

左志燕, 张人禾. 2012. 中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系 [J]. 大气科学, 36 (1): 185–194. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2012. The anomalies of spring rainfall in eastern China and its relation with tropical Pacific SST and Eurasian snow [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 185–194.

中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系

左志燕 张人禾

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要 利用降水观测资料, 研究了 1979~2004 年中国春季 (3~5 月) 标准化累积降水异常的时空特征及其与前冬、春热带太平洋海面温度和春季欧亚大陆积雪的关系。中国春季标准化累积降水量 EOF 第一模态最大变率位于中国东部中纬度地区, 主要反映了中国东部中纬度地区春季降水的变化特征。同时, 中国东部春季降水异常具有南、北反相变化的特征。当长江以南大部分地区的降水偏少时, 长江以北地区的降水偏多。春季降水异常具有显著的年际变化, 但在 1980 年代末出现年代际转型, 即年际变化的振幅明显增大变强、周期变长。从华北到长江流域中纬度地区的春季降水异常特征与前冬热带太平洋海面温度有密切的关系。当前冬、春热带东太平洋海温偏暖, 西太平洋海温偏冷时, 中国东部从华北到长江流域中纬度地区的春季降水偏多, 反之亦然。虽然当春季欧亚大陆楚科奇半岛和青藏高原积雪偏多, 贝加尔湖到中国东北地区的积雪偏少时, 对应着中国东部从华北到长江流域中纬度地区的降水偏多, 但当去掉 ENSO 信号后, 这种关系并不显著。说明 EOF 第一模态所反映的中国东部从华北到长江流域中纬度地区春季降水与欧亚大陆积雪的相关关系可能是前冬热带太平洋海面温度异常的一个体现。

关键词 中国春季降水 海面温度 欧亚大陆积雪

文章编号 1006-9895 (2012) 01-0185-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Anomalies of Spring Rainfall in China and its Relation with Tropical Pacific SST and Eurasian Snow

ZUO Zhiyan and ZHANG Renhe

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The spatial and temporal characteristics of spring (March–May) rainfall in China and its relations with the previous winter (December–January) and spring sea surface temperature (SST) over the tropical Pacific Ocean and spring snow over Eurasia are investigated using the observed rainfall dataset for the period 1979–2004. The leading EOF mode of normalized spring rainfall shows the most robust variability in the vast regions from the Yangtze River valley to North China (YRNC), representing the variation of spring rainfall in the middle-latitude eastern China. The anomalies of spring rainfall in eastern China show a meridional dipole mode across the Yangtze River valley. The interannual variability of springtime rainfall is notable and becomes more robust after the late 1980s. The anomalies of springtime rainfall over YRNC are significantly correlated with the SST in the tropical Pacific

收稿日期 2011-02-14, 2011-06-23 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2007CB411505, 国家自然科学基金资助项目 40921003, 国家科技支撑计划课题 2007BAC29B02

作者简介 左志燕, 女, 1980 年出生, 副研究员, 主要从事陆面过程与东亚季风的研究。E-mail: zyzuo@cams.cma.gov.cn

Ocean during the previous winter and spring. Positive spring rainfall anomalies in YRNC correspond to warmer tropical East Pacific Ocean and colder tropical West Pacific Ocean, and vice versa. Although more rainfall over YRNC is associated with increased snow water equivalent (SWE) in the Chukchi Peninsula and the Tibetan Plateau and reduced SWE in the area from south of Lake Baikal to Northeast China, and this correlation becomes insignificant after subtracting El Niño – South Oscillation (ENSO) effect. Thus, the link between Eurasian snow and spring-time rainfall over YRNC is probably a component of the relationship between ENSO and rainfall.

Key words springtime rainfall in China, sea surface temperature, Eurasian snow

1 引言

中国大部分地区的春季降水绝对值远小于夏季,但春季降水的多少对中国农牧业以及人民生活 and 工业用水有重要的影响。张洁等(2009)的研究表明,来自青藏高原南缘的西风水汽输送是中国春季降水的重要水汽来源。其中华南地区的春季降水水汽主要来源于菲律宾和中国南海地区,长江中下游地区的降水水汽主要来源于热带西太平洋。东部黄淮流域春季降水的水汽主要来源于中纬度西北太平洋,当 500 hPa 高压异常中心北移至日本海附近,同时东亚西风急流偏弱时,往往对应着黄淮流域降水偏多。

中国春季降水异常同时受到中高纬和低纬大气环流系统的影响(韩晋平等,2006),而海洋和陆地的热异常是直接导致北半球季节平均的大气环流和中国降水异常的外强迫因子。当春季东亚大陆温度增加和周边海洋表面温度减少时,青藏高原东侧低压以及西太平洋副热带高压加强,导致中国春季江淮流域降水增加,而江南降水减少(赵平等,2009)。华南春雨与太平洋海表面温度异常有密切关系。在 El Niño 盛期,华南春季降水有显著的正异常(Zhang et al., 1999; Zhang and Sumi, 2002),同时也与北太平洋上的环流异常有密切联系(Wang et al., 2002)。前汛期东北冷涡异常强(弱)年,对应着华南降水有显著的正(负)异常(苗春生等,2006)。El Niño 期间,华北当年和来年春季降水往往偏多(王群英和龚道溢,1999)。另外,前期冬季印度洋海温与中国华北春季降水也有显著的关系(顾伟宗等,2006)。

欧亚大陆—青藏高原积雪与东亚季风和中国春、夏季降水也有密切联系(陈烈庭和阎志新,1979;谭言科等,1999;陈乾金等,2000;陈兴芳和宋文玲,2000;吴统文和钱正安,2000;张人禾等,2008;Wu et al., 2009;穆松宁和周广庆,2010)。

