

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/323749033>

# Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China

Article in Chinese Journal of Geophysics- Chinese Edition · January 2018

DOI: 10.6038/cjg2018K0755.

CITATIONS

0

READS

19

3 authors, including:



**Ruonan Zhang**

Fudan University

10 PUBLICATIONS 163 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Chenghu Sun**

China Meteorological Administration

9 PUBLICATIONS 93 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Arctic sea ice/Eurasian snow cover-air interaction [View project](#)

张若楠, 孙丞虎, 李维京. 2018. 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响. 地球物理学报, 61(1):91-105, doi:10.6038/cjg2018K0755.

Zhang R N, Sun C H, Li W J. 2018. Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(1):91-105, doi:10.6038/cjg2018K0755.

## 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响

张若楠<sup>1</sup>, 孙丞虎<sup>2,3\*</sup>, 李维京<sup>3,4</sup>

1 复旦大学大气科学研究院, 上海 200433

2 中国气象局国家气象信息中心, 北京 100081

3 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

4 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

**摘要** 本文利用 NCEP/NCAR 等再分析资料和 CAM3.1 数值模式研究了夏季欧亚中高纬遥相关型年际变率与前期春季北极海冰变化的联系及其对我国夏季降水影响的可能机制. 结果表明, 夏季北大西洋—欧亚中高纬地区 500 hPa 位势高度场自然正交分解第二模态表现为“—+—+”遥相关波列, 其中格陵兰岛—北大西洋和乌拉尔山地区为异常高空槽区所控制, 而欧洲和贝加尔湖附近地区则为异常高压脊区, 这种波列分布与欧亚中高纬 EU 型遥相关型十分类似. 当遥相关波列为“—+—+”(“+—+—”)型分布时, 前期春季巴伦支海北部和巴芬湾一带海冰偏少(多), 同期夏季巴伦支海北部一带海冰亦持续偏少(多), 同时在我国东北北部地区、长江和黄河之间地区降水明显偏少(多). 深入分析发现, 巴伦支海北部和巴芬湾一带海冰偏少后, 由于该地区湍流热通量明显偏强, 在动力过程影响方面会形成异常 Rossby 波源, 准定常 Rossby 波活动通量将向东亚地区传播, 使得夏季欧亚中高纬“—+—+”遥相关波列出现. 另外, 海冰异常偏少后, 在热动力过程影响方面, 4—5 月欧亚中高纬乌拉尔山—贝加尔湖以北地区积雪会出现“西少东多”偶极子型异常分布, 其通过影响后期土壤湿度及下垫面热通量异常, 也有利于夏季欧亚中高纬遥相关波列的维持. 伴随着欧亚中高纬“—+—+”遥相关波列的出现, 乌山阻塞高压偏弱, 东亚槽偏浅, 且亚洲副热带急流随之加强, 贝加尔湖以北的副极地地区出现西风异常, 东亚副热带急流北侧出现东风异常, 贝加尔湖以南地区为异常反气旋控制, 南下冷空气活动减弱. 受到上述环流形势影响, 我国东北北部地区、黄河和长江之间地区降水明显偏少. 当巴伦支海北部和巴芬湾区域海冰偏多时, 结论则反之. 最后, 基于春季海冰指数和晚春偶极子型积雪指数, 我们建立了江淮流域夏季降水的预测模型, 回报结果表明其对江淮流域夏季降水的年际变率具有较高的预测技巧.

**关键词** 欧亚中高纬遥相关型; 北极海冰; 中国夏季降水; 欧亚积雪; 数值模拟

doi:10.6038/cjg2018K0755

中图分类号 P461

收稿日期 2016-12-30, 2017-11-10 收修定稿

### Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China

ZHANG RuoNan<sup>1</sup>, SUN ChengHu<sup>2,3\*</sup>, LI WeiJing<sup>3,4</sup>

1 Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2013CB430203), “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601501), 公益性行业专项(GYHY201406018), 国家自然科学基金(41661144017, 41675068, 41505053)资助.

**第一作者简介** 张若楠, 女, 1986 年生, 博士, 主要从事冰雪气候效应和短期气候预测研究. E-mail: zhangrn2010@126.com

**\* 通讯作者** 孙丞虎, 男, 1978 年生, 研究员, 主要从事气候与气候变化研究. E-mail: sunch@cma.gov.cn

2 *National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

3 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

4 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

**Abstract** This work investigates the relationship between Eurasian mid-high latitudes teleconnection in summer and the interannual variations of Arctic sea ice concentration (SIC) from preceding spring to summer and the associated influence on East Asian summer precipitation during the period of 1980–2015 by using NCEP/NCAR reanalysis datasets and the Community Atmospheric Model version 3.1. Results show that the second Empirical Orthogonal Function mode of the summer 500 hPa geopotential height field over mid-high latitudes of the North Atlantic-Eurasian continent shows a clear “-+-+” pattern with an anomalous trough over the region from Greenland to the North Atlantic, Ural Mountains, and an anomalous ridge over Europe and regions around Lake Baikal, which is similar to the Eurasian (EU) teleconnection pattern. When the summer Eurasian teleconnection exhibits a “-+-+” (“-+-+”) pattern, the light (heavy) SIC occurs in regions over Northern Barents Sea and Baffin Bay in preceding spring and over Northern Barents Sea in simultaneous summer, leading to deficit (excessive) summer precipitations over most regions to north of the Yangtze River valley, especially northern Northeast China and the region between Yellow and Yangtze River valleys. Further study shows that the persistence of light SIC tends to change the local surface turbulent heat flux from spring to summer, triggering the anomalous Rossby wave sources and the propagation of quasi-stationary Rossby wave activity flux southward and eastward from Arctic to East Asia. These physical processes ultimately result in the development of anomalous summer Eurasian teleconnection. In addition, corresponding to the influence of light SIC condition, the “-+” dipole pattern of anomalous Eurasian snow water equivalent (SWE) in April-May is observed from the Ural Mountains to north of Lake Baikal. This dipole SWE pattern then changes the soil moisture and associated heat flux anomalies in the following summer, further resulting in the enhancement of the summer Eurasian teleconnection. Accompanying with occurrence of the “-+-+” Eurasian teleconnection, the Ural blocking and the East Asian trough are weakened. Meanwhile, the summer Asian subtropical jet stream is accordingly accelerated, with increase of the westerly wind over subpolar regions and decreasing to the north of the East Asian subtropical jet stream. This favors formation of anomalous anticyclonic circulation in south of Lake Baikal, leading to weaker cold air activities. The aforementioned circulation system ultimately results in deficit of summer precipitation in northern Northeast China and the regions between Yellow and Yangtze River valleys. Relative to heavy SIC conditions, the influences are inverted. On the basis of the spring SIC index and late spring SWE index, we also establish a prediction model for the summer precipitation in the Yangtze-Huaihe River valley. The hind-cast results show that our prediction model can well predict the variation of summer precipitation in the Yangtze-Huaihe River valley.

**Keywords** Eurasian teleconnection; Arctic sea ice; Summer precipitation over China; Eurasian snow water equivalent; Numerical simulation

## 0 引言

欧亚遥相关型是北半球中高纬地区主要的低频遥相关型,表现为纬向波列分布特征,拥有三个以上大气活动中心(Wallace and Gutzler, 1981). 欧亚中高纬遥相关型的存在对整个欧亚大陆尤其是东亚地区的气候有重要影响(Shi and Zhu, 1993; Nitta and Hu, 1996; Ding and Wang, 2005; Liu et al., 2014; Wang and He, 2015). Shi 和 Zhu(1993)指出,早夏北半球存在的大气遥相关型对我国夏季旱涝分布有重要影响. Wu 等(2009)认为欧亚大陆出现在欧洲—贝加尔湖地区的“—+—”型遥相关波列从春夏发生东移,导致夏季我国东北地区、长江流域多雨,以及南方地区少雨. 卫捷等(2004)、Wang 和 He(2015)研究 1999—2000 年以及 2014 年夏季出现在东北亚和我国北方地区的严重干旱事件成因时,发现欧亚 EU 型遥相关型的增强会影响西太平洋副热带高压和东亚槽,导致以上区域降水偏少. 此外,不少学者在分析印度夏季风和东亚夏季风相互作用过程时发现欧亚 EU 型遥相关型可能起着桥梁作用(Wang et al., 2001; Wu and Wang, 2002). 由此可见,开展夏季欧亚地区遥相关型活动及其对东亚夏季气候影响的研究意义重大.

过去的研究表明,欧亚大陆中高纬地区冬季和夏季大气遥相关型的年际变率可能受到海温等强迫场的影响(Nakamura et al., 1987; Liu et al., 2014). 如 Liu 等(2014)认为冬季欧亚 EU 型遥相关型变化受到北大西洋海温异常的影响,瞬变涡旋活动在其形成中起了重要作用,而 SCAND 型和 EAWR 型遥相关型则分别与印度洋海温异常以及北美地区积雪异常有一定的联系. Ding 和 Wang(2005)发现北半球夏季全球尺度大气遥相关型的变化可能与 ENSO 影响有关.

