

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0046

GAO Songying, ZHAO Tingting, SONG Lili, et al. Transporting characteristics of snowstorm water vapor over Liaoning Province in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):439-446. [高松影, 赵婷婷, 宋丽丽, 等. 辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):439-446.]

辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征

高松影¹, 赵婷婷², 宋丽丽¹, 白 华³, 徐璐璐¹, 李瑞晗¹, 孟 鑫¹

(1. 丹东市气象台, 辽宁 丹东 118000; 2. 辽阳市气象台, 辽宁 辽阳 111000; 3. 沈阳市气象局, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 利用1949–2015年NCEP/NCAR逐日及月平均资料, 对辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征进行研究, 结果表明: 受冬季风影响, 辽宁省冬季降水水汽主要来自西边界中纬度西风气流的输入, 区域暴雪的发生是经向水汽异常输送的结果, 西风带偏西气流与日本海反气旋性环流西南侧偏南气流在辽宁省交汇是辽宁省区域暴雪产生的主要原因。辽宁省区域暴雪水汽源地主要有西太平洋、日本海、东海和黄海, 其中东海、黄海是直接的水汽源地。日本海高压是辽宁省区域暴雪水汽输送的关键系统, 82.4%的区域暴雪过程海平面气压场有日本海高压存在, 根据其位置和强度可分为偏北型、偏南型和高压脊型, 不同环流型高压水汽输送强度不同, 区域暴雪分布范围不同。东海、黄海湿度平流作用和风场辐合作用是辽宁省区域暴雪产生的贡献因子, 不同环流型日本海高压湿度平流作用的贡献不同。

关键词: 辽宁; 暴雪; 水汽输送; 日本海高压

中图分类号: P458.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0439-08

0 引言

水汽条件是降水形成的重要机制之一, 水汽来源直接影响降水的形成和强度^[1]。我国大部分地区位于东亚季风区, 季风气候特征显著。夏季, 夏季风为我国降水提供水汽来源^[2]。周晓霞等^[3]研究了亚洲季风区水汽输送的气候特征及其与中国夏季降水的关系, 指出夏季亚洲季风区为强大的水汽汇, 东亚大陆和印度季风区均有强的辐合中心; 周长艳等^[4]指出, 东亚夏季偏南风水汽输送所能到达的北界为东北北部50°N附近, 西太平洋副高南侧的东南风水汽输送所能到达的西界为甘肃东南部100°E附近。冬季东亚季风区处在冬季风控制下。敖娟等^[5]研究表明, 西风带水汽输送是影响西部地区冬季降水年代际变化的主要原因; 李进等^[6]分析指出东亚大陆在冬季风盛行下, 我国陆地均受西风水汽通量影响, 其中外来水汽输送对黄河流域的水汽贡献甚小; 孙照渤等^[7]研究指出, 影响华北地区冬季降水异常水汽的来源是南海及其以东的西太平洋;

对于我国南方地区, 研究学者指出, 西南地区冬季主要是中纬度的西风水汽输送, 但降水异常与中南半岛整层水汽通量矢量有关^[8]; 华南地区则主要来源于孟加拉湾和南海^[9]。影响中国东南部冬季降水的水汽输送主要有来自西风带绕高原的南支气流, 经过阿拉伯海和孟加拉湾向华南的输送水汽和来自低纬西太平洋经南海向中国西南的水汽输送^[10]。柏睿等^[11]在对1979–2016年我国东北地区空中水汽状况及变化趋势分析中, 对东北地区冬季降水水汽来源进行了研究, 指出水汽来源受东亚季风系统影响明显, 冬季季节水汽主要来源于西风带输送。

辽宁省地处欧亚大陆东岸, 属大陆性季风气候区, 冬季受冬季风影响, 降水相态以雪为主^[12-14], 暴雪是冬季主要气象灾害^[15-17]。据姚学祥^[1]统计, 辽宁省冬半年出现暴雪平均次数为12次, 是我国冬季出现暴雪平均次数最多的省份, 其中辽宁省东部是我国暴雪多发区, 仅次于新疆天山地区, 但目前的研究大多是对冬季季节平均水汽输送特征的

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2020-07-27

基金项目: 中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金项目(2017SYIAE12)资助

作者简介: 高松影(1966–), 女, 辽宁大连人, 高级工程师, 1989年在兰州大学获学士学位, 从事短期天气预报方面研究。

E-mail: ddgsy@163.com.

