

海流的质量输送分离及其 预报的初步研究*

沈凌云 赵保仁

(南京化工学校) (中国科学院海洋研究所, 青岛)

提要 本文引入质量输送概念, 利用三次实测余流、密度、深度和风的资料, 分离出常流质量输送和风海流质量输送两部分的六个要素, 归纳了过去的风海流圆和椭圆分离法。以东海北部近岸的 A 站为例, 提出了根据风速、风向查对和计算各层风海流的表格形式, 供预报余流之用。实测余流与预报值比较, 结果较好, 量值正确率平均为 78%, 方向误差为 31°。

海流的成因相当复杂。Nansen^[3] 认为海流(本文称为余流)是局地风引起的风海流和常流的矢量合成。Ekman 在风海流理论中, 认为风因子和流偏角不随风向变化, 即在相同风速下随风向变化的风海流呈圆形(本文称风海流圆)。为预报海流, 不少学者根据上述理论, 对余流进行分离, 试图以简便的方法获取风海流圆要素和常流。如较早的 Sverdrup^[4] 几何法, 沈凌云^[1]的几何法推广和代数法。而在近海, 风海流必然受到海岸的限制, 风因子和流偏角随风向而变化; 观测表明, 当风速值相同时, 随风向变化的风海流矢端呈椭圆(本文称风海流椭圆)。赵保仁^[1]推广了余流分离代数法, 用三次实测余流资料求取了风海流椭圆要素和常流。

基于上述成果, 本文引入质量输送概念, 认为质量输送是(局地)风海流质量输送和常流质量输送的矢量合成; 风海流质量输送呈椭圆, 导出求取风海流质量输送椭圆要素和常流质量输送的各关系式。从而把风海流圆、风海流椭圆的分离法归纳在内, 成为本文的特例。同时, 本文以东海 A 站为实例进行示范, 分离并选取了风海流椭圆常数 and 常流, 提供了 16 个风向方位下的风因子和风海流方位角查对表, 作为海流预报之用; 预报值与实测值比较, 结果尚佳。

一、质量输送的分离

当海区确定空间 (x, y, z) 的余流写成

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_c + \mathbf{v}_w + \mathbf{v}_v \quad (1)$$

时, 下式成立:

$$\int_{z_0}^z \rho \mathbf{v} dz = \int_{z_0}^z \rho \mathbf{v}_c dz + \int_{z_0}^z \rho \mathbf{v}_w dz + \int_{z_0}^z \rho \mathbf{v}_v dz \quad (2)$$

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1122 号。本文承毛汉礼教授鼓励和热情指导, 南京化工学校楼宇新校长支持, 范顺庭、吴永成同志帮助计算, 在此致以诚挚的谢忱。

收稿日期: 1984 年 11 月 21 日。

1) 沈凌云, 1961。余流分离的代数法(油印稿)。

式中, $\mathbf{v}, \int_{z_0}^z \rho \mathbf{v} dz$ 分别为海区 (x, y, z) 处的余流, 海区 $(x, y, z_0 - z)$ 处的质量输送(并以 \mathbf{M} 表示); $\mathbf{v}_c, \int_{z_0}^z \rho \mathbf{v}_c dz$ 分别为常流、常流质量输送(并以 \mathbf{M}_c 表示); $\mathbf{v}_u, \int_{z_0}^z \rho \mathbf{v}_u dz$ 分别为风速(去向)东分量所产生的风海流矢量, 并简称东风风海流, 以及东风风海流质量输送(并以 \mathbf{M}_u 表示); $\mathbf{v}_v, \int_{z_0}^z \rho \mathbf{v}_v dz$ 分别为北风(去向)风海流矢量、北风风海流质量输送(并以 \mathbf{M}_v 表示)。

坐标系统取 x 轴向东为正; y 轴向北为正, z 轴向下为正; 坐标平面为平均海平面; ρ 为海水密度。以简化符号代替后的式(2)为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_c + \mathbf{M}_u + \mathbf{M}_v \quad (3)$$

写成分量形式

$$\begin{cases} M_x = M_{c_x} + M_{u_x} + M_{v_x} \\ M_y = M_{c_y} + M_{u_y} + M_{v_y} \end{cases} \quad (4)$$

引入风海流质量输送 \mathbf{M}_c 及其分量符号 M_{c_x}, M_{c_y} 。则有

$$\mathbf{M}_c = \mathbf{M}_u + \mathbf{M}_v$$

其分量形式为

$$\begin{cases} M_{c_x} = M_{u_x} + M_{v_x} \\ M_{c_y} = M_{u_y} + M_{v_y} \end{cases} \quad (5)$$

据 Ekman 风因子和流偏角概念, 认为: 风速分量与其所产生的相应风海流质量输送矢量之间的偏角为常值, 分别以符号 $\Theta_{M_u}, \Theta_{M_v}$ 表示, 并称为“质量输送东风偏角”和“质量输送北风偏角”。同时, 定义“质量输送东风因子”和“质量输送北风因子”为

$$\begin{cases} K_{M_u} = \frac{M_u}{u_w} \\ K_{M_v} = \frac{M_v}{v_w} \end{cases} \quad (6)$$

显然, K_{M_u}, K_{M_v} 均为有维量。式中 u_w, v_w 是风矢量 \mathbf{W} 的东分量和北分量, 均以去向读之。

上述风矢量 \mathbf{W} 的两个分量 u_w 和 v_w , 与相应的质量输送矢量 \mathbf{M}_u 和 \mathbf{M}_v 之间的关系, 及其在坐标轴上的投影关系, 可由图 1a, b 分别表示。

