

## 对马暖流水起源的模糊分析

卢中发

苏育嵩

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

(青岛海洋大学物理海洋与海洋气象系)

### 摘 要

应用模糊集的数量指标分析方法和模糊识别的择近原理, 采用1987年夏、冬季和1988年春、秋季“向阳红09”号黑潮调查资料, 定量地分析了对马暖流水的源区的模糊特性及其起源。结论是: (1) 对马暖流表层水位于其源区的强混合区中, 其水体具有混合水的特性。(2) 对马暖流水的来源一年四季不尽相同, 具有复杂的结构。春季在近表层主要来源于东海沿岸水(包括东海陆架水), 而东海混合水与黑潮表层水次之(属沿岸型); 夏季由于表层盐度锋的影响, 在近表层主要来源于黑潮表层水, 而东海混合水次之(属黑潮型); 在秋季与冬季, 因大陆径流影响减弱, 海水的对流与涡动混合逐步加剧, 对马暖流表层水的来源呈现出东海型与黑潮型交错的复杂状态。此外, 对马暖流深层水一年四季均由黑潮次表层水演变而来。

本文将水的混合性质与水的来源区别开来, 以利于对传统的看法和近几年流行的新观点作进一步讨论。

关于对马暖流水的起源问题, 已有多种看法, 但可归结为传统的黑潮分支理论<sup>[1-3]</sup>与近几年流行的关于混合水的说法<sup>[4-7]</sup>。在讨论此问题前, 应先分清“水的特性”与“水的来源”两个概念。从“变性”的观点看, 同一水系中可划分为若干个水团<sup>[8, 9]</sup>。换言之, 不同水团因受地理、气候及混合等影响, 其温盐特性有所差别, 但仍可能属于同一水系, 即一个水团的水来源于另一个水团, 如对马暖流的水体来自于黑潮水。所谓黑潮分支理论, 系指水系而言, 无论其水的特性有所变化, 其分支水体主要来源于黑潮, 但不排除有某些水体从侧向加入。所谓近几年流行的混合水学说, 系指黑潮进入东海后, 有一部分水体早已从东海中部黑潮主干分离, 此部分水体与东海水混合形成混合水, 在东海向东北流动, 最后形成对马暖流水。同样, 此学说亦不排除有些水体源自东海东部的黑潮。D. Byung Lim 和佐原勉等提出不能将对马暖流简单地视为黑潮分支, 而应认为是起源于黑潮水与大陆沿岸水在东海中部相遇时形成的混合水<sup>[4-7]</sup>。尽管他们的解释不尽相同, 却与当前流行的新观点颇为相近。

以上两种说法, 就主要水源而言则有本质的区别, 但从水的性质而言却是一致的, 都是混合变性水, 只是变性的程度有所不同。因此要区分以上两种说法的关键问题要看水的来

源。而要搞清对马暖流水的来源问题，不能仅限于对马暖流源区的调查，应对整个东海海区的流况进行同步调查和整体分析，但在目前条件下则难以实现。在仅有对马暖流源区调查资料的情况下，只能根据水体混合变性的显著程度加以判别，即差别显著者非同系，差别相近者为同系。此外，如上所述，以上两种说法并非是绝对分离的，水源的成分两者兼而有之，其差别仅在于以谁为主而已。

对马暖流源地是低盐水系与高盐水系交汇的海域。由于本海区系地处温带，紧邻大陆的浅海，受到有明显季节性变化的海陆气候的影响，使其水文状况与气象条件变化较复杂，所以我们很难借助于一般传统方法（如 T-S 曲线法等）来探讨对马暖流水的起源。我们知道，任何事物类属的不清晰性称为模糊性。此类事物称为模糊事物，或称之为有模糊特性的事物。诚然，对马暖流水对不同水系的类属划分，换言之它的起源特性乃是不清晰的，因而具有一定的模糊性。鉴于应用模糊数学概念与方法分析水团是可行的<sup>〔10—15〕</sup>，因此我们试图用模糊数学的有关概念与方法来分析对马暖流水的模糊特性及其起源问题。

### 一、模糊集的数量指标分析法概述〔15—17〕

设  $X$  为经典集合， $\mathcal{F}(X)$  为  $X$  上的全体 Fuzzy 集。若  $\tilde{J} \subset \mathcal{F}(X)$ ，且满足以下条件：

- (1)  $\Phi, X \in \tilde{J}$ ;
- (2)  $A, B \in \tilde{J}$ ，则  $A \cap B \in \tilde{J}$ 。
- (3) 若每个  $A_\alpha \in \tilde{J}$  ( $\alpha \in C$ )，则  $\bigcup_{\alpha \in C} A_\alpha \in \tilde{J}$  (其中  $C$  是任意指标集)。

称  $\tilde{J}$  为  $X$  上的 Fuzzy 拓扑， $(X, \tilde{J})$  称为 Fuzzy 拓扑空间， $\tilde{J}$  中的成员称为  $\tilde{J}$  (拓扑  $\tilde{J}$  下) 的开集，其余集称为  $\tilde{J}$  的闭集。

不妨设  $\tilde{w}$  为某种水团或混合区，则  $\tilde{w}$  可表示成：

$$\tilde{w} = \bigcup_{a=1}^{m_0} \tilde{A}_a \in \tilde{J},$$

此处  $m_0$  为  $\tilde{w}$  所包含的模式样本数， $\tilde{A}_a$  为模式样本， $\tilde{A}_a \in \tilde{J}$  (参看文献〔12—15〕)。

