



中国石油勘探开发研究院出版物

盐构造图典

The Salt Mine



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

【美】修德克 【美】杰克逊 著
李本亮 陈竹新 译

盐 构 造 图 典

[美] 修德克 [美] 杰克逊 著
李本亮 陈竹新 译



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

盐构造图典 / (美)修德克, (美)杰克逊著; 李本亮,
陈竹新译. —杭州: 浙江大学出版社, 2013.12

ISBN 978-7-308-12653-3

I. ①盐… II. ①修… ②杰… ③李… ④陈…
III. ①盐—构造—图集 IV. ① 0611.65-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 296835 号

浙江省版权局著作权合同登记 图字: 11-2013-305 号

Copyright © 2011 by Michael R. Hudec & Martin P.A. Jackson

盐构造图典

[美] 修德克 [美] 杰克逊 著

李本亮 陈竹新 译

责任编辑 林汉枫 伍秀芳

封面设计 续设计

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州立飞图文制作有限公司

印 刷 浙江印刷集团有限公司

开 本 889mm×1194mm 1/12

印 张 25.5

字 数 330 千

版 印 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-12653-3

定 价 168.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571)88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

前言

盐构造作用是与盐相关的变形过程：是探索盐构造如何演化以及为何演化的研究。由于盐的软弱性，它在沉积盆地中起到润滑和强化变形的作用。因此，盐构造作用对于石油、天然气以及某些矿产的勘探来说利益攸关。盐构造作用使得盐体周围有大量的油气圈闭形成。此外，盐篷形成的巨大遮蔽罩影响着深层油气圈闭的地球物理成像。全世界有 130 多个盆地受盐构造作用的改造，其中包括许多富含油气的盆地，如墨西哥湾、西非近海、巴西近海、北海、中东以及北里海地区。

在过去 20 年里，油气勘探的成就已掀起了一股研究盐构造作用的热潮。结合地震数据采集和处理的进展，其受重视的程度使得我们对盐构造作用的理解已发生革命性的变化。然而，盐构造的信息资源也是海量的。自 1990 年以来，已发表的与盐构造作用相关的文章超过 3800 篇。这对于刚刚介入到盐盆地研究的人员来说，难以了解其基础；对于资深的盐构造研究人员来说，则难以跟上这一领域的进展。

鉴于如此海量的信息，获取和具备盐构造分析能力的最佳途径是什么呢？传统的学习方法，如阅读文章和参加口头演讲，是非常耗时的。而且，信息的获取和应用之间往往有很长的时间间隔。最终，这些信息通常被淹没于大量的、与手头问题几乎不相关的其他资料中。因此，我们需要一个体系，对盐构造作用的整个学科谱系进行快速分类，筛选出相关的信息，构架起通往更详细信息的桥梁。

《盐构造图典》是一部盐构造及其相关沉积体的图册。本图册含有带注解的盐构造图片，并配有对关键原理进行讨论的详细文字说明。对所有图片构造样式的划分依据于几何分类，而不是采用经常会引起争议或歧义的成因及起源分类。图片包括了野外露头资料（露头照片、地质图、航拍照片和卫星图像）、地震剖面、地质剖面、概念素描。此外，本图册

也展示了从美国德州大学奥斯汀分校经济地质研究所应用地球动力实验室精选的上百组物理和数值模型的最佳实例。

图册的设计考虑到了用户、用户所需求的信息以及用户预期的检索耗时。《盐构造图典》一书针对的是盐构造研究领域的初学者和资深的学家。我们认为这两类读者都希望对盐构造作用有更深入的了解，都在寻求相似或不同的解释方案，都希望对特殊的盐构造类型加深理解。而用户可能最多乐意花费 5 分钟的时间去寻找他们所需解决问题的答案。

《盐构造图典》一书包含了 400 张最有意义的图片。我们感谢 Bruno Vendeville, Dan Schultz-Ela 以及 Tim Dooley 提供了他们在应用地球动力实验室工作期间大量未发表的模拟结果，这使得本图册独具特色。我们也从其他实验人员手中精选了一些模拟图片，并在对应的文字说明中加以致谢。以下公司允许我们使用他们专有的图片：阿纳达科石油公司（Anadarko）、必和必拓石油公司（BHP Billiton）、英国石油公司（BP）、法国地球物理维里达斯集团（CGGVeritas）、雪佛龙石油公司（Chevron）、康菲石油公司（ConocoPhillips）、埃克森美孚石油公司（ExxonMobil）、瑞丁-贝茨公司（Reading & Bates）、壳牌石油公司（Shell）、范科石油公司（Vanco）、西方奇科石油公司（WesternGeco）以及道达尔石油公司（Total）。以下科学家为本图册提供了素材：Ian Davison、Chris Harrison、Charles Kluth、Lou Liro、Paul Nicholson、Mark Rowan、Delphine Rouby 以及 Chris Talbot。我们非常感谢无数的同行对我们的影响和对本图册的鼓励。

在此对中国石油勘探开发研究院翻译和出版此书深表感谢，因为他们的辛苦努力才使得此书有机会与广大中国读者见面。

引言

编撰像《盐构造图典》这样的图册面临着三大挑战：精选、分类和注释。

精选方面，问题在于图片的取舍。任何类似的工作都不可避免地反映出编者的工作经验和学科背景。例如，在过去的 20 年里，我们的合作机构致力于墨西哥湾和西非近海的重大项目研究，而图片的选择也体现了这一点。我们也试着拓宽《盐构造图典》的涉及面，从已发表的文献中选取了其他盆地的图片。但更专业和对这些盆地资料更熟悉的科学家的加入无疑会提升我们选择的品质。加之是一次性地编撰章节，且完成之后，除了增加我们研究团队的资料外，并没有重温这些章节，因而有些章节比其他章节更贴近学科研究前沿。例如，Mohriak *et al.* (2008) 以及 Brun & Fort (2008) 最近的专著是本书的相关章节完成后才出版的，因此他们的工作没有被选进本图册中。正因为如此，《盐构造图典》一书是一部有针对性的盐构造研究图典，可能与其他作者编撰的结构不同。

分类方面，挑战在于对入选图片进行有条理的分组整理。正如书后的词汇表所示，盐构造的命名是 100 多年来由数十位研究者所提出的，存在成因和非成因术语相纠结的现象。由于未见任何已发表的、可覆盖所有盐构造类型的分类，我们不得不在这部图册中进行相关尝试。我们的目标是尽量保持完全以几何形态进行分类，以便初学者可以很容易地划分一种盐构造样式的类型，而不必要知道它的运动学演化或形成机制。

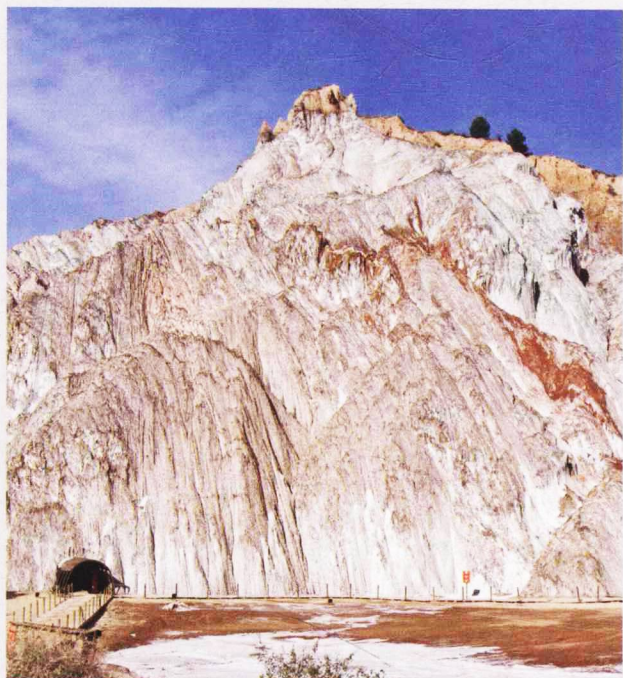
我们只是部分地实现了这一点，但在《盐构造图典》一书的图片中，仍然面临几何学分类的三个内在问题。第一，

个别图像通常不止反映一种构造类型。在某些图片中，我们忽略了它的主要构造而关注一个罕见的构造。第二，个别构造通常随不同的阶段和构造样式而演化。例如，底辟可以作为三角底辟启动，接着刺穿地表而形成盐墙，溢出而形成盐席，紧接着可以活化而形成由下降微盆地和上升盐墙构成的网格。类似这样的构造该如何分类？第三，许多构造是混合的，要么由连续生长阶段相叠置所造成，要么是两种过程共同作用的结果。例如，罗霍系统可以演化成反区域系统，或者被动底辟在区域伸展开始后可继续被动地生长。由于这三个问题的存在，我们最终利用几何学和成因标准对个别图片进行了类型划分。这样的分类当然有点不统一和另类，但我们发现它最实用。

在对图片进行精选和分类后，我们需要对图进行注释和撰写构造方面的文字说明。此处的策略是注重突出每张图的重点。在每张图中，我们撰写了我们认为非常有意义的、独特的或需要特别阐述的部分，而不是试图对每一个构造进行详尽地分析。某些文字说明仅仅关注几何学形态，而其他的则包括运动学和动力学方面的进展性见解。由于《盐构造图典》是一部图册而非教材，它的信息不是以逻辑顺序来呈现的。但图中的文字说明覆盖了相当广的议题，盐构造作用的教材中所可能包含的一些议题在此也有所涉及。我们希望初学者和专业人士发现《盐构造图典》是一部有益于开启信息之源的著作，以激发研究者在盐构造的几何形态学、起源和演化方面的新见解。

目 录

第一章 盐枕和盐背斜	1
第二章 盐株和盐墙	31
第三章 三角盐底辟	85
第四章 凹进底辟	109
第五章 拉张盐滑脱构造	121
第六章 挤压盐滑脱构造	141
第七章 盐席	161
第八章 微盆地	217
第九章 罗霍系统	235
第十章 反区域系统	245
第十一章 位置图	253
参考文献	269
主题词汇表	279
地理索引	295