当青藏高原前冬春积雪偏多时,春季东亚冬季风偏强,夏季风爆发晚,有利于中国华南前汛期的降水(蔡学湛,2001)。Chen and Wu (2000) 提出青藏高原前冬积雪与中国降水不仅在年际尺度上有密切关系,同时在年代际尺度上也密切相关。欧亚大陆冬—春季积雪异常与我国春—夏季南方降水有密切关系。当西伯利亚前冬春积雪偏多时,往往对应着我国南方春季降水的减少和夏季降水的增加(Wu and Kirtman, 2007; Wu et al., 2009)。当东亚地区上空对流层存在反气旋环流异常时,往往对应着中国华北春季降水的偏多,这个异常反气旋与起源于欧亚大陆中纬度地区的波列有密切关系(陆日宇,2001)。

如前所述,中国春季降水既受海温的影响,也受欧亚大陆积雪的影响,但已有的研究表明,欧亚大陆积雪与亚洲季风降水的关系可能是 ENSO 与亚洲季风关系某方面的体现(Ye and Bao, 2001; Liu and Yanai, 2002),与 ENSO 有关的遥相关作用使得在欧亚大陆激发出一个异常的大气环流,从而导致亚洲季风活动异常(Webster et al., 1998)。青藏高原雪盖与中国降水的关系包含了 ENSO 的作用,且 ENSO 对两者的关系具有很大的影响(Wu and Kirtman, 2007)。因此,海温和欧亚大陆积雪是否具有独立的影响?二者的影响程度如何?哪一个是最主要的影响因子?这些问题仍然是需要进一步研究的问题。本文旨在讨论中国春季降水的时空特征,在此基础上分析影响中国春季异常的外强迫因子,主要考虑的强迫因子包括前冬、春海表面温度异常和春季欧亚大陆—青藏高原积雪异常,以期进一步认识海温和欧亚大陆积雪在中国春季降水变异中的作用。

2 资料与方法

文中利用国家气象信息中心提供的 1958~2004 年 595 个台站观测的降水资料。文中对春季

(3~5 月) 累计降水量进行了标准化处理,即用春季累计降水量距平除以标准差,得到了春季标准化累计降水量。标准化累计降水量可以较好地反映我国春季降水的相对变异。海表面温度资料为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 OISST (NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature Analysis) (Reynolds et al., 2002)。积雪资料为美国国家雪冰中心提供的雪水当量资料 (SWE) (Armstrong and Brodzik, 2005)。风场和位势高度场的资料为 NCAR/NCEP 月平均再分析资料。文中采用了经验正交函数 (EOF) 分析、一元线性回归、相关、偏相关及合成分析等统计方法。

3 中国春季降水异常的时空特征及环流背景

图 1 给出了 1979~2004 年中国春季标准化累计降水量的 EOF 分析第一模态的空间型和相应的时间系数。该模态的方差贡献为 19.4%。可以看到, EOF 第一模态所显示的中国春季降水有较明

显的南、北反相变化特征,即当长江以南大部分地区的降水偏少时,中国东部除东北小部分地区外,长江以北地区的降水偏多。在中国西部地区,青藏高原地区的降水与西北降水也存在明显的反相变化特征。相对变率最大的中心位于中国东部从长江流域到华北地区的中纬度地带,其值最高可达 0.8 个标准差。图 1a 表明,虽然春季绝对累计降水量在华南地区最大,但是降水量的相对变率最大的地区却位于中国东部中纬度地区 ($30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)。因此, EOF 第一模态主要反映了中国东部中纬度地区春季降水的变化特征。从 EOF 第一模态相应的时间系数可以看到,中国东部春季降水的这种南、北反位相异常具有明显的年际变化。这种年际变化特征在 1980 年代末期发生改变。在 1980 年代末之前,虽然有明显的年际变化,但是除了 1981 年降水变率超过 1 个标准差外,其它年份的变率相对都较小。而在 1980 年代末之后,极端降水异常的年份增多,如 1990、1991、1998、2000、