设  $X$  为非空有限集，

$$X = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m\}, \quad \bar{x}_p = (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pn})^T \in R^n, \quad (p \leq m).$$

其中  $T$  为向量  $(\cdot)$  的转置。符号  $p \leq m$  表示  $p=1, 2, \dots, m$ 。以下类同。定义水团的模糊数量指标如下：

1. 水团的容量与浓度：对于任意的水团或混合区  $\tilde{w} \in \tilde{J}$ ， $\mu_{\tilde{w}}$  为  $\tilde{w}$  的隶属函数，则

$$|\tilde{w}| = \sum_{p=1}^m \mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p),$$

$$\|\tilde{w}\| = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m |\mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p) - 0.5|$$

式中

$$\mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p) = \bigvee_{1 \leq a \leq m_0} \mu_{\tilde{w}_a}(\bar{x}_p), \quad (p \leq m)$$

$|\tilde{w}|$ 、 $\|\tilde{w}\|$ 分别称之为 $\tilde{w}$ 的容量与浓度。

2. 为分析各种类型水团和混合区的混合特性, 需要研究它们所对应的模糊子集的模糊性, 即模糊度。对于 $\forall \tilde{w} \in \tilde{J}$ , 模糊度的具体形式有<sup>[15-17]</sup>:

(1) L-Fuzzy 性度量指标

$$L(\tilde{w}) = \frac{2}{m} \sum_{p=1}^m \left[ 0.5 - |\mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p) - 0.5| \right].$$

分别称之为 $\tilde{w}$ 的容量与浓度。

(2) W-Fuzzy 性度量指标

$$W(\tilde{w}) = 1 - \frac{2}{m \ln \left( 1 + \frac{m}{2} \right)} \cdot \sum_{p=1}^m |\mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p) - 0.5| \\ \times \ln \left( 1 + \sum_{p=1}^m |\mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p) - 0.5| \right).$$

(3) 模糊熵

$$E(\tilde{w}) \cong -\frac{1}{m \ln 2} \cdot \sum_{p=1}^m \left[ \mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p) \cdot \ln \mu_{\tilde{w}}(\bar{x}_p) \right. \\ \left. + \mu_{\tilde{w}^c}(\bar{x}_p) \cdot \ln \mu_{\tilde{w}^c}(\bar{x}_p) \right].$$

3. 设本测区的最佳分类数为 $k$ (参见文献[13, 15]), 两种不同类型的水团(或混合区) $\tilde{w}_i$ 与 $\tilde{w}_j$ ( $i, j \leq k$ )的接近性程度可用下述贴适度来表征:

设 $\tilde{w}_i$ 、 $\tilde{w}_j$ 的模式样本数分别为 $\alpha_0$ 、 $\beta_0 \leq k$ , 令

$$\tilde{w}_i = \bigcup_{a=1}^{\alpha_0} \tilde{w}_{i a}, \quad \tilde{w}_j = \bigcup_{\beta=1}^{\beta_0} \tilde{w}_{j \beta}.$$

(1) L-贴适度, 即Hamming贴适度

$$M_L(\tilde{w}_i, \tilde{w}_j) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m |\mu_{\tilde{w}_i}(\bar{x}_p) - \mu_{\tilde{w}_j}(\bar{x}_p)|.$$

(2) W-贴适度

$$M_W(\tilde{w}_i, \tilde{w}_j) = 1 - \frac{1}{m \ln \left( 1 + \frac{m}{2} \right)} \cdot \sum_{p=1}^m \left| \mu_{\tilde{w}_i}(\bar{x}_p) - \mu_{\tilde{w}_j}(\bar{x}_p) \right| \\ \times \ln \left( 1 + \sum_{p=1}^m \left| \mu_{\tilde{w}_i}(\bar{x}_p) - \mu_{\tilde{w}_j}(\bar{x}_p) \right| \right).$$

这里 
$$\mu_{\tilde{w}_j}(\overline{x_p}) = \bigvee_{1 \leq i \leq a_0} \mu_{\tilde{A}_{i_0}}(\overline{x_p}), \quad \mu_{\tilde{w}_j}(x_p) = \bigvee_{0 \leq \mu \leq \rho_0} \mu_{\tilde{A}_{i_0}}(\overline{x_p})$$

利用模糊识别中的择近原则可以判断对马暖流水的来源。

设有对马暖流表层水  $T_r$  及其邻近水团  $\tilde{w}_i \in \tilde{J}$  ( $i \leq l$ , 为  $T_r$  的邻近水团个数), 若

$$M(T_r, \tilde{w}_{i_0}) = \max\{M(T_r, \tilde{w}_1), M(T_r, \tilde{w}_2), \dots, M(T_r, \tilde{w}_l)\}$$

则表示  $T_r$  与  $\tilde{w}_{i_0}$  最相似, 换言之  $T_r$  主要来源于  $\tilde{w}_{i_0}$ 。

## 二、计算结果与分析

本测区水团的划分采用文献〔13, 15〕中介绍的 PFS 软划分方法, 各水团的特性分析可参考文献〔15〕。本文仅侧重于分析对马暖流水的起源问题, 为简便起见采用下述缩写记号表示各水团和混合区。

