

# 基于粗糙集的南海中尺度涡旋 时空关系抽取研究\*

齐光雅, 杜云艳, 曹 峰

(中国科学院 地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

**摘 要:**南海中尺度涡旋形成机制复杂, 影响因素众多, 数值模拟、定量统计等方法在分析涡旋时空关系上尚存在一定局限性。采用了粗糙集理论, 在不添加任何先验信息的基础上, 进行南海中尺度涡旋时空关系的表达, 并以 2003 年 11 月至 2009 年 6 月遥感反演图像中提取的涡旋数据为例, 分别以海区、产生时间、涡旋类型为决策属性, 抽取南海中尺度涡旋的时空关系规则。通过对时空关系规则的分析, 分别从时间、空间以及类型上描述了南海中尺度涡旋的具体特征。研究结果表明, 南海暖涡多发生于南海东南部以及中部, 多发生于冬季, 强度涡度都较低, 中心区域温度较高, 多发生于水深较浅的区域, 并且移动距离较小。冷涡则多发生于南海西南部以及南海东北部, 多发生于春、秋两季, 强度涡度都较高, 中心温度偏低, 多发生于水深较大区域, 移动距离也较大。

**关键词:** 海洋涡旋; 时空关系; 粗糙集; 规则抽取

**中图分类号:** P722.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2010)04-0417-11

海洋涡旋对海洋中能量和物质的交换起着极其重要的作用, 它是近几十年来人们对大洋环境的突破性认识。南海的中尺度涡现象十分丰富, 对我国的军事、生产和环境等具有十分重大的意义, 受到国内外海洋学者的关注。不同研究人员对南海中尺度涡旋进行了很多调查研究<sup>[1-9]</sup>, 其中定量研究主要有以下方法: 1) 数值模拟, 杨昆等<sup>[10]</sup>采用改进涡分辨普林斯顿海洋模式, 对冬季处于强盛的东北季风强迫, 以及黑潮在巴士海峡入侵的共同作用下的南海北部环流的中尺度涡旋体系进行了数值研究; 钱永甫等<sup>[11]</sup>利用美国普林斯顿大学海洋模式(POM)对风应力和海岸线共同作用下的南海冷暖涡生成机制进行了数值模拟; 数值模拟的方法可以获取海区特定边界条件的流场信息, 设定影响涡旋的条件, 对涡旋进行间接分析, 但该方法受到涡旋的形成原因复杂, 不能充分模拟的限制。2) 遥感影像信息提取, 葛咏等<sup>[12]</sup>基于多重分形技术, 利用海洋涡旋信息的物理特征时空形态的自相似性来提取涡旋, 提取出的信息包含涡旋的形状、大小、空间分布模式和涡旋能量流的方向等, 该方法优于传统的提取方法, 但在边界效应问题仍有缺陷。利用遥感影像信息提取方法, 可以提取某一瞬时时刻中尺度涡旋的特征信息, 但对于中尺度涡旋整体产生移动过程上的信息提取相对较弱。3) 定量统计, 郭景松等<sup>[13]</sup>利用 1993—2000 年间的 T/P 卫星高度计轨道资料的时间序列和 MODAS 同化产品中的卫星高度计资料对南海东北部海区中尺度涡旋进行动态追踪, 并提取了涡旋信息并对其特征量进行统计分析; 程旭华等<sup>[14]</sup>以 11 a、TOPEX/Poseidon、Jason 和 ERS1/2 高度计的融合资料(1993—2003 年)为基础, 统计了南海中尺度涡的时空分布, 分析了南海中尺度涡的季节和年际变化; 林鹏飞等<sup>[15]</sup>利用 T/P 混合 ERS1 或 ERS2 的卫星高度计资料, 对 1993—2002 年间南海和西北太平洋(10°~35°N, 120°~150°E)的中尺度涡进行辨认和动态追踪, 并对其产生和移动特征、出现概率及对海面高度变化的贡献进行统计分析。由于统计方法的限制, 对于南海中尺度涡旋的时空规律仍需进一步研究。

\* 收稿日期: 2009-10-15

**资助项目:** 国家高技术研究发展计划项目——空间数据挖掘的地理案例方法及其关键技术研究(2007AA128222); 资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新团队计划项目——时空数据挖掘关键技术与典型应用研究(088RA400SA)

**作者简介:** 齐光雅(1984-), 女, 北京人, 硕士研究生, 主要从事空间数据挖掘的地理案例方法和地理案例间时空关系抽取方面研究。

E-mail: qigy@lreis.ac.cn

(杜素兰 编辑)

粗糙集理论是研究不完整、不确定知识和数据的表达、学习、归纳的理论方法<sup>[16]</sup>,它的显著特点就是无需提供所处理数据之外的任何先验信息<sup>[17]</sup>,本文利用粗糙集理论表达海洋涡旋的时空关系,并以 2003 年 11 月至 2009 年 6 月遥感反演图像中提取出来涡旋数据为例,抽取海洋涡旋时空关系规则。

## 1 粗糙集的基本理论

### 1.1 信息表知识表达与决策表

信息表知识表达系统的基本成分是研究对象的集合,关于这些对象的知识是通过指定对象的属性(特征)和他们的属性值(特征值)来描述的。一般地,一个信息表知识表达系统  $S$  可以表示为  $S = \langle U, R, V, f \rangle$ 。这里,  $U$  是对象的集合,也称为论域,  $R = C \cup D$  是属性集合,子集  $C$  和  $D$  分别称为条件属性集和结果属性集,  $V = \bigcup_{r \in R} V_r$  是属性值的集合,  $V_r$  表示属性  $r \in R$  的属性值范围,即属性  $r$  的值域,  $f: U \times R \rightarrow V$  是一个信息函数,它指定  $U$  中每一个对象  $x$  的属性值。

