

文章编号:1672-9331(2021)04-0061-13

# 基于 NE25IM 的带洞面目标之间拓扑关系研究

赵彬彬<sup>1,2</sup>, 王倩<sup>1</sup>, 汤鑫<sup>1</sup>, 张宏奎<sup>1</sup>, 唐忠立<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对 25 交模型未对带洞面目标的交集成分进行深入分析与精细表达, 导致其对带洞面目标边界之间复杂交互细节表达能力不足的问题, 提出了基于节点的扩展 25 交模型(node-based extended 25 intersection model, NE25IM)。在 25 交模型的基础上, 将带洞面目标之间交点、交线及交面的个数、节点贡献值和结点度等量化元素引入 NE25IM, 以扩展表达矩阵中的交集非空元素, 达到对带洞面目标之间拓扑关系精细化表达的目的。利用 NE25IM 描述了带洞面目标(包括带 1 个洞和 2 个洞的情况)之间相接、相交、覆盖和包含 4 种基本拓扑关系, 并分析了带洞面目标交集成分的计算过程。最后, 通过案例分析验证了 NE25IM 的优势和带洞面目标内洞的数目的变化规律的现实意义。结果表明: NE25IM 能更直接、精确地表达带洞面目标边界之间复杂的交互细节, 这说明带洞面目标内洞的数目差异导致的模型表达上的数值差异与洞的形状和数目有关, 且带洞面目标之间子集组合的表达差异因拓扑关系类型的不同而不同。

**关键词:** 带洞面目标; 25 交模型; 交集结点度; 洞的数目差异; 交互细节

**中图分类号:** P208

**文献标志码:** A

## Study on topological relationships between regions with holes based on NE25IM

ZHAO Bin-bin<sup>1,2</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, TANG Xin<sup>1</sup>, ZHANG Hong-kui<sup>1</sup>, TANG Zhong-li<sup>1</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,

Changsha 410114, China; 2. Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of Highway Geological Disaster Early Warning in Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** For the problem that the 25-intersection model(25IM) did not analyze and express the intersection components of the regions with holes well, which led to its insufficient ability to express the complex interaction details between the boundaries of regions with holes, a node-based extended 25-intersection model(NE25IM) was proposed. Based on the 25IM, quantitative elements such as the number of intersections, node contribution value and node degree were introduced into the NE25IM to expand the non-empty intersection elements in the expression matrix, so as to achieve the purpose of fine expression of topological relationships between regions with holes. The NE25IM was used to describe the four basic topological relationships, including meet, overlap, cover and contain, between regions

**收稿日期:** 2021-04-23

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41301404); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ3083); 长沙理工大学公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室开放基金资助项目(kfj160603)

**通讯作者:** 赵彬彬(1980—), 男, 副教授, 主要从事多源、多尺度地图数据不一致性探测与处理等方面的研究。

E-mail: zbb sir@163.com

with holes (including the cases with one hole and two holes), and the calculation process of the intersection components of regions with holes was analyzed. Finally, an example analysis was used to verify the advantages of the NE25IM and the practical significance of the change regulation of the number of holes in regions. The results shows that the NE25IM can express the complex interaction details between the boundaries of regions with holes more directly and accurately, which illustrates that the model expression numerical difference caused by the difference in the number of holes in regions with holes is related to the shape and number of holes, and expression differences of subset combinations between regions with holes vary with the types of topological relationships.

**Key words:** region with holes; 25-intersection model; intersection node degree; difference in number of holes; interaction detail

空间关系是空间数据组织、查询、分析和推理的基础<sup>[1]</sup>,空间关系理论一直是 GIS 相关学科关注的热点之一<sup>[2-3]</sup>。空间关系可分为拓扑关系、度量关系和顺序关系 3 类。就拓扑关系而言,已有不少基本模型,如 4 交模型<sup>[4]</sup>、9 交模型<sup>[5]</sup>、区域链接法<sup>[6]</sup>等。这些模型多适用于简单目标之间拓扑关系的表达。对于复杂空间对象(如带洞面目标)之间的拓扑关系,则有扩展 9 交模型<sup>[3,7-8]</sup>、4 元组模型<sup>[9]</sup>、16 交模型<sup>[10]</sup>和 25 交模型(25-intersection model, 25IM)<sup>[11]</sup>等。这些模型的特点是基于点集拓扑理论将带洞面目标分解成多个简单子集或点集,再利用已知对象或者点集间的关系来描述拓扑关系<sup>[12]</sup>。例如,欧阳继红等<sup>[3]</sup>将 9 交矩阵的元素扩展为二进制编码,证明其表达能力强于 9 交模型;沈敬伟等<sup>[11]</sup>基于点集拓扑理论重新定义了带洞面目标元素的含义,进而形成了 25IM;王占刚等<sup>[12]</sup>通过定义两个 25 交关系矩阵操作算子,建立整体面域与分解区域间拓扑关系的计算方法,实现了拓扑关系描述模型之间的转换;周晓光等<sup>[13]</sup>基于目标整体交、差结果的欧拉数三维层次模型,引入结点度区分线/面交线细分的拓扑关系类型;陈占龙等<sup>[14]</sup>顾及带洞面目标的交互细节,利用元拓扑关系组合对带洞面目标的拓扑关系进行精细化表达;SHEN 等<sup>[15]</sup>用提出的 16 交模型描述了带洞球形空间目标之间的拓扑关系。综上所述,对带洞面目标之间拓扑关系的描述已有大量的研究<sup>[16-20]</sup>,且描述程度亦趋于精细,但这些成果对带洞面目标边界可能发生的复杂交互的描述能力有限<sup>[21]</sup>。例如,带洞面目标边界相交的成分可为点、线及其组合,现有的模型尚不能对它们进

行区分表达。

因此,本研究考虑了带洞面目标的边界特点和拓扑相交的细节,基于 25IM,引入带洞面目标之间交点、交线及交面的个数、节点贡献值和结点度等量化元素,实现了对拓扑关系的精细化表达。最后,针对相接、相交、覆盖和包含 4 种基本拓扑关系,分析了带洞面目标内洞的数目差异及对应表达模型的变化规律。

## 1 带洞面目标及其拓扑关系

### 1.1 定义

带洞面目标属于二维空间中的复杂对象,EGENHOFFER 等<sup>[21]</sup>认为带洞面目标的定性模型是由 5 个不同且互斥的部分构成,如图 1 所示。在图 1 中, $B^0$  为面目标  $B$  的内部, $B^{-1}$  为面目标  $B$  的内部区域,而且填充  $B$  中的洞, $B^{-0}$  是  $B$  的外部区域, $\partial_1 B$  是  $B$  的内边界,分割  $B^0$  和  $B^{-1}$ , $\partial_0 B$  是  $B$  的外边界,分割  $B^0$  和  $B^{-0}$ 。

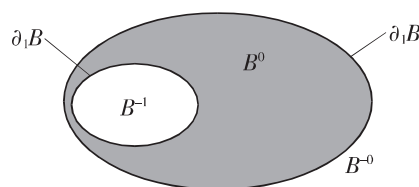


图 1 带洞面目标的定性模型

Fig. 1 Qualitative model of a region with holes

### 1.2 25IM

沈敬伟等<sup>[11]</sup>将带洞面目标的 5 个拓扑子集分别称为内部、外边界、内边界、外边界外部和内边界外部,并将两个带洞面目标  $A$  和  $B$  的 5 个拓扑子集两两之间的交集表示成一个  $5 \times 5$  的矩阵,提出了 25IM,即:

$$R_{25IM}(A, B) = \begin{bmatrix} A^0 \cap B^0 & A^0 \cap \partial_0 B & A^0 \cap \partial_1 B & A^0 \cap B^{-0} & A^0 \cap B^{-1} \\ \partial_0 A \cap B^0 & \partial_0 A \cap \partial_0 B & \partial_0 A \cap \partial_1 B & \partial_0 A \cap B^{-0} & \partial_0 A \cap B^{-1} \\ \partial_1 A \cap B^0 & \partial_1 A \cap \partial_0 B & \partial_1 A \cap \partial_1 B & \partial_1 A \cap B^{-0} & \partial_1 A \cap B^{-1} \\ A^{-0} \cap B^0 & A^{-0} \cap \partial_0 B & A^{-0} \cap \partial_1 B & A^{-0} \cap B^{-0} & A^{-0} \cap B^{-1} \\ A^{-1} \cap B^0 & A^{-1} \cap \partial_0 B & A^{-1} \cap \partial_1 B & A^{-1} \cap B^{-0} & A^{-1} \cap B^{-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