除了海温以外,欧亚大陆中高纬大气遥相关型的年际变率还可能与北极海冰变化有关. 尤其自 20 世纪 80 年代以来,北极海冰明显减少,大量研究分析了北极海冰变化对冬季欧亚大陆中高纬大气环流的影响及其相关的物理机制(Honda et al., 2009; Petoukhov and Semenov, 2010; Liu et al., 2012; Mori et al., 2014; Peings and Magnusdttir, 2014). 如 Petoukhov 和 Semenov(2010)利用大气环流模式研究发现冬季巴伦支—喀拉海海冰偏少可以激发出欧亚地区准正压结构的遥相关波列. 除了冬季,近来

一些学者开始分析北极海冰变化与夏季欧亚大陆中高纬大气环流的可能联系. 如 Wu 等(2009)、张若楠和武炳义(2011)发现春季巴伦支海海冰偏多与夏季欧洲—贝加尔湖地区的“—+—”型遥相关波列有一定的联系,而这一波列又会导致夏季我国东北地区和长江流域降水偏多,南方地区降水偏少. Wu 等(2013)分析了冬、春季巴芬湾海冰异常对夏季欧洲北部地区降水的影响,结果发现该地区海冰偏少主要通过影响欧亚地区低层风场遥相关波列的活动,使得夏季欧亚北部地区降水偏少. 同样 Petrie 等(2015)也发现伴随着北极海冰的大范围减少,夏季大西洋—欧洲地区会出现遥相关波列活动异常. 近期, Li 和 Leung(2013)的研究指出,虽然春、夏季海冰变化均可对夏季欧亚大陆中高纬大气遥相关型产生影响,但由于春季北极增温更加明显,所以春季海冰变化与我国夏季降水的联系可能比夏季海冰更加紧密. 可见,前期春季北极海冰变化对后期夏季欧亚大陆中高纬遥相关型以及东亚气候具有重要的调制作用.

过去的研究大都关注北极海冰变化对冬季欧亚中高纬地区环流型的影响,但对于夏季欧亚中高纬地区,到底哪种大气遥相关型与北极海冰变化联系紧密? 这种大气遥相关型对东亚尤其我国夏季降水又有怎样的影响? 可能的物理机制是什么? 这些问题均需要深入研究. 为解决上述问题,本文将首先利用统计诊断方法分析夏季欧亚中高纬地区主要遥相关型的年际变率与前期春季—夏季北极海冰变化的可能联系,以及对我国夏季降水分布的影响,进而利用 CAM3.1 模式深入分析春季北极海冰变化影响欧亚中高纬遥相关波列及我国夏季降水异常分布的物理机制.

本文第 1 节为数据、方法和模式介绍,第 2 节给出了夏季欧亚中高纬遥相关型年际变化与北极海冰可能联系,及其对我国夏季降水影响可能机制的分析,并对我国江淮流域夏季降水进行预测建模,第 3 节为结论.

## 1 数据、方法和模式介绍

本文应用的数据资料包括:(1)NCEP/NCAR 月平均位势高度场和风场资料,空间分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996);(2)英国 Hadley 中心月平均海冰密集度资料(HadISST SIC),空间分辨率为  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (Rayner et al., 2003);(3)美国气候

中心(CPC/NOAA)逐日全球陆地格点降水资料,空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  (Xie et al., 2007); (4) ERA-Interim 月平均土壤湿度再分析资料,空间分辨率为  $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$  (Balsamo et al., 2009). 土壤湿度资料分为 7 cm, 21 cm, 100 cm, 289 cm 四层, 本文主要应用表层 7 cm 土壤湿度进行研究. (5) 芬兰气象研究所提供的北半球月平均雪水当量资料(GlobSnow), 空间分辨率为  $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$  (Takala et al., 2011). 此外, 鉴于本文主要侧重年际尺度变率研究, 我们剔除了各变量的线性趋势.

本文还利用 NCAR 大气环流模式(CAM3.1)进行了数值模拟. CAM3.1 空间分辨率为 T42(约  $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ ), 垂直层次为 26 层(顶层约为 3.7 hPa) (Collins et al., 2006). 关于 CAM3.1 模拟能力的研究表明它能够较真实地模拟出欧亚大陆夏季气候及相应的环流变化特征(Hack et al., 2006; Wei et al., 2011; 张若楠和武炳义, 2011).

## 2 结果

### 2.1 夏季欧亚中高纬遥相关型与北极海冰变化的联系

许多学者利用遥相关型算法、自然正交分解(EOF)等方法来识别冬季北半球中高纬度地区的大气遥相关型(Wallace and Gutzler, 1981; Barnston and Livezey, 1987; Liu et al., 2014). 为了研究夏季欧亚大陆中高纬大气遥相关型与北极海冰变化的可能联系, 我们首先用 EOF 方法分析了北大西洋—欧亚大陆中高纬地区( $20^{\circ} \text{N}—90^{\circ} \text{N}, 70^{\circ} \text{W}—130^{\circ} \text{E}$ ) 500 hPa 位势高度场的主要模态. 分析结果发现第一模态的方差贡献为 23.6%, 主要表现为北大西洋中高纬度地区“南高北低”偶极子分布, 其中格陵兰岛附近地区为正高度距平所控制, 而西北欧一带地区为负高度距平所控制. 鉴于该模态与前期春季北极海冰没有显著的联系, 且同我国东部地区夏季降水联系并不显著(图略), 故下文不再对该模态进行讨论.

第二模态(EOF2)的方差贡献为 14.0%, 其时间系数(PC2)具有明显的年际变化特征(图 1a). 我们进一步分析了其空间结构, 发现欧亚大陆中高纬地区呈现“一十—”波列分布, 其中格陵兰岛—北大西洋地区和乌拉尔山地区为异常高空槽区控制, 受其影响乌拉尔山阻塞形势难以形成, 而欧洲地区和贝加尔湖附近地区则为异常高压脊区(图 1b), 上

述波列的分布特征与 EU 型遥相关(Wallace and Gutzler, 1981)十分类似.

对于夏季欧亚中高纬遥相关型, 许多研究沿用 Wallace 和 Gutzler(1981)的方法定义了 EU 型, 并研究了其对东北亚夏季气候的影响(卫捷等, 2004; Wang and He, 2015). 同样为了表征这个夏季欧亚大陆中高纬波列, 类似 Wallace 和 Gutzler(1981)的方法我们也定义了夏季欧亚中高纬遥相关指数(EUI): 
$$EUI = \frac{1}{4}Z(55^{\circ} \text{N}, 20^{\circ} \text{E}) - \frac{1}{2}Z(55^{\circ} \text{N}, 72^{\circ} \text{E}) + \frac{1}{4}Z(40^{\circ} \text{N}, 120^{\circ} \text{E})$$
, 其中  $Z$  为 500 hPa 位势高度场距平, 如图 1a 所示. 通过对比不难发现, EUI 指数和 PC2 的变化较为一致, 二者相关系数为 0.64, 超过了 99% 显著性. 因此, 后文中将利用 EUI 指数来表征出现在夏季欧亚中高纬地区的“一十—”遥相关波列的特征.

为了进一步分析与 EUI 指数相联系的中、低层大气环流场特征, 基于 EUI 指数我们分别以正负 0.8 个标准差为标准筛选出 7 个高指数年(1986, 1992, 1994, 1995, 1997, 2001, 2002)和 7 个低指数年(1981, 1987, 1989, 1993, 1998, 2003, 2012), 并分析了两组差值场的特征, 结果如图 1c—1d 所示. 在 500 hPa 位势高度差值场上, 北大西洋—欧亚中高纬地区表现为明显的纬向“一十—”遥相关波列, 其两个异常高空槽区分别位于格陵兰岛和乌拉尔山地区, 而两个异常高压脊区则分别位于欧洲地区和贝加尔湖附近地区(图 1c), 这与高度场 EOF2 模态非常类似(图 1b). 从垂直分布看, 在沿  $60^{\circ} \text{N}$  的 1000~100 hPa 剖面上, 该波列具有相当正压结构, 它反映了准定常 Rossby 波活动的特征(图 1d).

图 2 进一步给出了 EUI 高、低指数年合成的前期春季—夏季北极海冰差值场分布. 可以看出, 在前期春季, 巴伦支海北部区域以及巴芬湾区域海冰明显偏少(图 2a), 这与春季海冰 EOF2 空间分布非常相像, 该模态方差贡献为 13.4% (图 2c). 在后期夏季, 巴芬湾一带海冰异常有所减弱, 而巴伦支海一带海冰异常则会继续发展和维持(图 2b). 我们深入分析后发现这种夏季海冰异常分布的特征总体与夏季海冰 EOF1 模态的空间分布比较类似, 而该模态方差贡献为 19.8% (图 2d). 此外, 这种春—夏季海冰异常分布与 Wu 等(2009)发现的对我国夏季降水有影响的前春—夏季海冰异常的分布也较类似. 上述结果说明夏季欧亚中高纬遥相关波列为“一十—”型时, 可能会受到巴伦支海和巴芬湾一带海冰偏少

