舰船结冰预报方法研究

刘永禄，董韦敬
（海军大连舰艇学院 军事海洋系，辽宁 大连 116023）

摘要：目的 为在可能导致舰船结冰的海区航行的舰船提供结冰预报模型，保证船舶的航行安全。**方法** 基于结冰表面热平衡理论，给出舰船结冰预报模型和预报工具。**结果** 给出中等舰船结冰危险等级，结冰强度小于 1.5 t/h 为弱结冰风险等级，1.5～4.0 t/h 时为中等结冰风险等级，大于 4.0 t/h 为强结冰风险等级。**结论** 提出的结冰预报方法和工具简便易行，对于保障舰船在高纬海区的安全航行具有重大意义。

关键词： 船舶结冰；结冰预报；航行安全
DOI： 10.7643/ issn.1672-9242.2016.03.023
中图分类号： TJ04 **文献标识码：** A
文章编号： 1672-9242(2016)03-0140-07

Forecast Methods for Ship Icing

LIU Yong-lu, DONG Wei-jing
(Department of Military Oceanography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

ABSTRACT: Objective To propose ship icing forecast tools for supporting ship navigation safety on the high latitude sea area, in order to ensure navigation safety of ships. **Methods** The ship icing forecast model and forecast tool were given based on icing surface thermal equilibrium theory. **Results** The ship icing risk rank was provided. The risk level was low when the icing strength was less than 1.5 ton/hour. The risk level was medium when the icing strength was between 1.5 ton/hour and 4.0 ton/hour. The risk level was high when the icing strength was larger than 4.0 ton/hour. **Conclusion** The proposed ship icing forecast method and tool are easy to operate, and have significance for the navigation safety of ships in the high-latitude sea area.
KEY WORDS: ship icing; icing forecast; navigation safety

21 世纪以来，海洋经济逐渐发展成为中国国民经济的重要组成部分，海洋在社会经济发展中的地位和作用日益突出。这不仅表现在中低纬度海域，高纬海域的经济与战略地位和作用也越来越凸显。在高纬度海域，当大风和空气温度较低时，舰船经常会出现严重结冰的现象。如果舰船的甲板和船舷、上层建筑和武器装备、桅杆和索具都结了冰，则会导致火炮失效、机器运转失灵、无线电通信中断，同时舰船的负荷、排水量增加，结冰提高了重力中心，增大了受风面积，导致船在风暴时可能失去稳定性，突然翻倒甚至沉没[1—2]。我国舰船要到高纬度海区航行，势必会遇到船舶结冰的问题。为了保障舰船的航行安全，应该尽早开展对于舰船结冰的研究工作，为的舰船做好结冰预报。特别是以后随着冰层消退，北极航道开通，如果那时候还不能做好相应的预报工作，那将是重大的战略失误，将会极大地限制我国的经济发展，影响战略部署[3—4]。目前我国在舰船结冰预报领域的

收稿日期： 2016-01-16；**修订日期：** 2016-04-21
Received：2016-01-16；Revised：2016-04-21
作者简介： 刘永禄（1972—），男，内蒙古包头人，博士，副教授，主要研究方向为军事气象。
Biography：LIU Yong-lu (1972—), Male, from Baotou, Inner Mongolia, Ph.D., Associate professor, Research focus: military meteorology.

研究较少，还没有能够实际应用的结冰预报方法。

文中通过分析普通结冰和船舶结冰原理，确定影响舰船结冰的气象条件，建立了气象条件对舰船结冰影响的数学模型。通过舰船结冰数值计算模型，给出舰船结冰预报图。利用舰船结冰预报图，只要获得海区天气资料，就可以做出相应海区的结冰预报，提供舰船结冰预警信息，从而有效保障舰船在高纬度海域活动时的航行安全。

1　舰船结冰的机理和计算

舰船结冰的机理很复杂而且研究很少，有两种主要的舰船结冰形式：喷射型和淡水型[5]。喷射型结冰是由强风和海浪引起的弦外海水向船内喷射和注入造成的。淡水型的结冰是由过冷的沉淀物如雨水、毛毛雨、潮湿的雪以及雾或海中蒸发的水汽落到船上而形成的。实际中两种形式的结冰往往同时发生[6]。