25IM 虽能较准确地描述带洞面目标之间的拓扑关系,但精细化表达带洞面目标之间拓扑关系的能力有限,即无法区分图 2(a)和 2(b)所示的两种带洞面目标之间的拓扑关系,其模型表达均如图 2(c)所示。

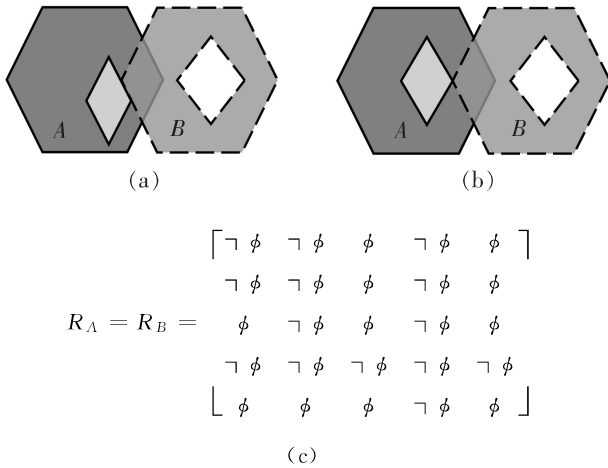


图 2 两个细节不同的拓扑相交情形及其 25IM 表达

Fig. 2 Two cases of topological intersection with different details and their 25IM expressions

由此可见,25IM 仅限于粗略地表达拓扑关系的类别(如相交、相接关系等),对于每个类别的细分情形(如交集为点、线、面或其组合以及面目标内部洞的个数等)则无能为力。

## 2 带洞面目标交集成分的特征及描述

相对于简单面目标而言,带洞面目标明显更复杂。为了详细、精确地描述带洞面目标之间复杂的拓扑关系,需从交集细节入手引入必要的元素。为此,需在 25IM 的基础上考虑交集成分的特征以实现多元化的表达。

### 2.1 拓扑子集的交集特征

分析 25IM 中的各元素可知,带洞面目标 A 和 B 的 5 个拓扑子集两两之间的交集可能为点、线、面中的一种,即各元素的维数各不相同,包括 0 维、1 维和 2 维 3 种情形,如式 2 所示。式中,  $n, l, a$  分别表示点、线、面(即 node, line, area),当外边

界与外边界、外边界与内边界、内边界与内边界相交时,交集有点、线或点线组合 3 种情况。由于 2 维空间所能表达的目标维数不高于空间本身的维数,25IM 对带洞面目标拓扑子集之交集的表达也止步于此,这亦是其局限性所在。

$$R_{25IM}(A, B) = \begin{bmatrix} a & l & l & a & a \\ l & n \text{ 或 } l & n \text{ 或 } l & l & l \\ l & n \text{ 或 } l & n \text{ 或 } l & l & l \\ a & l & l & a & a \\ a & l & l & a & a \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.2 基于节点的 25IM 扩展

以 25IM 为基础,在矩阵的非空交集元素上分别引入一个上标和下标,写作  $\neg \phi_{n^*(D_i, \deg(P_1)) \dots}^{(C_A, C_B)}$ ,并称其为基于节点的扩展 25 交模型(node-based extended 25-intersection model, NE25IM)。其中  $C_A, C_B$  分别为两目标的边界节点对交集部分的贡献值;  $D_i (i = 0, 1, 2)$  表示交集的维数,取值 0, 1, 2 分别表示结果为 0 维(点), 1 维(线), 2 维(面);  $\deg(P_1), \deg(P_2) \dots$  为交集的结点度(与交点关联的边数)<sup>[12]</sup>;  $n^*$  表示具有相同维数、结点度的交集个数。

引入交集特征后,NE25IM 可分别用点、线、面 3 种交集成分简化后进行表达:

$$R_{(n)} : \neg \phi_{n^*(D_0, \deg(P_1)), n^*(D_0, \deg(P_2)) \dots}^{(C_A, C_B)} \quad (3)$$

$$R_{(l)} : \neg \phi_{n^*(D_1, \deg(P_1), \deg(P_2)), n^*(D_1^0) \dots}^{(C_A, C_B)} \quad (4)$$

$$R_{(a)} : \neg \phi_{n^*(D_2)}^{(C_A, C_B)} \quad (5)$$

式中:  $D_1^0$  表示 1 条闭合线。

在图 3(a)和 3(b)中,两带洞面目标之间拓扑关系的差异在于 A 的内边界与 B 的外边界相接的交集元素不同。图 3(a)中的交集元素为一条线段,线段两端的结点度为 3,节点贡献值为 (1, 1),故  $\partial_1 A \cap \partial_0 B = \neg \phi_{1^*(1, 3, 3)}^{(1, 1)}$ ;而图 3(b)中的交集元素为一个点,相交点的结点度为 4,节点贡献值为 (1, 1),故  $\partial_1 A \cap \partial_0 B = \neg \phi_{1^*(0, 4)}^{(1, 1)}$ 。此外,图 3(a)和 3(b)中  $\partial_1 A \cap B^{-0}$  结点度的表示亦有差别,这

与上文的结论一致。综上所述,在带洞面目标之间拓扑关系的表达能力方面,NE25IM 比 25IM 更强。

(文中图上未标示  $A, B$  的,则实线包围的深灰色区域为面目标  $A$ ,虚线所包围的浅灰色区域为面目标  $B$ )。表 1 为带洞面目标不同相接关系的对比。

