

陈丹, 布和朝鲁, 朱克云 2013. 春末环贝加尔湖地区环流的年际和年代际变化及与中国温度和降水的关系 [J]. 大气科学, 37 (6): 1199–1209, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12155. Chen Dan, Bueh Cholaw, Zhu Keyun. 2013. Interannual and interdecadal variabilities of circulation over Lake Baikal region in late spring and their association with temperature and precipitation over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1199–1209.

春末环贝加尔湖地区环流的年际和年代际变化 及与中国温度和降水的关系

陈丹¹ 布和朝鲁^{2,3} 朱克云¹

¹ 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

² 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

³ 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 本文利用 1951~2011 年的再分析资料及观测资料, 探讨了春末环贝加尔湖地区环流的年际和年代际变化特征及其与中国温度、降水的关系, 主要结论如下: (1) 春末贝加尔湖脊 (简称贝脊) 在 1951~1979 年间较弱, 但在 1980~1999 年期间显著增强。进入 21 世纪后, 春末贝脊呈显著减弱的趋势; (2) 强 (弱) 贝脊使我国北方地区的温度显著升高 (降低), 使西南地区的温度降低 (升高)。贝脊的强弱变化, 对北方地区温度的影响在 1951~1979 年期间最为显著, 对西南地区温度的影响在 1980~2011 年期间显著。在 1951~1999 年期间, 贝脊的强弱变化与长江下游的降水量存在明显的反位相变化关系。进入 21 世纪后, 贝脊的强弱变化与西南地区降水量之间存在较为显著的正相关关系 (99%置信度); (3) 强贝脊与由北大西洋/欧洲上空向东传播的定常行星波密切相关, 而弱贝脊主要与欧亚大陆次极区纬向伸展的行星尺度脊相联系。在不同的年代际时段, 与贝脊强弱变化相联系的北半球异常环流特征也存在一定的差异; (4) 5 月份的强贝脊环流以前期的北大西洋涛动、东大西洋型以及弱东亚大槽环流为前兆信号。同年 3 月乌拉尔山气旋式异常环流为 5 月份贝脊弱的前兆信号。

关键词 贝加尔湖脊 年际和年代际变化 前兆信号

文章编号 1006-9895(2013)06-1199-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12155

Interannual and Interdecadal Variabilities of Circulation over Lake Baikal Region in Late Spring and Their Association with Temperature and Precipitation over China

CHEN Dan¹, BUEH Cholaw^{2,3}, and ZHU Keyun¹

¹ College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² International Center for Climate and Environment Sciences (ICCES), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Characteristics of the circulation over the Lake Baikal region in late spring and its association with

收稿日期 2012-09-18, 2013-01-15 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究计划项目 2010CB950304, 国家自然科学基金项目 40975033, 国家科技支撑计划项目 2009BAC51B02

作者简介 陈丹, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 从事气候学研究。E-mail: cdd107@126.com

通讯作者 布和朝鲁, E-mail: bueh@lasg.iap.ac.cn

temperature and precipitation over China are investigated on interannual and interdecadal time scales by using reanalysis and observational data from 1951–2011. It is determined that a ridge over Lake Baikal (LBR) was in a weak phase during 1951–1979 but was amplified during 1980–1999. Since the beginning of this century, the amplitude of the LBR showed a significant decreasing trend. In addition, a strong (weak) LBR led to a temperature increase (decrease) over northern China and a temperature decrease (increase) over southwestern China. The temperature influences of the LBR over the northern part of China were most significant during 1951–1979 and became significant over southwestern China after 1980. An out-of-phase relationship existed between LBR intensity and the precipitation over the lower reaches of the Yangtze River valley during 1951–1999. Conversely, the LBR intensity was strongly correlated with the precipitation over southwestern China since the beginning of this century, with a positive correlation coefficient of 0.74 at the 0.01 significance level. Moreover, the strong LBR was characterized by the eastward propagation of a stationary planetary-scale wave that originated from the North Atlantic/European sector, and the weak LBR featured a ridge with a zonally elongated structure along the sub-arctic coast of Eurasia. However, among the various interdecadal time periods, the characteristics of the Northern Hemisphere circulation associated with the anomalous LBR show differences. Further, the North Atlantic Oscillation, the East Atlantic Oscillation, and the weakened East Asian major trough persisting in February–April may be considered as precursory signals of the strong LBR in May. For the weak LBR in May, anomalous cyclonic circulation over the Ural Mountains may be considered as a precursory signal.

Keywords Ridge over Lake Baikal, Interannual and interdecadal variabilities, Precursory signal

1 引言

徐康等(2011a, 2011b)指出, 贝加尔湖地区是过去 50 年全球变暖的最显著地区之一, 在全球变暖背景下, 环贝加尔湖地区地表气温的升高是影响中国华北夏季降水长期变化的关键因子, 而且两者在年代际尺度上也存在显著的负相关关系, 从 1996 年开始的贝加尔湖地区地表气温的进一步升高是中国北方干旱化加剧的一个重要原因。在年际尺度上, 刘樱等(2012)指出夏季贝加尔湖地区阻塞高压活动的年际变化对我国的夏季旱涝形势产生影响。张庆云和陶诗言(1998)指出, 贝加尔湖地区阻高活动与中国东部的降水呈反相关。刘宗秀等(2002)研究了东北冷涡持续活动时期北半球的环流特征, 指出 5 月份贝加尔湖阻塞形势使东北冷涡活动频繁。谢作威和布和朝鲁(2012)指出, 从春末起至初夏, 贝加尔湖脊的加强有利于东北冷涡发展, 有时会造成暴雨(Xie et al., 2012)。李春等(2002)研究了华北夏季降水与贝加尔湖地区阻塞高压强度的关系, 发现, 华北夏季少雨期, 贝加尔湖附近常伴有强阻塞高压, 而华北夏季多雨期则相反。由此可见, 不论在年代际尺度还是年际尺度上贝加尔湖脊的强弱变化都与我国的天气气候密切相关。

我国地处东亚季风区, 物产丰富气候多变, 造成气象灾害种类多、发生频繁、影响大(Huang et al., 2003), 其中最为常见的旱涝灾害对我国农业和经济造成巨大的损失, 因此受到气象界的广泛关

注。研究发现, 在年代际变化尺度上, 我国夏季降水形势表现出华北与长江中下游地区间的反向变化特征, 即所谓的旱涝分布型(Huang et al., 2003; Ding and Sun, 2004; 申乐琳等, 2010)。前人对夏季严重旱涝事件关注较多, 而对旱涝形势在季节内尺度上的突然转换的研究较少(吴志伟等, 2007)。季节内的旱涝交替出现, 反映了旱涝极端事件在短期内的共存, 其造成的灾害更为严重。Wu et al. (2006)对长江中下游地区夏季长周期旱涝急转现象进行研究, 并首次提出了“旱涝急转、旱涝并存”的概念。Zong et al. (2012)指出, 春末夏初(5~6 月)长江流域中下游存在一个旱涝急转模态, 这一降水模态在 1979 年以后出现频次显著增多, 尤其在 1994 年后强度显著增强, 其中 2011 年的旱涝急转现象最为突出; 他们特别指出, 5 月份与贝加尔湖脊相联系的中高纬冷空气活动的持久维持以及 6 月份东亚夏季风环流的提前建立是这一旱涝急转模态的关键环流特征。因此, 研究春末时期贝加尔湖脊(简称贝脊)的年际和年代际变化特征具有重要的科学意义。

