

基于卫星观测的辽东湾冰情统计分析*

郭东琳^{1, 2, 3} 赵 鹏^{2, 3①} 王 彬^{2, 3} 李亚汝^{2, 3} 崔凤娟⁴

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院 青岛 266100; 2. 国家海洋局北海预报中心 青岛 266061; 3. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室 青岛 266061; 4. 国家海洋局北海信息中心 青岛 266061)

摘要 根据渤海 6 个海洋站的海冰监测及气温观测数据统计, 终冰日及冰期可用来表征当年渤海冰情严重程度, 在大多数年份冰情与终冰日早晚和冰期长短呈负相关。根据 2006/2016 年的辽东湾海冰面积及外缘线资料, 分析了 11 年间辽东湾冰情的年变化特征, 分析结果显示, 辽东湾海冰受局地气温影响明显, 两者呈较显著的负相关关系。分析结果发现, 辽东湾海冰年际变化除受局地气候的影响外, 还受太平洋副热带高压(简称副高)、极涡、东亚槽和欧亚环流等气候因子的共同调控, 其中受太平洋副高北界位置指数、极涡面积指数、东亚槽强度指数、欧亚纬向环流指数影响最为显著, 可作为辽东湾海冰预测的重要因子, 此外北极海冰密集度也可以为预测当年冬季辽东湾每月冰情提供依据。

关键词 辽东湾; 冰情; 局地气温; 气候因子; 北极海冰

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyh20180300065

我国北方的渤海和黄海北部, 由于冬季受寒潮影响, 每年都有不同程度的结冰现象, 冰期约 3 个多月(当年 12 月至后一年 3 月), 海洋学中常以冰期、冰厚、结冰范围等要素来定义冰情, 其中辽东湾海区冰情最为严重, 冰情最严重的年份整个辽东湾都为海冰所覆盖。海冰灾害的出现与恶劣的自然环境和人类活动有关, 海冰冰情等级和工业活动的频繁程度同海冰灾害发生率成正比, 人类重视程度同海冰灾害发生率成反比(李志军, 2010)。目前, 对渤海海冰的变化特征、形成原因和预测方法已经进行开展研究。如, 刘煜等(2013)认为渤海冬季冰情变化是与北大西洋涛动、北极涛动甚至南方涛动有密切关系, 郑冬梅等(2015)认为秋季副热带高压(简称副高)、冬季东亚和亚洲纬向环流对渤海冰情的年际变化均有重要影响, 可作为渤海海冰预报的指示因子。Gong 等(2010)发现北极涛动与渤海冰情严重程度在过去的一百年间有显著的相关性, Zhang 等(2016)利用非线性最小二乘

法得到了累积冻冰温度、累积融冰温度、风速、风向与海冰面积的经验公式。唐茂宁等(2015)利用回归分析得到渤海冰情等级与西伯利亚高压、西太平洋副高之间的统计关系, 回归结果能够反映渤海冰情年际变化。然而, 大气环流因子与冬季我国渤海海冰之间的物理机制目前尚不完全清楚, 渤海海冰的短期气候预测仍有待深入探讨。除此之外, 由于实测数据缺乏, 研究对象多为整个渤海区每年一次的冰级数据以及各种数值模式结果, 前者时间以及空间代表性不够强, 且只能反映出冰情的年际变化; 后者在渤海区由于受温盐初始场及气象强迫场分辨率的限制, 仍存在较大误差, 只能作为大致参考。本文根据以上实际状况, 结合国家海洋局北海预报中心每日海冰业务化遥感监测结果及海洋站每日观测结果, 进一步探讨了辽东湾海冰日变化情况以及其与局地气温、影响东亚气候的重要因子以及北极海冰密集度间的相互关系。

*山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金项目, 201503 号; 海洋公益性行业专项经费资助项目, 201505018-5 号。郭东琳, 工程师, E-mail: guodonglin@bhj.gov.cn

通信作者: 赵 鹏, 高级工程师, E-mail: zhaopeng@bhj.gov.cn

收稿日期: 2018-03-26, 收修改稿日期: 2018-04-28

1 资料来源

本文使用的气象观测资料取自国家海洋局北海预报中心海洋站实测数据,其中日平均气温选取葫芦岛、鲅鱼圈两个海洋站,初冰日、终冰日数据取自鲅鱼圈、秦皇岛、葫芦岛、塘沽、温坨子、芷锚湾和东港海洋站,74项大气环流指数来自中国气象局国家气候中心,2005/2006—2015/2016 每日海冰面积与最大外缘线数据资料应用国家海洋局北海预报中心提供的可见光(MODIS、hj-1a/1b)及 SAR 业务化遥感监测结果,海平面气压数据均来自于美国国家环境预报中心(NCEP)2.5°×2.5°网格的月平均再分析资料,北极海冰密集度数据来自英国气象局 Hadley 中心的观测数据集。

2 海洋站历年冰情分析

根据鲅鱼圈、秦皇岛、葫芦岛、温坨子、芷锚湾、

东港和塘沽七个海洋站的海冰监测及气温观测数据,统计出了 1995—2016 年各海洋站初冰日、终冰日、冰期以及 12 月至 1 月平均气温距平(见表 1、表 2)。表中初冰日早于平均日期、终冰日晚于平均日期、冰期长于平均冰期、气温高于平均气温时为正直,相反为负值,其中塘沽海洋站部分年份缺测。各海洋站位置如图 1 所示,塘沽海洋站位于渤海湾,东港海洋站位于北黄海,其余 5 个海洋站均位于辽东湾。

