

多尺度空间关系研究进展

杜世宏¹, 雒立群^{1,2}, 赵文智¹, 郭舟¹

(1. 北京大学遥感与GIS研究所, 北京 100871; 2. 61243 部队, 乌鲁木齐 830006)

摘要 空间关系及其尺度变化建模,一直是地理信息科学基础理论的重要前沿领域之一。本文全面总结了该领域在理论、方法和应用方面的最新进展。首先,详细阐述了关系表现与几何表现的特点和差异,提出了关系表现的尺度问题,尤其是与制图综合的关系。然后,分别结合形状化简、面对象合并、属性归纳、空间维数退化等制图综合算子,论述了拓扑和方向关系尺度变化规律的推导和建模方法。最后,结合多尺度空间关系变化模型,提出了基于关系的多尺度数据分析技术框架,并重点阐述了基于关系的多尺度数据一致性检测和多尺度数据查询的概念及解决方法,且用实例分析证明了它们的有用性。详细而具体地研究不同综合算子对拓扑和方向关系尺度变化的影响及建模方法,对于分析和理解多尺度空间数据,具有重要意义。

关键词 拓扑关系;方向关系;制图综合;尺度变化;关系一致性

DOI:10.3724/SP.J.1047.2015.00135

1 引言

空间信息多尺度表示与处理是地理信息科学的重要理论前沿问题,主要解决由于不同部门用户对地理数据的不同应用需求和分析需要,而导致空间数据的不同表示问题。多尺度数据建模和管理是多尺度应用的核心。美国国家地理信息与分析中心(NCGIA)从1988年就开始研究空间数据的多重表示问题^[1]。UCGIS认为未来的GIS是尺度依赖的,但对用户来讲是尺度敏感的。为对多尺度数据进行管理,由欧共体资助的MurMur项目从2001年开始实施^[2]。国际摄影测量学会和国际制图协会于2002年7月在加拿大渥太华联合召开“空间数据的多尺度表示”学术会议,研讨多尺度表示基础理论与应用问题。但GIS的尺度问题,尤其是多尺度数据查询与分析问题,远未达到人们所期望的程度^[3]。

空间信息主要有几何表现和关系表现2种方式:几何表现侧重表达地理要素的几何位置、几何形态和几何分布,为空间信息的高效组织、管理、查询、几何分析和可视化服务,但与人类对空间信息的理解方式有一定的差异;关系表现则是以人类对地理世界的认知和理解为基础,对地理要素的空间

关系进行抽象和理解,并用关系符号进行表达,服务于空间知识表达、推理和理解,与人类对空间信息的表述和理解一致。经过长期发展,几何表现在理论、方法、技术和软件等方面相对比较成熟;而关系表现尚处于理论发展阶段。由于关系表现是从几何表现转换而来,几何表现的多尺度特征导致关系表现也是多尺度的。

在几何数据多尺度表现领域,制图综合一直是研究重点,它侧重于对详细尺度空间数据进行空间和专题综合。如分形制图综合^[4]、渐进式综合^[5]、基于三角网的综合^[6]、基于遗传算法的综合^[7]等。尽管制图综合技术取得了很大进展,但距全自动化还相距甚远^[6]。多尺度数据仍然分库存储和管理同一地理实体点的不同几何表现^[8]。

空间关系理论研究一直聚焦于单尺度空间关系。例如,拓扑关系九交模型^[9]和RCC方法^[10];方向关系的关系矩阵模型^[11]、MBR模型^[12]等。空间关系推理方法,如拓扑关系定性推理^[13]和方向关系定性推理^[14]等,都是以单尺度空间关系为基础的。近年来的发展趋势,是把空间关系模型和制图综合方法联系起来研究关系表现的多尺度问题。

由于关系尺度变化可根据综合规律来建模和

收稿日期 2014-11-15;修回日期:2014-12-10.

基金项目 国家自然科学基金项目(41171297)。

作者简介 杜世宏(1975-),男,副教授,主要从事空间关系知识描述与推理研究。E-mail: dshgis@hotmail.com

推导,即空间关系的尺度变化是可预测的,比几何信息具有更强的适应性。因此,本文重点总结多尺度空间关系建模理论与应用的主要进展,主要包括拓扑关系多尺度建模、方向关系多尺度建模,以及基于关系的多尺度数据应用等,为推动基于关系的空间信息的理论发展和应用奠定基础。

2 空间关系与空间尺度

空间信息表现是空间信息科学的基础,主要涉及如何把各种地理要素的几何、属性,以及关系等重要信息经过认知、加工和抽象后,科学地加以组织和表达,以利于空间信息分析处理。其常用表现方式有2类:面向计算机的几何表现和面向认知的关系表现。无论是几何表现还是关系表现,都随着尺度的变化而变化。

2.1 空间信息表现方式

空间信息可从2个方面进行表示(图1)。一方面,为有利于计算机精确表现地理世界,必须先定义坐标系,然后基于坐标系表达地理要素的几何位置,采用高效的几何数据结构进行存储和管理。这种表现方式侧重表达地理要素的几何位置、几何形态和几何分布,因此称为几何表现方式。另一方面,人类基于对地理世界的认知和理解,将对地理要素空间关系的认知和抽象表示为关系符号,并进行交流和推理。这种表现方式侧重地理要素关系表达,并对每种关系赋予一个词汇或符号表示,故此称为关系表现方式。

如图1所示,几何表现把地理场景抽象为由面对象 a 、 b (由 b_1 、 b_2 和 b_3 组成)、 c ,以及线对象 d

组成的集合,完整记录了每个对象的几何坐标。几何分析可从对象几何位置进行面积、长度量算,以及分布模式推导等。关系表现则把对象间的空间关系表示为一些自然语句集合,方便人类理解,如“ d 穿越 a 、 d 从 b_1 和 b_2 间穿过、 b_3 和 c 位于 d 的北方、 c 位于 b 的东北”等。这里“穿越”、“穿过”、“北方”和“东北”等就是空间关系符号表示。

几何表现和关系表现都是对地理世界的抽象表示,但由于出发点不同,因此差异明显。几何表现重在空间信息的精确表达、管理和几何分析,必须严格定义空间坐标系,但与人类的认知不符。关系表现重在关系概念的认知和表达,由定性符号系统及相关运算组成。尽管关系表现对地理信息表达不精确,但人类有足够的 ability 进行推理、理解和交流。尽管二者差异明显,但它们都是重要的空间信息表现方式,互为补充。高层次的空间分析和理解不仅需要几何信息,更需要关系知识。例如,制图综合中,形状化简前后的数据需要保持拓扑一致性。表1总结和比较了2种表现的特点。

表1 几何表现和关系表现

Tab. 1 Comparison of geometric representation and relation representation

几何表现	关系表现
定位方式 笛卡尔坐标系	基于关系的定位
定位性质 绝对定位	相对定位
定位精度 量化、精确	定性、近似
对象表现 几何表现(点、线、面等)	关系知识表达、推理
空间分析 几何计算、欧式距离等	概念距离、关系距离、场景相似
信息度量 定量处理(面积、长度)	定性概念表达

