

一种双嵌套区域与简单区域间的拓扑关系模型

李 健^{1,2,3}, 欧阳继红^{1,3}, 朱佳斌², 富 倩⁴

(1. 吉林大学计算科学与技术学院, 吉林长春 130012; 2. 吉林农业大学信息技术学院, 吉林长春 130118;
3. 吉林大学教育部符号计算与知识重点实验室, 吉林长春 130012; 4. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061)

摘 要: 本文将通过将经典 4-交集矩阵中的区域内部替换为区域外部, 使其可以表示 RCC5 关系. 在此基础上定义了 4×4 交集矩阵, 构建了双嵌套区域与简单区域间的拓扑关系模型. 给出约束条件, 得到双嵌套区域与简单区域间实际存在的 53 种拓扑关系, 给出其关系示意图及概念邻域图, 在此基础上建立了拓扑关系的推理系统, 给出关系复合表. 应用本文所建立的拓扑关系模型, 可用于对台风降水区域与指定目标地区的拓扑关系进行定性模拟, 对台风及降水的预警机制具有一定的指导意义.

关键词: 定性空间推理; 双嵌套区域; RCC5; 台风

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 10-1988-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.019

The Topological Relation Model Between a Double Nesting Region and a Simple Region

LI Jian^{1,2,3}, OUYANG Ji-hong^{1,3}, ZHU Jia-bin², FU Qian⁴

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China; 2. College of Information Technology, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China; 3. Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China; 4. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China)

Abstract: The interior part of the classic 4-intersection matrix is replaced by the exterior part to represent the RCC5 relations. The 4×4 intersection matrix is then defined to describe the spatial topological relations between a double nesting region and a simple region. It is shown that there are totally 53 topological relations between a double nesting region and a simple region based on three constraints, the illustrations and the conceptual neighborhood graph of all these relations are also given. The reasoning mechanism of this model is established and the composition table is given. The proposed topological relation model can be applied to qualitatively simulate the spatial relations between the typhoon raining areas and the target area, which is useful to some degree on the forecasting and warning of typhoon raining.

Key words: qualitative spatial reasoning; double nesting region; RCC5 (region connection calculus); typhoon

1 引言

空间推理^[1]在地理信息系统、模式识别、机器人导航和空间数据库等领域有着广泛应用. 空间关系模型是空间推理研究中的基本问题. 目前已有的空间关系模型主要分为两类, 即基于逻辑方法的 RCC 理论^[2]和基于代数方法的交集模型^[3]. 此外, 还有许多基于这两类方法的扩展模型^[4~6]. 目前对于简单对象的空间关系建模已形成一套比较完善、成熟的理论体系, 而复杂对象的空间关系模型研究则成为当前以及今后空间推理的一

个重要研究方向.

本文旨在研究一类较特殊的复杂空间区域(即双嵌套区域), 通过将双嵌套区域分解为具有层次包含关系的三个简单区域, 从而将复杂区域的空间关系问题转化为多个简单区域间的空间关系问题. 基于这种思想, 本文提出了一种双嵌套区域与简单区域间的拓扑关系模型. 这类空间关系模型可用于对强台风或热带气旋等自然现象进行定性模拟, 在灾害预警中能够起到一定的指导意义.

我国是世界上受热带气旋影响最严重的国家之一, 平均每年登陆我国的台风就有 7-8 个^[7]. 2012 年 8 月

5 日 17 时第 11 号台风“海葵”(Haikui)进入我国东海东部海面,台风“海葵”的卫星云图如图 1 所示。

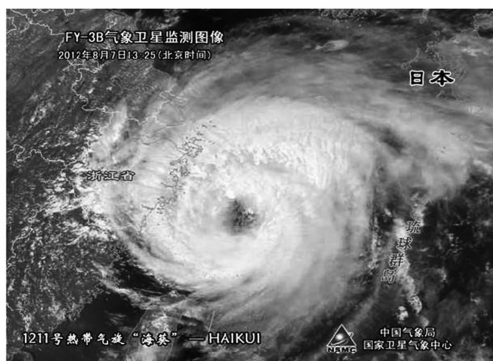


图1 台风“海葵”的卫星云图

在热带气旋的研究中,虽然热带气旋路径预报取得了一定进展,但对于一些异常路径的预报仍然不理想[8],图 2 为台风“海葵”的移动路径示意图.因此,为预防台风异常登陆的可能性,制定完备的预案十分重要.本文所研究的这类拓扑关系模型就可以用于台风在异常路径下的复杂登陆情况,将台风对指定地区的降水影响进行模拟表示,并制定出相应的方案备份。

