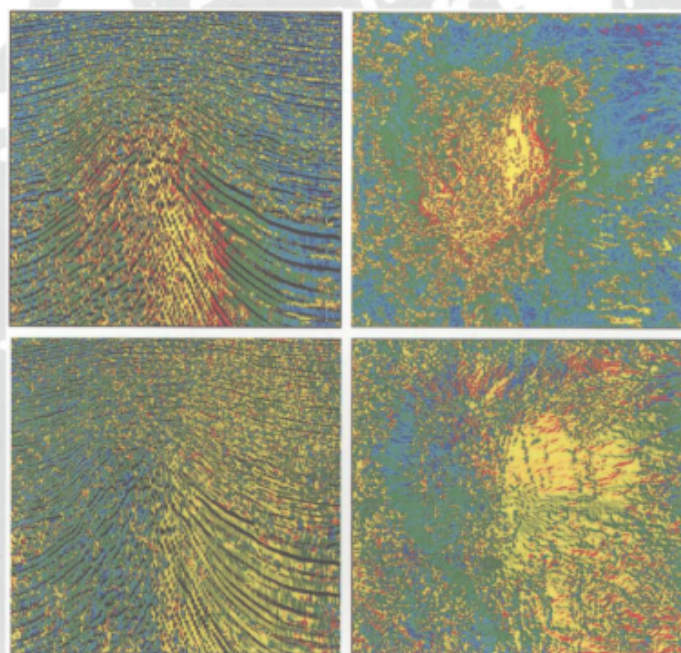


2006年SEG优秀教师短训班教材
—— 优秀教师教材系列之9 ——

地震属性 在构造和地层学中的应用

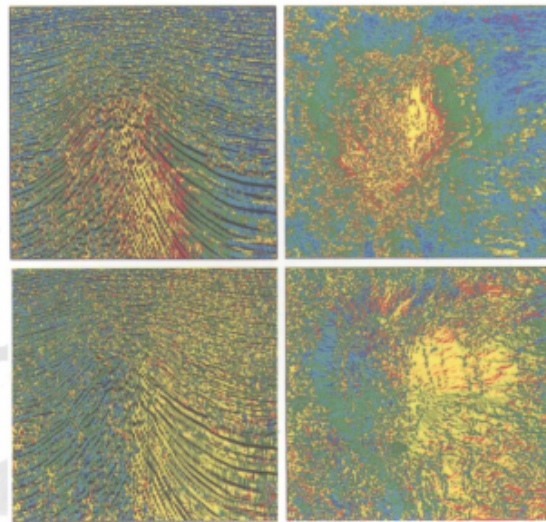
〔加〕S. 肖普拉 〔美〕K.J. 马弗特 著
夏义平 黄忠范 徐礼贵 李明杰 张延庆 郑良合 译



中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司
中国石油集团物探技术培训中心



Seismic Attribute Mapping of Structure and Stratigraphy



2008年12月印刷
工本费: 120.00 元

地震属性 在构造和地层学中的应用

[加] S. 肖普拉 [美] K. J. 马弗特 著

夏义平 黄忠范 徐礼贵 李明杰 张延庆 郑良合 译

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司
中国石油集团物探技术培训中心

前 言

《地震属性在构造和地层学中的应用》一书是S. 肖普拉 (Satinder Chopra) 和 K. J. 马弗特 (Kurt J. Marfurt) 共同编著, 由马弗特讲授的2006 年度优秀教师短训 (DISC) 教材。所应用的图是将要出版的《地震属性在有利圈闭识别和油藏表征中的应用》一书的主要图件。

地震数据具极其丰富的信息, 它为解释人员提供了反射同相轴的振幅、频率、外形等的量度。新的属性每年都在增加, 地震属性分析正在快速成为主要的研究领域。各种属性, 如倾角、倾向方位角、相干性、曲率、振幅结构以及谱分解的估算等, 可极大地加快新采集三维数据体的解释, 并能对老的三维数据体产生新的认识。成功利用地震属性不仅需要理解它们的物理含义, 同时还需了解地震数据的质量、资料区的沉积和构造作用等情况。

本教材及即将出版的新书在地震属性的理论、它们的物理意义以及产生这些属性的各种算法等方面作了探讨。所含实例用于说明地震属性在解释中的应用以及它们对了解储层特性的意义。

作者介绍



K. J. 马弗特 (Kurt J. Marfurt): 在纽约州哥伦比亚大学Henry Krumb 矿业学院任助教开始他的职业生涯, 教授矿产地球物理学。5 年后, 到阿莫克 (Amoco) Tulsa研究中心工作。在阿莫克持续重组过程中, 马弗特在地震模拟、偏移、信号分析、盆地分析、地震属性分析、反射层析、地震反演和多分量数据分析等多个领域进行研究并取得丰富经验。在阿莫克工作期间, 他获得5项专利, 其中2项属地震相干技术。

1999年, 马弗特到休斯敦大学工作, 是地球科学系的教授, 并担任应用地球科学和能源实验室 (CAGE) 主任。他工作的侧重点是地震属性新技术研发和检测。他在SEG杂志发表论文数十篇, 还是两本书的编者。他曾经获SEG地震模拟优秀展示奖 (1989), SEG地震相干研究优秀论文奖 (1999); 16年间, 先后担任地球物理学 (Geophysics) 杂志的助理主编和副主编。马弗特是GSH、SEG、EAGE、AAPG, 以及AGU的会员。



S. 肖普拉 (Satinder Chopra): 加拿大艾伯塔省卡尔加里市Arcis公司油藏服务部主任。1984年, 他加入印度石油和天然气有限责任公司 (ONGC), 在该公司工作至1997年。1998年, 他加入卡尔加里市的CTC Pulsonic公司, 该公司后来成为Scott Pickfold和岩心实验室油藏技术公司。他的研究领域是常规地震数据处理和交互解释, 但在涉及地震属性的地震资料特殊处理方面花费了很多时间, 包括相干和结构、地震反演、AVO、VSP处理、地震数据的频率加强, 他的主要研究兴趣是油藏表征技术。他已编写3本书, 发表80余篇论文, 并做过多次讲演。

肖普拉在印度Shimla的Himachal Pradesh大学获得地球物理学硕士和博士学位。他目前任SEG出版委员会主席, 并且是CSEG Recorder的编辑。他在印度石油和天然气有限责任公司 (ONGC) 曾多次获得奖励, 还与他的同事获得2002年至2005年的SEG优秀张贴论文奖。他是SEG、CSEG、EAGE、AAPG、职业工程师协会、艾伯塔省地质学家和地球物理家协会, 以及职业地球科学家得克萨斯州委员会的会员。肖普拉与他的妻子和两个孩子生活在卡尔加里。

