

焦洋, 游庆龙, 林厚博, 等. 2017. 夏、秋季北极海冰异常与秋、冬季青藏高原极端低温日数的关系及影响机理 [J]. 气候与环境研究, 22 (4): 435–445. Jiao Yang, You Qinglong, Lin Houbo, et al. 2017. Relationship of Arctic sea ice coverage anomalies in summer–autumn and extreme cold days over the Tibetan Plateau in autumn–winter and the mechanism [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 435–445, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15170.

夏、秋季北极海冰异常与秋、冬季青藏高原极端低温日数的关系及影响机理

焦洋^{1,2,3} 游庆龙^{1,3,4} 林厚博^{1,3} 闵锦忠^{1,4}

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 济南市气象局, 济南 250102

³ 南京信息工程大学中英气候变化与评估研究所, 南京 210044

⁴ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 利用 1979~2012 年青藏高原 125 个基本、基准站观测日最高及最低气温数据、Hadley 中心月平均海冰覆盖率资料、ERA-Interim 的风场、高度场等再分析资料, 根据相关统计分析、合成分析等方法系统地分析了青藏高原地区秋、冬季冷昼和冷夜日数(低温日数)与关键影响海区海冰的关系及影响机理。结果表明, 夏、秋季关键海区海冰偏少时, 秋、冬季极地和青藏高原地区 500 hPa 位势高度减小, 中高纬西伯利亚地区位势高度增强, 北极至青藏高原有明显由北向南波动通量, 高压反气旋系统在西伯利亚地区形成与壮大, 青藏高原以北风场呈现明显偏北风, Rossby 波在青藏高原及其以北地区呈现由北向南波动形式, 青藏高原以北的西风带地区 Rossby 波东传减缓, 导致经向活动加强, 北部冷空气易于通过气流向高原侵袭, 秋、冬季青藏高原低温日数将偏多。

关键词 青藏高原 北极海冰 Rossby 波

文章编号 1006-9585 (2017) 04-0435-11

中图分类号 P461⁺.6

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15170

Relationship of Arctic Sea Ice Coverage Anomalies in Summer–Autumn and Extreme Cold Days over the Tibetan Plateau in Autumn–Winter and the Mechanism

JIAO Yang^{1,2,3}, YOU Qinglong^{1,3,4}, LIN Houbo^{1,3}, and MIN Jinzhong^{1,4}

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102

³ Institute of Climate Change and Evaluation Between China and UK, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

⁴ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract In this paper, daily maximum and minimum temperature data (1979–2012) collected at 125 stations in the Tibetan Plateau are used. The observed monthly sea ice concentration field is extracted from the Hadley Centre sea ice data

收稿日期 2015-07-14; **网络预出版日期** 2017-04-22

作者简介 焦洋, 女, 1989 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要从事气候变化与极端天气研究。E-mail: jiaoyang0621@foxmail.com

通讯作者 游庆龙, E-mail: qinglong.you@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(41201072), 江苏特聘教授项目(R2013T07), 江苏省杰出青年基金项目(BK20140047), 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41201072), Jiangsu Specially-Appointed Professor (Grant R2013T07), Jiangsu Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (Grant BK20140047), A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

set ($1^\circ \times 1^\circ$, 1979–2012). Air temperature, geopotential height, and wind (monthly) fields are obtained from the latest reanalysis of the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ERA-Interim, $1^\circ \times 1^\circ$, 1979–2012). Based on statistical analysis and synthesis analysis, the relationships between the numbers of cold days and cold nights in the Tibetan Plateau region and the key area sea ice fraction in the Arctic are systematically analyzed. The results show that extreme cold days in the Tibetan Plateau in autumn–winter become more frequent in the years when sea ice fraction is low in the key region in summer–autumn. It can be seen that 500 hPa geopotential height in the Arctic is positively correlated that in the Siberia but negatively correlated with that in the Tibetan Plateau. From the polar region to the Tibetan Plateau, there is an obvious flux fluctuation from north to south while the high pressure and anticyclone above the Siberia area become stronger. The Tibetan Plateau is mainly under the control of northerly flows. In the years with low sea ice fraction, the Rossby wave presents a fluctuation pattern from north to south over the Tibetan Plateau and to the north of the Tibetan Plateau, which makes the cold airmass easy to reach the Tibetan Plateau and results in more extreme cold weather days in the region.

Keywords Tibetan Plateau, Arctic sea ice, Rossby waves

1 引言

地球上的海冰多集中分布在南北两极地区，被称作是气候异常的“记忆器”和全球变化的“指示器”之一（武丰民等，2014a；俞永强等，2005）。近几十年中，北极海冰以前所未有的速度急剧消融（Holland et al., 2006; Serreze et al., 2007; Wang and Overland, 2009; Comiso, 2012），武丰民等（2014a）研究发现 1979~2011 年北极海冰覆盖率在各月都呈现减少趋势，但秋季减少最多范围最广。冬春季节的海冰密集度与夏、秋季相比较稳定（Maslanik et al., 2007; Perovich and Polashenski, 2012），夏、秋季北极海冰融化后，开阔洋面将会吸收大量的太阳辐射，这些能量虽然没有使得海洋表面温度立即升高，但却储存于海洋内，在冬季到来时释放到大气中，进而导致冬季明显的北极影响放大现象（Screen and Simmonds, 2010; 武丰民等，2014b）。

Lenton et al. (2008) 认为北极海冰是一个只受很小扰动便可触发整个地球系统改变的关键“临界点”。海冰融化引发北极地区增暖，进而导致北极与中纬地区的厚度梯度和温度梯度都大大减弱（Petoukhov and Semenov, 2010; Francis and Vavrus, 2012）。北极海冰偏少年时，对流层低层的西风将减弱甚至发生东风异常（Overland and Wang, 2010），这将使得经向活动加强。北极海冰减少使大气环流发生变化，导致阻塞系统形成，进而引发的寒潮天气将影响北半球大部分地区，使得欧洲及美国东北部和中西部地区的暴雪天气增加（Liu et al., 2012）。武炳义等（2004, 2011）研究发现巴伦支海及喀拉海作为海—气作用的关键区

域，其海冰覆盖率变化将对局地行星边界层的稳定性造成影响；秋、冬季北极海冰异常偏少年，西伯利亚高压将增强，北极与欧亚中高纬大气热力梯度减小，而减弱的西风使得冷空气易于向南侵袭。

极地与赤道地区的温度差对整个大气环流起着重要的影响（Deser et al., 2010; Kumar et al., 2010），进而对中国气候产生影响。关于北极海冰对中国天气及气候的影响，中国学者做了很多研究。研究表明秋、冬季北极海冰面积与亚欧大陆中高纬度地表温度为正相关，春季北极海冰可作为东亚夏季风和中国夏季降水变化的先兆因子（武炳义等，2004, 2011）。欧洲沿岸的海冰与中国秋季气温关系最为密切（董新宁和孙照渤，2006）；冬季北极关键区的海冰偏少时，冬季风加强，进而使得我国大部分地区冬季气温偏冷（解小寒等，2006；高清清等，2011）。谢永坤等（2014）研究发现秋季北极海冰异常偏少年的冬季，中国以北亚欧大陆高纬度的偏北风较强且空气异常偏冷，使得中国大部分地区冬季异常低温天气容易发生。

