

# 一种新的面向多元统计分析的信息可视化技术

盛秀杰\* 金之钧 王义刚

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

盛秀杰,金之钧,王义刚. 一种新的面向多元统计分析的信息可视化技术. 石油地球物理勘探,2013,48(3): 488~496

**摘要** 在进行诸如多因子地质风险评价、不同测井响应值交会对比等多元分析时,传统二维、三维散点图可视化技术不可避免地会遇到基于欧式正交空间的维度耗尽及难以直接构建三维以上欧式空间的散点图等问题。基于此,本文引进并改进了一种主流多维信息可视化技术:首先在介绍信息可视化技术的基础上,引进平行坐标可视化技术表征多元(维)信息变化趋势与各个变量间的相互关系;随后简要阐述平行坐标的数学基础,揭示其实质是将二维欧式空间的一个点映射到二维平面上的一条曲线,其射影几何解释和对偶特性使它适用于多元可视化数据分析;最后结合多因子地质风险评估实例,对应于资源评价中的主观不确定性描述,面向平行坐标中的坐标轴和平行折线的可视化渲染,提出一种全新的颜色渐变渲染方案,以提升平行坐标的多元隐藏信息的直观表达能力;同时结合(聚类分析、主因子分析等)多种统计数学方法,基于平行坐标信息可视化技术构建服务于多因子地质风险评估的信息可视化数据挖掘流程,使信息可视化数据挖掘技术成为石油勘探开发多学科与信息科学技术相结合的新途径。

**关键词** 信息可视化 多元统计分析 数据挖掘 平行坐标 地质风险分析

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

近年来,在石油勘探开发领域,可视化技术被广泛应用于地质建模、油藏模拟等多种三维数据场的构建,使得待观察数据能够最大程度地多方位以浸入式、情景式及互动模式呈现在人们的“眼帘”,有利于人们观察、并给出准确判断。可视化技术关注的是具有空间位置属性的数据,强调运用计算机图形、图像处理技术来形象、直观显示各类计算过程与结果<sup>[1]</sup>。在客观显示各类基础数据(如测井曲线,地震剖面),准确揭示地下构造、沉积细节(如各类等值线图)及辅助多种统计手段(如散点图、星形图)等方面,各类图形可视化技术一直是人们推断、获取地下准确认知的不可或缺的技术手段。此类信息可视化技术大部分关注的是没有空间位置属性的抽象信息,它在揭示各类地质信息之间的关联关系、挖掘地质信息中隐藏的特征等方面具有明显优势。比如,

进行多元(维)统计分析时,应用传统二维、三维散点图以及两、两维度(元)组合构建的矩阵散点图等可视化技术有助于直接观察隐藏信息,并可进行聚类分析、异常值识别、线性与非线性关系判定等,进一步还可拟合形成各类“曲线”定义。但在进行诸如多因子地质风险评估<sup>[2~4]</sup>等石油地质类问题研究时,传统二维、三维散点图可视化技术不可避免地会遭遇基于欧式正交空间的维度耗尽及难以直接构建三维以上欧式空间的散点图等问题。尽管有人<sup>[5]</sup>提出:可基于一种坐标嵌套的多维可视数据结构,将输入变量映射到多个轴组成的坐标系统中,整个高维函数通过将一坐标嵌套在另一个坐标系中实现在低维欧式空间的可视化。但该类方法表示的信息维数还是非常有限,且为了消除坐标嵌套引起的视觉混乱,必须运用复杂的交互方式、图形处理技术,但其实现非常困难,并不具有实际应用价值。此外,将正交的高维散点数据正射投影到二维视图时,有价值的隐藏信息会过度“聚集”,造成错误信息传递<sup>[6]</sup>。

\* 北京市海淀区中国石化石油勘探开发研究院软件研发中心,100083。Email:shengxj.syky@sinopec.com

本文于2012年3月28日收到,最终修改稿于2013年4月8日收到。

本研究受国家重大专项(2011ZX05005-001-004)资助。

因此,本文首先通过介绍信息可视化技术及近年在多维信息可视化技术方面的最新发展与应用<sup>[7]</sup>,面向石油勘探开发领域多个学科,定位于进一步提升各种多元统计分析能力,引进平行坐标可视化技术反映多维信息变化趋势和各个变量间相互关系。随后简要阐述平行坐标的数学基础,揭示其本质是将二维欧氏空间一个点映射到二维平面上的一条曲线,其射影几何解释和对偶特性使它适用于多元可视化数据分析。最后结合多因子地质风险评估实例,对应于资源评价中的主观不确定性描述,面向平行坐标中的坐标轴与平行折线的可视化渲染,提出一种全新的颜色渐变渲染方案,可显著地改进和提升平行坐标的多元隐藏信息的直观表达能力;同时结合(聚类分析、主因子分析等)多种传统统计学方法,基于平行坐标信息可视化技术,构建了服务于多因子地质风险评估的信息可视化数据挖掘流程,优于传统基于统计技术的数据挖掘技术。此信息可视化数据挖掘技术有助于人们从海量勘探开发数据中发现有价值的“经验”模式、总结相关“知识”等,可为石油勘探开发其他学科的多元统计分析开辟新的途径。

