

宋洁, 杨辉, 李崇银. 2011. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析 [J]. 大气科学, 35 (6): 1009 - 1019. Song Jie, Yang Hui, Li Chongyin. 2011. A further study of causes of the severe drought in Yunnan Province during the 2009/2010 winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1009 - 1019.

# 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析

宋洁<sup>1</sup> 杨辉<sup>1</sup> 李崇银<sup>1,2</sup>

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

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

**摘要** 为了揭示 2009/2010 年冬季云南出现严重干旱灾害的原因, 本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料以及云南省台站降水资料计算得到的云南冬季降水指数, 讨论了在北半球冬季 (12~2 月) 北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, 简称 NAO) 和云南省降水 (旱涝) 之间的联系。分析结果表明, 在 1961/1962~2009/2010 年间的 49 个冬季, 冬季平均的云南降水指数和 NAO 指数的相关系数为 0.373 (超过 95% 信度), 表明 NAO 和云南省冬季降水之间存在着一定的联系。云南省冬季降水指数和北半球 300 hPa 位势高度异常场之间的回归结果表明, 和云南冬季降水联系紧密的环流系统可分为南北两个主要部分: 南支槽波列和贝加尔湖高压脊系统。研究表明, NAO 可以通过在亚-非副热带急流中传播的准定常波列以及波的反射分别影响这两个系统。因此, NAO 和云南冬季降水之间存在一定的联系。同时, 我们的结果还表明 NAO 和云南冬季降水之间的关系还受 ENSO 事件的调制。在 ENSO 为暖位相的冬季, NAO 和云南降水关系更为紧密, 而在 ENSO 为冷位相的冬季, NAO 和云南冬季降水的联系则不太显著。

**关键词** 云南 冬季干旱 北大西洋涛动 南支槽波列 贝加尔湖高压脊

**文章编号** 1006-9895 (2011) 06-1009-11

**中图分类号** P426

**文献标识码** A

## A Further Study of Causes of the Severe Drought in Yunnan Province during the 2009/2010 Winter

SONG Jie<sup>1</sup>, YANG Hui<sup>1</sup>, and LI Chongyin<sup>1,2</sup>

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

2 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

**Abstract** To understand the mechanisms responsible for the severe drought in Yunnan Province during the boreal winter (DJF) of 2009/2010, by using NCEP/NCAR reanalysis data and winter precipitation index in Yunnan Province which is calculated from station precipitation data in Yunnan Province, this study investigates the relationship between the North Atlantic Oscillation (NAO) and the precipitation in Yunnan Province during boreal winters. In the 49 winters of 1961/1961 - 2009/2010 period, the correlation coefficient between the time series of winter mean precipitation indices in Yunnan Province and the NAO indices is 0.373 (exceeds the 95% confidence level), which indicates that the winter precipitation in Yunnan Province is linked to the variability of the NAO. Regression results

**收稿日期** 2010-11-17, 2011-04-26 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 U0833602, 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950401, 国家科技支撑计划 2009BAC51B02, 国家自然科学基金资助项目 40805023, LASG 自由探索项目

**作者简介** 宋洁, 男, 1979 年出生, 博士, 主要从事气候动力学方面的研究。E-mail: song\_jie@mail.iap.ac.cn

between the winter precipitation indices in Yunnan Province and the northern hemispheric anomalous geopotential height at 300 hPa show that the circulation systems associated with the winter precipitation in Yunnan Province have a south and a north major components: the southern branch trough and the ridge of Lake Baikal. And the results show that the NAO can impact these two components through the quasi-stationary waves propagating along the Asia - Africa subtropical jet and the wave reflections, respectively. Therefore, the variations of the NAO and the winter precipitation in Yunnan Province are linked. The results also show that the linkage between the NAO and the winter precipitation in Yunnan Province is modulated by ENSO phenomenon. The relationship between the NAO and the winter precipitation in Yunnan Province is much close in the warm ENSO winters, while, they are barely linked in the cold ENSO winters.

**Key words** Yunnan Province, drought in winter, North Atlantic Oscillation (NAO), the southern branch trough, the ridge of Lake Baikal

## 1 引言

在 2009/2010 年的北半球冬季 (12~2 月), 我国的西南地区尤其是云南省, 出现了由于降水异常偏少而造成的严重旱情。在关于此次严重干旱发生原因的另一个研究中 (杨辉等, 2011), 我们已从与干旱发生联系紧密的大气环流组合性异常的角度, 以及海温 (特别是太平洋海温) 异常的角度进行了分析研究。我们发现此次云南的严重干旱与北半球大气环流的异常有一定的关系, 而该冬季的海温 (特别是太平洋海温) 异常却很难解释此次严重干旱的发生。为了弄清并理解 2009/2010 年冬季云南严重干旱发生的物理机制, 在已有大气环流异常形势分析的基础上, 我们需要对环流异常的根源做进一步的分析研究。

事实上, 在 2009/2010 年冬季, 北半球大气环流最引人注目的异常是北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, 简称 NAO) (Hurrell et al., 2003) 处于自 1950 年以来历史罕见的极端负位相 (L'Heureux et al., 2010)。该年冬季的 NAO 指数为 1950/1951~2009/2010 年 60 个冬季以来的最低值<sup>①</sup> (NOAA Attribution Team, 2010)。在 2009/2010 年冬季平均的北半球 300 hPa 位势高度异常形势场上 (图略), 可以看到在北大西洋的中高纬地区, 存在一个明显的北正南负的偶极型位势高度异常分布, 代表了典型的 NAO 负位相。

NAO 作为在北半球大西洋地区冬季大气环流的主导变化模态, 其对北美、欧洲乃至亚洲地区都存在显著的影响。在 NAO 的正 (负) 位相时, 加

拿大北极地区以及格陵兰岛比正常年份偏冷 (暖), 而北美及欧亚大陆高纬度地区则较之正常年份偏暖 (冷) (Hurrell, 1995, 1996)。同时有研究表明, 由 NAO 环流异常所激发的准定常 Rossby 波通过亚—非副热带急流的波导效应 (Hoskins and Ambrizzi, 1993) 可以一直传播到东亚/太平洋地区, 因此 NAO 的异常和东亚地区的气候变率也存在一定的联系 (Branstator, 2002; Watanabe, 2004)。我国的一些研究表明, 在北半球冬季, NAO 对我国的天气、气候也存在一定的影响。武炳义和黄荣辉 (1999) 研究了冬季 NAO 和东亚冬季风之间的联系, 其结果表明, 当冬季 NAO 指数偏高 (低) 时, 亚洲大陆中部气压显著偏低 (高), 使得西伯利亚高压和东亚冬季风减弱 (增强)。李崇银和李桂龙 (1999) 的研究还表明 NAO 的演变与 20 世纪 60 年代中国的气候突变存在明显的关系。王永波和施能 (2001) 研究了冬季 NAO 异常和我国气候的关系, 结果表明, 在 NAO 指数偏高的冬季, 我国东北东部、华北北部、西北地区偏暖, 而我国 40°N 以南地区则大范围降水偏多。2008 年 1 月, 我国南方地区出现大范围严重低温雨雪天气, 谭桂容等 (2010) 的研究表明, 这一大范围的低温灾害与 NAO 的异常也存在密切的关系。

