

多粒度的 GIS 数据不确定性粗集表达

邓 敏^{1,2}, 李志林¹, 程 涛³

(1. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港 九龙; 2. 中南大学 测绘与国土信息工程系, 湖南 长沙 410083; 3. 中山大学 地理与规划学院, 广东 广州 510275)

Rough Set Representation of GIS Data Uncertainties with Multiple Granularities

DENG Min^{1,2}, LI Zhi-lin¹, CHENG Tao³

(1. Department of Land Surveying and Geoinformatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. Department of Surveying and Geoinformatics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Geography and Urban Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Rough set is a novel mathematical tool for dealing with uncertainties and imprecision of geographic information, which can be used to represent uncertainties in multi-levels spatial knowledge. Based upon the fundamental concepts in rough set theory, this paper proposes rough set models to represent the uncertainties in position, attribute and topological relation of spatial objects. The changes of these uncertainties with the observation granularity are also investigated and represented by the rough set approach. It suggests that rough set is a very promising tool to integrate the representation of the uncertainties in measurement, classification and spatial relationships, and their changes with the observation granularity.

Key words: spatial object; granularity; uncertainty; rough set; spatial relations

摘 要: 粗集是一种处理地理信息不确定性和不精确性的新型数学工具,在揭示和表达多层次(或粒度)的空间知识方面具有较大优势。为此,从空间信息观测或表达的粒度角度来探讨空间数据所蕴含的不确定性。在此基础上,运用粗集理论中的一些基本概念和方法来系统地描述和表达空间目标位置数据、属性数据以及空间关系数据的不确定性,旨在建立一种多粒度的不确定性分析和表达方法。

关键词: 空间目标; 粒度; 不确定性; 粗集; 空间关系

1 引 言

空间目标的表达是 GIS 空间数据库理论中的关键问题之一^[1]。传统的 GIS 认为用于描述和表达现实世界地理实体的空间数据是确定的、明确的,即被描述的对象的相关信息(如位置、属性和拓扑关系数据)是精确的^[2]。然而,在 GIS 实际应用中,用户常常需要在描述地理实体的空间信息不完整、不确定、不精确的前提下认识和析地理现象,甚至进行推理、判断、预测和决策。为了模拟、分析和表达 GIS 中数据的误差或不确定性,许多有效的方法已经被提出,如模糊集理论、证据理论、概率统计学理论以及新近提出并得

以在 GIS 应用的云理论等。但是这些方法在应用于 GIS 空间数据分析时,一些附加信息或先验信息如模糊集理论中的成员隶属函数、证据理论中的基本概率赋值和统计学中的概率分布等通常是难以得到和确定的。

近年来,一些学者运用粗集理论对 GIS 数据的不确定性进行分析建模。例如, Worboys 用于处理由多空间或多语义分辨率引起的不精确性^[3,4]; Ahlqvist 用于表达遥感影像分类的不确定性^[5]; 王树良等人基于粗集的思想方法定义了粗实体、粗关系和粗算子^[6]。事实上,由于现实世界的复杂性以及地理实体表现形式的多样性,使得 GIS 中用于描述和表达地理实体的空间数据

收稿日期: 2005-05-10; 修回日期: 2005-09-26

基金项目: 香港理工大学基金项目(G-T873), 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金项目(WKL040304)

作者简介: 邓 敏(1974),男,江西临川人,博士后,主要从事地理信息系统空间关系理论及应用、空间数据不确定性理论研究。

库中充斥各种各样的不确定性。随着考虑不确定性的类型以及分析处理时的侧重点不同,可以利用不同的数学工具来分析和表达。同时在研究分析中亦可发现,这些数学理论方法在处理 GIS 空间数据不确定性时又存在一定的互通性和相似性,如模糊集中的支撑集和核集(Core)与粗集中的上近似和下近似在一定程度上具有等价性。但是,粗集在揭示和表达多层次的空间知识方面具有较大优势^[7]。不同层次的空间知识将蕴含着对现实世界抽象表达的细致程度。此外,在数据获取、采样以及处理中粒度(或分辨率)的不同将可能导致不同数量级的不确定性。基于此,本文试图引用信息论中的粒度概念来分析空间数据的不确定性,并运用粗集理论中的一些基本思想和方法对 GIS 的空间目标进行描述,重点探讨空间目标位置数据、属性数据及其空间关系数据在不同粒度下的不确定性等问题,旨在建立一种多粒度的不确定性分析和表达方法。