理论研究表明，结冰强度（冰生长的速度）与水文气象条件和船的结构特性有关。目前有几种计算船结冰的方法。其中一种计算船结冰方法的基础是结冰表面的热平衡理论，在朝向喷射水流的 1 cm^2 的表面上的结冰强度可按式（1）计算[7]；

$$J=\alpha(t_{л}-t_{x}+2.6\frac{L_{исп}}{P}(E_{t_a}-E_{t_л}))/$$
$$(L_{замлл}C\ (t_a-t\ )+C_w(t\ -t_x)) \tag{1}$$

式中：α 为散热系数，与风速和结冰表面的形状有关；$L_{зам}$，$L_{исп}$ 为冰的结晶热和蒸发热；$C_{л}$，C_w 为冰的单位热容量和水的单位热容量；t_a 为空气温度；t_x 为在淡水或喷射型云雾中水粒的温度；E_{t_a}，$E_{t_л}$ 分别为水表面上空气温度为 t_a 时的分压力和冰上结冰表面温度 $t_{л}$ 时的分压力；P 为气压；$t_{л}$ 为在稳定的结冰过程中，冰生长时的温度。

式（1）对喷射型和淡水型的结冰强度计算都是适用的。对于计算喷射型舰船结冰，其基础是：在舰船实际结冰强度与结冰的综合理论特征之间的经验关系。这些理论特征是：规则形状的物体如圆柱棒的结冰速度就是船舶在同样水文气象条件下的结冰速度[8]。结冰标准 N（棒的结冰速度）按式（2）计算：

$$N=\frac{\frac{W\lambda_a}{\nu}\frac{N_u}{R_e}(t_{\varphi a}-t_{\varphi a})+C_w[(t_a-t\ )-(t\ -t\ )\exp(-\frac{3x}{C_w\rho_w r_k}\frac{\lambda_a}{\nu}\frac{N_{uk}}{R_{ek}})]}{\rho_{л}L}\times$$
$$\frac{W\xi hE(1-a)+\frac{W\lambda_a}{\nu}\frac{N_u}{R_e}\frac{L_u}{C_a}\frac{\mu}{M}\frac{e_n-e_a}{P}}{-aC_w\rho_{\varphi a}[(t\ -t\ )-(t\ -t\ )\exp(-\frac{3x}{C_w\rho_w r_k}\frac{\lambda_a}{\nu}\frac{N_{uk}}{R_{ek}})]} \tag{2}$$

式中：t_a，t_w 分别为空气和海水的温度；W 为风速；h 为浪高；ξ 为比例系数，在方程式中表示喷射云和浪高含水量之间的关系；ρ_w，$\rho_{л}$ 分别为海水和冰的密度；R_e，R_{ek} 为对水柱（圆柱）和水滴的 Рейнольдс（列依诺尔斯）数；t_{φ} 为结冰锋面上的温度；N_u，N_{uk} 为对冰柱和水滴的 Нуссельт（努射尔特）数；ν 为海水的运动黏度；λ_a 为空气的热导率；e_a，e_n 为在空气和凝皮（薄膜）表面上的局部压力；L_u 为水蒸发的热量；μ，M 分别为蒸汽的和空气的分子量；C_w，C_a 为水和空气的单位热容量；P 为气压；L 为水结冰的热量；E 为结冰物体（冰柱）占据水量的系数；a 为喷射带来的、溢去水带去的热量的系数；x 为水滴飞到船舶表面的特征距离；r_k 为水滴的平均半径。在计算结冰强度标准 N 时，取 E=1，α=0.7，r_k=0.5 mm，x=10 m。

