

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.

# 2009 年冬季新疆北部持续性暴雪的环流特征 及其成因分析

张书萍 祝从文

中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘 要** 利用台站观测和 NCEP/NCAR 大气再分析等资料, 通过与历史同期降水事件比较, 分析了 2009 年冬季发生在我国新疆阿勒泰地区持续的水汽和环流异常特征以及北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 和 ENSO 现象对该地区持续性暴雪的影响。结果发现, 位于贝加尔湖以西的对流层持续性异常冷性低槽活动是影响 2009 年冬季新疆北部持续性暴雪的重要环流系统, 该异常低槽导致冷空气南下路径偏西, 并与来自里海的水汽输送在新疆北部地区交汇, 导致了持续性寒潮天气和暴雪的发生。其中, 贝加尔湖地区的异常低槽的维持与 AO 指数异常偏弱密切相关, 当 AO 指数处于负位相时, 贝加尔湖一带位势高度出现负异常, 北半球盛行经向环流异常, 有利于乌拉尔山阻塞高压的维持和冷空气沿贝加尔湖向南侵袭, 导致新疆北部持续性寒潮和大暴雪天气发生。分析冬季 ENSO 事件对新疆北部的影响中发现, El Niño 年冬季, 同期西太平洋副热带高压偏强偏北, 低纬度海洋水汽大多沿着副高边缘向东南输送, 其北上分量无法到达新疆地区, 因此 El Niño 对新疆北部的持续性大暴雪的影响并不明显。

**关键词** 2009 年冬季 新疆暴雪 环流异常 成因分析

**文章编号** 1006-9895 (2011) 05-0833-14

**中图分类号** P426

**文献标识码** A

## Possible Causes of Circulation Anomalies Associated with Subsequent Snowstorms over the North of Xinjiang during Winter 2009

Zhang Shuping and Zhu Congwen

*Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081*

**Abstract** The anomalies of moisture flux and atmospheric circulations linked to the subsequent snowstorms occurring in Altay area of Xinjiang during winter 2009 are discussed on the basis of station-observed and NCAR/NCEP reanalyzed data sets, and the possible causes associated with ENSO and Arctic Oscillation (AO) are addressed in the framework of historical analog analysis. Results suggest the enhanced anomalous cold trough in the west of Lake Baikal is a critical circulation system, and its maintenance resulted in the west cold surge moving southward, meeting the southwest warm and wet air coming from the Caspian Sea in North Xinjiang, and caused the successive snowstorms. Correlation analysis suggests that the enhanced anomalous cold trough over the west of Lake Baikal is

**收稿日期** 2010-09-17, 2011-03-10 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40921003, 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

**作者简介** 张书萍, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 研究方向为全球变化与东亚季风。E-mail: zsp@cams.cma.gov.cn

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

closely related to the weakened AO index. In negative AO index phase, the 500-hPa geopotential height around Lake Baikal decreases, a meridional circulation anomalies pattern prevails in the Northern Hemisphere, which maintained the Ural blocking high and gave rise to the southward moving clod surge along the west of Lake Baikal, and results in the successive cold waves and snowstorms in the north of Xinjiang. Analysis suggests that during the El Niño year, the enhanced western North Pacific subtropical high results in the southeast moisture flux, but the northward component could not arrive in North Xinjiang, therefore the El Niño event possibly has little benefit to the successive snowstorms in this area.

**Key words** winter 2009, snowstorms in Xinjiang, circulation anomalies, causes analysis

## 1 引言

2009年冬季(2009年12月~2010年2月),新疆北部共出现7次持续性降雪天气,其中4次过程中出现大暴雪天气,阿勒泰、塔城北部等地的9个气象观测站出现降雪量超过24.1 mm的大暴雪天气过程。此次持续性大暴雪具有发生频率高,降雪量大,降雪范围广,持续时间长和积雪厚度较深显著特点。据统计北疆地区最大积雪深度普遍在50 cm以上,其中阿勒泰观测站达94 cm,山区积雪在1~2 m之间,突破历史极值。阿勒泰等40个观测站的积雪持续时间长达38天,为历史罕见。持续性大暴雪天气过程导致北疆北部出现历史罕见的雪灾,给当地的牧业、交通和人民生活带来巨大的损失。据民政部统计,新疆地区受灾人口达154余万人,直接经济损失已达6.48亿元。

大气环流的异常直接导致地面出现异常天气气候现象。天气分析表明,冬季高空急流、强锋区、强辐散及有利的水汽条件是导致新疆产生暴风雪的必要环流条件。当极涡在东半球增强南扩,北半球槽脊均偏弱,而副热带高压偏北偏强时,中纬度西风增强,则新疆受到中纬度西风槽的影响导致降水偏多(谭艳梅和王建,2001)。大暴雪发生的天气过程中,低空急流提供西南水汽输送通量,制造上升运动和不稳定能量,高空急流起到抽吸作用,增强上升运动(刘正新等,2007)。同时干冷空气侵入形成干层以积累水汽和不稳定能量对暴雪天气过程提供有利的发生条件(黄海波和徐海荣,2007)。新疆地处欧亚大陆腹地,冬季降水主要受到中高纬度和冬季风环流系统的共同影响。北极涛动(Arctic Oscillation,简称AO)是冬半年北半球中高纬度地区大气环流尺度最大,最重要的模态,对冬季北半球气候有重要的影响。当AO偏强时,西太平洋副高偏弱,东亚高空西风急流偏弱,东亚大槽偏

弱,乌拉尔山阻高不易形成,导致冬季风偏弱,我国东部、新疆、内蒙古等地冬季气温偏高,同时除了内蒙古新疆外大部分地区降水也偏多;当AO偏弱时,环流形势相反,冬季风偏强,我国北方温度偏低,内蒙古、新疆、华南、江南降水偏多(龚道溢和王绍武,2003; 琚建华等,2004; 杨辉和李崇银,2008)。ENSO事件是海洋与大气相互作用中信号最强的现象,对东亚冬季风环流存在影响,研究表明,在El Niño发展年冬季亚洲上空的环流型呈现出东亚冬季风偏弱,不利于寒潮的向南爆发(陶诗言和张庆云,1998; 穆明权,2001; 黄荣辉和陈文,2002; 陈文,2002; 何溪澄等,2008)。

2009年冬季,AO指数出现了历史上罕见的负异常,并伴随赤道东太平洋典型的ENSO暖事件,上述极端异常事件对我国冬季的持续性异常天气和气候事件势必产生影响。此外伴随全球的变暖,研究发现,过去40年新疆北部冬季平均温度和降水表现出增加趋势(崔彩霞等,2005)。其中,冬半年降水总量、日降水强度以及强降水日数都有不同程度的增加趋势(房巧敏等,2007),并发现冬季降水的转折性变化最早发生在1986年(刘波等,2009)。2009年冬季新疆地区持续性暴雪是否是该地区气候变化长期趋势必然结果?导致该年冬季持续性暴雪的环流系统与历史事件有何差异?为回答上述科学问题,本文通过资料分析揭示影响2009年中国新疆持续性大暴雪的环流和水汽输送特征,通过讨论冬季海温和北极涛动与同期中国冬季降水和温度之间的关系,分析导致新疆持续性大暴雪的成因。本文的所用资料主要有:2009年12月~2010年2月日平均美国NCEP/NCAR大气再分析资料,1951~2009年的NCEP/NCAR再分析月平均资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度。国家信息中心提供的722台站观测的2009年12月~2010年2月的逐日降水和温度资料,以及1951年~

2007 年月平均降水资料。

## 2 2009 年冬季中国气候和环流异常特征

### 2.1 温度和降水

图 1 为我国 2009 年冬季 (2009 年 12 月~2010 年 2 月) 平均温度和降水及其距平分布, 如图所示, 除青藏高原地区, 2009 年我国冬季温度场呈南高北低的纬向分布特征, 其中平均  $0^{\circ}\text{C}$  等温线在  $35^{\circ}\text{N}$  附近。温度偏高的地区主要位于西南、东南以及南部沿海地区, 而温度偏低的地区主要位于东北和西北两个区域。分析冬季温度距平场可以发现, 以三江源地区以及南疆和西南地区为中心, 2009 年冬季全国大部分地区温度较常年偏高。但是, 新疆北部、内蒙古中西部以及东北地区气温偏低, 较常年平均值偏低  $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。比较 2009 年冬季降水及其距平分布可以发现, 我国冬季降水场上主要表现为南北多、中间少的分布, 北方降水集中在新疆北部和东北地区东北部, 南方则集中在华南地

区。其中, 降水正距平的主要中心位于新疆北部、内蒙古及东北一线, 以及华南地区, 而降水负距平仅出现在我国西南地区。其中明显看到, 新疆北部降水量较常年平均值异常偏大, 距平值达  $60\text{ mm}$  以上, 是北疆降水气候值的  $3\sim 4$  倍, 2009 年冬季北疆降水异常显著超过多年平均水平。

