

空间关系及其应用

杜世宏¹, 秦其明¹, 王 桥²

1. 北京大学 遥感与 GIS 研究所, 北京 100871

2. 南京师范大学 地理科学学院 江苏 南京 210097

DU Shi hong¹, QIN Qi ming¹, WANG Qiao²

1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China

2. College of Geographic Information Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

DU Shi hong QIN Qi ming WANG Qiao The spatial relations in GIS and their applications *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 069-080

Abstract: Spatial relations mainly describe the geometric relations between objects and provide basic theories and methods for Geographical Information System (GIS) analyses. Spatial relations include those relations of distance, direction, topology and similarity. From the point of view of the meaning of spatial relations, models of spatial relations should be able to treat correctly many influences such as object scale, cognition of people, hierarchy of objects, uncertainty of phenomena and the variation of objects with time, etc. From a mathematical point of view, the models should be formal and inferable in order to be easily operated and implemented. Because spatial relations model the relationships between spatial phenomena and objects in terms of cognition by people, they have been used comprehensively in many fields, such as spatial data query and retrieval, spatial data mining, the similarity of spatial scenes and the interpretation of images. However, as most models of spatial relations focus on those objects with simple shapes or on definite spatial phenomena, the models only describe and infer the spatial relations of objects embedded in a plane or of definite spatial phenomena. Accordingly, spatial relations between 3 dimension objects, indefinite spatial phenomena, and complex objects with any shapes, as well as the extraction, description and reasoning of spatial relations in remotely sensed images should be the goals in the future.

Key words: geographical information system; spatial relations; spatial relations reasoning

摘 要: GIS 中的空间关系主要描述空间对象之间的各种关系, 为 GIS 的分析提供基本的理论和方法支持。空间关系主要包括距离关系、方向关系、拓扑关系及空间关系相似性等。从空间关系的内涵来讲, 空间关系模型应该能够反映目标尺度、人类认知、目标层次、现象的不确定以及随时间变化等特性对空间关系的影响; 从数学角度来看, 空间关系模型必须是可形式化和可推理的, 以方便操作和实现; 空间关系从人们认知的角度对空间现象和目标间的关系进行建模, 因而在空间数据查询、检索、空间数据挖掘、空间场景相似性评价以及图像理解等应用领域得到了广泛应用。现有 GIS 模型主要针对二维平面的简单对象、确定的现象进行建模, 因而大多数空间关系模型只描述和推理二维平面对象和确定现象的空间关系, 三维空间关系、不确定空间关系、复杂目标间的多层次空间关系推理、遥感图像空间关系的抽取、描述与推理将是未来空间关系研究和发展的方向。

收稿日期: 2006-01-03; 修回日期: 2006-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271090)

作者简介: 杜世宏(1975—), 男, 北京大学遥感与 GIS 研究所博士后, 主要从事空间关系理论及其在遥感图像匹配、识别和检索中的应用研究。E-mail: dshgis@hotmail.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

关键词: 地理信息系统; 空间关系; 空间关系推理

中图分类号: P91; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2006)03-0069-12

地理信息系统(Geographical Information System, GIS)能够对现实世界进行数字化建模, 这种模型是建立在人们对现实世界认识和抽象基础上的, 是对客观世界数字化的近似反映, 采集、存储、管理、分析和描述整个或部分地球表面与空间地理分布数据, 通过一系列空间操作和分析方法, 为各行各业提供对规划、管理、决策和运营有关的信息。GIS 中的空间关系主要描述空间对象之间的各种几何关系, 为 GIS 的分析提供基本的理论和方法支持。空间关系可以是由空间现象的几何特性(空间现象的地理位置与形状)引起的空间关系, 如距离、方位、连通性、相似性等, 也可以是由空间现象的几何特性和非几何特性(包括度量属性, 如高程值、坡度值、气温值等; 名称属性, 如地名、物体名称)共同引起的空间关系, 如空间分布现象的统计相关、空间自相关、空间相互作用、空间依赖等, 还有一种是完全由空间现象的非几何属性所导出的空间关系^[1]。空间关系的概念始终贯穿于 GIS 的数据生产、表达、管理、分析、决策等阶段, 具有广泛的含义。本文的空间关系是指由空间对象的几何特性引起的空间关系, 主要包括距离关系、方向关系、拓扑关系及空间关系相似性等。

1 空间关系的特征

空间关系受空间对象、空间数据组织、空间认知等影响, 具有尺度、认知、层次、不确定性、形式化等几个特征。

1.1 空间关系的尺度特征

空间关系研究的主体是空间对象之间的各种关系, 而空间对象是具有尺度特征的, 因而空间关系也具有尺度特征。同一个对象在不同的尺度下, 具有不同的表现形式。如: 一个城市在较大的尺度下, 表现为一个多边形, 而在一个较小的尺度下则表现为一个点; 在大尺度下分离的多个对象, 在小尺度下可能会被聚类, 形成一个新的对象。在大尺度特征下研究对象间的空间关系是通过研究多边形间的关系来实现的, 而在小尺度下可能研究点之间的空间关系。在大尺度下研究相邻的类别间的空间关系, 而在小尺度下研究聚类后新对象间的空间关系。空间

对象的尺度特征还可能影响空间关系的表达方法或参数选择。如在大尺度下空间对象多表现为面, 因此选择基于投影的方法来表达方向关系较好; 而在小尺度下, 对象表现为点, 选择基于锥形的表达方式较好。空间对象的尺度特征还可能影响空间关系的类型和数量, 如两个狭长形的面对象在大尺度下只有 8 种面/面拓扑关系, 而在小尺度下变成为线对象, 因而有 33 种线/线拓扑关系。这种由于空间对象尺度特征引起的空间关系及其表达方法的差异, 称为空间关系的尺度特征。

1.2 空间关系的认知特征

空间关系是人类对地理现象或环境的认知概念在 GIS 中的直接反映, 因此与人类的认知密切相关。GIS 是一个辅助人类进行决策的工具, 要达到这一目标, GIS 必须能够接受人类对地理现象或环境的认知和表达, 能正确理解用户输入的概念, 并且能把处理的结果按照符合认知要求的形式输出。如人们常用“汽车在房子的附近”、“学校的北门附近有一个旗杆”等语言进行交流, 而不说“房子在汽车的附近”、“学校在旗杆的南面”等。这就需要 GIS 用户和 GIS 软件之间具有一致而友好的接口, GIS 中的空间关系概念与人们的认知概念相一致。基于自然语言的空间关系处理是人们认知习惯和空间关系相结合的典范。

1.3 空间关系的层次特征

空间关系的层次特征表现在两个方面, 一个是由空间关系语义引起的层次性; 另一个是由空间对象的层次性引起的。

空间关系的语义层次主要体现在语义分辨率上。如 8 方向关系中的“北”、“西北”和“东北”等 3 个概念在 4 方向关系中合并成为“北”一个概念, 也就是说, 4 方向基中的“北”比 8 方向基中的“东北”的语义层次高。同样, 拓扑关系也表现出语义上的层次性。如线/面间的 19 个拓扑关系可以概括为在内、在边界、在外、穿越等 4 个更高层次的关系^[2]。空间对象也具有层次结构特性。层次结构可以用一个树结构来表示, 树的根代表了最高的层次, 是一个最高级的空间对象; 树的叶子是最低层次的, 代表原子对象。除原子对象外, 根和中间节点的对象可以看作由其子节点的对象组成的复合对象。空间对象

