

海冰运动研究进展综述

颜钰^{1, 2, 3, 4}, 邵冬冬⁵, 许映军^{1, 2, 3, 4}, 顾卫^{1, 2, 3, 4}

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 4. 北京师范大学海岸带与海冰研究中心, 北京 100875; 5. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要:对海冰运动研究的主要进展进行综合评述:概述了海冰运动学研究的发展情况,重点对海冰运动的数值模拟、浮标观测、卫星遥感、雷达图像监测和数字图像监测等技术的发展历程和关键研究成果进行总结,并根据近几十年海冰运动发展现状,立足于实际需求,考虑技术发展水平,讨论海冰运动未来研究趋势。基于现场和遥感观测开发具有更高时间、空间分辨率的海冰运动模式将是未来研究侧重的方向。

关键词:海冰运动;数值模拟;浮标观测;卫星遥感;雷达监测;数字图像技术

中图分类号:P731.15 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2017)03-0085-09

1 引言

海冰运动是指海冰在风力、潮汐、洋流等多因素影响下,由多种作用力综合作用而呈现出的复杂运动形式。在南北极和中高纬度海区,海冰运动对海洋油气开采、海产养殖、船舶运输等造成巨大威胁。海冰运动引起的灾害是最严重的海洋灾害之一。1969年冬季渤海发生特大海冰灾害事件,整个海域出现封冻现象。在风和海流的作用下,运动的海冰撞毁了渤海二号钻井平台,造成了巨大的经济损失^[1];1989年美国Exxon公司Valdez油轮为躲避浮冰而偏离航道,造成轮船搁浅,三万多吨原油在阿拉斯加海域泄漏,对当地生态环境产生毁灭性的影响^[2];2010年冬季渤海海冰达到近30 a最严重冰情,海冰灾害直接经济损失超过60亿元,占当年全国海洋灾害总损失的47.6%^[1];2014年1月,由于南

极海冰快速运动的特性,我国雪龙号考察船在营救俄罗斯科考船时被困于密集浮冰区,后经多方努力成功脱困^[3]。

21世纪以来,海洋经济发展迅速,海洋资源开发和海洋运输等经济活动日益增多。海冰实时监测和海冰数值预报对海洋经济活动、海冰防灾减灾和资源化利用等具有突出作用^[4]。不论是针对大范围的海冰运动形式还是具体到某一工程点的海冰运动特征的研究,均具有重要意义和实用价值。对于冰区船舶运输尤其是近年来由于全球变暖而开通的北极航道而言,提高海冰运动的实时监测和数值预报能力是极为重要的,它是海洋运输重要的安全护卫者^[5]。此外,海冰是一种自然资源,可通过海冰淡化得到淡水。然而海冰与其他类型资源的最大不同之处在于海冰大多不是固定的,而是具有流动性的。海冰资源产业化开发过程中很重要的一

收稿日期:2016-10-28;修回日期:2016-11-28。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41571510);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014KJJCB02)。

作者简介:颜钰(1993-),男,博士在读,主要从事海冰运动观测与数值模拟研究。E-mail:yanyu@mail.bnu.edu.cn

通讯作者:顾卫(1956-),男,教授,博士,主要从事海冰资源开发利用研究。E-mail:weiguo@bnu.edu.cn

个因素是选址适宜性,海冰运动补充性就是影响选址的关键因素之一^[6]。本文对海冰运动研究的几种典型方法(数值模拟、浮标观测、卫星遥感、雷达图像监测和数字图像监测)的主要研究进展进行了综述,在此基础上对海冰运动研究未来发展方向作有益探讨,以期为海冰运动研究工作者提供参考。

2 海冰运动研究的重要进展

2.1 数值模拟

由于海冰监测技术受人力、物力、成本等因素限制,目前主要以数值模拟法解决海冰运动问题,并且此方法已发展较为成熟。海冰运动,顾名思义,它是针对海冰这一对象由动力因素主导的空间位置变化的过程。Felzenbaum^[7]将海冰运动速度与海面风速、风向以及海域流速、流向等动力因素结合起来,建立了最早的海冰运动模型。更为具体的动力学模式则必须考虑作用在冰上的多种动力因素,包括风应力、流应力、科氏力、冰内应力及海面梯度力等(见图1),从而构建包括海冰质量连续方程、海冰内部相互作用的本构方程以及海冰漂移动力方程等在内的数值模式。

国外海冰数值模拟研究始于上世纪70年代末,Hibler^[8]最早提出了在欧拉坐标下构建有限差分法的海冰动力模式,创造性地用粘塑性流变学理论研究冰原,并构建半隐式数值计算方法进行数值试验,对海冰动力学研究作出开创性贡献。海冰运动数值模拟过程中往往以扰动较大的多介质状态存在,拉格朗日坐标系对扰动小的多介质状态更契合,而欧拉坐标系更契合于扰动大的单介质状态。针对这一特点,Flato^[9]在海冰数值模拟时通过建立质点网格法将拉格朗日与欧拉两种坐标系耦合起