F<sub>r</sub> 为东海沿岸水; K<sub>r</sub> 为黑潮表层水 (在冬季为黑潮上层水); K 为黑潮次表层水; K<sub>l</sub> 为黑潮中层水; T<sub>r</sub> 为对马暖流表层水; Y<sub>r</sub> 为黄海表层混合水; Y<sub>l</sub> 为黄东海混合水; Y<sub>l</sub>

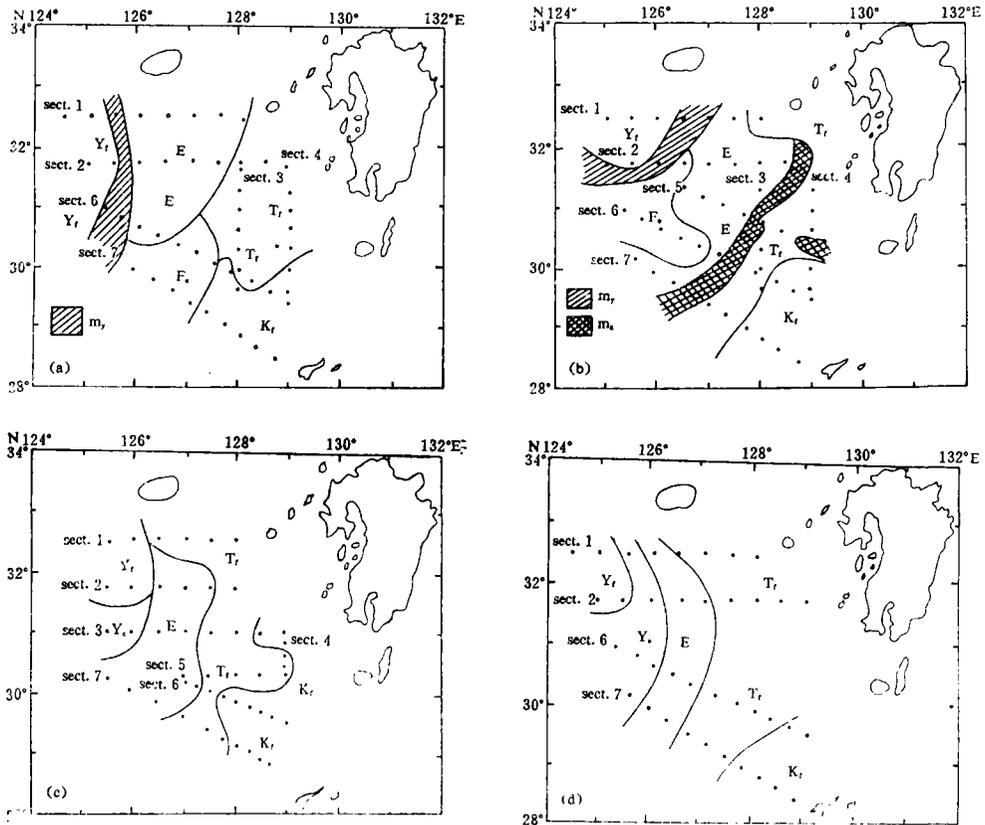


图 1 对马暖流源区 0 m 层水团的平面分布

a. 1938.1—1; b. 1938.7—8; c. 1983.10—11; d. 1987.11—12.11

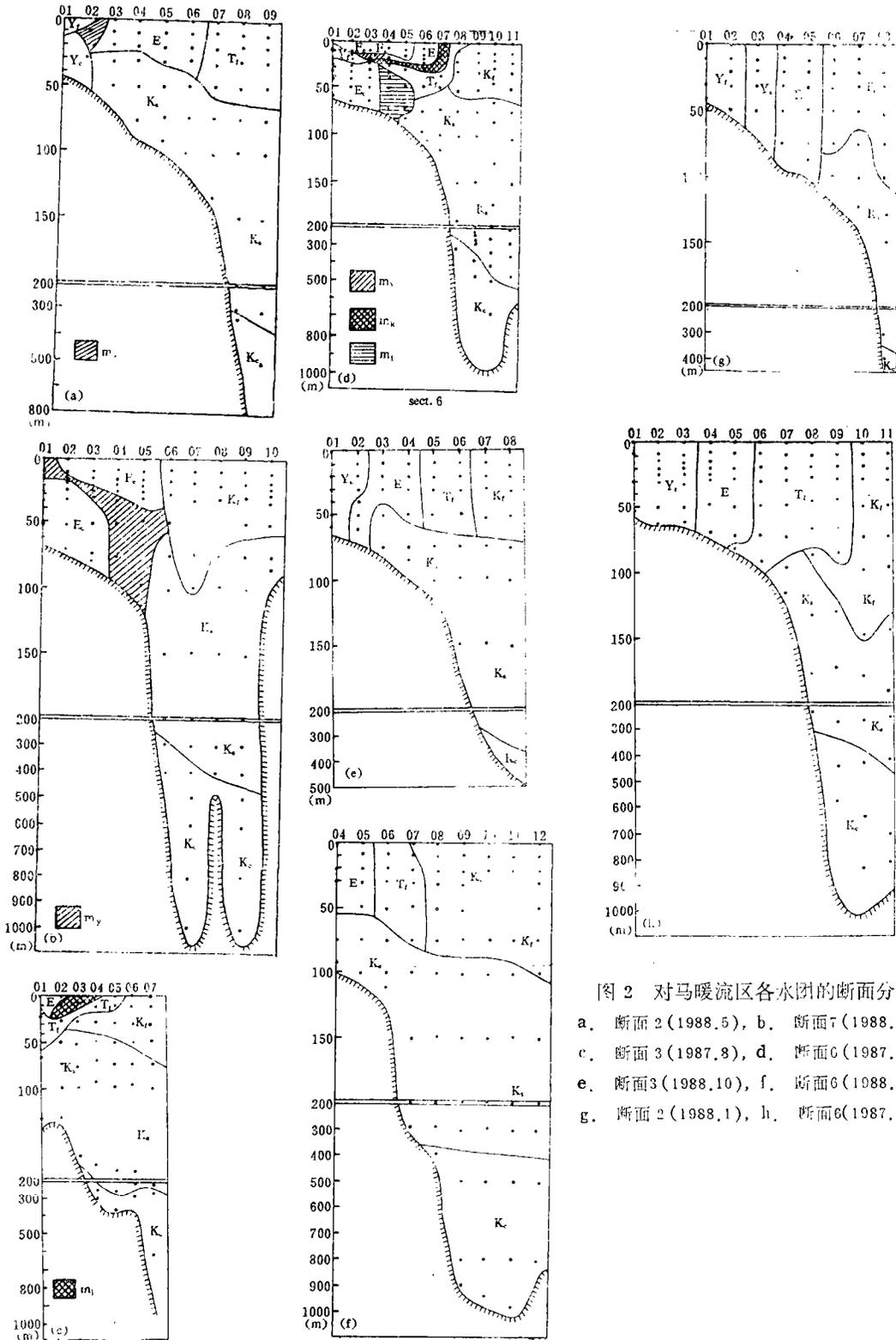


图2 对马暖流区各水团的断面分布  
 a. 断面2(1988.5), b. 断面7(1988.6),  
 c. 断面3(1987.8), d. 断面6(1987.8),  
 e. 断面3(1988.10), f. 断面6(1988.10),  
 g. 断面2(1988.1), h. 断面6(1987.12)

为黄海底层冷水（即黄海深层冷水）； $E_c$ 为东海北部底层冷水； $E$ 为东海混合水。

此外尚有， $m_y$ 为黄东海混合区； $m_k$ 为表层盐度锋区； $m_s$ 为次表层混合区。

图 1a—d、2a—h 系根据上述方法的计算结果绘制的；表 1 所列数据为各水团的温盐特征值。由以上图、表可看出，对马暖流表层水  $T_f$  在源区中无论其地理位置或其温盐特性均介于东海混合水与黑潮表层水之间。在一年中，其位置与特性虽有明显的季节变化，但其基本结构仍有确定的变化规律。图 3 系根据表 1 的数据绘制的。