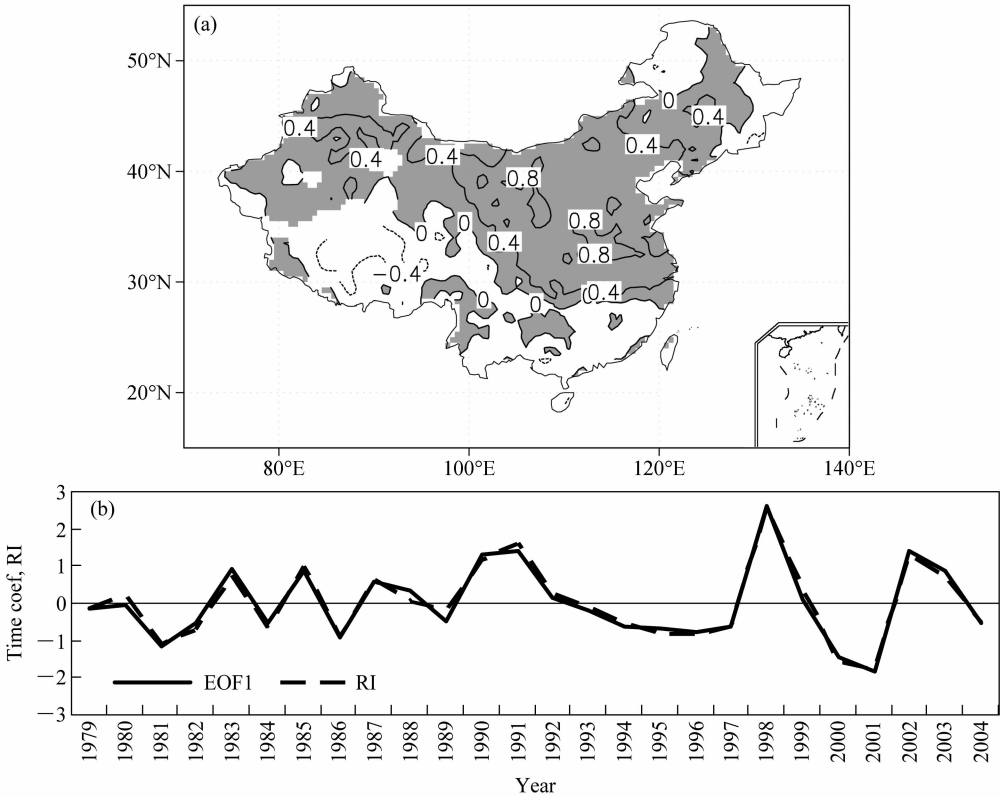


图 1 1979~2004 年中国春季标准化累计降水量的 EOF 第一模态的 (a) 空间型 (阴影: 归一化特征向量大于零) 和 (b) 相应的时间系数 (实线) 和标准化的东部中纬度地区 ($30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 的春季降水 (虚线) 随时间的演变图

Fig. 1 (a) Spatial distribution of the first EOF mode of normalized spring rainfall in China for the period 1979–2004 (shaded areas denote positive eigenvector), and (b) corresponding time series and normalized spring rainfall averaged over the mid-latitude zone ($30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) (RI for short)

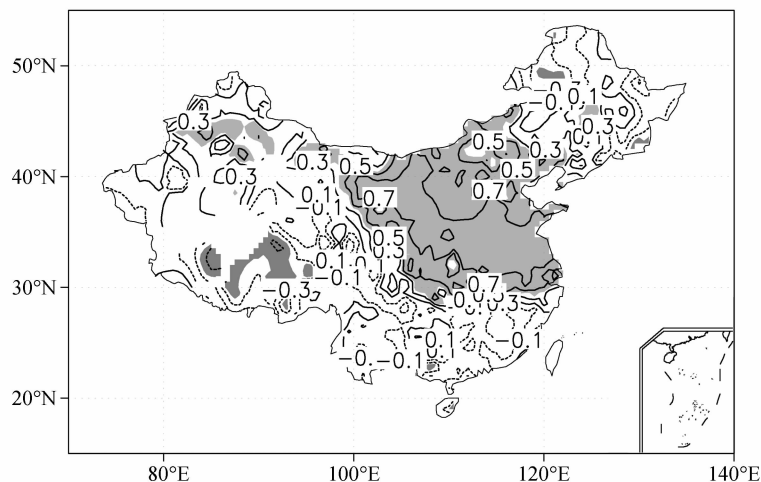


图2 1979~2004年RI与中国春季每个站点降水的相关系数分布。浅(深)阴影:正(负)相关显著性水平超过0.05

Fig. 2 Distribution of correlation coefficients between RI and the synchronous rainfall at each grid point during 1979–2004. Light (dark) shaded areas denote the positive (negative) correlation exceeding the 0.05 significance level

2001、2002年的降水变率都超过了一个标准差,1998年的降水异常甚至达到了2.6个标准差,这一年正是中国长江流域夏季发生严重洪涝灾害的一年。已有研究表明,东亚夏季风和我国夏季气候在1980年代末发生了一次年代际转型(Shi and Xu, 2007; 张人禾等, 2008),此处的分析表明中国春季降水也有年代际转型在此时发生,即年际变化的振幅变强、周期变长。

考虑到中国东部中纬度地区具有最大的降水相对变率,我们将此区域($30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)的春季降水进行区域平均后再进行标准化,得到一个时间序列,将该时间序列作为一个降水指数(RI),来验证春季降水EOF第一模态是否反应了降水相对变率的主要变化特征,RI在图1b中给出。从图1b可以看到,RI随时间的演变特征与EOF第一模态相应的时间系数的变化几乎一致,两者的相关系数高达0.99。我们进一步将RI与中国春季每个站点的降水进行相关分析,相关系数在图2中给出。可以看到,RI与位于我国东部中纬度地区的大部分站点的降水都有显著的正相关关系,表明我国东部中纬度地区的降水存在同位相变化特征,同时也进一步证实了春季降水的EOF第一模态所揭示的空间变化特征。另外,我们也看到RI与长江以南、青藏高原及东北部分地区的降水有负相关关系,与春季降水的EOF第一模态揭示的时空变化特征类似。因此,可以将RI作为表征

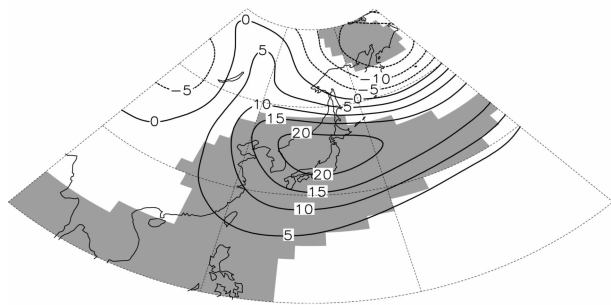


图3 春季500 hPa位势高度对RI的一元线性回归系数(单位: gpm)。阴影:回归系数显著性水平超过0.05

Fig. 3 Spring mean 500-hPa geopotential height anomalies (units: gpm), derived from a linear regression on RI. Shaded areas denote 500-hPa geopotential height anomalies exceeding the 0.05 significance level

中国春季降水的一个指数,来研究与中国春季降水异常相联系的大气环流系统。

图3和图4分别给出了春季500 hPa位势高度场和850 hPa水平风场对RI的一元线性回归图。从图3可看出,中国东部中纬度地区的春季降水与北太平洋上空500 hPa的系统关系密切。在径向上,位势高度场的异常表现出典型的负西太平洋遥相关型(WP),即阿留申地区的低压槽偏强,东亚和西北太平洋上空出现异常高压。也就是说,当中国东部中纬度地区的春季降水偏多时,对应着日本海上空500 hPa位势高度的正异常,以及阿留申上空500 hPa位势高度的负异常。表明中高纬的径向