来,使其将欧拉方法的计算扭曲严重的二维流体力学模型的优点和拉格朗日方法的计算多种物质和自由面运动的能力结合起来。然而,质点网格法坐标系间数据的交换导致数值扩散,大大增加了计算复杂性。因此Gutfraind等^[10]将最早应用于天体物理研究的光滑粒子流体动力学方法运用到海冰运动模拟中,将海冰模拟分解成足够多个具有各自质量、动量和能量的海冰粒子,计算出海冰运动情况。然而在自然条件下,不论极区还是局地海域,均表现出很强的海冰断裂、重叠和堆积等离散特性,上述3种数值方法均将海冰视为连续介质而无法解释海冰离散的特点。Shen等^[11]考虑海冰的类似颗粒材料力学行为,将颗粒流理论应用到海冰运动研究,并建立了基于海冰碰撞流变学的离散元模型,对碎冰区海冰运动进行数值模拟。4种主要海冰动力模式特点如表2所示。

随着海冰数值模拟不断发展,更多的海冰动力模式也被应用于渤海海冰运动模拟中。季顺迎等^[12]考虑海冰热力过程,采用光滑粒子流体动力学方法对辽东湾小尺度区域进行4天的海冰运动数值模拟,发现模型对辽东湾区域不规则海冰漂移演化过程有较强适应性。季顺迎等^[13]将质点网格法应用于渤海海冰模拟中。模型先在欧拉坐标下用差分法对海冰连续性方程及动力方程进行计算,求得各网格的海冰质点运动速度,接着在拉格朗日坐标里求取海冰质点位移数据。结果表明在对辽东湾海冰的模拟中,质点网格法能较好地解释海冰流变过程,能较好地描述海冰运动特征。王建锋^[14]引入隐交替有限差分格式,建立辽东湾浮冰运动模型。在拉格朗日坐标下,利用该模型模拟得到海冰的运动轨迹。同时还对影响海冰运动的风、流拖曳力和冰内应力等因素进行探讨。苏洁等^[15]将普林斯顿大学的海洋模式与中国国家海洋环境预报中心发展的海冰模式耦合在一起,构建了冰-海洋耦合的动力-热力模式,对渤海海冰与海洋的动力作用进行了模拟,并着重探讨了潮汐对海冰运动模式的影响。米丽丽^[16]将海冰离散为有一定尺寸、密集度和厚度的圆盘单元,针对海冰生消和运动中存在的非连续分布及形变特性,建立了改进的海冰动力离散元模型。在对辽东湾的海冰运动数值模拟中,模拟结果和卫星遥感数据与油气平台工程点的现场观测数

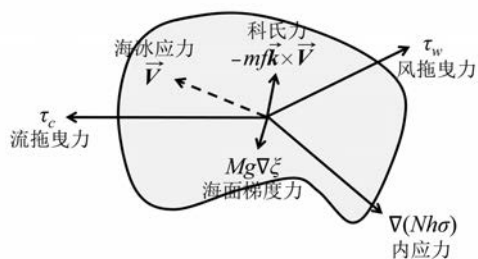


图1 海冰动量平衡图

表1 主要海冰动力模式对比

海冰动力模式	适用尺度	优点	缺点	代表人物
有限差分法	大、中尺度	计算效率高 应用范围广	视海冰为连续介质,描述网格内 海冰平均状态,不能精确模拟动 力破坏时区域性特点	Hibler ^[8]
质点网格法	小尺度	区域计算灵敏度高	网格和质点间来回插值过程数 值扩散,计算复杂性增加	Flato ^[9]
光滑粒子流体动力学 方法	中、小尺度	克服数值扩散现象,与风、流 耦合作用好,计算精度高	粒子间需进行大量循环计算, 中、长期数值模拟适用性降低	Gutfraind ^[10] 等
离散元模型	小尺度	对海冰离散特性较好解释,物 理意义明确	单元数量众多,计算量大且计算效 率较低,限制其在大中尺度应用	Shen ^[11]