为了预报结冰，采用两标准 N 之间的相关关系，一是仅按造成结冰的水文气象参数计算的标准 N，另一个是在海上同样水文气象条件下实际舰船的结冰强度 $N_{\varphi p}$。在建立这些关系时，使用了国内外从 1961 年到 1972 年的数据和资料[9—10]。对于小型（2000 t 以下）船只，这种关系的方程为：

$$N_{\varphi p}=0.54+0.68N\quad(\ R=0.85\pm0.03\ ) \tag{3}$$

式中：R 为相关系数。

对于中型（2000 ~ 6000 t）船只，回归方程为：

$$N_{\varphi p}=0.46+0.56N\quad(\ R=0.91\pm0.02\ ) \tag{4}$$

对于大型（6000 t 以上）船只：

$$N_{\varphi p}=0.22+0.43N\quad(\ R=0.82\pm0.04\ ) \tag{5}$$

从方程可见，在同样水文气象条件下，排水量越少的船只结冰越慢。

2 舰船结冰的预报

2.1 水文气象条件

通过上述舰船结冰的计算公式，可以看出，舰船结冰有关的水文气象条件有冰的结晶热和蒸发热、冰的单位热容量和水的单位热容量、空气温度、在淡水或喷射型云雾中水粒的温度、气压、海水温度、风速、浪高、海水和冰的密度、结冰锋面上的温度、海水的运动黏度、空气的热导率等。

另外有一种公认的观点认为，在北半球最适于舰船结冰的条件与冷空气入侵有关，通常冷空气携带着雨和雪。在北风、西北风和西风条件下，以上情况一般发生在气旋的后部。在东北风和东风条件下，船结冰有时也出现在气旋前部。风吹的方向，大多数情况下与预报区域的位置有关[11—12]。例如，在西伯利亚和加拿大东岸，冷空气经常从西北向吹来，在格陵兰海和丹麦海峡主要是东北风，而在挪威海，巴伦支海和波罗的海，风从东甚至从东南吹来。在不同海域不同风向情况下，船结冰重复率的数据见表 1。

表 1 在不同风向条件下船舶结冰的重复率

Table 1 The repetition rate of ship icing in different wind directions %

海名	风向				事件数
	271° ~ 360°	1° ~ 90°	91° ~ 180°	181° ~ 270°	
白令海	53	41	1	5	733
鄂霍茨克	50	20	5	25	623
日本海	82	12	-	7	250
太平洋的西北部	68	8	2	22	84
巴伦支海、挪威海	19	29	30	22	953
波罗的海	20	38	32	10	108
黑海、亚速海	55	45	-	-	11
拉布拉多尔斯克	69	4	38	24	87

气旋的后部是船最危险的结冰区域，这个区域距离冷锋有一定的距离。自 1967 至 1970 年的综合数据见表 2，可以看出，在除了波罗的海、巴伦支海和挪威海之外的所有海域，大多数结冰情况发生在气旋后部。在波罗的海、巴伦支海和挪威海，最大舰船结冰重复率发生在气旋前部[13—14]。

表 2 在不同天气条件下船舶结冰的重复率

Table 2 The repetition rate of ship icing under different weather conditions %

海洋名称	在气旋后部	在气旋前部	在其他条件下	事件数
白令海	57	32	11	442
鄂霍茨克	70	23	7	312
日本海	93	3	4	140
太平洋的西北部	75	19	6	182
巴伦支海、挪威海	40	50	10	596
波罗的海	5	66	30	44
黑海、亚速海	79	16	5	18

综上所述，对影响船舶结冰的气象条件有了笼统的认识，但是不能看出其主要因素，目前科学家们根据实际测量的数据，总结出了影响舰船结冰的主要气象条件就是风速、海水温度、海水盐度、空气温度，而这之中最主要的便是风速和空气温度[15]。

2.2 数值模型

通过对舰船结冰的深入研究，得出结冰气象条件后，由舰船结冰的气象条件，得知影响舰船结冰的主要气象条件是海区的风速和空气气温。因此可以针对海区的风速和空气温度这两个要素建立数值模型，并通过数值模型来进行舰船结冰的预报。通过查阅文献，可以得到风速和空气温度对舰船结冰的影响数据拟合，如图 1 所示。

