

沈晓琳, 祝从文, 李明. 2012. 2010 年秋、冬季节华北持续性干旱的气候成因分析 [J]. 大气科学, 36 (6): 1123–1134, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11192. Shen Xiaolin, Zhu Congwen, Li Ming. 2012. Possible causes of persistent drought event in North China during the cold season of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1123–1134.

2010 年秋、冬季节华北持续性干旱的气候成因分析

沈晓琳 祝从文 李明

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 利用 1951~2011 年中国台站观测的逐日降水、温度和美国 NCEP/NCAR 再分析月平均资料, 本文分析 2010 年秋、冬季 (11 月至次年 2 月) 发生在华北地区持续性干旱的大气环流和海温异常特征, 并讨论了北极涛动 (AO) 和 La Niña 事件对此次干旱事件的影响。分析表明, 2010 年发生在华北秋、冬季节的持续性干旱是叠加在降水减少气候趋势之上的一次极端干旱事件, 但本次极端干旱事件主要成因是受到同期较强的 AO 负位相和 La Niña 事件共同的影响。统计发现: AO 的负位相有利于乌拉尔山阻塞高压维持和发展, 而贝加尔湖上空出现负位势高度异常, 导致东亚中高纬度经向环流加强和冷空气向南侵袭。AO 负位相可导致贝加尔湖上空气压场偏低并影响冷空气的路径和强度, 进而间接地导致华北地区的干冷气候, 而同期 La Niña 的海温异常分布导致西北太平洋副热带高压偏弱偏南, 抑制了西太平洋水汽向华北地区输送, 从而直接导致该地区的干旱。由于 2010 年 AO 负指数和 La Niña 事件较历史干旱年份表现出较强和长时间持续性, 从而导致了锋面位置位于华北以南和华北本次的持续性干旱事件。

关键词 华北干旱 极端气候事件 北极涛动 La Niña 事件

文章编号 1006-9895(2012)06-1123-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11192

Possible Causes of Persistent Drought Event in North China during the Cold Season of 2010

SHEN Xiaolin, ZHU Congwen, and LI Ming

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Anomalies in the sea surface temperature (SST) and atmospheric circulation that are linked to the drought event in North China during the cold season spanning 2010–2011 are discussed. The possible impacts of the Arctic Oscillation (AO) and La Niña are also addressed in the framework of historical analog analysis based on daily station-observed and NCEP/NCAR reanalyzed data sets. The results suggest that the precipitation in North China exhibits a downward trend over the past decades, however, the extreme drought event occurred during the cold season of 2010 has been mainly affected by the negative phase of the AO and the stronger La Niña event. Statistical analysis suggests that during the negative phase of the AO, the geopotential height at 500 hPa decreases around Lake Baikal, the Ural blocking high develops, and meridional circulation anomalies prevail over East Asia. Such high-latitude circulation may enhance the cold surge around Lake Baikal and cause it to shift southward, indirectly causing a cold, dry climate in North China. During La Niña years, however, the cooling of the SST in the Niño3.4 region weakens the western North Pacific

收稿日期 2011-10-18, 2012-05-16 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40921003、90711003, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200906017, 中国气象科学研究院基本科研业务项目 2010Z001、2010Z003, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05090408

作者简介 沈晓琳, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 研究方向: 极端气候变化。E-mail: shenxiaolin_1986@126.com

通讯作者 祝从文, E-mail: tomzhu@cma.cma.gov.cn

subtropical high and directly blocks the southward moisture flux supply. In contrast to historical drought cases, the stronger and persistent negative phases of the AO and the La Niña event pushed the cold front much further south, and the two together caused the persistent drought event in North China during the cold season of 2010.

Key words drought in North China, extreme climate event, Arctic Oscillation, La Niña

1 引言

2010 年秋、冬季节,我国华北和黄淮等地出现持续时间较长的干旱天气。据统计,2010 年 10 月至 2011 年 1 月 12 日期间,华北大部、黄淮等地降水量普遍在 50 mm 以下,河北、山西、山东、河南、江苏和安徽六省区域平均降水量仅 40.2 mm,比常年同期偏少 53%,仅次于 1970 年,为 1961 年以来历史同期次少。其中,上述六省区域平均最长连续无降水日数达 45 天,较常年同期偏多 14 天,仅次于 1974 年和 1989 年,为 1961 年以来历史同期第三多。华北地区的干旱最为严重。以北京为例,北京单站创造了 108 天连续无降水并刷新了最近 60 年最晚初雪纪录。山东省发生了 60 年一遇的特大干旱,山东省有 2900 多万亩冬小麦受旱,366 条河道断流,391 座水库干涸,32 万人面临临时饮水困难。河北省约 901 万人受灾,受旱面积 714.58 千公顷,37 万人因持续性干旱出现临时饮水困难。本次严重干旱给农业、水利和当地经济造成了巨大的经济损失。

中国华北位于东亚副热带季风区,该地区降水主要来自夏季降水。伴随全球的变暖,近 50 年来东亚夏季风持续性减弱,导致来自南方的水汽供给减少和华北地区的夏季降水量下降。其中,自 70 年代末该地区的干旱程度呈现出加剧的趋势(陈烈庭, 1999; 黄荣辉等, 1999, 2006; 杨修群等, 2005; 据建华等, 2006; 丁一汇等, 2008; 徐康等, 2011a, 2011b)。研究表明,北极涛动(AO)和 ENSO 是冬季最活跃的大气影响因子。北极是中国重要的冷空气源地,北极冷空气的活动会影响东亚的气候变化。AO 是北半球中高纬大气环流低频变率的主要模态,对中国的寒潮天气、持续性低温、暴雨、沙尘暴等极端气候事件具有重要的影响。研究认为,冬季 AO 可以通过影响欧亚大陆西风带的位置和强度直接影响东亚冬季气候变化(武炳义等, 2004)。其中, AO 在北半球冬季比较明显(范丽军等, 2001),冬季 AO 指数偏强(弱),全国大部分地区气温偏高(低)。ENSO 是热带海—气相互作用

的主要模态, El Niño 年冬季东亚冬季风偏弱,不利于寒潮爆发(陶诗言和张庆云, 1998)。一般认为, El Niño 年冬季西太平洋副热带高压偏强偏北,水汽输送偏多,有利于东亚季风降水, La Niña 年水汽输送则偏少,不利于华北地区降水(龚道溢和王绍武, 2003; 据建华等, 2004; 陈文和康丽华, 2006; 何溪澄等, 2008; Gao and Yang, 2009; 张书萍和祝从文, 2011)。

我们注意到,过去对华北降水的大量研究主要集中在夏季,并以年代际尺度变化为主。但是,2010 年华北严重的持续干旱发生在秋、冬季节,本次华北地区持续性干旱是年代际时间尺度的延续,还是极端气候事件的变化?这一期间, AO 指数出现负异常并伴随 La Niña 事件的发生,本次华北极端持续性干旱是否是 AO 和 La Niña 的共同影响结果?为此,本文试图通过分析影响 2010 年华北秋、冬季节持续性干旱的大气环流和水汽输送因子,分析历史同期气候变化特征,揭示 AO 和 ENSO 不同位相配置条件下同期大气环流及水汽输送的差异,探讨 AO 和 La Niña 事件对本次华北持续性干旱事件的影响。