由图可看出：（1）高盐特性的黑潮水系是自成系统的，各水团的温盐特征的季节变化较小；而近岸水系则有明显的季节变化，仅在底层变化较小。（2）在表层， $T_f$  介于  $K_f$  与  $E$  之间。因此， $T_f$  属于混合水的范畴。由于水团的混合特性、边界和核心的变化等都是模糊的，因此判断对

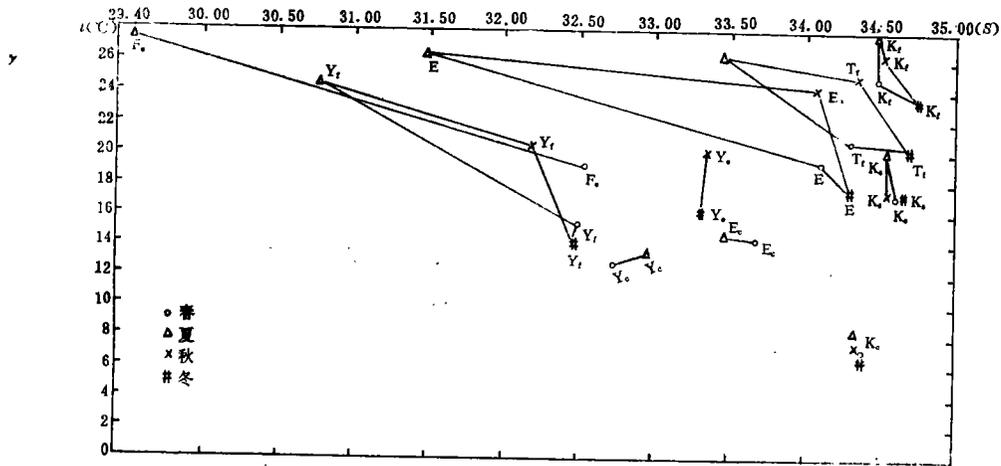


图 3 对马暖流源区各水团的温盐聚类中心的分布

表 1 对马暖流源区各水团的温盐特征值

水团名称	春 (1988.4—6)		夏 (1987.7—8)		秋 (1988.10—11)		冬 (1987.11—1988.1)	
	温度 (°C)	盐 度	温度 (°C)	盐 度	温度 (°C)	盐 度	温度 (°C)	盐 度
$F_s$	19.10	32.53	27.46	29.51				
$K_f$	24.82	34.48	27.96	34.46	26.26	34.48	23.42	34.75
$K_s$	17.15	34.59	20.29	34.52	17.68	34.56	16.80	34.61
$K_c$	7.21	34.37	8.45	34.32	7.37	34.35	6.83	34.37
$T_f$	20.69	32.30	26.05	33.43	25.18	34.31	20.04	34.68
$Y_f$	15.33	34.49	24.27	30.75	20.19	32.18	14.00	32.47
$Y_o$					20.06	33.35	16.98	33.31
$Y_c$	12.63	32.72	13.36	33.34				
$E_c$	14.59	33.64	14.78	33.45				
$E$	19.13	34.10	27.64	31.48	24.03	34.08	17.75	34.30

