

牛璐, 黄菲, 周晓. 北极海冰的年代际转型与中国冻雨年代际变化的关系[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 105-117, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.010

Niu Lu, Huang Fei, Zhou Xiao. Decadal regime shift of Arctic sea ice and associated decadal variability of Chinese freezing rain[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 105-117, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.010

北极海冰的年代际转型与中国 冻雨年代际变化的关系

牛璐^{1,2}, 黄菲^{1,2,3*}, 周晓^{1,2}

(1. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 山东省高校海洋—大气相互作用与气候重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 宁波大学 宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于 1961—2013 年 HadISST 海冰密集度资料, 定义了北极海冰的季节性融冰指数, 结果显示近几十年来北极季节性融冰范围呈显著的上升趋势, 并分别在 20 世纪 70 年代末和 90 年代中期存在显著的年代际转型, 相应地, 中国冻雨发生频数总体上呈现出显著的减少趋势, 但也存在显著的年代际转型。在 20 世纪 70 年代末之前, 北极季节性融冰范围较小但显著增长, 中国冻雨频数年际变化振幅较大, 且主要受巴伦支海、喀拉海海冰的影响; 20 世纪 70 年代末至 90 年代中期北极季节性融冰范围维持振荡特征, 没有显著的线性趋势, 中国冻雨频数变化振幅减小, 与北极海冰相关较弱, 主要相关因子为北大西洋及北太平洋海表温度变化; 而 90 年代中期以后, 北极海冰融化加快, 特别是 2007 年以后, 季节性融冰范围大大增加, 而中国冻雨频数处于低发时段, 其变化与太平洋扇区海冰及堪察加半岛附近海温呈显著负相关, 季节性融冰的显著区域也从东西伯利亚海逆时针旋转向波弗特海—加拿大群岛北部扩张, 同时向北极中央区扩张。不同年代影响冻雨的海温或海冰关键海区不同, 产生特定的大气环流异常响应, 进而影响到我国冻雨。

关键词: 冻雨; 季节性融冰; 年代际转型; 大气环流异常; 海温

中图分类号: P732.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)11-0105-13

1 引言

近几十年来, 北极海冰快速减少, 且减少速率远大于模式预测^[1]。其中多年冰减少最快, 且范围已扩展到北冰洋中心及加拿大北极群岛附近^[2]。太平洋扇区海冰融化最严重, 2007 年 9 月海冰范围达到极低值, 2012 年 9 月达到有史以来最低值^[3]。1999

年及 2002—2008 年 9 月在楚科奇海, 2005 年及 2006 年在东西伯利亚海均出现大面积开阔水域^[4]。1979—1996 年间北极海冰面积和范围的变化趋势为每 10 年减少 2.2%~3.0%, 1997 年以后则转变为每 10 年减少 10.1%~10.7%^[5]。黄菲等^[6]指出, 1997—2012 年海冰面积减少速率是 1979—1996 年的 2.7 倍, 北极海冰减少趋势在 1997 年前后存在

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-08-10。

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2015CB953904, 2012CB955604); 国家自然科学基金委员会—山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406401)。

作者简介: 牛璐(1990—), 女, 山东省淄博市人, 主要从事气候变化方面的研究。

* 通信作者: 黄菲, 女, 陕西省宝鸡市人, 教授, 主要从事气候动力学研究。E-mail: huangf@mail.ouc.edu.cn

显著年代际转型。

作为大气环流变化的冷源,北极海冰的加速减少必然会导致中高纬度大气环流的异常变化^[4,7-9],进而对我国气候产生重要影响。Liu 等^[10]研究了减少的北极海冰对北美、欧洲及东亚冬季降雪的影响,指出前一年秋季北极海冰范围的减少与中高纬大气环流的阻塞形势增多相联系,同时也导致北极区域水汽含量增多。黄菲等^[6]分析了年代际转型前后北半球冬季中高纬度极端低温的变化特征及相应的大气环流特征,发现 1979—1996 年间极端低温频数分布主要与冬季北大西洋涛动(NAO)相关,1997—2012 年间主要受冬季西伯利亚高压影响。

冻雨作为冬半年一种灾害性降水已经引起各国学者的广泛关注。贵州由于其特殊的地理位置、地形地貌和气候条件,为冻雨高发地带,早期研究较多^[11-14]。2008 年我国发生了大范围的雨雪冰冻灾害,其受灾范围及经济损失可谓 50 年来同类之最^[15-16]。其成因与欧亚大陆持续出现异常环流,南支槽活跃,副高较为偏西偏北,有利于暖湿空气的输送,最终造成我国江南准静止锋维持,产生冻雨天气^[17-18]。李崇银等^[19]指出这次极端天气的直接原因是大气环流的组合性异常。对于冻雨长时间序列的变化,发现 1954—2009 年间我国冻雨显著减少,与乌拉尔山和贝加尔湖阻高、亚洲极涡、西太副高等也有显著相关关系^[20]。但整体来说研究较少,与海温、海冰等外强迫的关系也缺乏系统分析。

2007 年 9 月北极海冰融化严重,紧接着 2008 年 1 月我国发生了大范围的冰冻雨雪灾害,这种联系是偶然的还是存在物理上的相关关系? 如果存在统计关系,北极海冰怎样通过大气环流影响中国冻雨的变化? 针对这些问题,本文研究了北极海冰季节性融冰的变化特征,以及中国冻雨发生频数的变化规律,进而探讨了二者之间的时空联系以及相关的海温和大气环流异常响应特征,并基于此建立了中国冻雨频数的预报模型。

2 资料和方法

本文所用冻雨资料来自国家气象信息中心提供的中国地面气候资料天气现象日值数据集中的雨淞日值记录。该资料经过了较严格的质量控制和检查。为保证数据的连续性,本文对缺测过多台站进行了剔除,最终筛选出 586 站资料。时间长度为 1961 年 1 月至 2013 年 6 月。海温、海冰数据来自哈德莱(Had-

ley)中心 HadISST 数据集中的海表面温度(SST)及海冰密集度(SIC)的月平均记录。格点分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,海温数据时间长度为 1961 年 1 月至 2013 年 6 月,海冰数据延至 2014 年 12 月。大气资料来自美国国家环境预报中心(NCEP)的 NCEP/NCAR Reanalysis 1 的日及月平均资料,格点分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,时间长度为 1961 年 1 月至 2013 年 6 月。所用要素包括 500 hPa 位势高度、近地面温度(SAT)、海平面气压(SLP)等。

由于冻雨是一种冬季降水类型,主要发生在每年 11 月至翌年 3 月,为便于研究,本文将前一年 7 月至当年 6 月作为一个冻雨年循环,期间各台站(共 586 站)发生的冻雨总日数为年总冻雨次数。由此得到了 1962—2013 年共 52 个冻雨年各年总冻雨发生频次。