2 资料和方法

本文用到的资料有 1951~2011 年的 NCEP/NCAR 再分析月平均资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996),海温资料取自美国 NOAA,水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ (Reynolds et al., 2002)。逐日和逐月的 AO 指数来源于美国 CPC 的网站 ([http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/\[2011-05-03\]](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/[2011-05-03]))。ENSO 的变化用 Niño3.4 区 ($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W} \sim 120^{\circ}\text{W}$) 海温距平 (SSTA) 来描述。除此之外,本文还用到了国家信息中心提供的 722 个台站 1951~2011 年观测的逐日降水和温度资料。文中采用了线性回归、小波分析、相关分析和偏相关分析等统计方法。关于极端气候事件定义,我们将 1971~2000 年的某日及其前后 5 天(降水取前后 10 天)的资料按照升序排列,计算出每个站每日气温或降水的第 90 (10) 个百分位值,得

到 366 个百分位值后做 11 点二项式平滑, 作为极端气候事件的日阈值, 并将超出极端阈值的台站定义为一次极端气候事件。

3 2010 年秋、冬季节中国气候和环流异常特征

为探究此次持续性干旱的成因, 我们首先对这一期间的逐月中国地表温度和降水进行了分析(图 1)。如图所示: 2010 年 11 月我国大部分地区温度较常年偏高; 12 月东北、青藏高原东部和新疆地区温度较常年偏低, 其他地区温度较常年偏高, 其中温度偏低的地区发生了极端低温事件; 2011 年 1 月, 除青藏高原、东北北部和西南南部外, 全国大部分地区温度较常年偏低, 且发生了极端低温事件; 2 月份全国温度较常年偏高。因此, 华北地区的温度在 2010 年 11 月和 12 月温度偏暖, 大范围 and 较强烈的降温发生在 2011 年的 1 月份, 导致了我国大部分地区发生了极端低温事件。从同期的逐月降水距平分布图可以看出(见图 2), 2010 年 11 月降水主要发生在东北、新疆北部和青藏高原地区, 其他地区降水较常年偏少。其中, 降水极端偏少主要集中在华北、西北、长江流域及华南南部; 进入 12 月, 降水偏少主要位于华北、黄淮、江淮及青藏高原地区; 2011 年 1 月我国东部及西北大部分地区降水偏少, 降水极端偏少依然集中在华北、江淮和黄淮地区; 2011 年 2 月长江以南及东北北部、西北部分地区降水偏少。因此, 华北地区 11~1 月三个月连旱, 但地表气温表现为 11~12 月偏高, 1 月份转为偏低; 2 月降水变多, 气温转暖。与持续性干旱不同, 华北地区的温度变化表现出明显的季节内波动特征。

降水的持续性异常往往与同期的大气环流持续性异常相联系。以 500 hPa 位势高度和温度的距平为例(见图 3), 分析可以发现: 2010 年 11 月和 12 月, 亚洲中高纬大陆上空表现出两高一低的环流型, 贝加尔湖上空受到持续性异常冷低压控制, 而里海和鄂霍次克海上空受到异常暖高压控制。因此, 这一期间的东亚地区上空的大气环流以经向环流为主, 有利于极地冷空气南下并影响我国。如图所示, 2010 年 11 月异常冷低压中心位于北极地区, 但到了 12 月冷低压中心明显向南移动至贝加尔湖地区。2011 年 1 月东亚大气环流异常与前期表现出不同的特征, 表现为冷低压控制了贝加尔湖以南地区, 冷低压中心向东移至西太平洋。而贝加尔湖以北的大

部分地区则是暖高压异常, 表现出了明显的南北反向分布特征。2011 年 2 月里海至西伯利亚为一个低压带, 低压中心分别位于东西伯利亚和里海, 中高纬大陆及西太平洋上空为异常暖高压控制。虽然这一期间的大气环流调整比较复杂, 但是从逐月环流场异常变化可以推断, 影响华北温度变化的主要系统是贝加尔湖上空的异常冷槽, 此冷低压的加深和向东南方向发展直接影响我国大部分地区, 上述环流异常很可能是导致 2011 年 1 月全国发生极端低温的直接原因。

我国的大陆性降水主要以锋面降水为主, 是冷暖空气相互作用的结果。通过分析可知, 这一期间的高空冷空气相对活跃, 由此推断华北地区的持续性干旱很有可能与暖湿气流的偏弱存在密切联系。研究表明, 华北降水异常偏多年对应的水汽输送特征为中纬度西风异常输送和副热带高压西北侧的西南异常输送在华北辐合(田红等, 2003)。分析 2010 年这一期间的 700 hPa 逐月水汽通量距平(见图 4)可以发现, 从 2010 年 11 月至 2011 年 1 月, 来自里海一带向东的西风带水汽输送明显偏少, 而同期的西太平洋向华北的水汽输送也明显偏少。其中, 2011 年 1~2 月来自西太平洋水汽输送偏少最为明显。由此可见, 不论是来自西风带的水汽输送, 还是来自西北太平洋的水汽输送均表现出显著的偏弱特征, 两者的共同作用和持续性异常导致了华北持续性干旱。因此, 干旱期间虽然北方较强的冷空气向南移动, 但是由于南方没有水汽输送, 从而无法形成有效降水。

4 华北降水与历史同期的环流和海温变化关系

我们选取华北地区 ($32.5^{\circ}\text{N} \sim 42.0^{\circ}\text{N}$, $112.5^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$) 88 个台站, 计算了 1951~2010 年秋、冬季节华北降水距平百分率和最大连续无降水日数距平, 分析 1959 年以来华北地区最大连续无降水日数的变化, 可以看出(图 5a): 80 年代末前后两段时间该地区的无降水日数均表现出明显的增多趋势。其中, 2010 年华北地区的无降水日数为近 50 年来历史最高值。分析降水的时间变化趋势可以发现(图 5b): 在 80 年代末前后华北地区秋、冬季降水均呈弱的减少趋势。其中, 2010 年秋、冬季节华北地区降水减少五成左右, 是近 12 年来减少最多的一年。由此可见, 2010 年秋、冬季华北地