研究,对东北地区冬季暴雪特别是辽宁省暴雪过程水汽输送特征研究的还不足。随着社会经济的快速发展,冬季暴雪灾害性天气对农业、能源、水资源等方面的影响越来越引起关注,研究辽宁省冬季暴雪过程水汽源地、输送路径、水汽辐合等特征,对提高东北地区冬季降水预报预测水平及研究气候异常、防灾减灾有理论指导意义。

1 资料与研究方法

1.1 资料

美国国家环境预测中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料被我国学者广泛用于降水水汽输送特征研究中^[3-11,17],本文利用1960-2015年(NCEP/NCAR)再分析资料逐日4个时次平均资料及月平均资料(水平格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$),包括1000、925、850、700、600、500、400、300 hPa共8个标准气压层的风场(u 、 v 分量)、比湿(q)以及地表面气压(p_s)及1960-2015年辽宁省52站日降水量资料对辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征进行研究。

1.2 研究方法

水汽通量即水汽输送量,是表征水汽输送的一个物理量,它可以综合反映大气环流和水汽变化对局地降水变化的影响^[18],计算分析水汽通量数值和方向,可以了解降水过程的水汽来源以及这种水汽输送和某些天气系统的关系;水汽通量散度则与降水的落区和强度关系密切^[19]。为综合体现深厚气层中的流场和湿度场,显示出大尺度的环流系统,

在本文研究分析中,计算从地表面开始整层大气积分的水汽通量和水汽通量散度^[4]。

(1)水汽通量的计算^[4]:

因为水汽主要集中在对流层中低层,忽略300 hPa以上大气中的水汽,在 p 坐标系中,由单位时间通过垂直于风向的、底为单位长度、高为整层大气柱的单位面积上的总水汽通量 Q 计算公式为:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (Vq) dp \quad (1)$$

由式(1)得到纬向水汽输送通量 Q_λ 、经向水汽输送通量 Q_φ :

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (uq) dp \quad (2)$$

$$Q_\varphi = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} (vq) dp \quad (3)$$

(2)水汽通量散度 Q_{div} 的计算^[4]:

$$Q_{div} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} \Delta \cdot (Vp) dp = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} V \cdot \Delta q dp + \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q \Delta \cdot V dp \quad (4)$$

式中:右边两项分别为水汽平流引起的水汽通量散度项和风场散度引起的水汽通量散度项。式(1)~式(4)中的 g 为重力加速度; V 为二维风矢量; u 和 v 分别为纬向风速和经向风速; q 为比湿, p_s 为地面气压。

2 冬季平均水汽输送特征

图1为1960-2015年冬季平均的 $15^{\circ} \sim 55^{\circ} N$, $90^{\circ} \sim 150^{\circ} E$ 范围内整层水汽通量合成图,由图可以得出该范围大气整层纬向水汽通量[图1(a)]分布特征: $35^{\circ} N$ 以北中高纬度地区水汽通量为正值,水汽自西向东输送; $35^{\circ} N$ 以南水汽通量为负值,

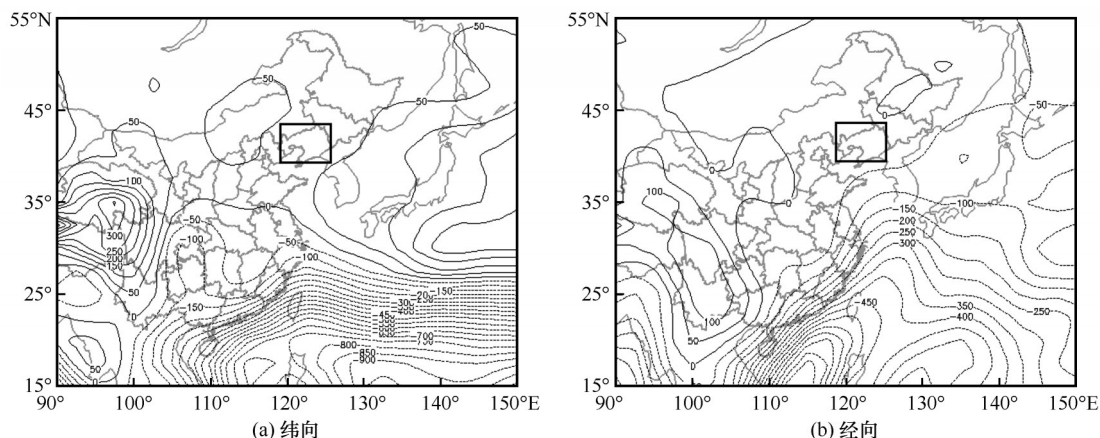


图1 1960-2015年冬季平均整层水汽通量合成图(单位: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, 实线表示向东、向北的输送通量、虚线表示向西、向南的输送通量,方框内为辽宁省)

Fig. 1 The synthetic maps of the average whole layer of water vapor flux in winter from 1960 to 2015 (unit: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) over Liaoning Province (shown in the box): latitude (a) and longitude (b) (solid line representing eastward and northward fluxes; dotted line representing westward and southward fluxes)

水汽自东向西输送, 中心位于热带西太平洋, 水汽输送量远远大于 35°N 以北自西向东的水汽输送量。在辽宁省西边界, 蒙古国东南部到内蒙古中东部、华北北部有水汽通量大值区, 有水汽自西边界流入, 水汽输送量约为 $50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 由此可见冬季辽宁省水汽输送通道主要为中高纬度的纬向西风。崔玉琴^[20]也指出, 在诸水汽源地中, 来自欧亚大陆水汽量为东北地区首位, 尤其在寒季, 所占百分比超过 60%。大气整层经向水汽通量分布[图 1(b)]特征为 35°N 以北中高纬度地区处于弱的水汽通量区, 辽宁省南边界、北边界没有明显的水汽流入、流出。