2.2 关系表现与制图综合

由于空间对象在不同尺度上有不同几何表现,具体表现在形状、大小、结构和空间维数的差异上,因此,导致相同地理对象在不同尺度上的空间关系也不同,且这种差异性依赖于制图综合变换算子。图1中,在详细尺度上,线对象 d 从子对象 b_1 和 b_2 间穿过,子对象 b_1 和 b_2 在对象 a 的内部,而 b_3 在 a 的外部;在粗略尺度上, b_1 、 b_2 和 b_3 被合并为对象 b ,线对象 d 穿越对象 b ,对象 a 和对象 b 相交。因此,详细尺度上 a 与 d 和 $\{b_1, b_2, b_3\}$ 的拓扑关系,以及粗略尺度上 a 与 d 和 b 的关系是不同的,主要是由对象合并运算产生的。从空间关系建模的角度看,空间关系模型,可从它们各自尺度的几何表现分别计算出2个尺度上的拓扑关系。由于它们是相

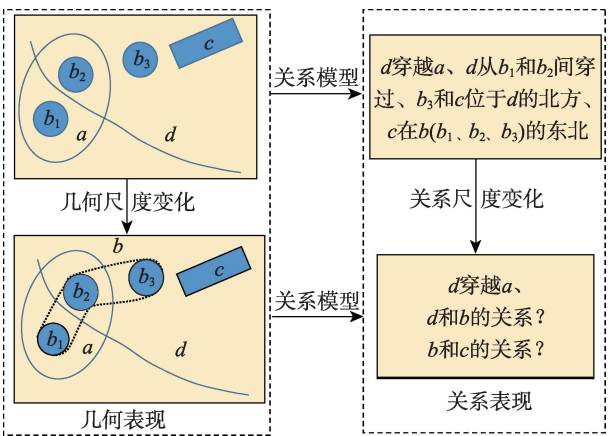


图1 关系表现与空间尺度

Fig. 1 Relation representation and spatial scale

同对象的空间关系,因此,应该遵守某种约束规则,即空间关系具有尺度依赖性。由于多尺度空间数据往往是独立生产和管理的,故不同尺度数据间存在度量和关系上的不一致性。但从制图综合和多尺度数据质量角度看,它们应该服从某种程度一致性。不一致的数据往往是某种错误引起的,是不允许的。

由于制图综合的原因,使得粗略尺度表现始终是详细尺度几何表现的简化,具体表现在形状、位置、结构和关系上,因此,评估多尺度数据度量和关系一致性与相似性的基础是综合的单调性假设^[5]。即任何对象的度量信息、拓扑结构,以及任意对象间的空间关系必须在连续表达尺度上保持相同,或在复杂度或细节上持续减少。这些变化可从几何相似性和关系相似性进行评估。

2.3 关系表现的尺度问题

多尺度对象的空间维数、形状、空间结构的改变,使得多尺度对象间的几何信息(如面积、长度)也发生改变。当空间维数、形状和结构不变时,拓扑关系不会随尺度、平移和旋转变换而改变;方向关系不随尺度变化和坐标平移而改变。而当尺度跨度加大,对象结构和维数都变化时,空间关系也会变化,但这种变化可根据综合规律来建模和推导。综上所述,有以下结论:(1)多尺度对象的空间维数、形状、空间结构、空间关系等都是依赖于空间尺度的,因此单尺度分析方法不能用于多尺度数据查询和处理;(2)几何信息的尺度变化难以建模,而空间关系尺度变化可被建模,因而空间关系更适于多尺度数据的分析处理。

关系表现的多尺度建模理论与应用,主要包括以下几个基本问题:

(1)多尺度关系建模。关系表现的尺度特性与综合算子有关。结合对象合并、形状化简、维数退化、属性归纳等算子,研究6类关系(面-面、线-面、线-线、点-线、点-面、点-点)的尺度转化规律。

(2)多尺度空间数据查询。传统空间数据查询只能处理单一尺度的空间对象。查询多尺度空间数据,需解决以下问题:①不同尺度数据的关联;②由于多尺度对象的空间维数、形状、结构和空间关系是变化的,如何保证同一查询语句在不同尺度下查询结果的一致性。

(3)多尺度数据一致性评价。同一对象在不同尺度下往往存在着空间维数、形状、对象结构、空间

关系的不一致性。不一致的多尺度数据不仅违背了地理世界的客观性,而且造成多尺度查询、处理和分析等产生错误的结果。因此,顾及空间维数、形状、对象结构和空间关系的多尺度数据一致性评价是急需解决的问题。

上述3个问题构成了多尺度关系研究的基本内容,其中空间关系多尺度建模是核心。

3 空间关系尺度建模

由于关系表示本质上依赖于几何表示,因此,当空间对象的几何表示随着尺度发生变化时,它们的关系表示也会发生变化,且这种变化与制图综合有关。

3.1 空间关系建模

3.1.1 拓扑关系模型

九交矩阵可用于分类任意两个空间对象的拓扑关系^[9]。对于简单空间对象有:(1)8种面-面关系,记为 $\Omega_{pp} = \{disjoint, meet, overlap, inside, contain, cover, coveredBy, equal\}$,缩写为 dt 、 mt 、 ov 、 in 、 ct 、 cv 、 cb 和 eq ;(2)19种线-面关系,记为 $\Omega_{lp} = \{LR1, \dots, LR19\}$ 。

3.1.2 方向关系模型

方向关系模型可分为定量和定性模型。定量模型包括基于Voronoi的方向组模型^[16]和方向距离模型^[17]等,定性模型包括方向关系矩阵模型^[11]和MBR模型^[12]等。与其他模型相比,方向关系矩阵是定性模型中描述能力最好的,且方便推理^[11],因此被大多数研究所采用。方向关系矩阵利用参照对象 a 的最小外接矩形将空间划分为9个方向: E_a 、 W_a 、 S_a 、 N_a 、 SE_a 、 SW_a 、 NE_a 、 NW_a 和 O_a (图2)。

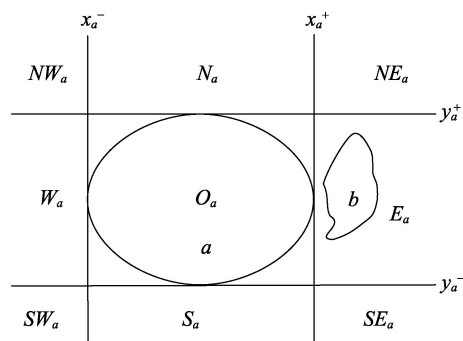


图2 方向关系

Fig. 2 Direction relations

连通区域 b 与 a 的方向关系为 $\beta(a,b)=\{r \in D | \text{tile}(r) \cap b^{\circ} \neq \emptyset\}$ 。其中, D 指由 9 个方向组成的集合; a 为参照对象, b 为目标对象, b° 为其内部; $\text{tile}(r)$ 为方向 r 的空间范围。

由方向关系定义可知,制图综合对方向关系有以下影响:(1)目标对象合并和维数退化会影响目标对象与方向区域间的关系,从而改变方向关系,使得方向关系随尺度变化;(2)参照对象的合并基本不会影响方向划分;(3)参照对象的维数退化会影响方向区域的划分,使得方向关系随尺度变化。因此,对目标和参照对象的综合都会引起方向关系尺度变化。

