

# 基于海温遥相关的渤海冬季气温与海冰预测方法

焦艳<sup>1,2</sup>, 曹丛华<sup>1,2</sup>, 黎舸<sup>1,2</sup>, 袁本坤<sup>1,2</sup>, 姜雯斐<sup>3</sup>, 于清溪<sup>3</sup>

(1.国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061; 2.山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266061; 3.国家海洋局北海信息中心, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 选取渤海历史冰情和气温资料、全球海温资料, 分析了1971—2015年渤海冬季气温和冰情的变化特征。基于遥相关分析法, 选取影响渤海冬季气温的前期海温关键区, 建立了渤海冬季气温和冰级的预测模型。结果表明: 渤海海气温和冰情具有明显的年际和年代际变化, 二者呈负相关关系; 根据全球海温遥相关型, 冰季前期的夏季海温对渤海冬季气温影响明显, 海温关键区为赤道以北低纬度中东太平洋海域、北太平洋白令海西南海域、西南印度洋和澳大利亚东南沿岸海域。由此建立的预测模型与实际观测值具有较好的一致性。

**关键词:** 渤海; 海冰; 冬季气温; 海温; 遥相关; 多元回归

**中图分类号:** P731.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)01-0019-06

## 1 引言

每年冬季, 我国的渤海和黄海北部都会有不同程度的海水结冰现象<sup>[1]</sup>。作为全球纬度最低的结冰海区之一, 渤海和黄海北部受大气和海洋环境的影响, 冰情具有明显的年际变化。海冰常常给近岸的水产养殖、交通运输和海洋生态环境等造成巨大的经济损失, 冰情严重时, 甚至危及沿岸人民群众的生命财产安全。因此, 在每年冬季海冰生成之前, 对渤、黄海域冰情进行预测, 对于海洋防灾减灾具有十分重要的意义。

我国对渤、黄海水冰的中长期预测已有近40 a历史, 随着对全球大气和海洋及其相互作用认识的不断深入, 海冰的长期预测技术取得了一定的进展。北大西洋涛动、西伯利亚高压、副热带高压和北极海冰密集度等因子被认为是影响渤、黄海水冰冰情的关键要素, 常用于渤、黄海冰情的年度趋势预测<sup>[2-3]</sup>。同时, 海冰的预测预报方法也在不断丰富, 分形分析<sup>[4]</sup>、逐步回归<sup>[5]</sup>、人工神经网络<sup>[6]</sup>等方法越来越多地应用于渤、黄海水冰的冰情预测中。

然而, 目前的预测多集中于大气环流因子对渤、黄海冰情的影响。根据第二类气候可预报性原理, 海洋是气候系统的重要外强迫。由于海洋的密度远超过大气, 状态的变化比大气慢, 预报时间尺度也比大气长。因此, 利用海洋要素预测渤、黄海冬季的大气状况, 进而对冬季冰情进行预测, 是一种可行性强且具有一定物理意义的方法。

本文第二部分介绍了研究应用的资料与方法; 第三部分分析了1971—2015年冬季渤、黄海气温和冰情的变化特征及相关关系; 第四部分基于遥相关分析法, 建立渤、黄海冬季气温与前期海温遥相关型; 第五部分建立渤、黄海冬季气温和冰级的预测模型, 并进行检验; 第六部分是总结与讨论。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料介绍

全球海温资料选取英国气象局 Hadley 气候变化中心 HadISST1 月平均资料, 分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ 。时间范围为 1970—2015 年, 区域范围为  $60^\circ\text{N}—60^\circ\text{S}$ 、

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-06-06。

基金项目: 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金(201504, 201505); 国家海洋局北海分局海洋科技项目(2015B08); 国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项(2016YFC1402000)。

作者简介: 焦艳(1987-), 女, 助理工程师, 博士在读, 主要从事海洋气候预测、海冰预警报技术研究等工作。E-mail: jiaoyan@bhj.gov.cn

通讯作者: 曹丛华(1960-), 女, 工程技术带头人, 本科, 主要从事海洋环境预报及海洋环境数值模拟。E-mail: caoconghua@bhj.gov.cn