### 2.2 500 hPa 位势高度场

大气环流的异常直接影响到地面天气气候现象。我们利用 500 hPa 位势高度场的纬向偏差以突出槽脊的位置来检验环流异常 (图 2)。分析 500 hPa 高度场气候场纬向距平 (即相对于纬圈平均值的偏差), 可以清楚看出北半球冬季三槽三脊环流型。其中, 东亚大槽、北美大槽分别位于亚洲东岸、北美东部, 位于欧洲东部的欧洲浅槽强度较弱; 三脊主要位于阿拉斯加、西欧沿岸和青藏高原北部。青藏高原北部的平均脊较前两者较弱, 位置恰好位于我国新疆北部上空。从槽脊的分布形势可以看出, 冬季我国主要受到东亚大槽与新疆脊之间南下的冷空气影响, 而极地冷空气沿贝加尔湖, 通

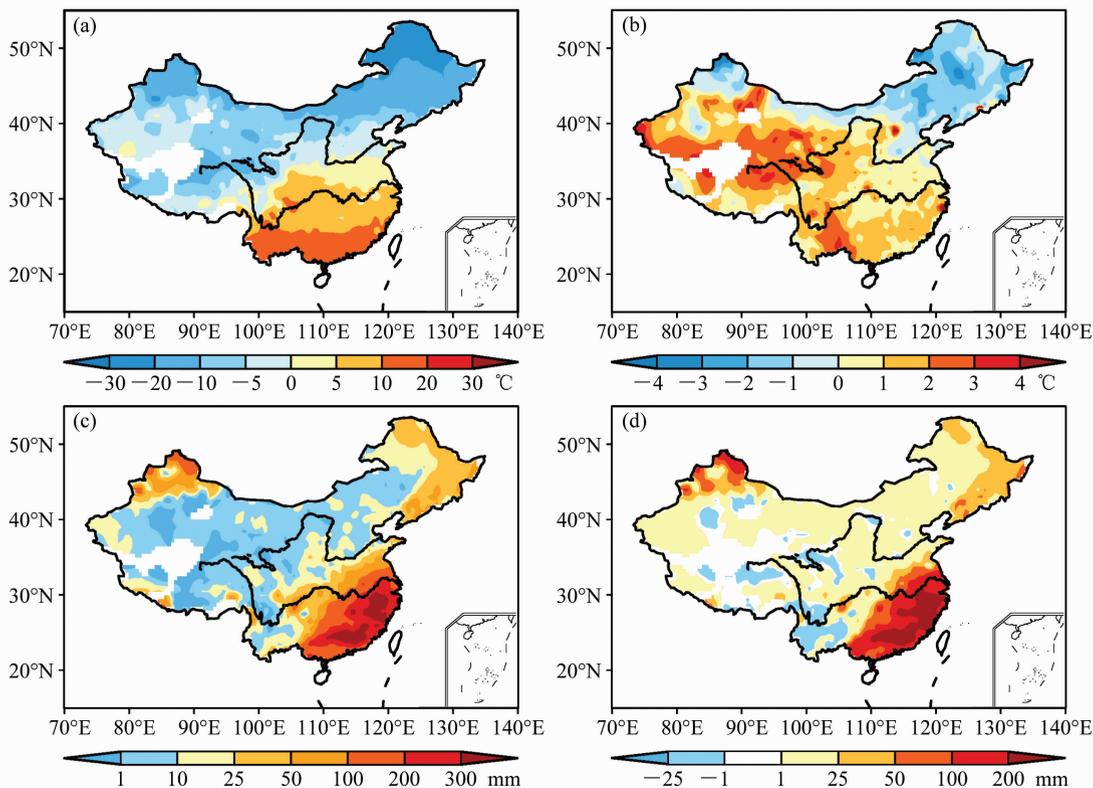


图 1 2009 年冬季 (a) 平均气温、(b) 温度距平、(c) 降水总量和 (d) 降水距平 (气候值取 1971~2000 年平均)

Fig. 1 (a) Winter averaged surface air temperature and (b) its anomaly in 2009; (c) total precipitation amount and (d) its anomaly in winter 2009

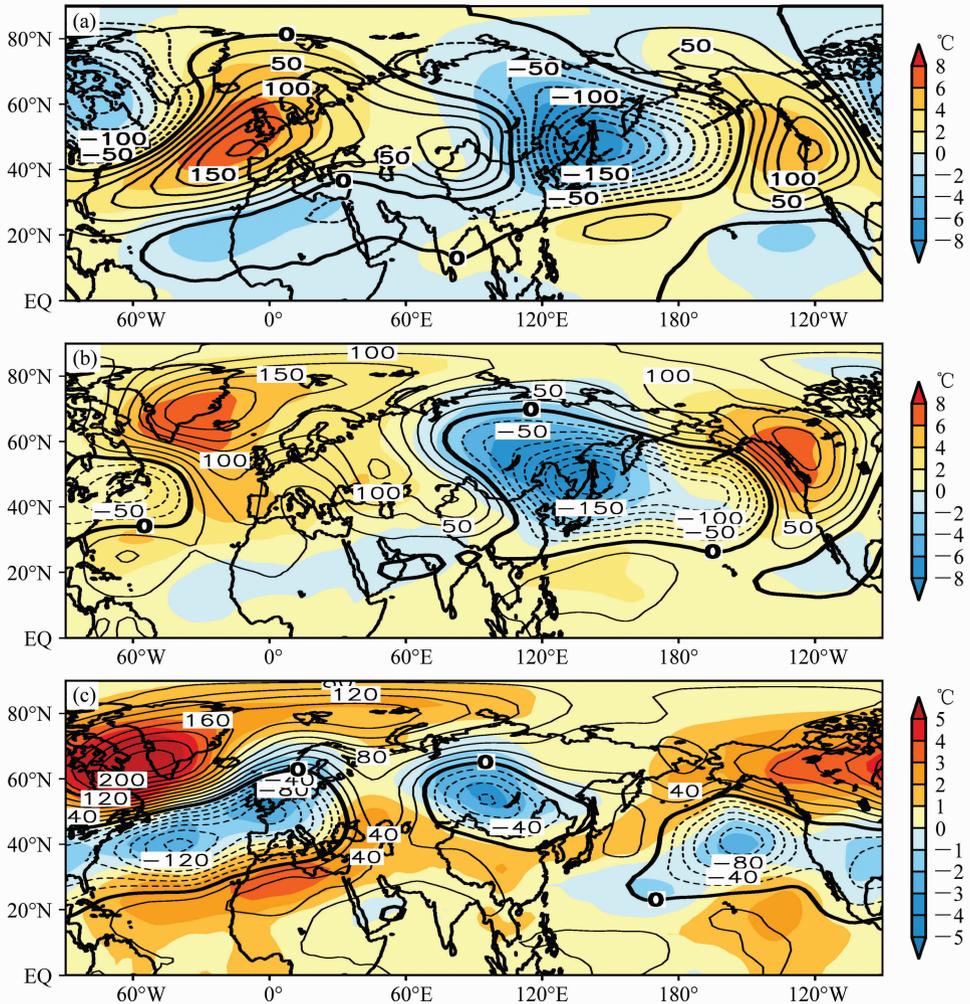


图2 北半球冬季 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: hPa) 和温度 (阴影) 的纬向距平场: (a) 冬季气候平均 (1971~2000 年); (b) 2009 年冬季平均; (c) 2009 年冬季距平

Fig. 2 Departures of geopotential height (contour, units: hPa) and air temperature (shaded) from zonal averages at 500 hPa in boreal winter: (a) Climatology (1971 - 2000); (b) winter averages in 2009; (c) anomalies in winter 2009

过内蒙古中部河套平原入侵我国, 从而造成我国的寒潮天气 (陶诗言, 1959)。分析 2009 年冬季的 500 hPa 位势高度场, 可以看出在两大洋的高压脊明显偏西偏北并且强度增强, 与之对应的东亚大槽位置向西移动, 位于西欧沿岸的高压脊位置向西北移到格陵兰岛东南部, 相对气候场大约西移了  $10^\circ$  经度, 向北移动了  $20^\circ$  纬度。原东亚大槽位置处出现正位势高度距平, 上游贝加尔湖区域出现负位势高度距平, 表明东亚大槽西移减弱。同样, 上游的新疆脊以及西欧的高压脊也依次西移。由于 2009 年冬季的槽脊的位置西移, 新疆脊与乌拉尔山阻塞高压合并, 导致纬向位势高度梯度加大和偏北风加强, 极地冷空气南下的位置也恰好移到新疆地区。