根据图 1a, b, 式(4)、(5)可改写成下列形式

$$\begin{cases} M_{c_x} = K_{M_u} u_w \cos \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_w \sin \Theta_{M_v} \\ M_{c_y} = -K_{M_u} u_w \sin \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_w \sin \Theta_{M_v} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} M_x = M_{c_x} + K_{M_u} u_w \cos \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_w \sin \Theta_{M_v} \\ M_y = M_{c_y} - K_{M_u} u_w \sin \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_w \cos \Theta_{M_v} \end{cases} \quad (8)$$

对海区某处, 式(8)中 M_x, M_y 以及 u_w, v_w 是可以通过实测的深度、余流、密度、风资料算得, 为已知量。 $M_{c_x}, M_{c_y}, K_{M_u}, K_{M_v}, \Theta_{M_u}, \Theta_{M_v}$ 为待求量。为此, 可通过 3 次实测资料获得 6 个独立方程求解。下列各式中的脚标“1”, “2”, “3”均表示第 1 次、第 2 次、第 3 次实测资料。

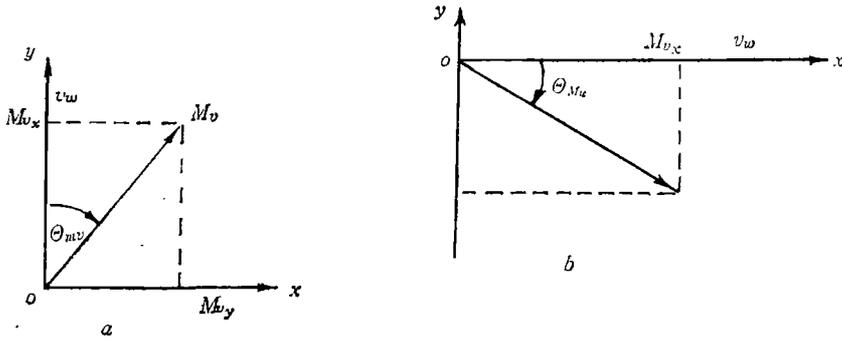


图1 风分量与风海流质量输送之间的投影关系
a. 北风分量与北风风海流; b. 东风分量与东风风海流。

$$\begin{aligned}
 M_{x_1} &= M_{c_x} + K_{M_u} u_{w_1} \cos \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_{w_1} \sin \Theta_{M_v} \\
 M_{x_2} &= M_{c_x} + K_{M_u} u_{w_2} \cos \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_{w_2} \sin \Theta_{M_v} \\
 M_{x_3} &= M_{c_x} + K_{M_u} u_{w_3} \cos \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_{w_3} \sin \Theta_{M_v} \\
 M_{y_1} &= M_{c_y} - K_{M_u} u_{w_1} \sin \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_{w_1} \cos \Theta_{M_v} \\
 M_{y_2} &= M_{c_y} - K_{M_u} u_{w_2} \sin \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_{w_2} \cos \Theta_{M_v} \\
 M_{y_3} &= M_{c_y} - K_{M_u} u_{w_3} \sin \Theta_{M_u} + K_{M_v} v_{w_3} \cos \Theta_{M_v}
 \end{aligned} \tag{9}$$

令

$$\begin{cases}
 A_M = K_{M_v} \sin \Theta_{M_v} \\
 B_M = K_{M_v} \cos \Theta_{M_v} \\
 C_M = K_{M_u} \cos \Theta_{M_u} \\
 D_M = K_{M_u} \sin \Theta_{M_u}
 \end{cases} \tag{10}$$

$$\Delta = (v_{w_1} - v_{w_2})(u_{w_2} - u_{w_3}) - (v_{w_2} - v_{w_3})(u_{w_1} - u_{w_2}) \tag{11}$$

$$\begin{cases}
 \Delta M_{x_{12}} = M_{x_1} - M_{x_2} \\
 \Delta M_{x_{23}} = M_{x_2} - M_{x_3} \\
 \Delta M_{y_{12}} = M_{y_1} - M_{y_2} \\
 \Delta M_{y_{23}} = M_{y_2} - M_{y_3} \\
 \Delta u_{w_{12}} = u_{w_1} - u_{w_2} \\
 \Delta u_{w_{23}} = u_{w_2} - u_{w_3} \\
 \Delta v_{w_{12}} = v_{w_1} - v_{w_2} \\
 \Delta v_{w_{23}} = v_{w_2} - v_{w_3}
 \end{cases} \tag{12}$$

解得

$$\begin{cases}
 A_M = \frac{\Delta M_{x_{12}} \Delta u_{w_{23}} - \Delta M_{x_{23}} \Delta u_{w_{12}}}{\Delta} \\
 B_M = \frac{\Delta M_{y_{12}} \Delta u_{w_{23}} - \Delta M_{y_{23}} \Delta u_{w_{12}}}{\Delta} \\
 C_M = \frac{-\Delta M_{x_{12}} \Delta v_{w_{23}} + \Delta M_{x_{23}} \Delta v_{w_{12}}}{\Delta}
 \end{cases} \tag{13}$$

$$D_M = \frac{\Delta M_{y_{12}} \Delta v_{w_{23}} - \Delta M_{y_{23}} \Delta v_{w_{12}}}{\Delta}$$

同时得到

$$K_{M_u} = \sqrt{C_M^2 + D_M^2} \quad (14)$$

$$K_{M_v} = \sqrt{A_M^2 + B_M^2} \quad (15)$$

$$\Theta_{M_u} = \arctg \frac{D_M}{C_M} \quad (16)$$

$$\Theta_{M_v} = \arctg \frac{A_M}{B_M} \quad (17)$$

$$M_{c_x} = M_x - C_M u_w - A_M v_w \quad (18)$$

$$M_{c_y} = M_y + D_M u_w - B_M v_w \quad (19)$$

上列式(14)–(19)即是根据3次实测资料求取该海区常流质量输送和风海流质量输送要素的关系式。

对比式(18), (19)与(4), 并考虑到式(5), 则显然有

$$M_{c_x} = C_M u_w + A_M v_w \quad (20)$$

$$M_{c_y} = -D_M u_w + B_M v_w \quad (21)$$

在实际计算时, 由于实测资料难免存在一定的误差, 式(18), (19)的实测资料数据可采取最小二乘方办法处理, 或采取平均值处理。

二、风海流质量输送椭圆

设风矢量 W 的方位角为 α , 则其分量为

$$\begin{cases} u_w = W \sin \alpha \\ v_w = W \cos \alpha \end{cases} \quad (22)$$