对于每个属性子集  $B \subseteq R$ ,定义不可分辨二元关系(不分明关系)  $IND(B)$ ,即

$$IND(B) = \{(x, y) \mid (x, y) \in U^2, \forall b \in B(b(x) = b(y))\} \quad (1)$$

显然,  $IND(B)$  是一个等价关系,且

$$IND(B) = \bigcap_{b \in B} IND(\{b\}) \quad (2)$$

一个决策表是一个信息表知识表达系统  $S = \langle U, R, V, f \rangle$ ,  $R = C \cup D$  是属性集合,子集  $C$  和  $D$  分别称为条件属性集和结果属性集,  $D \neq \emptyset$ 。条件属性  $C$  和结果属性  $D$  的等价关系  $IND(C)$  和  $IND(D)$  的等价类分别称为条件类和决策类<sup>[16]</sup>。

### 1.2 粗糙集与上/下近似集

令  $X \subseteq U$ ,当能  $X$  用属性子集  $B$  确切地描述(即是属性子集  $B$  所确定的  $U$  上的不分明集的并)时,称  $X$  是  $B$  可定义的,否则称  $X$  是  $B$  不可定义的。 $B$  可定义集也称作  $B$  精确集,  $B$  不可定义集也称为  $B$  非精确集或  $B$  粗糙集(在不发生混淆的情况下也简称粗糙集)。给定的知识表达系统  $S = \langle U, R, V, f \rangle$ ,对于每个子集  $X \subseteq U$  和不可分明关系  $B$ ,  $X$  的上近似集和下近似集可表达如下<sup>[16]</sup>:

$$B^-(X) = \{x \mid x \in U \wedge [x]_B \cup X \neq \emptyset\} \quad (3)$$

$$B_-(X) = \{x \mid x \in U \wedge [x]_B \subseteq X\} \quad (4)$$

即当且仅当  $[x]_B \cap X \neq \emptyset, x \in B^-(X)$ ;当且仅当  $[x]_B \subseteq X, x \in B_-(X)$ 。

### 1.3 离散化

运用粗糙集理论处理决策表时,要求决策表中的值用离散(如整型、字符串型、枚举型)数据表达。如果某些条件属性或决策属性的值域为连续值(如浮点型数表达),则在处理前必须进行离散化处理,而且,即使对于离散数据,有时也需要通过将离散值进行合并(抽象)得到更高抽象层次的离散值,这是粗糙集理论中的一类重要研究课题<sup>[16]</sup>。

人工智能的研究者提出了很多种离散化方法,较为常用的离散化算法有:等距离划分算法(Equal Interval Width)、等频率划分算法(Equal Frequency Intervals)、Naïve Scaler 算法、Semi Naïve Scaler 算法,以及布尔逻辑和 Rough 集理论相结合的离散化算法、基于断点重要性的离散化算法和基于属性重要性的离散化算法等。

### 1.4 属性约简

所谓属性约简,就是在保持信息系统分类能力不变的条件下,删除其中不相关或不重要的属性。基于粗糙集理论的知识获取,主要是通过对原始决策表的约简,在保持决策表决策属性和条件属性之间的依赖关系不发生变化的前提下对决策表进行约简。属性约简的目标就是要从条件属性集合中发现部分必要的条件属性,使得根据这部分条件属性形成的相对于决策属性的分类和所有条件属性所形成的相对于决策属性的分类一致。

设  $U$  为一个论域,  $P$  和  $Q$  为定义在  $U$  上的两个等价关系簇,且  $Q \subseteq P$ ,  $Q$  的  $P$  正域记为

$$POS_P(Q) = \bigcup_{x \in U/Q} P_-(X) \tag{5}$$

若  $POS_P(Q) = POS_{(P \setminus \{r\})}(Q)$ , 则称  $r$  为  $P$  中相对于  $Q$  可省略的(不必要的),简称  $P$  中  $Q$  可省略的;否则称  $r$  为  $P$  中相对于  $Q$  不可省略的(必要的),若  $P$  中的每一  $r$  都是  $P$  中  $Q$  不可省略的,则称  $P$  中对于  $Q$  不可省略(必要的)。

设  $U$  为一个论域,  $P$  和  $Q$  为定义在  $U$  上的 2 个等价关系簇,若  $P$  的  $Q$  独立子集  $S \subseteq P$  有  $POS_S(Q) = POS_P(Q)$ , 则称  $S$  为  $P$  的  $Q$  约简<sup>[16]</sup>。

## 2 基于粗糙集的海洋中尺度涡旋时空关系抽取方法

### 2.1 海洋中尺度涡旋时空关系的粗糙集表达

针对海洋中尺度涡旋时空关系的粗糙集提取,需先将海洋中尺度涡旋的各种时空关系定量表达后,再转换成粗糙集能够处理的决策表形式(二维表格)。图 1 给出海洋涡旋时空关系粗糙集表示流程:

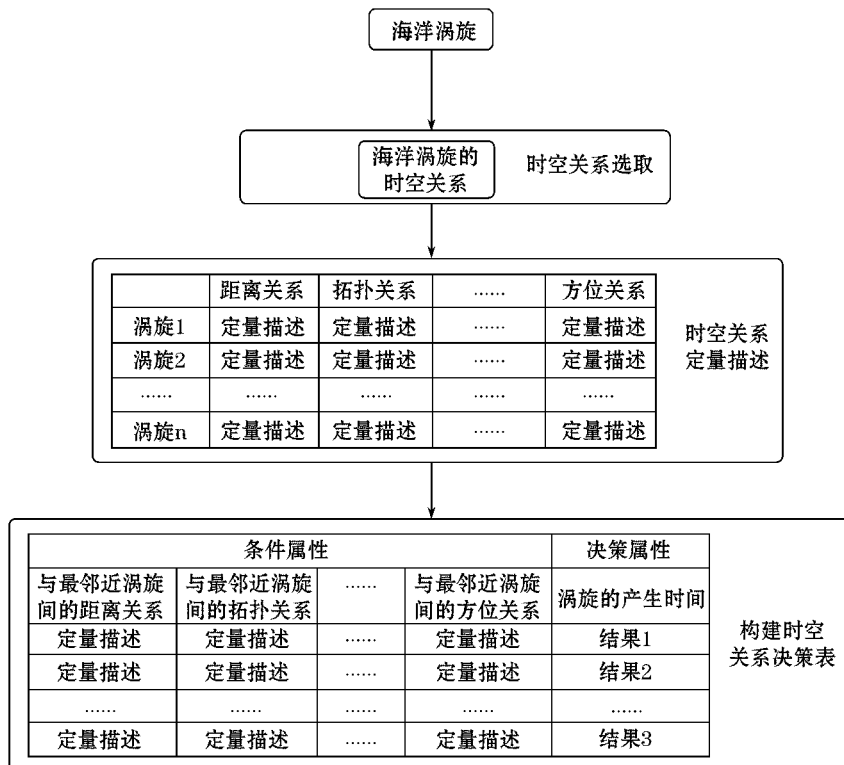


图 1 海洋涡旋时空关系粗糙集表达流程图

Fig. 1 The flow chart of relation in time and space among oceanic eddies, which is expressed in the theory of rough sets

1) 海洋涡旋时空关系的选取: 根据先验知识的指导, 选取海洋涡旋特定的时空关系作为研究对象。如涡旋与发生时间最邻近涡旋之间的距离、拓扑或方位关系; 涡旋与各大陆海岸线的距离关系等。

2) 海洋涡旋时空关系定量描述: 对于海洋涡旋的各种时空关系, 选用合适的描述方法对其进行定量描述。如拓扑关系可以用 RCC-8<sup>[18,19]</sup> 模型来定量描述。

3) 构建海洋涡旋时空关系决策表: 以决策表的形式表达海洋涡旋的时空关系。决策表的行表示海洋涡旋现象的实例。决策表的列分为条件属性以及决策属性两部分, 分别代表海洋涡旋的各种时空关系, 以及具体的涡旋时空关系结果。各行的值是用不同的时空关系描述方法得到的定量描述结果(不包括决策属性)。

## 2.2 海洋涡旋时空关系规则抽取

利用粗糙集方法进行海洋涡旋时空关系规则抽取步骤如下:

1) 海洋涡旋时空关系粗糙集表达: 如图 1 所示, 将海洋涡旋的时空关系表示成粗糙集决策表的形式。

2) 决策表离散化: 运用粗糙集理论处理决策表, 表中的值用离散(如整型、字符串型、枚举型)数据表达, 如果某些条件属性或决策属性的值域是连续值(如浮点型数表达), 则在处理前必须进行离散化。因此, 对 1) 得到的决策表应用粗糙集离散化方法进行离散化。

3) 时空关系约简: 为了从决策表中抽取得到适应度大的规则, 需对决策表进行约简。运用粗糙集的属性约简算法对离散化后的时空关系决策表进行约简, 得到最后的时空关系决策规则表。对得到的时空关系规则, 计算其覆盖度和置信度<sup>[16]</sup>。

粗糙集的规则可以用  $A \Rightarrow B$  来表示。

规则的置信度:

$$\alpha = \frac{|X \cap Y|}{|X|} \quad (6)$$

规则的覆盖度:

$$\beta = \frac{|X \cap Y|}{|Y|} \quad (7)$$

式中,  $X = \{x | x \in U \wedge A_x\}$ ;  $Y = \{x | x \in U \wedge B_x\}$

$U$  为一个论域,  $A_x$  表示研究对象  $x$  的条件属性值满足公式  $A$ ,  $B_x$  表示研究对象  $x$  的决策属性值满足公式  $B$ , 及集合  $X$  是条件属性值满足公式  $A$  的实例集合, 集合  $Y$  是决策属性值满足公式  $B$  的实例的集合。海洋涡旋时空关系规则置信度的描述是得到某个涡旋结果的时空关系规则的可信程度, 而覆盖度描述是海洋涡旋时空关系规则对某个涡旋结果的支持程度。

## 3 应用实例与结果分析

### 3.1 实验区简介

在国际水文局的定义中, 南海为 NE-SW 走向, 其南部边界在南纬 3 度, 位于南苏门答腊和加里曼丹之间, 北边及东北至广东、广西、福建和台湾及台湾海峡, 东边至菲律宾群岛, 西南至越南与马来半岛, 通过巴士海峡、苏禄海和马六甲海峡连接太平洋和印度洋。南海为世界第三大陆缘海, 仅次于珊瑚海和阿拉伯海, 面积约 256 万  $\text{km}^2$ , 约等于中国的渤海、黄海和东海总面积的 3 倍, 平均水深约 1 212 m, 最深处为中部的深海平原, 达 5 567 m 左右<sup>[24]</sup>。

