

黄、渤海海冰长期变化特征分析

李 剑^{1,2}, 黄嘉佑¹, 刘钦政²

(1. 北京大学大气科学系, 北京 100871; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 选取渤海、黄海北部冰情等级、冰面积资料和大气环流逐月资料, 采用小波分析和交叉小波分析方法, 研究海冰长期变化特征及其气候成因。结果发现黄、渤海海冰具有多尺度变化特征, 存在低频变化、高频变化和无明显周期的演变过程。西太平洋副高、亚洲极涡以及纬向环流是影响海冰生成与变化的直接因素。黄、渤海海冰还与印度洋副高、北美副高, 以及大西洋副高存在显著年代际相关关系。

关键词: 海冰长期变化; 气候因子; 小波分析; 交叉小波分析

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2005)02 - 0022 - 011

1 引言

黄、渤海地处中纬度季风气候带, 是全球纬度最低的结冰海域之一, 每年冬季出现的海冰对渤海航运, 海上油气勘探和生产等都有不同程度的影响, 即使在一般和冰情较轻的年份, 海冰依然会在个别海区造成灾害。因此, 海冰已经作为黄、渤海海域海上工程设计、航运和开发生产中必须考虑的重要环境因素之一。多年来, 海洋工作者对渤、黄海海冰变化规律及其影响因素进行了深入的分析研究和预报实践, 海冰预报已经成为海洋环境预报的日常业务内容, 目前已经形成包括经验预报、统计预报和数值预报等多种方法并用的预报系统, 为预防和减轻海冰灾害发挥了重要作用^[1-7]。

随着全球气候变暖, 黄、渤海海冰自 20 世纪 80 年代以来持续偏轻, 这种现象引起了一些学者的关注。如刘钦政等^[8]利用信噪比方法分析了 1932 年以来共 69a 的冰级资料, 发现海冰变化具有突变特征, 1973 年以前为重冰年多发阶段, 1973 年以后以轻冰年为主, 但未能揭示突变前后的长期变化特征。白珊等^[9]对 1953 ~ 2000 年冬季渤海、北黄海冰情进行谱分析, 认为渤海海冰存在 9.6, 2.7 和 4.4a 的主周期, 北黄海海冰的主要周期为 9.6, 4.4 和 3.2a, 莱州湾海冰的变化特征略有不同, 其主要周期为 12 和 2.7a。但由于谱分析方法的优势在于能够迅速反映系统整体的周期变化特征, 能够突出系统变化最为显著的周期特征。但是如果系统变化序列的功率谱是宽带谱, 谱分析方法将无法准确描述系统的变化周期在不同时期的差异和演变。利用小波分析方法能够弥补谱分析的不足, 小波分析在时域和频域同时具有良好的局部性性质, 能将系统信号分解为多尺度成分, 并对各种不同尺度成分采用相应粗细的时域或空域步长, 从而能不断聚焦研究

对象的微小细节，小波分析还具有数学意义上严格突变点诊断能力^[10]。邓冰等^[11]曾利用小波分析方法对渤、黄海海冰等级序列进行分析，研究了海冰的周期变化以及突变特征，并据此提出了新的海冰预报方案，但缺乏对海冰持续偏轻的气候成因分析。为此，本文采用小波分析方法，利用冰情等级和海冰面积资料序列，对北黄海、渤海冰情的长期变化特征进行了更为细致的分析，并采用交叉小波分析法分析了海冰长期变化与气候变化的关系，以便了解海冰变化的气候成因。

海冰作为冰雪圈的一部分对气候变化具有重要影响，研究表明海冰与大气、海冰与海流和海温在不同空间和时间尺度均存在显著相关^[12~15]。海冰不仅对局地 and 区域的气候产生影响，还对半球乃至全球的大气环流和气候产生影响^[16]。同时海冰的成因与天气气候变化存在密切的关系，特别是渤、黄海处于典型的季风气候带，属于季节性结冰海域。海冰的生消和发展主要随渤海区域冬季气候变化而变化^[17~19]。作为海冰预报的物理基础，研究渤海海冰的气候成因也十分重要的，我们将运用交叉小波分析的方法揭示海冰冰情与气候因子之间的关系。

