

2018 年 1 月江苏两次暴雪过程积雪效率差异及其机理研究

韩汶君¹ 虞越越^{*1} 周雨蒙¹ 陈圣劼^{*2,3} 管兆勇¹ 黄蔚¹ 吴雯璐¹ 廖良

梦¹

¹ 南京信息工程大学 大气科学学院, 南京 210044

² 江苏省气象台, 南京 210008

³ 中国气象局交通气象重点实验室, 南京 210008

摘要 2018 年 1 月 3-5 日江苏第一次暴雪过程中降雪量大、积雪效率偏低, 而 1 月 24-28 日第二次暴雪过程降雪量小、积雪效率高。基于 ERA-Interim 再分析资料和中国气象局积雪、近地气温等观测资料, 利用等熵大气质量环流理论从温度、水汽条件差异对 2018 年 1 月江苏两次暴雪过程积雪效率差异进行了深入分析。研究表明: (1) 第一次过程前期, 深厚且强盛的向极地暖支将大量暖空气输送至江苏南部, 导致该地区整层增温; 第二次过程中, 低层强大的向赤道冷支输送使地面温度在整个降雪期间均低于 0℃, 低温条件使得积雪效率偏高; (2) 第一次过程, 江苏地区深厚、强盛的水汽质量辐合层配合大范围上升运动, 将水汽携带至高层产生更大降雪量, 低层经向水汽质量输送强, 纬向水汽质量辐散较弱, 使得近地面比湿相应增加, 积雪效率偏低; 第二次过程, 低层深厚的水汽质量辐散层不利于水汽在江苏汇聚, 低湿条件利于积雪累积, 贡献于偏高的积雪效率。因此, 异常强的经向干冷空气质量输送和弱的经向和纬向水汽质量输送引起的低温、低湿环境条件是造成第二次暴雪过程比第一次过程积雪效率偏高的主要原因。积雪效率与温度和湿度空间分布型的对比分析还表明: 在相对高温、高湿的环境条件下, 积雪效率对局地温度和湿度的响应更为敏感。

关键词 积雪效率; 积雪深度; 温度; 湿度; 等熵大气质量环流

文章编号 2021065A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21065

收稿日期 2022-1-14; **网络预出版日期**

作者简介 韩汶君, 女, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要研究热带气旋及其动力学特征。

E-mail: 1399765020@qq.com

通讯作者 虞越越, E-mail: yuyy@nuist.edu.cn; 陈圣劼, E-mail: chenshengjieshez@163.com

资助项目 国家重点研发计划资助 2019YFC1510201, 江苏省自然科学基金资助 BK20211288, 国家自然科学基金资助 42075052, 国家级大学生创新训练项目 201810300051, 国家科技支撑计划 2011BAK21B00, 中国气象局预报员专项项目 CMAYBY2019-040, 江苏省气象局科研项目 KM202001

Funded by National key research and development program (Grant 2019YFC1510201), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant BK20211288), National Science Foundation of China (Grant 42075052), National College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program (Grant 201810300051), National Key Technology R&D Program (2011BAK21B00), Special Project for Forecasters of China Meteorological Administration (CMAYBY2019-040), Scientific Research Projects of Jiangsu Meteorological Bureau (KM202001)

On the snow accumulation efficiency difference during the two snowstorm events in Jiangsu in January 2018