因青藏高原地区的观测台站较少，以往研究在探讨北极海冰对我国气候的影响时并没有对高原做过多讨论。而青藏高原地域广阔，地形复杂，被认为是全球气候变化的敏感放大区和驱动机（Dai, 1990; Kang et al., 2010; 陆龙骤等，2011），对中国东部地区气候变化的指示作用不容忽视（徐影等，2003；张核真等，2013）。北极海冰变化具有时空差异，对北极海冰分区域进行探讨也显得十分重要。青藏高原地区观测资料匮乏，时间延续性较差（吴佳和高学杰，2013），所以利用较全面的青藏高原台站资料，对其进行有针对性的区域研究十分重要。低温灾害性天气将对青藏高原地区的畜牧

业造成严重影响, 因此, 要深入研究北极海冰影响青藏高原秋、冬季极端低温日数的机理, 进一步提供一个对该地区的低温天气进行监测预测的预报因子。

2 资料方法

利用 1979~2012 年中国区域的 825 个基本、基准站观测的日最高气温及最低气温经均一化后的数据集(李庆祥等, 2006; 李庆祥和李伟, 2007), 选取青藏高原地区的 125 个台站数据。Hadley 中心月平均海冰覆盖率资料 [1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)], ERA-Interim 提供的风场、高度场等再分析资料 (Rayner et al., 2003)。

利用 Takaya and Nakamura (1997, 2001) 定义的准地转条件下的三维波作用通量计算公式, 探讨低值年的波动形式, 三维波通量与 Rossby 波群速度方向平行, 但其与位相无关, 所以较为适合用于探讨 Rossby 波频散特征, 本文选用纬向和经向两个分量进行计算。

经圈平面上的 Eliassen-Palm 通量和散度, 用来描述行星波的传播及诊断波流相互作用。本文选取 4~7 波计算经圈平面上的 Eliassen-Palm 通量, 即 EP 通量, 用矢量 $\mathbf{F}$ 定义, 球面对数压力坐标下, 准地转变化下的 $\mathbf{F}$ 表达式为

$$\mathbf{F} = (-\rho_0 a \cos \varphi \overline{v' u'}, \rho_0 a \cos \varphi f \frac{\overline{v' \theta'}}{\theta_p}), \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{F} = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\mathbf{F}_\varphi \cos \varphi) + \frac{\partial \mathbf{F}_z}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho_0 a \cos \varphi} \Delta \mathbf{F} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{F}, \quad (3)$$

其中, ρ_0 为空气密度, θ_p 为参考位温对气压 p 的导数, a 为地球半径, φ 为纬度, f 为科里奥利参数, v' 、 u' 和 θ' 为准定常行星波引起的风场和温度场的对应扰动量, $\mathbf{F}_\varphi$ 、 $\mathbf{F}_z$ 表示单位质量空气的涡旋动量通量和热量通量, $\mathbf{D} \cdot \mathbf{F}$ 为 EP 通量的散度 (Andrews et al., 1997; 杨蕾等, 2006), 文中扰动量分别取高值年和低值年异常, 基本流场本文取 1979~2011 年气候平均。

本研究相速度采用

$$c = U - \frac{\beta}{k^2 + l^2}, \quad (4)$$

计算得到, 其中, U 表示纬向平均风速, β 表示 Rossby 参数, k 、 l 分别表示纬向和经向波数 (Counou

et al., 2014)。

本研究中还应用到经验正交 (EOF) 分解、相关统计分析、MK 突变检验、去趋势分析、线性回归分析、概率函数等相关统计方法 (魏凤英, 1999)。文中采用高斯滤波 (吴洪宝和吴蕾, 2005) 的方法, 将夏、秋季海冰标准化序列进行 9 年平滑。前期我们利用 1979~2012 年 8~10 月 (海冰减少最为明显的月份) 去趋势北极海冰覆盖率与青藏高原地区平均气温作滞后相关分析, 发现其与青藏高原地区当年 11 月至次年 2 月的气温有较为显著的正相关。因此选取北极海冰 1979~2011 年的 8~10 月 (下文称夏、秋季) 以及青藏高原的 11 月至次年 2 月 (下文称秋、冬季) 为研究时段。冷昼日数为日最高气温 $< 10\%$ 分位值的日数, 冷夜日数为日最低气温 $< 10\%$ 分位值的日数。

3 夏、秋季关键区北极海冰对青藏高原秋、冬季低温的影响

3.1 秋、冬季青藏高原冷指数的时空特征

秋、冬季冷昼日数 EOF 分解第一模态 (图 1) 方差贡献 32.2%, 空间分布图显示念青唐古拉山以南和横断山以东小范围地区为负值区, 高原大部分地区为正值区, 即高原南部小范围地区与高原大部为反位相关系, 除南部部分站点高原大部呈现出一致性。EOF 分解第一模态反映了秋、冬季高原冷昼日数变化趋势基本一致的特征。

时间系数既可表征秋、冬季冷昼日数逐年的变化, 也表征该模态逐年所占权重。时间系数的 5 年滑动在 20 世纪 90 年代初开始呈现下降趋势, 意味着高原地区冷昼日数在 20 世纪 90 年代初开始减少, 近 10 年, 2005 年后出现上升趋势, 表明高原大部分地区冷昼日数在 2005 年前后有上升趋势。秋、冬季冷夜日数 EOF 分解第一模态 (图略), 方差贡献 29.8%, 时空分布特征与冷昼日数相似。

3.2 关键区海冰与青藏高原地区低温日数关系

对夏、秋季北极海冰覆盖率进行标准化 (图 2c), 其值显示从 21 世纪初开始, 夏、秋季北极海冰覆盖率较前期偏低, 处于海冰覆盖率低值期。9 年平滑曲线反映出夏、秋季北极海冰覆盖率的年代际变化, 20 世纪 90 年代中期之后, 夏、秋季北极海冰覆盖率开始呈现减少趋势, 21 世纪前期开始, 减少趋势增强。与高原大部分地区低温日数出现小幅度增长的时期较一致。夏、秋季北极海冰 EOF 分解第一模态