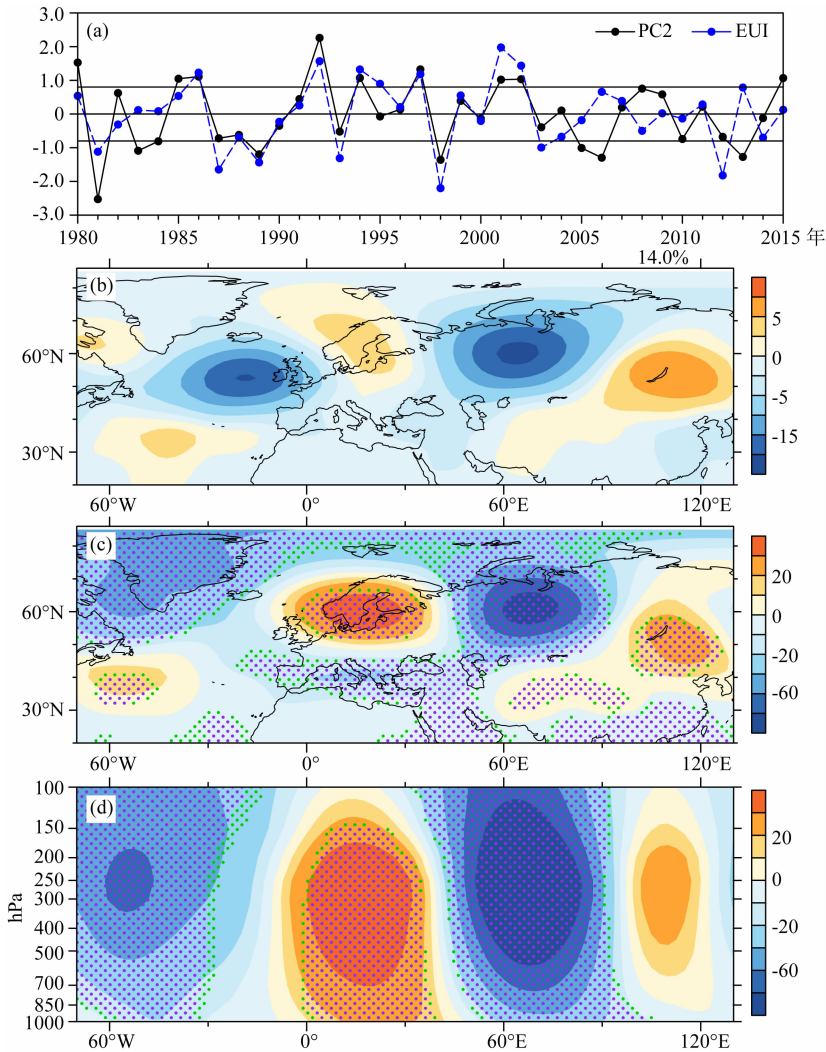


图1 (a) 1980—2015年标准化欧亚中高纬度EU型遥相关型指数(EUI, 蓝色虚线)和500 hPa位势高度场第二模态时间系数(PC2, 黑色实线). (b) 欧亚地区500 hPa位势高度场自然正交分解第二模态空间分布型. (c) EUI高指数年与低指数年合成的500 hPa位势高度差值场. (d) 沿60°N剖面的位势高度差值场(单位:gpm)

图(a)中的黑色直线表征EUI指数 $\pm 0.8$ 个标准差. 高度场差值超过90%和95%显著性的区域分别用绿色和紫色点图表示.

Fig. 1 (a) Normalized time series of Eurasian teleconnection index (EUI, blue dashed line) and the second Principal Component index (PC2, black solid line) of summer 500 hPa geopotential height for the period of 1980—2015. (b) Spatial distribution of second mode of 500 hPa geopotential height over North Atlantic-Eurasian continent. (c) Composite differences of 500 hPa geopotential height. (d) Profile of geopotential height along 60°N between high and low EUI years (units: gpm)

The black straight lines in (a) represent  $\pm 0.8$  standard deviation of the EUI index. Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

的调制,其本质上反映了春—夏季海冰主要变率模态的潜在影响,反之亦然.后面我们将对其可能的影响机制加以深入分析.

为了进一步探索北极海冰变化对夏季欧亚大陆中高纬大气环流的影响,我们定义了前期春季的巴伦支海—巴芬湾海冰指数(SICI),即巴伦支海(70°N—82°N, 0°—55°E)以及巴芬湾(52°N—70°N, 65°W—50°W)区域范围平均的海冰异常值.图3a给出了标

准化SICI指数的历史序列,可以发现SICI指数存在着显著的年际变化.同样,我们也定义了夏季巴伦支海冰指数(SICL\_JJA),其为70°N—82°N, 0°—55°E区域范围平均的海冰异常值(图略).表1给出了夏季EUI分别与春、夏季海冰指数间的相关系数,分别为-0.51和-0.47,均超过了99%的显著性.这说明前春—夏季巴伦支海北部区域以及巴芬湾区域的海冰异常与夏季欧亚中高纬EU型变化关系紧密.

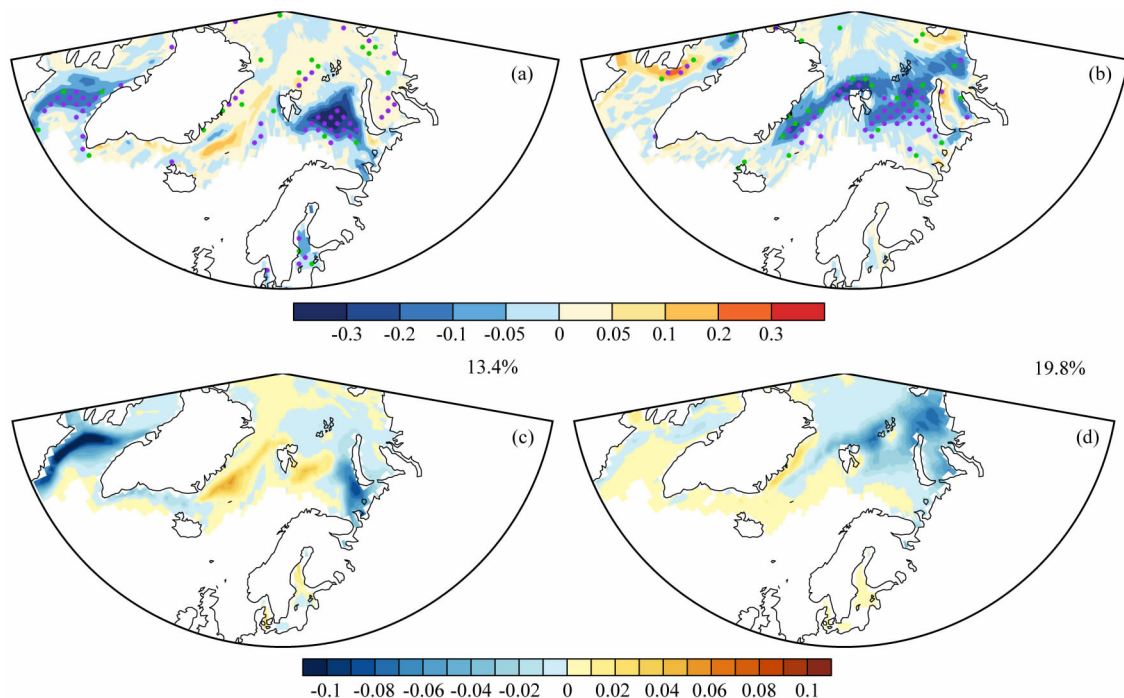


图2 EUI高指数年与低指数年合成的海冰密集度差值场:(a)前期春季,(b)夏季.海冰密集度场差值超过90%和95%显著性的区域分别用绿色和紫色点图表示.(c)春季海冰密集度自然正交分解第二模态空间分布型.(d)夏季北极海冰密集度自然正交分解第一模态空间分布型

Fig. 2 Composite differences of the Arctic sea ice concentration in (a) preceding spring and (b) summer between high and low EUI years. Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively. (c) Spatial pattern of the second mode of Arctic sea ice concentration in preceding spring. (d) Spatial pattern of the leading mode of Arctic sea ice concentration in summer

表1 夏季EUI指数与春季SICI、夏季SICL\_JJA、4—5月SWEI指数之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the summer EUI and the spring SICI, summer SICL\_JJA, and April-May averaged SWEI

	SICI	SICL_JJA	SWEI
EUI	-0.51	-0.47	0.48

我们以SICI指数正负0.7个标准差为标准筛选出海冰偏少年(1980, 1986, 1992, 1995, 1996, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009)和海冰偏多年(1982, 1983, 1984, 1993, 1997, 1998, 1999, 2003, 2012, 2014, 2015),并分析了中、低层大气环流在海冰偏少年、偏多年合成的差值场,结果如图3b—3d所示.在850 hPa位势高度场和风场(图3b)以及500 hPa位势高度场(图3c)上,北大西洋—欧亚大陆中高纬地区同样存在着明显的纬向遥相关波列.这与500 hPa位势高度场在EUI高、低指数年的合成差值场(图1c)非常相像.从位势高度场的垂直结构看(图3d),其也反映出了与EUI高、低指数年合成类似的相当正压结构(图1d),尤其是位于欧洲和乌拉尔山地区的

负中心非常明显,这不利于乌山阻高建立,而东亚地区的正高度距平会使东亚槽变浅,南下的冷空气活动减弱,不利于江淮流域降水偏多(Fan et al., 2008).在200 hPa风场上(图3e),位于西亚—中亚上空的亚洲急流增强北跳,贝加尔湖以北的副极地地区为西风异常,东亚副热带急流北侧为东风异常,这有利于贝加尔湖附近地区反气旋的出现.对于东亚副热带急流的变化特征,以往研究曾发现,夏季欧亚地区出现EU型时,会对东亚副热带急流和中高纬西风带分布有调制作用(Wang and Zhang, 2015; Gao et al., 2017),而东亚副热带急流和西风带的变化将通过急流以北和以南地区的辐合辐散运动来加强大气的垂直运动,进而影响东亚地区的降水(穆松宁和周广庆, 2012; Wu et al., 2016).上述统计分析的结果进一步表明,前春巴伦支海和巴芬湾区域海冰异常可能是影响夏季欧亚中高纬EU型的重要因子之一.