地震属性是由地震数据衍生出的几何形态、运动学、动力学以及统计特征的特别量度。近年来，它已引起重视并被广泛应用于勘探开发和油藏工程。应用地震属性，可将井中与之对应的各种地质参数经地震测网或数据体外延；可重塑构造活动、沉积和成岩作用演化，推测目的层段的岩性、孔隙度、封堵性分布，断裂密度及其延伸方向；可选取合适的参数和压制噪声的算法，用于地震数据处理的各个阶段；同时，彩色显示的各种属性图像及多种属性组合图像也有利于研究分析、交流和演示。

本书主要介绍一套新研发的体属性，强调这些度量地震数据结构最新属性的理论依据、属性算法的实现、数据的体估算值及其在解释中的应用。书中349幅图片展示了基本概念、算法，通过对构造变形、地层特征、储层参数、流体性质等地质参数敏感的各相应属性体的层切片、时间（深度）切片图像和组合图像的描述，说明地震属性在油气勘探开发、油藏工程以及三维地震地层学和地震地貌学研究中的应用及前景。

《地震属性在构造和地层学中的应用》的翻译工作由中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司和中国石油集团物探技术培训中心组织，参加并完成翻译工作的有：夏义平、徐礼贵、郑良合、李明杰、张延庆、黄忠范等同志；袁秉衡、李建雄、康南昌和刘万辉同志参加讨论并提出了许多建议。张延庆、黄忠范对全文作了校正。最后，夏义平、袁秉衡、李明杰同志对全文作了审读。本书作为内部参考资料，仅供读者学习之用，注意资料的保存。

限于译者水平，译文中难免有不当之处，敬请指正。

译者

2008年10月

目 录

前言

作者介绍

译者的话

第一章 绪言

第二章 谱分解和子波变换

第三章 几何属性

第四章 属性与地震资料解释

第五章 属性与地震资料处理

参考文献

1

21

46

105

167

214

第一章 绪 言

概述

好的地震属性和有效的属性分析技术酷似优秀的解释人员。地震属性是由地震数据衍生出的几何形态、运动学、动力学及统计特征的特别量度。一般属性包括反射振幅、反射时间、地层厚度、地层顶与底之间的能量、反射倾角和方位角、复数道振幅和频率、照度、相干性、振幅随炮检距变化以及谱分解的量度。假如有一个实用的地质模型,就可以将这些一般属性直接地对应于相应的地层沉积、构造变形以及储层性质。

同时,还存在数百种统计有效的特别属性。将勘探数据分析工作流程中获取的数百种一般的或者特别的属性与预测的储层物性建立关系,可能出现假的正相关风险。这一工作类似于用掷硬币的方法来预测100个国家一周内的天气情况(晴天或者雨天)。虽然,我们都明白,根据掷硬币来安排明天的工作是一种愚昧的行为,但在统计学中,我们深信,所抛硬币中,肯定有一次预测与7天中某一天的天气情况具极强的相关性。

避免出现假正相关的有效途径是只应用与一定(预测)的岩性或地质作用有物理相关性的属性。在本教程中,我们主要介绍一套最新开发出的体(积)属性,这些体属性是统计分析、三维地震地层学和地震地貌学的基础。我们强调这些度量地震结构最新属性的理论依据,并研究这些属性算法的实现、数据的体估算值及其在解释中的应用。

倾角、倾向方位角、相干性、曲率以及振幅(或能量)横向变化的体估算值通常称为几何属性。经增加谱分解、结构分析,以及在有限方位角和炮检距体内地震反射率的一定量度后,拓宽了研究的范畴,超越了只对反射层几何形态变化成图的原有框架。

应用地震属性有两个主要目的。第一个目的是巧妙地将稀疏的井中测定值,如储层厚度、孔隙度、油气饱和度,经过密度较大的地震测网外推。所应用的预测技术包括多变量统计学、地质统计学、神经网络,它们可应用于对振幅和厚度敏感的属性。预测者通常是岩石物理学家、地球物理学家以及油藏工程师。

第二个目的是重塑构造、沉积和成岩过程——从而能够推断岩性、孔隙度、封堵性、裂隙密度及其展布方向。所用的预测技术包括地质模型以及现代和古代的同类物。这方面的预测者通常是构造地质学家和地层学家。本教程中,我们可看到应用几何属性能实现这个目的。同时,我们也将明白,裂隙和渗透率的定量预测要求改进现有的统计分析方法并提高目前工作流程的有效性。

其次,地震属性也可地为地震数据处理提供质量控制。在未做解释的时间切片上,处理人员可容易地识别出地质构造(如断层,河道),以及处理的假象(如假构造和采集的足迹),从而优选处理参数。

本书中,我们也将对所用属性的显示方法进行归纳。将回顾红—绿—蓝(RGB)、青—品红—黄—黑(CMYB),以及色度—亮度—饱和度(HLS)等显示方法。然后讨论用常规的,并且是有效的一维色棒显示地震数据和属性。并且对应用叠置、组合显示、二维色棒、三维色棒联合显示属性—地震数据,或者对属性—其他属性的组合显示作评价。对具体的彩色显示作优劣判断,用二维和三维色棒在同一图片上显示多种属性,应用色彩调置使解释人员能将这些特征传递为其他的特性。

章节要点

地震属性常用彩色显示以尽可能捕获更详细的信息，这有助于将这些信息变成研究组成员或外来访问者（可能不是地学研究人员）所熟悉的同一类图件。最好的色标应是人类日常生活所能感觉到和（或）经历过的类似物。如复数道包络常用彩虹色配置显示，以暖色调表示高值，以冷色调表示低值。

时间构造图也常用彩虹色配置显示，但常以红色表示深度浅的（低值）区，以蓝色表示埋深高值区，以此吸引解释人员注意浅的构造区，因为这些构造部位往往是含油气圈闭的发育区。在倾角和相干图像中，我们希望突出异常带。因此，我们将低倾角和高相干性地区用白色表示，而以黑色表示高倾角值和低相干性地区。

由于色彩是具周期性的，因此是显示具周期性特征属性的最佳选择，如相位、倾向方位角等。虽然选择色调不连续的色棒可以突出要表达的感兴趣的构造部位，但它却妨碍了数据本身所表达的内容。因此，解释人员应该采用单色或双色过渡色棒显示。当显示既含有正值又含有负值的地震数据或属性时，解释人员应选取一中性的背景色（如白色、灰色或者黑色）表示接近于零的属性值。