2 资料和分析方法

本文利用国家海洋环境预报中心总结和分析的 1932 年~2004 年共 73a 的海冰等级资料和 1953 年~2000 年共 48a 的海冰面积指数进行海冰长期变化特征的分析。传统上，采用冰情等级作为冰情指标，根据冰外缘线到各海湾湾底距离确定的各海湾的冰情等级，然后再经过加权平均得到各年度的海冰等级。海冰面积指数是普遍用于全球和局地海域海冰研究中的一个综合性冰情参数，近年来已被用作黄、渤海的冰情指标，它可以克服用边缘线到湾底距离确定海冰等级时的一些困难，例如冰情特别严重的 1969 年，渤海几乎完全被冰覆盖，就很难确定这个距离。因此，本文同时对冰情等级和海冰面积指数进行分析，实际上除了少数几个年份外，冰面积指数和海冰等级具有良好的一致性（见图 1）。

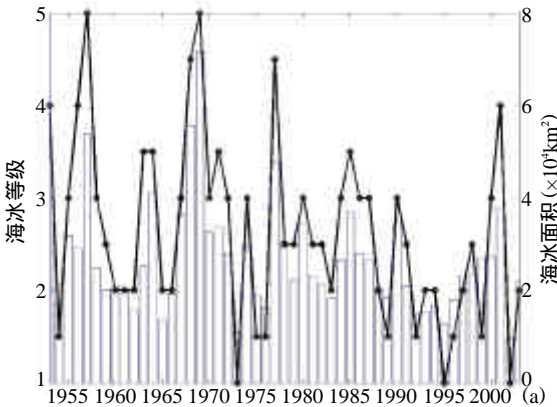


图 1 海冰等级（点线图）以及海冰面积（直方图）序列

选取 1953 年~2000 年间 74 个大气环流指数逐月资料(由中国气象局气象中心提供),根据逐月资料建立季节尺度因子,定义 6~9 月为夏季,11 月至次年 2 月为冬季,分别得到夏季、冬季和全年平均的资料序列,用于进一步分析气候因子与海冰之间的关系。

本文主要采用小波分析以及交叉小波分析方法研究海冰变化特征以及海冰 - 气候关系。小波分析(或称子波变换或小波分析和小波变换)是八十年代出现了一种新的数学方法。它是传统傅立叶分析的重大进展,被认为是在工具和方法上的重大突破,小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部性质。它能将不断地聚焦到所研究对象的任意微小细节小波变换对各种尺度是平等的,它对原序列从不同尺度中进行分析,揭示多时间尺度的不同结构。小波变换方法通过调整放大倍数可以从物理空间看清楚气候资料的精细结构和演变过程,从不同尺度层次分别找到气候突变点,从而判断气候转折期。小波分析在大气科学中还有气候本征变化和自然变化的检测、自适应多分辨数据滤波器等多种应用。

相对小波分析而言,经典的傅立叶分析是一种纯频域分析。傅立叶变换的结果是将序列分解成一系列谐波的迭加,分解中有利于高频分解,但是各种相近的周期不容易分解。

交叉小波分析是在对各因子小波变换的基础上,对不同因子的小波系数求积,建立交叉小波谱。交叉小波可以表示两个时间序列包含的振动成分之间的相互关系^[20~22]。

本文采用 Morlet 小波作为小波分析的基小波,该小波的优势在于能够提供连续、平滑的小波能量谱图。同时 Morlet 小波是一种复数型小波,能够更好的表征时间序列的周期振荡现象^[23]。

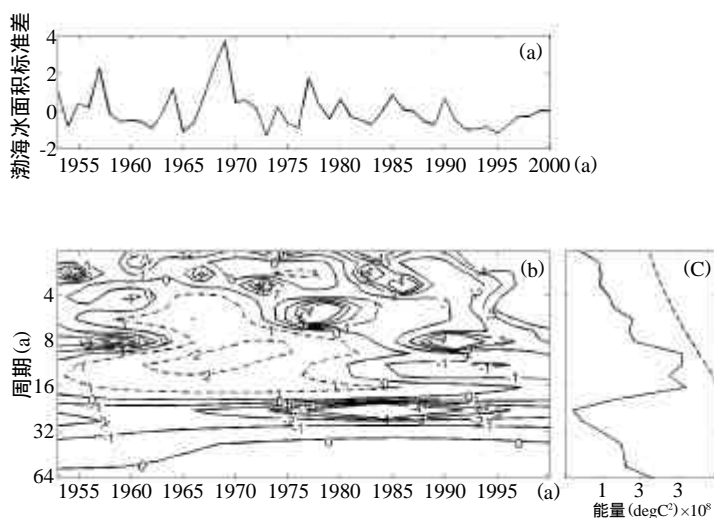


图 2 渤海冰面积指数小波分析

(a) 渤海冰面积指数序列 (b) 渤海冰面积小波能量谱 (c) 累积能量

3 海冰突变与多周期变化特征

对不同海区海冰面积指数的小波分析得知,不同海区的海冰冰情反映出较为显著的周期特征。图 2 为 1953 年~2000 年渤海冬季海冰面积指数的小波分析能量谱图。

从图 2a 可以看出,面积指数的时间序列显示渤海海冰的几个重冰年都是出现在 1980 年之前,而且冰情变化的幅度也很大,在 20 世纪 70 年代末以后冰情总体减弱,变化幅度趋于缓和。这种变化趋势与刘钦政等^[8]提出的渤海海冰在 70 年代发生突变的观点是相一致的。

