

从卫星遥感图象序列计算辽东湾 海冰运动速度矢量

黄 润 恒

(国家海洋环境预报中心 北京 100081)

刘 清 革

(国家海洋局 北京 100860)

摘 要 该文选取 NOAA 卫星连续 5 天晴空图象序列, 用相关-张弛-(C-R)法和泛函分析法(FAM)计算了辽东湾海冰运动速度矢量场。在运用这些方法之前, 利用地标点和最大互相关方法对图象序列进行精确配准, 为了消除非运动因素引起的图象灰度变化对于 FAM 计算结果的影响, 对图象序列采用了一种简单的均衡化处理。研究表明, C-R和 FAM 两种算法计算的海冰运动在总体趋势上是一致的, 并且与辽东湾局地平均风场和潮汐活动有较好的对应关系。

关键词 海冰卫星遥感, 相关-张弛法, 泛函分析法

1 引 言

中国渤海和黄海北部每年冬季都有不同程度的结冰现象, 有关海冰漂移的信息是海洋工程设计、海上生产活动和海冰动力学研究十分关注的问题。除了实地测量、雷达跟踪等方法以外, 卫星遥感是获取大范围海冰运动信息的一种有效方法。Ninnis 等人和我们都曾经用模板匹配最大互相关方法进行遥感海冰表面漂移的试验^[1,2]。近来 Wu 等人针对模板匹配法的固有缺点进行了改进, 提出了相关-张弛(C-R)的迭代方法, 成功地从 GMS 热红外图象上提取南大洋海流信息^[3]。此外, Bannehr 等人运用泛函分析方法从 Meteosat 水汽图象上计算水汽输送速度^[4]。据知, 目前尚未见到运用这两种方法对海冰漂移速度矢量的研究结果。该文的目的是将这种方法用于海冰遥感, 考察在何种条件下和何种程度上这两种方法能得到相互一致的结果, 同时利用常规的气象和水文资料对遥感得到的海冰漂移结果进行解释, 初步探讨海冰运动对风场和潮汐的响应特征。

2 计算方法

2.1 最大互相关方法(MCC)及其改进

最大互相关方法(MCC)又叫做模板匹配法, 它本质上是一种模式识别技术, 在遥感图象的配准上有广泛的应用, 近来它又被广泛应用于从相邻时刻的遥感象对上提取目标物的运动特性。MCC 的概念是简洁而明了的, 它以两幅图象(或子图象)互相关系数的大小来衡量它们的相似程度。对于时间间隔为 Δt 的两幅图象, 如果我们在第一幅图上取一块具有明显特征子图象, 叫做模板; 在第二幅图上围绕相同位置取一块较大的搜索区, 逐次计算模板与搜索区内各个子图象的相关系数, 其中相关系数最大的位置就是模板在 Δt 时刻后到达的位置。而模板内目标物的平均速度矢量就是位移矢量除以时间间隔 Δt 。

MCC 中有 3 个重要的参数: 模板大小 l , 搜索区范围 L 以及临界相关系数 r_0 。一般搜索区的大小可根据目标物在所考虑的时段内的最大位移(取自先验信息)来决定。模板的大小应选择包含有足够清晰的目标物特征。根据我们的经验, 太大的模板需要较多的机时来计算相关系数, 而且还可能