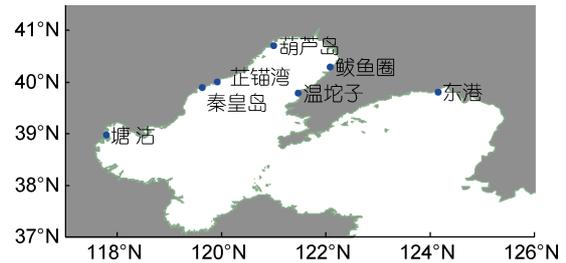


图 1 各海洋站位置

Fig.1 Position of Marine Stations in the northern Bohai Sea

表 1 鲅鱼圈、秦皇岛、葫芦岛、塘沽海洋站初冰日、终冰日、冰期和冬季(12—1月)平均气温距平

Tab.1 The anomalies of the initial ice day, final ice day, icing duration, and temperature of Bayuquan, Qinhuangdao, Huludao, and Tanggu Stations

海洋站	鲅鱼圈				秦皇岛				葫芦岛				塘沽			
	初冰日	终冰日	冰期	气温	初冰日	终冰日	冰期	气温	初冰日	终冰日	冰期	气温	初冰日	终冰日	冰期	气温
1995/1996	10	4	14	-0.17	-9	8	-1	-0.41	17	15	33.5	0.38	12	7	24	-0.84
1996/1997	-3	-2	-6	0.17	-3	-2	-5	0.02	20	0	21.5	0.67	13	-9	9	-0.29
1997/1998	13	-4	8	0.65	13	-10	3	0.28	10	-2	9.5	1.17	14	-2	17	0
1998/1999	19	-9	9	1.59	13	0	13	1.32	19	-3	-9.5	2.25	-	-	-	1.24
1999/2000	-3	2	-1	-2.21	-2	2	0	-1.81	0	1	2.5	-1.89	17	3	25	-1.05
2000/2001	2	8	9	-2.71	4	12	16	-2.14	-4	12	9.5	-2.82	-	-	-	-0.99
2001/2002	3	-17	-15	1.07	1	-21	-23	1.35	2	-1	3.5	1.75	19	-24	0	1.76
2002/2003	7	6	12	-0.82	7	13	20	-0.01	11	0	12.5	-0.59	-1	-24	-20	-1.47
2003/2004	6	-16	-10	1.41	8	-10	-2	1.01	3	-8	-3.5	1.27	-	-	-	0.73
2004/2005	-6	12	5	-1.12	-6	7	-4	-0.33	-2	2	1.5	-1.06	-	-	-	-0.67
2005/2006	7	2	8	-0.75	4	11	15	-0.89	9	3	13.5	-1.14	-	-	-	-0.49
2006/2007	-3	-15	-19	3.07	-3	-17	-20	2.26	-7	-19	-25	2.55	-	-	-	2.09
2007/2008	5	3	8	0.91	-15	5	-10	0.89	-23	1	-21	0.71	-19	1	-13	1.41
2008/2009	-6	-1	0	1.77	-7	7	0	1.07	-14	0	-13	1.39	-7	-10	-12	1.03
2009/2010	5	15	19	-0.41	12	7	19	-0.72	-5	4	0.5	-1.82	1	2	8	-1.73
2010/2011	-2	-6	-9	-0.62	0	-4	-4	-0.61	6	4	11.5	-1.25	-5	2	2	-1.02
2011/2012	-6	12	6	-1.74	-17	6	-11	-1.05	-5	4	0.5	-2.42	-26	4	-17	-0.76
2012/2013	-1	5	3	-2.46	6	4	10	-2.07	3	13	17.5	-2.14	1	-1	5	-1.86
2013/2014	-26	-4	-31	1.26	-4	0	-4	0.96	-19	0	-19	1.16	-	-	-	1.27
2014/2015	-7	-4	-12	1.03	-23	-9	-32	1.21	-16	-17	-32	1.58	-	-	-	1.34
2015/2016	-13	10	-3	0.15	18	7	25	-0.27	-14	1	-13	0.32	-21	-8	-24	0.37

表 2 温坨子、芷锚湾、东港海洋站初冰日、终冰日、冰期和冬季(12—1月)平均气温距平

Tab.2 The anomalies of the initial ice day, final ice day, icing duration and temperature of Wentuozhi, Zhimaowan, Donggang Stations

海洋站	温坨子				芷锚湾				东港			
	年份	初冰日	终冰日	冰期	气温	初冰日	终冰日	冰期	气温	初冰日	终冰日	冰期
1995/1996	-	-	-	-	10	14	24	-0.6	-	-	-	-
1996/1997	-11	-10	-21	0.34	6	-8	-2	-0.48	-	-	-	-
1997/1998	21	6	27	0.72	6	-15	-9	1.01	10	-9	0	-
1998/1999	21	-19	2	2.16	6	-7	-1	2.04	9	-5	3	-
1999/2000	1	13	15	-1.31	12	6	19	-1.08	15	7	22	-
2000/2001	-3	7	4	-1.93	-4	10	6	-1.42	19	8	26	-
2001/2002	3	-14	-11	1.42	-3	-7	-10	2.07	3	-2	0	-
2002/2003	11	18	29	-0.83	0	-7	-7	0.22	13	-9	3	0.24
2003/2004	15	-10	6	1.06	-5	10	5	1.52	-4	-13	-17	0.84
2004/2005	-1	12	11	-1.18	-13	8	-5	0.39	-11	15	13	-0.47
2005/2006	3	10	13	-1.25	2	4	-2	-0.17	1	10	20	-0.43
2006/2007	-19	-28	-48	2.31	6	-8	-2	2.98	6	-17	-12	1.49
2007/2008	-13	0	-12	0.28	-10	1	-9	0.78	-18	0	-18	0.61
2008/2009	0	-3	-3	1.02	3	2	5	-0.11	5	-5	-1	1.48
2009/2010	3	20	23	-1.71	17	13	30	-2.07	-5	8	2	-0.83
2010/2011	7	4	11	-1.06	-6	-1	-7	-0.9	-1	5	3	-1.22
2011/2012	-7	15	9	-1.29	7	3	10	-2.23	-2	10	8	-1.53
2012/2013	3	-1	2	-1.92	4	7	11	-2.68	2	2	3	-2.11
2013/2014	-17	-7	-23	1.59	-12	-4	-16	0.28	-18	-1	-20	1.31
2014/2015	-17	-13	-30	1.34	-24	-17	-41	0.95	-3	-11	-15	0.21
2015/2016	-	-	-	0.21	-	-	-	-0.46	-18	1	-17	0.44