图 1 中，曲线 1、曲线 2、曲线 3 分别对应弱结冰、中等结冰、强结冰情况，计算出所对应的函

数为：y_1= -38.975 $x^{-1.085}$；y_2= -83.699 $x^{-1.101}$；y_3= -158.5 $x^{-1.103}$。所拟合的三条曲线与数据点较为接近，用拟合函数的拟合优度检验方法，计算出相应的相关指数分为：$R_1^2=1-\dfrac{\sum(Y-Y_2)^2}{\sum(Y-Y_1)^2}=0.9813$；$R_2^2=1-\dfrac{\sum(Y-Y_2)^2}{\sum(Y-Y_1)^2}=0.9725$；$R_3^2=1-\dfrac{\sum(Y-Y_2)^2}{\sum(Y-Y_1)^2}=0.9986$，由此可见，拟合的效果较理想。

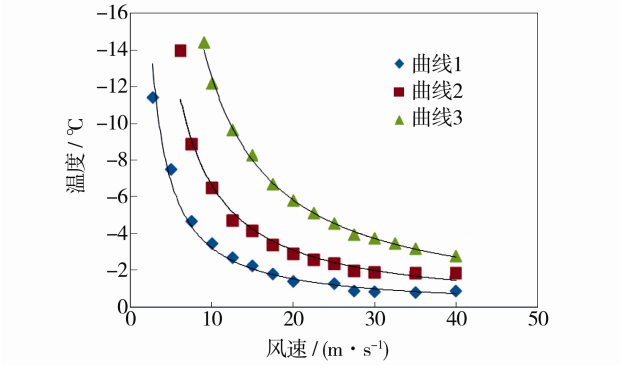

图 1　风速和空气温度拟合曲线

Fig.1　Fitting curves of wind speed and air temperature

曲线 1 下面区域的点为不结冰区，舰船可以在该区安全航行。曲线 1 和曲线 2 之间区域的点为弱结冰区域，舰船在该海区的航行危险性较小。曲线 2 和曲线 3 之间区域的点为中等结冰区域，舰船在该海区的航行比较危险。曲线 3 之上区域的点为强结冰区域，舰船在该海区的航行危险系数大。

在风速和空气温度数值给定的情况下，容易计算出舰船是弱结冰、中等结冰和强结冰。具体操作如下：将已知的风速和空气温度表示为坐标形式（a，b）；将横坐标值分别代入三条曲线，得到三个曲线纵坐标值，对应曲线 1、曲线 2、曲线 3 分别为 b_1，b_2，b_3；将 b 值与 b_1；b_2；b_3 比较，若 $b>b_1$，则为不结冰，若 $b_1>b>b_2$，则为弱结冰，依此类推，则可得出船舶在该海域航行时结冰的强弱。

2.3　模型运算举例

已知某海区某时刻风速和空气温度分别为 30 m/s 和-3 ℃，求舰船航行在该海区的结冰强弱。

对于上述问题，首先将风速和空气温度表述为坐标形式，可表示为（30，-3），将横坐标数值 30 分别代入：y_1= -38.975 $x^{-1.085}$；y_2= -83.699 $x^{-1.101}$；y_3= -158.5 $x^{-1.103}$，得出 y_1=-0.972 993；y_2=-1.978 836；y_3=-3.721898，则此刻该船舶航行在该海区的结冰强度为中等结冰。

2.4　舰船结冰的预报过程

舰船结冰的预报分两个阶段编制，在第一阶段，对预报区域的天气资料进行全面的分析，并确定是否存在易于出现结冰的水文气象条件，即空气温度是否低于 0 ℃，低多少，风速怎样，是否将要下雨，是雨、雾或潮湿的雪，出现平流云的概率怎样等。这便要首先进行充分准确的天气预报，进行了充分的天气预报之后，便得到相应海区的各项天气信息，最主要的就是风速和温度的信息，之后对预报员提出了第二个更复杂的问题。他应回答结冰强度将如何的问题，是弱、中等或是强结冰，而这又与船舶的类型和尺寸，它的速度和相对于风和浪的速度以及航向有关。对于具体的预报，提供两种预报方法。