随着东亚气候年代际变化的深入研究, 黄荣辉等(1999)发现, 在 20 世纪 70 年代末东亚夏季气候发生了一次明显的年代际变化, 表现为我国华北地区进入持续性干旱期, 长江中下游降水增多(Hu, 1997; 黄荣辉等, 1999; Gong and Ho, 2002; 张庆云等, 2003; Ding et al., 2008), 西北地区夏季降水也在这个时期表现出显著增多的趋势(Shi et al.,

2003; Shi et al., 2007; Zhou and Huang, 2010)。此外, 刘永等(2012)的研究指出, 在 20 世纪 90 年代末, 全球夏季降水经历了一次显著的年代际变化, 与此对应, 我国东部夏季降水也经历了一次显著的年代际变化。Zhu et al. (2011) 的研究认为, 进入 21 世纪后的太平洋年代际振荡 (PDO) 位相转换是贝加尔湖附近温度升高以及我国东部夏季降水量改变的主要原因。Lu et al. (2011) 指出, 自 20 世纪 90 年代中期起, 夏季东亚对流层上层西风急流的年代际变化开始出现减弱趋势, 对应的贝加尔湖脊逐渐增强。那么, 很自然关注的一个问题是, 在这三个年代际时段, 春末贝脊的年际变化特征及其对中国气候的影响存在怎样的差异?

本文在前人工作的基础上, 试图回答以下几个问题: (1) 春末 (5 月份) 贝脊在不同年代际时段的变化特征是什么样的? (2) 在不同年代际时段, 春末贝脊与我国温度、降水存在什么关系? (3) 在不同年代际时段, 贝脊强弱变化 (年际变化) 具有什么样的环流特征和前兆信号?

2 资料和方法

本文所使用的资料为: (1) 美国环境预报中心 (NCEP) 和国家大气研究中心 (NCAR) 联合推出的全球再分析资料的月平均场, 包括 500 hPa 位势高度、850 hPa 风场、850 hPa 相对湿度场, 空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; (2) 国家气候中心提供的全国 160 站点逐月温度和降水资料。选取资料的时间段均为 1951~2011 年。

为了反映贝脊的强弱变化, 本文引入了贝脊指数的概念, 其定义为环贝加尔湖区域 ($40^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$, $80^{\circ} \sim 115^{\circ} \text{E}$) 平均的 500 hPa 位势高度距平。本文分别选取长江下游地区 10 个站点 (南京、合肥、上海、杭州、安庆、屯溪、宁波、衢县、温州、信阳) 和西南地区 10 个站点 (遵义、贵阳、康定、雅安、西昌、丽江、大理、昆明、临沧、蒙自) 的平均降水量来表征长江下游和西南地区各自的整体降水变化特征。文中还采用了 Lanczos 滤波 (Zhou et al., 2010)、相关分析、回归分析、合成分析和 t 检验方法。

3 贝脊在不同年代际时段的变化特征

如前所述, 东亚地区的这些年代际变化均与贝加尔湖地区异常环流紧密联系。为此, 本文以 20

世纪 70 年代末和 90 年代末的两次突变为依据 (黄荣辉等, 1999; 刘永, 2012), 将 1951~2011 年的时段分为三个时期, 即 1951~1979 年 (第一时期)、1980~1999 年 (第二时期) 以及 2000~2011 年 (第三时期), 分别考察 5 月份贝加尔湖地区 500 hPa 高度场的变化特征。图 1 给出了 5 月 500 hPa 平均高度场及其各年代际时段的差值。图 1a 为 1951~2011 年 5 月 500 hPa 平均高度场, 5 月份贝加尔湖附近为高压脊。图 1b 为第二时期和第一时期 5 月 500 hPa 高度场差异, 可见在第二时期极区位势高度降低, 环贝加尔湖地区位势高度明显增加。图 1c 为第三时期和第一时期的高度场差值, 第三时期贝加尔湖地区平均位势高度也高于第一时期。图 1d 为第三时期和第二时期的高度场差值, 反映了第三时期贝加尔湖地区平均位势高度场略低于第二时期。这说明贝脊具有明显的年代际变化, 且在第二时期最为强盛。

图 2 给出了 5 月和 6 月贝脊指数逐年的变化特征 (虚曲线), 并通过 Lanczos 滤波方法滤去 9 年以下的年际波动, 保留 9 年以上的年代际变化特征 (实曲线) 和不同年代际时段贝脊指数的变化趋势 (虚直线)。如前所述, 环贝加尔湖地区环流具有明显的年代际变化特征, 由 5 月和 6 月 500hPa 高度场距平时间序列和 9 年平滑曲线可看出, 在年代际尺度上这两个月贝脊的强弱变化特征有相似之处: 1979 年以前基本在平均值以下, 较弱, 并且已经表现出逐渐增强的趋势; 从 1980 年到 1990 年末, 环贝加尔湖地区的位势高度高于平均值, 5 月平均位势高度有明显增强趋势, 6 月则出现减弱趋势; 2000 年后, 5 月份贝脊有急剧减弱趋势, 6 月份贝脊也有减弱趋势, 但总体上平均位势高度仍维持在较强水平。1980 年后, 5 月和 6 月之间贝脊的这种变化差异为春末出现旱涝急转情况提供了可能性。总体来说, 环贝加尔湖地区位势高度距平在 1979 年前后出现正负转变, 在 1999 年出现了明显的跃变。

为了进一步研究贝脊在 5 月和 6 月之间的变化关系, 在表 1 中列出不同年代时段它们的相关系数。在整个时期 (1951~2011 年), 5、6 月贝脊指数的相关系数为 0.56, 其中 1951~1979 年期间两月指数的相关系数达到 0.6, 通过了 0.01 显著性检验, 这说明 50 年代初到 70 年代末贝加尔湖地区环流异常在这两个月的持续性很好。而在 1980~1999 年和 2000~2011 年期间, 贝脊指数在这两个月的相关系