第一章 盐枕与盐背斜

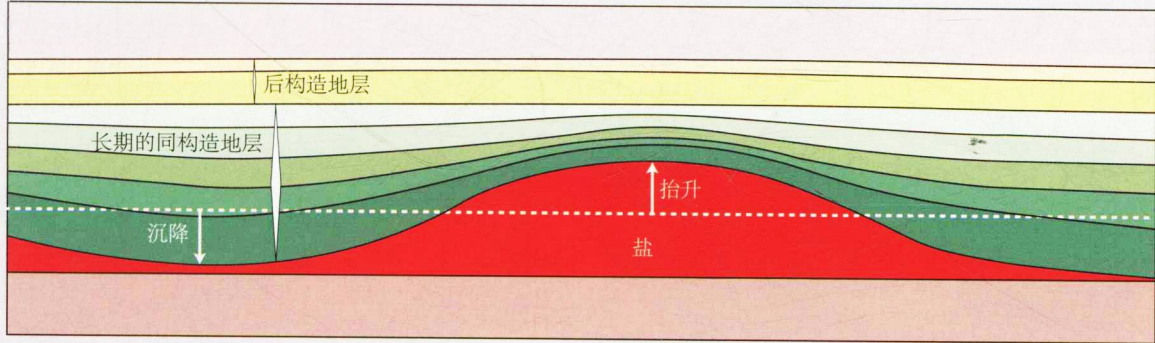
盐核褶皱具有相对简单的几何形态，是向人们展示盐构造最为理想的入门“教科书”。这些褶皱随处可见，易于识别，出现在所有的盐构造盆地中。

当盐岩遭受上部地层的均衡挤压时，上涌的盐层就形成盐核背斜。平面上，当盐核背斜的长宽之比小于2时，称为盐枕（salt pillows）；当长宽之比等于或大于2时，称为盐背斜（salt anticlines）。纵剖面上，盐背斜与盐枕则难以区分。

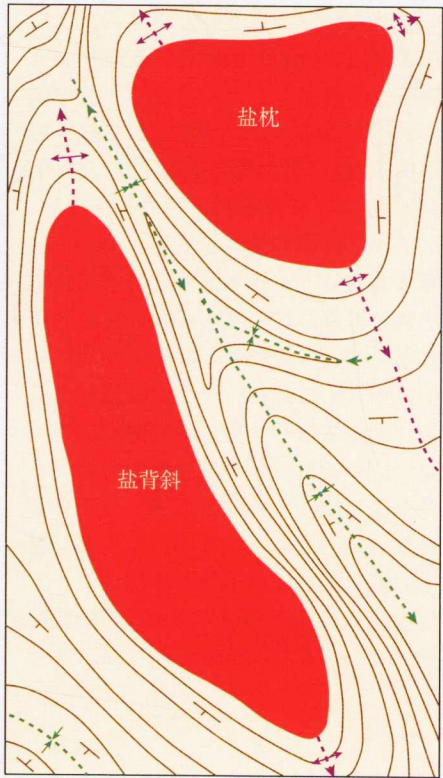
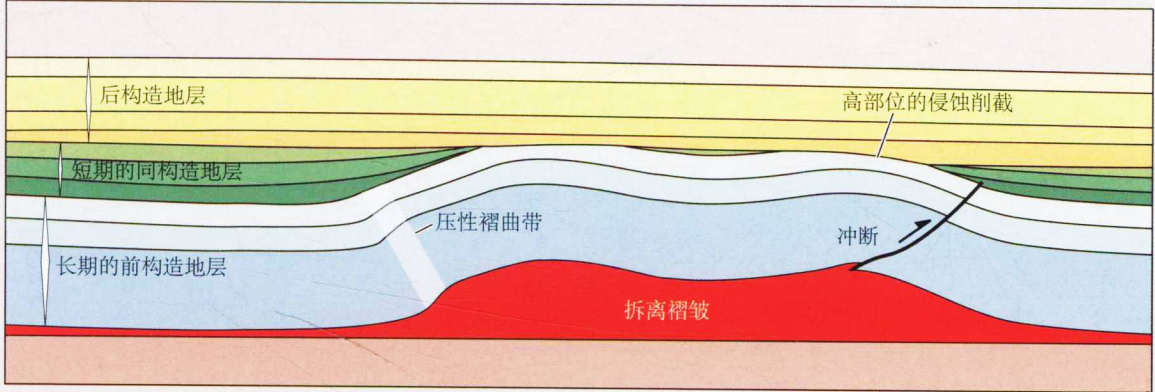
盐枕和盐背斜的形成过程可以从上覆沉积物的厚度变化来推断。对大量的盐枕和盐背斜的研究表明，它们主要有两

种形成方式：第一种，一套薄到几乎不存在的前构造地层被另一套经过长期沉积形成的同构造地层所覆盖。这种模式显示了盐构造生长的方式，其中盐流是重力作用的结果。第二种，同构造运动阶段相对短暂，而同构造沉积物长期被夹在前构造和后构造沉积地层之间。这些压性褶皱是区域性挤压造成的；与持续作用的重力荷载不同，这类区域性挤压经常是间歇式的。与盐运动模式相比，这些压性盐枕和盐背斜不但以大量的突发性地层减薄为特征，而且还可能拥有次级的压性构造，例如冲断和膝折褶曲带。

盐动力盐枕或盐背斜



压性盐枕或盐背斜

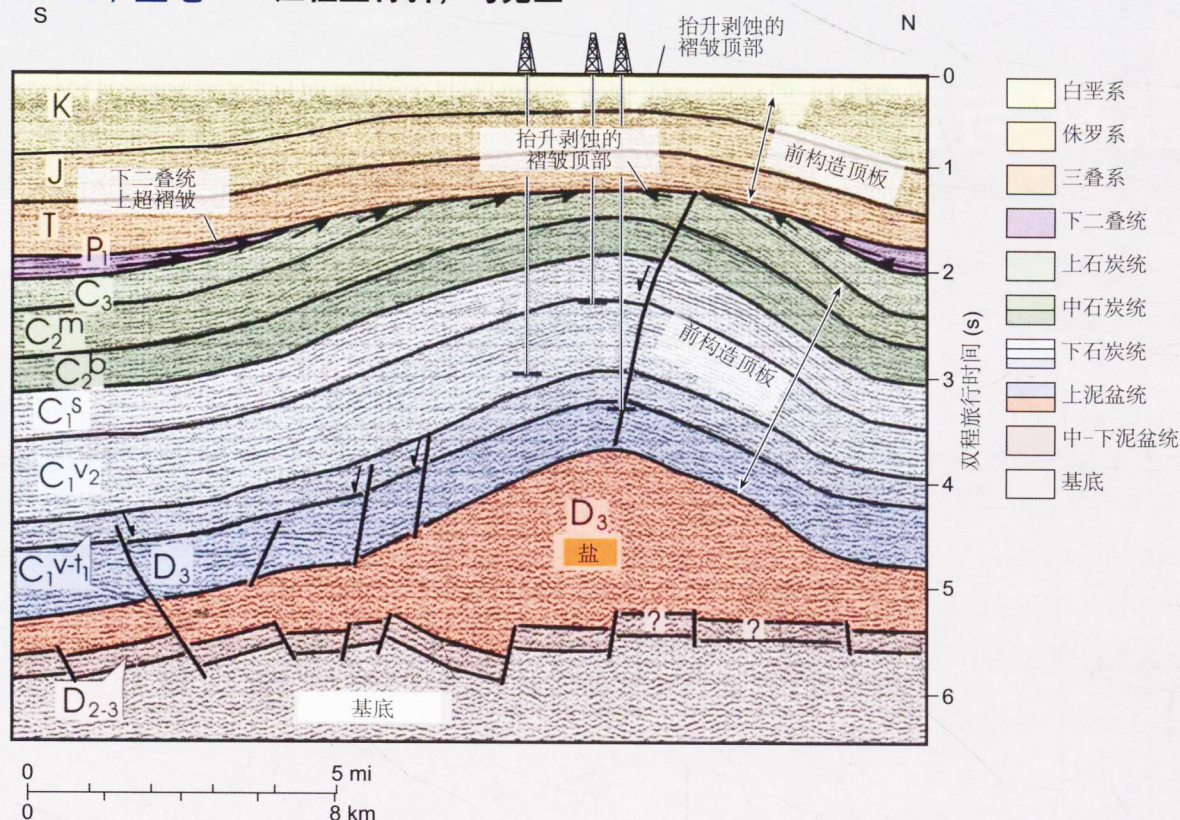




第聂伯-顿涅茨 (Dnieper-Donets) 盆地——压性盐背斜, 乌克兰

图 1.01 挤压期的盐背斜生长

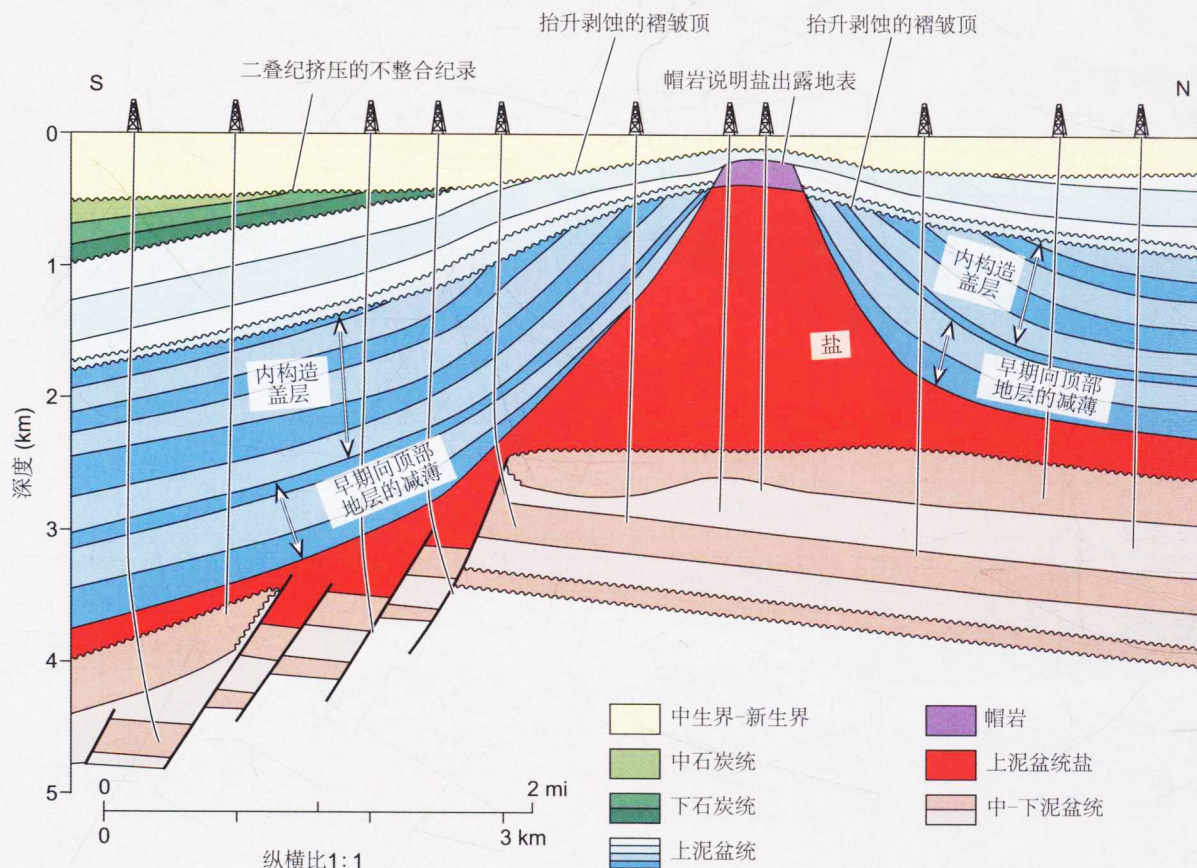
该盐背斜形成始于早二叠世的挤压期；它的发展壮大发生在晚白垩世的第二次挤压。两次变形为挤压运动的证据包括 (1) 背斜顶部的抬升与剥蚀, (2) 一个巨厚的前构造顶板, (3) 短暂的变形事件。出现在构造顶部的小型正断层被认为是顶部地层弯折的结果。据 Stovba & Stephenson (2003) 修改。