本文所用方法包括突变检验、回归分析及合成分析等。突变检验包括气候均值突变检验,如 Mann-Kendall 检验及滑动 T 检验^[21];还有气候变率突变检验,这里采用滑动 F 检验方法^[22]。回归分析包括一元线性回归及逐步回归^[23]。

3 北极海冰的年代际转型

3.1 季节性融冰范围的时间变化

近年来随着全球变暖,北极海冰快速融化,多年冰化为季节性的一年冰,北冰洋开阔水域增大,海冰流动性加快,北极海冰变化存在年代际转型^[2,4-6]。北极海冰变化对气候影响较大的是季节性融冰的变化,由于北极海冰范围在每年的 2、3 月份达到最大,9 月份面积最小,为了表征季节性融冰的变化,这里定义北极海冰季节性融冰面积指数,即每年 2—3 月平均的北极海冰面积减去 8—9 月平均的海冰面积。该指数与 Huang 等^[24]定义的北极海冰范围年较差指数类似,它能很好地表征北极海冰快速融化过程中每年结冰速率和融冰速率差异产生的季节性融冰变化,可从另一个角度更好地理解北极海冰的变化特征。

图 1 为北极海冰季节性融冰面积指数随时间的变化。为验证 HadISST 资料可信度,我们与美国冰雪中心(NSIDC)数据作了对比(图 1 灰色实线)。除个别年份,两种资料变化规律基本一致。整体来看,50 年来该面积指数呈增加趋势,超过了 0.01 的显著性水平;20 世纪 60 年代约为 $7 \times 10^6 \text{ km}^2$,2007 年以后在 $10 \times 10^6 \text{ km}^2$ 左右,表明北极海冰季节性融冰面积增大。具体来说,1979 年以前,季节性融冰面积较小,且呈增加趋

势, 均值为 $7.4 \times 10^6 \text{ km}^2$, 线性倾向系数为 $0.056 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$, 超过 0.05 的显著性水平。1979 年该序列出现显著增加, 且超过 0.01 的显著性水平(图 2a, b), 之后至 1995 年北极季节性融冰范围振荡维持, 没有显著的趋势。1996 年该序列有一弱的突变减少(图 2a), 之后转为阶梯型的 5~6 a 周期的波动; 同时面积指数增速

加大, 线性倾向系数为 $0.121 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$, 超过 0.01 的显著性水平; 同时年际振幅加大, 尤其在 2007 年以后, 融冰面积显著增大, 与 2006 年相比, 增幅超过 $1.7 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。因此本文将该序列分为 3 个时间段, 即 1961—1978 年, 1979—1995 年, 1996—2013 年, 针对每个时间段分别进行分析。

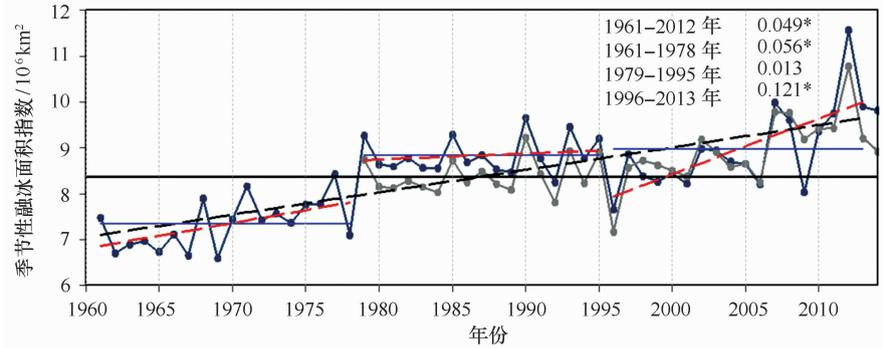


图 1 北极海冰季节性融冰面积指数随时间的变化

Fig. 1 The time series for Arctic sea ice seasonal melting area index

蓝色实线为 HadISST 数据, 代表各年代段均值; 灰色实线为 NSIDC 数据; 红色虚线代表各年代段趋势; 右上数值代表各年代段线性倾向系数; * 表示超过 0.05 的显著性水平

The blue line from HadISST dataset, represent average of each decade; the grey line from NSIDC dataset; the red dashed line represent trend of each decade; top right corner number represent linear trend coefficient; star means passing 0.05 significance level

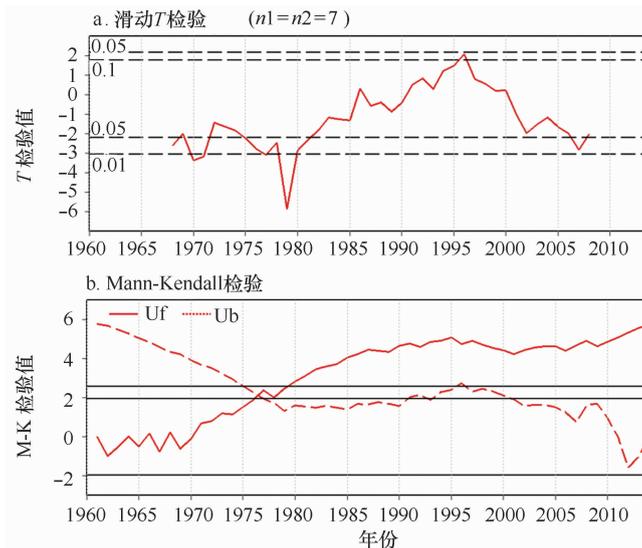


图 2 北极海冰季节性融冰面积指数序列的滑动 T 检验(a)及 Mann-Kendall 检验(b), 其中 U_f 和 U_b 分别代表正序列和逆序列的统计检验量

Fig. 2 The moving T test (a) and Man-Kendall test (b) for Arctic sea ice seasonal melting area index, the U_f and U_b in b denote the sequence and inverted sequence of statistical test variables, respectively

3.2 季节性融冰的空间变化

用前文定义的北极海冰季节性融冰面积指数序列与空间各点的海冰密集度(SIC)的冬夏差值(每年 2

—3 月平均减 8—9 月平均)作回归, 得到各年代时段内季节性融冰的空间分布特征(图 3)。从整个时间段来看(图 3a), 除格陵兰岛以东沿岸至巴伦支海一线

地区为负值外,北极大部分海区,尤其是太平洋扇区波弗特海、楚科奇海、东西伯利亚海及拉普捷夫海等地区海冰变化与季节性融冰面积指数为同位相变化,表明该指数的变化主要由这些区域海冰的季节性融化决定。在不同的年代阶段,1961—1978 年间主要海区为拉普捷夫海及东西伯利亚海一带,白令海及巴伦

支海以北海区也有显著正异常;1979—1995 年间则集中在西伯利亚向东至阿拉斯加沿岸以北整个海域;1996 年以后,太平洋扇区季节性融冰面积显著增大,显著海区向东扩展至加拿大北极群岛,同时向北冰洋中央区也有显著扩展。由此说明 1996 年以后北极海冰的季节性融冰面积也存在显著年代际转型。