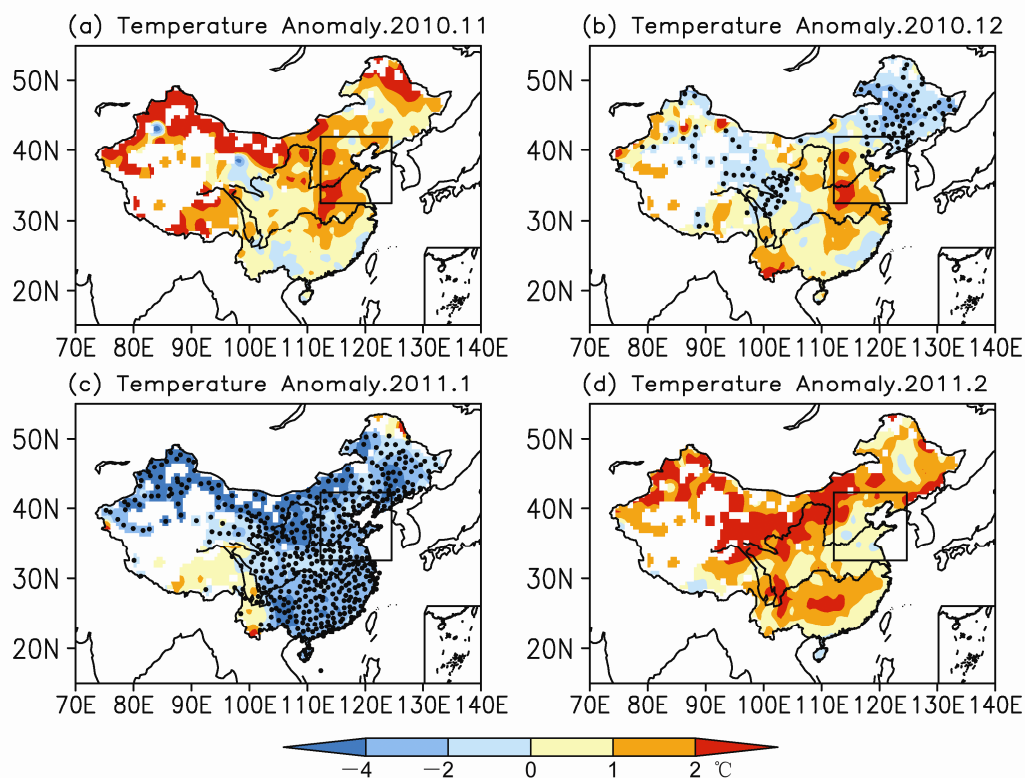


图1 2010年秋、冬季节逐月温度距平分布: 2010年 (a) 11月、(b) 12月; 2011年 (c) 1月、(d) 2月。实心圆表示发生极端低温的台站

Fig. 1 The monthly surface air temperature anomaly in (a) Nov 2010, (b) Dec 2010, (c) Jan 2011, and (d) Feb 2011. The dot indicates the extreme cold event

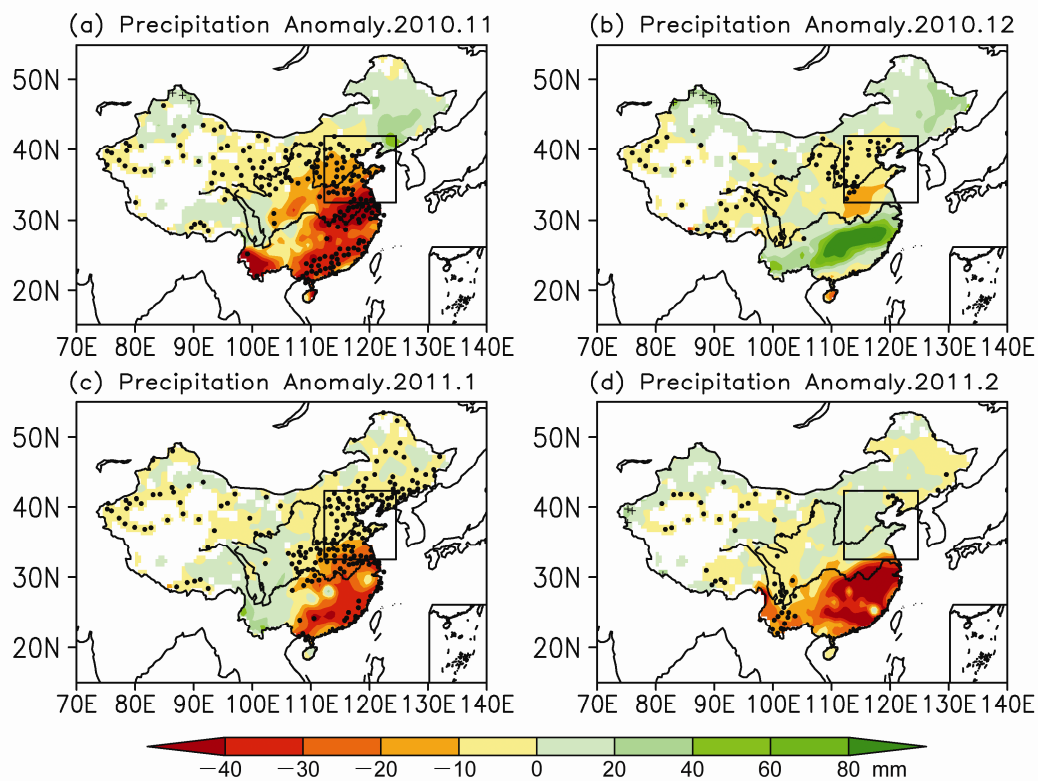


图2 同图1, 但为降水距平分布。实心圆为发生极端干旱的台站

Fig. 2 The monthly precipitation anomaly in (a) Nov 2010, (b) Dec 2010, (c) Jan 2011, and (d) Feb 2011. The dot indicates the extreme drought event

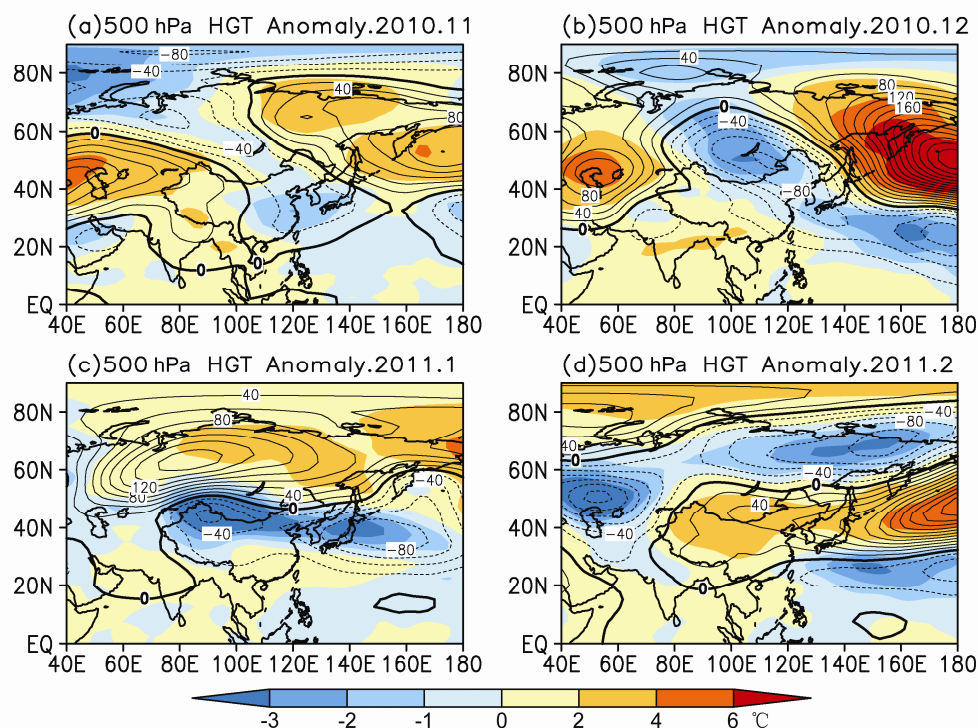


图 3 同图 1, 但为逐月北半球 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: hPa) 和温度 (阴影) 的距平场。气候态为 1971~2000 年

Fig. 3 The monthly geopotential height anomaly (contour, units: hPa) and air temperature anomaly (shaded) at 500 hPa in (a) Nov 2010, (b) Dec 2010, (c) Jan 2011, and (d) Feb 2011