由以上分析可以看出, 辽宁省冬季降水水汽主要来源于西风带偏西气流输送, 经向水汽贡献很小, 这体现出我国东北地区冬季降水受东亚季风影响的特征。

3 区域暴雪水汽输送特征

暴雪是辽宁省冬季主要灾害性天气, 由于区域

性暴雪影响范围大, 更容易导致灾害的发生, 因此本文主要对辽宁省区域暴雪过程进行研究。定义冬季(11月-次年2月)辽宁省 52 个观测站某日 24 h 降雪量 $\geq 10\text{ mm}$ 的站数达到或超过 5 个为一次区域性暴雪过程。经统计 1960-2015 年辽宁省共有 34 个区域暴雪过程。

3.1 区域暴雪水汽源地

对 1960-2015 年辽宁省冬季 34 个区域暴雪过程整层水汽通量进行合成得到图 2(a), 从中可以看到, 辽宁省冬季区域暴雪过程的水汽输送带主要有两支, 一支来自中高纬西风带偏西气流, 以纬向输送方式自西向东将水汽输送到辽宁省西边界; 另一支来自日本海反气旋性环流南侧偏东气流, 该偏东气流受我国东海岸阻挡分为南北两支, 其中北支气流由向西转向西北偏北方向, 以经向输送方式由南向北将西太平洋、日本海、东海和黄海水汽输送到辽宁省南边界。虽然纬向输送的水汽通量范围和强度比经向水汽通量弱, 但二者的汇合是辽宁省区域暴雪区产生的重要原因。

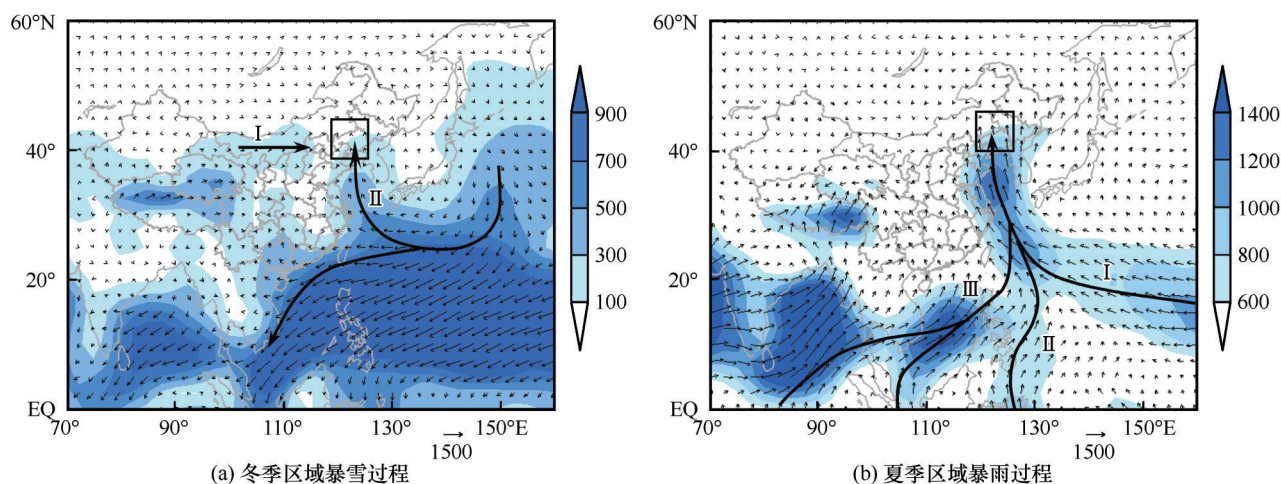


图 2 1960-2015 年辽宁省整层水汽通量合成图(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 方框内为辽宁省)

Fig. 2 The synthetic maps of the whole layer of water vapor flux over Liaoning Province (shown in the box) during 1960-2015 (unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$): winter regional blizzard process (a) and summer regional rainstorm process (b)

由此可见, 辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征有两个, 一是受冬季风影响, 有来自西风带纬向水汽的输送, 二是有来自日本海反气旋性环流经向异常水汽的输送, 这点也是与辽宁省冬季平均水汽输送特征不同的地方。将辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征与辽宁省夏季区域暴雨水汽输送特征[图 2(b)]进行对比分析, 可以得知, 受夏季风影响, 夏季有三支气流由南向北交汇形成强水汽通量带, 经向向辽宁省输送水汽。这三支气流分别是西太平

