

北极海冰的气候变化与 20 世纪 90 年代的突变

方之芳^{1,2}, 张 丽³, 程彦杰⁴

(1. 成都信息工程学院, 四川 成都 610041; 2. 中国气象局成都高原气象研究所 四川 成都 610071;
3. 中国科学院大气物理研究所, LASG 北京 100029; 4. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要:应用英国 Hadley 气候研究中心 1968~2000 年的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的北半球逐月海冰密集度资料, 使用 EOF 分解等统计方法, 探讨北极海冰的气候变化趋势、海冰的突变、海冰的季节持续性和各季的特色。结果表明: (1) 自 1968 年以来, 北极海冰的减小是北半球海冰变化的总趋势; 海冰的趋势变化在海冰的年际总变化中占有相当重要的地位, 可达 50% 左右。冬春季主要减少区域在格陵兰海、巴伦支海和白令海; 夏秋季海冰减少是唯一趋势, 中心在北冰洋边缘的喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海、波弗特海。(2) 20 世纪 80 年代中后期北极海冰已出现减小趋势, 在 20 世纪 90 年代, 海冰又出现范围和面积的突然减少, 中心在格陵兰海和巴伦支海; 即海冰减少是加速的, 其变化程度已远远超过一般的自然变化。(3) 海冰有很好的季节持续性, 有很强的隔季相关, 也有较好的隔年相关; 各季节海冰分布型之间有很好的联系, 表现为海冰分布型的总体变化趋势是一致的, 在海冰的减少中也体现了分布型的特征。

关键词: 北极海冰; 海冰减少趋势; 海冰的季节持续性; 海冰突变

中图分类号: P467

文献标识码: A

引 言

全球气候自 20 世纪 80 年代开始增暖趋势非常明显^[1], T. Schneider 和 I. M. Held 应用 1916~1998 年全球 1 月和 7 月的地面平均温度资料, 分析全球温度的年际变化, 认为无论冬夏, 20 世纪的温度是增加的, 70 年代中期以后温度上升最为明显^[2]。王会军应用 850 hPa (30~60°N, 60~150°E) 区域的平均大气温度距平资料, 研究指出: 20 世纪 80 年代以来, 我国东亚区域近 20 a 几乎全为暖冬^[3]。从 20 世纪 90 年代末开始, 全球气候再次发生异常变化, 温度陡然上升, 灾害频繁。李小燕和刘传凤在 1999 年至 2002 年的气候概述中指出, 1999 年全球大部分地区气候普遍偏暖, 特别是欧洲、东亚和北美的大部分地区气候偏暖非常显著; 比 1961~1990 年的 30 a 平均气温偏高 0.33 °C^[4~5]。H. Martin 和 Arun Kumar 在 2003 年指出, 1998~2002 年期间, 美国、地中海、南欧、亚洲的西南部等大范围区域, 温度为异常显著正距平, 而降水却为异常显著负距平, 仅为气候平均的 50%, 因此干旱严重发生; 而且热带海温也出现大范围的异常增温^[6]。

全球气候的异常增暖, 对气候系统的各组成部分会有明显的影响。

极地海冰是气候系统的重要组成部分, 作为气候系统的敏感性因子, 在 20 世纪 80 年代和 1998~2002 年期间北极海冰会有明显的反映。1997 年, Cavalieri 和 Parkinson 等人应用 1978~1996 年的卫星观察海冰资料, 讨论北半球总体海冰的变化, 指出在这期间海冰以每 10 a 约为 $2.9 \pm 0.4\%$ 的速率减少^[7]。1999 年, Konstantin 等人客观分析 5 份不同年份不同来源的北半球海冰资料, 资料年代分别为 1953~1998, 1960~1990, 1973~1994, 1978~1994 和 1972~1998 年, 资料显示: 在 20 世纪的近几十年中, 北半球海冰范围变化呈减小趋势, 资料年代越后, 海冰的减小趋势越明显。他们应用 GFDL 气候模式和哈德来研究中心的气候模式, 模拟海冰厚度的趋势变化, 模拟结果与观测资料基本一致^[8]。

很多工作已证实, 北半球某些海域海冰的分布是反位相的, 例如冬季大西洋区域, 格陵兰岛以东的巴伦支海、格陵兰海和喀拉海的海冰与格陵兰岛以西的拉布拉多海、戴维斯海峡和巴芬湾的海冰范围呈反位相^[9~11]。近年的研究工作也证实, 格陵兰岛

以东各海域的海冰减少趋势最为明显,而格陵兰岛以西的海冰却有微小增加趋势^[12],即北大西洋的东部与西部的海冰是反位相的;在太平洋区域,则体现为鄂霍次克海与白令海的海冰范围是反位相的^[9,10,13]。

海冰具有特殊的物理性质,海冰的融化和凝结需要吸收和放出大量能量,因此海冰的季节变化具有持续性。2000年,Clare和Walsh应用1958~1997年海冰密集度再分析资料,认为冬季(1~3月)海冰与隔年海冰的自相关可达0.69^[12];方之芳和Wallace应用1953~1989年的Walsh的依利诺伊大学海冰研究小组的海冰密集度资料,认为冬季(12~2月)海冰与春季乃至初夏的海冰都有很好的相关,月和季的相关值分别达0.53和0.61^[14];汪代维和杨修群应用1951~1994年的Hadley气候研究中心的海冰密集度资料,以2~4月为冬季,认为北大西洋一侧海冰面积异常型持续时间可达0.5~1a;而北太平洋一侧具有半年的持续性^[15]。

考虑到20世纪90年代末的全球异常增温,本文应用1968~2000年海冰资料,重点研究近33a海冰的衰减趋势,90年代海冰的异常变化,海冰突变与温度突变的同步性,以及不同季节海冰分布型的季节持续性,不同海区海冰分布型的联系,同时讨论由于海冰资料的局限性,在海冰特性分析中可能出现的差异。

1 资料和方法

应用英国Hadley气候研究中心提供的1968年1月至2000年12月北半球逐月海冰密集度(concentration)经纬度格点资料。

资料初始来源于SMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)和SSM/I(Special Sensor Microwave /Imager)的卫星微波图像资料, Hadley气候研究中心应用气候模式对资料初始进行运算和处理,获得格点距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的海冰密集度资料。

格点的数值表示每个网格点内海冰覆盖面积占网格总面积的比率,即称为“海冰密集度”,表示海冰的相对面积;取值范围为0.0~1.0之间,0表示网格内无冰,1为网格内全部被冰覆盖,0.1~0.9为冰覆盖的面积比率。海冰密集度能表示海冰覆盖面积和范围,但不能反映海冰厚度的变化。

Y. V. Konstantin等在文中指出^[8], Hadley气候研究中心对 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的海冰密集度资料,经过有限差分二阶方案,将海冰资料平滑成 $1^{\circ} \times 3^{\circ}$ 的格点资

料(经向间隔为 1° ,纬向间隔为 3°)。在北半球地区,海冰资料范围是 $40^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{N}$ 。

应用回归分析方法和时间变化曲线拟合方法,计算每一格点海冰年际趋势变化值;运用回归系数显著性检验中的t分布检验方法,检验海冰趋势变化的显著性;应用气候突变检测的Mann-Kendall统计检验方法,检验突变发生时间^[16~17]。