从小波能量谱图(见图 2b)中进一步可以发现渤海海冰变化存在年代际变化,对于不同的周期来说,年代际变化的表现是不同的。最为明显的是 6~8 年和 15 年左右的较长周期。这两种周期在整个时间段内尽管一直有清楚的表现,但是仍然可以发现,在上世纪 70 年代末以前表现相对更为明显,其小波功率贡献很大,而在 80 年代则迅速减弱。在短周期变化方面同样也存在 70 年代末的年代际突变现象,从图中还可以看到,渤海海冰变化在 90 年代之前还存在着 2~4 年左右的短周期,但是这种高频变化在 90 年代以后就消失了。可见,海冰的变化在 90 年代还可能出现一个年代际变化,但是由于 90 年代到现在,资料还很短,仍需要以后进一步验证。不过,上述周期的累积能量还未能够达到显著性检验 5% 的水平(见图 2c)。

黄海的海冰与渤海海域的海冰变化有细微的差别。黄海海冰也是在进入 80 年代以后也出现了冰情减弱的特征(见图 3a),但是相对于渤海海域海冰的变化来说,黄海海冰冰情的变化幅度相对较为剧烈。同时,从小波能量谱(见图 3b)中我们可以看到,黄海的海冰变化同样存在多尺度特征,低频方面存在 6~8 年以及 15 年左右两个主要的周

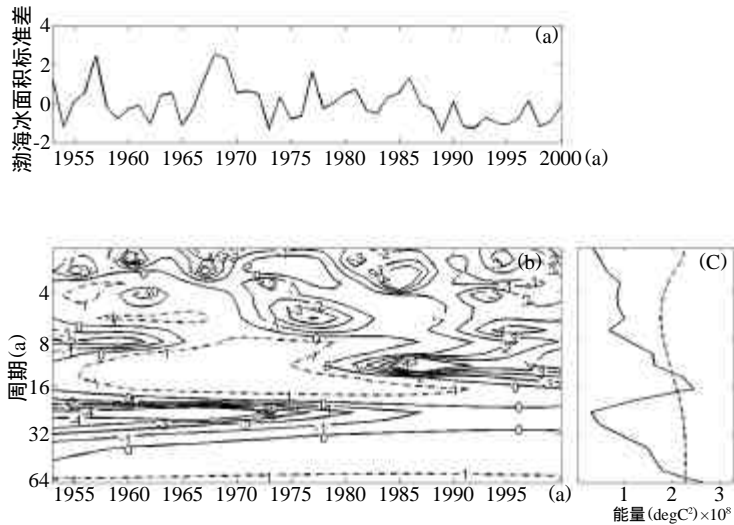


图 3 渤海冰面积指数小波分析

a) 冰面积指数序列 b) 小波能量谱 c) 累积能量

期,与渤海海冰比较而言,长周期能量更为集中,15 年左右的周期累积小波能量通过了 5% 显著性水平的白噪声检验。同时,北黄海海冰 2~4 年的短周期在 80 年代以前呈现与渤海海冰基本类似的模态,而 80 年以后则出现完全不同的模态,短周期虽然不是非常明显,但也存在较强的能量负值中心(见图 3b)。

由以上分析我们可以看到,中国海海冰在上世纪 90 年代之前存在相对显著的周期特征,90 年代之后这种周期特征发生了一定的变化,特别是短周期部分在不同的海域存在不同的变化模态,而长周期特征也相对较为模糊。产生这种变化的原因可能于外界强迫因子的变化有关,比如大气环流特征的改变,我们将在下面的章节中讨论大气因子对海冰变化的影响。同时也有可能同中国海本身物理特性的变化存在一定的关系,比如温盐结构、海流特征的变化等,我们将在以后的工作中对这方面的成因进行深入研究和分析。总之,中国海海冰变化总体来说存在一定的周期性,其主要周期为 2~4 年,6~8 年左右和 15 年左右,不同周期在年代际时间尺度上也存在变化。可见,通过小波分析,不仅可以揭示冰期变化的周期特征,而且可以发现不同周期的年代际变化特征。