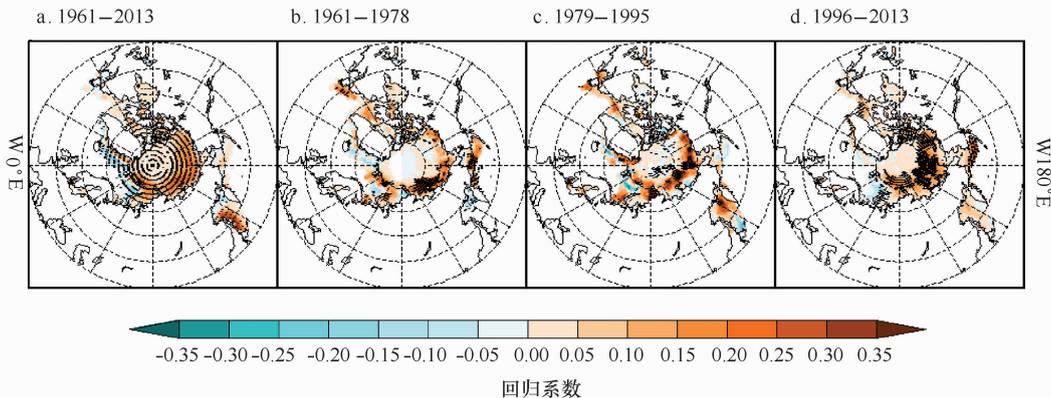


图 3 北极海冰季节性融冰面积指数与海冰密集度冬夏差异的回归场的空间分布(打点区域超过 0.05 的显著性水平)

Fig. 3 Spatial pattern of regression between Arctic sea ice seasonal melting area index and difference of maximum SIC and minimum SIC of last year (the dotted area passes 0.05 significance level)

4 中国冻雨的年代际变化

4.1 中国冻雨年频数的时间变化

图 4 为标准化的年总冻雨发生频数随时间的变化。整体来看,冻雨呈减少趋势,线性倾向系数为 $-0.03/a$,且超过了 0.05 的显著性水平。但是不同年代内冻雨变化不尽相同。滑动 T 检验(图 5a)结果表明冻雨频数在 1997 年出现显著突变,且超过 0.01 的显著

性水平。1997 年之前发生频数大部分在 0 值以上波动,1997 年之后基本在 0 值以下波动。Man-Kendall 检验(图 5b)也表明自 1997 年前后年总冻雨次数出现显著减少,超过 0.05 的显著性水平。综上,本文认为中国冻雨在 1997 年前后出现了年代际转型。另外,对该序列作滑动 F 检验(图 5c),结果表明在 1980 年前后出现了方差突变,且显著性水平接近 0.01。1980 年以前年际变率振幅较大,1980 年以后则年际变率较小。

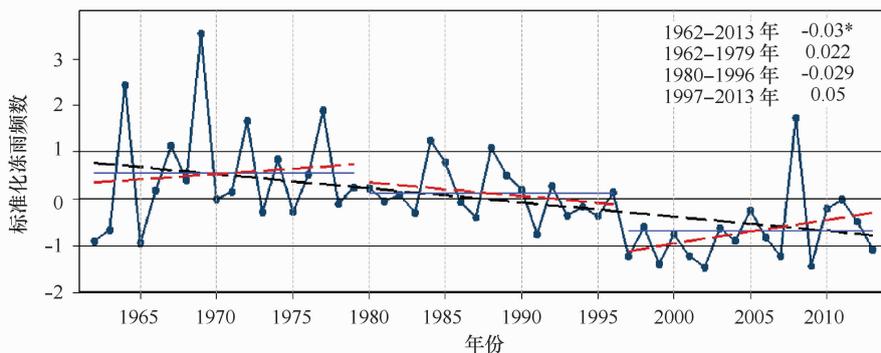


图 4 标准化的年总冻雨发生频数随时间的变化

Fig. 4 Temporal evolution of standardized freezing rain frequency

蓝实线代表各年代段均值;红虚线代表各年代段趋势;黑实线代表整体均值;黑虚线代表整体趋势;右上数值代表各年代段线性倾向系数;*表示超过 0.05 的显著性水平

The blue solid line represent average of each decade; the red dashed line represent trend of each decade; the black solid line represent overall average; top right corner number represent linear trend coefficient; star means passing 0.05 significance level

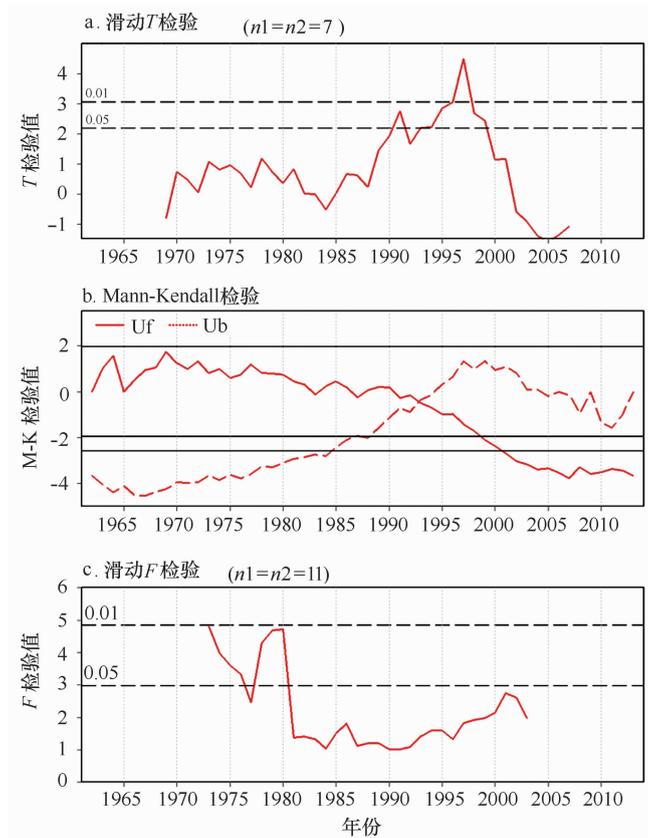


图5 标准化的年总冻雨发生频数的滑动 T 检验(a), Man-Kendall 检验(b)和滑动 F 检验(c), 其中 U_f 和 U_b 分别代表正序列和逆序列的统计检验量

Fig. 5 The moving T test (a), Man-Kendall test (b), and the moving F test (c) of standardized freezing rain frequency, the U_f and U_b in b denote the sequence and inverted sequence of statistical test variables, respectively

因此, 中国冻雨的频数变化也存在 3 个时间段的年代际变化, 1962—1979 年间冻雨频数年际变率较大, 冻雨有弱的增加趋势(线性倾向系数 0.022); 1980—1996 年间年际变率减小, 冻雨呈减少趋势(线性倾向系数 -0.029); 1997 年以后冻雨突然减少, 之后冻雨呈增加趋势(线性倾向系数 0.05, 超过 80% 的信度检验)。值得注意的是, 2008 年中国南方大范围的冻雨灾害是非常极端的个例, 虽然历史上曾在 1964, 1969 和 1977 年冬均出现过比 2008 年更多的冻雨发生, 但在 20 世纪 70 年代末以来全球变暖冻雨频数大幅度减少的背景下, 2008 年冬季的冻雨发生是最多的一次。