洋副热带高压西南侧的东南气流, 125°E 附近穿越赤道气流及来自孟加拉湾的西南气流(由中南半岛与 105°E 附近穿越赤道气流在南海汇合而成)。夏季辽宁区域暴雨水汽源地除西太平洋、日本海、东海和黄海外, 还有孟加拉湾及在 105°E 、 125°E 附近跨越赤道气流带来的水汽输送到辽宁省, 但在冬季, 孟加拉湾盛行偏东风, 基本没有水汽向我国输送。

3.2 区域暴雪水汽输送方式

以上分析指出,辽宁省冬季区域暴雪水汽主要来自中高纬西风纬向输送和日本海反气旋环流西南侧偏南气流经向输送,该反气旋环流反映在海平面气压场是在 $20^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{N}$, $125^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$ 范围有闭合高压存在,其中心强度在 1022.5 hPa 以上,将其定义为日本海高压。在辽宁省冬季34个区域暴雪过程中,有28个区域暴雪过程海平面气压场有日本海高压存在,占82.4%,另外有6个区域暴雪过程没有明显日本海高压。由此可见日本海高压是影响辽宁省区域暴雪水汽输送的关键系统。对辽宁省28个区域暴雪过程海平面气压场环流形势进行分析,日本海高压的形成和环流型有三种。第一种是鄂霍次克海至日本海有高压建立和发展,高压中心一般在 35°N 以北、 140°E 附近或以东,高压脊线一般呈

南-北向,这种方式形成的日本海高压强度大,中心气压可达 1035.0 hPa ;第二种是由大陆高压东移经由河套、华北入海,高压中心一般在 30°N 、 140°E 附近或以东,高压脊线一般为准东-西或东北-西南向;第三种是北方蒙古或鄂霍次克海高压主体在 50°N 以北,仅有高压脊东南或南伸至日本海,有时分裂出闭合的高压环流。依照日本海高压形成方式及高压中心的位置和强度,将以上三种环流型的日本海高压定义为偏北型、偏南型和高压脊型。下面分别给出不同环流型日本海高压典型个例的日平均海平面气压场,图3(a)为偏北型日本海高压,选取1990年2月18日日平均海平面气压场;图3(b)为偏南型日本海高压,选取2004年2月21日日平均海平面气压场;图3(c)为高压脊型日本海高压,选取2015年12月1日日平均海平面气压场。