上式代入式(20), (21)并稍加整理可得:

$$\begin{cases} M_{c_x} = W(C_M \sin \alpha + A_M \cos \alpha) \\ M_{c_y} = W(B_M \cos \alpha - D_M \sin \alpha) \end{cases} \quad (23)$$

令

$$M'_{c_x} = \frac{M_{c_x}}{W}; \quad M'_{c_y} = \frac{M_{c_y}}{W}$$

并消去式(23)中的 α , 即得椭圆方程:

$$(B_M^2 + D_M^2)M_{c_x}'^2 + 2(D_M C_M - A_M B_M)M_{c_x}' M_{c_y}' + (A_M^2 + C_M^2)M_{c_y}'^2 - (A_M D_M + B_M C_M)^2 = 0$$

上述方程经过顺时针转动轴后, 可转化为椭圆标准方程:

$$\frac{M_{c_x'}^2}{R_M^2} - \frac{M_{c_y'}^2}{T_M^2} = 1 \quad (24)$$

转角

$$\beta_M = \frac{1}{2} \arctg \frac{2(C_M D_M - A_M B_M)}{(A_M^2 + C_M^2) - (B_M^2 + D_M^2)} \quad (25)$$

式中 R_M, T_M 为质量输送椭圆的长半轴和短半轴, 分别由下式决定:

$$\begin{cases} R_M = \sqrt{\frac{(A_M D_M + C_M B_M)^2}{|(B_M^2 + D_M^2) \cos^2 \beta_M + (A_M^2 + C_M^2) \sin^2 \beta_M - 2(C_M D_M - A_M B_M) \sin \beta_M \cos \beta_M|}} \\ T_M = \sqrt{\frac{(A_M D_M + C_M B_M)^2}{|(B_M^2 + D_M^2) \sin^2 \beta_M + (A_M^2 + C_M^2) \cos^2 \beta_M + 2(C_M D_M - A_M B_M) \sin \beta_M \cos \beta_M|}} \end{cases} \quad (26)$$

由式(7),(22)得

$$\begin{cases} M_{e_x} = K_{M_u} \cos \Theta_{M_u} W \sin \alpha + K_{M_v} \sin \Theta_{M_v} W \cos \alpha \\ M_{e_y} = -K_{M_u} \sin \Theta_{M_u} W \sin \alpha + K_{M_v} \cos \Theta_{M_v} W \cos \alpha \end{cases} \quad (27)$$

从而可得质量输送风因子 K_M 为:

$$K_M^2 = \frac{M_{e_x}^2 + M_{e_y}^2}{W^2} = K_{M_u}^2 \sin^2 \alpha + K_{M_v}^2 \cos^2 \alpha + K_{M_u} K_{M_v} \sin 2\alpha \sin(\Theta_{M_v} - \Theta_{M_u})$$

即

$$K_M = \sqrt{K_{M_u}^2 \sin^2 \alpha + K_{M_v}^2 \cos^2 \alpha + K_{M_u} K_{M_v} \sin 2\alpha \sin(\Theta_{M_v} - \Theta_{M_u})} \quad (28)$$

恒取正值。

同时, 由式(22),(23)可得风海流质量输送的方位角

$$\theta_M = \arctg \frac{M_{e_x}}{M_{e_y}} = \arctg \frac{K_{M_u} \cos \Theta_{M_u} \sin \alpha + K_{M_v} \sin \Theta_{M_v} \cos \alpha}{K_{M_v} \cos \Theta_{M_v} \cos \alpha - K_{M_u} \sin \Theta_{M_u} \sin \alpha} \quad (29)$$

至此即给出了全部表达式, 这在形式上与赵保仁^[4]的风海流椭圆相同, 但其含义不同。

对离岸较远的开阔深海区, 可以认为: $K_M = K_{M_u} = K_{M_v}$, $\Theta_M (= \Theta_M - \alpha) = \theta_{M_u} = \Theta_{M_v}$ 。亦即 $A_M = D_M$, $B_M = C_M$ 。此时, 椭圆变为圆, 即 $R_M = T_M$ 。

这时只要两次资料即可算得 K_M , Θ_M , M_{e_x} , M_{e_y} 。这就是沈凌云(1961)导出的结果, 将在后面附出。

三、几种特例

1. 体积输送的分离

当 ρ 为常量时, 式(2)可改写为

$$\int_{z_0}^z \mathbf{v} dz = \int_{z_0}^z \mathbf{v}_c dz + \int_{z_0}^z \mathbf{v}_u dz + \int_{z_0}^z \mathbf{v}_v dz$$

并令

$$\mathbf{S} = \int_{z_0}^z \mathbf{v} dz, \quad \mathbf{S}_c = \int_{z_0}^z \mathbf{v}_c dz, \quad \mathbf{S}_u = \int_{z_0}^z \mathbf{v}_u dz, \quad \mathbf{S}_v = \int_{z_0}^z \mathbf{v}_v dz,$$

分别称为: 体积输送; 常流体积输送; 东风风海流体积输送; 北风风海流体积输送。采取前述质量输送分离的相同方法, 根据 3 次实测的深度、余流、风的资料, 可求得该海区的体积输送常数。其数学形式, 与质量输送分离的完全一致。不同的仅仅是符号和含义。为了节省篇幅, 不再列出各方程和解式, 仅将与式(1)~(29)对应的有关符号和含义列于表 1。