人们很早就注意到我国南方冬季的天气受到南支槽 (又称印缅槽或南支波动) 的影响 (陶诗言, 1953)。如 2008 年 1 月我国南方出现雨雪低温天气, 有研究指出南支槽在我国南方的形成和加深在那次过程中起到非常重要的作用 (李崇银等, 2008; 布和朝鲁等, 2008)。具体针对云南省, 一些

① 2009/2010 年北半球冬季的 NAO 指数为 -2.52 个标准差。

研究(秦剑等, 1991; 郭荣芬等, 2010)也表明, 南支槽和冷空气是影响云南省冬季天气气候的两个重要因素。位于我国上游的 NAO 异常事件是否对我国西南尤其是云南省的冬季旱涝也存在一定的影响, 这是一个有意义的问题。针对 2009/2010 年冬季的云南干旱, 我们已就大气环流异常和海温异常的影响问题进行了分析研究。这里我们将进一步讨论 NAO 异常通过遥相关波列影响冬季云南降水(干旱)的问题, 更主要是讨论并揭示 NAO 影响云南冬季旱涝的机制。

尽管 NAO 被认为是位于北大西洋地区的一个局地现象, 但其引起的在地中海地区的辐合辐散而造成的涡度异常作为 Rossby 波波源可以激发出沿着亚—非副热带急流波导向下传播的准定常 Rossby 波(Watanabe, 2004)。索渺清等(2008)的研究认为在北半球冬半年, 在南支槽上游的亚—非副热带西风急流中的 Rossby 波的传播是南支槽加强的一个主要机制。因此, 和 NAO 相联系的沿亚—非副热带急流波导传播的准定常 Rossby 波在一定程度上对南支槽存在影响。同时, NAO 对东亚冬季风的影响(武炳义和黄荣辉, 1999)也可能对入侵我国的冷空气存在一定的影响。因此, NAO 通过对南支槽以及冷空气的影响进而可以影响到云南省冬季的降水, 这是我们研究 NAO 对云南省冬季降水可能存在影响的物理基础。

## 2 资料和方法

本文所采用的资料为 NCEP/NCAR 逐日和逐月再分析资料(Kalnay et al., 1996), 资料的水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ; 垂直方向从 1000~10 hPa 分为 17 层; 时间跨度为 1948 年 1 月至 2010 年 2 月。本文还使用了国家气候中心整理的 1951~2009 年全国 160 个站点月平均降水资料。本文所使用的逐月 NAO 指数定义为对北半球冬季(12~2 月)逐月的北大西洋地区( $20^\circ\text{N} \sim 85^\circ\text{N}$ ,  $90^\circ\text{W} \sim 50^\circ\text{E}$ )的海平面气压(SLP)异常场进行 EOF 分解得到的经过标准化处理的第一主成分的时间序列。在进行 EOF 分解之前, SLP 异常场利用纬度余弦的平方根进行了适当的面积权重处理。在本文中每个资料格点的异常定义为每月(每日)该格点上的原始资料减去该格点该月(该日)多年平均值后的剩余部分。本文还使用了云南省全省逐月降水指数, 定义

为云南省 122 个台站月降水资料的平均。降水指数的时间序列所包含的时间段为 1961/1962~2009/2010 年冬季(12~2 月, 共 49 个冬季的 147 个月), 并经过标准化处理。受云南省降水资料的时段所限, 因此本研究在涉及云南省降水指数时所使用的资料时段为 1961/1962~2009/2010 年 49 个北半球冬季的 12~2 月。但在不涉及云南省降水指数时, 为了尽可能的利用到所有资料, 使用的资料时段为 1948/1949~2009/2010 年 62 个北半球冬季的 12~2 月(共 186 个月)。在使用全国 160 个站月平均降水资料时, 所使用的资料时段为 1951/1952~2008/2009 年 58 个冬季的 12~2 月(共 174 个月)。

## 3 云南省冬季降水和 NAO 的关系

为了揭示云南冬季旱涝和 NAO 的关系, 我们首先进行了云南省冬季降水和 NAO 关系的资料统计分析, 图 1 给出的是 1961/1962~2009/2010 年的 49 个冬季, 冬季平均的云南省降水指数和 NAO 指数的时间序列。由图 1 不难发现两时间序列随时间的变化具有一定的一致性, 两者相关系数为 0.373, 超过 95% 的信度检验。这一结果表明, 位于我国上游的 NAO 事件和云南省的冬季降水存在着具有统计意义的联系; 即当 NAO 为正(负)位相时, 云南省冬季降水将偏多(少)。由于在 2009/2010 年的冬季 NAO 异常的信号极为明显, 因此, 我们可以认为 2009/2010 年冬季极强的负 NAO 事件可能是造成该年冬季云南省出现严重干旱的原因之一。同时, 从图 1 中我们还注意到 NAO 指数和云南省冬季降水指数之间的关系在 1985/1986 年前后存在一定的变化。以 1985/1986 年为界, 我们计算了 1961/1962~1985/1986 以及 1987/1988~2009/2010 年这两个时段冬季 NAO 指数和云南省冬季降水指数之间的相关。两者的相关系数分别为 0.319 (1961/1962~1985/1986) 和 0.491 (1987/1988~2009/2010)。这表明, 冬季 NAO 和云南省冬季降水两者之间的关系自 1980 年代以来变得更为紧密。

我们还计算了 1951/1952~2008/2009 年 12~2 月逐月的 NAO 指数和我国同期的 160 个站点月平均降水的相关分布(图略), 结果表明, 北半球冬季 NAO 指数和我国大部分地区的降水都呈正相关, 其中高相关区位于我国河套以西地区(内蒙

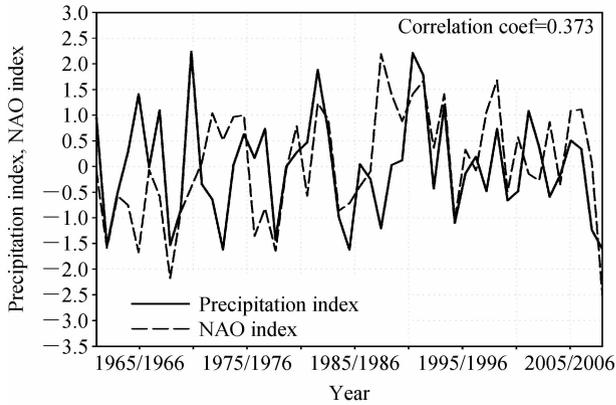


图1 1961/1962~2009/2010年冬季(12~2月)平均的云南省降水指数和NAO指数的时间序列(两者的相关系数为0.373,超过95%的信度检验)