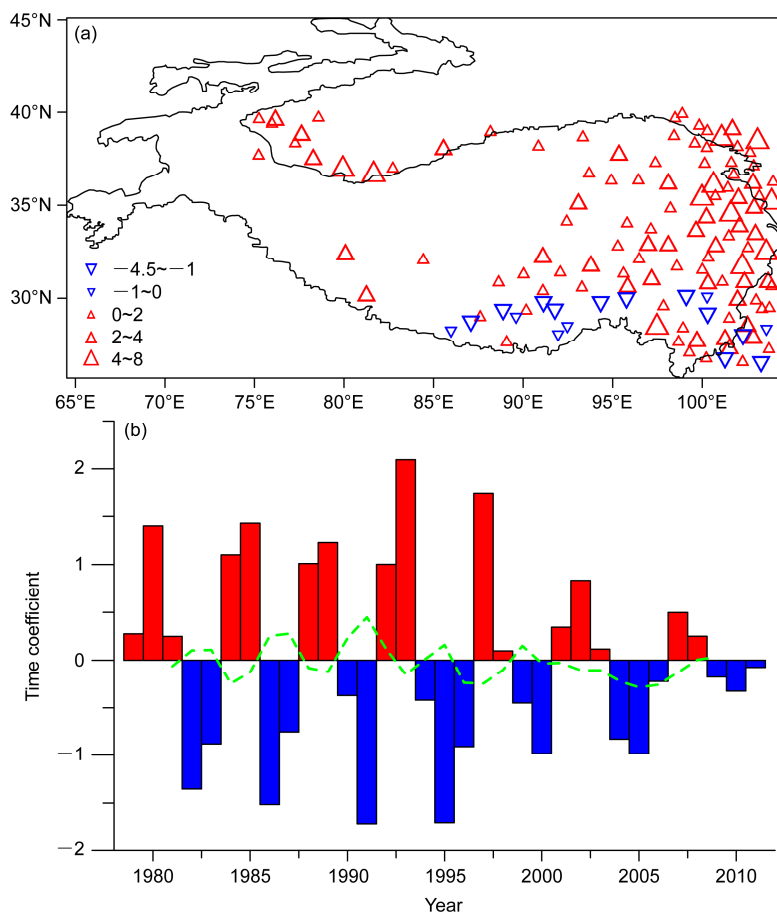


图1 1979~2011年秋、冬季(11月至次年2月)冷昼日数EOF分解(a)第一模态及(b)时间系数(绿线为5年滑动平均)

Fig. 1 (a) The first leading mode and (b) time coefficients (green line indicates 5-year moving average) of cold day number in autumn–winter (November to February) during 1979–2013

(图略, 方差贡献 40.5%) 的结果表明, 近 10 年北极海冰大部分区域呈减少趋势, 但巴伦支海以东—挪威海—格陵兰海与其他区域呈反位相。

冬季喀拉海和巴伦支海的海冰面积与同期的东亚冬季风强弱密切相关(武炳义等, 1999)。冬季鄂霍茨克海—巴伦支海东部—喀拉海—哈得孙湾的海冰偏少时, 中国中东部大部分地区冬季温度偏低(董新宁和孙照渤, 2006; 解小寒和杨修群, 2006)。利用秋、冬季冷昼日数、冷夜日数的 EOF 分解第一模态时间系数与夏、秋季北极海冰覆盖率作相关性分析(图 2a、2b), 图上显示的阴影区域均通过 0.05 显著性检验, 可以发现冷昼、冷夜日数与北极海冰覆盖率的相关系数显著区域一致, 且为负相关, 表明低温日数偏多时, 相关显著区域的海冰偏少, 根据相关系数显著区域的位置, 选取关键海区: A: 拉普捷夫海东部—东西伯利亚海(70°N~80°N, 120°E~180°); B: 波弗特海—巴芬湾(70°N~

80°N, 150°W~60°W)

将 A+B 区定为关键影响海区, 对关键区的海冰覆盖率标准化后作去趋势分析(图 2d), 低于 -0.5 的定为关键区海冰低值年, 高于 0.5 的定为关键区海冰高值年。从中挑选出 12 个低值年(1981 年、1988 年、1989 年、1990 年、1991 年、1993 年、1995 年、2003 年、2005 年、2007 年、2010 年、2011 年)及 11 个高值年(1979 年、1984 年、1986 年、1992 年、1994 年、1996 年、1997 年、1999 年、2000 年、2001 年、2004 年)。

青藏高原秋、冬季冷昼日数对夏、秋季关键区去趋势海冰覆盖率回归分析(图 3)显示, 高原上大范围为负值, 大值区位于东北部, 而由于高原南部地处低纬度, 加上其地势较低, 该处气候暖湿化(谭春萍等, 2010), 横断山以东和冈底斯山至念青唐古拉山南麓出现小范围正值区, 其余高原大部为负值区。冷夜日数的回归分析(图略)与冷日日数具

