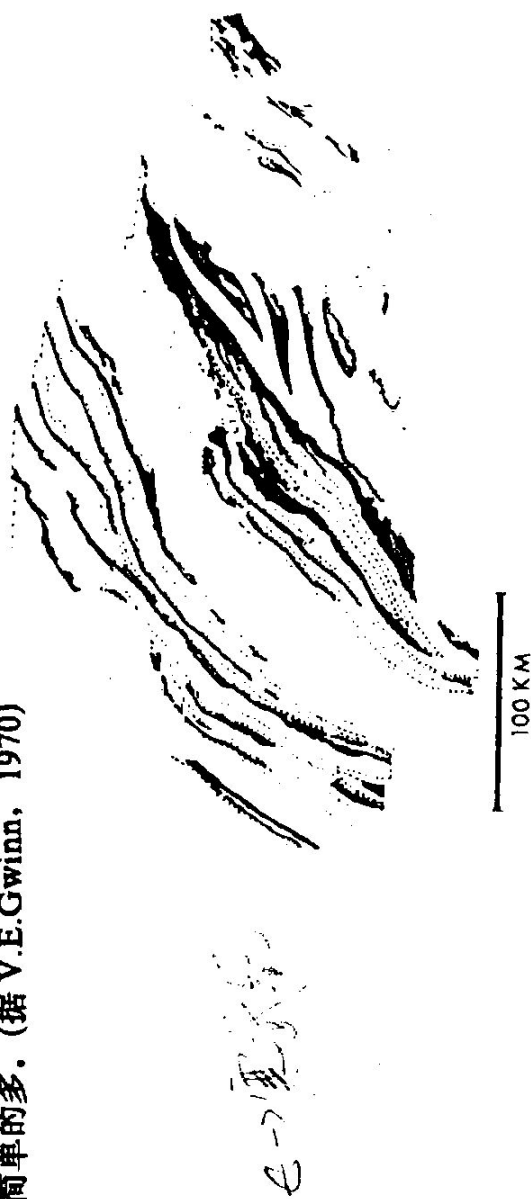


图 6 Roeder 和 Witherspoon 利用平衡剖面建立了田纳西州东部的复原再造图, 证实平衡剖面方法对于在该区重建岩相图具有重要价值(据 Roeder 和 Witherspoon, 1978)

利用平衡技术和造山缩短作用的估算在重建古地理的过程中可以了解相关系 (Dinnison 和 Woodward, 1963, Roeder 和 Witherspoon, 1978, 图 6)。

相关系的知识不仅具理论意义, 而且在工业中可用来识别多孔储油岩的位置以及查明在地层圈闭中生油层、储油层与密封层之间的关系(图 7)。连续复原的剖面(Royse, Warner 和 Reese 1975)可以表现逆冲带在其演化的不同阶段的构造图象。这一步骤对于评价碳氢化合物的形成、运移及储存的相对时间来说是很有必要的。

剖面的平衡技术正在日益完善。许多作者已经指出, 在剖面平衡过程中有几种误差可能是难以避免的。构造压实作用(Hossack, 1979)和压溶作用可以产生误差。Woodward 等(1986)还在他们编制的南阿巴拉契亚的剖面中利用了应变资料。

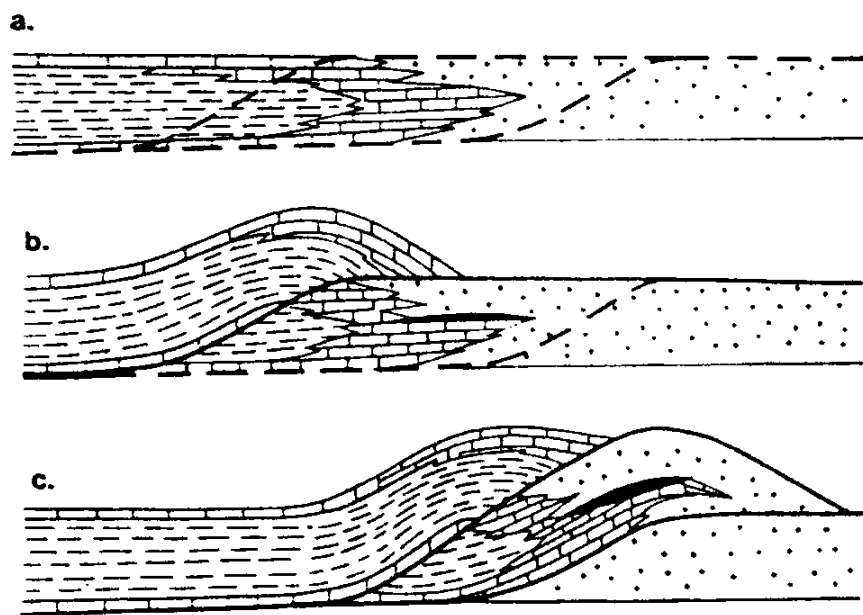


图 7 在逆冲构造区沉积相的变化部位经常会被上覆的逆冲席所掩盖, 而且相变的形式也会受到逆冲位移的歪曲。在勘探工作中, 对于确定可能生油的隐伏礁或相变趋势的位置, 再造复原图和准确的可复原剖面是非常重要的。