的层次性可以是自然形成的(如交通网层次树、水系层次树等),也可以是经过分类和聚类形成的(聚类和分类算法形成的各个类别和聚类之间的层次关系)。层次空间关系包括:原子对象与原子对象间的空间关系、原子对象与复合对象间的空间关系以及复合对象与复合对象间的空间关系。前一种空间关系是没有层次性的,而后两种空间关系是有层次性的。在实际应用中,仅仅研究原子对象间空间关系是不够的,还可能需要对层次空间关系进行评价。如图1中,在进行基于关系的数据集数据匹配时,如果仅仅考虑两对高级的复合对象(A与B)间的方向关系,图1a和图1b中的复合对象A与B是匹配的(相似的);但如果还考虑复合对象所包含的原子对象间的方向关系,则图1a中的A与B是匹配的,而图1b中的A与B是不匹配的。

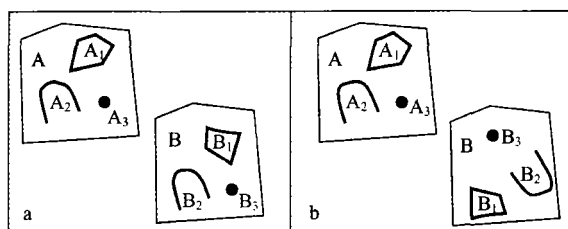


图1 空间关系层次性
Fig.1 Hierarchy of spatial relations

1.4 空间关系的不确定性特征

空间关系的不确定性表现出了空间关系的复杂性,是现实世界中地理现象或环境复杂性在GIS中的具体表现。空间方向关系的不确定性可以由下面的几个因素引起:(1)人们的认知所具有的不确定性。不同的人对方向关系有不同的理解,特别是对空间关系的认识是具有模糊性的。(2)空间数据具有的不确定性导致空间关系是不确定的。(3)空间关系在分析处理及应用中也会具有不确定性,如数据集模糊匹配等。这种不确定性是对不确定性数据进行分析所需要的^[3],也可能是由分析处理过程本身所决定的。

1.5 空间关系的时间特征

有些空间对象的空间位置和范围是随着时间变化的,如地块的分割、合并,火灾区域的蔓延,鱼群的迁移等,这种随时间变化的对象称为时空对象。时空变化包括运动、收缩、增长、形状变换、分割、合并、消失和重现等^[4,5]。由于空间对象的时空变化,导致了它们之间空间关系也是随时间而变化的。如一对时空对象的拓扑关系在时间 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ 、

t_8, t_9 的变化序列分别是相离(disjoint)、相遇(meet)、相交(overlap)、覆盖(cover)、包含(contains)、覆盖、相交、相遇、相离。方向关系随着时间变化也存在同样的变化序列。时空关系是在一定时间间隔内或时间点上时空对象所表现出的空间关系序列,这个序列反映了时空对象在关系上的发展及变化。空间关系的这种随时间而变化特征称为时间特征。

研究时空对象和时空关系有利于扩展GIS对时间的建模能力,从而为用户提供与时间有关的数据管理和查询服务。时空关系研究内容主要包括:时空拓扑关系描述和操作、时空方向关系描述和操作、时空组合关系描述和操作以及时空关系在时空数据库中的实现和查询代数等。

1.6 空间关系是形式化的、可推理的

空间关系的形式化特征是空间关系表达和推理模型的基本要求。尺度、认知、层次和不确定性特征是空间关系主体——空间对象或空间关系本身的特征,而可推理和可形式化特征是对空间关系表达和推理模型的要求。一个空间关系表达模型必须是形式化的,以方便在空间数据库中进行空间关系查询;它必须是可推理的,以方便能够从已知的关系推理出未知的关系;它必须是可比较的,以能够对空间关系进行比较,定义空间关系之间的相似性。这是一个空间关系表达和推理模型所具备的基本特征。

此外,空间关系表达和推理模型还应考虑完备性、严密性、唯一性、通用性等准则^[6]。完备性是指空间关系表达模型能够表达空间对象间所有可能的定性关系;严密性是指只有实际存在的或物理上正确的一组空间关系才能被从模型中推理出来;唯一性是指表达模型所能表达的每个定性关系能被唯一的区别,也就是说它们是相互排斥的;通用性是指表达模型能够处理不同形状的对象和不同类型的关系^[6]。

2 空间关系的研究内容

空间关系的研究主要集中在空间关系认知、空间关系表达、空间关系推理、空间关系分析处理和空间关系应用等方面。有两个截然不同而又互相补充的观点:一个从数学角度研究空间关系;另一个从语言和认知的角度研究空间关系。数学观从数学的角度出发,严密地定义了空间关系定义模型及其推理,

如时空关系的代数表达模型; 而语言和认知观点则主要从人类语言的角度出发, 认识和描述空间关系, 探讨如何建立一个友好而自然的人机接口等, 如自然语言空间关系。

2.1 空间关系认知

空间关系认知主要是研究空间关系与人们认知之间的关系。认知对空间关系的影响表现在对空间关系概念划分的影响、自然语言空间关系的特征和表现等方面。

认知对空间关系概念划分的影响表现为认知概念的离散性和有限性。从数学上讲, 任意对象间的空间关系是无限连续的, 但是人们对空间关系的认识和交流能力却是有限的, 仅使用少量的空间关系概念来交流。因此, 需要检验空间关系表达模型所区别的空间关系个数与人们能够区别的个数以及表达模型所能够区别的关系类型与人们能够区别的关系类型的一致性。Mark 和 Egenhofer 通过两个主体试验来验证九交模型用于区别拓扑关系种类、数目与认知概念的一致性^[7]。第一个试验让测试人员对 40 个线/面拓扑关系图形进行分类。试验结果表明, 九交模型所能区分的拓扑关系与人们经常使用的关系是一致的。第二个试验让测试人员对 40 个拓扑关系图形与句子“公路穿过公园”、“公路进入公园”间的含义一致性程度打分。试验结果表明, 大多数空间关系能被九交模型所区别, 并能用关系原语的一个特殊子集来很好地表达。认知概念对空间关系的影响还表现在关系的层次划分上。空间关系是有语义层次的, 认知可以给层次划分提供依据。例如, 在建立空间关系语义层次树时, 需要多少个高层关系, 哪些低层关系应该可以用一个高层关系概括等, 都是以认知为基础的。

空间关系在自然语言中起着重要作用。杜清运从语言学的角度对空间关系做了研究^[8]。他认为空间关系有两大功能, 一是作为句子的动词, 反映主语和谓语的关系, 如“桥梁跨过河流”; 二是作为各级无语义的、同义的或上下义的语言单位之间的组合约束, 成为词法和句法的一部分。他还对空间关系的几何和本体方面语义特征做了概括, 指出空间关系与参与者之间存在一些可能的联系, 如“桥”与“道路”、“河流”与“桥”、“街区”与“道路”等。为了缩小空间关系表达模型所表达的关系与人们在自然语言中所使用的空间术语之间的差异, Shariff 等用拓扑关系+度量细化的方法校正了 54 个英语空间关系