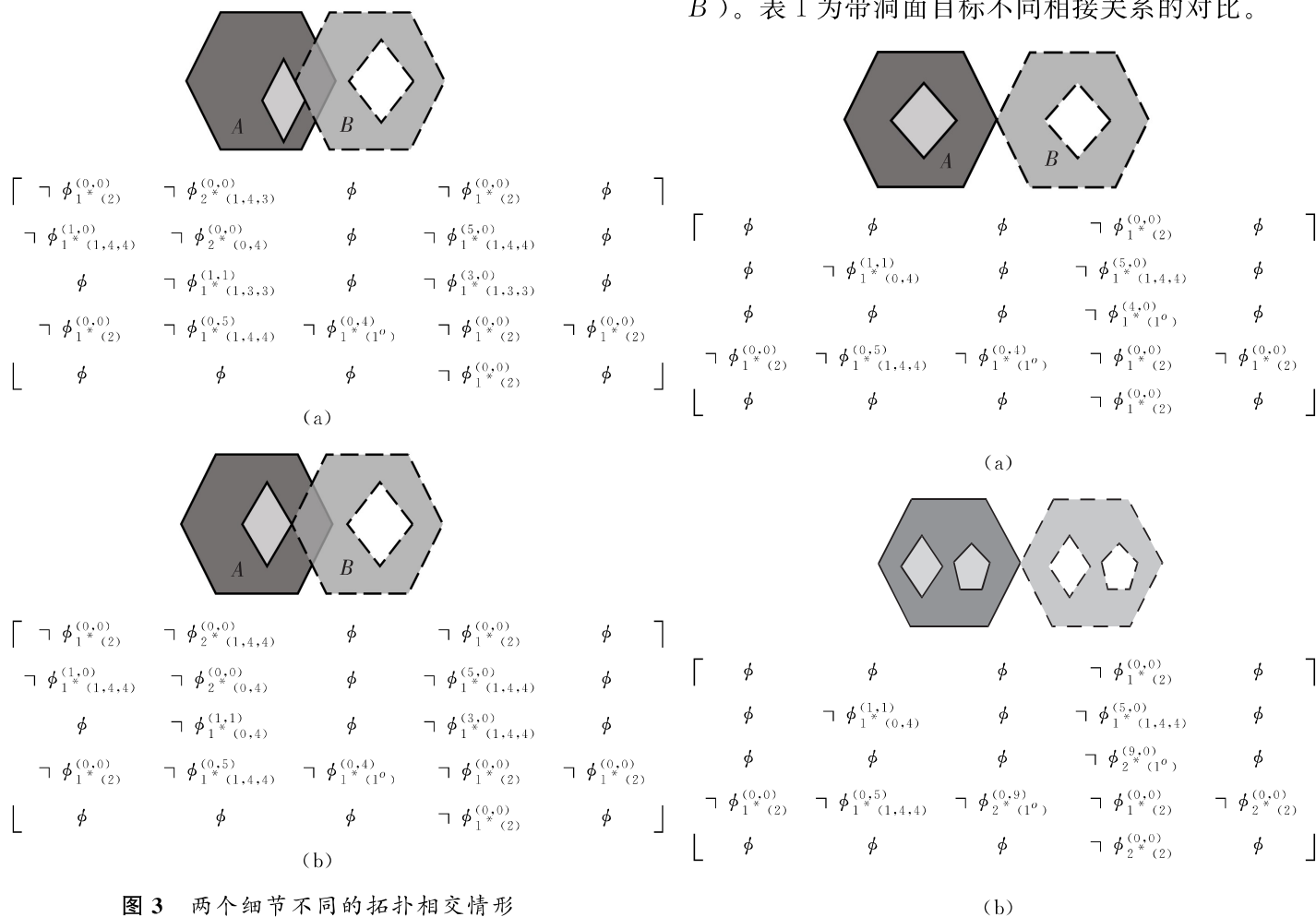


图 3 两个细节不同的拓扑相交情形

及其 NE25IM 表达

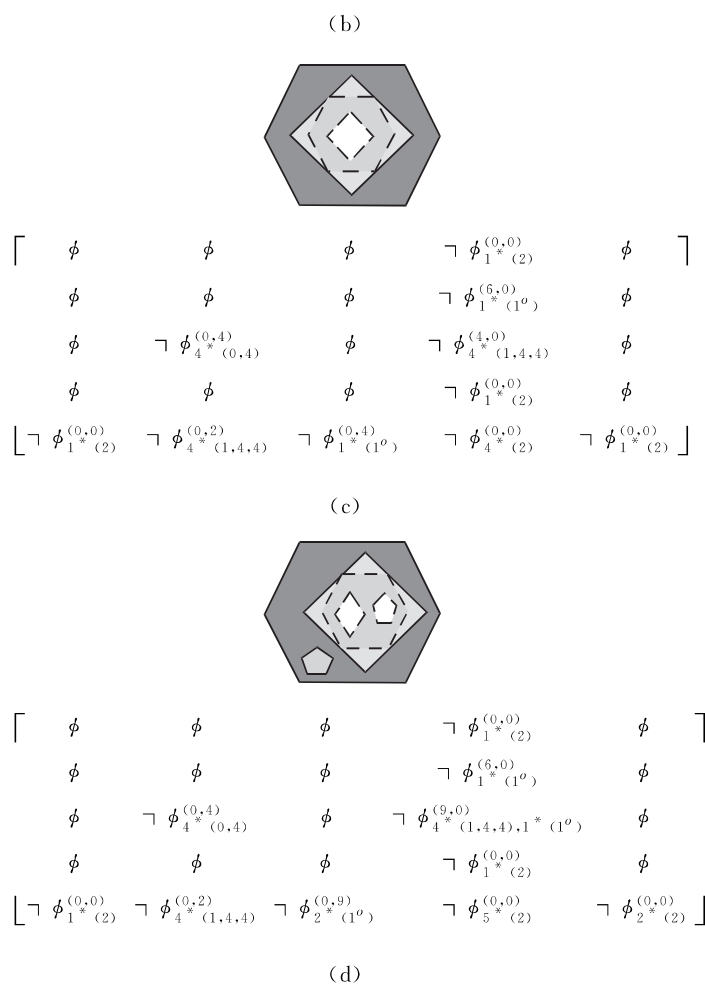
Fig. 3 Two cases of topological intersection with different details and their NE25IM expressions

### 3 基于 NE25IM 的带洞面目标拓扑关系的表达与分析

NE25IM 可以细致、准确地描述带洞面目标之间的拓扑关系。设面目标内部的洞的数目为  $n$  ( $n \geq 1$ ),若洞的数目发生变化,面目标拓扑关系的表达也会随之发生改变。根据 NE25IM 及带洞面目标的性质,本节分别讨论拓扑相接、相交、覆盖和包含 4 种关系。为方便起见,用两个带洞面目标(分别包含 1 个洞和 2 个洞)作对比分析,并用 NE25IM 进行表达与描述。

#### 3.1 相接关系

在空间上接触的两个带洞面目标  $A, B$  的关系被称为相接关系,NE25IM 可以区分 3 种不同类型的相接关系。图 4 所示为 3 组(每两幅图为一组)带洞面目标拓扑相接类型及其 NE25IM 表达



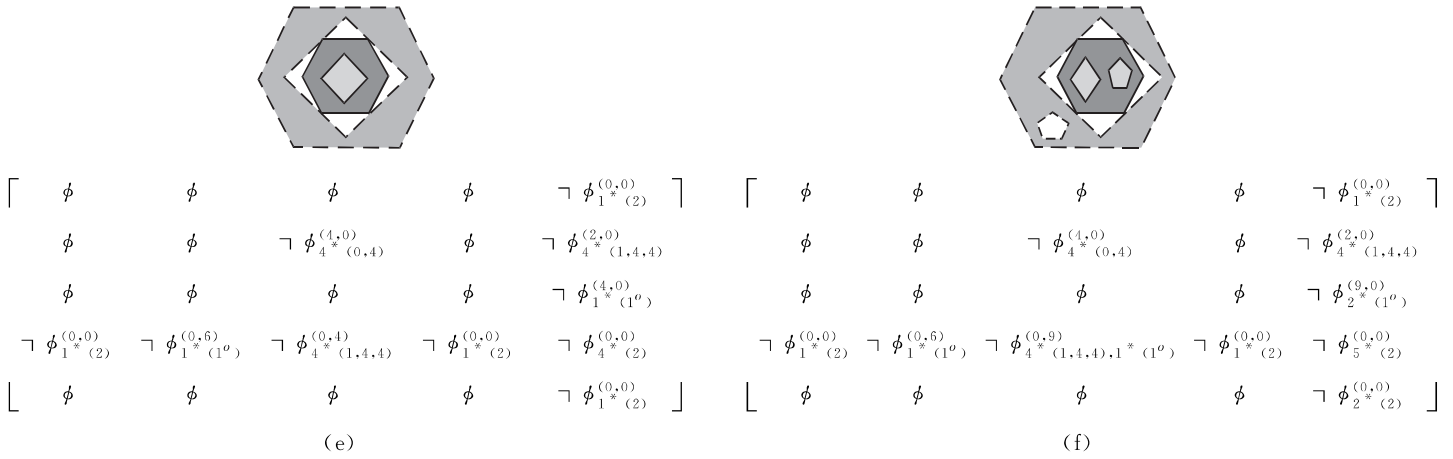


图 4 3 组拓扑相接关系及其 NE25IM 表达

Fig. 4 Three groups of topological meet relationships and their NE25IM expressions

表 1 不同拓扑相接关系的对比

Table 1 Comparison of different topological meet relationships

拓扑表达式	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)	图 4(e)	图 4(f)
① $\partial_0 A \cap \partial_0 B$	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	—	—	—	—
② $\partial_1 A \cap \partial_0 B$	—	—	$\neg \phi_{4*}^{(0,4)}(0,4)$	$\neg \phi_{4*}^{(0,4)}(0,4)$	—	—
③ $\partial_0 A \cap \partial_1 B$	—	—	—	—	$\neg \phi_{4*}^{(4,0)}(0,4)$	$\neg \phi_{4*}^{(4,0)}(0,4)$
④ $\partial_1 A \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(9,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{4*}^{(4,0)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{4*}^{(9,0)}(1,4,4), 1^*(1^0)$	—	—
⑤ $A^{-0} \cap \partial_1 B$	$\neg \phi_{1*}^{(0,4)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,9)}(1^0)$	—	—	$\neg \phi_{4*}^{(0,4)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{4*}^{(0,9)}(1,4,4), 1^*(1^0)$
⑥ $A^{-0} \cap B^{-1}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	—	—	$\neg \phi_{4*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{5*}^{(0,0)}(2)$
⑦ $A^{-1} \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{4*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{5*}^{(0,0)}(2)$	—	—
⑧ $A^{-1} \cap \partial_1 B$	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(0,4)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,9)}(1^0)$	—	—
⑨ $A^{-1} \cap B^{-1}$	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$
⑩ $\partial_1 A \cap B^{-1}$	—	—	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(9,0)}(1^0)$