2 一些基本概念

2.1 知识、等价关系与不可分辨关系

在粗集理论中,“知识”是用一个粗集来表示的,并用于对现实或抽象的对象进行分类。由于分类或表达的详细程度各异,从而认为知识是有层次的,即有粒度的(granularity)。知识的不精确性是由于组成论域知识的粒度太大引起的。为了揭示知识的粒度大小,下面引入等价关系和不可分辨关系两个概念。

设 $U = \phi$ 是论域, $C = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 使得 $X_i \subseteq U$, $X_i \cap \phi$, 且对 $i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$, 满足 $X_i \cap X_j = \phi$, $\bigcup_{i=1}^n X_i = U$, 则称 C 为一个划分, X_1, X_2, \dots, X_n 称为划分 C 的一个等价类。研究在每个划分中,都对对应着一个等价关系,这个等价关系描述的是论域 U 上的某一个属性。例如在土地利用分类时,可以按照土壤结构、坡度、以及它的商业价值等方面进行划分,这里土壤结构、坡度、商业价值分别是描述土地的一个属性。根据不同的属性,则可得到土地的不同划分。 U 上的一簇划分,称为关于 U 的一个知识库。

不可分辨关系是一族等价关系(即属性)集合的最细划分,该关系中的每一个等价类不能由原等价关系族的任一等价类再细分,称之为基本集合。因此,不可分辨关系表示了知识最细层次上的划分。

2.2 粗集的下近似、上近似和边界区

设 R 为论域 U 上的一族等价关系,并将 U 划分为互不相交的基本等价类,二元对 $K = (U, R)$ 构成一个近似空间。对于一个给定的集合 X , 满足 $X \subseteq U$, w 为 U 中的一个对象, $[w]_R$ 表示所有与 w 不可分辨的对象组成的集合,即由 w 决定的等价类。当集合 X 能表示成基本等价类组成的并集时,则称集合 X 是可精确定义的;否则,集合 X 只能通过逼近的方式来刻画。在粗集中,这种逼近是通过集合 X 关于 R 的下近似和上近似来实现的。它们可分别表达为

$$R_-(X) = \{w \in U : [w]_R \subseteq X\}$$

$$R_+(X) = \{w \in U : [w]_R \cap X \neq \phi\}$$

$$Bn(X) = R_+(X) - R_-(X)$$

$R_-(X)$ 实际上是那些根据已有知识判断属于 X 的对象所组成的最大集合,亦称 X 的正域,记作 $POS(X)$ 。由根据已有知识判断不属于 X 的对象所组成的集合称为 X 的负域,记作 $NEG(X)$ 。 $R_+(X)$ 是那些可能属于 X 的对象所组成的最小集合。显然, $R_+(X) + NEG(X) = U$ 。 $Bn(X)$ 为集合 X 的上、下近似之差。如果 $Bn(X) = \phi$, 则称 X 关于 R 是清晰的(crisp);如果 $Bn(X) \neq \phi$, 则称集合 X 是关于 R 的粗集。并且, $Bn(X)$ 的宽度表示了集合 X 在划分中粒度的大小。

3 空间位置数据不确定性的粗集模型

3.1 具有明确边界定义的地理实体

自然界中的地理实体按其空间形态分布和存在方式可粗分为离散实体和连续实体。传统的地图制图是将现实世界视为一个离散空间,并由形状各异的空间目标镶嵌而成。其中,空间目标被认为是具有明确边界的,由点、线、面或其组合表达。Chrisman 首次将 α -带概念引入 GIS 和制图学领域来描述空间目标的位置不确定性^[8]。随后, Caspary 在假定线段端点误差服从正态分布,并且端点分量误差相关但端点之间误差独立的前提下发展了误差带指标(简称 σ -带)^[9]。史文中、刘文宝等人分别基于随机过程和随机场提出了一般的线位误差带(即 g -带)^[10]和面位误差环(即 g -环)^[11]。上述研究表明,虽然空间目标的真实位置是不可知的,但是可以将目标界定在一个带