本章中，我们展示在同一个图片中如何作一种以上属性的组合显示。最常用的技术包括地震叠置（overlay）和混合图（blended或mixed maps）。组合彩色图（composite color maps）（一般不常用），首先对第一种属性的超出其色棒中某一给定临界值部分成图，然后对第二种属性以另一种色棒成图，再将两者显示在同一图上。彩色表能特别有效地显示成图的二维和三维矢量值，如倾角大小和倾向方位角，加权能量的相干振幅（Energy-Weighted Coherent-Amplitude）梯度图。在二维和三维显示中，色棒也使解释人员可用置信测量值来调节属性值。例如，只有当反射是局部连续时，反射的倾角和倾向方位角的估计值才是有效的。只有当反射的弯曲度不等于零时（即反射不是板状的），反射形态的目的估算值才是有效的。最大频谱的有意义估算值要求该频率分量的振幅远大于平均谱的振幅。

通过有意义的彩色编码调置，多属性地震可视化技术使解释人员能将选取的多个可见属性联系起来，从而进行更有效的数据分析、交流和演示。

图 1.1 从 20 世纪 70 年代中期和 80 年代 AAPG 资助的地震地层学教材 (Tury Taner) 中扫描的两幅图。(a) 二维地震剖面中可见到的反射特征。(b) 用于地震地层解释的理论剖面特征。这些早期的解释流程理念激发了随后的几何属性的发展 (包括体倾角、倾向方位角、反射平行程度、连续性、不整合指示的研究)。(据 Tury Taner)

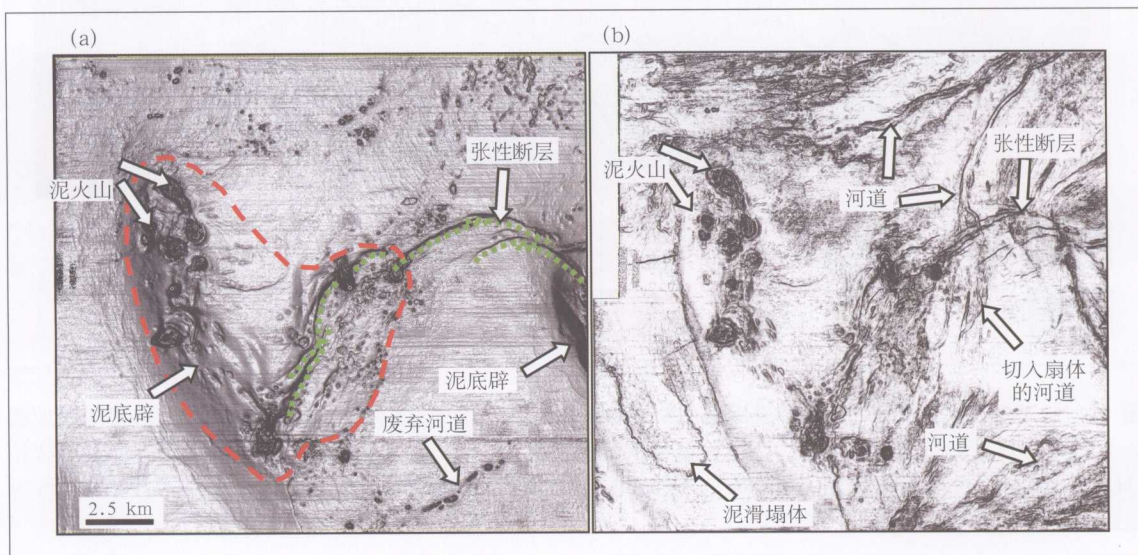
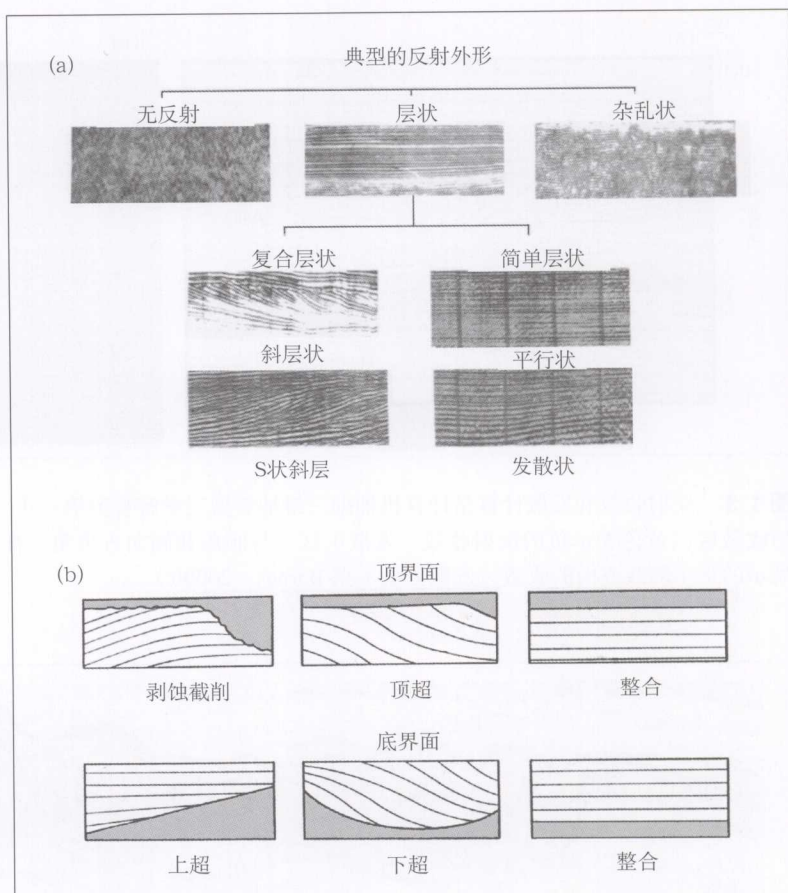


图 1.2 (a) 沿海底拾取产生的常规倾角大小图。(b) 边界体中海底以下 250 ms 的层切片, 边界体的产生应用了 Sobel 滤波的变差 (据 Adeogba 等, 2005)