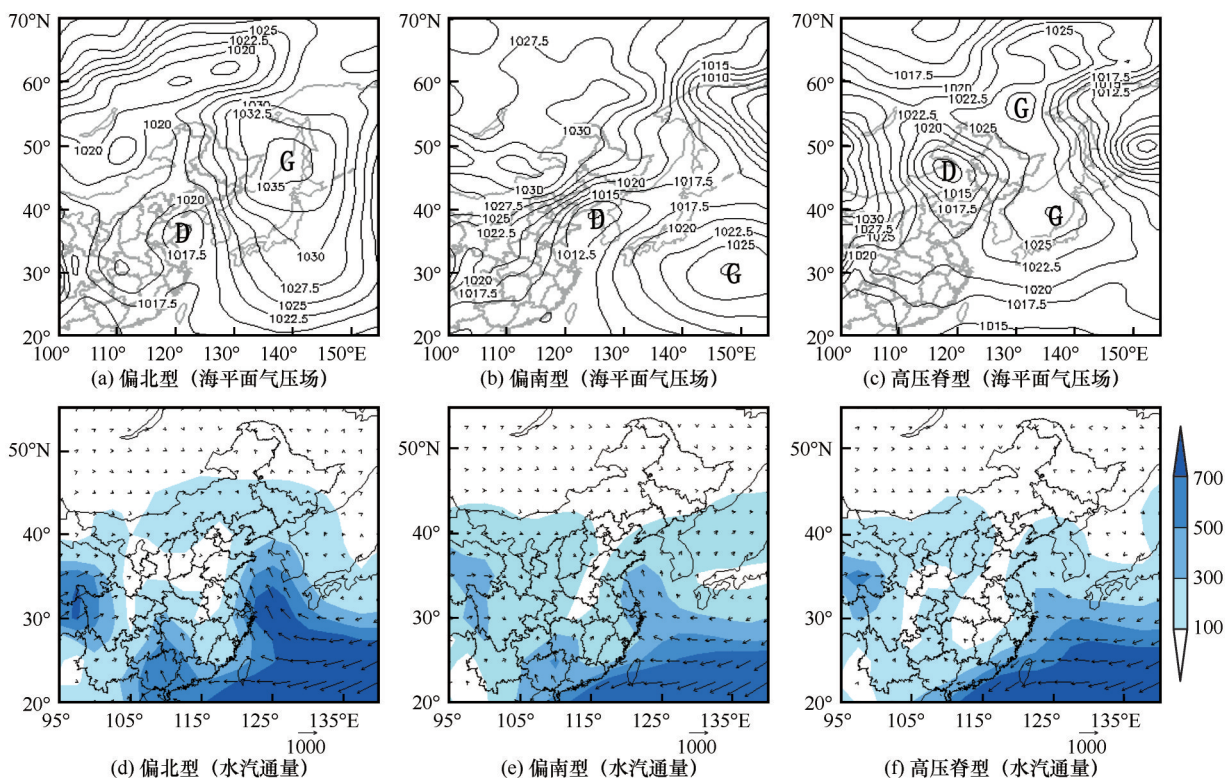


图3 不同类型日本海高压典型日平均海平面气压场(单位:hPa)和辽宁省区域暴雪过程整层水汽通量合成图(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 3 Typical daily average sea level pressure fields (unit: hPa) of Japan Sea High for northerly type (a), southerly type (b) and high pressure ridge type (c) and synthetic map of the whole layer of water vapor flux during heavy snowfall in Liaoning (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) for northerly type (d), southerly type (e) and high-pressure ridge type (f)

图3(d)~3(f)为不同环流型日本海高压暴雪过程整层水汽通量合成图,通过对比分析发现,日本海高压环流型不同,高压西南侧经向水汽输送的路径和水汽输送强度不同,辽宁省区域暴雪分布范围不同。偏北型日本海高压强度大、稳定,高压脊

线近南-北向,水汽输送经向度大,水汽输送最强[图3(d)],整层水汽输送通量 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 北界到达 39°N 附近,对应辽宁省区域暴雪分布范围最大,9个区域暴雪个例中有7个个例暴雪站数超过总站数(52个)的1/3;偏南型日本海高压位置偏

南, 高压脊线近东-西向, 水汽输送经向度较小, 水汽输送强度其次[图 3(e)], 整层水汽输送通量 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 北界在 36°N 山东半岛附近, 6 个区域暴雪个例中有 3 个暴雪个例暴雪站数超过总站数(52 个)的 $1/3$; 高压脊型日本海高压主体在 50°N 以北, 仅有高压脊南伸至日本海, 水汽输送强度最弱[图 3(f)], 整层水汽输送通量 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 在 33°N 还未进入黄海, 13 个区域暴雪个例中只有 2 个个例暴雪站数超过总站数(52 个)的 $1/3$ 。由此可见, 日本海高压强度越强, 位置越偏北, 高压脊线越接近南-北向, 高压西南侧水汽向北经向输送的分量越大, 辽宁省暴雪范围越大。另外, 34 个区域暴雪过程中有 6 个区域暴雪个例海平面气压场没有日本海高压配合, 这种情况下, 造成辽宁省区域暴雪过程的天气系统或为强烈发展的蒙古气旋, 或为北上的江淮气旋等南方气旋或为倒槽发展北上, 蒙古气旋水汽的强烈辐合和南方气旋或倒槽前偏南气流丰沛的水汽输送为辽宁省区域暴雪产生创造

有利条件。

3.3 区域暴雪水汽通量散度

水汽通量散度表征水汽的辐合和辐散, 散度大于零表示水汽辐散, 小于零表示水汽辐合。依据式(4)整层大气的水汽通量散度 Q_{div} 可分解为 2 项, 第 1 项为整层大气湿度平流项, 为正时, 表示某区域整层大气流入气流的比湿低, 流出气流的比湿高, 为水汽源, 则它对该区域水汽输送的辐合是负贡献; 为负时, 表示某区域整层大气流入气流的比湿高, 流出此区域的气流比湿低, 该区域为水汽汇, 它对该区域水汽输送的辐合有正贡献。第 2 项为整层大气风场散度引起的水汽通量散度项, 为正时, 表示整层大气的风场为辐散场, 此项对水汽输送的辐合是负贡献; 为负时, 表示整层大气的风场为辐合场, 对水汽输送的辐合是正贡献^[21]。图 4 是 $20^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $95^\circ \sim 135^\circ \text{E}$ 范围, 不同环流型日本海高压对应的辽宁省冬季区域暴雪过程整层大气湿度平流场和整层大气风场散度场合成图。