HAN Wenjun¹ YU Yueyue^{*1} ZHOU Yumeng¹ CHEN Shengjie^{*2,3} GUAN Zhaoyong¹

HUANG Wei¹ WU Wenlu¹ LIAO Liangmeng¹

¹ College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

³ Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210008

Abstract The first snowstorm event occurred in Jiangsu during January 3-5, 2018 had larger snowfall but lower snow accumulation efficiency, while the following second snowstorm event during January 24-28 had smaller snowfall but higher snow efficiency. Using the ERA-Interim reanalysis data and the observation data from the China Meteorological Administration, this study investigated the temperature and humidity conditions in these two snowstorm events and explored the underlying physical processes in the framework of isentropic atmospheric mass circulation. Main results are as follows: (1) The early stage of the first snowstorm event was characterized by higher temperature in the entire troposphere, which was attributed to a relatively deeper and stronger poleward warm air branch of isentropic atmospheric mass circulation to the south of Jiangsu, compared to the second snowstorm event. In contrast, in the second snowstorm event, the stronger equatorward cold air branch of isentropic atmospheric mass circulation resulted in the temperature lower than 0°C, which promoted the higher snow accumulation efficiency. (2) The deep water vapor convergence layer in lower isentropic layers collaborated with the wide range of ascending motions during the first snowstorm, and further brought lower-level water vapor to higher layer for the formation of larger snowfall. Larger meridional water vapor transport but weak zonal water vapor divergence in the low isentropic layers caused the near-ground specific humidity to increase significantly and thus contributing to the lower snow accumulation efficiency. However, in the second snowstorm event, there was a deep layer of water vapor divergence in the lower isentropic layers, which contributed to the larger snow accumulation efficiency. Therefore, colder and dryer conditions resulting from the abnormal meridional cold air transport and weak water vapor transport in both meridional and zonal directions are the key factors for the higher snow efficiency in the second snowstorm event. The comparison of spatial distribution of temperature and humidity with that of the snow efficiency further shows that the snow efficiency is more sensitive to the local temperature and humidity under the condition of high temperature and humidity.

Keywords Snow accumulation efficiency; Snow depth; Temperature; Humidity; Isentropic atmospheric mass circulation

1 引言

暴雪是冬季最主要的灾害性天气之一,主要表现为大范围、高强度降雪,伴有寒潮、大风和气温骤降等现象,严重威胁农业、畜牧业、交通运输、通讯电力和生产生活甚至生命和财产安全(Molarius et al., 2014; 杨琨等, 2013; 陈丽芳, 2013; 姚晨等, 2018)。暴雪天气的准确预报,可大大规避其带来的风险及灾害,具有重要的社会经济价值,是气象科研和业务部门重点关注的对象。我国地域辽阔、南北横跨中低纬度,冬季在多个省市都有极大可能出现暴雪灾害(杨琨等, 2013),如:2008年1月安徽中部与皖南出现30-45cm积雪,严重影响水电供应以及交通运输安全,是建国以来安徽省受影响程度最深、损失最为惨重的一次雪灾(周后福等, 2008);2011年1月17-19日受暴雪、冰冻天气影响,湖南省国省干线有14条国省道和19处路段因强降雪交通中断,湖北6市州22县区146.4万人遭受低温冰冻和雨雪灾害,农作物受灾面积55960hm²,绝收面积2343hm²,直接损失高达5.98亿元(姚蓉等, 2012)。

暴雪预报相较于暴雨预报需要考虑更多的物理量因子(周石砢等, 2002; 李隆基等, 2017)、更复杂的物理过程,要提供更丰富的服务信息。暴雪是低温、充沛水汽和特定环流形势等多个条件共同作用的结果。学者们多关注暴雪成因,以期提高对降水性质的判断能力及强降雪落区和强度的预报水平。温度条件方面:甘文强(2018)发现,降雪时温度层结具有显著冷性结构,云顶或逆温底端的温度低于-10℃,适宜冰晶形成;冷暖空气的配置也十分关键,比如中低空暖湿空气在回流干冷空气上爬升造成锋生,是北京暴雪的主要成因之一(吴庆梅等, 2014),这种与降雪发生发展紧密相关的温度条件与经向风的增大和冷暖平流有关(张备等, 2012),也与平流层极涡的强度和位置变化有关(Zhang et al., 2016; Huang et al., 2017; Zhang et al., 2020);有研究指出,暴雪天气还常伴有850hPa-925hPa逆温层的维持(杨璐璐等, 2018),温度层结的变化对降雪相态具有重要影响(甘文强等, 2018)。此外,充沛的水汽条件也不可或缺,大范围的湿度区、湿位涡大值区往往能指示降雪落区和降雪强度(刘梅等, 2008; 姜有山等, 2017),观测数据分析与WRF中尺度数值模拟均验证了持续水汽辐合可导致暴雪的产生(姚蓉等, 2012; 沈玉伟和孙琦旻, 2013)。高湿区还需要配合强烈的辐合上升运动,才能将低层水汽抬升至高层,在此过程中绝热冷却、凝结成雪并降落,因此上升运动可决定降雪的相态变化程度,是暴雪的动力条件(甘文强等, 2018; 张俊兰等, 2017; 杨成芳等, 2008; Martin et al., 1998b)。特定环流形势有利于水汽输送和上升运动的维持和加强,也是暴雪形成与发展的指示因子。比如:乌拉尔山阻塞高压和孟加拉湾南支槽稳定维持,形成“南低北高”的环流形势有利于暖气流在长江中下游一带汇合(陈红专等, 2012),南支槽前西南暖湿气流的强烈输送(王东海等, 2008),为持续暴雪发生提供了良好的大尺度环流背景;低层辐合、高层辐散的配置形势可产生强烈的上升运动,对降雪强度起着重要调控作用(沈玉伟等, 2013);风速脉动的下游地区往往有强降水发展,强急流带的出现是夜间降雪量骤增的主要原因(尹东屏等, 2012; 2009);偏弱的冬季北半球极涡利于冷空气南压,造成我国南方地区出现大范围雨雪天气(刘超等, 2018)。我国的降雪影响系统还具有多样性和南北差异,既可由气旋发展北上而形成,也可以由北支槽波动合并南下时的冷暖空气交绥而导致(刘超等, 2018)。

