

地理空间数据可视分析综述

周志光^{1,2)}, 石 晨¹⁾, 史林松¹⁾, 刘亚楠^{1)*}

¹⁾ (浙江财经大学信息管理与工程学院 杭州 310018)

²⁾ (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310058)
(liuyn@zju.edu.cn)

摘 要: 地理空间数据通常是指用于描述自然现象和社会事件的发生及演变的空间位置、分布、关系、变化规律等方面的信息资料。随着获取渠道的多样化、采集过程的规范化以及采样粒度的精细化, 地理空间数据普遍呈现属性描述多样化、特征分布时空化、结构关系层次化等特点, 经典的统计分析软件和地理信息系统难以有效地发掘地理空间数据中隐含的复杂关系模式及结构特征。可视分析则是在有效地融合可视设计和数据挖掘模型的基础上, 借助交互技术引导用户全面而细致地分析和探索地理空间数据中潜在的对象、过程、事件, 以及所呈现的多维、时空、动态、关联等特征。因此, 文中对面向地理空间数据可视分析的相关研究进行综述, 首先从视觉元素映射的视角出发, 介绍点、线、面、体等视觉元素在地理空间数据可视化过程中的设计与应用; 其次对于地理空间数据的组织形式, 分别概述具有显著多维、时空、层次等特点的地理空间数据的可视分析前沿技术和方法; 进一步简述地理空间数据可视分析技术在自然环境、城市交通、人文经济等领域的拓展应用。在此基础上, 对地理空间数据可视分析的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 地理空间数据; 可视分析; 数据可视化; 交互设计

中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2018.17127

A Survey on the Visual Analytics of Geospatial Data

Zhou Zhiguang^{1,2)}, Shi Chen¹⁾, Shi Linsong¹⁾ and Liu Yanan^{1)*}

¹⁾ (School of Information, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018)

²⁾ (State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: Geospatial data usually refers to information materials describing the occurrence and evolution of natural phenomena and social and historical events. With the diversification of access channel, standardization of acquisition process, and the refinement of sampling granularity, the geospatial data show the following characteristics: the diversification of attribute description, the temporalization and spatialization of feature distribution, and the hierarchy of structure relation. The classic statistical analysis software and geographic information system (GIS) are difficult to exploit the complex relationship patterns and structural features implied in geospatial data. Based on the effective fusion of visual design and data mining model, visual analysis technology interactively guide the users to analyze and explore the above characteristics of hidden objects, processes, events in the geospatial data. Therefore, this paper reviews the related research on the visual analysis of geospatial data. Firstly, we introduce the design and application of visual elements such as point, line, surface and body from the perspective

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-03-09. 基金项目: 国家自然科学基金(61303133); 浙江省自然科学基金(LY15F020024); 全国统计科学研究重大项目(2015LD03); 浙江省一流学科 A 类(浙江财经大学统计学)规划项目; 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1806). 周志光(1983—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为数据可视化与可视分析; 石 晨(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数据可视化; 史林松(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地理空间数据可视化; 刘亚楠(1982—), 女, 博士, 副教授, 论文通讯作者, 硕士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为数据挖掘与多媒体数据可视分析。

of visual element mapping. Secondly, from the perspective of the organizational form of geospatial data, we summarize the advanced technologies and methods with respect to significant multidimensional, temporal-spatial and hierarchical features of geospatial data. Further, applications of the geospatial data visual analysis technology in the natural environment, urban traffic, human economy and other fields are illustrated. Finally, the future development trend of geospatial data visual analysis is prospected.

Key words: data visualization; visual analysis; geospatial data; interactive analysis

人类在认识自然和改造自然的过程中,通常借助符号、语言、文字、地图等形式,描述自然现象和社会历史事件的发生及演变的空间位置、分布、关系、变化规律等方面的地理信息.随着信息科学和传感器技术的快速发展,连续的地理空间实体可以离散为易于计算机识别、存储和处理的数字表示,不同地理几何单元的人类行为、自然及社会现象得以有效记录,形成了以空间、时间、属性为核心要素的地理空间数据集合.有效地利用地理空间数据对经济社会发展形式、人类生活模式进行全面而细致的分析、研判和论证,进而捕捉发展机遇、制定科学决策、推动经济发展和民生改善,是当前统计科学、计量地理、数据分析等研究领域的热点方向,具有重要的理论研究价值和现实意义.

在地理空间分析领域,地理信息系统(geographic information system, GIS)和统计分析软件是常用的地理空间数据分析工具^[1].GIS 不仅能提供丰富的数据存储、处理、计算、展示等基础功能,而且面向用户需求提供大量的空间分析功能,如拓扑分析、网络分析等,有效地提升了地理空间数据的分析与认知效率^[2].然而,随着 GIS 的发展,其结构与功能日趋复杂,用户在具体的数据分析过程中难以理解 GIS 提供的模型及参数含义,并且其相对固定的分析功能难以满足用户探索数据的个性化需求.尤其是在分析具有显著多维、时空、多尺度属性的复杂地理空间数据过程中,GIS 在统一的空间表达、数据建模、人机交互和运行效率上存在明显不足,具有较大的局限性.统计分析软件为地理空间分析过程中特定问题的求解提供有效的支持,适用于规模较小、逻辑关系简单的样本数据分析和研究;而对于规模较大、结构关系复杂的数据,则需要用户反复抽取和分析样本数据,进而根据经验推测原始数据中可能存在的现象及关系模式,不仅过程烦琐、效率低下,而且结论具有较强的不确定性.

可视化(visualization)是利用人类视觉认知高通量的特点,将数据通过直观的视觉形式展现给用户,帮助用户理解复杂现象、诠释复杂数据、探究隐藏规律^[3].可视分析(visual analytics)在经典可视化技术的基础上,有效地集成数据挖掘、模型分析等理论和方法,利用交互可视界面复杂数据进行探索和分析^[4].针对地理空间数据的不同来源、分析目标及特有的空间信息特征,国内外学者设计多种可视分析工具,如基于自然环境^[5]、城市交通^[6]、社交活动^[7]、公共服务^[8]等各个行业数据的可视分析系统,有效地证实了可视分析技术可用于地理空间数据分析,相比于 GIS 具有充分的灵活性和可行性.

可以看出,面向地理空间数据多维、时空、层次等复杂特点,经典的统计分析软件和 GIS 难以有效地处理和分析其错综复杂的关系结构和数据特征.而可视分析能够有效地融合数据挖掘和可视化设计,并借助交互技术对地理空间数据中隐含的多维、时空、动态、关联等特征进行全面而细致的分析和探索.因此,本文面向地理空间数据的可视分析方法进行综述,首先从视觉元素映射的角度出发,详细地介绍点、线、面、体等常见的地理空间数据呈现形式及其典型的设计与应用案例;根据地理空间数据的组织形式,从多维、时空、层次等角度出发,对相应的地理空间数据可视分析方法进行分类和介绍;进而简述地理空间数据可视分析方法在不同行业领域的拓展应用.最后,对地理空间数据可视分析的研究难点和发展趋势进行了分析和展望.

1 地理信息系统(GIS)

GIS 是在计算机软硬件的支持下,以数字化的形式对地理空间数据进行存储、处理、计算、展示和分析,进而解决跨平台、异构数据互操作、分布式空间计算、信息资源共享的软件工具.当前,GIS

已经具备较强的数据可视和解析功能, 不仅支持几何地图的呈现^[9], 而且能够借助空间分析模型对属性数据的时空分布、关联进行深入分析^[10-11], 在地形地貌、气象预测和智慧城市等领域中得到广泛应用。

GIS的起源与发展经历3个重要阶段。1960年, Tomlinson 提出将地图转变为数字化形式描述, 便于地理信息数据的处理与分析^[12]。经过多年发展, GIS在地图呈现、数据分析以及系统二次开发等方面实现巨大突破。20世纪60~80年代, 第1代GIS问世, 如典型的SYMAP和GRID等系统。受限于计算机存储和计算能力, 该阶段的GIS普遍存在存储能力弱、访存速度慢、图形和属性数据分离等缺陷。20世纪80年代后期, 计算机软硬件技术蓬勃发展, 以ARC/INFO, GENAMAP, SYSTEM9等系统为代表的第2代GIS应运而生, 普遍引入DBMS(data base management system)管理数据, 三维建模、渲染和空间分析能力显著增强^[13]。20世纪90年代以后, GIS已经发展成为通用的地理信息数据分析工具, MapInfo, Surpermap^[14], ArcGIS^[15-16]等系统是第3代GIS的典型代表, 实现以系统为中心向以数据为中心的转变^[16], 其具备图像数据、矢量数据的一体化存储等复杂功能。