2. 余流的分离

当我们只要求把各层的余流进行分离, 以求取各层风海流椭圆常数和常流时, 利用式

表 1 质量输送分离各关系式(1—29)转变为体积输送分离或余流分离时的符号对照

	质量输送	体积输送	余流
1	$M = \int_{x_0}^z \rho v dz$ $M_x = \int_{x_0}^z \rho u dz$ $M_y = \int_{x_0}^z \rho v dz$	$S = \int_{x_0}^z v dz$ $S_x = \int_{x_0}^z u dz$ $S_y = \int_{x_0}^z v dz$	v “ v
2	常流质量输送 $M_c = \int_{x_0}^z \rho v_c dz$ $M_{c_x} = \int_{x_0}^z \rho u_c dz$ $M_{c_y} = \int_{x_0}^z \rho v_c dz$	常流体积输送 $S_c = \int_{x_0}^z v_c dz$ $S_{c_x} = \int_{x_0}^z u_c dz$ $S_{c_y} = \int_{x_0}^z v_c dz$	常流 v_c u_c v_c
3	东风风海流质量输送 $M_u = \int_{x_0}^z \rho v_u dz$ $M_{u_x} = \int_{x_0}^z \rho u_{e_x} dz$ $M_{u_y} = \int_{x_0}^z \rho u_{e_y} dz$	东风风海流体积输送 $S_u = \int_{x_0}^z v_u dz$ $S_{u_x} = \int_{x_0}^z u_{e_x} dz$ $S_{u_y} = \int_{x_0}^z u_{e_y} dz$	东风风海流 v_u u_{e_x} u_{e_y}
4	北风风海流质量输送 $M_v = \int_{x_0}^z \rho v_v dz$ $M_{v_x} = \int_{x_0}^z \rho v_{e_x} dz$ $M_{v_y} = \int_{x_0}^z \rho v_{e_y} dz$	北风风海流体积输送 $S_v = \int_{x_0}^z v_v dz$ $S_{v_x} = \int_{x_0}^z v_{e_x} dz$ $S_{v_y} = \int_{x_0}^z v_{e_y} dz$	北风风海流 v_v v_{e_x} v_{e_y}
5	质量输送东风因子 $K_{M_u} = M_u / u_w$	体积输送东风因子 $K_{S_u} = S_u / u_w$	东风因子 $K_u = v_u / u_w$
6	质量输送北风因子 $K_{M_v} = M_v / v_w$	体积输送北风因子 $K_{S_v} = S_v / v_w$	北风因子 $K_v = v_v / u_w$
7	质量输送风因子 $K_M = M_c / W$ 其中 $M_e = \sqrt{M_{e_x}^2 + M_{e_y}^2} $	体积输送风因子 $K_s = S_e / W$ 其中 $S_e = \sqrt{S_{e_x}^2 + S_{e_y}^2} $	风因子 $K = v_e / W$ 其中 $v_e = \sqrt{v_{e_x}^2 + v_{e_y}^2} $
8	质量输送东风偏角 Θ_{M_u}	体积输送东风偏角 Θ_{S_u}	东风偏角 Θ_u
9	质量输送北风偏角 Θ_{M_v}	体积输送北风偏角 Θ_{S_v}	北风偏角 Θ_v
10	质量输送偏角 Θ_M	体积输送偏角 Θ_s	流偏角 Θ

(1)，并依前述质量输送相同的处理方法，根据 3 次实测的各层余流及风的资料，即可求得。其结果与文献[1]一致¹⁾。

有关各量统一列在表 1 中。

1) 文献[1]中个别符号印刷有误，某些交角未统一于方位角，引用时请注意。

3. 风海流圆的分离

对于离岸远、水深大的开阔海区,风海流将不受岸线和底形的限制,因而其椭圆变为风海流圆。此时,只需 2 次实测的余流和风资料即可进行分离。这就是沈凌云(1961)提出的余流分离代数法。鉴于该文当时仅印了油印本,交流不广,现将要点附述如下。

设海区某空间的余流由常流和风海流所组成;常流、风因子和流偏角均为恒量。则余流的两个分量可由

$$\begin{cases} u = u_c + u_w \\ v = v_c + v_w \end{cases} \quad (30)$$

表示。引进风因子 k 和流偏角 γ 后,可改写为

$$\begin{cases} u = k(u_w \cos \gamma + v_w \sin \gamma) + u_c \\ v = k(v_w \cos \gamma - u_w \sin \gamma) + v_c \end{cases} \quad (31)$$

利用 2 次实测的余流和风资料,并分别标以测序脚标后代入式(31),即可得 4 个独立方程:

$$\begin{cases} u_1 = k(u_{w_1} \cos \gamma + v_{w_1} \sin \gamma) + u_c \\ u_2 = k(u_{w_2} \cos \gamma + v_{w_2} \sin \gamma) + u_c \\ v_1 = k(v_{w_1} \cos \gamma - u_{w_1} \sin \gamma) + v_c \\ v_2 = k(v_{w_2} \cos \gamma - u_{w_2} \sin \gamma) + v_c \end{cases}$$

解得

$$k = +\sqrt{\frac{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2}{(\Delta u_w)^2 + (\Delta v_w)^2}} \quad (32)$$

$$\gamma = \arctg \frac{\Delta v_w \Delta u - \Delta u_w \Delta v}{\Delta u_w \Delta u + \Delta v_w \Delta v} \quad (33)$$

$$u_c = \bar{u} - \frac{\bar{v}_w(\Delta u_w \Delta u + \Delta v_w \Delta v) + \bar{u}_w(\Delta v_w \Delta u - \Delta u_w \Delta v)}{(\Delta u_w)^2 + (\Delta v_w)^2} \quad (34)$$

$$v_c = \bar{v} - \frac{\bar{v}_w(\Delta u_w \Delta u + \Delta v_w \Delta v) - \bar{u}_w(\Delta v_w \Delta u - \Delta u_w \Delta v)}{(\Delta u_w)^2 + (\Delta v_w)^2} \quad (35)$$