## 2 可视化技术

可视化是一种将数据信息和知识转化为一种直观视觉形式、辅助人们快速识别隐藏信息的新技术。可视化主要分为科学计算可视化和信息可视化。

### 2.1 科学计算可视化

科学计算可视化的主要功能是构建系列三维(3D)虚拟现实软、硬件环境。在该环境中人们可全方位融入地震、测井等基础数据显示环境中,交互式进行构造建模、储层建模及动态显示复杂系列油藏模拟过程,有助于勘探目标的发现和合理开采方案的制定等。

值得注意的是,科学计算可视化总是基于物理

数据,通过相关计算机图形、图像处理技术绘制这些物理数据可观察的属性。尽管有些科学计算可视化也可能源于对一些物理空间的抽象,但这些信息在本质上仍然是几何的,是基于物理空间位置的建模。而在从事石油地质分析时,人们也迫切需要一系列图形显示技术应用于抽象地质信息分析,揭示信息之间的关系和信息中的隐藏特征。如进行多元统计分析时,散点图及星形图是必须的辅助技术手段。考虑到诸如散点图等类图形显示都没有明显的空间特征,这就要求除了强调所绘制对象的不同可视化属性外(如图元形状、样色、线宽等),更重要的是强调如何把非空间抽象信息设计为一种有效的可视化形式。

### 2.2 信息可视化

信息可视化<sup>[8]</sup>在于通过结合科学可视化、人机交互、数据挖掘、图像技术、图形学和认知科学等诸多学科的理论和方法构建 3D 动画显示。信息可视化除了强调可视化结构(如空间基、图元、图元的图形属性)外,更关心如何在直观视觉形式中融入多种认知能力,即交互性和动画成了信息可视化的重要特征之一<sup>[9]</sup>。

信息可视化的参考模型可归纳为从数据到可视化形式再到人的感知系统的互动、回溯调节(图 1),体现了人们对数据“理解”的连续性:原始数据的规范化便于图形渲染,对规范化的数据通过选择合适的可视化方式使数据变为抽象信息,而抽象信息通过系列交互式手段及与经验的结合变为系列知识,而这个过程也就是典型的、区别于基于统计方法的数据挖掘过程,也称信息可视化数据挖掘(图 1)。设计、完成一种新的信息可视化一般包括:识别信息结构(如是层次、多维,还是网络等)、定义渲染流程(包括数据转换、投影变换、显示属性定义等)、选择合适的图形导航策略(如放大与缩小、概貌与细节、焦点与上下文等)及最后设计合理的各类交互模式(如拾取、关联、过滤等)。

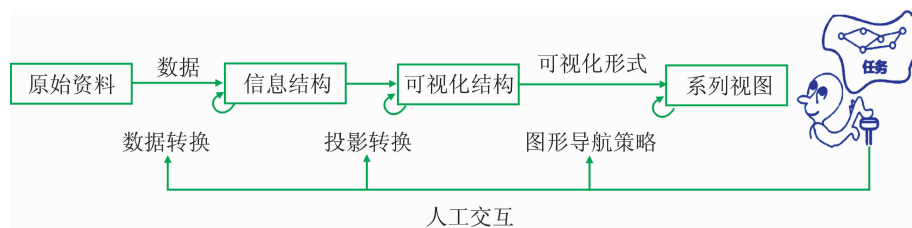


图 1 信息可视化的参考模型<sup>[13]</sup>

### 2.3 多维信息可视化

围绕多元统计分析,人们提出了多种基于“投影”、“图标化”及这两项结合的信息可视化技术,如“脸图”、星形图(改进)、矩阵散点图等<sup>[10~12]</sup>。基于投影的散点图等技术为推进多元统计分析技术在不同领域的应用起了关键作用,但也遭遇瓶颈。考虑到散点图等基于欧式正交空间的信息可视化技术在进行多元统计分析时不能充分表征隐藏信息,不能用一种直观方式直接表示多元信息的隐含特征(如数据间关系),且不具备进一步的数据挖掘能力,本文遵循信息可视化设计理念,引进并改进了一种多维信息可视化技术,即平行坐标技术。将该技术应用于多因子地质风险评估,展示了信息可视化数据挖掘过程。

## 3 平行坐标

### 3.1 定义

平行坐标起源于19世纪,起初用于欧式二维空间,随后 Insellberg<sup>[14]</sup>将平行坐标技术延伸到多维空间,且给出了完整的数学模型表述,还将平行坐标应用于多个计算几何算法中;Wegman等<sup>[15]</sup>率先将平行坐标技术用于多元统计分析时的各种“隐藏”表征,并将其广泛应用于该领域。近年来,平行坐标已