0°—360°E,不考虑南北极高纬度海冰覆盖区域的温度变化。

渤、黄海海域气温资料选用NECP/NCAR的全球再分析资料,时间范围为1970—2015年,所选空间范围为37.5°—42.5°N、117.5°—125°E。

渤、黄海海冰历史观测资料来自国家海洋局北海分局。北海分局自1965年起开展渤海和黄海北海部的海冰观测。根据国家海洋局1973年制定的《中国海冰冰情预报等级》,以海冰外缘线和冰厚作为标准,将渤海和黄海北部的冰情划分为5个等级,1.0—5.0级分别对应“轻冰年”、“偏轻冰年”、“常冰年”、“偏重冰年”和“重冰年”。为更好地描述冰情,常精确至0.5级。

## 2.2 研究方法

遥相关是指相距一定时间或间隔一定空间的两个要素之间的显著关系。早在20世纪20—30年代,Walker等<sup>[7]</sup>就研究了海平面气压场与天气的遥相关关系,开创性地提出了北半球冬季海平面气压场上经典的3种遥相关型:北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)、北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)和南方涛动(Southern Oscillation, SO)。本文利用遥相关法,对渤、黄海冬季气温和全球海温进行计算分析,建立渤、黄海冬季气温与全球海温的遥相关型。

回归分析是用来研究变量与变量之间关系的方法,用于分析某个变量(预报量)与一个或者多个变量(预报因子)之间的统计关系,建立预报量和预报因子之间的回归方程,从而实现对预报量的定量预测<sup>[8]</sup>。本文基于多元线性回归和一元线性回归

的方法,分别建立渤、黄海冬季气温和冰情的回归方程,并进行量化预测。

## 3 渤、黄海冬季气温和冰情变化特征

### 3.1 渤、黄海冬季气温变化特征

渤、黄海地区的冬季气温是影响冰情的直接因子,海冰的生成和增长常伴随着强冷空气带来的剧烈降温 and 持续低温。选取前一年12月—当年2月的平均气温作为冬季气温,如1970年12月—1971年2月平均气温记作1971年冬季气温。

图1为1971—2015年冬季渤、黄海冬季气温的时间序列,可以看出气温具有明显的年代际和年际变化。从20世纪70年代至21世纪初,渤、黄海冬季气温呈现出波动上升的趋势(+0.75 °C/10a);21世纪初至今,渤黄海冬季气温振幅增大,并未出现上升的趋势,反而呈现微弱的下降趋势(-0.21 °C/10a)。这与近年来全球范围内观测到“变暖停滞”的气候背景是一致的<sup>[9]</sup>。梁苏洁等<sup>[10]</sup>对中国大陆1960—2013年冬季气温的年代际变化特征进行分析发现,中国冬季气温在整体变暖的趋势上叠加有年代际波动,可划分为冷期、暖期和停滞期3个时期。韩雪等<sup>[11]</sup>研究表明,我国冬季气温自21世纪80年代中期升高趋势明显,曾连续出现13个暖冬,2004年出现偏冷特征,2009年起冷冬持续出现。上述关于冬季气温趋势变化的研究结果与本文基本一致。