3.2 拓扑关系尺度建模

拓扑关系的尺度变化与制图综合算子密切相关。本节将结合拓扑关系模型,重点总结在不同制图综合算子作用下,如何推导拓扑关系尺度变化规律。

















3.2.1 维数退化与拓扑关系尺度建模

维数退化运算可改变空间对象的维数,如一个面对象被综合为一个线或点对象。不同维数空间对象的 3 个子集划分和九交矩阵不同,空间关系值域也不同,因此维数退化引起的拓扑变化建模,就是在不同关系值域间进行转换。维数退化引起的拓扑变化,主要指 8 种面-面关系向 19 种线-面、33 种线-线、3 种点-面关系的转化。Kang 等^[18]采用矩阵比较法、拓扑距离法^[19]、矩阵合并法,以及混合法,推导获得 8 种面-面与 19 种线-面拓扑关系的对应性(表 2)。例如,矩阵比较法和拓扑距离法把面-面关系中的 *contain* 变为线-面关系中的 *LR 14*;而矩阵合并法却变为 *LR 14*、*LR 15*、*LR 16*、*LR 17*、*LR 18* 和 *LR 19*。因此,不同方法的结果是不同的。

已有工作建立了面-面与线-面拓扑关系的转换,而面-面与线-线,以及线-面与线-线间拓扑关系的转换尚未完成,但应与面-面向线-面关系转换

表 2 8 种面-面与 19 种线-面拓扑关系的对应性^[18]

Tab. 2 The correspondences between the eight region-region relations and 19 line-region relations^[18]

8 种面-面关系	19 种线-面关系		
	矩阵比较法	拓扑距离法	矩阵合并法
<i>disjoint</i>	 LR1	 LR1	LR1
<i>contain</i>	 LR14	 LR14	LR14, LR15, LR16, LR17, LR18, LR19
<i>inside</i>	 LR9	 LR9	LR9
<i>equal</i>	 LR8	 LR8	LR8, LR10, LR11, LR12, LR13
<i>meet</i>	 LR3	 LR3	LR2, LR3, LR5, LR6, LR7
<i>cover</i>	 LR16	 LR16	LR14, LR15, LR16, LR17, LR18, LR19
<i>coveredBy</i>	 LR10	 LR10	LR8, LR10, LR11, LR12, LR13
<i>overlap</i>	 无	 LR16, LR18, LR19	LR14, LR15, LR16, LR17, LR18, LR19

的推导方法类似。

3.2.2 区域合并与拓扑关系尺度建模

合并运算将详细尺度上的多个面对象合并为一个粗略对象。尽管合并运算改变了面的连通性、形状和大小,但没有改变拓扑关系的值域,只是取值发生了变化。实质是从详细尺度上的多个面关系推导粗略尺度上 2 个面对象的关系^[20]。图 3 中,详细尺度上 3 个对象 a_0 、 a_1 、 a_2 被合并为面对象 a^* ,则粗略尺度上 a^* 和 b 的关系,可从 a_0 、 a_1 、 a_2 和 b 的 3 个关系推导出来。推导时,先从 a_0 与 b 以及 a_1 与 b 的关系推导合并区域 $a_0 \cup a_1$ 与 b 的可能关系;然后根据 $a_0 \cup a_1$ 与 b 及 a_2 与 b 的关系推导 a^* 与 b 间可能的关系。据此可知,多个面合并引起的拓扑变化,可表示为 2 个面合并的拓扑变化的组合。因面-面关系有 8 个基本关系,因此,一个 8×8 的组合表可表达任意 2 个面合并引起的拓扑变化^[20]。面合并最终推理的结果为 8 个基本关系集合的一个

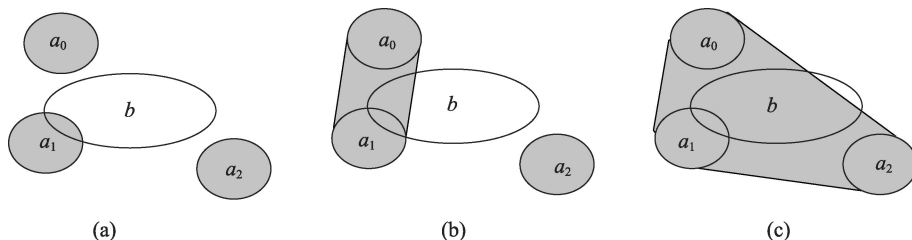


图 3 区域合并引起的拓扑变化

Fig. 3 Topological changes caused by merging regions

子集。例如,图3中合并后可能的关系为 dt 、 mt 、 ov 、 ct 和 cv 。

一般将聚合(Aggregation)、融合(Amalgamation)和合并(Merging)算子统称为合并运算,都把多个相似对象合并为一个对象,但它们所作用对象的维数不同。聚合运算主要把一群非常接近的点聚合为一个面。融合运算把多个面合并为一个面,主要有2种运算:拓扑邻近和视觉邻近融合。而合并算子把多个平行或接近的线合并为一条线。因此,已有工作主要适用于面对象融合引起的拓扑变化,而点和线合并引起的拓扑变化还需要进一步研究。

3.2.3 属性归纳与拓扑关系尺度建模

空间数据库包括空间和属性数据,以及拓扑关系。为更好地满足尺度依赖的应用需求,有必要将属性归纳和区域划分与拓扑关系尺度变化关联起来。区域划分将平面空间无缝地分为若干个具有相同属性的简单区域。属性划分可表示为多尺度属性分类系统,每个区域的属性值可在不同属性粒度上收集获得。在地理领域,区域与属性划分是十分相似的;自然与环境资源(如土壤类型、土地利用和土地利用分类、植被种类、森林种类、行政管理单元和图像分割)就是典型的例子。从空间角度看,这些现象经常被模拟为同质区域;而从属性角度看,它们被表示为多重分类系统或多尺度属性系统^[21]。因此,属性归纳首先将详细属性变为粗略属性,然后将具有相同粗略属性的相邻区域被合并为一个粗略区域。合并操作只将相邻区域的公共边合并到一个粗略区域的内部,而不会对粗略区域形状进行简化。因此,属性归纳只会引起区域划分的综合,而不会引起其他形式的空间综合。区域划分的综合进一步引起了其他对象与区域划分的拓扑变化。Du等^[22]研究了线对象与属性归纳引起的拓扑关系变化。其中线对象来自于另一个专题图层,并没有随区域划分的综合而化简或合并。这种推导主要利用拓扑关系的尺度依赖特性计算粗略尺度关系。因此,它避免了将详细划分先综合为粗略划分,无需或仅需少量几何运算就可得到粗略尺度关系。这项工作可进一步扩展,推导线对象合并和属性归纳2个算子同时作用时产生的拓扑变化。

3.2.4 形状化简与拓扑关系尺度建模

形状化简通过删除冗余的坐标或弯曲,使复杂形状简化和光滑。一般有2种方法:几何化简和结构化简。几何方法使用几何度量(如两点距离、点到线的垂直距离或线段夹角)判断需要删除或保留

的坐标点。比较典型的方法有Douglas-Peucker算法^[23]、分层算法^[24]和带状树算法^[25]。结构化简先将形状分解成一系列基元(如弯折、曲线等),然后分析基元度量值(如大小、方向、平均宽度等),决定舍弃和保留的基元。

在制图领域,为保持拓扑一致性,在形状化简过程中引入不一致性检测算法,保持化简前后拓扑的一致性。制图综合领域的拓扑一致性主要指化简后的形状不能与自己或其他对象相交。但这些方法都没有明确形式化拓扑关系,也没有建模形状化简对拓扑变化的影响,因此不能获得详细的拓扑变化信息。从形状化简角度,应该明确使用有效的形状描述方法^[26];从拓扑变化角度,应该建模形状化简对拓扑变化的影响;从拓扑分析角度,应能获得拓扑变化的详细信息。因此,形状描述、形状化简和拓扑变化是相关的。