成为信息可视化及其数据挖掘等领域的主流技术之一,用于对高维几何和多元数据的可视化,甚至可很好地表示超高维数据。

平行坐标本质上是用一系列相互平行的坐标轴表示高维数据的各个变量,变量值对应每个轴上位置。换言之,将 $n$ 维数据属性(图2中的 $C_i$ )空间通过 $n$ 条等距离(图2中的 $d$ )的平行轴映射到二维平面上,每一条轴线代表一个属性维,轴线上的取值范围从对应属性的最小值到最大值均匀分布。为了反映变化趋势与各个变量间相互关系,往往将描述不同变量的各点连接成折线,将多维数据点映射成为平面上的折线且不损失信息,从折线的变化规律中便可相对简单地挖掘数据信息了(图2)。

因此,平行坐标不仅易于理解,而且能有效提供维度分布信息,有利于用户发掘隐性知识,快速而准确地定位多维信息集合中的隐含特征。近年来,随着基于线性或非线性方法的降维映射技术的应用,使超高维数据间的某种特性在平行坐标降维后仍旧保持不变且易于观察。但平行坐标可视化效果也受限于维度轴排列次序,尤其是显示高维数据时:维度轴的随机排列极易引起可视混乱和对象交叠,使得用户难以发掘多维信息集合存在的组织结构特征及各多维对象间预期的隐含关系,不便于用户从中获取隐性知识。

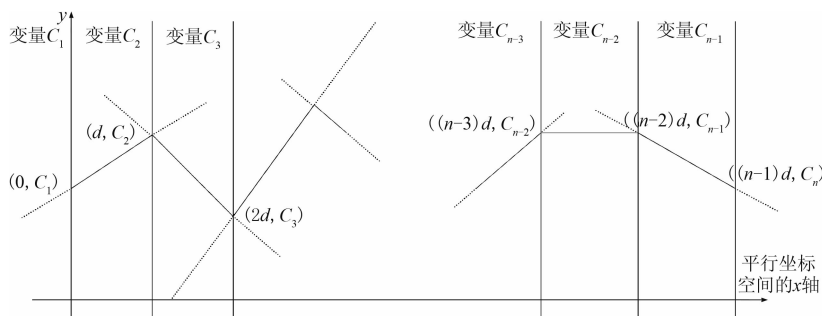


图2 平行坐标的典型绘制示意图

### 3.2 典型统计特征

面向欧式空间和平行坐标空间的对偶特性是平行坐标的主要特点。假定欧式空间的一条直线( $y=mx+b$ )上的两点(图3a)分别是 $(a, ma+b)$ 和 $(c, mc+b)$ ,需要将它们映射到平行坐标空间中的两维度上,平行轴间距为1。结果如图3b所示,欧式空间中的点 $(a, ma+b)$ 变为平行坐标空间中点 $(0, a)$ 与 $(1, ma+b)$ 间的线段,点 $(c, mc+b)$ 变为平行坐标空间中点 $(0, c)$ 与 $(1, mc+b)$ 间的线段,且两

条线段相交于点 $((1-m)^{-1}, b(1-m)^{-1})$ 。显然,交叉点取决于欧式空间中直线的斜率( $m$ )和截距( $b$ ),而这两个参数正是在二维数据中散点图所要揭示的主要隐藏信息。

平行坐标中两维度间折线相交于一点,在二维欧式空间中表现为同一条直线上不同取值点很好揭示了不同维度间的线性关系。同时,不同的 $m$ 和 $b$ 决定了平行坐标中两维度间的“可视化”特点。进一步分析如下:假定 $0 < (1-m)^{-1} < 1$ ,  $m$ 为负值,意味

着交叉点存在于当前两维度轴之间( $m = -1$  意味着位于正中间),可很好揭示两维度间的负相关关系(图 4 中绿色散点);假定 $(1-m)^{-1} < 0$  或 $(1-m)^{-1} > 1$ , $m$  为正数,交叉点存在于当前待分析两维度轴之外(沿 $b^{-1}$ 方向的一组“平行”线),可很好揭示两维度间的正相关关系(图 5 中绿色散点,横轴与纵轴取值范围是 $0 \sim 1.0$ ,表示不同成藏条件“好”与“坏”的主观概率推断结果)。

此外,二维或三维散点图的聚类统计特征是以相互间的空间距离进行直观分析,并可基于不同聚类模式进行量化区分。对应的是,平行坐标可视化技术是以每个轴上的投影点聚簇(空间欧式距离差最小)作为直观聚类分析的基础,然后沿其他平行坐标轴观察此类聚簇是否一直延续,即每个维度的差异是否都是最小(图 6,所有纵轴表示不同成藏条件的主观概率推断结果,取值范围均是 $0 \sim 1.0$ )。