1971—2015年间,渤、黄海冬季气温最低值为-6.3 °C,出现在1984年冬季;气温最高值达到0.0 °C,出现在2002年冬季。

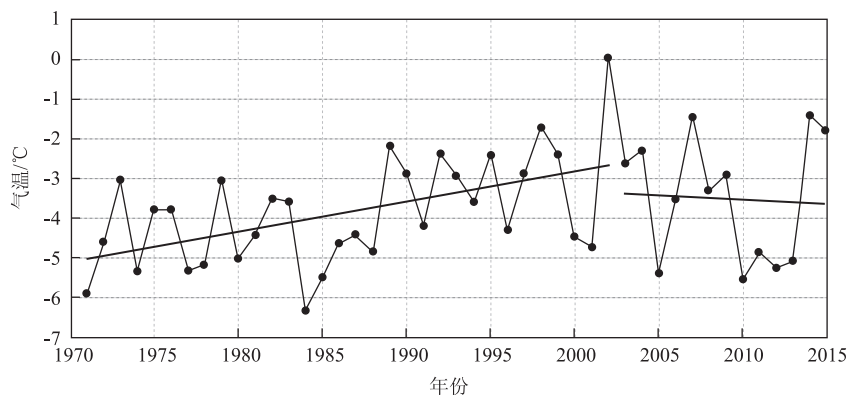


图1 1971—2015年渤、黄海冬季气温时间序列

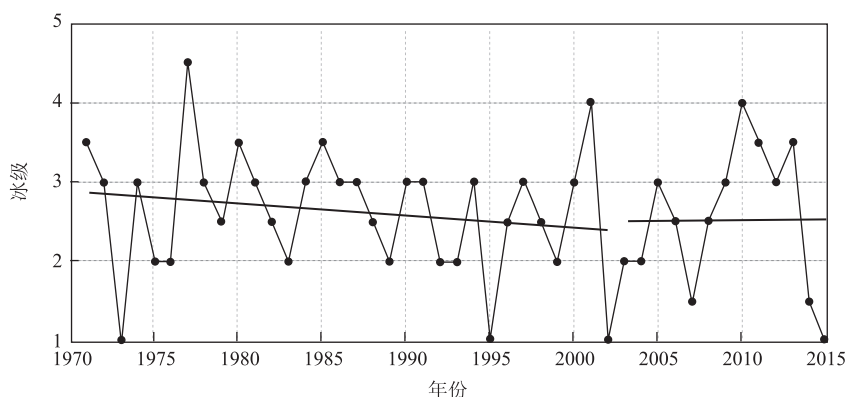


图2 1971—2015年渤、黄海冬季冰级时间序列

### 3.2 渤、黄海冬季冰情变化特征

图2为1971—2015年冬季渤、黄海冬季冰级的时间序列。可以看出,冰级也具有比较明显的年代际和年际变化趋势。1971—2002年,冰级呈波动下降的趋势( $-0.14/10a$ );2002—2015年冰级振幅较大,总体呈微弱的上升趋势( $+0.03/10a$ )。

1971—2015年间,冰情最严重的年份为1977年(4.5级),其次是2001和2010年(4.0级);冰情最轻的是1973、1995、2002和2015年(1.0级)。

### 3.3 渤、黄海冬季气温与冰情的相关分析

根据3.1和3.2节的分析,渤、黄海冬季气温和冰级具有反向变化趋势。白珊等<sup>[12]</sup>分析了渤海、北黄海冰情与局地气温的关系,得出冰面积与气温负相关,并在1—2月最显著。李宁等<sup>[13]</sup>、刘煜等<sup>[14]</sup>研究也表明,渤、黄海冰情与局地气候变化趋势具有很好的相关关系。

对1971—2015年渤、黄海冬季气温和冰级的时间序列进行相关分析,相关系数达到 $-0.78$ ,通过99%信度检验,负相关关系显著。由此建立渤、黄海冬季气温和冰级的回归方程:

$$B = -0.46T + 0.90 \quad (1)$$

式中: $B$ 代表冬季渤、黄海的冰级; $T$ 代表当年冬季渤、黄海的气温。

## 4 渤、黄海冬季气温与全球海温的遥相关型

为研究前期全球海温对渤、黄海冬季气温的影

响,对渤、黄海冬季气温与前一年各季节全球海温进行遥相关分析。在相关分析之前,首先对气温和海温进行了去长期趋势的标准化处理。得到的相关系数场如图3所示。从影响范围和影响强度方面来看,前一年夏季(6—8月)海温对渤、黄海冬季气温的影响最为明显。下面主要分析夏季海温遥相关型,并由此建立预测模型。

图3c可以看出,夏季影响我国渤、黄海冬季气温的关键海域(通过95%显著性检验,  $|r| > 0.29$ )主要分布在:赤道以北低纬度中东太平洋海域( $180^{\circ}$ — $120^{\circ}$ W,  $5^{\circ}$ — $30^{\circ}$ N)、北太平洋白令海西南海域( $160^{\circ}$ E— $160^{\circ}$ W,  $45^{\circ}$ — $60^{\circ}$ N)和西南印度洋海域( $50^{\circ}$ — $65^{\circ}$ E,  $15^{\circ}$ — $40^{\circ}$ S)。上述3个关键海区前一年夏季气温与渤黄海冬季气温分别呈明显的正相关、正相关和负相关关系。此外,澳大利亚东南沿岸、西北太平洋中国及菲律宾沿岸、佛罗里达半岛西部和美国东部沿岸、巴西东南沿岸也有部分海域的相关系数通过显著性检验。

## 5 基于关键区海温的渤、黄海冬季气温和冰情预测模型

采用多元回归分析的方法,建立渤、黄海冬季气温与赤道以北低纬度中东太平洋、北太平洋白令海西南海域和西南印度洋3个关键海区前一年夏季海温的预测方程,计算得到气温的预测值与观测值相关系数为 $0.48$ ,通过95%显著性检验。