由于拓扑关系与空间对象的形状有关,Du等^[27]研究了一种形状依赖的表达方法,把形状复杂的面对象分解为简单基元的组合,并且形式化表达了线对象与基元的拓扑关系。因此,这种表达方式有助于将形状与拓扑关系相关联。由于任意形状化简可表示为基元化简的组合,因此线对象与面对象形状化简引起的拓扑变化,可从线对象与面对象基元的拓扑关系中推导出来。该方法首先采用拓扑关系矩阵表达线对象与每个基元的拓扑关系;然后,从拓扑关系矩阵中推导每个基元被综合引起的拓扑变化;最后,从拓扑关系变化矩阵分析基元综合可能引起的整体拓扑变化。这种方法不需要进行真正的几何化简,其只是利用了形状化简的思想来推导拓扑变化,不依赖于具体几何化简算法。

3.2.5 拓扑不变量与尺度建模

随着尺度变化,除了拓扑关系发生变化外,空间对象拓扑结构也会变化。另外,拓扑关系用九交矩阵描述^[9],而九交矩阵只关注9个交集是否为空,并不评价9个交本身的组成和结构。九交矩阵中非空交有关的不变量(即拓扑不变量)也具有尺度特性。如果用更多标准来评估九交矩阵中的非空交,则能更详细区分拓扑关系。由于其他非空交与边界交有类似的结构,因此仅考虑非空边界交的拓扑不变量,包括:(1)边界交单元序列,记录子单元序列及其拓扑不变量;(2)边界交单元维度,边/边交单元可以是0或1维,分别取决于边界交是点还是线;(3)边界交单元类型;(4)有界性。

Egenhofer等^[28]用单元不变表表示非空边/边交

的单元序列、维度、类型和有界性,并在此基础上,提出了两个面对象的拓扑结构和拓扑关系的等价性和相似性概念,评价了拓扑不变量随尺度变化的规律。如图4所示, a^* 和 b^* 为带岛屿对象 a 和 b 的外轮廓, H_1^b 和 H_2^b 为 b 的2个岛屿, $T(\partial a^*, \partial b^*)$ 和 $T(\partial a^*, \partial H_1^b)$ 分别为 a^* 和 b^* ,以及 a^* 和 H_1^b 边界交的单元不变表。随着空间尺度变小,对象 b 的岛屿 H_2^b 被删除、 H_1^b 和 a 的外轮廓被化简。图4(a)–(c)为详细尺度表现,图4(d)–(e)为粗略尺度表现。从拓扑结构来看,化简前后的拓扑关系矩阵(图4(b)和4(e))是等价的,因为二者的变化仅仅是前者删除了一列(删除岛屿引起的)。从拓扑不变量的角度,二者也是等价的,因为 $T(\partial a^*, \partial b^*)$ 和 $T(\partial a^*, \partial H_1^b)$ 在变化前后(图4(c)和4(f))是完全相同的。

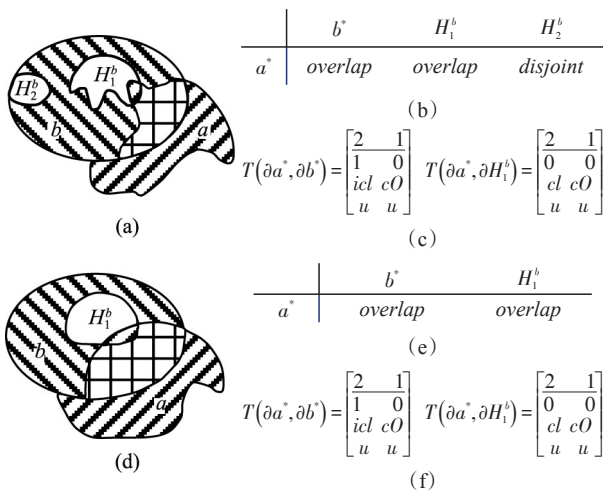


图4 2个等价的关系结构^[28]

Fig. 4 The two equivalent relations^[28]

3.3 方向关系尺度建模

本节将基于方向关系矩阵模型,结合区域合并和维数退化制图综合算子,总结推导方向关系尺度变化规律的方法。

3.3.1 区域合并与方向关系尺度建模

方向是对拓扑关系的一个重要补充,描述了目标对象与参照对象的相对位置关系。因此,在评估多尺度空间数据的一致性时,方向关系也应予以考虑。

面对象有连通和非连通之分。非连通面对象合并可引起方向关系变化,其可作为目标对象、参照对象或同时为目标和参照对象,因此,合并运算可分别作用于目标和参照对象,或同时作用于目标和参照对象。Du等^[29]分别研究了这些情形下,由详细尺度方向关系推导粗略尺度关系的方法。推导过程将方向关系的尺度变化特性与合并算子相关联,具体为:(1)将连通面对象的方向关系模型扩展用于处理非连通对象,给出了不同尺度下方向一致性的定义;(2)基于扩展模型,提出了3种计算方法,通过使用合并操作,从非连通面对象的方向关系推导连通面对象的方向关系;(3)通过对比推导出的关系与实际关系,评估多尺度空间对象方向关系的一致性。由于连通面对象间有218个可能的方向关系,而非连通区域间有511个可能的关系,因此本质是建立511个和218个关系间的转换和映射。

图5和图6显示了不同尺度下对象合并及其方向关系变化,且图6是图5的化简。图5中, $\beta(a, b) = \{NW_a, O_a\}$ 。为评估图5(a)和图6(a)中方向关系的一致性,矩形近似法推导出的粗略关系集合为 $M(a, b^*) = \{\{NW_a, N_a, O_a\}, \{NW_a, W_a, O_a\}, \{NW_a, N_a, W_a, O_a\}\}$ 。根据数据计算的粗略关系为 $\beta(a, b^*) = \{NW_a, W_a, O_a, S_a\}$ 。由于 $\beta(a, b^*) \notin M(a, b^*)$,因此, $\beta(a, b^*)$ 和 $\beta(a, b)$ 不一致。

为评估图5(b)和图6(b)中方向关系的一致性,根据详细关系推导出的粗略关系集合为 $M(a, b^*) = \{\{NW_a, N_a, O_a\}, \{NW_a, W_a, O_a\}, \{N_a, NW_a, W_a, O_a\}\}$;根据实际数据计算出的关系为 $\beta(a, b^*) = \{NW_a, N_a, O_a\}$ 。因为 $\beta(a, b^*) \in M(a, b^*)$,所以,图5(b)和图6(b)中的关系是一致的。

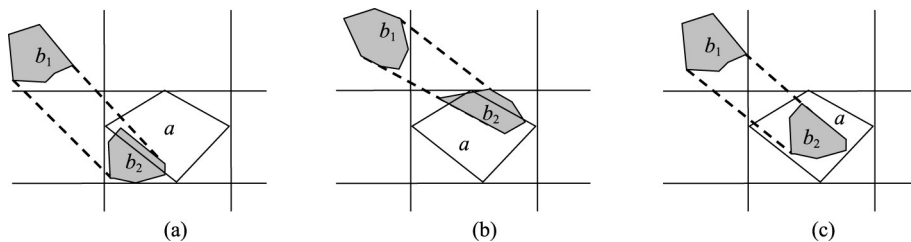
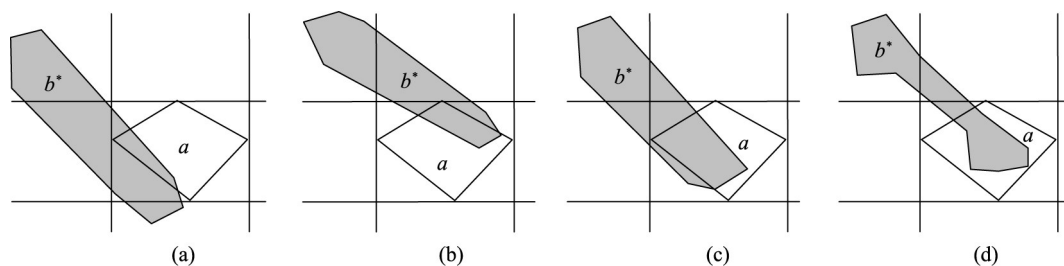