可以看出, GIS在空间数据处理、分析和显示等方面与时俱进、发展迅速, 然而其相对固定的分析功能难以满足用户探索数据的个性化需求, 尤其是在分析具有显著时空、多维属性的复杂地理空间数据的过程中, 不能有效地集成领域专家先验知识, 定制探索式地分析地理空间数据与发现知识流程, 存在较大的局限性。可视分析能够有效融合数据挖掘和可视化设计, 借助交互技术对地理空间数据中隐含的多维、时空、动态、关联等特征进行全面而细致地分析和探索, 相比于GIS更具有充分的灵活性和可行性。

2 地理空间数据可视分析中的视觉元素

信息可视化中, 点、线、面、体是经典的视觉元素, 其广泛应用于地理空间数据可视分析的过程中^[17]。因此, 本节将从视觉元素映射的视角出发, 对点、线、面、体等元素在地理空间数据分析中的应用进行概述。

2.1 基于点的地理空间数据可视化

空间位置信息是地理空间数据中的基本属性,

是指行为、事件发生的具体地点。在地理空间数据可视分析研究中, 通常借助点的设计描述实体属性数据的分布和位置信息。Wang等^[18]提出的面向南京市无线射频识别(radio frequency identification, RFID)技术获取交通卡口车辆运行数据设计可视分析系统, 其在地图上用圆点描述交通卡口的地理空间位置, 设计颜色、箭头数量及方向等属性, 用于表示不同卡口的车流速度、方向以及流量大小等信息。如图1^[18]所示, 用户能够直观地分析和发现南京市重要的交通枢纽以及车流等信息。

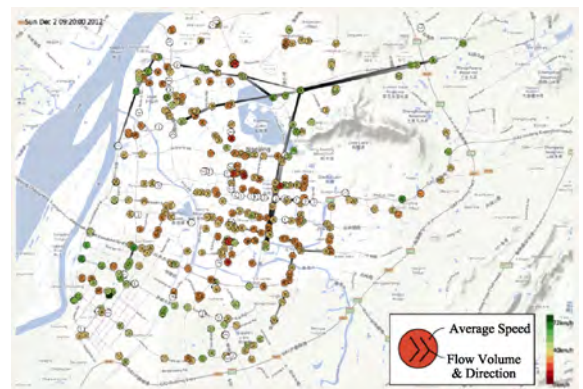


图1 南京市RFID数据可视化

地图上标记圆点能够有效地展示地理空间位置信息, 但是随着数据量的增加, 圆点容易产生相互覆盖等问题, 妨碍数据的有效感知。Walker等^[19]提出一种数据探索的人文地形(美军将服务于战术行动的文化情报称为“人文地形”)可视化分析方法, 利用散点图、密度图和点图将人文地形不同属性的值用点映射到地图上, 通过分析这些点代表的属性值分布及其关系来揭示情报来源和走势, 以帮助军事专家制定相应的战略决策, 如图2^[19]所示。

Chen等^[20]提出了一种分层多类采样的新型散点图可视化方法。在保持不同数据类之间相对密度特征不变的情况下, 采用优化扩展的多类蓝噪声采样算法对原始数据进行下采样处理, 进而利用分层采样方法解决散点图缩放过程中采样结果的一致性问题。图3^[20]在标准的篮球场空间视图上, 展示了3支NBA球队的投篮位置分析情况, 并在保持原始数据密度分布的基础上, 对3支球队数据进行区分和展示。

2.2 基于线的地理空间数据可视化

线是对点进行连接的可视化方法, 通常表示2个或多个视觉元素之间的关联关系。地理空间数据



图2 人文地形可视分析系统

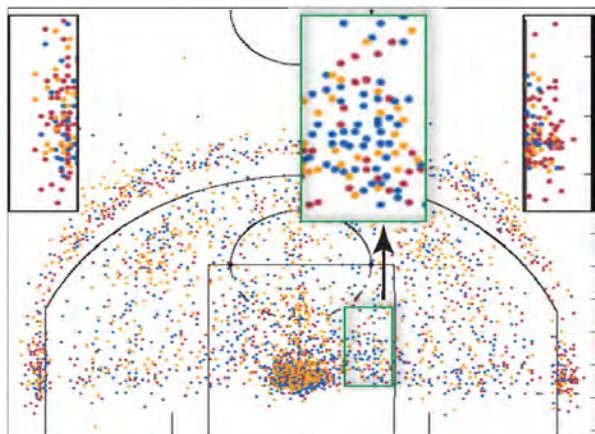


图3 分层多类采样可视化方法

中诸多有价值信息可以借助线可视化方式描述;例如,路径、流量、趋势等。Rae^[21]针对大型人口普查数据集,利用带有箭头的线段表示人口的流动方向和迁移距离,以便直观地分析人口迁居的地理空间特征。

随着数据量的增加,线可视化分布错综复杂,会干扰人眼视觉感知,妨碍地理空间特征的识别。因此,大量研究工作对线可视化进行优化处理;例如,线聚类 and 线捆绑等技术。Andrienko 等^[22]面向大规模的船舶运输轨迹设计渐进聚类分析方法,根据船舶目的地的相似性,利用OPTICS算法将原始轨迹进行聚类分析和展示。如图4^[23]所示, Lambert 等针对全球空中交通网络,对初始的上万条飞机航线进行3D线捆绑;进一步优化在地球背景上的显示效果,以帮助用户理解网络的视觉复杂性,并减少线分布杂乱引起的遮挡问题。

线捆绑技术可以有效地避免线可视化布局混乱问题,虽然能够在一定程度上反映数据的整体走势,却无法具体地描述数据对象之间的关联,存在一定的局限性。Guo 等^[24]面向大规模的地理流向数据提出平滑和映射算法,采用了流密度估计方法和流图一般化方法来平滑其量值,并用一个选择

算法选取出代表性的流并进行映射,如图5^[24]所示。与一般的线捆绑技术相比,该算法能够较好地提取并分离重要的流向和连接,避免了在减少视觉混乱时属于不同流向的连接被捆绑到一起的问题。

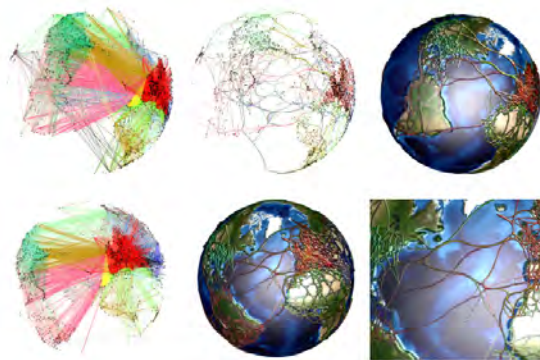


图4 全球空中交通网络捆绑路线图



图5 基于流的平滑和映射

2.3 基于区域的地理空间数据可视化

区域是地理空间数据中具有相邻空间位置或者相似属性的地域范围,例如,地图中各个国家、省份、城市等行政区域,或基于人类社交行为的属性区域等。在具体的地理空间数据可视分析研究中,区域的定义可以大致分为固定划分区域、属性聚类区域和交互指定区域等。

Correll 等^[25]针对传统专题地图可能由于基础比率偏差或样本异常而产生误导的缺陷, 采用 Bayesian Surprise 方法来设计 Surprise 地图, 将预期模型与观测数据相结合, 执行贝叶斯更新步骤来重新估计其合理性, 以提升意外事件的重要性并降低预期事件的权重. 图 6 在固定划分地理区域的地图上, 展示了加拿大各省份的犯罪事件密度和人均犯罪率分布的可视化对比结果^[25].

属性聚类区域是指把具有相同或相似属性的地理空间位置进行聚类, 进而获得具有特定分析意

义的区域特征. Collins 等^[26]提出了气泡集(bubble sets)方法, 在不改变原始节点布局和地图可视化的前提下, 采用隐式曲线对每一组集合聚类生成一个连续光滑的闭包, 并用不同的半透明颜色显示为五颜六色的气泡. Pu 等^[27]提出了一个可视分析系统 T-Watcher, 根据 GPS 数据将地图划分为栅格点, 并对其进行聚类形成区域视图, 颜色亮度表示车流量, 如图 7^[27]所示, 出租车上下客密集区域可以有效呈现城市中的热点位置分布, 进而帮助交通部门监控并分析大城市复杂的交通情况.