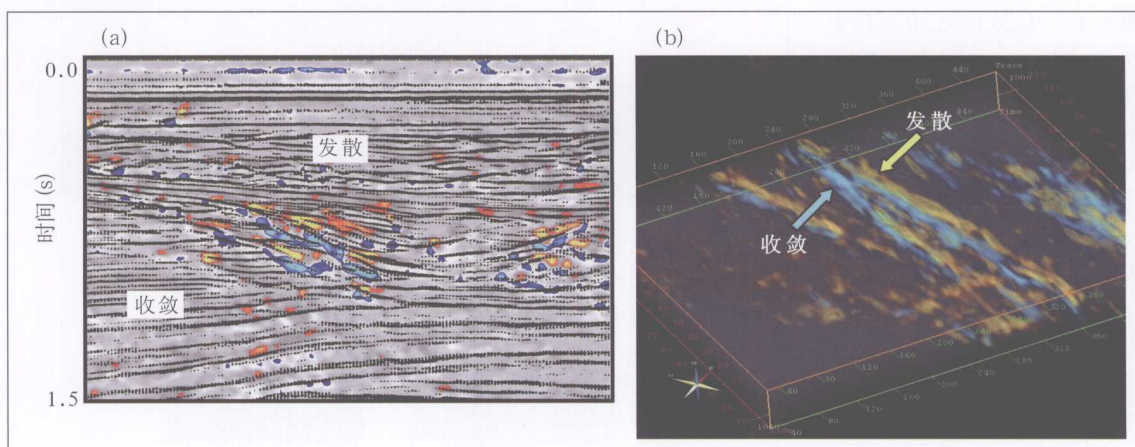


图 1.3 反射收敛和发散计算是计算机辅助三维地震地层学解释的第一步。在这些图像中,蓝色区是正的反收敛区,黄色表示负的反收敛(发散)区。与倾角和倾向方位角一样,反射收敛度也是矢量。图中所展示的是主测线方向的收敛/发散分量(据 Barnes, 2000b)

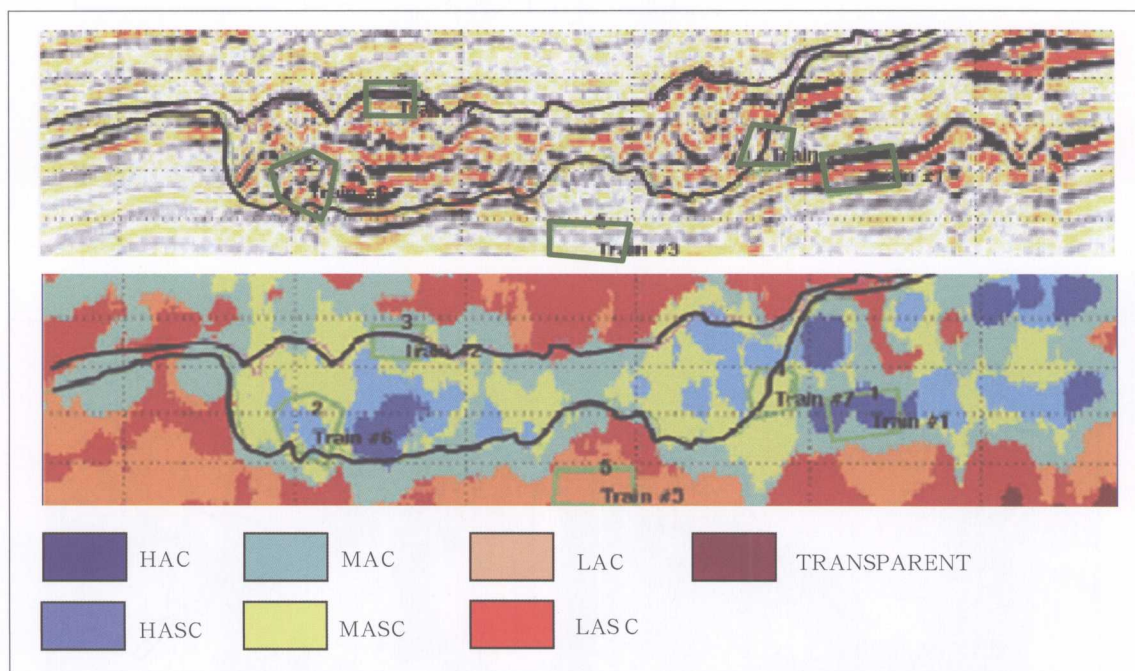


图 1.4 应用解释员训练的概率神经网络所作的地震相分类,图中已识别出多种地震相。图中整理的地震分类体系有高振幅连续相(HAC)、中等振幅连续相(MAC)、低振幅连续相(LAC)、高振幅半连续相(HASC)、中等振幅半连续相(MASC)、低振幅半连续相(LASC)、空白反射相(TRANSPARENT)等地震相组成(据 West 等, 2002)