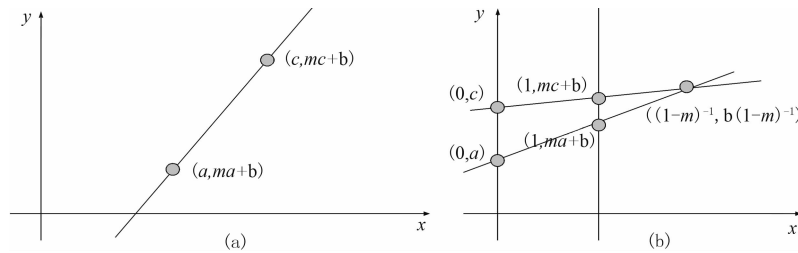


图 3 平行坐标的典型统计参数说明——点线对偶

(a) 欧式平面空间中的两点; (b) 平行坐标空间中两点对偶成两线

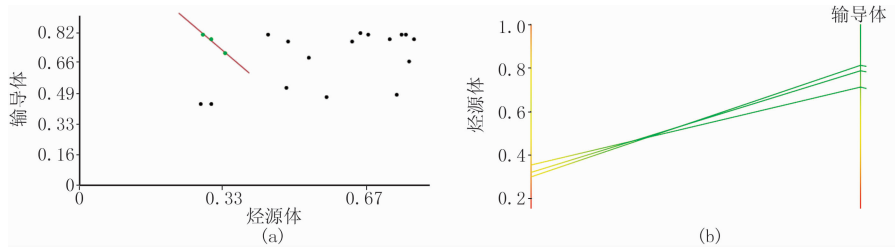


图 4 典型平行坐标的负相关特征(PetroV——表明该图取自重大专项所开发的资源评价软件)  
(a) 欧式平面空间中的负相关图形特征(三点一线); (b) 平行坐标空间中的负相关图形特征(三线内部相交一点)

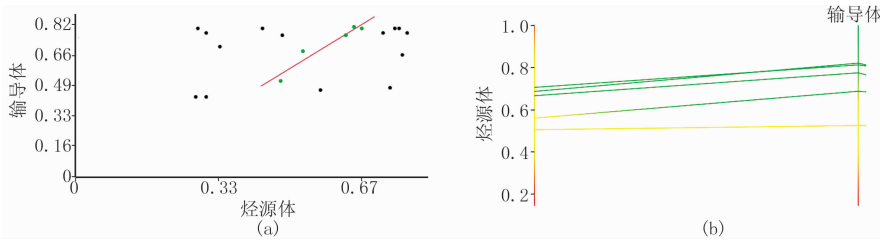


图 5 典型平行坐标的正相关特征(PetroV)

(a) 欧式平面空间中的正相关图形特征(多点拟合一线); (b) 平行坐标空间中的负相关图形特征(多线外部相交于一点)

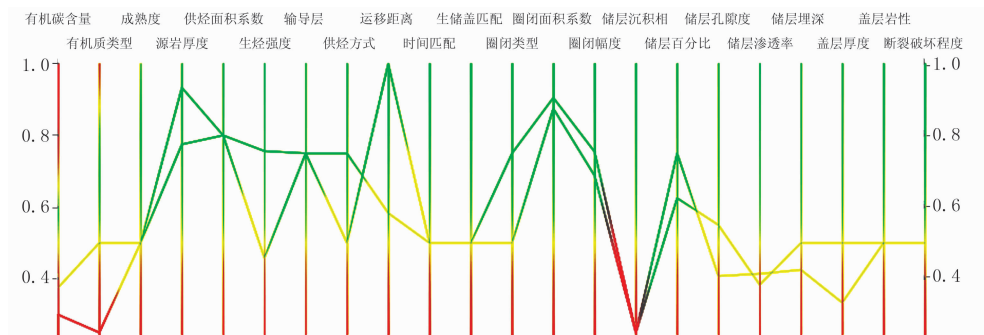


图 6 两个含油气区带的多维聚簇特征(PetroV)

## 4 面向多因子地质风险分析的可视化数据挖掘

可视化数据挖掘是指用可视化技术从大的数据集中发现隐含的、有用的知识,再通过采用友好的交互界面和大量直观的图形帮助人们更好地进行数据挖掘的技术。可视化数据挖掘旨在将数据挖掘的过程可视化,用户通过可视的交互手段调用后台的数据挖掘算法,由用户感兴趣的数据得到相应的数据分析,而不仅仅是数据查询;可视化数据挖掘实现了数据可视化与数据挖掘之间的一种更紧密的结合。目前,有多种利用平行坐标对多维信息进行可视化分析的方法,采用这些方法的主要目的是使数据显示效果更加明显,使用户能较容易地对视图进行分析,并获得有用信息。其中,基于平行坐标对数据进行分析的方法有:刷、维数的控制、抽象、维放大、交换坐标轴、上钻下卷等<sup>[16,17]</sup>。

多因子地质风险分析是资源评价不可或缺的多元定量分析技术手段。在多因子地质风险分析阶段,人们需厘清地质因素(多因子)间的相关联系、相互影响、相互制约等隐含关系,进而对目标区域的成藏过程、油气资源的不确定性等有相对清晰的界定<sup>[18]</sup>。但现阶段在该领域还没有十分适用的信息可视化方式来辅助人们进行多因子分析,进而对当前的地质风险因子之间的关系(如两因子间的相关性、主控因子的识别等)、资源评价目标之间的关系(聚类、成藏模式归纳等)进行深入研讨。