图4给出了我国夏季降水在EUI高、低指数年和SICI低、高指数年的合成差值场.不难发现它们比较相似,主要表现为我国长江流域及其以北大部

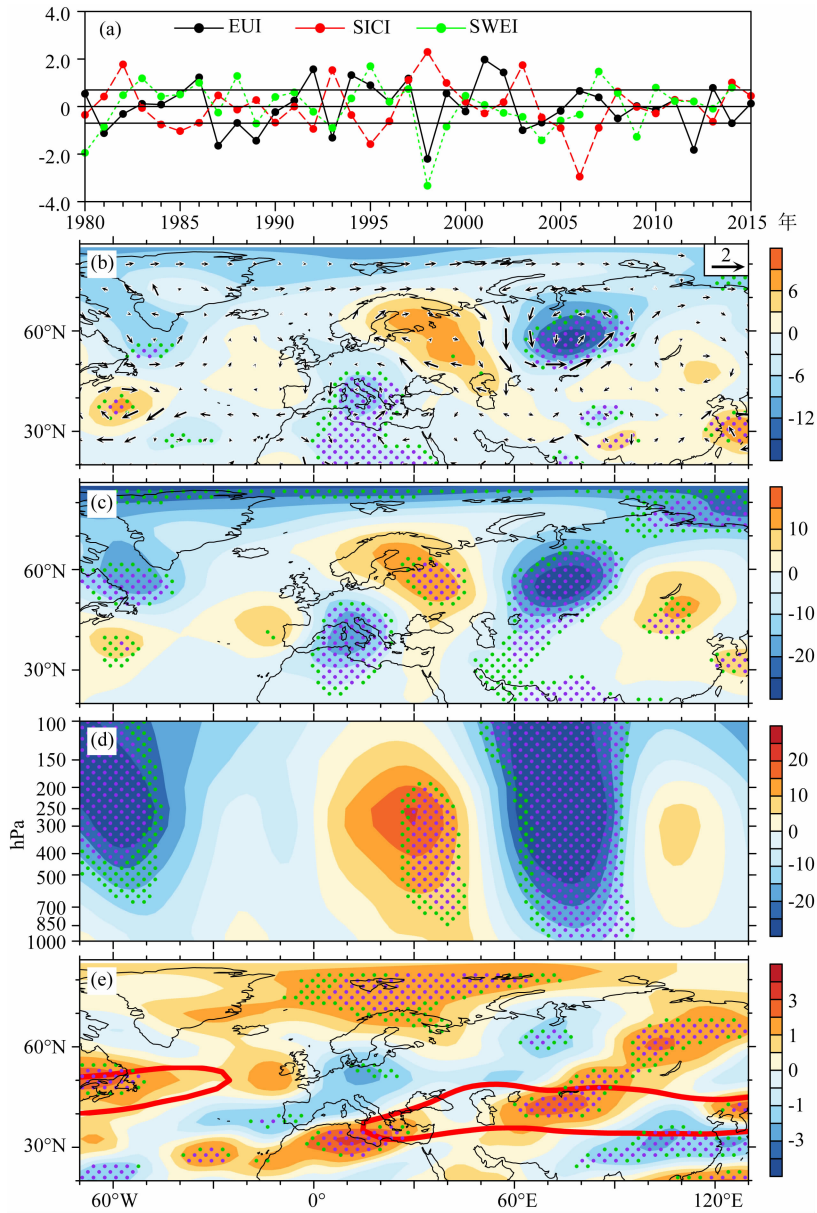


图3 (a) 标准化春季海冰指数(SICI, 红色虚线), 4—5月雪水当量指数(SWEI, 绿色虚线)和EUI指数(黑色实线). (b) 海冰偏少与偏多年合成的850 hPa位势高度差值场(单位:  $\text{gpm}$ )和水平风场(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). (c) 500 hPa位势高度差值场. (d) 沿 $60^\circ\text{N}$ 剖面的位势高度差值场. (e) 200 hPa纬向风速差值场

图(a)中黑色直线代表SICI指数 $\pm 0.7$ 个标准差. 图(e)中红色实线代表 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速.

高度场和风场差值超过90%和95%显著性的区域分别用绿色和紫色点表示.

Fig. 3 (a) Normalized time series of the spring Arctic sea ice concentration index (SICI, red dashed line), April–May Eurasian snow water equivalent index (SWEI, green dashed line), and summer EUI (black solid line) for the period of 1980–2015. (b) Composite differences of 850 hPa geopotential height (units:  $\text{gpm}$ ) and horizontal wind (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). (c) 500 hPa geopotential height. (d) Profile of geopotential height along  $60^\circ\text{N}$ . (e) 200 hPa zonal wind between the light and heavy SIC years

The black straight lines in (a) represent  $\pm 0.7$  standard deviation of the SICI index. The red solid line in (e) represents  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  wind speed. Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

分地区降水偏少(多), 尤其是在东北北部地区、黄河和长江之间地区降水偏少(多)非常显著. 这与以往研究结果指出的受夏季欧亚中高纬“一十十”遥相

关型影响, 东北亚地区降水偏少较为一致(卫捷等, 2004; Wu et al., 2013; Wang and He, 2015). 但我们还注意到, 在长江流域以南地区两者分布不尽相同,



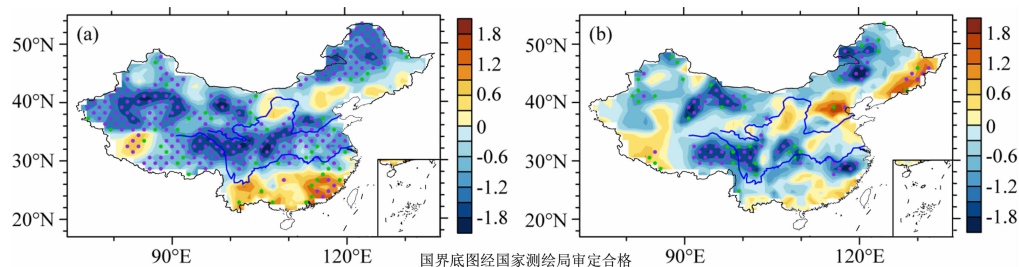


图 4 (a)EUI 高指数年与低指数年和(b)海冰偏少与偏多年合成的中国夏季降水差值场(单位:mm)降水场差值超过 90%和 95%显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。

Fig. 4 Composite differences of summer precipitation (units: mm) over China between the high and low EUI years (a) and between the light and heavy SIC years (b)

Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

这可能与我国南方地区的降水异常还会受到北大西洋海温和印度洋海温等因子的影响有关(Zhang et al., 1999; Nigam, 2003; 张人禾等, 2008; Zuo et al., 2013)。

上述结果表明,夏季欧亚中高纬“一十—十”EU型的年际变率可能受到前期春—夏季北极海冰偏少的影响,而该遥相关型的变化又会使得我国东北北部地区、黄河和长江之间地区夏季降水偏少;反之亦然。下面将对可能物理机制作进一步研究。

## 2.2 物理机制分析

北极海冰的大幅变化可能会影响下垫面热通量的异常分布。伴随着春季巴伦支海和巴芬湾区域海冰的减少,这些区域向上的湍流热通量明显偏强,大量热量从海洋中释放到大气。当这种状况持续到夏季时,相应的加热异常也会持续(图略)。春夏持续的下垫面热通量异常可以为夏季欧亚遥相关型的发展提供热动力条件。许多研究表明,北极海冰偏少,尤其是巴伦支—喀拉海(Honda et al., 2009; Petoukhov and Semenov, 2010)和巴芬湾(Wu et al., 2013)一带海冰偏少引起的下垫面热力异常在激发欧亚大陆冬季准定常行星波中有重要作用。为此,我们计算了夏季 300 hPa Rossby 波源(Sardeshmukh and Hoskins, 1988)和波活动通量(Takaya and Nakamura, 2001),并分析了其在海冰偏少、偏多年的合成差值场。从图 5 中可以看出,格陵兰海东侧—巴伦支海北部区域出现了明显的波源负异常,正好位于欧亚中高纬遥相关型的上游。并且,对应该波源异常区域,在 300 hPa 波活动通量场上有一支波活动通量从格陵兰海—巴伦支海北部一带区域向南传播,在欧洲地区—乌拉尔山地区得到加强后向东传播至远东地区。基于以上分析,我们认为前春—夏季巴伦支北部区域海冰偏少时,低层的异常加热会激发 Rossby 波源,使得欧