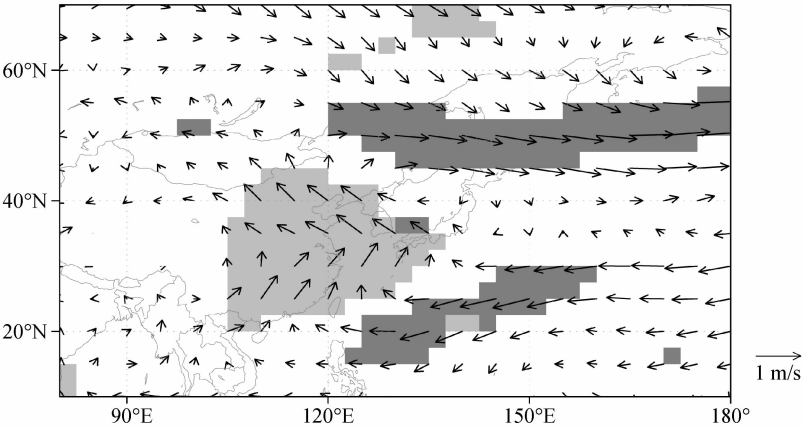


图 4 850 hPa 水平风场对 RI 的一元线性回归系数(单位: m/s)。深(浅)阴影: 纬向(经向)风对 RI 的回归系数显著性水平超过 0.05

Fig. 4 Spring mean 850-hPa horizontal wind anomalies, derived from a linear regression on RI. Dark (light) shaded areas denote 850-hPa zonal (meridional) wind anomalies exceeding the 0.05 significance level

环流偏弱, 西风急流偏强, 东亚大槽偏弱。一个偏弱的东亚大槽使得槽后偏北气流减弱, 有利于偏南气流带来较多的水汽, 使得中国华北春季降水偏多(陆日宇, 2001)。

从图 4 可看出, 中国东部中纬度地区的降水正异常, 在 850 hPa 流场上对应着 45°N 以北的中高纬度低空西风急流异常偏强, 中国东南部沿岸及西北太平洋表现为反气旋环流异常。与此反气旋环流异常相联系, 在中国东部地区出现显著的南风异常, 有利于水汽在对流层低层一直传输到中国东部大部分地区, 为中国东部的降水提供有利条件。也就是说, 当中国东部中纬度春季降水异常偏多时, 对流层低层中高纬西风急流偏强, 东亚大槽偏弱, 中国东部出现显著的南风异常, 引起中国东部中纬度地区的降水出现正异常, 反之亦然。从前面的分析看到, 中国东部中纬度地区的春季降水与东亚上空大尺度大气环流有密切关系。下面, 我们进一步探讨热带太平洋海面温度(SST)和欧亚大陆积雪异常与中国东部中纬度地区春季降水的联系, 以揭示与中国东部中纬度地区春季降水异常相联系的大气环流异常的成因。

4 RI 与前冬、春热带太平洋 SST 异常的联系

图 5a 给出了 RI 与前冬热带太平洋 SST 的相关系数分布图。可以看到, RI 与前冬的热带中东太平洋 SST 有显著的正相关关系, 与热带西太平洋的 SST 有明显的负相关关系。相关系数的分布

与 ENSO 事件时 SST 的分布非常类似, 即中国春季降水异常与 ENSO 事件关系密切。Zhang et al. (1996) 的研究表明, ENSO 期间与这种 SST 异常反向变化所对应的对流异常的偶极型分布对东亚气候具有重要影响, 因此, 我们把前冬热带中东太平洋 SST 与 RI 正相关和热带西太平洋 SST 与 RI 负相关显著性水平通过 0.05 的每个格点 SST 标准化后分别进行区域平均, 两者之差作为 SST 的指数(SSTI), SSTI 指数突出了 ENSO 期间赤道西太平洋 SST 异常与赤道中东太平洋 SST 异常的反相变化特征。下面, 我们来考察 SSTI 与中国春季降水及大气环流的关系。图 5b 给出了 SSTI 与春季热带太平洋 SST 的相关系数分布图。与图 5a 相比可以看到, 这种前冬热带中东太平洋 SST 的正异常和西太平洋 SST 的负异常可以持续到春季, 热带太平洋前冬海温异常的持续性所造成的春季 SST 异常, 可以对中国春季降水造成影响。

图 6 给出了 RI 和 SSTI 的时间演变图。可以看到, 1979~2004 年期间, 正的 SSTI 基本上对应着大的 RI, 两者的相关系数为 0.59, 超过了 0.01 的信度检验。也就是说, 当热带中东太平洋前冬的 SST 偏暖、热带西太平洋 SST 偏冷时, 对应着中国东部中纬度地区春季降水的偏多。如 1983、1991 和 1998 年中国东部中纬度地区春季降水偏多对应着大的 SSTI, 也即强 ENSO 事件, 而 1981、2000 和 2001 年春季降水的偏少对应着小的 SSTI, 也即 La Niña 事件。当然, 我们也看到有些年份(如 1985 和 1995 年)的降水异常并不能被热带太平洋