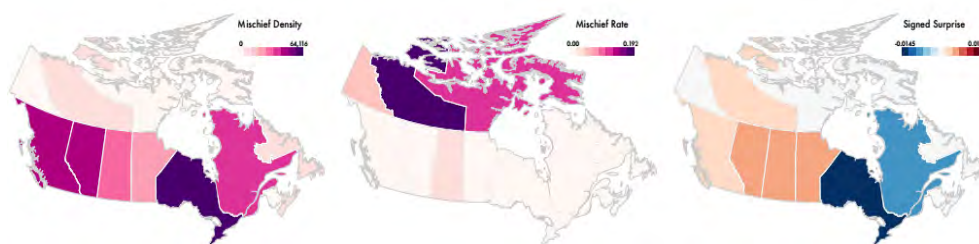


图 6 加拿大各省份犯罪分布图

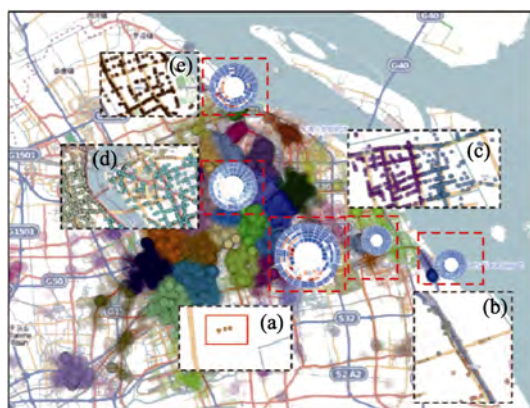


图 7 T-Watcher 区域聚类视图

交互指定区域是指用户为了查看可视对象在特定区域的集散情况, 利用过滤、刷等交互技术选定区域进行展示. 为了选择最优广告牌位置, Liu 等^[28]基于大规模出租车轨迹数据, 提出了一种交互式视觉分析系统 SmartAdP. 在一些候选位置中, 通过一组耦合可视化, 包括解决方案视图、位置视图和排名视图, 使用户可从多个角度和不同层次细节来进行比较并选出最合适的广告牌投放位置. Ferreira 等^[29]开发了一个快速查询和展示出租车起点-终点(origin-destination, OD)数据的分析系统 TaxiVis. 如图 8^[29]所示, 用户可以借助交互界面快速地定义可视化查询模型, 并引入自适应的 LOD 方式减少数据量以减少出租车 OD 点分布地重叠

覆盖现象, 同时利用热力图展现出租车 OD 点的宏观分布情况, 并利用不同的方式构建网格地图, 帮助用户了解城市各个区域出租车的 OD 分布情况.

2.4 空间立体元素可视化

空间立体元素可视化是指在 2D 平面地图的基础上, 在空间维度上绘制实体或者叠加属性. Qu 等^[30]提出了聚焦+上下文的放大技术, 可以在三维虚拟城市地图中放大感兴趣的路线或地标建筑, 利用 Seam Carving 算法对背景区域进行裁剪, 进而对感兴趣的道路进行拓宽, 同时在利用基于网格的方式对地标建筑进行缩放的基础上, 将感兴趣道路进行无遮挡的展示, 其可视化效果如图 9^[30]所示.

Reddy 等^[31]提出了一种三维地形可视化方法, 利用虚拟现实建模语言(VRML)通过三维建模来对特定区域的地形进行近似逼真的立体可视化展示. Yuan 等^[32]将地震数据与卫星观测资料在时间和空间上进行整合, 开发可视分析系统, 设计高维传递函数, 结合多种空间上的可视化形式来高效、直观地展示多模态数据, 如图 10^[32]所示.

Chen 等^[33]基于 Google Earth 设计了一个气象研究可视化平台, 在地理空间视图可视化的基础上, 从空间垂直方向绘制大气层卫星数据, 通过 NASA Goddard 互动在线可视分析基础设施系统, 展现云层反射率垂直剖面信息的变化情况, 如图 11^[33]所示.

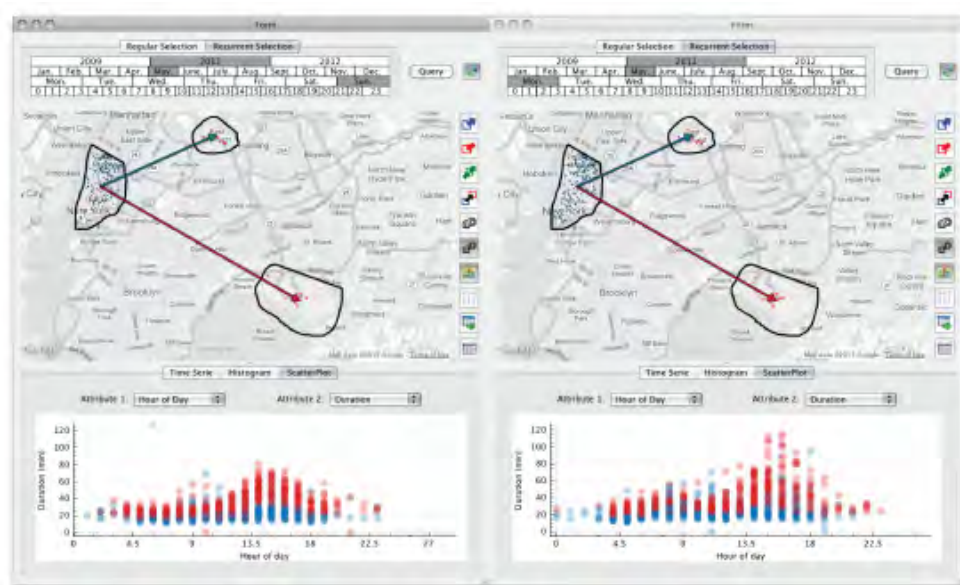


图 8 出租车数据 TaxiVis 系统

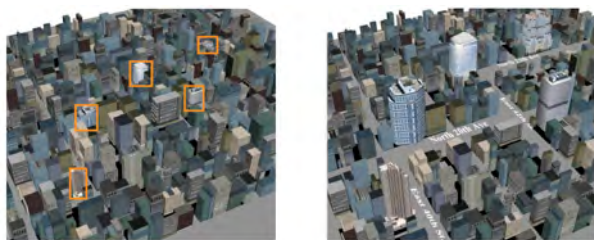


图 9 城市三维地图的聚焦+上下文可视化

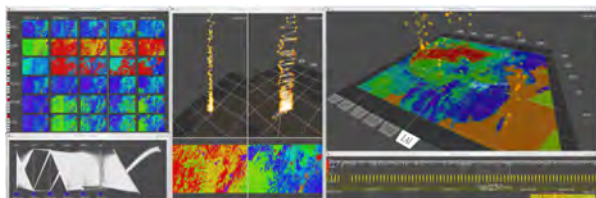


图 10 地震数据与卫星观测资料协同可视化

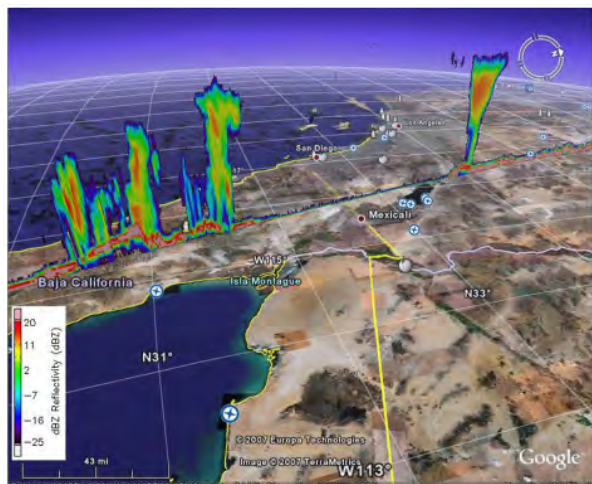


图 11 云层反射率垂直剖面图

3 地理空间数据的组织形式

地理空间数据普遍具有多维、时空、层次等特点,例如国家统计局定期发布的各个地区的宏观经济数据,全国各个空气质量监测站点实时公开的污染指标数据等。因此,本节从多维、时空、层次等数据组织形式的角度出发,对地理空间数据可视分析技术进行综述。

3.1 地理空间多维数据可视化

地理空间中多维数据普遍存在,且属性之间蕴含着用户感兴趣的关联特征,相关可视分析研究借助于地图嵌入元素、Small multiples、关联视图等方式对地理空间多维数据进行可视分析。陈为等^[34]基于贝叶斯网络提出了 BN-Mapping 可视化方法,在利用启发式方法对原始的多维地理空间数据离散化之后,对其训练得到相应的贝叶斯网络模型,针对该模型的拓扑结构、条件概率表及数据本身基于地理位置的分布关系等分别设计了可视化视图,并通过交互式可视分析界面将它们进行有机结合,使用户可以对多维变量之间的地理位置相关隐式关系进行探索、发现及分析。如图 12^[34]所示,芝加哥地区的犯罪模式统计和分析显示在基于 glyph 的地理空间视图上。

Turkay 等^[35]从交互的角度出发,支持用户在地图空间中选择感兴趣区域,利用 Small multiples 展示对应区域多维属性的变化,多个属性关联关系的协同展示,有助于领域专家综合各种信息,全面地对英国国家经济、人口、地缘、政治等因素进行