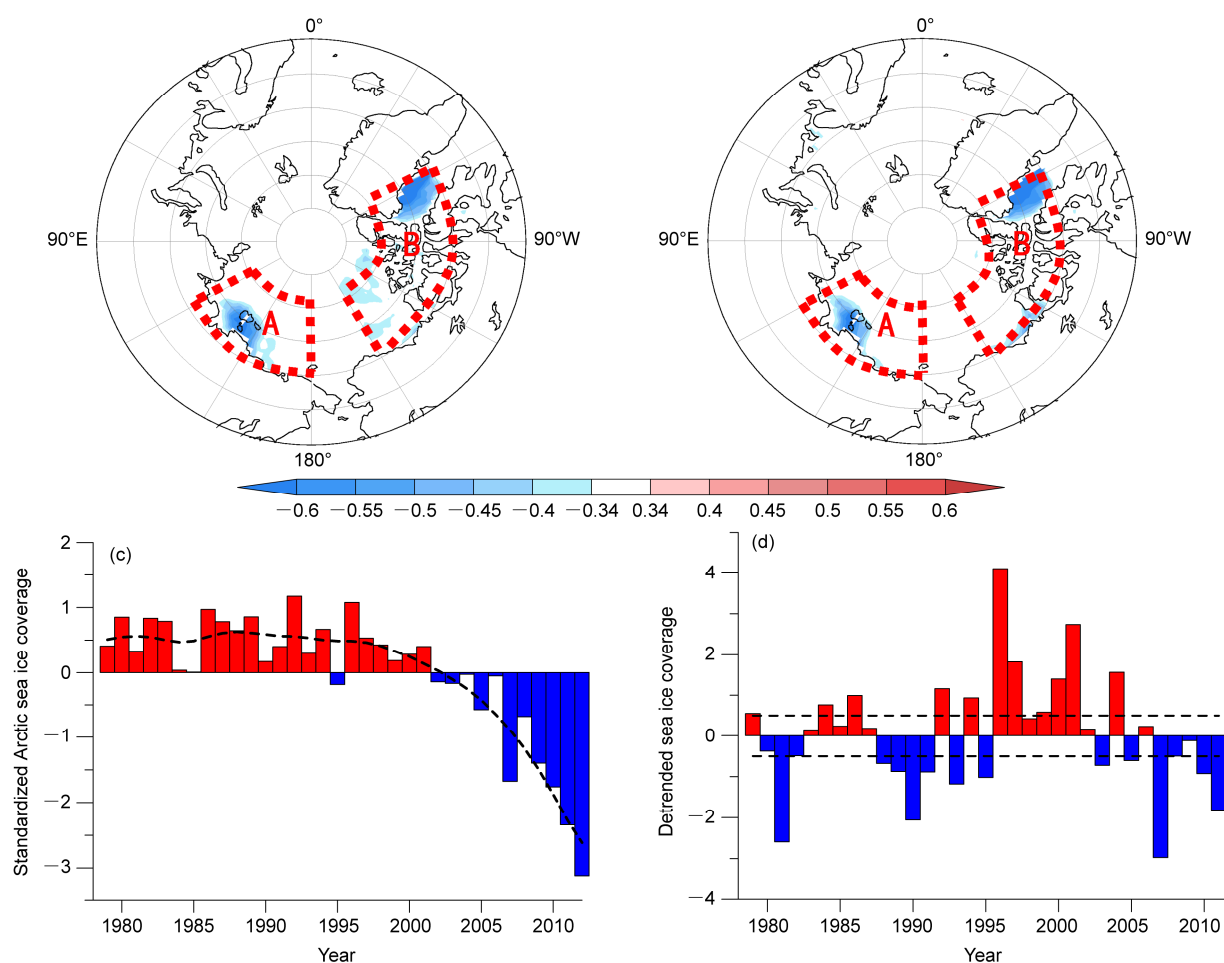


图2 1979~2011年秋、冬季青藏高原(a)冷昼日数、(b)冷夜日数EOF分解第一模态时间系数与北极海冰覆盖率相关系数(填色区为通过0.05显著性检验区域);(c)1979~2011年夏、秋季北极海冰覆盖率标准化序列(虚线为9年平滑曲线);(d)1979~2011年关键区海冰覆盖率去趋势序列(虚线为 ± 0.5 标准值)

Fig. 2 Correlation between time coefficients (a) cold days, (b) cold nights number in the Tibetan Plateau and Arctic sea ice fraction in autumn–winter during 1979–2012 (colored areas are for values that pass the 0.05 significance test); (c) standardized sequence of Arctic sea ice fraction in autumn–winter during 1979–2012 (the dotted line shows 9-year moving average curve), and (d) the detrended fluctuation analysis of sea ice fraction in the key area during 1979–2012 (the dotted line shows ± 0.5 standard value)

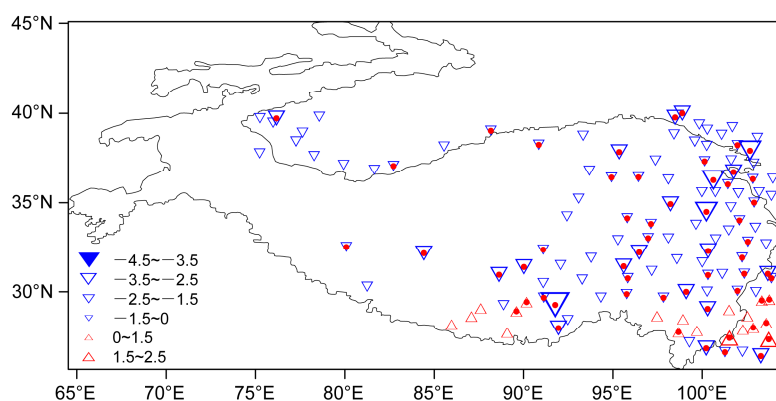


图3 1979~2011年秋、冬季冷昼日数对夏、秋季关键区去趋势海冰覆盖率回归(红点为通过0.05显著性检验台站)

Fig. 3 The number of cold days regressed onto detrended sea ice fraction in the key area in autumn–winter during 1979–2012 (red dots indicate those stations where the regression passes significance test at 0.05 level)

有相同的分布形式和结论,表明夏、秋季关键海区海冰偏少时,秋、冬季青藏高原低温日数将偏多。

4 关键区海冰减少影响青藏高原极端低温的可能机理

4.1 500 hPa 环流场响应

图 4a 为 500hPa 位势高度场对关键区去趋势海

冰覆盖率回归,图中蓝色负值区代表关键区海冰偏少时,该区域 500 hPa 位势高度偏强;红色正值区,反之。从中看出关键海区海冰偏少将使得极地和青藏高原地区 500 hPa 位势高度减小,高原以北中高纬地区位势高度增强。500 hPa 位势高度场(图 5a)差值分布(关键区海冰低值年—高值年),填色区域通过 0.1 显著性检验。可以看出关键区海冰低值年时,高度场自极地向高原呈现出“负—正—负”的

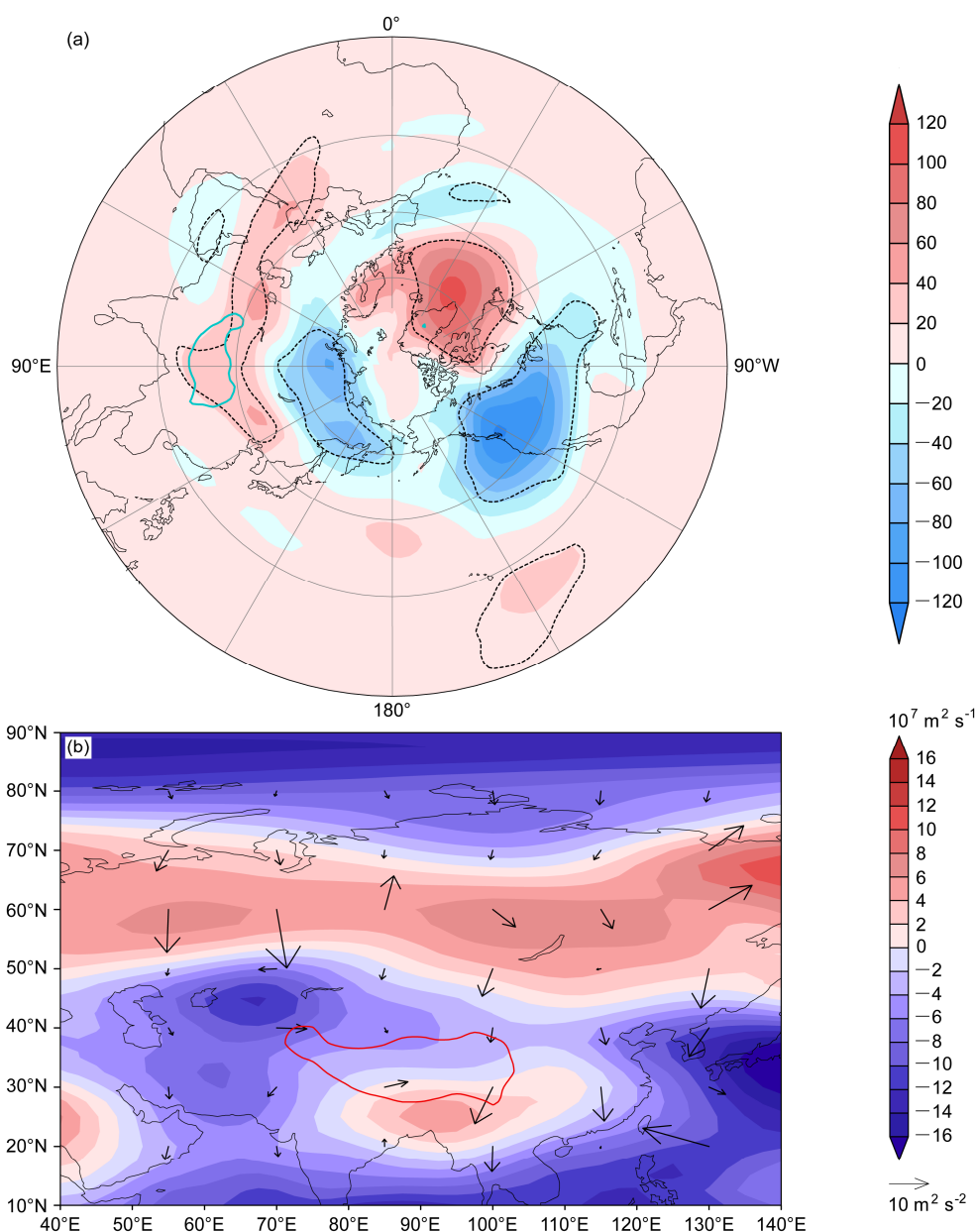


图 4 (a) 500 hPa 位势高度场对关键区去趋势海冰覆盖率回归(黑色虚线内通过 0.1 显著性检验,绿色粗实线内为青藏高原区域);(b) 关键区 500 hPa 流函数(填色,单位: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$)和波作用通量(矢量,单位: m^2/s^2)海冰低值年与高值年差值分布