表2 6种常用海冰浮标比较

浮标类型	布设方式	数据类型	数据传输	工作寿命/a	参考文献
J-CAD (JAMSTEC Compact Arctic Drifter)	吊车布放	气温、盐度、水深、气压、 风速、位置	GPS/Argos/ 铱星	2	Inoue 等 ^[17]
IMB (The Ice Mass Balance Buoy)	海冰钻孔	冰厚、水深、气温、 气压、位置	Argos/GPS	1.5	Richter-Menge 等 ^[18]
CALIB (Compact Air Launched Ice Beacon)	飞机投放	冰温、气压、位置	Argos	1	King ^[19]
IB (Ice Beacon)	海冰钻孔	冰温、气温、气压、位置	Argos/铱星	2	Lukovich 等 ^[20]
POPS (Polar Ocean Profiling System)	海冰钻孔	冰温、水深、盐度、气温、 气压、位置	Argos/铱星	2.7	Kikuchi 等 ^[21]
ITP (Ice Tethered Profiler)	海冰钻孔	冰温、气温、气压、电导、 位置、溶解氧、叶绿素	铱星	3	Timmermans 等 ^[22]

据吻合良好。

2.2 浮标观测

浮标观测是获取冰厚、冰温、气压和水深等参数以及海冰运动现场观测数据的重要手段^[17-18]。一般的地面观测站如雷达监测站只能获取沿岸基站附近海域海冰资料,而破冰船和冰面营地等成本过高,通常只在短期海冰研究中应用,长时间序列观测不太适用。然而大范围和长时间序列的海冰现场观测是必要的,自动测量浮标就很好地解决这一问题。近年来,通过浮标观测所得海冰运动数据一方面提高了卫星遥感技术对海冰的解译精度,另一方面通过与卫星遥感数据和数值模拟技术结合,提高了对海冰的短期预报精度。海冰浮标观测技术已广泛应用于海冰运动轨迹、速度和海冰形态、变形率等多方面研究^[17]。浮标可放置在固定冰或漂流

浮冰上,其中放在漂流浮冰上所得数据即为海冰运动漂移轨迹^[18]。海冰浮标技术开发主要涉及布设方式、数据传输、电池续航和工作寿命等因素,表2为6种常用海冰浮标的比较。

自上世纪60年代以来,海冰浮标观测技术便在冰区开始得到应用。然而由于电池续航能力、数据存储与传输等因素的限制,一套海冰浮标设备的工作寿命仅为几天。经过30 a的发展,浮标观测技术有长足的进步。1991年,国际北极浮标计划正式启动。该计划旨在北极地区建立浮标漂流网络,以提供浮标所在区域地理位置信息和基础气象数据。两年后,与北极浮标计划类似,主要研究区为南大洋的南极浮标计划成立。Rigor等^[23]利用北极浮标计划提供的数据分析发现,北极海冰自西向东其平流运动速度逐渐降低,且海冰距俄罗斯西伯利亚海岸越来越远。李娜等^[24]则运用北极浮标计划提供的

数据定量研究风对海冰运动的影响,研究发现海冰运动速度约为风速的2.13%。Schwegmann等^[25]将美国国家冰雪数据中心提供的威德尔海域1989—2005年间的每日海冰运动浮标观测日数据与AVHRR卫星图像解译的海冰运动信息作比较,结果表明卫星解译数据与浮标观测数据吻合较好,但71%的卫星图像解译的海冰速度要小于浮标实际观测的海冰运动速度。邓娟等^[26]将浮标数据与MODIS影像结合起来,研究了2008年中国第三次北极科学考察期间浮标所在区域海冰运动轨迹和速度等运动特征。同时其利用小波分析法得到海冰运动速度存在明显的周期性变化规律。2014年9月,我国第六次北极科考队布放了4组海冰温度链和漂移浮标,这是我国首次完成海冰浮标阵列的布放。海冰浮标阵列将改善过去单个浮标观测获取数据的局限性,可更全面获取极地海冰变化的特点。

2.3 卫星遥感技术

卫星遥感,也被称为航天遥感,是以运行于太空中的飞行器从太空中观测地球表面的一种技术。卫星遥感具有探测范围广,成像迅速,可以对某一区域进行周期性监测等优点。但在过去,卫星图像精确度低、天气状况影响大等弊端使其在应用过程中受限。随着卫星遥感技术的发展,观测资料精度大幅提高,用卫星资料获取大范围的海冰运动数据已成为一种有效方法^[27-31]。提供海冰运动研究数据的卫星传感器包括超高分辨率辐射计(AVHRR)^[28,31]、NASA散射计(NSCAT)^[30]、专用微波成像仪(SSM/I)^[28]、高级微波扫描辐射计(AMSR-E)^[29]和合成孔径雷达(SAR)^[27]。

从卫星资料获取海冰运动信息的方法主要包括最大协相关方法(Maximum Correlation Criterion, MCC)、小波分析方法、和光流法。最常用的估算大面积海冰运动的方法是MCC法^[31-32]。该方法利用协相关分析法对连续的卫星遥感图像进行处理,从而得到海冰运动信息。方法简要叙述如下:

考虑两个二维信号 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$,其定义域为 $|x| < L, |y| < L$,两个信号间具有空间延迟,即两个信号间的位移量 (x_0, y_0) ,关系如下:

$$f(x, y) = g(x + x_0, y + y_0) \quad (1)$$

在 (x_0, y_0) 点,协方差 r_{fg} 的值为:

$$r_{fg}(x_0, y_0) = E[(f(x, y) - m_f) \times (g(x + x_0, y + y_0) - m_g)] \quad (2)$$

式中: $E[\]$ 是数学期望值, m_f, m_g 是信号的平均值,由式(1)和(2)得到空间延迟 (x_0, y_0) 情况下,最大协相关系数为:

$$\rho(x_0, y_0) = r_{fg}(x_0, y_0) / [(\sigma_f^2)^{1/2} (\sigma_g^2)^{1/2}] = 1 \quad (3)$$

实际情况下,两个信号是部分相关,即 $\rho(x_0, y_0) < 1$ 。确定出系数最大的点后两个信号之间的位移量 (x_0, y_0) 也随即得到,具体操作步骤参见吴龙涛等^[32]报道。

Ninnis等^[31]首先在波弗特海域将MCC法应用于AVHRR遥感图像中,进而得到该海区的海冰运动速度,其结果与海冰浮标测量数据一致;黄润恒等^[33]利用MCC方法从相邻24h的AVHRR图像跟踪海冰的表观运动,得到了辽东湾海冰表观位移的空间分布;吴龙涛等^[32]将该法应用于MODIS图像中,基于海冰运动动力学获得渤海大范围海冰运动速度场。同时将风速和潮流资料与海冰运动速度进行回归分析,建立渤海海冰运动速度和风速或流速的关系。Laverne等^[29]利用MCC方法计算得到AMSR-E传感器反演的北极海冰运动数据,并且每48h得到一整幅北极海冰运动的矢量场,极大缩短了获取海冰运动信息的时间。

除了最大协相关方法,小波分析方法、光流法等也被用于卫星图像获取海冰运动信息研究中。Liu等^[30]将二维高斯小波变换方法运用到北极地区NSCAT和SSM/I卫星图像中,获取了北极海冰运动信息,同时发现了北极海冰主要环流模式周期为4d。Yu等^[34]利用二维小波分析方法从AMSR-E卫星图像中解译出北冰洋海冰运动矢量图,并讨论了2005—2007年间北极海冰运动和变形的特性。

2.4 雷达图像监测

海冰雷达图像监测技术是通过对比一段时间内不同雷达图像,从而获得监测海域内海冰的运动距离和方向,进而确定海冰速度矢量场及其变化规律。图2为岸基雷达测量示意图。雷达图像监测具有监测范围适中、图像精度高、连续采集能力强、安装简便以及运行维护成本低等优点,已经成为海冰运动研究中重要手段之一^[35]。海冰雷达图像识别主要包括基于光流法^[36]的速度场识别和基于特征点匹

图2 岸基雷达测量示意图^[35]

配法^[37]的重点冰块速度识别这两种方法。

海冰速度场识别首先将图像分块化,之后对分块后的图像进行光流法处理。该方法通过观测监测范围内海冰运动所形成的运动轨迹,分析雷达图像中像素强度随时间的变化及相关性,从而确定目标像素点的位置改变。假设目标像素点 $A(x, y)$ 在 t 时刻强度为 $I(x, y, t)$,忽略 t 时刻内海冰块在两幅图像中的微小形变,有:

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (4)$$

式中: δx 和 δy 分别是横坐标与纵坐标位移, δt 是时间间隔。对上式进行泰勒展开:

$$I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t + O^2 \quad (5)$$

式中: O^2 为可以忽略的高阶展开项。由此可得:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} V_x + \frac{\partial I}{\partial y} V_y + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

通过对海冰雷达图像目标像素点强度分析,可求得海冰的水平 and 垂直速度分量。结合海冰位移与时间间隔,矢量合成后即可生成该海区海冰速度场。

重点冰块速度识别过程中计算量较小,因此可运用特征点匹配法这一精度更高的算法进行运算^[37]。首先提取重点冰块的特征点,并确定该区域的目标像素点。通过计算某一像素点与周围8个像素点的亮度均值之差,差值最大的点即锁定为目标像素点。通过查找并匹配两幅雷达图像中所有目标像素点对应的位移,海冰运动情况即可求出。假设 t_1 时刻雷达图像表示为 $p(x, y) = \sigma(x, y)$, t_2 时刻雷达图像即可表示为 $q(x, y) = \sigma(x + \Delta x, y + \Delta y)$,其中 $(\Delta x, \Delta y)$ 是 t_1 与 t_2 间的位移。海冰运动分析即可简化为计算 $(\Delta x, \Delta y)$ 。海冰运动位移 $(\Delta x, \Delta y)$ 可通过以下步骤计算而得。首先 $p(x, y)$ 和 $q(x, y)$ 的互相关