应用经验正交分解方法(EOF),讨论海冰第一模态的分布特征和年际变化,海冰的模式是应用同性相关场方法,即求算时间序列与原始距平资料的相关,其图像与原始模态场是一致的,但单位为相关值^[18~19]。考虑到极地附近为永久海冰覆盖区,如果参加自然正交分解(EOF),将会减小海冰分布型的解释总方差;参考挪威E. Bjorgo等人的工作^[20],先分析海冰资料中永久海冰覆盖区的范围,然后剔除相应网格点,再进行有关计算。

2 海冰的趋势变化

根据Walsh对海冰资料来源的陈述,是在每月的月底记录海冰面积资料^[9],参考Clare和Walsh的海冰季节划分方法^[12],定义冬季为1~3月,春季为4~6月,夏季为7~9月,秋季为10~12月。

应用回归方法分析和时间变化曲线拟合方法,计算各季各网格点海冰密集度在1968~2000年中的年际变化趋势,显示在图1中。图中可见,冬季北半球海冰是减少的,主要在格陵兰海和巴伦支海。

格陵兰海海冰的最大减少中心在 $70^{\circ} \text{N}, 14^{\circ} \text{W}$ 附近,年际变化趋势值在15以上,即表示在该格点范围内,每10a减少约0.15密集度,在1968~2000年的32a间隔中,该处海冰的减少值可能达0.48密集度;反映冬季格陵兰海中心海冰减少。巴伦支海也是海冰减少区,减少趋势最大值在12左右,即在32a间隔中,该格点大约减少0.38密集度;整个格陵兰海和巴伦支海海冰面积都是减少的。

拉布拉多海、戴维斯海峡和巴芬湾的海冰密集度变化在-5~5之间,增加区域范围很小,仅在戴维斯海峡,值为3左右;即在33a中,该处每格点大约增加0.1海冰密集度;巴芬湾则每格点海冰大约减小0.1密集度(图1(a))。

在太平洋一侧,鄂霍次克海西部靠近萨哈林岛附近的海冰是增大的,最大格点趋势值约为8,而白令海的海冰则是减少的,白令海峡以南的海冰最大格点减少趋势值也为8;即在33a中,鄂霍次克海的某些区域海冰大约增加0.26密集度;而在白令海的某些海域海冰大约减少0.26密集度(图1(a))。

冬春季大西洋和太平洋海冰的反位相分布已有

很多学者提出这结论, 即鄂霍次克海与白令海的海冰呈反位相^[9~10], 格陵兰海和巴伦支海的海冰与拉布拉多海、戴维斯海峡和巴芬湾的海冰呈反位相^[9~15]; 上述分析也显示这些海区海冰的反位相变化。应用 t 分布检验方法对海冰的变化趋势进行显著性检验, 格陵兰海和巴伦支海海冰的大范围减少通过 99% 的信度水平检验; 戴维斯海峡海冰增大区仅有少数格点通过 95% 信度检验; 鄂霍次克海的近海岸区与白令海峡附近有小范围区域通过 95% 信度检验^[16], 即格陵兰海和巴伦支海海冰的减少趋势十分明显(图略)。

春季海冰的变化趋势和中心位置大致与冬季相

仿, 仍存在反位相分布, 但数值小于冬季。在 33 a 中, 格陵兰海和巴伦支海中心格点的海冰减少约为 0.45 和 0.32 密集度(图 1(b))。

春季海冰变化的主要特征是北冰洋近岸海域海冰密集度的减小, 其值在 0~ -5 之间, 即表示近年来平均而言, 春季北冰洋边缘地区的海冰比 20 世纪 60~70 年代减小约 0.16 密集度。

春季海冰的变化趋势显著性检验结果是: 格陵兰海、巴伦支海、喀拉海和拉普捷夫海的部分海域都通过 99% 的信度检验, 海冰减少通过信度的区域比冬季偏北, 向北冰洋移动。在哈得孙湾, 仅有很小范围海冰增大通过 99% 信度检验(图略)。

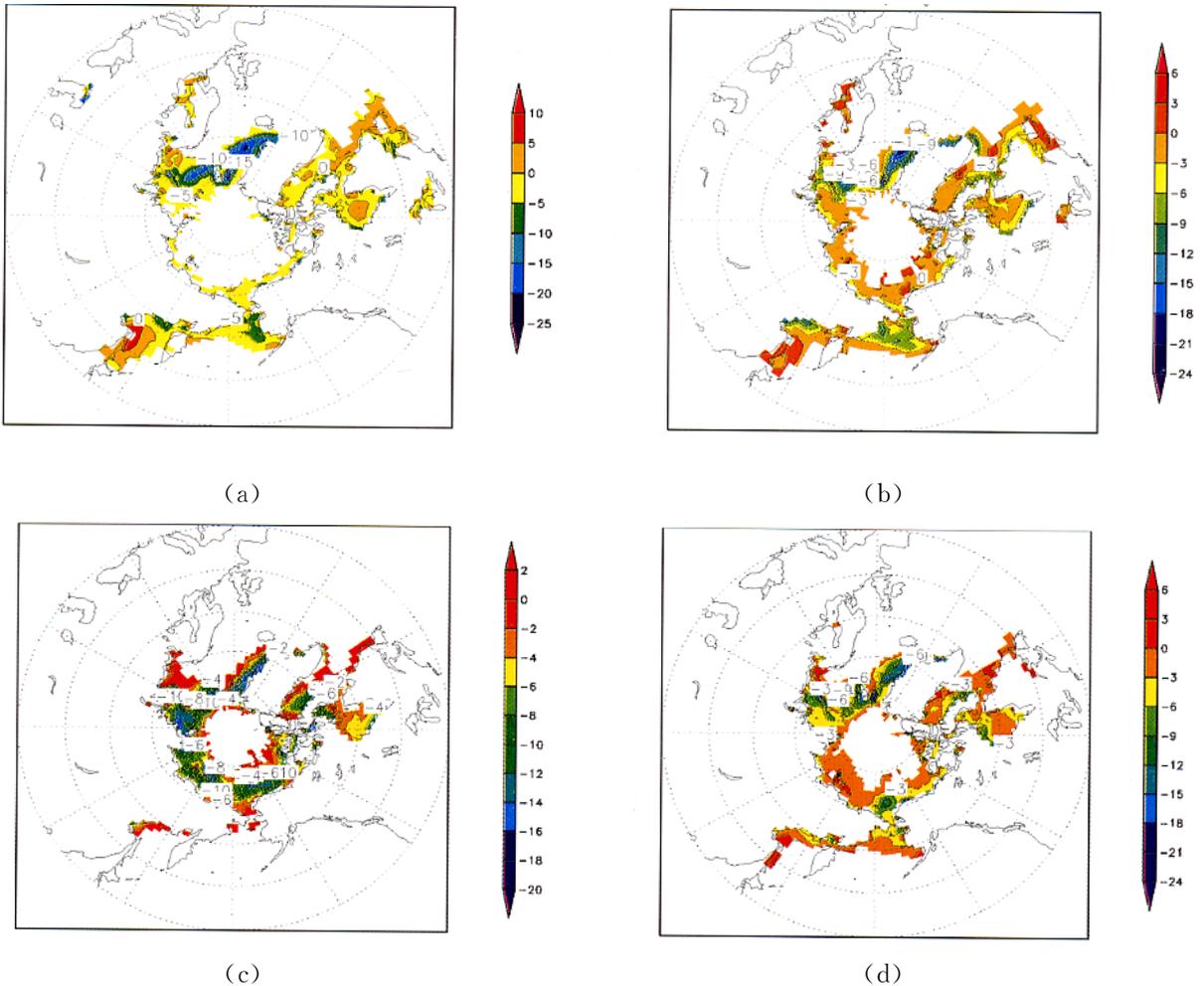


图 1 1968~2000 年各季北半球海冰密集度趋势变化 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季 (海冰密集度趋势变化以百分数(%)表示, 冬季每隔 5% 密集度分析等值线, 春季和秋季是 3%, 夏季是 2%)

