

# 模糊数学方法在南海北部海区 水团分析中的应用\*

李凤岐 苏育嵩 范立群

(山东海洋学院物理海洋与海洋气象系, 青岛) (湛江水产学院)

## 摘 要

本文将模糊数学的多种方法, 用于南海北部海区的水团分析. 在用模糊聚类方法划分水团时, 提出了基于欧氏距离的相似关系, 同时提出了基于 $F$ -检验而决定水团个数的方法. 以模糊聚类划出的水团为基础, 再用软划分方法, 对水团边界和测样归属进行合理调整. 根据上述结果及区域海洋学的分析, 在该海区划出了8个水团: 沿岸冲淡水团 $F$ 、近岸混合水团 $M$ 、暖表层水团 $WS$ 、表层水团 $S$ 、表次层混合水团 $SU$ 、次层水团 $U$ 、次中层混合水团 $UI$ 和中层水团 $I$ . 将各类水团在 $\theta$ - $S$ 图解上的点集, 归结为变形椭圆凸点集、半无界凸点集和单侧凹点集3种类型. 分别提出了建立相应隶属函数的方法, 并给出了拟合结果. 计算了各季节各水团的熵, 讨论了高熵和低熵水团的特征及形成原因. 计算了各季节不同水团之间的格贴近度, 借以讨论水团变性的特点和它们之间的相互关系. 可将8个水团归纳为3种类型: 径流冲淡型( $F$ ), 浅海变性型( $M$ 、 $WS$ 、 $S$ 和 $SU$ ), 深海大洋型( $U$ 、 $UI$ 和 $I$ ).

南海水深域阔, 岸线底形复杂, 调查资料较少, 故分析研究的困难很多. 鉴于调查资料的随机性和水团概念的模糊性<sup>[1]</sup>, 将统计学和模糊数学方法应用于浅海水团分析, 已取得某些成果<sup>[1-5]</sup>. 在南海仅对个别海域作过系统聚类与模糊聚类的试验<sup>[6, 7]</sup>.

本文使用国家海洋局南海分局在北部海区调查的较长序列的资料<sup>1)</sup>, 并参考其他资料, 较系统地应用模糊数学方法进行了水团分析, 得到了某些结果.

## 一、模糊聚类与软划分

与渤、黄、东海相比, 南海水团的保守性和均一性是强一些; 但与典型的大洋水团相比, 其变性也是显然的<sup>[8-10]</sup>; 尤其是北部, 变性更为显著<sup>[11]</sup>. 水团的变性, 使之逐渐

本文于1986年8月22日收到, 修改稿于1986年12月5日收到.

• 国家自然科学基金资助项目.

1) 国家海洋局海洋科技情报研究所编, 海洋调查资料, 第三册, 1980, 1—197.

丧失其原始特征, 而导致模糊性增大. 因此, 用模糊聚类对其划分应更合理一些.

### (一) 模糊聚类

1. 相似关系 为体现水团划分的内同性和外异性原则<sup>[1, 4]</sup>, 我们提出了基于欧氏距离的相似关系  $\tilde{R} = [r_{ij}]$

$$r_{ij} = \exp[-D_{ij}^2/m], \quad i, j=1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

式中,  $m$  是测样总数, 置于分母为防计算溢出.  $D_{ij}^2$  是测样  $i, j$  的欧氏平方距离:

$$D_{ij}^2 = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)', \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{x}_i$  是测样  $i$  的测值:

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}), \quad (3)$$

$N$  是测值的维数. 传统的水团分析一般只取温盐二维, 即  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}) = (t_i, S_i)$ .  $\mathbf{x}_i$  亦然.

依式 (1) 建立的  $\tilde{R}$ , 显然满足自返性和对称性, 传递性可通过对  $\tilde{R}$  的有限次合成运算而实现. 也可用编网等方法直接分类<sup>[12, 13]</sup>.

2. 水团个数的确定 用不同的  $\lambda$  水平求  $\tilde{R}$  的截集, 便可得出不同的分类. 至于“分几类为好”, 所见文献未给出一般方法<sup>[6]</sup>. 我们的做法是: 通过调整  $\lambda$  水平, 依次分为 2 类、3 类、……、30 类, 同时计算

$$F_c = \frac{\frac{1}{2(C-1)} \sum_{k=1}^c m_k (\bar{\mathbf{x}}_k - \bar{\mathbf{x}})(\bar{\mathbf{x}}_k - \bar{\mathbf{x}})'}{\frac{1}{2(m-C)} \sum_{k=1}^c \sum_{r=1}^{m_k} (\mathbf{x}_r - \bar{\mathbf{x}}_k)(\mathbf{x}_r - \bar{\mathbf{x}}_k)'}, \quad C=1, 2, \dots, 30, \quad (4)$$

式中,  $C$  为分类数,  $m_k$  为第  $k$  类内的测样数,  $r$  为第  $k$  类内测样的新序号,  $\bar{\mathbf{x}}_k$  是第  $k$  类的均值,  $\bar{\mathbf{x}}$  是总体的均值.

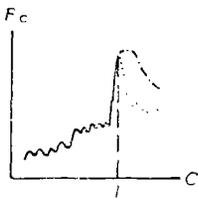


图1  $F_c$  随  $C$  的变化

有了  $F_c$  值, 不仅可以判断分为  $C$  类有无统计学上的显著意义, 而且还可以分析  $F_c$  的变化规律. 我们发现, 几乎每个月都有如下特点: 当分类数增至某个数  $l$  时,  $F$  值出现极大的阶跃; 其后, 类数再增加时,  $F$  值不是缓增就是剧降 (图 1). 这表明对应于  $l$  的分类, 统计意义显著. 在  $l$  类中, 我们把那些密集成团的点集 (本海区为六七个) 各划为一个水团, 而把那些零散的点集归入“混合水”. 后者在点聚图上介于低盐和高盐点集之间 (图 2); 在大面图上介于沿岸水和外海水之间 (图 3), 故称之为“近岸混合水团”, 以  $\tilde{M}$  记之. 其他水团的名称和记号为: 沿岸冲淡水团  $\tilde{F}$ , 暖表层水团  $\tilde{WS}$ , 表层水团  $\tilde{S}$ , 表次层混合水团  $\tilde{SU}$ , 次层水团  $\tilde{U}$ , 次中层混合水团  $\tilde{UI}$  和中层水团  $\tilde{I}$ .

