

# 空间对象拓扑关系研究综述

吴华意<sup>1</sup> 刘波<sup>1,2</sup> 李大军<sup>2</sup> 凌南燕<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

<sup>2</sup> 东华理工大学测绘工程学院, 江西 南昌, 330013

**摘要:**在分析已有空间对象拓扑关系研究的基础上,本文总结了确定性空间对象间拓扑关系和不确定性空间对象间拓扑关系的研究内容和研究方法,并探讨了目前空间对象拓扑关系的研究还存在的问题。

**关键词:**空间对象;拓扑关系;描述模型;地理信息系统

中图法分类号:P208

文献标志码:A

GIS 中空间关系主要包含方向关系、拓扑关系和度量关系,其中拓扑关系是最基本也是最重要的关系,在 GIS 空间推理与应用中占有重要的地位<sup>[1-2]</sup>。李德仁等<sup>[3]</sup>提出的 7 大地球空间信息方面的问题中,多个问题涉及了 GIS 空间关系的研究。国内外一些重要的 GIS 学术会议,如国际摄影测量与遥感学会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)大会、国际制图协会(International Cartographic Association, ICA)大会、空间信息理论国际学术会议(International Conference on Spatial Information Theory, COSIT)、中国地理信息产业协会(China Association for Geographic Information Service, CAGIS)年会等,都把空间关系作为重要的会议主题,权威的 GIS 学术期刊也纷纷刊登空间关系的相关研究成果<sup>[4-14]</sup>。

目前,关于空间对象拓扑关系的研究主要集中在两个方面:① 确定性空间对象(包括简单和复杂空间对象)拓扑关系研究。这方面的研究成果主要是在相关拓扑学基础上,提出或扩展拓扑关系描述模型,来描述确定性拓扑关系,如 GIS 软件中常用的 9-元组模型;② 不确定性空间对象间拓扑关系研究。这方面的研究成果主要是利用相关数学方法(如模糊数学、粗集理论和概率统计等),提出或扩展了确定性空间对象拓扑关系模型,来描述不确定性拓扑关系。

本文在整理和分析已有空间对象拓扑关系研

究的基础上,总结了确定性空间对象(包括简单和复杂空间对象)拓扑关系和不确定性空间对象拓扑关系的研究内容和研究方法,并探讨了目前空间对象拓扑关系研究还存在的问题。

## 1 确定性空间对象拓扑关系

### 1.1 N-交集模型

为了形式化描述空间对象之间的拓扑关系,Güting<sup>[15]</sup>把空间对象看成是一个点集。通过判断两个点集的交集取值,从而描述空间对象间相离或者相交的拓扑关系。更进一步地,考虑点集由边界点和内部点组成,两个点集的交集是边界点和边界点、边界点和内部点、内部点和内部点的交集的组合。这样,空间对象间拓扑关系就可以用这些组合来形式化描述,这种模型及其各种扩展,统称为 N-交集模型。

#### 1.1.1 4-元组模型

Egenhofer 等<sup>[16]</sup>将任意空间对象 A 由内部  $A^\circ$  和边界  $\partial A$  两个部分表达,通过判断空间对象 A、B 的内部和边界的交集关系,提出确定性空间对象间的拓扑关系  $2 \times 2$  矩阵,即 4-元组模型(4-intersection model, 4IM):

$$R_4(A, B) = \begin{bmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial B \\ \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap \partial B \end{bmatrix} \quad (1)$$

当交集的结果取值为空(0)或非空(1)时,4IM 能描述点、线和面对象间多种有意义的拓扑

收稿日期:2013-11-05

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41201395, 41371372);江西省教育厅科技资助项目(GJJ14479);江西省数字国土重点实验室开放基金资助项目(DLLJ201308)。

第一作者:吴华意,博士,教授,从事网络地理信息系统和地理信息服务的理论与方法研究。E-mail: wuhuayi@whu.edu.cn

关系。表1给出了4IM表达的面对象间8种有意义的空间拓扑关系。

由于4IM仅考虑了空间对象的内部和边界,

没有考虑外部点,线与线、线与面两类空间对象之间的拓扑关系在区分时会产生混淆,模型设计存在缺陷。

表1 4IM表达的8种空间拓扑关系

Tab.1 Eight Spatial Topological Relations in 4IM

|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ |
| 相离<br>disjoint                                 | 包含<br>contain                                  | 被包含<br>inside                                  | 相邻<br>meet                                     | 相等<br>equal                                    | 覆盖<br>cover                                    | 被覆盖<br>covered-by                              | 交叠<br>overlap                                  |