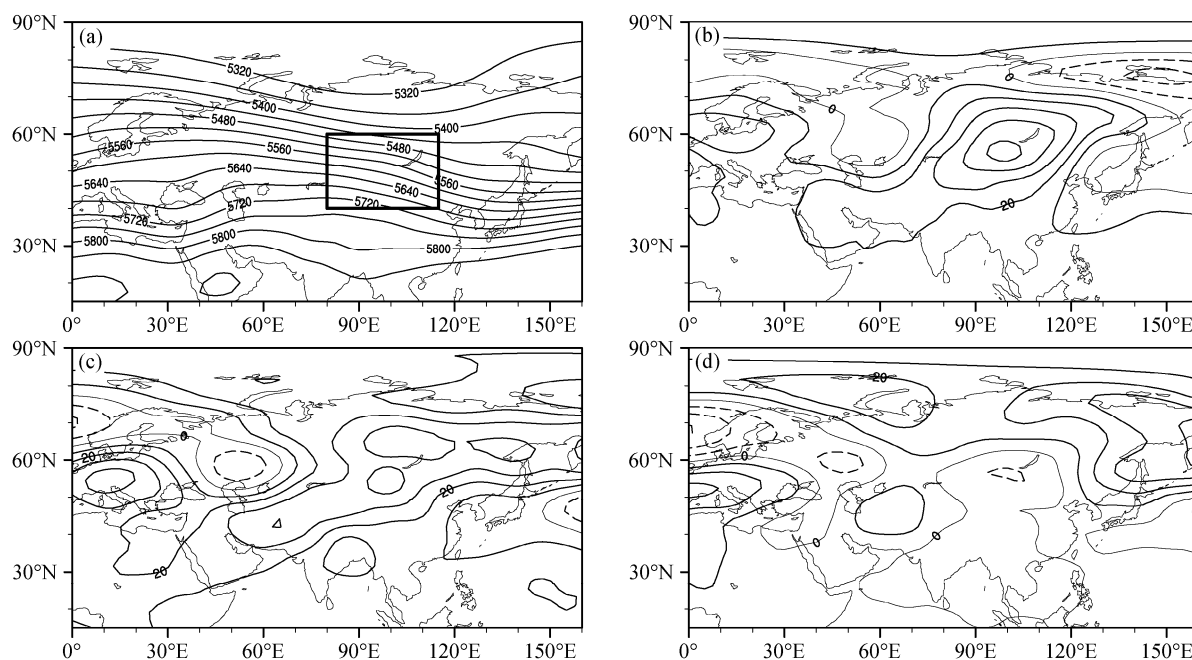


图 1 5 月份 500 hPa 高度场及其年代际时段的差值图 (单位: m): (a) 1951~2011 年的平均场, 方框为定义贝脊指数所选的地理范围; (b) 1980~1999 年与 1951~1979 年的差值场; (c) 2000~2011 年与 1951~1979 年的差值场; (d) 2000~2011 年与 1980~1999 年的差值场。图 a 的等值线间隔为 40 m, 图 b-d 的等值线间隔为 10 m

Fig. 1 500-hPa geopotential height in May and their differences between different periods (units: m): (a) 1951–2011 climatological mean field, the box represents the area for the definition of Baikal Lake ridge index; (b) difference between 1980–1999 and 1951–1979; (c) difference between 2000–2011 and 1951–1979; (d) difference between 2000–2011 and 1980–1999. The contour intervals are 40m in (a) and 10m in (b)–(d), respectively

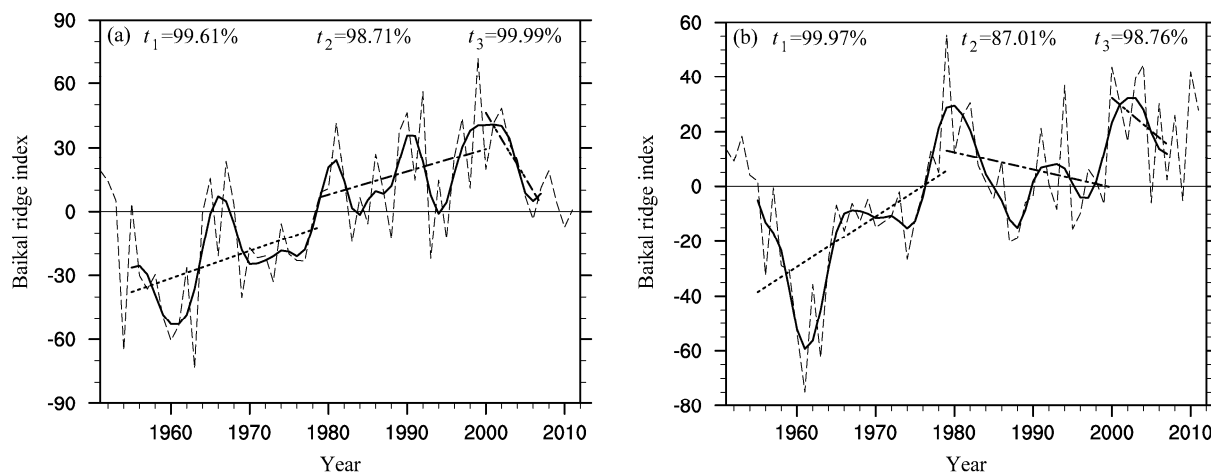


图 2 1951~2011 年贝脊指数时间序列 (虚曲线): (a) 5 月; (b) 6 月。实线表示九年平滑后的时间序列, 虚直线表示分段变化趋势, t_1 、 t_2 、 t_3 表示趋势的置信度

Fig. 2 The time series (1951–2011) of Baikal ridge index (dashed line): (a) May; (b) June. The solid line represents data smoothed with a 9-year filter, the dashed straight lines represent the trend in different periods, t_1 , t_2 , t_3 denote the confidence levels of the trend

数急剧减小, 说明 80 年代后贝加尔湖地区环流异常在这两个月的维持程度减弱, 环流变化快, 出现环流形势急转的可能性增大。这一结果与 Zong et al. (2012) 指出的我国长江中下游春末夏初旱涝急转情况越来越频繁的事实比较一致。

叶笃正等 (1958) 提出并讨论了东亚大气环流

在 6 月突变的现象。由表 1 可知, 上世纪 80 年代以前, 环贝加尔湖地区环流在 5 月和 6 月年际变化特征存在一致性, 这说明东亚环流突变在该地区存在一定的前兆信号; 而 80 年代以后, 贝脊指数在这两个月不存在显著的相关关系, 就环贝加尔湖地区环流而言, 6 月突变现象不存在前期的局地环流

征兆。

表 1 5 月和 6 月贝脊指数的相关系数

Table 1 The correlation coefficient between the May and June Baikal ridge indexes. Asterisks indicate significance at the 0.01 level

时间段	1951~2011 年	1951~1979 年	1980~1999 年	2000~2011 年
相关系数	0.56*	0.60*	0.16	0.15

*代表通过 0.01 显著性检验

4 春末贝脊指数与中国温度、降水的关系

4.1 多年统计情况

春末夏初是东亚季风区环流转变的重要时期，也是我国温度、降水状况最为复杂的时期。如前所述，随着年代际变化，春末贝脊强弱也发生明显变化。因此有必要研究这个时期贝脊对我国温度、降水的不同影响。图 3 为 1951~2011 年我国 5 月温度、降水对同期贝脊指数（1 个标准差）的回归场。在 5 月份，贝脊指数与长江以北的大部分地区的温度存在显著的正相关关系。同时，与 5 月份贝脊的加强对应，我国西南地区（云南、四川西南、贵州西南广西和海南）温度则为负异常，最显著的区域位于四川南部和云贵交界（图 3a）。由图 3b 可知，贝脊指数与长江下游地区降水量的关系呈现显著的负相关，而与我国西南地区降水量则为明显的正相关。

为了进一步验证贝脊的强弱变化与中国温度、降水的关系，下面给出合成分析结果。合成方法如下：从 5 月标准化贝脊指数（1951~2011 年）

序列中，挑选出大于+1.0 σ （标准差）的年，将其定义为强贝脊年，将小于-1.0 σ 的年定义为弱贝脊年。强脊年共 9 年（1981、1989、1990、1992、1997、1999、2001、2002），弱脊年共 8 年（1954、1957、1959、1960、1961、1963、1969、1973）。图 4 给出了贝脊指数强弱年中国温度、降水异常的合成结果。当 5 月贝脊强时，我国新疆北部和内蒙古地区显著升温，长江以北的东部地区温度也上升，我国西南地区温度显著降低（图 4a）。由图 4b 可见，我国西南地区降水显著增加，长江中下游及江南地区降水有所减少。当贝脊弱（或成为贝加尔湖槽）时，我国温度、降水分布与强脊年情况基本相反，除西南和华南以外的全国大部地区温度显著降低，尤以我国华北、东北北部和华东北部地区为最显著（图 4c）。在弱贝脊年，长江下游地区降水明显增强，我国西南地区的降水有所减少（图 4d）。