图5 详细尺度下非连通区域方向关系^[29]

Fig. 5 The direction relations of disconnected regions at the detailed scale^[29]

图6 粗略尺度下连通区域方向关系^[29]Fig. 6 The direction relations of connected regions at the coarse scale^[29]

按照同样的方法,可得出以下结论:(1)图6(a)中的关系不可能与图5中任何关系一致;(2)图6(b)和图6(d)中的关系与图5(b)和图5(c)中的关系可以一致;(3)图6(c)中的关系可以和图5(c)中的关系一致。由于不知道合并过程的细节,图6(b)和图6(d)均为将图5(c)中子对象合并形成的可能结果。从方向关系看,图6(b)和图6(d)是等价的。因此,图6(b)和图6(d)中的关系与图5(c)中的关系是一致的。

3.3.2 维数退化与方向关系尺度建模

方向关系矩阵模型定义方向关系时,主要依据是参照对象的范围和方向的朝向。在大尺度地理范围内,方向朝向主要按照经线走向来定义,北极为北,南极为南。这种朝向是一种外部参照框架^[30],因此,不同尺度上参照对象维数变化不会影响方向朝向,但会影响参照对象的范围。随着空间尺度的降低,参照对象会从面对象退化为线或点对象。不同维数的参照对象具有不同的空间范围,显然对方向关系是有影响的。由于方向关系矩阵本质上是根据水平和垂直轴划分方向区域,且一个参照对象在水平或垂直轴的投影为一条线或者一个点。因此,有4种不同类型的参照框架:(1)在2个轴上的投影都是点,(2)在水平轴上的投影是点,而垂直轴上的投影是线段,(3)水平轴上投影是线段,而垂直轴上投影是点,(4)在水平和垂直轴上的投影都是线段。前3种情况分别表示参照对象为点、竖直线和水平线时的特殊结构。当参照对象是一个面或一条非竖直且非水平的线时,即为第4种情况。因此,维数退化引起的方向变化主要按照以下次序进行:第4种情况→第2或第3种情况→第1种情况。Goyal^[11]研究了深度方向关系矩阵模型,能兼容点、线和面对象方向关系,并在此基础上研究了维数退化对方向关系的影响,以及不同尺度上方向关系的兼容性。

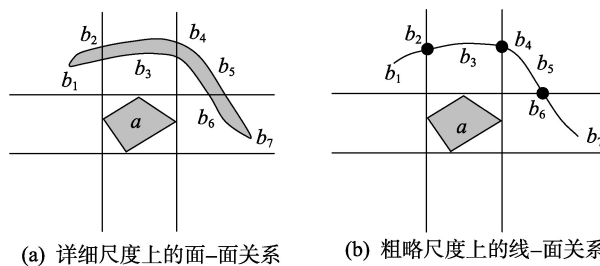


图7 维数退化前后方向关系变化

Fig. 7 The direction relation change caused by dimension reduction

在详细尺度上,目标对象 b 是一个面(图7(a)),而在粗略尺度上 b 退化为一条线(图7(b)),而参照对象 a 在2个尺度上均为面。目标对象 b 由7个单元 b_1-b_7 组成。在详细尺度上,单元 b_1 、 b_3 、 b_5 和 b_7 为面,且分别与 NW_a 、 N_a 、 NE_a 和 E_a 的方向区域相交;而 b_2 、 b_4 和 b_6 为线,分别与上述4个方向的边界相交。在粗略尺度上,对象 b 退化为线,单元 b_1 、 b_3 、 b_5 和 b_7 为退化线, b_2 、 b_4 和 b_6 退化为点。维数退化前后所有目标单元关于参照对象的投影关系在两种尺度上保持一致。因此,图7中方向关系在维数退化前后保持一致。

4 多尺度空间关系的应用

4.1 总体框架

已有多尺度空间数据分析方法存在以下问题:(1)未对尺度特性建模,查询和分析过程无法利用尺度信息;(2)以几何信息为主。由于多尺度数据往往多源异构,多尺度对象的空间维数、形状、关系、结构和相对位置可能发生变化。因此,多尺度数据分析必须考虑制图综合的影响。基于关系的多尺度空间数据分析包含4个方面:(1)顾及制图综合变换的多尺度对象对应性匹配,找到同一空间对象在不同尺度上对应的详细和粗略几何表现;(2)

根据不同制图综合算子,推导拓扑和方向关系的尺度变化规律;(3)基于多尺度空间关系,检测多尺度数据中关系的不一致性;(4)基于多尺度数据匹配和多尺度空间关系的多尺度数据查询。其中核心是多尺度拓扑和方向关系变化推导。

制图综合算子类型繁多,目前主要考虑了4种:(1)对象维数保持不变,但形状化简(Simplify);(2)对象空间维数保持不变,但结构简化,即复杂对象中的子对象被合并(Merge);(3)对象维数发生变化,面被退化为线或点(Reduce);(4)专题属性综合或重分类导致邻近对象合并(Merge)。这4种综合类型可归纳为3种空间变换Simplify、Merge和Reduce,且随空间对象类型而变化(如合并2个面或2条线的方法显然不同)。这3种变换对多尺度空间对象的几何形状和对象连接关系等是有影响的,因此,必然影响多尺度数据匹配、多尺度关系建模、多尺度关系不一致性检测,以及多尺度数据查询。

4.2 多尺度数据匹配

由于多尺度数据库目前采用分库存储,同一对象不同尺度几何表现之间缺乏联系。为进行多尺度空间数据分析,首先,必须建立多尺度数据的对应关系,即发现同一空间对象在多尺度数据库中的对应表现。由于制图综合的影响,不同尺度数据库中空间对象个数、几何形状和空间维数都发生了改变,因此,多尺度数据匹配和多尺度空间关系建模必须充分考虑对象合并、对象删除、形状化简和对象维数退化等综合算子的影响。

令 $X^P = \{a_i\}_{i=1}^n$ 和 $X^Q = \{a_i^*\}_{i=1}^m$ 为详细和粗略尺度数据集。多尺度数据匹配是从 X^P 和 X^Q 中自动获得 m 对匹配对象 $S = \{s_i\}_{i=1}^m$ 和 $S^* = \{a_i^*\}_{i=1}^m$, 其中, $s_i = \{a_j\}_{j=1}^k$ 和 a_i^* 是同一对象在2个尺度上的不同几何表现。根据 s_i 和 a_i^* 对象个数和维数即可获得综合变化情况,步骤如下:

(1)详细对象集合 s_i 被综合为粗略对象 a_i^* (即 $s_i \rightarrow a_i^*$), 因此, s_i 和 a_i^* 是 $n:1$ 或 $1:1$ 的关系;

(2)若集合 s_i 只有一个对象,且和 a_i^* 具有相同空间维数,则为形状化简(Simplify);

(3)若集合 s_i 有多个对象,且和 a_i^* 具有相同空间维数,则为对象合并(Merge);