第聂伯河-顿涅茨盆地——盐背斜, 普里皮亚海槽 (Pripyat Trough), 乌克兰

图 1.02 可能的挤压期的盐背斜生长

构造顶部早期变薄的地层显示这个底辟源自一个在上泥盆统盐沉积之后随即形成的低幅度盐背斜。在泥盆纪被激活并分隔盖层之前, 这个背斜被埋藏在一套巨厚的均厚地层之下 (内构造地层)。这个激活事件是压性的, 其证据包括 (1) 被抬升和剥蚀的构造顶部, (2) 一个巨厚的内构造盖层, (3) 一次短暂的抬升。重新激活事件有挤压性的迹象, 但是, 任何发生在晚泥盆世的挤压事件都与人们对那个地质时代的认知相悖; 人们普遍认为晚泥盆世是一个拉伸、火山活动和盆地形成的时期。晚泥盆世这个背斜显示在普里皮亚海槽存在一个尚未被识别的构造事件。另一种解释是地层几何形状不准确。发生在二叠纪的第二期挤压事件使得该构造进一步发展壮大, 引起活化构造顶部被剥蚀。据 Stovba & Stephenson (2003) 修改。



大盐漠 (Great Kavir) ——盐丘与盆地, 伊朗

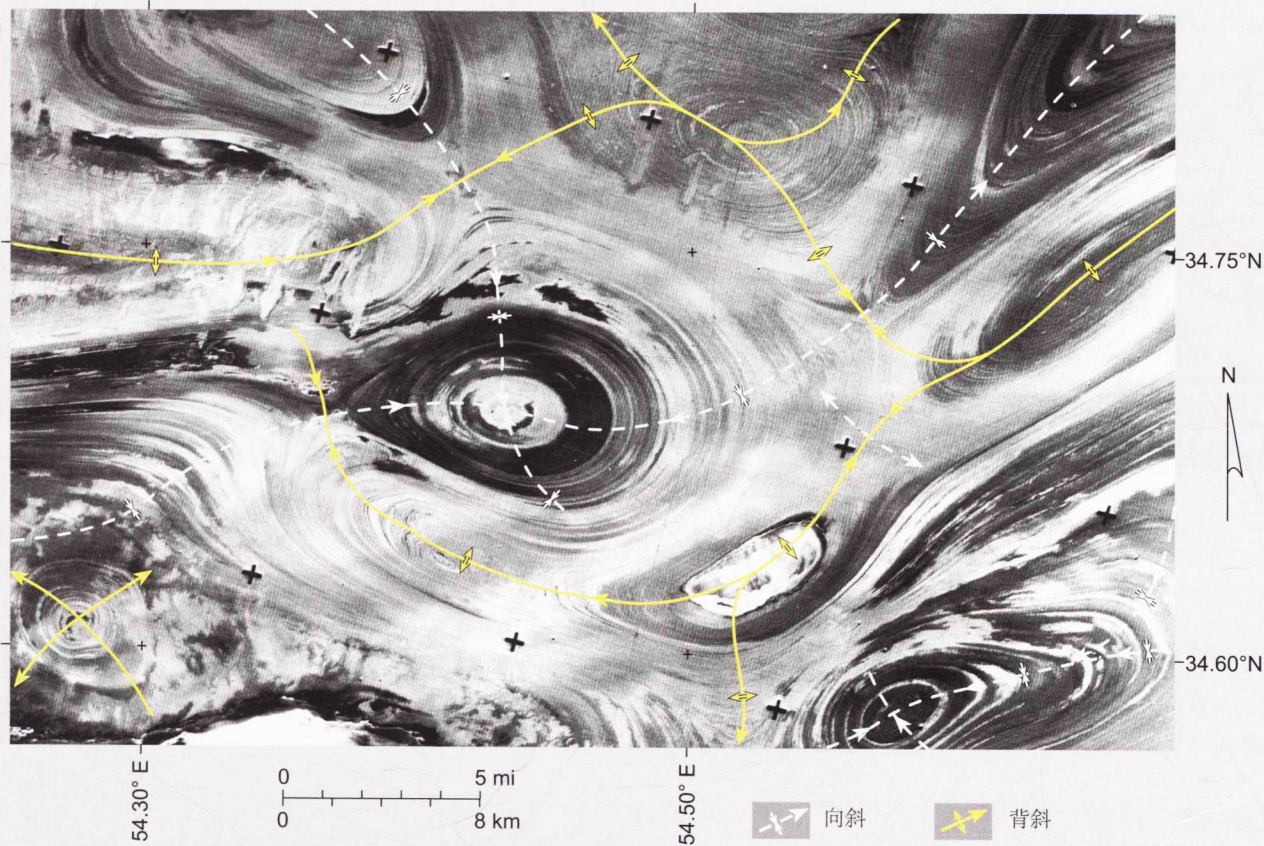


图 1.03 盐上褶皱干涉模式

出现在中新统红层上部的干涉构造大概是从中新统蒸发岩中滑脱形成的。四个穹窿被一个环绕中央盆地的背斜圈连接在一起, 这是穹窿与盆地干涉的非典型模式。位于中南部的白色椭圆是其中一个构造穹窿的剥蚀分裂的盐核。X 状的鞍部出现在两个穹窿和两个盆地的四条轴线连接处。Jackson 等 (1990) 将这种模式解释为东北向的厄尔布尔士山 (Alborz) 挤压褶皱与一个盐背斜锥形之间的相互干涉。返束光导摄像管图像 83117706160XB 由 (美国) 国家海洋和大气局提供。据 Jackson 等 (1990)。

大盐漠 ——扭压断层附近的盐丘和盆地, 伊朗

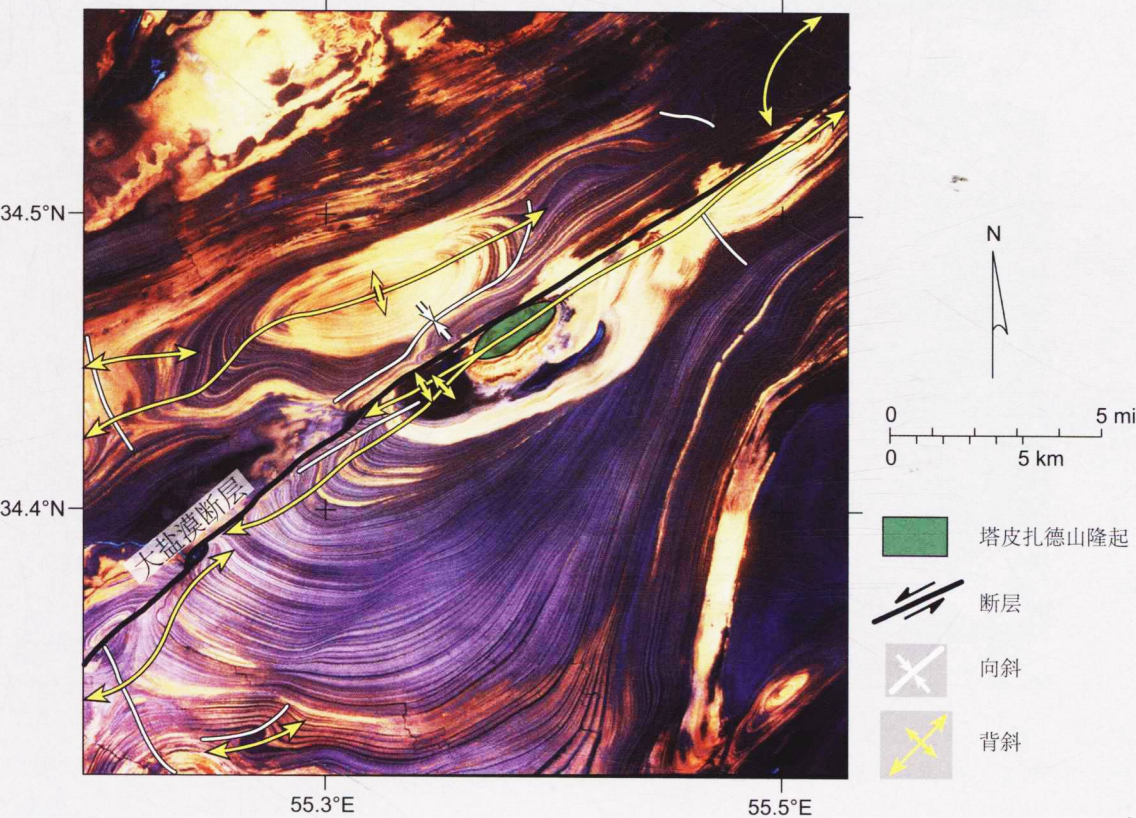


图 1.04 扭压盐背斜

大盐漠扭压断层长 700 km, 它沿中新统蒸发岩薄层滑脱而形成褶皱的中新统红层上部地层。西南的断层崖高 10 m, 上盘北倾。塔皮扎德山 (Tapeh Zard, 黄色山) 核部是片岩, 是盐漠中部地区唯一出露的前白垩系基底。断层西北面与盐核褶皱之间的微小夹角说明该断层有左旋分量。据 Jackson 等 (1990) 解释。Landsat 图像由 ConocoPhillips 遥感实验室提供。