马暖流水与其邻近水团的混合强弱可采用模糊集的数量指标分析方法<sup>[15]</sup>。

### 1. 各水团的模糊度

水团的模糊度表征该水团的混合强度和稳定性。由表2可看出,对马暖流表层水 $T_r$ 具有很高的模糊度,因而是很不稳定,混合强烈的水团。换言之, $T_r$ 位于本测区中的强混合区域,一年四季均具有混合水的性质。由于诸水团的 $L$ -模糊度与 $W$ -模糊度的大小变化趋势基本一致(表2),故我们仅依 $W$ -模糊度来分析各水团的混合强度。如依 $W$ -模糊度的大小强弱排列为:

表2 对马暖流源区各水团的模糊度

水团名称	春 (1988.4—6)		夏 (1987.7—8)		秋 (1988.10—11)		冬 (1987.11—1988.1)	
	$L$ -模糊度	$W$ -模糊度	$L$ -模糊度	$W$ -模糊度	$L$ -模糊度	$W$ -模糊度	$L$ -模糊度	$W$ -模糊度
$F_e$	0.04	0.05	0.07	0.09				
$K_r$	0.05	0.06	0.11	0.13	0.11	0.14	0.07	0.09
$K_e$	0.12	0.15	0.09	0.11	0.06	0.07	0.03	0.04
$K_e$	0.04	0.05	0.05	0.06	0.02	0.02	0.02	0.03
$T_r$	0.14	0.17	0.13	0.16	0.11	0.15	0.09	0.10
$Y_r$	0.04	0.03	0.04	0.06	0.02	0.03	0.02	0.02
$Y_e$					0.04	0.05	0.03	0.03
$Y_e$	0.01	0.01	0.02	0.03				
$E_e$	0.05	0.07	0.02	0.02				
$E$	0.11	0.13	0.08	0.09	0.09	0.12	0.05	0.07

$$\text{春季: } \{Y_e\} < \left\{ \begin{matrix} K_e \\ F_e \end{matrix} \right\} < \{K_r\} < \{E_e\} < \{Y_r\} < \{E\} < \{K_e\} < \{T_r\}.$$

$$\text{夏季: } \{E_e\} < \{Y_e\} < \left\{ \begin{matrix} Y_r \\ K_e \end{matrix} \right\} < \left\{ \begin{matrix} E \\ F_e \end{matrix} \right\} < \{K_e\} < \{K_r\} < \{T_r\}.$$

$$\text{秋季: } \{K_e\} < \{Y_r\} < \{Y_e\} < \{K_e\} < \{E\} < \{K_r\} < \{T_r\}.$$

$$\text{冬季: } \{Y_r\} < \left\{ \begin{matrix} Y_e \\ K_e \end{matrix} \right\} < \{K_e\} < \{E\} < \{K_r\} < \{T_r\}.$$

春季,东海沿岸水对本测区东南部,甚至对黑潮主干部分的入侵是很厉害的。由表2还可看出,东海沿岸水 $F_e$ 与黑潮表层水 $K_r$ 的模糊度比东海混合水 $E$ 和对马暖流表层水 $T_r$ 要小,因而它们是相对稳定的(见图1a、2b)。

夏季,低盐水明显地由近海向外海扩展。由图1b可看出(见表1),因受降雨、大陆径流的影响,除对马暖流表层水与黑潮表层水所占据的海域外,盐度聚类中心均小于32.00。此外,低盐水域与对马暖流表层水之间被盐度锋 $m_1$ 所分隔<sup>[15]</sup>。由表2可知,东海混合水比黑潮表层水稳定,并且后者与对马暖流表层水均属于高模糊度水团。此说明黑

潮表层水有可能成为对马暖流表层水的主要来源之一。

秋季，本海区的聚类中心分布，除黄东海混合水外，尤其是盐度的聚类中心分布（见表1），与夏季比较相对均匀，如在表层，除 $Y_f$ 与黄东海混合水外，其他水团的盐度聚类中心不低于34.00。此说明与夏季相比，秋季入海淡水减少，但外海高盐水的影响加强。由表2可看出，尽管 $K_f$ 、E和 $T_f$ 三者的模糊度颇为接近，但依其大小来看， $T_f > K_f > E$ 成立。

冬季，随着外海高盐水的影响增强，盐度逐渐增高。除 $Y_f$ 与黄东海混合水受陆架低盐水影响较大外，本测区的大部分海域的盐度聚类中心几乎皆超过34.20（见表1）。这种高盐特征系由冬季海水强烈的混合作用所致，往往几乎使200m以浅的水层均一化，直到夏季大量淡水入海，才使这种均一性遭受破坏。可见，在冬季形成了上均匀层，它导致黑潮上层水的盐度比其中下层要高<sup>[20, 21]</sup>。对马暖流表层水在冬季亦有这种类似的性质（见表1）。与秋季类似，由表2可看出，尽管 $T_f$ 、 $K_f$ 和E三者的模糊度比较接近，但依其大小来看， $T_f > K_f > E$ 仍然成立。