在第 1 组的图 4(a)和 4(b)中,拓扑相接的  $A, B$  两带洞面目标的外边界相交;在第 2 组的图 4(c)和 4(d)中,  $A$  的内边界与  $B$  的外边界相交;在第 3 组的 4(e)和 4(f)中,  $A$  的外边界与  $B$  的内边界相交。表 1 中的表达式①~③分别表达了这 3 种拓扑相接的相交成分,可以用来区分不同类型的相接关系。

与图 4(a), 4(c)和 4(e)相比,在图 4(b), 4(d)和 4(f)中分别增加了一个五边形的洞。分析表 1 中的表达式④~⑩可以发现,这 3 组拓扑关系表达的数值变化是一样的,只是数值变化的位置不同。在第 1 组的图 4(b)中,  $A, B$  的内边界与外边界外部的交集各增加了 1 条闭合线,且有 5 个节点,故  $\partial_1 A \cap B^{-0} = \neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1^0)$ ,  $A^{-0} \cap \partial_1 B = \neg \phi_{2*}^{(9,0)}(1^0)$ ,  $C_A$  的值由 4 变为 9,  $n$  的值由 1 变为 2;  $A, B$  的外边界外部与内边界外部的交集各增

加了 1 个面,即  $A^{-0} \cap B^{-1} = \neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$ ,  $A^{-1} \cap B^{-0} = \neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$ ,  $n$  的值由 1 变为 2。在第 2 组的图 4(d)中,  $A$  的内边界与  $B$  的外边界外部、 $A$  的内边界外部与  $B$  的内边界的交集各增加了 1 条含 5 个节点的闭合线,故  $\partial_1 A \cap B^{-0} = \neg \phi_{4*}^{(9,0)}(1,4,4), 1^*(1^0)$ ,  $A^{-1} \cap \partial_1 B = \neg \phi_{2*}^{(0,9)}(1^0)$ ;  $A$  的内边界外部与  $B$  的外边界外部、内边界外部的交集各增加了 1 个面,故  $A^{-1} \cap B^{-0} = \neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$ ,  $A^{-1} \cap B^{-1} = \neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$ 。第 3 组与第 2 组的相接关系刚好相反,所以图 4(f)中的拓扑关系矩阵与图 4(d)中的互为转置。

通过分析表 1 可知,当带洞面目标之间为相接关系时,则洞的数目只会影响带洞面目标的内边界、外边界外部和内边界外部 3 个子集之间的组合表达。

### 3.2 相交关系

带洞面目标  $A$  和  $B$  的内部相交,且相交的结



果不等同于其中的任一对象,则  $A, B$  的关系为相交关系。图 5 所示为 4 组(每两幅图为一组)带洞

面目标的拓扑相交关系及其 NE25IM 表达。表 2 为带洞面目标不同相交关系的对比。

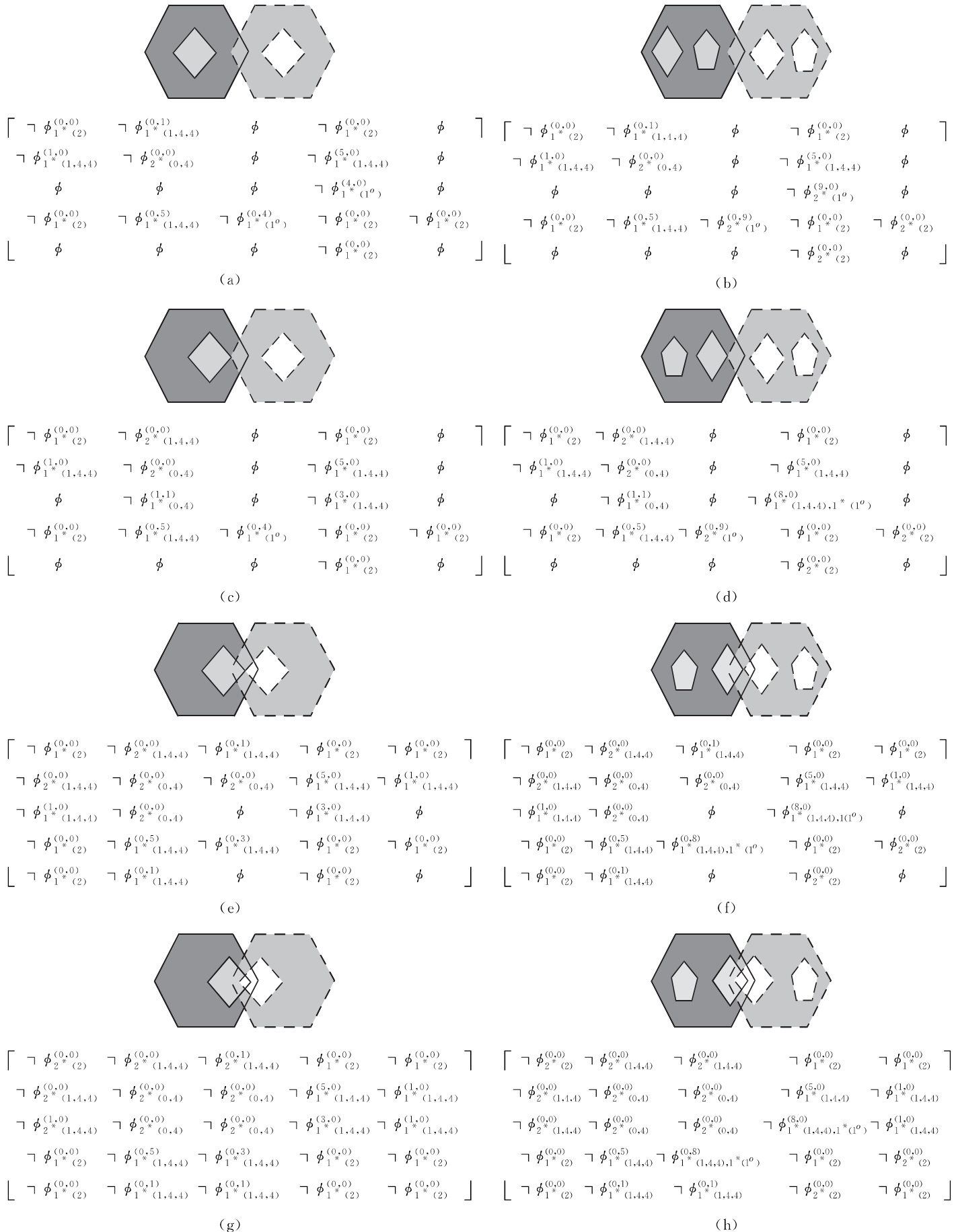


图 5 4 组拓扑相交关系及其 NE25IM 表达

Fig. 5 Four groups of topological overlap relationships and their NE25IM expressions

表 2 不同拓扑相交关系的对比

Table 2 Comparison of different topological overlap relationships

拓扑表达式	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)	图 5(d)	图 5(e)	图 5(f)	图 5(g)	图 5(h)
① $A^0 \cap B^0$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$
② $\partial_1 A \cap \partial_0 B$	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(0,4)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(0,4)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(0,4)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(0,4)$
③ $A^{-1} \cap B^0$	—	—	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$
④ $A^0 \cap B^{-1}$	—	—	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$
⑤ $A^{-1} \cap B^{-1}$	—	—	—	—	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$
⑥ $\partial_1 A \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(3,0)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(8,0)}(1,4,4), 1^*(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(3,0)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(8,0)}(1,4,4), 1^*(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(3,0)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(8,0)}(1,4,4), 1^*(1^0)$
⑦ $A^{-0} \cap \partial_1 B$	$\neg \phi_{1*}^{(0,4)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,9)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,4)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,9)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,3)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,8)}(1,4,4), 1^*(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,3)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,8)}(1,4,4), 1^*(1^0)$
⑧ $A^{-0} \cap B^{-1}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$
⑨ $A^{-1} \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$