暴雪预报除了雪量的预报,更需关注雪深(杨成芳和刘畅, 2019; Martin et al., 1998a; 顾佳佳和武威, 2015)。不同雪深对城市运行和农业产生的影响及对应的灾害防御管理措施有显著差异。积雪深度与降雪量并不完全对应,积雪增量与降雪量的比值——积雪效率——可用于表征相同降雪量条件下雪深受其他多种因素的影响情况(杨琨等, 2013; 尹东屏等, 2009; 杨成芳等, 2015; 白淑英等, 2014; 李德俊等, 2014)。前人关于积雪效率的影响因子研究发现,低温和低湿是提高积雪效率的两个重要条件。在某些地区由于空气湿度大、有降水或雨夹雪的情况,或地面温度较高,积雪容易融化,积雪效率低;而在无液态降水、地面较为干燥的情况下雪深和雪量才呈正相关线性关系(尹东屏等, 2009; 白淑英等, 2014; 李德俊等, 2014; 周之栩等, 2018; 胡淑娟等, 2016)。暖湿的南方比干冷的北方积雪效率低也可由温湿条件差异解释(姚晨等, 2018)。此外,风速低(李德俊等, 2014; 周之栩等, 2018)、净辐射-地面温度-积雪效率之间的正反馈(刘超等, 2018)也有利于积雪效率的增长。胡淑娟(2016)等人还对影响新疆地区积雪深度变化的因素贡献进行了排序:土壤地表温度>净辐射>空气温度>土壤体含水量>风速>空气相对湿度>降水>水汽压的大小。然而,关于雪深及积雪效率的研究多着眼于单一气象要素的定性分析,鲜有对影响雪深的物理过程的具体、定量分析;且多为个例研究,结论不一定具有普遍代表性,需要更多的典型个例进行补充验证。

江苏省自北向南有沂沭河、淮河与长江三大水系,地形平坦,属东亚季风气候区。近年来,在全球气候变暖影响下,江苏冬季出现气候异常事件的次数有所增长(吴庆梅等, 2014),罕见低温、暴雪等已成为江苏的主要气候灾害之一(傅云燕等, 2013)。2018年1月3-5日和24-28日,江苏地区发生了两次暴雪天气过程。3-5日,江苏省多市降雪量超过35mm,六合、浦口、南京站的4日降水量突破各站1月日降水量极值,成为近5年来江苏最大的一次降雪。24-28日的第二次暴雪天气使江南地区气温出现入冬以来的最低值,平均气温较常年同期偏低4℃以上,8个县市日最低气温跌破历史极值,江苏中南部最大积雪深度5-15cm,江苏西南部深度达20-32cm。这次连续性暴雪天气过程使不少站点出现继2008年以来雪量最大、积雪最深的一次降雪,有些站点甚至突破了历史极值(傅云燕等, 2013)。值得注意的是,4日江苏南部大部分地区出现本次降雪量极值,达28mm以上,而第二次过程的降雪量和降雪范围远不及第一次,在此降雪情况下,第二次的积雪深度却与第一次相当,在江苏西南部分地区积雪深度高达23cm,超过了第一次暴雪过程。这表明,2018年1月江苏两次降雪过程的积雪效率存在显著差异。也有研究指出,两次降雪过程有明显的“干湿雪”之分,第一次过程为“湿雪”,第二次过程为“干雪”(李正金等, 2018)。因此,这两次降雪过程是研究积雪效率影响因素的典型个例。