基本原理

在这一节, 我们将回答在开始建立一条平衡剖面时必然碰到的下列问题:

1. 建立一条平衡剖面涉及到哪些假设?
2. 绘制一条平衡剖面需要哪些资料?
3. 这些资料的来源是什么?
4. 如何将资料用于我们的剖面?
5. 由地表资料能推测哪些地下情况?

在回答这些问题时, 我们先来讨论一些必须遵循的地质原理。在理想情况下, 第一步应当先制作一条非常接近真正平衡的剖面, 遵守下列基本原理将确保第一步在主要方面是成功的。

选择剖面线

剖面的平衡方法要求剖面线平行于逆冲运动的方向, 因此第一步就是确定构造运移的方向。构造运移的方向通常是用区域构造线的平均走向来确定。的图 8 中所选剖面线垂直于:①主要逆冲断层的走向, ②主体褶皱的走向, ③与逆冲断层的断坡及褶皱相伴生的型式正断层的走向。

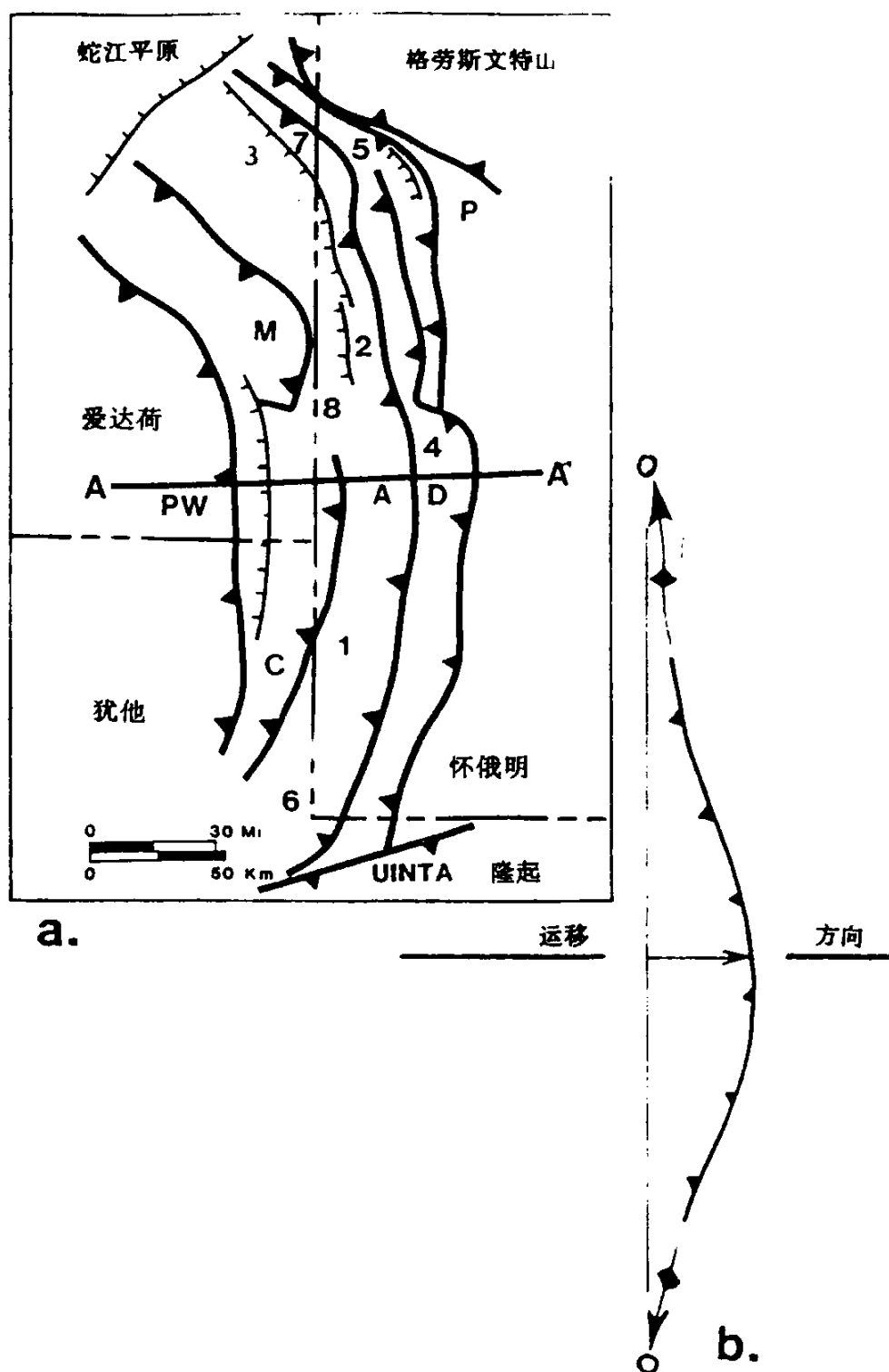


图 8a 区域性剖面的位置应选在横向构造最简单的地区，如爱达荷—怀俄明—犹他逆冲带平面图的中部(A—A' 线)
b. 用于确定构造运移方向的 Elliott 的弓箭法则。

小规模(即露头尺度)的褶皱(图 9a、b)不宜用来确定运移方向，特别是在薄层状地层单元及邻近断层的高应变区。这些部位的非均匀应变可能导致褶皱轴的旋转。然而 Hansen(1971)提出了解决这一问题的一种方法，将大量具旋转方向的或不对称的褶皱轴投影到赤平网上就可以确定出运移方向；运移方向位于褶皱轴组成的大圆上，并把褶皱轴分为左旋区与右旋区(图 9b)。