状区域范围内。也就是说,在这个带状区域内,目标的边界是不可分辨的。以一带为例,不确定空间目标集合的下近似、上近似和边界区分别表达为

$$R_-(X) = X \quad (1)$$

$$R_+(X) = X \oplus \quad (2)$$

$$Bn(X) = R_+(X) - R_-(X) \quad (3)$$

式中, \ominus 和 \oplus 分别为目标形态侵蚀和膨胀算子。对于点、线和面目标,它们的粗集表达如图 1。

分析可知,不确定点和不确定线目标的下近

似为空集,即表明根据已有知识不能确定点、线的真实位置(在图 1(a)和(b)中分别用灰色点和线表示)。而边界区的大小仅与 ϵ 的取值有关,也就是说,不可分辨的区域大小取决于获取的空间数据的精度。由此可知,对于大比例尺地图,空间数据精度高,不确定性带(即边界区)窄,数据的观测粒度小;而对于小比例尺地图,空间数据精度低,不确定性带宽,数据的观测粒度大。

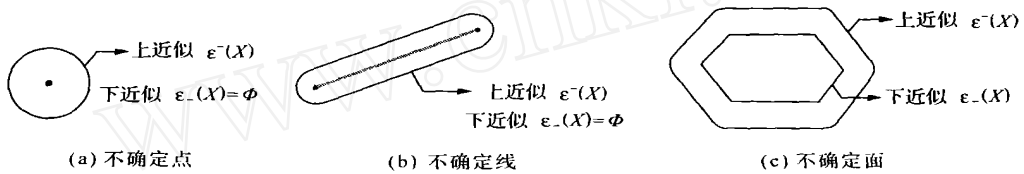


图 1 具有明确边界定义的空间目标位置不确定性的粗集表达

Fig. 1 Rough-set representation of positional uncertainty of spatial objects with definite boundary

3.2 没有明确边界定义的地理实体

自然界中还广泛存在着另一类连续地理实体(如可耕地、沙漠区等),这类实体的属性值在空间分布上是连续变化的。Goodchild 曾提出了利用场模型来表达这类连续地理实体^[12];Burrough 和 Frank 阐述了这类实体的位置不确定性主要是其属性的连续变化导致的^[2];Cohn 和 Gotts 提出了用于描述连续实体的蛋黄模型(egg-yolk model)^[13];刘文宝和邓敏在分析连续实体空间形态构成不确定性的前提下,定义了 GIS 输出图上连续地理实体的内部、边界和外部^[14]。上述研究都是基于空间目标属性定义和属性值空间分布的变异性进行的。从粗集的角度观察,在一定粒度(或分辨率)下,连续地理实体的下近似、上近似和边界区则可分别表达为

$$R_-(X) = \{ p_{ij} | \mu_X(p_{ij}) = 1 \} \quad (4)$$

$$R_+(X) = \{ p_{ij} | \mu_X(p_{ij}) > 0 \} \quad (5)$$

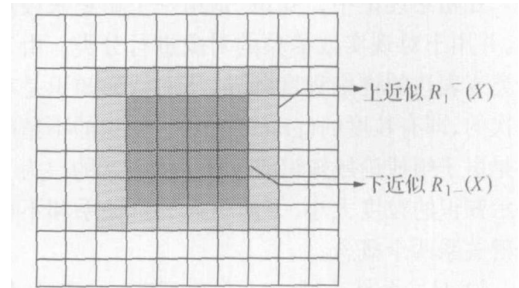
$$Bn(X) = R_+(X) - R_-(X) \quad (6)$$

式中, p_{ij} 为第 i 行、第 j 列的一个栅格像元。在此,如果将一个连续地理实体看作一个集合,则它的下近似是由确定隶属这个集合的元素组成,而上近似则是由可能隶属这个集合的元素组成。进一步地,式(6)可等价表达为

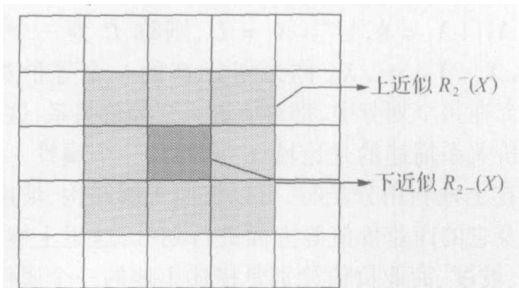
$$Bn(X) = \{ p_{ij} | 0 < \mu_X(p_{ij}) < 1 \} \quad (7)$$