图 2 为气温距平与初冰日、终冰日、冰期距平散点图。结果显示, 初冰日早晚与局地气温相关性不明显(在四个象限均匀分布), 初冰日多与秋末冬初首次寒潮发生时间有关, 寒潮到来时气温迅速降低, 海表面形成少量初生冰, 厚度较小密度偏低, 随寒潮过后气温回升冰情消失, 待下一次强冷空气到来时再次形成大量浮冰, 且随着温度持续降低海冰范围持续增长; 在大多数年间终冰日早晚和冰期长短与局地气温呈负相关(多数分布在二、四象限), 即局地气温越低, 终冰日越晚, 冰期越长, 因此终冰日及冰期可用来表征当年渤海冰情严重程度。

3 数据统计分析

3.1 辽东湾遥感海冰资料分析

如图 3 所示, 在 2006—2016 年 11 年间, 除 2007/2008 年冬季辽东湾初冰日出现在 12 月下旬以外, 其余年间均出现在 11 月末和 12 月初。其中 2015/2016 年冬受强冷空气影响初冰日出现最早, 在 11 月 24 日; 终冰日普遍出现在 3 月中旬及上旬, 其中 2005/2006

年冬季终冰日出现的最晚, 在 3 月 19 日, 2006/2007 年终冰日出现的最早, 在 2 月 16 日; 每年海冰面积最大日除 2009/2010 年较早, 出现在 1 月 12 日, 其余均出现在 1 月下旬和 2 月上旬, 2005/2006、2011/2012、2012/2013 年海冰最大面积日均为 2 月 8 日。11 年间海冰面积最大值出现在 2012/2013 年冬季, 因该年 1 月和 2 月渤海沿岸整体气温较常年偏低, 2006/2007 年海冰面积最大值为 11 年中最小, 不足 8500m²; 其中 2009/2010 年冬季辽东湾冰期最长, 为 111 天, 2007/2008 年冬季冰期最短, 仅为 66 天, 其中冰期超过 90 天的年份有 6 年, 分别为 2005/2006、2008/2009、2009/2010、2011/2012、2012/2013、2015/2016 年。结合以上分析, 2006—2016 年这 11 年间, 冰情最严重的为 2009/2010 年冬季, 因该年冬季冷空气活动频繁且影响范围广、持续时间长、极端天气事件多, 北方部分地区最低气温突破历史最低纪录(郭可彩等, 2011), 冰情最轻的年份为 2007/2008 年, 因该年 1 月和 2 月全国平均气温较常年同期偏高, 其中华北等地偏高 2℃ 以上, 东北大部偏高 4℃ 以上。

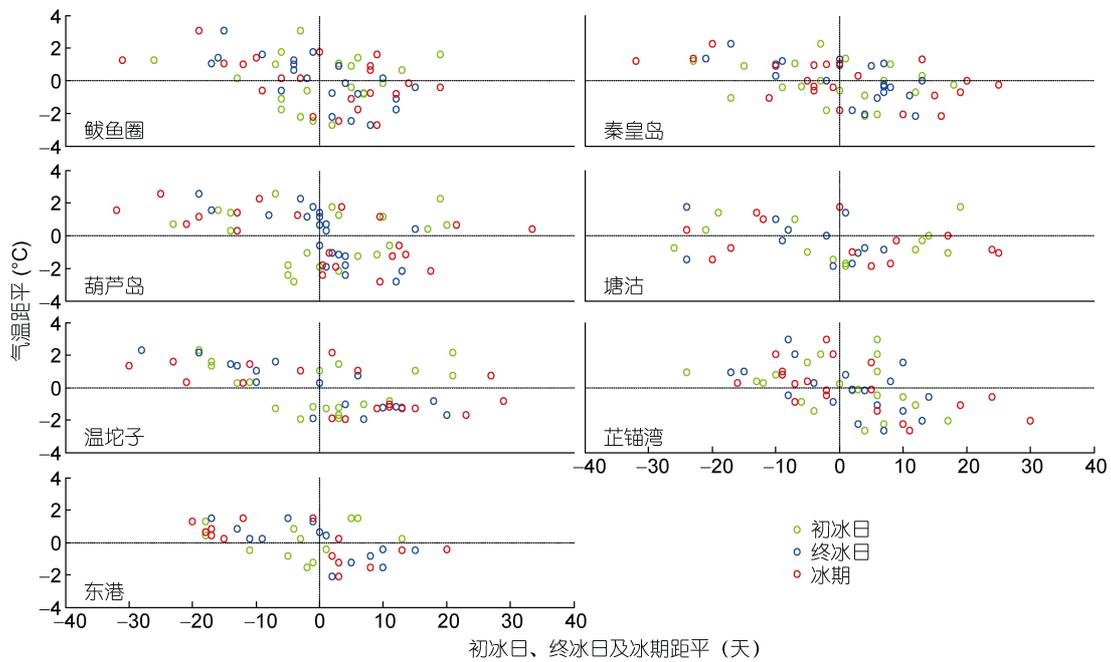


图2 初冰日、终冰日、冰期距平与气温距平分布图

Fig.2 The distribution of the Initial ice day, Final ice day, Icing duration and temperature anomaly