如果剖面内包括由低级到高级的变质地段，则发育稳定并且一致定向的矿物拉伸线理是非常好的运移方向指示要素。例如在北卡罗林纳州蓝岭区的祖父山—芒廷县构造窗区(图 10)，尽管褶皱轴的方位变化，但拉伸线理却是一致定向的。通过矿物拉伸线理确定的

运移方向(图 10b)与通过区域性构造的走向确定的运移方向(图 10a)是一致的。



a

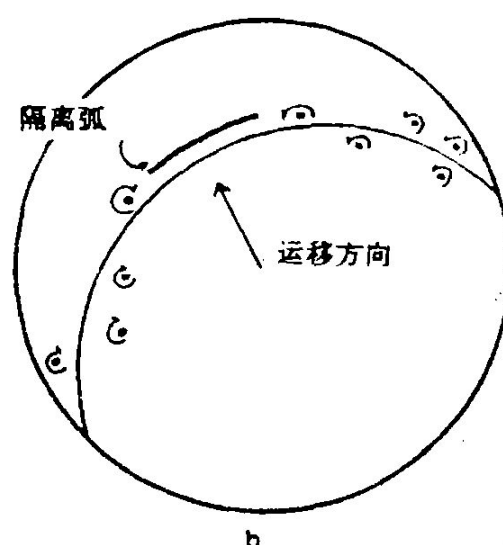


图 9a 由于强烈的局部变化，只用小规模
的褶皱作用往往无法指示构造运移的正确方向
b. 如果全面系统地研究小褶皱，通过
Hansen 的隔开圆弧法也可确定出构造运移的方
向(据 Hansen 1971 修改)

Price(1981)指出，如果剖面线方位与构造运移方向的偏差在 30° 范围以内，缩短作用结果中不存在重大误差(15%)。图 11 表明，对于 50km 长的剖面来说，当偏角为 30° 时，岩层长度的改变小于 15%，但是沿走向剖面的端点却偏离了 30km。平衡原理假定，最终复原在一起的断片曾经是相连接的。如果剖面线端点沿走向的偏离大于剖面线长度的 10%，那么只有当逆冲席的褶皱呈完美的圆柱状而无侧向变化时，才有可能将上、下盘复位到原始状态。这表明局部剖面的方位与运移方向的偏差不应超过 5° 。可以复原的剖面不应出现相互交叉的情况，因此对成套的系列剖面来说(Woodward, 1985; Dixon, 1982; Rodded 等, 1978)，确定运移方向要比确定个别剖面方向更加重要。