亚中高纬地区准定常波形成,并对我国夏季降水产生显著影响。

北极海冰偏少除了通过直接的动力过程影响中高纬环流外,还可能通过影响欧亚中高纬地区积雪及相联系的热动力过程对中高纬环流产生影响(Liu and Yanai, 2002; Bader et al., 2011; Zhang et al., 2017)。以往研究表明,北极巴伦支—喀拉海一带区域海冰偏少会增加极地附近区域的水汽含量,使得欧亚大陆中高纬部分地区降水增加、温度降低(Liu et al., 2012; Wu et al., 2016),有利于积雪的形成和维持。为此,我们进一步分析了 4—5 月平均的欧亚雪水当量异常情况。图 6 给出了 EUI 高、低指数年合成的雪水当量差值场以及春季巴伦支海(70°N—82°N, 0°—55°E)区域平均海冰回归的雪水当量异常场。可以发现,两者的空间分布非常相像,这表明当欧亚中高纬遥相关波列为“一十—十”型时(图 6a),或者巴伦支海一带海冰偏少时(图 6b),欧亚中高纬乌拉尔山—贝加尔湖以北地区的积雪将出现“西少东多”偶极子型异常分布,其中东欧平原地区积雪偏少,而西伯利亚西北部地区积雪明显偏多。欧亚中高纬遥相关波列为“十—十—”型或者海冰偏多时则相反。

为了考察上述春季偶极子型积雪异常分布对夏季欧亚地区大气环流的可能影响,我们定义了 4—5 月“偶极子型”积雪指数(SWEI),即为 52°N—67°N, 77°E—120°E 与 45°N—65°N, 30°E—70°E 两个区域平均雪水当量之差。图 3a 中给出了标准化积雪指数 SWEI 历年演变序列,其也表现出很强的年际变化特点,并且该指数与夏季 EUI 指数的相关系数为 0.48(表 1),超过 99%显著性,反映了晚春积雪分布异常对夏季 EU 型变化的潜在影响。图 7 给出了晚春 SWEI 指数分别与晚春、夏季土壤湿度异常以及

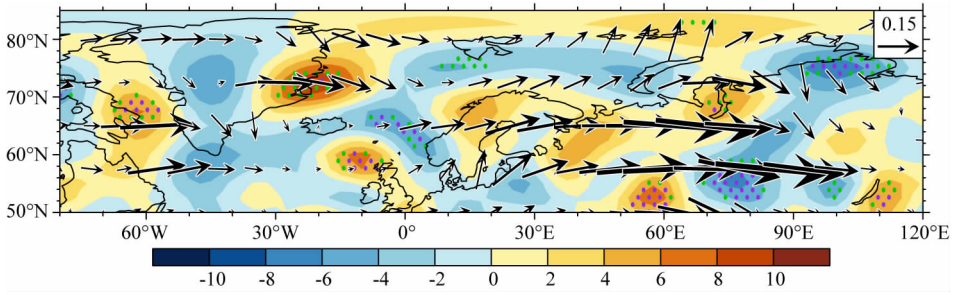


图 5 海冰偏少与偏多年合成的夏季 300 hPa 波源(阴影)和波活动通量(矢量,单位: $m^2 \cdot s^{-2}$ )差值场  
波源差值超过 90%和 95%显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。

Fig. 5 Composite differences of summer 300 hPa wave source (shadings) and wave activity flux (vectors, units:  $m^2 \cdot s^{-2}$ ) between the light and heavy SIC years

Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

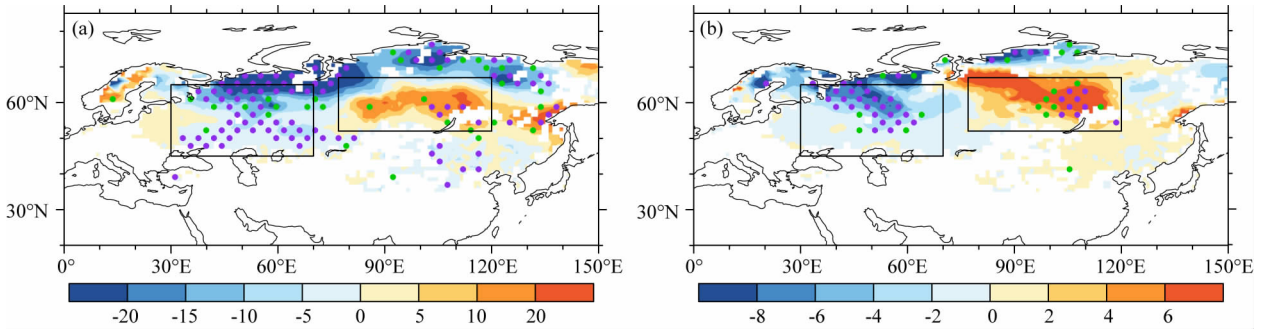


图 6 (a) EUI 高指数年与低指数年合成的 4—5 月欧亚雪水当量差值场。(b) 4—5 月欧亚雪水当量与负的巴伦支海(70°N—82°N, 0°—55°E)区域平均海冰指数的回归场(单位: mm)

图中右、左两个黑色方框中区域平均雪水当量之差用来定义雪水当量指数(SWEI)。  
雪水当量差值和异常超过 90%和 95%显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。

Fig. 6 (a) Composite difference of Eurasian snow water equivalent in April-May between the high and low EUI years. (b) Eurasian snow water equivalent anomaly in April-May regressed with the negative regional mean spring SIC index over Barents Sea (70°N—82°N, 0°—55°E) (unit: mm)

The SWEI is defined as averaged difference of SWE between the right rectangle and the left rectangle. Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

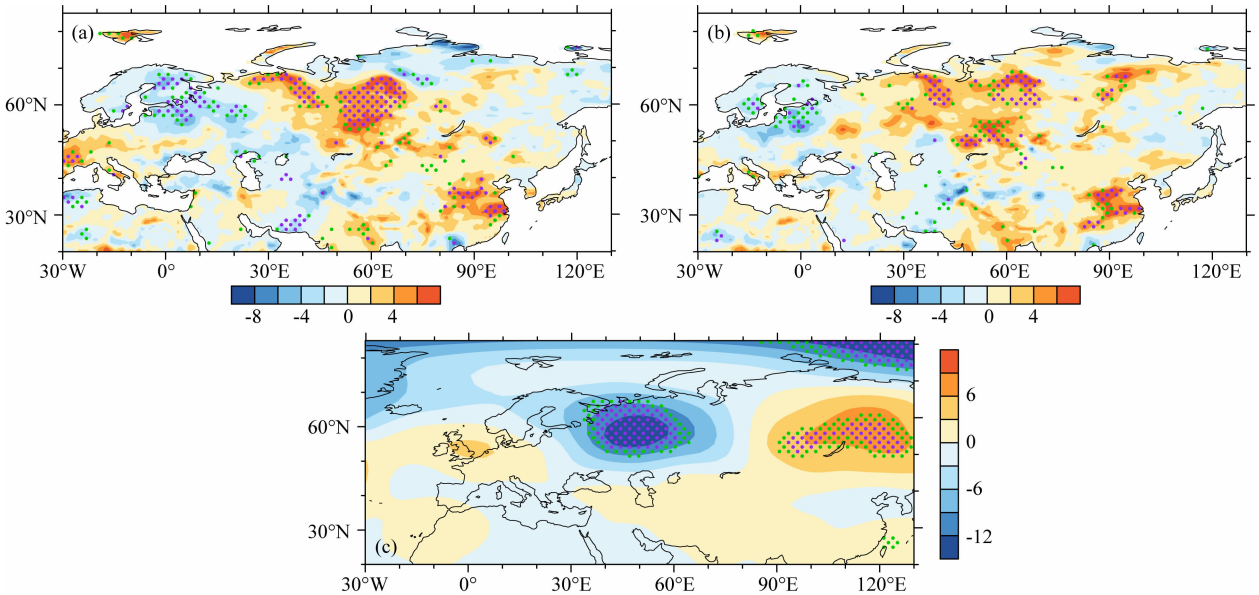


图 7 (a) 4—5 月欧亚地区土壤湿度, (b) 夏季欧亚地区土壤湿度(单位:  $m^3 \cdot m^{-3}$ ),  
(c) 夏季 500 hPa 位势高度异常(单位: gpm)对标准化 SWEI 的回归  
土壤湿度和位势高度场异常超过 90%和 95%显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。

Fig. 7 Eurasian soil moisture (unit:  $m^3 \cdot m^{-3}$ ) in April-May (a) and summer (b). (c) Summer 500 hPa geopotential height anomalies (unit: gpm) regressed with normalized SWEI

Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

夏季 500 hPa 位势高度异常的回归分布图. 可以发现, 对应春季“西少东多”偶极子型积雪异常, 晚春、夏季东欧地区土壤湿度偏干, 而西伯利亚平原西北部的乌拉尔山一带土壤明显偏湿 (图 7a—7b). 这样的土壤湿度异常分布可以直接影响下垫面水分平衡和热通量 (Zhang and Zuo, 2011; Zhang et al., 2017), 在热动力作用下, 东欧地区边界层厚度增加、乌拉尔山一带边界层厚度降低 (Ferranti and Viterbo, 2006). 因此, 欧亚大陆中高纬地区乌拉尔山至贝加尔湖一带出现“西低东高”波列分布 (图 7c). 这种波列分布, 与 EUI 指数以及 SICI 指数合成的欧亚中高纬遥相关波列非常相像 (图 1c 和图 3c). 这意味着由春季北极海冰偏少产生的欧亚积雪异常可以进一步加强夏季欧亚中高纬“一十—十”EU 型; 海冰偏多时则反之.