Fig. 1 The time series of winter (DJF) mean precipitation index in Yunnan Province and the NAO index from 1961/1962 to 2009/2010. The correlation coefficient between these two time series is 0.373 (over the 95% confidence level)

古、宁夏、陕西、青海)以及我国的中南部(湖南、湖北、重庆、贵州)。这与王永波和施能(2001)的结果相一致。与图1结果吻合的是,NAO指数和我国西南地区的降水也呈现较为显著的正相关。

## 4 NAO影响的机理分析

### 4.1 云南省冬季旱涝环流型

上面简单资料分析的结果表明,在北半球冬季,NAO和云南省的降水存在一定的联系。为了分析和了解冬季NAO和云南省降水之间存在联系的机制和途径,首要明确的是影响云南省冬季降水的大气环流型。为此,我们利用1961/1962~2009/2010年12~2月逐月的云南省降水指数和同期的北半球300 hPa位势高度异常场进行了逐点相关计算,相关系数分布如图2(见文后彩图)所示。尽管这一方法较为简单,但其结果明确揭示出和云南省冬季旱涝联系密切的环流形式,且物理意义明确,便于我们理解。由图2可见,和云南省冬季降水密切相关的环流型在欧亚大陆以 $40^{\circ}\text{N}$ 为界大致可分为南、北两个部分。南面部分为起源于欧洲地中海地区并沿着亚-非副热带急流(图2中红线为300 hPa气候态的纬向风 $20\text{ m/s}$ 等风速线,表示急流的大致分布)向下游传播的波列系统,我们称之为南支槽波列系统。北面部分为从欧洲北部到东亚北部的一个略成西北-东南向的偶极型系统,由于

其在东亚北部的极值中心大致位于贝加尔湖地区,因此我们称之为贝加尔湖高压脊系统。

为了证明云南省冬季旱涝所对应的环流型可以分为如上所述的南北两个系统,我们分别以格点( $27.5^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\text{E}$ )和格点( $55^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}$ )为基准点利用逐日北半球300 hPa位势高度异常场,计算了相应的一点遥相关形势图(图3)。选择这一南一北两个格点为基准点是因为这两个格点分别对应着云南省冬季旱涝环流型的两个极值中心。由图3a清晰可见有一遥相关波列从中东一直延伸到我国西南部。这反映了亚-非副热带急流的波导效应,即在上游的欧洲/中东地区出现了扰动异常,扰动能量将以准定长波的形式沿副热带急流向下游传播到我国西南地区。而在图3b中,遥相关图展示的是一个略成西北-东南向的偶极型系统,分布于欧洲到东亚北部地区。由于一点遥相关图直观地反映出大气内部的固有模态,且这两个一点遥相关图非常类似于云南省冬季旱涝环流型的南支槽波列系统和贝加尔湖脊系统。因此,我们有理由认为云南省冬季旱涝环流型主要是由南部的南支槽波列系统和北部的贝加尔湖脊系统组合而成的。

根据南支槽波列系统和贝加尔湖脊系统的空间分布特点,我们分别定义了南支槽波列指数(NZC wave train index)和贝加尔湖脊指数(Ridge index),用来表征这两个系统随时间的变化。南支槽波列指数根据它的四个极值点的位势高度异常定义为 $-\frac{1}{4}[H(27.5^{\circ}\text{N}, 92.5^{\circ}\text{E}) - H(17.5^{\circ}\text{N}, 62.5^{\circ}\text{E}) + H(27.5^{\circ}\text{N}, 27.5^{\circ}\text{E}) - H(42.5^{\circ}\text{N}, 2.5^{\circ}\text{E})]$ ;其中, $H$ 为300 hPa位势高度异常。贝加尔湖脊指数定义为( $45^{\circ}\text{N} \sim 65^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$ )这一矩形区域300 hPa位势高度的平均值。同时,我们也计算了冬季逐月的南支槽波列指数(贝加尔湖脊指数)和云南省冬季逐月降水指数的相关系数为0.386(0.178)。这表明,云南省冬季旱涝环流型的南北两部分对云南省冬季降水的影响主要以南部的南支槽波列系统为主,贝加尔湖脊系统的影响则较不显著。

事实上,我们认为云南省冬季旱涝环流型的南北两部分分别表示了影响云南省冬季降水的两个重要因素:其一是活动于青藏高原西侧和南侧的副热带西风带的波动——南支槽。已有研究表明,当南支槽发展加深,槽底向南伸到孟加拉湾海面,同时南海的副热带高压西伸到中南半岛,则可将孟加拉

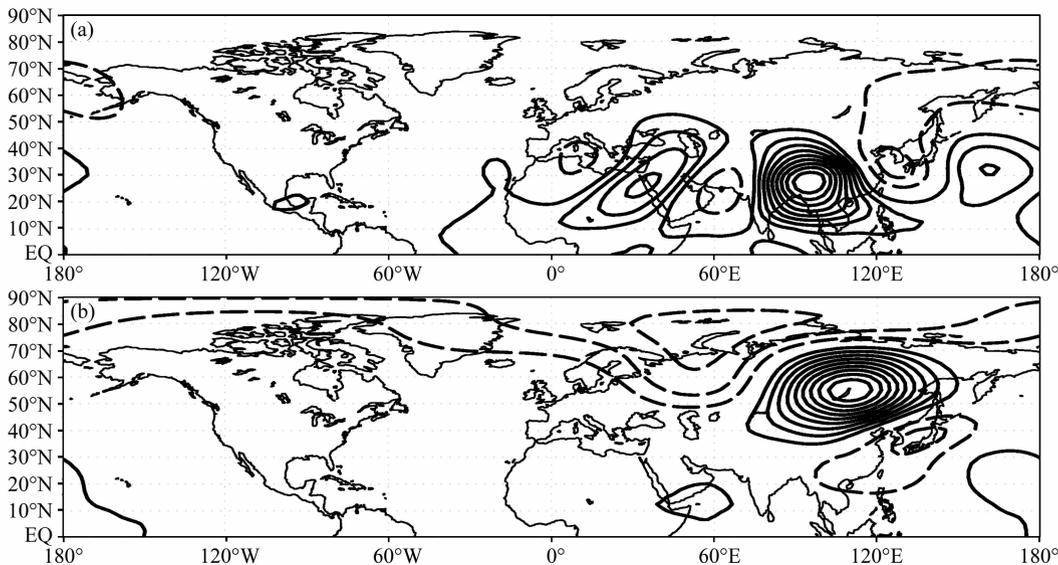


图 3 北半球冬季 (12~2 月) 逐日 300 hPa 位势高度异常场的一点遥相关图: (a) 基准点 (27.5°N, 95°E); (b) 基准点 (55°N, 110°E)。等值线间隔为 0.1, 虚线表示负值, 零线已省略