1）概略预报。根据风速和温度对于结冰影响的图像，只要知道所在海区的风速和温度，便可以计算出舰船结冰的等级，划分为弱结冰，中等结冰，强结冰等 3 个等级。因此此种方法预报步骤为：通过天气预报方法，得出未来该海区的风速和空气温度信息；带入风速和温度计算模式，确定出在该条件下舰船结冰危险等级；发布结冰预报。

2）精确预报。当知道根据空气和水的温度、风速、浪高和海水的盐度后，根据计算公式可以给出船舶结冰图，如图 2 所示。

在图 2 中，第一象限中的曲线表示在水温、盐度和浪高一定时，标准 N 与风速和空气温度之间的关系；在第二象限，确定对没有基站水温数据的修正值，每条曲线对应着一定的水温；在第三象限，计算实际浪高的影响，每条曲线对应着一定的浪高；在第四象限，斜线船型近似为中等舰船（在 2000 ~ 6000 t 之间），反映 N_φ 和 N 之间关系的曲线，在这个象限中，考虑没有基站海水盐度的影响，每条曲线对应着一定的盐度。

舰船结冰图的使用方法如下：在第一象限，从相应于风速的点沿 y 轴负向引垂线与空气温度的曲线相交，相交之后，再从这一交点沿 x 轴负向引平行线到第二象限，与海水温度的曲线相交，从这个交点引垂线至第三象限，与浪高曲线相交。进而，从所得交点引平行线到第四象限与类似中等舰船的回归方程线相交，再从这一点沿 y 轴负向引垂线

与海水盐度曲线相交，然后从这个交点沿 x 轴正向引平行线与垂直坐标相交，在其上可读取到冰的最大强度值。

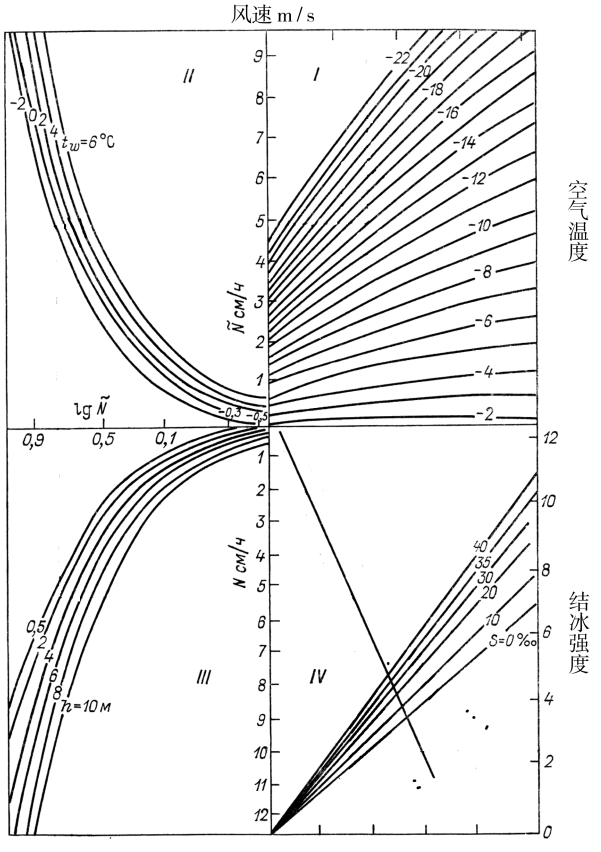

图 2　舰船结冰图

Fig.2　Ship icing figure

得到结冰强度值之后，可以由 2.1 中风速气温与结冰危险的对应关系，得到舰船的结冰危险等级，再在舰船结冰图中利用相同的风速气温得到结冰强度，这样就得到结冰危险等级与结冰强度关系。中等舰船结冰危险等级与结冰强度的关系：弱结冰<1.5 t/h；中等结冰 1.5 ~ 4.0 t/h；强结冰>4.0 t/h。

在画图求解的过程之中，会存在介于两条曲线之间的数值。这时需要根据插值法进行绘图，并且在绘图的过程中，注意绘图的准确性，最大限度地减小误差，确保船舶结冰预报的准确性。