为了进一步验证北极海冰的动力影响过程以及通过欧亚积雪变化这一热动力过程对夏季欧亚中高纬 EU 型的协同影响机制, 图 8 给出了 SICI 和 SWEI

不同位相配置下合成的夏季 500 hPa 位势高度差值场. 在海冰偏少年 (图 8a) 和 SWEI 高指数年 (图 8c), 北大西洋—欧亚大陆中高纬地区均表现出显著的“—十—十”型, 在海冰偏多年 (图 8b) 和 SWEI 低指数年 (图 8d), 表现出“+—+—”型, 但型态振幅略有减弱. 进一步, 在海冰偏少且 SWEI 高指数年 (图 8e), 北大西洋—欧亚大陆中高纬地区表现出显著的“—十—十”型波列, 在海冰偏多且 SWEI 低指数年 (图 8f), 则表现出显著的“+—+—”型. 这意味着北极海冰偏少且欧亚地区积雪出现“西少东多”的协同分布时, 可以加强夏季欧亚中高纬“—十—十”型. 北极海冰偏多且欧亚地区积雪出现“西多东少”的协同分布时, 则会加强夏季欧亚大陆中高纬“+—+—”型遥相关波列. 图 8g 进一步给出了海冰偏少且 SWEI 高指数年与海冰偏多且 SWEI 低指数年的 500 hPa 高度差值场, 不难发现其基本反映了 EUI 高、低指数年合成的欧亚大陆中高纬 EU 型分布. 上述结果进一步表明了协同影响的重要性.

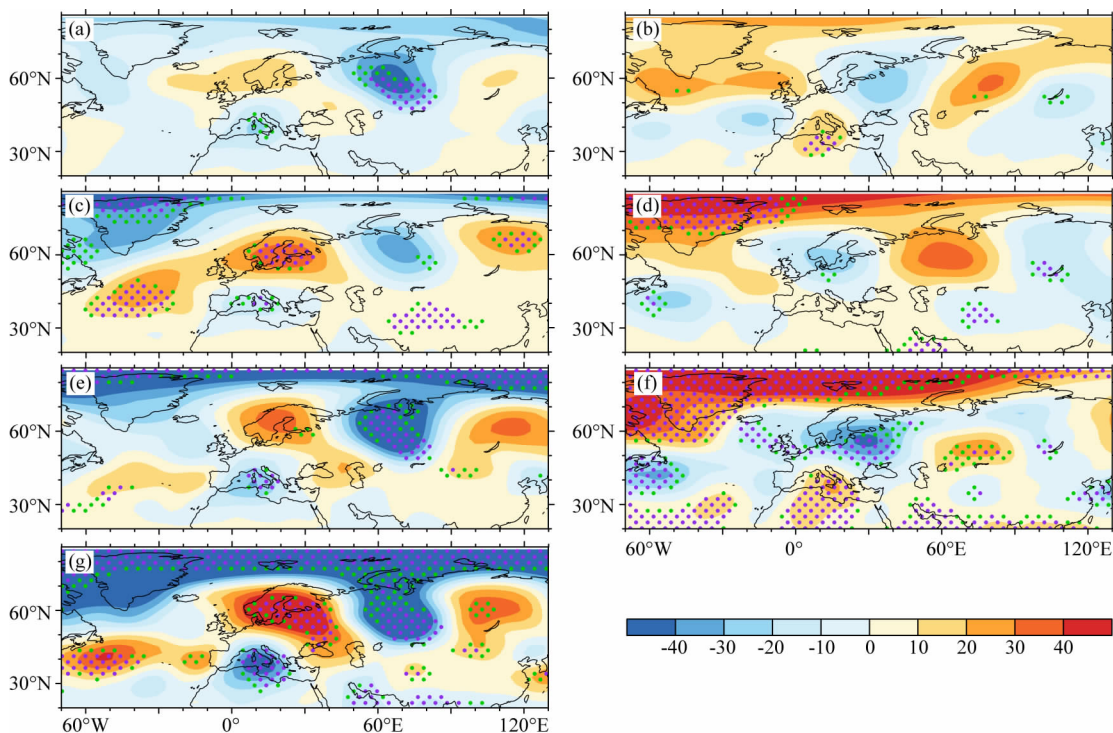


图 8 (a)海冰偏少年, (b)海冰偏多年, (c)SWEI 高指数年, (d)SWEI 低指数年, (e)海冰偏少且 SWEI 高指数年, (f)海冰偏多且 SWEI 低指数年合成的 500 hPa 位势高度异常场 (单位: gpm). (g)海冰偏少且 SWEI 高指数年与海冰偏多且 SWEI 低指数年合成的 500 hPa 位势高度差值场 (单位: mm)

位势高度差值超过 90% 和 95% 显著性的区域分别用绿色和紫色点表示.

Fig. 8 Composite 500 hPa geopotential height anomalies in light SIC years (a), heavy SIC years (b), high SWEI years (c), low SWEI years (d), light SIC with high SWEI years (e), heavy SIC with low SWEI years (f). (g) Composite difference of 500 hPa geopotential height between the light SIC with high SWEI years and heavy SIC with low SWEI years (unit: mm)

Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

以上统计诊断分析的结果说明,统计意义下北极海冰偏少(多)时,在动力过程上可以直接通过影响极地海洋上的热通量异常,激发欧亚中高纬地区准定常 Rossby 波,导致夏季欧亚中高纬 EU 型遥相关型出现.另一方面,在热动力过程上其可以通过改变欧亚中高纬地区春季积雪及相关联的土壤湿度异常分布去影响欧亚中高纬遥相关型.为了验证以上物理过程,下面通过数值试验进一步加以分析.

### 2.3 数值模拟

我们利用 CAM3.1 模式设计了一系列试验来模拟北极海冰与夏季欧亚中高纬 EU 型之间的联系及其对东亚气候的影响.试验方案大致如下,(1)控制试验:外强迫场选用模式指定的具有年循环的气候平均海冰和海温场.控制试验共积分了 60 年,其中前 10 年当作 spinup(启动年)剔除掉,后 50 年结果作为控制试验结果.(2)敏感性试验(海冰影响试验):将观测结果中海冰偏少、偏多年合成的从前春至夏季的 HadISST 海冰差值(图 2)叠加到模式指定的气候平均海冰场,并将其作为外强迫场驱动模式运行;SST 外强迫场与控制试验一致.为了得到相对可信和显著的模拟结果(Mori et al., 2014; Peings and Magnusdttir, 2014),敏感性试验采用多初值方法.试验的 50 个初值分别来自于控制试验后 50 年中每年的 3 月 1 日,运行时段为 3 月 1 日至次年 8 月 31 日,因而总共得到 50 个敏感性试验样本.(3)数值模拟结果:利用合成分析将 50 个样本的敏感性试验与控制试验之差的集合平均估算为数值模拟结果.

为了检验模式中海冰强迫场的表征能力及其气候影响,我们首先评估了模式湍流热通量对海冰异常的响应.图 9 给出了从前春至夏季的湍流热通量差值场,可以看到北极海冰持续偏少时,春季湍流热通量在格陵兰海北侧—巴伦支海北部一带以及巴芬湾区域明显偏强(图 9a),并一直持续到夏季(图 9b),这与海冰偏少、偏多年合成的湍流热通量差值十分相似(图略).

我们进一步分析了中、低层大气环流对海冰异常强迫的响应,如图 10a—10c 所示.500 hPa 高度场在欧亚大陆中高纬地区表现为波列分布,其两个负中心分别位于格陵兰岛—北大西洋和乌拉尔山地区,两个正中心分别位于西欧地区和贝加尔湖以北地区(图 10a).我们发现这个波列与海冰偏少、偏多年合成的欧亚中高纬遥相关波列(图 3c)在空间分布和强度上都十分接近.同时,在 850 hPa 高度场和

环流场上(图 10b),模式也成功模拟出了观测分析中发现的受海冰影响的欧亚中高纬遥相关波列(图 3b),尤其是位于贝加尔湖以北地区的反气旋结构.对于 200 hPa 纬向风特征,模式模拟结果表明,位于西亚—中亚上空的亚洲急流增强,贝加尔湖以北的副极区域为西风异常,东亚副热带急流北侧为东风异常(图 10c),这种纬向风分布有利于贝加尔湖以北地区反气旋的生成.

图 10d 给出了模式模拟的夏季 300 hPa 大气 Rossby 波源和波活动通量差值场,不难发现格陵兰海北部—巴伦支海北部一带区域的上空高层大气存在显著的波源负异常,这个区域有明显的波活动通量向东和向南传播,在乌拉尔山地区得到加强后继续向远东地区传播.这些模拟结果说明,受巴伦支海海冰持续偏少的影响,其可以通过激发准定常 Rossby 波使得夏季欧亚中高纬出现“—+—+”型遥相关波列.

图 11 给出了模式模拟的春季 4—5 月平均的欧亚地区雪水当量差值场,可以发现东欧平原地区积雪明显偏少,西伯利亚—贝加尔湖一带区域积雪明显偏多.这与观测事实分析中巴伦支海冰偏少与偏多年合成的“西少东多”偶极子型积雪分布十分一致(图 6).

受到夏季欧亚中高纬“—+—+”型遥相关波列的影响,模式模拟的我国长江流域及其以北大部分地区降水明显偏少,尤其是在内蒙古—东北北部地区,黄淮及江淮一带地区(图 12),与统计诊断分析中 EUI 高、低指数年(图 4a)以及海冰偏少、偏多年(图 4b)合成的降水差值场分布较为相似.以上结论在海冰偏多时则反之.