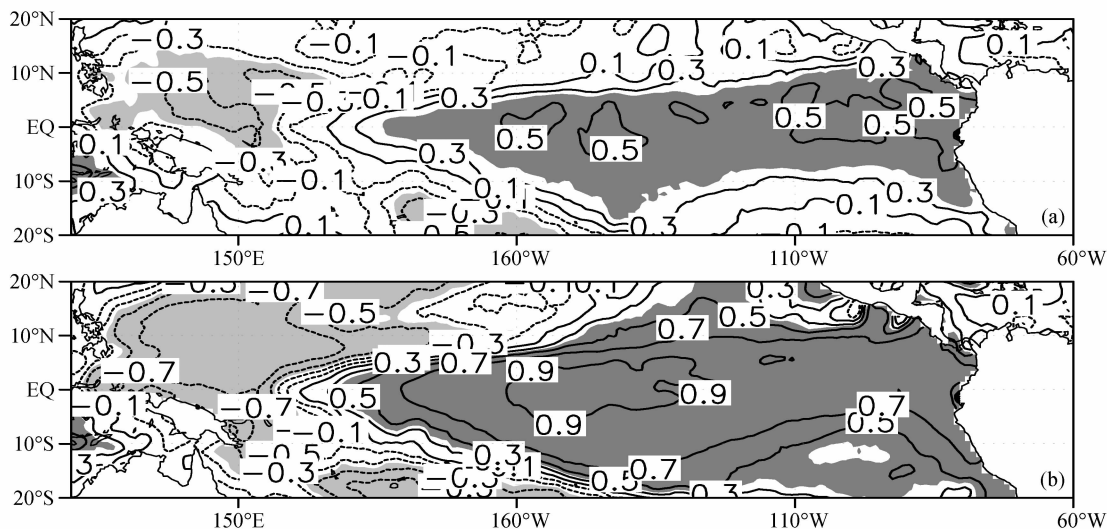


图 5 (a) 1979~2004 年期间 RI 与前冬热带太平洋 SST 的相关系数分布图; (b) SSTI 与春季热带太平洋 SST 的相关系数分布。深(浅)阴影: 正(负)相关显著性水平超过 0.05

Fig. 5 Distribution of the correlation coefficients (a) between RI and previous winter SST over the tropical Pacific Ocean, and (b) between the SSTI (SST over tropical East Pacific Ocean minus SST over tropical West Pacific Ocean) and spring SST over the tropical Pacific Ocean for the period 1979 - 2004. Dark (light) shaded areas denote the positive (negative) correlation exceeding the 0.05 significance level

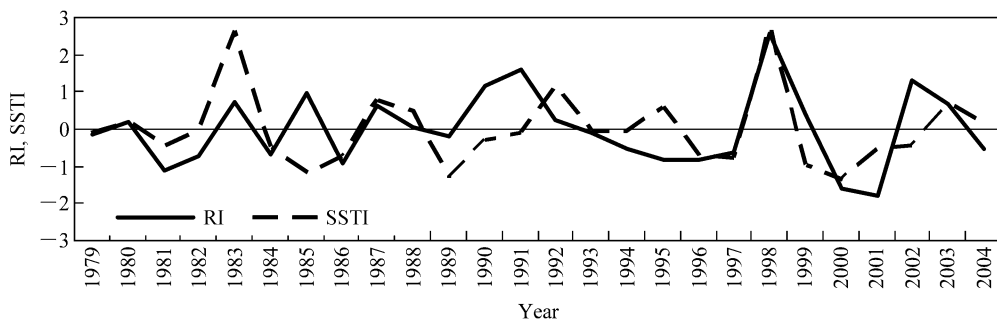


图 6 RI 与 SSTI 随时间的演变

Fig. 6 Time series of RI (solid line) and the SSTI (dashed line)

SST 的异常所解释, 说明虽然热带太平洋 SST 是影响中国春季降水的一个重要因素, 但中国东部中纬度的春季降水还受其它外强迫因子的影响。

为了分析前冬热带太平洋如何影响中国春季降水, 图 7 给出了春季 500 hPa 位势高度场对 SSTI 的一元线性回归系数分布图。可以看到, 与图 3 相比, 二者具有较好的一致性, 说明图 3 所给出的与 RI 相关的位势高度异常基本上能被 SSTI 所解释。也即当前冬、春热带东太平洋 SST 异常偏暖和热带西太平洋 SST 异常偏冷时, 对应着春季 500 hPa 位势高度在中高纬表现为负的 WP, 表明前冬春热带太平洋 SST 异常对中国东部中纬度地区春季降水有重要的影响。同时, 我们也看到与 SSTI 相联