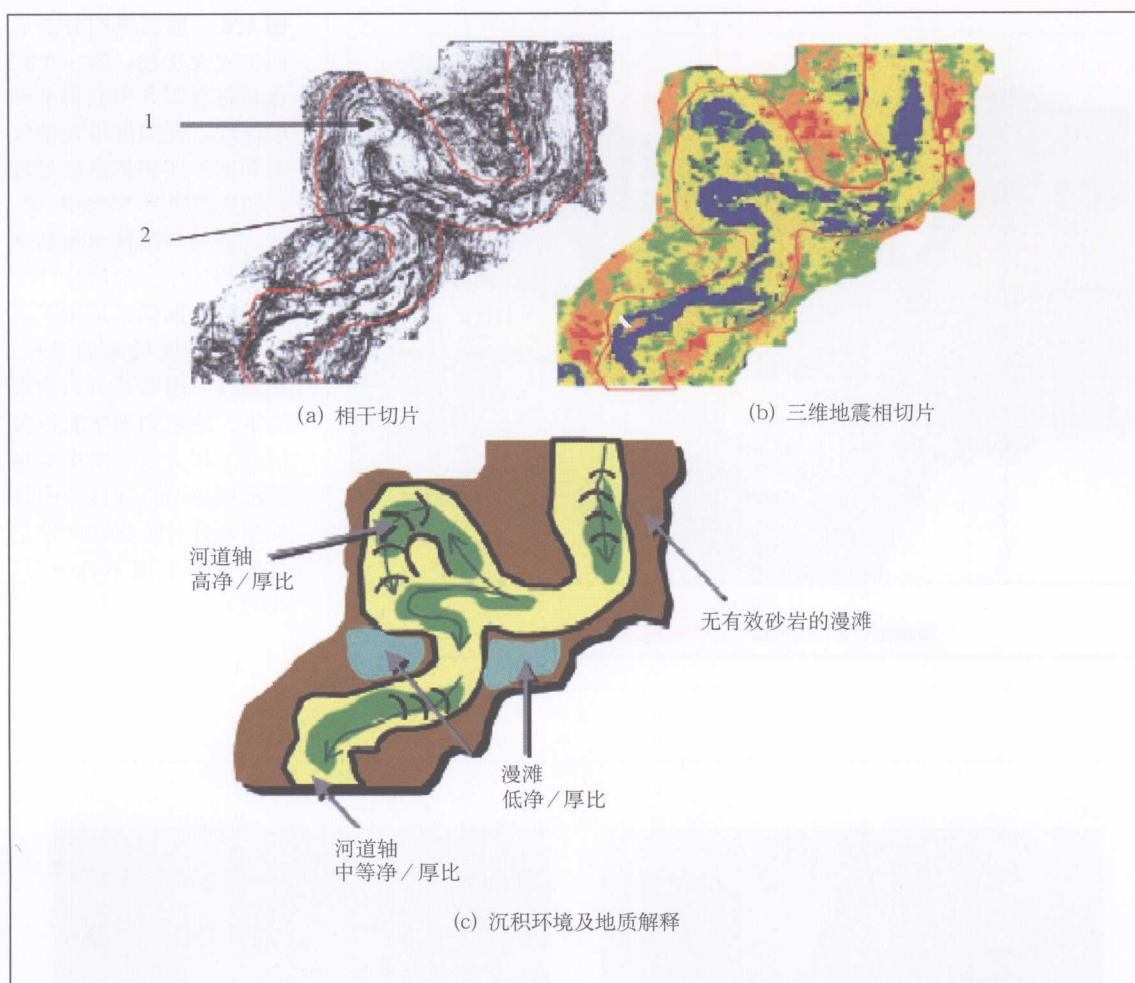


图 1.5 (a) 相干切片, 突出了河道的两侧边界 (红线); 宽而老的弯曲单元 (1); 窄且新的弯曲单元 (2)。(b) 三维地震相切片, 展示出弯曲单元 (1) 是由高振幅连续 (HAC) 至中振幅半连续 (MASC) 地震相组成, 而弯曲单元 (2) 则主要由高振幅连续 (HAC) 地震相组成。因为结构—分析地震相分类是一种体分类, 这种分析法可应用于目的层段内的不同地层, 无论这一层段是否以成图层为边界。(c) 考虑到地震相与其相对应层段地层之间的理论关系, 可以得到净/厚比环境图, 并能说明三维资料覆盖区内不同的沉积环境和地质解释 (据 West 等, 2002)

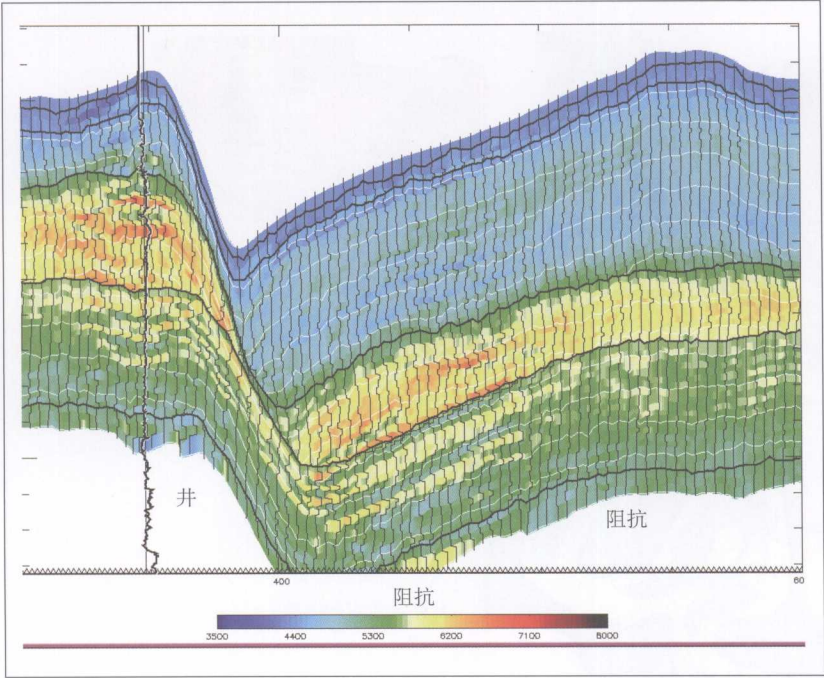


图 1.6 地震属性分析有两个主要用途。第一个用途是将有限井中获得的储层厚度、孔隙度以及油气饱和度等实测信息经过较密的地震测网巧妙地外延。这方面的预测技术包括多变量统计学、地质统计学以及神经网络，适用于对振幅和厚度敏感的属性。预测人员通常是岩石物理学家、地球物理学家以及油藏工程人员。图中展示了根据墨西哥探区波阻抗反演属性计算得到的储层孔隙分布（据 Veekan 等，2002）