它们的几何意义如图 2,其中(b)的粒度大小是

(a)的两倍。从图中可以看出,在不同的粒度下,上近似和下近似可能发生变化,并且边界区的宽度描述了粒度的大小。



(a) 在粒度 R_1 下的粗集表达



(b) 在粒度 R_2 下的粗集表达

图 2 不同分辨率下连续空间目标位置不确定性的粗集表达

Fig. 2 Rough-set representation of positional uncertainty for spatial objects with indefinite boundary

3.3 具有明确定义但获取的信息不完全

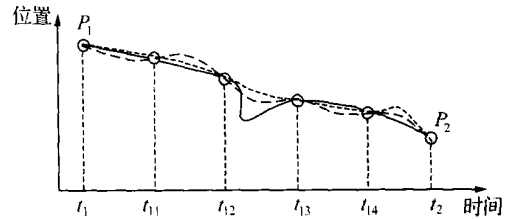
毛善君根据对现实世界中所研究对象获取信息的多少,将地理信息系统分为三大类^[15]: 黑色系统:无任何已知信息; 灰色系统:部分信息已知,部分信息未知; 白色系统:所有的信息都已知。对于第二种情况,如在地质、矿山、石油等应用领域,由于研究对象一般位于地表以下,通过钻探等手段获取的信息是十分有限的,不足以描述或表达研究对象的空间真实形态。如通过钻探手段获取的信息,只有钻孔处地层的 3 维坐标数据可以认为是精确的或是与空间实际位置一致的,而钻孔之间被表达出来的数据都是推断的,应该说是不确定的。此外,在空间信息的动态推断时,获取的仅是某几个离散时刻有关研究对象的空间和属性信息,然后对这些信息拟合和分析,得出研究对象在整个时间过程中的运动轨迹或分布规律。显然,只有在相应观测时刻表达研究对象的数据可以认为是精确的或是与空间实际位置一致的,而在两观测时刻之间表达出来的数据都是借助内插、拟合等方法推断得到的,不可避免地带有不确定性,甚至是错误的。

通过上述分析可以发现,要具体确定空间目标的真实位置状态是较难的,即难以确定现有数据偏离真实位置状态的大小。但是,完全可以根据已获取的信息及其蕴藏的约束关系来确定偏离真实位置状态的最大不确定性边界。从粗集的角度解释,则意味着可以确定目标集合的上、下近似,而其边界区就是目标数据集的不确定性大小。如图 3,在时间区间 $[t_1, t_2]$ 内某一动态点从 P_1 变化到 P_2 有很多种可能轨迹(如图 3(a)),但是由于动态点变化速度和时间具有一定的约束关系,使得轨迹的位置仅能在一定范围内变化(即轨迹位置的不确定性)。因此,我们可以确定它的上近似为最大变化范围,可以用误差椭圆来表示(如图 3(b)),而由于运动轨迹真实位置不可知,即下近似为空集。随着观测间隔(即粒度)变小,动态点运动轨迹的位置不确定性也将减小,即它的上近似所表达的空间变化范围减小。

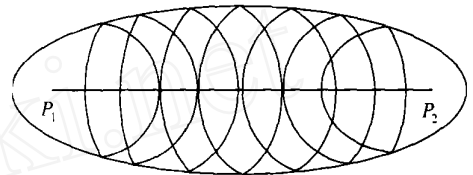
4 属性数据不确定性的粗集模型

4.1 属性分类信息的原子特性

一个属性信息表示系统 S 可描述为 $S = \langle U, At, Val, f \rangle$, 其中 U 是论域, At 是属性集, Val 是属性值的集合, $f: U \times At \rightarrow Val$ 是一个信息函



(a) 在 $[t_1, t_2]$ 内从 P_1 运动到 P_2 的可能轨迹



(b) 上近似为整个椭圆区域,下近似为空集

图 3 在时间区间 $[t_1, t_2]$ 从 P_1 运动到 P_2 的轨迹位置不确定性粗集表达

Fig. 3 Rough-set representation of positional uncertainty from P_1 moving to P_2 in interval $[t_1, t_2]$