图 5 为强弱贝脊年 5 月份 850 hPa 风与水汽通量散度的合成异常场。如图 5a 所示，在强贝脊年，贝加尔湖地区为反气旋性环流控制，与此相联系的异常偏北风可影响到长江下游地区，引起局地降水量的减少，对应着对流层低层水汽通量散度的正距平。同时，该异常偏北风也影响到我国西南地区，有利于局地水汽通量的辐合，造成局地降水量的增加。弱脊年的情况（图 5b）与强脊年恰好相反，贝加尔湖地区为气旋性环流控制，中国东部地区受异常偏南风的影响。与之对应，在对流层低层，环贝加尔湖地区异常环流有利于在长江下游地区水汽通量的辐合，降水显著增多，同时有利于西南地区水汽通量的辐散，降水减少。可见，贝脊的强弱变

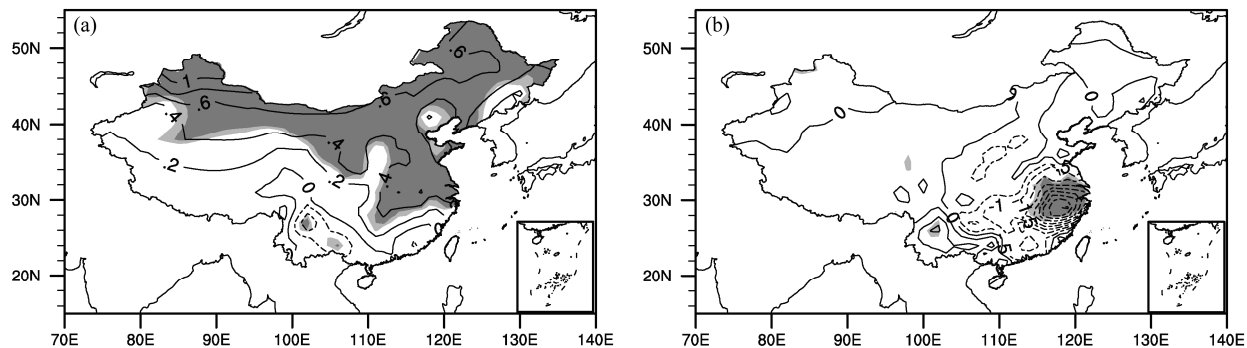


图 3 1951~2011 年 5 月中国温度和降水量距平对同期贝脊指数的回归场：(a) 温度异常（单位：℃，等值线间隔为 0.2℃）；(b) 降水量异常（单位：mm，等值线间隔为 0.5 mm）。浅、深阴影分别代表 90%和 95%置信度
Fig. 3 (a) Surface air temperature anomalies regressed against the Baikal Lake ridge index in May during 1951–2011 (units: °C, the contour interval is 0.2°C); (b) same as (a), except for the regressed pattern of precipitation anomalies (units: mm, the contour interval: 0.5 mm). Light and dark shadings denote the regions of 90% and 95% significance levels, respectively

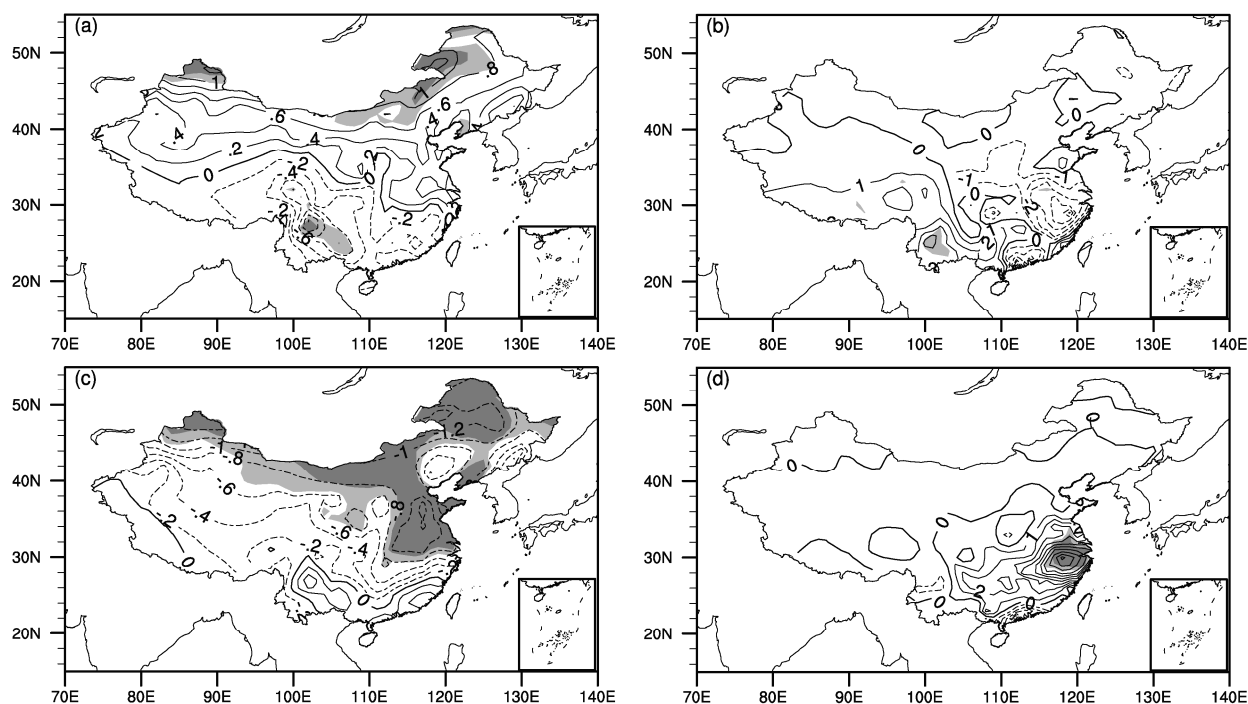


图4 强和弱贝脊年的我国温度和降水异常合成场: (a) 强脊年温度距平(单位: $^{\circ}\text{C}$, 等值线间隔为 0.2°C); (b) 强脊年降水距平(单位: mm, 等值线间隔 1mm); (c) 同(a), 但为弱脊年; (d) 同(b), 但为弱脊年。阴影同图3

Fig. 4 Composite temperature and precipitation anomalies for the (a, b) strong and (c, d) weak Baikal Lake ridge years: (a, c) Temperature anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$, contour interval: 0.2°C); (b, d) precipitation anomalies (units: mm, contour interval: 1mm). Shadings are the same as in Fig. 3