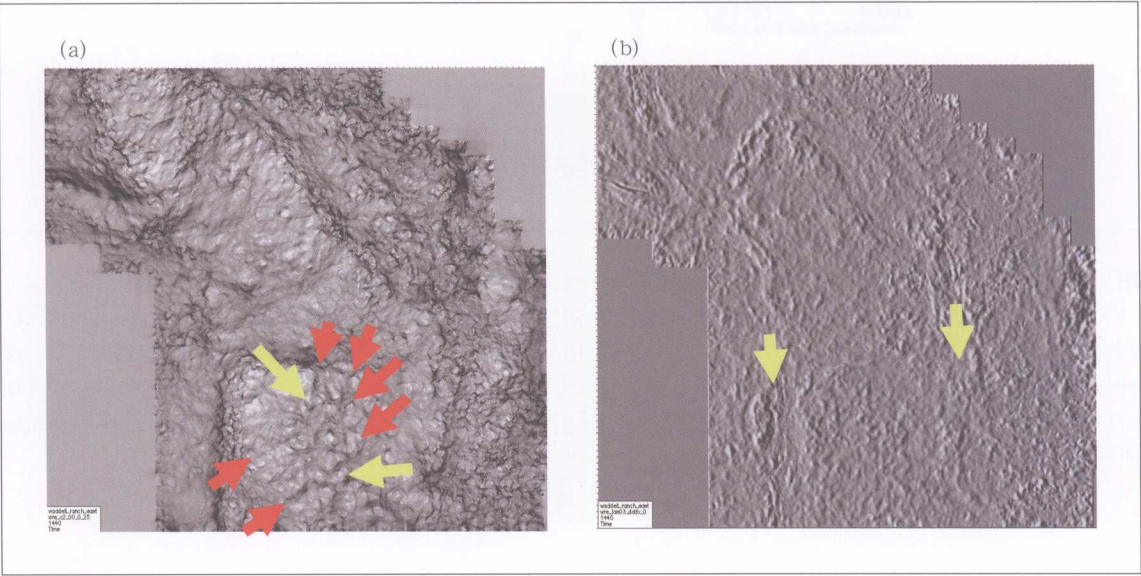


图 1.7 地震属性的第二种用途是重塑构造活动、沉积和成岩作用过程，从而使我们能推测岩性、孔隙度、封堵性、裂缝密度以及裂缝展布方向，预测要利用地质模型，包括现代及古构造环境模拟。这方面的预测人员通常是构造地质学家和地层学家。(a) 时间切片 ($t = 1.440\text{ s}$)，该切片是从经过得克萨斯中央盆地台地上方采集的地震数据衍生的最大负曲率体 (most-negative-curvature volume) 中提取的。我们将红色箭头所指示的线性体解释为裂缝带。而黄色箭头所指示的“碗”状区是该层段 Ellenburger 组的岩溶层段。(b) 时间切片 ($t = 1.440\text{ s}$)，展示的是加权能量相干振幅梯度南北向分量数据体时间切片。箭头指示的是河道，该河道自北向南流。这些河道有助于确定当时的沉积环境，在井资料的约束下，能推测岩性分布

图 1.8 图 3.77 中展示的差分算子经希尔伯特变换后的线性组合

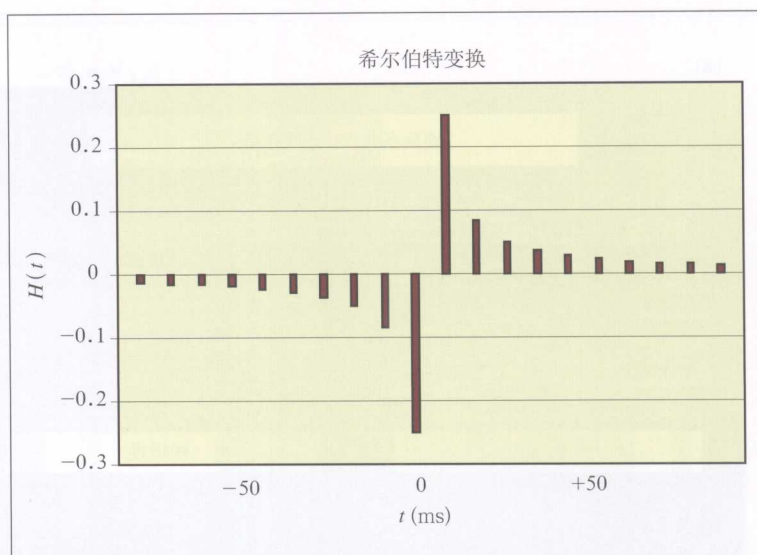


图 1.9 复数道属性包括实数道、虚数道、包络、瞬时相位和瞬时频率。波形干涉在瞬时相位产生奇异性，如最低箭头所指示的负的偏差。按包络衡量瞬时频率的权值，通过在整个短时窗作加权平均频率计算并作平滑，可以压制这类偏差（据 Taner 等，1979）