术语与度量属性的关系^[9]。Mark 等做了相似的实验来校正拓扑关系与自然语言的一致性程度^[10]。杜世宏等进一步把外部方向关系、内部方向关系和拓扑关系组合, 给出了自然语言空间关系的形式化定义, 如“一条道路从公园的东部穿过”^[11]。

Mark 认为空间关系中, 拓扑关系是本质的, 起着定义的作用, 而度量信息(大小、形状、距离和方向等)起细化的作用^[12]。一些空间术语纯粹是拓扑的, 与度量不相关, 如“进入”和“在内”等。另一方面, 度量信息则决定了空间术语的语义, 如“北”和“附近”都细化了“相离”拓扑关系。

2.2 空间关系表达

空间关系表达的主要目的是建立空间对象与所对应的空间关系之间的映射。通过该映射, 任意空间对象间的空间关系都可以用一个词语或句子来表达。这是一个多对一的映射, 即一对空间对象只能用一个关系来描述。不同的空间关系可以采用不同的方法, 但映射的结果必须与认知概念接近, 还必须考虑到空间关系的形式化和可推理等特征。

2.2.1 空间关系表达方法

虽然映射的原域(空间对象集合)和目标域(空间关系集合)相同, 但由于采用了不同的映射方法, 因而形成了不同的表达方法。空间关系的主要表达方法有点集拓扑法、区域连接法、2D string 法、Voronoi 图法、外接矩形法和广义交模型表达法等。

(1) 点集拓扑法。GIS 领域中广泛使用的拓扑关系表达法是四交和九交模型, 该模型是建立在点集拓扑学基础上的。点集拓扑法把空间对象所在的平面分为内部(A°)、边界(∂A)和外部(A^-)等三个子集。根据两个空间对象的三个子集相交所组成的矩阵来判断对象间的拓扑关系^[13]。点集拓扑法把点、线、面分开处理, 有利于在基本定性拓扑关系的基础上辅助度量信息, 对定性关系的细节在数量上进行度量, 从而有更丰富的语义表达能力, 适合于自然语言空间关系建模和表达。

(2) 区域连接法(RCC 理论)。区域连接方法由人工智能领域专家提出, 并在人工智能领域得到应用。区域连接方法把经过扩展的空间区域作为单元来研究空间关系, 而不是点集拓扑学中的点。区域间的关系原语是连接关系 $C(x, y)$, 而不是点集拓扑关系中的交。Cohn 等认为区域定义了一种自然的方法来表述与定性表现有关的不确定性, 而且任何物理实体所占的空间都是一个区域而不是点, 因

而空间关系表达法采用区域连接法而不是点集交来描述^[14]。 $C(x, y)$ 表示 x 和 y 的拓扑闭包共享至少一个点,使用关系 C 可以定义8个基本关系,如:不连接(DC)、外部连接(EC)、部分交叠(PO)、正切真部分(TPP)、非正切真部分(NTPP)、相等(EQ)、反正切真部分(TPPI)和反非正切真部分(NTPI)。这8个关系可以进一步综合为5个关系。

区域连接法不区分点、线、面特征,不利于从细节上对拓扑关系进行数量度量,因而无法对自然语言空间关系进行建模,如“道路穿过公园”等,语义表达能力有限,在GIS中应用受限制,而且也不利于拓扑关系的不确定性处理。

(3) 2D STRING 法。2D string 法又称符号投影法,最早由 Chang 提出,在图像检索中得到广泛应用^[15]。后来经过扩展,不仅能处理点对象,而且也能处理较复杂形状和任意大小的对象,甚至是多维和时间序列图像。2D string 把对象在 X 和 Y 轴上的投影坐标按照“=”、“<”、“:”等3个算子连接起来,从而形成一个字符串。如果仅连接 X 轴投影,则为1D string;若 X 、 Y 都连接,则为2D string。在2D string 上可以定义各种串匹配运算,从而进行图像检索和关系表达。

Chang 等根据对象在水平和竖直方向上的起始和终止切割线,将对象空间重新划分,并且进一步丰富了算子(由3个扩展到5个),形成了2D G-string 方法^[16]。孙玉国将2D G-string 扩展,形成2D T-string。2D T-string 能够处理3类定性空间关系:拓扑关系、顺序关系、辅助关系(包围与半包围关系)^[17]。

与RCC方法一样,2D string 法适用于定性关系表达,不能对数量信息进行度量,不利于自然语言空间关系和不确定性关系的描述。

(4) Voronoi 图法。Voronoi 图按离目标最近原则,将连续空间剖分为若干个Voronoi区域,每个Voronoi区域只包含一个目标,即空间目标与Voronoi区域是一一对应的^[18]。陈军等认为九交模型把对象的补作为外部区域导致内部、边界和外部的线性依赖关系,并且外部区域太大,不利于描述空间邻近关系^[19]。针对这一缺点,他们用Voronoi区域作为对象的外部区域,从而提出了V9I模型来描述空间关系。V9I模型不仅可以描述空间临近关系,而且还可以描述复杂对象间的拓扑关系,从而提高空间关系的分辨率。

Voronoi 图的局域动态特性有利于生成局部Voronoi图,从而不必显示存储空间关系,而是在使用时动态构建和推断,为动态GIS提供了数据模型基础;其缺点在于必须动态创建和维护Voronoi图,需要花费一定的时空资源。

(5) 外接矩形法。外接矩形法主要是用对象的外接矩形来近似空间对象,从而把空间关系转化为研究外接矩形间的关系。由于外接矩形比空间对象简单且结构化,因而可以降低空间关系处理的复杂度。Papadias 等提出了外接矩形间的169种关系,然后研究了基本拓扑关系和方向关系与这169种关系之间的对应关系,提出了空间关系检索的二步法:过滤和细化^[20]。过滤阶段用外接矩形间的关系来快速地消除不可能满足条件的对象,细化阶段进一步检验备选集中对象是否满足查询条件。

外接矩形法还可以与R树索引紧密结合,从而可以实现空间关系的快速检索。但是该方法不能提供严格的定义模型,有利于方向关系的表达而不利于拓扑关系的表达,严格地来讲是一种检索模型而不是表达模型。

(6) 广义交模型法。由于九交模型仅仅表达了简单形状和可控复杂对象间的关系,而不能够表达任意复杂对象间的空间关系。Abdelmoty 把九交模型扩展到了广义交模型来表达拓扑关系^[21]。广义交模型首先把对象和空间分解为典型的子集,然后利用这些子集间的交来描述空间关系。若 x 为一对象,且 x_1, x_2, \dots, x_n 为其子集,则 $x = \bigcup_{i=1}^n x_i$, x 的补集为 $x^- = \bigcup_{j=n+1}^m x_j$, 对象 x 所在的空间为 X , 且 $X = x \cup x^-$ 。利用上面的分解,对象 x 和 y 间的关系可定义为: $R(x, y) = X \cap Y = (\bigcup_{i=1}^n x_i) \cap (\bigcup_{j=1}^m y_j) = (x_1 \cap y_1, x_1 \cap y_2, \dots, x_1 \cap y_m, x_2 \cap y_1, \dots, x_n \cap y_m)$ 。其中, $x_i \cap y_i$ 可以取空值或非空值,这个交集可以用一个 $n \times m$ 矩阵来表示。通过不同的空间分解策略,广义交模型可以描述复杂对象间的空间关系。