此项研究得到德国研究技术部部长基金支持, 自由柏林大学气象研究所的 Warnecka 教授和 Bannehr 博士对此项工作提出建设性的意见。

收稿日期: 1996年12月4日; 收到修改稿日期: 1997年3月21日

滤掉位移场的细节；太小的模板又可能得出不合理的匹配结果。根据海冰数值预报模式网格的需要并参照文献 [3]，在该研究中模板大小取 19×19 象元，搜索区取 39×39 象元。考虑到相关系数的置信度^[3,5]，临界相关系数 $r_0 = 0.35$ 。传统的 MCC 方法纯粹是一种统计方法，在计算模板的位移时它没有考虑速度场的内在联系，即没有考虑相邻模板位移矢量的相容性。在改进的 MCC 方法中，对于某一特定的模板而言，不是简单地选取最大相关系数作为位移矢量的指标，而是把所有相关系数大于 r_0 的方向都作为可能的位移方向，而每一个可能的位移又受到相邻模板若干可供选择的位移矢量的影响，同时它们也影响相邻的其它模板。因此在数学上归结为求解一组线性方程组，通过迭代以确定各个模板的最佳位移方向和大小。这一组位移矢量彼此是相容的，表达了速度场的连续性。由于采取了张弛迭代求解，因此改进的 MCC 方法又叫做相关-张弛方法 (C-R)。

在 C-R 方法中引入了另一个参数，即相互影响的空间尺度 d_0 ，它与速度场的相关长度有关，参照文献 [3] 在该研究中 d_0 取 5 个象元。

2.2 泛函分析方法 (FAM)

1981 年 Horn 和 Schunck 将 FAM 方法用于计算机模式研究^[6]，后来 Bannehr 等人将它用于 Meteosat 水汽图象，推导出水汽输送速度。该法认为图象上灰度分布的变化完全是由于景物的微分运动所引起的，当景物运动时，图象灰度作为被动示踪物应该是守恒的。在数学上，灰度的变化应满足平流方程：

$$\frac{dg}{dt} = \frac{\partial g}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla g = 0 \tag{1}$$

实际上，平流方程只能给出速度沿灰度梯度方向的分量：

$$v_{||} = - \frac{\partial g / \partial t}{|\nabla g|} \tag{2}$$

为了得到速度场的另一个分量，还需要附加一个约束条件。该约束条件取自速度场在所考虑的区域应是连续的要求，即：

$$|\nabla v_{||}|^2 + |\nabla v_{\perp}|^2 = \min \tag{3}$$

方程 (3) 也等价于：

$$|\nabla v_1|^2 + |\nabla v_2|^2 = \min \tag{3'}$$

方程 (1) 和 (3) 构成一个条件极值问题，可用泛函条

件极值问题求解。引入 Lagrangian 乘子 λ ，

$$S(v_1, v_2) = \int_S [(g_t + v_1 g_x + v_2 g_y)^2 + \lambda^2 (|\nabla v_1|^2 + |\nabla v_2|^2)] ds = \min \tag{4}$$

积分域 S 充满所考虑的区域。

从 (1) 式可知，有关速度的信息来源于图象灰度在时间域和空间域一阶导数，对于离散化的数字图象而言，差分计算所引入的误差随波数的增加而增加。为了减小这种误差，Bannehr 等采用高斯滤波技术，并导出滤波器的空间尺寸 N 与最大可能位移量存在下列关系^[4]：

$$N = 1 + \frac{4}{\pi^2} (u_0 \Delta t)^2 \tag{5}$$

其中 $u_0 \Delta t$ 是最大可能位移。

类似于 MCC，在 FAM 中也有 3 个影响计算结果的参数：网格大小，光滑因子 λ 以及高斯滤波器的尺寸 N 。

由于引入了约束条件，FAM 方法给出的速度场比较连续，它能反映流场的整体性质。

3 海冰遥感图象及其配准

该文所用的海冰遥感图象取自我们自己接收和处理的 NOAA 卫星第 2 通道 AVHRR。原始数据经接收和预处理后生成带有定标系数和定位数据的标准数据集，进行 Mecator 投影，生成渤海海区的遥感图。AVHRR 第 2 通道的光谱响应范围为 $0.75 - 1.1 \mu m$ ，它对下垫面的反射性质比较敏感，在晴空条件下能清晰地区分陆地、海水和海冰。研究所用的海冰图象序列日期为 1992 年 2 月 6 日至 10 日共 5 幅图。卫星过境时间分别为地方时 14:36, 14:24, 14:12, 14:00 和 13:48。相邻两幅图的时间间隔 Δt 为 23 小时 48 分钟。正如文献 [2] 所指出的，从图象序列提取目标物的运动参数、图象间的几何配准至关重要。虽然在预处理过程中考虑了每个象元的几何位置，但是由于以下几个原因，在预处理定位中仍然存在一定的误差。这几种因素是所用的卫星轨道预报模型的误差、星上时钟的误差 (一般在半秒以内) 以及由于地球形状所产生的图象边缘的几何畸变。因此在用某种算法计算海冰位移之前，我们运用标准的 MCC 方法对图象序列进行再配准。