Fig. 4 (a) 500-hPa geopotential height regressed onto detrended sea ice fraction in the key area (black dashed lines indicate significance at 0.1 level; the green solid line marks the Tibetan Plateau region); (b) differences in 500-hPa stream function (colored, units: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$) and wave activity flux (vectors, units: m^2/s^2) between years of low and high sea ice coverage in the key area (low years minus high years)

空间变化特征。

500 hPa 关键区海冰低值年与高值年流函数及波作用通量差值分布图(图 4b)可知, 关键区海冰低值年时自北极至青藏高原有明显由北向南波动通量, 且青藏高原处于流函数低值带, 西伯利亚地区地处流函数高值带, 流函数高值带意味着有较强

的高压反气旋系统, 同时高度场差值在低值年时也在西伯利亚地区存在正值, 西伯利亚地区高压反气旋系统形成与壮大将使得北方源地的冷空气易于向南侵袭。风场(图 5b)差值分布(关键区海冰低值年—高值年, 阴影区域通过 0.1 显著性检验)可以看出, 关键区海冰低值年时, 西伯利亚地区风场

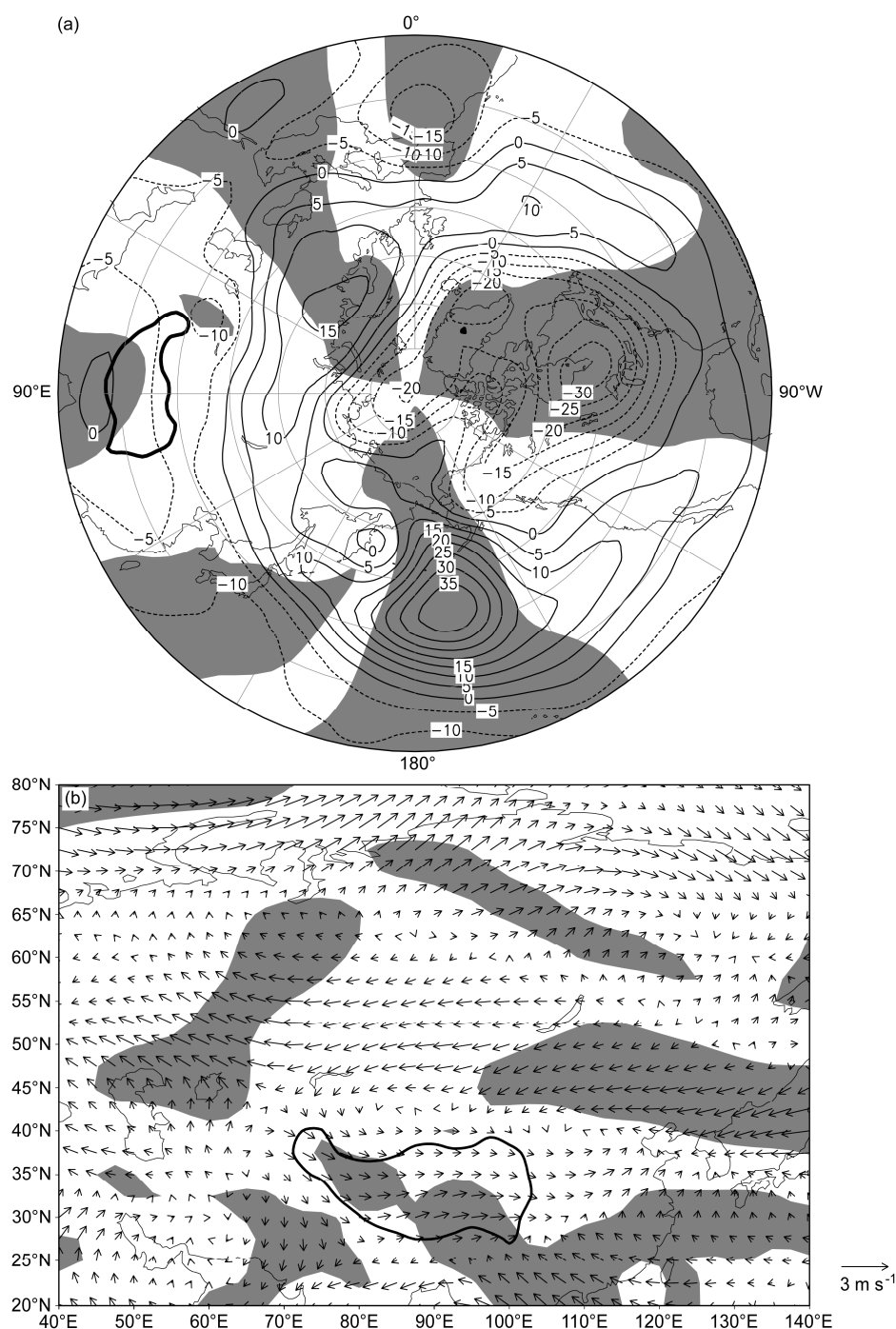


图 5 500 hPa (a) 位势高度场(单位: hPa)和 (b) 风场(单位: m/s)关键区海冰覆盖率低值年与高值年差值(阴影区域通过 0.1 显著性检验)

Fig. 5 Differences in 500-hPa (a) geopotential height (hPa) and (b) wind (m/s) between years of low and high sea ice coverage in the key area (shaded areas indicate significance at 0.1 level)

呈现反气旋结构, 青藏高原以北风场呈现明显偏北风, 来自中高纬的冷空气向高原侵袭, 但其南部风场有偏南风的存在, 北方冷空气对高原南部影响较小。

4.2 经圈环流及纬向风变化

图 6a 为 $75^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ 平均经圈环流差值分布 (黑色线内通过 0.1 显著性检验), 高原以北, 经向气流以北向南为主, 北风分量偏强。EP 通量及其散度 (图 6b) 的差值分布形式表明, 夏、秋季关键区海冰低值年时, 青藏高原北部、南部上空均出现散度辐合区, 意味着该区的西风减弱, 减弱的西风使得经向活动加强, 青藏高原上空的 EP 通量在海冰低值年时由北向南波动加强, 由于 EP 通量平行于子午面内行星波的群速度, 与基本气流发生相互作用,