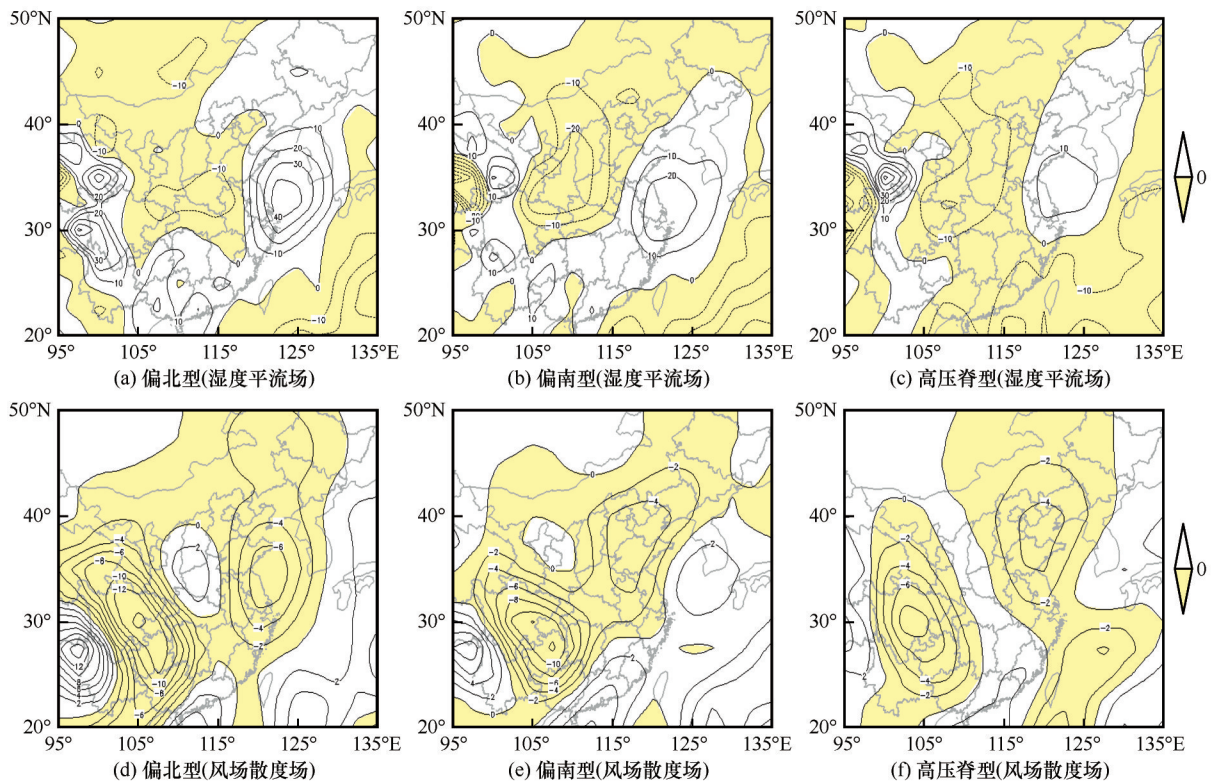


图 4 不同类型日本海高压区域暴雪过程整层湿度平流合成图(阴影为负值区, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和整层大气风辐合(辐散)场合成图(阴影为负值区, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Humidity advection of whole layer in the process of snowstorm (shaded as a negative value area, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in different areas of Japan Sea high pressure area of northerly type (a), southerly type (b) and high-pressure ridge type (c) and the whole layer of atmospheric wind convergence (divergence) field composite map (shaded as a negative value area, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) of northerly type (d), southerly type (e) and high pressure ridge type (f)

由整层湿度平流合成图[图4(a)~4(c)]可以看到,在辽宁省区域暴雪发生期间,东海、黄海为正的湿度平流大值区,中心位于东海北部到黄海南部,说明这个区域流入气流比湿低,流出气流比湿高,是水汽源区域,由此可以直观看出,东海、黄海是辽宁省冬季区域暴雪发生主要和直接的水汽源地,当日本海有高压建立时,其西南侧的偏南气流将东海、黄海的水汽经向输送到辽宁省暴雪区。进一步分析可以看出,3种环流型日本海高压位于东海北部、黄海的正湿度平流大值区范围相差不大,但强度明显不同。偏北型日本海高压正湿度平流大值区强度最强[图4(a)],湿度平流中心值达到 $40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 湿度平流线到达辽宁省 40°N 附近;偏南型日本海高压正湿度平流大值区强度次之[图4(b)],湿度平流中心值为 $20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 湿度平流线在 38°N 附近;高压脊型日本海高压正湿度平流大值区 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 湿度平流线也在 38°N 附近[图4(c)],但湿度平流大值区中心值仅为 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此可见,东海北部、黄海水汽源地的强度决定了辽宁省区域暴雪的范围,偏北型日本海高压水汽源地的强度最强,区域暴雪范围最大,其次为偏南型,高压脊型区域暴雪范围最小。

由整层大气风场散度场合成图[图4(d)~4(f)]可以看到,在辽宁省区域暴雪发生期间,我国东部地区处在风场辐合区,对水汽输送的辐合是正贡献。偏北型日本海高压风场辐合范围最大、强度最强[图4(d)],风场辐合大值区偏东,中心数值达到 $6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;偏南型[图4(e)]和高压脊型[图4(f)]日本海高压风场辐合大值区偏西、偏北,强度偏弱,中心数值为 $4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。分析表明,东海、黄海湿度平流作用和风场辐合作用是辽宁省区域暴雪产生的贡献因子。

4 结论

利用1949–2015年NCEP/NCAR逐日及月平均资料,通过计算分析大气整层水汽通量和水汽通量散度,对辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征进行了研究,结果表明:

(1)受冬季风影响,辽宁省冬季气候平均整层水汽输送以中高纬度纬向西风为主,经向输送基本没有贡献。

(2)辽宁省冬季区域暴雪的产生主要是经向水

汽异常输送的结果,来自日本海反气旋环流西南侧的偏南气流,以经向方式将水汽由南向北输送到辽宁省南边界,来自中高纬的偏西气流,以纬向方式将水汽输送到辽宁省西边界,两支气流输送的水汽在辽宁省汇合。