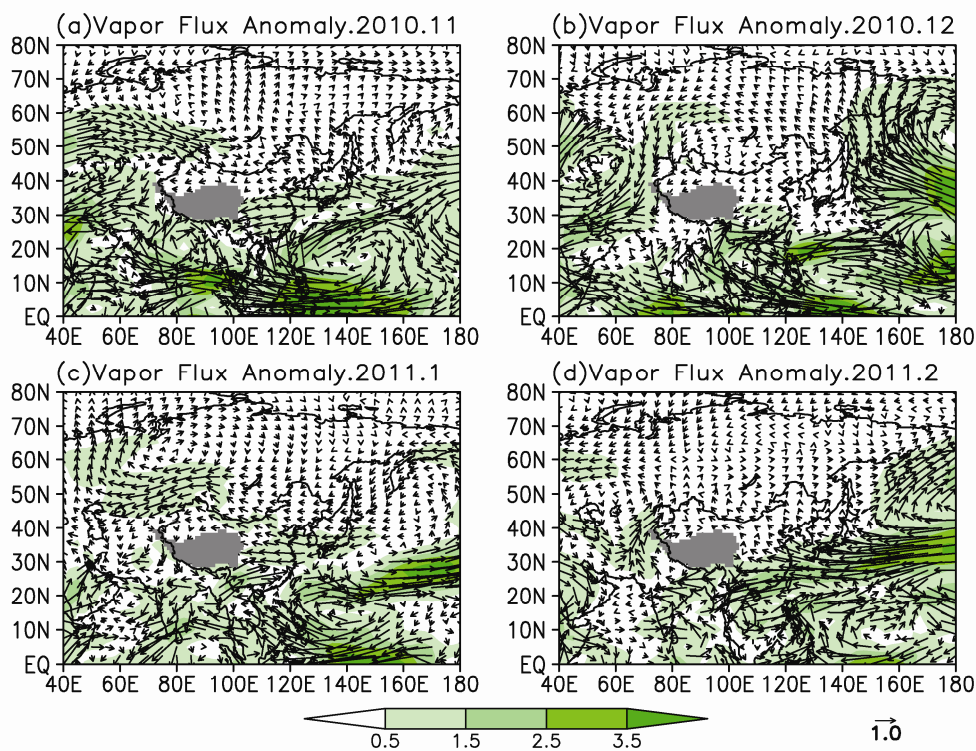


图 4 同图 1, 但为 700 hPa 水汽通量距平场 (单位: $\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。彩色阴影为水汽通量值

Fig. 4 The monthly 700-hPa water vapor flux anomaly ($\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) in (a) Nov 2010, (b) Dec 2010, (c) Jan 2011, and (d) Feb 2011. Color shading: magnitude of moisture flux

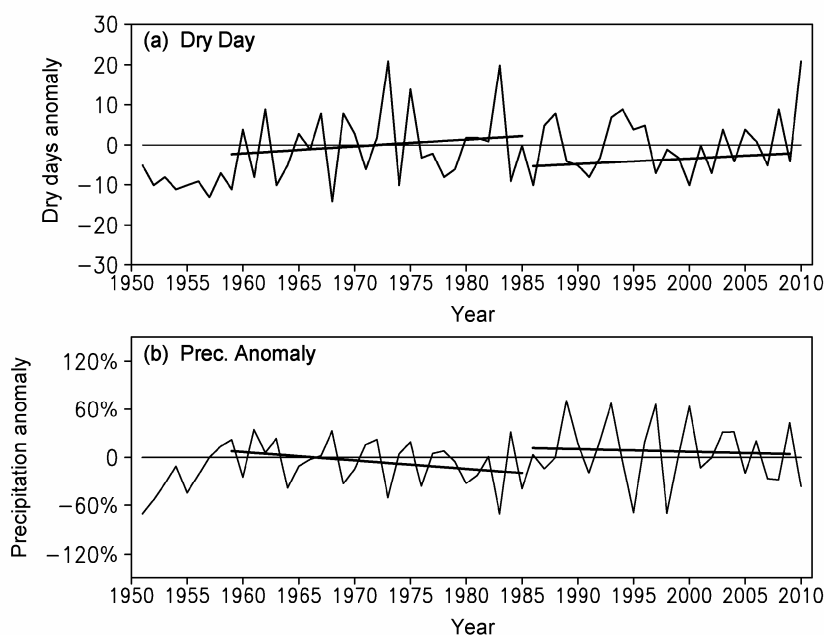


图5 1951~2010年秋、冬季节华北 (a) 最大连续无降水日数距平及 (b) 降水百分率距平的时间序列变化 (气候态取1971~2000平均)

Fig. 5 Time series of (a) accumulated dry days anomaly and (b) precipitation anomaly percentage averaged over the North China in cold season during 1951–2010. The climatology is defined over the period of 1971–2000

区的持续性干旱不仅是一次极端气候事件,同时与该区域降水的减少趋势存在一定的联系。尽管如此,本次干旱事件并不能完全被年代际变化趋势所解释,因此年际尺度外源强迫因子的异常影响很有可能是导致本次持续性严重干旱的重要原因。

2010年秋、冬季节期间,北半球环流和太平洋海温距平分别表现出AO负指数异常和Niño3.4区海温距平为显著负异常(即La Niña事件)。为了从统计上揭示2010年秋冬华北降水与历史同期环流和海温年际变化之间的关系及其可能差异,我们首先将2010年秋、冬季节华北降水样本剔除,之后计算了1951~2009年历史同期华北降水与500 hPa位势高度场、700 hPa水汽通量场及海温的回归系数(图6)。如图所示,历史同期华北降水与环流的回归系数场表明:与华北秋、冬季节降水相关的异常高度场主要位于贝加尔湖以西(关键区1)和日本海(关键区2)。当关键区1位势高度偏低(偏高)时,华北地区的降水偏多(偏少);当关键区2位势高度场偏低(偏高)时,华北地区的降水偏少(偏多)。分析700 hPa水汽通量回归系数场发现,对应位势高度场的上述特征,水汽通量异常表现出以巴尔喀什湖为中心的气旋性形态,表明华北降水与里海向东水汽输送存在相关。除此之外,在日本海上空水汽通量回归场存在一个反气旋分布形态。因

此,上述回归分析表明,秋、冬季节华北地区的降水与贝加尔湖和日本上空的气旋和反气旋异常存在密切的联系。分析历史同期华北降水与海温回归系数场可以发现:秋、冬季节El Niño型的海温异常分布有利于华北降水的增多,相反,La Niña型的海温异常分布不利于华北地区的降水发生。上述分析结果与2010年干旱期间的实况(图略)一致,因此可以认为:2010年秋、冬季节中高纬度环流、水汽通量和太平洋海温异常分布均不利于华北降水的发生。上述因素很有可能是2010年华北秋、冬季节持续性干旱的原因。

虽然AO和Niño3.4区的海温与同期影响华北降水的环流系统均存在密切的联系,但是分析他们与降水之间的关系可以发现(图7),华北降水指数与同期的AO指数之间几乎不存在相关。相比较而言,华北降水指数与同期的Niño3.4区海温指数之间却表现出显著相关,相关系数超过了95%显著性检验。因此,我们推断AO很有可能通过影响中高纬度环流异常的分布从而影响华北降水,而ENSO对华北降水的影响更加直接。