总而言之，由上述分析水团的模糊程度可知，在一年四季中， $T_f$ 具有最大的模糊度，因而它是最不稳定的，混合最厉害的水团。若把 $F_o$ 、 $K_f$ 与E相比可知，在春季， $F_o$ 、 $K_f$ 比E稳定；在夏季， $F_o$ 和E比 $K_f$ 稳定；而在秋冬两季，E略比 $K_f$ 稳定。

## 2. 各水团的模糊熵

模糊熵所表征的特性与模糊度基本相同，计算结果（表3）也与表2相近，同样可作为水团混合强度的示性特征。

表3 对马暖流源区各水团的模糊熵

季 节	$F_o$	$K_f$	$K_o$	$K_e$	$T_f$	$Y_f$	$Y_o$	$Y_e$	E。	E
春 (1988.4—6)	0.09	0.13	0.24	0.10	0.25	0.08		0.04	0.14	0.19
夏 (1987.7—3)	0.19	0.20	0.18	0.11	0.24	0.10		0.06	0.05	0.16
秋 (1988.11— 1988.1)		0.22	0.12	0.06	0.23	0.06	0.09			0.20
冬 (1987.11— 1988.1)		0.13	0.07	0.04	0.18	0.04	0.06			0.12

## 3. 各水团的混合浓度

水团的混合浓度表征该水团的温盐分布的均匀性，也是水团混合强度的示性指标。

由表4可看出，依各季水团的混合浓度大小排列有：

$$\text{春季: } \left\{ \begin{matrix} F_o \\ K_f \end{matrix} \right\} > \{E\} > \{T_f\}.$$

$$\text{夏季: } \{F_o\} > \{E\} > \left\{ \begin{matrix} K_f \\ T_f \end{matrix} \right\}.$$

$$\text{秋季: } \left\{ \begin{matrix} K_f \\ E \end{matrix} \right\} > \{T_f\}.$$

冬季:  $\{E\} > \{K_f\} > \{T_f\}$ .

表4 对马暖流源区各水团的混合浓度

季 节	$F_e$	$K_f$	$K_e$	$T_f$	$Y_f$	$Y_e$	$F_e$	$E$
春 (1988, 4—6)	0.48	0.48	0.46	0.48	0.43	0.48	0.49	0.48
夏 (1987, 7—8)	0.47	0.45	0.46	0.48	0.45	0.48	0.49	0.49
秋 (1988, 10—11)		0.45	0.47	0.49	0.44	0.49	0.48	0.45
冬 (1987, 11—1988, 1)		0.46	0.48	0.49	0.45	0.49	0.49	0.47

由此可见, 对马暖流表层水与黑潮表层水、东海混合水比较而言, 在春、夏、秋、冬各季,  $T_f$  均为低浓度水团, 故它必然是混合强度较大的水团。在春季,  $E$  的浓度比  $K_f$  和  $F_e$  低, 因而  $K_f$  和  $F_e$  比  $E$  稳定; 在夏季,  $T_f$  与  $K_f$  具有同样大的浓度, 但比  $E$  和  $F_e$  小, 因而  $F_e$  和  $E$  比  $K_f$  和  $T_f$  稳定; 在秋季,  $K_f$  与  $E$  的浓度相等, 就浓度而言, 两者无法比较, 但均比  $T_f$  大, 此说明  $K_f$  和  $E$  比  $T_f$  稳定; 在冬季, 黑潮表层水的浓度比东海混合水小一些, 因而前者比后者混合能力强。

#### 4. 水团间的贴近度及对马暖流表层水的来源

在讨论对马暖流水的来源时, 必须分析对马暖流水与其相邻水团的关系, 即比较它们之间的贴近度大小。现将对马暖流表层水与其邻近水团的贴近度的计算结果列于表5中。

依据贴近度的定义可知, 水团与其自身的贴近度为1, 而与其无关者的贴近度为0。本

表5 本测区各季节对马暖流表层水与其邻近水团的贴近度

季 节	水 层 (m)	L - 贴 近 度			W - 贴 近 度			类 型
		$M_L (T_f, F_e)$	$M_L (T_f, E)$	$M_L (T_f, K_f)$	$M_W (T_f, F_e)$	$M_W (T_f, E)$	$M_W (T_f, K_f)$	
春 季 (1988, 4—6)	0	0.86	0.83	0.82	0.91	0.88	0.87	沿岸型
	10	0.91	0.84	0.85	0.95	0.89	0.90	沿岸型
	50	0.86		0.79	0.91		0.85	沿岸型
夏 季 (1987, 7—8)	0		0.64	0.78		0.67	0.83	黑潮型
	10		0.76	0.79		0.80	0.84	黑潮型
秋 季 (1988, 10—11)	0		0.85	0.83		0.90	0.88	东海型
	10		0.72	0.63		0.76	0.66	东海型
	50		0.71	0.73		0.75	0.78	黑潮型
冬 季 (1987, 11—1988, 1)	0		0.82	0.83		0.88	0.89	黑潮型
	10		0.87	0.86		0.93	0.91	东海型
	50		0.68	0.70		0.72	0.75	黑潮型

文计算了 $L$ -贴近度与 $W$ -贴近度,以便分析 $T_r$ 与其相邻水团的靠近程度.由于两种贴近度的变化趋势基本一致,故仅以 $W$ -贴近度分析之,且应用模糊识别的择近原则推断出对马暖流水的来源.为简便起见,利用择近原则,就 $W$ -贴近度而言,将对马暖流表层水的来源划分为下述几种类型:

(1) 当 $M_w(T_r, K_r) <$ ,或 $M_w(T_r, K_r)$ 与 $M_w(T_r, E)$ 均 $> M_w(T_r, F_e)$ 时,称为沿岸型.