### 1.1.2 9-元组模型

针对4IM设计上的缺陷,Egenhofer等<sup>[17]</sup>进一步将空间对象A用内部 $A^{\circ}$ 、边界 $\partial A$ 和外部 $A^{-}$ 3个部分表达,构成了9-元组模型(9-intersection model,9IM),如式(2)所示:

$$R_9(A, B) = \begin{bmatrix} A^{\circ} \cap B^{\circ} & A^{\circ} \cap \partial B & A^{\circ} \cap B^{-} \\ \partial A \cap B^{\circ} & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^{-} \\ A^{-} \cap B^{\circ} & A^{-} \cap \partial B & A^{-} \cap B^{-} \end{bmatrix} \quad (2)$$

当交集结果取值为空(0)或非空(1)时,9IM不仅解决了4IM在线/线、线/面两类关系区分上易导致混淆的问题;相比于4IM,9IM能够区分更多的拓扑关系类型。

但是,9IM所得到的拓扑关系部分相互排斥,仅仅在一定的分类层次上是完备的,同时引入外部点集后,相比4IM,模型的计算难度增大。

### 1.1.3 4-交差模型

针对9IM设计上的缺陷,邓敏等<sup>[22]</sup>通过判断两个空间对象A与B的 $(A^{\circ} \cap B^{\circ})$ 、 $(\partial A \cap \partial B)$ 、 $(A^{-} \cap B^{-})$ 以及 $(A^{-} \cap B^{\circ})$ 之间的相互运算,提出了新的4-元组模型,即4-交差模型(4-intersection-difference model,4IDM),如式(3)所示:

$$R_4(A, B) = \begin{bmatrix} A^{\circ} \cap B^{\circ} & A^{-} \cap B^{\circ} \\ B^{-} \cap A^{\circ} & \partial A \cap \partial B \end{bmatrix} \quad (3)$$

当交集结果取值为空(0)或非空(1)时,4IDM的拓扑关系区分能力与4IM、9IM一致,也能得到表1中8种有意义的拓扑关系。同时,4IDM不用考虑目标的外部,计算过程中只有4个元素,能提高模型的计算效率。

### 1.1.4 其他扩展N交集模型

针对9IM关于线/面间拓扑关系描述存在的缺陷,Clementini等<sup>[18]</sup>引入维数(Dimension)的概念,定义 $\text{Dim}(\partial A) = 1$ 、 $\text{Dim}(A^{\circ}) = 2$ 、 $\text{Dim}(\partial L) = 0$ 、 $\text{Dim}(L^{\circ}) = 1$ (其中A表示面对象,L表示线对象),进而扩展4IM和9IM,得到相应的DE-4IM和DE-9IM,如式(4)和式(5)所示,提高了模型的拓扑关系判断能力。

$$R_{DE4}(A, B) =$$

$$\begin{bmatrix} \text{Dim}(A^{\circ} \cap B^{\circ}) & \text{Dim}(A^{\circ} \cap \partial B) \\ \text{Dim}(\partial A \cap B^{\circ}) & \text{Dim}(\partial A \cap \partial B) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_{DE9}(A, B) =$$

$$\begin{bmatrix} \text{Dim}(A^{\circ} \cap B^{\circ}) & \text{Dim}(A^{\circ} \cap \partial B) & \text{Dim}(A^{\circ} \cap B^{-}) \\ \text{Dim}(\partial A \cap B^{\circ}) & \text{Dim}(\partial A \cap \partial B) & \text{Dim}(\partial A \cap B^{-}) \\ \text{Dim}(A^{-} \cap B^{\circ}) & \text{Dim}(A^{-} \cap \partial B) & \text{Dim}(A^{-} \cap B^{-}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

无论是9IM或DE-9IM,将空间对象的外部纳入模型中,相比4IM,增加了计算难度,不利于空间操作的实现;而且,对象外部的引入,使目标内部、边界和外部形成线性关系,限制了其拓扑关系的识别能力。考虑到这些不利因素,李成名等<sup>[20]</sup>提出用空间实体的势力范围( $A^V$ )代替原9IM中空间对象的外部,而陈军等<sup>[21]</sup>提出用Voronoi多边形取代原9IM中空间对象的外部,分别构成新的拓扑关系描述模型,简称为NIV模型和V9I模型,其中V9I模型如式(6)所示:

$$R_v(A, B) = \begin{bmatrix} A^{\circ} \cap B^{\circ} & A^{\circ} \cap \partial B & A^{\circ} \cap B^V \\ \partial A \cap B^{\circ} & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^V \\ A^V \cap B^{\circ} & A^V \cap \partial B & A^V \cap B^V \end{bmatrix} \quad (6)$$

V9I模型在区分地理空间中邻近关系和相离关系时具有一定的优势,且空间对象Voronoi范围相对于目标外部来说,容易操作和实现。但是,邓敏等<sup>[22]</sup>认为,V9I模型并不是一种真正的拓扑关系形式化模型,因为Voronoi图是通过距离变换建立的。