4 海冰与大气气候因子的关系

冰雪圈、海洋、大气之间存在着复杂的反馈机制,各个圈层相互影响,是气候系统变化的重要机制之一。由于渤海、北黄海的海冰都属于季节性成冰,存在时间相对较短(每年 4 个月左右),而且主要分布于相对较为封闭的海域(渤海海域以及黄海北部地区),因此渤海、北黄海海冰不会像南北极地区的海冰那样对大气环流以及海洋环流造成十分明显的影响。渤海海冰的变化应该是对大气、海洋演变过程的一种响应。为了揭示渤海海冰与大气环流以及其它气候条件之间的关系,我们考察了中国气象局提供的 74 个气候因子 1953 年~2000 年的变化特征,并且通过交叉小波变换分析了其中几个与渤海海冰变化显著相关的因子,揭示了这些因子与海冰之间的不同周期变化的内在联系。

首先我们将气候因子逐月资料进行重构,根据资料的相似性,定义 6~9 月为夏季,11 月至次年 2 月为冬季,分别得到夏季、冬季和年平均资料序列。然后分别对气候因子和海冰等级、各海区海冰面积指数做相关分析,从中挑选相关显著的因子,进行交叉小波分析,研究气候因子对海冰演变的影响,以及这种影响随时间变化规律。

通过相关分析我们发现(见表 1),西太平洋副高、亚洲区极涡面积指数、欧洲区极涡面积指数以及亚洲区纬向环流指数与海冰面积指数存在较好的短期相关关系,而且主要是冬季的环流特征与海冰冰情关系密切。冬季西太平洋副高面积指数以及强度指数与渤海海冰指数存在提前一年的负相关,相关系数达到 -0.4 以上,通过了 5% 的显著性检验。也就是说,西太平洋副高的强弱是影响海冰冰情的一个主要因子。亚洲区极涡面积指数和亚洲区纬向环流指数与海冰面积则有较好的正相关,相关系数也通过了显著性检验。由以上特点不难看出大气环流因子是影响海冰冰情的直接因素,渤海与黄海冬季受亚洲大陆高压控制,气温变化具有明显的大陆性特点,当冷空气过境,尤其是寒潮入侵

时，海温显著下降，有利于海冰生成。西太平洋副热带高压是影响东亚气候的重要天气系统，冬季副高面积和强度指数较大时，冷气团活动较弱，不利于渤海和黄海北部海冰发展。亚洲区的极涡和纬向环流也是制约东亚局地气候的基本因子，极涡较强而纬向环流较弱时，冷气团活跃，有助于该地区海冰生成。反之，副高强度和纬向环流较强而极涡较弱时，冷气团活动减弱，不利于海水降温，进而影响了海冰生成。因此大气环流条件以及海气之间的热量交换是影响海冰生成的最直接的因素。

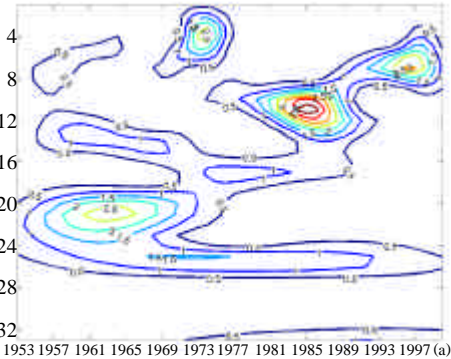
表 1 气候因子提前海冰面积指数一年的相关系数 (Rc=0.2847)

气候因子	指数	海 域		
		渤海	黄 海	辽东湾
西北太平洋副高	面积	-0.401	-0.490	-0.379
	强度	-0.403	-0.466	-0.369
	脊线	-0.280	-0.298	-0.235
	北界	-0.326	-0.350	-0.332
亚 洲 区 极 涡	西伸极点	0.363	0.458	0.339
	面积	0.489	0.503	0.524
	强度	-0.116	-0.215	-0.153
亚 洲 环 流 指 数	纬向	-0.396	-0.516	-0.327
	经向	0.316	0.314	0.220

交叉小波分析的结果显示 (见图 4)，不同时期，大气因子对海冰冰情的影响是存在差异的，在 70 年代以前，副高、极涡以及环流对海冰的影响比较显著，交叉小波谱图中显著正值中心都表现为 11 年和 22~24 年左右的低频特征上。说明在 11 年和 22~24 年周期附近，它们有明显的相关变化。反映在这两个主要的太阳活动周期上，它们表现出明显的相关关系。