在第 1 组的图 5(a)和 5(b)中,拓扑相交的  $A, B$  两带洞面目标在且仅在内部相交;在第 2 组的图 5(c)和 5(d)中,除了  $A, B$  两目标在内部相交外,  $A$  的内边界与  $B$  的外边界也相交于一点;在第 3 组的图 5(e)和 5(f)中,  $A, B$  两目标内部与内边界外部相交;在第 4 组的图 5(g)和 5(h)中,  $A, B$  两目标的内部与内边界外部相交,且内边界外部也相交。表 2 中的表达式①~⑤分别表达了 4 种相交关系的主要交集成分,可以用于区分不同类型的拓扑相交。

分析表 2 中的表达式⑥~⑨可知,在第 1 组的图 5(b)中,  $A, B$  的内边界与外边界外部的交集各增加了 1 条闭合线,且有 5 个节点,故  $\partial_1 A \cap B^{-0} = \neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1^0)$ ,  $A^{-0} \cap \partial_1 B = \neg \phi_{2*}^{(0,9)}(1^0)$ ,  $C_A, C_B$  的值由 4 变为 9,  $n$  的值由 1 变为 2。且  $A, B$  的内边界外部与外边界外部的交集各增加了 1 个面,即  $A^{-0} \cap B^{-1} = \neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$ ,  $A^{-1} \cap B^{-0} =$

$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$ ,  $n$  的值由 1 变为 2。第 2 组到第 4 组的情况与第 1 组基本相同,不同的是在第 2 组的图 5(d)中,  $A$  的内边界与  $B$  的外边界的节点相交,故  $\partial_1 A \cap B^{-0} = \neg \phi_{1*}^{(8,0)}(1,4,4), 1^*(1^0)$ ,  $C_A$  的值由 3 变为 8;第 3 组与第 4 组的变化一致,  $A, B$  的内边界外部与其他部分相交,故  $\partial_1 A \cap B^{-0} = \neg \phi_{1*}^{(8,0)}(1,4,4), 1^*(1^0)$ ,  $A^{-0} \cap \partial_1 B = \neg \phi_{1*}^{(0,8)}(1,4,4), 1^*(1^0)$ 。

由表 2 不难发现,当带洞面目标之间为相交关系时,则洞的数目只会影响带洞面目标的内边界、外边界外部和内边界外部 3 个子集之间的组合表达。

### 3.3 覆盖关系

带洞面目标  $A$  的内部包含  $B$  的内部,且  $A$  的边界与  $B$  的边界相交,但  $A$  不等于  $B$ ,则  $A, B$  的关系为覆盖关系。表 3 为带洞面目标不同覆盖关系的对比。图 6 所示为 4 组(每两幅图为一组)带洞面目标的拓扑覆盖关系及其 NE25IM 表达。

表 3 不同拓扑覆盖关系的对比

Table 3 Comparison of different topological cover relationships

拓扑表达式	图 6(a)	图 6(b)	图 6(c)	图 6(d)	图 6(e)	图 6(f)	图 6(g)	图 6(h)
① $\partial_0 A \cap \partial_0 B$	$\neg \phi_{1*}^{(1,3)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,3)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,3)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,3)}(1,3,3)$	—	—	—	—
② $\partial_1 A \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(9,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1,4,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(4,0)}(1,4,4)$
③ $A^{-1} \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$
④ $\partial_1 A \cap \partial_0 B$	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$	$\neg \phi_{1*}^{(1,1)}(0,4)$
⑤ $\partial_1 A \cap \partial_1 B$	—	—	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$
⑥ $\partial_1 A \cap B^{-1}$	—	—	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(7,0)}(1,3,3), 1^*(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(2,0)}(1,3,3)$
⑦ $A^{-1} \cap B^{-1}$	—	—	—	—	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$
⑧ $A^0 \cap \partial_1 B$	$\neg \phi_{1*}^{(0,4)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,9)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,4)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,9)}(1,3,3), 1^*(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,4)}(1,3,3)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,9)}(1,3,3), 1^*(1^0)$
⑨ $A^0 \cap B^{-1}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$

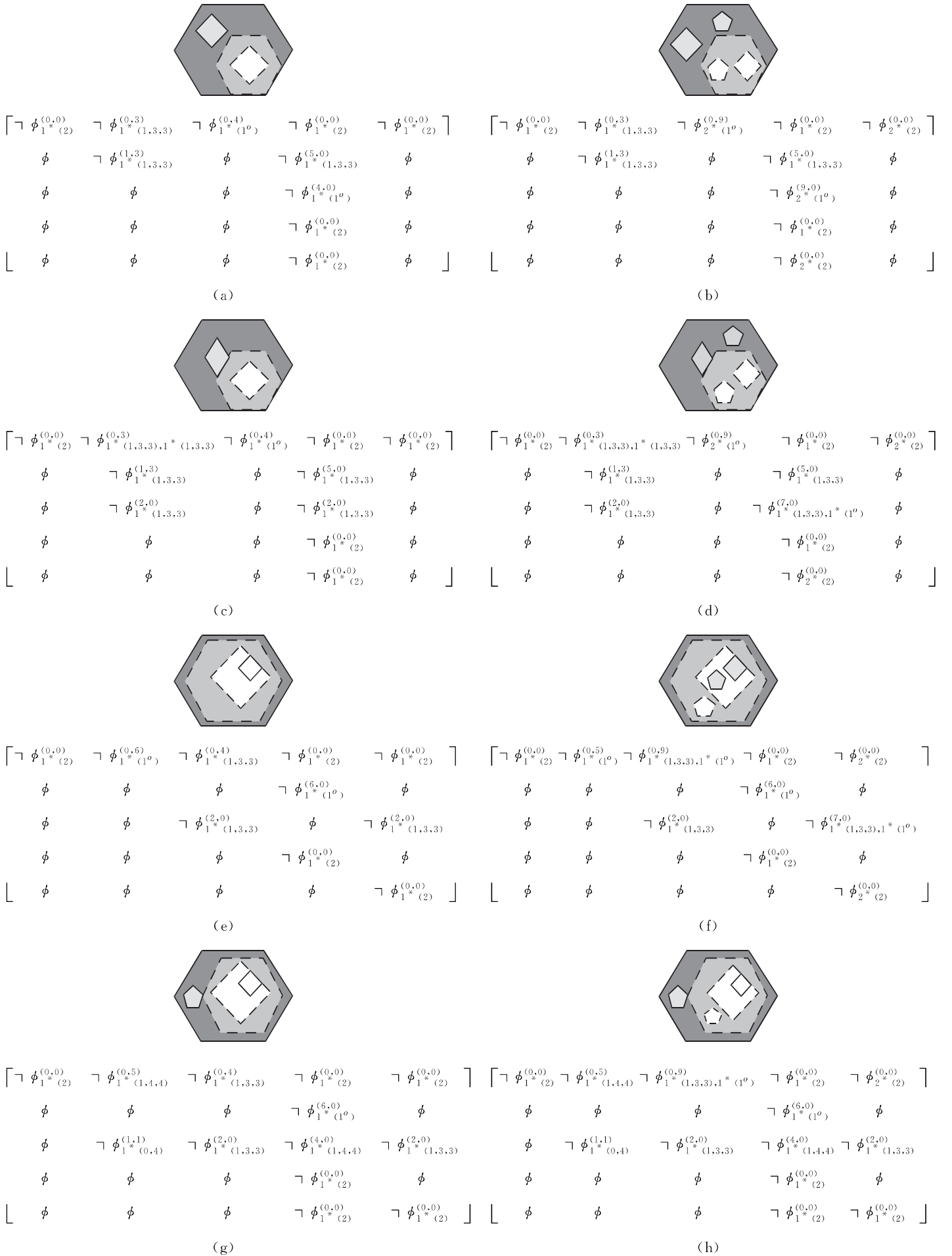


图6 4组拓扑覆盖关系及其NE25IM表达

Fig. 6 Four groups of topological cover relationships and their NE25IM expressions



在第 1 组的图 6(a)和 6(b)中,  $A$  的外边界与  $B$  的外边界相交于 1 条折线,且  $A, B$  有 1 个节点重合;第 2 组除了具有第 1 组的特征外,  $A$  的内边界与  $B$  的外边界相交于 1 条折线;在第 3 组的图 6(e)和 6(f)中,  $A$  的内边界与  $B$  的内边界相交于 1 条折线;在第 4 组的图 6(g)和 6(h)中,带洞面目标  $A$  带双洞,且 1 个洞的内边界与  $B$  的外边界相交于 1 点,另 1 个洞的内边界与  $B$  的内边界相交于 1 条折线。表 3 中的表达式①~⑩分别表达了 4 种覆盖关系的主要交集成分,可以用于区分不同类型的拓扑覆盖。