首先，我们在第一幅图上找出一系列的地标点，通常这些地标点为无云区，且比较均匀地分布在图象上。以这些地标点为模板中心，用 MCC 方

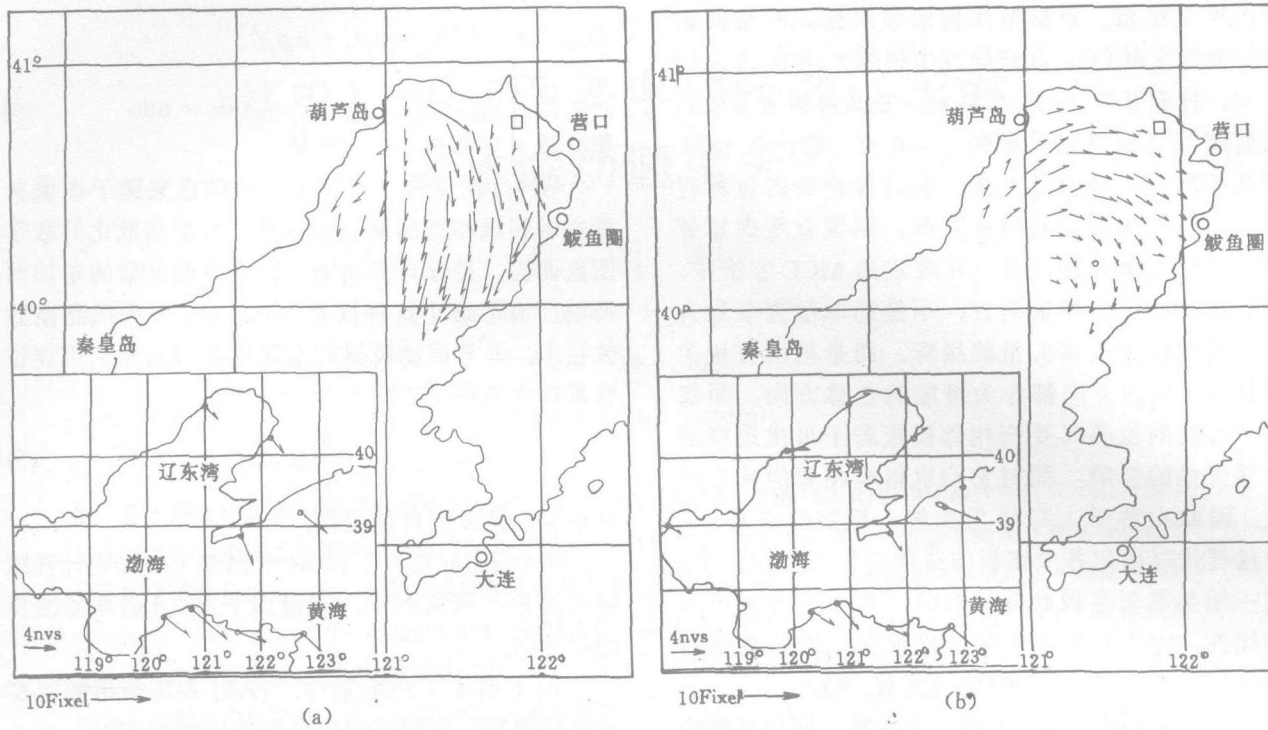


图 1 C-R算法所

(a) 2月6日—2月7日, (b)2月7日—2月8日,

图中插图表示沿岸几个台

Fig.1 Ice motion vector

表1 图象对的相对配准误差

Table 1 The relative registration error in image pairs (unit: pixel)