不同的大气气候因子的作用在影响幅度、显著频率等方面略有差别。副高的影响在 1970 年以前，主要的响应频率在 22 年左右。此后，副高和海冰相关主要表现为 11 年和更短 (5~6 年) 周期上，说明年代际的突变也表现在它们之间的关系中。我们还发现在表征副高强弱的诸多指标中，海冰与副高面积指数的交叉小波能量更为集中，可以视为副高对海冰影响的一个主要指标。而极涡和纬向环流对海冰的影响集中体现在 60~70 年代，特别是交叉小波能量的极大值中心出现在 1969 年，当年渤海出现了有资料记载以来的最为严重的冰封灾害，可以认为是海冰对大气的低频振荡的一种强烈响应现象。

进入 90 年代，大气因子对海冰的影响出现了明显的变化，产生了与前期完全不同的响应模态，副高与海冰的交叉小波能量谱出现了高频特征，主要的正值中心集中在 5~6 年尺度上，而极涡和纬向环流的影响还是维持较长的周期，但是影响强度有很大的减弱，海冰在这两种不同频率的因子影响下进入一个变化调整时期。



a) 西太平洋副高强度指数

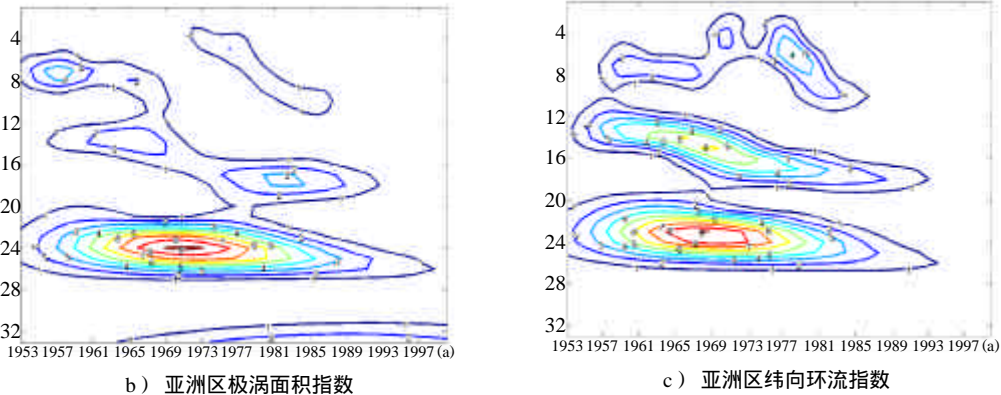


图 4 渤海海冰面积与大气因子交叉小波谱

20 世纪 90 年代中后期，海冰和大气的关系再次发生改变，与副高的交叉小波能量谱在 1997 年前后存在一个弱的正值中心，而极涡和纬向环流的谱图中不再出现极值中心，这说明在全球变暖的背景下，大气环流条件变得不再有利于海冰的发展，这可能是渤海以及北黄海在上世纪 90 年代后期，连续出现偏轻冰年的主要原因。

海冰与其它大气环流因子之间的相关分析还表明(见表 2)，黄、渤海海冰提前于印度洋副高、北美副高以及大西洋副高等因子，也存在很好的相关关系，海冰面积指数与印度洋副高面积和强度指数提前 10 年左右的正相关为 0.3 以上，与北美副高强度指数提前 15 年左右的正相关达到了 0.4 左右，而与大西洋副高提前 11 年左右的正相关更是高达 0.5 左右。

表 2 海冰面积指数与气候因子年代际尺度相关

气候因子	指数	海 域		
		渤海	黄海	辽东湾
大西洋副高	面积	0.529 (7a)	0.450 (6a)	0.494 (7a)
	强度	0.598 (7a)	0.501 (6a)	0.564 (7a)
北美副高	面积	0.376 (16a)	0.349 (14a)	0.382 (16a)
	强度	0.441 (16a)	0.388 (14a)	0.462 (16a)
印度洋副高	面积	0.354 (10a)	0.332 (13a)	0.323 (10a)
	强度	0.368 (10a)	0.360 (13a)	0.344 (10a)

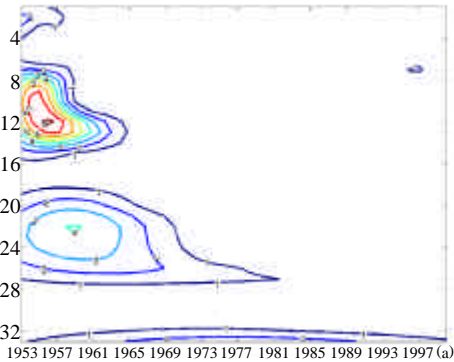
(括号中为气候因子落后海冰年数, $R_c=0.2847$)