与前面两种拓扑关系类型相比,带洞面目标的拓扑覆盖关系类型发生了一些改变。分析表 3 可知,在第 1 组的图 6(b)中,  $A$  的内部与  $B$  的内边界的交集增加了 1 条闭合线,故  $A^0 \cap \partial_1 B = \neg \phi_{2^*(1^0)}^{(0,9)}$ ,  $C_B$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内边界与  $B$  的外边界外部也增加了一条闭合线,故  $\partial_1 A \cap B^{-0} = \neg \phi_{2^*(1^0)}^{(9,0)}$ ,  $C_A$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内部与  $B$  的内边界外部、 $A$  的内边界外部与  $B$  的外边界外部各增加了 1 个面,故  $A^0 \cap B^{-1} = \neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$ ,  $A^{-1} \cap B^{-0} = \neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$ ,  $n$  的值由 1 变为 2。第 2 组中图 6(d)的变化与第 1 组一致。在第 3 组的图 6(f)中,  $A$  的内部与  $B$  的内边界的交集增加了 1 条闭合线,故  $A^0 \cap \partial_1 B = \neg \phi_{1^*(1,3,3),1^*(1^0)}^{(0,9)}$ ,  $C_B$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内边界与  $B$  的内边界外部也增加了 1 条闭合线,故  $\partial_1 A \cap B^{-1} = \neg \phi_{1^*(1,3,3),1^*(1^0)}^{(7,0)}$ ,  $C_B$  的值由 2 变为 7;  $A$  的内部、内边界外部与  $B$  的内边界外部各增加了 1 个面,故  $A^0 \cap B^{-1} = \neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$ ,  $A^{-1} \cap B^{-1} = \neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$ 。第 4 组中图 6(h)的变化不大,  $A$  的内部与  $B$  的内边界的交集增加了 1 条闭合线,故  $A^0 \cap \partial_1 B = \neg \phi_{1^*(1,3,3),1^*(1^0)}^{(0,9)}$ ,  $C_B$  的值

由 4 变为 9;  $A$  的内部与  $B$  的内边界外部的交集增加了 1 个面,即  $A^0 \cap B^{-1} = \neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$ 。

由表 3 可知,当带洞面目标为覆盖关系时,则洞的数目会影响带洞面目标的内部、内边界、外边界外部和内边界外部 4 个子集之间的组合表达。

### 3.4 包含关系

带洞面目标  $A$  完全包含  $B$ , 则  $A, B$  的关系为包含关系。基于 NE25IM, 可以区分 3 种不同类型的包含关系。表 4 为带洞面目标不同包含关系的对比。图 7 所示为 3 组(每两幅图为一组)带洞面目标的拓扑包含关系及其 NE25IM 表达。

在第 1 组的图 7(a)和 7(b)中,  $A$  的洞与  $B$  并列, 即  $A$  的内部、 $B$  的外边界外部与其他部分的交集都有值; 在第 2 组的图 7(c)和 7(d)中,  $A$  包含  $B$ , 但  $B$  的洞包含  $A$  的洞; 第 3 组的图 7(e)和 7(f)是在第 2 组的基础上, 在  $A$  的内部增加了 1 个洞, 且与  $A$  并列, 其表达式是第 1 组和第 2 组的结合。分析表 3 可知, 表达式①~⑥分别表达了 4 种覆盖关系的主要交集成分, 且可以用于区分不同类型的拓扑包含关系。

经过对比可知, 在第 1 组的图 7(b)中,  $A$  的内部与  $B$  的内边界的交集增加了 1 条闭合线, 故  $A^0 \cap \partial_1 B = \neg \phi_{2^*(1^0)}^{(0,9)}$ ,  $C_B$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内边界与  $B$  的外边界外部也增加了 1 条闭合线, 故  $\partial_1 A \cap B^{-0} = \neg \phi_{2^*(1^0)}^{(9,0)}$ ,  $C_A$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内部与  $B$  的内边界外部、 $A$  的内边界外部与  $B$  的外边界外部各增加了 1 个面, 故  $A^0 \cap B^{-1} = \neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$ ,  $A^{-1} \cap B^{-0} = \neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$ ,  $n$  的值由 1 变为 2。在第 2 组的图 7(d)中,  $A$  的内部与  $B$  的内边界的交集增加了 1 条闭合线, 故  $A^0 \cap \partial_1 B = \neg \phi_{2^*(1^0)}^{(0,9)}$ ,  $C_B$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内边界与  $B$

表 4 不同拓扑包含关系的对比

Table 4 Comparison of different topological contain relationships

拓扑表达式	图 7(a)	图 7(b)	图 7(c)	图 7(d)	图 7(e)	图 7(f)
① $\partial_1 A \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(4,0)}$	$\neg \phi_{2^*(1^0)}^{(9,0)}$	—	—	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(5,0)}$	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(5,0)}$
② $A^{-1} \cap B^{-0}$	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$	—	—	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$
③ $\partial_1 A \cap B^{-1}$	—	—	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(4,0)}$	$\neg \phi_{2^*(1^0)}^{(9,0)}$	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(4,0)}$	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(4,0)}$
④ $A^{-1} \cap B^{-1}$	—	—	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$
⑤ $A^0 \cap \partial_1 B$	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(0,4)}$	$\neg \phi_{2^*(1^0)}^{(0,9)}$	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(0,4)}$	$\neg \phi_{2^*(1^0)}^{(0,9)}$	$\neg \phi_{1^*(1^0)}^{(0,4)}$	$\neg \phi_{2^*(1^0)}^{(0,9)}$
⑥ $A^0 \cap B^{-1}$	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{1^*(2)}^{(0,0)}$	$\neg \phi_{2^*(2)}^{(0,0)}$