数,它指定 U 中每一个目标对象的属性值。空间目标的描述信息是通过目标的属性及其属性值来表达的,这种描述目标的“属性—值”对就是目标所具有的某种特征。设 $U \neq \emptyset$ 是论域, $A = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 是目标集, $A \subseteq U$, A 中任何目标具有的特征所组成的集合,称为特征集,记 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 这些特征可由“属性—值”对来表示,即: $t = (a, v), a \in At; v \in Val$ 。

对于任一目标 $w \in A$, 如 w 可由 T 描述,则这种关系可表示为: (w, T) , T 为特征关系。于是可以得到

$$[w] = \{ T : (w, T) \} \quad (8)$$

若已知一特征集 T , 对于每个 $w \in U$, 如果满足: $[w] \cap T = \{w\}$, 则称 $[w]$ 为特征集; 同理, 非特征集定义为: $[\wedge] = \{w \in U : (w, T) \notin T\}$ 。从而可利用 $[w]$ 和 $[\wedge]$ 构造如下原子集

$$\begin{aligned}
 [a_0] &= [\wedge_1 \wedge_2 \dots \wedge_n] = [\wedge_1] [\wedge_2] \dots [\wedge_n] \\
 [a_1] &= [t_1 \wedge_2 \dots \wedge_n] = [t_1] [\wedge_2] \dots [\wedge_n] \\
 &\dots \\
 [a_N] &= [t_1 t_2 \dots t_n] = [t_1] [t_2] \dots [t_n]
 \end{aligned}$$

其中, $N = 2^n - 1$, 则 $[a_0], [a_1], \dots, [a_N]$ 形成了对论域 U 的一种划分。这里, 每个原子概念都是一种布尔表示的等价类, 在同一个等价类中所有目标对象都是不可区分的, 并且这些等价类共同形成了对论域的划分。同时, 这些原子是描述空

间论域信息的最小“颗粒”(即粒度)。因此,“颗粒”越细,空间论域属性信息表达越精确;反之,“颗粒”越粗,空间论域属性信息表达越粗糙。

根据粗集理论对于知识的定义,可以用原子集/原子概念来描述和表达空间论域 U 中任一目标对象 A 的属性信息。若 A 可由一族原子概念精确描述,即 A 可表示成原子集的并集时,则的属性信息描述是确定性的,是可精确定义的;反之, A 的属性信息是带有不确定性的,只能粗糙定义,即采用逼近的方式来描述。

4.2 属性特征判别的不确定性

GIS 中属性数据可划分为标称、等级、比值、数值四种类型。属性数据的不确定性来自于数据源的不确定性、数据建模的不确定性和分析过程中引入的不确定性等,现有的研究考虑较多的是属性值的量测不确定性、属性值分布的空间变异性和属性值数据分类的不确定性^[16]。在实际应用中,如从遥感影像中提取某属性类型的空间目标时,一个像元可能同时隶属于几种属性类型,这将使得在判别和提取过程中存在不确定性。对于一个像元 p_{ij} ,假设具有 n 个属性特征,在进行归一化处理后,则可表达为

$$(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) | p_{ij} \quad (9)$$

其中, $0 < \mu_i \leq 1$, 且 $\sum_{i=1}^n \mu_i = 1$ 。于是,从粗集角度分析,仍可利用式(4) ~ (6) 类似表达某属性类型空间目标集的上近似、下近似及边界区。

5 空间关系不确定性的粗集模型

在 GIS 中,空间关系通常分为拓扑关系、方向关系和距离关系三种。下面以拓扑关系为例,利用粗集分析和描述空间关系信息的不确定性。

5.1 多粒度拓扑关系的粗集表达

拓扑关系是一种拓扑变换下的不变量,它的形式化描述方法与目标本身的形态、维数以及镶嵌空间的拓扑特性密切相关^[17]。随着目标形态的复杂化,拓扑关系的种类也将成倍的增多。例如,两个自相交的线/线、带有空洞的面/面之间的拓扑关系情形远比简单线或简单面之间的拓扑关系情形要多。需要指出的是,现有的 4 交模型、9 交模型、4 交差模型、RCC 模型以及基于 Voronoi 图的 9 交模型仅是对目标间拓扑关系的一个粗略分类,在这些模型下区分的拓扑关系类型可能蕴藏着无穷种不可分辨的情形。例如,对于两条面目标相接的情形,一个相接点的情形与多个相接点的情形以及相接为线的情形利用上述模型描述时是相同的,但事实上它们的拓扑关系并不同。