以上拓扑关系模型都能描述简单对象间拓扑关系,但是,描述带空洞或岛屿的复杂空间对象间拓扑关系能力有限。关于复杂拓扑关系的研究,是近年来空间拓扑关系研究的重点。Egenhofer等<sup>[19]</sup>基于9IM并借助简单推理方法探讨了带有孔的面对象间拓扑关系描述,但对带孔的面对象的定义存在不足,在对带孔的面对象分解后,改变了其拓扑性质。邓敏等<sup>[23]</sup>针对这一问题,对带孔的面对象的定义进行扩展,并在该定义基础上层

次地分析和区分简单对象和带一个孔对象间拓扑关系,但没有对两个各带一孔的面对象拓扑关系进行讨论;刘波等<sup>[24,26]</sup>在文献[23]的基础上,提出 4-4IDM 及适合 N 交模型的方法来描述带一孔的面对象间拓扑关系,并通过试验验证了该方法正确性和可行性。虽然文献[19,23-24,26]中的模型解决了部分复杂拓扑关系,但模型本身设计目的是描述凸面对象,而对凹面或带多个洞的面对象间复杂拓扑关系无能为力。针对这些问题,欧阳继红等<sup>[25]</sup>将 9IM 中的元素扩展为二进制编码,得到 D9-交集模型来描述复杂空间对象拓扑关系;李健等<sup>[27-29]</sup>扩展 4IM,得到新的 6-交集、8-交集和 16-交集模型,得到凹形区域和简单区域间拓扑关系图,并给出其概念邻域图。这些 6-交集、8-交集和 16-交集等模型虽然具有一定的区分度,但模型设计越来越复杂,给模型计算及适用性带来一定的难度。

### 1.2 RCC 模型

Randell 等<sup>[11-13]</sup>运用区域连接演算 (region

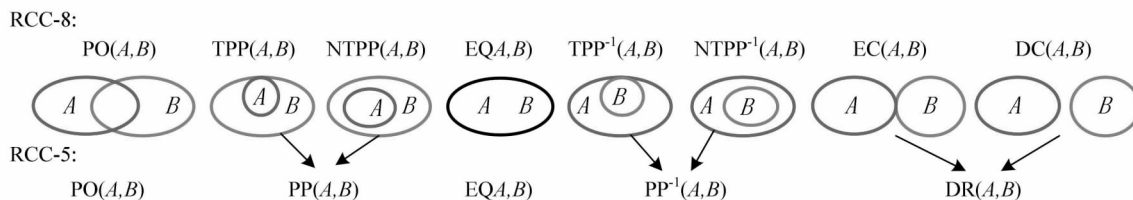


图 1 空间对象间的 RCC-8 和 RCC-5 关系

Fig. 1 RCC-8 and RCC-5 Relations Between Regions

为了增加 RCC 模型的描述能力,Cohn 等<sup>[14]</sup>以空间对象的“凸壳”为基本研究对象,得到 RCC-23 和 RCC-15。

由于 RCC 模型仅仅适合于描述空间面对象间的拓扑关系,而不能描述空间点、线目标间的关系,给该模型的应用推广带来了一定的限制。

### 1.3 其他模型

另外一些学者还从其他角度提出一些模型,如空间代数模型和 2D-String 模型。

李志林等<sup>[30]</sup>提出的空间代数模型,它是利用多个空间代数算子,如交、并、差和反差等,构建一个数学函数来表达空间对象拓扑关系。该模型相比于 N-交集模型和 RCC 模型,在区分能力上得到提高,能区分更多的拓扑情形。进一步地,李志林等<sup>[31]</sup>在其提出的空间代数模型基础上,纳入空间目标的 Voronoi,建立了基于 Voronoi 的空间代数模型。该模型比原始的空间代数模型能区分出更多的空间邻近关系。

Chang 等<sup>[32]</sup>提出将空间对象分别投影到 X

connection calculus,RCC)理论来表达空间区域 A 与 B 的拓扑特性和拓扑关系,得到描述空间面对象的 RCC 模型。其中,最有代表性的是 RCC-8 和 RCC-5 关系集。RCC-8 由以下 8 种拓扑关系组成:不连接(DC(A,B),A is disconnected from B)、外部连接(EC(A,B),A is externally connected to B)、部分交叠(PO(A,B),A partially overlaps B)、正切真部分(TPP(A,B),A is a tangential proper part of B)、非正切真部分(NTPP(A,B),A is a non-tangential proper part of B)、相等(EQ(A,B),A is identical with B)、反正切真部分(TPP<sup>-1</sup>(A,B))和反非正切真部分(NTPP<sup>-1</sup>(A,B));而 RCC-5 未考虑区域的边界,把 RCC-8 中的 DC(A,B)与 EC(A,B)合并为分离(DR(A,B),A is discrete from B),TPP(A,B)和 NTPP(A,B)合并为真部分(PP(A,B),A is a proper part of B),TPP<sup>-1</sup>(A,B)和 NTPP<sup>-1</sup>(A,B)合并为反真部分(PP<sup>-1</sup>(A,B)),具体图形关系如图 1 所示。