5 2010年秋、冬季节华北干旱持续性成因分析

图3显示,2010年秋、冬季节逐月的500 hPa

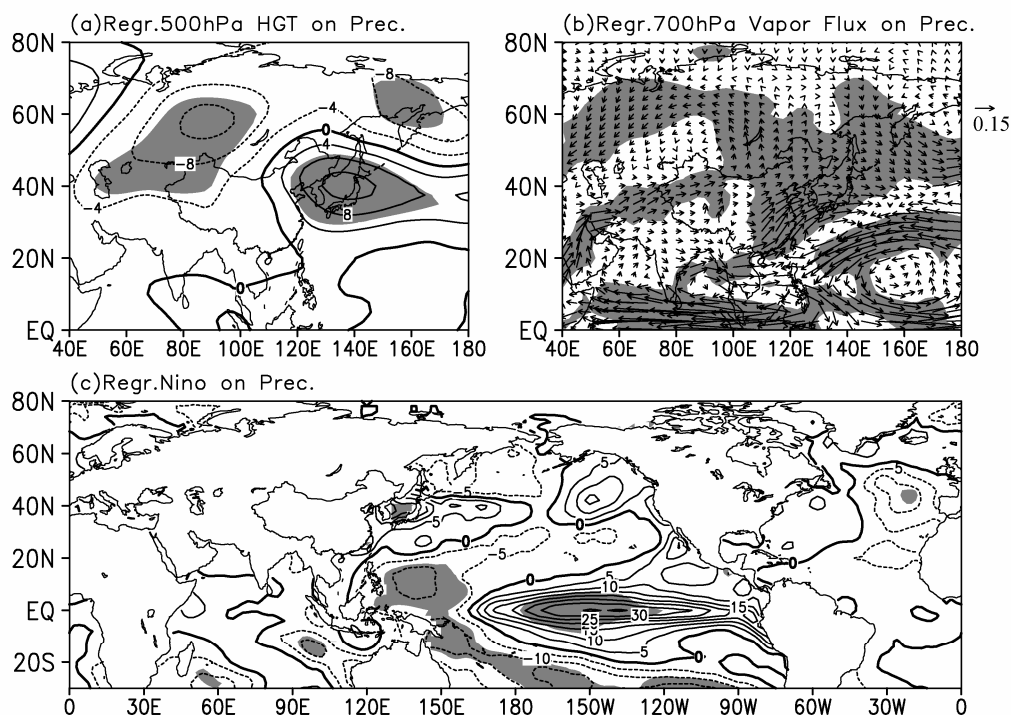


图 6 1951~2009 年秋、冬季节华北降水(单位: mm)与同期(a) 500 hPa 位势高度距平(单位: hPa)、(b) 700 hPa 水汽通量距平(单位: $\text{g}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)、(c) 海温距平(单位: $10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}$)的回归系数场。阴影: 超过 95% 信度的显著性检验

Fig. 6 Regression coefficients of (a) 500-hPa geopotential height anomaly (units: hPa), (b) 700-hPa water vapor flux anomaly (units: $\text{g}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), and (c) SST anomaly (units: $10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}$) on the precipitation (units: mm) in North China in cold season during 1951–2009. Shaded areas: exceeding the 95% confidence level

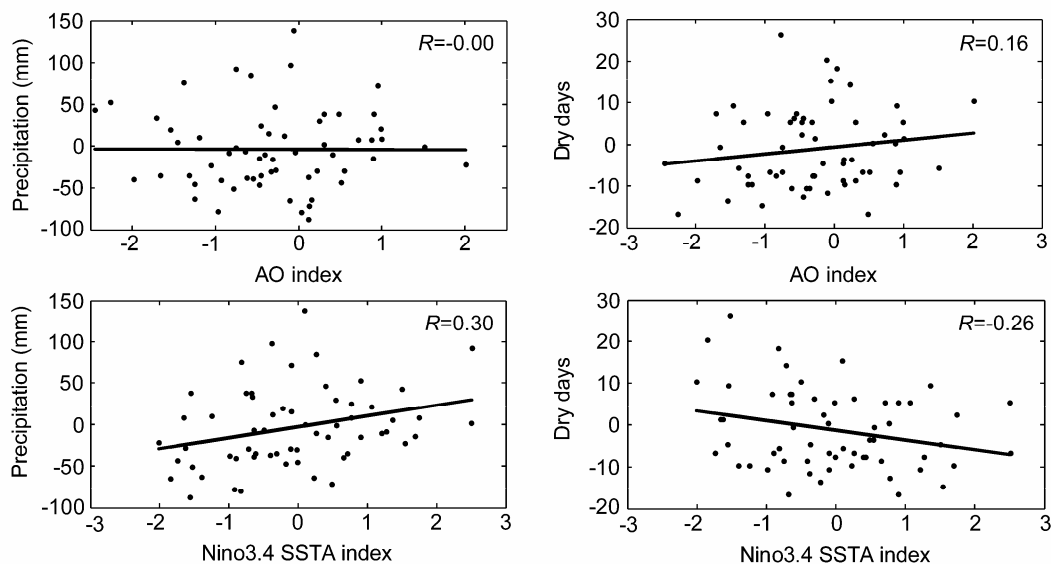


图 7 1951~2010 年秋、冬季节 AO 指数和 Niño3.4 区 SSTA 指数与华北地区降水量及无降水日数的散点图。图中右上角 R 表示相关系数

Fig. 7 Scatter diagram between AO index and Niño3.4 SST anomaly (SSTA) index and the precipitation index in North China. R is the correlation coefficient

位势高度场距平随时间变化表现出明显的波动特征, 小波分析表明高度场的上述波动在 AO 指数反映出明显的季节内(15~30 天)振荡特征(图略)。对这一期间逐日的 AO 指数与华北温度和降水之间超前滞后相关分析可以发现, AO 指数超前华北地表温度变化 12 天左右, AO 对温度的超前相关系数

达到 0.55, 超过 95% 显著性检验, 而其与降水的相关性较差。

AO 指数的波动反映冷空气的前锋活动, 为此我们计算了 850 hPa 沿 $115^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 平均假相当位温 θ_{se} 的纬度—时间剖面图(图 8)。选取 280 K 为锋面特征线并与同期的气候值进行了比较, 分析锋面

的变化特征。除此之外,我们还计算了逐日经向风的纬圈偏差,它表示冷暖空气随时间的经向变化,正负号分别代表偏南和偏北风异常。分析 2010 年秋、冬季节逐日的 θ_{se} 随时间和纬度变化可以发现,当特征线偏南时,对应应有由北向南的经向动能传输,当特征线偏北时,有向北的经向动能传输,且偏离气候态越大,经向动能也越大。我们注意到,从 2010 年 12 月中旬至次年 2 月初期间,特征线较常年位置明显偏南,预示着这一期间的锋面位于华北以南上空。因此,华北地区干旱可能由于南下冷空气较强,经向动能向南分量较大,锋面在华北以南形成,导致华北地区无法形成锋面降水。