本文首次将平行坐标可视化技术应用于大港油田M区带的地质风险分析。首先,利用该区带最新地质研究成果,对区带内多个资源评价目标的22个地质单因素(22个维度)进行初步的主观概率推断,获取介于0~1.0之间的主观推测概率。接着,对平行坐标中的平行坐标轴和折线的可视化属性提出了一种全新的渲染方案:面向主观概率分析结果的不确定性表达(也称自信度表达),基于三色图(图7a)渐变渲染坐标轴和两两坐标轴间的线段;在此基础上,最后构建面向多因子地质风险分析的可视化数据挖掘过程,主要包括:基于三色图渐变的直观聚类分析、基于上卷与下挖的多层次观察资源评价目标、基于平行坐标维数控制的主控地质因素识别、与散点图结合的两两地质风险因子间的相关性分析等。

### 4.1 直观聚类

面向各个地质因素(多因子)的主观概率推断是进行后续多因子联合概率分析、计算的基础。本文提出可利用红、黄、绿三种颜色对主观概率推断结果进行不确定性转换,也称自信度转换(图7a),其中主观概率为0.5(黄色)意味着自信度最低,也可理解为最“纠结”的主观概率;主观概率为1.0意味着对“好”的评价的自信度最高;反之,主观概率0意味着对“差”的评价的自信度最高。该主观不确定性转换等同交通信号灯效果,使资源评价目标结果的可行性在图形主观表达上一目了然。图7b是后续多因子联合概率模型计算时约定的成藏体系成熟度模板。图中:绿色区域表示油气系统成藏条件匹配较好,具有较好勘探远景;红色区域代表油气成藏条件相对较差,勘探潜力小,风险大,其中左边红色区域表示成藏条件未达到大型油气聚集的要求,右侧红色区域则表示原有的成藏条件已遭破坏,进入油气成藏的暮年期。

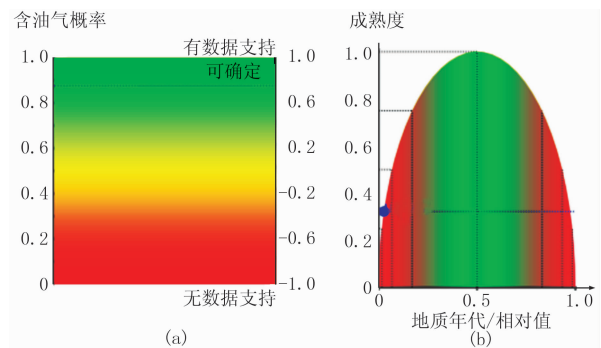


图7 主观概率与自信度三色映射示意图(PetroV)

(a)自信度的三色映射图;(b)基于三色图的油气藏成熟度模板

基于三色图(也称作“红绿灯图”)颜色渐变渲染,本文对现有平行坐标可视化技术的相关可视化属性进行了改进:一方面,对平行坐标轴(代表各个地质单因素的主观概率)从概率最小到概率最大进行从红到黄,从黄到绿的颜色渐变渲染处理;另一方面,根据端点的颜色(坐标轴对应颜色)对两两坐标轴间的线段进行插值渐变处理。改进后的平行坐标的主观聚类的定性表达更加充分。如图8中,每一条折线表示一个评价目标,以每一个评价单元的22项风险因子为参数,运用平行坐标对各个评价单元进行直观聚类,通过直接观察就可初步区分为三大类,即上部“绿色部分”(有利评价单元)、中部“黄色部分”(较有利评价单元)及下部“红色部分”(不利评

价单元)。以此为约束条件(聚类数目为三类,以 0, 1,2 表示),不同折线(评价对象)映射为  $n$  维欧式空间的系列坐标点,按照 K-Means 聚类方法进行空间

聚类分析,获取明确的基于主观概率推断结果的资源评价目标的聚类关系。如图 9 与图 8 的主观观察结果一一呼应。

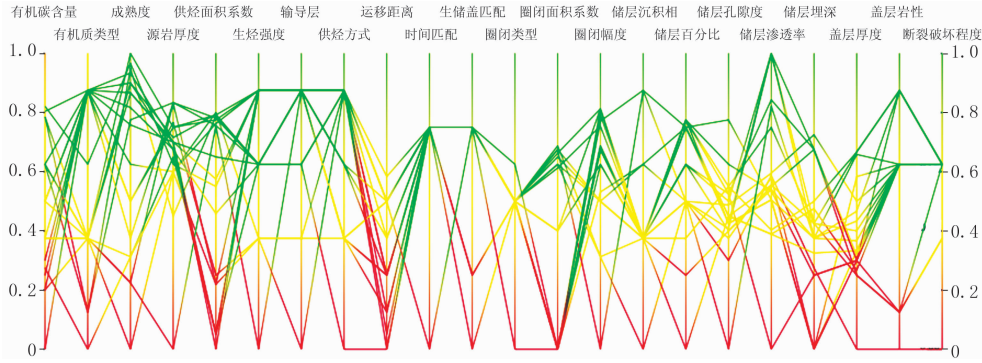


图 8 基于 22 个地质因子主观概率推断的平行坐标显示(PetroV)