探索式的分析和理解, 如图 13^[35]所示。

Wang 等^[36]提出了对大规模多维数据集进行实时建模的高斯立方体(gaussian cubes)模型, 在结合大量统计信息的基础上, 通过计算最优多维高斯分布, 扩展和提升了大数据的建模能力, 能够支持地理空间多维属性数据的实时检索、查找和可视化。为了避免人机交互过程中, 等待时间过长影响数据分析效率等问题, Turkyay 等^[37]提出一种渐进式的交互可视分析框架, 支持用户交互选中感兴趣属性, 引入在线式的聚类 and 降维算法分别对高维数据进行渐进式分析并展示, 同时支持用户交互更改属性, 可视化结果会在有限时间内完成反馈, 经过数次迭代操作得到聚类 and 降维结果, 之后基于用户

对不同途径获得的条件筛选做进一步组合操作, 从而获得最终的高维数据可视分析结果。图 14^[37]展示了带有显著地理空间信息标签的信用卡消费数据渐进式的分析结果。

3.2 地理时空数据可视化

在地理空间数据中, 数据的多维属性数据往往随时间的推移发生改变。大量研究工作面向地理空间数据的时空属性开展可视分析方法研究。Kehrer 等^[38]提出一个多重类别的比较模型, 设计并列视图展示挪威海湾的船舶航行路线随时间的变化情况, 横坐标表示一天中的不同时间段, 纵坐标表示一周中的不同天数, 将一周中每个工作日不同时间段的船舶密度并列在一起进行对比。Lu 等^[39]面

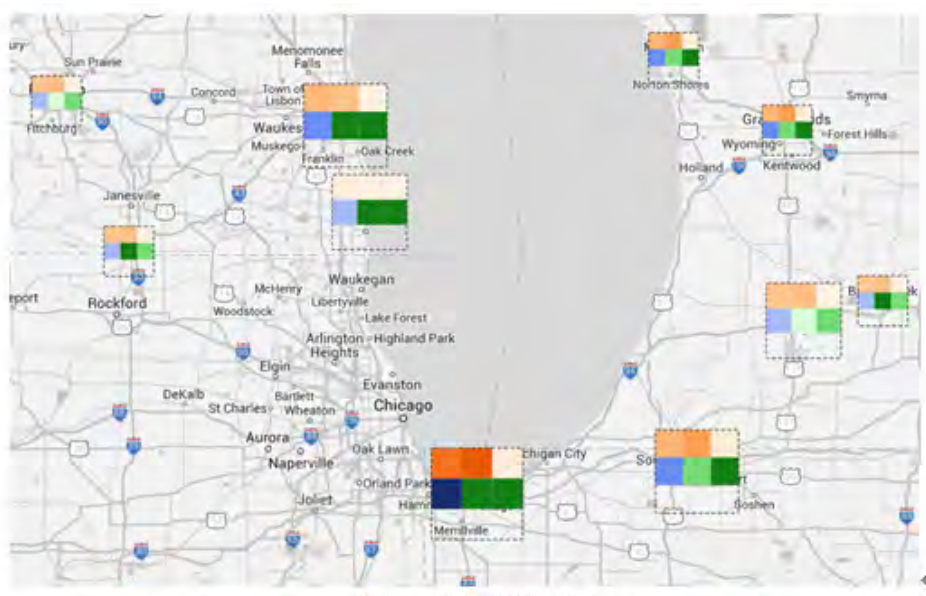


图 12 BN-Mapping 可视化方法



图 13 英国人口普查数据的多维属性可视化

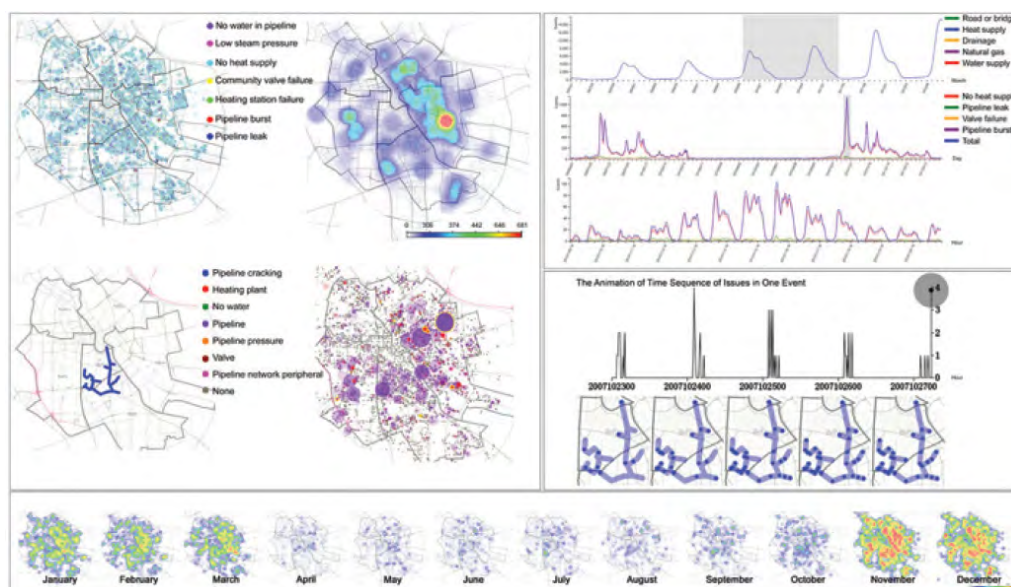


图 17 城市公共服务热线数据可视分析系统

3.3 地理空间层次数据可视化

地理空间数据的时空维度通常存在层次结构特征, 例如宏观经济统计数据, 时间属性可以分解为年度、季度、月度等尺度, 空间属性可以分解为国家、省、市、区等尺度. 而且, 随着数据采集技术的发展以及统计过程的规范化, 时空尺度不断细化,

层次结构关系日趋复杂. 为了能够地直观地分析和展示不同尺度、不同地理空间数据的分布特征, Goodwin 等^[41]设计层次颜色图, 利用颜色分量描述多尺度数据的正负相关性以及相关程度, 设计像素化的地图形式表达局部空间数据的差异, 如图 18^[41]所示.

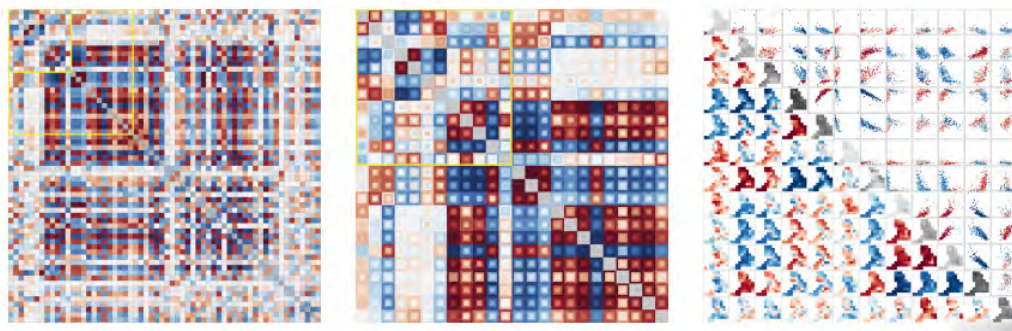


图 18 多尺度、跨地域的多变量可视方法

Packer 等^[42]有效地结合基于距离的空间聚类算法和交互式可视分析技术, 在聚类结果视觉反馈的启发下, 探索式地改进聚类算法的参数, 优化空间数据聚类分析过程. 集合(Ensemble)模拟数据具有典型的多维时空属性, 且在空间维度具有显著的多分辨率特征. Wang 等^[43]设计内嵌式平行坐标实现多分辨率气象集合模拟数据的多维参数关联关系的协同可视, 并且利用 Small multiples 描述模拟数值与真实观测数据之间的差异. Biswas 等^[44]基于不同分辨率下的多维敏感度属性, 在空间对象进行聚类分析, 进而利用颜色协同展示聚类结

果的一致性, 并且借助 MDS 直观地呈现不同时间步的多分辨率下多维敏感度属性差异, 如图 19^[44]所示.

针对食品安全等领域对数据空间分布和关联关系分析的需求, 陈谊等^[45]设计基于热力图和放射环的关联层次数据可视化工具 SunMap, 在地理空间视图上叠加热力图展示数据分布, 用基于节点排序的放射环可视化具有层次结构的数据, 并将 SunMap 应用于全国农药残留检测数据分析领域, 帮助用户快速找到目标信息, 探寻隐含于数据中的关联特征.