Fig. 1 The North Hemisphere sea-ice concentration tendency variation during 1968~2000 (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn. The unit is the percent of the decrease sea-ice concentration for 10 years, the contour interval is 5% for winter, 3% for spring and autumn, 2% for summer

在图 1(c) 中, 由于夏季海冰发生明显的季节后退, 拉布拉多海和戴维斯海峡、鄂霍次克海、白令海

和白令海峡已基本无冰。夏季海冰的减少基本是均一的, 变化趋势几乎全部为负值。除极地附近的永

久海冰区外,北冰洋边缘海域的海冰全部都是减少的。

喀拉海和拉普捷夫海的海冰减少较为明显,中心变化趋势在 -12 以上,即在 33 a 中,在该区域的中心,部分格点海冰减小可达 0.4 密集度左右;其他海域的海冰密集度减小也有 0.2 密集度,包括冬春季海冰略有增大的鄂霍次克海、巴芬湾和哈得孙湾。此外,格陵兰海和巴伦支海仍然是海冰减少区,其值在 -12 以上。海冰趋势变化的显著性检验结果是:格陵兰海和北冰洋边缘各海域海冰的减少都大范围通过 99% 信度检验,尤其是楚科奇海,范围最大(图略);与 2000 年 Clara 和 Walsh 的工作和 1999 年 Parkinson 看法相同^[12]。

秋季海冰又开始凝结,范围扩大,但海冰的减少趋势仍是均一的。除鄂霍次克海西侧海冰稍有增大外,绝大部分地区海冰都是减少的,值在 $0\sim 15$ 之间,中心仍在格陵兰海、巴伦支海和楚科奇海,其值达 -10 以上,即在 33 a 中,海冰减小超过 0.3 密集度(图 1(d))。在秋季的显著性检验图中,格陵兰海、巴伦支海和楚科奇海都通过 99% 信度检验(图略)。

综上分析可以认为:在 1968~2000 年间,各季节北半球海冰均以减少为主要趋势;海冰增加的范围十分有限。冬春季主要减少区域在格陵兰海和巴伦支海,夏秋季在北冰洋边缘海域;然而冬春季海冰密集度变化趋势的反位相关系依然存在,大西洋一侧是格陵兰海和巴伦支海与拉布拉多海、戴维斯海峡和巴芬湾的海冰;太平洋一侧是白令海与鄂霍次克海海冰,这结果与早年应用不同海冰资料分析的 EOF 结果一致^[9~10,15~16],也与格陵兰海和巴伦支海海冰指数的年际变化一致^[11~12]。

方差的数值能反映该气象要素的年际变化是否显著,海冰方差的空间分布特征已在 Fang Z-F 和 Wallace、王嘉、汪代维和杨修群的文章中详细叙述,以 3 种不同资料计算的北极海冰的方差分布都十分相仿,表现为冬季北大西洋一侧的格陵兰海、巴伦支海、太平洋一侧的白令海和鄂霍次克海为方差大值区;春季总体与冬季相仿;夏季格陵兰海、巴芬湾和北冰洋边缘各海域中心都为方差大区;秋季又与之相仿^[10~16]。

本文计算 1968~2000 年各季各格点海冰趋势

项的方差贡献在总方差中的比重。

首先计算各格点海冰的方差值,然后求算各格点海冰趋势变化的方差贡献值^[17],再计算趋势变化的方差贡献值占总方差的百分率,即各格点趋势项方差贡献的比重,将结果显示在图 2 中。

图中可见,海冰趋势项方差贡献比重的空间分布特征是:冬季北大西洋一侧的格陵兰海是趋势项方差贡献的大值区,中心值达 53%,此外巴伦支海、太平洋一侧的白令海和鄂霍次克海趋势变化的方差贡献也较大,达 40% 以上(图 2(a))。

春季总体与冬季相仿,但其值小于冬季;喀拉海和拉普捷夫海近海岸的海冰减少趋势达 45% 左右;

格陵兰海和巴芬湾为方差贡献大值区,中心值为 43% 和 42%;白令海和鄂霍次克海则方差较小, $<15\%$ (图 2(b))。

夏季格陵兰海和北冰洋边缘各海域中心都为趋势项方差贡献大值区。在 80°N 以南的北冰洋边缘海域,即永久冰区附近;包括东西伯利亚海、楚科奇海、波弗特海和加拿大海盆近帕里群岛海域以及鄂霍次克海近亚洲大陆,海冰趋势项的贡献值都达 50% 以上(图 2(c))。

秋季又与夏季相仿,但趋势项所占的比重小于夏季,仅为 30% 以下(图 2(d)),秋季格陵兰海仍然为趋势项方差贡献大值区,北冰洋边缘各海域的方差贡献大值区都位于永久冰区以南,即在 80°N 附近及以南海域,包括东西伯利亚海、楚科奇海和波弗特海的北部,以及加拿大海盆近帕里群岛海域,鄂霍次克海近亚洲大陆处,有小范围的趋势项方差贡献大值区。上述诸区海冰趋势项的贡献值都达 50% 以上(图 2(d))。

图中各季海冰趋势项方差贡献中心正与 Fang Z-F 和 Wallace、王嘉、汪代维和杨修群等的方差大值区一一对应^[10~15],可见在海冰年际变化明显区域(即方差大值中心),海冰的趋势变化也是最明显的。

在 2002 年,方之芳等人应用 1953~1998 年海域的年平均海冰资料,计算格陵兰海和巴伦支海趋势项的方差贡献值,它们分别占了总方差的 36% 和 27%^[11],即对北极海冰而言,海冰的趋势变化在海冰的年际总变化中,占有相当重要的地位,以冬季和夏季最为明显。