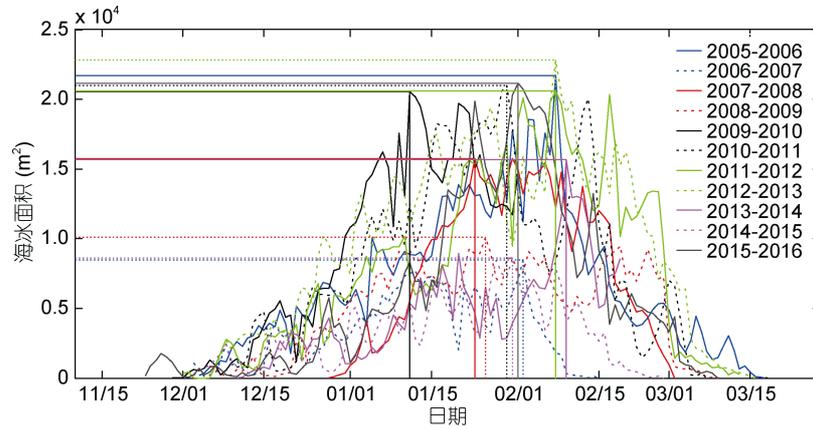


图3 2006—2016年冬季辽东湾海冰面积日变化

Fig.3 Diurnal variation of sea ice area in the Liaodong Bay from 2006 to 2016

3.2 局地气温与冰情统计关系

选取葫芦岛海洋站和鲅鱼圈海洋站的气温表征辽东湾局地气温变化。用海冰面积及海冰外缘线距离来表征辽东湾海冰冰情。对海冰面积与时滞局地气温作相关性分析，表3和表4分别给出了海冰面积与葫芦岛、鲅鱼圈两海洋站时滞局地气温的相关系数，计算方法如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_{i+d} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_{i+d} - \bar{y})^2}}, (d = 0, 1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

式中， x 为局地气温， y 为辽东湾海冰面积， d 为滞后天数。结果显示辽东湾每日海冰面积与两个海洋站气温呈负相关，且在滞后一天时最显著，相关系数最大值分别超过-0.68和-0.64，皆在2010/2011年份相关性最显著，可能因为该年份辽东湾地区冷空气次数较少，气温变化幅度较为稳定。

将辽东湾每日海冰外缘线距离与葫芦岛、鲅鱼圈两海洋站日平均气温做时滞相关分析，表5和表6分别给出了外缘线距离与葫芦岛、鲅鱼圈海洋站日平均气温的时滞相关系数，(2010/2011年数据缺失)显示海冰外缘线距离与两个海洋站气温呈负相关，且在滞

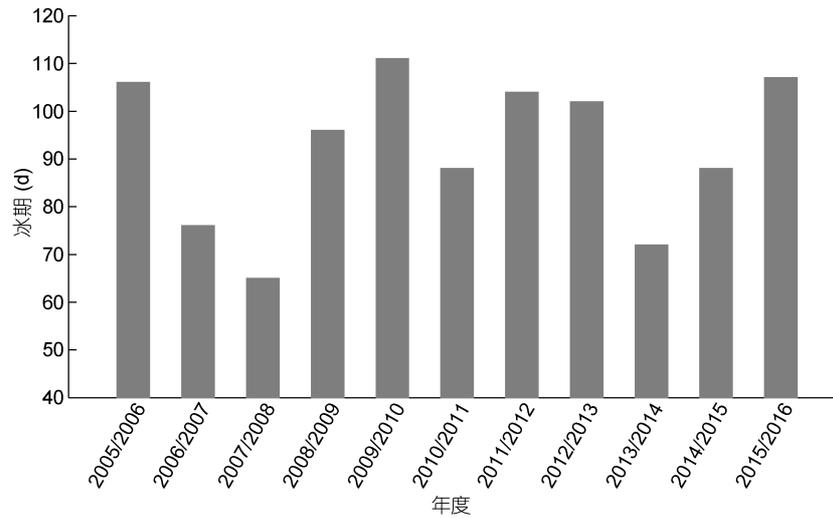


图 4 2006—2016 年辽东湾冰期

Fig.4 Duration of sea ice in the Liaodong Bay from 2006 to 2016

表 3 辽东湾每日海冰面积与葫芦岛海洋站日平均气温时滞相关系数

Tab.3 Cross-correlation coefficient between sea ice area in Liaodong Bay and daily temperature in Huludao Station

年份	滞后 0 天	滞后 1 天	滞后 2 天	滞后 3 天	滞后 4 天	滞后 5 天
2005—2006	-0.45	-0.47	-0.41	-0.39	-0.38	-0.36
2006—2007	-0.50	-0.57	-0.53	-0.49	-0.45	-0.45
2007—2008	-0.58	-0.57	-0.49	-0.44	-0.42	-0.42
2008—2009	-0.37	-0.42	-0.41	-0.38	-0.32	-0.28
2009—2010	-0.58	-0.59	-0.57	-0.55	-0.56	-0.57
2010—2011	-0.64	-0.68	-0.65	-0.57	-0.48	-0.42
2011—2012	-0.62	-0.63	-0.60	-0.57	-0.54	-0.54
2012—2013	-0.42	-0.44	-0.40	-0.39	-0.38	-0.36
2013—2014	-0.50	-0.51	-0.47	-0.38	-0.39	-0.38
2014—2015	-0.33	-0.34	-0.16	-0.18	-0.26	-0.23
2015—2016	-0.54	-0.62	-0.61	-0.59	-0.56	-0.55