大盐漠——西杜拉希亚 (West Dulasian) 背斜中西段, 伊朗



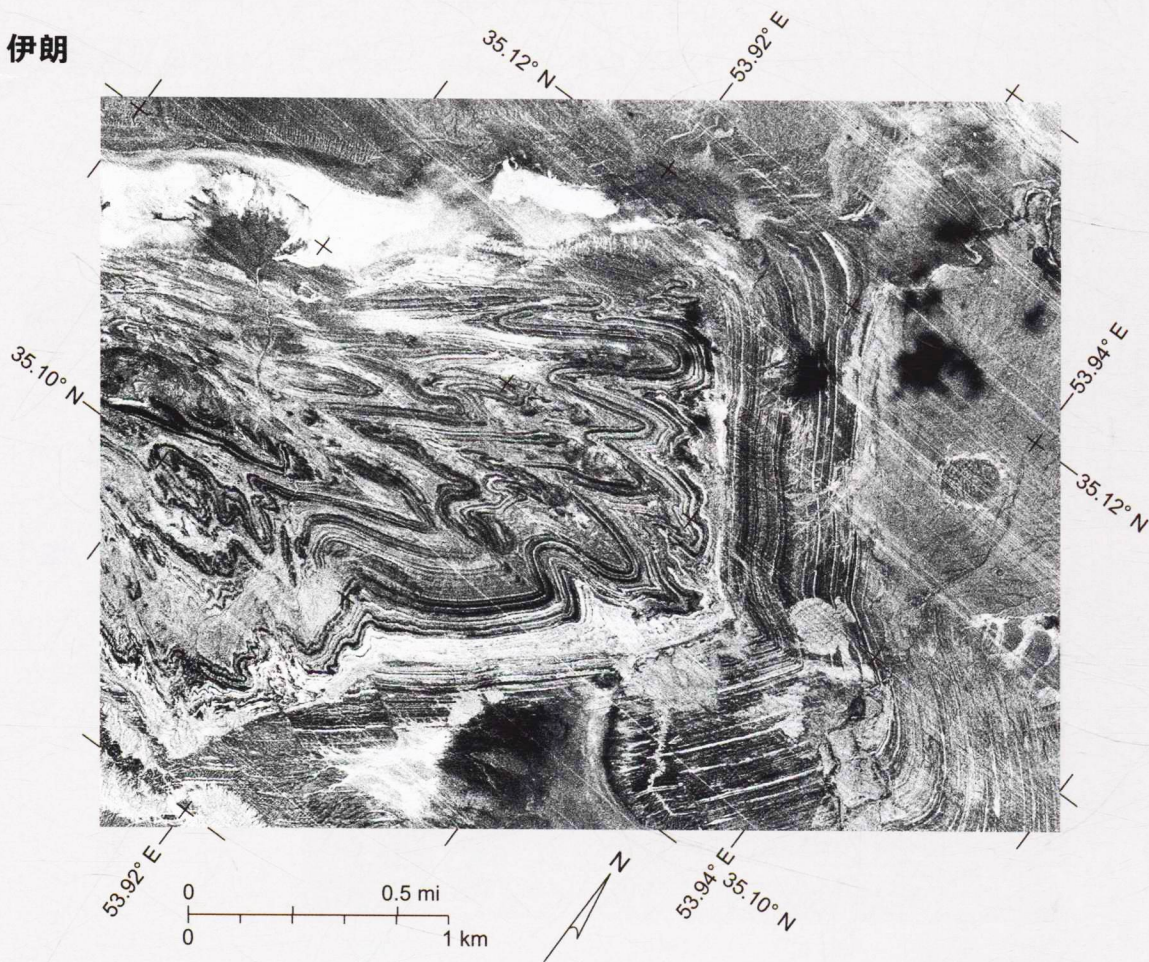
图 1.05 挤压盐背斜的内部褶皱

互层的盐岩、石膏和泥岩使得中新统蒸发岩呈现出清晰的条带, 用来识别西杜拉希亚背斜核部出露的蒸发岩的内部构造。一系列风格近似的流褶皱包括西南部的椭圆状闭合模式, 这些可能是由背斜核部巨大的剪切作用形成的鞘褶皱。更西端, 背斜与上覆层的南部接触面构造是协调的, 但是与背斜内部的等斜褶皱不协调。背斜核部的北部接触面被现代盐湖所覆盖。更东部的构造参见图 1.06。据 Jackson 等 (1990)。

大盐漠——西杜拉希亚背斜东端, 伊朗

图 1.06 挤压盐背斜的内部褶皱

互层的盐岩、石膏和泥岩使得中新统蒸发岩呈现出清晰的条带, 用来识别西杜拉希亚背斜核部出露的蒸发岩的内部构造。在蒸发岩褶皱核部东端的斜交剖面上, 圆形褶皱清晰可见。这些褶皱朝核部接触剪切带向外上方消亡。断层在褶皱南翼错断红层上部地层。东部的黑色块体是云影。白色斜线是负向擦痕。更西部的构造参见图 1.05。照片来自 Worldwide Aerial Surveys, Inc.。



墨西哥湾盆地 (Gulf of Mexico Basin) —— 阿特沃特 (Atwater) 褶皱带, 美国近海

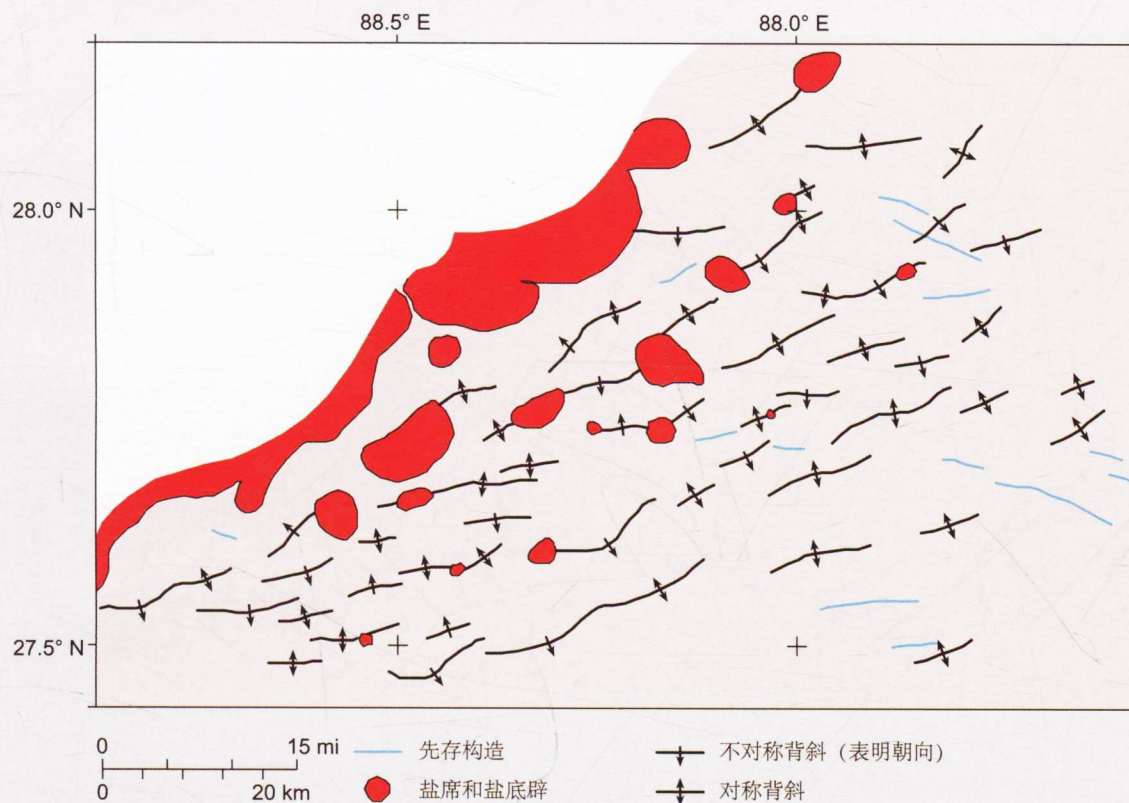


图 1.07 挤压型趾状构造的生长发育

中新统-上新统阿特沃特褶皱带位于北墨西哥湾盐盆的下倾末端, 接近盐的向海终端。褶皱带的形态受到西北部盐席综合体的控制。盐底辟常形成于背斜轴部, 通常是在褶皱的倾伏端或褶皱走向改变的地方。盐底辟的形成早于挤压开始的时间, 并且构成了很多褶皱的核部。褶皱轴面有着向海和向陆两种倾向, 这在盐上滑脱构造里是非常典型的。据 Rowan 等 (2000)。