2.2.2 拓扑关系描述

拓扑关系表达方法中比较成熟的是四交和九交模型。Egenhofer 等用九交模型描述点、线、面间的拓扑关系^[13]。九交模型利用了对象内部、边界和外部相交的拓扑不变量来区分不同的拓扑关系,它理论上可区分的拓扑关系数为512个,但实际上大多数没有实际意义。有意义的拓扑关系数目分别为:面/面8个、线/线33个、线/面19个、点/线3个、

点/面 3 个、点/点 2 个。除了交不变量外, 还有维 (Dimension) 和分离数 (Number of Separations) 两个不变量。拓扑关系中的非空交集可以用它们的维数来进一步进行区分^[22], 空集的维数为 -1, 点的维数为 0, 线的维数为 1, 面的维数为 2。把维数引入九交模型, 可以区分 0D meet、1D meet、0D cover、1D cover、0D overlap、1D overlap 等拓扑关系。非空交集的分离数用 Euler 示性数来度量, 分离数总是 ≥ 0 。把分离数引入九交模型, 可以对 meet、covers、coveredBy、overlap 等 5 种拓扑关系进一步区分, 而对其他 3 种拓扑关系没有作用^[23]。

在九交模型中, 对象外部太大, 无法区分岛屿和对象外的情形, 因而不能有效描述带岛屿的复杂区域间的拓扑关系。Egenhofer 等^[24]把带岛屿的区域分为两部分: 广义区域(对象及其岛屿的并集)和岛屿, 从而带岛屿的区域 A 和 B 间的拓扑关系用一个基本拓扑关系集来描述, 这些拓扑关系包括: A 广义区域与 B 广义区域的拓扑关系、A 广义区域与 B 中每个岛屿的拓扑关系、A 的每个岛屿与 B 广义区域的拓扑关系、A 的每个岛屿与 B 的每个岛屿的拓扑关系。

拓扑关系表达方法中另一个比较有影响的方法是 Voronoi 图法。用空间对象的 Voronoi 势力范围来代替点集拓扑学中对象的外部^[18], 形成 V9I 模型。扩展后的 V9I 模型能够把九交模型中相离拓扑关系进一步区分为相离和相邻; 把含有空洞的包含、包含于和相离关系区分开, 而九交模型无法区分。Voronoi 图的另一个优点是可以方便地表达空间临近关系。把任意两个空间对象 A、B 之间的 Voronoi 区域的最少数 k 定义为其间的 Voronoi 距离, 根据 Voronoi 距离可以进一步定义 k 阶空间临近关系^[25]。

2.2.3 方向关系描述

方向关系描述的方法有锥形方法、投影方法、MBR 方法、方向关系矩阵等方法。锥形描述方法用对象质心点代替对象, 把对方向关系的研究转化为对两个质心间的角度关系的研究^[26]。锥形方法可以利用角度来严密地定义方向关系, 并且根据需要, 方向关系的分辨率(如 4 方向、8 方向、16 方向或更高)也比较容易实现转化, 并与定量信息联系紧密。其缺点是忽略了对对象的大小、形状等对方向关系的影响, 因而描述结果不够准确。投影的方法把空间根据参照对象在横、纵坐标轴上的投影划分为 4 个

或 8 个方向区域, 每个区域描述一个方向^[27]。投影的方法易于实施, 可以顾及参照对象的大小, 但相对于锥形方法, 投影方法只能描述 4 方向和 8 方向关系, 不能描述更高分辨率的方向关系。Goyal 用方向关系矩阵来描述方向关系^[28]。方向关系矩阵是基于投影的, 描述了目标对象落在每个方向区域内的面积比例, 可以顾及目标对象的形状和大小, 是一个效果较好的模型。

方向关系矩阵的缺点在于其存在“同一”方向这一盲区, 仅仅描述了参照对象外接矩形(MBR)外部的方向关系, 却不能描述 MBR 内的一些人们经常使用的方向概念, 如“面的东部”、“面的西部”、“面的东部边界”等。这些概念的共同点是它们的空间范围都在参照对象的内部或边界上, 因而必然在参照对象的 MBR 内, 而方向关系矩阵却不加区分, 用“同一”来描述, 显然是不合理的。为了弥补这一不足, 杜世宏等提出了一种新的方向关系描述模型——细节方向关系来描述这些概念^[29]。细节方向关系包括内部、边界和环部等 3 种方向关系。其中, 内部方向关系包括东部(EP)、西部(WP)、南部(SP)、北部(NP)、东北部(NEP)、西北部(NWP)、东南部(SEP)、西南部(SWP)和中部(CP)9 个概念; 边界方向关系包括东部边界(EL)、西部边界(WL)、南部边界(SL)、北部边界(NL)、东北边界(NEL)、西北边界(NWL)、东南边界(SEL)、西南边界(SWL)和中部边界(CL)9 个概念; 环部方向关系包括东部环(ER)、西部环(WR)、南部环(SR)、北部环(NR)、东北环(NER)、西北环(NWR)、东南环(SER)、西南环(SWR)和中部环(CR)9 个概念。

方向关系矩阵描述参照对象外接矩形以外的方向概念, 而细节方向关系描述外接矩形以内的方向概念, 两者所描述的概念和空间范围都不同, 因而它们是相互补充的。为了区分把方向关系矩阵所描述的方向关系称为外部方向关系。

2.2.4 距离关系描述

空间距离关系是一种比较松散的关系, 有欧氏距离和 Voronoi 距离等。欧氏距离是一种常用方法, 用欧氏空间的距离度量公式进行绝对度量。受人们表达习惯的影响, 距离也可以用定性的概念来表达, 如远、中、近等。Voronoi 距离是用对象间 Voronoi 区域的个数来度量的。

2.3 空间关系推理

空间关系推理是空间关系应用的一个重要方

面,是继空间关系表达后的另一个研究热点。空间关系推理可以分为定量推理和定性推理。定性推理在一定程度上比定量方法更接近认知,更容易让人们接受,因而成为空间推理的主要方法。空间关系推理是建立在空间关系表达基础上的,推理输入、过程和结果都受空间关系表达的影响,因而不同的空间表达方法有不同的推理方法和结果。

空间关系推理按所推理的关系类型可分为单种空间关系推理和组合空间关系推理;按空间关系对时间是否处理可分为时空关系推理和非时空关系推理;按照所涉及的层次可分为单层空间关系推理和多层空间关系推理(层次空间关系推理);按照空间关系的推理方法可分为公理法、组合表法、代数法、逻辑法、基于知识的推理等。