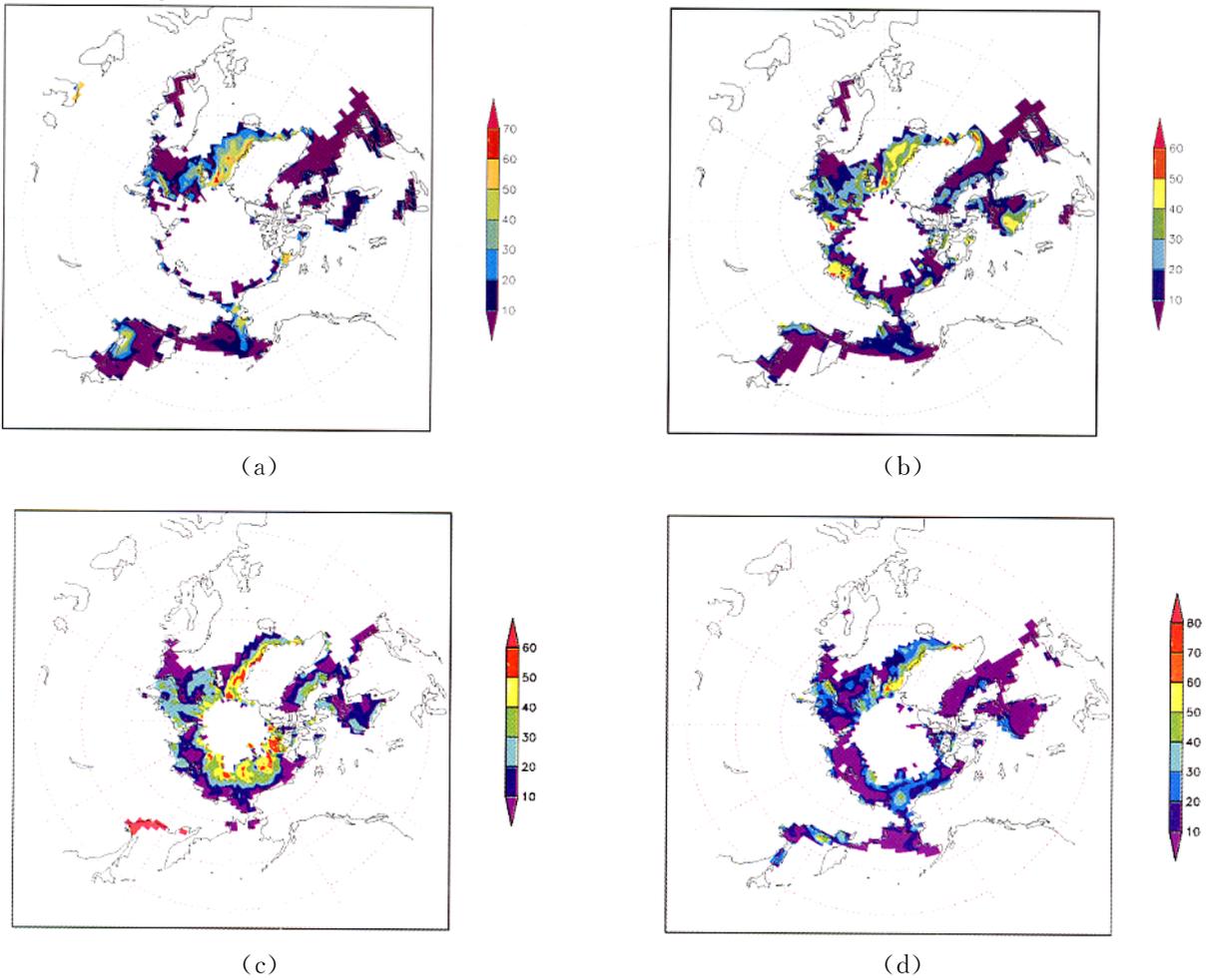


图 2 1968~2000 年各季北半球海冰密集度趋势项的方差贡献在总方差中所占的比重
(a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季(单位以百分数表示, 每隔 10% 分析等值线)

Fig. 2 The ratio between the tendency term variance and the total variance contribution of the North Hemisphere sea-ice concentration during 1968~2000 (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn (The unit is the percent, the contour interval is 10%)

3 20 世纪 90 年代北极海冰的突变和海冰的年代际变化

根据上节分析, 各季海冰减少显著的区域正是方差最大中心。对同一海域而言, 海冰趋势变化存在明显的季节持续性, 从图 1 可见, 格陵兰海和巴伦支海各季海冰的减少趋势是一致的, 其中心位置都与冬季相仿; 北冰洋边缘的喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海、波弗特海的海冰从春季至秋季也都是减少的。然而, 海冰具有其特殊的分布型, Walsh、方之芳和 Wallace、汪代维和杨修群、王嘉等已讨论过不同季节、不同范围北半球海冰的经验正交分解(EOF)结果的分布型^[10~15]。本节应用不同季节海冰的 EOF 分解和它的时间序列, 讨论北极海冰的突变时间和年代际变化。

经验正交分解方法(EOF)的目的是使头几个主分量的方差能占有原变量总方差的很大部分, 即将主要方差变化特性集中于第一模态中, 与之相应的时间序列则表示该模态的时间变化^[16]。

应用 1968 至 2000 年各季海冰密集度距平资料, 分析海冰的第一模态和相应的时间序列, 显示于图 3 和图 4 中, 其时间序列则表示该模态的年际或年代际变化。

海冰的模式是应用同性相关场, 即求算 EOF 时间序列与各格点海冰原始距平资料的相关值, 其图像是与原始模态场一致的, 但单位为相关值^[18~19]。在经验正交分解前, 已剔除该季节永久性海冰覆盖区的相应网格点。

图 3 (a) 是冬季 (1~3 月) 海冰的第一模态场, 解释方差占总方差的 32.52%, 近乎总方差的

1/3。从模态图中可见,在北大西洋一侧,格陵兰海和巴伦支海为正值区,拉布拉多海和戴维斯海峡是负值区;在太平洋一侧,白令海为较小的正值区,鄂霍次克海为负值区,与以前的分析基本一致^[10~15]。最大中心值在格陵兰海,其值达 0.82,与冬季海冰趋势图比较(图 1(a)),正负中心为反向,但位置几乎完全一致,可见第一模态反映了海冰趋势变化的最大区域,也代表这些区域,即 EOF 第一模态的时间序列几乎能完全代表该区域海冰年际变化。

与之相应的时间序列特征是:1990 年前在小范围内振动;1989 年后,基本是逐年减少,尤其在 1997 年后发生陡然下降,在其后的 3 a 中,下降值超过前 30 a 的变化总和。反映冬季格陵兰海和巴伦支海海

冰在 20 世纪 80 年代中后期,已开始减小,在 90 年代后期,尤其在 1998~2000 年减小非常迅速(图 4(a))。

春季(4~6 月)第一模态解释方差占总方差的 28.26%,与冬季第一模态十分相似,北大西洋一侧和北冰洋边缘的各海域,都为正相关,在拉普捷夫海有正中心,其值为 0.80(图 3(b))。与趋势图(图 1(b))比较,也呈反向。

时间序列特征与冬季很相似,在 20 世纪 80 年代后期,已呈逐年减少的特点;在 1997 年以后发生陡然下降,1998~2000 年间减小十分明显(图 4(b))。