南海位于季风气候带, 冬季盛行强劲的东北季风, 夏季盛行西南季风。通常 10 月至次年 3 月为冬季季风, 6 至 8 月为夏季季风, 4 至 5 月为春季季风转变时期, 9 月为秋季季风转变时期<sup>[20]</sup>。已有研究表明, 南海的中上层环流主要受季风驱动。冬季, 南海表层环流为气旋式态势; 夏季, 南海的表层环流呈反气旋式态势<sup>[1,8,21]</sup>。

在南海存在着许多活跃的中尺度涡,有较强季节性变化,受季风 and 在海面上海气热量交换影响很大等<sup>[7]</sup>。已有研究表明,南海中尺度涡主要发生在台湾岛西南、吕宋岛西侧以及越南以东外海<sup>[22]</sup>。涡旋出现的区域主要位于越南南部以东至台湾西南一线海域,呈 NE-SW 向分布<sup>[15]</sup>。反气旋涡与气旋涡的个数多<sup>[15,22]</sup>,在冬季季风期间,南海中尺度涡生成得最多<sup>[22]</sup>。且从西北太平洋进入的涡很少<sup>[15]</sup>。80%的涡旋向西移动,随纬度变化呈“Σ”型分布<sup>[15]</sup>。由此可知南海中尺度涡旋存在着一定的时空分布规律,但具体的定量规律还有待于进一步深入。

本研究基于上述方法,进行南海 2003 年 11 月至 2009 年 6 月海洋涡旋中尺度涡旋时空规律的定量抽取。原始资料采用美国海军实验室(Navy Research Laboratory,NRL)全球分层海洋数值模式模拟出的海洋要素场数据,包括海面高度异常(SSHA)、海表温度(SST)和海流场(Current/Speed)数据。该模式同化多种卫星资料,主要利用 ENVISAT、GFO 和 JASON-1 等进行海面高度差 SSHA 的同化,利用 IR 数据进行 SST 的同化,时间分辨率为 1 d,空间分辨率为(1/32)°。典型的中尺度涡旋案例从 3 个要素场中经专家识别获取。所构建的南海区域典型案例库共 391 个历史案例,其中暖涡 291 个,冷涡 100 个。图 2 给出一暖涡案例。

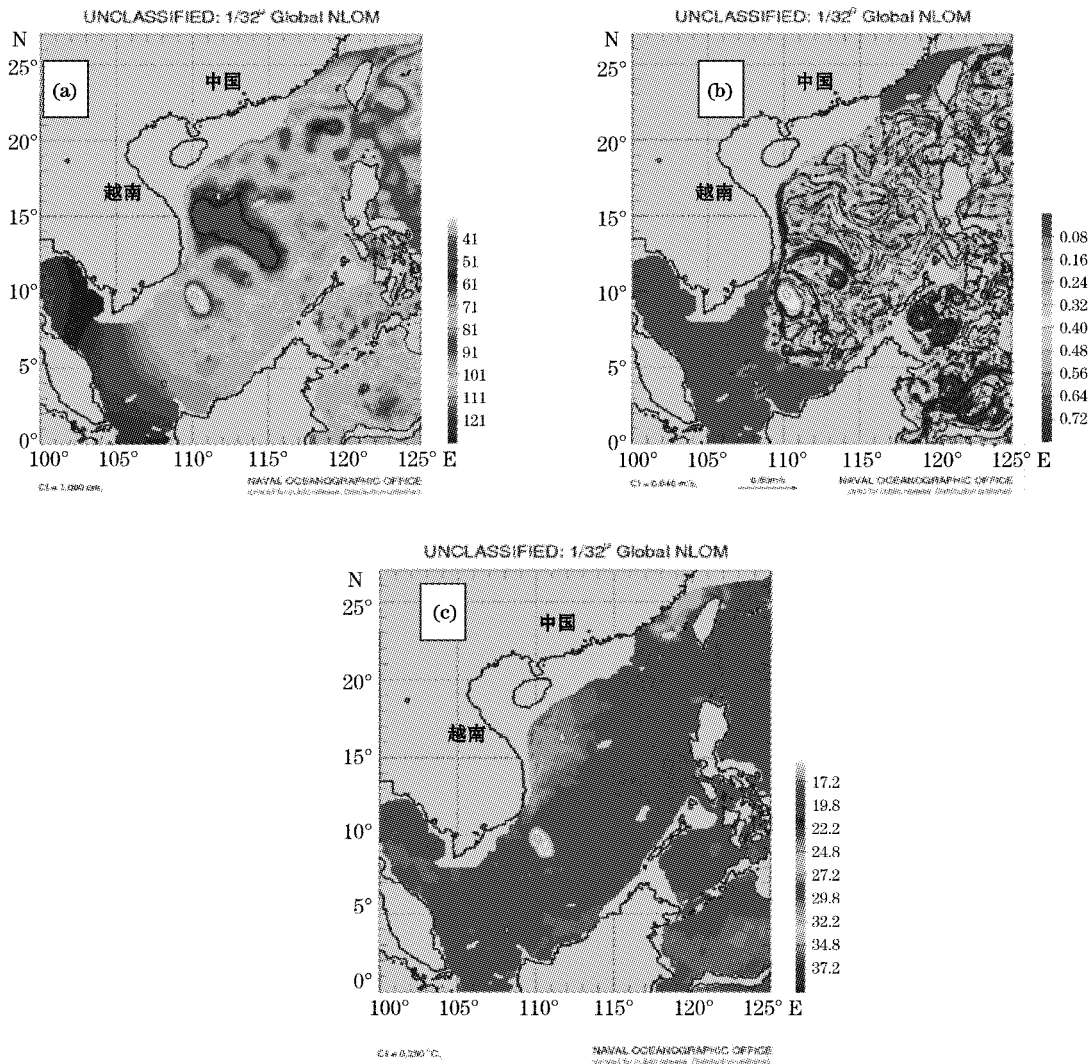


图 2 南海海表面中尺度涡旋矢量表达实例  
(a) 高度异常;(b) 流速;(c) 温度

Fig. 2 The practical example of vector expression of the mesoscale eddy at the surface of the South China Sea  
(a) sea surface level anomaly, (b) current velocity, and (c) temperature.