表 4 辽东湾每日海冰面积与鲅鱼圈海洋站日平均气温时滞相关系数

Tab.4 Cross-correlation coefficient between sea ice area in Liaodong Bay and daily temperature in Bayuquan Station

年份	滞后 0 天	滞后 1 天	滞后 2 天	滞后 3 天	滞后 4 天	滞后 5 天
2005—2006	-0.39	-0.42	-0.39	-0.34	-0.34	-0.34
2006—2007	-0.45	-0.52	-0.49	-0.45	-0.40	-0.40
2007—2008	-0.51	-0.53	-0.49	-0.46	-0.45	-0.46
2008—2009	-0.37	-0.40	-0.40	-0.36	-0.30	-0.26
2009—2010	-0.42	-0.43	-0.41	-0.39	-0.39	-0.41
2010—2011	-0.56	-0.64	-0.63	-0.56	-0.48	-0.40
2011—2012	-0.46	-0.48	-0.46	-0.42	-0.38	-0.37
2012—2013	-0.37	-0.41	-0.36	-0.34	-0.33	-0.30
2013—2014	-0.24	-0.30	-0.26	-0.16	-0.15	-0.15
2014—2015	-0.43	-0.45	-0.27	-0.26	-0.28	-0.24
2015—2016	-0.49	-0.56	-0.56	-0.52	-0.48	-0.47

表 5 辽东湾每日海冰外缘线距离与葫芦岛海洋站日平均气温时滞相关系数

Tab.5 Cross-correlation coefficient between ice bounding line in Liaodong Bay and daily temperature in Huludao Station

年份	滞后 0 天	滞后 1 天	滞后 2 天	滞后 3 天	滞后 4 天	滞后 5 天
2005—2006	-0.36	-0.37	-0.30	-0.26	-0.25	-0.22
2006—2007	-0.67	-0.73	-0.57	-0.41	-0.25	-0.19
2007—2008	-0.61	-0.61	-0.53	-0.46	-0.44	-0.43
2008—2009	-0.43	-0.50	-0.45	-0.36	-0.25	-0.17
2009—2010	-0.60	-0.59	-0.53	-0.51	-0.54	-0.53
2010—2011	-	-	-	-	-	-
2011—2012	-0.56	-0.57	-0.47	-0.41	-0.39	-0.36
2012—2013	-0.10	-0.13	-0.12	-0.11	-0.11	-0.09
2013—2014	-0.59	-0.61	-0.51	-0.39	-0.41	-0.36
2014—2015	-0.51	-0.54	-0.27	-0.19	-0.23	-0.21

表 6 辽东湾每日海冰外缘线距离与鲅鱼圈海洋站日平均气温时滞相关系数

Tab.6 Cross-correlation coefficient between ice bounding line in Liaodong Bay and daily temperature in Bayuquan Station

年份	滞后 0 天	滞后 1 天	滞后 2 天	滞后 3 天	滞后 4 天	滞后 5 天
2005—2006	-0.30	-0.33	-0.27	-0.22	-0.22	-0.21
2006—2007	-0.63	-0.77	-0.60	-0.34	-0.17	-0.11
2007—2008	-0.57	-0.59	-0.53	-0.48	-0.46	-0.48
2008—2009	-0.37	-0.42	-0.37	-0.29	-0.23	-0.14
2009—2010	-0.44	-0.44	-0.37	-0.35	-0.41	-0.42
2010—2011	-	-	-	-	-	-
2011—2012	-0.41	-0.46	-0.37	-0.30	-0.29	-0.26
2012—2013	-0.10	-0.14	-0.10	-0.08	-0.05	-0.03
2013—2014	-0.37	-0.42	-0.33	-0.18	-0.19	-0.16
2014—2015	-0.50	-0.55	-0.29	-0.18	-0.21	-0.17

后一天时最显著, 相关系数最大值分别超过-0.73 和 -0.77, 皆在 2006/2007 年份相关性最显著; 在 2012—2013 年两者几乎没有相关性, 可能因为该年份辽东湾初冰期和融冰期海冰发展和融化较迅速。

3.3 海冰面积(月最大)与气候因子关系

表 7 中给出海冰面积与各环流因子的滞后相关分析结果, 相关系数置信度超过 98%是显著的。太平洋高压对我国气候有重要的影响, 其中副高的面积、强度、脊线以及北边界都是关键指标(符淙斌等, 1980)。采用西太平洋及北太平洋副热带高压的这些指数, 统计分析它们与辽东湾冰情的关系。

结果表明, 西北太平洋副高对渤海天气系统的影响较为显著。其范围、强度、脊线以及北边界对渤海冰情具有重要影响。超前 16 个月的北太平洋副高面积指数与月最大海冰面积呈最大负相关; 超前 2 个月的西太平洋副高强度呈最大负相关; 超前 6 个月的副高脊线位置指数呈最大正相关; 超前 6、7 个月左右的副高北界位置指数与月最大海冰面积呈最大正相关。这意味着前期副热带高压的面积越大, 强度越

强, 副热带高压中心越往北, 当年冬季的渤海冰情偏轻; 反之亦然。

极涡指数常用于表示高纬冷空气动向。一般说来, 当该指数为负值且绝对值大时称为“冷空气积蓄期”, 当其为正值且绝对值大时, 称为“冷空气暴发期”(荒井康等, 1983)。本文采用北半球、亚洲和太平洋极涡的面积和强度研究它们与辽东湾冰情的相关性。结果表明, 极涡指数与辽东湾月最大海冰面积之间有良好的正相关性; 对于北半球极涡、亚洲区极涡和太平洋区极涡指数, 超前 15 月时相关系数最大, 超前 3 个月和 9 个月次之。即极涡越强, 辽东湾气候越冷, 海冰面积越大。