轴和 Y 轴上,形成一种基于符号投影的拓扑关系模型——二维字符串(2D-String)模型。该模型在表达方向关系方面较为有效,而表达拓扑关系则要复杂和困难<sup>[3]</sup>。同时该模型是利用一维的方法解决二维的问题,模型的可靠性、完备性和扩展性有待改进。

## 2 不确定性空间对象拓扑关系

受空间数据采集精度、空间对象表达等因素影响,空间对象的边界具有不确定性,而边界的不确定会影响拓扑关系判断的结果<sup>[33-34]</sup>,从而影响不确定性空间推理。关于不确定性空间对象拓扑关系的研究,学者们主要是利用相关数学方法(如模糊数学、粗集理论和概率统计等),在确定性空间对象拓扑关系研究基础上,提出或扩展了相关模型来描述不确定性拓扑关系。

1) 扩展 RCC 模型,描述不确定性空间对象拓扑关系

最具代表性的是 Cohn 等在 RCC 模型基础上提出的“蛋-黄”模型<sup>[35]</sup>,如图 2 所示。“黄”对应确定部分,“蛋白”对应不确定部分,“蛋”对应区域的整体。该模型满足 RCC 模型中的相关定理,并且要求“黄”是“蛋”的“真部分”。对 RCC 模型扩展后,基于“蛋-黄”模型的两个不确定性空间对象间有 46 种拓扑关系。“蛋-黄”模型主要是对 RCC 模型进行转化,使之在一定约束条件下处理不确定性空间对象间拓扑关系,这种方法实际上仍然是一种确定性的描述,方法上缺少模糊性,不能充分反映空间对象的模糊性。在“蛋-黄”模型的基础上,周涛等<sup>[36]</sup>通过改进“蛋-黄”模型中 46 种拓扑关系的内部逻辑,得到了该模型邻近拓扑关系间的动态变化图和拓扑关系示意图。杜晓初等<sup>[37]</sup>提出一种定量化的方法对“蛋-黄”模型中的 46 种拓扑关系进行抽象扩展,利用不确定性对象内部和宽边界的交集面积,来表征这些交集的相交程度,通过空间关系向量与参考空间关系向量的相关程度,确定拓扑关系的类别,并运用这种方法,将这 46 种拓扑关系抽象为最基本的 6 种拓扑关系。以上基于 RCC 模型的扩展,从不同侧面展开,虽然得到了不确定性空间对象间一些有意义的拓扑关系,但没有分析各种拓扑关系间的概念邻域图,不确定性空间推理能力受到限制。

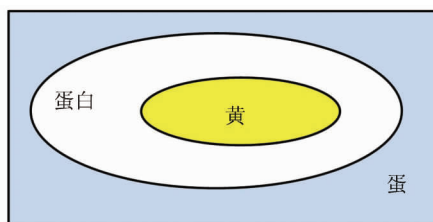


图 2 模糊目标的“蛋-黄”模型  
Fig. 2 ‘Egg-Yolk’ of Fuzzy Object

## 2) 利用模糊数学描述不确定性拓扑关系

此类研究方法将不确定性空间对象建模为模糊集,基于截集和确定性拓扑关系研究中  $N$  交集模型来判断不确定性空间对象间的拓扑关系。Zhan<sup>[39-40]</sup>引入模糊数学中截集的概念,通过判断一对不确定性空间对象对于关系  $R$  的隶属程度,来确定不确定性对象间拓扑关系。Ai<sup>[41]</sup>基于 9IM,将宽边界与其他元素交集的取值由经典数学中  $\{0,1\}$  扩展到模糊数学中  $[0,1]$ ,从而得到各种相交关系的模糊描述。Schneider<sup>[42]</sup>利用离散模糊空间对象的隶属函数,扩展 9IM 从而计算两个不确定性空间对象间不同拓扑关系的隶属程度。刘文宝等<sup>[43]</sup>、邓敏等<sup>[44]</sup>采用模糊数学的方

法,建立了模糊空间对象的形态描述模式,基于确定空间对象拓扑关系模型来分析不确定性空间对象间的拓扑关系。戴洪磊等<sup>[45]</sup>基于模糊几何原理,通过隶属函数的建立,首次将矢量 GIS 中几何数据的位置不确定性与目标间拓扑关系的判定结合起来,详细地分析了确定性和不确定性的 GIS 目标间拓扑关系的判断。利用模糊数学建立的不确定性拓扑关系模型中,不确定性空间对象的定义,受模糊数学中“截集  $\lambda$ ”取值的影响较大,不同的取值会得到不同的拓扑关系结果,并且模型没有给出不确定性拓扑关系间的概念邻域图,不确定性空间推理能力有限。