就位置而言，中国海与上述副高中心相隔遥远，而且黄渤海海冰范围小、冰期短，同时，相对海洋变化而言大气环流是一个快变过程，大气信号的持续性大约只有 1~2 年，显然不能把大气因子和海冰之间这种年代际尺度的相关视为海冰对大气环流的直接影响。已有的研究表明，海冰和海洋环流中包含 11 年尺度变化的反馈机制，这种尺度的变化很可能是太阳活动对大气和海洋变化的强迫^[24]。近年来的观测和数值模拟表明大洋中明显存在 10 年和 10 年以上尺度变化，如 Levitus 等^[25] 分析了大西洋 125 m 深处的历史海洋温度资料，指出在 1947 年~1990 年间有海盆范围准 11 年温度振荡现象，Hurrell^[26] 指出南欧地中海地区冬季近 11 年干旱以及从冰岛到斯堪的纳维亚半岛的温度异常均与北大西洋振荡的持续正位相有关。Latif 等^[27] 用耦合模式研究气候内部振荡的特点，认

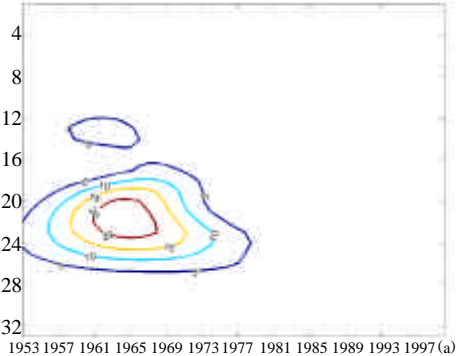
为北太平洋 SST 存在周期为 15~20 年的年代际变率。大量研究表明由密度驱动的海洋温盐环流 THC 的强度变化也存在年代际尺度周期变化^[28], Delworh 等^[29] 用耦合的大气海洋环流模式模拟了 THC 强度的年代际变化,指出这种变化与北大西洋 THC 的汇区盐度异常一致,引起 SST 的 11 年振荡并导致北大西洋北欧和北极的气温异常。同时观测研究表明,该时间尺度变化与热带太平洋、印度洋海表温度^[30~31]。大气环流特征也出现相应的变化规律,如高登义等^[32] 指出北美、大西洋副高强度存在 11 年尺度周期性变化。

进一步分析发现海冰与上述地区大气气候因子的相关关系主要体现在 70 年代以前,图 5 给出的是渤海海冰指数与北美副高强度、大西洋副高强度和印度洋副高强度的交叉小波能量谱,从中可以看到主要的正值中心都出现在 70 年以前,信号的周期主要为 11 年和 22~24 年左右两个周期域内。其他海域的变化也与之类似(图略)。根据上述大气以及海洋因素存在年代际变化的特点,我们可以推断,由于海冰是海洋本身温度、盐度、环流等特征与气候因子共同作用的产物,因此海冰提前于大气这种显著相关可以认为海冰是大气环流与海洋年代际变化反馈机制中的一种重要信号。它们在不同周期尺度的变化关系上,可能反映它们共同受太阳活动的制约。但是这种推论还需要进一步研究验证。

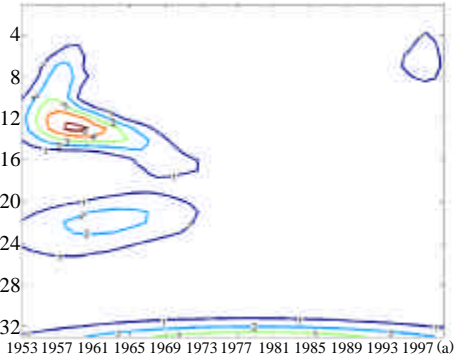
有许多学者的研究表明,全球海洋环流性质在 70 年代发生了突变,如 Gray^[33] 研究了全球近百年的气候变化,认为热盐环流 THC 在 1967~1968 年经历了由强转弱的过程。相应的,大气环流性质以及遥相关特征也存在一定的突变现象,如施能^[34] 认为太平洋北美遥相关 PNA 在 1976 年前后发生突变。Hurrl^[26] 研究了 NAO 的十年际变化,认为北太平洋高压、北大西洋高压和北美高压在



a) 大西洋副高强度指数



b) 北美副高强度指数



c) 印度洋副高强度指数

图 5 渤海海冰面积与副高交叉小波能量谱

在 1977 年~1978 年左右存在突变现象。因此,海冰与上述地区大气因子相关性的变化可能与这些突变的发生存在一定的关系。由于这里我们只考虑了海冰与副热带高压之间的关系,至于与其他气候因子之间的关系以及二者联系的具体物理机制还需要进一步的研究。