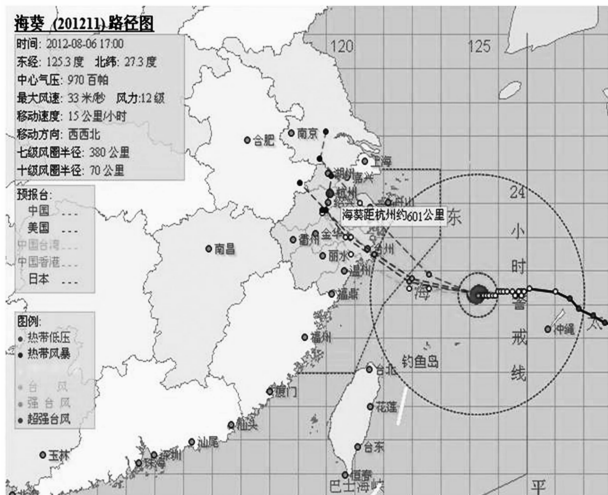


图2 台风“海葵”的路径示意图

2 RCC 理论和交集模型

1992 年,Randell 等人[2]基于 Clarke[9]的空间演算逻辑公理提出了 RCC 理论,其中应用最广泛的是 RCC8 和 RCC5 关系集,如图 3 所示。

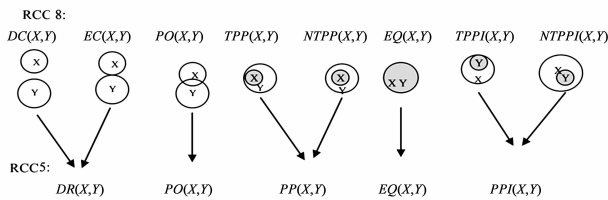


图3 两个简单区域间的RCC8和RCC5关系

1991 年,Egenhofer 等人[3]提出了 4-交集模型,通过考察 4-交集矩阵中每个位置集合的空与非空,得到了二维空间中实际存在的 8 种面/面拓扑关系,与 RCC8 关系相互对应。

本文中不考虑空间对象的边界,因而为了能表示边界不敏感的 RCC5 关系,将 4-交集矩阵中的区域边界替换为区域的外部,从而得到了与 RCC5 关系一一对应的扩展 4-交集矩阵表示,如表 1 所示。

表 1 RCC5 关系集的扩展 4-交集矩阵表示

Table with 5 columns: DR(A, B), PO(A, B), PP(A, B), EQ(A, B), PPI(A, B). Each cell contains a 2x2 matrix of 0s and 1s.

3 双嵌套区域与简单区域间的拓扑关系表示模型

首先给出一些基本概念的定义:

定义 1(双嵌套区域) 令 A, B, C 为三个简单区域,若 A, B, C 满足拓扑关系 PPI(A, B), PPI(B, C), 则称由 A, B, C 组成的复合区域为双嵌套区域。

如图 4 所示, A, B, C, D 为四个简单区域,其中 A, B, C 组成一个双嵌套区域。

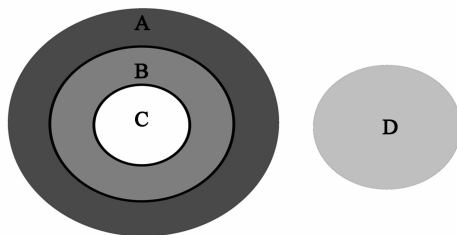


图4 双嵌套区域与简单区域

定义 2(4x4 交集矩阵) 根据扩展 4-交集矩阵的思想,可将简单区域 A, B, C, D 分别划分为区域的内部 A0, B0, C0, D0 和区域的外部 A1, B1, C1, D1, 考虑这四个区域中内、外两部分间相交的所有情况,则空间全域被划分成 2^4 = 4x4 个部分,每个部分取值为 0 或 1, 分别表示各部分间的交集为空或非空. 从而得到如下的 4x4 交集矩阵。

Matrix equation showing intersections of regions A, B, C, D and their exteriors (A0, B0, C0, D0 and A1, B1, C1, D1).