中国冻雨出现的这种年代际变化与北极季节性海冰的年代际转型有着非常一致的年代际变化特征, 表明中国冻雨发生背景的年代际变化可能与北极海冰异常造成的中高纬度大气环流异常相联系。因此后文中将重点从这 3 个不同年代背景下探讨北极海冰变化影响中国冻雨的可能途径。

4.2 中国冻雨频数的空间分布

图 6 为各年代时段中国冻雨频数趋势的空间分布。整体来看(图 6d), 1962—2013 年间, 除辽宁、新疆地区部分台站及内蒙古地区部分台站冻雨日数略有增加外, 我国大部分地区年冻雨日数为减小趋势。且黄河流域以南、长江流域以北各台站及东北中部地区减少趋势显著, 通过 0.05 的显著性水平。长江流域以南等地区虽为减少趋势, 但趋势不显著。对 3 个阶段各站年冻雨日数的趋势进行分析发现(图 6a~c), 与总减少趋势分布相比, 各时间段内冻雨的趋势变化差异较大。1962—1979 年间, 冻雨趋势的空间分布为带状相间分布。36°N 的黄河中下游流域以北大部分地区冻雨为减少趋势, 以南为增加趋势; 长江中下游流域为减少趋势, 再南部则为增加趋势。1980—1996 年, 全国大部地区冻雨为减少趋势, 且贵州、湖南减少趋势显著, 只有辽宁、中国东部部分地区为增加趋势。1997 年以后, 中国北部大部地区为减少趋势, 南部大部地区为增加趋势, 且趋势较显著。可以认

为,1997 年的年代际转型以后,对于中国南方大部,各站冻雨从减少趋势变为增加趋势。

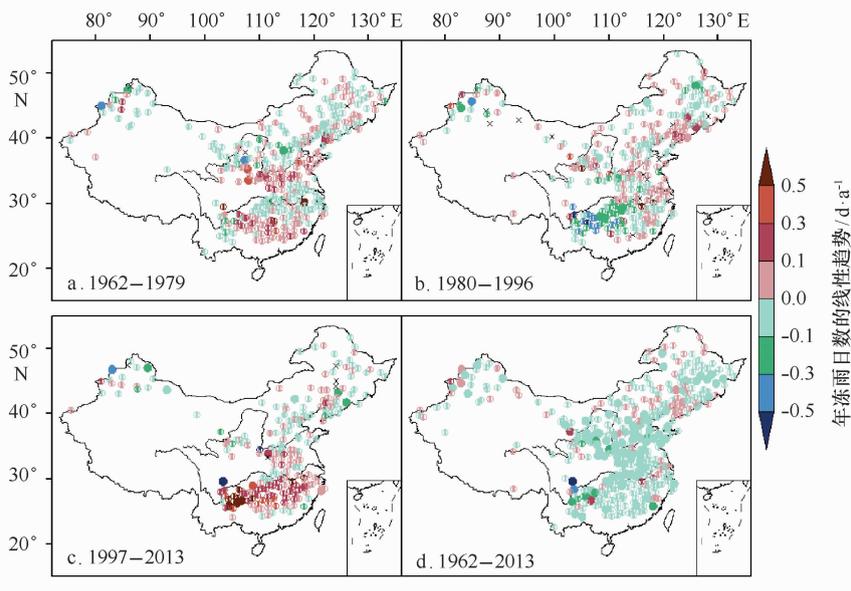


图 6 不同时间段年冻雨日数趋势的空间分布(实心圆表示超过 0.05 的显著性水平)

Fig. 6 The spatial pattern of the trend of annual mean freezing rain days (solid round passes 0.05 significance level)

5 冻雨发生频数与北极海冰年代际变化的时空联系

5.1 冻雨变化与北极季节性融冰的关系

图 7 为各年代内冻雨总发生频数与前一年海冰季节性融冰指数的空间相关场分布。从整个时间段来看(图 7a),冻雨总频数与冰岛以北至巴伦支海以北一线海区为正相关关系,与西半球海区融冰指数为显

著负相关关系。对不同年代段分别分析发现(图 7b~d),不同年代的空间分布差异较大。1962-1979 年间在拉普捷夫海域附近有两处显著正相关海区;而 1980-1996 年间除楚科奇海西北部分海域为显著负相关外,没有显著相关海区;1997-2013 年间相关海区又发生了变化,在太平洋扇区 80°N 附近出现大片显著正相关海区,说明 1997 年以后中国冻雨变化与太平洋扇区海冰快速融化有密切联系。

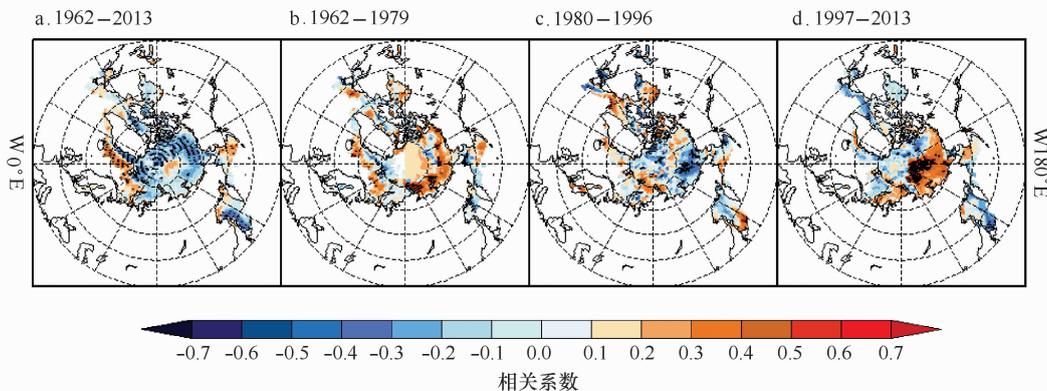


图 7 冻雨总发生频数与前一年海冰季节性融冰指数的相关场的空间分布 (打点区域超过 0.05 的显著性水平)

Fig. 7 Spatial pattern of correlation between freezing rain frequency and difference of maximum SIC and minimum SIC of last year(the dotted area passes 0.05 significance level)

5.2 冻雨变化与海表温度、海冰密集度的空间相关

图 8、图 9 为去趋势标准化的年总冻雨发生频数与不同季节海温、海冰的回归分布。与原标准化序列对应的空间分布相比,两者空间分布一致,说明冻雨变化与海温及海冰的年际关系较为突出。对比发现,1962—1979 年间,冻雨变化与海温的关系较不显著。仅前一年夏季北大西洋中纬度海区存在负异常,前一年秋季北太平洋海区存在正异常。与海冰的关系较显著,前一年秋季巴伦支海、喀拉海一带海冰有显著正异常。1980—1996 年间,与海冰关系较弱,而热带海温影响显著增强。前一年夏季赤道太平洋及印度洋海区存在显著正异常;北大西洋格陵兰岛以南海域