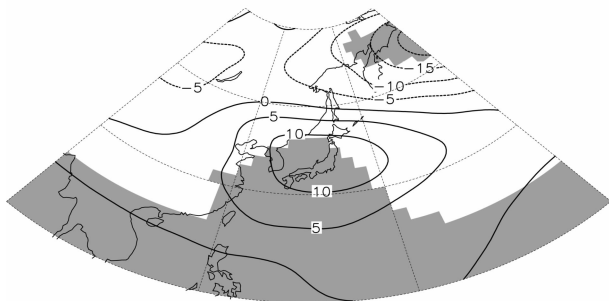


图 7 同图 3, 但为对 SSTI 的回归系数

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for regression on the SSTI

系的日本海上空位势高度的正异常比与 RI 相联系的异常强度弱, 可见也有其它因子对中国东部中纬度的春季降水有影响。

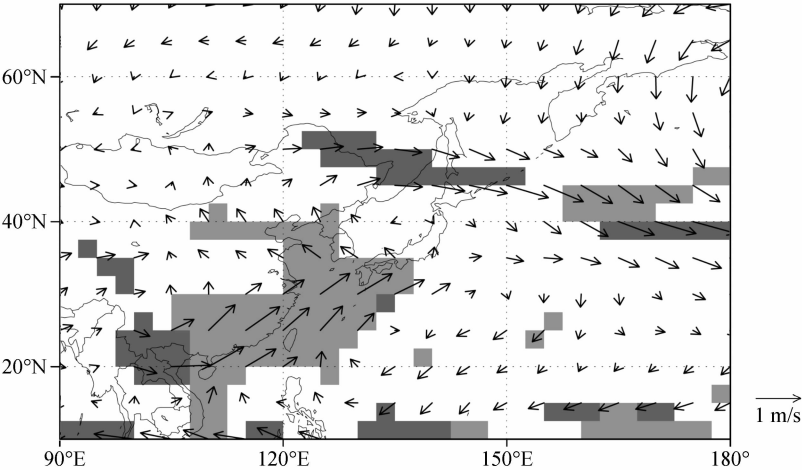


图 8 同图 4，但为对 SSTI 的回归系数

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for regression on the SSTI

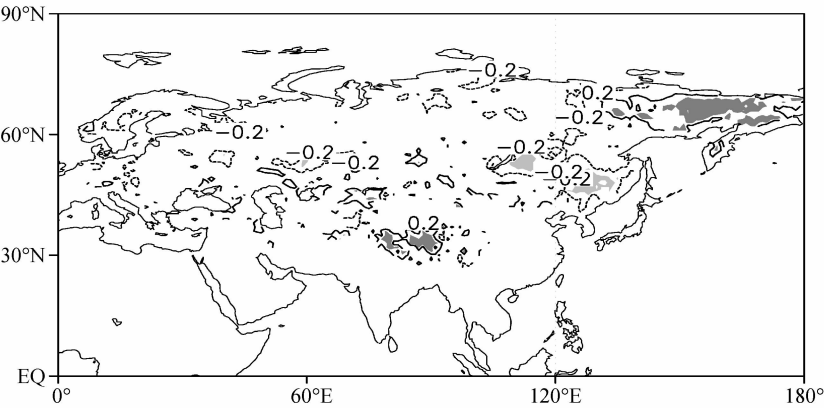


图 9 春季欧亚大陆 SWE 与 RI 的相关系数分布图。深（浅）阴影：正（负）相关显著性水平超过 0.05

Fig. 9 Distribution of the correlation coefficients between spring Snow Water Equivalent over Eurasia (SWE) and RI for the period 1979 – 2004. Dark (light) shaded areas denote the positive (negative) correlation exceeding the 0.05 significance level

同样，我们给出了 850 hPa 水平风场对 SSTI 一元线性回归系数分布图（图 8）。可以看到，当 SSTI 处于正异常时，对应着中高纬度的西风急流异常偏强，中国东部地区和日本海出现显著的南风异常，有利于水汽往南输到中国东部大部分地区，为中国东部的降水提供有利条件。对应着前冬、春热带中东太平洋 SST 异常偏暖，热带西太平洋 SST 异常偏冷，春季大气环流在西北太平洋表现为反气旋环流异常，中高纬西风急流偏强，东亚大槽偏弱，中国东部对流层低层出现显著的南风异常，引起中国东部中纬度地区的降水出现正异常，反之亦然。对于与中国东部沿岸南风异常相联系的西北太平洋异常反气旋的产生，Zhang et al. (1996, 1999) 和 Zhang and Sumi (2002) 给出了物理解释，

指出热带西太平洋的冷海温距平在大气中造成对流异常冷却，激发出大气 Rossby 波响应，在西北太平洋产生异常反气旋。

5 RI 与欧亚大陆积雪的联系

图 9 给出了春季欧亚大陆雪水当量 (SWE) 与 RI 的相关系数分布。可以看到，除青藏高原中西部和楚科奇半岛的 SWE 与 RI 有显著的正相关关系，贝加尔湖以南附近地区和中国东北平原的 SWE 与 RI 有显著的负相关关系外，欧亚大陆其它地区的春季积雪与中国东部中纬度地区的春季降水无明显的相关关系。而相关分析表明，楚科奇半岛上的 SWE 与青藏高原中西部，贝加尔湖以南附近地区和东北平原上 SWE 的相关系数分别为 0.34、

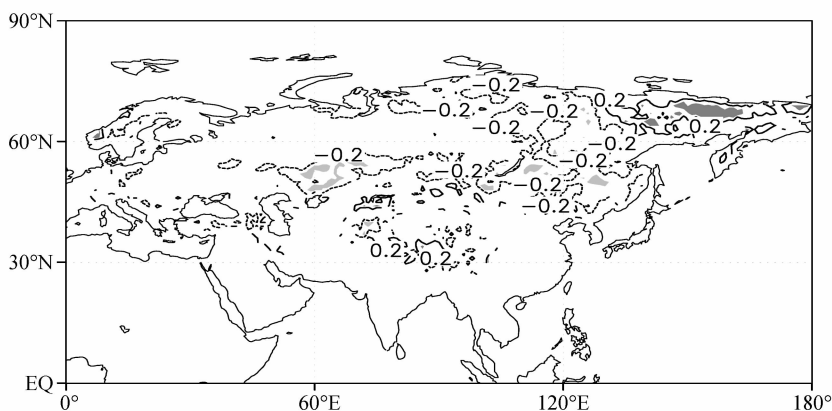


图 10 去掉 SSTI 信号后的春季欧亚大陆 SWE 与 RI 的偏相关系数分布图。深(浅)阴影: 正(负)相关显著性水平超过 0.05

Fig. 10 Distribution of the partial correlation coefficient between spring Eurasian SWE and RI, with removing the correlation between spring Eurasian SWE and the SSTI. Dark (light) shaded areas denote the positive (negative) correlation exceeding the 0.05 significance level

—0.12 和 —0.30, 都没有达到信度检验。这说明与 RI 显著相关的楚科奇半岛、青藏高原中西部、贝加尔湖以南附近和东北平原上积雪之间没有一致性的变化, 缺少必然的联系。也即与 RI 相联系的欧亚大陆 SWE 的异常并不具有整体的变化特征。