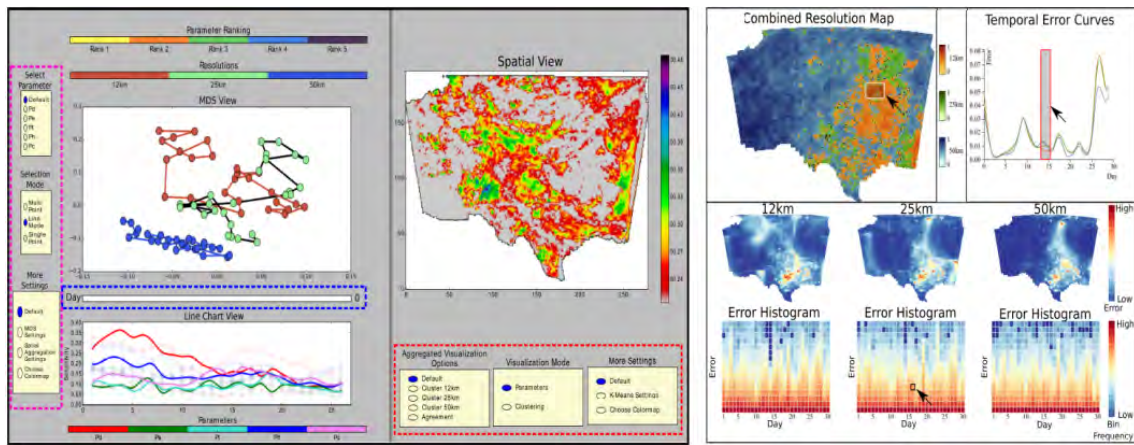


图 19 集合模拟数据可视分析系统

4 地理空间数据可视化在各领域的应用

结合地理空间数据的多维、时空、层次等特点,利用点、线、面、体等视觉元素映射方式,开发与设计交互式的可视分析系统工具,能够有效帮助用户快速理解和分析地理空间数据中的隐含的复杂特征结构,广泛应用于各个行业领域,如自然环境、城市交通和人文经济等。

4.1 地理空间数据可视化在自然环境领域的应用

随着传感器技术的快速发展,自然环境数据被更加准确和细致地采集和记录,针对具有显著地理空间属性的自然环境数据进行可视分析能够有效揭示各种自然现象的位置分布、时空迁移、动态演变等特征和规律。

Goda 等^[46]聚焦于 2011 年日本东北海岸的海啸灾害数据,设计并实现能够有效呈现海啸灾害和风险分析不确定的可视分析系统,模拟地震源特征,可视化海啸传播场景,对海啸危害进行风险建模和损失估算分析,进而提高人类针对自然灾害的应急处理能力。Xavier 等^[47]设计一种面向动物迁徙和自然环境之间关联关系探索的交互式可视分析工具,利用移动轨迹的颜色及宽度属性直观地映射各种环境因素对动物迁徙的影响,图 20^[47]展示了具体鸟类的迁徙与自然环境的关联关系图。

梅鸿辉等^[48]开发并研制了全球尺度三维大气数据可视化系统 AVIS,面向气象数据的海量、多维、多源、时变、多尺度等特征,设计综合考虑密度场、向量场、张量场以及非空间数据场等多类型数据的混合绘制方法,全方位、多角度地展现原始气象数据中隐含地复杂特征,帮助气象专家快速分析和解读气象数据。图 21^[48]所示为 Avis 的系统

界面,以及描述风场、温度场以及相对湿度的混合可视化结果。

面向具有显著时空、多维属性的空气质量检测数据,可视化领域研究学者基于不同的数据分析目标,开发多种有效的可视分析工具。Qu 等^[5]学者基于香港特别行政区公布的空气质量监测数据,开发可视分析工具,利用极坐标和改进的平行坐标,展示数据不同维度的属性信息,进而结合网络关系图,有效地描述不同属性之间的关联特征。孙国道等^[49]聚焦于不同城市之间的空气污染状况差异,以及城市之间空气污染的相互作用等问题,设计基于城市群空气质量数据的可视分析系统,结合空气质量数据的多维时空属性分析,引入 Voronoi 图展示城市群的空间分布,嵌入线条堆栈图呈现城市群的时序演化,利用平行坐标视图展示城市群的空气污染状况,相关研究结果为城际之间合作解决空气污染问题提供支持。

Li 等^[50]面向自然气候变化的时空多维属性,有效融合属性信息和地理空间视图,设计 Vismate 可视化工具,通过地理空间外围的环形视图有效展示空间聚类的时序属性变化,便捷地与地图进行区域关联和互动,辅助用户直观地感知初始气象数据时空维度的异常特征。

4.2 地理空间数据可视化在城市交通领域的应用

城市交通数据同样具有显著的时空属性,能够有效记载交通对象的位置分布、移动、流量等现象,对城市交通数据进行可视分析,有助于居民健康出行、优化城市规划建设、解决交通拥堵等问题。典型的城市交通数据记录传感器包括交通枢纽安装的监控设备、出租车辆装载的全球定位系统(global positioning system, GPS)以及公共自行车站



图 20 动物迁徙与环境因素的关联关系可视分析

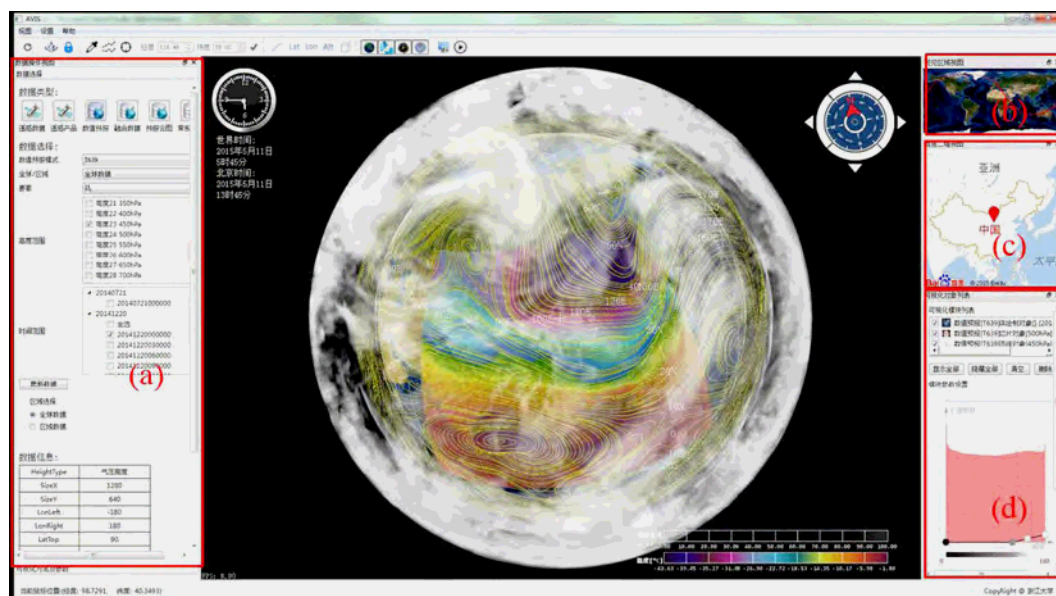


图 21 全球尺度三维大气数据可视化系统 AVIS

点的用于记录车辆借出、归还的电子设备等。基于上述传感器采集的数据, 可视化领域的研究学者设计多种面向城市交通数据的可视分析工具, 帮助领域专家快速分析和掌握城市交通运行状况。

Wang 等^[18]面向南京市 RFID 交通数据设计可视分析工具, 在地图空间嵌入圆点表示基站位置, 边描述交通链路关系, 点和边等视觉元素能够直

观地呈现宏观的城市交通运行模式, 设计像素图交互地展示感兴趣基站的车流量统计信息, 进而支持用户探索式地分析交通拥堵状况与基站链路以及路径选择之间的关联。图 22^[18]展示了该系统的可视分析流程。

Huang 等^[51]面向深圳市出租车 GPS 数据, 研制基于图模型分析的交通轨迹数据可视分析系统

TrajGraph. 将轨迹要素抽象为图结构的边和顶点, 综合考虑距离、流量、时间、速度等交通要素, 衡量抽象图结点的重要程度, 进而深入剖析深圳市交通路况, 为城市规划建设提供决策支持. 路径选择是城市交通领域的重要研究命题, 与居民的出行及城市生活效率密切相关. Lu 等^[52]从可视分析的角度出发, 基于出租车 GPS 数据研制了一种有效的路径选择及推荐方法. 在地理空间视图中, 对行程的起始和终止区域进行交互式的过滤和提取, 在地图中展示不同路径的同时, 支持路径相关和轨迹相关等多种因素的可视表达, 帮助用户快速比较和选择行程路径, 图 23^[52]展示了利用该系统进行路径选择的可视分析效果.