通过普查 1951~2010 年秋、冬季节 AO 指数和 Niño3.4 区 SSTA 指数所对应的年份华北地区旱涝情况(见图 9a),我们发现:历史同期华北极端干旱事件年份共发生 11 次。其中,发生在 AO 负指数和 La Niña 年份华北秋、冬季干旱发生次数占 7 次。我们注意到:仅 AO 的负指数年份发生干旱的频数为 1 次,而仅厄尔尼诺年份干旱的次数为 3 次。因此,AO 负指数和 La Niña 共同出现的年份华北干旱的概率较大。此外,我们选取 AO 负指数和 La Niña 共同出现,并且华北降水偏少的 7 个年份,对 AO 指数和 Niño3.4 区 SSTA 指数进行了合成分析。将合成结果与 2010 年个例比较发现:2010 年秋、冬季期间,AO 指数和 Niño3.4 区 SSTA 指数均比历史合成值低,并且表现出更长时间的持续性。因此,AO 和 La Niña 的强度和时间持续性可以在一定程度上解释 2010 年华北干旱的严重性和时间持续性(见图 9b, c)。

研究发现,ENSO 对 AO 的季节内变率存在较弱的影响(左金清, 2011),但是 ENSO 和 AO 之间同期的统计关系并不显著(L'Heureux and Thompson, 2005; Kryjov and Park, 2007)。我们对 1951~2010 年秋、冬季节的 AO 指数和 Niño3.4 区的海温指数进行了相关分析,发现 AO 和 ENSO 同期变化不存在显著相关,说明两者同期变化相对独立。为了探究 AO 及 ENSO 对秋、冬季华北降水的影响及其差异,我们分别对 500 hPa 位势高度、水汽通量和 AO 指数、Niño3.4 区海温指数进行了相关及偏相关分析(图 10, 11)。比较可以发现,500 hPa 位势高度场与两个指数的相关系数场和偏相关系数场差异较小,表明 AO 和 ENSO 对秋、冬季节大气环流均有影响。其中,从 AO 和位势高度的偏

相关系数场可以看出(图 10b),回归系数正值位于从贝加尔湖向东至日本海地区。因此,当 AO 指数为负(正)位相时,对应贝加尔湖地区位势高度场偏低(高),其上游的乌拉尔山高压脊偏强(弱)。2010 年秋、冬季 AO 指数为负异常,在其作用下,贝加尔湖上空出现负位势高度异常,导致亚洲中高纬度环流的经向环流加强,强冷空气向南侵袭影响中国东部地区,与实况比较一致。从 ENSO 和位势高度的偏相关系数场可以看出(图 10d),正相关系数位于日本海以南的西太平洋上空,负相关系数位于西伯利亚一带,表明当 Niño3.4 区 SST 偏高(低)时,日本海至西太平洋上空的位势高度场偏高(低),西伯利亚一带的位势高度场偏低(高)。干旱期间 Niño3.4 区的 SST 异常偏低,日本及以南地区的位势高度异常偏低,副热带高压偏弱偏南,以日本为中心表现为 500 hPa 位势高度负异常,与实况一致。分析 11~2 月逐月相关系数场发现(图略),随着时间的推移,相关系数的显著区域从西北向东南移动,伴随着西伯利亚地区的负位势高度异常也向东南移动,冷空气沿此西北—东南路径移动,影响中高纬大陆。

分析 700 hPa 水汽通量和 AO 指数的相关系数场发现(图 11a),在贝加尔湖上空有一个反气旋式水汽通量回归场,表明当 AO 指数偏低(高)时,贝加尔湖及上空水汽通量表现为气旋性(反气旋性)异常,因此干旱期间,在 AO 指数负异常的影响下,贝加尔湖上空的气旋性水汽通量异常抑制了西太平洋西南水汽输送。分析 700 hPa 水汽通量对 Niño3.4 区海温指数的相关系数场可以发现(见图 11c),与位势高度场相对应,在位势高度场为正的地区水汽通量回归系数场有反气旋式环流。比较干旱期间的这四个月, Niño3.4 区海温距平指数均为负值,上述关键区则对应应有气旋式水汽通量场,导致输送至我国华北地区的水汽减少。分析图 11 可以看出,当去掉 ENSO 对水汽通量的影响后, AO 对水汽通量的相关系数的显著区域基本不变,而大小有所变化,在贝加尔湖地区相关性变小。当去掉 AO 因子 ENSO 对水汽通量的相关性变化不大。由此可见, AO 和 ENSO 对北半球大气环流的作用相对独立。其中, AO 的变化通过影响东亚中高纬度环流影响华北地区的降水,而 ENSO 则有可能通过影响西太平洋水汽通量直接影响华北地区的降水。

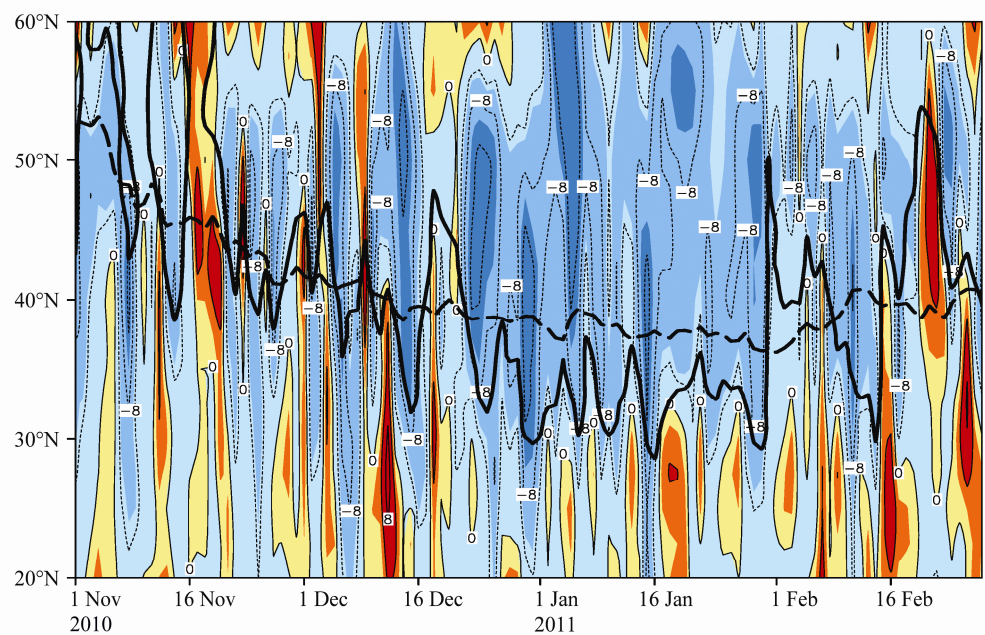


图 8 2010 年秋、冬季节沿 115°E~125°E 平均的 850 hPa 纬圈偏差经向风分量（彩色，单位：m/s）和 280 K 特征位温线（粗实线）纬度—时间剖面图。粗虚线为 280 K 位温线气候平均值变化

Fig. 8 Latitude-time cross section of daily meridional wind at 850 hPa (color shading, units: m/s) and 280-K θ_{se} (pseudo equivalent potential temperature) (thick solid line) averaged over 115°E–125°E in the cold season of 2010. Thick dashed indicates the climatology of θ_{se}