从前面分析得到, 青藏高原中西部和楚科奇半岛的 SWE 与 RI 有显著的正相关关系, 而贝加尔湖以南附近地区和中国东北平原的 SWE 与 RI 有显著的负相关关系, 但与 RI 相联系的欧亚大陆 SWE 的这些异常变化并不具有一致性的变化特征。为了分析欧亚大陆 SWE 的这些异常变化产生的可能原因, 我们进一步讨论热带太平洋 SST 异常在春季欧亚大陆积雪与中国降水之间关系的作用。图 10 给出了去掉 SSTI 作用后的春季欧亚大陆 SWE 与 RI 的偏相关系数分布图。可以看到, 当在春季欧亚大陆积雪与中国降水之间的相关关系中去掉热带太平洋 SST 作用后, 两者关系明显减弱。其中青藏高原中西部 SWE 与 RI 之间的显著正相关关系消失, 而贝加尔湖以南附近地区和中国东北平原 SWE 与 RI 的显著负相关关系以及楚科奇半岛附近的 SWE 与 RI 的正相关关系也明显减弱。说明与中国东部从华北到长江中下游地区的春季降水异常相联系的欧亚大陆 SWE 异常可能是由于前冬、春热带中东太平洋 SST 异常偏暖和热带西太平洋 SST 异常偏冷引起的。即春季欧亚大陆积雪与中国东部中纬度降水的关系可能只是前冬、春热带太平洋 SST 异常的一个表现。实际上, 标准化春季累积降水量的 EOF 第二模态的最大变率主要在长

江以南地区(图略), 而长江以南地区的春季降水与欧亚大陆积雪有密切的联系(左志燕等, 2011; Zuo et al., 2011)。

6 结论

本文讨论了中国春季降水异常的时空特征及其与海表面温度及欧亚大陆积雪的联系。研究表明中国春季降水有南、北反位相变化的特征。在中国东部, 当从长江到华北地区的降水偏多时, 对应着长江以南和东北部分地区的降水偏少。在中国西部, 当青藏高原降水偏多时, 对应着中国西北地区的降水偏少。其中降水变率最大的地区位于中国东部从长江到华北的中纬度地区。该区降水变率绝大部分都达到 0.5 个标准差以上。中国东部中纬度地区的春季降水具有明显的年际变化。这种年际变化特征在 1980 年代末期发生改变。在 1980 年代末之前年际波动振幅较小、周期较短, 1980 年代末之后, 振幅明显增大、周期变长、极端降水异常的年份明显增多。

中国东部中纬度地区的降水与前冬、春 SST 有密切的关系。当前冬、春热带中东太平洋 SST 异常偏暖, 热带西太平洋 SST 异常偏冷时, 对应着中国东部中纬度地区的降水异常偏多, 反之亦然。热带太平洋 SST 的这种异常能解释中国东部中纬度地区春季降水异常的大部分特征。研究表明, 偏暖的热带中东太平洋和偏冷的热带西太平洋, 能引起中高纬对流层中低层大气环流出现负 WP 遥相关型, 阿留申低压槽和日本上空的西风急流偏强,

西北太平洋出现反气旋异常环流, 即春季北半球中高纬径向环流偏弱, 东亚大槽偏弱, 这种异常环流型有利于对流层低层异常南风在中国东部往北一直到达华北和内蒙古地区, 使得中国东部中纬度地区的春季降水偏多。

中国东部中纬度地区的春季降水虽然也与欧亚大陆积雪有关, 即当欧亚大陆春季 SWE 在青藏高原中西部和楚科奇半岛偏多, 贝加尔湖以南附近地区和东北平原偏少时, 对应着中国东部中纬度地区的降水偏多, 但两者之间的这种联系包含了前冬、春热带太平洋 SST 异常的作用。当去掉热带太平洋 SST 异常的作用后, 春季欧亚大陆 SWE 与中国东部中纬度地区春季降水的关系明显减弱。说明欧亚大陆积雪与中国东部春季降水的这种联系可能只是前冬、春热带太平洋 SST 异常的一个表现。本文所得到的关于欧亚大陆积雪与我国东部中纬度春季降水的统计关系只是通过分析美国雪冰中心的 SWE 资料而得到的。虽然这套 SWE 资料已经被许多研究验证和使用 (Wu and Kirtman 2007; Wu et al., 2009), 但资料的来源依然存在一些自身问题, 如资料来源本身的缺测问题, 资料来源分辨率较低需要通过插值来获得高分辨率资料等问题 (Armsrong and Brodzik, 2005), 因此, 关于欧亚大陆积雪与我国降水关系的研究需要进一步利用其它积雪资料来进行深入研究。

参考文献 (References)

- Armstrong R L, Brodzik M J. 2005. Northern Hemisphere EASE-grid weekly snow cover and sea ice extent version3 [DB/OL]. National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO, digital media [2011-02-14]. <https://nsidc.org/data/nsidc-0046.html>.
- 蔡学湛. 2001. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 358 - 367. Cai Xuezhao. 2001. The influence of abnormal snow cover over Qianhai-Xizang Plateau and East Asian monsoon on early rainy season rainfall over South China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 12 (3): 358 - 367.
- Chen L T, Wu R G. 2000. Interannual and decadal variations of snow cover over Qinghai-Xizang Plateau and their relationships to summer monsoon rainfall in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 17: 18 - 30.
- 陈烈庭, 阎志新. 1979. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响 [M]. 中长期水文气象预报文集 (第一集). 北京: 水利电力出版社, 185 - 194. Chen L T, Yan Z X. 1979. Impacts of Himalayan winter-spring snow cover on atmospheric