## 3) 利用粗集理论描述不确定性拓扑关系

这类模型的基本思想是:利用粗集理论中“上、下近似集”来建模不确定性空间对象,扩展确定性拓扑关系研究中  $N$  交集模型来判断不确定性空间对象间拓扑关系。杜世宏等<sup>[48]</sup>利用粗集和模糊数学构建了扩展 9 交模型,但由于对象间拓扑关系空间模糊划分所形成的外部模糊集仍然是无限大,与原 9IM 一样无法描述空间关系中的相邻等概念。李大军等<sup>[50-51]</sup>利用粗集理论,在 4IDM 的基础上,提出适合于描述确定和不确定对象,以及两个不确定性对象间拓扑空间关系的扩展模型(4-4ID 模型),并且详细讨论不确定性对象之间的拓扑关系。廖伟华<sup>[52]</sup>利用粗集探讨了模糊对象间的拓扑关系,并推理得到若干拓扑关系。粗集中上、下近似取值,决定了不确定性空间对象边界的带宽,从而相应得到不同的拓扑关系结果。同样,此类模型也没有给出不确定性拓扑关系间的概念邻域图,不确定性空间推理能力有限。

## 4) 利用其他方法描述不确定性拓扑关系

另外,也有一些学者利用概率论、灰度集等数学方法对不确定性空间对象拓扑关系展开研究,如 Winter<sup>[49]</sup>用概率论方法研究了不确定区域(位置不确定的面对象)间的拓扑关系处理。Liu 等<sup>[53-54]</sup>在 9-元组模型基础上探讨了模糊对象拓扑关系定量表述方法。Tang 等<sup>[55]</sup>扩展了 9 元组、16 元组、25 元组定量描述模型来判断模糊拓扑关系,并用计算机实现并验证了相关模型。Clementini 等<sup>[38]</sup>从代数的角度定义了模糊目标的内部、边界和外部,基于 9IM 得到 44 种不同的拓扑关系。包磊等<sup>[56]</sup>利用灰度集来判断模糊拓扑关系定量描述,将不确定性空间对象间拓扑关系的不确定性量化为一个可信度区间。

可以看出,虽然这些学者用不同的数学方法、

从不同的侧面来对不确定性拓扑关系的问题进行探讨,并取得了一定的成就,但对于不确定性对象拓扑关系的研究仍然很简单,而且实用性不够。

### 3 存在的问题

空间对象拓扑关系的研究成果丰富,但各种模型的优缺点也比较突出,特别是现有研究成果对复杂空间拓扑关系和不确定性空间拓扑关系的描述能力有限,应用型不强。因此,关于空间拓扑关系的研究还需要进一步深入开展。

#### 1) 复杂空间拓扑关系的研究

确定性空间拓扑关系的研究主要集中在简单对象(如单点、简单线和简单凸面)间拓扑关系描述和推理问题,但现实世界复杂性、多样性客观存在,如存在一个对象由多个部分组成、面带洞、凹面之间的拓扑关系等情况。因此,当前的这些拓扑关系模型是不完备的,不足以表达复杂空间对象拓扑关系,也无法达到应用的要求。例如,目前的研究成果尚不能有效表达如图 3(a)、3(b)所示的线/线,以及图 3(c)、3(d)所示的线/面关系。

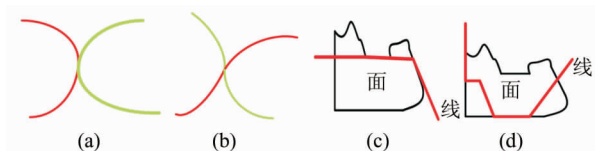


图 3 线/线,线/面不同的复杂空间拓扑关系  
Fig. 3 Complex Spatial Topological Relations  
Between Line/line, Line/area

复杂空间拓扑关系的研究应从以下几个方面着手:① 复杂拓扑关系的描述方法研究急需加强探讨;② 关于线、面之间复杂拓扑关系的计算尚缺乏有效的方法,对这方面的研究也尚需加强;③ 目前的 GIS 平台或应用系统尚无法较好地实现复杂拓扑关系的高级分析,大多数商业软件如 ArcGIS 也只能实现简单空间拓扑关系的查询与分析,复杂拓扑关系在 GIS 的行业应用系统中需要跟进。

#### 2) 不确定性空间对象拓扑关系的研究

关于不确定性空间对象的拓扑关系的研究,虽然已经取得了一些成绩,但仍存在不少问题,具体表现在:① 现有的研究思路和方法主要集中在模型的探讨方面,较少研究不同尺度下不确定性空间对象定义的合理性。而同一尺度下,同一个不确定性空间对象,不同的定义必定造成不确定性对象不同的带宽、也就必定会影响拓扑关系判

断结果;② 关于不确定性空间对象间拓扑关系的描述与计算目前尚缺乏有效的方法;③ 缺少对不确定性拓扑关系应用适宜性方面的研究。虽然已有研究中,各种数学方法,如模糊数学、灰度集、粗集等方法应用到不确定性拓扑关系的描述上,但探讨其应用适宜性的研究相对较少。不同尺度下的不同领域,其应用应有所区别。