根据船舶结冰图就可以预报船只的结冰强度，以中等舰船为例，具体预报过程如下：通过天气预报方法，得出预报海区未来的风速、空气温度、浪高的预报信息；因为每个海域的水温与盐度变化很小，因此可以通过查阅历史资料，得出所在海区预报时间的海水温度和盐度；通过舰船结冰预报图进行结冰强度预报。

2.5　预报船舶结冰强度的举例

根据精确预报步骤，对海参崴附近海域 2013 年 1 月 8 号的舰船结冰情况进行预报。

通过天气预报方法，得出预报海区未来的风速、空气温度、浪高的预报信息。由 2013 年 1 月 7 号的 FXFE782 图可以预报出海参崴附近海域 A 点 2013 年 1 月 8 号 0800 的风速和空气温度，可以看出 A 点的图上温度为-18 ℃。因为该图的气压条件为 850 hPa，所以海表空气温度应该为-9 ℃。同时也可预报出该点风速为 20 节，即 10 m/s。

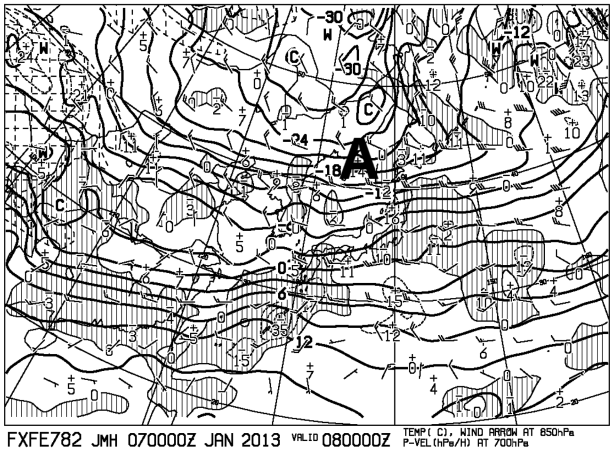

图 3　850 hPa 风和空气温度预报

Fig.3　850 hPa Wind and temperature forecast chart

由 2013 年 1 月 7 号的 FWPN782 图，可以预报出 A 点 2013 年 1 月 8 号 0800 的风浪<2 m/s，因为风速较大（10 m/s），则浪高应预报为 2 m。通过查阅《日本海水文图集》，可预报出 A 点的空气温度 t_α=-9 ℃，风速为 10 m/s，水温 t_w=3 ℃，盐度 s=3.4%，浪高 h=2 m，如图 4 所示。