2.3.1 空间关系推理方法

公理化方法通过一组基本的空间关系谓词,建立空间关系的公理和推理规则,通过推理规则对关系谓词进行推理,就可以得到可能的新关系。代数方法把空间关系作为项来处理,在构造出基本空间关系的原子复合表后,既可以利用约束满足算法,通过实现关系集的复合运算完成推理,也可以建立全部关系集复合运算的完全复合表,通过查表实现推理。

2.3.2 单种与组合空间关系推理

单种空间关系推理指推理过程中仅使用某一种空间关系进行推理,如从拓扑关系推理拓扑关系、从方向关系推理方向关系等;组合关系推理使用两种以上的空间关系进行推理,如拓扑和方向的组合推理、方向和距离关系的组合推理等。

在九交模型的拓扑关系表达中,点、线、面间拓扑关系是不同的,所以单种拓扑关系推理又可进一步分为单种空间对象类型的推理(如两对线对象或两对面对象间的推理)和多种空间对象类型的推理。Egenhofer^[30]和 Papadias 等^[31]给出了面/面拓扑关系推理的组合表,共 64 种组合,任意两对面对象拓扑关系的推理可以在组合表中进行查找,就可得到可能的关系集。Abdelmoty 等基于广义的交模型定义了线/面和面/面多种空间对象类型拓扑关系推理组合表^[21],该表 19 行 8 列共 152 种组合。RCC 理论是以区域为单元进行表达和推理的,因而没有单种和多种空间对象类型推理之分^[14]。赵学胜等在四元三角网球面层次格网剖分的基础上,通过单元递归细化来推理 2 个球面对象间的拓扑关系^[32]。

方向关系推理仍然与其表达法密切相关。Frank 提出了方向关系代数描述方法的性质和运算,主要运算有反运算(仅对点对象的方向关系有效)和组合运算(关系推理)^[33]。并在代数运算的基础上,研究了基于投影和基于锥形两种方向关系系统的近似推理组合表。Skiadopoulos 等基于方向关系的投影表达法^[34],先是给出了单项方向关系的推理的组合表(共 81 项),然后详细地给出并证明了多项方向关系推理规则。Skiadopoulos 的方法是组合表法和公理法的严密结合,推理能力和结果都比较理想,可以应用到 GIS 软件中。

组合关系推理的目的在于综合利用不同空间关系的互补信息进行推理,得到单种空间关系推理无法获得的推理结果。Jung Hong Hong 等提出了一种方向关系和近似距离的组合推理模型^[35]。该模型利用有序的间隔距离来对距离空间进行近似完整划分(各间隔相互不重叠),然后利用间隔距离和方向组合进行空间推理规则研究。Papadias 等研究了方向关系和定量距离间的组合推理问题^[31],根据推理规则,可以得到推理距离值的范围,但本质上,该推理方法是把方向和距离关系分开处理的,因而利用综合信息的能力有限。Hernández 提出了一个能够同时处理拓扑关系和方向关系的推理模型^[36],该模型仍然把方向和推理分开处理,不是一个理想的组合推理模型。

2.3.3 时空关系推理

时空关系表达和推理主要研究时空对象空间关系变化规律及其处理。对象的时空变化可分为离散变化(如地块合并)和连续变化(如鱼群移动和火灾蔓延)两种,因而时空关系推理也可分离散和连续两种推理形式。

在离散时空拓扑关系推理方面,Egenhofer 等基于九交模型,研究了面/面拓扑关系的时空变化和推理问题^[37],定义了拓扑关系时空变化的最临近拓扑关系图(closest topological relationship graph),探讨了由于平移、旋转、减小和扩张等空间对象形状和位置的变化引起的拓扑关系时空变化规律及其在最临近拓扑关系图上的映射,以及拓扑关系可能的变迁途径。最临近拓扑关系图本质上并未对时间建模,只是对可能的关系变化情况做了预测。舒红按地理状态将地理事件划分为空间几何事件(不引起拓扑关系改变的空间事件)和空间拓扑事件(引起拓扑关系改变的空间事件)^[4],并把地理事件间的相对

关系定义为时态关系, 在时态关系的基础上又进一步区分了时态方向关系(如, “先 Before”、“后 After”)和时态拓扑关系(“在……期间 During”、“不同时 Unconcurrent”、“紧接着 Follow”), 继而把时空拓扑关系定义为空间拓扑事件间的时态拓扑关系。

Erwig 等研究了连续变化对象(移动对象)的时空拓扑关系推理模型^[9]。该方法对时间信息直接建模, 成为时空对象。空间谓词是空间对象的 bool 函数, 时空拓扑谓词则是时空对象间的 bool 函数。在时空对象的基础上定义了提升和聚合两个时间操作算子, 基本时空谓词就可被这两个时间算子所定义, 而两个时空对象间的时空拓扑谓词变化则是基本时空谓词的一个序列。这种时空表达和推理模型实际上是一个代数系统, 基本时空拓扑关系构成了代数空间的元素, 时空对象拓扑关系变化序列则是通过一些代数运算和规则生成的高级谓词。

到目前为止, 时空关系推理研究主要集中在拓扑关系方面, 而对方向关系的时空变化和推理的研究相对较少, 这是以后值得注意和努力的一个研究方向。

2.3.4 层次空间关系推理

层次空间推理是一个空间问题解决方法, 它利用空间层次来推理空间信息并得出结论。层次空间关系推理利用空间对象及其关系的层次信息实现空间关系推理。层次空间关系推理与层次空间数据模型及层次数据结构有着紧密的关系。层次空间关系推理可以利用高层次对象间的关系来推理低层次对象间的关系, 从而减少低层次对象间空间关系的计算量。Papadias 等研究了在一个点和面对象按层次组织的空间数据库中进行层次方向关系推理的 3 个算法^[38], 并且讨论层次方向关系推理的复杂性和信息损失。Claramunt 等定义了时间和空间层次结构, 继而把层次时间推理和层次空间推理集成在一个框架内^[39]。

3 空间关系应用

空间关系可以在一定程度上对地理现象及其环境间的关系进行描述, 因而在空间数据库及空间数据理解中有着重要应用, 其应用范围主要包括空间数据查询语言、空间数据检索机制、空间数据挖掘、空间场景相似、遥感影像理解及在空间数据匹配中的应用等。

3.1 空间查询语言

查询语言是一种从空间数据库中检索数据的有力工具, 而空间数据检索是空间数据管理、提取、显示、分析等 GIS 功能的基础。然而, 传统关系数据库的结构化查询语言(SQL)不能处理空间数据, 因此设计和实施空间查询语言是非常必要的。由于空间数据的特殊性, 空间查询语言的设计和实施比传统数据查询语言复杂得多。已经提出的空间查询语言有结构化空间查询语言、自然空间查询语言、可视化空间查询语言以及基于草图的空间查询语言等。