有了  $F_c$  值, 不仅可以判断分为  $C$  类有无统计学上的显著意义, 而且还可以分析  $F_c$  的变化规律. 我们发现, 几乎每个月都有如下特点: 当分类数增至某个数  $l$  时,  $F$  值出现极大的阶跃; 其后, 类数再增加时,  $F$  值不是缓增就是剧降 (图 1). 这表明对应于  $l$  的分类, 统计意义显著. 在  $l$  类中, 我们把那些密集成团的点集 (本海区为六七个) 各划为一个水团, 而把那些零散的点集归入“混合水”. 后者在点聚图上介于低盐和高盐点集之间 (图 2); 在大面图上介于沿岸水和外海水之间 (图 3), 故称之为“近岸混合水团”, 以  $\tilde{M}$  记之. 其他水团的名称和记号为: 沿岸冲淡水团  $\tilde{F}$ , 暖表层水团  $\tilde{WS}$ , 表层水团  $\tilde{S}$ , 表次层混合水团  $\tilde{SU}$ , 次层水团  $\tilde{U}$ , 次中层混合水团  $\tilde{UI}$  和中层水团  $\tilde{I}$ .

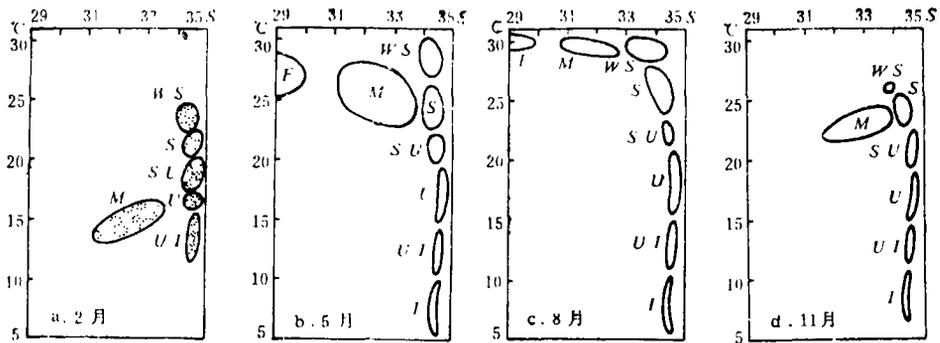


图2 南海北部海区水团的点集  
(2月份未测深水站)

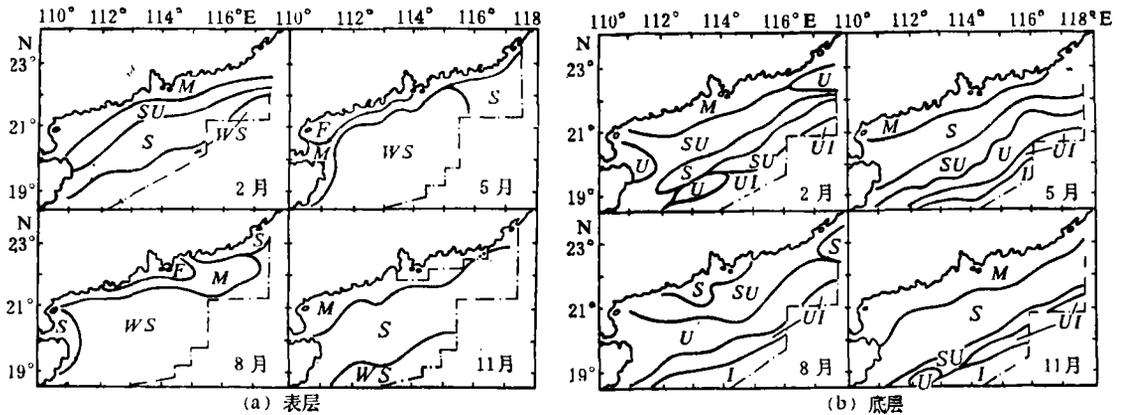


图3 南海北部海区水团的分布

(二) 模糊软划分

仅依上述划分水团时，仍然是“非此即彼”的硬划分，边界的描划也较“主观”。软划分可给出隶属度，边界描划较“客观”<sup>〔13〕</sup>。其步骤是：

1. 给出初始分类矩阵，可依模糊聚类结果，给出  $U^{(0)} = [u_{kj}^{(0)}]$ ：

$$u_{kj}^{(0)} = \begin{cases} 1, & \text{当 } x_j \in \text{水团 } k, \\ 0, & \text{当 } x_j \notin \text{水团 } k, \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, C; \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

2. 计算各水团的聚类中心：

$$V_k = \sum_{j=1}^m (u_{kj}^{(0)})^A x_j / \left[ \sum_{j=1}^m (u_{kj}^{(0)})^A \right]^{-1}, \quad k=1, 2, \dots, C. \quad (6)$$

式中， $V_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kN})$ ； $A$ 为参数，可加强  $x_j$  属于各类隶属度的对比度，在北海区我们取  $A=1.5$ ，若再大，则混合带偏宽。

3. 求软划分矩阵  $U^{(1)} = [u_{kj}^{(1)}]$ ：

$$u_{kj}^{(1)} = \left[ \sum_{i=1}^c \left( \frac{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{V}_k\|}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{V}_i\|} \right)^{\frac{2}{1-\alpha}} \right]^{-1}, \quad k=1, 2, \dots, C; \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