(4)若集合 s_i 中对象维数高于 a_i^* 的维数,则为

维数退化(Reduce);

(5)集合 $S = \bigcup_{i=1}^m s_i$ 中对象有对应的粗略对象,可参与多尺度分析;

(6)集合 $X^P - S$ 中对象无对应的粗略对象,不参与多尺度分析;

(7)根据 s_i 和 a_i^* 间的匹配关系和综合联系,即可进行多尺度数据分析。

由于匹配方法是一个独立的领域,本文不再赘述。

4.3 多尺度关系构建

根据匹配得到的集合 $S = \{s_i\}_{i=1}^m$ 和 $S^* = \{a_i^*\}_{i=1}^m$, 以及 $s_i \rightarrow a_i^*$ 的对应关系,即可进行多尺度关系构建。多尺度关系是指详细尺度上 s_i 和 $s_j (i \neq j)$ 间的拓扑/方向关系与粗略尺度上 a_i^* 和 a_j^* 间的拓扑/方向关系的变化。这种变化与 $s_i \rightarrow a_i^*$ 和 $s_j \rightarrow a_j^*$ 的综合关系紧密相关。

根据 s_i 和 s_j 的对象几何类型组合,有面-面、线-面、线-线、点-线、点-面和点-点6种空间关系集合,即 Ω_{pp} 、 Ω_{lp} 、 Ω_{ll} 、 Ω_{dl} 、 Ω_{dp} 和 Ω_{dd} , 记为 $\Omega_i (1 \leq i \leq 6)$ 。详细尺度上的空间关系集 Ω_i 可根据已有空间关系模型(拓扑九交或方向关系矩阵)确定。空间关系尺度建模就是结合制图综合变换 $s_i \rightarrow a_i^*$ 和 $s_j \rightarrow a_j^*$, 以及 s_i 和 s_j 间的空间关系 Ω^d , 推导 a_i^* 和 a_j^* 间可能的关系 Ω^* , 即解决 $\Omega^d \rightarrow \Omega^*$ 变换。

(1)对于Simplify变换,集合 s_i 和 s_j 中只有一个对象,即 Ω^d 中只有一个关系 r , a_i^* 和 a_j^* 间可能的关系为集合 Ω^* , 且 r 和 Ω^* 肯定属于同一空间关系集合(即 $r \in \Omega_i$ 、 $\Omega^* \subseteq \Omega_i$ 、 $1 \leq i \leq 6$, 3.2.4节)。采用3.2.4节的方法,基于 r 可推导出形状化简后的关系 Ω^* 。

(2)对于Merge变换,集合 s_i 和 s_j 中对象可先进行两两合并,其本质是根据 r_1 和 $r_2 (r_1, r_2 \in \Omega^d)$ 推理 Ω^* 的取值,且它们肯定属于同一空间关系集合(即 $\Omega^d, \Omega^* \subseteq \Omega_i$ 、 $1 \leq i \leq 6$)。Merge合并两个面对象,因此,可根据合并前的两个对象和合并后的对象,以及 r_1 和 r_2 推导出Merge后的空间关系集 Ω^* (3.2.2和3.2.3节)。

(3)由于Reduce变换改变了对象的维数, r 和 Ω^* 肯定属于不同拓扑关系集合(即 $r \in \Omega_i$ 、 $\Omega^* \subseteq \Omega_j$ 、 $r \in \Omega_i$ 、 $1 \leq i \neq j \leq 6$)。因此,Reduce变换使 Ω_i 中每个关系变换为 Ω_j 中的关系。Reduce变换下的空间关系尺度变化即为 Ω_i 和 Ω_j 中关系的对应性(3.2.1节)。

(4)根据 s_i 和 s_j ($i \neq j$) 与 a_i^* 和 a_j^* 可获得3种关系信息:①由 s_i 和 s_j 数据,根据关系模型计算详细关系 Ω^d ;②由关系集合 Ω^d 与制图综合变换 $s_i \rightarrow a_i^*$ 和 $s_j \rightarrow a_j^*$ 推理 a_i^* 和 a_j^* 间可能的关系集合 Ω^* ;③由 a_i^* 和 a_j^* 数据,根据关系模型计算实际关系 Ω^c ,并基于 Ω^d 、 Ω^* 和 Ω^c 即可进行多尺度关系分析。

4.4 多尺度数据一致性检测

不一致性检测通过检验2个对象的详细关系是否与粗略关系一致来评价它们相对位置的一致性^[13,18,20]。首先,需在多尺度数据库中找到同一对象的多重表现;然后,分别在多尺度数据集中建立关系;最后,进行空间关系多尺度建模和一致性检测。

(1)对于多尺度关系一致性,已知综合关系 $s_i \rightarrow a_i^*$ 和 $s_j \rightarrow a_j^*$,以及 s_i 和 s_j 与 a_i^* 和 a_j^* 间的空间关系。根据空间关系模型可计算 s_i 和 s_j 的关系 Ω^d ,以及 a_i^* 和 a_j^* 的关系 Ω^c ;根据多尺度关系模型可推理 a_i^* 和 a_j^* 间可能的关系 Ω^* 。若实际计算出的粗略关系 Ω^c 在由详细关系推导出的集合 Ω^* 内,则多尺度关系 Ω^d 和 Ω^c 是一致的;否则,不一致。

(2)由于多尺度数据包含多种地理要素,如水系、道路、居民地、湖泊等。因此,必须全面检查不同要素间关系的不一致性。例如,水系相对于道路、道路相对于水系、居民地相对于水系、居民地相对于道路等。不同地理要素间一致性的含义是不同的。

Abdelmoty 和 Jones^[31]系统研究了多源空间数据集成中的不一致性问题,认为一致性评价可从对象和关系一致性2个方面进行。对象一致性包括:对象存在性、对象维数、对象形状、对象大小、对象结构等指标的等价性。关系一致性包括:拓扑关系、方向关系、相对大小等指标的等价性。由于空间关系描述相对位置,且多源空间数据往往存在位置上的偏差,因此空间关系在多源数据一致性评价中具有更重要的作用。

4.5 多尺度数据查询

空间关系是空间查询语句的重要组成部分,因此关系的尺度特性对查询结果有重要影响。根据多尺度数据匹配得到的多尺度对象对应性和多尺度空间关系模型,对多尺度查询进行高效处理。根据综合关系 $s_i \rightarrow a_i^*$ 和 $s_j \rightarrow a_j^*$,多尺度对象 s_i 和 s_j ,以及 a_i^* 和 a_j^* 间的空间关系,可进行多尺度数据查

询处理。查询内容如下:

(1)根据多尺度数据匹配关系 $s_i \rightarrow a_i^*$ (或 $s_j \rightarrow a_j^*$),可进行多尺度对象查询。查询详细对象 s_i 和粗略对象 a_i^* 间的合并和降维等综合关系。

(2)根据 s_i 和 s_j 以及 a_i^* 和 a_j^* 间的多尺度关系,可进行多尺度关系一致性或变化查询。

(3)根据多尺度关系和多尺度属性,可进行多尺度属性查询处理。

(4)扩展空间查询语句,使其支持多尺度空间关系、多尺度对象和多尺度属性查询。

应用多尺度空间关系变化规律检验多尺度查询语句的合法性,即根据空间变换类型,以及空间关系尺度模型,由详细尺度关系推导粗略尺度关系 Ω^* 。如果查询语句中的粗略关系与 Ω^* 满足一致性规则,则查询语句合法;否则不合法。