分析澳大利亚东南沿岸、西北太平洋中国及菲律宾沿岸、佛罗里达半岛西部和美国东部沿岸、巴西东南沿岸等部分海域海温的影响,在上述3个关

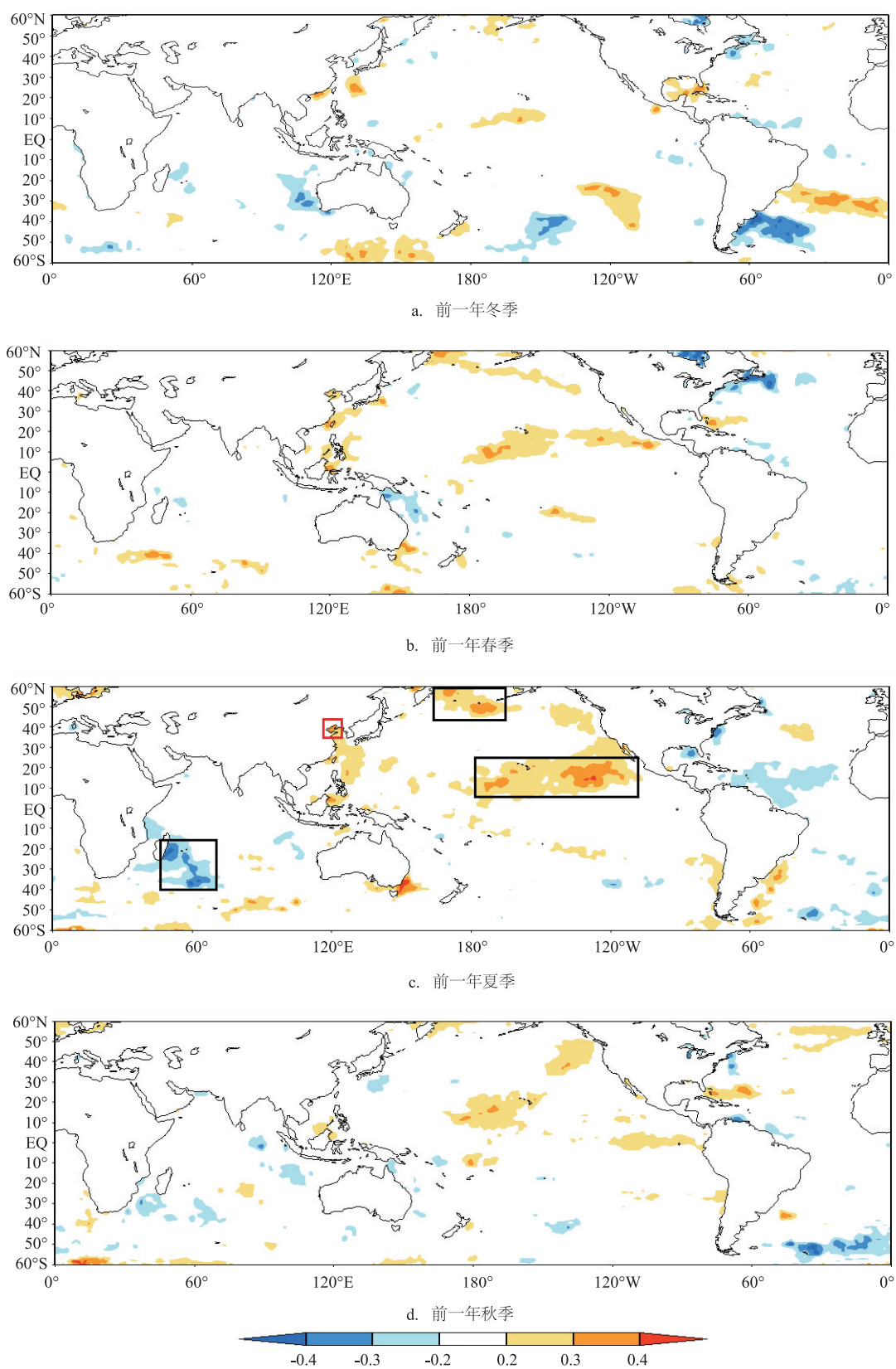


图3 渤、黄海冬季气温与前期海温相关系数场及夏季海温关键区



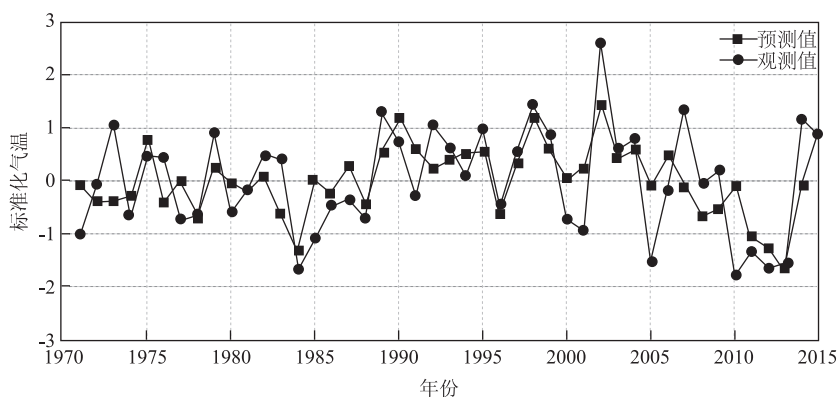


图4 气温预测值与观测值对比图(气温均为标准化数据)

键海区的基础上,分别加入上述海域海温作为回归因子,得出澳大利亚东南沿岸海温对渤海冬季气温影响明显,增加该因子后建立气温预测方程,计算得到气温预测值与观测值相关系数显著提高至0.62(见图4)。

由此,建立渤、黄海冬季气温预测模型:

$$T' = 0.178X_1 + 0.218X_2 - 0.254X_3 + 0.417X_4 \quad (2)$$

式中: $X_1, X_2, X_3, X_4$ 分别为赤道以北低纬度中东太平洋、北太平洋白令海西南海域、西南印度洋和澳大利亚东南沿岸海域前一年夏季的标准化海温值; $T'$ 为渤、黄海冬季标准化气温值。

在气温预测模型的基础上,将 $T'$ 转换为渤、黄海冬季实际气温值 $T$ ,带入式(1)就可以得到渤、黄海冬季冰级的预测值。

## 6 总结与讨论

本文首先分析了渤、黄海冬季气温和冰情变化特征。1971—2002年,渤、黄海冬季气温升高,冰级降低;2003—2015年,渤、黄海冬季气温略有降低,冰级略有升高,但变化趋势不明显。进一步分析了渤、黄海冬季气温和冰级的相关性,二者呈明显的负相关关系,相关系数为-0.78。为建立渤、黄海冬季气温和冰级的预测模型,采用全球海温遥相关法,发现前一年夏季海温对渤、黄海冬季气温影响最为明显。选取影响渤、黄海冬季气温的关键区,利用多元回归方法建立预测模型,计算得到渤、黄海冬季气温预测值与观测值的相关性显著,达到0.62。基于该模型,利用气温与冰级的关系,可以得