(1) 结构化空间查询语言(Structural Spatial Query Language, SSQL)。空间关系在结构化空间查询语言中是作为谓词出现在查询语句中的。最初的结构化空间查询语言仅仅是对 SQL 的直接扩充, 即在基于关系代数的查询语言基础上, 增加对空间关系的处理, 是一种基于关系的空间查询语言。后来, 由于各种应用领域和复杂分析的需求, 出现了针对具体应用的空间查询语言。Egenhofer 确定了研究空间查询语言的 11 个关键需求^[40], 并提出了一种关系型的 SSQL。该语言包括了一元、二元算子、空间数据定义语言、根据点查询、图形表现语言等内容, 把空间数据查询、空间数据定义及查询结果集的显示模式统一在一个查询语言中。空间关系可以作为谓词出现在 SSQL 的 WHERE 子句中, 从而实现基于空间关系的数据查询。Voisard 等把空间算子分为六类^[41], 据此着重研究了地图投影(类似于关系代数中的投影算子)、地图选择、地图并、空间选择、地图叠置、地图合并、地图分解等 7 个算子, 并讨论了这些算子在空间数据库中的实现问题。针对具体应用领域的空间查询语言有: 用于空间分析的空间查询语言 SQL/SDA^[42], 为空间数据挖掘服务的面向对象结构化空间查询语言 SDMOQL^[43], 用于更新和查询 GML 的空间查询语言 GMLQL 等。

(2) 自然空间查询语言(Natural Spatial Query Language, NSQL)。结构化空间查询语言具有严格而又标准的语法规则, 计算机实现起来容易。但是这种语言比较复杂, 这导致用户为实现一个简单的任务, 却必须学习复杂的语法, 对用户的要求较高。另一方面, 这种严格语法却与人们的自然交流语言不一致, 因而人们经常使用的一些语言无法用结构化空间语言来实现。GIS 需要一种既简单易行而又要符合日常交流习惯的空间查询语言来方便用户访问和操作空间数据。自然语言的典型特征就是

带有修饰性的程度副词, 如“非常”、“大概”、“差不多”等。Wang^[44]给关系数据模型的域关系演算查询语言扩展了自然语言接口, 用“much higher than”、“much less than”、“approximately equal to”等模糊语句取代了“>”、“<”、“=”等算子, 每个算子前都可附加程度副词修饰, 使得域关系演算语句能够处理模糊查询的功能, 继而讨论模糊查询的实现和扩充到关系数据库中的问题。Zhan 研究了面向对象间拓扑关系修饰性程度副词的模糊隶属函数建立问题^[45]。

(3) 可视化空间查询语言 (Visual Spatial Query Language, VSQL)。基于图标的可视化语言 (Visual Language based on Icon, VLI) 是概念实体及其操作的一种图形表现, 本质上是一个工具, 用户能够通过它来组成图标化的 (iconic) 或可视化 (visual) 的句子来实现查询^[56]。VLI 包括图标 (Icons)、操作 (Operators)、语法 (Grammar)、句法 (Syntax)、表现含义 (Representing meaning) 等成分。图标包括对象图标和运算图标, 分别表述复杂实体及一系列运算。通过 Operators 就可把图标组合起来形成查询语句, 这种组合过程必须接受语法和句法的约束。在 VLI 中, 用图标取代了 SQL 中的关键词和谓词, 图标的形状代表了操作或对象的含义, 通过可视化界面来生成查询语句和保证语法规则, 因此规则和操作难度及谓词复杂性得到降低。VLI 是一个通用的可视化查询语言, 其中的对象和运算图标及操作、语法、句法等内容需要根据具体的应用领域来定制。Lee 和 Chin 把 VLI 的概念引入 GIS 中, 着重实现了一个基于拓扑关系的可视化查询语言^[47]。

(4) 基于草图的空间查询语言 (Spatial Query Language by Sketch, SQLS)。SSQL 和 NSQL 是基于文本的查询语言, 空间关系的文本描述是模棱两可的, 很容易造成误解或误匹配, 尤其是在多语言环境中, 同一个词语可能有不同的含义^[48]。VSQL 使用了可视化的图标和界面来表达和组织查询语句, 优点是把用户从记忆繁琐而复杂的语法规则中解放出来^[49]。但 VSQL 的语法和句法与 SSQL 和 NSQL 是类似的, 并且仅仅使用一些由系统预定义的标准图标很难真实而准确地表达对象间的空间关系, 仍然会造成误匹配, 并且由于不能从细节和数量上描述空间关系, 导致匹配的结果集太大, 其中一些可能不是用户所期望的结果。由于上述原因, 基于草图的空间查询语言得到了重视和研

究^[48-49]。在 SQLS 中, 用户可以用鼠标或手在触摸屏上画他要查询的空间对象结构, 形成草图, 包括对象间相对大小比例、空间关系的细节信息以及空间对象形状等。草图包含了明确而详细的信息, 可以作为查询条件提交给 GIS, 通过空间关系相似性匹配就可检索到用户所需的数据。Egenhofer 基于“拓扑重要, 度量细化”的原则^[48], 设计了 SQLS 中草图的符号表现及查询处理方法。Blaser 详细论述了 SQLS 的接口设计、草图绘制习惯、草图处理 (包括草图组成、关系描述、草图相似性处理)、查询处理、查询系统设计等组成模块^[50]。

3.2 空间数据检索

空间查询语言只是一个用户和 GIS 进行交互的接口规范, 真正的数据检索策略和方法是非常复杂的, 包括数据组织结构、空间关系匹配与空间数据搜索策略等。Papadias 描述了用于一维间隔关系表达的一个二进制串编码及其相似性度量, 并把编码扩展到了多粒度和多维空间, 用于表达空间对象的空间关系^[51]。在此基础上研究了基于时空关系的对象检索、空间并查询、结构查询、对象时间序列的动态查询等问题。

3.3 在空间数据挖掘中的应用

空间数据挖掘是从空间数据库中抽取隐含的知识、空间关系或没有明显存在于空间数据库中的其他模式^[52]。空间关系在数据挖掘中可以用来表达挖掘到的知识和规则, 以及用于提取与挖掘任务相关的数据和简化挖掘算法等。拓扑关系 inside、overlap、disjoint 等, 方向关系 left_of、west_of 等, 距离关系 close_to、far_away 等可以作为空间谓词来表达空间关联规则^[53], 如 is_a (x, school) \rightarrow close_to (x, park) (80%)。Clementini 等研究了宽边界区域间拓扑关系的概念层次及计算概念层次的算法, 并利用拓扑关系的概念层次进行了多层次空间关联规则挖掘^[54]。

3.4 在空间场景相似性评价中的应用

空间场景的相似性包含了场景几何结构相似性及语义相似性。空间关系用来捕获空间对象分布, 通过多分辨率模型, 允许从不同尺度和不同层次分析拓扑、方向和距离关系, 从而度量空间结构相似性, 而语义相似性通过特征类的语义网来评价^[55]。一个复杂空间场景中的多个不同类型对象间存在多类型和多层次空间关系。这些复杂关系可用基本的拓扑、方向和距离关系的组合来描述, 因而场景相似

性用拓扑、方向、距离相似性的组合来度量。若对场景 A 中的空间关系进行一系列变化, 得到场景 B, 则所需的最小空间关系变化可用于描述场景相似性^[56]。场景相似性表现出很强的层次性以及类似等高线性质的距离特性。Bruns 用空间关系的概念邻居图来研究简单区域组成的场景相似性, 而没有研究线/区域、复杂区域等组成场景的相似性, 更没有给出场景相似性的度量值, 也没有考虑场景的语义相似性^[59]。Rodríguez 等在语义网的支持下, 从特征的组成、功能、属性三个方面研究特征类之间语义和几何结构的相似性, 并给出了具体的相似性度量值^[57]。