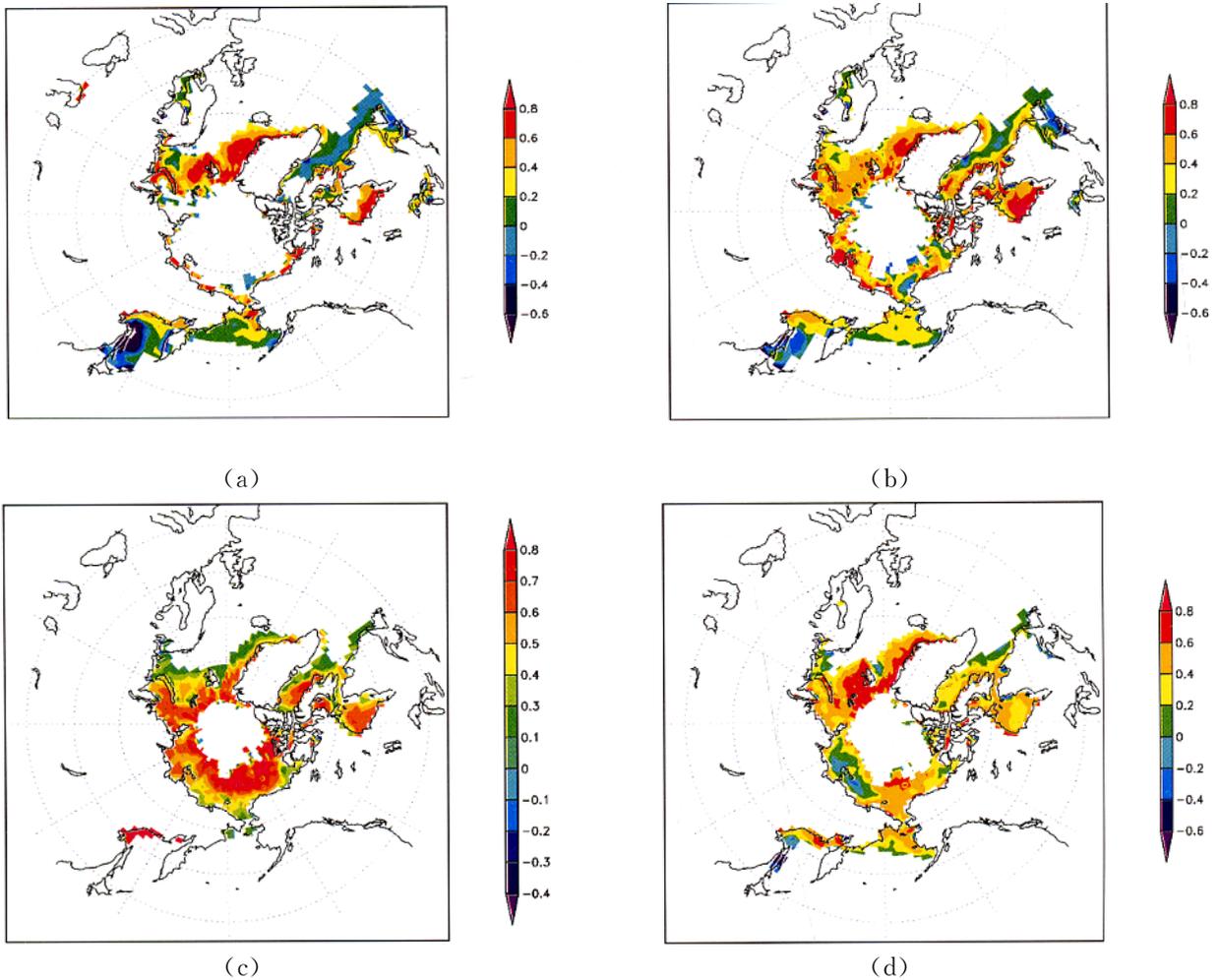


图 3 各季北半球海冰距平场 EOF 的第一模态

(a)冬季,解释总方差的 32.52%;(b)春季,解释总方差的 28.26%;(c)夏季,解释总方差的 32.56%;(d)秋季,解释总方差的 34.56% (等值线单位是相关值,冬季、春季和秋季等值线间隔是 0.2,夏季是 0.1。对 33 a 资料而言,当 $r=0.449$ 或 0.349 时,达到 $\alpha=0.01$ 或 0.05 的置信水平)

Fig. 3 The horizontal structure of the leading EOF's of the temporal covariance matrix of sea ice concentrations during 1968~2000 (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn. The color shows the temporal correlation between the time series of the expansion coefficient of the EOF1 and the sea ice concentration at each grid point (When $r=0.449$ or 0.349 , it reaches at $\alpha=0.01$ or 0.05 significant level. Contour interval is 0.2 for winter, spring and autumn, 0.1 for summer)

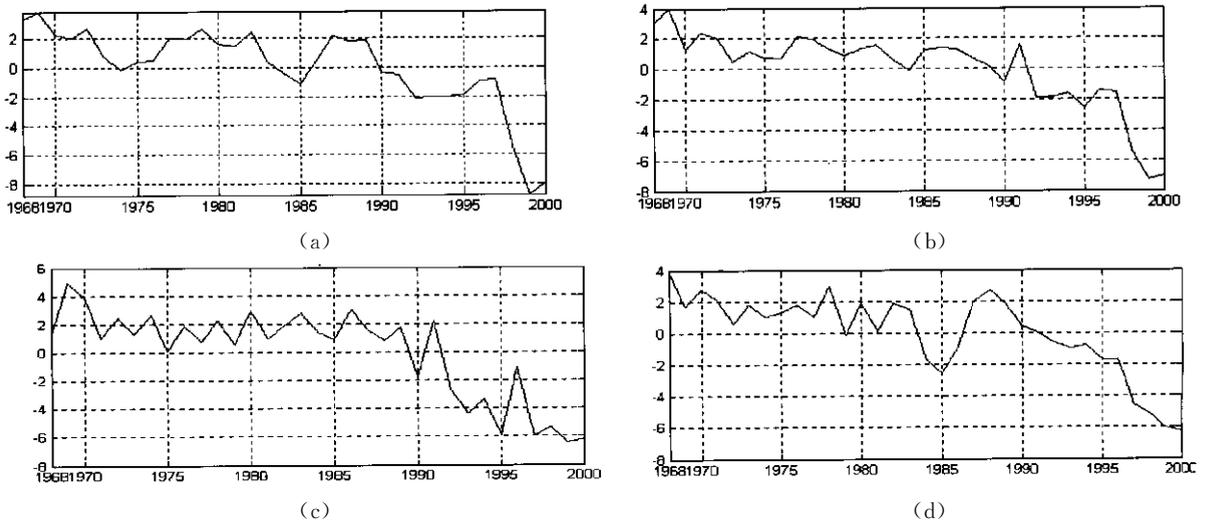


图 4 各季北半球海冰距平场 EOF 的时间序列

Fig. 4 Time series of the sea-ice leading EOFs (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn

夏季(7~9月)第一模态解释方差占总方差的 32.56%;与春季第一模态十分相似,整个模态是同向的,全部都为正值,即海冰的变化具有均一性(图 3(c))。正值中心出现在喀拉海、拉普捷夫海、楚科奇海和波弗特海,最大相关值 0.75。与趋势图(图 1(c))相比较,呈反向。

时间序列的年际变化特征,就总体而言,与春季及冬季相似,在 1991 年以后,序列就基本呈逐年减少趋势(图 4(c))。

秋季(10~12月)的第一模态解释方差占总方差的 34.56%,与夏季相仿,整个模态基本同向,中心在格陵兰海和巴伦支海,最大相关值 0.76;在北冰洋边缘的大部分海域,都有较小的正相关值,但在拉普捷夫海和东西伯利亚海有小的负相关值区;反映秋季海冰变化基本具有均一性,但在北冰洋有的边缘海域是不同向的(图 3(d))。与趋势图(图 1(d))比较,也是呈反向的。