从粗集的角度分析,拓扑关系表达的不确定性主要是由于形式化模型的粗糙性,从而导致拓扑关系分类的不可分辨性,也就是说,拓扑关系的分类信息颗粒偏大,使得上述两类拓扑关系成为等价类,具有不可分辨性。如图 4,以相接关系为例,例证了拓扑关系信息具有不同的粒度,在图中层次 3 的(a)与(b)和(c)与(d)四种关系在层次 2 的模型下是不可分辨的,即为等价类;而层次 2 的两种关系在层次 1 的模型下是不可分辨的,为等价类。因此,在层次 1、层次 2、层次 3 的模型下区分的拓扑关系信息粒度依次变小。在这方面的后续研究中,如 Clemeniti 等人的维数扩展 9 交模型^[18]和邓敏等人提出的拓扑关系层次表达模型^[19],都是试图将拓扑关系信息的粒度变小,减少拓扑关系分类的不可分辨性,达到拓扑关系描述的精细化,以满足实际应用与空间分析的要求。

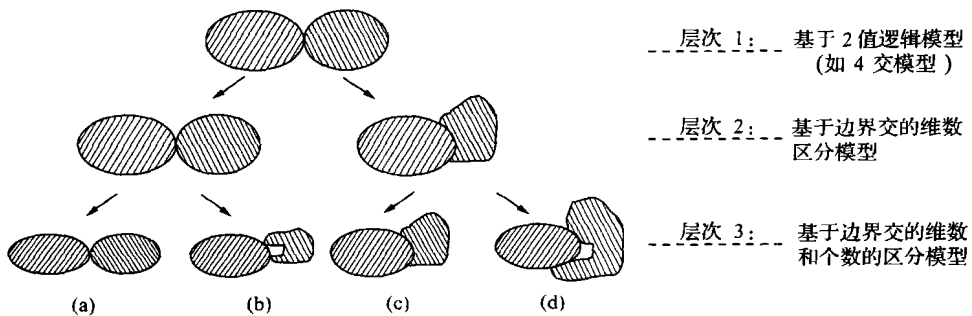


图 4 不同层次区分模型下拓扑关系信息粒度不同

Fig. 4 Hierarchical granularity of topological relations information under various models

5.2 不确定拓扑关系的粗集推理模型

在 5.1 节中从拓扑关系信息的多粒度性分析了不同层次拓扑关系模型的粗糙性。然而在实际应用中, 拓扑关系往往由空间目标位置数据推理得到。为此, 下面基于粗集的方法进一步分析和推理由空间位置数据不确定性引起的不确定拓扑关系。

以文献[20]提出的 4 交差模型为例, 它是由目标 A 的内部与目标 B 的内部之交集 ($A^\circ \cap B^\circ$)、 A 的边界与 B 的边界之交集 ($\partial A \cap \partial B$)、 A 与 B 之差集 ($A - B$) 以及 B 与 A 之差集 ($B - A$) 四个部分构成的, 形式化表达为

$$(A, B) = \begin{bmatrix} A^\circ & B^\circ & A - B \\ B - A & \partial A & \partial B \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于空间目标的位置不确定性将直接影响式(10)中目标集合内部、边界及其本身的几何意义, 进而使得它们之间的交集可能产生不同的值。不妨设目标 B 的位置数据含有误差或不确定性, 根据 3.1 节给出的粗集表达方法, 则可定义如下两个 4 交差矩阵:

$$(A, \tilde{B}) = \begin{bmatrix} A^\circ & (\tilde{B})^\circ & A - \tilde{B} \\ \tilde{B} - A & \partial A & \partial(\tilde{B}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

和

$$(A, \hat{B}) = \begin{bmatrix} A^\circ & (\hat{B})^\circ & A - \hat{B} \\ \hat{B} - A & \partial A & \partial(\hat{B}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据式(11)和(12)定义的两个 4 交差矩阵, 并利用拓扑关系变化的邻域关系概念^[21], 则可推理得到目标 A 和 B 之间的所有可能拓扑关系。当两个目标位置数据都带有不确定性的情况下, 则只需计算如下四个 4 交差矩阵

$$(\tilde{A}, \tilde{B}), (\tilde{A}, \hat{B}), (\hat{A}, \tilde{B}), (\hat{A}, \hat{B})$$