墨西哥湾盆地——麦道格 (Mad Dog) 与 K2 盐背斜, 阿特沃特褶皱带, 美国近海

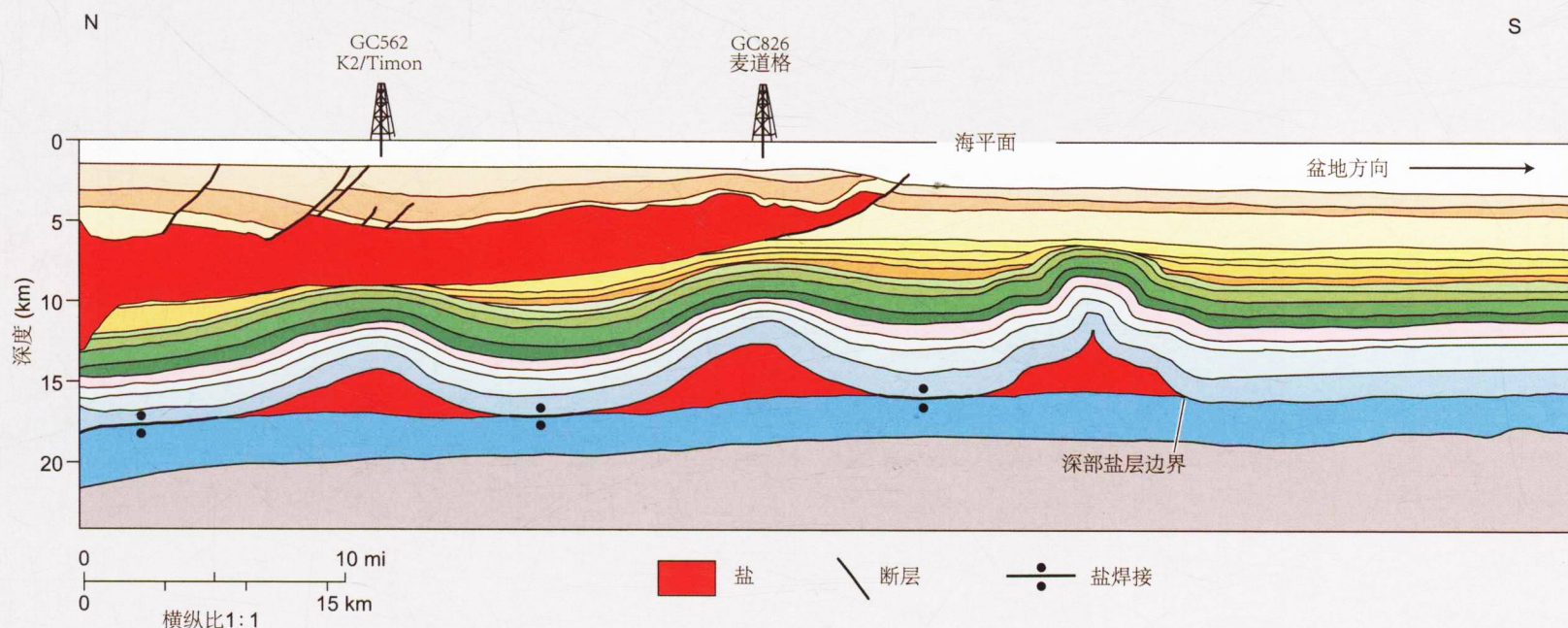


图 1.08 挤压型盐背斜的生长发育

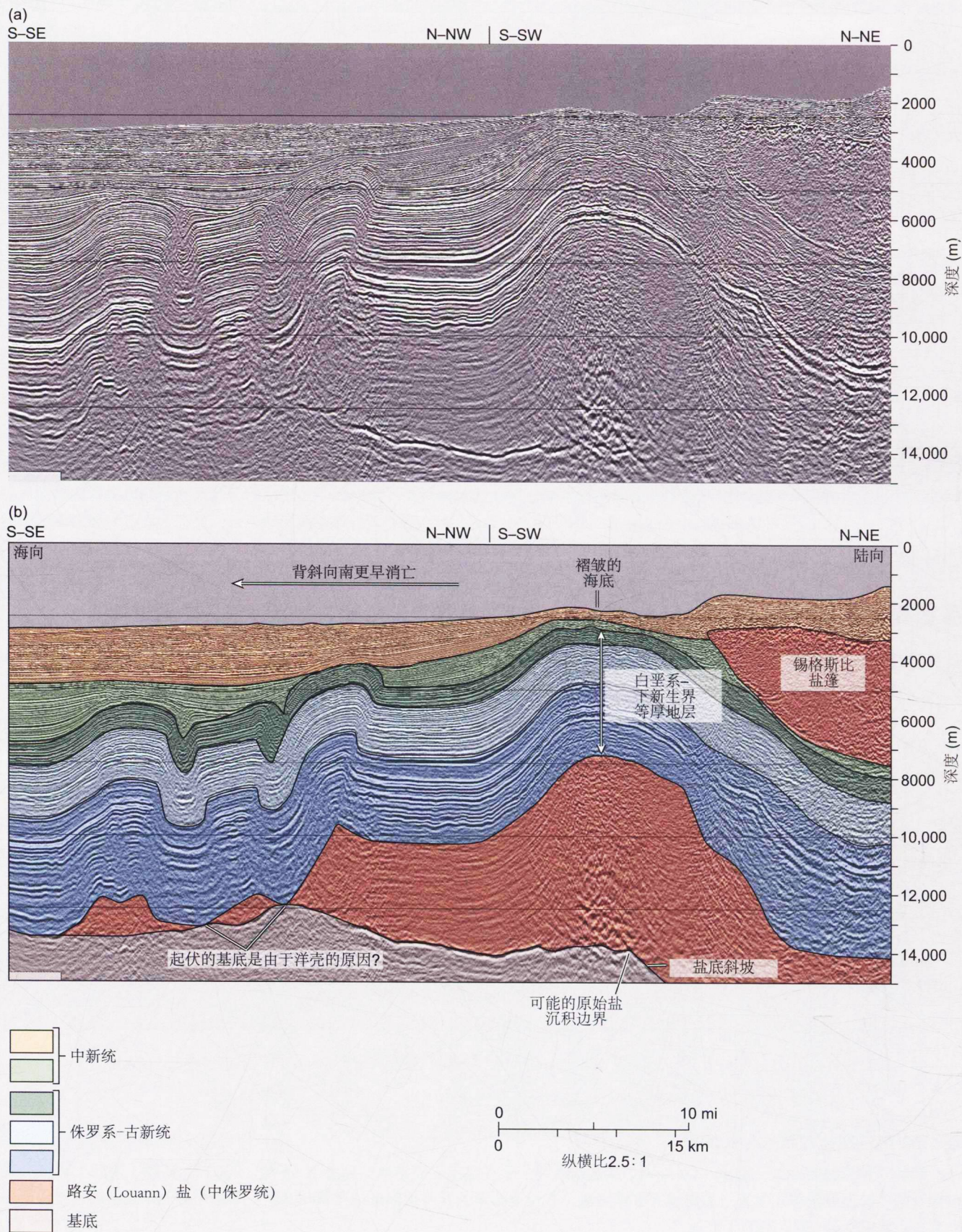
阿特沃特褶皱带形成于路安 (Louann) 盐盆近海端一个深部中生界异地盐席之上 (Peel, 2001)。前缘 (南部) 背斜上覆于深部盐席的海向尖灭点。该前缘背斜在其他背斜停止发育之后继续吸收缩短量, 在较为圆滑的背斜顶部形成了箱状背斜。褶皱带被一个浅层的、终止于一条顶板边界逆断层的异地盐席所覆盖。据 Rowan 等 (2004) 修改。



墨西哥湾盆地——珀迪多 (Perdido) 褶皱带的挤压盐背斜, 美国近海

图 1.09 挤压盐背斜的生长发育

珀迪多褶皱带白垩系-下新生界等厚地层说明挤压从渐新世才开始。向海末端的褶皱比向陆的褶皱幅度小一些, 核部盐更少, 消亡的时间也更早。褶皱变形的海底表明在褶皱带北端的挤压仍在继续。锡格斯比 (Sigsbee) 盐篷在北部背斜发育期间开始侵入, 并在背斜后翼聚合。褶皱带向陆末端之下的一个很大的盐底斜坡也许标志着盐盆原始的向海尖灭点。如果该假设成立, 那么该斜坡向海端的盐源自一个早期异地盐席。珀迪多褶皱带之下的盐基呈不规则状, 可解释为洋壳或者火山壳。地震剖面来自于 CGGVeritas 公司。