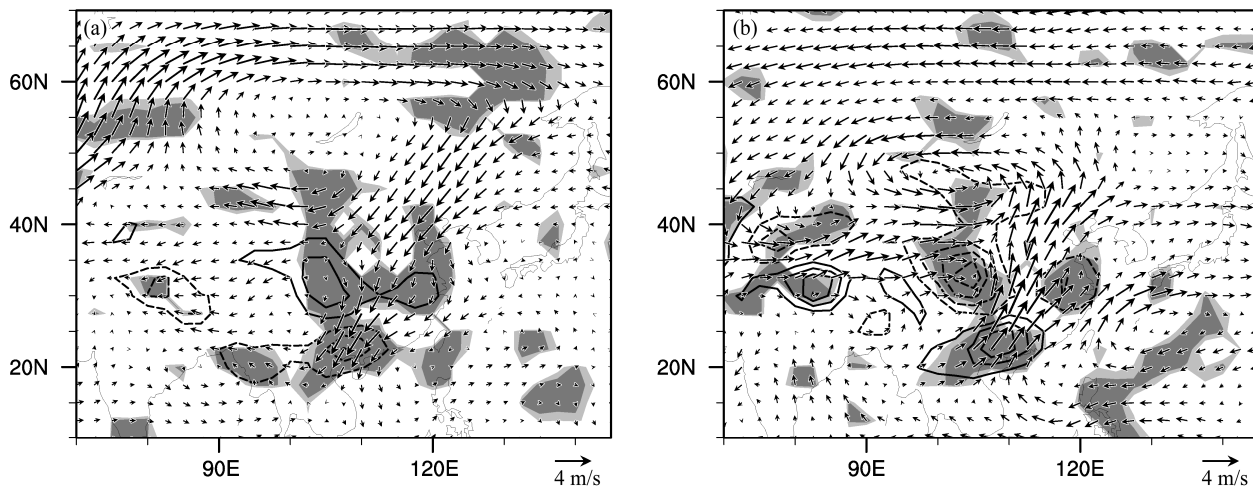


图5 5月份850 hPa异常风场(单位: m/s, 箭头)与水汽通量散度距平(单位: $10^{-6} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 等值线间隔: $12 \times 10^{-6} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 零线被省略)的合成场: (a) 强脊年, (b) 弱脊年。阴影同图3

Fig. 5 Composite 850-hPa wind anomalies (m/s) and water vapor flux divergence anomalies (contour interval: $12 \times 10^{-6} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$, the zero line is omitted) in May for the (a) strong and (b) weak Baikal Lake ridge cases. Shadings are the same as Fig. 3

化对我国长江下游和西南地区的降水具有十分重要的影响。

4.2 不同年代际时段的情况

上一小节讨论了整个时期(1951~2011年)的贝脊与中国气候的关系,而这一节则着重探讨不同

年代际时段它们的关系发生哪些变化。图6分别给出了1951~1979年、1980~1999年和2000~2011年三段时期5月中国地区温度距平对贝脊指数的回归场。在第一时期(1951~1979年),5月份贝脊对中国温度、降水的影响与1951~2011年整个时

段十分相似。在强（弱）贝脊年，除华南和西南以外的中国大部地区温度偏高（低），其中西北、东北和华北东部地区的温度变化较为显著（图 6a）。与第一时期相比，在第二时期贝脊的强弱对中国华南和西南温度影响更加显著，范围有所扩大，而对我国北方地区温度的影响范围减小，只对西北地区和华北北部有明显影响（图 6b）。2000 年之后（图 5c），贝脊对中国温度的影响发生了进一步的变化，对中国北部地区温度的影响进一步减弱，但强（弱）脊使得西南大部地区温度显著降低（升高），使东南沿海地区温度上升（降低）。

由上一节分析可知，贝脊对中国长江下游和西南地区的降水具有重要影响。下面进一步分析这种关系的年代际变化特征。图 7 给出了 5 月份标准化贝脊指数与标准化长江下游和西南地区降水量逐年变化特征，其中实线为标准化贝脊指数，虚线为标准化降水量。由图 7a 可见，随着年代际变化，第一时期和第二时期的贝脊指数与长江下游的降水量存在明显的反位相变化关系，两者的相关系数分别为 -0.46 和 -0.37 ，均通过 90% 显著性检验（表 2）。但在第三时期，两者的这种关系基本消失。这说明 1951~2011 年期间的贝脊指数与长江下游的降水量的反位相变化关系（相关系数为 -0.51 ）主要反映第一和第二时期的情况。由图 7b 和表 2 可见，第一时期贝脊指数与西南地区降水量的相关系数很小，第二时期存在正相关关系，相关系数达 0.34 ，但仍不显著。值得注意的是，在第三时期（2000~2011 年）贝脊指数与西南地区降水量距平的同号率达 83.3%（10 年/12 年），其相关系数为 0.74 ，通过 99% 的显著性检验。这说明，自上世纪 80 年代开始，贝脊的强弱变化与西南地区的降水量的正相关关系逐步加强，到了本世纪两者的关系变得极为显著。近几年，我国西南地区的春季干旱灾害（见图 7b）备受关注，上述研究结果可能对此类问题的研究提供了一个中高纬异常环流（贝脊的强弱变化）的视角。

表 2 贝脊指数与我国区域降水相关

Table 2 The correlation coefficient between the Baikal Ridge index and the rainfall over China. One and two asterisks indicate confidence at the 90% and 99% levels, respectively

	1951~2011 年	1951~1979 年	1980~1999 年	2000~2011 年
长江下游	-0.51^{**}	-0.46^*	-0.37^*	-0.01
西南地区	0.16	0.01	0.34	0.74^{**}

*和**分别表示 90%和 99%置信度

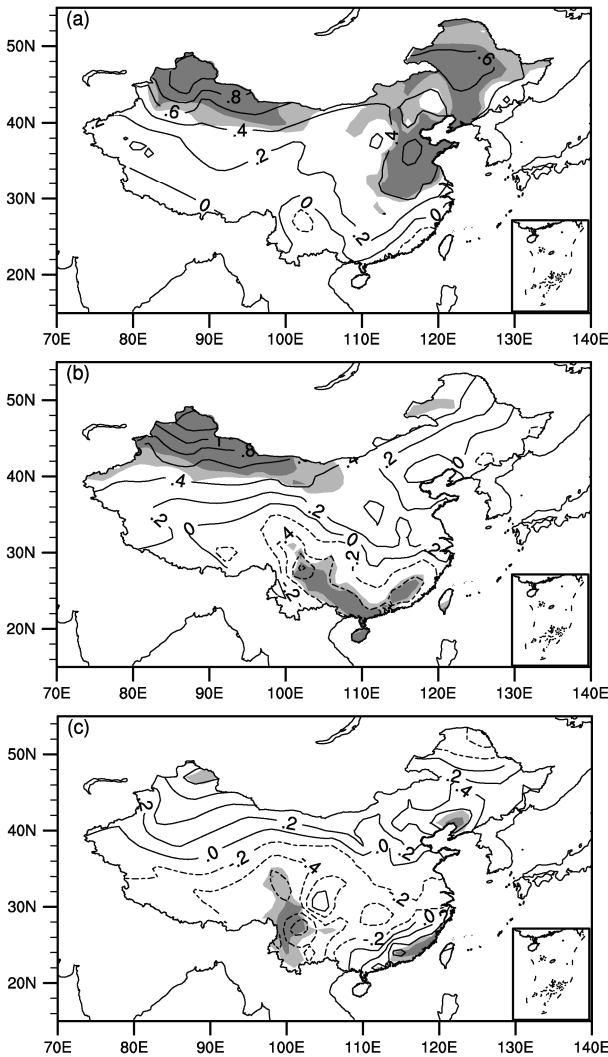


图 6 不同年代际时段 5 月份中国温度异常（单位： $^{\circ}\text{C}$ ，等值线间隔为 0.2°C ）对同期贝脊指数的回归场：(a) 1951~1979 年，(b) 1980~1999，(c) 2000~2011 年。阴影同图 3