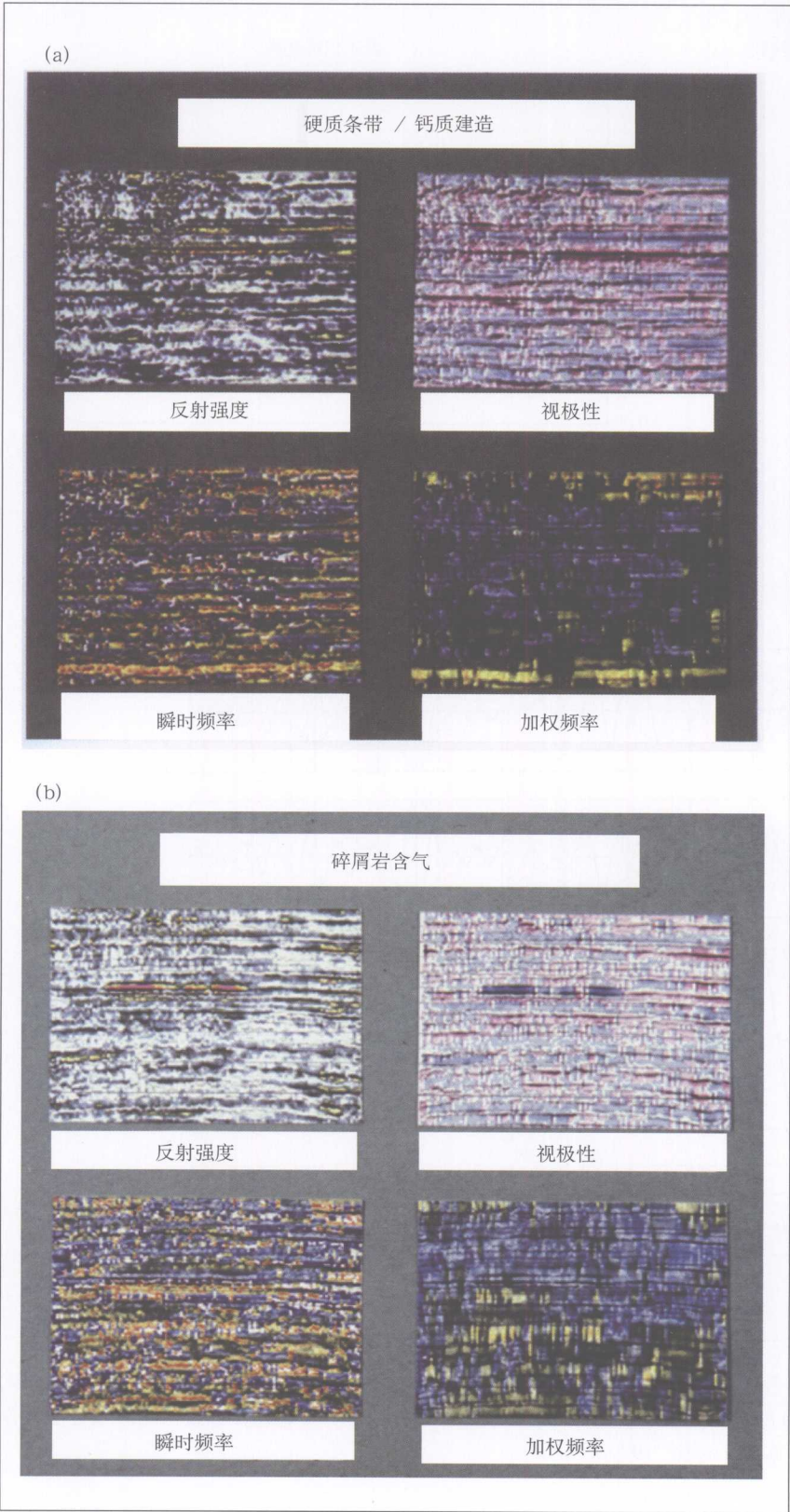


图 1.10 20 世纪 70 年代中期和 80 年代地震地层学教材中的两张拷贝 (Tury Taner), 说明复数道属性的价值。(a) 硬质条带—钙质建造实例。(b) 碎屑岩含气实例, 包括反射强度 (也叫作包络)、视极性、瞬时频率和加权频率。虽然两个实例中的反射强度都很强 (红色和黄色), 但硬钙质建造的视极性是红色, 而碎屑岩含气则表现为蓝色 (据 Tury Taner)

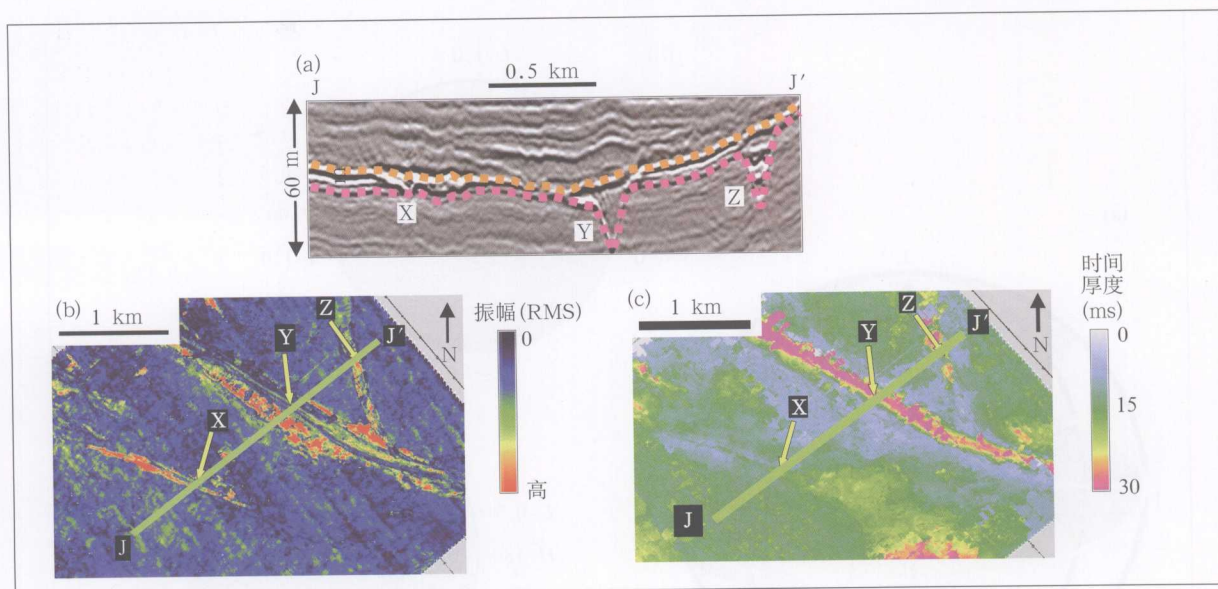


图 1.11 (a) 东西向地震剖面，剖面中有 3 个下切河道，分别以 X、Y、Z 表示。(b) 以图 (a) 中橘黄线为中心的 20 ms 时窗均方根振幅图。高振幅区是天然堤复合体。(c) 是图 (a) 中橘黄线与品红线之间层段的时间厚度图 (据 Oyedele, 2005)

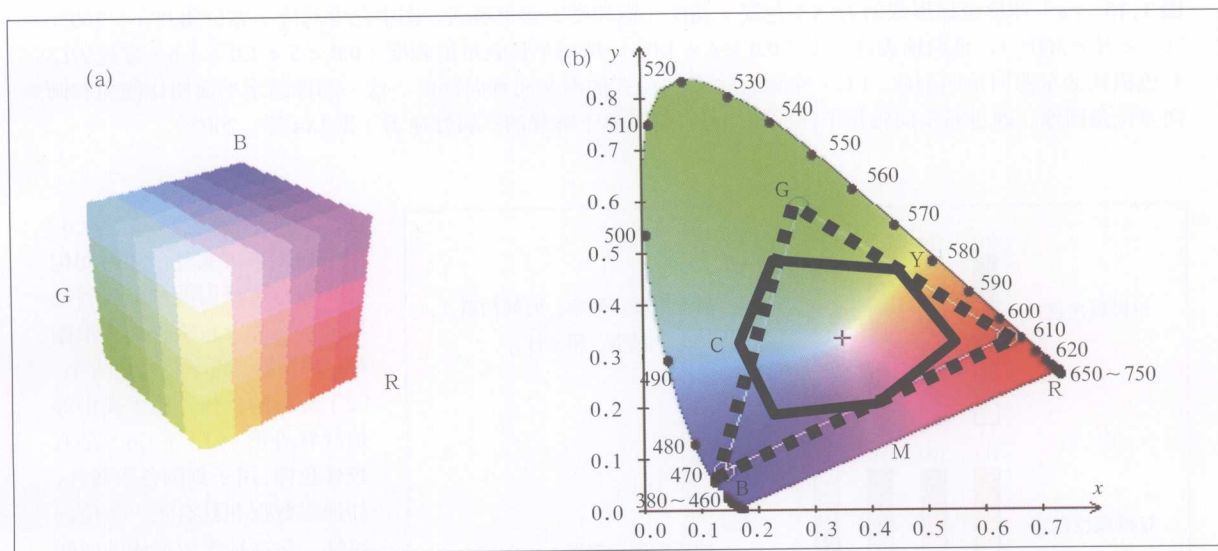


图 1.12 (a) RGB 彩色模式 (所用颜色是红色、绿色和蓝色，这些颜色常用于视觉显示，如计算机监视器)。(b) RGB 模式和 CMYB 模式 (CMYB 分别表示青色、品红、黄色和黑色，这些混杂颜色常用于绘图)，该图为 CIE 标准意义的人类视觉系统 (在 RGB 三角形与 CIE 彩色模式周边之间的区域)。不是所有人类感觉出的颜色都可用红、绿、蓝色打印出来的。此外，用 CMYB 模式绘图墨汁也不能产生监视器所显示的许多颜色 [(b) 图中 CMYB 多边形与 RGB 三角形的重叠区] (据 <http://www.hf.faa.gov> 修改)