一些具体的推理方法可参阅文献[21]和[22]。显然, 如果粒度变化, \tilde{A} 、 \hat{A} 、 \tilde{B} 和 \hat{B} 将会随之发生变化, 从而推理得到的拓扑关系可能也会不同。

6 结论与展望

不确定性是一个内涵非常丰富的概念, 在不同的学科领域则有不同的理解和定义。本文主要是从空间数据的粒度(有时也理解为分辨率)角度

来观察空间目标, 并运用粗集方法来分析和表达空间目标位置、属性及其关系的不确定性。并且发现利用粗集理论不仅能有效地表达地理信息的量测、分类、空间关系等不确定性, 而且在揭示和表达多层次(或粒度)的空间知识方面具有较大优势。未来进一步的工作将是综合使用现有的各种数学理论与方法, 如文献[23]将粗集与模糊集集成, 发展了粗糙模糊集(Rough Fuzzy Set)并应用于遥感影像分类, 从而使得在特定的应用环境下更精确、更全面地刻画空间目标的不确定性。而在模型表达时, 还应考虑与 GIS 的充分结合, 增强模型的实用性, 以较好地解决实际应用问题。

参考文献:

- [1] MOLENAAR M. An Introduction to the Theory of Spatial Object Modeling[M]. London: Taylor and Francis, 1998.
- [2] BURROUGH P, FRANK A. Geographic Objects with Indeterminate Boundaries [M]. London: Taylor and Francis, 1996.
- [3] WORBOYS M. Computation with Imprecise Geospatial Data [J]. Computer, Environment and Urban System, 1998, 22, 85-106.
- [4] WORBOYS M. Imprecision in Finite Resolution Spatial Data [J]. GeoInformatica, 1998, 2(3): 257-279.
- [5] AHLQVIST O. Rough Classification and Accuracy Assessment [J]. International Journal of Geographic Information Science, 2000, 14(5): 475-496.
- [6] WANG Shuliang, LI De-ren, SHI Wen-zhong, et al. Theory and Application of Georough Space [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(3): 274-282. (王树良, 李德仁, 史文中等. 地学粗空间的理论与应用 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 274-282.)
- [7] PAWLAK Z. Rough Set [J]. International Journal of Information and Computer Science, 1982(11): 341-365.
- [8] CHRISMAN N R. Methods of Spatial Analysis Based on Errors in Categorical Maps [D]. Bristol (UK): University of Bristol, 1982.
- [9] CASPARY W, SCHEURING R. Positional Accuracy in Spatial Databases [J]. Computer, Environment and Urban System, 1993, 17(2): 103-110.
- [10] SHI W, LIU W. A Stochastic Process-based Model for Positional Error of Line Segments in GIS [J]. International Journal of Geographic Information Science, 2000, 14(1): 51-66.
- [11] LIU Wen-bao, DAI Hong-lei, XU Ban-lin, et al. The Model of Planar Polygon's Positional Error Donut in GIS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(4): 338-344. (刘文宝, 戴洪磊, 徐泮林等. GIS 中平面面位误差环的解析模型 [J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 338-344.)