EP 通量可以用来描述行星波的传播, 其散度可以用来诊断波流相互作用。说明夏、秋季海冰低值年时, 秋、冬季青藏高原上对流层中层至平流层底部主要受到由北向南的波流控制, Rossby 波在青藏高原及其以北地区呈现由北向南波动形式, 北部冷空气易于通过气流向高原侵袭, 对青藏高原的极端冷天气造成影响。

海冰偏少年, 气候态时对流层低层的西风减弱, 甚至发生东风异常 (Liu, 2012; Outten and Esau, 2012), 西风减弱导致阻塞形势增加, 经向活动减弱, 使得极地冷空气入侵中高纬, 引发中高纬多地极端冷天气发生 (Overland and Wang, 2010; 武丰民等, 2014b)。图 7 为选取关键区海冰低值年和高值年高原以北西风带常处位置 ($35^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$,

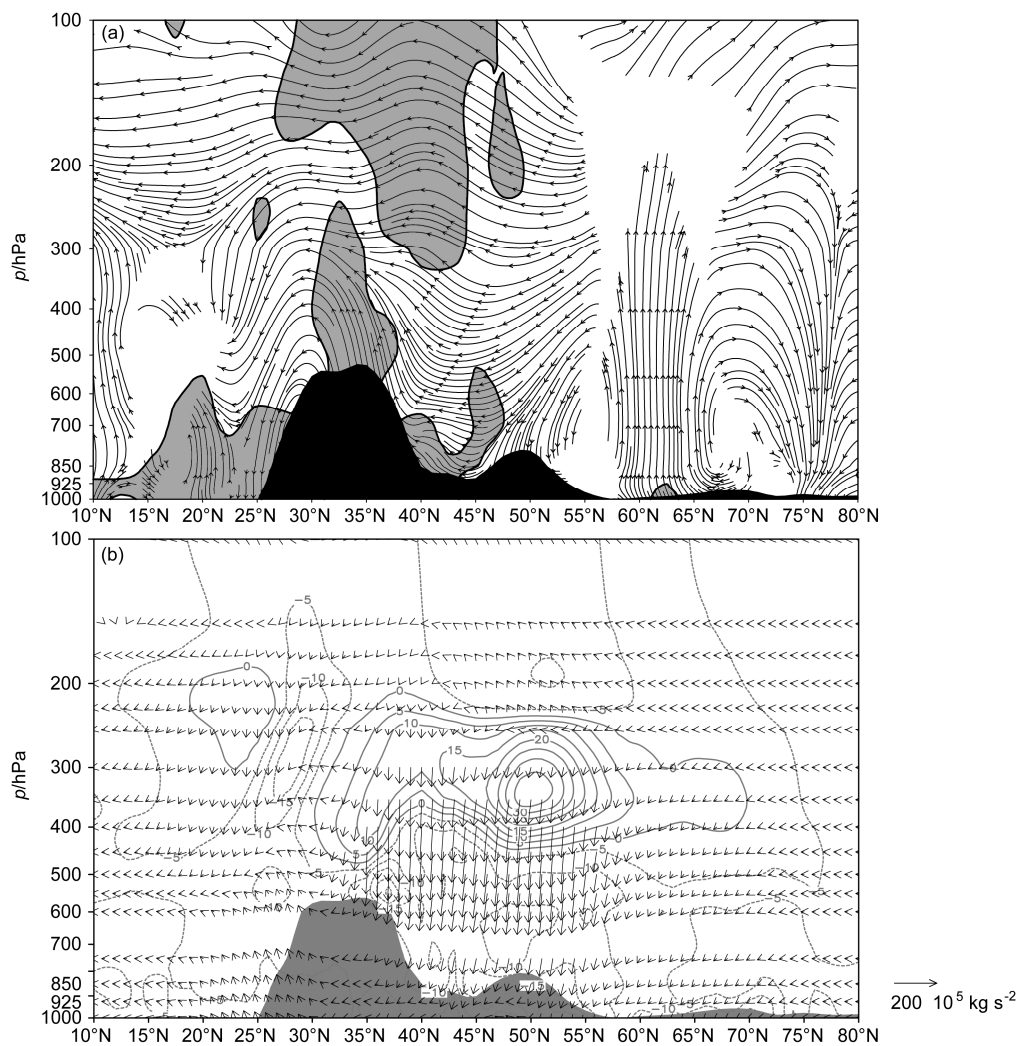


图 6 (a) $75^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ 平均经圈环流 (灰色阴影区通过 0.1 显著性检验)、(b) 4~7 波 EP 通量 (矢量, 单位: 10^5 kg s^{-2}) 及其散度 (等值线, 单位: $\text{m s}^{-1} \text{ d}^{-1}$) 关键区海冰覆盖率高低年与低值率差值

Fig. 6 Differences in (a) mean meridional circulation over $75^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ (grey shaded areas indicates significance at 0.1 level), and (b) wave-4 to wave-7 EP (Eliassen-Palm) flux (vector, units: 10^5 kg s^{-2}) and flux divergence (counter, units: $\text{m s}^{-1} \text{ d}^{-1}$) between years of low and high sea ice coverage in the key area

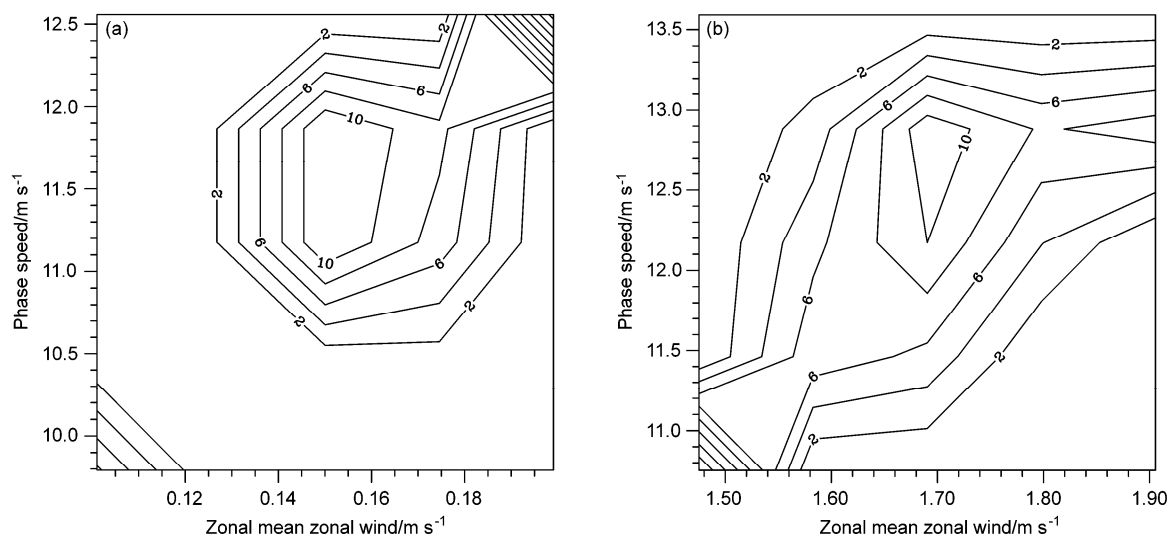


图7 关键区海冰 (a) 低值年、(b) 高值年 ($35^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$) 区域 500 hPa 纬向风与相速度 6~8 波概率密度函数分布