海温有显著正异常;北太平洋海域为负异常。而 1997—2013 年间,海冰的主要影响海区又产生变化,关键海区主要集中在太平洋扇区。前一年夏季堪察加半岛以东海温存在显著负异常,前一年夏季开始楚科奇海至北冰洋中心海域为负异常,前一年秋季显著性达到最大。结合前面分析的北极季节性海冰的变化,可以发现中国冻雨的发生在 20 世纪 70 年代末之前和 90 年代中期之后主要与北极海冰的融化、季节性融冰的增多显著相关,而 70 年代末到 90 年代中期这段时间正是全球变暖最快的年代,中国冻雨的变化则主要与热带及中纬度海温的关系更密切。

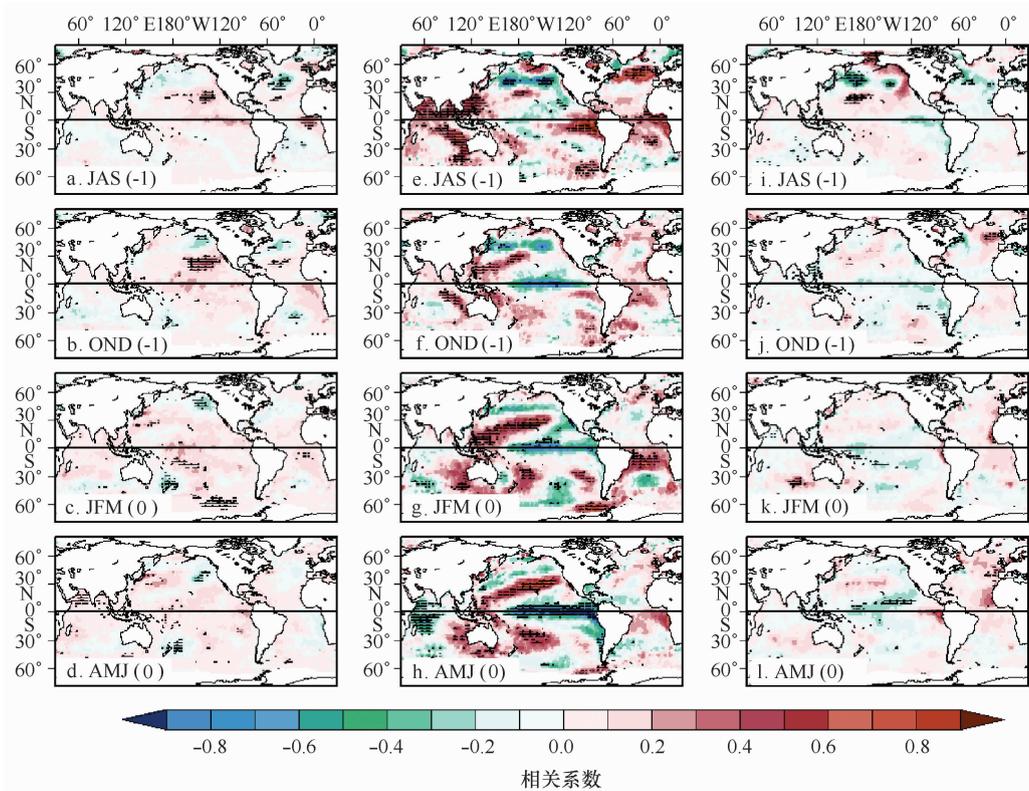


图 8 去趋势的标准化年总冻雨发生频数与从前一年夏(JAS(-1))、种(OND(-1))到当年冬(JFM(0))、春(AMD(0))不同季节海温的回归分布(a~d:1962—1979年,e~h:1980—1996年,i~l:1997—2013年,打点区域超过0.05显著性水平)

Fig. 8 Spatiational patterns of regression between detrended standardized freezing rain occurrences and SST in different seasons from previous summer (JAS(-1)), autumm (OND(-1)) to the following winter (JFM(0)) and spring (AMD(0))(a~d:1962—1979,e~h:1980—1996,i~l:1997—2013,the dotted area passed 0.05 significance level)

5.3 冻雨频数预报模型的建立和影响因子分析

为了更直观地找出影响中国冻雨频数变化最主要的相关性因子,本文选取前文研究中 8 个代表性海

区的海表温度和海冰密集度作为预报因子,应用逐步回归方法对不同年代分别建立冻雨频数的预报方程,得到不同年代内影响中国冻雨发生的主要因子。所

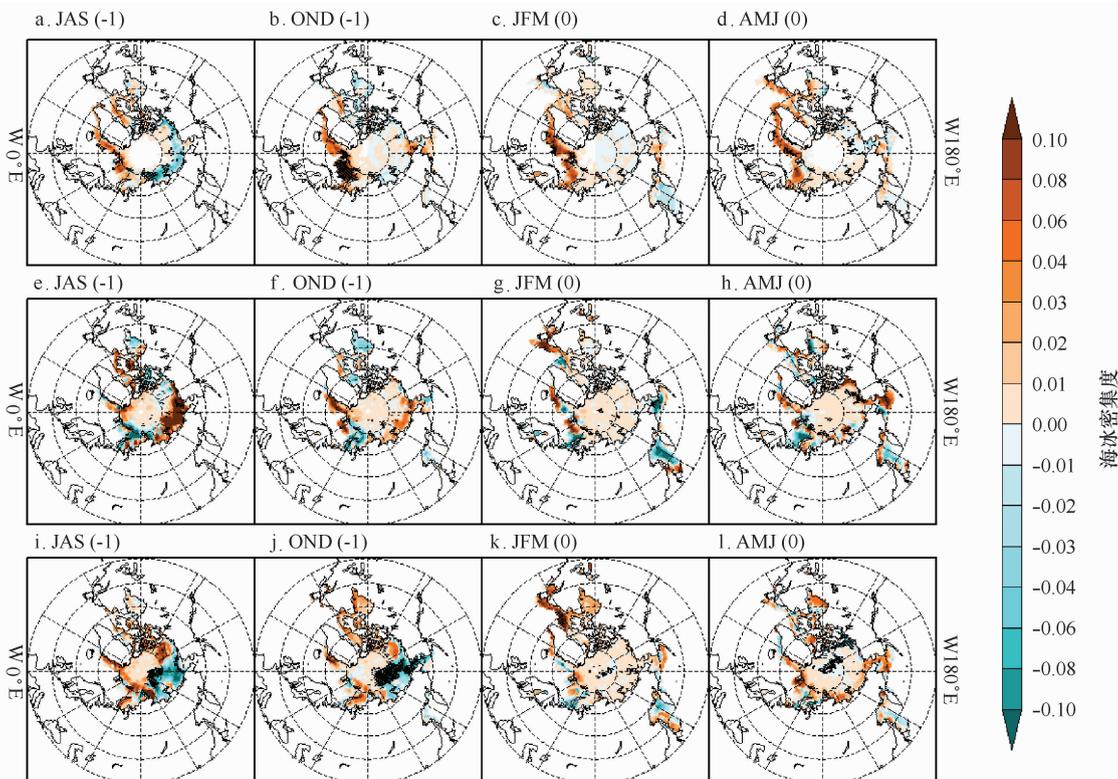


图9 去趋势的标准化年总冻雨发生频数与不同季节的海冰的回归分布

(a~d:1962—1979年,e~h:1980—1996年,i~l:1997—2013年,打点区域超过0.05显著性水平)