- [12] GOODCHILD M. Modeling Error in Object and Fields [A]. Accuracy of spatial databases [C]. London: Taylor and Francis, 1989, 107-113.
- [13] COHN A, GOTTS N. The 'egg-yolk' representation of regions with indeterminate boundaries [A]. In: Burrough and Frank (eds), Geographic objects with indeterminate boundaries [C]. London: Taylor and Francis, 1996, 171-188.
- [14] LIU Wen-bao, DENG Min. Analysis of Positional Uncertainty of Geographic Region in GIS [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6 (1): 45-49. (刘文宝,邓敏. GIS 中地理区域位置不确定性分析 [J]. 遥感学报, 2002, 6 (1): 45-49.)
- [15] MAO Shan-jun. The Theory and Method of Gray Geographic Information System [R]. Beijing: Peking University, 1999. (毛善君. 灰色地理信息系统的理论与方法 [R]. 北京: 北京大学, 1999.)
- [16] LIU Wen-bao, DENG Min, XIA Zong-guo. Uncertainty of Attribute Data in Vector-based GIS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(1): 76-81. (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.)
- [17] CHEN Jun, LI Cheng-ming, LI Zhi-lin, et al. A Voronoi-based 9-intersection Model for Spatial Relations [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2001, 15 (3): 201-220.
- [18] CLEMENTINI E, DI FELICE P, OOSTEROM P. A Small Set for Formal Topological Relationships Suitable for End-user Interaction [A]. Advances in Spatial Databases [C], New York: Springer-Verlag, 1993, 277-295.
- [19] DENG Min, FENG Xue-zhi, CHEN Xiao-yong. Hierarchical Models of Topological Relations between Spatial Regions [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(2): 142-147. (邓敏,冯学智,陈晓勇. 面目标间拓扑关系形式化描述的层次模型 [J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 142-147.)
- [20] DENG Min, LIU Wen-bao, FENG Xue-zhi. 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 面目标间拓扑关系描述的形式化模型 [J]. 测绘学报, 2005, 34(1): 85-90.)
- [21] DENG Min, FENG Xue-zhi, LIU Wen-bao, et al. Uncertain Reasoning Approach of Topological Relations under Location Uncertainty in GIS [J]. Pattern Cognition and Artificial Intelligence, 2004, 17(3): 326-331. (邓敏,冯学智,刘文宝,等. 地理信息系统中拓扑关系不确定性推理的方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2004, 17(3): 326-331.)
- [22] DENG Min, CHEN Xiaoyong, KUSANAGI M. Reasoning of Topological Relations between Imprecise Regions [J]. Geographic Information Sciences, 2004, 10(1): 73-81.
- [23] AHLQVIST O, KEU KELAAR J, OU KBIR K. Rough and Fuzzy Geographical Data Integration [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2003, 17(3): 223-234.

(责任编辑:张燕燕)

(上接第 56 页)

- 11-14. (胡雪莲,孙永军,程承旗等. 基于地理空间概念的地理元数据组织管理研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19 (2): 11-14.)
- [3] DUTTON G. Encoding and Handling Geospatial Data with Hierarchical Triangular Meshes [A]. Proceeding of 7th International Symposium on Spatial Data Handling [C]. [s.l.]: [s.n.]. 1996, 34-43.
- [4] FEKETE G. Rendering and Managing Spherical Data with Sphere Quadrees [A]. Proceedings of the First 1990 IEEE Conference on Visualization [C]. [s.l.]: [s.n.]. 1990, 176-186.
- [5] GOODCHILD M F, YANG S. A Hierarchical Data Structure for Global Geographic Information Systems [J]. Computer Graphics, Vision and Image Processing, 1992, 54(1): 31-44.
- [6] SAHR K, WHITE D. Geodesic Discrete Global Grid Systems [J]. Cartography and Geographic Information Science, 1998, 30(2): 121-134.
- [7] OTTOSON P, HAUSKA H. Ellipsoidal Quadrees for Indexing of Global Geographical Data [J]. Int. J. Geographical Information Science, 2002, 16(3): 213-226.
- [8] WALDO, Chen Z. A Quadtree for Global Information Storage [J]. Geographical Analysis, 1986, 18(4): 360-371.
- [9] CLARKE K C. Criteria and Measures for the Comparison of Global Geocoding Systems, Discrete Global Grids [EB/OL]. <http://www.geog.ucsb.edu/%7Ekclarke/Papers/GlobalGrids.html>, 2002.
- [10] SAMET H. The Quadtree and Related Hierarchical Data Structures [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 1984, 16(2): 187-260.
- [11] GONG Jian-ya. A Kind of Linear Quadtree Code Based on Natural Number [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1992, 21(2): 90-99. (龚健雅. 一种基于自然数的线性四叉树编码 [J]. 测绘学报, 1992, 21(2): 90-99.)
- [12] CHEN Jun-yong. Necessity and Feasibility for a Geocentric 3D Coordinate System Employed in China [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(4): 283-288. (陈俊勇. 关于中国采用地心 3 维坐标系统的探讨 [J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 283-288.)

(责任编辑:雷秀丽)