式中,  $\|\dots\|^2$  我们取为欧氏平方距离。

4. 迭代: 算出  $U^{(1)}$  后, 可将其作为新的  $U^{(0)}$ , 返回步骤 2, 如此反复迭代. 停止迭代的条件是, 检查相邻两次的矩阵, 有  $\max\{|u_{kj}^{(t)} - u_{kj}^{(t-1)}|\} < \epsilon (=0.001)$ . 由最后的软划分矩阵  $U^{(1)}$ , 便可划出等隶属度线进行分析, 尤对边界的调整划定大有助益。

## 二、各水团隶属函数的建立

将水团定义为论域中的模糊子集, 以及其隶属函数取何种形式等, 已于文献 [1, 4] 中讨论过. 浅海水团水体元的测值, 在  $\vartheta$ - $S$  点聚图上, 一般为围绕其聚类中心散布的凸点集 [1-3]. 当然, 由于温盐扩散系数及不同水团扩散性质的差异, 点集一般呈变形椭圆域 [4]. 点集的外包络线, 习惯上就作为水团的边界, 依文献 [1], 即隶属度为 0.5. 愈近聚类中心, 隶属度愈高. 因而, 我们可用  $\vartheta$ - $S$ - $\mu$  空间中的钟形函数  $\mu(\vartheta, S)$ , 来拟合其隶属函数 [4].

### (一) 变形椭圆凸点集的隶属函数

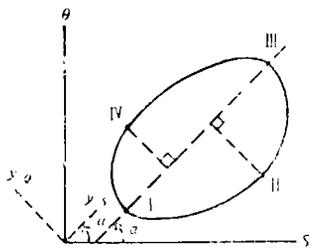


图4 拼接椭圆

变性水团在  $\vartheta$ - $S$  平面上的点集, 通常为凸点集, 即集内任两点的连线不越出该集的外包络线. 拟合凸点集最简便易行的方法, 是用 4 个椭圆的各 1/4, 拼接而成变形椭圆域, 然后依其建立隶属函数。

图 4 中点 I、III 是域内距离最远的两点, 线 I-III 与  $S$  轴的夹角为  $\alpha$ . 点 II、IV 分别为 I-III 下方、上方距离最远的点. 进行坐标转换:

$$\left. \begin{aligned} y_{\vartheta} &= \vartheta \cos \alpha - S \sin \alpha \\ y_S &= S \cos \alpha + \vartheta \sin \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

则隶属函数可写为:

$$\mu(\mathbf{x}) = \mu(y_{\vartheta}, y_S) = \exp \left[ -\frac{(y_{\vartheta} - b_{\vartheta})^2}{G_{\vartheta}} - \frac{(y_S - b_S)^2}{G_S} \right]. \quad (9)$$

式中,

$$b_{\vartheta} = y_{\vartheta}(I) = y_{\vartheta}(III), \quad (10)$$

$$b_S = \begin{cases} y_S(II), & \text{当 } y_{\vartheta} \leq b_{\vartheta}, \\ y_S(IV), & \text{当 } y_{\vartheta} > b_{\vartheta}, \\ y_S, & \text{当 } y_{\vartheta} = b_{\vartheta} \text{ 且 } y_S \in (S', S''), \\ S', & \text{当 } y_{\vartheta} = b_{\vartheta} \text{ 且 } y_S < S', \\ S'', & \text{当 } y_{\vartheta} = b_{\vartheta} \text{ 且 } y_S > S''; \end{cases} \quad (11)$$

$$G_{\theta} = \begin{cases} [y_{\theta}(I) - b_{\theta}]^2 / \ln 2, & \text{当 } y_{\theta} \leq b_{\theta}, \\ [y_{\theta}(IV) - b_{\theta}]^2 / \ln 2, & \text{当 } y_{\theta} > b_{\theta}; \end{cases} \quad (12)$$

$$G_s = \begin{cases} [y_s(I) - y_s(II)]^2 / \ln 2, & \text{当 } y_{\theta} \leq b_{\theta} \text{ 且 } y_s \leq y_s(II), \\ [y_s(II) - y_s(III)]^2 / \ln 2, & \text{当 } y_{\theta} \leq b_{\theta} \text{ 且 } y_s > y_s(II), \\ [y_s(III) - y_s(IV)]^2 / \ln 2, & \text{当 } y_{\theta} > b_{\theta} \text{ 且 } y_s > y_s(IV), \\ [y_s(IV) - y_s(I)]^2 / \ln 2, & \text{当 } y_{\theta} > b_{\theta} \text{ 且 } y_s \leq y_s(IV), \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $y_{\theta}(I)$  表示点 I 的  $y_{\theta}$  值, 其余类推 (下同); 而  $S' = \min\{y_s(I), y_s(IV)\}$ ,  $S'' = \max\{y_s(II), y_s(III)\}$ .

作为示例, 将  $\mu_M$  的参数列于表 1 中 (为省正文篇幅, 其他水团的参数列于附表 1—4 中). 从表中看  $M$  椭圆长轴方向的变化是很有趣的. 冬季长轴左低右高 ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ); 春季后虽普遍增温, 但低盐部分增温更快, 长轴变为左高右低 ( $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ), 夏季高盐部分