Fig. 9 Spatical patterns of regression between detrended standardized freezing rain occurrences and SIC in different seasons (a~d:1962—1979,e~h:1980—1996,i~l:1997—2013; the dotted areas passed 0.05 significance level)

选关键海区信息如表1所示,结果如下。

表1 关键海区信息

Tab. 1 The information of the key areas

因子	季节	海区位置
X1	SST 前夏/JAS(-1)	48°~60°N,40°W~0° 北大西洋
X2	SST 前夏/JAS(-1)	30°~45°N,60°~30°W 北大西洋
X3	SST 前夏/JAS(-1)	20°~35°N,160°~130°W 北太平洋
X4	SST 前夏/JAS(-1)	37°~51°N,155°E~180° 北太平洋
X5	SST 前夏/JAS(-1)	0°~22°N,75°~130°E 热带印度洋
X6	SST 前夏/JAS(-1)	0°~10°S,90°~80°W 赤道东太平洋
X7	SIC 前秋/OND(-1)	73°~78°N,20°~60°E 大西洋扇区
X8	SIC 前秋/OND(-1)	76°~86°N,150°E~170°W 太平洋扇区

1962—1979年间,最优预报因子为 X_7 ,复相关系数为0.761,均方差无偏估计量为0.796, F 统计量为22.06。标准化的预报方程为: $\hat{Y}=0.761X_7$ 。

1980—1996年间,最优预报因子为 X_1 、 X_4 ,复相关系数为0.741,均方差无偏估计量为0.386, F 统计

量为8.549。标准化的预报方程为: $\hat{Y}=0.55X_1 - 0.415X_4$ 。

1997—2013年间,最优预报因子为 X_4 、 X_8 ,复相关系数为0.846,均方差无偏估计量为0.436, F 统计量为17.58。标准化的预报方程为: $\hat{Y}=-0.356X_4 -$

0.66 X_8 。

图 10 为拟合序列的变化与原冻雨序列变化的对比图, 由图可知各年代段各预报因子分别拟合效果较好。由上可知, 不同年代影响冻雨的海温、海冰的主要海区是不同的。1962—1979 年为巴伦支海、喀拉海海冰, 且为正相关关系。1980—1996 年间为北大西洋中高纬度海温及堪察加半岛以东海温, 且与大西洋海温变化呈正相关, 与太平洋海温变化呈负相关。1997—2013 年间, 主要影响海区均集中在太平洋, 尤其是

2008 年冻雨灾害的显著增多与 2007 年太平洋扇区海冰的减少关系密切。此阶段若堪察加半岛附近海温降低, 太平洋扇区海冰减少, 则冻雨灾害增多。这与近几十年来海冰变化是一致的, 北极海冰在 1997 年存在显著的年代际转型, 1997 年以后太平洋扇区海冰融化显著增多。由此可能造成了整个大气环流的变化, 从而使影响我国冻雨变化的关键海区向太平洋扇区转移。

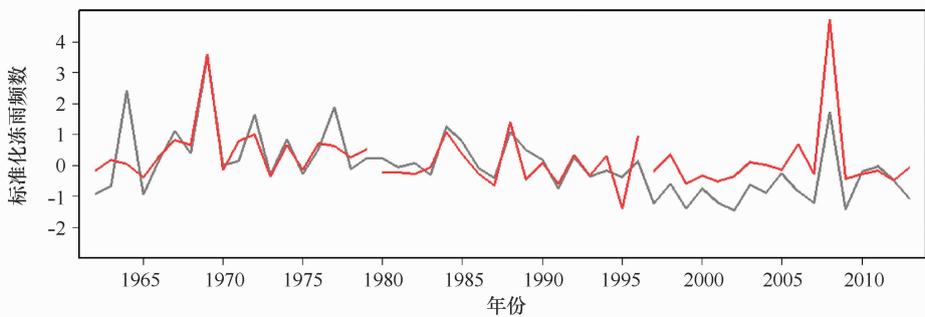


图 10 3 个时间段由预报方程拟合得到的标准以冻雨频数曲线(红色)及原冻雨变化曲线(灰色)对比

Fig. 10 The fitting series (red) and the freezing rain occurrences (grey) in three time periods

5.4 北极海冰影响中国冻雨变化的大气桥

为更好地分析冻雨频数较多时的背景环流形势, 本文以 1 倍均方差为界, 大于 1 的年份规定为冻雨多年, 小于 -1 的年份规定为冻雨少年, 得到 8 个冻雨多年, 7 个冻雨少年。冻雨多年年份为: 1964, 1967, 1969, 1972, 1977, 1984, 1988, 2008 年; 冻雨少年的年份为 1997, 1999, 2001, 2002, 2007, 2009, 2013 年。除 2008 年外, 冻雨多年均在 1997 年年代际转型之前, 冻雨少年均在 1997 年以后。可见 1997 年以前为冻雨多发期, 1997 年以后为冻雨少发期。

对冻雨多、少年冬季 500 hPa 位势高度异常分别进行合成(图 11), 发现冻雨频数较多的年份乌拉尔山地区位势高度异常偏高, 对应高空西风减弱, 经向环流加大; 同时贝加尔湖以南地区位势高度异常偏低, 更有利于冷空气入侵我国; 鄂霍茨克海上空位势高度偏低, 使东亚大槽加深, 也有利于冷空气的入侵; 这些区域均超过 0.05 的显著性水平。另外东南沿海位势高度异常偏高, 使西太平洋副热带高压偏西偏北, 有利于冷暖空气作用在我国长江中下游地区, 进而产生冻雨灾害。而冻雨少年时, 整个中国中南部上空位势高度异常偏高, 不利于冷暖空