西太平洋暖池是热带太平洋海表面温度场的主要模态(李克让等, 1998), 其变化制约亚洲、太平洋区域甚至全球气候变化和某些重大自然灾害的形成与变化。结果显示, 西太平洋暖池指数与辽东湾月最大海冰面积之间的相关性较为显著, 正负相关的置信度皆超过 98%。西太平洋暖池面积指数超前 21 个月时呈最大正相关, 超前 0 个月时呈最大负相关。

东亚大槽是东亚地区对流层中层的重要环流系统, 冬季东亚大槽强度变化对华中和东北地区冬季平均气温有较大影响, 东亚大槽典型强(弱)年, 华中和东北地区冬季平均气温偏高(低)(黄小梅等, 2013)。结果显示, 东亚槽强度指数与辽东湾月最大海冰面积之间的相关性较为显著, 正负相关的置信度皆超过 98%。东亚槽强度指数超前 1 个月时呈最大负相关, 即东亚大槽偏弱时渤海冰清加重; 而东亚槽位置指数与海冰面积之间相关性不明显。

西太平洋遥相关型与西太平洋地区的气候有密切联系。结果显示, 太平洋遥相关型指数与辽东湾月最大海冰面积之间存在一定的相关性, 超前 5 个月时相关系数最大, 其中西太遥相关型指数与海冰面积与相关性为正, 北太遥相关型指数与海冰面积与相关性为负。

大气环流是制约局地气候特别是东亚气候的基本因子, 已有研究表明华北冬季偏冷期中、高纬纬向环流减弱, 经向环流明显增强, 暖期情况正好相反(申红艳等, 2010)。结果显示, 纬向环流指数与辽东湾月最大海冰面积之间的相关性较为显著, 正负相关

的置信度皆超过 98%。纬向环流指数超前 1 个月时相关系数最大, 相关性为负; 而经向环流指数与海冰面积之间相关性较弱。欧亚纬向环流减弱, 经向环流明显增强时, 极涡区的冷空气南下, 影响至渤海使得渤海冰清加重。

冬季北极涛动可以影响到西伯利亚高压, 从而影响到东亚冬季风, 进而影响到我国冬季气温。此外北大西洋涛动异常变化也与我国冬、夏季气候有一定关系。结果显示, 北极涛动与辽东湾月最大海冰面积之间有较好的相关性, 北极涛动指数超前 1 个月时呈最大负相关; 北大西洋涛动指数与南方涛动指数与海冰面积相关性不明显, 相关系数皆小于 0.40; 此外超前 9—10 个月左右的 Nino 3.4 指数与海冰最大面积呈最大正相关, 相关系数为 0.47。

综上所述可以得出, 辽东湾海冰冰情受太平洋副高、极涡、东亚槽和欧亚环流等气候因子的共同影响, 其中受太平洋副高北界位置指数、极涡面积指数、东亚槽强度指数、欧亚纬向环流指数影响最为显著, 相关系数皆超过 0.70。

表 7 大气环流指数与月(12、1、2 月)海冰最大面积相关系数

Tab.7 Correlation between Atmospheric circulation index (Dec, Jan, and Feb) and monthly maximum sea ice area

气候因子	指数	超前时间(月)	相关系数峰值
副高指数	西太平洋副高面积指数	24,1,8	-0.42,-0.36,0.29
	北太平洋副高面积指数	16,7,15	-0.51,0.46,-0.44
	西太平洋副高强度指数	2,1,19	-0.35,-0.34,0.33
	西太平洋副高脊线位置指数	1,6,20	-0.69,0.67,0.64
	北太平洋副高脊线位置指数	18,1,19	0.66,-0.65,0.65
	西太平洋副高北界位置指数	6,20,19	0.71,0.70,0.69
极涡指数	北太平洋副高北界位置指数	18,19,7	0.71,0.66,0.64
	北半球极涡面积指数	15,9,21	0.77,-0.65,-0.65
	北半球极涡强度指数	15,9,3	0.75,-0.64,0.63
	亚洲区极涡面积指数	15,16,21	0.65,0.62,-0.59
	亚洲区极涡强度指数	15,9,21	0.72,-0.70,-0.63
	太平洋区极涡面积指数	15,16,3	0.66,0.65,0.59
暖池指数	太平洋区极涡强度指数	15,4,3	0.67,0.60,0.59
	西太平洋暖池面积指数	21,12,13	0.63,-0.62,-0.62
东亚槽指数	西太平洋暖池强度指数	0,1,12	-0.65,-0.57,-0.55
	东亚槽位置指数	1,18,9	0.41,-0.25,0.24
遥相关指数	东亚槽强度指数	1,14,20	-0.70,-0.64,0.63
	西太平洋遥相关型指数	5,3,20	0.50,-0.31, 0.27
环流指数	北太平洋遥相关型指数	5,17,18	-0.52,-0.42,-0.37
	欧亚经向环流指数	15,22,0	0.40,-0.33,0.33
	欧亚纬向环流指数	1,5,17	-0.71,0.62,0.60
	亚洲经向环流指数	22,18,0	-0.34,0.30,0.26
	亚洲纬向环流指数	1,2,17	-0.67,-0.58,0.57