所以,对于任意的双嵌套区域与简单区域,可用一个 4x4 的 0/1 矩阵来表示它们之间的拓扑关系. 总共有 2^6 种不同的 4x4 矩阵,但不是所有 0/1 矩阵都能对应一种可实现的拓扑关系. 为了得到二维平面中所有可实现的矩阵,下面提出三条约束条件,用以除去不可实现的情况。

约束条件 1 一个 4x4 的 0-1 矩阵能够对应一种

可实现的拓扑关系,则由该矩阵对应的二元拓扑关系必须属于 RCC5 关系集.

约束条件 2 对于任意四个简单区域 A, B, C, D , 必然有这四个区域的外部总是相交的, 即 $A_1 \cap B_1 \cap C_1 \cap D_1 = 1$.

约束条件 3 对于由简单区域 A, B, C 组成的双嵌套套区域, 必然有:

$$A_0 \cap B_0 = 1, \quad A_0 \cap B_1 = 1, \quad A_1 \cap B_0 = 0, \quad A_1 \cap B_1 = 1;$$

$$A_0 \cap C_0 = 1, \quad A_0 \cap C_1 = 1, \quad A_1 \cap C_0 = 0, \quad A_1 \cap C_1 = 1;$$

$$B_0 \cap C_0 = 1, \quad B_0 \cap C_1 = 1, \quad B_1 \cap C_0 = 0, \quad B_1 \cap C_1 = 1.$$

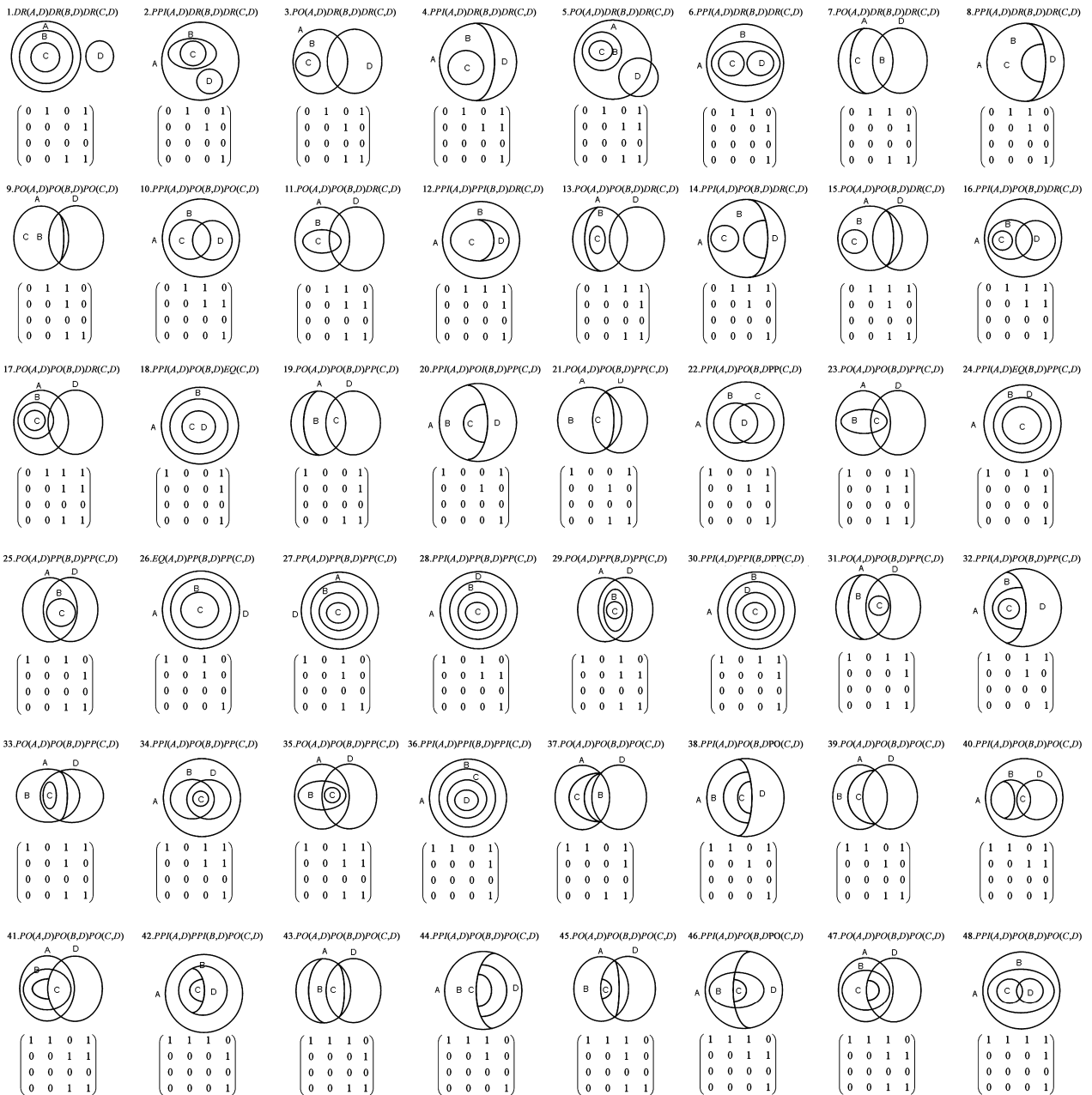
根据上述的约束条件, 我们给出如下算法:

1. 每个矩阵以 $[a_1, a_2, \dots, a_{16}]$ 的行向量形式给出, 首先生成理论上的 65536 种 0-1 矩阵, 即一个由 65536 个行向量构成的矩阵 A ;

2. 依次扫描 A 的每行, 标记下矩阵 A 中所有满足约束条件的行向量;

3. 将矩阵 A 中所有满足条件的行向量保存到矩阵 B 中, 并输出, 其结果即为所求.

根据算法, 通过程序计算可得到 53 种 0-1 矩阵, 对应二维平面中实际存在的 53 种拓扑关系, 给出其示意图, 如图 5 所示.



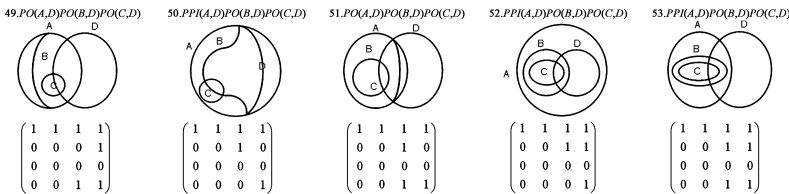


图5 双嵌套区域与简单区域间的53种拓扑关系

我们通过分析图 5 中的 53 种拓扑关系得到其概念邻域图^[10](如图 6 所示),其中椭圆外是基于 RCC5 关系的二元拓扑关系表示,椭圆内的数字序号表示基于 4 × 4 交集模型的 53 种拓扑关系.两椭圆间有线段连接表示这两类拓扑关系可以经过连续变化得到.

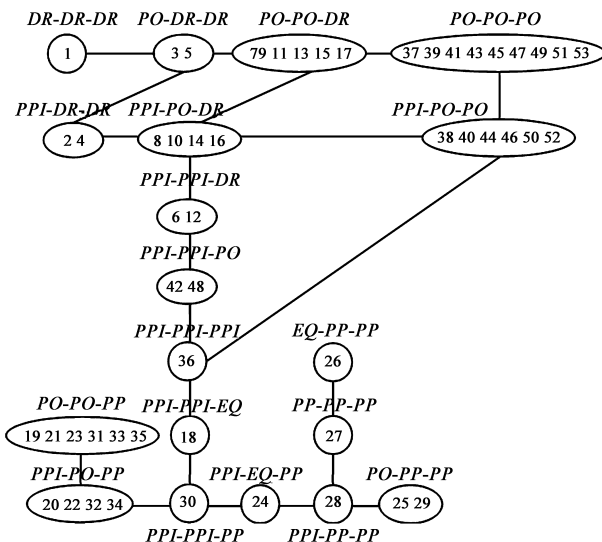


图6 双嵌套区域与简单区域间53种拓扑关系的概念邻域图

4 双嵌套区域与简单区域间的拓扑关系推理模型

推理系统可以实现区域间拓扑关系的复合推理,由已知的多组拓扑关系推理得到未知的复合拓扑关系.根据定义 1 有 $f(A, B) = PPI, f(B, C) = PPI$,若给定 $f(A, D)$ 或 $f(B, D)$,则可以推导出 $f(C, D)$,给出拓扑关系复合表,如表 2 所示:

若给定 $f(A, D) = DR$,则可以推导出 CD 间唯一的一种拓扑关系,即 $f(C, D) = DR$,如图 5 中序号为 1 的拓扑关系.

若给定 $f(A, D) = PO$,则由表 2 可知, $f(C, D)$ 存在 3 种可能: DR, PO 或 PP .对应图 5 中序号为 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 52, 53 的 25 种拓扑关系.进一步地,若再给定 $f(B, D) = DR$,则由表 2 可得 $f(C, D) = DR$,对应图 5 中序号为 3, 5 的 2 种拓扑关系.

表 2 双嵌套区域与简单区域间的二元拓扑关系复合表

$f(A, B)$ 的拓扑关系	$f(B, C)$ 的拓扑关系	$f(A, D)$ 的拓扑关系	$f(B, D)$ 的拓扑关系	$f(C, D)$ 的拓扑关系
PPI	PPI	DR	DR	DR
		PO	DR	DR
			PO	DR, PO, PP
		PPI	DR	DR
			PO	DR, PO, PP
			PPI	DR, PO, PPI, EQ, PP
			EQ	PP
			PP	PP
		EQ	PP	PP
		PP	PP	PP

5 台风地区降水的拓扑关系模型

根据台风结构特性,距离台风中心一定距离的平

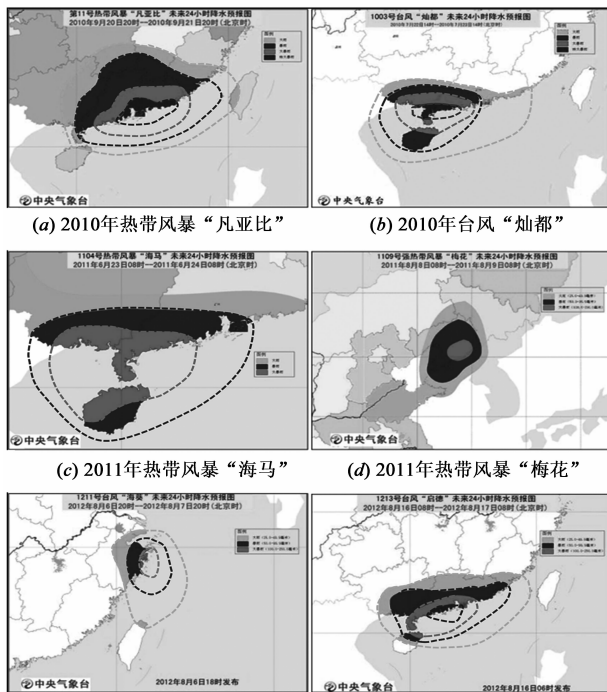


图 7 2010年至2012年台风降水示意图(陆上部分)

均降水量有最大值,且在大尺度范围内,平均降水量随着台风半径增加而呈现减小趋势^[11].对 2010 年至 2012 年(截止到 2012 年第 13 号强台风“启德”)的 40 种台风的降水分布形态进行统计和比较(图 7 为只包括陆上降水的部分降水示意图),得到:虽然台风降水结构存在不对称性和边界不规则性,但按照一定的降水级别标准对台风降水区域进行划分,可使用本文提出的拓扑关系模型对各级降水区域进行定性模拟.

根据我国降水强度等级国家标准(内陆部分),降水强度一般可划分为 6 个等级,我们可以根据降水强度等级划定一类台风降水级别标准,如表 3 所示.