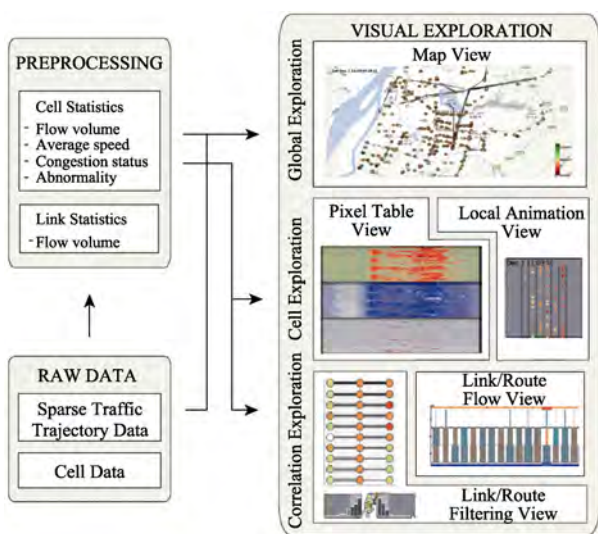


图 22 交通路口数据可视分析流程

为了进一步提高出租车 GPS 数据的分析和探索效率, Al-Dohuki 等^[53]利用文本语义转换工具, 将初始的出租车轨迹数据转换为出租车轨迹索引文件和行程索引文件, 设计并研制了基于语义的出租车轨迹交互式可视分析工具 SemanticTraj. 提供包括布尔查询、邻近查询以及模糊查询等不同的查询方案, 支持用户交互输入语义查询条件, 并且指定时空界限范围, 进而在地理空间视图上有效展示查询结果. 相比于传统的地图空间操作式方法, 基于语义的交通数据过滤和分析的角度具有较强的创新性. 近年来, 政府倡导绿色出行, 公共自行车成为城市交通的重要组成部分, 对于公共自行车借出、归还数据进行可视分析, 不仅能够反映公共自行车的使用效率, 而且可以帮助用户快速发现市民出行的时空规律. Shi 等^[54]面向杭州市公共自行车数据, 聚焦车流模型研制了可视分析系统设计关联视图展现车流的 OD 分布、时空变化以及借出车辆与天气、事件等影响因素之间的关联关系等. 进一步设计平行坐标视图展示了车流多维属性的关联特征, 系统的分析结果有助于城市公共自行车使用效率的统计以及居民出行规律的探索. Yan 等^[55]将公共自行车数据构造为一个基于空间、时间、用户基本信息的张量类型数据, 进而利用张量分解提取潜在的用户行为模式, 设计可视分析系统, 从空间、时间、用户等不同维度出发, 探索城市公共自行车的使用模式和用户特点. 图 24^[55]展示了基于张量分解的公共自行车可视分析系统界面.

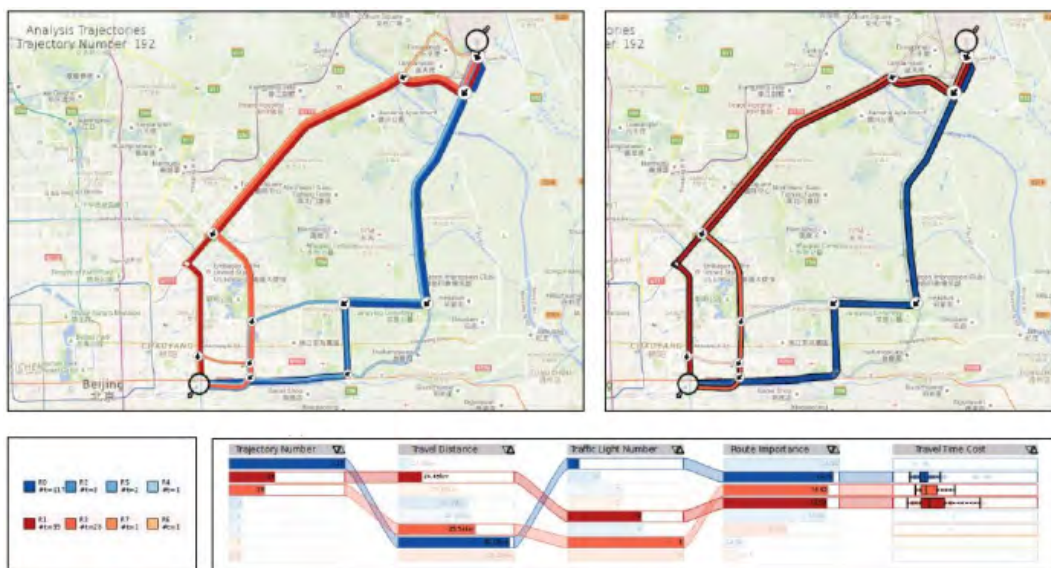


图 23 路径选择行为的可视分析



图 24 基于张量分解的公共自行车可视分析系统

4.3 地理空间数据可视化在人文社会经济领域的应用

人类社会的社交活动、经济行为等数据同样存在显著的地理空间属性, 国内外研究学者针对人文社会经济领域的的数据, 开展了大量的可视分析研究, 用以揭示不同地理空间范畴的人群活动规律、社交行为、经济运行状况等信息, 为社会繁荣稳定、经济发展评估等决策提供有效支持。

Doraiswamy 等^[56]以纽约出租车数据以及地铁数据为例, 设计基于拓扑分析的城市事件探索的可视分析系统。将时空数据转换为具有特定分析含义的时序标量函数, 将地理空间发生的事件抽

象为不同的拓扑结构特征, 提供可视化界面支持用户直观分析和交互选取感兴趣的事件特征, 进而在原始数据中方便、快捷地实现相似事件的分析和探索。图 25^[56]展示了基于拓扑分析的城市事件探索的可视分析流程。

Wu 等^[57]面向广州市记录手机-基站交换的电信数据, 设计一种能够有效分析城市人群移动行为的可视分析系统 TelCoVis, 聚焦于人群共同出现(Co-occurrence)的行为特点, 研究共同出现行为特征的提取和关联分析, 并且设计地理空间视图、轮廓树图、平行坐标图等可视化效果, 帮助用户快速识别人群共同出现的行为特征, 为相关部门研究

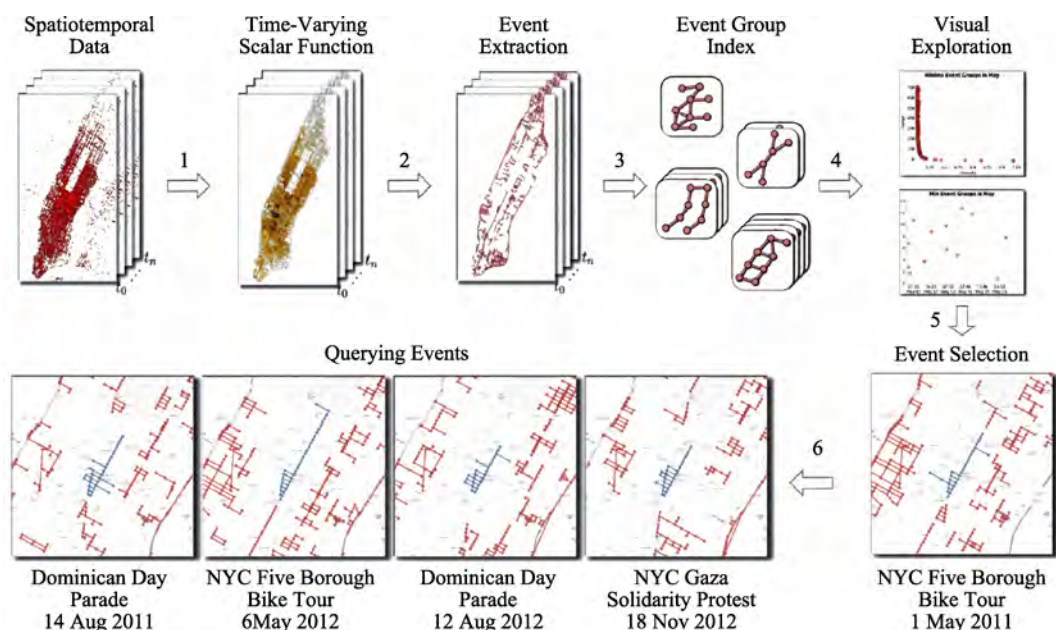


图 25 基于拓扑分析的城市事件探索的可视分析流程

和分析城市人群活动及各类衍生的社会问题提供帮助和支持. 图 26^[57]展示了面向共同出现行为的城市人群移动可视分析系统界面图.

Cao 等^[58]面向社交网络中的流行媒介 Twitter 数据, 研制了能够有效结合地理空间信息, 实时分析社交网络舆情的可视分析系统 Whisper. 以向日葵传播种子的过程为隐喻, 类比一个 Twitter 热点话题的产生过程, 话题与地理空间属性的关联能够帮

助用户直观地感知不同地域对于热点话题的态度和关注度. 图 27^[58]展示了基于向日葵隐喻的社交网络数据可视分析系统界面图.