表 1  $\mu_M$  在 4 个季节中的参数值

参 数	冬季 (2月)	春季 (5月)	夏季 (8月)	秋季 (11月)	
$\alpha$	47.29049°	113.41858°	156.83229°	48.06636°	
$b_{\theta}$	-13.90468	-39.67592	-39.51698	-9.02456	
$y_s(II)$	32.46138	11.65195	-17.15439	39.61861	
$y_s(IV)$	33.60825	9.83348	-18.02853	38.88298	
$G_{\theta}$	$y_{\theta} \leq b_{\theta}$	0.85250	$0.29554 \times 10$	0.24480	$0.15479 \times 10$
	$y_{\theta} > b_{\theta}$	$0.14752 \times 10$	$0.25894 \times 10$	$0.96176 \times 10^{-1}$	0.99518
$G_s$	$y_{\theta} \leq b_{\theta}$ 且 $y_s \leq y_s(II)$	$0.33601 \times 10$	$0.24366 \times 10^2$	$0.43264 \times 10$	$0.11411 \times 10^2$
	$y_{\theta} \leq b_{\theta}$ 且 $y_s > y_s(II)$	$0.58416 \times 10$	$0.15102 \times 10$	0.67303	$0.19182 \times 10$
	$y_{\theta} > b_{\theta}$ 且 $y_s > y_s(IV)$	$0.10804 \times 10$	$0.11649 \times 10^2$	$0.34982 \times 10$	$0.51464 \times 10$
	$y_{\theta} > b_{\theta}$ 且 $y_s \leq y_s(IV)$	$0.10308 \times 10^2$	$0.75735 \times 10$	$0.10610 \times 10$	$0.62225 \times 10$

的温度也升上来了, 虽仍左高右低, 但斜率为四季中最小; 秋季降温又以低盐部分为著, 长轴复又左低右高.

(二) 半无界凸点集的隶属函数

南海北部的近岸冲淡水势力不强, 但珠江等入海, 也形成相当范围的冲淡水. 其点集只在右侧保持凸性, 左侧可一直延伸到  $S \rightarrow 0$  处, 故可处理为半无界凸点集 (图 5). 对盐度大于临界值  $a_s$  (我们取  $a_s = 29.00$ ) 者, 可用半个变形椭圆拟合, 而小于  $a_s$  者隶属度均为 1<sup>(1, 4)</sup>. 其隶属函数可有更简单的形式:

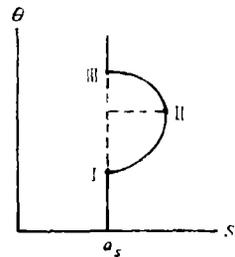


图 5 半无界凸点集

$$\mu_{\tilde{F}}(x) = \begin{cases} 1, & S \leq a_s \\ \exp \left[ -\frac{(\vartheta - a_s)^2}{D_s} - \frac{(S - a_s)^2}{D_s} \right], & S > a_s. \end{cases} \quad (14)$$

式中,

$$\begin{aligned} a_s &= S(I) = S(\mathbb{I}), \\ a_s &= \vartheta(I), \\ D_s &= [S(\mathbb{I}) - a_s]^2 / \ln 2, & S > a_s, \\ D_s &= \begin{cases} [\vartheta(I) - a_s]^2 / \ln 2, & \vartheta \leq a_s, \\ [\vartheta(\mathbb{I}) - a_s]^2 / \ln 2, & \vartheta > a_s. \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

依实测资料计算了 $\mu_{\tilde{F}}$ 的参数值(表2. 2月、11月 $\tilde{F}$ 范围小且紧靠岸, 未测, 故缺).

表2  $\mu_{\tilde{F}}$ 的参数值

参 数	$a_s$	$a_s$	$D_s$	$D_s$	
				$\vartheta \leq a_s$	$\vartheta > a_s$
5 月	29.00	26.75	$0.14427 \times 10$	$0.22542 \times 10$	$0.14427 \times 10$
8 月	29.00	30.00	$0.14427 \times 10$	0.81152	0.36074

### (三) 单侧凹点集的隶属函数

大洋的次层和深层水团, 对应于盐度垂向变化的极大值层, 中层水团(除地中海水和红海水外)则对应于盐度的极小值, 故大洋的温盐曲线族呈耳廓形弯曲. 位于曲线族转折处的次层、中层和深层水团, 其点集便成了单侧凹点集. 本海区因深度所限, 未发现大洋深层水, 但大洋次层、中层水的散布却不容置疑.  $\tilde{I}$ 的右凹性明显而稳定;  $\tilde{U}$ 明显左凹, 仅在2月因受对流混合影响失去凹性. 对此, 我们用变形椭圆凸点集和一个虚设的半无界凸点集的余集来拟合(如图6). 设凸点集的隶属函数为 $\mu_1$ , 半无界凸点集的隶属函数为 $\mu_2$ , 则

$$\mu = \begin{cases} \mu_1, & \text{当 } \mu_1 \geq 0.5 \text{ 且 } \mu_2 < 0.5, \\ 1 - \mu_2, & \text{当 } \mu_1 > 0.5 \text{ 且 } \mu_2 \geq 0.5, \\ \min\{\mu_1, \mu_2\}, & \text{当 } \mu_1 < 0.5 \text{ 且 } \mu_2 < 0.5. \end{cases} \quad (16)$$

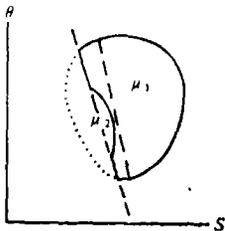


图6 左凹点集

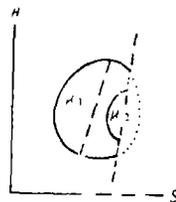


图7 右凹点集

中层水团的凹点集亦可用式(16)拟合, 但 $\mu_1$ 和 $\mu_2$ 的位置如图7。  
 $\mu_U$ 和 $\mu_I$ 的参数值, 列于附表5和附表6中。