表 3 台风降水级别划分

台风降水级别划分	I	II	III
降水等级区间	小雨至大雨	暴雨至大暴雨	特大暴雨
12h(mm)	0.2 ~ 30.0	30.1 ~ 140.0	> 140.0
24h(mm)	1.0 ~ 50.0	50.0 ~ 200.0	> 200.0
影响描述	地面潮湿 平地积水	可能造成 山洪暴发	容易造成 洪涝灾害

在具体的拓扑关系建模中,根据台风降水区域按照降水级别 I、II、III,分别对应降水区域 A、B、C 三个区域(降水级别 I < II < III,级别越高降水量越大)且有 PPI(A, B)、PPI(B, C),如图 8 所示:

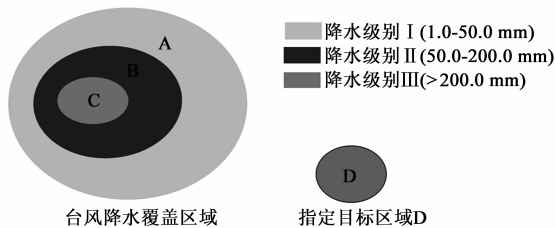


图 8 台风降水区域与指定地区的示意图

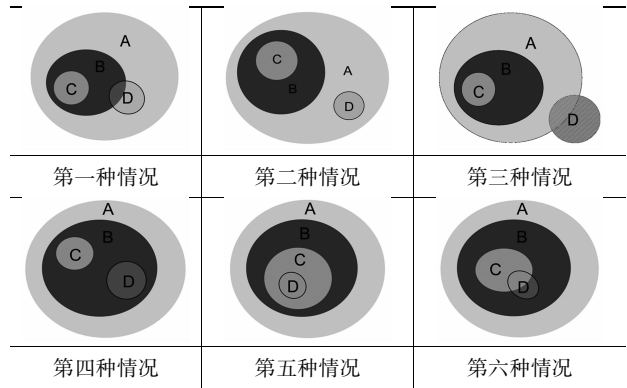
按照降水级别的划分, C 为中心强降水区域,覆盖范围较 A 和 B 要小,但降水量却最大,对地区 D 的破坏程度也最大.若能对 C、D 间的关系进行预测和表示,我们就能及早启动相应紧急预案进行人员和物资的转移,减少人员伤亡和经济损失.根据第 4 节的推理系统,我们可以根据台风降水区域 A 与地区 D 之间的关系,推导出 CD 间可能存在的关系,得到地区 D 在降水级别为 III 级的中心强降水带 C 下受影响的情形,从而对该降水影响情况进行预测和分析,有助于台风降水灾害预测评估.

台风降水分布对目标地区可能产生的影响与图 5 中的 53 种拓扑关系图是相互对应的.表 4 列出了其中的 6 种.

以表 4 中的第一种情况举例说明:这类降水区域与目标区域的拓扑关系模型,其拓扑关系包括 PPI(A,

D), PO(B, D), DR(C, D),它表示降水区域 A 覆盖了地区 D,降水区域 B 与地区 D 相交,与 C 相离.显然,由中心降水区域 C 与地区 D 呈相离关系可知,地区 D 不受中心强降水的直接影响,但是局部地区受到降水级别 I 和 II 的降水影响,因此地区 D 需要启动降水级别 I 至 II 的预案以减轻灾害影响.

表 4 台风降水拓扑关系模型的示意图



进一步地,根据图 6 中的 53 种拓扑关系图及其概念邻域图,给出地区 D 的地区降水概率表.其中台风对地区的降水影响按照影响范围分有全局影响、局部影响和无影响三种.地区 D 局部受到暴雨的情形,即包括 PO(B, D)和 PP(B, D)共有 40 种可能,即地区 D 局部受到暴雨的概率为 75.47%;类似地对大雨、暴雨和特大暴雨造成的全局影响、局部影响和无影响进行计算,得到地区降水概率表,如表 5 所示.

表 5 指定地区 D 的降水概率表

概 率		雨 势				
		大雨	暴雨	特大暴雨		
影 响	拓 扑 关 系	PPI EQ	全局	49.05%	15.09%	3.770%
		PO PP	局部	47.17%	75.47%	64.15%
		DR	无影响	3.770%	9.430%	32.08%
采取应对机制			I 级 (或以上)	II 级 (或以上)	III 级 (或以上)	

需要注意的是,本文认为台风登陆情形是完全随机的,故认定 53 种降水和区域的拓扑关系发生概率是等可能的.根据地区降水影响的发生概率启动相应的响应机制,可为地区降水预警提供参考和依据.