综上所述,如何从地理现象出发,采用有效的、简单的方法,解决复杂空间对象、不确定性空间对象拓扑关系表达问题并设计出易实现、易操作的计算方法,使空间拓扑关系表达模型更好地在实际中加以应用,既是一个理论问题,也是促进 GIS 在更多领域发挥作用、推动 GIS 产业的发展的应用问题。

### 参 考 文 献

- [1] Zhan F B. Approximate Analysis of Binary Topological Relations Between Geographic Regions with Indeterminate Boundaries [J]. *Soft Computing*, 1998, 2(2):28-34
- [2] Chen Jun, Zhao Renliang. Spatial Relations in GIS: A Survey on Its Key Issues and Research Progress [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(2): 95-102(陈军,赵仁亮. GIS 空间关系的基本问题与研究进展[J]. *测绘学报*, 1999, 28(2): 95-102)
- [3] Li Deren, Guan Zequan. Integration and Implementation of Space Information System[M]. Wu Han: Wuhan University Press, 2002(李德仁,关泽群. 空间信息系统的集成与实现[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002)
- [4] Cohn A G, Hazarik AS. Qualitative Spatial Representation and Reasoning: An Overview[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2001, 46(1-2):1-29
- [5] Frank A U. Qualitative Spatial Reasoning: Cardinal Directions as an Example[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1996, 10(3):269-290
- [6] Clementini E, Di Felice P. An Algebraic Model for Spatial Objects with Indeterminate Boundaries[C]. In: Burrough PA, Frank AU, eds. *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*, London: Taylor & Francis, 1996: 155-169
- [7] Clementini E, Di Felice P, Van Oosterom P. A Small set of Formal Topological Relationships Suitable for End-user Interaction[M]//Abel D, Ooi BC, eds. *Advances in Spatial Databases, the 3rd International Symposium, SSD'93, LNCS 692*, Berlin: Springer-Verlag, 1993: 277-295

- [8] Egenhofer M J, Franzosa R. Point-Set Topological Spatial Relations[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(2):161-174
- [9] Egenhofer M J, Mark D M. Modeling Conceptual Neighborhoods of Topological Line-region Relations [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(5):555-565
- [10] Mark D M, Egenhofer M J. Modeling Spatial Relations Between Lines and Regions: Combining Formal mathematical Models and human subjects testing[J]. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1994, 21(4):195-212
- [11] Randell D A, Cui Z, Cohn A G. A Spatial Logic Based on Regions and Connection[M]//Nebel B, Rich C, Swartout WR, eds. Proceedings of the 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1992: 165-176
- [12] Randell D A, Cohn A G. Modelling Topological and Metrical Properties in Physical Processes [M]//Brachman R, Levesque H, Reiter R, eds. Proceedings of the 1st International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1989: 55-66
- [13] Cohn A G. A Hierarchical Representation of Qualitative Shape Based on Connection and Convexity [M]//Frank AU, Kuhn W, eds. Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS, LNCS 988, Berlin: Springer-Verlag, 1995: 311-326
- [14] Cohn A G, Bennett B, Gooday J, Gotts N M. Qualitative Spatial Representation and Reasoning with the Region Connection Calculus[J]. *GeoInformatica*, 1997, 1(1):1-44
- [15] Güting R H. Geo-Relational Algebra: A Model and Query Language for Geometric Database Systems [M]//Goos G, Hartmanis J, eds. Advances in Database Technology, EDBT'98. LNCS 303, Berlin: Springer-Verlag, 1988: 506-527
- [16] Egenhofer M, Franzosa R. Point-set Topological Spatial Relations[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(2):161-174
- [17] Egenhofer M, Herring J. Categorizing Binary Topological Relationships Between Regions, Lines, Points in Geographic Databases[R]. Department of Surveying Engineering, University of Maine, Oronoi, ME, 1991
- [18] Chementini, Di Felice D P. A Small Set of Formal Topological Relationships Suitable for End-user Interaction [J]. *Advances in Spatial Databases*, 1993: 177-295
- [19] Egenhofer M J, Clementini E, Di Felice P. Topological Relations Between Regions with Holes[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1994, 8(2):129-144
- [20] Li Chengming, Chen Jun. The Nine-intersection Model for Describing Spatial Relation[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1997, 22(3):207-211(李成名,陈军. 空间关系描述的9-交模型[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1997, 22(3):207-211)
- [21] Chen Jun, Li Chengming, 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
- [22] Deng Min, Liu Wenbao, Feng Xuezhi. Generic Model of Topological Relations Between Spatial Regions in GIS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(1):85-90(邓敏,刘文宝,冯学智. GIS 面目标间拓扑关系的形式化模型[J]. *测绘学报*, 2005, 34(1):85-90)
- [23] Deng Ming, Li Zhilin, Li Guangqiang. A Hierarchical Approach to Topological Relations Between a Simple Area and an Area with Holes[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 330-337(邓敏,李志林,李光强. 简单面目标与带孔洞面目标间拓扑关系的层次表达方法[J]. *测绘学报*, 2008, 37(3): 330-337)
- [24] Liu Bo, Li Dajun, Zou Shilin, et al. Combinational Reasoning of Topological Relations Between Regions with Holes [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(2): 262-267(刘波,李大军,邹时林,等. 带孔洞面域间的拓扑关系的组合推理[J],*测绘学报*,2011, 40(2): 262-267)
- [25] Ouyang Jihong, Huo Linlin, Liu Dayou, et al. Extended 9-intersection Model for Description of Topological Relations Between Regions with holes[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2009, 39(6):1 595-1 600(欧阳继红,霍林林,刘大有,等. 能表达带洞区域拓扑关系的扩展 9-交集模型[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2009, 39(6):1 595-1 600)
- [26] Liu Bo, Li Dajun, Ruan Jian, et al. Formal Description of Regions with Hole's Topological Relations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1):68-71(刘波,李大军,阮见,等. 带空洞面对象间拓扑关系的形式化描述[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2009, 34(1):68-71)
- [27] Li Jian, Ouyang Jihong, Wang Guowei, et al. Rep-