### 三、利用隶属函数进一步讨论水团的特征

#### (一) 用格贴近度讨论水团特征的相近程度

1. 格贴近度的计算: 考虑到隶属函数有钟形特点, 取用内积和外积定义的格贴近度<sup>[12, 13]</sup>。例如, 对 $\tilde{F}$ 和 $\tilde{M}$ , 其内积和外积分别为:

$$\tilde{F} \cdot \tilde{M} = \bigvee_{z \in X} [\mu_{\tilde{F}}(\mathbf{x}) \wedge \mu_{\tilde{M}}(\mathbf{x})], \quad (17)$$

$$\tilde{F} \odot \tilde{M} = \bigwedge_{z \in X} [\mu_{\tilde{F}}(\mathbf{x}) \vee \mu_{\tilde{M}}(\mathbf{x})], \quad (18)$$

式中,  $X$ 为论域, 其他符号皆从模糊数学习惯用法<sup>[12, 13]</sup>。 $\tilde{F}$ 和 $\tilde{M}$ 的格贴近度为

$$(\tilde{F}, \tilde{M}) = \frac{1}{2} [\tilde{F} \cdot \tilde{M} + (1 - \tilde{F} \odot \tilde{M})]. \quad (19)$$

为省篇幅, 仅从计算结果中取各季前6个最大的格贴近度列于表3中。

表3 各季节前6个最大的格贴近度

名次	1	2	3	4	5	6
冬季 (2月)	$(\tilde{WS}, \tilde{S})=0.679$	$(\tilde{S}, \tilde{SU})=0.674$	$(\tilde{SU}, \tilde{U})=0.609$	$(\tilde{U}, \tilde{UI})=0.521$	$(\tilde{M}, \tilde{SU})=0.513$	
春季 (5月)	$(\tilde{M}, \tilde{S})=0.739$	$(\tilde{U}, \tilde{UI})=0.719$	$(\tilde{S}, \tilde{SU})=0.693$	$(\tilde{UI}, \tilde{I})=0.679$	$(\tilde{WS}, \tilde{S})=0.668$	$(\tilde{SU}, \tilde{U})=0.643$
夏季 (8月)	$(\tilde{U}, \tilde{UI})=0.731$	$(\tilde{S}, \tilde{SU})=0.711$	$(\tilde{SU}, \tilde{U})=0.659$	$(\tilde{M}, \tilde{WS})=0.649$	$(\tilde{WS}, \tilde{S})=0.626$	$(\tilde{UI}, \tilde{I})=0.593$
秋季 (11月)	$(\tilde{M}, \tilde{S})=0.782$	$(\tilde{U}, \tilde{UI})=0.719$	$(\tilde{WS}, \tilde{S})=0.662$	$(\tilde{UI}, \tilde{I})=0.659$	$(\tilde{S}, \tilde{SU})=0.636$	$(\tilde{SU}, \tilde{U})=0.571$

2.  $\tilde{M}$ 相近于哪个水团: 顾名思义, $\tilde{M}$ 是由沿岸冲淡水 and 外海水混合而形成的, 现在要问, 相比之下它更相近于谁? 由表3看,  $\tilde{M}$ 与 $\tilde{F}$ 的贴近度, 无论哪个季节都未进入前6名; 而与外海水的贴近度, 四季都进入了前5名, 春、秋季更是名列第一; 这表明 $\tilde{M}$ 更相近于外海水团。当然, 季节变化时, 它所贴近的水团也有别。名列第一的春、秋季, 它相近于 $\tilde{S}$ , 夏季增温相近于 $\tilde{WS}$ , 冬季降温后, 它又相近于 $\tilde{SU}$  (此时的 $\tilde{SU}$ 主要是前期余留的高盐水冷却对流而形成)。这种变更, 反映了 $\tilde{M}$ 特征的季节变化是很大的。

3. 垂向各层次水团格贴近度的综合比较: 除 $\tilde{M}$ 和 $\tilde{F}$ 外, 其余各水团在 $\delta$ - $S$ 点聚图上基本呈纵向叠置; 在海区中的分布, 特别是深水海域, 尤其是次层及其以下各水团, 也基本是垂向叠置的。故重点讨论各层水团的格贴近度。由于季节变化等原因, 不宜仅用格贴近

度的量值直接比较, 还应考虑不同季节的名次作综合评判. 为此, 对名次1—6给归一化权重: 0.25、0.21、0.17、0.14、0.12、0.11; 求加权平均, 得  $(\overline{U}, \overline{UI}) = 0.1394 > (\overline{S}, \overline{SU}) = 0.1212 > (\overline{WS}, \overline{S}) = 0.1094 > (\overline{SU}, \overline{U}) = 0.0873 > (\overline{UI}, \overline{I}) = 0.0842$ . 可见: (1) 名列第一的是  $(\overline{U}, \overline{UI})$ . 在大洋中它们的性质亦相近, 故分开与否观点不一<sup>[8, 14]</sup>. 在此海区我们是将其分开, 一因聚类结果各自成类, 二是经判别分析检验, 证实其差异确已达到显著水平. 名次更后的各组, 当然也应该分别独立划为水团.

(2) 表层与次层之间的混合水团  $\overline{SU}$ , 以及次层与中层的混合水团  $\overline{UI}$ , 都具有“趋上”的特征. 即它们与“下垫”水团的贴进度均明显地小于与“上覆”水团的贴进度. 对  $\overline{SU}$  而言, 这体现了秋冬季降温对流混合影响之大; 对  $\overline{UI}$  而言, 既看出次层的“活动性”大于中层, 也显示出中层水沿陆坡爬升的效应, 即深度越浅, 受次层的影响越大.

综合上述可见, 在本海区已不宜再沿袭大洋水团的简单分层模式.

## (二) 熵、水团的模糊度和变异性

熵原是热力学的一个概念, 用于统计物理成了描述杂乱无章性的尺度; 用于概率论和信息论, 可作为描述随机变量无约束程度和剩余信息量的尺度. 用于水团分析, 则可描述水团的模糊度——模糊性和不均匀性的尺度.