函数的计算公式如下所示:

$$r_{pq}(\tau_x, \tau_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, y) \cdot q(x + \tau_x, y + \tau_y) dx dy \quad (8)$$

$\sigma(x, y)$ 自相关函数的计算公式如式(9)所示:

$$r_{\sigma\sigma}(\tau_x, \tau_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(x, y) \cdot \sigma(x + \tau_x, y + \tau_y) dx dy \quad (9)$$

之后互相关函数 $p(x, y)$ 和 $q(x, y)$ 可转换为自相关函数 $\sigma(x, y)$ 的计算:

$$r_{pq}(\tau_x, \tau_y) = r_{\sigma\sigma}(\tau_x + \Delta x, \tau_y + \Delta y) \quad (10)$$

自相关函数在原点取极大值,即: $r_{pq}(\tau_x, \tau_y) \leq r_{pq}(-\Delta x, -\Delta y)$,通过寻找式(8)中 t_1 与 t_2 时刻雷达图像的互相关函数的最大值所在位置 $(-\Delta x, -\Delta y)$,就能够得到海冰运动位移 $(\Delta x, \Delta y)$ 。在考虑图像几何比例变化的情况下,运动位移除以时间间隔 Δt 即可求出海冰运动速度。

海冰雷达图像监测技术始于上世纪90年代。孙鹤泉等^[38]通过对辽东湾油田平台记录的雷达图像进行重点冰块速度识别,确定了该海区内海冰平均相对位移,从而计算出海冰的平均速度。Mahoney等^[35]使用岸基雷达对美国阿拉斯加波罗海域沿岸海冰进行了两年的观测,获得了沿岸海冰的冰速分布特征。赵宝刚等^[39]基于雷达图像监测,结合粒子测速法完成海冰运动矢量场的快速雷达遥感观测。该方法在辽东湾工程点附近海域的海冰预报中得到应用,实现全天候海冰运动预报。Karvonen^[40]使用芬兰波罗的海岸基雷达监测所得海冰雷达图像,对角点进行了连续追踪,有效获取该海域海冰运动规律。季顺迎等^[41]于2011/12年冬季全冰期对辽东湾油气平台邻近海域进行了连续雷达监测,通过研究监测区内不同特征点的移动,获得连续两天的海冰速度监测结果,进而确定了整个工程点附近海域的海冰速度场分布,同时证明该区域海冰的运动受潮流影响表现出明显的周期性。孙鹤泉等^[3]应用特征点匹配法和光流法得到海冰运动矢量图,并对以上两种方法进行对比:与特征点匹配法相比,光流法对细节和光滑性的描述要更精确;但对计算效率而言,特征点匹配法仍是海冰运动研究的首选算法。

2.5 数字图像监测

卫星遥感技术的发展为大范围海冰运动资料的获取提供巨大帮助。然而卫星传感器距地面遥

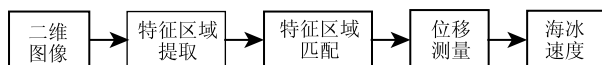


图3 数字图像监测流程

远,遥感图像分辨率大多不高,目前通常只能获取较大范围海冰运动信息,而难以得到小尺度范围的信息。获取海冰运动必要参数的最直接方法是现场观测,但现场数据的获取往往受到特殊地理位置及恶劣天气条件等限制。海冰数字图像监测技术可较好解决以上问题。数字图像监测可提供高分辨率海冰图像,可完整地呈现小尺度海冰运动信息。数字图像中各像素点代表的实际距离可通过与已知长度的参照物进行比对而得。将一定时间内的两幅图像中的同一特征块提取出并进行差异匹配后即可快速准确地获得海冰块体运动速度信息。与海冰雷达图像监测方法相比,数字图像监测法计算得到的海冰运动参数更为准确。因此,在冰区工程点附近海域开展海冰数字图像监测可有效补充卫星遥感和雷达等手段的不足,构建立体监测体系。海冰运动数字图像监测流程如图3所示。

近几年来,海冰数字图像监测技术也有较快发展。王宇新等^[42]对辽东湾油气平台海冰监测站架设的数码像机拍摄的视频进行处理,将视频分解成时间序列图像,提取图像中Harris角点为海冰特征点,之后利用灰度相关特征匹配函数对不同时刻图像的特征点进行匹配。根据特征点的匹配信息可得到其移动距离及方向,进而得到海冰速度场分布。Leisti等^[43]在破冰船安装海冰照相系统,每分钟拍摄一张照片,经过图像识别获取实时海冰运动信息。张项^[44]建立了目标过滤海冰跟踪法,可满足海冰现