本文围绕2018年1月江苏两次降雪过程,采用ERA-Interim每6时再分析资料,对比考查两次降雪过程中温度、湿度和动力条件及其对积雪效率的影响,应用等熵质量环流理论定量分析暴雪过程中决定温度变化的冷暖空气质量输送和决定湿度变化的水汽质量输送过程,探究了持续性暴雪天气过程中影响积雪效率和积雪深度的气象条件及其环流成因,以期积雪深度的业务预报提供重要参考。

2 资料及方法

2.1 资料

本文采用 2018 年 1 月 ERA-Interim 再分析资料 (ECMWF, 2012; Simmons et al., 2006; Dee et al., 2011) 的每 6 小时水平风速、位势高度、温度、垂直速度、比湿场格点数据, 水平分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, 垂直方向上将 1000-hPa 空气层分为 37 层等压面。采用 NCEP/NCAR Reanalysis 1 再分析资料的 对流层顶温度和气压数据计算了对流层顶位温。文中的观测数据来自中国气象局提供的逐日 08 时积雪资料 (单位: cm)、中国地面日值资料和江苏省气象局提供的逐时降水量资料 (单位: mm), 均为 2018 年 1 月江苏省 70 个基准观测站数据。

2.2 方法

2.2.1 积雪效率

积雪效率定义为积雪增量与降雪量的比值, 作为衡量单位时间内的降雪在地表累积的程度。计算公式如下:

$$\text{当日积雪效率} = \frac{\text{当日积雪增量}}{\text{当日降雪量}} \quad (2.1)$$

其中, 积雪增量单位为 cm, 降雪量单位为 mm, 积雪效率单位为 cm/mm。积雪深度为当日 08 时观测数据, 积雪增量为后一日积雪深度减去当日积雪深度, 降雪量为当日 09 时至后一日 08 时降雪量总和, 如 1 月 3 日降雪量为 1 月 3 日 09 时至 1 月 4 日 08 时降雪量总和。

2.2.2 地面观测比湿

根据中国气象局提供的地面日值资料中的温度、相对湿度和气压数据, 首先得到地面饱和水汽压, 公式如下:

$$e_s = e_{s0} \cdot e^{\frac{a \cdot t}{t - b + 273.15}} \quad (2.2)$$

其中, $a = 17.269$; $b = 35.86$; $e_{s0} = 6.1078$ 。

然后根据相对湿度公式: $rh = e/e_s$ 得到地面水汽压 e , 根据下列公式得到比湿 q :

$$q = 0.622 \times \frac{e}{p_s - 0.378 \times e} \quad (2.3)$$

其中 p_s 为已知地面气压。

2.2.3 经向、纬向大气质量通量及其散度

为了定量表征江苏地区冷暖空气的输送情况, 本文参考 Pauluis 等 (2008; 2010) 和 Yu (2014; 2015) 的方法, 利用 ERA-Interim 资料提供的气象变量, 计算了经向大气质量通量和纬向大气质量通量。首先计算两段暴雪期间江苏地区地面及三维位温 (分别记为 θ_s 和 θ)。需要注意的是难免出现等压面与地面相交的情况, 有一些数据是位于地表或地面以下。为了保证所用数据均为真实大气所存在的区域, 我们对资料进行预处理: ERA-Interim 资料垂直方向有 1000 hPa, 975 hPa, 950 hPa, 900 hPa, ..., 1 hPa 共 37 层, 对于地面气压低于 1000 hPa 的格点, 如气压为 901 hPa, 筛选出气压 ≥ 901 hPa 即地面及以上的现有等压面数据, 加上地面层 (即 901 hPa, 对应地面变量值); 对于地面气压高于 1000 hPa 的格点, 如气压为 1001 hPa, 地面及以上部分为 ≥ 1001 hPa, 所有等压面数据可用, 但需加上地面层 (即 1001 hPa, 对应地面变量值)。预处理后将原始变量资料插值到从 $\sigma = 1$ 到 $\sigma = 0$ 的 200 层等间距 ($\delta\sigma = 0.05$) 的 sigma 面上。具体计算过程如下:

每个格点相邻等 sigma 面的气块质量 (δm_σ) 由下式计算可得:

$$\delta m_\sigma = p_s \cdot \frac{\delta\sigma}{g}, \quad (2.4)$$

其中, p_s 表示地面气压, g 表示重力加速度, $\delta\sigma$ 表示两层 sigma 面的间距。

将地面到对流层顶附近划分成 14 个等熵面 (等位温面), 分别为: 260 K, 270 K, 280 K, 290 K, 300 K, 310 K, 320 K, 330 K, 340 K, 350 K, 360 K, 370 K, 380 K, 390 K, 记为 θ_n ($n=1,14$)。通过这 14 个等熵面的分割, 我们得到 13 个等熵层。相邻等熵面 θ_n 和 θ_{n+1} 围成的等熵层内的经向大气质量通量 (mv) 和纬向大气质量通量 (mu) (记在较低等熵面 θ_n 上) 计算方法如下:

$$mv(\lambda, \varphi, \theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_\sigma(\lambda, \varphi, \sigma, t) v(\lambda, \varphi, \sigma, t) Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_n, \theta_{n+1}) R \cos(\varphi) \Delta \lambda d\sigma \quad (2.5a)$$

$$mu(\lambda, \varphi, \theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_\sigma(\lambda, \varphi, \sigma, t) u(\lambda, \varphi, \sigma, t) Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_n, \theta_{n+1}) R \cos(\lambda) \Delta \varphi d\sigma \quad (2.5b)$$

其中, φ 表示半格点纬度, u 、 v 分别表示纬向风和经向风速度, θ_n 和 θ_{n+1} 表示两相邻等熵面, Y 函数的定义为: 当 $\theta_n \leq \theta(\lambda, \varphi, \sigma, t) < \theta_{n+1}$ 时, $Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_n, \theta_{n+1}) = 1$, 否则 $Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_n, \theta_{n+1}) = 0$; R 表示地球半径 ($R = 6378\text{km}$); $\Delta\varphi$ 表示纬向格距, $\Delta\lambda$ 表示经向格距, 均为 0.75° ; mu 和 mv 的单位为 kg/s 。

除这 13 层等熵层外, 还有近地层 (其质量通量记在 250K 等熵面), 即: 地面位温层 θ_s 至 $\theta_1 = 260\text{K}$ 围起来的等熵层间经向质量通量为:

$$mv(\lambda, \varphi, \theta_s, t) = \int_0^1 \delta m_\sigma(\lambda, \varphi, \sigma, t) v(\lambda, \varphi, \sigma, t) Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_s, \theta_1) R \cos(\varphi) \Delta \lambda d\sigma \quad (2.6a)$$

$$mu(\lambda, \varphi, \theta_s, t) = \int_0^1 \delta m_\sigma(\lambda, \varphi, \sigma, t) u(\lambda, \varphi, \sigma, t) Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_s, \theta_1) R \cos(\lambda) \Delta \varphi d\sigma \quad (2.6b)$$

将相邻等熵面的经向质量通量沿纬圈进行积分, 可得等熵层内江苏区域经度范围内沿纬圈积分 ($116.25-121.5^\circ\text{E}$) 的经向质量通量 ($[mv]$), 其计算方法如下:

$$[mv](\varphi_j, \theta_n, t) = \sum_{i=60}^{67} mv(\lambda_i, \varphi_j, \theta_n, t) \quad (2.7a)$$

等熵层内江苏区域纬度范围内沿经圈积分 ($30-36^\circ\text{N}$) 的纬向质量通量 ($[mu]$), 其计算方法如下:

$$[mu](\lambda_i, \theta_n, t) = \sum_{j=37}^{45} mu(\lambda_i, \varphi_j, \theta_n, t) \quad (2.7b)$$

将等熵经向质量通量进行经向差分运算得到等熵经向质量通量散度。与一般散度风计算公式相比, 等熵经向质量通量散度强调等熵层内的空气质量的净流入流出情况, 散度 >0 , 表示有净的空气质量流出; 散度 <0 , 表示有净的空气质量流入。其计算方法如下:

$$[mvd](\varphi_j, \theta_n, t) = [mv](\varphi_j, \theta_n, t) - [mv](\varphi_{j-1}, \theta_n, t) \quad (2.8)$$