Fig. 6 Surface air temperature anomalies regressed against the Baikal Lake ridge index in May during (a) 1951–1979, (b) 1980–1999, and (c) 2000–2011 (units: $^{\circ}\text{C}$, contour interval: 0.2°C). Shadings are the same as Fig. 3

5 5 月环贝加尔湖地区异常环流特征及其前兆环流信号

由上一节分析可知，贝脊的年际和年代际变化对中国气候造成不可忽视的影响。那么有必要在各个年代际时段对与贝脊相联系的北半球异常环流变化进行研究，以便理解其形成和变化的可能原因。图 8 为 1951~2011 年期间的强弱贝脊年 5 月 500 hPa 位势高度异常场的合成结果。强弱贝脊年的个例挑选与 4.1 节相同。如图 8a 所示，强脊年的北半球异常环流以 Rossby 波列为主要特征，源于西欧上空的定常 Rossby 波向东传播，经乌拉尔山地区，到达贝加尔湖地区，形成反气旋式异常环流。同时，极涡

较强,特别是在格陵兰和加拿大群岛地区。阿留申群岛附近为正异常中心,表明北太平洋急流减弱。由图 8b 可见,弱脊年的异常环流不能视为强脊年的反位相,没有对称性特征。在贝脊减弱年,靠近欧亚大陆的次极区位势高度增加,形成纬向尺度较大的弱脊,引导冷空气大范围南下,其南侧形成一个西南—东北走向的位势高度减弱带,其中贝加尔湖地区的气旋性异常环流最为显著。

下面通过合成分析简要讨论与贝脊强弱相联系的北半球异常环流及其年代际变化特征。针对不同年代际时段,选取贝脊指数大于 $+0.5\sigma$ 的年份为强脊年,小于 -0.5σ 的年份为弱脊年。在 1951~1979 年期间共有 11 个强脊年和 8 个弱脊年,在 1980~

1999 年间有 6 个强脊年和 5 个弱脊年,在 2000~2011 年间有 3 个强脊年和 5 个弱脊年。5 月份 500 hPa 高度异常场的合成结果表明(图略),在第一时期,与强贝脊相联系的正距平中心位于贝加尔湖和巴尔喀什湖之间,呈西北—东南向带状分布,与之对应的行星尺度波列源于偏高纬度,其负异常中心位于北欧北部。弱贝脊年的异常环流特征与整个时期(1950~2011 年)弱脊年合成结果相似(图 8b),贝加尔湖地区至中国东北为强低压控制。第二时期强脊环流特征和整个时期的合成结果类似,但与第一时期相比,贝加尔湖地区反气旋式异常环流十分强盛。该时期弱脊环流与其强脊环流情况呈反位相,极涡显著减弱。在第三时期,环贝加尔湖地区异常

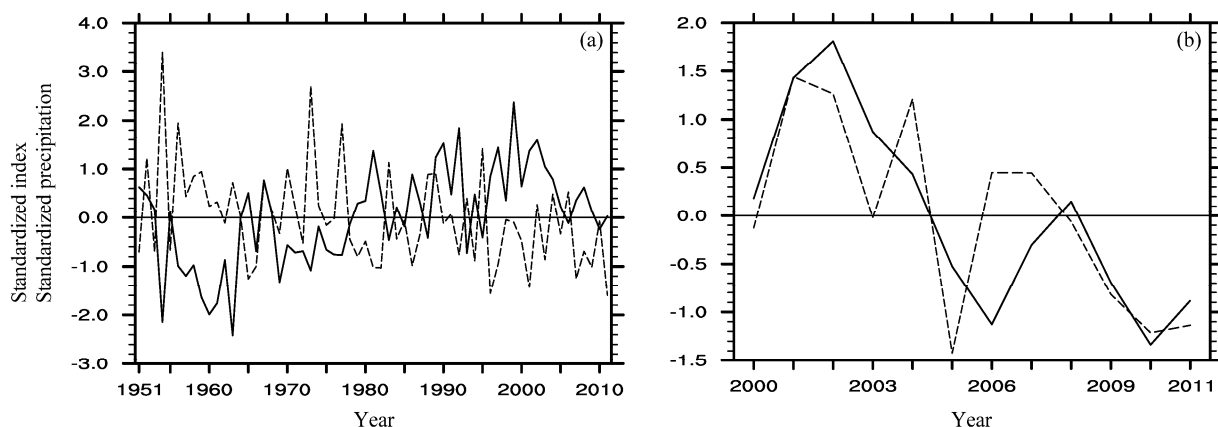


图 7 5 月份的标准化贝脊指数与我国区域平均标准化降水量的时间序列: (a) 1951~2011 年贝脊指数(实线)与中国长江下游地区降水量(虚线); (b) 2000~2011 年贝脊指数(实线)与中国西南地区化降水量(虚线)

Fig. 7 Time series of (a) the standardized Baikal Lake ridge index (solid lines) and the standardized area-averaged precipitation amount over the lower reaches of the Yangtze River (dashed lines) in May during 1951–2011, and (b) the standardized Baikal Lake ridge index (solid lines) and the standardized area-averaged precipitation amount over southwestern China (dashed lines) in May during 2000–2011

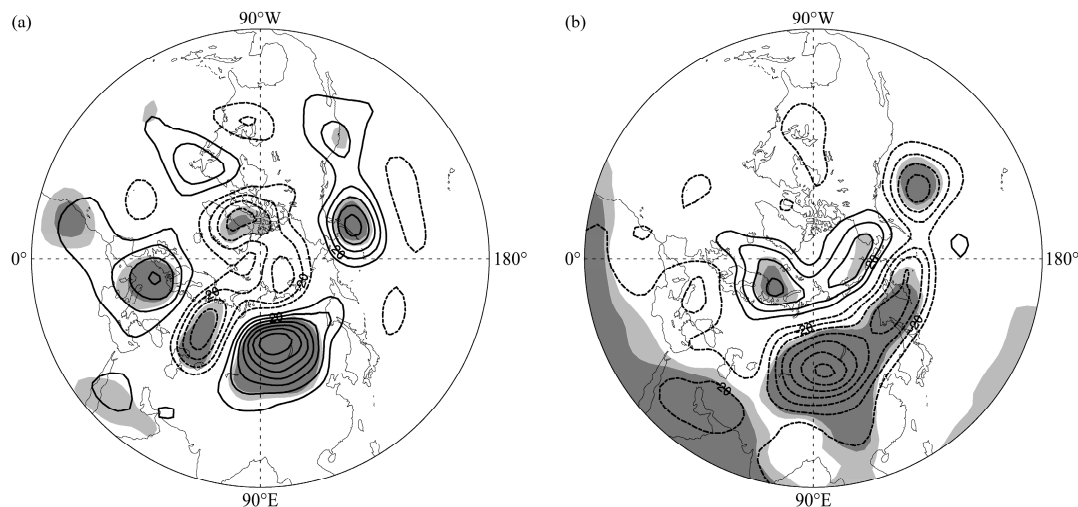


图 8 1951~2011 年 5 月 500hPa 位势高度异常的合成场(单位: m): (a) 强脊年, (b) 弱脊年。等值线间隔为 10 m, 阴影同图 3

Fig. 8 Composite 500-hPa geopotential height anomalies in May for (a) the strong Baikal Lake ridge cases and (b) the weak Baikal Lake ridge cases during 1951–2011. Contour interval is 10 m and shadings are the same as in Fig. 3