墨西哥湾盆地——盐动力背斜，圣马洛（St. Malo）区块，美国近海

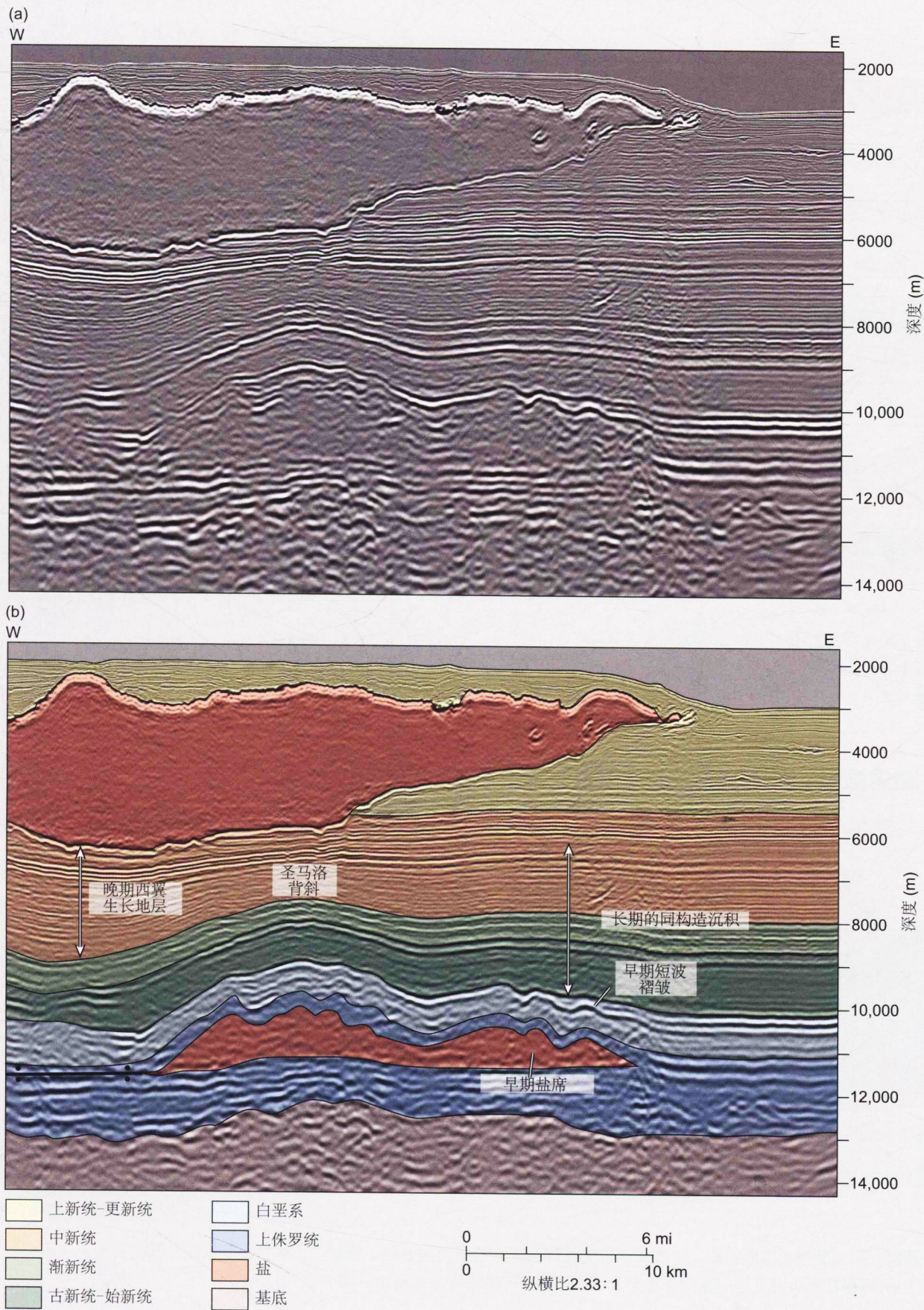


图 1.10 盐背斜的盐动力学生长机制

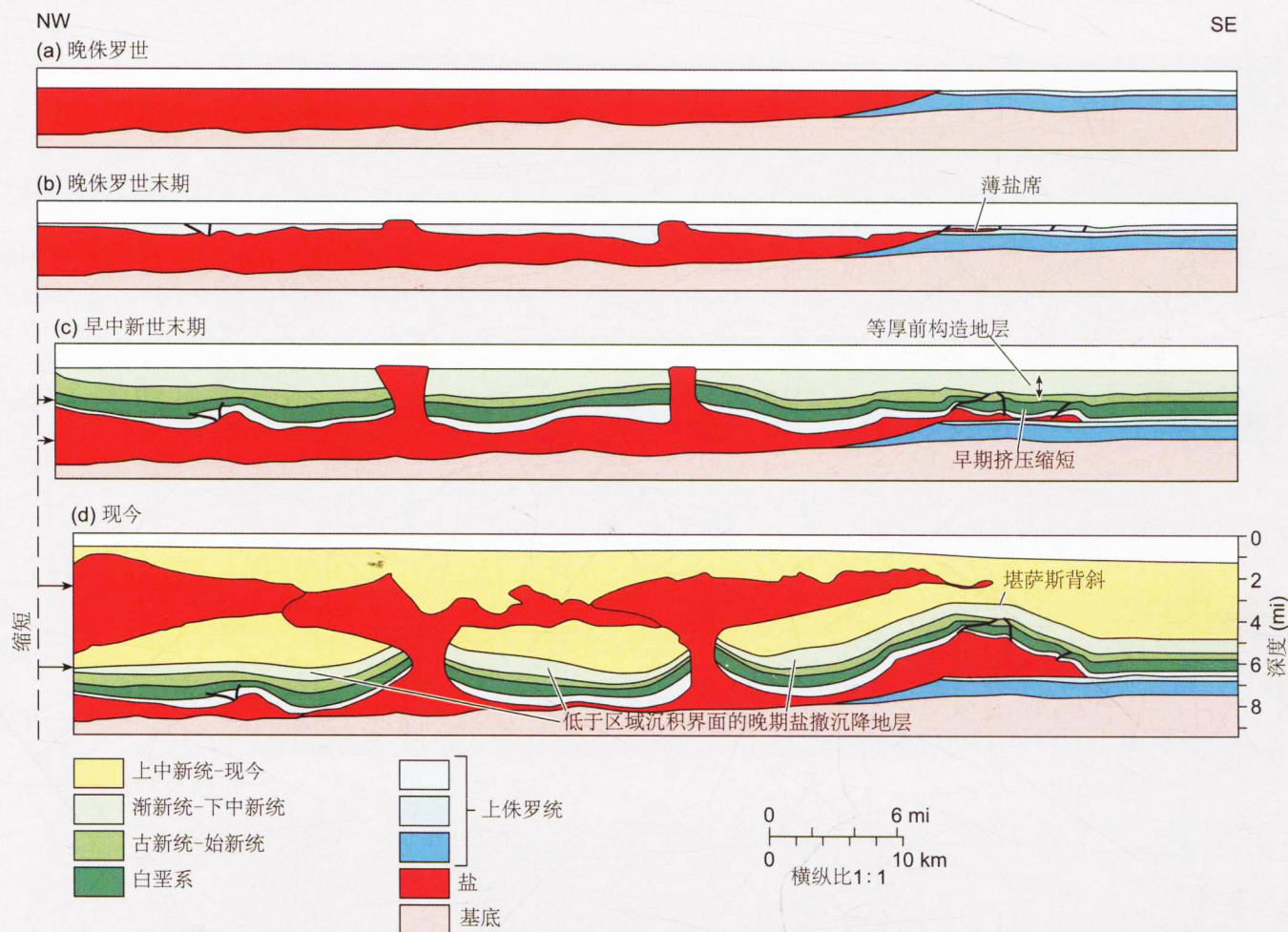
圣马洛盐背斜覆盖在来自路安盐盆向海末端的一条异地盐席之上。该盐席原本是墨西哥湾重力扩展系统的挤压前缘。由于中生界顶板较薄,挤压使得盐席顶板变形为短波长褶皱。挤压在白垩纪末期结束,此时该构造开始了长期、缓慢的生长。顶板在古新世沉积加厚,使得后期褶皱波长明显大于中生界褶皱。在这个历时很长的同构造沉积期间(古新世-中新世),盐流作用甚于挤压,因此背斜生长的第二阶段被认为是盐运动的结果。与此解释一致的是该背斜的翼部旋转是穿时的。东翼几乎停止变形后,西翼发生沉降。地震剖面来自CGGVeritas公司。



墨西哥湾盆地——异地盐席之上的挤压盐背斜，堪萨斯（Kansas）区块，美国近海

图 1.11 盐背斜的压性生长

(a)~(b) 晚侏罗世海底扩张开始之后，盆地倾斜引起盐向东南流动，并在深海平原上形成了一条很薄的盐席。(c) 一次较早的挤压使得盐席之上发育了小冲断，随后堪萨斯背斜在整个古新世期间均未活动，沉积了一套较厚的等厚地层。(d) 晚中新世，沿基底盐滑脱层重新开始的滑移在盐盆前缘形成堪萨斯背斜，而这套等厚地层也发生褶皱变形。据 Mount 等 (2007) 修改。



侏罗山（Jura）褶皱带——维森施坦（Weissenstein）背斜，瑞士

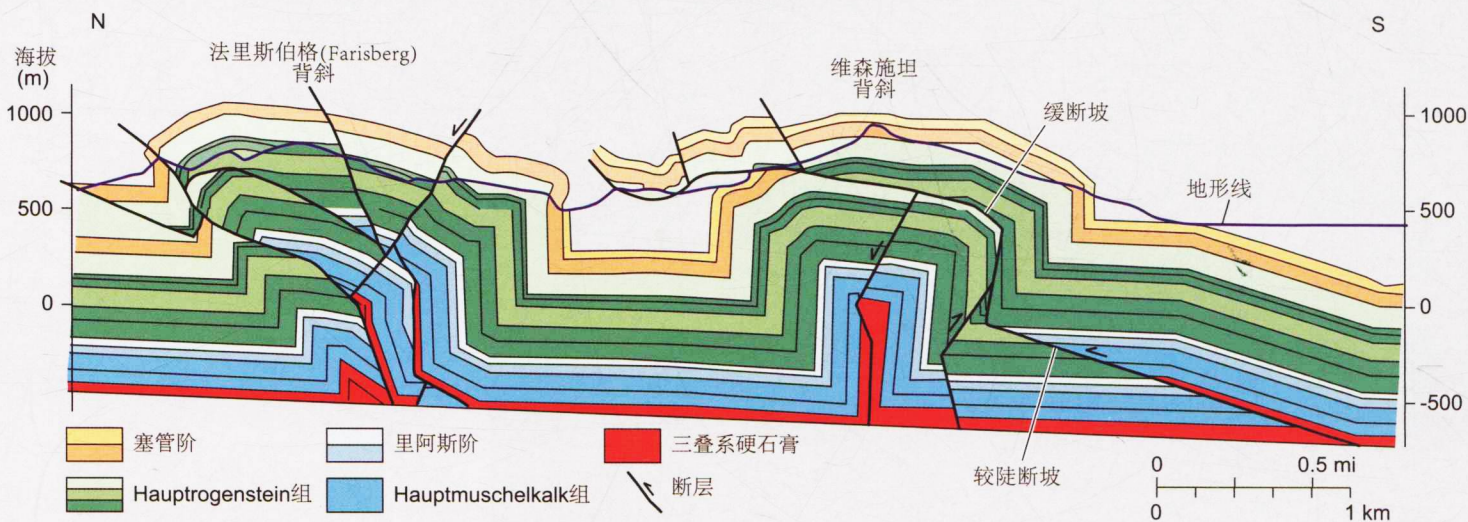


图 1.12 薄盐层上的挤压

维森施坦背斜是典型的箱状背斜，其被一条大型褶皱冲断错断。该断层从三叠系薄的硬石膏拆离层开始，断坡向上穿过里阿斯阶，然后转为一个平缓的断坡向上到达侏罗阶。该断层在图 1.13 所示的相邻剖面也可见。该剖面基于 Meler (1977) 的箱状褶皱概念。据 Bitterli (1990)。

侏罗山褶皱带——维森施坦背斜（顿来恩峡谷，Dunnern Gorge），瑞士

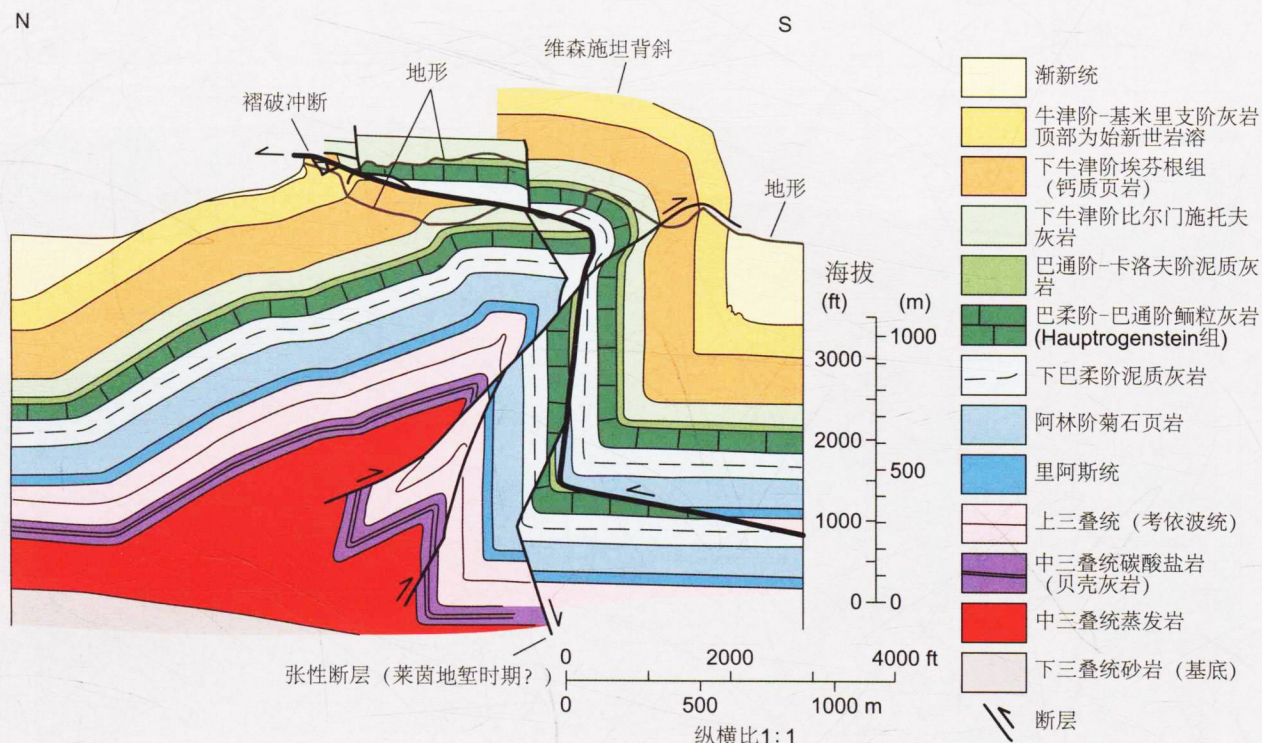


图 1.13 薄盐层上的挤压缩短

切割南倾背斜的断层包括：
(1) 侏罗纪挤压形成的褶皱冲断；
(2) 被左旋走滑断层激活的较新的拉张断层。该大型褶皱冲断与图 1.12 所示相邻剖面中的为同一条。据 Meier (1977)、Laubscher & Bernoulli (1980)。