Fig. 7 Probability density function of 500-hPa zonal wind and the phase velocity of wave-6 to wave-8 over the area ($35^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$) for years of (a) low sea ice coverage and (b) high sea ice coverage in the key area

$75^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$) 的 500 hPa 纬向风与相速度 6~8 波概率密度函数分布, 可以看出在关键区海冰低值年时, 青藏高原以北的西风带地区西风减弱, Rossby 波东传减缓, 这将导致经向活动加强。西风急流主流减弱是阻塞高压形成的信号之一, 而阻塞高压的崩溃即将引发寒潮天气, 进而影响我国大部分地区 (朱乾根, 2000), 以往研究也表明, 秋、冬季北极海冰的异常偏少时西伯利亚高压将增强, 减弱欧亚中高纬地区的西风, 减弱北极与欧亚中高纬大气热力梯度, 同时减弱的西风使得冷空气易于向南侵袭 (武炳义等, 2011)。

5 结论与讨论

本研究系统地分析 1979~2011 年青藏高原地区秋、冬季低温日数的变化特征, 选取关键影响海区并挑选关键区海冰低值年和高值年进行环流合成变化分析, 结果如下:

(1) 秋、冬季青藏高原大部分地区冷昼日数、冷夜日数在 20 世纪 90 年代初持续减少, 2005 年前后有上升趋势。夏、秋季北极海冰覆盖率具有明显的年代际变化, 20 世纪 90 年代中期之后开始呈现减少趋势, 21 世纪初减少趋势加强。近 10 年夏、秋季北极海冰大部分区域呈减少趋势, 但巴伦支海以东—挪威海—格陵兰海与其他区域呈反位相, 说明对北极海冰的分区域研究的必要性。

(2) 根据相关分析选取并确定了关键海区: 拉普捷夫海东部—东西伯利亚海 ($70^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 与波弗特海—巴芬湾 ($70^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 60^{\circ}\text{W}$), 挑选出 12 个低值年和 11 个高值年, 夏、秋季关键海区海冰偏少时, 秋、冬季青藏高原低温日数将偏多。

(3) 关键海区海冰偏少将使得极地和青藏高原地区 500 hPa 位势高度减小, 高原以北中高纬地区位势高度增强。关键区海冰低值年时, 500 hPa 高度场自极地向高原呈现出“负—正—负”的“三明治”式变化。自极地至青藏高原有明显由北向南波动通量, 高压反气旋系统在西伯利亚地区形成与壮大。青藏高原以北风场呈现明显偏北风。青藏高原对流层中层至平流层底部主要受到由北向南的波流控制, Rossby 波在青藏高原及其以北地区呈现由北向南波动形式, 青藏高原以北的西风带地区西风减弱, Rossby 波东传减缓, 导致经向活动加强。北部冷空气易于通过气流向高原侵袭, 对青藏高原的极端冷天气造成影响。

北极海冰减少造成北极与中纬地区的厚度梯度减弱, 冬季中高纬地区盛行西风明显减弱, 经向波动有显著加强, 西风急流主流减弱导致阻塞形势增加, 易爆发寒潮 (Sokolova et al., 2007; Honda et al., 2009; Seierstad and Bader, 2009)。表明青藏高原以北地区在海冰低值年时, 偏北的经向风易将西西伯利亚地区冷空气带向青藏高原, 使得极端冷

天气易于发生。本文主要基于已有观测资料的统计分析, 还需进一步得到数值模拟的验证, 已有的研究 (Honda et al, 2009; Petoukhov and Semenov, 2010; Peings and Magnussdottir, 2014) 指出, 秋季北极海冰变化可以作为预测东亚冬季气温的预报因子, 但对环流机制的探讨尚无定论, 青藏高原本身海拔较高, 冰雪覆盖率较大, 对气候响应敏感, 其自身冰雪变化对该区域以及我国东部季风区极端天气的影响机制也将是一个重要的科学问题, 这将是我们的下一步工作。

参考文献 (References)

- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1997. *Middle Atmospheric Dynamics* [M]. New York: Academic Press, 489pp.
- Coumou D, Petoukhov V, Rahmstorf S, et al. 2014. Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (34): 12331–12336, doi: 10.1073/pnas.1412797111.
- Comiso J C. 2012. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover [J]. *J. Climate*, 25 (4): 1176–1193, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
- Dai Jiaxi. 1990. *The Qinghai-Tibet Plateau Climate* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-356.
- Deser C, Tomas R, Alexander M, et al. 2010. The seasonal atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in the late twenty-first century [J]. *J. Climate*, 23 (2): 333–351, doi: 10.1175/2009JCLI3053.1.
- 董新宁, 孙照渤. 2006. 北极海冰变化及其与中国秋季气温的相关分析[J]. *南京气象学院学报*, 29 (1): 82–87. Dong Xinning, Sun Zhaobo. 2006. Characteristics of Arctic sea-ice and its relation with autumn air temperature in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29 (1): 82–87, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2006.01.012.
- Francis J A, Vavrus S J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (6): L06801, doi: 10.1029/2012GL051000.
- 高清清, 孙照渤, 倪东鸿. 2011. 冬季北极海冰与中国同期气温的关系 [J]. *气象与减灾研究*, 34 (4): 7–15. Gao Qingqing, Sun Zhaobo, Ni Donghong. 2011. Relation of winter arctic sea-ice and the synchronous air temperature in China [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese)*, 34 (4): 7–15, doi: 10.3969/j.issn.1007-9033.2011.04.002.
- Holland M, Bitz C, Tremblay B. 2006. Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (23): L23503, doi: 10.1029/2006GL028024.
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (8): L08707, doi: 10.1029/2008GL037079.
- Kumar A, Perlwitz J, Eischeid J, et al. 2010. Contribution of sea ice loss to Arctic amplification [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (21), doi: 10.1029/2010GL045022.
- Kang Sichang, Xu Yanwei, You Qinglong, et al. 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research Letters*, 5 (1): 75–82.
- Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (6): 1786–1793, 10.1073/pnas.0705414105.
- 李庆祥, 李伟. 2007. 近半个世纪中国区域历史气温网格数据集的建立 [J]. *气象学报*, 65 (2): 293–300. Li Qingxiang, Li Wei. 2007. Construction of the gridded historic temperature dataset over China during the recent half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (2): 293–300, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2007.02.015.
- 李庆祥, Menne M J, Williams Jr C N, et al. 2006. 利用多模式对中国气温序列中不连续点的检测 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 736–742. Li Qingxiang, Menne M J, Williams Jr C N, et al. 2006. Detection of discontinuities in Chinese temperature series using a multiple test approach [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (4): 736–742, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2005.04.004.
- Liu J, Curry J A, Wang H, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109 (11): 4074–4079, doi: 10.1073/pnas.1114910109.
- 陆龙骤, 卞林根, 张正秋. 2011. 极地和青藏高原地区的气候变化及其影响 [J]. *极地研究*, 2011, 23 (2): 82–89. Lu Longzhou, Bian Lingen, Zhang Zhengqiu. 2011. Climate change and its impact of the polar and the Tibetan Plateau regions [J]. *Chinese Journal of Polar Research (in Chinese)*, 23 (2): 82–89.
- Maslanik J A, Fowler C, Stroeve J, et al. 2007. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (24), doi: 10.1029/2007GL032043.
- Overland J E, Wang M. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice [J]. *Tellus A*, 62 (1): 1–9, doi: 10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x.
- Outten S D, Esau I. 2012. A link between Arctic Sea ice and recent cooling trends over Eurasia [J]. *Climatic Change*, 110 (3–4): 1069–1075, doi: 10.1007/s10584-011-0051-7.
- Peings Y, Magnussdottir G. 2014. Response of the wintertime Northern Hemisphere atmospheric circulation to current and projected Arctic Sea ice decline: A numerical study with CAM5 [J]. *J. Climate*, 27 (1): 244–264, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00272.1.
- Perovich D K, Polashenski C. 2012. Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (8): L08501, doi: 10.1029/2012GL051432.
- Petoukhov V, Semenov V A. 2010. A link between reduced Barents-Kara Sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (21): D21111, doi: 10.1029/2009JD013568.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses sea surface temperature sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D14): 4407, doi: 10.1029/2002JD002670.
- Screen J A, Simmonds I. 2010. Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (16): L16707, doi: 10.1029/2010GL044136.
- Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. 2007. Perspectives on the Arctic's