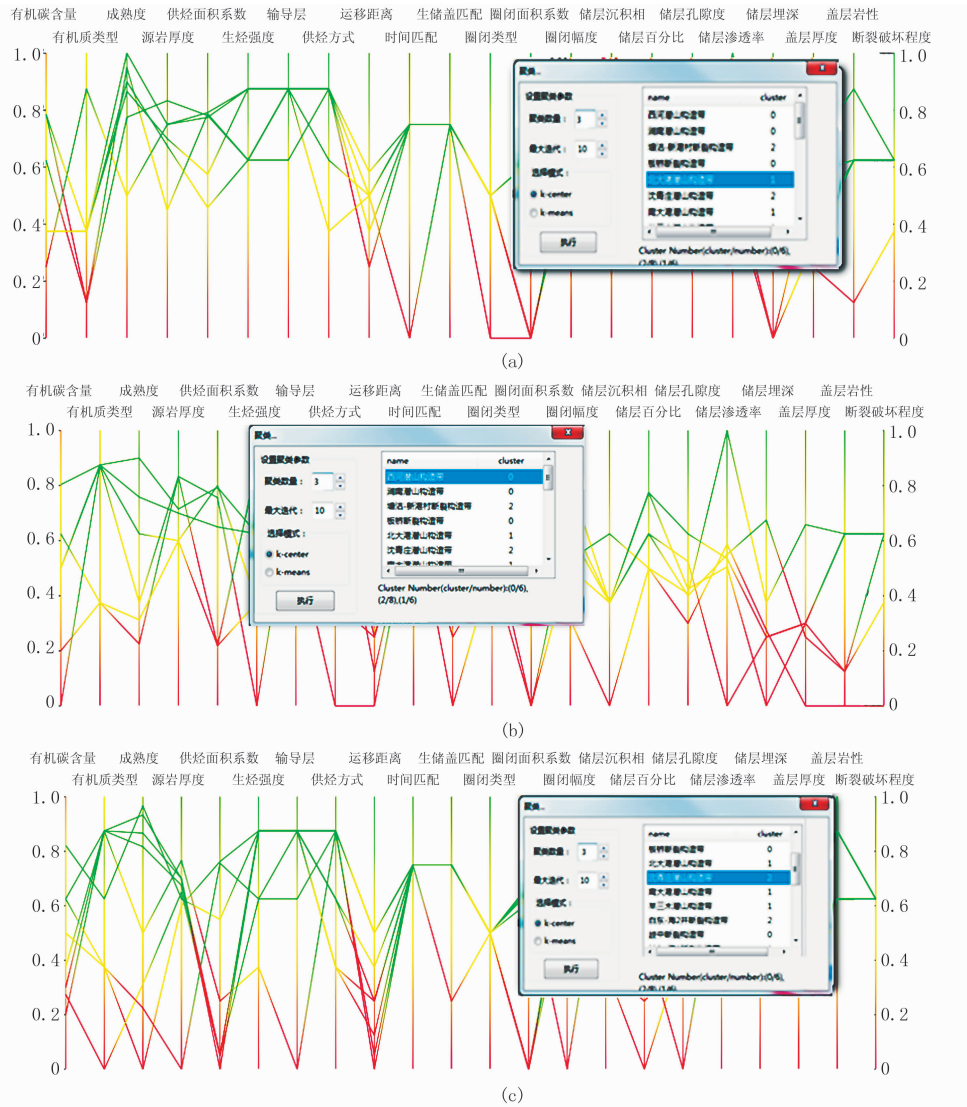


图 9 基于欧式距离的 K-Means 三大类聚类结果(PetroV)

(a)绿色部分; (b)黄色部分; (c)红色部分

## 4.2 多层次观察

应用平行坐标系统可对评价单元进行多层次观察。做多因子地质风险分析时,往往需要分层次组织地质因素。通过层次化组织的地质风险因子体系与平行坐标可视化技术相结合,通过“上卷”(上一层次评价指标)和“下钻”(下一层次评价指标)操作可使数据呈现不同的详细程度,从而可从不同层次上观察和分析数据。将分别归属于烃源体、输导体与圈闭体的地质分析因素(图8)进行上卷(各个地质因子的加权和,图10),更加清晰地识别出一个异常成藏对象,即大神堂亚成藏体系。

## 4.3 主控因子识别

为提高地质风险分析结果的准确性,需界定每个地质单因素对资源赋集的贡献大小。即需要制定每个地质单因素在后续联合概率分析中的权值大小,以获取最终的综合风险分析评估结果。理论上,

每个地质单因素的权值大小可由下面相对繁琐的步骤完成:针对上百种地质单因素,需人为构建两两因素间的重要性比对(不同目标区域,需重新构建)的判断矩阵,进而求取该矩阵的最大特征根及其特征向量以获取相应权值。实际上,在地质风险分析过程中,专家往往可凭经验直接进行地质单因素的权值设定。