场追踪的需求。该方法首先将海冰图像灰度化和去除噪声,之后按照一定规则分割图像,并利用近似形态学处理得到清晰图像,最后应用目标过滤法对海冰块体进行跟踪。Hagen等^[37]建立实时海冰运动处理系统,对航空摄影系统拍摄的图像进行处理,所求得海冰运动速度与浮标观测基本一致。

3 小结及未来发展趋势

综上所述,过去几十年来,海冰运动的数值模拟、浮标观测、卫星遥感、雷达图像监测和数字图像监测技术都取得了长足的发展,总结各方法的主要优缺点、运用领域及当前主流技术(模型、方法)如表3所示。

自上世纪60年代以来,浮标观测、数值模拟等技术发展极大地促进了对于海冰运动的研究,海冰运动研究也逐渐从理论研究转化到实际应用当中,这对于海冰预报是至关重要的。随着科学技术的不断进步,卫星、雷达等遥感手段以及数字图像监测技术的涌现则对不同尺度的海冰运动研究提供了更为有力的支持。尝试分析海冰运动研究的进一步发展方向和重点如下:

(1)目前海冰运动研究的区域主要集中于极地,尤其是针对北极海冰的研究,而对部分只存在季节性海冰的地区研究工作相对较少,主要集中在波罗的海等海域,对如中国渤海、日本海、北海等人类经济活动频繁的海域研究有待加强;

(2)未来,结合现场和遥感观测开发具有更长时间、空间分辨率的海冰运动数值模式是研究的新方向。目前,现有的几种主要海冰运动研究方法有

表3 海冰运动研究方法对比

研究方法	运用领域	优点	缺点	主流技术
数值模拟	大、中、小尺度研究区域	时间、经济成本较低,适合各种尺度	基础数据要求高,需配合现场观测	SPH、PIC、FVCOM
浮标观测	多年冰覆盖区	数据精度高,时间连续性强	投放成本高,折损率高,受场地限制,空间覆盖率低	海冰钻孔
卫星遥感	极区或较大范围区域	覆盖范围大,适合整个极区或大尺度区域研究	时间分辨率较差,图像分辨率较低,易受云层遮挡	最大协相关方法(MCC)
雷达图像监测	岸基海冰	连续性采集能力强,安装成本较低,监测范围较大、精度高	受雨、雪、雾等天气要素影响较大	特征点匹配
数字图像监测	冰区工程点	单点高分辨率	观测覆盖范围小,受光照条件限制	实时海冰运动追踪

机结合,能使各种方法优势互补。如浮标获取的海冰运动实测数据提高了卫星、雷达等遥感手段对海冰运动信息的解译精度,促进了数值模式算法的优化。与此同时,卫星、雷达遥感手段以及数值模式等又弥补了浮标观测的区域局限性;

(3)在海冰运动数值模拟方面,以往研究大多针对大尺度海冰运动,而对小尺度海冰运动的研究较少。由于海冰具有灾害性,有可能对沿岸的港口、电厂以及海上平台和船舶造成危害,因此,对各类海洋工程小尺度的海冰运动研究,对于防灾减灾具有重要意义。此外,近年来在渤海海冰资源利用及海冰淡化研究中,也需了解不同海区的海冰运动特征,这对合理评估海冰资源的流动补充性至关重要。加强小尺度海冰数值模拟研究可为海冰防灾减灾和海冰资源产业化应用提供重要参考;

(4)随着海洋观测技术的发展,海冰运动观测数据数量将更加庞大,类型也将更加丰富,数据也具有很强的区域分布特性。将近年来蓬勃发展的数据理念应用到海冰运动观测数据共享平台中,可更好地组织管理庞大的数据信息,应用多源海冰资料的融合分析,发展海冰资料同化技术,更大程度地挖掘海冰运动数据的分布性、多源性和多样性等潜在价值。同时海冰运动研究涉及学科多,单一研究团队很难在海冰运动研究各领域均处于领先地位,因此可通过建立海冰运动研究合作平台,相互借鉴,取长补短,构建一支高效、稳定的海冰运动研究技术队伍。此外,加强国际合作,以科学目标为前提,集成观测,形成综合性观测体系。如建立浮标观测共享机制,将各国家独立浮标数据上传至国际共享平台,大大提高数据使用效率和价值;

(5)经过五十多年发展,世界上部分发达国家已建立起较为完善的海冰运动立体观测体系,如美国将多源卫星、海岸自动观测网及基于NOAA的浮标观测整合起来形成海洋动力环境监测网。我国海洋科学研究起步较晚,与发达国家相比仍有差距。虽然目前我国卫星遥感、雷达监测及数值模拟等技术发展较好,然而海上固定式长期海洋综合观测平台构建、固定浮标及ARGO浮标等应用较少,导致海冰现场观测资料较为匮乏。未来我国需对海上观测平台、浮标观测等进行更多资金和技术的支持,构建并完善海冰运动长期、连续、实时的立体