水团  $A$  的熵, 可依其隶属函数借助仙农函数来计算, 即

$$\tilde{H}(A) = \frac{1}{m \ln 2} \sum_{i=1}^m S(\mu_A(x_i)). \quad (20)$$

其中,  $S(z)$  为仙农函数<sup>[12]</sup>

$$S(z) = -z \ln z - (1-z) \ln(1-z).$$

考虑到该海区各水团盐度变化的特殊性, 即除  $\overline{F}$  和  $\overline{M}$  外, 其余各水团的盐度均很高, 且集中于一个狭窄的区间内; 故盐度步长及起点稍有不当地, 将导致计算结果失真. 故我们直接用实测各水样的温盐值, 计算各水团的熵, 以期较好地反映实际情况. 计算结果如下表.

表4 各水团四季的熵

名次	1	2	3	4	5	6	7	8
冬季 (2月)	$\overline{SU}$ 0.322	$\overline{WS}$ 0.228	$\overline{S}$ 0.199	$\overline{M}$ 0.150	$\overline{U}$ 0.112	$\overline{UI}$ 0.071		
春季 (5月)	$\overline{M}$ 0.422	$\overline{S}$ 0.282	$\overline{U}$ 0.231	$\overline{UI}$ 0.198	$\overline{WS}$ 0.152	$\overline{SU}$ 0.119	$\overline{I}$ 0.117	$\overline{F}$ 0.001
夏季 (8月)	$\overline{S}$ 0.251	$\overline{U}$ 0.238	$\overline{UI}$ 0.206	$\overline{WS}$ 0.181	$\overline{SU}$ 0.128	$\overline{I}$ 0.092	$\overline{M}$ 0.068	$\overline{F}$ 0.005
秋季 (11月)	$\overline{M}$ 0.483	$\overline{S}$ 0.447	$\overline{U}$ 0.118	$\overline{UI}$ 0.112	$\overline{WS}$ 0.100	$\overline{SU}$ 0.096	$\overline{I}$ 0.085	

1. 低熵水团：本海区模糊度最低的水团是  $\tilde{F}$ 。秋、冬季迫于高盐势强的外海水，它仅龟缩于近岸河口区，其低盐特征相比之下更突出，因而易辨认、不模糊。春、夏径流强盛， $\tilde{F}$  扩展范围增广之时，其熵值也为本海区最低（见表4）。

其次是  $\tilde{I}$ ，除2月份未观测外，其熵值均很低。原因是它潜伏于本海区南侧的深水区，较少受上层各水团的影响，所以变性较小。当然，源于太平洋的中层水，在通过巴士海峡进入南海后，在沿陆坡北进过程中，其上部由于爬升和混合，也会变性。但变性较大的部分已归入  $\tilde{UI}$ ；滞留于陆坡外缘的  $\tilde{I}$ ，仍较好地保持着初始特征，故其熵值很低；只缘水团厚度远大于  $\tilde{F}$ ，温度变化幅度较大，熵才高于  $\tilde{F}$ 。

2. 高熵水团：最注目的是  $\tilde{M}$ 。春、秋两季熵值均居本海区之首，表明在增、降温期变性强烈，模糊度高。2、8月熵值偏低，是因为此时增、降温率趋近于零，椭圆长轴较平，但这种状况维持时间短促。从全年看，长轴方向反复改变，所贴近的水团也随季节而异，其季节变性之大不言而喻。

次高熵水团为  $\tilde{S}$ ，这与其“处境”有关。春、夏季增温变性，秋、冬季对流混合，还有次层水的涌升等等，不是交替作用，就是同时夹击，使得  $\tilde{S}$  “终年几无宁日”。

3. 水团类型的划分：综合上述，本海区的8个水团可分为3种类型：（1）径流冲淡型： $\tilde{F}$ ，特点是低熵，终年以低盐为特征。（2）浅海变性型：包括  $\tilde{M}$ 、 $\tilde{WS}$ 、 $\tilde{S}$  和  $\tilde{SU}$ 。 $\tilde{SU}$  之所以划入该类型，是因为它与  $\tilde{S}$  的贴近度甚高，受  $\tilde{S}$  的影响显著。该型水团的熵值较高，且季节变化明显，受陆地及海面条件影响显著。（3）深海大洋型：包括  $\tilde{U}$ 、 $\tilde{UI}$  和  $\tilde{I}$ ，熵值低，且季节变化小，终年散布于深海，较好地保持着大洋水团的特征。

附表1 冬季（2月） $\mu_{\tilde{WS}}$ 、 $\mu_{\tilde{S}}$ 、 $\mu_{\tilde{SU}}$  和  $\mu_{\tilde{UI}}$  的参数值

参 数	$\tilde{WS}$	$\tilde{S}$	$\tilde{SU}$	$\tilde{UI}$	
$\alpha$	98.53081°	79.91919°	82.27151°	88.67808°	
$b_0$	-37.41643	-30.35942	-31.62161	-34.22551	
$y_s$ (II)	18.39220	26.34000	22.31145	14.67591	
$y_s$ (IV)	17.69302	27.67113	23.62610	13.44185	
$G_0$	$y_0 \leq b_0$	0.24301	$0.17617 \times 10^{-1}$	0.25329	$0.15923 \times 10^{-1}$
	$y_0 > b_0$	0.14904	0.23128	0.13362	$0.46085 \times 10^{-2}$
$G_s$	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_s \leq y_s$ (II)	$0.30551 \times 10$	$0.21193 \times 10^{-1}$	$0.96552 \times 10^{-1}$	$0.81930 \times 10$
	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_s > y_s$ (II)	0.85403	$0.42038 \times 10$	$0.95063 \times 10$	$0.33243 \times 10$
	$y_0 > b_0$ 且 $y_s > y_s$ (IV)	$0.31114 \times 10$	0.20382	$0.22625 \times 10$	$0.10926 \times 10^2$
	$y_0 > b_0$ 且 $y_s \leq y_s$ (IV)	0.82465	$0.30430 \times 10$	$0.35713 \times 10$	$0.19047 \times 10$