Fig. 3 One point correlation maps of the daily anomalous geopotential height field at 300 hPa during the boreal winters (DJF). The base points are (a) (27.5°N, 95°E) and (b) (55°N, 110°E), respectively. The contour interval is 0.1, zero lines are omitted, and dashed lines are negative values

湾的西南暖湿气流向低纬高原的云南地区输送, 这时如果有冷空气配合, 则会造成云南冬春季节的主要降水过程 (秦剑等, 1997)。而若当南支槽系统减弱甚至变为高压脊系统, 则我国的西南地区正位于高压脊的脊前, 受干燥的西北气流影响, 很难产生降水。其二是影响云南的冷空气。在冬季, 影响云南的冷空气路径较为复杂, 除了受到由高纬南下的冷空气的影响外, 在很大程度上, 云南省还受到入侵我国东部强冷空气的自东向西回流部分的影响。因此, 当入侵我国的冷空气路径偏东或偏西时, 均可以影响到云南。但值得注意的是, 云南受到回流冷空气影响的一个重要条件是入侵我国东部的冷空气要南压到足够低的纬度 (大约为 25°N) (段旭等, 2010), 而当入侵我国的冷空气路径偏东且南压纬度较高时, 很难对云南造成影响。如 2009/2010 年冬季入侵我国的冷空气路径就比较偏东且南压纬度较高, 不利于在云南等我国西南地区形成降水。

我们可以很直观地从图 2 中看出南支槽波列系统反映了南支槽对云南省冬季降水的影响, 但对于理解贝加尔湖脊系统和影响云南的冷空气之间存在联系还需要给出进一步的说明。我们利用标准化逐

月的贝加尔湖脊指数合成了高指数 (脊强) 和低指数 (脊弱) 时所对应的 850 hPa 风场以及两者之间的差异<sup>①</sup> (图 4)。由图 4 可以看到, 当贝加尔湖脊偏强 (弱) 时, 入侵我国的冷空气的路径空气偏西 (东), 且可以南压到较低 (高) 的纬度。一个简单的解释是: 在冷空气南侵的过程中, 由于行星涡度减小, 根据绝对涡度守恒原理, 其相对涡度逐渐增加, 冷空气路径将逐渐转向偏东; 当贝加尔湖脊偏强时, 脊前入侵我国的西北冷空气的相对负涡度较强, 根据绝对涡度守恒的原理, 拥有较强相对负涡度的冷空气由北向南入侵我国时, 将在更低的纬度上转向, 因此冷空气可以入侵到更低的纬度, 其路径也明显偏西。一个显而易见的推论是, 当贝加尔湖脊系统减弱时, 入侵我国的冷空气将在较高纬度转向, 其路径偏东。同时, 在贝加尔湖脊强和弱合成结果的差异场上 (图 4c), 我们注意到当贝加尔湖脊偏强时, 在 850 hPa 风场上有更为明显的由我国东部自东向西的回流风场。因此, 当贝加尔湖脊偏强 (弱) 时, 入侵我国的冷空气容易 (不易) 影响到云南。

#### 4.2 NAO 影响途径

我们认为 NAO 和云南省冬季降水之间存在联

① 合成标准为贝加尔湖脊指数的一个标准差。

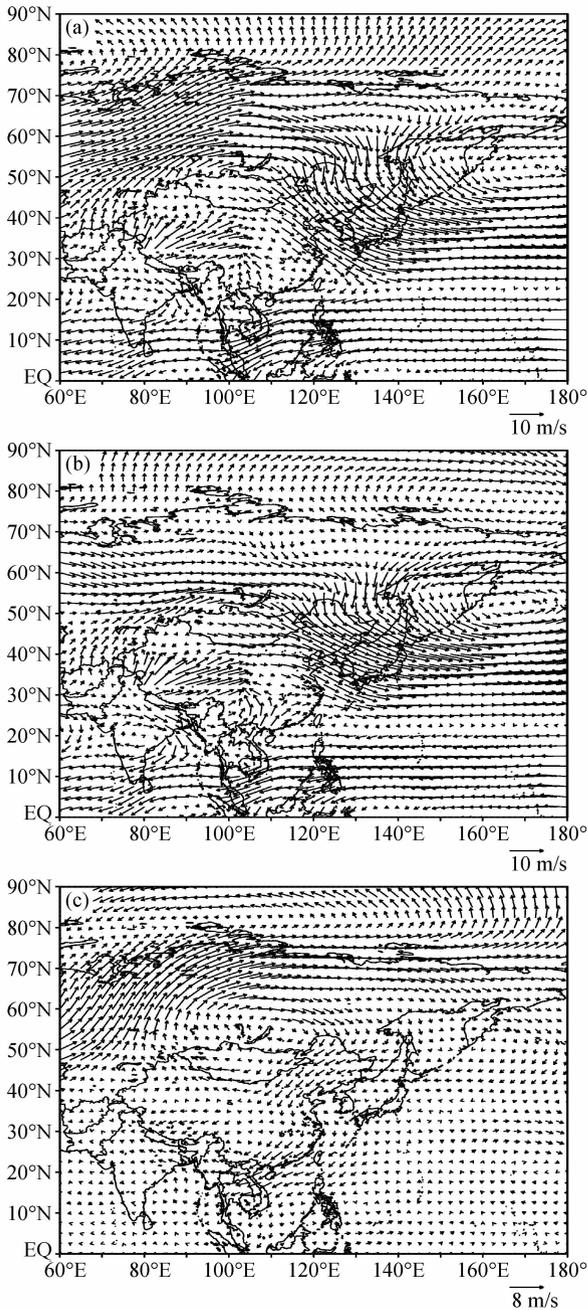


图4 利用冬季逐月的贝加尔湖脊指数合成的850 hPa风场：  
(a) 高指数合成；(b) 低指数合成；(c) 两者之间的差异（高指数合成减低指数合成）

Fig. 4 Composites of 850-hPa wind fields based on the ridge index of Lake Baikal; (a) High index composite; (b) low index composite; (c) the differences (high index composite minus low index composite)

系是因为云南省冬季旱涝环流型的南北两部分均受到NAO的影响。图5是贝加尔湖脊指数和南支槽波列指数和北半球每个格点的300 hPa位势高度异常计算相关而得的相关系数分布图。由图5清楚可