- resentation for Topological Relations Between a Region with a Hole and a Simple Region[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2012, 50(6):1 209-1 213(李健, 欧阳继红, 王国伟, 等. 一个带单洞区域和一个简单区域间的拓扑关系表示[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2012, 50(6):1 209-1 213)
- [28] Li Jian, Ouyang Jihong, Wang Zhenxin. Topological Relations Between a Region with Two Holes and a Simple Region[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(5):1 214-1 218(李健, 欧阳继红, 王振鑫. 带双洞区域与简单区域间的拓扑关系[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2012, 42(5):1 214-1 218)
- [29] Li Jian, Ouyang Jihong, Chen Gang, et al. Representation of Topological Relations Between a Hollow Region and a Simple Region[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(2):386-390(李健, 欧阳继红, 陈岗, 等. 一个凹形区域和一个简单区域间拓扑关系的表示[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(2):386-390)
- [30] Li Zhilin, Zhao Renliang, Chen Jun. An Algebra for Spatial Relations[C]. *Geoinformatics & DM-GIS'2001*, Bangkok, 2001
- [31] Li Zhilin, Zhao Renliang, Chen Jun. A Voronoi-Based Spatial algebra for Spatial Relations[J]. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(7):528-536
- [32] Chang S K, Shi Q Y, Yan C W. Iconic Indexing by 2-D String[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intelligence*, 1987(9):413-428
- [33] Frank A U. Qualitative Topological Relations and Indeterminate Boundaries [M]//Burrough P A, Frank A U, eds. *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*, London: Taylor & Francis, 1996: 153-154
- [34] Schneider M. Uncertainty Management for Spatial Data in Databases: Fuzzy Spatial Data Types[M]//Goos G, Hartmanis J, Leeuwen, J V, eds. *Advances in Spatial Databases, the 6th International Symposium, SSD'99, LNCS 1651*, Berlin: Springer-Verlag, 1999: 330-351
- [35] Cohn A G, Gotts N M. The 'Egg-Yolk' Representation of Regions with Indeterminate Boundaries [M]//Burrough P A, Frank A U, eds. *Proceedings of GIS Data-Specialist Meeting on Special Objects with Indeterminate Boundaries*, London: Taylor & Francis, 1996: 171-187
- [36] Zhou Tao, Lu Huiling, Yang Deren, et al. Popularized "egg-folk" Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2):342-346(周涛, 陆惠玲, 杨德仁, 等. "蛋黄"模型的拓展研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(2):342-346)
- [37] Du Xiaochu, Guo Qingsheng, Ding Hong. Quantitative Analysis and Abstraction of Topological Relation Between Regions with Broad Boundaries[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(11):1 021-1 024(杜晓初, 郭庆胜, 丁虹. 宽边界空间对象拓扑关系量化分析与抽象[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2004, 29(11):1 021-1 024)
- [38] Clementini E, di Felice P. Approximate Topological Relations[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1997, 16(2):173-204
- [39] Zhan F B. Topological Relations Between Fuzzy Regions[M]//Bryant B, Carroll J, Oppenheim D, Hightower J, George KM, eds. *Proceedings of the 1997 ACM Symposium on Applied Computing*, New York: ACM Press, 1997: 192-196
- [40] Zhan F B. A Fuzzy Set Model of Approximate Linguistic Terms in Descriptions of Binary Topological Relations Between Simple Regions [M]//Matsakis P, Sztandera LM, eds. *Applying Soft Computing in Defining Spatial Relations*, Heidelberg: Physica-Verlag, 2001: 179-202
- [41] Ai Tinghua. A Topological Relation Description for Spatial Objects with Uncertainty Boundaries[M]//Li Deren, Gong Jianya, Chen Xiaoling, eds. *Spatial Information Science, Technology and Its Applications*, Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1998: 394-398
- [42] Schneider M. Finite Resolution Crisp and Fuzzy Spatial Objects [M]//Forer P, Yeh AGO, He J, eds. *Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Data Handling*, Beijing: International Geographical Union, 2000: 3-17
- [43] Liu Wenbao, Deng Min. Analyzing Spatial Uncertainty of Geographical Region in GIS[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1):45-49(刘文宝, 邓敏. GIS 图上地理空间对象不确定性的分析[J]. *遥感学报*, 2002, 6(1):45-49)
- [44] Deng Min, Li Chengming, Lin Zongjian. On Formalization Methods of Describing Fuzzy Region in GIS [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2002, 27(1):39-41(邓敏, 李成名, 林宗坚. GIS 中模糊空间对象的形式化描述方法探讨[J]. *测绘科学*, 2002, 27(1):39-41)
- [45] Dai Honglei, Chen Lansan, Xu Panlin et al. Application of Positional Uncertainty in Spatial Objects' Topological Relationship[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2004, 5(5):94-97(戴洪磊, 陈兰森, 徐泮林, 等. 矢量 GIS 中位置不