4 结语与展望

空间关系是一个非常重要的基础研究领域, 尽管已取得了很大的进步, 但在研究内容和范围上仍需进一步发展。这是因为, 一方面, GIS 本身的理论、技术和需求使得空间关系向多维、不确定性和多层次空间关系描述与推理方向发展; 另一方面, 尽管空间关系在 GIS 领域得到了最充分的发展, 但是其他一些学科, 如智能机器人、计算机视觉和图像理解、遥感图像智能解译等领域也越来越重视空间关系的作用。在空间关系的研究和发展中, 需要进一步研究以下几个方面。

(1) 三维空间关系。现实世界是一个三维模型, 而现有的 GIS 中所存储的数据和提供分析功能基本上都是二维的, 对三维数据的建模和分析很有限。同样, 对空间关系的研究也是集中在二维方面, 对三维空间关系的研究远远不够, 特别是三维目标间方向关系和邻近关系的认知和描述。如三维目标间存在哪些基本的方向关系和邻近关系概念? 如何定义它们在空间上的联系以及推理? 在描述和推理三维 GIS 时, 采用球面坐标系还是直角坐标系更合适等问题, 都需要进行深入研究才能确定。

(2) 不确定空间关系。由于现实世界中的很多现象复杂多变, 受数据采集方式、人们的认识以及 GIS 中描述方式的影响, GIS 所描述的空间关系与真实目标间以及与人们认知中的空间关系间总存在差异, 即空间关系是不确定的, 如何描述和处理不确定空间关系, 特别是把不确定空间关系应用到 GIS 的空间分析等应用中是一个新的研究方向。

(3) 复杂目标间的多层次空间关系推理。目前

空间关系的研究主要集中在简单目标和 2 个对象间空间关系的描述和推理问题。而缺乏对复杂目标 (多个简单目标组成的复杂目标) 空间关系描述和推理的研究。复杂目标间的空间关系是多层次的, 包括简单对象与简单对象、复杂对象与简单对象、复杂对象间的空间关系, 这种多层次空间关系的描述、推理和传递机制, 都需要进一步研究。

(4) 遥感图像空间关系的抽取、描述与推理。目标空间关系的描述和推理主要是基于矢量目标的, 很少研究栅格目标间的空间关系。图像目标间也存在同样的空间关系, 对于图像理解和语义描述是非常重要的。但是, GIS 中矢量目标是已存在的, 而遥感图像中的栅格目标及其空间关系需要抽取才能获得。因此如何把矢量目标间的空间关系描述和推理应用于图像目标, 如何从图像上抽取和管理大量目标间的空间关系, 如何在遥感图像匹配、检索和识别中的应用也是一个难题。

(5) 空间关系的应用。目前对空间关系的研究主要集中在基础理论方面, 应用方面的研究则集中在空间查询语言方面。空间关系是对目标及其所处的环境间依赖关系的一种语义和关系建模, 因而还有更重要的应用需要进行研究和试验。如空间关系在矢量数据和遥感图像的匹配、遥感图像和遥感图像的匹配、矢量与矢量的匹配, 以及在遥感图像识别、检索、配准等领域具有更广泛的应用。基于空间关系的匹配与已有匹配方法在效果和效率的差异、优劣及其改进都有待进一步研究。

References:

- [1] GUO Renzhong. Spatial analysis[M]. Wuhan: Press of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1997 (in Chinese).
- [2] AI Tinghua. Research on supporting data model and methods of city map database generalization [D]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000 (in Chinese).
- [3] LIU Wenbao, DENG Min, XIA Zongguo. Analysis of uncertainties of attributes in vector GIS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(1): 76-81 (in Chinese).
- [4] SHU Hong. Study on principles for concept formalization and logic spatial temporal data model [D]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1997 (in Chinese).
- [5] ERWIG M, Schneider M. Spatial temporal predicates [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering,

- 2002, 14(4): 881-901.
- [6] ABDELMOTY A I, WILLIAMS M H. Approaches to the representation of qualitative spatial relationships for geographic data bases [C] // Advanced geographic data modeling: spatial data modeling and query language for 2D and 3D applications. 1994: 204-216.
 - [7] MARK D, EGENHOFER M J. Modeling spatial relations between lines and regions: combining formal mathematical models and human subjects testing [J]. Cartography and Geographical Information Systems, 1994, 21(3): 195-212.
 - [8] DU Qingyun. Study on linguistic characteristics and automatic understanding mechanism of spatial information [D]. Wuhan: Wuhan University, 2001 (in Chinese).
 - [9] SHARIFF A R, EGENHOFER M J, MARK D. Natural language spatial relations between linear and areal objects: the topology and metric of English Language terms [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(3): 215-246.
 - [10] MARK D, EGENHOFER M J. Calibrating the meanings of spatial predicates from natural language: line region relations [C] // Sixth international symposium on spatial data handling, Edinburgh, Scotland, 1994: 538-553.
 - [11] DU Shihong, WANG Qiao, LI Zhijiang. Definitions of natural language spatial relations in GIS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(6): 533-538 (in Chinese).
 - [12] MARK D. Spatial representation: a cognitive view [M] // MAGUIRE D J, GOODCHILD M F, RHIND D W, et al. Geographical information systems: principles and applications. 2nd ed. London: Longman Scientific, 1999: 81-89.
 - [13] EGENHOFER M J, HERRING J. Categorizing binary topological relations between regions, lines and points in geographic databases [R]. Technical Report, Department of Surveying Engineering, University of Maine, 1991.
 - [14] COHN A G, BENNETT B, GOODAY J, et al. Qualitative spatial representation and reasoning with the region connection calculus [J]. GeoInformatica, 1997, 1(1): 1-44.
 - [15] CHANG S K. Elements of a visual language [J]. IEEE Software Magazine, 1987, 4(1): 29-39.
 - [16] CHANG S K, JUNGERT E, LI Y. Representation and Retrieval of Symbolic Pictures Using Generalized 2D Strings [R]. Technical Report, University of Pittsburgh, 1988.
 - [17] SUN Yuguo. Description of topological spatial relations and representation of spatial relations using 2D T String [D]. Wuhan: Wuhan Surveying Technology University, 1993 (in Chinese).
 - [18] CHEN Jun. Voronoi dynamic spatial data model [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 2002 (in Chinese).
 - [19] CHEN Jun, LI Chenming, LI ZhiLin, et al. A Voronoi based 9 intersection model for spatial relations [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2001, 15(3): 201-220.
 - [20] PAPADIAS D, THEODORIDIS Y. Spatial relations, minimum bounding rectangles and spatial data structures [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11(2): 111-138.
 - [21] ABDELMOTY A I, EL GERESY B A. A general approach to the representation of spatial relationships [R]. Technical Report, Department of Computer Studies, University of Glamorgan, Wales, 1995.
 - [22] EGENHOFER M J. A model for detailed binary topological relationships [J]. GeoInformatica, 1993, 47(3&4): 261-273.
 - [23] CAO Han. Research on knowledge representation and reasoning mechanism for spatial relation reasoning [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002 (in Chinese).
 - [24] EGENHOFER M J, CLEMENTINI E, DIFELICE P. Topological relation between regions with holes [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1994, 8(2): 129-144.
 - [25] ZHAO Renliang, CHEN Jun, LI Zhilin. Define and describe k order spatial adjacency with Voronoi distance [C] // Proceedings of dynamic and multi dimensions GIS, 1999: 77-82.
 - [26] PEUQUET D, ZHANG Cixiang. An algorithm to determine the directional relationship between arbitrarily shaped polygons in the plane [J]. Pattern Recognition, 1987, 20(1): 65-74.
 - [27] FRANK A U. Qualitative spatial reasoning: cardinal directions as an example [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1996, 10(3): 269-290.
 - [28] GOYAL R. Similarity assessment for cardinal directions between extended spatial objects [D]. Maine: University of Maine, 2000.
 - [29] DU Shihong, WANG Qiao, YANG Yiping. A qualitative description model of detailed direction relations [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(12): 1496-1503 (in Chinese).
 - [30] EGENHOFER M J. Deriving the composition of binary topological relations [J]. Journal of Visual Languages and Computing, 1994, 5(2): 133-149.
 - [31] PAPADIAS D, KARACAPILIDIS N, ARKOUMANIS D. Processing fuzzy spatial queries: a configuration similarity approach [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(2): 93-118.
 - [32] ZHAO Xuesheng, CHEN Jun. Hierarchical spatial relation reasoning based on spherical OTM partition [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(4): 355-360 (in Chinese).
 - [33] FRANK A U. Qualitative spatial reasoning: cardinal directions as an example [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1996, 10(3): 269-290.
 - [34] SKIADOPOULOS S, KOUBARAKIS M. Composing cardinal direction relations [J]. Artificial Intelligence, 2004, 152: 143-171.
 - [35] HONG Junhong, EGENHOFER M J, FRANK A. On the robustness of qualitative distance and directions reasoning [C] // PEUQUET D. Auto Carto 12, Charlotte, NC, 1995: 301-310.