图象对 (月/日)	地标点 数目	RMS(象元数, 配准前)	RMS(象元数, 配准后)
2/8和2/6	22	1.07	0.43
2/8和2/7	21	1.27	0.49
2/8和2/9	22	0.56	0.56
2/8和2/10	19	1.24	0.51

法找到它们在第 2 幅图象的最佳匹配位置。如果两幅图配准很好, 则匹配点的座标应该与模板座标相同。如果匹配得不好, 则模板中心与匹配点的座标存在一定的差异。利用这些差异可以在两幅图的座标之间建立如下变换关系:

$$\xi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2$$

$$\eta_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_iy_i + b_4x_i^2 + b_5y_i^2$$

其中 (ξ_i, η_i) 为第 i 个地标点在第一幅图象上的座标, (x_i, y_i) 为第 i 个匹配点在第 2 幅图象上的座标, $(a_0, b_0 \dots a_5, b_5)$ 为待定的变换系数。原则上为了确定 12 个待定的变换系数, 只需要 6 个地标点, 但是为了确保配准精度, 本研究使用了约 20 个地标

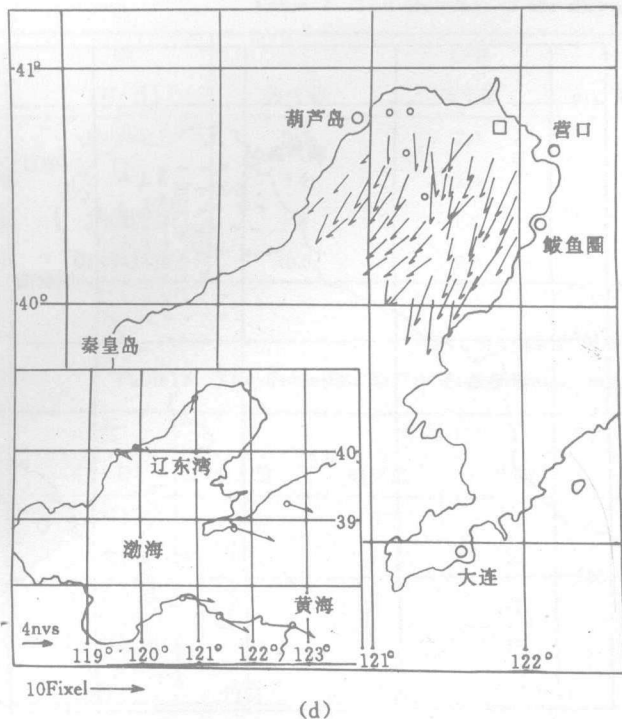
点, 用最小二乘法求解上述方程组。表 1 给出图象序列配准后的结果。由表 1 可见, 经过配准处理后, 所有图象对的配准误差小于 1 个象元。

4 计算结果

我们运用 C-R 和 FAM 方法计算 1992 年 2 月 6 日至 2 月 10 日辽东湾海冰的运动。在正式计算前, 除了上述的配准处理以外, 还对图象作了如下的预处理: 图象灰度定标。(即将图象灰度值转换为下垫面的反照率), 格式转换以及对陆地和海水进行屏蔽, 以将计算域限在海冰范围以内。以下给出计算结果。

4.1 C-R结果

图 1(a) — (d) 给出用 C-R 方法计算的海冰运动。由图 1 可见, 除了在个别网格点, C-R 给出的海冰运动是相当均匀的。由于 C-R 算法第一步是寻找特征点, 它排除了某些特征不明显的“平区”(如图中圆圈所示), 这些“平区”或者是图象固有的, 或者接近海岸, 后者通常与沿岸固定冰相联系。C-R 结



得的冰运动矢量

(c)2月8日—2月9日, (d)2月9日—2月10日

站 24 小时平均风速矢量

derived by C-R method.