见，无论是贝加尔湖脊系统还是南支槽波列系统，都与大西洋地区的环流异常存在一定的联系。1961/1962~2009/2010年北半球冬季（12~2月）逐月的贝加尔湖脊指数和NAO指数的相关为0.351，而南支槽波列指数和NAO指数的相关为0.458，它们均通过95%信度检验。这一结果表明NAO与贝加尔湖脊和南支槽波列系统之间确实存在一定的联系。如何理解NAO与贝加尔湖脊和南支槽波列系统之间联系的物理机制，是我们下面讨论的重点。

#### 4.2.1 南支槽波列系统

Watanabe (2004) 的研究已经表明，由于亚—非副热带急流的波导作用，NAO在地中海地区造成的异常辐合辐散，可引起视为Rossby波波源的涡度异常，以准定常波的形式通过副热带急流传播到东亚地区。简单的正压涡度方程模型的模拟结果证明，当地中海地区为涡度正异常（位势高度为负异常）时，我国西南部地区为涡度负异常〔位势高度为正异常，见Watanabe (2004) 的 Fig. 8〕，反之亦然。这正如我们在图5b中南支槽波列指数和北半球300 hPa位势高度异常的相关场所示。因此，NAO和南支槽波列系统之间存在联系的实质是NAO在地中海地区引起的扰动能量沿着亚—非副热带急流向下游传播所致。事实上，地中海地区和中国西南地区位势高度异常的反向变化关系是由沿亚—非副热带急流传播的准定常波的波数决定的。由观测所得（见图5b），沿亚—非副热带急流向我国西南传播的准定常波列的纬向波数大约为5波，即纬向波长约 $70^\circ$ （经度）。而我国西南和地中海地区的距离大致为 $100^\circ$ （经度），约为1.5个波长，因此我国西南地区和地中海地区的位势高度异常恰好为反向关系。而准定常波的波数是由背景场环流和行星涡度梯度决定。理论计算结果表明，在亚—非副热带急流中传播的准定常行星波的理论全波数为7（布和朝鲁等，2008；索渺清等，2008）。若假设其波动的纬向、经向尺度相当，则其纬向波数大约为5波。因此，地中海和中国西南地区位势高度异常之间为反向关系绝非偶然，这是由背景场环流所决定的必然结果。

#### 4.2.2 贝加尔湖脊系统—ENSO对NAO影响的调制

我们认为NAO对贝加尔湖脊系统的影响涉及

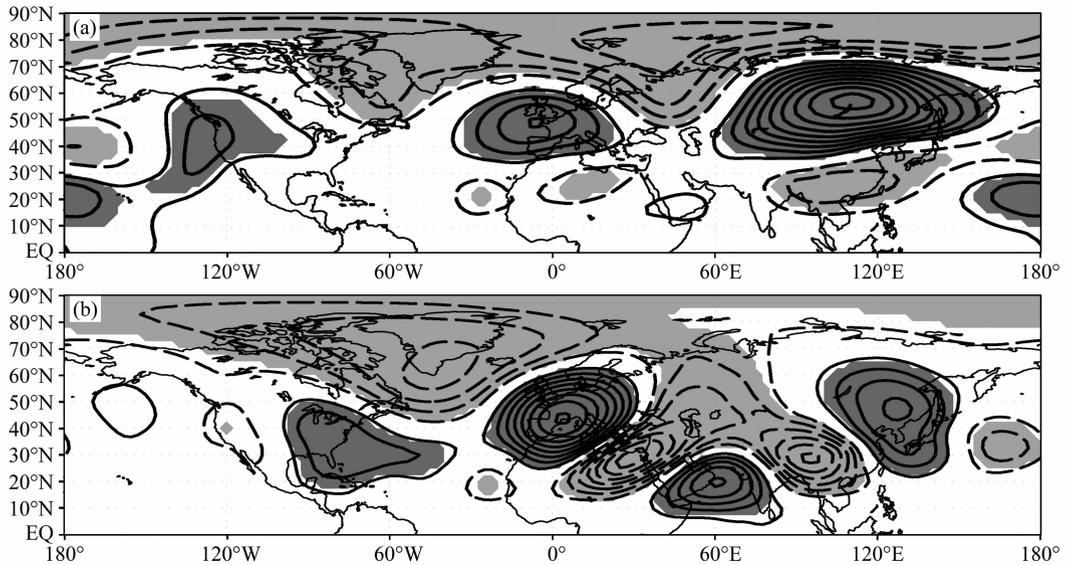


图 5 逐月的北半球冬季 (12~2 月) 贝加尔湖脊指数 (a)、南支槽波列指数 (b) 和北半球 300 hPa 位势高度异常的相关系数分布 (虚线为负值, 等值线间隔为 0.1, 零线已省略)。阴影: 相关通过 95% 信度检验

Fig. 5 The spatial distribution of correlation coefficients between (a) the monthly ridge index of Lake Baikal and (b) the monthly NZC wave train index with the northern hemispheric 300-hPa geopotential height anomalies during the boreal winters (DJF). The contour interval is 0.1, the zero lines are omitted, and dashed lines are negative values; the shading denotes that the correlation coefficients exceeded the 95% confidence level

到 Rossby 波破碎及非线性反射这一概念。当 Rossby 波沿射线路径从中高纬向低纬度传播时, 到达其相应的临界纬度 (即这一纬度上的纬向风的风速等于 Rossby 的相速度) 时 Rossby 波发生破碎, Rossby 波或被吸收或发生反射 (既经向群速度由原先向赤道方向变为向极地方向)。当 Rossby 波发生反射时, 它可以显著地影响到其下游的中高纬度地区。由于 NAO 可以认为是破碎的波 (breaking wave) (Benedict et al., 2004; Franzke et al., 2004), 且由于贝加尔湖脊系统位于其下游的中高纬度地区, 因此我们认为 NAO 对贝加尔湖脊系统的影响是通过波的反射而造成的。

为了证明这一点, 我们给出了在 ENSO 冷、暖位相时的冬季 NAO 指数和北半球 300 hPa 位势高度异常的相关系数分布 [图 6 (见文后彩图)]。由图 6 所示, 在 ENSO 冷暖位相, NAO 和北半球环流的联系在东亚北部 (即贝加尔湖地区) 出现了明显的不同。在 ENSO 暖位相, NAO 和该地区的位势高度异常存在显著的正相关, 然而在 ENSO 冷位相, NAO 和该地区的位势高度异常则几乎没有相关关系。这一结果表明, 在 ENSO 暖 (冷) 位相, NAO 对贝加尔湖脊系统存在显著 (几乎没有) 影