若以零等值线代表高低压之间的冷空气南侵的位置, 可以发现, 伴随乌拉尔山阻塞高压的加强, 高低压之间的零值线也随之向西移动, 并发生西北向扭转, 因此导致影响我国的冷空气路径偏西, 使我国新疆地区有更多机会受到冷空气的影响。从 2009 年冬季 500 hPa 高度场距平可以发现, 整个北半球由高纬向低纬出现了正—负—正的位势高度异常分布 (图 2c), 表明 2009 年冬季的极地位势高度异常偏高, 极涡南移到东西两半球的中纬度地区, 中纬度位势高度偏低, 出现几个负异常位势高度中心, 并伴随着温度降低。可以推断, 影响我国冬季新疆北部降水的异常环流为环贝加尔湖地区异常低槽, 它为持续性暴雪的形成提供了冷空气和动力抬

升条件。因此, 2009年冬季由于槽脊位置相对于气候场向西移动, 导致贝加尔湖地区出现负位势高度异常, 冷空气路径偏西, 寒冷的极地空气从泰梅尔半岛长驱直入侵入中国, 由于低纬度位势高度场也较常年偏高, 冷空气无法南下, 而是沿着偏北路径一路影响到我国新疆、内蒙古、东北等北方地区, 给我国新疆地区的降雪提供了冷空气的保证。

### 2.3 700 hPa 水汽通量

新疆北部为半干旱气候区, 冬季水汽输送在一年中是最弱的, 对新疆来说暴雪的产生不仅与冷空气活动有关, 暖湿气流提供水汽保证也是一个关键因素。水汽输送是降水天气过程产生的重要条件。持续性大暴雪天气必然需要有异常水汽输送的支持。分析发现, 700 hPa 的水汽通量基本能够代表新疆地区的整层水汽输送(图略)。为此, 我们给出了700 hPa 的水汽气候场和2009年冬季平均场以及距平场输送特征(图3)。如图3a所示, 分析水汽输送的气候场可以看出, 西风带水汽输送是我国北方冬季水汽的主要来源, 同样也是北疆地区的主要水汽输送途径。图3a中阴影可以代表水汽输送路径, 可以看到西风带水汽输送经过里海地区的“接力”输入新疆地区。从地中海来的水汽在里海附近得到补充, 汇合了来自红海, 阿拉伯海湾的水汽后继续向西输送, 遇到青藏高原后分为两支, 北支转向东北成为影响我国新疆地区的重要的西南水汽通道。同时, 高纬度西风带也给新疆地区带来水汽, 并且与西南水汽在新疆上空辐合。因此, 影响新疆冬季的水汽输送主要是西风带所携带的水汽通量, 加入地中海向里海附近汇集的水汽通量, 以及里海到青藏高原南侧的西南水流通道。

比较可以发现, 2009年冬季水汽输送通量(图3b)遇青藏高原分支后的南支水汽输送显著减少, 而向东北方向输送北支水汽输送通量显著增加。主要表现如下特征:(1) 西风带水汽较常年异常偏多。从水汽输送的距平图(图3c)中可见, 从地中海到里海的西风带水汽输送异常偏多, 同时里海到新疆上空的北支水汽输送较气候平均值也明显偏多。因此, 2009年冬季从海洋上向西输送的西风带水汽通量本身异常偏多, 导致新疆地区高水汽输送通量可以维持。(2) 伊朗高原东侧有异常的北上的水汽输送通量。图3c中显示, 红海以及波斯湾向里海汇合水汽输送通量没有发生异常, 但是伊朗

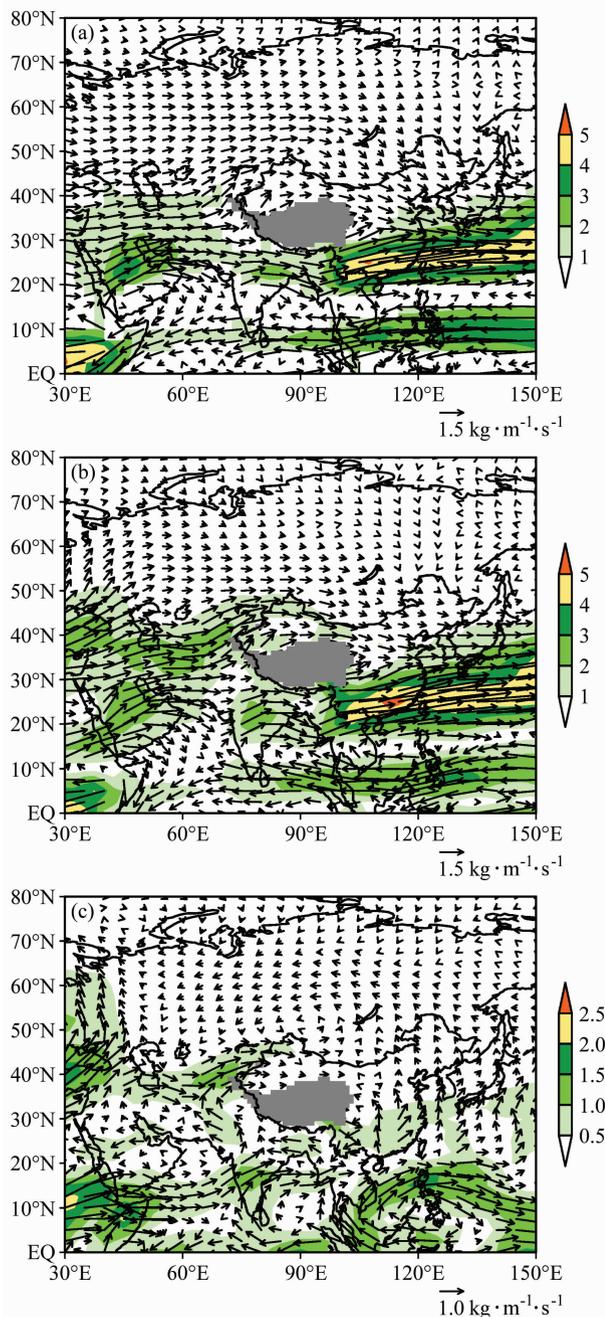


图3 北半球冬季700 hPa水汽通量场(箭头表示水汽通量矢量, 彩色阴影表示水汽通量值)(a) 气候平均、(b) 2009年冬季平均及(c) 其距平场(单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 Winter averaged 700-hPa water vapor flux for (a) climatology (1971–2000) and (b) 2009, and (c) its anomalies in winter 2009. The shaded areas stand for vapor fluxes with values more than  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (a, b) and  $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (c), respectively

高原东侧有北上的水汽输送异常, 这一支水汽来源于印度河流域, 北上后同西风带水汽汇合成西南水汽流输送到新疆地区, 它的存在对新疆持续性暴雪

可能有一定的影响。(3) 遇青藏高原分支后的南支水汽输送东输分量减少。图 3c 中看到, 水汽输送异常图中南支水汽输送通量出现向西向北的分量, 表示南支水汽输送分量减少, 主要输送方向由东南向改为东北向。因此, 2009 年冬季输送到新疆北部的西南暖湿气流不仅汇合了西风的正水汽输送异常, 同时也汇合了一部分南支水汽输送的北上分量, 从而导致总输送新疆的水汽异常偏多。

通过以上分析, 我们可以认为 2009 年冬季水汽通量输送异常主要是由于西风带上水汽输送异常偏多, 由于从西边输送到里海地区的水汽较多, 而同时遇到青藏高原分支后, 南支水汽在伊朗高原东部(青藏高原西侧)转向北上, 汇合北支水汽输送的西南气流中输送到新疆地区, 由此导致我国新疆地区的水汽输送通量异常偏大, 维持了持续性暴雪所需要的水汽条件。从 2009 年冬季 500 hPa 位势高度的距平场(见图 2c)分布可以看出, 该年冬季高度场异常表现为高、中、低纬分别为正一负一正的类似三明治形式的异常分布。负异常带中存在着几个较强的异常中心, 这样的异常叠加到气候态上使得中间的负异常中心的北边西风减弱, 南边西风增强。地中海地区恰好处于异常值达到 80 gpm 负异常中心的南部, 因此地中海的上空西风分量异常

增强, 导致西风带上暖湿的水汽向西输送异常的偏多。同样, 从图 2c 中可以看到, 处于低纬度的印度洋上有正的位势高度异常中心, 这一个异常中心形成了高压坝, 阻挡了西风带上的水汽向我国西南地区输送, 因此水汽的南支输送被阻挡, 并在伊朗高原东部(青藏高原西侧)转向北上输送, 导致我国新疆地区水汽充沛, 为持续性大暴雪天气的发生提供了有利的水汽条件。