果与图象动画所显示的冰运动相一致。

4.2 FAM 结果

如上所述, 对于 FAM 算法, 速度场的信息完全来源于图象灰度在空间域和时间域的导数, 因而其结果对导数的计算非常敏感, 而时间导数对最终结果的影响比空间导数更严重, 任何非运动因素所产生的图象灰度变化将会影响到计算结果, 因而必须设法消除。例如, 对可见光图象而言, 两幅图上太阳照射条件是不同的, 因而必须对太阳高度角进行订正。此外大气条件也可能有所差别。理论上, 可以用大气辐射传输模式进行大气校正, 但大气校正算法相当复杂, 而且还需要有相应的大气参数。为此我们提出一种从图象自身进行均衡化的方法, 比较简单易行。

首先从第 1 幅图上找出最亮(海冰特征最明显)的部分, 以此为模板, 然后用 MCC 方法在第 2 幅图(又称为参考图象)上找到与之相匹配的子图象, 由于正确的模板匹配, 该子图象的海冰特征同样明显, 因而也是第 2 幅图的最亮部分。

令最亮模板和最佳匹配子图象的灰度平均值为

m_s, m_i , 得到灰度增量 Δ :

$$\Delta = m_s - m_i$$

然后以 Δ 对第一幅图的灰度 S 进行均衡化, 均衡化后的灰度值 $S^{(n)}$ 为:

$$S^{(n)} = S + \Delta$$

显然, 均衡化后两幅图象的最亮部分的均值相等。试验表明, 这种简单的均衡化处理能得到较好的结果(见图 2)。正如预期的那样, FAM 结果是比较光滑的, 速度场在整体性质方面与 C-R 结果相似。

5 分析和讨论

5.1 计算结果的相互比较

表 2 给出 C-R 算法和 FAM 算法各自得出之位移大小的统计结果。一个明显的特点是, 除了在 C-R 的平点以外, FAM 结果的平均值普遍小于 C-R 结果。其原因是, FAM 算法附加了速度场全域平滑的约束条件公式(3)。表 3 给出两种计算结果点对点的相互比较, 速度方向的均方根偏差为 40° , 大小的均方根偏差为 3.4 象元。我们还对未经均衡化处理的象对进行 FAM 计算, 其结果为上述两项均方根