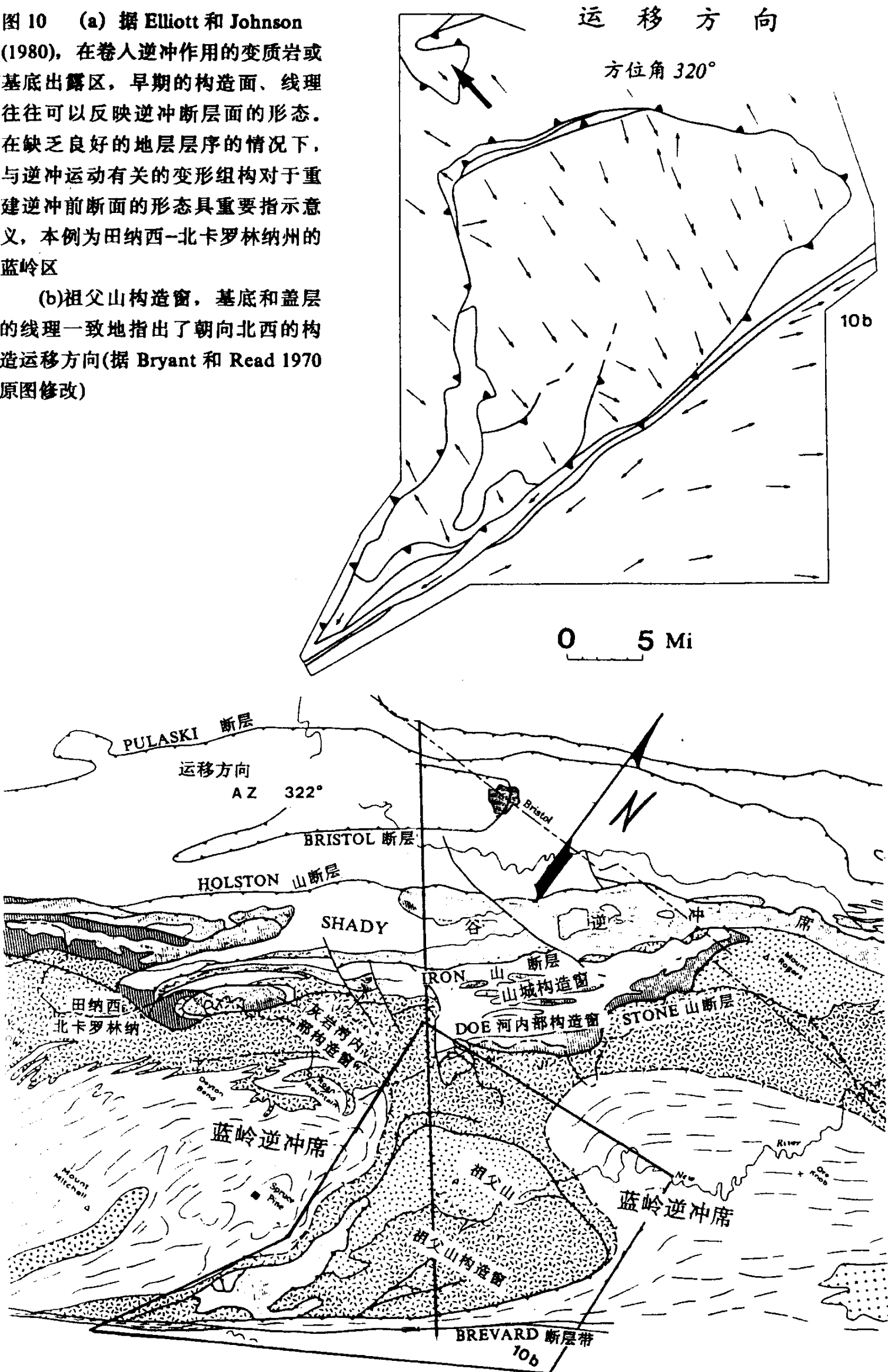
在研究区确定了大致的运移方向之后，就需要为第一条横剖面选择一个特定的位置。不论研究目的或研究区的范围如何，第一条剖面应当是区域性的，如果有可能，最好是能够被“钉”在未变形的前陆上(图 12)。要建立一条区域剖面，地质学家必须利用所有的构造及地层资料。在利用区域剖面对构造及地层的变化进行分析之后，才能在这条剖面附近利用这些资料建立较短的剖面。