附表2 春季(5月)  $\mu_{WS}$ 、 $\mu_S$ 、 $\mu_{SU}$  和  $\mu_{UI}$  的参数值

参 数	$WS$	$S$	$SU$	$UI$	
$\alpha$	95.41819°	95.56496°	91.67079°	88.98150°	
$b_\theta$	-36.83917	-36.58949	-35.08266	-34.34680	
$y_S$ (II)	24.60025	20.38043	20.62845	13.21482	
$y_S$ (IV)	24.67390	19.70753	20.62538	13.20949	
$G_\theta$	$y_\theta \leq b_\theta$	0.15688	$0.46835 \times 10^{-1}$	$0.92964 \times 10^{-1}$	$0.22093 \times 10^{-1}$
	$y_\theta > b_\theta$	0.28794	0.60761	0.15379	$0.44795 \times 10^{-1}$
$G_S$	$y_\theta \leq b_\theta$ 且 $y_S \leq y_S$ (II)	$0.40542 \times 10$	$0.34205 \times 10$	$0.49023 \times 10$	$0.97722 \times 10$
	$y_\theta \leq b_\theta$ 且 $y_S > y_S$ (II)	$0.59465 \times 10$	$0.81629 \times 10$	0.44864	$0.51977 \times 10$
	$y_\theta > b_\theta$ 且 $y_S > y_S$ (IV)	$0.55229 \times 10$	$0.13433 \times 10^2$	0.45359	$0.52270 \times 10$
	$y_\theta > b_\theta$ 且 $y_S \leq y_S$ (IV)	$0.44183 \times 10$	$0.10845 \times 10$	$0.48860 \times 10$	$0.97322 \times 10$

附表3 夏季(8月)  $\mu_{WS}$ 、 $\mu_S$ 、 $\mu_{SU}$  和  $\mu_{UI}$  的参数值

参 数	$WS$	$S$	$SU$	$UI$	
$\alpha$	77.41491°	98.91244°	91.83286°	88.63652°	
$b_\theta$	-26.62463	-37.57602	-35.16402	-34.24843	
$y_S$ (II)	35.65222	20.46921	21.88029	15.12421	
$y_\theta$ (II)	36.46954	18.32538	21.54071	12.41570	
$G_\theta$	$y_\theta \leq b_\theta$	0.63369	0.68126	$0.54238 \times 10^{-1}$	$0.58501 \times 10^{-1}$
	$y_\theta > b_\theta$	$0.13135 \times 10$	$0.39398 \times 10^{-1}$	$0.27130 \times 10^{-1}$	$0.22273 \times 10^{-1}$
$G_S$	$y_\theta \leq b_\theta$ 且 $y_S \leq y_S$ (II)	$0.16521 \times 10$	$0.95632 \times 10$	$0.57409 \times 10$	$0.15766 \times 10^2$
	$y_\theta \leq b_\theta$ 且 $y_S > y_S$ (II)	$0.18153 \times 10$	$0.50944 \times 10$	0.37005	$0.11568 \times 10$
	$y_\theta > b_\theta$ 且 $y_S > y_S$ (IV)	0.14358	$0.23349 \times 10^2$	$0.10327 \times 10$	$0.18739 \times 10^2$
	$y_\theta > b_\theta$ 且 $y_S \leq y_S$ (IV)	$0.51396 \times 10$	0.26775	$0.39527 \times 10$	0.51456

附表4 秋季(11月)  $\mu_{WS}$ 、 $\mu_S$ 、 $\mu_{SU}$ 和 $\mu_{UI}$ 的参数值

参 数		$WS$	$S$	$SU$	$UI$
	$\alpha$	95.71039°	97.96956°	87.47391°	88.46135°
	$b_0$	-36.29393	-37.18732	-33.70901	-34.14949
	$y_S$ (II)	22.54465	19.67256	22.06201	14.47456
	$y_S$ (IV)	22.40137	18.39386	21.89629	13.71973
$G_0$	$y_0 \leq b_0$	$0.51406 \times 10^{-2}$	0.28400	$0.17935 \times 10^{-1}$	$0.10217 \times 10^{-1}$
	$y_0 > b_0$	$0.67265 \times 10^{-1}$	$0.36675 \times 10^{-1}$	$0.84174 \times 10^{-1}$	$0.10583 \times 10^{-1}$
$G_S$	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_S \leq y_S$ (II)	0.35565	$0.67269 \times 10$	$0.34949 \times 10$	$0.82820 \times 10$
	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_S > y_S$ (II)	$0.16356 \times 10^{-1}$	$0.10918 \times 10$	$0.49209 \times 10$	$0.11636 \times 10$
	$y_0 > b_0$ 且 $y_S > y_S$ (IV)	$0.89992 \times 10^{-1}$	$0.66604 \times 10$	$0.58437 \times 10$	$0.39415 \times 10$
	$y_0 > b_0$ 且 $y_S \leq y_S$ (IV)	0.18000	$0.11188 \times 10$	$0.27902 \times 10$	$0.41611 \times 10$