平行坐标的维度重排和抽象(减少维度)为快速识别目标区域的关键地质因素及因素间的重要性(坐标轴从左到右)提供了新思路,该类操作的本质是:遵循上述的直观聚簇观察,遇到分类明显、分类数少且每一分类的数量较其他平行维度相对集中的维度,或者说对其他平行轴的所有聚簇有明显“聚类”调节效果的维度,可将其定位为关键维度或控制因子(如图8中的“储层埋深”)。而该主观观察结果与主因子统计分析结果相吻合(图11)。

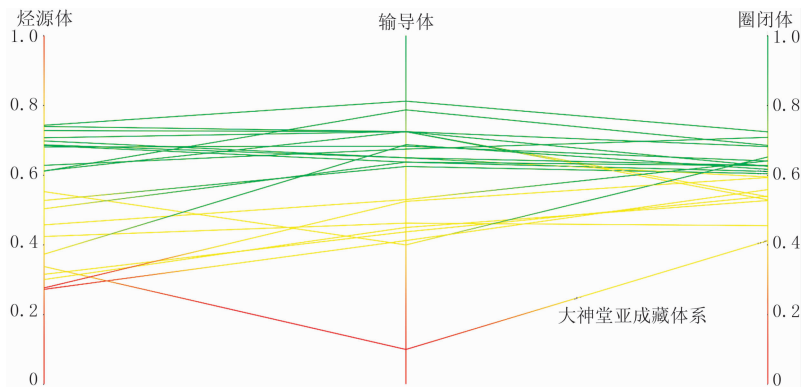


图10 22维度上卷为3维度的平行坐标显示(PetroV)



图11 22个地质因子的主因子投影距离排序(PetroV)

### 4.4 相关性分析

在做多因子地质风险分析时,每个地质因子都表征油气资源富集的某些信息,且这些信息彼此间存在一定的相关性。因此通过平行坐标可快速观察多因子间的相关性,找出影响目标区域资源富集的相关信息(维度)。如图 12a 中的“储层埋深”和“盖层厚度”在该资源评估区存在明显的负相关统计特

征(结合二维欧式空间的散点图显示),基于此,可进一步通过线性拟合等技术提炼目标区域资源富集的综合维度(因子)。综合指标不仅保留了彼此间不相关的原始数据维的主要信息,同时最大限度地保留了原有数据的信息。如图 12b 中的“运移距离”与“时间匹配”的特殊相关关系(平行折线相交于某维度一点)也代表了综合维度的平行坐标显示效果。