2.2.4 经向、纬向水汽质量通量

为了表征水汽输送情况, 结合比湿数据同理计算相邻等熵面的经向和纬向水汽质量通量, 单位 kg/s :

$$mvq(\lambda, \varphi, \theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_\sigma(\lambda, \varphi, \sigma, t) v(\lambda, \varphi, \sigma, t) q(\lambda, \varphi, \sigma, t) Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_n, \theta_{n+1}) R \cos(\varphi) \Delta \lambda d\sigma, \quad (2.9a)$$

$$\begin{aligned} & \mu q(\lambda, \varphi, \theta_n, t) \\ & = \int_0^1 \delta m_\sigma(\lambda, \varphi, \sigma, t) u(\lambda, \varphi, \sigma, t) q(\lambda, \varphi, \sigma, t) Y(\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \theta_n, \theta_{n+1}) R \Delta \varphi d\sigma, \end{aligned} \quad (2.9b)$$

其中, q 表示比湿。江苏地区沿经圈和纬圈积分的水汽质量通量计算方式同公式 (2.5), 在此不再赘述。

3 降雪实况概述

第一次降雪过程为 1 月 3-5 日, 第二次降雪过程为 24-28 日, 26 日降雪存在短暂的停歇。日累积降雪量的分布图 (图 1a-c、图 2a-e) 显示: 第一次和第二次降雪落区主要都集中在苏西南无锡、常州等大部分区域; 两次过程的降雪量都呈现出由南向北递减的分布特征。第一次降雪过程中, 日降雪量 20mm 以上的范围覆盖整个淮南地区, 第二次降雪过程 20mm 以上的日降雪量只在 27 日苏南边界出现, 可见第一次降雪过程比第二次降雪过程的降雪强度大、范围广。

两次降雪过程的 08 时积雪深度 (图 1d-f、图 2f-j), 相较于日降雪量在时间上有所滞后, 且其分布特征与降雪量存在一定的差异, 第一次降雪过程展现出来的差异尤为显著。第一次积雪深度大值区域偏北, 主要位于盱眙、六合、浦口, 而降雪量较小的淮北区域积雪深度反而大于苏南。第二次积雪深度同降雪量分布基本吻合, 呈现由南向北递减的特征。此外, 第二次降雪过程在降雪量远小于第一次的情况下, 积雪深度却与第一次相差不大, 甚至在 27-28 日皖南常州、无锡等地雪深超过了第一次, 说明两次降雪过程的积雪效率存在较大差异。

图 1g-i 和图 2k-o、图 1j-l 和图 2p-t 分别给出的是江苏两次降雪过程的积雪增量以及积雪效率 (积雪增量与日降雪量的比值)。如图所示, 两次过程的积雪增量的量值相当, 其事件演变特征类似, 降雪过程初期都在淮北出现了较大的积雪效率, 后期由于积雪开始融化且没有降雪的补充, 在 5 日和 28 日都出现了融雪 (积雪效率负值区)。但是, 第二次的积雪效率整体大于第一次。在第一次降雪过程中, 3、4 日, 积雪效率普遍在 0.5-2cm/mm 之间, 最大不超过 5cm/mm; 积雪效率大值区主要位于淮北地区, 而在苏南和江淮南部, 积雪效率近似为 0。在第二次降雪过程中, 24 日淮北一带和 26 日苏南一带都出现 5cm/mm 以上的积雪效率大值区, 24 日积雪效率大值区域 (2cm/mm 以上) 位于淮北一带, 与第一次积雪效率大值区相比, 其位置更偏南, 说明第二次降雪期间, 南方地区满足了某种利于积雪的天气条件。下文将聚焦温度和湿度条件, 揭示造成两次降雪过程积雪效率差异的主要气象因子及其相对重要性。