### 3.2 实验区时空关系的粗糙集表达

南海中尺度涡旋具有特定的时空统计特征,为了进一步抽取南海中尺度涡旋的时空关系规律,采用上述所给出的粗糙集方法,进行具体定量规则的抽取。就此,针对中尺度涡旋研究侧重点不同,对决策属性选择也各不相同。如,当侧重于研究不同区域的中尺度涡的时空规律时,决策项需涡旋发生的空间区域;而当侧重于研究不同类型的涡旋其时空关系规律时,决策项则需选择涡旋的类型。本研究选取海区、时间和涡旋类型作为决策属性分别进行涡旋时空关系规则抽取,进而对该区域中尺度涡旋的时空关系规律进行综合分析。

根据已有研究成果<sup>[22]</sup>,本研究中主要考虑两大类中尺度涡旋的属性特征,其一是涡旋自身的特征属性;其二是涡旋时空关系属性特征。主要有:

1) 涡旋发生的空间区域(Vortex Zone),根据南海不同的物理海洋环境特征划分为4个海区<sup>[22]</sup>:南海东北部( $Z_1$ )、南海中部( $Z_2$ )、南海东南部( $Z_3$ )以及南海西南部( $Z_4$ )(图3);

2) 涡旋产生的时间(VortexTime),以季节划分:春季3至5月,夏季6至8月,秋季9至11月,冬季12至2月;

3) 类型(VortexType),分冷涡和暖涡两种;

4) 强度(VortexIntensity),用涡旋中心与外围的振幅差表示,单位为m;

5) 涡度(Vorticity),用公式(3)进行获取:

$$\zeta = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y \approx 8gM / fD^2 \quad (8)$$

式中, $M$ 为涡旋强度; $D$ 为涡旋直径; $f$ 为科氏参数。

6) 水平尺度(Horizontal),用涡旋东西与南北直径和的一半来表示;

7) 中心点温度(Center Temp);

8) 中心与外围温差(Vortex Temp);

9) 海水深度(deep),涡旋核心区的平均水深;

10) 距离关系(distance),与参考涡旋<sup>①</sup>的距离,用涡旋几何中心间的欧式距离表示;

11) 方位关系(direction),与参考涡旋的方位关系,采用8方位表示法;

12) 拓扑关系(topology),与参考涡旋的拓扑关系,采用RCC-8<sup>[18,19]</sup>模型表示。

针对构建的南海391个典型中尺度涡旋,采用ArcGIS的VBA二次开发实现上述12个属性特征指标的定量计算。并按照第2.1节中的方法,把上述指标1)、2)、3)分别作为决策属性,其他指标作为条件属性进行粗糙集决策表的构建。表1是将涡旋发生的空间区域作为决策属性给出的决策表示例。

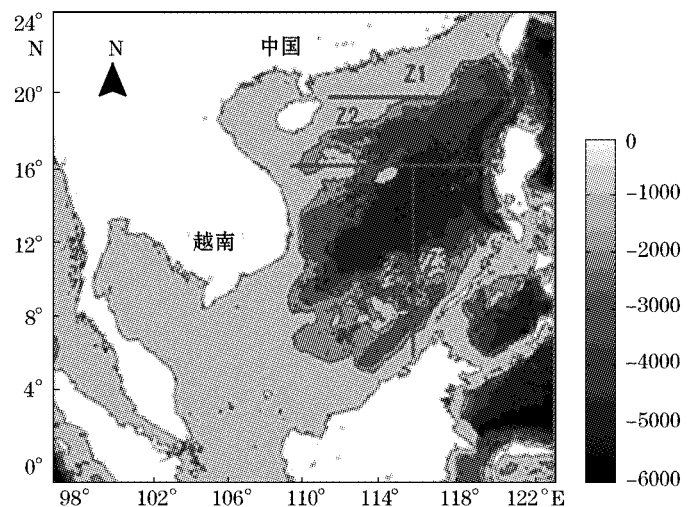


图3 南海地形图

Fig. 3 Topography in the South China Sea(SCS)

① 参考涡旋定义为与当前涡旋时间上最为邻近的涡旋。具体获取方法:以当前涡旋为圆心,以1.83km×60km为半径的缓冲区内所搜索到的时间先于且最邻近的涡旋。

表 1 以海区为决策属性的海洋涡旋时空关系决策表

Table 1 List of decision properties which are related to the sea area where eddies are located, in order to show the relations in time and space

时 间	类 型	强 度 /m	涡 度 /s <sup>-1</sup>	水平尺度 /m	条件属性						决策属性 海 区
					中心点 温度 /°C	中心与 外围温差 /°C	距离关系 /m	方位关系	拓扑关系	海水深度 /m	
冬季	暖涡	0.091 2	0.692×10 <sup>-6</sup>	150 762.08	23.31	0.028	77 340	东	相离	2 028	南海中部
夏季	冷涡	0.184 5	0.973×10 <sup>-6</sup>	200 655.8	29.94	0.075 3	20 074	东南	交迭	802	南海西南部
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

3.3 时空关系规则抽取

根据第 3.2 节,创建好海洋涡旋时空关系决策表后,进行粗糙集的具体运算,提取时空关系规则。具体计算时采用粗糙集软件 Rosetta<sup>[23]</sup>,该软件由挪威科技大学计算机与信息科学系和波兰华沙大学数学研究所合作研发<sup>[16]</sup>。具体计算步骤如下:

- 1)将以海区为决策属性的海洋涡旋时空关系决策表(表 1)导入 Rosetta 软件;
- 2)使用布尔逻辑与粗糙集理论相结合的离散化方法,对表 1 中值域是连续值的条件属性进行离散化;
- 3)使用遗传算法对完成离散化后的决策表进行时空关系约简和规则抽取。实现方法可参见文献<sup>[23]</sup>。

同理,变换决策属性后采用上述步骤再进行抽取,便可获得各自对应的时空关系规则。表 2 给出对对应于表 1 抽取到的覆盖度在 10%以上,置信度为 100%的主要时空关系规则。

表 2 不同海区涡旋内蕴时空关系规则表

Table 2 List of the regularity of the relationships in time and space among the eddies located in various sea area

序 号	规 则	置信度 /%	覆盖度 /%
1	VortexType(冷涡) AND Vorticity([0.7×10 <sup>-6</sup> ,*)) AND Horizontal([*,172598.00)) AND CenterTemp([*,26.92)) => VortexZone(南海东北部)	100	15.5
2	VortexTime(冬季) AND VortexType(冷涡) AND Vorticity([0.7×10 <sup>-6</sup> ,*)) AND CenterTemp([*,26.92)) => VortexZone(南海东北部)	100	14.3
3	VortexType(暖涡) AND VortexIntensity([*,0.08)) AND Vorticity([*,0.7×10 <sup>-6</sup> )) AND CenterTemp([26.92,28.53)) => VortexZone(南海东南部)	100	13.3
4	VortexTime(冬季) AND Vorticity([*,0.7×10 <sup>-6</sup> )) AND CenterTemp([26.92,28.53)) => VortexZone(南海东南部)	100	13.3
5	VortexTime(夏季) AND Horizontal([194924.00,*)) AND deep([*,1756)) => VortexZone(南海西南部)	100	11.9
...	.....	...	...

注:上述表中的闭合代表包含,开放表示不包含。

3.4 实验结果分析

为了进一步从抽取的规则表中进行综合分析,如表 3 至表 5 所示,对规则表进行了深入的分析与转换。分别从空间、时间和类型来分析南海涡旋时空关系。由表 3 可知,从区域上看,南海东北部由于受冬季季风的影响,涡旋出现时间多为冬、春两季,冷涡、暖涡都有出现,其中心温度多低于 26.92 °C,涡度大于 0.7×10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>,水平尺度小于 172.6 m;在南海东南部,多为暖涡,出现时间多为冬季(吕宋西南的反气旋涡都发生在冬季<sup>[22]</sup>),中心温度偏高,处于 26.92~28.53 °C 之间,涡度小于 0.7×10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>,水平尺度小于 172.6 m,涡

旋强度偏低,小于 0.08 m 或处于 0.08~0.12 m 之间,中心与外围的温差多大于 0.03 °C 且小于 0.16 °C,与参考涡旋涡旋存在交迭的空间拓扑关系;在南海西南部,涡旋的水平尺度多大于 194.9 m,强度偏低处于 0.08~0.11 m 之间,多发生在水深小于 1 756 m 的海域,基本在参考涡旋的南面出现。

表 3 不同海区中尺度海洋涡旋内蕴时空关系规则

Table 3 Regularity of the relations in time and space among the mesoscale eddies in various sea area where the eddies are located

属性特征	南海东北部	南海东南部	南海西南部
中心点温度/°C	<26.92	[26.92,28.53)	
涡度/s <sup>-1</sup>	>0.7×10 <sup>-6</sup>	<0.7×10 <sup>-6</sup>	
类型	冷涡、暖涡	暖涡	
时间	冬、春	冬	夏
水平尺度/km	<172.6	<172.6	>194.9
强度/m		<0.08 或 [0.08,0.12)	[0.08,0.11)
中心与外围温差/°C		[0.03,0.16)	
所处位置海水深度均值/m	<1756 或 >1897	<1756	
与参考涡旋间拓扑		交迭	
与参考涡旋间方位			南

注:空白处无此项

从时间上看,如表 4 所示,南海涡旋存在以下规律:冬季时,涡旋的中心温度较低多小于 26.22 °C,涡度大于 0.6×10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>,强度较低多处于 0.08~0.11 m 之间,中心与外围的温差小于 0.18 °C,多为暖涡,且多出现在南海中部,发生在水深处于 1 723~2 092 m 之间的海域,与参考涡旋涡旋存在交迭的空间拓扑关系,并出现在参考涡旋的东北方向;秋季时,涡旋中心点的温度偏低处于 26.22~28.72 °C 之间,强度大与 0.16 m,多为暖涡,出现在南海中部;夏季时,涡旋中心与外围的温差小于 0.18 °C,中心温度较高高于 29.59 °C,多为暖涡,多出现于南海西南部,发生在水深处于 1 723~1 881 m 之间的海域。

表 4 不同时间的海洋中尺度涡旋内蕴时空关系规则

Table 4 Regularity of the relations in time and space among the mesoscale eddies occurring in various times

属性特征	冬季	秋季	夏季
中心点温度/°C	<26.22	[26.22,28.72)	>29.59
类型	暖涡	暖涡	暖涡
海区	南海中部	南海中部	南海西南部
与参考涡旋间拓扑	交迭		
与参考涡旋间方位	东北		
涡度/s <sup>-1</sup>	>0.6×10 <sup>-6</sup>		
强度/m	[0.08,0.11)	>0.16	
中心与外围温差/°C	<0.18		<0.18
所处位置海水深度均值/m	[1723,1881)或 [1881,2092)		[1723,1881)