Turkay 等^[35]面向英国经济人口普查数据, 设计交互式的时空多维数据可视分析系统, 支持用户交互定义分析路径, 利用 Small multiples 展示各个经济指标的相关性及变化规律, 分析结果有利于经济学家快速发现地域经济发展的特点及规律. 周志光



图 26 面向共同出现行为的城市人群移动可视分析系统

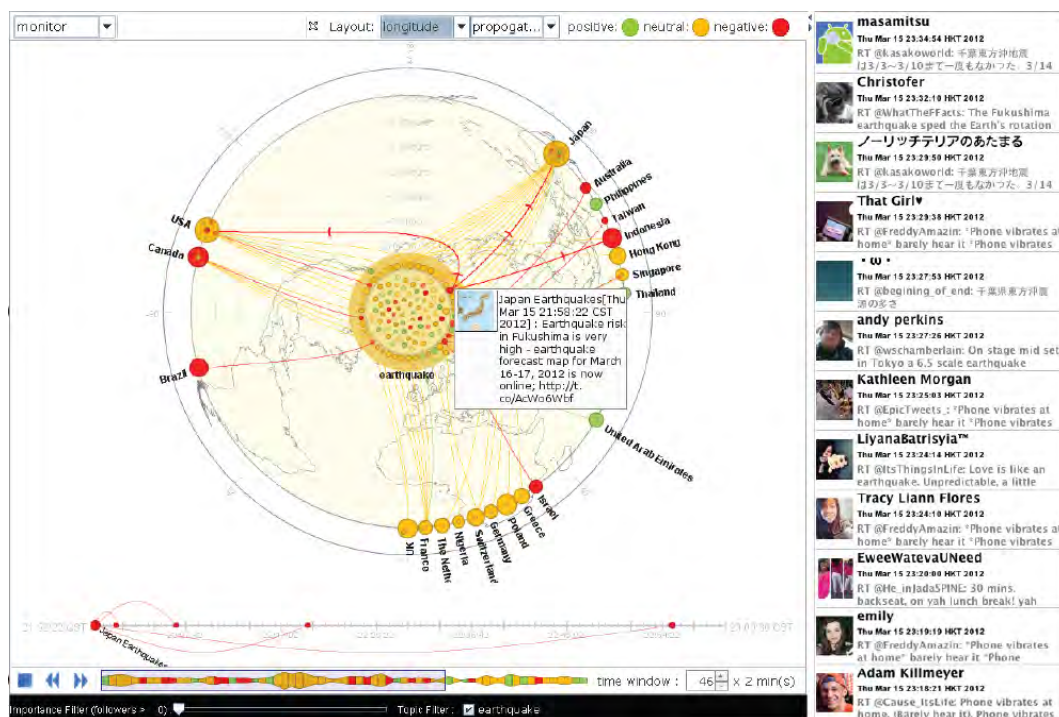


图 27 基于向日葵隐喻的社交网络数据可视分析系统

等^[59]面向 GDP 数据设计时空多维属性的可视分析方法. 提出研究面向 GDP 数据多维属性特征的时空交互可视分析方法, 设计内圆、中环、外环的可视化模式, 协同展现地理空间各个区域的多维属性差异、产业结构比例及时序发展规律等特征, 为用户提供快速探索经济统计数据中产业结构时空特征模式的工具.

5 总结与展望

本文对基于可视化的地理空间数据分析方法进行了综述, 并针对现有研究成果, 介绍了 GIS 的数据分析功能和阶段发展情况, 视觉元素在地理空间数据可视分析中的设计与应用, 数据组织形式在地理空间可视分析中的前沿技术和方法以及地理空间数据可视分析在具体领域的拓展应用. 未来越来越多的地理空间数据将被采集和记录, 而地理空间数据分析的需求也将持续增长, 目前该领域还存在很多重大的问题和挑战, 尤其是面向不同组织形式的地理空间数据可视化, 仍有待于持续深入研究:

(1) 虽然视觉元素叠加、Small multiples 或关联视图等方式能够有效展现地理空间多维属性信息, 但是地理空间对象的相关性受限于固定的地图空间位置, 难以直观的呈现, 且关联特征缺少定量描述, 分析结果存在不确定性. 因此, 在传统的多维数据分析基础上, 如何有效地结合相对固定的地图表达方式, 设计地理空间要素动态可变的抽象可视化方法, 进而驱动空间统计分析方法参数调整和结果优化, 定量地描述多维属性空间关联特征, 是辅助用户快速、直观地分析与挖掘地理空间多维属性关联特征的关键, 对于地理空间数据的探索与理解具有重要的意义.

(2) 并列地图、动画展示或交互视图等形式在一定程度上能够呈现地理空间多维属性的时序变化特征, 却难以克服屏幕空间的局限; 需要结合领域专家的先验知识以及用户的特定需求, 全面而综合地展示、对比、探索和量化原始数据中复杂的时空分布以及多维属性关联关系. 因此, 有效地结合数据分析目标, 有针对性地地理空间数据的多维、时空要素进行归纳计算或维度转换, 实现多维时空信息的协同展示, 进而构建地理空间多维数据的时序相关模型, 从不同空间、属性视角度量空间特征的动态变化规律, 以及属性细节的时空

关联关系, 是地理空间数据时空分布规律的分析、识别、表达的关键.

(3) 多尺度协同展示和交互式探索是层次结构数据可视化分析的有效途径. 然而对于多维属性时空分布各异, 关联关系动态变化的地理空间数据而言, 传统的多尺度协同展示容易产生屏幕空间资源不足或细节特征展示不清等问题, 而交互式的分析策略则缺乏有效的知识引导, 不利于多维属性多尺度时空关联模式的探索和分析. 因此, 如何在有限的空间资源背景下, 设计高效的时空协同可视化界面, 支持全局和细节时空特征的展示与分析, 进而在用户先验知识的引导下, 实现多维属性关联关系的尺度转换与重建, 自适应地对多维属性进行多尺度时空关联建模和特征模式分析, 对于地理空间数据的特征探索和关系挖掘具有重要的意义.

参考文献(References):

- [1] Cui Tiejun. The principle of geospatial analysis[M]. Beijing: Science Press, 2016 (in Chinese)
(崔铁军. 地理空间分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2016)
- [2] Samet H. Applications of spatial data structures: computer graphics, image processing, and GIS[M]. Boston: Addison-Wesley, 1990
- [3] Herman I, Melançon G, Marshall M S. Graph visualization and navigation in information visualization: a survey[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2000, 6(1): 24-43
- [4] Sacha D, Stoffel A, Stoffel F, *et al.* Knowledge generation model for visual analytics[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2014, 20(12): 1604-1613
- [5] Qu H M, Chan W Y, Xu A B, *et al.* Visual analysis of the air pollution problem in Hong Kong[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2007, 13(6): 1408-1415
- [6] Liu W, Zheng Y, Chawla S, *et al.* Discovering spatio-temporal causal interactions in traffic data streams[C] //Proceedings of the 17th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2011: 1010-1018
- [7] Wu Y C, Liu S X, Yan K, *et al.* OpinionFlow: visual analysis of opinion diffusion on social media[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2014, 20(12): 1763-1772
- [8] Zhang J W, Yanli E, Ma J, *et al.* Visual analysis of public utility service problems in a metropolis[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2014, 20(12): 1843-1852
- [9] Lv Guonian, Yuan Linwang, Yu Zhaoyuan. Challenges to development and socialization of GIS technology[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(4): 483-490 (in Chinese)
(闫国年, 袁林旺, 俞肇元. GIS 技术发展与社会化的困境与挑战[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(4): 483-490)
- [10] Reveiu A, Dardala M. Techniques for statistical data visualization in GIS[J]. Informatica Economica Journal, 2011, 15(3): 72-79
- [11] Bo H, Bin J, Hui L. An integration of GIS, virtual reality and the internet for visualization, analysis and exploration of spatial