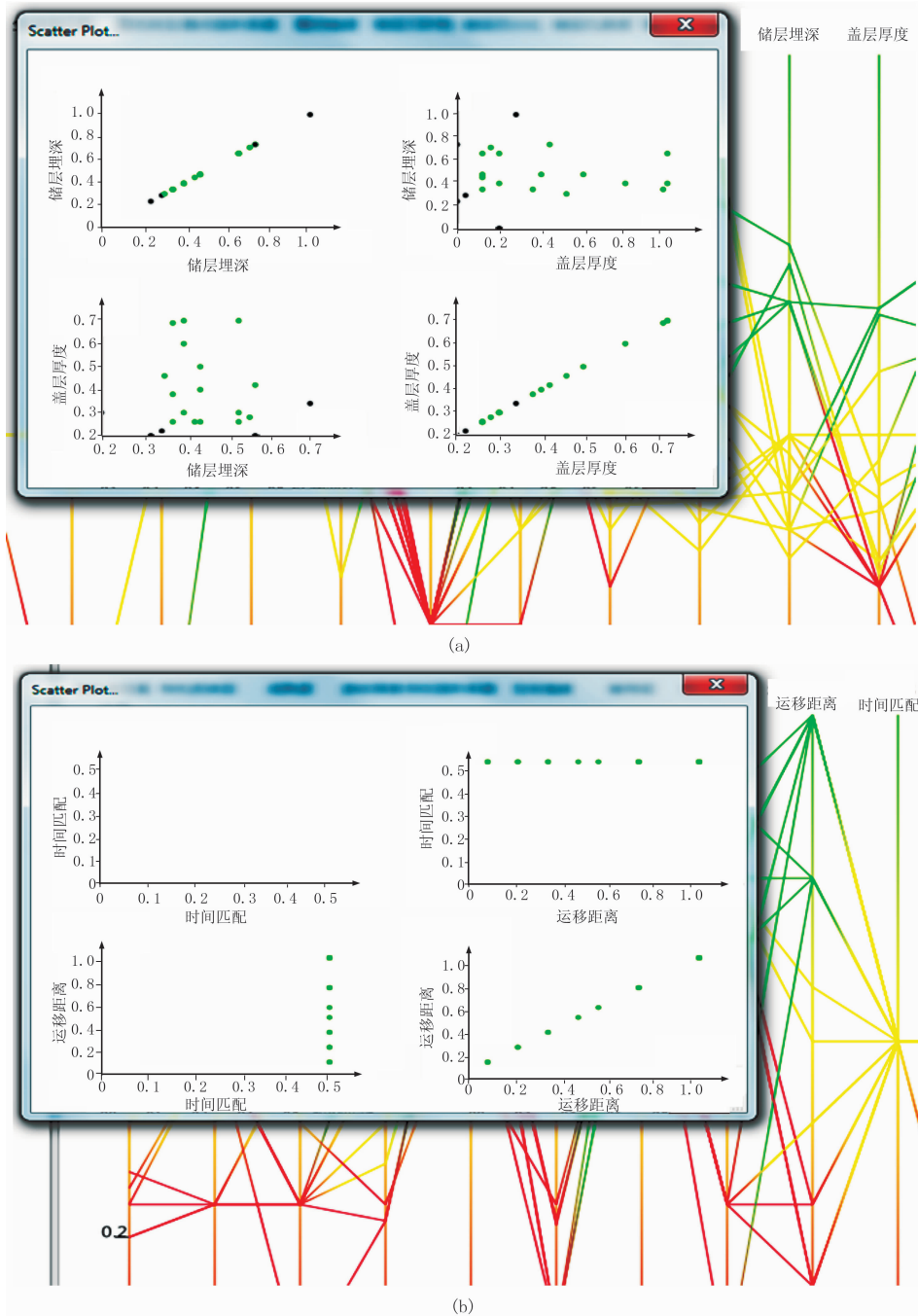


图 12 多维度间的相关性分析(PetroV)

(a)储层埋深与盖层厚度间的负相关统计特征；(b)运移距离与时间匹配间的特殊相关统计特征



## 5 结束语

21世纪初,Foley发表了关于计算机图形学的“十大尚未解决的关键问题”一文<sup>[19]</sup>,将信息可视化列为第三位。该文认为,随着存储成本的急剧下降及随之而来的数据仓库等技术的日益普及,信息可视化将会越来越重要。因此,本文定位于石油勘探开发领域的多学科应用,如资源评价中的多因子地质风险分析、不同测井曲线响应值的交会分析、面向不同数学统计手段的地震振幅数据分析等,引进一种新的多元统计分析手段,即平行坐标可视化技术。本文基于平行坐标可视化技术的多因子地质风险评估案例,对于其他典型石油地质分析,尤其是多元分析具有实际参考意义。期待以平行坐标为代表的系列信息可视化技术,面对无几何属性的抽象信息,尤其是基于信息可视化数据挖掘技术获取抽象信息之间的复杂关系等方面,能够有一系列新的应用,并有所突破。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] McCormick B H, DeFanti T A, Brown M D et al. Visualization in scientific computing. *Computer Graphics*, 1987, 21(6): 15~21
- [ 2 ] Otis R M, Schneidermann N. A process for evaluating exploration prospect. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(7): 1087~1109
- [ 3 ] White D A. Geologic risking guide for prospects and plays. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(12): 2048~2061
- [ 4 ] Houghton J C, Dolton G L, Mast R F et al. Geological survey estimation procedure for accumulation size distributions by play. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(3): 454~466
- [ 5 ] Rao R, Card S K. Exploring large tables with the table lens. In Video Proceedings of CHI'95, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, 1995
- [ 6 ] Wegman E J. Hyper dimensional data analysis using parallel coordinates. *Journal of the American Statistical Association*, 1990, 85(411): 664~675
- [ 7 ] Nahum D G, Stephen G E. Information visualization. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1997, 7(8): 29~31
- [ 8 ] Robertson G G, Card S K, Mackinlay J D. The cognitive co-processor for interactive user interfaces. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on User Interface Software and Technology*, 1989, 10~18
- [ 9 ] George G R, Jock D M, Card S K. Cone Trees: Animated 3D visualizations of hierarchical information. Human factors in computing systems conference proceedings on reaching through technology, 1991, 189~194
- [ 10 ] Andrews D F. Plots of high dimensional data. *Biometrics*, 1972, 28: 125~136
- [ 11 ] Chernoff H. Using faces to represent points in k-dimensional space. *Journal of the American Statistical Association*, 1973, 68(1): 361~368
- [ 12 ] 孙杨,唐九阳等. 改进的多变元数据可视化方法. 软件学报, 2010, 21(6): 1462~1472
- [ 13 ] Card S, Mackinlay J, Shneiderman B. *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*. Morgan Kaufmann, 1999
- [ 14 ] Inselberg A. Parallel coordinates: visualization, exploration and classification of high: dimensional data. *Handbook of Data Visualization*, Springer, 2008
- [ 15 ] Wegman E J, Luo Q. High dimensional clustering using parallel coordinates and the grand tour. *Computing Science and Statistics*, 1997, 28(1): 352~360
- [ 16 ] Ellis G, Dix A. Enabling automatic clutter reduction in parallel coordinates plot. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2006, 12(5): 717~724
- [ 17 ] Hauser H, Ledermann F, Doleisch H. Angular brushing of extended parallel coordinates. In the Proceedings of the IEEE Visualization '97, 2003, 10~16
- [ 18 ] 金之钧,张一伟等. 油气成藏机理与分布规律. 北京: 石油工业出版社, 2003
- [ 19 ] Foley J. Getting There: The Ten Top Problems Left. *Vision 2000 issue of IEEE Computer Graphics and Applications*, 2000

(本文编辑:朱汉东)