到渤、黄海冬季冰情的预测值。

根据全球海温遥相关分析,影响渤、黄海冬季气温的前一年夏季海温关键区有:赤道以北低纬度中东太平洋海域、北太平洋白令海西南海域、西南印度洋和澳大利亚东南沿岸海域。下面从物理机制方面进行初步分析:(1)赤道以北低纬度中东太平洋海域与Niño区相近,目前有大量研究表明,ENSO通过海-气相互作用,影响东亚冬季风,进而对我国冬季气候产生影响<sup>[15-16]</sup>;(2)北太平洋白令海是来自太平洋的温暖海水进入北冰洋的必经之地。夏季该海域水温偏高,表明进入北冰洋的海水变暖,加速了北极偏太平洋一侧海冰的融化。黄菲等<sup>[17]</sup>研究表明,前夏和前秋东西伯利亚海-波弗特海海冰异常融化,对应冬季海平面西伯利亚高压和阿留申低压北移,对流层中层东亚大槽西移,高层西风急流西移北移,导致影响东亚的冷空气路径偏北,冷空气对60°N冬季气温影响最为明显,而对40°N附近的渤海海域影响不大;(3)西南印度洋海温负异常与印度洋偶极子(IOD)<sup>[18]</sup>负位相有关。王腾飞<sup>[19]</sup>研究了气候变暖前后关键区海温对我国冬季气温的影响,结果表明,气候变暖后,西印度洋和东太平洋关键区海温与影响我国的环流系统密切相关:夏季西印度洋海温偏低,引起冬季西伯利亚高压偏弱、东亚冬季风偏弱;夏秋季东太平洋海温偏高,引起副高偏西偏强、印缅槽偏弱。二者共同作用导致冬季我国大部分地区气温偏高;(4)澳大利亚东南海域夏季海温异常的影响机制尚不清楚,可能是通过越赤道气流对渤、黄海冬季气温产生影响,该问题有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 白珊, 刘钦政, 李海, 等. 渤海的海冰[J]. 海洋预报, 1999, 16(3): 1-9.
- [2] 唐茂宁, 洪洁莉, 刘煜, 等. 气候因子对渤海冰情影响的统计分析[J]. 海洋通报, 2015, 34(2): 152-157.
- [3] 李彦青, 苏洁, 汪洋, 等. 渤海海冰外缘线候平均离岸距离的变化及其关键影响因子[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(7): 7-16.
- [4] 高振会, 杨建强, 费立淑. 分形分析方法在海冰趋势预测中的应用[J]. 海洋通报, 2003, 22(4): 66-69.
- [5] 郑冬梅, 张书颖, 周志强, 等. 逐步回归分析在渤海海冰等级预报中的应用[J]. 海洋预报, 2015, 32(2): 57-61.
- [6] 卢海. 基于人工神经网络的冰情预测研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [7] Walker G T, Bliss E W. World weather V[J]. Mem Royal Meteorological Society, 1932, 4: 53-84.
- [8] 胡基福. 气象统计原理与方法[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1996.
- [9] 宋斌, 智协飞, 胡耀兴. 全球变暖停滞的形成机制研究进展[J]. 大气科学学报, 2015, 38(2): 145-154.
- [10] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.
- [11] 韩雪, 陈幸荣, 李荣滨. 我国冬季气温的趋势变化特征及其影响因子分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(6): 49-57.
- [12] 白珊, 刘钦政, 吴辉碇, 等. 渤海、北黄海海冰与气候变化的关系[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 33-41.
- [13] 李宁, 雷飏, 顾卫, 等. 环辽东湾地区冬季平均气温对渤海海冰面积的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1818-1824.
- [14] 刘煜, 刘钦政, 隋俊鹏, 等. 渤、黄海冬季海冰对大气环流及气候变化的响应[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 18-27.
- [15] 韩文韬, 卫捷, 沈新勇. 近 50 年中国冬季气温对 ENSO 响应的时空稳定性分析研究[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 97-106.
- [16] 李维京, 李怡, 陈丽娟, 等. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化[J]. 应用气象学报, 2013, 24(4): 385-396.
- [17] 黄菲, 高聪晖. 东亚冬季气温的年代际变化特征及其与海温和海冰异常的关系[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(9): 11-18.
- [18] 肖莺, 张祖强, 何金海. 印度洋偶极子研究进展综述[J]. 热带气象学报, 2009, 25(5): 621-627.
- [19] 王腾飞. 我国冬季气温年际异常的主模态及其变异的成因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.

## Prediction method of air temperature and sea ice in winter in the Bohai Sea and the Yellow Sea based on teleconnection

JIAO Yan<sup>1,2</sup>, CAO Cong-hua<sup>1,2</sup>, LI Ge<sup>1,2</sup>, YUAN Ben-kun<sup>1,2</sup>, JIANG Wen-fei<sup>3</sup>, YU Qing-xi<sup>3</sup>

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

**Abstract:** The historical data of air temperature (AT) from NCEP/NCAR and sea ice grades (SI) from SOA was used to analyze the variation characteristics of AT and SI in winter during 1971—2015 in the Bohai Sea and the Yellow Sea. The prediction model of AT and SI was set up based on the method of teleconnection by selecting SST key areas which have obviously influence on the temperature in winter in the Bohai Sea and the Yellow Sea. Results showed that, both AT and SI had interannual and interdecadal variations, and they had significant negative correlations with each other. According to the teleconnection, SST anomalies in the Middle East Pacific Ocean, the southwest of the Bering Sea, the southwest of Indian Ocean and the coastal area of southeast Australia were strong precursor signals of AT in winter in the Bohai Sea and the Yellow Sea. The analyses also showed that there was a good corresponding relationship between AT from predicted model and the observation.

**Key words:** the Bohai Sea and the Yellow Sea; sea ice; air temperature in winter; sea surface temperature; teleconnection; multiple regression