### 2.4 预测建模与应用

夏季江淮一带降水形势的预测是我国短期气候预测业务的重点之一,在此我们参考 Fan 等(2008)的方法,进一步利用多元线性回归方法,基于春季 SICI 指数和晚春(4—5 月)SWEI 指数来建立江淮流域夏季降水的预测模型.

$$YH = 0.09 - 0.33 \times SICI + 0.25 \times SWEI. \quad (1)$$

图 13 给出了夏季江淮流域(28°N—32°N, 94°E—120°E)区域平均降水以及预测模型回归和回报的江淮流域降水(YH).可以看出,二者在年际尺度上有较好的一致性,相关系数高达 0.53.其中,在建模阶段 1980—2005 年,二者相关系数为 0.49.为检验预测效果,我们又利用这个模型对 2006—2015 年的江淮流域降水进行回报,发现二者相关系数为 0.68,

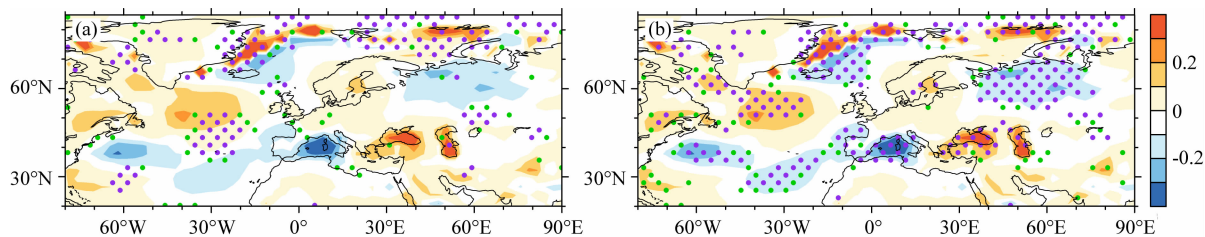


图 9 CAM3.1 模式中海冰影响试验和控制试验合成的表层湍流热通量差值场(单位:  $W \cdot m^{-2}$ ):(a)前期春季,(b)夏季湍流热通量差值超过 90% 和 95% 显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。

Fig. 9 CAM3.1 model-based composite differences of surface turbulent heat flux (the sum of sensible and latent heat flux) between the ICE and CTRL experiments in preceding spring (a) and summer (b) (unit:  $W \cdot m^{-2}$ ) Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

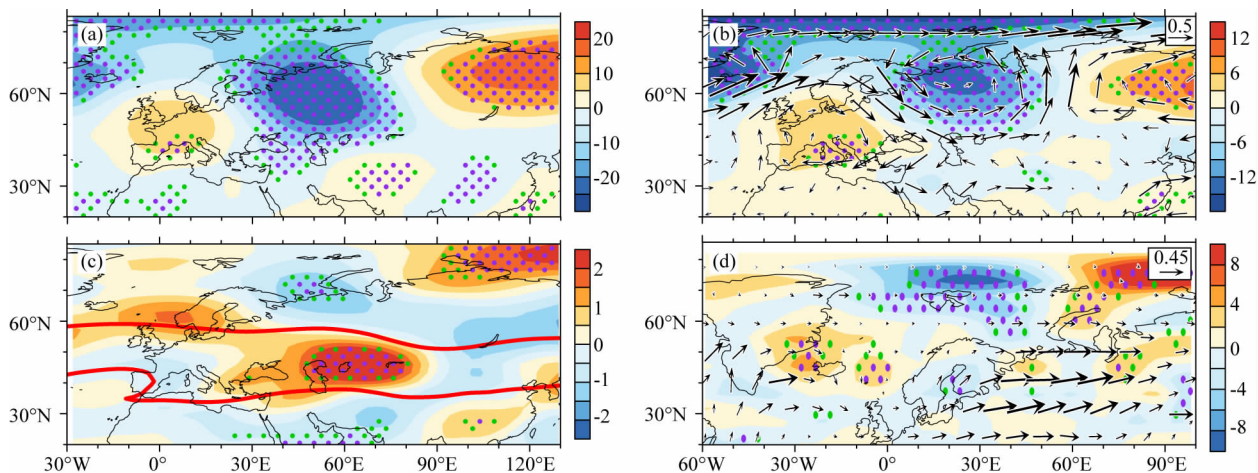


图 10 CAM3.1 模式中海冰影响试验和控制试验合成的夏季(a)500 hPa 位势高度差值场(单位: gpm),(b)850 hPa 位势高度差值场(阴影)和风场(矢量,单位:  $m \cdot s^{-1}$ ),(c)200 hPa 纬向风差值场,(d)300 hPa 波源(阴影)和波活动通量差值场(矢量,单位:  $m^2 \cdot s^{-2}$ )

图(c)中红色实线代表  $20 m \cdot s^{-1}$  风速。位势高度场、风场和波源差值超过 90% 和 95% 显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。  
Fig. 10 CAM3.1 model-based composite differences of summer 500 hPa geopotential height (a) (unit: gpm), 850 hPa geopotential height (shadings) and horizontal wind (b) (vectors, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ), 200 hPa zonal wind (c), and 300 hPa wave source (shadings) and wave activity flux (d) (vectors, unit:  $m^2 \cdot s^{-2}$ ) between the ICE and CTRL experiments The red solid line in (c) represents  $20 m \cdot s^{-1}$  wind speed. Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

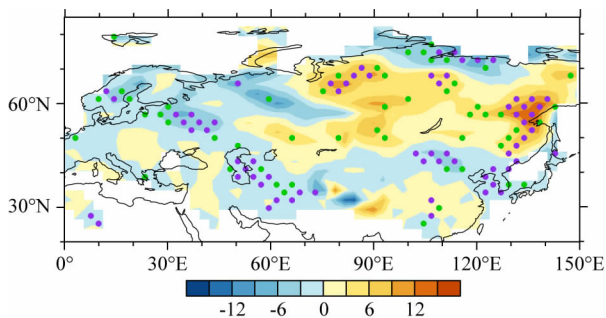


图 11 CAM3.1 模式中海冰影响试验和控制试验合成的 4—5 月欧亚雪水当量差值场(单位: mm) 雪水当量差值超过 90% 和 95% 显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。

Fig. 11 CAM3.1 model-based composite difference of Eurasian snow water equivalent (units: mm) in April-May between the ICE and CTRL experiments Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

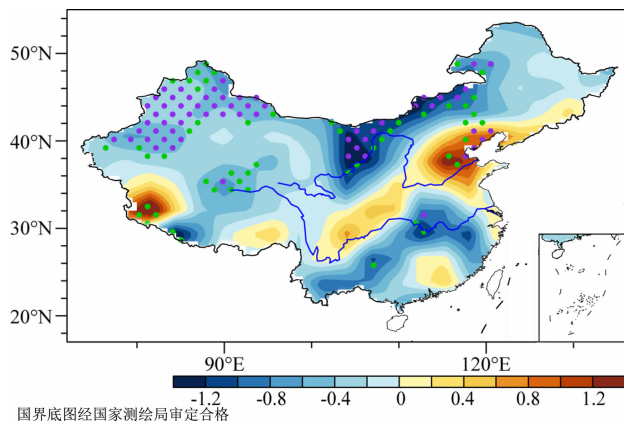


图 12 CAM3.1 模式中海冰影响试验和控制试验合成的中国夏季降水差值场(单位: mm) 降水差值超过 90% 和 95% 显著性的区域分别用绿色和紫色点表示。  
Fig. 12 CAM3.1 simulated composite difference of summer precipitation (units: mm) over China between the ICE and CTRL experiments Values significantly exceeding the 90% and 95% confidence levels are marked by green and purple dots, respectively.

超过了 95% 的显著性。回报结果表明, 预测模型可以较好地预测江淮流域降水的年际变率, 成功地再现了 2006, 2013 年的高值和 2012, 2014, 2015 年的低值。因此, 这个基于 SICI 和 SWEI 指数的二元线性预测模型对夏季江淮流域降水具有较高的预测技巧, 对汛期气候预测有一定的应用价值。

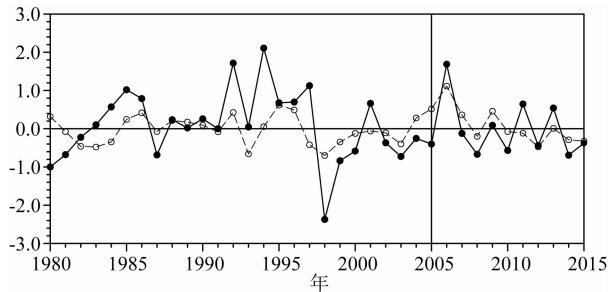


图 13 CPC 资料中夏季江淮流域降水(实线), 基于 SICI 和 SWEI 模型预测的 1980—2005 年江淮流域降水和回报的 2006—2015 年江淮流域降水(虚线)

Fig. 13 The time series for real CPC precipitation in Yangtze-Huaihe River Valley (solid line), the SICI and SWEI model-based prediction for the period of 1980—2005, and the hind-cast values for the period of 2006—2015 (dashed line)