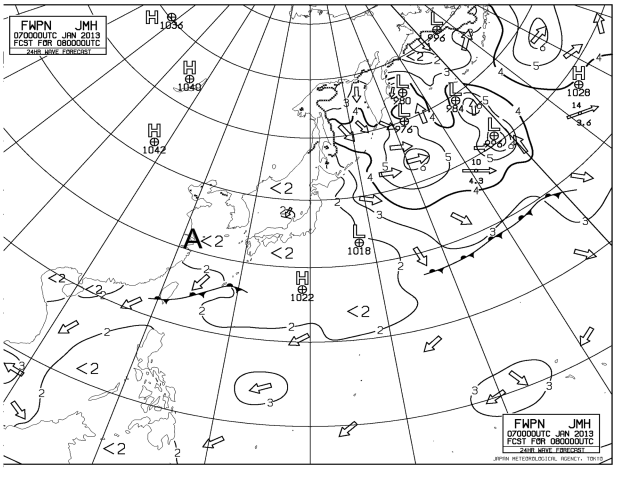

图 4　海浪预报

Fig.4　Wave forecast chart

海参崴海域 2013 年 1 月 8 日结冰预报如图 5 所示，第一象限，从相应于 10 m/s 风速的点沿 y 轴负向引垂直线到与空气温度为-9 ℃的曲线相交，再从这一交点沿 x 轴负向引平行线到第二象限，与海水温度为 3 ℃的曲线相交。因为图 5 中没有 3 ℃的曲线，所以需要在 2 ~ 4 ℃曲线之间进行内插，量取两线之间的间距，在其平均位置进行绘图，然后从这个交点引垂线至第三象限，与浪高为 3 m 的曲线相交。同温度曲线一样，3 m/s 曲线也需内插得到。进而，从所得交点沿 x 轴引平行线到第四象限与中等舰船的回归方程线相交，再从这一点沿 y 轴负向引垂线与海水盐度为 3.4%的曲线相交，然后从这个交点沿 x 轴正向引平行线与垂直坐标相交，在其上可读取到结冰的最大强度值，为 1.25 t/h。由此可得知这种情况下船舶属于弱结冰，危险系数较小。

知道上述结果后，便可发布结冰预报：结冰强度为 1.25 t/h，危险等级为弱结冰。

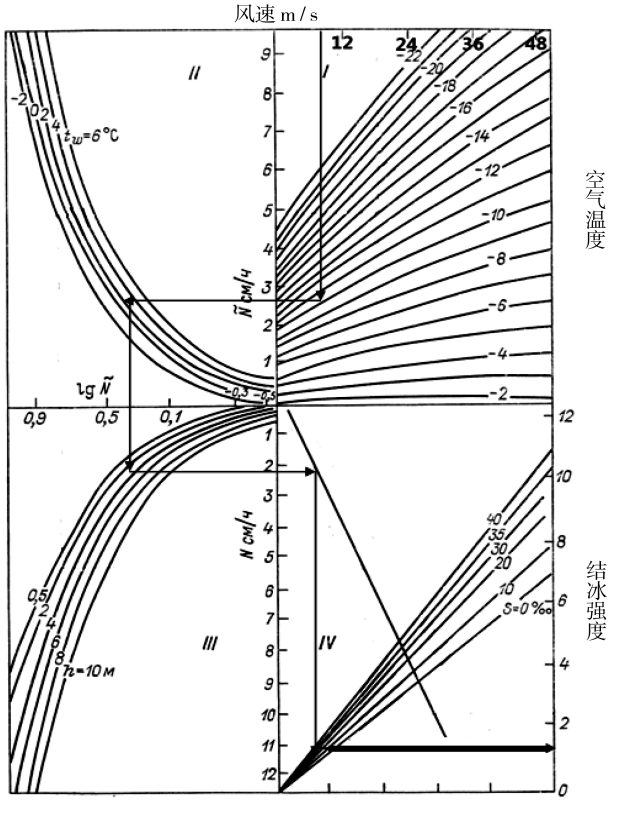

图 5　海参崴海域 2013 年 1 月 8 日结冰预报

Fig.5　Ship icing forecast in Vladivostok sea area on January 8, 2013.

3　结语

通过对于结冰条件、结冰原理、以及天气预报过程和方法进行深入的研究与分析，认为舰船结冰主要与所在海区的风速、空气温度、海水盐度和海水温度有关，同时这其中最主要的因素是风速和空气温度。在得出影响条件的基础上，提出了预报舰船结冰的具体方法，并对 2013 年 1 月 8 日海参崴海域舰船结冰情况进行了实例预报，说明这种预报方法在实际应用中是可行的。

该预报方法通过对舰船结冰条件作了客观、量化的分析计算，可弥补通常分析中凭借个人经验判断的不足，该方法对舰船在易结冰海域航行的结冰情况有重要应用价值。由于目前世界各国对于舰船结冰的预报较少，只能得出预报结冰的气象条件，并根据相应的气象条件进行分析，而没有考虑船型、船体结构等的影响。同时因为资料的限制，无法对预报结果进行验证，只能根据理论进行预报。这些也是现在进行舰船结冰预报的局限性。

由于资料限制，对舰船结冰预报的研究很少，这就要求在以后对各种船型在易结冰海区航行的气象条件、航行情况等进行统计与积累，建立相应的数据库。只有建立了数据库，才能对舰船结冰进行深入研究与验证，舰船结冰预报的科学性和准确性才能得到保障。

参考文献：

[1]　骆有通, 刘松年. 预防舰船结冰及处置方法[J]. 航海, 1984(2): 15—18.
LUO You-tong, LIU Song-nian. A Method of Preventing the Icing and Handling of Ships[J]. Navigation, 1984(2): 15—18.