时间序列的总体减小趋势与其他各季类似,仍然体现 20 世纪 90 年代有明显下降的特点;但在 1988 年以后,就开始连续的减小,1996 年以后又出现海冰的陡然下降,比冬季和春季超前 1 a(图 4(d))。

从图 3 与图 1 的比较中,可见海冰的经验正交分解第一模态反映了海冰趋势变化的最大区域,即海冰趋势变化在海冰年际总变化中占据相当重要的地位,因此,在经验正交分解中,也占重要地位。图 4 中的时间序列则反映了北半球总体海冰分布的年际和年

代际变化特征,也显示海冰各季年际变化的总趋势是一致的。

应用魏凤英介绍的 Mann-Kendall 统计检验方法,检验各季海冰 EOF 时间序列的突变发生时间,其结果显示在图 5 中^[17]。冬季和春季海冰的突变发生在 1989 年;夏季和秋季发生在 1994 年。在 20 世纪 90 年代,北极海冰的范围和面积发生突然的变化,其变化程度已远远超过一般的自然变化。

为揭示上述海冰的年代际变化特征,根据图 5 的 Mann-Kendall 检验结果,对冬季和春季以 1990 年为分界年,将海冰分为 2 时段,即 1968~1989 年和 1990~2000 年。对夏季和秋季以 1994 年为界,即 1968~1994 年和 1995~2000 年。

应用后一时段的每一格点海冰平均值减去前一时段的相应格点平均值,获得北半球各季海冰的差值图;如数值为负,则表示 20 世纪 90 年代以后海冰减少,其结果显示在图 6 中。

从图 6 中可见,各季节所有的格点几乎均为负值,即反映 20 世纪 90 年代海冰是减少的。

冬季,除鄂霍次克海近岸区和拉布拉多海部分海区以外,所有海域 90 年代海冰都是减少的,最大中心在格陵兰海和巴伦支海,其中心值达 0.43 海冰密集度,即 90 年代这些海区海冰已减少一半左右(图 6(a))。

春季,与冬季相仿,中心也在格陵兰海和巴伦支海,减少值达 0.34 海冰密集度(图 6(b))。

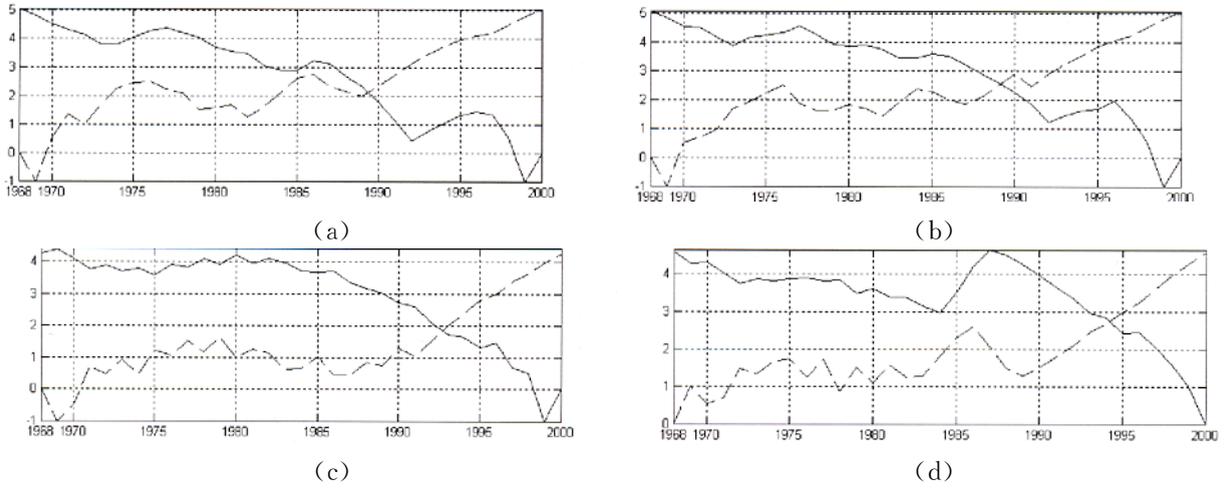


图 5 各季北半球海冰 EOF 时间序列的 Mann-Kendall 统计检验 (a) 冬季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季

Fig. 5 The Mann-Kendall exam for the sea-ice time series of the expansion coefficients in Fig. 4 (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn

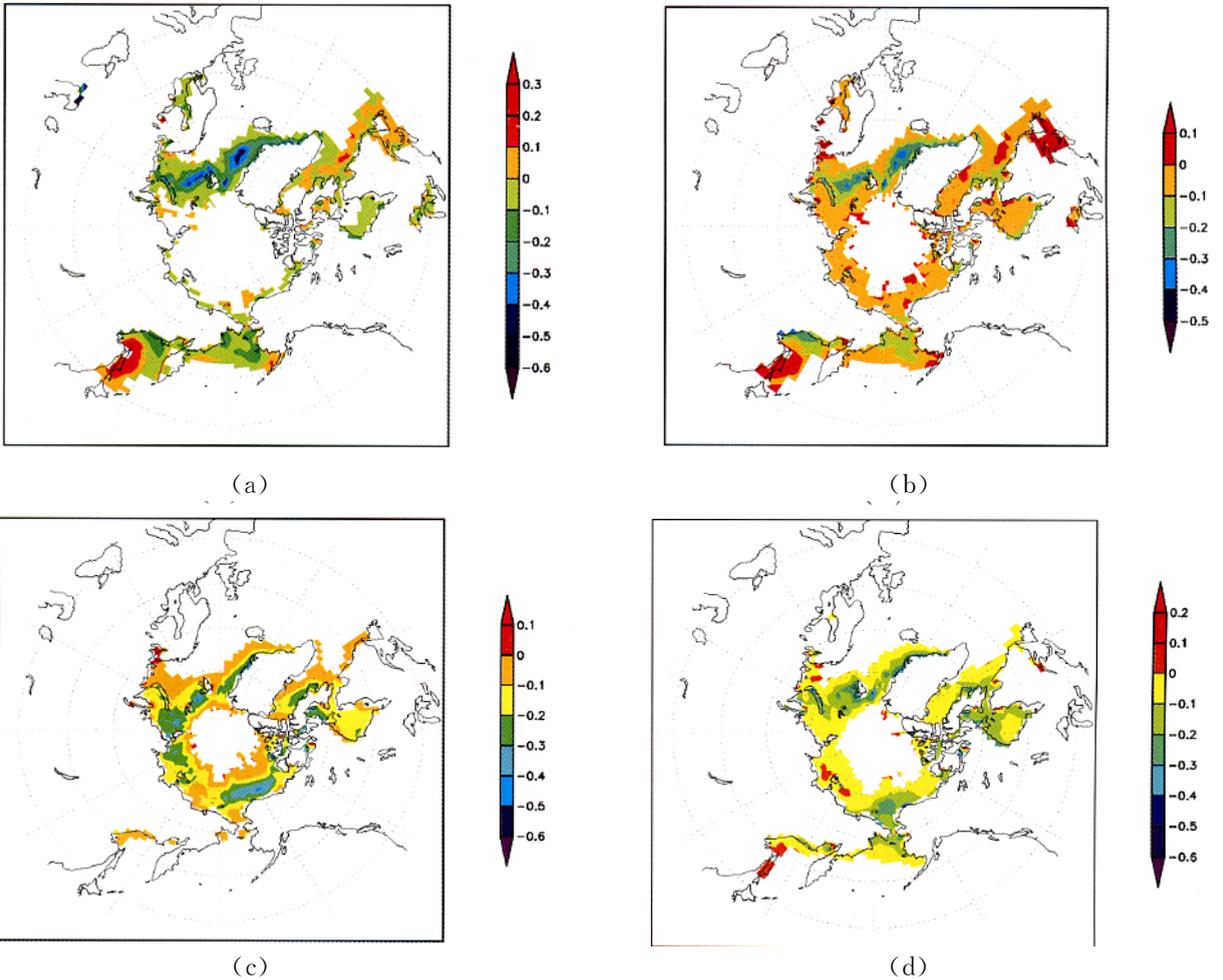


图 6 2 时段海冰密集度平均差值图 (a) 冬季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季

(冬季和春季以 1990 年为分界年, 1991~2000 年海冰密集度平均值减 1968~1990 年平均值; 夏季和秋季以 1994 年为界, 1995~2000 年平均值减 1968~1994 年平均值, 等值线间隔是 0.1 密集度)

Fig. 6 Sea-ice epoch differences between 1991~2000 mean and 1968~1990 mean sea-ice concentration in winter and spring, and 1995~2000 mean and 1968~1990 mean in summer and autumn (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn

夏季, 减少中心在北冰洋边缘海区, 即在喀拉海、拉普捷夫海、楚科奇海和波弗特海, 此外还有格陵兰海和巴伦支海, 中心减少值在 0.3 海冰密集度左右(图 6(c))。

秋季, 减少中心在格陵兰海和巴伦支海, 此外还有北冰洋边缘海区的楚科奇海, 中心值为 0.25 海冰密集度(图 6(d))。

应用 t 检验方法, 对上述 2 时段时间的海冰差值进行 2 组样本平均值差异的显著性检验^[16], 即对北半球海冰进行 20 世纪 90 年代气候突变的检验。结果是格陵兰海和巴伦支海海冰的大范围减少各季节都通过 99% 的信度水平检验; 冬季戴维斯海峡海冰增大区仅有 3 个格点通过 95% 信度检验; 冬季和春季鄂霍次克海的近岸海冰增大区, 也仅少数格点通过 95% 信度检验; 夏季和秋季北冰洋边缘海区海冰的减少, 即喀拉海、拉普捷夫海、楚科奇海和波弗特海海冰减少大范围通过 99% 的信度水平检验(图略)。

综上所述, 海冰有明显的年代际变化, 20 世纪 90 年代以来, 格陵兰海、巴伦支海和北冰洋边缘海区的海冰呈显著减少, 冬季减少值最大, 秋季相对较小。

4 海冰分布型的自相关性和资料质量

海冰的融化和凝结都需要能量的累积, 以前的研究已指出海冰有很好的自相关性^[9~10, 13]。

图 3 和图 4 已显示: 各季海冰第一模态分布型具有季节的连续性, 海冰 EOF 第一模态时间序列的下降趋势也是大体一致的。

应用各季海冰的时间序列, 求算海冰在超前和滞后 1 a 时间内的自相关值, 以讨论海冰分布型的季节持续性, 也反映不同海区海冰的季节联系, 将其结果列于表 1。

表 1 各季海冰时间序列的时滞自相关值

Tab.1 The auto-correlation coefficients between the EOFs sea-ice time series for all seasons

滞后季节数	冬季	春季	夏季	秋季
-3	0.8852	0.7759	0.7728	0.8735
-2	0.7733	0.8187	0.8121	0.8397
-1	0.8532	0.9504	0.8734	0.7919
0	1	1	1	1
1	0.9504	0.8734	0.7919	0.8532
2	0.8121	0.8397	0.7733	0.8187
3	0.8735	0.8852	0.7759	0.7728
4	0.8750	0.8549	0.7214	0.8179

注: 滞后季节数是海冰滞后于相应季节的季节数, 以冬季为例, 当滞后季节数为 -2, 相关值为冬季海冰与前一年夏季海冰的相关; 当滞后季节数为 2, 相关值为冬季海冰与当年夏季海冰的相关。当 $r=0.449$ 或 0.349 时, 达到 $\alpha=0.01$ 或 0.05 的置信水平

从表中可见, 各季海冰都有很好的隔季相关, 也有较好的隔年相关; 所有海冰的自滞相关值都通过 99% 的信度水平检验, 即在任意季节, 前后 1 a 内海冰的 EOF 第一模态分布型之间都有很好的相关联系; 反映虽然各季海冰的分布区域不同, 但是海冰分布型的总体变化趋势却是很一致的, 即全球气候变暖在各海域都有反应, 海冰减少是海冰年际变化的最主要趋势。

各季节之间海冰的相关程度是有差异的, 冬季与春季最为密切, 其相关值达 0.9504, 即春季的海冰范围和密集度分布特征基本与冬季一致, 冬季海冰对春季海冰的分布起着决定性作用。夏季的隔季相关值相对小些, 夏季海冰分布型在很大程度上受春季海冰的影响, 但对秋季海冰的影响则相对较小, 相关值仅为 0.7919, 虽然也通过 $\alpha=0.01$ 的置信水平。

本文是应用海冰密集度资料, 它有较强的资料样本, 能表示海冰范围变化, 但该资料不能确切反映海冰厚度变化。例如在 20 世纪 80 年代中后期, 全球刚进入气候增暖阶段^[1~6], 在夏秋季, 北冰洋边缘各海域海冰范围已出现明显减小(图 3(c, d) 和 4(c, d)); 然而, 当秋冬季来临, 海冰再次形成, 当年的初生冰覆盖了北冰洋边缘海域, 虽然海冰厚度在变薄, 但海冰密集度资料却难以反映其中的差异, 因此图 4 中显示的 80 年代中后期冬季海冰范围的变化不如其他季节明显。

海冰厚度是表达海冰真实状态的重要指数; 海冰厚度具有很大的变化范围, 在北半球海域, 并列存在十几厘米的新生冰和几十米的冰山, 因此考虑海冰厚度, 对海冰厚度分级予以讨论是十分必要的^[21~24], 但目前由于资料限制, 一般应用资料年代较长的海冰密集度资料讨论海冰。

5 结 论

(1) 对整个北半球而言, 在 1968~2000 年间, 海冰减少是主要变化趋势。各季节海冰均出现大范围的减小; 海冰增加范围十分有限。冬春季海冰主要减少区域在格陵兰海和巴伦支海, 夏秋季在北冰洋边缘海域。上述区域也是海冰年际变化最明显区域, 即海冰的趋势变化在海冰的年际总变化中, 占有相当重要的地位, 可达 50% 左右。冬春季主要减少区域在格陵兰海、巴伦支海和白令海; 夏秋季海冰减少是唯一一趋势, 中心在北冰洋边缘的喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海、波弗特海。

(2) 20 世纪 80 年代中后期北极海冰出现明显的减小趋势,在 1997 年以后,海冰又出现突然减少,即海冰的减少主要出现在近 10 a 中,海冰减少在加速,其变化程度已远远超过一般的自然变化。