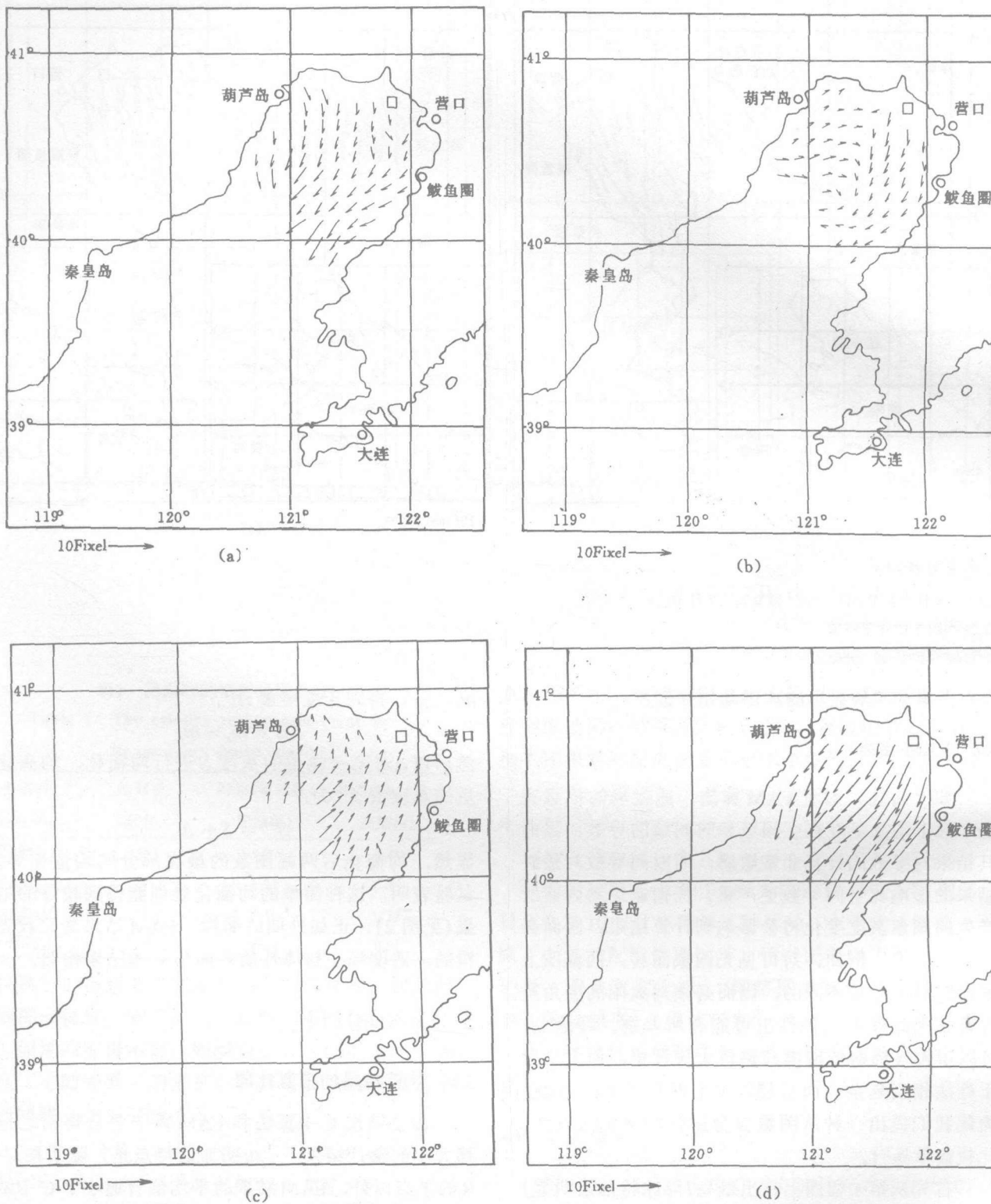


图 2 用最亮块均衡化处理后的 FAM 方法得到的结果

(a)2月6日—2月7日, (b)2月7日—2月8日, (c)2月8日—2月9日, (d)2月9日—2月10日

Fig.2 Ice motion vectors derived by FAM method from image pair with the brightest block normalization.

表2 两种算法的位移大小统计结果(单位: 象元)

Table 2 The statistics of ice displacement magnitude by two methods

例 (月/日)	C-R			FAM		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
I 2/6和2/7	10.0	2.0	6.8	7.6	1.0	3.3
II 2/7和2/8	5.4	1.0	3.2	5.5	0.6	2.3
III 2/8和2/9	9.4	0.0	6.3	6.0	1.1	2.8
IV 2/9和2/10	10.0	0.0	7.5	10.7	2.1	6.9

表3 FAM和C-R大小和方向的偏差

Table 3 The deviation in ice displacement magnitude and direction between FAM and C-R

例 (月/日)	方向 (°)				大小 (象元)			
	最大值	最小值	均值	RMS	最大值	最小值	均值	RMS
I 2/6和2/7	58	1	25	28	7.5	0	3.5	4.2
II 2/7和2/8	161	0	48	59	4.5	0	1.5	1.9
III 2/8和2/9	171	1	28	51	7.8	0.1	4.0	4.6
IV 2/9和2/10	46	0	16	20	8.5	0	2.2	2.8
平均值	109	1	29	40	7.1	0	2.8	3.4