式中, $\Delta u_w = u_{w_1} - u_{w_2}$, $\Delta v_w = v_{w_1} - v_{w_2}$; $\Delta u = u_1 - u_2$, $\Delta v = v_1 - v_2$; $\bar{u}_w = (u_{w_1} + u_{w_2})/2$, $\bar{v}_w = (v_{w_1} + v_{w_2})/2$; $\bar{u} = (u_1 + u_2)/2$, $\bar{v} = (v_1 + v_2)/2$ 。

四、A 站的分离结果及其余流的预报

东海北部 A 站,其西北侧 50 海里内岸形十分复杂,东南侧面临开阔大海,等深线走向为 NNE—SSW,水深不足 50m。连续观测多日,起迄日期在 6 月中旬至下旬的 20 天之内,多为偏南风,风速不大,系用手持风速风向仪在离海面约 12m 的船顶层甲板观测;测流仪器,表层为双链浮筒,5m 层以下为 Ekman 海流计,观测层次为 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45m。密度资料由温、盐度资料换算而得。

为了分离计算的方便,我们按观测日期分组,余流以及同时刻相应的密度、风资料,编号为 B, D, F, H, J, L, N, P, R, T, V; 流场滞后于风场 12 小时的资料,编号为 A, C, E, I, K, M, O, Q, S, U。

用于分离的资料组合,第1类为风、余流、密度同步,即无滞后现象的组合;第2类为余流、密度比风资料滞后12小时的组合。组合情况列于表2。

表2 分离所用资料的组合

类别	次序	代号	余流、密度	风
1	1	1a	B, D, F	B, D, F
1	2	1b	J, N, T	J, N, T
1	3	1c	L, P, T	L, P, T
1	4	1d	D, J, R	D, J, R
1	5	1e	H, P, V	H, P, V
1	6	1f	P, R, V	P, R, V
1	7	1g	F, N, R	F, N, R
2	1	2a	B, D, F	A, C, E
2	2	2b	J, N, T	I, M, S
2	3	2c	L, P, T	K, O, S
2	4	2d	D, J, R	C, I, Q
2	5	2e	H, P, V	G, U, U
2	6	2f	P, R, V	O, Q, U
2	7	2g	F, N, R	E, M, Q

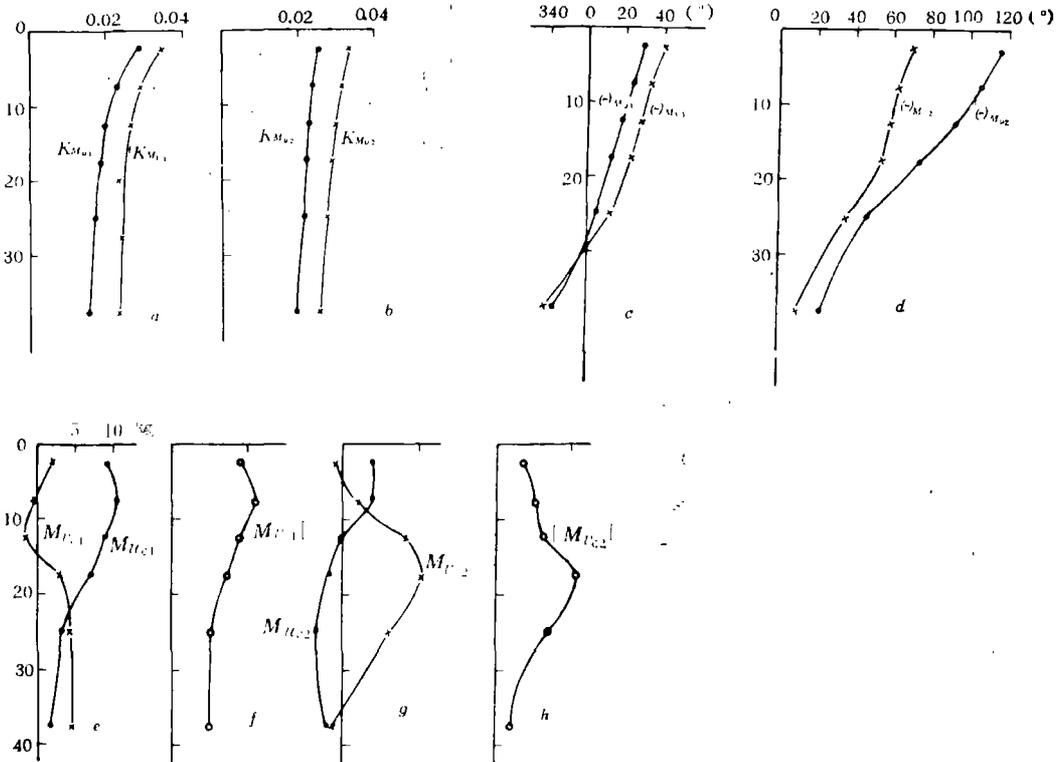


图2 1,2类质量输送要素垂直分布

—·—东风分量要素; —×—北风分量要素。

a. K_{Mu_1}, K_{Mu_1} ; b. K_{Mu_2}, K_{Mu_2} ; c. $\Theta_{Mu_1}, \Theta_{Mu_1}$; d. $\Theta_{Mu_2}, \Theta_{Mu_2}$; e. $M_{v_{c1}}, M_{v_{c1}}$; f. $|M_{v_{c1}}|$; g. $M_{v_{c2}}, M_{v_{c2}}$; h. $|M_{v_{c2}}|$ 。

由表 2 所列的组合, 1, 2 两类分别各求取 7 组分离数据。经过同样的平滑处理, 获得代表 A 站两类各层质量输送要素和余流要素的数据。垂直分布如图 2a—f 和图 3a—f 所示, 其中质量输送各数据均已化为单位体积。