响。在 ENSO 冷暖位相时, 北半球冬季逐月的 NAO 和贝加尔湖脊指数之间的相关系数也证明了这点。在 ENSO 暖位相, 两者相关系数为 0.639, 在 ENSO 冷位相, 两者相关系数为 0.178。

在 ENSO 冷暖位相, NAO 对贝加尔湖脊系统影响的巨大区别揭示了 NAO 对贝加尔湖脊系统影响的物理机制。我们计算了在 ENSO 冷暖位相时北半球冬季逐月 NAO 指数和 300 hPa 经向风异常的回归结果 (图 7)。这一回归结果揭示了和 NAO 相联系的纬向非对称的定常波列, 其中图 7 中的矢量是相应的 Plumb 定常波波作用量矢量 (Plumb, 1985), 其与定常波的群速度方向平行。由图 7 我们清楚可见, 在 ENSO 冷位相, 和 NAO 相联系的定常波的传播方向是沿着西北—东南方向由中高纬向低纬度传播, 这与经典的 Rossby 波在球面上传播的射线路径理论相一致。当定常波传播到副热带纬度时 (20°N 附近), 可以看到定常波有沿着副热带急流向下游传播的特征。而在 ENSO 暖位相, 和 NAO 相联系的定常波沿西北—东南方向, 向低纬传播, 但在 30°N~40°N 附近, 定常波的经向传播方向突然转向, 由较低纬度“反射”到较高纬度并向其下游传播。显然和 NAO 相联系的定常波在

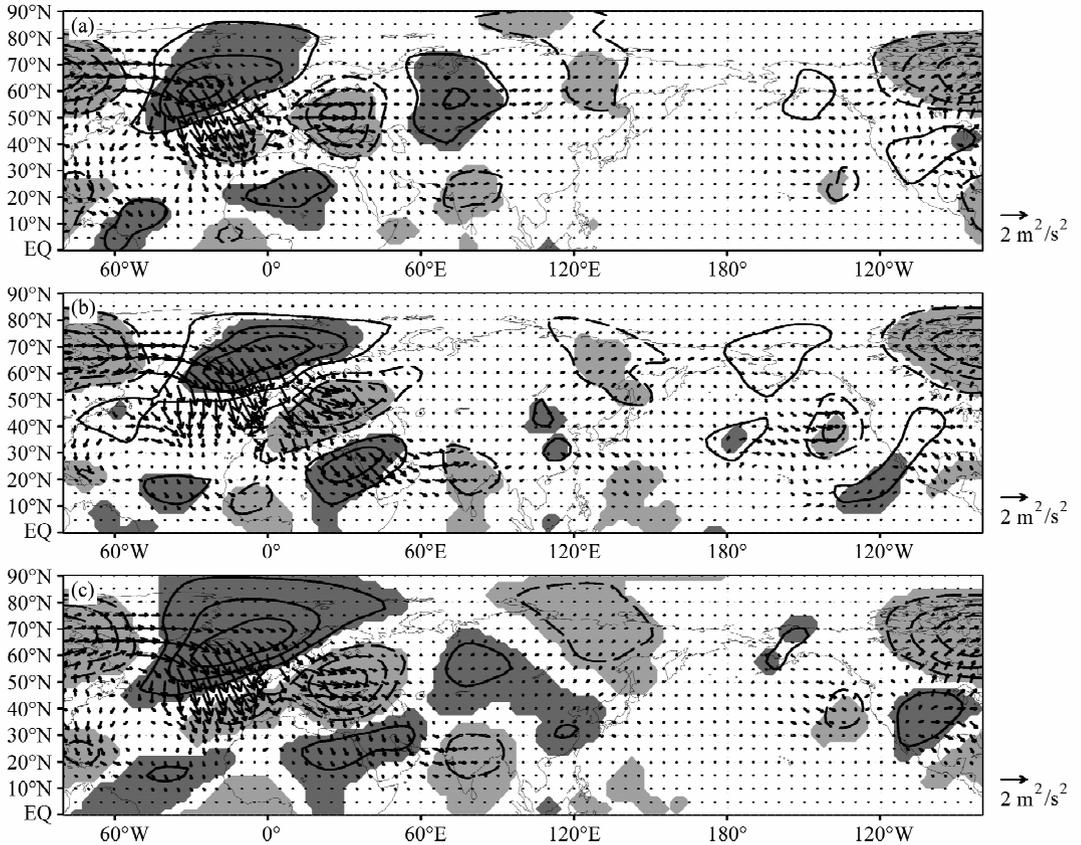


图7 1948/1949~2009/2010年北半球冬季(12~2月)逐月NAO指数和北半球300 hPa经向风异常的回归结果(等值线, 间隔: 1 m/s, 虚线为负值, 零线已省略): (a) ENSO暖位相冬季; (b) ENSO冷位相冬季; (c) 所有冬季。阴影: 回归通过95%信度检验; 矢量: 定常波波作用量矢量(单位:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

Fig. 7 The 300-hPa meridional wind anomalies regressed on the monthly normalized NAO indices (contours with interval 1 m/s, dashed lines are negative values, and the zero lines are omitted) during (a) warm ENSO winters, (b) cold ENSO winters, and (c) all winters from 1948/1949 to 2009/2010. The shading denotes the regressive results exceed the 95% confidence level; the vectors denote the corresponding Plumb's stationary wave activity fluxes

ENSO冷暖位相截然不同的传播方向, 造成了NAO在ENSO冷暖位相相对贝加尔湖脊系统显著的不同影响。在ENSO暖位相, 定常波反射传播到其下游的中高纬地区, 因此NAO对贝加尔湖脊系统有着明显的影响; 而在ENSO冷位相, 定常波则传播到副热带地区, 无法影响贝加尔湖脊系统。因此, 我们可以认为NAO对贝加尔湖脊系统的影响是通过波的反射达成的。并须注意到, 在正常的情况下, 和NAO相联系的定常波是介于反射和非反射之间(见图7c), ENSO的冷暖位相分别是和NAO相联系的定常波不发生反射和发生反射两个比较极端的例子。其物理机制是由于ENSO通过

东西向的Walker环流改变了大西洋地区Hadley环流的强度(Wang 2005), 从而影响定常波的反射或非反射(强Hadley环流抑制波的反射)(Magnusdottir and Walker, 2000; Esler et al., 2000; Walker and Magnusdottir, 2002)。由于这一部分我们已在另一文(Song and Li, 2011)<sup>①</sup>中有详细讨论, 且不是本文的重点, 因此就不在本文中展开论述。

同时, 在图6中另一个引起我们注意的是, 在ENSO暖位相, 在欧亚大陆区域和NAO变化联系紧密的环流异常的空间分布和云南省冬季旱涝环流型的空间分布非常类似; 而在ENSO冷位相, 两者

① Song Jie, Li Chongyin. 2011. Reflective and nonreflective North Atlantic oscillation [J]. Submitted to J. Climate.