[2]　刘松年. 舰船结冰的处置方法[J]. 西北工业大学学报, 2007(4): 79—87.
LIU Song-nian. The Method of Handling the Icing of Ships[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007(4): 79—87.

[3]　曲凯阳, 江亿. 各种因素对过冷水发生结冰的影响[J]. 太阳能学报, 2003, 24(6): 814—821.
QU Kai-yang, JIANG Yi. The Effects of Various Factors on the Freezing of Cold Water[J]. Solar Energy Journal, 2003, 24(6): 814—821.

[4]　张大林, 杨曦, 昂海松. 过冷水滴撞击结冰表面的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2003(1): 56—60.
ZHANG Da-lin, YANG Xi, ANG Hai-song. Supercooled Water Droplets Impact Icing Surface Numerical Simulation[J]. Journal of Aerospace Power, 2003(1): 56—60.

[5]　张萍, 闻建伟. 气温与结冰过程的分析和计算[J]. 黑龙江水利科技, 2005(1): 32—37.
ZHANG Ping, WEN Jian-wei. Analysis and Calculation

of Temperature and Freezing Process[J]. Heilongjiang Water Conservancy Science and Technology, 2005(1): 32—37.

[6] 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(6): 1—3.
SUN Shao, SU Jie, SHI Pei-jun. Bohai 2010 Analysis of Sea Ice Disaster Characteristics[J]. Journal of Natural Disasters, 2011(6): 1—3.

[7] 孔玉寿, 章东华. 现代天气预报技术[M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2005.
KONG Yu-hou, ZHANG Dong-ua. Modern Weather Prediction Technology[M]. Second Edition. Beijing: China Meteorological Press, 2005.

[8] 丁本忠. 胶州湾近七十年的海水结冰分析[J]. 海岸工程, 1983(1): 15—18.
DING Ben-zhong. Analysis of Sea Ice in the Jiaozhou Bay in Recent Seventy Years[J]. Coastal Engineering, 1983(1): 15—18.

[9] 侍茂崇, 高郭平, 鲍献文. 海洋调查方法导论[M]. 青岛:中国海洋大学出版社. 2008: 120—123.
SI Mao-cong, GAO Guo-ping, BAO Xian-wen. Marine Survey[M].Qingdao: Ocean University of China. 2008: 120—123.

[10] 刘钦圣. 最小二乘问题计算方法[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1989.
LIU Qin-sheng. Calculation Method of the Least Square Problem[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1989.

[11] 陈光, 任志良, 孙海柱. 最小二乘曲线拟合及 Matlab 实现[J].软件技术, 2005, 24(3): 107—108.
CHEN Guang, REN Zhi-liang, SUN Hai-zhu. Least Square Curve Fitting and Matlab Implementation[J]. Software Technology, 2005, 24(3): 107—108.

[12] 杨蓉, 张杰. 结冰探测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2010(增刊): 199—203.
YANG Rong, ZHANG Jie. The Icing Detection Technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010(s): 199—203.

[13] 周强, 阳初春. EESS 应用于舱面舱盖除冰的可行性分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2006(6): 3—4.
ZHOU Qiang, YANG Chu-chun. EESS Application on Deck Hatch Cover Except Ice Feasibility Analysis[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006(6): 3—4.

[14] 李辉, 袁晓燕. 抗结冰涂层: 从表面化学到功能化表面[J]. 化学进展, 2012(11): 18—21.
LI Hui, YUAN Xiao-yan. Anti Icing Coating: From the Surface Chemistry to the Functional Surface[J]. Chemical Progress, 2012(11): 18—21.

[15] 吴卫平, 张翔. 除冰方法综合分析[J]. 气象科学, 2009(6): 47—55.
WU Wei-ping, ZHANG Xiang. Comprehensive Analysis of the Method of Deicing[J]. Meteorological Science, 2009(6): 47—55.