5 结论与讨论

渤海以及黄海北部海域是全球纬度最低的结冰海域之一,受到特殊的地理位置以及气候条件的影响,其海冰变化呈现出明显的特殊性。

从总体上来说,由于全球变暖的气候背景的影响,中国大部分地区气温普遍升高,同时亚洲冬季风减弱,中国寒潮发生的频数减少,强度减弱^[35]。在上述条件下,渤海以及黄海北部海域海冰冰情减弱,是 90 年代为近 50 年来冰情最轻的时期。同时,冰情变化幅度减小,无论是冰等级序列还是冰面积指数序列都没有出现较大幅度的波动。

不同海域的海冰变化略有差异,但是都表现出多尺度变化的特点,主要的周期包括 2~4 年周期、6~8 年周期以及 16 年左右的长周期。由于分析方法的差异,本文的周期长度与白珊等^[9]以及邓冰等^[11]的分析结果略有差异,但是都说明了渤海以及黄海北部海冰存在多尺度周期变化特征。海冰周期特征在 90 年代之前比较明显,而且在 70 年代初,主周期的周期长度发生改变,这可能与刘钦政等^[8]提出的海冰突变有关。由于受到资料长度的限制,渤海以及黄海北部海冰是否存在更长时间尺度的周期还有待进一步考证。

由于地处季风气候带,渤海、黄海北部海冰变化主要受到亚洲地区环流条件的影响。冬季西太平洋副高、亚洲区极涡以及纬向环流等条件主宰了东亚冬季的环流形势,成为影响海冰的最直接的要素。上述气候因子对海冰的影响也出现了三个不同的时期,从 70 年代以前的低频模态以极涡和纬向环流影响为主转入 70 年代中期的高频模态以副热带高压影响为主,而进入 90 年代以后各个因子的影响明显减弱。这些变化从某种程度上可以解释海冰突变以及周期演变特征的形成。

与此同时,渤海、黄海北部海冰与印度洋副高、北美副高以及大西洋副高存在年代际尺度的相关关系。考虑到这些因子本身的变化特点、海洋物理性质的年代际变化以及海气相互作用等因素,我们认为海冰与这些因子的相关关系恰恰说明了,海冰是海气相互作用过程中的一个重要的信号或者指标,它们在不同周期尺度的变化关系上,可能反映它们共同受太阳活动的制约。当然,这种推论还需要利用更多的观测资料通过模拟和分析加以验证。

研究海冰的生消以及演变过程,除了考虑气候条件的影响外,海洋环流条件、温度盐度结构以及变化等也是重要的制约要素,关于这些因子的作用还有待于进一步分析和研究。

参考文献:

- [1] 荆艳琴. 海冰展望和天气过程预报方法探讨[J]. 海洋预报, 1991, 8(4): 62~67.
- [2] 毛祖松, 刘金芳. 用隶属函数方法试作渤、黄海冰情等级预报[J]. 海洋预报, 1989, 6(2): 54~59.