- data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2001, 15(5): 439-456
- [12] Huang Xingyuan, Ma Jinsong, Tang Qin. *Introduction to Geographic Information System*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990: 107-115 (in Chinese)
(黄杏元, 马劲松, 汤 勤. *地理信息系统概论*[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 1990: 107-115)
- [13] Coors V. 3D-GIS in networking environments[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2003, 27(4): 345-357
- [14] Yang Hongpeng. *The research and realization of 3D terrain visualization methods based on ArcGIS*[D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2008 (in Chinese)
(杨宏鹏. *基于 ArcGIS 的地形三维可视化方法的研究与实现*[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008)
- [15] Bo Weiwei. *Map symbol design in GIS based on ArcMap*[J]. *Geospatial Information*, 2006, 4(2): 70-72 (in Chinese)
(薄伟伟. *基于 ArcMap 的地图符号设计与研究*[J]. *地理空间信息*, 2006, 4(2): 70-72)
- [16] Hong Defa, Yang Guodong, Wang Zhiheng. Construction of virtual campus based on ArcScene and SketchUp[J]. *Computer Technology & Development*, 2008, 18(12): 41-43 (in Chinese)
(洪德法, 杨国东, 王志恒. *基于 ArcScene 和 SketchUp 的虚拟校园的建立*[J]. *计算机技术与发展*, 2008, 18(12): 41-43)
- [17] Chen W, Guo F, Wang F Y. A survey of traffic data visualization[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(6): 2970-2984
- [18] Wang Z C, Ye T Z, Lu M, *et al.* Visual exploration of sparse traffic trajectory data[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2014, 20(12): 1813-1822
- [19] Walker R, Singsby A, Dykes J, *et al.* An extensible framework for provenance in human terrain visual analytics [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2013, 19(12): 2139-2148
- [20] Chen H D, Chen W, Mei H H, *et al.* Visual abstraction and exploration of multi-class scatterplots[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2014, 20(12): 1683-1692
- [21] Rae A. From spatial interaction data to spatial interaction information? geovisualisation and spatial structures of migration from the 2001 UK census[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2009, 33(3): 161-178
- [22] Andrienko N, Andrienko G. Visual analytics of movement: an overview of methods, tools and procedures[J]. *Information Visualization*, 2013, 12(1): 3-24
- [23] Lambert A, Bourqui R, Auber D. 3D edge bundling for geographical data visualization[C] // *Proceedings of the 14th International Conference Information Visualisation*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 329-335
- [24] Guo D S, Zhu X. Origin-destination flow data smoothing and mapping[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2014, 20(12): 2043-2052
- [25] Correll M, Heer J. Surprise! Bayesian weighting for de-biasing thematic maps[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017, 23(1): 651-660
- [26] Collins C, Penn G, Carpendale S. Bubble sets: revealing set relations with isocontours over existing visualizations[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1009-1016
- [27] Pu J S, Liu S Y, Ding Y, *et al.* T-Watcher: a new visual analytic system for effective traffic surveillance[C] // *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Mobile Data Management*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 127-136
- [28] Liu D Y, Weng D, Li Y H, *et al.* SmartAdP: visual analytics of large-scale taxi trajectories for selecting billboard locations[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017, 23(1): 1-10
- [29] Ferreira N, Poco J, Vo H T, *et al.* Visual exploration of big spatio-temporal urban data: a study of New York city taxi trips[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2013, 19(12): 2149-2158
- [30] Qu H M, Wang H M, Cui W W, *et al.* Focus+context route zooming and information overlay in 3D urban environments[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1547-1554
- [31] Reddy M, Leclerc Y, Iverson L, *et al.* TerraVision II: visualizing massive terrain databases in VRML[J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1999, 19(2): 30-38
- [32] Yuan X R, Xiao H, Guo H Q, *et al.* Scalable multi-variate analytics of seismic and satellite-based observational data[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2010, 16(6): 1413-1420
- [33] Chen A, Leptoukh G, Kempler S, *et al.* Visualization of a-train vertical profiles using google earth[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(2): 419-427
- [34] Chen Wei, Zhu Biao, Zhang Hongxin, *et al.* BN-Mapping: visual analysis of geospatial data with bayesian network[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(7): 1281-1293 (in Chinese)
(陈 为, 朱 标, 张宏鑫. BN-Mapping: 基于贝叶斯网络的地理空间数据可视分析[J]. *计算机学报*, 2016, 39(7): 1281-1293)
- [35] Turkay C, Slingsby A, Hauser H, *et al.* Attribute signatures: dynamic visual summaries for analyzing multivariate geographical data[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2014, 20(12): 2033-2042
- [36] Wang Z, Ferreira N, Wei Y, *et al.* Gaussian Cubes: real-time modeling for visual exploration of large multidimensional datasets[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017, 23(1): 681-690
- [37] Turkay C, Kaya E, Balcisoy S, *et al.* Designing progressive and interactive analytics processes for high-dimensional data analysis[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017, 23(1): 131-140
- [38] Kehrner J, Piringner H, Berger W, *et al.* A model for structure-based comparison of many categories in small-multiple displays[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2013, 19(12): 2287-2296
- [39] Lu M, Wang Z, Liang J, *et al.* OD-Wheel: visual design to explore OD patterns of a central region[C] // *Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 87-91
- [40] Lins L, Klosowski J T, Scheidegger C. Nanocubes for real-time exploration of spatiotemporal datasets[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2013, 19(12): 2456-2465
- [41] Goodwin S, Dykes J, Slingsby A, *et al.* Visualizing multiple variables across scale and geography[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016, 22(1): 599-608
- [42] Packer E, Bak P, Nikkilä M, *et al.* Visual analytics for spatial clustering: using a heuristic approach for guided exploration[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2013, 19(12): 2179-2188
- [43] Wang J, Liu X, Shen H W, *et al.* Multi-resolution climate ensemble parameter analysis with nested parallel coordinates plots[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017, 23(1): 81-90
- [44] Biswas A, Lin G, Liu X, *et al.* Visualization of time-varying weather ensembles across multiple resolutions[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017, 23(1):

- 841-850
- [45] Chen Yi, Lin Xiaolei, Zhao Yunfang, *et al.* SunMap: an associated hierarchical data visualization method based on heatmap and sunburst[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(7): 1075-1083 (in Chinese)
(陈 谊, 林晓蕾, 赵云芳, 等. SunMap: 一种基于热图和放射环的关联层次数据可视化方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(7): 1075-1083)
- [46] Goda K, Song J. Uncertainty modeling and visualization for tsunami hazard and risk mapping: a case study for the 2011 Tohoku earthquake[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2016, 30(8): 2271-2286
- [47] Xavier G, Dodge S. An exploratory visualization tool for mapping the relationships between animal movement and the environment[C] // *Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Interacting with Maps*. New York: ACM Press, 2014: 36-42
- [48] Mei Honghui, Chen Haidong, Zhao Xin, *et al.* Visualization system of 3D global scale meteorological data[J]. *Journal of Software*, 2016, 27(5): 1140-1150 (in Chinese)
(梅鸿辉, 陈海东, 肇 昕, 等. 一种全球尺度三维大气数据可视化系统[J]. *软件学报*, 2016, 27(5): 1140-1150)
- [49] Sun Guodao, Hu Yajuan, Jiang Li, *et al.* Urban agglomerations-based visual analysis of air quality data[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2017, 29(1): 17-26 (in Chinese)
(孙国道, 胡亚娟, 蒋 莉, 等. 基于城市群的空气质量数据的可视分析方法研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, 29(1): 17-26)
- [50] Li J, Zhang K, Meng Z P. Vismate: interactive visual analysis of station-based observation data on climate changes[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 133-142
- [51] Huang X K, Zhao Y, Ma C, *et al.* TrajGraph: a graph-based visual analytics approach to studying urban network centralities using taxi trajectory data[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2016, 22(1): 160-169
- [52] Lu M, Lai C F, Ye T Z, *et al.* Visual analysis of multiple route choices based on general GPS trajectories[J]. *IEEE Transactions on Big Data*, 2017, 3(2): 234-247
- [53] Al-Dohuki S, Wu Y Y, Kamw F, *et al.* SemanticTraj: a new approach to interacting with massive taxi trajectories[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017, 23(1): 11-20
- [54] Shi X Y, Yu Z H, Chen J, *et al.* The visual analysis of flow pattern for public bicycle system[J]. *Journal of Visual Languages & Computing*, 2017
- [55] Yan Y, Tao Y, Xu J, *et al.* Visual analytics of bike-sharing data based on tensor factorization[J]. *Journal of Visualization*, 2018: 1-15
- [56] Doraiswamy H, Ferreira N, Damoulas T, *et al.* Using topological analysis to support event-guided exploration in urban data[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2014, 20(12): 2634-2643
- [57] Wu W C, Xu J Y, Zheng H P, *et al.* TelCoVis: visual exploration of co-occurrence in urban human mobility based on Telco data[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2016, 22(1): 935-944
- [58] Cao N, Lin Y R, Sun X H, *et al.* Whisper: Tracing the Spatio-temporal Process of Information Diffusion in Real Time[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2012, 18(12): 2649-2658
- [59] Zhou Zhiguang, Xu Yangbing, Liu Fang, *et al.* Visual analysis of GDP with spatiotemporal multidimensional features[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(5): 712-722 (in Chinese)
(周志光, 徐杨炳, 刘 芳, 等. 面向 GDP 数据时空多维属性的可视分析方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(5): 712-722)