(3)日本海高压是影响辽宁省区域暴雪水汽输送的关键系统,依照高压强度和位置将其分为偏北型、偏南型和高压脊型,其中偏北型高压向辽宁暴雪区输送的水汽强度最强,对应辽宁省区域暴雪分布范围最大,其次是偏南型和高压脊型。在预报业务中对辽宁省冬季区域暴雪的预报应关注日本海高压的位置和强度。

(4)辽宁省区域暴雪水汽源地主要有西太平洋、日本海、东海和黄海,不像夏季受夏季风影响,有来自孟加拉湾及南半球越赤道气流带来的水汽。东海、黄海是辽宁省区域暴雪主要和直接的水汽源地;东海、黄海湿度平流作用和风场辐合作用是辽宁省区域暴雪产生的贡献因子,偏北型日本海高压东海、黄海湿度平流作用贡献最大。

参考文献(References):

- [1] Yao Xuexiang. The weather forecast techniques and approaches [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011. [姚学祥. 天气预报技术与方法[M]. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [2] Zheng Gaoguang, Jiao Meiyan, Ding Yihui, et al. Climate in China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2019. [郑国光, 矫梅燕, 丁一汇, 等. 中国气候[M]. 北京: 气象出版社, 2019.]
- [3] Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. Moisture transportation in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(1): 59–70. [周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J]. 气象学报, 2008, 66(1): 59–70.]
- [4] Zhou Changyan, He Jinhai, Li Wei, et al. Climatological characteristics of water vapor transfer over East Asia in summer[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(1): 18–27. [周长艳, 何金海, 李薇, 等. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 18–27.]
- [5] Ao Juan, Sun Jianqi. Difference of water vapour transportation in the interannual and decadal variations of winter precipitation over western China[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(4): 497–506. [敖娟, 孙建奇. 中国西部冬季降水年际与年代际变化的水汽输送差异[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 497–506.]
- [6] Li Jing, Li Dongliang, Zhang Jie. Characteristics of water vapor transportation and budget of winter and summer in the Yellow River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(2): 342–350. [李进, 李栋梁, 张杰. 黄河流域冬、夏季水汽输送及收支特征[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 342–350.]
- [7] Sun Zhaobo, Liu Hua, Ni Donghong. Characteristics of North China winter precipitation anomaly and its relationship with atmospheric circulation and SST[J]. Transactions of Atmospher-

- ic Sciences, 2017, 40(5): 577 – 586. [孙照渤, 刘华, 倪东鸿. 中国华北地区冬季降水异常特征及其与大气环流和海温的关系[J]. 科学学报 2017, 40(5): 577 – 586.]
- [8] Zhang Wancheng, Wan Yunxia, Ren Juzhang, et al. Analysis of water vapor transportation and its influence on rainfall anomaly in Yunnan autumn and winter of 2009[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(6): 1534 – 1542. [张万城, 万云霞, 任菊章, 等. 水汽输送异常对 2009 年秋、冬季云南降水的影响研究[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1534 – 1542.]
- [9] Wu Wei, Wen Zhiping, Chen Yunguang, et al. Interannual variability of winter and spring precipitation in South China and its relation to moisture transport[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(2): 187 – 196. [吴蔚, 温之平, 陈运光, 等. 华南冬春降水的年际变化及其与水汽输送的联系[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 187 – 196.]
- [10] Chen Yingman, Cao Jie, Wang Chuanhui. Precipitation variation over southeastern China in winter and its circulation pattern[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(3): 323 – 330. [陈颖曼, 曹杰, 王传辉. 中国东南部冬季降水变化及其环流特征[J]. 大气科学学报, 2013, 36(3): 323 – 330.]
- [11] Bai Rui, Li Ren, Wu Tonghua, et al. Air moisture condition and change trend in Northeast China, 1979 – 2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1441 – 1447. [柏睿, 李韧, 吴通华, 等. 1979 – 2016 年我国东北地区空中水汽状况及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1441 – 1447.]
- [12] Zou Xudong, Zhang Feimin, Wang Chenghai, et al. The relationship between winter precipitation and eastern Asian winter monsoon in North-east China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1454 – 1461. [邹旭东, 张飞民, 王澄海, 等. 我国东北地区冬季降水和东亚冬季风的关系研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1454 – 1461.]
- [13] Zhu Ling, Gu Zhengqiang, Gong Qiang, et al. Effect of snow cover on ground-air temperature difference observed by automatic weather stations in Liaoning Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2): 293 – 303. [朱玲, 顾正强, 龚强, 等. 辽宁省积雪对自动气象站观测地气温差的影响[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 293 – 303.]
- [14] Cui Jin, Zhou Xiaoshan, Yan Qi, et al. Snow-to-liquid ratio variation and its atmospheric influence factors in Shenyang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1508 – 1514. [崔锦, 周晓珊, 阎琦, 等. 沈阳降雪含水比变化特征及其大气影响因子[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1508 – 1514.]
- [15] Han Xiujun, Jia Xuxuan, Shen Yuan, et al. The snow disaster zoning and the snowfall impact pre-assessment in Liaoning Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 21 – 27. [韩秀君, 贾旭轩, 申远, 等. 辽宁雪灾区划及降雪影响预评估[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 21 – 27.]
- [16] Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Cui Yan, et al. Variation characteristics of different levels of snow in Liaoning Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 720 – 732. [周晓宇, 赵春雨, 崔妍, 等. 辽宁省不同等级降雪变化特征[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 21 – 27.]
- [17] Yan Qi, Jiang Dakai, Chen Chuanlei, et al. Climatic characteristics of regional snowstorm from 1960 to 2009 in Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(4): 43 – 48. [阎琦, 蒋大凯, 陈传雷, 等. 1960 – 2009 年辽宁区域性暴雪气候特征[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(4): 43 – 48.]
- [18] Ren Hongli, Zhang Peiqun, Li Weijing, et al. Characteristics of precipitation and water vapor transport during springtime in the Eastern Northwest China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(3): 365 – 374. [任洪利, 张培群, 李维京, 等. 中国西北部地区春季降水及其水汽输送特征[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 365 – 374.]
- [19] Liu Jianwen, Guo Hu, Li Yaodong, et al. The weather analysis forecast quantity calculation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. [刘建文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社, 2005.]
- [20] Cui Yuqin. Budget condition of water vapor over northeast China and its source[J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(15): 80 – 87. [崔玉琴. 东北地区上空水汽平衡状况及其源地[J]. 地理科学, 1995, 15(15): 80 – 87.]
- [21] Huang Ronghui, Chen Jilong. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(6): 1035 – 1045. [黄荣辉, 陈际龙. 我国东 – 西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1035 – 1045.]