- [36] HERNÁNDEZ D. Relative representation of spatial knowledge: the 2D case [C] // MARK D, FRANK U. Cognitive and linguistic aspects of geographic space. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991: 373-385.
- [37] EGENHOFER M J, ALT A H. Reasoning about gradual changes of topological relationships [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1992(639): 196-219.
- [38] PAPADIAS D, EGENHOFER M J. Hierarchical spatial reasoning about direction relations [J]. *GeoInformatica*, 1997, 1 (3): 251-273.
- [39] CLARAMUNT C, JIANG B. Hierarchical reasoning in time and space [EB/OL]. <http://www.ecole-navale.fr/fr/irenav/cv/claramunt/Clara&JiangSDH.pdf>, 2000.
- [40] EGENHOFER M J. Spatial SQL: a query and presentation language [J]. *IEEE Transactions on Knowledge Engineering and Data Engineering*, 1994, 6(1): 86-95.
- [41] VOISARD A, DAVID B. A database perspective on geospatial data modeling [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2002, 14(2): 226-243.
- [42] LIN Hui, HUANG Bo. SQL/SDA: a query language for supporting spatial data analysis and its web based implementation [J]. *IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering*, 2001, 13(4): 674-682.
- [43] MALERBA D, APPICE A, CECI M. A data mining query language for knowledge discovery in a Geographical Information System [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004 (2682): 95-116.
- [44] WANG Fangju. Towards a natural language user interface: an approach of fuzzy query [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1994, 8(2): 143-162.
- [45] ZHAN F B. Approximate analysis of binary topological relations between geographic regions with indeterminate boundaries [J]. *Soft Computing*, 1998(2): 28-34.
- [46] CHANG S K, COSTAGLIOLA G, PACINI G, et al. Visual language system for user interfaces [J]. *IEEE Software*, 1995: 33-44.
- [47] LEE Y C, CHIN F L. An iconic query language for topological relationships in GIS [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(1): 25-46.
- [48] EGENHOFER M J. Spatial Query by Sketch [C] // Proceedings of the IEEE symposium on visual languages IEEE Computer Society, Washington DC, USA, 1996: 60-67.
- [49] EGENHOFER M. Query processing in Spatial Query by Sketch [J]. *Journal of Visual Languages and Computing*, 1997, 8(4): 403-424.
- [50] BLASER A D. Sketching spatial queries [D]. Maine: University of Maine, 2000.
- [51] PAPADIAS D, MAMOULIS N, DELIS V. Approximate spatio-temporal retrieval [J]. *ACM Transactions on Information Systems*, 2001, 19(1): 53-96.
- [52] KOPERSKI K, HAN Jiawei, ADHIKARY J. Spatial data mining progress and challenges [EB/OL]. <http://db.cs.sfu.ca/GeoMiner/survey/html/survey.html>, 1996.
- [53] KOPERSKI K, HAN Jiawei. Discovery of spatial association rules in geographic information databases [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1995 (951): 47-66.
- [54] CLEMENTINI E, FELICE P D, KOPERSKI K. Mining multiple level spatial association rules for objects with a broad boundary [J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2000, 34 (3): 251-270.
- [55] RODRÍGUEZ M A, EGENHOFER M J. Putting similarity assessments into context: matching functions with user's intended operations [J]. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1999 (1688): 310-323.
- [56] BRUNS H T, EGENHOFER M J. Similarity of spatial scenes [C] // Seventh international symposium on spatial data handling. London: Taylor & Francis, 1996: 31-42.
- [57] RODRÍGUEZ M A, EGENHOFER M J, RUGG R. Assessing semantic similarities among geospatial feature class definitions [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1999 (1580): 189-202.

参考文献:

- [1] 郭仁忠. 空间分析 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997.
- [2] 艾廷华. 城市地图数据库综合的支撑数据模型与方法研究 [D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000.
- [3] 刘文宝, 邓敏, 夏宗国. 矢量 GIS 中属性数据的不确定性分析 [J]. *测绘学报*, 2000, 29(1): 76-81.
- [4] 舒红. 概念、形式化和逻辑时空数据建模原理初探 [D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1997.
- [8] 杜清运. 空间信息的语言学特征及其自动理解机制研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2001.
- [11] 杜世宏, 王桥, 李治江. GIS 中自然语言空间关系定义 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(6): 533-538.
- [17] 孙玉国. 拓扑关系描述与 2D T-String 空间关系表达 [D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1993.
- [18] 陈军. Voronoi 动态空间数据模型 [M]. 北京: 测绘出版社, 2002.
- [23] 曹茜. 空间关系推理的知识表示与推理机制研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [29] 杜世宏, 王桥, 杨一鹏. 一种定性细节方向关系的表达模型 [J]. *中国图像图形学报*, 2004, 9(12): 1496-1503.
- [32] 赵学胜, 陈军. 基于球面四元三角网剖分的层次空间推理 [J]. *测绘学报*, 2001, 30(4): 355-360.