- circulation and on rainfall in during the pre-rainy period of southern China (in Chinese) [M]//Changjiang Water Resource Commission. Collected Papers on Medium- and Long-term Hydrologic and Meteorological Forecasts (1). Beijing: Water Conservancy and Power Press, 185 - 194.
- 陈乾金, 高波, 李维京, 等. 2000. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其与环流关系的研究 [J]. 气象学报, 58 (5): 582 - 595. Chen Q J, Gao B, Li W J, et al. 2000. Studies on relationships among winter snow cover over the Tibetan Plateau and droughts/floods during Meiyu season in the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as atmosphere/ocean [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 582 - 595.
- 陈兴芳, 宋文玲. 2000. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析 [J]. 大气科学, 24 (5): 585 - 592. Chen X F, Song W L. 2000. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime drought and floods of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 585 - 592.
- 顾伟宗, 陈海山, 孙照渤. 2006. 华北春季降水及其与前期印度洋海温的关系 [J]. 南京气象学院学报, 29 (4): 484 - 490. Gu Weizong, Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2006. Spring precipitation in North China and its relation to SST of Indian Ocean in the preceding winter [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (4): 484 - 490.
- 韩晋平, 王会军, 姜大勝. 2006. 耦合模式长期积分资料所揭示的华南春季降水及环流特征的年际变化 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 194 - 202. Han Jinping, Wang Huijun, Jiang Dabang. 2006. Interannual variation of spring precipitation and circulation in South China as simulated by a coupled model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 194 - 202.
- Liu X D, Yanai M. 2002. Influence of Eurasian spring snow cover on Asian summer rainfall [J]. Int. J. Climatol., 22: 1075 - 1089, doi: 10.1002/joc.784.
- 陆日宇. 2001. 与华北地区春季降水量异常关联的大气环流异常 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 400 - 408. Lu Riyu. 2001. Atmospheric circulation anomaly associated with the spring rainfall anomaly in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 400 - 408.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析 [J]. 大气科学, 30 (6): 1249 - 1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. The anomalous features of the northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1249 - 1256.
- 穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. 大气科学, 34 (1): 213 - 226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter Northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomaly

- lies in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 213–226.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis [J]. J. Climate, 15: 1609–1625.
- Shi Xiaohui, Xu Xiangde. 2007. Regional characteristics of the interdecadal turning of winter/summer climate modes in Chinese mainland [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (1): 101–112.
- 谭言科, 何金海, 祝从文. 1999. 欧亚冬季雪盖对北半球夏季大气环流的影响及其与东亚太平洋遥相关的可能联系 [J]. 大气科学, 23 (2): 152–160. Tan Yanke, He Jinhai, Zhu Congwen. 1999. Impact of Eurasian winter snow cover on the Northern Hemisphere summer circulation and its possible relation to East Asia Pacific teleconnection pattern [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (2): 152–160.
- Wang Huijun, Xue Feng, Zhou Guangqing. 2002. The spring monsoon in South China and its relationship to large-scale circulation features [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (4): 651–664.
- 王群英, 龚道溢. 1999. 华北降水资源的变化及其与厄尔尼诺的关系 [J]. 自然资源学报, 14 (2): 103–108. Wang Qunying, Gong Daoyi. 1999. Variation of rainfall over North China and its possible connection to El Niño [J]. J. Natural Res. (in Chinese), 14 (2): 103–108.
- Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoon: Processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. J. Geophys. Res., 103 (C7): 14451–14510.
- Wu Bingyi, Yang Kun, Zhang Renhe. 2009. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 26 (1): 31–44.
- Wu R G, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. J. Climate, 20 (7): 1285–1304.
- 吴统文, 钱正安. 2000. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析 [J]. 气象学报, 58 (5): 571–580. Wu T W, Qian Z A. 2000. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai–Xizang Plateau and summer rainfall of eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 571–580.
- Ye H, Bao Z. 2001. Lagged teleconnections between snow depth in northern Eurasia, rainfall in Southeast Asia and sea-surface temperature over the tropical Pacific Ocean [J]. Int. J. Climatol., 21: 1607–1621. doi: 10.1002/joc.695.
- 张洁, 周天军, 宇如聪, 等. 2009. 中国春季典型降水异常及相联系的大气水汽输送 [J]. 大气科学, 33 (1): 121–134. Zhang Jie, Zhou Tianjun, Yu Rucong, et al. 2009. Atmospheric water vapor transport and corresponding typical anomalous spring rainfall patterns in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 121–134.
- Zhang Renhe, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asia monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 74: 49–62.
- Zhang Renhe, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 16: 229–241.
- Zhang Renhe, Sumi A. 2002. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and autumn [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80: 213–227.
- 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 [J]. 气象学报, 66 (5): 697–706. Zhang Renhe, Wu Bingyi, Zhao Ping, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 697–706.
- 赵平, 蒋品平, 周秀骥, 等. 2009. 春季东亚海—陆热力差异对我国东部西南风降水影响数值试验 [J]. 科学通报, 54 (16): 2372–2378. Zhao Ping, Jiang Pinping, Zhou Xiuji, et al. 2009. Modeling impacts of East Asian ocean–land thermal contrast on spring southwesterly winds and rainfall in eastern China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 54 (16): 2372–2378.
- 左志燕, 张人禾, 武炳义. 2011. 1979–2004 年中国大陆南方地区春季降水的年代际变化特征及其与欧亚大陆积雪的联系 [J]. 中国科学 (D 辑), 11: 1688–1696. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe, Wu Bingyi. 2011. Inter-decadal variation of springtime rainfall over southern China mainland for 1979–2004 and its relationship with Eurasian snow [J]. Science in China (Series D: Earth Science) (in Chinese), 11: 1688–1696.
- Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y, et al. 2011. Decadal variability in springtime snow over Eurasia: Relation with circulation and possible influence on springtime rainfall over China [J]. International Journal of Climatology, doi:10.1002/joc.2355.