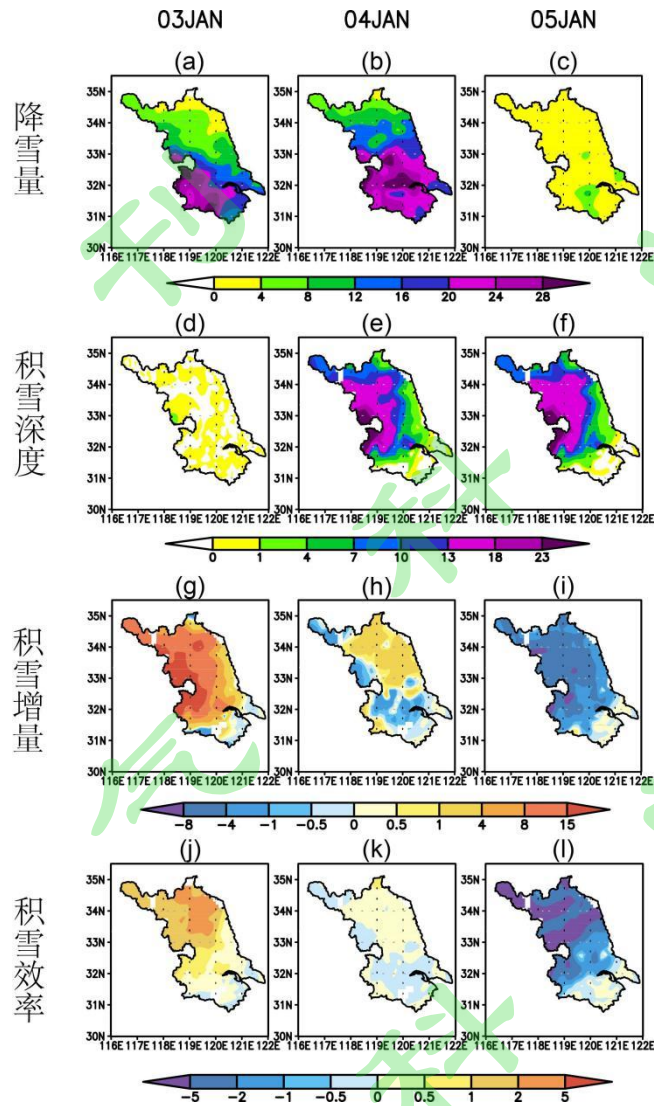


图 1 2018 年 1 月 3-5 日降雪实况：(a-c) 降雪量（单位：mm）、(d-f) 积雪深度（单位：cm）、(g-i) 积雪增量（单位：cm）、(j-l) 积雪效率（单位：cm mm⁻¹）

Fig. 1 The snowfall (a-c, units: mm), snow depth (d-f, units: cm), snow accumulation increment (g-i, units: cm) snow accumulation efficiency (j-l, units: cm mm⁻¹) on January 3-5, 2018