观测体系;

(6)以新的科学目标和科学任务为指引,使用新仪器设备观测,并对经典的海冰运动研究仪器设备整体性能进行革新,提高适用范围、观测区间、观测精度、观测寿命等指标。如小尺度的区域海冰运动监测系统可引入近几年来发展迅速的无人机探测技术,结合数字图像监测技术将其运用到海冰运动研究。另外,GPS结合小型定位跟踪器技术对于监测流冰的短时运动状况也十分有效。就提高适用范围而言,对渤海、日本海等一年生海冰区,研发出具有良好浮载性能和适应能力的海冰浮标为提升区域适用性的技术关键。在气候变暖背景下,北极目前所放置海冰浮标的位置在将来可能面临夏季无冰的情况,如何应对这种情况值得研究。此外,目前海冰浮标的电池寿命多为两到三年,技术的革新将为更长时间尺度的连续观测提供可能。

参考文献:

- [1] 孙劭, 苏洁, 史培军. 2010年渤海海冰灾害特征分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 87-93.
- [2] Peterson C H, Rice S D, Short J W, et al. Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill[J]. Science, 2003, 302 (5653): 2082-2086.
- [3] 孙鹤泉, 李春花, 张志刚. 基于遥感图像分析的极区海冰漂移研究[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(1): 10-14.
- [4] Gu W, Liu C Y, Yuan S, et al. Spatial distribution characteristics of sea-ice-hazard risk in Bohai, China[J]. Annals of Glaciology, 2013, 54(62): 73-79.
- [5] Smith L C, Stephenson S R. New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(13): E1191-E1195.
- [6] Li L T, Gu W, Liu C Y, et al. Suitability of locations in the Bohai Sea, China, for the exploitation of sea ice as a freshwater resource [J]. Annals of Glaciology, 2013, 54(62): 267-272.
- [7] Felzenbaum A I. The theory of steady drift of ice and the calculation of the long period mean drift in the central part of the Arctic Basin[J]. Problemy Severa, 1958, 2: 16-46.
- [8] Hibler W D. A dynamic thermodynamic sea ice model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1979, 9(4): 815-846.
- [9] Flato G M. A particle-in-cell sea-ice model[J]. Atmosphere-Ocean, 1993, 31(3): 339-358.
- [10] Gutfraind R, Savage S B. Smoothed particle hydrodynamics for the simulation of broken-ice fields: Mohr-Coulomb-type rheology