宽扎 (Kwanza) 盆地——多相盐背斜，安哥拉近海

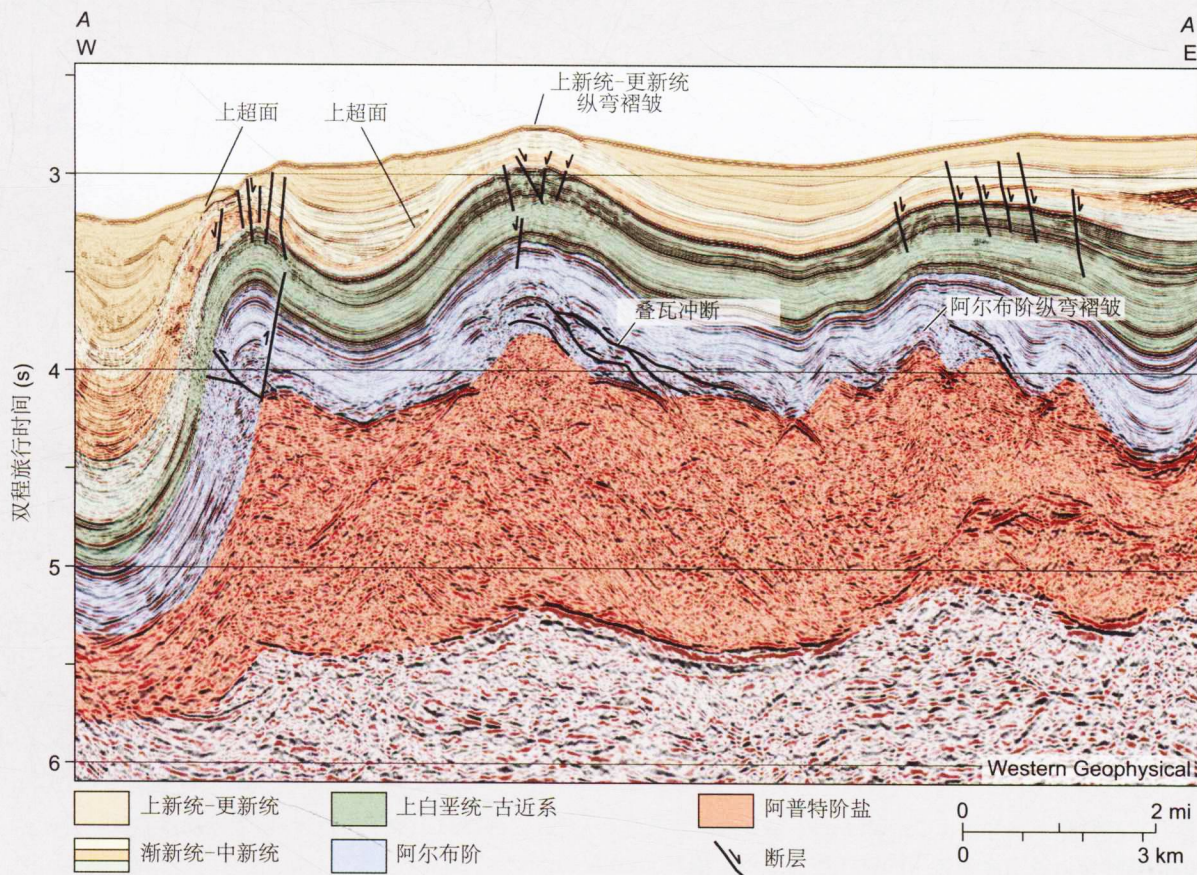


图 1.14 厚盐层上的挤压缩短

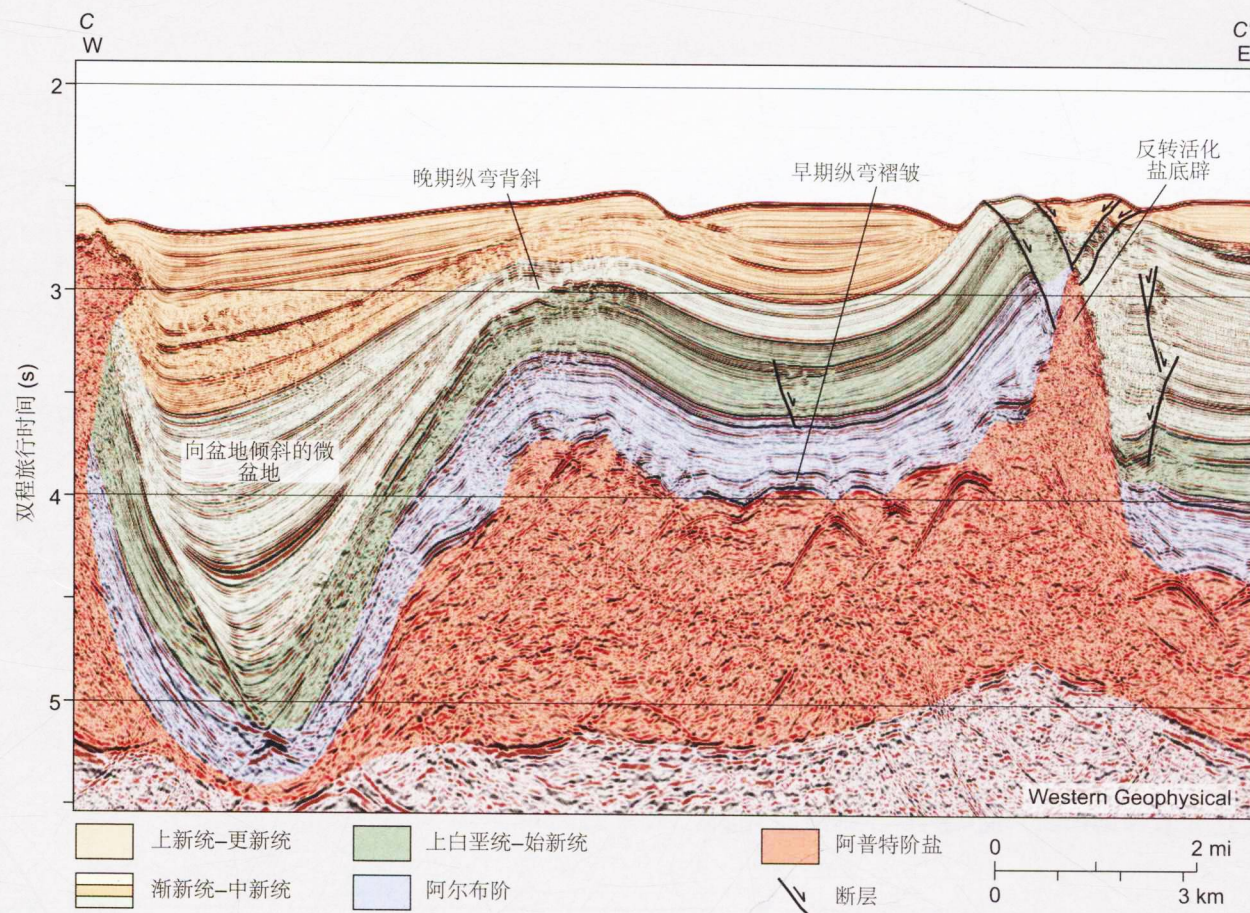
一系列纵弯褶皱和叠瓦冲断表明在早白垩世阿尔布期 (Albian) 发生了一次挤压运动。在经历了构造平静期之后，新生代生长褶皱沿下白垩统阿普特阶 (Aptian) 盐层滑脱，内部盐流作用聚集膨大。新生界在盐区上聚集。朝向背斜的上超面和地层减薄表明褶皱时间是古近世-新近世。地震剖面由 WesternGeco 公司提供，地震解释由 Martin Jackson 和 Mike Hudec 提供。



宽扎盆地——活化盐背斜，安哥拉近海

图 1.15 厚盐层上的挤压缩短

一系列纵弯褶皱和叠瓦冲断表明在阿尔布期发生了一次挤压运动。在经历了构造平静期之后，新生界生长褶皱沿阿普特阶盐层滑脱，内部盐流作用聚集膨大。新生界在盐区上聚集。剖面右边，一个活化盐底辟的生长期贯穿晚白垩世，之后因上新世-更新世的挤压作用而发生反转。剖面左边是一个长期处于活动状态的微盆地。地震剖面由 WesternGeco 提供，地震解释由 Martin Jackson 和 Mike Hudec 提供。