- 确定性在目标间的拓扑关系判定中的应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(5):94-97
- [46] Bittner T, Stell J. Rough Sets in Approximate Spatial Reasoning[M]//Ziarko W, Yao Y, eds. Rough Sets and Current Trends in Computing, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001: 445-453
- [47] Li Boquan, He Wei. Fuzzy RCC8 Topological Relations[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2011, 25(6): 44-52(李伯权, 贺伟. 模糊 RCC8 拓扑关系[J]. 模糊系统与数学, 2011, 25(6):44-52)
- [48] Du Shihong, Wang Qiao, Li Shun et al. The Research of Rough Expression of Fuzzy Objects and Their Spatial Relations [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1):1-8(杜世宏, 王桥, 李顺, 等. 模糊对象粗糙表达及其空间关系研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(1):1-8)
- [49] Winter S. Uncertain Topological Relations Between imprecise Regions[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(5):411-430
- [50] Li Dajun, Liu Bo, Liu Xuejun, et al. Description of Topological Relation with in Fuzzy Region in GIS [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2006, 26(4):518-520(李大军, 刘波, 刘学军, 等. GIS 中模糊区域拓扑关系形式化描述[J]. 桂林工学院学报, 2006, 26(4):518-520)
- [51] Li Dajun, Liu Bo, Cheng Penggen, et al. Description of Topological Relation for Fuzzy Spatial Objects Based on Rough Set[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(1): 72-77(李大军, 刘波, 程朋根等. 空间对象间拓扑关系 Rough 描述[J]. 测绘学报, 2007, 36(1):72-77)
- [52] Liao Weihua. Study on Development of Topological Relations Among Area Objects Based on Variable Precision Rough Set in GIS[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2010, 12(6):806-809(廖伟华. 变精度粗糙集下的 GIS 面目标拓扑关系扩展研究[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(6):806-809)
- [53] Liu Kimfung, Shi Wenzhong. Quantitative Fuzzy Topological Relations of Spatial Objects by Induced Fuzzy Topology[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, (11):38-45
- [54] Liu Kimfung, Shi Wenzhong, Zhang Hua. A Fuzzy Topology-Based Maximum Likelihood Classification [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, (66):103-114
- [55] Tang Xinming, Wolfgag K, Wang Hongyan. Topological Relations Between Fuzzy Regions in a Fuzzy Topological Space[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, (12S):s151-s165
- [56] Bao Lei, Luo Bing, Qin Xiaolin. A Grey Set Based Quantitative Analysis Model for Indeterminate Topological Relations Between Uncertain Spatial Regions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(6):731-733(包磊, 罗兵, 秦小麟. 利用灰集进行空间区域拓扑关系不确定性定量分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(6):731-733)

## Topological Relations of Spatial Objects: A Review

WU Huayi<sup>1</sup> LIU Bo<sup>1,2</sup> LI Dajun<sup>2</sup> LING Nanyan<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Faculty of Geomatics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China

**Abstract:** Based on analysis of previous studies of topological relations between spatial objects, this paper reviews the research contents and methods for describing relations between certain spatial objects, and for topological relations between uncertain spatial objects. Potential research problems in topological relations between spatial objects are discussed.

**Key words:** spatial object; topological relation; description model; GIS

**First author:** WU Huayi, PhD, professor, specializes in Web GIS and geospatial information service. E-mail: wuhuayi@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41201395, 41371372; the Science and Technology Project of Jiangxi Provincial Education Department, No. GJJ14479; the Open Foundation of Digital Land Key Lab of Jiangxi Province, No. DLLJ201308.