- and frictional boundary conditions[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 134(2): 203-215.
- [11] Shen H H, Hibler W D, Leppäranta M. On applying granular flow theory to a deforming broken ice field[J]. *Acta Mechanica*, 1986, 63(1): 143-160.
- [12] 季顺迎, 岳前进. 辽东湾区域性漂移海冰的 SPH 数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2001(4): 8-15.
- [13] 季顺迎, 岳前进, 赵凯. 渤海海冰动力学的质点网格法数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(6): 748-760.
- [14] 王建峰. 辽东湾冬季流冰漂移预报的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [15] 苏洁, 吴辉碇, Knuth M A, 等. 渤海海冰和海洋的动力相互作用模拟试验[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(S2): 292-298.
- [16] 米丽丽. 渤海海冰动力过程的改进离散单元方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [17] Inoue J, Kikuchi T. Effect of summertime wind conditions on lateral and bottom melting in the central Arctic[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 44(1): 37-41.
- [18] Richter-Menge J A, Perovich D K, Elder B C, et al. Ice mass-balance buoys: a tool for measuring and attributing changes in the thickness of the Arctic sea-ice cover[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 44(1): 205-210.
- [19] King J C. Validation of ECMWF sea level pressure analyses over the Bellingshausen Sea, Antarctica[J]. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(3): 536-540.
- [20] Lukovich J V, Babb D G, Barber D G. On the scaling laws derived from ice beacon trajectories in the southern Beaufort Sea during the International Polar Year-Circumpolar Flaw Lead study, 2007-2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C11): C00G07.
- [21] Kikuchi T, Inoue J, Langevin D. Argo-type profiling float observations under the Arctic multiyear ice[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(9): 1675-1686.
- [22] Timmermans M L, Toole J, Krishfield R, et al. Ice-Tethered Profiler observations of the double-diffusive staircase in the Canada Basin thermocline[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C1): C00A02.
- [23] Rigor I G, Wallace J M, Colony R L. Response of sea ice to the Arctic oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(18): 2648-2663.
- [24] 李娜, 刘骥平, 张占海, 等. 海水物质平衡浮标对北冰洋中心区海冰温度与物质平衡的观测[J]. *海洋学报*, 2011, 33(2): 20-26.
- [25] Schwegmann S, Haas C, Fowler C, et al. A comparison of satellite-derived sea-ice motion with drifting-buoy data in the Weddell Sea, Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 103-110.
- [26] 邓娟, 柯长青, 雷瑞波, 等. 2009 年春夏季北极海冰运动及其变化监测[J]. *极地研究*, 2013, 25(1): 96-104.
- [27] Sumata H, Kwok R, Gerdes R, et al. Uncertainty of Arctic summer ice drift assessed by high-resolution SAR data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(8): 5285-5301.
- [28] Barth A, Canter M, Van Schaeybroeck B, et al. Assimilation of sea surface temperature, sea ice concentration and sea ice drift in a model of the Southern Ocean[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 93: 22-39.
- [29] Lavergne T, Eastwood S, Teffah Z, et al. Sea ice motion from low-resolution satellite sensors: An alternative method and its validation in the Arctic[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C10): C10032.
- [30] Liu A K, Zhao Y H, Wu S Y. Arctic sea ice drift from wavelet analysis of NSCAT and special sensor microwave imager data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C5): 11529-11538.
- [31] Ninnis R M, Emery W J, Collins M J. Automated extraction of pack ice motion from advanced very high resolution radiometer imagery[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, 91(C9): 10725-10734.
- [32] 吴龙涛, 吴辉碇, 李万彪, 等. 渤海冰漂移对海面风场、潮流场的响应[J]. *海洋学报*, 2005, 27(5): 15-21.
- [33] 黄润恒, 王强, 金振刚. 模板匹配法在遥感海冰位移上的应用[J]. *海洋学报*, 1993, 15(1): 119-124.
- [34] Yu J, Liu A K, Yang Y, et al. Analysis of sea ice motion and deformation using AMSR-E data from 2005 to 2007[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(12): 4127-4141.
- [35] Mahoney A, Eicken H, Shapiro L. How fast is landfast sea ice? A study of the attachment and detachment of nearshore ice at Barrow, Alaska[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 47(3): 233-255.
- [36] Fleet D, Weiss Y. Optical flow estimation[M]//Paragios N, Chen Y M, Faugeras O, eds. *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*. US: Springer, 2006: 237-257.
- [37] Hagen R A, Peters M F, Liang R T, et al. Measuring Arctic sea ice motion in real time with photogrammetry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(11): 1956-1960.
- [38] 孙鹤泉, 孙延维, 王平让. 基于雷达海冰图像互相关的冰漂流场测量[J]. *海洋学报*, 2003, 25(4): 135-141.
- [39] 赵宝刚, 郝江凌, 邵秘华. 基于 ECDIS 的雷达遥测海冰监控系统[J]. *中国造船*, 2008, 49(2): 107-112.
- [40] Karvonen J. Tracking the motion of recognizable sea-ice objects from coastal radar image sequences[J]. *Annals of Glaciology*, 2013, 54(62): 41-49.
- [41] 季顺迎, 陈晓东, 刘煜, 等. 基于油气平台的海冰雷达监测图像处理及冰速测量[J]. *海洋学报*, 2013, 35(3): 119-127.
- [42] 王宇新, 刘彦飞, 郭禾, 等. 海冰观测中的图像匹配方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(35): 245-248.
- [43] Leisti H, Riska K, Heiler I, et al. A method for observing compression in sea ice fields using IceCam[J]. *Cold Regions*

Science and Technology, 2009, 59(1): 65-77.

工大学, 2014.

[44] 张项. 基于图像处理的海冰识别与追踪方法[D]. 大连: 大连理

Review on sea ice motion

YAN Yu^{1,2,3,4}, SHAO Dong-dong⁵, XU Ying-jun^{1,2,3,4}, GU Wei^{1,2,3,4}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875 China;

2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875 China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875 China; 4. Coastal Zone and Sea Ice Research Center, Beijing Normal University, Beijing 100875 China; 5. State Key Laboratory of Water Environment Simulation & School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875 China)

Abstract: This paper provides a review on sea ice motion. The development of sea ice motion is first outlined. The historical development and state-of-the-art of the numerical simulation, buoy observation, satellite remote sensing, radar observation and digital image processing technology related to sea ice motion research are concluded. The trends and future directions of sea ice motion research are further discussed in terms of technological development and practical application. The development of sea ice motion models with higher temporal and spatial resolution using in-situ and remote sensing observation will be the focus in future.

Key words: sea ice motion; numerical simulation; buoy observation; satellite remote sensing; radar observation; digital image processing technology