(3) 海冰有明显的年代际突变现象,20 世纪 90 年代以来,格陵兰海、巴伦支海和北冰洋边缘海区海冰减少值已超过平均值的一半以上,冬季减少值最大,秋季相对较小。

(4) 海冰都有很好的季节持续性,有很强的隔季相关,也有较好的隔年相关;在任何季节,前后一年内海冰的分布型之间有很好的相关联系,即海冰分布型的总体变化趋势是很一致的,海冰的减少也体现分布型特征。

在 1975 年世界气象组织(WMO)的斯德哥尔摩“气候的物理基础及其模拟”的国际学术讨论会中,Kutzbach 就曾预言:在下一世纪中,人为因素导致的这种气候变暖趋势将会增长,北极的大西洋地区可能是一个关键性地区;这一地区的周围实际上是一些严重的热污染和大气污染源地,而且对海冰的变化特别敏感。据推测,人类的活动将会导致该地区海冰面积大幅度减小,从而引起无法预知的气候变化。由于在气候系统内某一部分的变化会通过一些动力和热力过程而导致其它地区的变化,因此,上述的地区性变化实际上具有全球意义。人类活动有可能会使全球范围的气候发生自 100~200 万 a 前人类出现以来所未经历过的变化^[25]。

上述分析证实 30 a 前的“斯德哥尔摩预言”:北极的大西洋地区是气候变暖的关键性地区,格陵兰海和巴伦支海正是北半球海冰减少值最大的区域,海冰的敏感性已显示,人类的活动对海冰的后果也已成事实呈现。

参考文献:

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change. The scientific basis contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [M]. London: Cambridge University Press, 2001. 944.
- [2] Schneider T, Held I M. Discriminations of Twentieth-Century Changes in Earth Surface temperatures [J]. Journal of Climate, 2001, 14: 249-254.
- [3] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv Atmos Sci, 2001, 18 (3): 376-386.
- [4] 李晓燕. 1999 年全球重大气候事件概述 [J]. 气象, 2000, 26(4): 16-17.
- [5] 刘传凤. 2000 年全球重大气候事件概述 [J]. 气象, 2001, 27(4): 18-19.
- [6] Hoerling M, Kumar A. The Perfect Ocean for Drought [J]. Science, 2003, 299: 691-694.
- [7] Cavalieri D J, Gloerson P, Parkinson C L, et al. Observed hemispheric Asymmetry in Global Sea Ice Change [J]. Science, 1997, 278: 1104-1106.
- [8] Vinnikov K Y, Robock A, Stouffer R J, et al. Global warming and North Hemisphere sea ice extent [J]. Science, 1999, 286: 1934-1936.
- [9] Walsh J E, Johnson C M. Interannual atmospheric variability and associated fluctuations in Arctic Sea ice extent [J]. J Geophys Res, 1979, 84 (C11): 6915-6928.
- [10] Fang Z F, Wallace J M. Arctic sea ice variability on a time scale of weeks and Its relation to Atmospheric Forcing [J]. Journal of Climate, 1994, 7: 1897-1914.
- [11] 方之芳, 郭裕福, 乔琪, 等. 北极海冰减少及其与相关气象场的联系 [J]. 高原气象, 2002, (21): 565-575.
- [12] Clara Deser, Walsh J E. Arctic Sea Ice Variability in the Context of Recent Atmospheric Circulation Trends [J]. Journal of Climate, 2000, 13: 617-633.
- [13] 王嘉. 北半球海冰时空变化及其与初夏东亚大气环流的联系 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002. 12-13.
- [14] Fang Z F, Wallace J M. The Relationship between the winter-time Blocking over Greenland and the sea Ice distribution over North Atlantic [J]. Adv Atmos Sci, 1993, 10: 453-464.
- [15] 汪代维, 杨修群. 北极海冰变化的时间和空间型 [J]. 气象学报, 2002, 60: 129-137.
- [16] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2000. 19-28, 135-139.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2002. 62-72.
- [18] Bretherton C S, Smith C, Wallace J M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data [J]. Journal of Climate, 1992, 5: 541-560.
- [19] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies [J]. Journal of Climate, 1992, 5: 561-576.
- [20] Bjorgo E, Johanessen O M, Niles M W [J]. J Geophys Res Lett, 1997, 24: 413-420.
- [21] Kwok R, Rothrock D. Variability of Fram Strait ice flux and North Atlantic Oscillation [J]. J Geophys Res, 1999, 104 (C3): 5177-5189.
- [22] Thorndike A S, Rothrock D S, Maykut G A, et al. The thickness distribution of sea ice [J]. J Geophys Res, 1975, 80: 4501-4513.
- [23] Mastanik J A, Serreze M C, Barry R G. Recent decreases in Arctic summer ice cover and linkages to atmospheric circulation anomalies [J]. J Geophys Res Lett, 1996, 23: 1677-1680.
- [24] Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic sea ice extents, areas and trends, 1978-1996 [J]. J Geophys Res, 1999, 104 (C90): 20837-20856.
- [25] Kutzbach J E. Fluctuations of Climate monitoring and modeling [J]. WMO Bulletin, 1974, 23: 47-54.

The Decrease of the Arctic Sea Ice and the Abrupt Changes of Sea Ice in 1990s

FANG Zhi-fang^{1,2}, ZHANG li³, CHENG Yan-jie⁴

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610071, China;

3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

4. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the Hadlley Centre Arctic sea-ice data for the period 1968~2000, it is found that the decrease tendency of the Arctic sea-ice in the North Hemisphere is very obvious. Since 1968, the sea-ice extent decrease was appeared in the Barents Sea, Greenland Sea and Bering Sea during winter, and the Kola Sea and East Siberia Sea during summer. During 1990s the decrease was suddenly appeared in all areas of the Arctic Ocean, i. e. abrupt change, especially in the Barents Sea and Greenland Sea. The sea ice change over the Arctic Ocean is larger than the normal nature variation. The sea-ice seasonal patterns have the seasonal persistence and high relationship with the pattern before 1~4 seasons. Therefore the Sea-ice decrease tendency should maintain long time during the recent period.

Key words: Arctic sea-ice; decrease tendency of the sea-ice; sea-ice seasonal persistence; abrupt changes of sea ice

欢迎订阅 2006 年《干旱气象》

《干旱气象》是中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办的专业学术期刊, 国内外公开发行人。《干旱气象》辟有研究论文、短论、应用技术报告、研究综述和学术争鸣等栏目, 主要刊登有关干旱气象的最新研究成果、发展动向和趋势; 气象科学各学科具有创造性的论文; 有推广价值的技术经验; 有关国内外气象科技的新理论、新技术、新方法等方面的短论和研究综述。《干旱气象》已被《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版 CAJ-CD)》、万方数据—数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强, 适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。

《干旱气象》为季刊, 2006 年正刊 4 期, 每期定价 16 元, 全年 64 元。欢迎广大读者订阅, 并可以随时邮局款汇购买, 款到开正式发票。

编辑部地址: 甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所《干旱气象》编辑部

邮政编码: 730020 联系电话: 0931-4670216-2270

电子信箱: gsqx@chinajournal.net.cn

银行汇款: 兰州市工商银行拱星墩分理处

户 名: 中国气象局兰州干旱气象研究所

帐 号: 2703001509026401376

邮 汇: 兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所《干旱气象》编辑部