### 3 影响冬季新疆北部降水的主要环流系统

为分析历史冬季北疆地区的温度和降水特征, 我们选取 ( $45^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E}\sim 91^{\circ}\text{E}$ ) 区域代表北疆地区, 计算了 1955~2009 年该区域平均的冬季平均温度和降水量(图 4)。从时间变化趋势分析可以发现, 新疆北部地区冬季自 1979 年以来出现明显增暖现象, 这与北半球和全国的冬季增温现象是一致的。同时, 新疆北部降水异常偏多年大多数出现在 20 世纪 80 年代以后, 这与过去的研究比较一致(杨莲梅, 2005; 刘波等, 2009)。2009 年冬季北疆地区的平均季降水量是气候值的 3 倍, 是过去 50 年不遇的一次极端天气气候现象, 并非完全是当地气候变化趋势的必然结果, 而平均温度变化并不明

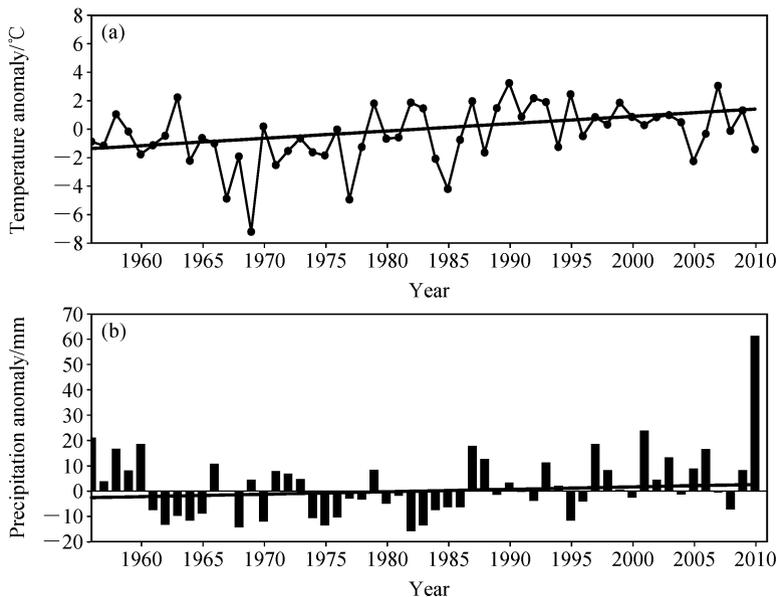


图 4 1951~2009 年冬季新疆北部 ( $45^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E}\sim 91^{\circ}\text{E}$ ) 地表平均温度距平 (a) 和降水距平 (b) 的时间序列变化 (气候态值取 1971~2000 年平均)

Fig. 4 The time series of winter (a) surface air temperature anomaly and (b) precipitation anomaly averaged over the north of Xinjiang ( $45^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E}\sim 91^{\circ}\text{E}$ ) during 1951-2009

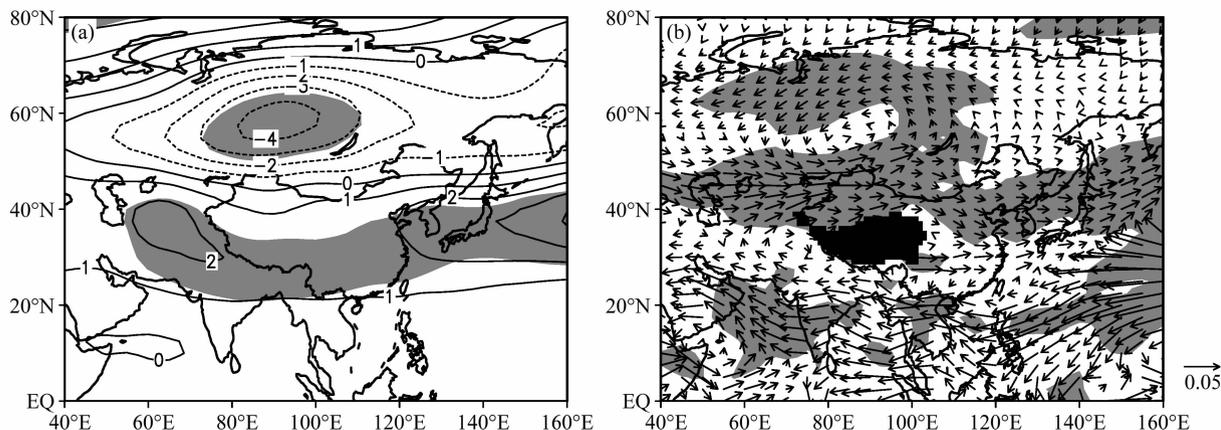


图 5 1951~2008 年冬季北疆降水量与同期 500 hPa 位势高度场 (单位: hPa) (a) 和 700 hPa 水汽通量 (单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (b) 的回归系数场。阴影: 超过 95% 信度的显著性检验

Fig. 5 Regression coefficients of (a) 500-hPa geopotential height (units: hPa) and (b) 700-hPa water vapor flux (units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) on the winter precipitation in North Xinjiang during 1951-2008. Shaded areas: exceeding the 95% confidence level

显。剔除 2009 年冬季资料, 我们采用 1951~2008 年冬季新疆降水的年序列对 500 hPa 高度场和 700 hPa 水汽通量场进行了回归分析, 确定对新疆地区降水相关的环流系统和水汽输送。

图 5 表示 1951~2008 年冬季新疆北部降水与 500 hPa 位势高度场和 700 hPa 水汽通量场的回归系数, 如图所示, 影响北疆地区降水的关键系统是位于贝加尔湖西部的低位势高度异常中心, 中心位置大约在 ( $60^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E}$ ) 附近, 降水与高度场表现为显著的负相关。因此, 当该关键区域位势高度偏低 (偏高) 时, 新疆北部降水量偏多 (偏少)。比较可以发现, 2009 年冬季 500 hPa 位势高度的负异常发生在以贝加尔湖为中心, 横跨蒙古部分区域, 其中对新疆降水关键的影响区域出现负的位势高度异常, 恰好对应新疆地区的降水偏多的环流模式。同位势高度场一致, 700 hPa 的水汽通量场的回归出现了以北疆以北地区为中心的气旋性回归系数矢量场。可以看到, 新疆降水偏多对应着里海到新疆地区的水汽通量增多, 同时其下游地区蒙古及我国东北地区的水汽通量也增多, 即是北支西南水汽输送通量增多。同样, 2009 年冬季的水汽通量场异常与之符合。

#### 4 2009 年冬季北疆持续性暴雪的可能成因

2009 年冬季我国北疆地区发生了持续性大暴雪过程, 本次大暴雪过程具有发生频次多, 持续时

间长, 降雪量大等特点, 频发的大暴雪天气过程使得北疆地区累积积雪量, 积雪日数等指标均突破历史极值, 产生历史罕见的雪灾。图 6 为 2009 年冬季北疆地区的降水与温度逐日变化, 如图所示, 北疆地区共计出现 7 次持续降雪时段, 其中 4 次过程中出现了大暴雪天气过程。持续时间最长一次降水时段是 2009 年 12 月 31 日到 2010 年 1 月 9 日共计 10 天的连续性降雪并大暴雪过程, 这次降雪也是给新疆带来罕见雪灾的主要过程之一。伴随着这 7 次的降雪过程, 新疆地区的地面温度也发生了 7 次显著的降温过程, 降温幅度均在  $10^{\circ}\text{C}$  以上。降水过程与降温的一致性表明北疆冬季的大暴雪天气过程和冷空气的活动密切相关, 每次大暴雪天气过程发生之后都伴有一次寒潮的爆发, 冷空气的频繁南下侵入新疆地区是今年冬季持续性大暴雪天气过程的特点之一。

持续性降水一定与持续性天气系统相联系, 本文用 2009 年冬季 500 hPa 位势高度距平场的纬度-时间图来分析今年冬季给我国新疆地区带来降水的天气系统的移动。我们取新疆地区  $80^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$  纬向平均的 500 hPa 高度距平场, 给出其纬度-时间剖面图 (图 7)。其中, 图 7 虚线区域代表  $45^{\circ}\text{E} \sim 50^{\circ}\text{E}$  的新疆北部地区, 上方图为对应的是该区域平均逐日降水量。