偏差分别为 75° 和 4.2 象元。另一个有趣的现象是，未经均衡化处理象对中有两个例子(例 I、例 III)的 FAM 结果趋势与 C-R 结果有较大的差异(图略)，可见均衡化处理对于 FAM 结果与 C-R 结果的符合程度是起作用的。因为 C-R 算法起源于 MCC，其结果比较直观可信，在缺少实测冰运动数据的情况下，我们暂且将它作为比较的标准。

5.2 冰运动与风场的关系

从图象序列导出的冰运动代表了冰的表现位移或时间平均位移，为了揭示它与风场的关系，应该对风矢量进行时间平均。表 4 给出辽东湾东、西岸两个代表性台站(鲅鱼圈和葫芦岛)从第 1 天 14:00 到第 2 天 14:00 的平均风矢量的大小和方向。由表可见，两个台站 24 小时平均风向彼此接近，它代表了这个时间段辽东湾平均风的总趋势。为了便于比较，同样的风矢量也画在图 1 的插图中。由图可见，C-R 和 FAM 算法所得的冰运动方向在总体上与观察的平均风向一致。例如，例 I 为西北风，冰向南运动；例 II 为西南风，大部分冰向东北、东运动；例 III 为南风，冰向北运动，例 IV 为东北风，冰向南运动。但是近岸海冰由于受到诸如潮汐、海岸地形的影响，它们的运动有时与风向并不一致。这说明局部海域海冰运动对风应力的响应特征要比文献 [2] 中所研究的开放海域海冰运动复杂得多。

表4 辽东湾24小时平均风矢量

Table 4 The 24 hour averaged wind vector in Liaodong Bay

例 (月/日)	风速 (m/s)		风向 (°)	
	鲅鱼圈	葫芦岛	鲅鱼圈	葫芦岛
I 2/6和2/7	2.8	2.9	145	142
II 2/7和2/8	3.0	1.8	54	44
III 2/8和2/9	3.4	3.7	29	352
IV 2/9和2/10	1.5	3.8	199	213

在图 1 的插图中我们还标出远离研究区的几个台站的平均风矢量。一个明显的特点是在 2 月 6 日—10 日这个时间段内渤海地区平均风的主导方向为吹向黄海的西北风，而冰运动所响应的是局地平均风。例 II 和例 III 特别能说明这一点：当局地平均风为西南风(例 II)和南风(例 III)时，与此相应，冰平均地向东北和向北运动。

5.3 潮汐对冰运动的影响

验潮站实测资料以及模式计算都表明，研究区的潮汐活动具有典型的半日潮特征，半日潮的振幅呈现某种长周期变化，两个岸站潮汐位相几乎相同。潮高的周期性意味着潮汐作用力也是周期的，涨潮时潮汐对海冰的作用是向岸方向，反之亦然。NOAA 卫星两次过境的时间间隔接近 24 小时(实际

为 23 小时 48 分钟), 海水经历了两次涨潮和落潮。令 Δ_+ , Δ_- 为涨潮和落潮的总量, 则 24 小时水位的变化

$$\Delta = \Delta_+ - \Delta_- = h_2 - h_1 \quad (13)$$

式中 h_2 , h_1 为两幅图象相应时刻的潮高。因此可用潮高差 Δ 近似作为潮汐对海冰运动剩余影响的指标。表 5 给出两个台站在卫星过境时刻的潮高以及两次过境时的潮差。表中所示两个台站的各自潮差具有相同的符号, 表明辽东湾潮汐活动的同步性。

表 5 NOAA 卫星过境时刻两个台站的潮高
以及两次过境时的潮差

Table 5 Tide height and difference at correspondent pass time of NOAA satellite at two stations

日期 (月/日)	过境时刻	潮 高 (cm)		潮 差 (cm)	
		鲅鱼圈	葫芦岛	鲅鱼圈	葫芦岛
2/6	14:36	109	75.4		
2/7	14:24	64.4	28	-44.6	-47.4
2/8	14:12	65.4	31.8	1.0	3.8
2/9	14:00	69	35	3.6	4.2
2/10	13:48	80.0	57	11.8	21.0