气在我国上空交汇, 不利于冻雨产生。

图 12 给出了冻雨变化与 500 hPa 位势高度的回归分布, 以进一步研究相应的大气环流变化情况。1962—1979 年间, 冬季整个回归分布类似欧亚(EU)遥相关型, 欧洲及日本为正异常, 里海的中高纬度地区为负异常; 整个波列自巴伦支海、喀拉海一带向我国延伸。这个分布与前文适宜冻雨灾害产生的背景环流一致, 从而造成冻雨增多。1980—1996 年间, 主要呈现出自格陵兰岛以南海区向我国延伸的波列分布; 西欧为负异常, 正异常地区东移, 位于乌拉尔山一带, 贝加尔湖以南至 30°N 为负异常, 30°N 以南为正异常, 从而造成冻雨灾害增多。1997—2013 年冬季整个环流分布与 1997 年之前差别较大, 波列自极地向南延伸至我国; 欧亚大陆 500 hPa 位势高度呈南北反位相分布; 贝加尔湖以北为正异常, 以南为负异常, 进而导致我国冻雨灾害增多。这表明 1997 年之前与冻雨相联系的大气环流主要受大西洋扇区海冰或海温影响; 而 1997 年以后, 大气环流分布受太平洋扇区海冰融化影响显著, 太平洋扇区海冰的融化可能是造成大气环流南北反位相分布的主要影响因子。

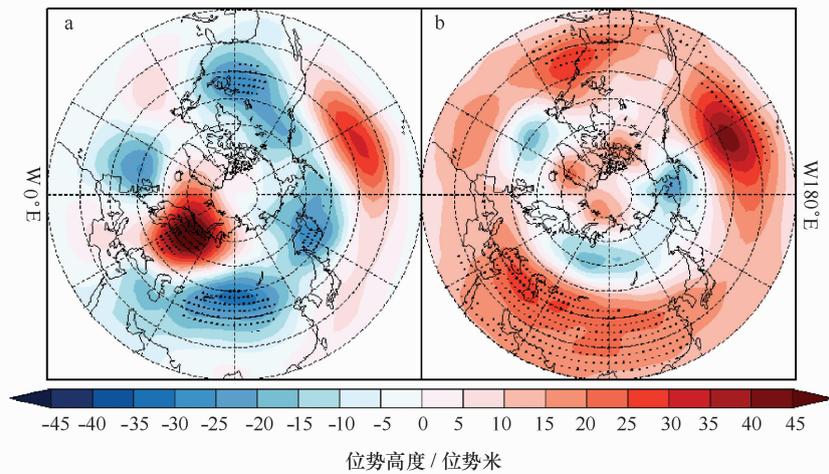


图 11 冻雨多年与少年的冬季(DJF)500 hPa 位势高度异常合成场

(a. 冻雨多年异常场, b. 冻雨少年异常场, 打点区域超过 0.05 的显著性水平)

Fig. 11 Composite pattern of 500 hPa geopotential height anomaly in winter (DJF)

(a. the year of more freezing rain, b. the year of less freezing rain, the shaded area pass the 0.05 significant level)

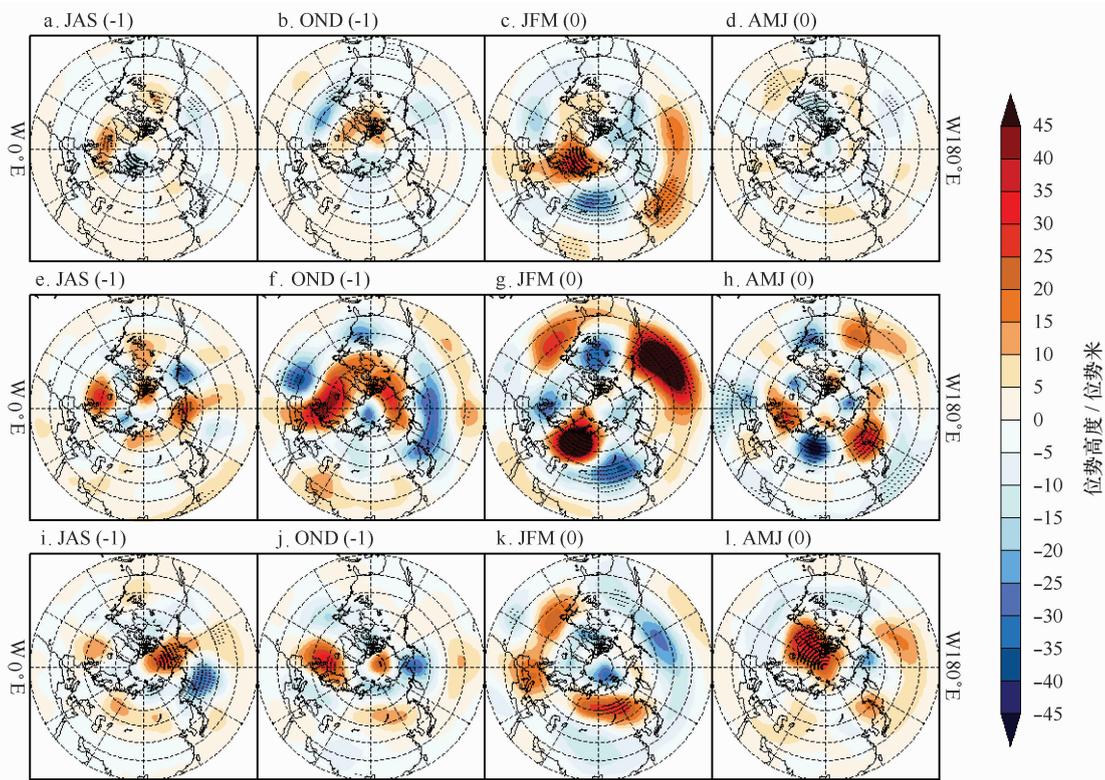


图 12 去趋势标准化的冻雨总次数与不同季节的 500 hPa 位势高度的回归

(a~d: 1962—1979 年, e~h: 1980—1996 年, i~l: 1997—2013 年, 打点区域过 0.05 显著性水平)

Fig. 12 The spatial patterns of regression between detrended standardized freezing rain occurrences and 500 hPa geopotential height in different seasons

(a~d: 1962—1979, e~h: 1980—1996, i~l: 1997—2013, the dotted areas passed 0.05 significance level)

6 结论

本文定义了北极海冰季节性融冰指数,在此基础上分析了近几十年来北极海冰季节性融冰范围随时间的变化及其空间分布特征。发现北极海冰在20世纪70年代末及90年代中期存在显著年代际转型。1961—1978年间,北极海冰季节性融冰面积较小,但呈显著增加趋势;1979—1995年间,北极季节性融冰范围振荡维持,且没有显著的趋势;1996年以后,转为阶梯型的5~6 a周期的波动,且融冰面积快速增加。对应空间上,季节性融冰的显著区域从北冰洋亚洲北岸的东西伯利亚海一带逐渐逆时针旋转向波弗特海—加拿大群岛北部扩张,同时向北极中央区扩张。

对冻雨变化的研究发现,我国冻雨总频数存在与北极海冰季节性融冰指数变化较为一致的年代际变化。1962—1979年间冻雨频数年际变化振幅较大,1980—1996年冻雨频数变化振幅减小,1997年以后冻雨频数处于低发时段,但存在上升趋势。对不同年