从图 7 中可以看到, 7 次降雪天气过程均伴有关键区域位势高度的降低, 这同降水与位势高度的回归关系一致。从逐日天气图 (图略) 也可以看

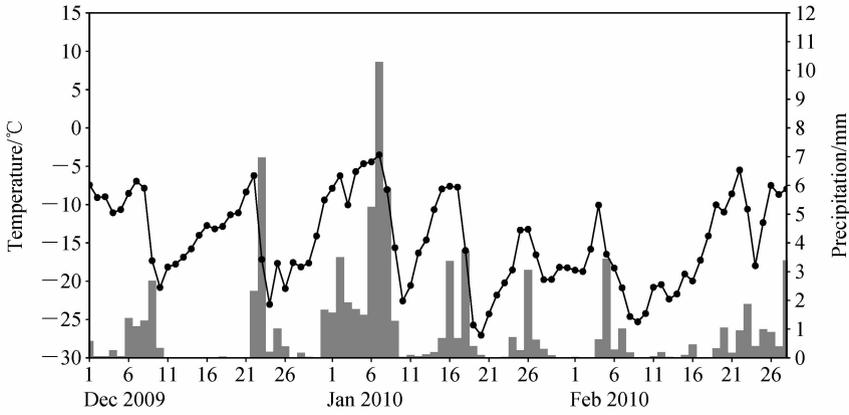


图 6 2009 年冬季北疆地区逐日降水量(柱形图)和地表气温(曲线图)变化

Fig. 6 Variations of daily precipitation (bar) and surface air temperature (curve) over North Xinjiang in winter 2009

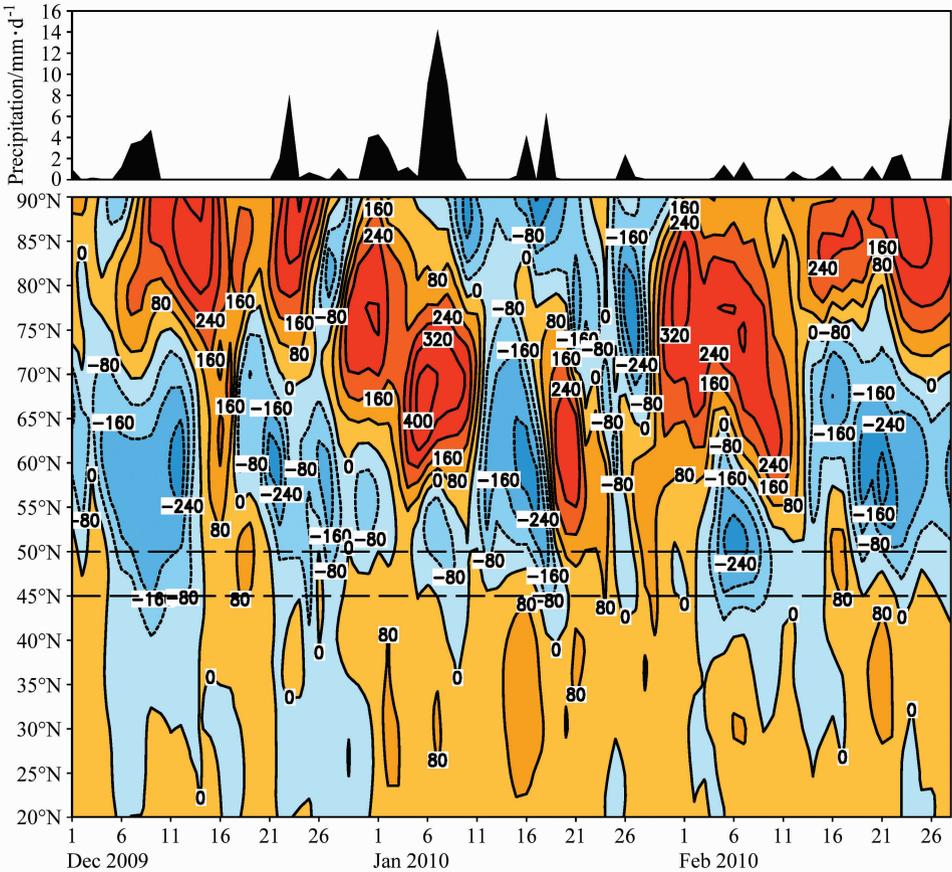


图 7 2009 年冬季逐日 500 hPa 位势高度距平沿 80°E-90°E 纬向平均的纬度—时间剖面图(单位: gpm)。上图对应的是逐日降水量变化(单位: mm/d)

Fig. 7 Latitude-time cross section of daily 500 hPa geopotential height anomaly averaged over 80°E-90°E in winter 2009 (units: gpm). Upper panel is the corresponding daily precipitation in North Xinjiang

出, 7 次降水过程关键区域的天气系统的移动不尽相同, 但是多为极地高压建立而引起的极涡南下。2009 年冬季, 两大洋的高压脊发展强烈, 2009 年

12 月 6 日欧洲地区以及阿拉斯加高压脊发展并建立极地高压, 极涡被推离极地地区南下到东西半球, 当极涡偏向东边球, 自泰梅尔半岛向东半球南

下的极涡引起关键区域的位势高度降低, 北疆处于极涡底部的强锋区内, 随后极涡东移, 其携带的冷空气侵入新疆地区造成一次寒潮天气。北大西洋高压脊、乌拉尔山高压脊以及北太平洋高压脊之间交替发展, 导致极地高压一直盘踞在极地, 并维持到 1 月 11 日。被推离极地的极涡在东半球维持在中亚地区以及欧洲西部地区。由于极涡在中高纬度的持续维持, 使贝加尔湖一带的异常低槽从 12 月到 2 月初一直维持。新疆处于极涡底部的强锋区内, 2009 年 12 月 31 日到 1 月 9 日, 上游乌拉尔山高压脊发展, 同时极涡下游的高压脊产生阻塞高压侵入到蒙古地区, 使得极涡被阻滞在贝加尔湖一带稳定不动, 则冷空气低涡槽后堆积, 上游西风槽活动频繁, 提供暖湿气流, 则产生了长达 10 天的持续性大暴雪天气过程。此后极涡重建不久, 在 2 月 1 日极地高压再次建立, 并且一直维持到 2 月 28 日, 关键区域的低位势异常也随之维持到 2 月末, 在这一段时间内新疆北部频繁发生降雪天气过程。

水汽的来源以及持续不断的供给是 2009 年冬季新疆持续性暴雪发生的必要条件之一。为了清楚

地分析水汽来源以及输送过程, 我们采用逐日资料沿 40°N~50°N 的纬向平均给出纬向水汽输送通量的经度—时间图 (图 8 左), 并沿着 65°E~80°E 平均给出经向水汽输送通量纬度—时间剖面 (图 8 中)。虚线部分表示前文定义的新疆北部地区。从经度—时间图中看到, 位于 0°~30°E 的地中海以及位于 50°E~60°E 的里咸海是新疆纬向水汽输送的两大源地, 较高的水汽通量西起地中海, 沿着西风带自西向东输送, 在里咸海地区得到补充加强, 当暖湿气流输送到达新疆北部上空, 配合新疆北部的关键区域低槽提供冷空气及动力抬升条件, 南下冷空气同暖湿气流相遇, 则形成一次大暴雪天气过程。图 8 左中明显看到 7 次过程中均伴有西风带高水汽输送通量东移。而在纬度—时间剖面图 (图 8 中) 中看到, 沿经向北上的水汽基本来源于 30°N 以北地区, 低纬海洋的水汽很难越过伊朗高原而影响新疆北部地区, 经向水汽输送通量是由于西风带水汽输送受到高原阻挡产生向北分量后而形成。但是在 2009 年 12 月 31 日~2010 年 1 月 9 日长达 10 天的大暴雪天气过程中, 北上水汽输送通量中有