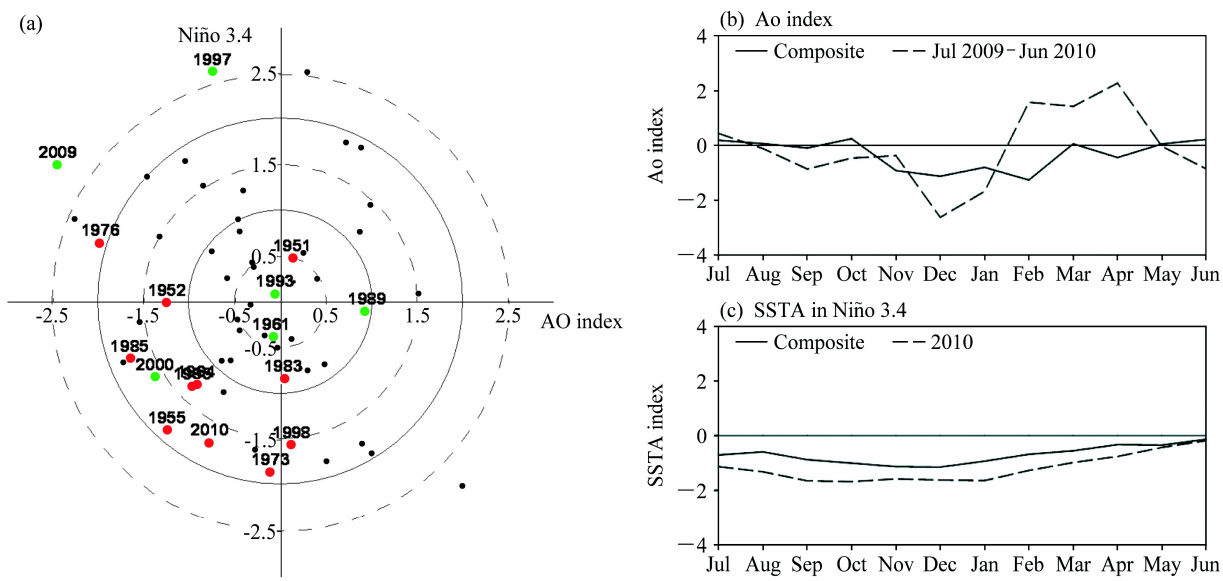


图 9 (a) 1951~2010 年秋、冬季节 AO 指数和 Niño3.4 区 SSTA 指数（标准化后）散点图。绿色点表示华北降水偏多的年份，红色点表示华北降水偏少的年份（以一个标准差为基准）；(b) 2009 年 7 月至 2010 年 6 月（虚线）及华北降水偏少年份合成（实线）的 AO 指数逐月变化；(c) 同（b），但为 Niño3.4 区 SSTA 指数

Fig. 9 (a) Scatter plot of the normalized AO index and Niño3.4 SSTA index in the cold season during 1951–2010, the green (red) dots indicate the wet (dry) year in North China; (b) the composite of AO index during the dry years in North China (solid line) and the monthly AO index during the cold season of 2010 (dashed line); (c) same as (b), but for Niño3.4 SSTA index

6 结论和讨论

本文主要讨论了 2010 年秋、冬季节（11 月～次年 2 月）发生在华北地区持续性干旱的环流和海

温异常特征，并从 AO 和 ENSO 对东亚环流和水汽的影响讨论了本次华北持续性干旱的气候成因，主要结论：

（2）自上世纪 80 年代华北地区秋、冬季节存

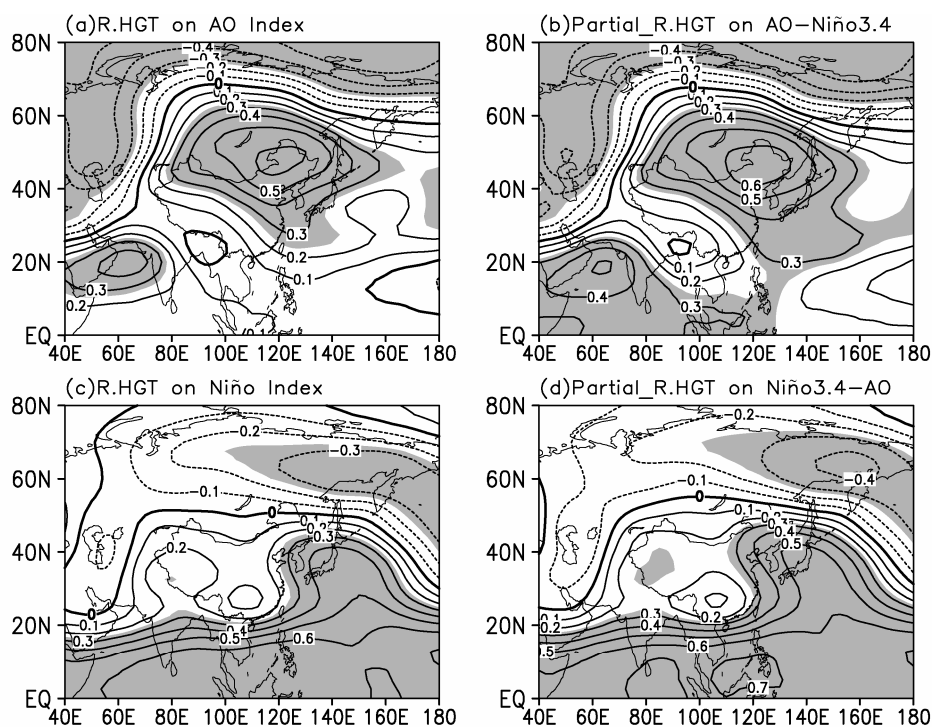


图 10 1951~2009 年秋、冬季节 (a, b) AO 指数与 500 hPa 位势高度场的 (a) 相关、(b) 偏相关系数场, 以及 (c, d) Niño3.4 区海温异常指数与 500 hPa 位势高度场的 (c) 相关、(d) 偏相关系数场。阴影: 超过信度为 95% 显著性检验

Fig. 10 The (a, c) regular and (b, d) partial correlation coefficients (a, b) between 500-hPa geopotential height and AO index, and (c, d) between 500-hPa geopotential height and Niño3.4 SSTA index in the cold season during 1951–2009. Shaded areas: exceeding the 95% confidence level