对比图 2, 3 各相应要素可知, 质量输送和余流的各要素, 其垂直分布趋势完全一致。因此, 以下我们以讨论余流要素作为代表, 质量输送和体积输送的情况大致相同。

对比 1, 2 两类余流要素可知, 除数值上略有不同以外, 趋势上并无明显不同。赵保仁^[2]曾对 A 站的余流和风的关系等问题作过研究, 认为流场滞后于风场变化的时间, 随深度的增加而增加, 表层约为 6—12h, 底层约为 15—20h, 未能得出各层的确切滞后时间。我们暂把图 3 的 1, 2 类各要素, 按平滑曲线上读得的各层数据列成表 3, 再按表 3 所列的两类要素分层加以平均, 作为选定的 A 站余流要素, 如图 4、表 4。这样, 意味着选定的要素大体上代表流场滞后于风场变化时间为 6 小时。

根据表 4 所列 A 站的选定要素, 依式 (28), (29) 求取了 16 个风向(来向)方位的风因子 K 和风海流方位角 θ (去向), 列于表 5。表 5 中, 风向方位下面的角度为风去向方位

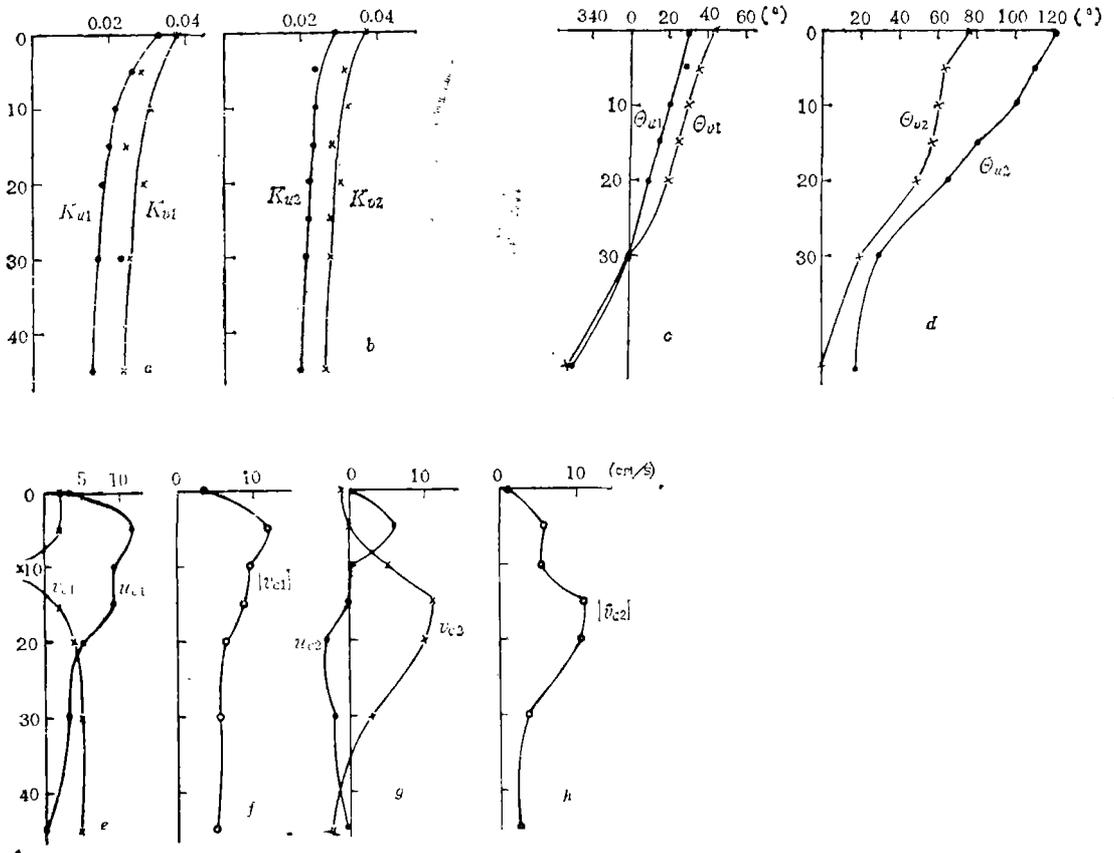


图 3 1, 2 类余流要素垂直分布

— · — 东风分量要素; — × — 北风分量要素。

a. K_{u1}, K_{v1} ; b. K_{u2}, K_{v2} ; c. θ_{u1}, θ_{v1} ; d. θ_{u2}, θ_{v2} ; e. u_{c1}, v_{c1} ; f. $|v_{c1}|$; g. u_{c2}, v_{c2} ; h. $|v_{c2}|$ 。

角。

表 3 1,2 类余流要素

层次	第 1 类						第 2 类					
	K_u	K_v	θ_u	θ_v	u_c	v_c	K_u	K_v	θ_u	θ_v	u_c	v_c
0	0.033	0.038	30	45	3	2	0.029	0.038	118	75	0	-1
5	0.026	0.033	25	38	12	2	0.025	0.033	110	68	6	0
10	0.021	0.030	20	30	9	-3	0.024	0.031	100	62	1	5
15	0.020	0.028	15	25	9	2	0.023	0.030	87	55	0	11
20	0.019	0.027	10	18	5	4	0.022	0.029	74	48	-3	10
25	0.018	0.026	5	9	4	5	0.022	0.028	60	37	-3	7
30	0.017	0.025	0	0	3	5	0.021	0.027	45	27	-2	3
35	0.017	0.024	350	350	2	5	0.021	0.027	32	17	-2	0
40	0.016	0.024	340	340	2	5	0.020	0.026	18	8	-1	-1
45	0.015	0.023	330	330	0	5	0.019	0.026	5	0	0	-2