- shrinking sea-ice cover [J]. *Science*, 315 (5818): 1533–1536, doi: 10.1126/science.1139426.
- Sokolova E, Dethloff K, Rinke A, et al. 2007. Planetary and synoptic scale adjustment of the Arctic atmosphere to sea ice cover changes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (17): L17816, doi: 10.1029/2007GL030218.
- Seierstad I A, Bader J. 2009. Impact of a projected future Arctic Sea ice reduction on extratropical storminess and the NAO [J]. *Climate Dyn.*, 33 (7–8): 937–943, doi: 10.1007/s00382-008-0463-x.
- 谭春萍, 杨建平, 米睿. 2010. 1971~2007 年青藏高原南部气候变化特征分析 [J]. *冰川冻土*, 32 (6): 1111–1120. Tan Chunping, Yang Jianping, Mi Rui. 2010. Analysis of the climatic change characteristics in the southern Tibetan Plateau from 1971 to 2007 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 32 (6): 1111–1120.
- Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24 (23): 2985–2988, doi: 10.1029/97GL03094.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi geostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608–627, doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- Wang M Y, Overland J E. 2009. A sea ice free summer Arctic within 30 years? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (7): L07502, doi: 10.1029/2009GL037820.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1–296. Wei Fengying. 1999. *Modern Climatic Statistical Diagnosis Prediction Technology* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–296.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 北京: 气象出版社, 400pp. Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. *Climatological Statistical Diagnosis and Prediction Methods* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 400pp.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56 (4): 1102–1111, doi: 10.6038/cjg20130406.
- 武丰民, 何金海, 祁莉, 等. 2014a. 海冰消融背景下北极增温的季节差异及其原因探讨 [J]. *海洋学报*, 2014, 36 (3): 39–47. Wu Fengmin, He Jinhai, Qi Li, et al. 2014a. The seasonal difference of Arctic warming and its mechanism under sea ice cover diminishing [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 36 (3): 39–47, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2014.03.005.
- 武丰民, 何金海, 祁莉. 2014b. 北极海冰消融及其对欧亚冬季低温影响的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 29 (8): 913–921. Wu Fengmin, He Jinhai, Qi Li. 2014b. Arctic sea ice declining and its impact on the cold Eurasian winters: A review [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 29 (8): 913–921, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.08.0913.
- 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 1999. 冬季北极喀拉海, 巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响 [J]. *大气科学*, 23 (3): 267–275. Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. 1999. The impact of variation of sea-ice extent in the Kara Sea and the Barents Seas in winter on the winter monsoon over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (3): 267–275.
- 武炳义, 卞林根, 张人禾. 2004. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响 [J]. *极地研究*, 16 (3): 211–215. Wu Bingyi, Bian Lingen, Zhang Renhe. 2004. Effects of the winter AO and the arctic sea ice variations on climate variation over East Asia [J]. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 16 (3): 211–215.
- 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 [J]. *科学通报*, 56 (27): 2335–2343. Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. 2011. Effects of autumn–winter Arctic sea ice on winter Siberian High [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (30): 3220–3228, doi: 10.1007/s11434-011-4696-4.
- 徐影, 丁一汇, 李栋梁. 2003. 青藏地区未来百年气候变化 [J]. *高原气象*, 22 (5): 451–457. Xu Ying, Ding Yihui, Li Dongliang. 2003. Climatic change over Qinghai and Xizang in 21st Century [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 22 (5): 451–457.
- 解小寒, 杨修群. 2006. 冬季北极海冰面积异常与中国气温变化之间的年际关系 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 42 (6): 549–561. Xie Xiaohan, Yang Xiuqun. 2006. Interannual relationship between Arctic sea ice concentration anomaly and China air temperature variation during winter [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* (in Chinese), 42 (6): 549–561, doi: 10.3321/j.issn:0469-5097.2006.06.001.
- 谢永坤, 刘玉芝, 黄建平. 2014. 秋季北极海冰对中国冬季气温的影响 [J]. *气象学报*, 72 (4): 703–710. Xie Yongkun, Liu Yuzhi, Huang Jianping. 2014. The influence of the autumn Arctic sea ice on winter air temperature in China [J]. *Journal of Meteorological Research* (in Chinese), 72 (4): 703–710, doi: 10.11676/qxxb2014.057.
- 杨蕾, 陈文, 黄荣辉. 2006. 北半球准定常行星波气候平均态的资料分析和数值模拟 [J]. *大气科学*, 30 (3): 361–376. Yang Lei, Chen Wen, Huang Ronghui. 2006. The data analysis and numerical simulation of the climatology of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (3): 361–376.
- 俞永强, 陈文. 2005. 海-气相互作用对我国气候变化的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 310pp. Yu Yongqiang, Chen Wen. 2005. *The Air Sea Interaction Effect on the Climate Change in China* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 310pp.
- 张核真, 路红亚, 洪健昌, 等. 2013. 藏西北地区气候变化及其对草地畜牧业的影响 [J]. *干旱区研究*, 30 (2): 308–314. Zhang Hezhen, Lu Hongye, Hong Jianchang, et al. 2013. Climate change and its effect on steppe animal husbandry in Northwest Tibet [J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 30 (2): 308–314.
- 朱乾根. 2000. 天气学原理与方法 [M]. 北京: 气象出版社, 649pp. Zhu Qiangen. *The Principle and Method of Synoptic Meteorology* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 649pp.