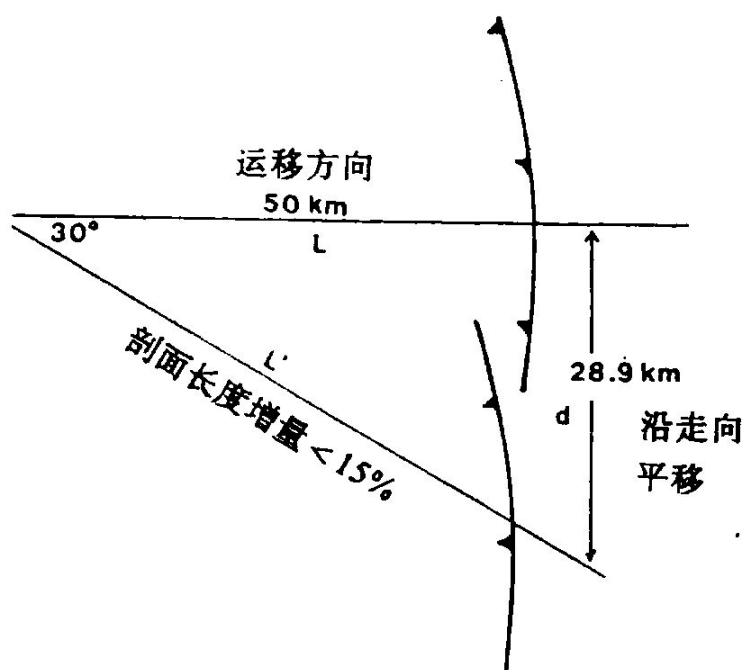
最初的区域剖面应建立在用 Elliott(1976)的“弓箭”法则确定的具最大逆冲位移的地段附近，最大位移线通常接近中部。以这种方式选择的剖面线可以避免逆冲断层端部附近的旋转的，非平面的运动。

最初的剖面还应避开侧断坡和掀断层。Hossack(1983)提出，侧断坡，尤其是成对的侧断坡，会严重地限制可能的运移方向，如 Jacksboro 和 Russel Fork 断层(南阿巴拉契亚山的松树山逆冲席)。与此有关的褶皱方位，相对于运动方向也是变化的。通过或靠近这些构造的剖面常常是不平衡的，也是无法复原的。

图 10 (a) 据 Elliott 和 Johnson (1980), 在卷入逆冲作用的变质岩或基底出露区, 早期的构造面、线理往往可以反映逆冲断层面的形态。在缺乏良好的地层层序的情况下, 与逆冲运动有关的变形组构对于重建逆冲前断面的形态具重要指示意义, 本例为田纳西-北卡罗林纳州的蓝岭区

(b) 祖父山构造窗, 基底和盖层的线理一致地指出了朝向北西的构造运移方向(据 Bryant 和 Read 1970 原图修改)





剖面长度						
L = 10 km			L = 50 km		L = 100 km	
	d	L'	d	L'	d	L'
0°	--	--	--	--	--	--
5°	.9	10	4.4	50.2	8.8	100.4
10°	1.8	10.2	8.8	50.8	17.6	101.5
15°	2.7	10.4	13.4	51.8	26.8	103.5
30°	5.8	11.6	28.9	57.7	57.7	115.5

图 11 在剖面线与真正的构造运动方向不一致时，计算缩短量中的误差并不困难。复原中出现的主要误差并非来自对缩短量的估算，而是由于将构造不附合实际地沿走向延伸过远，因此产生了重叠现象和复原的困难。

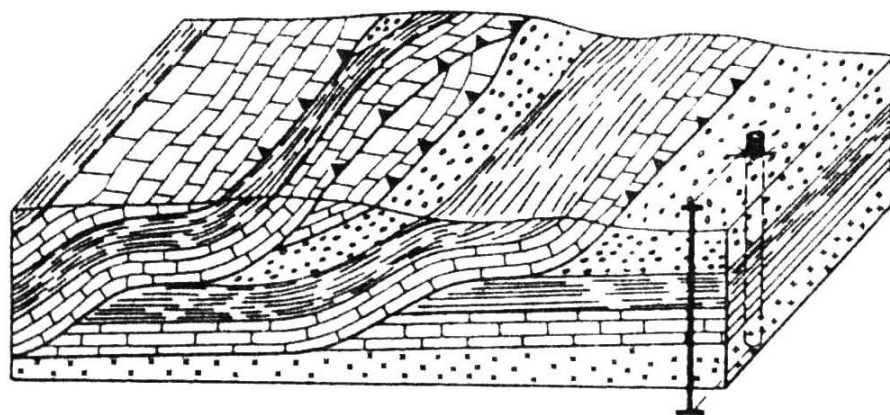


图 12 区域性剖面的起点均应位于未变形前陆的钉线处

汇集地层资料

这一点似乎很明显，但是许多构造地质学家，包括我们本身，常常在搜集精确的地层信息方面变得很懒。如果我们的研究用的是不正确的地层厚度，则剖面或许仍是平衡的并且是可以复原的，但必是不可接受的(在其几何学的相对真实性方面)。当使用的地层厚度