根据风的预报,查表 5 得相应风向下的 K 和 θ , 则风海流值由风因子的定义可知

$$|v_c| = K|W| \quad (36)$$

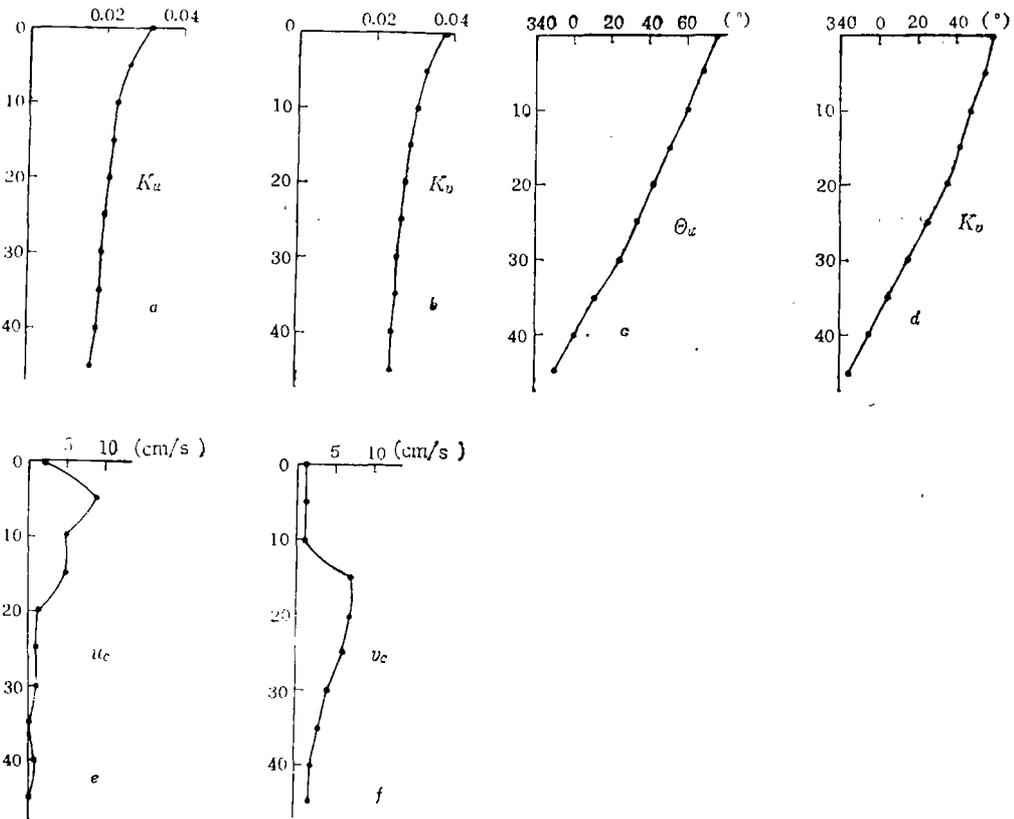


图 4 A 站选定余流要素垂直分布

a. K_u ; b. K_v ; c. θ_u ; d. θ_v ; e. u_c ; f. v_c

表 4 A 站余流常数

层次	K_u	K_v	θ_u	θ_v	u_c	v_c
0	0.031	0.038	75	60	2	1
5	0.026	0.033	68	55	9	1
10	0.023	0.031	60	48	5	1
15	0.022	0.029	51	42	5	7
20	0.021	0.028	43	36	1	7
25	0.020	0.027	33	26	1	6
30	0.019	0.026	24	15	1	4
35	0.019	0.026	11	5	0	3
40	0.018	0.025	0	355	1	2
45	0.017	0.025	350	345	0	2

风海流的方向即为 θ 方向。

由于常流矢量 v_c 的两个分量已在表 4 列出, v_c 当为已知, 则余流合成求得:

$$v = v_c + v_e$$

A 站某年某月某日 0400 时至次日 0400 时的平均风速为 $|W| = 9.4\text{m/s}$; 平均风向(去向)为 16° 。由于 16° 接近于表 5 所列出的 22.5° , 取 22.5° 为准查表 5。这样预报的各层余流与实测的各层余流数据, 列于表 6 和图 5a, b。

预报值与实测值比较, 除 30m 层误差达 53% 以外, 其余各层的符号程度相当良好: 0m 和 5m 层误差不到 3%; 10, 15, 20, 45m 层的误差均在 25% 以内。各层的平均误差, 则为 22%; 亦即预报值与实测值比较, 准确率达 78%。方向的误差, 平均为 31° , 最大为 49° 。造成这些误差的原因, 一方面是实测风向为 16° , 而预报查用表 5 时取 22.5° 代替; 另一方面, 风与余流的观测值本身也存在一定的误差。同时, 我们也注意到, 从一昼夜 25 个实测流速矢量加以平均作为滤波的办法所获取的余流, 不仅仅只是风海流和常流。但作为实用的简便方法进行预报, 这一结果是良好的。