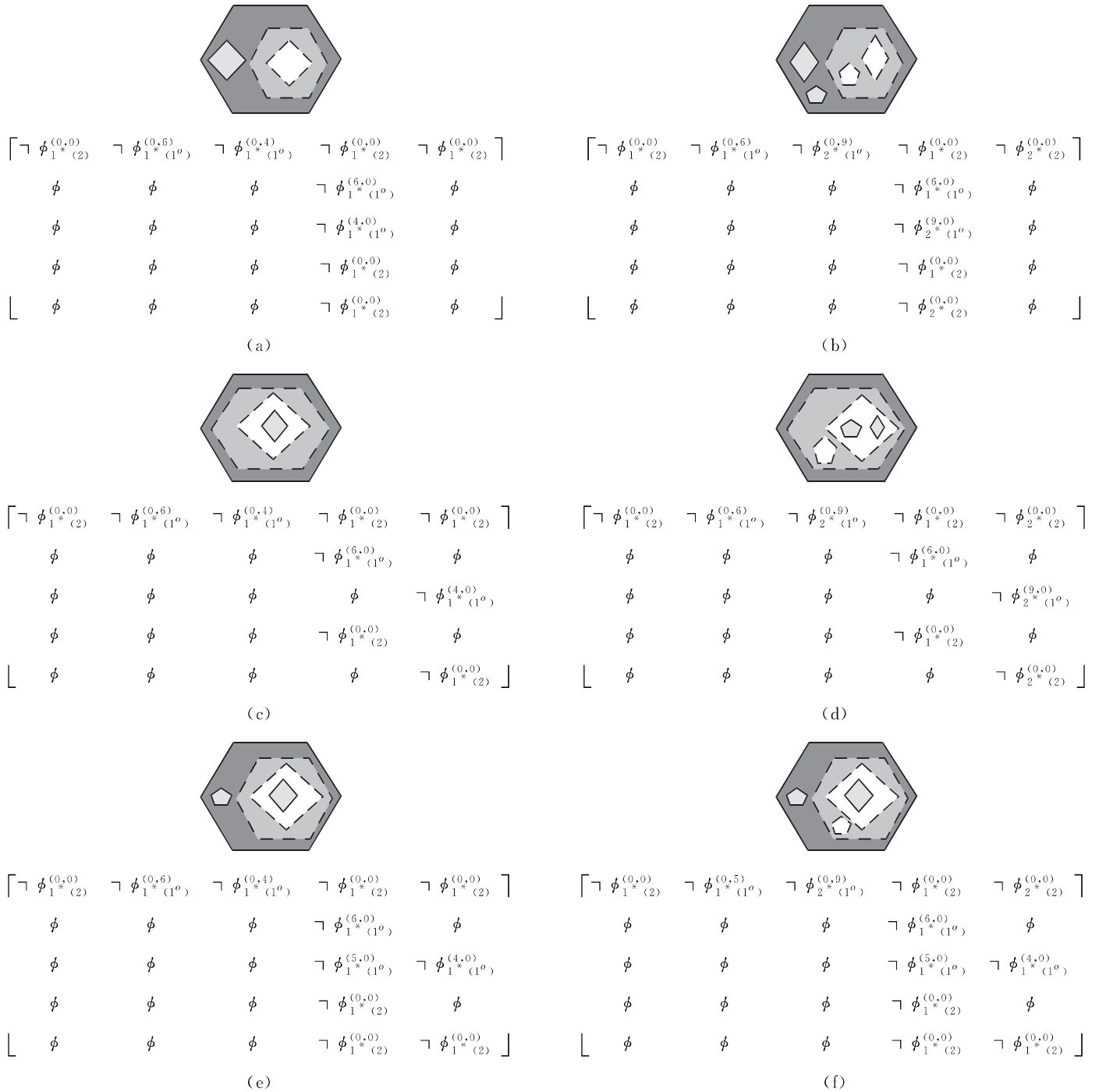


图 7 3 组拓扑包含关系及其 NE25IM 表达

Fig. 7 Three groups of topological contain relationships and their NE25IM expressions

的内边界外部也增加了 1 条闭合线,故  $\partial_1 A \cap B^{-1} = \neg \phi_{2*}^{(9,0)}_{(1^\circ)}$ ,  $C_A$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内部、内边界外部与  $B$  的内边界外部各增加了 1 个面。在第 3 组的图 7(f) 中,  $A$  的内部与  $B$  的内边界的交集增加了 1 条闭合线,故  $A^0 \cap \partial_1 B = \neg \phi_{2*}^{(0,9)}_{(1^\circ)}$ ,  $C_B$  的值由 4 变为 9;  $A$  的内部与  $B$  的内边界外部的交集增加了 1 个面,即  $A^0 \cap B^{-1} = \neg \phi_{2*}^{(0,0)}_{(2)}$ 。

由表 4 可知,当带洞面目标之间为包含关系时,洞的数目只会影响带洞面目标的内部、内边界、外边界外部和内边界外部 4 个子集之间的组合表达。

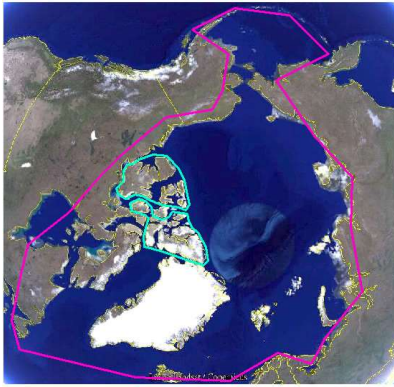
## 4 应用分析

自然环境和人类社会中诸多地理实体可抽象为带洞面目标。图 8 所示分别为 1980 年 12 月、2000 年 12 月和 2016 年 12 月 3 个不同时期北冰洋冰川的分布影像,图中玫红色线的内部为北冰洋区域,绿色线的内部为岛群区域,红色线的内部为冰川消融后露出的岛屿,北冰洋和两个岛群都是带洞面目标。不难发现,随着时间的推移,冰川

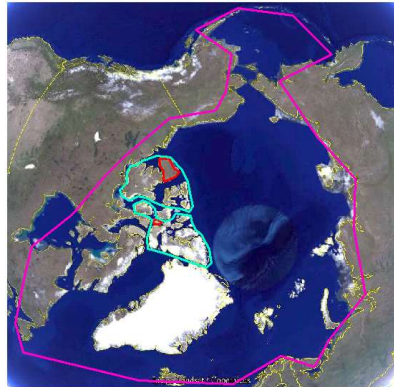
消融后露出的岛屿数目在不断增加,带洞面目标之间的拓扑关系也随之发生了变化。

图 9 所示为 2000,2016 年北冰洋岛群的冰川变化,其 25IM 表达式为:

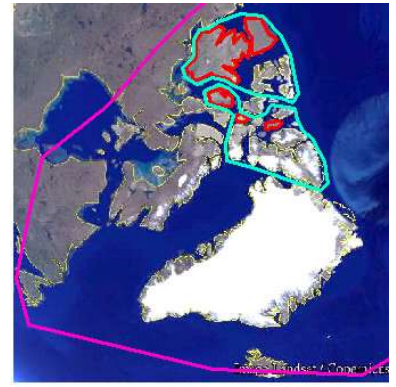
$$R_{2000}(A, I_1) = R_{2016}(A, I_1) = R_{2000}(A, I_2) = R_{2016}(A, I_2) = \begin{bmatrix} \neg \phi & \neg \phi & \neg \phi & \neg \phi & \neg \phi \\ \phi & \phi & \phi & \neg \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \neg \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \neg \phi & \phi \\ \lfloor \phi & \phi & \phi & \neg \phi & \phi \rfloor \end{bmatrix} \quad (6)$$



(a) 1980 年 12 月



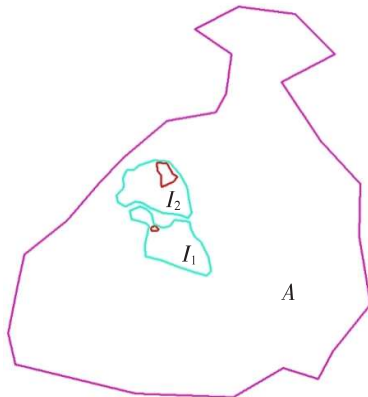
(b) 2000 年 12 月



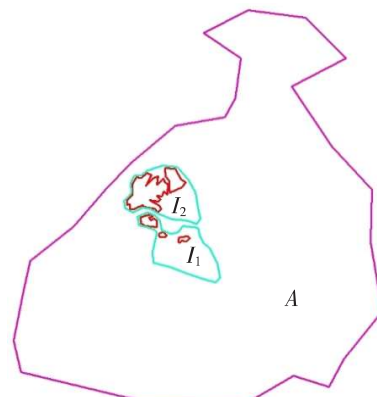
(c) 2016 年 12 月

图 8 3 个不同时期北冰洋冰川的分布影像

Fig. 8 Glacier distribution images of the Arctic Ocean in three different periods



(a) 2000 年



(b) 2016 年

图 9 北冰洋岛群冰川的变化

Fig. 9 Glacier change of island groups in the Arctic Ocean

在图 9 中,北冰洋( $A$ )与岛群 1( $I_1$ )、岛群 2( $I_2$ )之间的拓扑关系为包含关系, $I_1$ 与 $I_2$ 之间为分离关系。 $A$ , $I_1$ 和 $I_2$ 的边界节点数分别为 25, 22 和 24。基于 25IM 的 2000,2016 年北冰洋与岛群之间拓扑关系的表达式是一样的,即 25IM 只能粗略表达拓扑类别,对带洞面目标边界的交互细节和带洞面目标内洞的数目变化的表达能力明显不足。

NE25IM 可详细表达北冰洋与岛群之间的拓扑关系。2000,2016 年  $A$  与  $I_1$ 、 $A$  与  $I_2$  之间可表达的拓扑关系见表 5。当表 5 中的表达式③为  $A^0$

$\cap \partial_1 I_1 = \neg \phi_{n^*(1^0)}^{(C_A, C_B)}$  时,可以看到,从 2000 年到 2016 年, $C_A$  值未变化, $C_B$  值由 6 增大到 26, $n$  值由 1 增大到 3,这在一定程度上说明随着全球气候变暖,冰川消融, $I_1$  内部无冰川的岛屿数目在逐渐增多;当表达式③为  $A^0 \cap \partial_1 I_2 = \neg \phi_{n^*(1^0)}^{(C_A, C_B)}$  时,可以看到,从 2000 年到 2016 年, $C_B$  值由 9 增大到 41, $n$  值由 1 增大到 2,说明冰川消融速度很快,范围很广,无冰川的岛屿数量呈上升趋势。表 5 中的表达式⑤为  $A^0 \cap I_1^{-1} = \neg \phi_{n^*(2)}^{(0,0)}$ ,  $A^0 \cap I_2^{-1} = \neg \phi_{n^*(2)}^{(0,0)}$ ,两个表达式中的  $n$  值都有所增大,这也验证了上述的分析。