宽扎盆地——盐背斜，安哥拉

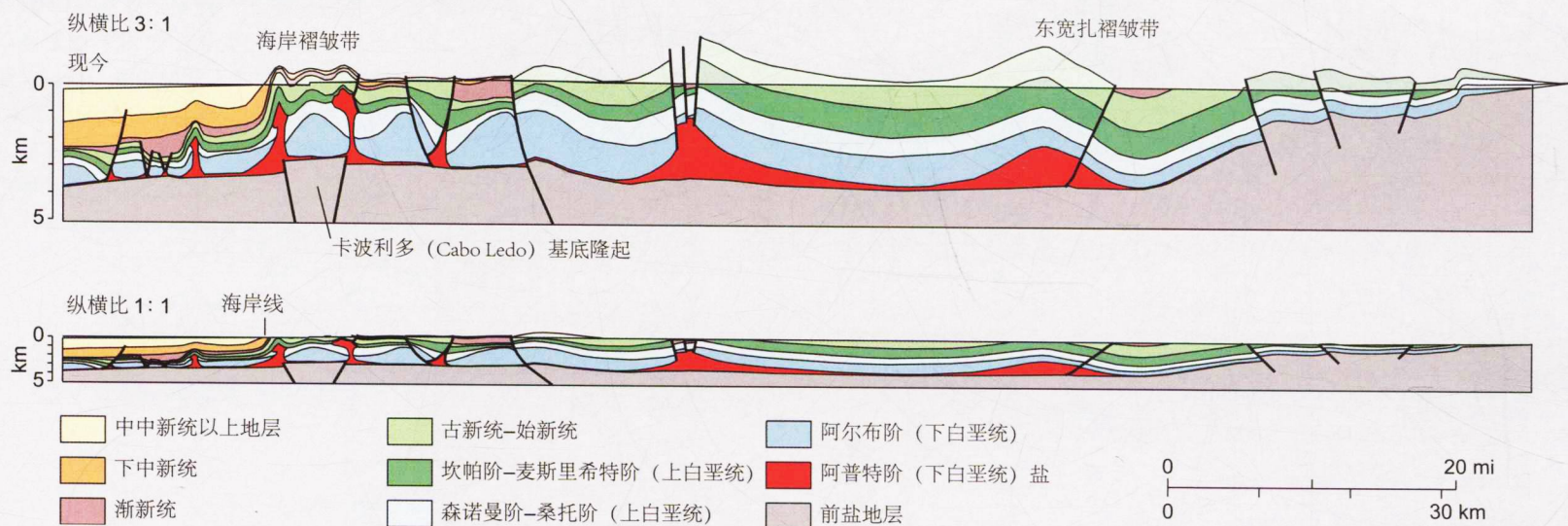


图 1.16 与基底反转相关的挤压缩短

东宽扎 (East Kwanza) 褶皱带的基底卷入式冲断和卡波利多 (Cabo Ledo) 基底隆起在古近世-新近世的抬升记录了古近世-新近世的基底反转。在盐层之上，同一挤压事件形成了剖面中部舒缓的挤压褶皱以及海岸褶皱带的挤压型盐底辟。据 Hudec & Jackson (2002)。

北德盆地 (North German Basin) —— 盐背斜附近龟背构造的生长, 杜斯特 (Düste) 油田, 德国

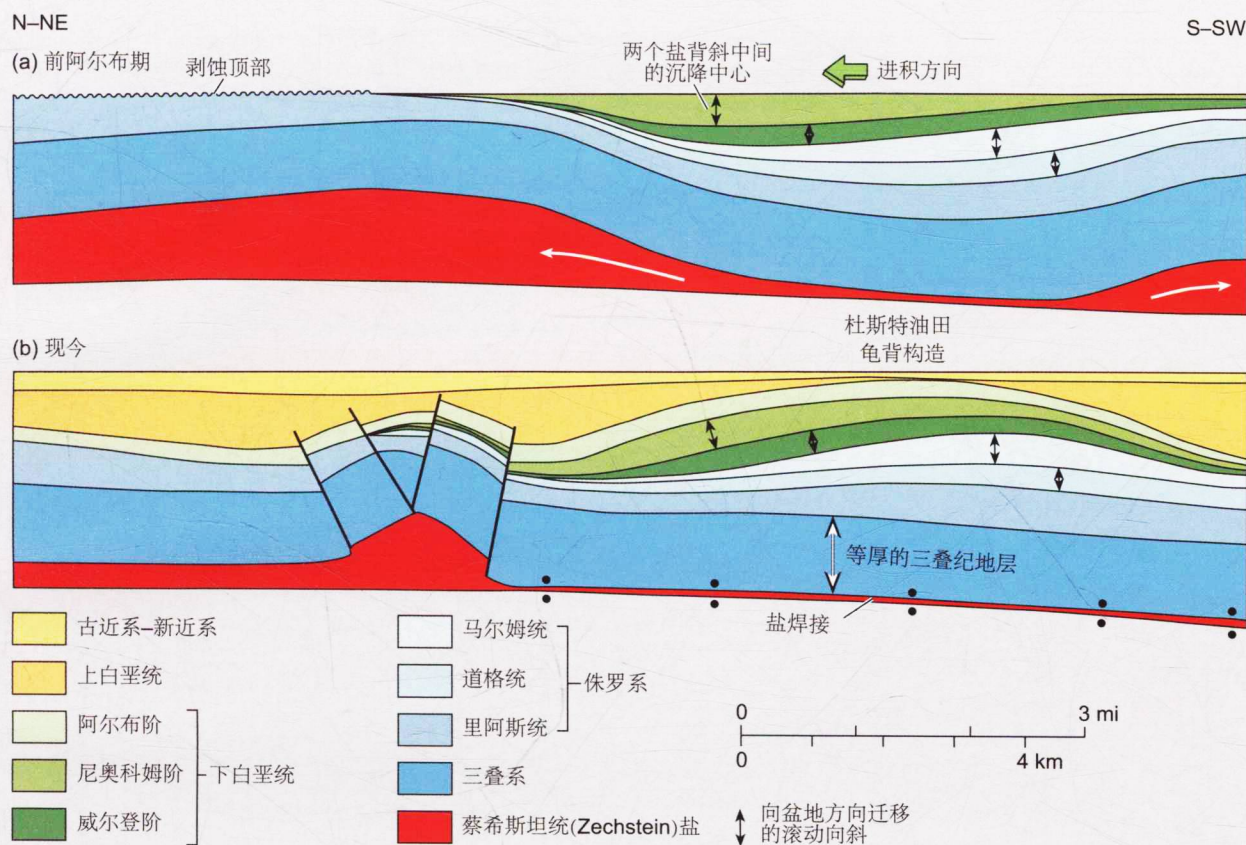


图 1.17 盐背斜的沉降

前阿尔布期的平衡恢复显示出两个盐背斜之间存在一个从上侏罗统至下白垩统的沉积中心。该沉积中心下方的盐焊接继而在晚白垩世引起了盐撤作用，使得盐向两侧的背斜流动。该沉降作用使得老的沉积中心成为一个构造高区，形成一个龟背构造。该龟背背斜位于一套很厚的、几乎等厚的三叠系沉积之上。被延后的龟背构造形成时间可能表明了沉积物加载于下伏盐层的侏罗纪进积作用。该差异荷载引起了不均衡的盐撤作用，并最终形成了龟背构造。据 Trusheim (1960) 修改。

北德盆地——挤压盐背斜, 巴瑞恩盐背斜, 德国

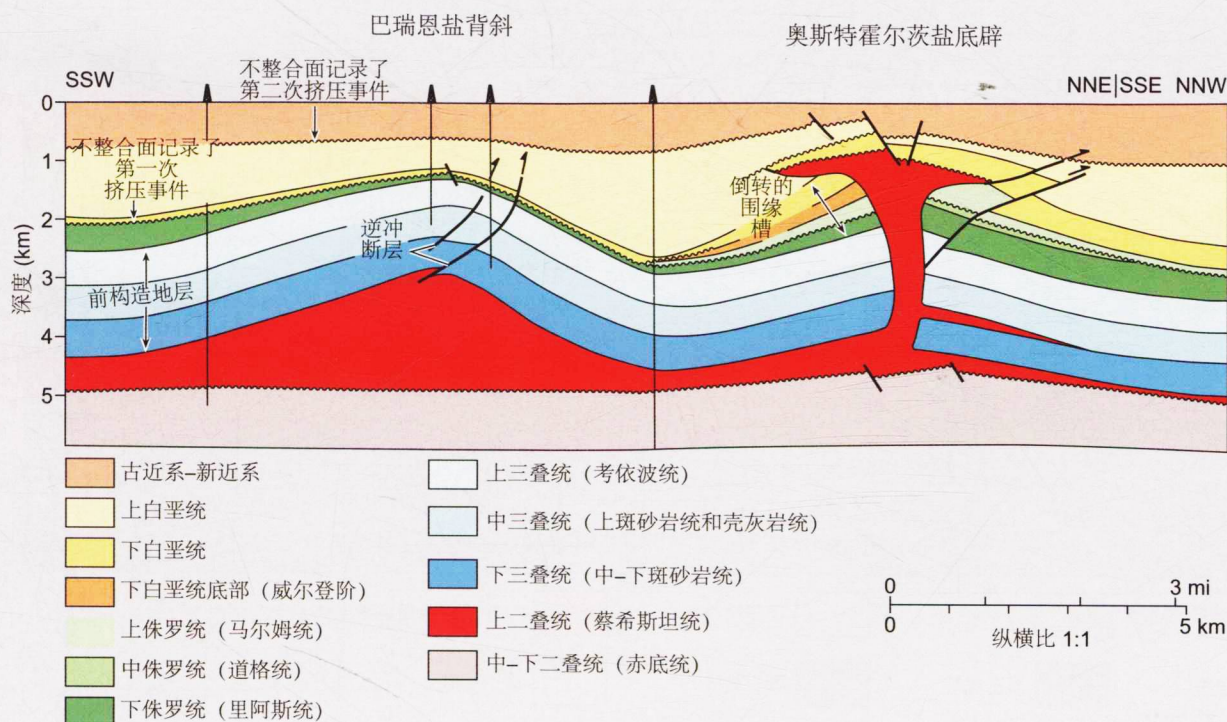


图 1.18 盐背斜的挤压生长

巴瑞恩 (Barrien) 和奥斯特霍尔茨 (Osterholz) 盐构造附近的地层从三叠纪甚至可能直到中侏罗世 (主要不整合面的时间) 均是等厚的。这些原为水平的地层表明盐背斜可能直到中侏罗世才开始变形。在巴瑞恩的厚而坚硬的前构造地层卷入褶皱变形表明，从中侏罗世开始形成的盐背斜是挤压性质的 (同图 1.19 所示杰斯特德盐背斜一样)，这与背斜顶部发育的小冲断相吻合。晚白垩世 - 新生代早期的持续挤压作用使得盐背斜和盐底辟增大，并在奥斯特霍尔茨盐底辟的侧面形成了冲断。据 Baldschuhn 等 (2001) 修改。