代间冻雨变化与海温、海冰的关系进行研究发现,中国冻雨的发生在20世纪70年代末之前和90年代中期之后主要与北极海冰的融化,季节性融冰的增多显著相关;1979年以前最主要影响因子为北大西洋扇区海冰,1997年以后则主要受太平洋扇区海冰影响。而20世纪70年代末到90年代中期这段时间正是全球变暖最快的年代,中国冻雨的变化则主要与热带及中纬度海温的关系更密切。

为探究海冰融冰面积的年代际变化与冻雨的年代际变化是否存在物理上的必然联系,本文结合其背景环流进行了探究。发现冻雨发生时对应着特定的背景环流,冻雨过程受海洋海温及大气环流的通道影响,海温及海冰的关键海区通过遥相关关系间接影响中国冻雨天气。

由此认为,海冰的年代际转型可能是造成冻雨年代际转型的主要原因。但冻雨灾害的成因及变化较为复杂,是多个气候系统相互作用的产物,有待于更深入的分析研究。

参考文献:

- [1] Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9): L09501.
- [2] Maslanik J, Stroeve J, Fowler C, et al. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13502.
- [3] Parkinson C L, Comiso J C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(7): 1356—1361.
- [4] Overland J E, Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice[J]. *Tellus A*, 2010, 62(1): 1—9.
- [5] Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01703.
- [6] 黄菲, 狄慧, 胡蓓蓓, 等. 北极海冰的年代际转型及极端低温变化特征[J]. *气候变化研究快报*, 2014, 3(2): 39—45.
Huang Fei, Di Hui, Hu Beibei, et al. Decadal regime shift of Arctic sea ice and corresponding changes of extreme low temperature[J]. *Climate Change Research Letters*, 2014, 3(2): 39—45.
- [7] Zhang X, Sorteberg A, Zhang J, et al. Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(22): L22701.
- [8] Francis J A, Chan W, Leathers D J, et al. Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): L07503.
- [9] Screen J A, Simmonds I, Deser C, et al. The atmospheric response to three decades of observed Arctic sea ice loss[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(4): 1230—1248.
- [10] Liu J, Curry J A, Wang H, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(11): 4074—4079.
- [11] 许丹, 罗喜平. 贵州凝冻的时空分布特征和环流成因分析[J]. *高原气象*, 2003, 22(4): 401—404.
Xu Dan, Luo Xiping. Time and space characters of congeal in Guizhou and circulation features analyses[J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(4): 401—404.
- [12] 叶茵, 杜小玲, 严小冬, 等. 贵州冻雨时空分布及对应临近环流特征分析[J]. *贵州气象*, 2007, 31(6): 11—13.
Ye Yin, Du Xiaoling, Yan Xiaodong, et al. Time and space characters of congeal in Guizhou and circulation features analyses nearby[J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2007, 31(6): 11—13.
- [13] 严小冬, 吴战平, 古书鸿, 等. 贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素浅析[J]. *高原气象*, 2009, 28(3): 694—701.
Yan Xiaodong, Wu Zhanping, Gu Shuhong, et al. Analyses on the space-time distribution characteristics and their influence factors of freezing rain in Guizhou Province[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3): 694—701.
- [14] 张艳梅, 顾欣, 陈海涛, 等. 贵州高原西北部冻雨的时空变化特征[J]. *资源科学*, 2011, 33(3): 477—482.

- Zhang Yanmei, Gu Xin, Mei Haitao, et al. Temporal and spatial characteristics of freezing rain days over the northwestern Guizhou Plateau[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 477–482.
- [15] 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估[J]. 气象, 2008, 34(4): 95–100.
Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in south China during January 2008: I. climatic features and its impact[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(4): 95–100.
- [16] 赵琳娜, 马清云, 杨贵名. 2008 年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 556–566.
Zhao Linna, Ma Qingyun, Yang Guiming. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(4): 556–566.
- [17] 陶诗言, 卫捷. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 337–350.
Tao Shiyuan, Wei Jie. Severe snow and freezing rain in January 2008 in the southern China[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(4): 337–350.
- [18] 赵思雄, 孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 351–367.
Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January–February 2008[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(4): 351–367.
- [19] 李崇银, 杨辉, 顾薇. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(2): 113–122.
Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over south China in January 2008[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(2): 113–122.
- [20] 王遵亲. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析[J]. 大气科学, 2011, 35(3): 411–421.
Wang Zunyan. Climatic characters and changes of ice freezing days in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2011, 35(3): 411–421.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 57–66.
Wei Fengying. Modern Climate Statistics and Forecast Technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 1999: 57–66.
- [22] 陈广才, 谢平. 水文变异的滑动 F 识别与检验方法[J]. 水文, 2006, 26(2): 57–60.
Chen Guangcai, Xie Ping. Slide F test of Change-Point Analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(2): 57–60.
- [23] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 28–36.
Huang Jiayou. Statistical Analysis and Forecasting Method of Meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2004: 28–36.
- [24] Huang Fei, Shan Xiaolin, Fan Tingting. Decadal change of annual range for the Arctic sea ice in recent 30 years[C]//Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE–2011. Maui, Hawaii, USA, 2011: 978–985.

Decadal regime shift of Arctic sea ice and associated decadal variability of Chinese freezing rain

Niulu^{1,2}, Huang Fei^{1,2,3}, Zhou Xiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Ocean-Atmospheric Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the HadISST sea ice concentration (SIC) data from 1961–2013, we define the Arctic sea ice seasonal melting index and analyze the spatial and temporal characteristics of Arctic sea ice seasonal melting extent. It turns out that in recent decades there are two significant decadal regime shift, late 1970s and the middle of 1990s respectively. Before the late 1970s, the oscillation of Arctic sea ice extent was decrease under the background of global warming, the seasonal melting extent (SME) was small but increased significantly; during the late 1970s and the middle of 1990s, the oscillation of the SME was maintain and had no significant trend; while after the middle of 1990s, although there is a hiatus of the global warming, the melting of Arctic sea ice is accelerating, especially after 2007, during which Arctic sea ice SME is greatly increased. Besides that, as the time goes by, the significant SME area expanded anticlockwise from the East Siberia sea to Beaufort Sea-north Canadian Arctic Archipelago gradual-

ly, and expand to the central Arctic at the same time. Correspondingly, the total frequency of Chinese freezing rain (CFR) is decreasing during the past several decades and also has significant decadal regime shift. The inter-annual amplitude of the total frequency of CFR was large during 1962–1979, then turned small during 1980–1996, with close relation to SST instead of sea ice. After 1997 the total frequency of CFR is at a low stage, but is increasing, which may mostly be influenced by Arctic sea ice variability. The key area of SST or SIC that influence CFR are different during different decadal epochs, resulting in certain atmospheric background circulation anomalies. There is a consistency between the change of CFR and the SME, which means that the decadal regime shift of the Arctic sea ice may be the cause of the decadal regime shift of Chinese freezing rain.

Key words: freezing rain; seasonal melting sea ice; decadal regime shift; atmospheric circulation anomaly; sea surface temperature