的相似性则较不明显。这一结果表明, NAO 和云南省冬季降水的关系也受到 ENSO 事件的调制, 在 ENSO 暖位相, 两者之间的关系更好, 而在 ENSO 冷位相, 两者之间的联系则较差。冬季逐月的 NAO 指数和云南省冬季降水指数在 ENSO 冷暖位相的相关系数也证明了这一点。在 ENSO 暖位相, 两者相关为 0.436, 而在 ENSO 冷位相, 两者的相关则降为 0.075。

## 5 结论

在 2009/2010 的冬季, 我国西南地区尤其是云南省经历了严重的干旱灾害。为了进一步揭示云南省这次干旱灾害的原因, 本文分析了北大西洋涛动 (NAO) 和云南省冬季降水之间的联系。其主要结论可归纳如下:

(1) 资料分析的结果表明, NAO 和云南省冬季降水之间存在一定的联系, 当 NAO 为正 (负) 位相时, 云南省冬季降水将偏多 (少)。

(2) 与云南省冬季降水联系紧密的环流形式由南部的南支槽波列系统和北部的贝加尔湖高压脊系统组成, 它们分别表示了影响云南省冬季降水的南支槽以及冷空气活动。

(3) NAO 通过影响南支槽波列和贝加尔湖高压脊系统, 从而进一步影响云南省的冬季降水。

(4) NAO 和云南省冬季降水之间的联系还受到 ENSO 事件的调制, 在 ENSO 暖位相时, 两者关系更为紧密, 而在 ENSO 冷位相时, 两者之间的联系则不显著。

尽管本文所关注的是 NAO 对冬季云南省降水的影响, 但值得指出的是 NAO 对我国冬季气候的影响绝不局限于云南省或是我国西南地区。正如王永波和施能 (2001) 所指出的, 在冬季, NAO 对我国大部分地区的气候都存在一定的影响。同时, 我们发现在 ENSO 的暖位相时期, NAO 和我国乃至东亚地区的气候变化的联系会更为紧密。例如, 在 ENSO 的暖位相, NAO 和东亚冬季风的北方温度模 (Wang et al., 2010) 具有非常好的关系, 两者指数之间的相关达 0.660 (Song and Li, 2011)。这表明在 ENSO 暖位相, NAO 对我国及东亚地区的气候变化的影响已经具有了相当的预报意义。因此, 尽管 NAO 被认为是局限于大西洋地区的一个大气内部变化模态, 其影响主要分布在北美/欧洲区域,

但其对我国及东亚地区也具有不可忽视的影响, 因此, 我们 also 需提高对 NAO 研究的重视程度。

## 参考文献 (References)

- Benedict J J, Lee S, Feldstein S B. 2004. Synoptic view of the North Atlantic oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61: 121-144.
- Branstator G. 2002. Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic oscillation [J]. *J. Climate*, 15: 1893-1910.
- 布和朝鲁, 纪立人, 施宁. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 I: 亚非副热带急流低频波 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 419-433.
- Bueh Cholaw, Ji Liren, Shi Ning. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part I: Low frequency waves embedded in the Asian African subtropical jet [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 419-433.
- 段旭, 段玮, 陶云, 等. 2010. 云南冰冻灾害研究与电线覆冰区划 [M]. 北京: 气象出版社, 96pp.
- Duan xu, Duan wei, Tao Yun, et al. 2010. Frozen Ice Disaster Research and Regional Division of Ice Covering Electric Wires in Yunnan Province [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 96pp.
- Esler J G, Polvani L M, Plumb R A. 2000. The effect of the Hadley circulation on the propagation and reflection of planetary waves in a simple one-layer model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57: 1536-1556.
- Franzke C, Lee S, Feldstein S B. 2004. Is the North Atlantic oscillation a breaking wave? [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61: 145-160.
- 郭荣芬, 高安生, 杨素雨. 2010. 低纬高原两次冬季南支槽强降水的对比分析 [J]. *大气科学学报*, 33 (1): 82-88.
- Guo R F, Gao A S, Yang S Y. 2010. Comparison analysis of two heavy rain processes on the plateau at low latitude caused by the southern branch trough in winter [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 33 (1): 82-88.
- Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50: 1661-1671.
- Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 269: 676-679.
- Hurrell J W. 1996. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23: 665-668.
- Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. 2003. An overview of the North Atlantic Oscillation [M]// *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. Geophysical Monograph Series, 279pp.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-470.

- L'Heureux M, Butler A, Jha B, et al. 2010. Unusual extremes in the negative phase of the Arctic Oscillation during 2009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37; doi: 10.1029/2010GL043338.
- 李崇银, 李桂龙. 1999. 北大西洋涛动和北太平洋涛动的演变与 20 世纪 60 年代的气候突变 [J]. *科学通报*, 44 (16): 1765 - 1769.
- Li Chongyin, Li Guilong. 1999. Variation of the NAO and NPO associated with climate jump in the 1960s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44 (21): 1983 - 1987.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 113 - 122.
- Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 113 - 122.
- Magnusdottir G, Walker C C. 2000. On the effects of the Hadley circulation and westerly equatorial flow on planetary-wave reflection [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126: 2725 - 2745.
- NOAA Attribution Team. 2010. Understanding themid-Atlantic snowstorms during the winter of 2009 - 2010[R/OL]. [http://www.esrl.noaa.gov/psd/csi/images/NOAA\\_AttributionTeam\\_SnowstormReport.pdf](http://www.esrl.noaa.gov/psd/csi/images/NOAA_AttributionTeam_SnowstormReport.pdf). [2010 - 11 - 17]
- Plumb R A. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42: 217 - 229.
- 秦剑, 潘丽娜, 石鲁平. 1991. 南支槽与强冷空气的结合对云南省冬季天气的影响 [J]. *气象*, 17 (3): 39 - 43.
- Qin Jian, Pan Lina, Shi Luping. 1991. Influences of the combination between the southern branch trough and strong cold air on winter weather in Yunnan Province [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 17 (3): 39 - 43.
- 秦剑, 据建华, 谢明恩, 等. 1997. 低纬高原天气气候 [M]. 北京: 气象出版社, 210pp.
- Qin Jian, Ju Jianhua, Xie Ming'en, et al. 1997. *Weather and Climate in Low Latitudes Plateau [M]*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 210pp.
- 索渺清, 丁一汇, 王遵娅. 2008. 冬半年南支西风 Rossby 波传播及其与南支槽形成的关系 [J]. *应用气象学报*, 19 (6): 731 - 740.
- Sou Miaoqing, Ding Yihui, Wang Zunya. 2008. Relationship between Rossby wave propagation in southern branch of westerlies and the formation of the southern branch trough in winter [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 19 (6): 731 - 740.
- 谭桂容, 陈海山, 孙照渤, 等. 2010. 2008 年 1 月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系 [J]. *大气科学*, 34 (1): 175 - 183.
- Tan Guirong, Chen Haishan, Sun Zhaobo, et al. 2010. Linkage of the cold event in January 2008 over China to the North Atlantic oscillation and stratospheric circulation anomalies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 175 - 183.
- 陶诗言. 1953. 冬季由印缅来的低槽对于华南天气的影响 [J]. *气象学报*, (1): 172 - 192.
- Dao Shih-yen. 1953. The influence of the trough from Indo-Burma on the weather of southern China in winter [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, (1): 172 - 192.
- Walker C C, Magnusdottir G. 2002. Effect of the Hadley circulation on the reflection of planetary waves in three-dimensional tropospheric flows [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59: 2846 - 2859.
- Wang B, Wu Zhiwei, Chang Chih-Pei, et al. 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes [J]. *J. Climate*, 23: 1495 - 1512.
- Wang C. 2005. ENSO, Atlantic climate variability, and the Walker and Hadley circulations [M]// *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*. Kluwer Academic Publishers, 173 - 202.
- 王永波, 施能. 2001. 近 45a 冬季北大西洋涛动异常与我国气候的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 24 (3): 315 - 322.
- Wang Yongbo, Shi Neng. 2001. Relation of North Atlantic Oscillation anomaly to China climate during 1951 - 1995 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 24 (3): 315 - 322.
- Watanabe M. 2004. Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Climate*, 17: 4674 - 4691.
- 武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风 [J]. *大气科学*, 22 (6): 641 - 651.
- Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effect of the extremes in the North Atlantic oscillation on East Asia winter monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22 (6): 641 - 651.
- 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2011. 2009/10 年冬季云南严重干旱的原因分析 [J]. *气候与环境研究*, 待发表.
- Yang Hui, Song Jie, Yan Hong-Ming and Li Chong-Yin. 2011. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, In Press.