环流仍以源于北大西洋的定常波列以及极区异常环流为主要特征，并与第一时期的合成结果有些相似。

由上文分析可知，5 月份贝脊的强弱变化能够

影响中国气候，同时其异常环流也存在明显的年代际变化特征，那么它是否存在前兆性异常环流信号？图 9 给出了与 5 月强、弱脊年（1951~2011 年）

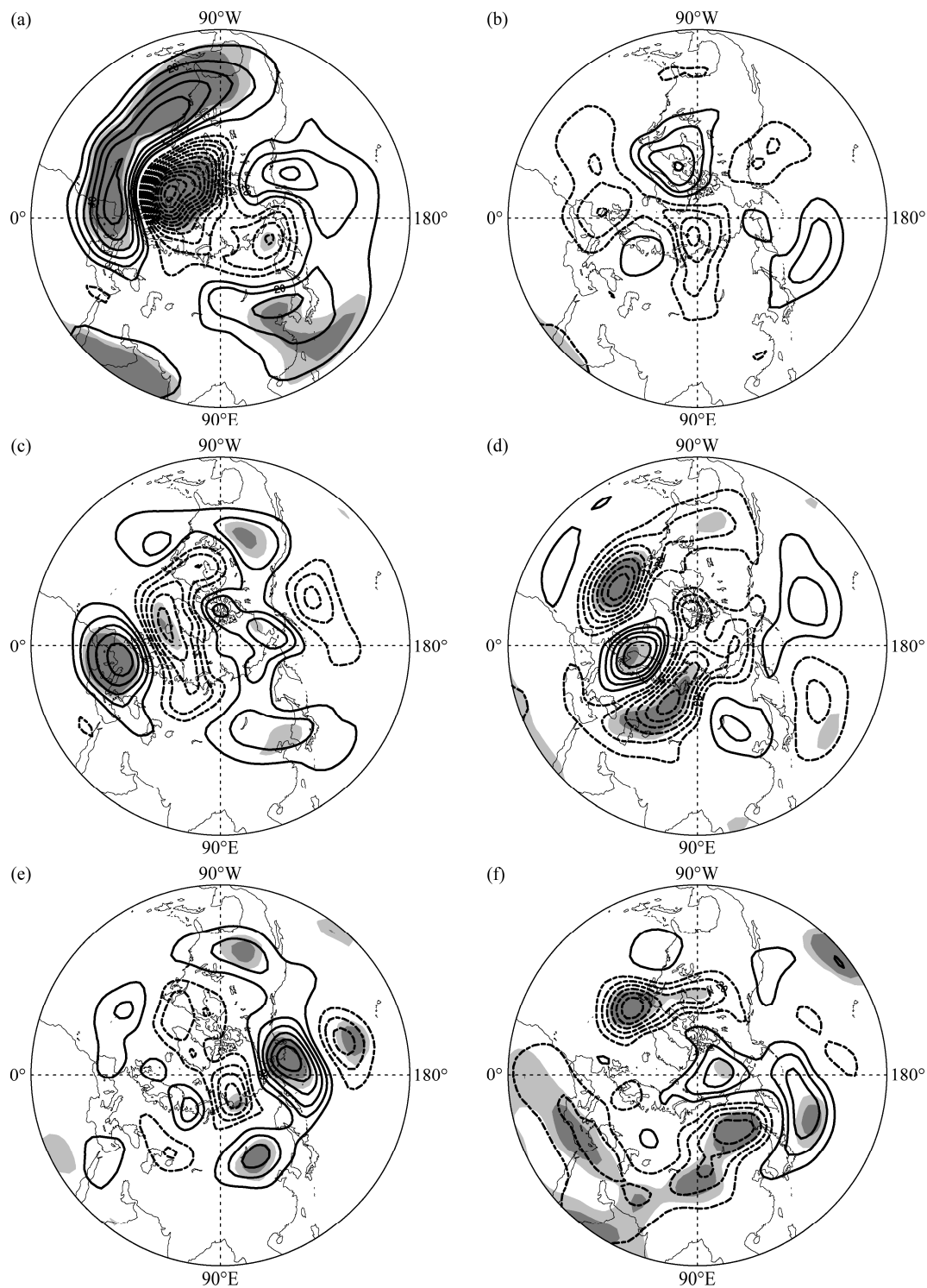


图 9 5 月份强、弱贝脊的前兆信号：2~4 月份 500 hPa 位势高度距平（单位：m）合成场。(a) 强脊年 2 月，(b) 弱脊年 2 月；(c)、(d) 同图 (a)、(b)，但为 3 月；(e)、(f) 同图 (a)、(b)，但为 4 月。图中等值线间隔为 10 m，阴影同图 3

Fig. 10 Precursory signals of the anomalous Baikal Lake ridge in May: composite 500-hPa geopotential height anomalies (units: m) in (a, b) February, (c, d) March, and (e, f) April. (a, c, e) For the weak Baikal Lake ridge cases; (b, d, f) for the strong Baikal Lake ridge cases. Contour interval is 10 m and shadings are the same as in Fig. 3

对应的同年 2 月、3 月和 4 月 500 hPa 位势高度异常场的合成结果。强弱贝脊年（5 月）的个例挑选与 4.1 节相同。首先分析强贝脊的情况，最强的前兆信号出现在 2 月（图 9a），此时北大西洋涛动十分强盛，东亚大槽显著减弱。到了 3 月（图 9c），北大西洋地区的异常环流转为东大西洋型，东亚大槽仍处于减弱的态势。4 月，北大西洋/欧洲地区的异常信号已减弱，但贝加尔湖地区的正高度异常中心仍存在（图 9e）。这时极涡的加强和乌拉尔山南端的负距平中心与对应的 5 月份异常环流有些相似（图 8a）。由于强脊年的个例（5 月）主要发生在第二时期，此类前兆信号也主要针对这个时期的强贝脊异常环流。

由弱脊年的合成结果可知，最强的前兆信号出现在 3 月（图 9d），源于北大西洋地区的 Rossby 波列的传播十分明显，乌拉尔山地区为显著的气旋式异常环流。这一波状环流的雏形 2 月份已形成（图 9b）。到了 4 月份（图 9f），气旋式异常环流已在贝加尔湖—东北亚地区形成，这可能与 3 月份乌拉尔山地区气旋式异常环流的东移以及北太平洋脊向极区伸入过程有关，有待进一步研究和确认。无论如何，4 月和 5 月的份异常环流在东亚和欧亚大陆次极区比较相似（图 8a）。由于弱脊年的个例主要发生在第一时期，此类前兆信号也主要针对这个时期的弱贝脊异常环流。

6 结论与讨论

本文利用 1951~2011 年 NCEP/NCAR 再分析资料逐月气象场以及中国 160 站点逐月温度和降水资料，探讨了春末环贝加尔湖地区环流的年际和年代际变化特征与中国温度、降水的关系，主要结论如下：

（1）春末贝加尔湖脊具有明显的年代际变化特征，它在 1951~1979 年期间较弱，但在 1980~1999 年期间贝加尔湖地区位势高度逐渐增强。进入本世纪后，春末贝加尔湖脊呈现显著减弱的趋势。在 1951~1979 年期间，贝加尔湖地区异常环流在 5 月和 6 月的持续性较好。