5 多尺度数据实例分析

由于尚未有商业软件可完成多尺度数据匹配、多尺度空间关系建模和推理、多尺度数据一致性检测和多尺度数据查询等功能。因此,北京大学课题组自行研发了“GeoReasoner”软件系统,进行多尺度数据分析。基于 Visual C++开发平台,实现了拓扑和方向计算、尺度推理,基于 ArcEngine 平台实现了多尺度数据显示和管理功能。GeoReasoner 集成了6个模块来统一分析处理拓扑和方向关系,用于查询处理和一致性检测。同时,GeoReasoner 也定义了标准接口,用于和不同的客户端挂接。

用户只需输入2个尺度上要检测的数据集,系统会自动提供检测结果和报告,并提供交互式验证支持(图8)。基于自主开发的软件系统,采用

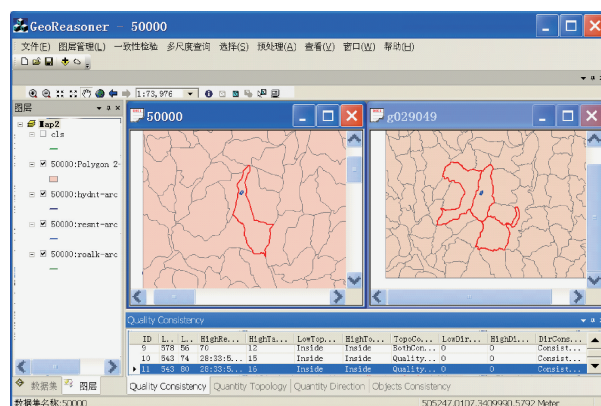


图8 系统界面

Fig. 8 System interface

1:10 000和1:50 000数据对道路网络、水系网络、面状网络和居民地进行多尺度匹配、多尺度数据一致性检测和查询实验(图9)。

图9(a)中,左图(详细数据)中居民地 a 位于湖泊 b 的东南方,右图(粗略数据)中居民地同样位于湖泊东南方。相同地理实体在2个尺度数据上,相对位置关系未变,因此是一致的。图9(b)中,详细尺度数据中居民地位于湖泊的西北和西方,而粗略尺度数据中居民地 a 位于湖泊 b 的西北,因此二者是不一致的。详细尺度上的两个居民地被合并为一个粗略尺度居民地,且湖泊形状发生了变化。由于不合理的合并操作,改变了对象间的相对位置。图9(c)中,详细和粗略尺度上居民地和道路均为分离关系(即 $LR1$),故它们是拓扑一致的。图9(d)

中,详细尺度数据(左图)中,箭头所指的道路和居民地为分离关系(即 $LR1$),而在粗略尺度数据中,道路进入了居民地,故它们是拓扑不一致的。

6 结论

本文结合制图综合算子,重点总结了形状化简、对象合并、属性归纳、空间维数退化等综合算子作用下的拓扑和方向关系尺度变化规律。不同制图综合算子对详细数据进行了不同的空间变换,从而产生了不同的几何形状,导致了不同的关系变化。详细而具体地研究不同综合算子对空间关系尺度变化的影响,对于分析和理解多尺度空间数据,具有重要意义。

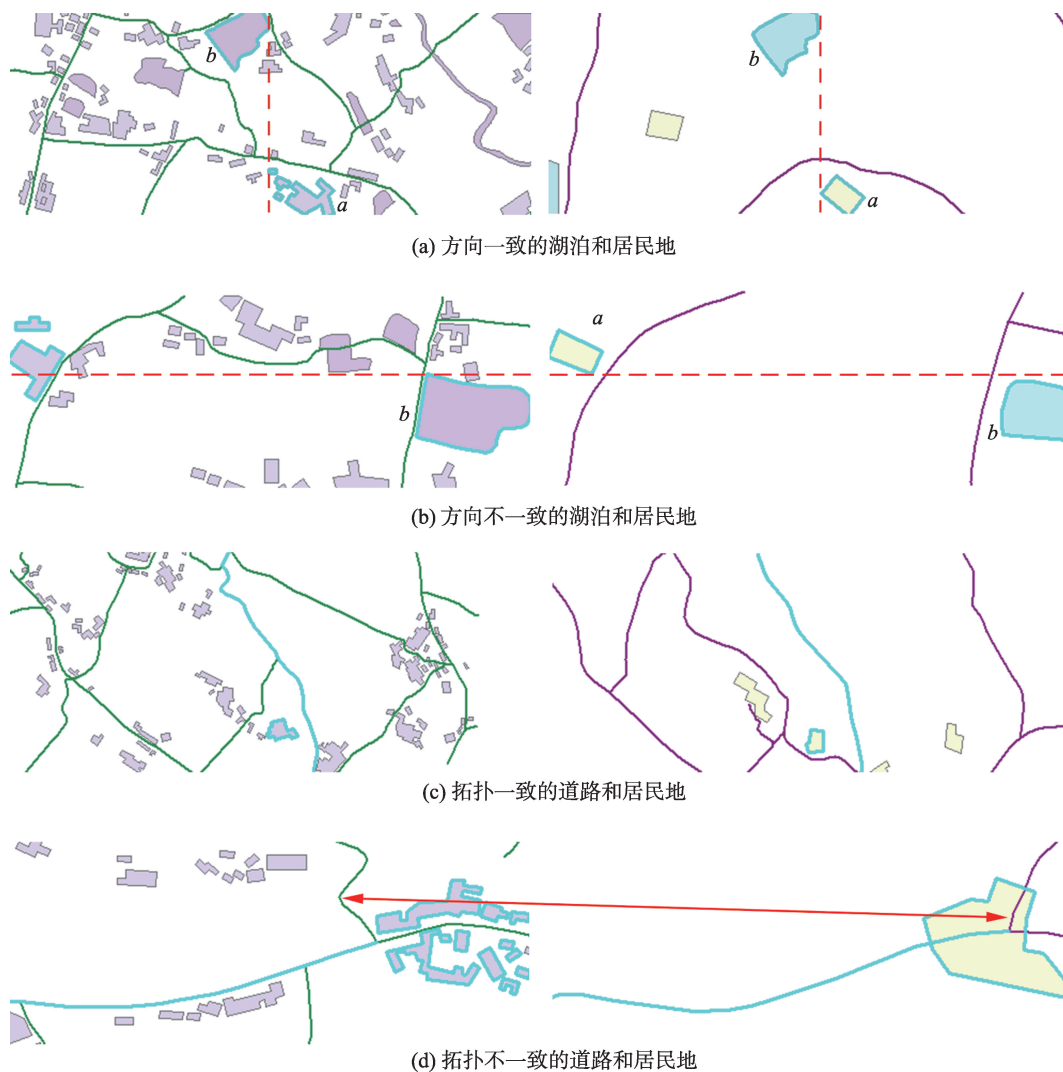


图9 不一致性检测实例

Fig. 9 The examples of inconsistent relations at two scales

虽然已有工作仅涉及4种经典综合算子引起的空间关系变化,但其原理和方法具有通用性,可为其他算子引起的拓扑变化建模所借鉴。未来研究的重点在于:(1)扩展其他制图综合算子引起的空间关系尺度变化规律;(2)制图综合是一系列综合算子按照一定次序执行的结果,现有工作分别研究了不同综合算子独立产生的影响,而未考虑多种算子组合对关系变化的影响,这应是后期研究的重点;(3)没有与空间数据结构或空间数据库的几何算法关联。未来有必要探索空间推理和几何算法的集成,以提高多尺度数据处理的效率。