表5 不同年份中  $A$  与  $I_1$ ,  
 $I_2$  之间可表达的拓扑关系

Table 5 Expressible topological relationships between  $A$  and  $I_1$ ,  $I_2$  in different years

拓扑表达式	$(A, I_1)_{2000}$	$(A, I_1)_{2016}$	$(A, I_2)_{2000}$	$(A, I_2)_{2016}$
① $M^0 \cap N^0$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$
② $M^0 \cap \partial_0 N$	$\neg \phi_{1*}^{(0,24)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,24)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,22)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,22)}(1^0)$
③ $M^0 \cap \partial_1 N$	$\neg \phi_{1*}^{(0,6)}(1^0)$	$\neg \phi_{3*}^{(0,26)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,9)}(1^0)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,41)}(1^0)$
④ $M^0 \cap N^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$
⑤ $M^0 \cap N^{-1}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{2*}^{(0,0)}(2)$
⑥ $\partial_0 M \cap N^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(25,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(25,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(25,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(25,0)}(1^0)$
⑦ $\partial_1 M \cap N^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(22,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(22,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(24,0)}(1^0)$	$\neg \phi_{1*}^{(24,0)}(1^0)$
⑧ $M^{-0} \cap N^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$
⑨ $M^{-1} \cap N^{-0}$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$	$\neg \phi_{1*}^{(0,0)}(2)$

注:表中  $M$  指代  $A$ ,  $N$  指代  $I_1, I_2$ 。

## 5 结论

25IM 是一种定性表达带洞面目标之间拓扑关系的模型,但难以对不同类型的带洞面目标之间的拓扑关系进行精确区分。为此,本研究通过引入带洞面目标之间交点、交线及交面的个数、节点贡献值和结点度等一系列量化元素对 25IM 进行改进,提出了 NE25IM。然后,将 NE25IM 应用到带洞面目标之间细节拓扑关系的分析中;在带洞面目标内洞的数目与拓扑模型之间的关系方面,分析了 2 个洞与 1 个洞之间的区别。最终得到以下结论:

1) 相对于 25IM, NE25IM 中的量化数值能够更精确地表达带洞面目标边界间复杂的交互细节,其数值的差异和组合方式的改变可以反映出拓扑关系类别中的不同细分类型。

2) 当带洞面目标之间为相接或相交关系时,洞的数量只会影响其外边界外部、内边界、内边界外部 3 个子集之间的组合表达;当带洞面目标之间为覆盖或包含关系时,洞的数量会影响其内部、内边界、内边界外部和外边界外部 4 个子集之间的组合表达。

3) 由带洞面目标内洞的数目差异导致的模型表达式中数值的差异,一般与洞的形状和数目有关,子集之间组合表达的差异因拓扑关系类型的

不同而不同。

本研究提出的 NE25IM 也存在一定的局限性。一方面,两带洞面目标边界节点对交集部分的贡献值  $C_A$ ,  $C_B$  的取值为实际总值,未体现交集内各部分的取值;另一方面,结点度未体现各节点的先后顺序。因此,下一步的研究工作需要深入探讨带洞面目标之间的拓扑关系,并通过元拓扑关系有序表达带洞面目标的边界交互细节。此外,基于边界节点对拓扑关系的影响,对 NE25IM 在有向带洞面目标方向进行扩展也是后续研究的重点。

## 〔参考文献〕

- [1] EGENHOFER J. Pre-processing queries with spatial constraints[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1994, 60(6): 783-970.
- [2] 贺鸿愿, 周晓光. 三维拓扑关系的基本问题和研究进展[J]. 地理信息世界, 2014, 21(3): 9-17.
- [3] HE Hong-yuan, ZHOU Xiao-guang. 3D topological relationships: a survey on its key issues and research progress[J]. Geomatics World, 2014, 21(3): 9-17.
- [4] 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.
- [5] 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): 1 595-1 600.
- [6] EGENHOFER M J, FRANZOSA R D. Point-set topological spatial relations[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1991, 5(2): 161-174.
- [7] EGENHOFER M J, HERRING J R. Categorizing binary topological relationships between regions, lines and points in geographic databases[J/OL]. Statistics & Information Forum. [2021-02-25]. <http://www.doc88.com/p-9169700929896.html>.
- [8] RANDELL D, CUI Z, COHN A G. A spatial logical based on regions and connection[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1992: 165-176.
- [9] 陈占龙, 冯齐奇, 吴信才. 复合面状对象拓扑关系的



- 表达模型[J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 438-444.
- CHEN Zhan-long, FENG Qi-qi, WU Xin-cai. Representation model of topological relations between complex planar objects[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 438-444.
- [8] SHEN J W, ZHOU T G, CHEN M. A 27-intersection model for representing detailed topological relations between spatial objects in two-dimensional space[J]. International Journal of Geo-Information, 2017, 6(2): 1-16.
- [9] DU S, QIN Q M, WANG Q, et al. Reasoning about topological relations between regions with broad boundaries[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2008, 47(2): 219-232.
- [10] 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.
- LI Jian, OUYANG Ji-hong, WANG Zhen-xin. 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.
- [11] 沈敬伟, 周廷刚, 朱晓波. 面向带洞面状对象间的拓扑关系描述模型[J]. 测绘学报, 2016, 45(6): 722-730.
- SHEN Jing-wei, ZHOU Ting-gang, ZHU Xiao-bo. Topological relation representation model between regions with holes[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(6): 722-730.
- [12] 王占刚, 屈红刚, 王想红. 基于 25 交模型实现带洞面域拓扑关系描述模型间的转换[J]. 测绘学报, 2018, 47(9): 1 270-1 279.
- WANG Zhan-gang, QU Hong-gang, WANG Xiang-hong. Transformations among topological relation representation models for regions with holes using the 25-intersection method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(9): 1 270-1 279.
- [13] 周晓光, 陈斐, 陈军. 引入结点的线/面拓扑关系细分方法与应用[J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 445-452.
- ZHOU Xiao-guang, CHEN Fei, CHEN Jun. A node-degree based line/polygon topological relationship refinement model and its application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 445-452.
- [14] 陈占龙, 叶文. 复杂面实体拓扑关系的精细化模型[J]. 测绘学报, 2019, 48(5): 630-642.
- CHEN Zhan-long, YE Wen. The precise model of complex planar objects' topological relations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(5): 630-642.
- [15] SHEN J W, ZHANG L, CHEN M. Topological relations between spherical spatial regions with holes[J]. 2020, 13(4): 429-456.
- [16] 王占刚, 杜群乐, 王想红. 复杂区域对象拓扑关系分解与计算[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 1 047-1 057.
- WANG Zhan-gang, DU Qun-le, WANG Xiang-hong. Dividing and computing topological relations between complex regions[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(8): 1 047-1 057.
- [17] DU S H, FENG C H, GUO L. Integrative representation and inference of qualitative locations about points, lines, and polygons[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 29(6): 980-1 006.
- [18] 刘波, 李大军, 邹时, 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.
- LIU Bo, LI Da-jun, ZOU Shi, et al. Combinational reasoning of topological relations between regions with holes[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(2): 262-267.
- [19] 霍林林. 复杂空间关系模型及空间描述逻辑中若干问题的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- HUO Lin-lin. Research on some problems of complex spatial relations models and spatial description logic[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [20] 赵彬彬, 周凯, 刘泉菲, 等. 面/面目标之间拓扑关系的判定规则及其实现[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(2): 1-7.
- ZHAO Bin-bin, ZHOU Kai, LIU Quan-fei, et al. Decision rules and its implementation for topological relations between area objects[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(2): 1-7.
- [21] EGENHOFER M J, VASARDANI M. Spatial reasoning with a hole[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Spatial Information Theory: Lecture Notes in Computer Science. Melbourne: Springer, 2007: 303-320.