注:空白处无此项

从类型来看,如表 5 所示,该区域的暖涡与冷涡呈现出非常明显的时空特征,暖涡的涡度低于 0.7×10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>,强度低于 0.1 m,而冷涡的涡度大于 0.9×10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>,强度大于 0.17 m;暖涡中心区域温度很高,多大于 29.02 °C,而冷涡中心区温度相对较低,处于 27.72~29.02 °C 之间或更低;暖涡多发生在水深小于 1 741 m,或 1 723~1 881 m 的海域,而冷涡多发生于水深大于 2 105 m,或 1 879~2 105 m 的海域;暖涡距参考涡旋较近,冷涡距参考涡旋较远;且暖涡多出现于冬季的南海东南部以及南海中部,而冷涡则多出现于秋、春两季的南海西南部以及南海东北部。

表 5 不同类型涡旋内蕴时空关系规则

Table 5 Regularity of the relations in time and space among various eddy types

属性特征	暖 涡	冷 涡
涡度/ $s^{-1}$	$<0.7 \times 10^{-6}$	$>0.9 \times 10^{-6}$
中心点温度	$>29.02^{\circ}$	$<27.72^{\circ}$ 或 $[27.72^{\circ}, 29.02^{\circ})$
与参考涡旋间距离/m	$<48.17$	$>48.17$
强度/m	$<0.1$	$>0.17$
所处位置海水深度均值/m	$<1741$ 或 $[1741, 1879)$	$[1879, 2105)$ 或 $>2105$
时间	冬	秋、春
海区	南海东南部、南海中部	南海西南部、南海东北部

综上所述,根据抽取出的时空关系规则可以得出如下结论:南海暖涡多发生于南海东南部以及中部,多发生于冬季(与林鹏飞等<sup>[15]</sup>的统计结果吻合),强度涡度都较低,中心区域温度较高(符合暖涡的特征),多发生于水深较浅的区域,并且移动距离较小。而冷涡,则多发生于南海西南部以及南海东北部(与林鹏飞等<sup>[15]</sup>的统计结果吻合),多发生于春、秋两季,强度涡度都较高,中心温度偏低(符合冷涡的特征),多发生于水深较大区域,移动距离也较大。

## 4 结 语

本文利用从 2003 年 11 月至 2009 年 6 月南海区域遥感反演图像中提取出来的涡旋数据,基于粗糙集理论,表达了海洋涡旋的时空关系,并抽取较多覆盖率较大的涡旋时空关系规则。这些规则不仅从空间上、时间上给出南海涡旋的分布特征,而且具体描述了南海两种类型涡旋的特征。从实验结果看,基于粗糙集理论进行海洋涡旋时空关系规则提取,效率较高,根据研究的侧重点不同选择不同的决策属性,从而比较灵活地获取时空关系规律,具有实际应用的可行性。但由于该方法要求根据先验知识进行涡旋时空关系的选取,并具体定量描述,选取不同的时空关系,得到的结果也会有所不同。

另外,由于部分冷涡的周期较短,水平尺度较小,在数字化遥感数据识别涡旋时存在一定误差,造成冷涡比暖涡数量少,这对结果产生了一定程度上的影响。在以后的研究中,可增加实验数据,选取其他反映该区域涡旋特征的时空关系指标,采用粗糙集理论中其他离散化与属性约简算法,选出更多有实际意义的规则,予以应用。

## 参考文献(References):

- [1] HUANG Q Z, WANG W Z, LI Y X, et al. General situations of the current and eddy in the South China Sea[J]. Advances In Earth Science, 1992, 7(5): 1-5. 黄企洲, 王文质, 李毓湘, 等. 南海海流和涡旋概况[J]. 地球科学进展, 1992, 7(5): 1-5.
- [2] GUAN B X. Warm eddy in the open sea east of Hainan Island[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1997, 15(4): 1-7. 管秉贤. 海南岛以东外海的暖涡[J]. 黄渤海海洋, 1997, 15(4): 1-7.
- [3] SUN X P, XIU S M. Analysis on the cold eddies in the sea area northeast of Taiwan[J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(2): 1-10. 孙湘平, 修树孟. 台湾东北海域冷涡的分析[J]. 海洋通报, 1997, 16(2): 1-10.
- [4] LI Y C, CAI W L, LI L, et al. Seasonal and interannual variabilities of mesoscale eddies in northeastern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 61-70. 李燕初, 蔡文理, 李立, 等. 南海东北部海域中尺度涡的季节和年际变化[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 61-70.
- [5] LI Y C, LI L, LIN M S, et al. Observation of mesoscale eddy fields in the sea southwest of Taiwan by TOPEX/POSEIDON altimeter data [J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2002, 24(Supp. 1): 163-170. 李燕初, 李立, 林明森, 等. 用 TOPEX/POSEIDON 高度计识别台湾西南海域中尺度强涡[J]. 海洋学报, 2002, 24(Supp. 1): 163-170.
- [6] LAN J, HONG J L, LI P X. Seasonal variability of cool-core eddy in the western South China Sea[J]. Advances In Earth Science, 2006, 21(11): 1145-1152. 兰健, 洪洁莉, 李丕学. 南海西部夏季冷涡的季节变化特征[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1145-1152.