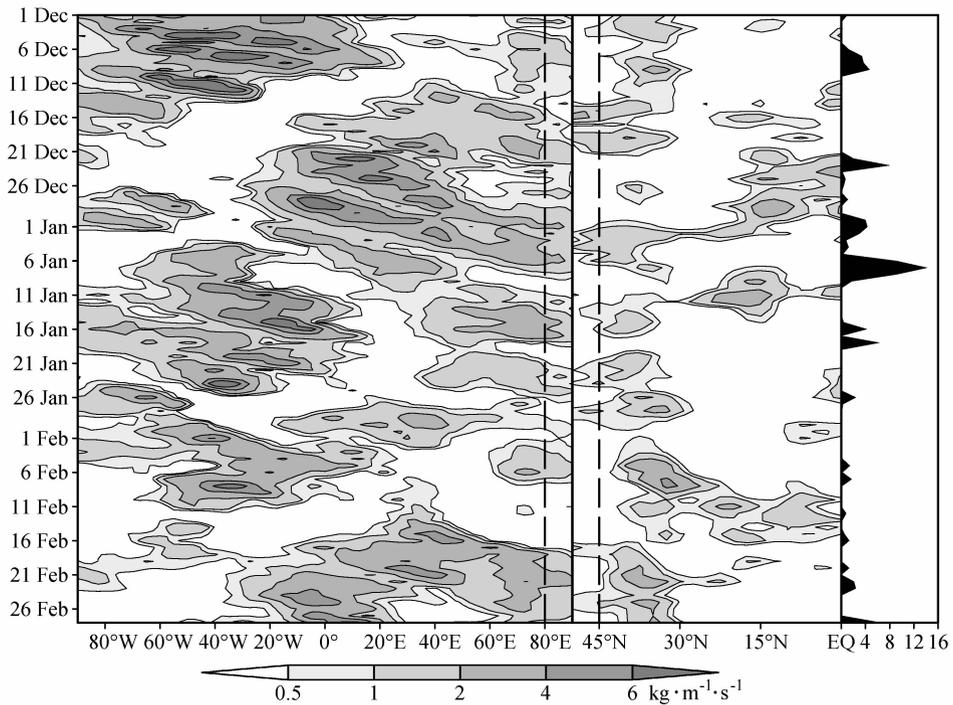


图 8 2009 年冬季逐日 700 hPa 水汽输送通量 (单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 沿 40°N~50°N 平均的经度—时间剖面图 (左) 与沿 65°E~80°E 平均的纬度—时间剖面图 (中) 以及逐日降水量 (单位: mm/d) 变化 (右图)。虚线框出的区域代表北疆地区 (45°N-50°N, 80°E-91°E)  
 Fig. 8 Longitude-time cross section of daily 700-hPa vapor flux averaged over 40°N-50°N (left panel) and latitude-time cross section of daily 700-hPa vapor flux averaged over 65°E-80°E (middle panel) in winter 2009 (units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Right panel is the corresponding daily precipitation (mm/d) in North Xinjiang. The area surrounded by dashed lines stand for North Xinjiang (45°N-50°N, 80°E-91°E)

部分来自低纬印度洋的水汽输送越过高原, 汇合在西南暖湿气流中影响新疆, 这可能是导致 700 hPa 水汽输送通量的距平图中北上水汽输送异常的原因, 在逐日天气图(略)中发现, 这部分水汽是由于上游分裂的低槽加深而引起的槽前北向的水汽输送增加而产生的。2009 年 12 月 31 日~2010 年 1 月 9 日这次长达 10 天的持续性暴雪天气给新疆地区带来极大的灾害, 我们分析认为, 在持续暴雪发生之前, 大量的暖湿空气在地中海附近聚集形成高水汽输送通量并持续维持了 10 天, 当这一条水汽输送带随着西风带东移到达新疆上空, 低纬度水汽也恰好受到深槽的影响北上补充, 同时 500 hPa 高度场上, 位于新疆北部北高南低的阻切形势建立, 切断低压长期维持在新疆北部上空, 降雪产生动力条件具备, 地中海附近高水汽输送的持续维持, 北上水汽的补充, 动力与水汽条件同时具备并持续维持使得在新疆北部的产生了长达 10 天暴雪天气过程, 并出现了 50 年不遇的极端大暴雪天气。

由此可见, 2009 年冬季的持续性降雪天气是由于极地高压发展, 极涡被迫南移到东半球稳定少动而引起的。由于两大洋高压脊发展强烈, 极地地区大多数时间为极地高压控制, 极涡被迫分裂南下到东西两半球, 我国北疆地区处于极涡底部锋区中。同时频发的西风槽分裂东下, 地中海一带聚集大量的暖湿空气随西风带持续向东输送, 我国新疆地区处于暖湿气流同冷空气交汇处, 同时由于北疆地处天山山脉与阿尔泰山脉的喇叭口地形中, 产生的地形辐合极容易产生大暴雪天气过程。

2009 年冬季北疆地区持续性大暴雪是由于极地高压建立, 极涡南移并长期盘踞在东半球而形成的。我们注意到, 2009 年冬季 AO 指数处于极端负位相, 海洋发生典型的 ENSO 事件, 这两个强气候信号势必对全球和区域的气候异常产生影响。为此, 本文试图从 AO 和 ENSO 对大气环流的影响来探讨北疆发生持续性大暴雪的原因。

图 9 表示 1951~2008 年冬季 AO 指数、北疆降水时间序列, 以及同期 500 hPa 高度场和 700 hPa 水汽通量对 AO 指数的回归场, 如图所示, 2009 年冬季, AO 发生了显著的负异常, AO 指数与北疆降水呈显著负相关, 相关系数为  $-0.29$ , 超过 95% 显著性检验。通过对 500 hPa 位势高度场对 AO 指数的回归分析(图 9a)可以发现, 正回归系数主要位

于从贝加尔湖延伸到日本直至东至太平洋东部, 以及北美东部至大西洋并达到欧洲西部。因此, 当 AO 指数为负位相时, 对应贝加尔湖地区的位势高度值偏低, 乌拉尔山高压脊偏强。比较可以发现, 2009 年冬季在 AO 指数极端负异常下, 乌拉尔山高压脊与东亚大槽均发展, 中纬度西风经向较大, 有利于冷空气的南下。分析 700 hPa 的水汽通量回归场发现, 在北美东岸—大西洋中部—地中海地区, 亚欧大陆东部—中纬度太平洋—北美西部有着两大顺时针的水汽通量回归系数场, 这表明当 AO 偏低(偏高)时, 大西洋中部表现为水汽通量的气旋(反气旋)性异常。同样, 比较 2009 年冬季的水汽通量异常场, 发现 AO 指数负异常产生的两大气旋性水汽通量同 2009 年冬季的异常场也几乎完全对应。因此, 受 AO 指数负位相的影响, 大西洋到地中海一带上出现气旋性水汽通量异常, 从地中海到里海的西风带水汽通量增多。同样, 在里海到我国新疆北部的的水汽输送路径中, AO 的负异常会使得这里的水汽输送通量减少, 但是相关并不显著。因此, AO 的负位相能够解释 2009 年冬季西风带上地中海向里海输送水汽异常偏多的现象, 可以推断, 2009 年冬季地中海的异常高水汽通量经过里海后随西风东移输送到我国新疆地区, 导致里海到新疆的水汽通量输送相应增大。

中东太平洋海温异常偏高是 2009 年冬季气候的另一个异常情况。本文取 Niño3.4 区域平均海表温度(SST)距平作为 ENSO 指数, 分析 ENSO 对中国冬季降水的可能影响。图 10 表示的是 1951~2008 年 Niño3.4 区 SST 指数, 及其同 500 hPa 高度场和 700 hPa 水汽通量的回归系数。

如图 10 所示, 2009 年冬季, Niño3.4 区域的海温距平为  $1.66^{\circ}\text{C}$ , 该年冬天是一个典型的 El Niño 年。分析可以发现, 500 hPa 位势高度场在  $20^{\circ}\text{N}$  以南的热带地区均为正值, 特别是在西太平洋暖池中心为正回归的中心区域, 表明当 Niño3.4 区的 SST 为正(负)距平时, 该区域的 500 hPa 位势高度异常偏高(低)。由于 2009 年冬季 Niño3.4 区的 SST 异常偏高, 与之对应的 2009 年冬季的低纬度地区位势高度异常偏高, 副热带高压偏强偏北, 以日本以东为中心的 500 hPa 位势高度场表现出正异常。其中, El Niño 与中高纬环流之间的关系主要体现在从中西伯利亚向东南并延伸到