### 3 结论

本文利用 NCEP/NCAR 等再分析资料和 CAM3.1 数值模式系统地研究了春季北极海冰影响夏季欧亚大陆中高纬 EU 型遥相关型的可能机制, 并分析了其对我国夏季降水的可能影响。结果表明, 夏季北大西洋—欧亚中高纬地区 500 hPa 位势高度场自然正交分解第二模态表现为明显的“—+—+”型遥相关波列, 异常高空槽区分别位于格陵兰岛—北大西洋和乌拉尔山地区, 这不利于乌拉尔山阻高的建立, 而异常高压脊区则分别位于欧洲和贝加尔湖附近地区, 这个遥相关波列与夏季欧亚中高纬 EU 型遥相关型分布非常相似。当该遥相关波列为“—+—+” (“+—+—”) 型分布时, 前期春季巴伦支海北部区域和巴芬湾区域海冰明显偏少(多), 夏季巴伦支海北部区域海冰持续偏少(多), 同时我国长江流域及其以北大部分地区降水偏少(多), 尤其是在东北北部地区、长江和黄河之间的地区。机理分析表明, 前期春季—夏季北极海冰偏少后, 在动力过程影响方面会激发异常 Rossby 波源, 使准定常 Rossby 波活动通量向东亚地区传播, 促使夏季欧亚中高纬地区“—+—+”型出现。另一方面, 在热动力过程影响方

面, 春季北极海冰异常偏少后, 4—5 月欧亚大陆乌拉尔山—贝加尔湖以北地区积雪出现“西少东多”偶极子型异常分布, 其中东欧平原地区积雪偏少, 西伯利亚地区积雪偏多。而上述积雪的消融则会影响到后期夏季土壤湿度及下垫面热通量的分布, 进一步来加强夏季欧亚中高纬 EU 型。伴随着夏季欧亚中高纬 EU 型的出现, 乌山阻塞高压偏弱, 东亚槽偏浅, 且亚洲副热带急流得到加强, 贝加尔湖以北的副极地地区出现西风异常, 同时东亚副热带急流北侧出现东风异常, 这有利于贝加尔湖附近地区形成反气旋性环流, 南下冷空气活动减弱。这些环流形势异常最终导致夏季我国东北北部地区、黄河和长江之间地区降水明显偏少。当春夏季海冰偏多时, 结论则反之。最后, 我们基于春季海冰指数和晚春偶极子型积雪指数建立了关于我国江淮流域夏季降水的预测模型, 回报结果表明该模型具有较高的预测技巧, 其可以较好地预测江淮流域夏季降水的年际变率, 对汛期气候预测有一定的应用价值。

虽然上述诊断分析发现北极海冰偏少或偏多是影响夏季欧亚中高纬 EU 型变化的一个重要因子, 但是我们也注意到北大西洋涛动和北大西洋海温等因子也会影响夏季欧亚大陆中高纬环流的异常分布 (Zuo et al., 2013; Wu et al., 2013), 而它们与北极海冰的协同变化对夏季欧亚中高纬遥相关型分布的影响则需要我们进一步加以分析。

### References

- Bader J, Mesquita M D S, Hodges K I, et al. 2011. A review on Northern Hemisphere sea-ice, storminess and the North Atlantic Oscillation: Observations and projected changes. *Atmospheric Research*, 101(4): 809-834.
- Balsamo G, Beljaars A, Scipal K, et al. 2009. A revised hydrology for the ECMWF model: Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the Integrated Forecast System. *Journal of Hydrometeorology*, 10(3): 623-643.
- Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115(6): 1083-1126.
- Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L, et al. 2006. The community climate system model version 3 (CCSM3). *Journal of Climate*, 19(11): 2122-2143.
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the northern Hemisphere Summer. *Journal of Climate*, 18(17): 3483-3505.
- Fan K, Wang H J, Choi Y J. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze

- River Valley summer rainfall. *Chinese Science Bulletin*, 53(4): 602-609.
- Ferranti L, Viterbo P. 2006. The European summer of 2003; Sensitivity to soil water initial conditions. *Journal of Climate*, 19(15): 3659-3680.
- Gao T, Yu J Y, Paek H. 2017. Impacts of four northern-hemisphere teleconnection patterns on atmospheric circulations over Eurasia and the Pacific. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4): 815-831.
- Hack J J, Caron J M, Yeager S G, et al. 2006. Simulation of the Global Hydrological Cycle in the CCSM Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3): Mean Features. *Journal of Climate*, 19(11): 2199-2221.
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophysical Research Letters*, 36(8): L08707, doi: 10.1029/2008GL037079.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437-472.
- Li Y F, Leung L R. 2013. Potential impacts of the arctic on interannual and interdecadal summer precipitation over China. *Journal of Climate*, 26(3): 899-917.
- Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(11): 4074-4079.
- Liu X D, Yanai M. 2002. Influence of Eurasian spring snow cover on Asian summer rainfall. *International Journal of Climatology*, 22(9): 1075-1089.
- Liu Y Y, Wang L, Zhou W, et al. 2014. Three Eurasian teleconnection patterns; Spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies. *Climate Dynamics*, 42(11-12): 2817-2839.
- Mori M, Watanabe M, Shiogama H, et al. 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geoscience*, 7(12): 869-873.
- Mu S N, Zhou G Q. 2012. Mechanism for the correlation of winter fresh snow extent over Northern Eurasia and summer climate anomalies in China: Anomalous seasonal transition of land as a bond. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 36(2): 297-315.
- Nakamura H, Tanaka M, Wallace J M. 1987. Horizontal structure and energetics of Northern Hemisphere wintertime teleconnection patterns. *Journal of Atmospheric Sciences*, 44(22): 3377-3391.
- Nigam S. 2003. Teleconnections. // Holton J R ed. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. London: Academic Press, 2243-2269.
- Nitta T, Hu Z Z. 1996. Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 74(4): 425-445.
- Peings Y, Magnusdottir G. 2014. Response of the wintertime Northern Hemisphere atmospheric circulation to current and projected Arctic sea ice decline; a numerical study with CAM5. *Journal of Climate*, 27(1): 244-264.
- Petoukhov V, Semenov V A. 2010. A link between reduced Barent-Kara sea-ice and cold winter extremes over northern continents. *Journal of Geophysical Research*, 115(D21) D21111, doi: 10.1029/2009JD013568.
- Petrie R E, Shaffrey L C, Sutton R T. 2015. Atmospheric response in summer linked to recent Arctic sea ice loss. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(69): 2070-2076.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108(D14): 4407.
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. *Journal of Atmospheric Sciences*, 45(7): 1228-1251.
- Shi N, Zhu Q G. 1993. Studies on the northern early summer teleconnection patterns, their interannual variations and relation to drought/flood in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 10(2): 155-168.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 58(6): 608-627.
- Takala M, and Coauthors. 2011. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of spaceborne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): doi: 10.1016/j.rse.2011.08.014.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 109(4): 784-812.
- Wang B, Wu R G, Lau K. 2001. Interannual variability of the Asian summer monsoon; Contrasts between the Indian and the western North Pacific-East Asian monsoons. *Journal of Climate*, 14(20): 4073-4090.
- Wang H J, He S P. 2015. The North China/Northeastern Asia severe summer drought in 2014. *Journal of Climate*, 28(17): 6667-6681.
- Wang N, Zhang Y C. 2015. Connections between the Eurasian teleconnection and concurrent variation of upper-level jets over East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(3): 336-348, doi: 10.1007/s00376-014-4088-1.
- Wei J, Zhang Q Y, Tao S Y. 2004. Physical causes of the 1999 and 2000 summer severe drought in North China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28(1): 125-137.
- Wei T, Wang L N, Dong W N, et al. 2011. A comparison of East Asian summer monsoon simulations from CAM3.1 with three dynamic cores. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(3-4): 295-306.
- Wu B Y, Zhang R H, Wang B. 2009. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall: a further study. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(4):

666-678.

- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R, et al. 2013. On the relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia. *Journal of Climate*, 26(15): 5523-5536.
- Wu R G, Wang B. 2002. A contrast of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship between 1962-77 and 1978-93. *Journal of Climate*, 15(22): 3266-3279.
- Wu Z W, Li X X, Li Y J, et al. 2016. Potential influence of Arctic sea ice to the interannual variations of East Asian spring precipitation. *Journal of Climate*, 29(8): 2797-2813.
- Xie P, Yatagai A, Chen M, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *Journal of Hydrometeorology*, 8: 607-626.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 16(2): 229-241.
- Zhang R H, Wu B Y, Zhao P, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66(5): 697-706.
- Zhang R H, Zuo Z Y. 2011. Impact of spring soil moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation in East China. *Journal of Climate*, 24(13): 3309-3322.
- Zhang R N, Wu B Y. 2011. The Northern Hemisphere atmospheric response to spring Arctic sea ice anomalies in CAM3.0 model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(5): 847-862.
- Zhang R N, Zhang R H, Zuo Z Y. 2017. Impact of Eurasian spring snow decrement on East Asian summer precipitation. *Journal of Climate*, 30(9): 3421-3437.
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. The impact of North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(4): 1173-1186.

## 附中文参考文献

- 穆松宁, 周广庆. 2012. 欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的机理研究——陆面季节演变异常的“纽带”作用. *大气科学*, 36(2): 297-315.
- 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2004. 1999 及 2000 年夏季华北严重干旱的物理成因分析. *大气科学*, 28(1): 125-137.
- 张人禾, 武炳义, 赵平等. 2008. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后期的年代际转型及其可能成因. *气象学报*, 66(5): 697-706.
- 张若楠, 武炳义. 2011. 北半球大气对春季北极海冰异常响应的数值模拟. *大气科学*, 35(5): 847-862.

(本文编辑 何燕)