(2) 当 $M_w(T_r, K_r) > M_w(T_r, E)$ 时,称为黑潮型.

(3) 当 $M_w(T_r, K_r) < M_w(T_r, E)$ 时,称为东海型.

对于 $L$ -贴近度也有上述相似的结论.

由表5可知:

春季  $M_w(T_r, K_r) < M_w(T_r, F_e)$  或  $M_w(T_r, K_r), M_w(T_r, E) < M_w(T_r, F_e)$  成立.此说明,对马暖流表层水虽受 $K_r$ 、 $E$ 与 $F_e$ 的联合影响,但 $T_r$ 与 $F_e$ 的贴近度比 $T_r$ 与 $E$ 和 $T_r$ 与 $K_r$ 的贴近度大,因此在0m、10m和50m层,对马暖流表层水主要来源于东海沿岸水(包括东海陆架水),属沿岸型.此可能与东海陆架水对源区表层及黑潮主干的入侵有关<sup>[8,19]</sup>.

夏季 在0m与10m层, $M_w(T_r, K_r) > M_w(T_r, E)$ 恒成立.所以在10m以浅的表层内对马暖流表层水主要来源于黑潮表层水,属于黑潮型.在近表层, $T_r$ 为何主要来源于黑潮表层水,我们分析其原因,可能与表层的盐度锋存在有关<sup>[16]</sup>.事实上,由图1b可看出, $T_r$ 与 $E$ 之间因盐度锋存在(具有较大的盐度梯度)而无法充分混合,且 $T_r$ 与 $K_r$ 又具有较相近的模糊度,因此在近表层, $T_r$ 在夏季主要来源于黑潮表层水,此即黑潮型.

秋季 由于大陆径流影响减弱,海水的对流与涡动混合逐渐增强,上均匀层增厚,盐度增高,跃层下沉,盐度垂直分布较夏季均匀.这种过渡状态使对马暖流表层水的来源呈现出各种类型的交错状态.如在10m以浅层, $T_r$ 主要来源为东海型,而在50m层却出现黑潮型(表5).因此,尽管在秋季在近表层的不同水层 $T_r$ 的来源都是东海混合水与黑潮表层水的混合水(见文献[4]),但其主要来源却是不同的.

冬季 海区受大陆气团控制,强劲的偏北风连续吹到海上,海水迅速冷却,蒸发加剧,同时涡动混合和对流混合亦随之加剧,这些原因导致 $T_r$ 的主要来源也是交错复杂的.如在表层与50m层, $T_r$ 的主要来源为黑潮型,而在10m层却为东海型(见表5).

##### 5. 关于对马暖流深层水及其他

由图1、2可看出,无论是春夏还是秋冬,对马暖流深层水(即下层水)均是由黑潮次表层水 $K_e$ 演变而来的.此外,由图2c-h尚可看出对马暖流表层水的厚度,在春、夏和秋各季, $0 < T_r < 75$ m;在冬季,由于强烈的混合作用,对马暖流表层水与其部分深层水已合为一体,简称为 $T_r$ .在陆架区,有的可直达海底,而在黑潮主干区往往可达100m左右的水层(见图2h),

### 三、讨论与结语

1. 本文中所述的东海沿岸水  $F_1$ , 包括东海陆架水, 由图 1a、2b 可看出,  $F_1$  对陆架的覆盖范围很广阔, 对黑潮主干的入侵也很可观 (见文献 [18, 19]). 正因为东海沿岸水的覆盖与入侵, 使其在春季成为对马暖流表层水的主要来源。

2. 冬季对流混合强烈, 黑潮暖流水在 200m 左右厚度内, 各种水文及化学要素分布十分均匀, 即黑潮表层水与具有高盐特征的黑潮次表层水的一部分混合为一 (即上均匀层 (见文献 [20, 21])). 往往导致出现黑潮表层水, 即黑潮上层水的盐度比黑潮次表层水 (位于下均匀层) 的盐度高. 从而黑潮水的高盐特性不是出现在夏季所指的次表层中, 而是出现在黑潮上层水中 (见文献 [21]).

这里应指出, 本文所指的冬季黑潮上层水是包括黑潮表层水与次表层水中与其混合激烈的部分, 余下较不激烈部分仍划为黑潮次表层水. 此与文献 [20, 21] 中把整个黑潮表层水与次表层水合为上层水略有不同 (见表 2 及文献 [14]). 此外, 对马暖流表层水在冬季也具有与黑潮上层水相似的性质。

3. 本文应用模糊集的数量指标分析方法定量地分析了对马暖流水的模糊特性. 首先, 用模糊集的模糊度量各水团的混合能力, 因而能分析对马暖流源区各水团的混合状况. 其次, 用模糊集之间的贴近度分析各水团之间的相互关系, 并用模糊识别中的择近原则较好地判断了对马暖流水在源区中的来源。

4. 文中采用符合 Fuzzy 度量公理标准的  $L$ -Fuzzy 性度量指标,  $W$ -Fuzzy 性度量指标及相应的符合贴近度普遍定义的贴近度公式分析水团的模糊性, 即混合强度及水团之间的贴近程度, 效果较好 (见文献 [17]). 这样可避免某些水团的不可比较性等缺陷。