- [3] 包澄澜. 海洋灾害及预报. 北京: 海洋出版社, 1991, 205.
- [4] 王相玉. 渤海、黄湖北部的冰期和结冰范围 [J]. 海洋预报, 1991, 8(1): 43~50.
- [5] 余加艾, 刘钦政. 利用灰色系统方法预测冰情 [J]. 海洋环境科学, 1995, 14 (4): 70~75.
- [6] 陈克文, 臧恒范. 渤海海冰与冬季冷暖长期天气过程分析及其预报 [J]. 海洋调查, 1982, (2): 37~45.
- [7] Zhang Zhanhai, Huiding Wu and Yongliang Wang. Variability of climate and ice conditions in the Bohai Sea, China, Boreal Environment Research, Helsinki, 1997, 2: 163~169.
- [8] 刘钦政, 黄嘉佑, 等. 渤海冬季海冰气候变异的成因分析 [J]. 海洋学报, 2004, 26 (2): 11~19.
- [9] 白 珊, 刘钦政, 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.
- [10] 林振山, 邓自旺. 子波诊断技术的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1999, 1.
- [11] 邓 冰, 佟 凯, 等. 渤、黄海海冰的变化和预报结果分析 [J]. 海洋科学进展, 2003, 21 (2): 214~217.
- [12] Huang Jia-you. The influence of Arctic and Antarctic ice on Southern Oscillation [J]. Arc Meteorological Sinica, 1999, 13 (4): 439~449.
- [13] 周 丽, 徐祥德. 两极海冰与青藏高原地面过程“耦合”特征 [J]. 极地研究, 1999, 11 (4): 275~284.
- [14] 戴新刚. 过去 200ka 北半球 $\delta^{18}O$ 海温谱及其数值模拟 [J]. 冰川冻土, 2000, 22 (4): 317~322.
- [15] 康建成, 孙俊英. 北冰洋海冰/气候系统及其对全球气候的影响 [J]. 极地研究, 1999, 11 (4): 301~310.
- [16] Walsh J E. The role of sea ice in climate variability. Atmosphere-Ocean, 1983, 23 (3):
- [17] 张启文. 渤海海冰变化与气象条件的关系 [J]. 海洋预报, 1986, 3(1): 47~54.
- [18] 王曼丽. 1997/98 年冬季渤海和黄海北部冰情特征分析 [J]. 海洋预报, 1999, 16 (1): 49~55.
- [19] 孟 上, 李 海. 1998/99 年度渤海地区天气气候和海冰特征分析 [J]. 海洋预报, 1999, 16 (4): 52~59.
- [20] Jevrejeva S, J C Moore, A Grinsted. Influence of the Arctic Oscillation and El Nino Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea :The wavelet approach [J]. J Geophys Res., 2003, 108 (D21): 46~77.
- [21] Torrence C, G P Compo. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull Am Meteorol Soc, 1998, 79: 61~78.
- [22] Torrence C, P Webster. Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System [J]. J Clim, 1999, 12: 2679~2690.
- [23] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. Annu Rev Fluid Mech, 1992, 24: 395~457.
- [24] Kellog W W. Climate feedback mechanisms involving the polar regions [C]. In: Climate of the Arctic, Weller & Bowling (Eds), Geophys. Inst., University of Alaska, 1975, 111~116.
- [25] Levitus S, J I Antonov, T P Boyer. Interannual variability of temperature at the depth of 125 meters in the North Atlantic Ocean [J], Science, 1994, 266: 96~99.
- [26] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation [J]. Science, 1995, 269: 676~679.
- [27] Latif M, et al. A mechanism for decadal climate variability [C]. In: Decadal Climate Variability Dynamics and Predictability, David L T, et al (Eds). Springer-verlag Berlin Heidelberg, 1996, 263~292.
- [28] Weaver A J, et al. Freshwater flux forcing of decadal and interdecadal oceanic variability [J]. Nature, 1991, 353: 836~838.
- [29] Delworth T, et al. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean - atmosphere model [J]. J Climate, 1993, 6: 1993~2011.
- [30] Kawamura R. A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales [J]. J Phys Oceanogr, 1994, 24: 707~715.
- [31] Lau N C, M J Nath. A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere - ocean system [J]. J climate 1994, 7: 1184~1207.
- [32] 高登义, 武炳义. 北半球海-冰-气系统的 10 年振荡及其振源初探 [J]. 大气科学, 1998, 22 (2): 137~144.
- [33] Gray W M. Recast of global circulation characteristics in the next 25- 30 years [C]. In: NOAA ed. Proceedings of the Twenty-First Annual Climate Diagnostics And Prediction Workshop. October 28-November 1 1996., Department of Commerce NOAA, 1997, 219~222.
- [34] 施 能. 北半球冬季大气环流遥相关的长期变化及其与我国气候变化的关系 [J]. 气象学报, 1996, 54 (6): 675~683.
- [35] 王遵亲, 丁一汇, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 2004, 62 (2): 228~236.

THE LONG-TERM VARIATION CHARACTERISTICS OF SEA ICE IN THE BOHAI SEA AND THE NORTH HUANGHAI SEA

Li Jian^{1,2}, Huang Jiayou¹, Liu Qinzhen²

(1. Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing, 100871, China ; 2. National Center for Marine Environment Forecasts, Beijing, 100081, China)

Abstract Based on the sea ice grade, sea ice area and monthly atmospheric circulation index time series, wavelet and cross-wavelet methods are employed to investigate the long-term variation characteristics and climatic mechanism of sea ice in the Bohai Sea and the North Huanghai Sea. The results show that sea ice variation contains multi-scale variations. There are low-frequency variation, high-frequency variation and non-periodical evolution patterns in the past 50 years. The atmospheric circulation in the Asia region, such as the subtropical high in the northwest Pacific, the Asia polar low and the zonal circulation, is the most direct factors affecting on sea ice formation and evolution. Furthermore there are notable correlation, on interdecadal scales, between sea ice and climate factors including the Indian Ocean high, the Atlantic Ocean high and the North American high.

Keywords : sea ice long-term variation ; climatic factors ; wavelet ; cross-wavelet