3.4 海冰面积(月最大)和北极海冰的统计关系

近十几年北冰洋海冰厚度的显著减少,是北冰洋增暖的又一个重要现象,对全球气候变化有深远影响(赵进平等, 2003)。已有研究表明秋冬季北极海冰密集度和海表温度异常的综合影响是导致西伯利亚高压和欧亚大陆中高纬度及东亚出现地面温度异常的原因(武炳义等, 2011)。本文对北极海冰月平均密集度与辽东湾冬季月最大海冰面积作时滞相关分析。图 4 给出 2005/2006—2015/2016 每年冬季(12 月、1 月、2 月)辽东湾月最大海冰面积分别与当前月份至此前 5 个月的北极月平均海冰密集度的相关系数分布。结果显示辽东湾冬季冰情与同期的楚科奇海的海冰密集度显著相关(相关系数 >0.70); 与此前 1 个月的楚科奇海及哈得孙湾的海冰密集度显著相关(相关系数

>0.70); 与此前 2 个月的格陵兰海西岸、戴维斯海峡西北部、 120° — 180° W, 70° — 73° N 区域内的海冰密集度显著相关(相关系数 >0.60); 与此前 3 个月的格陵兰海西岸海冰密集度显著相关(相关系数 >0.70); 与此前 5 个月的戴维斯海峡西部及 150° E— 150° W, 70° — 80° N 区域的海冰密集度显著相关(相关系数 <-0.70)。可以推测, 前期北极海冰密集度通过影响冬季西伯利亚高压强度进而影响辽东湾冬季冰情: 之前 1—4 个月的格陵兰海西岸海冰密集度的增加使得冬季西伯利亚高压加强, 进而加重了冬季辽东湾冰情; 之前 5 个月的 150° E— 150° W, 70° — 80° N 区域内海冰密集度的增加使得冬季西伯利亚高压减弱, 进而使冬季辽东湾冰情减弱。因此可以将前期北极海冰密集度作为渤海海冰预报的重要因子。

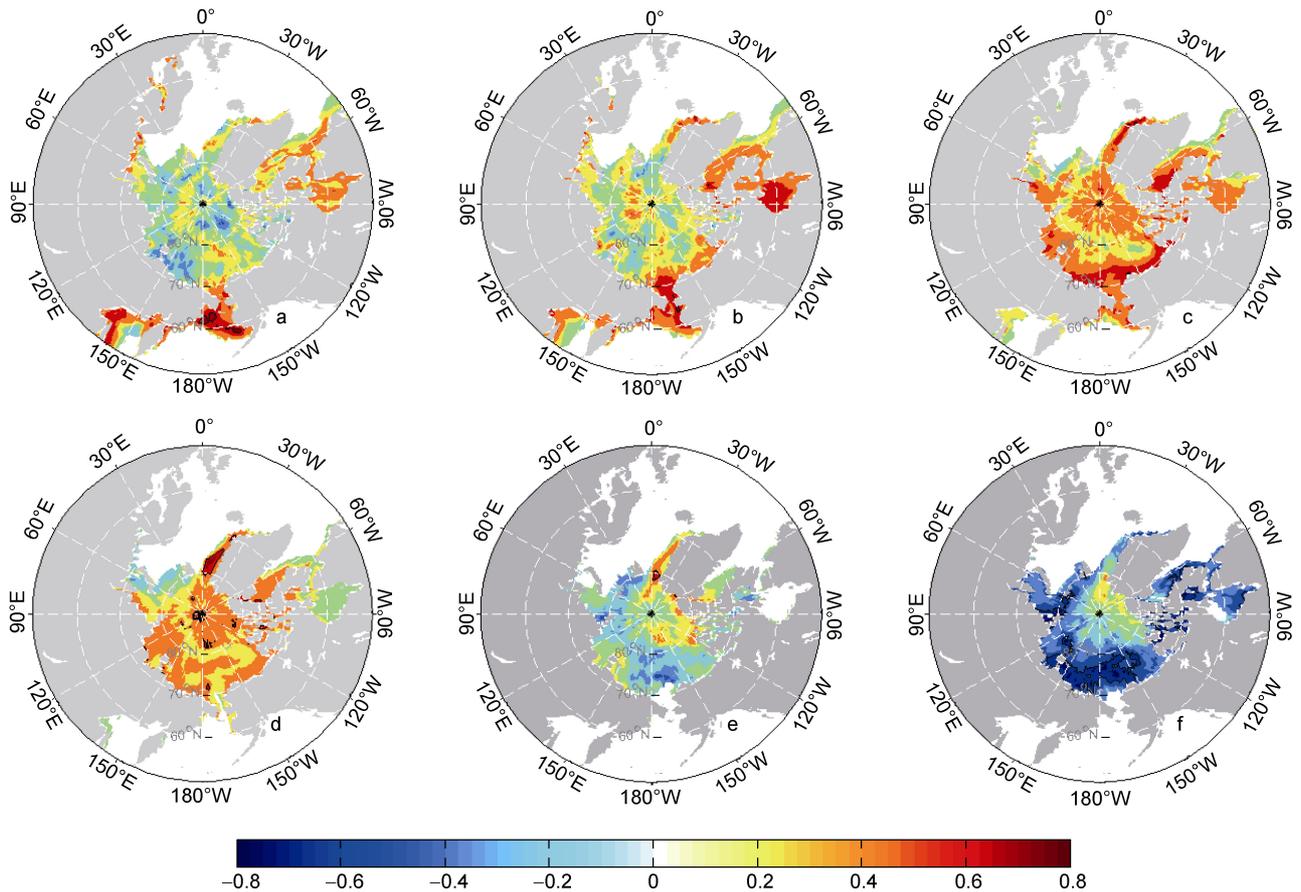


图 5 辽东湾冬季最大海冰面积与当前月(a)及前期 1—5 月(b—f)北极海冰密集度相关系数分布图(通过了置信度为 95% 的显著性检验)