多尺度方向一致性是对拓扑一致性的必要补充。通过考虑方向、拓扑和对对象有关的标准,可有效评价多尺度空间数据库的一致性,并用于维护多尺度空间数据库的完整性,集成多源空间数据,准确地处理多尺度空间数据查询。另一个问题是,方向关系矩阵对表达面对象的方向关系是有效的,但并不适合于处理线和点对象。因此,应发展适用于点和线数据的模型,用于评价面对象退化为线或点,或线化简为点时的方向一致性。

在大数据时代,数据类型众多、数据量大、结构化和非结构化数据并存,如何使已有的空间关系模型能自适应的处理空间尺度、要素类型等对关系的影响,高效管理和分析多尺度、多要素空间关系也是今后一个重要的研究方向。

参考文献:

- [1] Buttenfield B P. Object-oriented map generalization: modeling and cartographic considerations[C]. In: Muller J C, Lagrange J P, Weibel R (eds.). *Proceedings of GISDATA I: GIS and Generalization, Methodology and Practice*. London: Taylor & Francis, 1995:16-51.
- [2] Spaccapietra S, Vangenot C, Parent C, *et al.* MurMur: A research agenda on multiple representations[C]. *Proceedings of the International Symposium on Database Applications in Non-Traditional Environments*, Kyoto. IEEE CS Press, 1999,373-384.
- [3] 李霖,吴凡.空间数据多尺度表达模型及其可视化[M].北京:科学出版社,2003.
- [4] 王桥.地图信息的分形描述与自动制图综合[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,1998.
- [5] 齐清文,刘岳.GIS环境下面向地理特征的制图概括的理论和方法[J].*地理学报*,1998,53(4):303-313.
- [6] 艾廷华.城市地图数据库综合的支撑数据模型与方法的研究[D].武汉:武汉测绘科技大学,2000.
- [7] 武芳,钱海忠,邓红艳,等.面向地图自动综合的空间信息智能处理[M].北京:科学出版社,2008.
- [8] Stefanakis E. Representation of generalized map series using semi-structured data models[J]. *Cartography and GIS*, 2003,30(1):51-68.
- [9] Egenhofer M, Herring J. Categorizing binary topological relations between regions, lines and points in geographic databases[R]. Orono: Department of Surveying Engineering, University of Maine, 1991.
- [10] 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.
- [11] Goyal R. Similarity assessment for cardinal directions between extended spatial objects[D]. Orono: University of Maine, 2000.
- [12] Papadias D, Theodoridis Y. Spatial relation, minimum bounding rectangles, and spatial data structures[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997,11(2):111-138.
- [13] Egenhofer M, Franzosa R. On the equivalence of topological relations[J]. *International Journal of Geographic Information Systems*, 1994,8(6):133-152.
- [14] Skiadopoulos S, Koubarakis M. Composing cardinal direction relations[J]. *Artificial Intelligence*, 2004,152(2):143-171.
- [15] Egenhofer M, Clementini E, Di Felice P. Topological relations between regions with holes[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1994,8(2):129-144.
- [16] Yan H, Chu Y, Li Z, *et al.* A quantitative description model for direction relations based on direction groups[J]. *Geoinformatica*, 2006,10(2):177-196.
- [17] Yang S, Yong J H, Sun J G, *et al.* A cell-based algorithm for evaluating directional distances in GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(4):577-590.
- [18] Kang H K, Kim T W, Li K J. Topological consistency for collapse operation in multi-scale databases[M]. In: *Conceptual Modeling for Advanced Application Domains*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004:91-102.
- [19] Egenhofer M J, Al-Taha K K. Reasoning about gradual changes of topological relationships[M]. In: *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1992:196-219.
- [20] Tryfona N, Egenhofer M J. Consistency among parts and aggregates: A computational model[J]. *Transactions in GIS*, 1997,1(3):189-206.
- [21] Sorokine A, Bittner T, Renscher C. Ontological investigation of ecosystem hierarchies and formal theory for multi-

- scale ecosystem classifications[J]. *Geoinformatica*, 2006, 10(3):313-335.
- [22] Du S, Wang Q, Guo L. Modeling scale dependences of topological relations between lines and regions induced by reduction of attributes[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(11):1649-1686.
- [23] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 1973,10(2):112-122.
- [24] Cromley R G. Hierarchical methods of line simplification [J]. *Cartography and geographic information systems*, 1991,18(2):125-131.
- [25] Buttenfield B. Treatment of the cartographic line[J]. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 1985,22(2):1-26.
- [26] Clementini E, Di Felice P. A global framework for qualitative shape description[J]. *GeoInformatica*, 1997,1(1):11-27.
- [27] Du S. Analyzing topological changes for structural shape simplification[J]. *Journal of Visual Languages & Computing*, 2014,25(4):316-332.
- [28] Egenhofer M, Clementini E, Di Felice P. Evaluating inconsistencies among multiple representations[C]. In: Kraak J M, Molenaar M (eds.). *Sixth International Symposium on Spatial Data Handling*, 1994:901-920.
- [29] Du S, Guo L, Wang Q. Scale-explicit model for checking directional consistency in multi-resolution spatial data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(3):465-485.
- [30] Retz-Schmidt G. Various views on spatial prepositions[J]. *AI Magazine*, 1988,9(2):95-105.
- [31] Abdelmoty A I, Jones C B. Towards maintaining consistency of spatial databases[C]. In: Golshani F, Makki K (eds.). *Proceedings of the Sixth International Conference on Information and Knowledge Management*, 1997:293-300.

Research Progress in Multi-scale Spatial Relations

DU Shihong^{1*}, LUO Liqun^{1,2}, ZHAO Wenzhi¹ and GUO Zhou¹

(1. *Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China*; 2. *Unit 61243 of PLA, Urumqi 830006, China*)

Abstract: Modeling spatial relations and their scale changes has been one of the important topics in GIS science. This paper discussed the geometric-based and relational-based representation of geographic information. The first representation aims to store, manage, and analyze geometric data with coordinates, and concentrates on the geometric locations, shapes and distributions of spatial objects, thus it is termed as geometric representation. The latter uses symbols to qualitatively represent, communicate and infer spatial relationships between spatial objects based on people's cognition and understanding, thus it is termed as relational representation. This paper mainly focused on summarizing the latest progress in theories, methods and applications about the relational representation. First, the above-mentioned two representations were compared and their scale changes were highlighted. It is discovered that the geometric representations of same geographic entities vary at different spatial scales, so do the relational representations vary between geographic entities. This type of changes in relational representations strongly associates with cartographic generalization operators, which affects the changes of shapes, sizes and structures of spatial objects. Second, the influences of the generalization operators, which include shape simplification, merging of areal objects, attribute induction and spatial dimension reduction, on spatial relations were analyzed, and related methods were presented for deriving and modeling the scale changes of topological and directional relations which was caused by the four operators. Third, combined with multi-scale spatial relations, a technological framework for analyzing multi-scale datasets was presented. We also illustrated the concepts and solutions for detecting the consistency of multi-scale data, and tested them practically with case studies to demonstrate their efficiency. Finally, it can be concluded that the generalization operators and modeling methods play important roles in analyzing and understanding multi-scale spatial datasets.

Key words: topological relations; direction relations; map generalization; scale changes; relation consistency

*Corresponding author: DU Shihong, E-mail: dshgis@hotmail.com.