Transporting characteristics of snowstorm water vapor over Liaoning Province in winter

GAO Songying¹, ZHAO Tingting², SONG Lili¹, BAI Hua³, XU Lulu¹,
LI Ruihan¹, MENG Xin¹

(1. Dandong Meteorological Observatory, Dandong 118000, Liaoning, China; 2. Liaoyang Meteorological Observatory, Liaoyang 111000, Liaoning, China; 3. Shenyang Meteorological Bureau, Shenyang 110168, China)

Abstract: Using the daily and monthly average data of NCAR/NCEP from 1949 to 2015, the characteristics of the snowstorm water vapor transport over Liaoning Province in winter were studied. The results show that: under the influence of winter monsoon, the characteristics of the average winter water vapor transport over the province was that the water vapor mainly came from the middle latitude of the western boundary and there was no water vapor input in the meridional direction of the westerly, however, the occurrence of regional snowstorm was the result of the abnormal transport of water vapor in the meridional direction. There were two main water vapor transport belts. One was the mid-high latitude westerly belt airflow, and the other one was the northern branch of the northeast flow of the anticyclonic circulation over the south side of the Japan Sea. The two water vapor belts converged in Liaoning. Snowstorm water vapor sources mainly included the Western Pacific, the Japan Sea, the East China Sea and the Yellow Sea. The East China Sea and the Yellow Sea were the main and direct sources of water vapor. The Japan Sea high pressure was the key system for the transportation of snowstorm water vapor in Liaoning Province. There was Japan Sea high pressure in sea level pressure field during 82.4% of the snowstorm process in Liaoning Province. According to the location and intensity of the Japan Sea high pressure, it would be divided into northerly, southerly and high-pressure ridge types. Different types of high-pressure water vapor transmission intensity were different, corresponding to the intensity and distribution range of snowstorm in Liaoning Province. The north-north type (high-pressure center was north of 35° N, near or east of 140° E) had the strongest water vapor transmission, and the distribution range of the snowstorm was the largest. The southerly type (high-pressure center was near or east of 30° N, 140° E) had the second strongest water vapor transmission, and the distribution range of the snowstorm was small. High-pressure ridge type (with high-pressure ridges extending southeast or south to the Japan Sea) had the weakest water vapor transmission, and the distribution range of the snowstorm was the smallest. During the occurrence of snowstorm in Liaoning, the East China Sea, as well as the Yellow Sea, was a large area of positive humidity advection, which was the source of water vapor, and Liaoning Province was within the convergence of the wind field. Among them, the northerly area snowstorm was the largest and strongest in the water vapor source area in the north and south of the Yellow Sea. The corresponding wind field convergence area was also largest in range and strongest in strength. The advection of the water vapor in the East China Sea and the Yellow Sea and the convergence of the wind field were the contributing factors for the snowstorm in Liaoning Province.

Key words: Liaoning Province; snowstorm; water vapor transport; Japan Sea high pressure

(责任编辑: 孙建奇; 编辑: 庞瑜, 周成林)