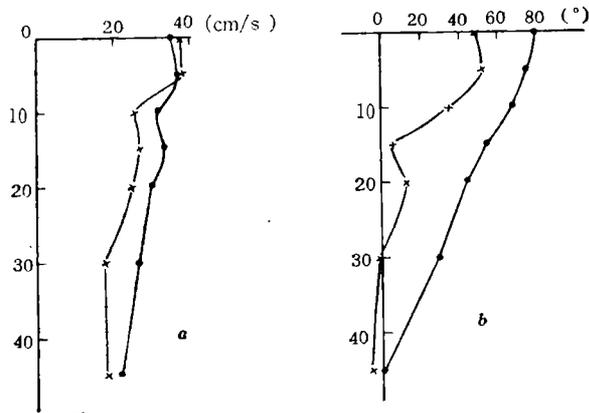


图 5 A 站预报与实测比较

— · — 预报值; — × — 实测值。

a. 量值 (cm/s); b. 方向 (°)。

表 5 A 站 16 个风向方位的风因子流方位角查对表

风来向	N		NNE		NE		ENE		E		ESE		SE		SSE	
	180°		202.5°		225°		247.5°		270°		292.5°		315°		337.5°	
z	K	θ	K	θ												
0	0.038	240	0.034	260	0.030	285	0.029	315	0.031	345	0.035	8	0.039	27	0.040	43
5	0.033	235	0.030	254	0.026	278	0.025	308	0.026	338	0.030	25	0.033	22	0.034	39
10	0.031	228	0.028	246	0.024	269	0.022	298	0.023	330	0.026	356	0.030	16	0.032	32
15	0.029	222	0.027	240	0.024	262	0.022	290	0.022	321	0.025	347	0.028	8	0.029	26
20	0.028	216	0.026	234	0.023	255	0.021	283	0.021	313	0.023	340	0.026	2	0.028	20
25	0.027	206	0.025	224	0.022	245	0.020	272	0.020	303	0.022	330	0.025	352	0.027	10
30	0.026	195	0.024	212	0.021	234	0.019	262	0.019	294	0.022	321	0.024	342	0.026	359
35	0.026	185	0.024	202	0.021	223	0.019	250	0.019	281	0.021	309	0.024	331	0.026	349
40	0.025	175	0.024	192	0.021	212	0.018	239	0.018	270	0.020	299	0.023	321	0.025	339
45	0.025	165	0.023	181	0.021	201	0.018	227	0.017	260	0.019	290	0.022	312	0.025	330

风来向	S		WSE		SW		WSW		W		WNW		NW		NNW	
	0°		22.5°		45°		67.5°		90°		112.5°		135°		157.5°	
z	K	θ	K	θ	K	θ	K	θ								
0	0.038	60	0.034	80	0.030	105	0.029	135	0.031	165	0.035	188	0.039	207	0.040	223
5	0.033	55	0.030	74	0.026	98	0.025	128	0.026	158	0.030	205	0.033	202	0.034	219
10	0.031	48	0.028	66	0.024	89	0.022	118	0.023	150	0.026	176	0.030	196	0.032	212
15	0.029	42	0.027	60	0.024	82	0.022	110	0.022	141	0.025	167	0.028	188	0.029	206
20	0.028	36	0.026	54	0.023	75	0.021	103	0.021	133	0.023	160	0.026	182	0.028	200
25	0.027	26	0.025	44	0.022	65	0.020	92	0.020	123	0.022	150	0.025	172	0.027	190
30	0.026	15	0.024	32	0.021	54	0.019	82	0.019	114	0.022	141	0.024	162	0.026	179
35	0.026	5	0.024	22	0.021	43	0.019	70	0.019	101	0.021	129	0.024	151	0.026	169
40	0.025	355	0.024	12	0.021	32	0.018	59	0.018	90	0.020	118	0.023	141	0.025	159
45	0.025	345	0.023	1	0.021	21	0.018	47	0.017	80	0.019	110	0.022	132	0.025	150

表 6 预报与实测的比较

层次(m)		0	5	10	15	20	30	45
预报	量值 (cm/s)	34.8	37.2	31.3	33.4	29.8	26.5	21.6
	方位角(°)	79	76	68	54	44	29	0
实测	量值 (cm/s)	37.7	37.9	25.2	26.8	24.5	17.3	17.9
	方位角(°)	38	53	35	5	13	358	354

参 考 文 献

- [1] 赵保仁, 1982. 确定近岸风海流椭圆的一个简单方法. 海洋科学 1982(2)41—43.
- [2] 赵保仁, 1982. 局地风对黄海和东海近岸浅海海流影响的研究. 海洋与湖沼 13(6): 479—490.
- [3] Nansen, F., 1902. The Norwegian North Polar Expedition 1893—1896. Vol. III, pp. 358—359.
- [4] Sverdrup, H. U., 1936. The Wind-Drift of the Norwegian North Polar Expedition with the "Mond" 1918—1925, pp. 18—19.

A PRELIMINARY STUDY ABOUT SEPARATION AND FORECAST OF THE CURRENT MASS TRANSPORT*

Shen Lingyun

(*Nanjing Chemical Technological School*)

and

Zhao Baoren

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

In this paper it is presumed that the mass transport of current is composed of constant current and wind drift current, of which the mass transport of the constant current is invariable in a short period, and that the wind factor and current deviation angle of the wind drift mass transport vary with wind direction. The wind factor with current deviation angle of mass transportation can therefore be decomposed into north wind factor with current deviation angle and east wind factor with current deviation angle. In general the above four elements of the wind drift mass transport as well as two constant current elements are called the six elements of current mass transport.

With three sets of observations of wind and current vectors and depth and density made at different times and by solving six linear algebraic equations, the six elements of mass transport can be obtained. From the obtained formulae for the wind factors and current deviation angles of the mass transport it is shown that the orbit of the current vectors is an ellipse when the wind direction varies.

All the previous methods for the separation of the wind drift current are confined to current vectors. In this paper, we introduce the concept of current mass transport for the separation of the drift current. The previous methods for separations of the wind drift current are special cases of the present method. Without the influence of density, it turns to volume separation method, yet with the volume transport of the unit thickness only, it turns to the method of the separation of wind drift current ellipse. In the deep sea area far from coast, when the wind factor and current deviation angles are independent of wind direction a cycle will be found. So the present method can be regarded as a generalization of all previous methods of residual current separation.

As an example, the wind factors and the current deviation angles are calculated and tabled for every layer and for all the 16 azimuths of the station A near the coast in the northern East China Sea. According to the wind forecast, the wind drift cur-

* Contribution No. 1122 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.

rent can be predicted by the tables and simple calculation. This method is useful for predicting the current in the lake also.

Comparing the predicted residual current with measured one, they are in good agreement. The errors are 22% for the magnitudes and 31° for directions of the residual current in average, respectively.