5. 本文所提出的作为水团的混合强度的一种指标的混合浓度表示式是对吴望名等提出的关于模糊子集的浓度的定义的改正 (参见文献 [16]). 原定义把浓度看作某一模糊子集的所有元的隶属度的平均值. 而本文是对其定义公式加进了某水团中测样的模糊性的度量情况, 即把所有离开与靠近 0.5 的隶属度的平均状况作为水团的混合浓度. 计算结果表明比较符合实际情况。

6. 计算结果表明, 对马暖流表层水具有混合水的性质, 但不能单纯地根据其混合特性来确定其来源. 这是传统的黑潮分支理论与当前流行的混合水观点分歧的关键. 既然是混合水, 其水体来源于多方面, 而利用模糊识别的择近原则能较好地判别其主要来源. 根据本调查资料计算得出, 对马暖流表层水位于其源区的强混合区中, 其来源一年四季不尽相同, 具有复杂的结构. 正因为如此, 不能简单地根据分支理论或新观点说明之. 春季, 对马暖流表层水在近表层主要来源于东海沿岸水, 而黑潮表层水与东海混合水次之, 此可能与东海陆架低盐水的覆盖与入侵有关; 夏季, 由于表层盐度锋影响,  $T_1$  在近表层主要来源于黑潮表层水; 秋季, 为过渡性季节, 对马暖流表层水的来源呈现出各种类型的交错状态. 一般在 10m 以浅水层中为东海型, 在 50m 层附近为黑潮型; 冬季, 因水团间的混合加剧, 使  $T_1$  的来源也是交错复杂的, 但与秋季不同, 在表层与 50m 层为黑潮型, 而在

10m层却为东海型。

7. 本文将本研究海区中具有较大模糊度的特殊水域划分为混合区<sup>[15]</sup>,而盐度锋区、温度锋区等也看成是一种混合区。一般地,若混合区与其相邻水团的模糊度差值较大,即有跃变,我们便称它与此水团的交界线为锋线。

8. 我们这里分析的对马暖流水的起源包括黄海暖流水的起源。由于对马暖流水与黄海暖流水具有相似的温盐特性,加上本测区在其传统分支点附近调查资料贫乏,所以本研究工作未对它们进行区分。

9. 应用模糊数学的概念和方法分析对马暖流水的起源仅是一种尝试。由于所采用的资料有限,故所得出的结论仅供参考,尚需作进一步论证。

### 参 考 文 献

- [1] Sverdrup, H. U. et al., *Their Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology*, Practice Hall, New York, 1962, 1087.
- [2] Noriyasu, S., *The Tsushima Current, Kuroshio—Its Physical Aspects*, University of Tokyo Press, 1972, 357—370.
- [3] 上海水产学院编, 海洋学, 农业出版社, 1983, 103, 104.
- [4] Lim, D.B., On the origin of the Tsushima Current Water, *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 6 (1971), 2, 85—91.
- [5] 佐原勉·半沢洋一, 东シナ海の水系分布, 海と空, 54 (1979), 4, 135—148.
- [6] Nagata, Y., Oceanic condition in the East China Sea, *Proc. Japan-China Study Symp.*, 1981, 25—41.
- [7] Gnan Bingxian, A sketch of the current structure and eddy characteristics in the East China Sea, *SSCS Proc.*, China Ocean Press, 1983, 52—73.
- [8] 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.
- [9] 苏育嵩, 黄东海地理环境概况, 环流系统与中心渔场, 山东海洋学院学报, 16 (1976), 1, 12—27.
- [10] 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.
- [11] 李凤岐等, 模糊数学方法在南海北部海区水团分析中的应用, 海洋学报, 9 (1987), 6, 699—699.
- [12] 卢中发、李 可, 东海水团的Fuzzy划分, 黑潮调查研究论文集, 1987, 163—170.
- [13] 卢中发, 模糊目标函数聚类算法及其在东海黑潮水团分析中的应用, 海洋学报, 11 (1989), 3, 265—274.
- [14] Lu Zhongfa and Li Ke, A preliminary study on the dividing the water masses in the East China Sea in summer and winter by using FCFM method, *Physics of Shallow Seas*, China Ocean Press, 1990, 242—259.
- [15] Lu Zhongfa, Fuzzy sets study of water mass mixing in the source region of the Tsushima Warm Current, *Chinese J. Oceanol. Limnol.*, 8 (1990), 4, 336—347.
- [16] 吴望明等, 应用模糊集方法, 北京师范大学出版社, 1985, 12—14.
- [17] 王绍智, 关于Fuzzy性度量的公理化探讨, 模糊数学, 7 (1987), 3, 9—12.
- [18] 姜景忠, 西边界流在陆架边缘上的锋面涡旋, 东海海洋, 6 (1988), 2, 8—15.
- [19] Shibata, A. and I. Engchi, *The Oceanogra Phical Magazine*, 35 (1981), 1, 2, 21—29.
- [20] 任允武、孙国栋、毛汉礼, 南黄海和东海北部(28°—37°N)冬季水文特征及海水类型(水系)的初步分析, 海洋科学集刊, 第1集, 科学出版社, 1964, 78—126.
- [21] 邢成军, 冬季东海黑潮上层水变化特征的分析, 海洋科学, 10 (1986), 5, 1—7.