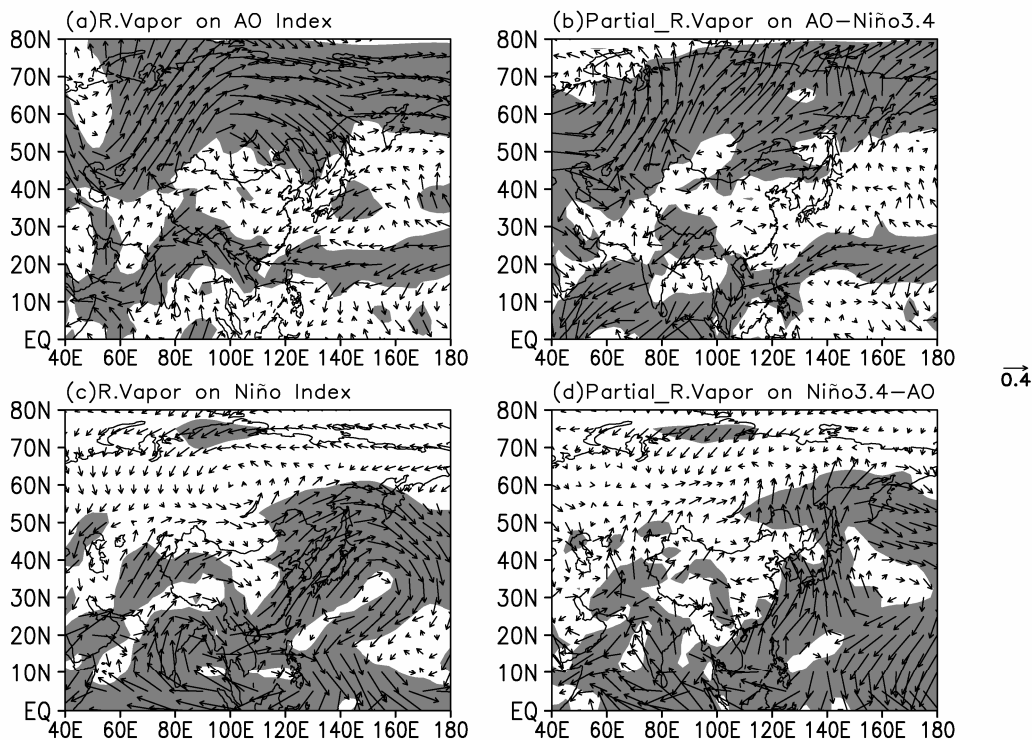


图 11 1951~2009 年秋、冬季节 (a, b) AO 指数与 700 hPa 水汽通量场的 (a) 相关、(b) 偏相关系数场, 以及 (c, d) Niño3.4 区海温异常指数与 700 hPa 水汽通量场的 (c) 相关、(d) 偏相关系数场。阴影: 区域为超过 95% 显著性检验的区域

Fig. 11 The (a, c) regular and (b, d) partial correlation coefficients (a, b) between 700-hPa vapor flux and AO index, and (c, d) between 700-hPa vapor flux and Niño3.4 SSTA index in the cold season during 1951–2009. Shaded areas: exceeding the 95% confidence level

在降水减少和干旱加剧的趋势, 虽然发生在 2010 年华北地区的持续性干旱存在年代际减少趋势项, 但主要体现为 AO 负指数和 La Niña 事件的共同影响所导致的年际尺度极端气候异常。

(2) 分析发现, 贝加尔湖上空的负位势高度异常和西太平洋副热带高压的位置偏南和强度偏弱, 以及锋面位置的偏南是导致本次持续性干旱的环流背景。统计表明, AO 负位相有利于贝加尔湖上空出现负位势高度异常, 导致中高纬度环流的经向度加大, 冷空气南下和锋面位置异常偏南。La Niña 事件导致副热带高压偏弱偏南和来自西太平洋水汽向华北地区输送偏少。

(3) 统计表明, 秋、冬季节 AO 及 ENSO 年际变化之间不存在显著相关, 可以认为是相对独立的两个因子。AO 主要影响贝加尔湖至日本海一带环流变化, 并通过影响中高纬度环流异常的分布影响华北降水; 而 ENSO 则主要作用于西太平洋的大气环流及水汽输送。两者影响的区域, 环流和对降水有所不同, 但对华北地区的降水的影响具有同等重要作用。

(4) AO 和 ENSO 位相的不同配置对华北秋、冬季节的降水影响不同。其中, AO 的负位相和 La Niña 事件配合更有利于华北极端干旱的发生。由于 AO 负指数和 La Niña 较历史同期华北干旱事件表现出较强强度和长时间持续性, 这可能是导致 2010 年秋、冬季节华北持续性干旱的成因。

(5) 随着全球气候的逐渐变暖, 华北干旱已经不仅仅发生在夏季, 在秋、冬季也偶有发生, 甚至发生了极端气候事件, 这种跨季节的干旱与全球变暖的关系, 还需要进一步研究。

参考文献 (References)

- 陈烈庭. 1999. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征 [J]. 高原气象, 18 (4): 477–485.
- Chen Lieting. 1999. Regional features of interannual and interdecadal variations in summer precipitation anomalies over North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 477–485.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用 [J]. 大气科学, 30 (5): 863–870.
- Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the Arctic oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 863–870.
- 丁一汇, 张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较 [J]. 大气科学, 32 (4): 794–805.
- Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 794–805.
- 范丽军, 李建平, 韦志刚, 等. 2003. 北极涛动和南极涛动的年变化特征 [J]. 大气科学, 27 (3): 420–424.
- Fan Lijun, Li Jianping, Wei Zhigang, et al. 2003. Annual variations of the Arctic oscillation and the Antarctic oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 27 (3): 420–424.
- Gao H, Yang S. 2009. A severe drought event in northern China in winter 2008–2009 and the possible influences of La Niña and Tibetan Plateau [J]. J. Geophys. Res., 114: D24104, doi: 10.1029/2009JD012430.
- 龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气温的影响 [J]. 地理学报, 58 (4): 559–568.
- Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2003. Influence of Arctic oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 559–568.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征 [J]. 大气科学, 32 (2): 335–344.
- He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response characteristics of the East Asian winter monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 32 (2): 335–344.
- 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 (4): 465–476.
- 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 (4): 465–476.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730–743.
- Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 30 (5): 730–743.
- 据建华, 任菊章, 吕俊梅. 2004. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. 高原气象, 23 (4): 429–434.
- Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lü Junmei. 2004. Effect of interdecadal variation of Arctic oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 429–434.
- 据建华, 吕俊梅, 任菊章. 2006. 北极涛动年代际变化对华北地区干旱化的影响 [J]. 高原气象, 25 (1): 74–81.
- Ju Jianhua, Lü Junmei, Ren Juzhang. 2006. The effect of interdecadal variations of Arctic oscillation on aridization in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (1): 74–81.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437–472.
- Kryjov V N, Park C K. 2007. Solar modulation of the El-Niño/Southern Oscillation impact on the Northern Hemisphere annular mode [J]. Geophys. Res. Lett., 34: L10701, doi: 10.1029/2006GL028015.
- L'Heureux M L, Thompson D W J. 2005. Observed relationships between the El-Niño/Southern Oscillation and the extratropical zonal mean circulation [J]. J. Climate., 19: 276–287.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. J. Climate., 15: 1609–1625.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. 大气科

- 学, 22 (4): 399–407. Tao Shiyan, Zhang Qingyun, 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 22 (4): 399–407.
- 田红, 郭品文, 陆维松. 2002. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 25 (4): 498–502. Tian Hong, Guo Pinwen, Lu Weisong. 2002. Features of water vapor transfer by summer monsoon and their relations to rainfall anomalies over China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 25 (4): 498–502.
- 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): 211–220. Wu Bingyi, Bian Lin'gen, 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): 211–220.
- 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 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.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. *地球物理学报*, 48 (4): 789–797. Yang X Q, Xie Q, Zhu Y M, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48 (4): 789–797.
- 张书萍, 祝从文. 2011. 2009 年冬季新疆北部持续性暴雪的环流特征及其成因分析 [J]. *大气科学*, 35 (5): 833–846. Zhang Shuping, Zhu Congwen. 2011. Possible causes of circulation anomalies associated with subsequent snowstorms over the North of Xinjiang during winter 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (5): 833–846.
- 左金清. 2011. AO/NAO 与 ENSO 的联系及其对中国气候异常的影响. 兰州大学博士学位论文. Zuo J Q. 2011. Relationship between AO/NAO and ENSO and their impact on climate anomalies in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University.