6 与相关工作的比较

本文提出的一种双嵌套区域与简单区域间的拓扑关系模型可看是复杂对象空间关系模型中较为简单的一类.目前有关复杂对象的空间拓扑关系模型相对较少,有学者对带洞区域^[4,5]、复合区域^[12]的空间拓扑关

系模型进行了相关研究,并取得了一定研究成果。但多数模型都是基于传统的二元拓扑关系模型,在实际应用中往往具有一定的局限性,表达力较弱。本文将双嵌套区域看作具有非内切真包含的三个简单区域,建立了一种基于多元拓扑关系的空间关系模型,对空间关系的刻画更细致,表达力更强。

7 结论

本文通过扩展 4-交集矩阵定义了 4×4 的交集矩阵,用于双嵌套区域与简单区域间的空间拓扑关系建模。给出约束条件用以去掉不可实现的拓扑关系,最终得到双嵌套区域与简单区域间的 53 种拓扑关系。通过给出其关系示意图验证了 53 种拓扑关系均是实际存在的。给出其概念邻域图,进一步建立了拓扑关系的推理系统,给出双嵌套区域与简单区域间的二元拓扑关系复合表。

在此基础上,将本文提出的空间拓扑关系模型用于定性模拟台风降水区域和指定地区的拓扑关系,从而能够在一定程度上对台风降水影响进行预测和分析,有助于台风降水灾害预测评估。

参考文献

- [1] Shengsheng Wang, Dayou Liu. An efficient method for calculating qualitative spatial relations[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(1): 42 - 46.
- [2] Randell DA, Cui Z, Cohn A G. A spatial logic based on regions and connection[A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning[C]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1992. 165 - 176.
- [3] Max J Egenhofer, Robert D Franzosa. Point-set topological spatial relations[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1991, 2: 161 - 174.
- [4] 欧阳继红, 霍琳琳, 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): 1596 - 1600.
OUYANG Ji-hong, HUO Lin-lin, LIU Da-you, 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): 1596 - 1600. (in Chinese)
- [5] M Egenhofer, M Vasardani. Spatial reasoning with a hole[A]. Conference on Spatial Information Theory (COSIT-07)[C]. Germany: Springer, 2007. 303 - 320.
- [6] S Li. A complete classification of topological relations using 9-intersection method[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20: 589 - 610.

- [7] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 420 - 432.
CHEN Lianshou, MENG Zhiyong. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001, 25(3): 420 - 432. (in Chinese)
- [8] 曹楚, 王忠东. 台风 Aere(2004)与超强台风 Gloria(1963)路径分析[J]. 广东气象, 2011, 33(3): 20 - 26.
Cao Chu, Wang Zhong dong. The track analysis of typhoon "Aere"(2004) and super typhoon "Gloria"(1963)[J]. Guangdong Meteorology, 2011, 33(3): 20 - 26. (in Chinese)
- [9] Clarke B L. A calculus of individuals based on connection[J]. Notre Dame Journal of Formal Logic, 1981, 23(3): 204 - 218.
- [10] Freksa C. Temporal reasoning based on semi-intervals [J]. Artificial Intelligence, 1992, 54: 199 - 227.
- [11] 何会中, 程明虎, 周凤仙. 0302 号(鲸鱼)台风降水和水粒子空间分布的三维结构特征 [J]. 大气科学, 2006, 30(3): 492 - 502.
He Hui-Zhong, CHENG Ming-Hu, ZHOU Feng-Xian. 3D structure of rain and cloud hydrometeors for typhoon Kujira (0302). Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(3): 492 - 502. (in Chinese)
- [12] Clementini E, Di Felice P. A model for representing topological relationships among complex geometric features in spatial databases[J]. Information Sciences, 1996, 90(1 - 4): 121 - 136.

作者简介



李 健 男, 1981 年生, 讲师、博士。研究方向: 时空表示与推理、偏微分方程。
E-mail: liemperor@163.com



欧阳继红 女, 1964 年生, 教授、博导。研究方向: 知识工程与专家系统、空间推理和数据挖掘。
E-mail: ouyangjihong@yahoo.com.cn