（2）春末贝加尔湖脊的年际和年代际变化对中国温度和降水具有重要影响：强（弱）贝加尔湖脊使我国北方部分地区的温度显著升高（降低），使西南地区的温度降低（升高）。贝加尔湖脊的强弱变化对北部地区温度的影响在 1951~1979 年期间

最为显著；在后两个时期，它对西南地区温度的影响显著加强。在 1951~1999 年期间，贝加尔湖脊的强弱变化与长江下游的降水量存在明显的反位相变化关系；在本世纪贝加尔湖脊的强弱与我国西南地区降水量的相关系数达到 0.74（99%置信度）。

（3）强贝加尔湖脊与行星尺度定常波自北大西洋/欧洲向东传播相联系。欧亚大陆次极区带状正高度距平区的形成为弱贝脊环流的主要特征。在三个年代际时段，与贝加尔湖脊强弱变化相联系的北半球异常环流特征存在一定的差异。

（4）5 月份贝脊的强弱变化存在前兆性异常环流信号：对强脊而言，其前期环流以北大西洋涛动、东大西洋型以及弱东亚大槽为主要特征；对弱脊而言，其前兆信号出现在 3 月，以乌拉尔山地区气旋式异常环流为主要特征。

2011 年春末夏初（5~6 月）的旱涝急转现象是以东亚中高纬环流的快速调整为前提（Zong et al., 2012）。同时，我们也注意到，进入本世纪后贝脊指数也急剧下降（图 2a）。那么，与 5 月贝脊相关的异常环流是否与初夏（6 月）东亚夏季风环流建立的早晚存在某种联系，值得我们进一步深入研究。

如前所述，春末贝加尔湖地区的异常环流在之前的 2 月和 3 月份就已存在前兆性环流特征。众所周知，大气环流本身无法维持这么长时间的信息。那么，与此相联系的外强迫特征（例如，热带太平洋和热带印度洋的海温异常）究竟是什么样的？这有待进一步研究。

本文中涉及了与贝加尔湖地区异常环流相联系的北半球环流异常，但是，由于篇幅的关系，尚未探讨其形成和维持的动力学机理。这需要在季节内尺度上进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Ding Y H, Sun Y. 2004. Changes in Asian summer monsoon and possible mechanisms [J]. *News Letter on Climate Change*, 2003-2004: 47-49.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *Int. J. Climatol.*, 28: 1139-1161.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 78-1-78-4.
- Hu Z Z. 1997. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface

- temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 19403–19412.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18: 465–477. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18: 465–477.
- Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20: 55–69.
- 李春, 孙照渤, 陈海山. 2002. 华北夏季降水的年代际变化及其与东亚地区大气环流的联系 [J]. *南京气象学院学报*, 25 (4): 455–462. Li Chun, Sun Zhaobo, Chen Haishan. 2002. Inter-decadal variation of North China summer precipitation and its relation with East Asian general circulation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 25 (4): 455–462.
- 刘樱, 王妍, 刘军. 2012. 夏季贝加尔湖阻塞高压的年际变化及其与我国降水的关系 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 6 (1): 16–20. Liu Ying, Wang Yan, Liu Jun. 2012. Inter-annual change of Lake Baikal blocking high and its possible relation to precipitation over China in summer [J]. *Desert and Oasis Meteorology (in Chinese)*, 6 (1): 16–20.
- 刘永. 2012. 我国东部夏季降水在 20 世纪 90 年代末的年代际变化及其机理 [D]. 中科院大气物理研究所博士学位论文. Liu Yong. 2012. An interdecadal change of summer rainfall over eastern China around the late-1990s and associated mechanism [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 刘宗秀, 廉毅, 高枫亭, 等. 2002. 东北冷涡持续活动时期的北半球 500 hPa 环流特征分析 [J]. *大气科学*, 26 (3): 361–372. Liu Zongxiu, Lian Yi, Gao Zongting, et al. 2002. Analyses of the Northern Hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (3): 361–372.
- Lu R Y, Ye H, Jhun J G. 2011. Weakening of interannual variability in the summer East Asian upper-tropospheric westerly jet since the mid-1990s [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (6): 1246–1258.
- 申乐琳, 何金海, 周秀骥, 等. 2010. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究 [J]. *气象学报*, 68 (6): 918–943. Shen Lelin, He Jinhai, Zhou Xiujie, et al. 2010. The regional variabilities of the summer rainfall in China and its relation with anomalous moisture transport during the recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (6): 918–943.
- Shi Y F, Shen Y P, Li D L, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm–dry to warm–wet in Northwest China [J]. *Quaternary Sciences*, 23: 152–164.
- Shi Y F, Shen Y P, Kang E, et al. 2007. Recent and future climate change in Northwest China [J]. *Climatic Change*, 80: 379–393.
- Wu Z W, Li J P, He J H, et al. 2006. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L05813: doi:10.1029/2005GL024487.
- 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 2007. 正常季风年华南夏季“旱涝并存、旱涝急转”之气候统计特征 [J]. *自然科学进展*, 17 (12): 1665–1671.
- Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. 2007. The coexistence of normal monsoon years, the South China summer rainfall droughts-floods abrupt climate statistical characteristics [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 17 (12): 1665–1671.
- 徐康, 何金海, 祝从文. 2011a. 近 50 年中国东部夏季降水与贝加尔湖地表气温年代际变化的关系 [J]. *气象学报*, 69 (4): 570–580. Xu Kang, He Jinhai, Zhu Congwen. 2011a. The interdecadal linkage of the summer precipitation in eastern China with the surface air temperature over Lake Baikal in the past 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (4): 570–580.
- 徐康, 祝从文, 何金海. 2011b. 近 50 年环贝加尔湖区变暖对中国华北夏季降水的影响机理 [J]. *高原气象*, 30 (2): 309–317. Xu Kang, Zhu Congwen, He Jinhai. 2011b. Impact of the surface air temperature warming around Lake Baikal on trend of summer precipitation in North China in the past 50 Years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (2): 309–317.
- 谢作威, 布和朝鲁. 2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流 [J]. *气象学报*, 70 (4): 704–716. Xie Zuowei, Bueh C. 2012. Low frequency characteristics of Northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (4): 704–716.
- Xie Z W, Bueh C, Ji L R, et al. 2012. The cold vortex circulation over northeastern China and regional rainstorm events [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5 (2): 134–139.
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象 [J]. *气象学报*, 29 (4): 249–263. Ye Duzheng, Tao Shiyun, Li Maicun. 1958. The abrupt change of the atmospheric circulation in June and October [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (4): 249–263.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. *气象学报*, 56 (2): 199–211. Zhang Qingyun, Tao Shiyun. 1998. Influence of Asian mid high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (2): 199–211.
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 2003. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征 [J]. *气候与环境研究*, 8: 307–318. Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyun. 2003. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8: 307–318.
- Zhou L T, Huang T H. 2010. Interdecadal variability of summer rainfall in Northwest China and its possible causes [J]. *International Journal of Climatology*, 30: 549–557.
- Zhou T J, Brönnimann S, Griesser T, et al. 2010. A reconstructed dynamic Indian monsoon index extended back to 1880 [J]. *Climate Dynamic*, 34: 573–585.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dynamics*, 36 (7–8): 1463–1473.
- Zong H F, Bueh C, Chen L T, et al. 2012. A typical mode of seasonal circulation transition—A climatic view of the abrupt transition from drought to flood over the middle and lower reaches of the Yangtze River valley in the late spring and early summer of 2011 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5: 349–354.