附表5  $\mu_U$ 的参数值

参 数		春季(5月)	夏季(8月)	秋季(11月)	冬季(2月)	
	$\alpha$	89.11908°	91.10558°	88.94713°	90.00000°	
	$b_0$	-34.36285	-34.99681	-34.28662	-34.48000	
	$y_S$ (II)	19.13437	16.57532	17.28563	16.40000	
	$y_S$ (IV)	17.52748	16.18370	17.28139	16.85000	
$G_0$	$y_0 \leq b_0$	$0.74274 \times 10^{-1}$	$0.24212 \times 10^{-1}$	$0.21246 \times 10^{-1}$	0.12134	
	$y_0 > b_0$	$0.62678 \times 10^{-1}$	0.13694	$0.17019 \times 10^{-1}$	0.11311	
$G_S$	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_S \leq y_S$ (II)	$0.24299 \times 10^2$	$0.60503 \times 10$	$0.63780 \times 10$	0.92331	
	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_S > y_S$ (II)	$0.17350 \times 10$	$0.19254 \times 10^2$	$0.72916 \times 10$	$0.14427 \times 10$	
	$y_0 > b_0$ 且 $y_S > y_S$ (IV)	$0.10545 \times 10^2$	$0.23603 \times 10^2$	$0.73191 \times 10$	0.43640	
	$y_0 > b_0$ 且 $y_S \leq y_S$ (VI)	$0.89959 \times 10$	$0.39576 \times 10$	$0.63523 \times 10$	$0.22542 \times 10$	
$\mu_2$	$\alpha$	89.02495°	89.04510°	88.47251°	—	
	$b_0$	-34.14314	-34.08441	-34.08788	—	
	$y_S$ (II)	18.08633	18.92325	17.66641	—	
	$G_0$	$y_0 \leq b_0$	$0.34225 \times 10^{-1}$	$0.34653 \times 10^{-1}$	$0.41007 \times 10^{-2}$	—
	$G_S$	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_S \leq y_S$ (II)	$0.10541 \times 10^2$	$0.32582 \times 10$	$0.44286 \times 10$	—
		$y_0 \leq b_0$ 且 $y_S > y_S$ (II)	$0.57573 \times 10$	$0.32358 \times 10$	$0.22507 \times 10$	—

附表6  $\mu_T$ 的参数值

参 数		春季(5月)	夏季(8月)	秋季(11月)	
$\alpha$		91.47846°	90.19642°	90.00000°	
$b_0$		-34.71391	-34.48740	-34.40000	
$y_s$ (II)		6.40268	8.98085	8.75000	
$y_s$ (IV)		6.41196	6.48152	8.50000	
$G_0$	$y_0 \leq b_0$	$0.33711 \times 10^{-1}$	$0.78557 \times 10^{-2}$	$0.14429 \times 10^{-1}$	
	$y_0 > b_0$	$0.61828 \times 10^{-1}$	$0.22482 \times 10^{-1}$	$0.14424 \times 10^{-1}$	
$\mu_1$	$G_s$	$y_0 \leq b_0$ 且 $y_s \leq y_s$ (II)	$0.60436 \times 10$	$0.23081 \times 10^2$	$0.86598 \times 10$
		$y_0 \leq b_0$ 且 $y_s > y_s$ (II)	$0.97887 \times 10$	$0.46757 \times 10$	$0.66689 \times 10$
		$y_0 > b_0$ 且 $y_s > y_s$ (IV)	$0.97191 \times 10$	$0.26670 \times 10^2$	$0.83099 \times 10$
		$y_0 > b_0$ 且 $y_s \leq y_s$ (IV)	$0.60986 \times 10$	$0.32480 \times 10$	$0.69826 \times 10$
$\alpha$		90.14551°	89.34497°	89.23579°	
$b_0$		-34.69362	-34.42915	-34.37692	
$y_s$ (IV)		7.16357	6.99345	8.25855	
$\mu_2$	$G_0$	$y_0 \geq b_0$	$0.13193 \times 10^{-1}$	$0.31659 \times 10^{-2}$	$0.31412 \times 10^{-2}$
	$G_s$	$y_0 \geq b_0$ 且 $y_s > y_s$ (IV)	$0.73021 \times 10$	$0.19100 \times 10$	$0.90633 \times 10^{-1}$
		$y_0 \geq b_0$ 且 $y_s \leq y_s$ (IV)	$0.44915 \times 10$	0.51850	$0.22524 \times 10$

## 参 考 文 献

- [1] 李凤岐等, 用模糊集合观点讨论水团的有关概念, 海洋与湖沼, 17(1986), 2: 102—110.
- [2] 苏育嵩等, 聚类分析法在浅海水团分析中的应用及黄、东海变性水团的分析, 海洋与湖沼, 14(1983), 1: 1—13.
- [3] 李凤岐等, 聚类分析在浅海变性水团分析中的试验, 海洋学报, 5(1983), 6: 675—686.
- [4] 李凤岐等, 从混合变性过程看水团隶属函数的建立, 海洋学报, 8(1986), 2: 131—141.
- [5] 王凤钦等, 浅海变性水团的软划分, 海洋学报, 8(1986), 4: 408—415.
- [6] 邱章、黄企洲, 模糊聚类法在海洋水团划分中的应用初探(I), 海洋湖沼通报, 1984, 1: 15—19.
- [7] 黄建冲、黄企洲, 试用“聚类分析”方法分析巴士海峡区域的水团, 海洋湖沼通报, 1983, 3: 9—13.
- [8] Sverdrup, H. U. et al., *The Oceans, Their Physics, Chemistry and general Biology*, Prentice-Hall, Inc. New York, 1949, 735—737, 625—626, 669—671, 691—693, 700—701, 714—742.
- [9] 赫崇本、管秉贤, 南海中部NE—SW断面海水热盐结构以及海盆冷水来源的分析, 海洋与湖沼, 15(1984), 5: 411—418.
- [10] 徐锡祯, 南海中部的温、盐、密分布及水团特征, 南海海区综合调查研究报告(一), 科学出版社, 1982, 119—127.
- [11] 黄企洲, 巴士海峡的海洋学状况, 南海海洋科学集刊, 第6集, 科学出版社, 1984, 53—67.
- [12] 汪培庄, 模糊集合论及其应用, 上海科学技术出版社, 1983, 54—84, 20—21.
- [13] 楼世博等, 模糊数学, 科学出版社, 1983, 94—98, 117—124.
- [14] 增泽让太郎等著, 鲁守范译, 物理海洋学, 第4卷, 科学出版社, 1985, 56—61, 70—77.