- [7] GUAN B X, YUAN Y C. Overview of studies on some eddies in the China seas and their adjacent seas- I. The South China Sea and the region east of Taiwan[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2006, 28(3): 1-16. 管秉贤, 袁耀初. 中国近海与其附近海域若干涡旋研究综述- I. 南海和台湾以东海域[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 1-16.
- [8] LI L. A review on mesoscale oceanographical phenomena in the South China Sea[J]. Journal Of Oceanography In Taiwan Strait, 2002, 21(2): 562. 李立. 南海中尺度海洋现象研究概述[J]. 台湾海峡, 2002, 21(2): 562.
- [9] CHENG X H, QI Y Q. Distribution and propagation of mesoscale Eddies in the global ocean learnt from altimetric data[J]. Advances In Marine Science, 2008, 26(4): 447-453. 程旭华, 齐义泉. 基于卫星高度计观测的全球中尺度涡的分布和传播特征[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(4): 447-453.
- [10] YANG Q, SHI P, WANG D X, et al. Numerical study about the mesoscale multi-eddy system in the northern South China Sea in winter [J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2000, 22(1): 27-34. 杨昆, 施平, 王东晓, 等. 冬季南海北部中尺度涡旋的数值研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 27-34.
- [11] QIAN Y P, WANG Q Q, ZHU B C. Numerical modelings of the wind forced cold and warm gyres in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(5): 625-633. 钱永甫, 王谦谦, 朱伯承. 南海风生冷暖涡的数值模拟[J]. 大气科学, 2000, 24(5): 625-633.
- [12] GE Y, DU Y Y, CHENG Q M, et al. Multifractal filtering method for extraction of ocean eddies from remotely sensed imagery[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2007, 29(5): 40-47. 葛咏, 杜云艳, 成秋明, 等. 多重分形方法在涡旋遥感信息处理提取中的应用研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(5): 40-47.
- [13] GU J S, YUAN Y L, XIONG X J, et al. Statistics of the mesoscale eddies on both sides of the Luzon Strait[J]. Advances In Marine Science, 2007, 25(2): 139-148. 郭景松, 袁业立, 熊学军, 等. 吕宋海峡两侧中尺度涡统计[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(2): 139-148.
- [14] CHENG X H, QI Y Q, WANG W Q. Seasonal and interannual variabilities of mesoscale eddies in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(4): 51-59. 程旭华, 齐义泉, 王卫强. 南海中尺度涡的季节和年际变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(4): 51-59.
- [15] LIN P F, WANG F, CHEN Y L, et al. Temporal and spatial variation characteristics on eddies in the South China Sea[J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2007, 29(3): 14-22. 林鹏飞, 王凡, 陈永利, 等. 南海中尺度涡的时空变化规律- I. 统计特征分析[J]. 海洋学报, 2007, 29(3): 14-22.
- [16] WANG G Y. Rough Sets Theory and Knowledge Acquisition[M]. Xi'an: Xi'an JiaoTong University Press, 2001. 王国胤. 粗糙集理论与知识获取[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [17] MIAO D Q, LI D G. Rough Sets Theory Algorithms and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 苗夺谦, 李道国. 粗糙集理论、算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [18] RANDELL D A, CUI Z, COHN A G. A spatial logic based on regions and connection[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1992: 165-176.
- [19] RANDELL D A, COHN A G. Modelling topological and metrical properties in physical processes[C]//Proceedings of the 1st International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1989: 55-66.
- [20] WANG G H, SU J L, QI Y Q. Advances in studying mesoscale eddies in South China Sea[J]. Advances In Earth Science, 2005, 20(8): 882-886. 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉. 南海中尺度涡研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 882-886.
- [21] WANG J, QI Y Q, SHI P, et al. Characteristics of sea surface height in South China Sea based on data from TOPEX/Poseidon[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(4): 26-33. 王静, 齐义泉, 施平, 等. 基于 TOPEX/Poseidon 资料的南海海面高度场的时空特征分析[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(4): 26-33.
- [22] WANG G H. Discussion on the movement of mesoscale eddies in the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. 王桂华. 南海中尺度涡的运动规律探讨[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [23] QHRN A. Discernibility and rough sets in medicine; tools and application[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 1999: 41-51.
- [24] The General Editorial Committee. Encyclopedia of China[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2009: DISK16. 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2009: DISK16.

## Study on Acquisition of Relations in Time and Space Among Mesoscale Eddies in the South China Sea Based on Rough Set Theory

QI Guang-ya, DU Yun-yan, CAO Feng

(*State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System,*

*Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** Due to the complexity of mechanisms for mesoscale eddy formation in the South China Sea and the numerous causative factors, the methods such as numerical simulation, quantitative statistics, etc., have their limitations in analyzing the relations in time and space among the eddies. The theory of rough sets are applied to describe the relations in time and space of the mesoscale eddies in the South China Sea without any of other priori informations. As a practical example, the data extracted and retrieved from the remote sensing images available in the period from November 2003 to June 2009 are used to show how to obtain the informations about the eddies. The sea area where the eddies are located, the eddy-occurring times, and the eddy types are the main decision properties. Therefore the concrete characteristics about the eddy occurring time, locating area, and type can be described based on the analysis of the regularity of the relations in time and space among the eddies. As it is shown in the studying results, most of warm eddies occur in the southeast and the middle of the South China Sea, and most of them occur in winter. The vorticities are mostly lower in the warm eddies. Most of the warm eddies are situated in the shallower sea area. Most of the warm eddies do not move far away from its original location. To be compared with the warm eddies, most of the cold eddies occur in the southwest and the northeast of the South China Sea, and most of them occur in spring or autumn. The vorticities are stronger in the cold eddies. Most of them occur in the deeper sea area of the South china Sea. They move about in a larger range around its original location.

**Key words:** oceanic eddy; relationship in time and space; rough sets; regularity extraction

**Received:** October 15, 2009