将潮差与相应的冰运动矢量场的整体特征相比较可以看到, 在 4 个例子中有 3 个例子(例 I、例 II、例 III)的冰运动与潮差的符号有较好的对应关系, 即潮差为负, 冰向南运动; 反之潮差为正, 冰向北运动。例 IV 情况例外, 这或许归因于风的作用。目前我们还不能将潮汐的作用与风的作用加以分离, 为此有必要选择静风或风力不大的例子并结合海冰动力数值模式作进一步研究。

6 结 论

该文用两种方法从序列的卫星遥感图象上推导出海冰运动矢量。MCC 及其变形(C-R)是模式识别和相似性检测技术, 它只要求图象特征在所考虑的时间段内基本保持不变, 而与图象灰度的时间变化无关。对于特征不明显的模板有可能所有的相关系数都小于临界相关系数 r_0 , 因而无法确定位移的方

向和大小, 这种情形在 C-R 算法中被称之为“平点”。FAM 方法要求图象灰度在运动过程中保持不变。然而实际上总存在一些非运动因素引起的图象灰度变化, 为了消除这些因素对计算结果的影响, 象对之间灰度的均衡化是十分必要的。由于引入了速度平滑性条件, 对于那些灰度梯度不明显的区域, 位移信息主要来自邻近运动的平滑, 因而 FAM 得到的速度场是比较光滑的。该文的试验结果表明, 两种方法所得到的海冰运动速度场在整体性质上是一致的, 但在某些格点上速度的大小还有一定的差别。

两种算法结果表明, 冰运动的总体趋势受局地平均风的影响, 并且与潮汐的剩余效应有关, 然而为了区分风应力和潮汐力对冰运动的贡献, 尚需作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Huang R. H. *et al.* Application of satellite imagery to monitoring of sea ice motion in north China Sea. *Advances in Space Research*, 1992, 12(7): 163-167.
- [2] Ninnis, R. M. *et al.* Automated extraction of pack ice motion from AVHRR imagery. *J. Geophys. Res.* 1986, 91(C9): 10,725-10,734.
- [3] Wu, Q. X. *et al.* Computing velocity fields from sequential satellite images. *Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment*, eds. Jones *et al.*, 1993.
- [4] Bannehr, L., M. Rohn. Determination of displacement vector field from satellite image. 30th COSPAR Conference, Hemberg, Germany, 1994.
- [5] Emery, W. J. *et al.* An objective method for computing advective surface velocity from sequential infrared images. *J. Geophys. Res.* 1986, 91(c11): 12,865-12,878.
- [6] Horn, B. K., G. B. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 1981, 17: 185.

作 者 简 介

黄润恒, 1939 年 11 月出生。1963 年毕业于北京大学地球物理系, 1967 年毕业于中国科学院研究生部, 1985 年调至国家海洋环境预报中心, 现任研究员。长期从事大气辐射传输、海洋/大气遥感研究工作, 发表论文 30 余篇。

Motion of Ice in Liaodong Bay of China Remotely-Sensed from Sequential Images of NOAA Satellite

Huang Runheng

(National Research Center for Marine Environmental Forecasts)

Liu Qingge

(State Oceanic Administration of China)

Abstract Currently the modified maximum cross correlation (Correlation-Relaxation) method and the functional analysis method (FAM) are used to study displacement vector fields of sea ice in the Liaodong Bay of China, from NOAA satellite image sequences of continuous five clear days. Before using these algorithms several preprocessing steps, such as image registration, calibration, as well as land and water masks, are performed. Particularly, two kinds of normalization methods for the image sequence are tested in order to eliminate non-advective effect on the FAM calculations. The calculated results for the C-R method and the FAM are quite homogeneous and show distinct patterns in displacement vector fields. Both results are well explained by wind and tide data, which demonstrate that the time averaged winds and the residual tidal activity are responsible for the displacement of sea ice deduced from time lapsed images.

Key words Remote sensing of sea ice, Correlation-relaxation method, Functional analysis method