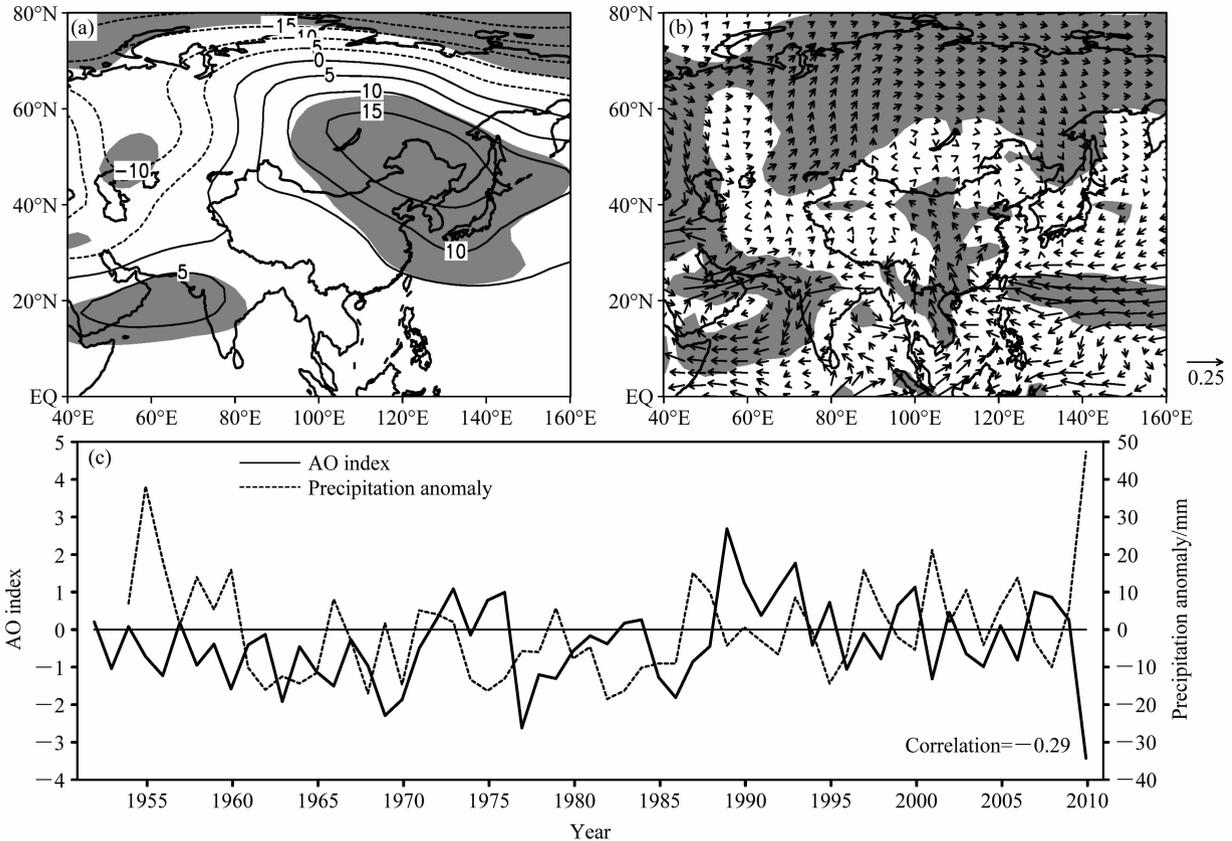


图9 1951~2008 年冬季 AO 指数与同期 500 hPa 高度场(单位: hPa) (a) 和 700 hPa 水汽通量场(单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (b) 之间的回归系数以及 1951~2009 年冬季 AO 指数(实线)与北疆地区冬季降水量距平(虚线)的时间序列(c)。阴影为超过信度为 95% 的显著性检验  
 Fig. 9 Regression coefficients of 500-hPa geopotential height (units: hPa) (a) and 700-hPa water vapor flux (units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in winter (b) on winter AO index during 1951 - 2008 (The shading denotes the areas exceeding the 95% confidence level). (c) Time series of winter AO Index (solid) and winter averaged precipitation anomaly (dashed) over North Xinjiang during 1951 - 2008

太平洋东部, 且以太平洋东部为中心的负相关系数区域, 以及加拿大地区的正回归系数区。因此, 2009 年 ENSO 暖事件发生时, 以太平洋东部为中心的 500 hPa 位势高度场表现出负异常, 而在加拿大地区出现位势高度的正异常。比较可以发现, ENSO 与 AO 影响下的 500 hPa 位势高度的异常在正位相正好叠加, 导致北太平洋东部和北美北部则出现了强烈的位势高度异常。分析 700 hPa 水汽通量的回归系数可以发现, 与位势高度场的相对应, 在位势高度回归场为正的地区出现水汽通量回归场的反气旋性中心。低纬度海洋向我国南方地区输送的水汽通量值较大, 这可能是 2009 年冬季我国华南地区出现暴雨的原因之一。虽然回归系数场中从里海到新疆一带的西南水汽通道与 Niño3.4 区的 SST 指数相关超过显著性检验, 但是我们前面分析的结论这一部分的水汽并非来自低纬度海洋, 因此

El Niño 对新疆北部大暴雪天气过程的影响并不明显。

图 11 表示的是冬季 AO 指数、Niño3.4 区 SST 指数与同期我国气温以和降水的相关系数, 从图中可以看到, AO 指数与我国气温最强的正相关发生在新疆北部以及东北北部, 相关系数均超过显著性检验。比较今年我国气温异常的分布图, 可以看到 2009 年冬季我国新疆以及东北地区的气温明显偏低。从 AO 指数与我国降水的相关系数图中可以看到, AO 指数与我国西北地区特别是新疆地区的降水有较好的负相关, 其余地区均为正相关, 因此 AO 负位相是影响我国新疆地区的降水量偏多的因子之一。比较发现, 我国的大部分地区的气温同 Niño3.4 区 SST 指数存在正相关关系, 仅在黑龙江东北部以及青藏高原的西部一带出现负相关区域。其中, Niño3.4 区 SST 指数与我国降水量的相关场

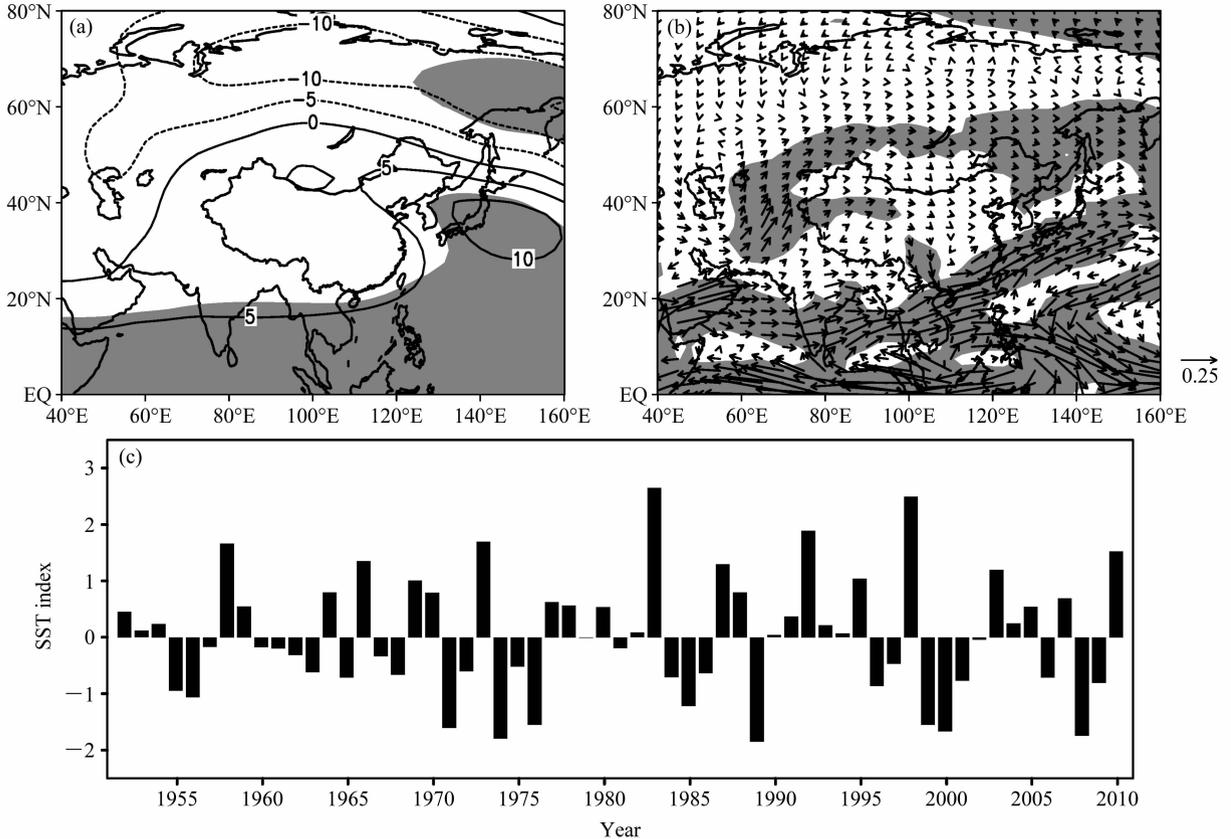


图 10 1951~2008 年冬季 500 hPa 位势高度场 (单位: hPa) (a) 和 700 hPa 水汽通量场 (单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (b) 对 Niño3.4 区 SST 指数的回归系数以及 1951~2009 年冬季 Niño3.4 区 SST 指数时间变化 (c)。阴影: 超过信度为 95% 的显著性检验

Fig. 10 Regression coefficients of (a) 500-hPa geopotential height (units: hPa) and (b) 700-hPa water vapor flux (units:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) on SST index (Niño3.4 region) in winter during 1951-2008 (The shading denotes the areas exceeding the 95% confidence level). (c) Time series of winter SST index (Niño3.4 region) during 1951-2009

中可以看到在华南地区出现显著的正相关区域, 由此推断, 2009 年华南降水偏多与 El Niño 事件存在联系。

## 5 结论和讨论

本文采用资料分析, 通过与历史比较讨论了 2009 年冬季新疆北部持续性暴雪的环流特征, 并分析了 AO 和 ENSO 对中国冬季温度和降水之间的关系及其可能影响, 主要结论如下:

(1) 2009 年冬季贝加尔湖以西的持续性冷气旋异常是影响该年新疆北部持续性暴雪的重要环流系统。通过历史比较发现, 冬季贝加尔湖异常冷性低槽与 AO 异常密切相关。当 AO 指数为负位相时, 有利于乌拉尔山异常阻塞高压和贝加尔湖冷性低槽维持。2009 年冬季, 贝加尔湖地区的异常气旋导致冷空气南下路径偏西, 并与来自里海的水汽

输送交汇与新疆北部, 导致了持续性寒潮天气和暴雪的发生。虽然该年冬季温度变化幅度与气候差异不明显, 但是该地区的冬季降水量是气候值的 3 倍。因此, 是过去 50 年不遇的连续降水天气导致的极端气候事件, 并不完全是当地气候长期变化趋势的必然结果。

(2) 通过对 58 年我国冬季地表气温和降水与同期 AO 和 Niño3.4 区的 SST 指数相关分析发现, 当 AO 负位相时期, 新疆北部以及东北极易出现低温天气, 我国西北地区特别是新疆地区的降水偏多。因此, 2009 年 AO 指数的极端负异常是很可能是导致新疆地区的降水量偏多的重要因子。而分析 ENSO 事件的影响发现, 2009 年冬季为典型的 El Niño 年, 当赤道东太平洋海温偏高时, 西太平洋副热带高压偏强偏北, 由低纬度海洋产生的暖湿空气沿副高边缘大量的输送到我国南方地区, 但是由于

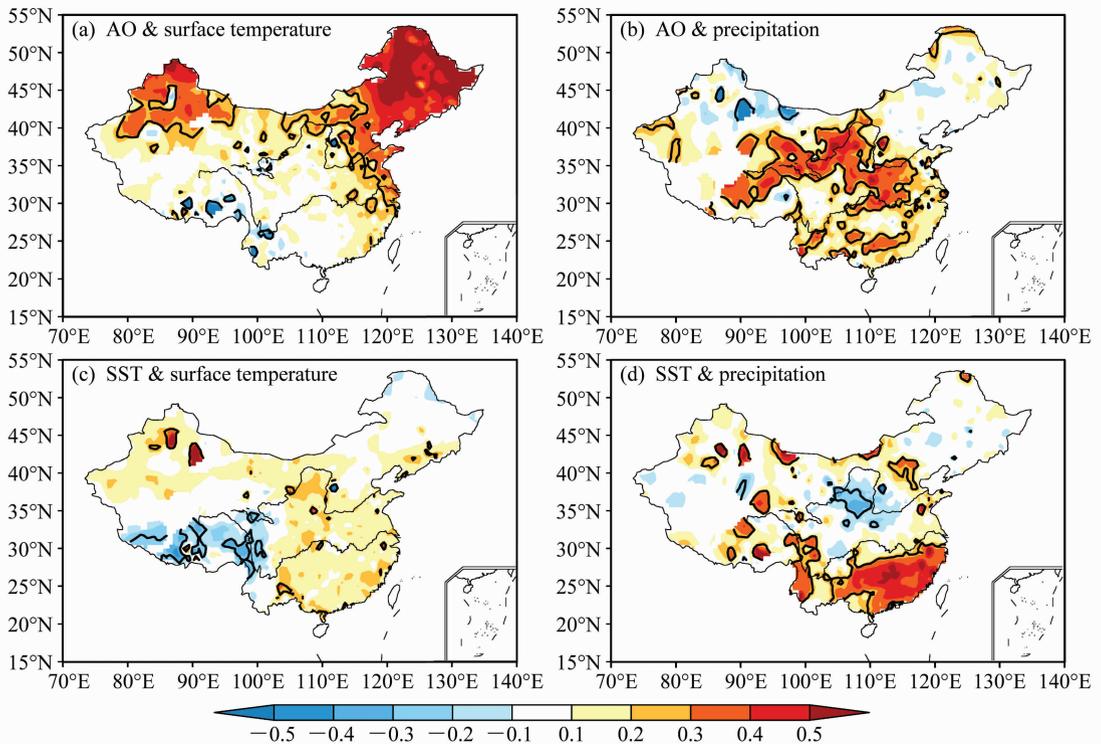


图 11 1951~2008 年冬季 AO 指数 (a、b)、Niño3.4 区 SST 指数 (c、d) 与同期温度 (a、c) 和降水 (b、d) 之间的相关系数。实线包围区域为超过信度为 95% 的显著性检验区域

Fig. 11 Correlation coefficients between winter (a, b) AO index and (c, d) SST anomaly in the Niño3.4 region with the corresponding (a, c) surface air temperature and (b, d) precipitation over China during 1951–2008. Areas exceeding the 95% confidence level are enclosed by the solid lines

伊朗高原的阻挡, 低纬度海洋的水汽很难北上输送到达新疆北部, ENSO 同我国新疆持续性暴雪过程影响并不明显。

(3) 2009 年冬季 AO 指数明显偏低, 导致冷空气南下频繁。然而, 由于 ENSO 的影响导致西太平洋副热带高压偏强, 阻碍了冷空气的向南侵袭和长江以南的剧烈降温天气, 从而没有出现类似于 2008 年在我国长江以南和西南地区发生的冰冻雨雪天气现象。2009 年 AO 指数极端偏弱, 这是北半球大尺度环流异常的表现形式, 什么原因导致了大尺度环流的剧烈调整还需要进一步研究。

### 参考文献 (References)

陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. 大气科学, 26 (5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (5): 595–610.

崔彩霞, 杨青, 王胜利. 2005. 1960–2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析 [J]. 冰川冻土, 27 (4): 486–490. Cui Caixia, Yang Qing, Wang Shengli. 2005. Comparison analysis of the long-term variations of snow cover between mountain and plain areas in Xinjiang Region from 1960 to 2003 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 27 (4): 486–490.

房巧敏, 龚道溢, 毛睿. 2007. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析 [J]. 地理科学, 27 (5): 711–717. Fang Qiaomin, Gong Daoyi, Mao Rui. 2007. Changes of daily precipitation of China in wintertime during the last 46 years [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 27 (5): 711–717.

龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响 [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 J. Atmos. Sci. (in Chinese), 32 (2): 335–344.

黄海波, 徐海容. 2007. 新疆一次秋季暴雪天气的诊断分析 [J]. 高原气象, 26 (3): 624–629. Huang Haibo, Xu Hairong. 2007.

- Diagnostic analysis on a snowstorm event occurred of Xinjiang in Fall [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (3): 624 - 629.
- 黄荣辉, 陈文. 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 146 - 159. Huang Ronghui, Chen Wen. 2002. Recent Progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (2): 146 - 159.
- 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.
- 刘波, 冯锦明, 马柱国, 等. 2009. 1960~2005 年新疆气候变化的基本特征 [J]. *气候与环境研究*, 14 (4): 414 - 426. Liu Bo, Feng Jinming, Ma Zhuguo, et al. 2009. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (4): 414 - 426.
- 刘正新, 田惠平, 赵俊荣, 等. 2007. 新疆天山中部初秋罕见大暴雪成因分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 1 (5): 21 - 24. Liu Zhengxin, Tian Huiping, Zhao Junrong, et al. 2007. Snowstorm origin analysis in early autumn at middle part of Xinjiang Tianshan Mountains [J]. *Desert and Oasis Meteorology (in Chinese)*, 1 (5): 21 - 24.
- 穆明权. 2001. 东亚冬季风异常与 ENSO 循环关系的进一步研究 [J]. *气候与环境研究*, 6 (3): 273 - 285. Mu Mingquan. 2001. A further research on the cyclic relationship between anomalous East - Asian winter monsoon and ENSO [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (3): 273 - 285.
- 谭艳梅, 王健. 2001. 北疆冬季降水异常与前期环流特征的相关分析 [J]. *新疆气象*, 24 (3): 12 - 15. Tan Yanmei, Wang Jian. 2001. Lag-correlation analysis on abnormal precipitation in winter and its circulation situation in North Xinjiang [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese)*, 24 (3): 12 - 15.
- 陶诗言. 1959. 十年来我国对东亚寒潮的研究 [J]. *气象学报*, 30: 226 - 230. Tao Shiyan. 1959. Study on East Asian cold waves in China during recent 10 years (1949 - 1959) [J]. *Acta Meteorology Sinica (in Chinese)*, 30: 226 - 230.
- 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 22 (4): 399 - 407.
- 杨辉, 李崇银. 2008. 冬季北极涛动的影响分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 395 - 404. Yang Hui, Li Chongyin. 2008. Influence of Arctic Oscillation on temperature and precipitation in winter [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 395 - 404.
- 杨莲梅, 杨涛, 贾丽红, 等. 2005. 新疆大~暴雪气候特征及其水汽分析 [J]. *冰川冻土*, 27 (3): 389 - 396. Yang Lianmei, Yang Tao, Jia Lihong, et al. 2005. Analyses of the climate characteristics and water vapor of heavy snow in Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 27 (3): 389 - 396.