Fig.5 Correlation between monthly maximum sea ice area and Arctic ice concentration (a) current month (b)1 to 5 months ahead (Significant at 95% level)

4 结论

本文在讨论了初冰日、终冰日、冰期与当年冬季气温的关系以及2005—2016年辽东湾冰情日变化及其与局地气温相关性的基础之上,进一步分析了辽东湾月最大海冰面积与影响东亚的重要气候因子以及北极海冰之间的相互关系,并对相关物理过程进行了假设,得到的主要结论有以下几点:

(1) 终冰日及冰期可用来较好地表征当年渤海冰情严重程度,在大多数年间冰情与局地气温呈负相关。

(2) 用辽东湾海冰面积和外缘线距离表征海冰冰情,用鲅鱼圈和葫芦岛海洋站气温表征辽东湾局地气温,辽东湾日海冰冰情与局地气温呈明显负相关,且在滞后一天时最显著。

(3) 辽东湾海冰冰情受太平洋副高、极涡、东亚槽和欧亚环流等气候因子的共同影响,其中受太平洋副高北界位置指数、极涡面积指数、东亚槽强度指数、欧亚纬向环流指数影响最为显著,相关系数皆超过 0.7。当太平洋副高强度较强时渤海冰情加重;而当极涡面积增大、欧亚纬向环流减弱,经向环流明显增强时,极涡区的冷空气南下,影响至渤海使得渤海冰情加重;东亚大槽偏弱,东北地区冬季平均气温偏低,渤海冰情加重。

(4) 前期北极海冰密集度可作为辽东湾海冰预报的重要因子。

参 考 文 献

- 申红艳, 丁裕国, 张 捷, 2010. 华北冬季气温年代际变化及大气环流分析. 气象科学, 30(3): 338—343
- 刘 煜, 刘钦政, 隋俊鹏等, 2013. 渤、黄海冬季海冰对大气环流及气候变化的响应. 海洋学报, 35(3): 18—27
- 李志军, 2010. 渤海海冰灾害和人类活动之间的关系. 海洋预报, 27(1): 8—12
- 李克让, 周春平, 沙万英, 1998. 西太平洋暖池基本特征及其对气候的影响. 地理学报, 53(6): 511—519
- 武炳义, 苏京志, 张人禾, 2011. 秋-冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响. 科学通报, 56(27): 2335—2343
- 郑冬梅, 王志斌, 张书颖等, 2015. 渤海海冰的年际和年代际变化特征与机理. 海洋学报, 37(6): 12—20
- 赵进平, 史久新, 矫玉田, 2003. 夏季北冰洋海冰边缘区海水温盐结构及其形成机理. 海洋与湖沼, 34(4): 375—388
- 荒井康, 高良诚, 1983. 环流指数与极涡指数. 气象科技, (1): 48—51
- 郭可彩, 商 杰, 黎 舸等, 2011. 2009—2010 年冬季渤海及黄海北部冰情分析. 海洋预报, 28(2): 35—40
- 唐茂宁, 洪洁莉, 刘 煜等, 2015. 气候因子对渤海冰情影响的统计分析. 海洋通报, 34(2): 152—157
- 黄小梅, 管兆勇, 戴竹君等, 2013. 冬季东亚大槽强度年际变化及其与中国气候联系的再分析. 气象学报, 71(3): 416—428
- 符淙斌, 王金根, 吴达铭, 1980. 北半球副高带的长期变化(一). 气象, 6(5): 3—5
- Gong D Y, Kim S J, Ho C H, 2010. Arctic Oscillation and ice severity in the Bohai Sea, East Asia. International Journal of Climatology, 27(10): 1287—1302
- Zhang N, Wu Y S, Zhang Q H, 2016. Forecasting the evolution of the sea ice in the Liaodong Bay using meteorological data. Cold Regions Science and Technology, 125: 21—30

SEA ICE IN THE LIAODONG BAY: STATISTICAL ANALYSIS BASED ON SATELLITE OBSERVATIONS

GUO Dong-Lin^{1, 2, 3}, ZHAO Peng^{2, 3}, WANG Bin^{2, 3}, LI Ya-Ru^{2, 3}, CUI Feng-Juan⁴

(1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *North China Sea Marine Forecast Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 3. *Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China*; 4. *North China Sea Data & Information Service of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Abstract Using the monitoring data of sea ice and the observation of air temperature from 2006 to 2016 in six marine stations in the Liaodong Bay along the northern Bohai Sea, the final ice day and the icing duration are used to better characterize the icing severity in the Liaodong Bay, North Bohai Sea. In most years, the final ice day and the icing duration are negatively correlated with the icing severity. Based on the sea ice area and outer edge distance data, the variation of icing severity in the 11 years was analyzed. The results show that the sea ice area in the Liaodong Bay was obviously influenced by the regional temperature, and a significant negative correlation was observed between the two variables. The inter-annual variation of sea ice in the Liaodong Bay is not only affected by regional climate, but also by the Pacific subtropical high, the Polar vortex, the East Asian Trough, Eurasian circulation index, and other climatic factors. The Pacific Subtropical High Northern Boundary Position Index, the Polar Vortex Area Index, the East Asian Trough Intensity Index, and the Eurasian Zonal Circulation Index are the most important influential factors, and these factors can be used as the predictive factors to the sea ice in the Liaodong Bay. In addition, the Arctic sea ice concentration can provide a reference for the prediction of sea ice in the Liaodong Bay.

Key words Liaodong Bay; icing severity; regional temperature; climatic factors; Arctic sea ice