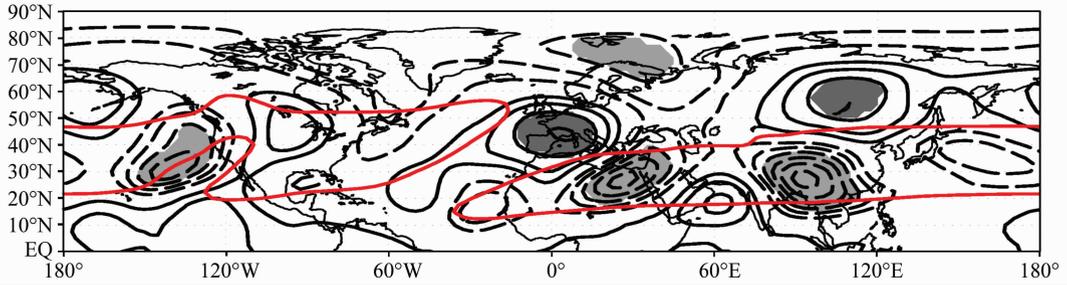


图 2 1961/1962~2009/2010 年冬季 (12~2 月) 逐月的标准化的云南省降水指数和北半球 300 hPa 位势高度异常之间的相关系数分布 (虚线为负值, 等值线间隔为 0.05, 零线已省略)。阴影: 相关系数通过 95% 信度检验; 红线: 300 hPa 气候态的纬向风 20 m/s 等风速线 (西风急流的大致位置)

Fig. 2 The spatial distribution of correlation coefficients between the monthly precipitation index in Yunnan Province and the monthly northern hemispheric 300-hPa anomalous geopotential height during the boreal winters (DJF) of 1961/1962 - 2009/2010 (dashed lines are negative values, contour interval is 0.05, zero lines are omitted). The shading denotes the correlation over the 95% confidence level; red lines are zonal wind speed 20m/s contours at 300 hPa, which roughly indicate the positions of jets

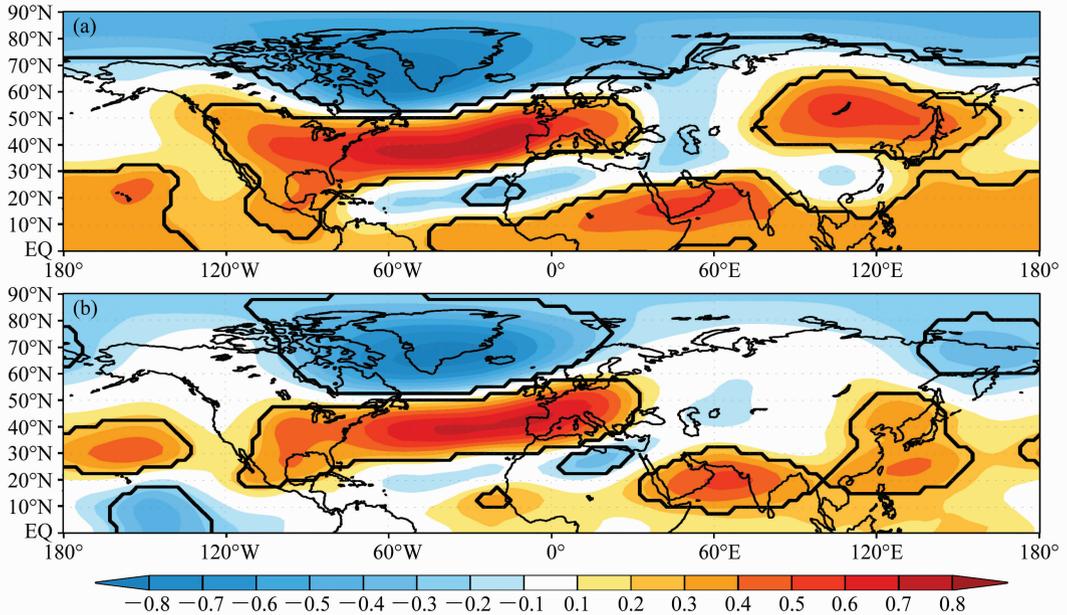


图 6 北半球冬季 (12~2 月) 逐月 NAO 指数和北半球 300 hPa 位势高度异常的相关系数分布: (a) ENSO 暖位相冬季; (b) ENSO 冷位相冬季。图中被包围的区域表示相关通过 95% 信度检验

Fig. 6 The spatial distributions of the correlation coefficients between the monthly NAO index and the northern hemispheric 300-hPa geopotential height anomalies during (a) the warm ENSO winters (b) the cold ENSO winters. The correlation coefficients in the surrounded areas exceed 95% confidence level