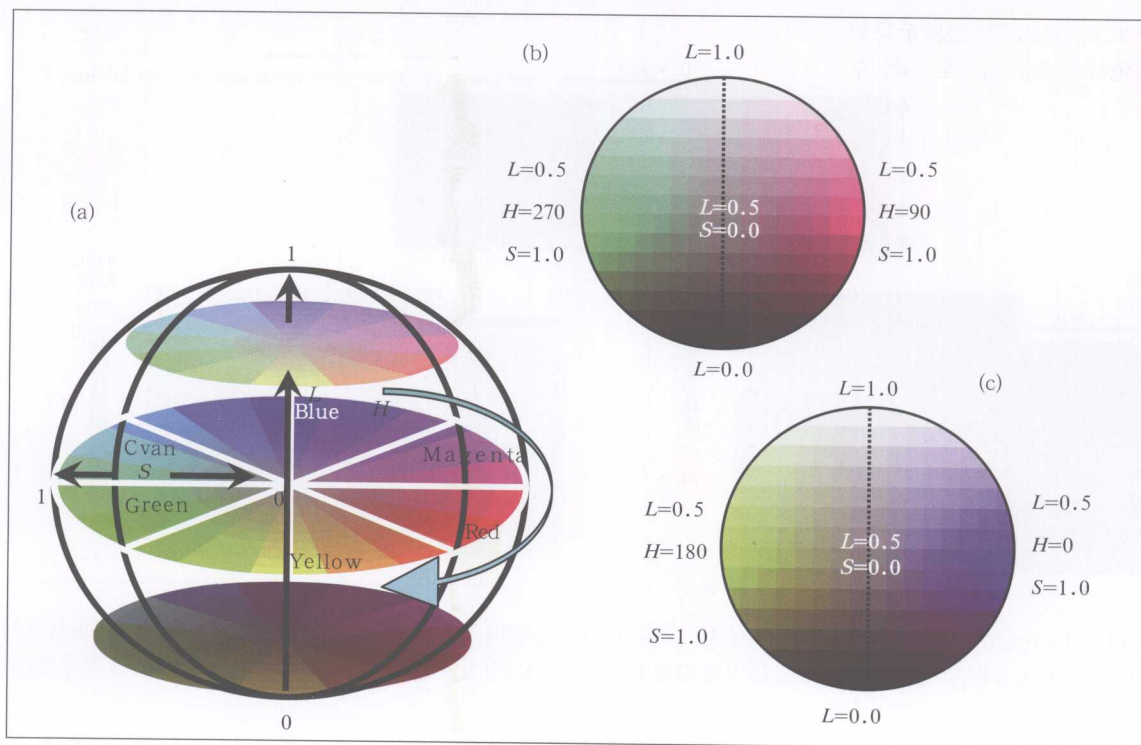


图 1.13 (a) 球形坐标形式的 HLS (色度—亮度—饱和度) 彩色模式。图中色度对应于方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ ($0^\circ < H < 360^\circ$)；垂向轴表达亮度 ($0.0 < L < 1.0$)；球的半径表示饱和度 ($0.0 < S < 1.0$)。(b) 穿越 HLS 彩色模式的的东西向垂向剖面。(c) 穿越 HLS 彩色模式的南北向垂向剖面。这一图像的水平面用作倾角和倾向方位角图像。通过对垂向轴相干性成图，可以得到易于解释的三属性显示 (据 Lin 等，2003)

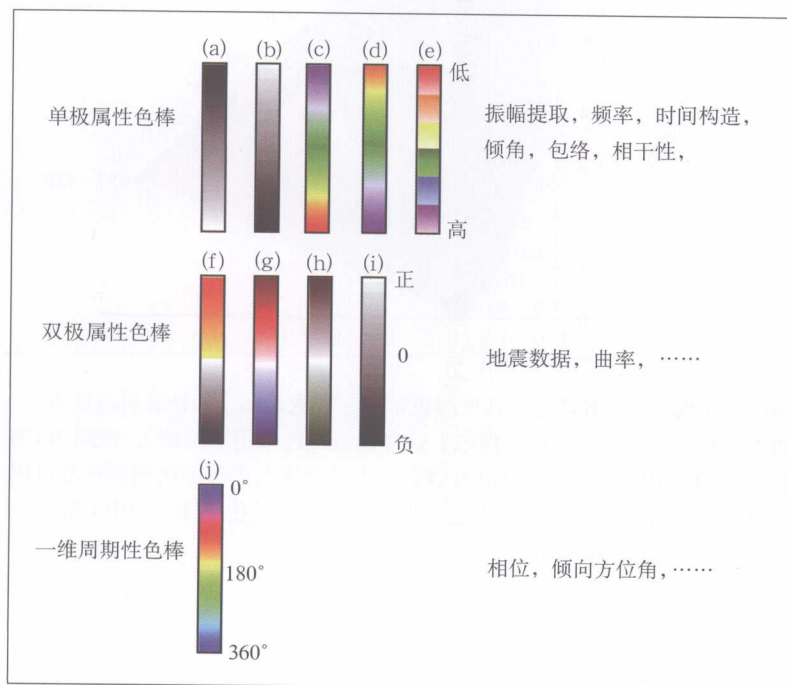


图 1.14 一维色棒 (a) 至 (d) 用于显示单极属性，如时间构造，沿地震反射波峰或波谷提取的层切片、包络、均方根振幅、相干性、曲率和倾角大小。(e) 专门的色棒，用于提供等值线状外形。(f) 至 (h) 是双极性色棒，用于刻画各类属性，如地震数据和具有正、负值的属性，包括地震数据体的时间和垂向切片，最大正曲率和最大负曲率，相干振幅梯度，以及反射层视倾角。(i) 单向过渡的一维色棒，通常用于刻画双极性属性数据，尤其当解释者希望刻画解释出的断层和地层时，常用它表示。(j) 一维周期性色棒，常用于显示相位和倾向方位角