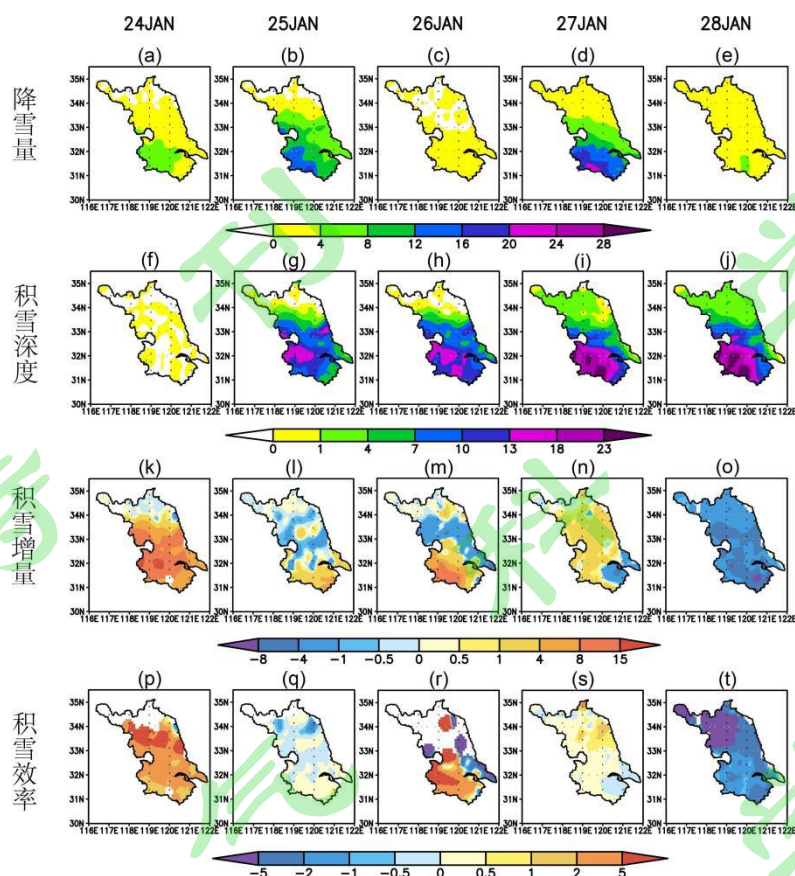


图 2 2018 年 1 月 24-28 日降雪实况：(a-e) 降雪量（单位：mm）、(f-j) 积雪深度（单位：cm）、(k-o) 积雪增量（单位：cm）、(p-t) 积雪效率（单位：cm mm⁻¹）

Fig. 2 The snowfall (a-e, units: mm), snow depth (f-j, units: cm), snow accumulation increment (k-o, units: cm), snow accumulation efficiency (p-t, units: cm mm⁻¹) on January 24-28, 2018

4 两次暴雪过程积雪效率差异的原因分析

4.1 温度条件

温度的垂直-时间演变特征如图 3 所示。可以看出，在两次降雪期间对流层中低层的空气温度均降到 0°C 以下，具有明显的冷性结构（胡淑娟等, 2016），有利于固态降水的形成。两次过程的温度层结在 700 hPa 以下均有逆温层存在，验证了前人研究指出的逆温是暴雪过程的典型特征之一：一方面一旦逆温结构破坏，将为暴雪的发生提供大量的能量，是暴雪的潜在能量来源（姚蓉等, 2012）；另一方面，两次过程的逆温层温度基本都在 0°C 以下，为冷空气垫，使降水在经过此层结时被凝结成固态水，有利于暴雪的产生和持续。这种伴随暴雪过程的“下冷上暖”温度结构的出现主要是强冷空气势力从低层入侵的结果。

两次过程的不同在于：1）第一次降雪逆温条件出现在 4 日以及降雪后的 6-7 日左右，第二次降雪逆温条件分别出现在 24 日、26 日、27 日及 29 日，说明第二次降雪期间有多次冷空气南下入侵江苏境内；2）第二次降雪过程中逆温结构的冷中心强度是第一次的三倍，说明第二次降雪期间南侵的冷空气势力更为强盛；3）正因为多次较强冷空气的入侵，第二次过程中冷空气垫的持续时间更长。第二次降雪前一天（23 日）对流层低层（850 hPa 以下）

温度已下降至 0℃以下，并持续到 1 月底，而在第一次降雪前期，对流层低层温度>0℃，并在降雪后快速回暖。因此，第二次降雪过程江苏区域的温度更低，积雪更易积累，与较高的积雪效率实况一致。

进一步通过对比分析两次降雪期间积雪效率（图 1j-l、图 2p-t）与江苏区域站点气温的空间分布型情况（图 4），考查温度条件对积雪效率空间分布的可能贡献。对比发现：两次过程的地面温度分布一致，都是由东南向西北递减。第一次降雪过程前期（3 日），整个江苏区域地面温度高于 0℃，为积雪融化提供一个相对温暖的环境，4 日江苏北边开始出现低于 0℃的低温区，使得降雪期间的积雪增量和积雪效率呈现类似北高南低的分布特征。站点气温与积雪效率的空间相关系数整体上为负（表 1），在降雪前期（3 日）高达-0.7（通过 99% 的信度检验）。这说明第一次降雪期间，地面温度确实与积雪效率关系紧密，温度越低，积雪效率越高。第二次降雪过程则不然，近地温度几乎全省低于 0℃，在降雪前期（24、27 日）近地温度与积雪效率的空间分布相关系数略小于第一次过程，说明第二次降雪过程中，温度对积雪效率分布的影响仍然显著，但较第一次过程偏小。为何两次降雪过程中温度对局地积雪效率的作用不一致，另一大因素——水汽条件的贡献如何，需要进一步探讨。

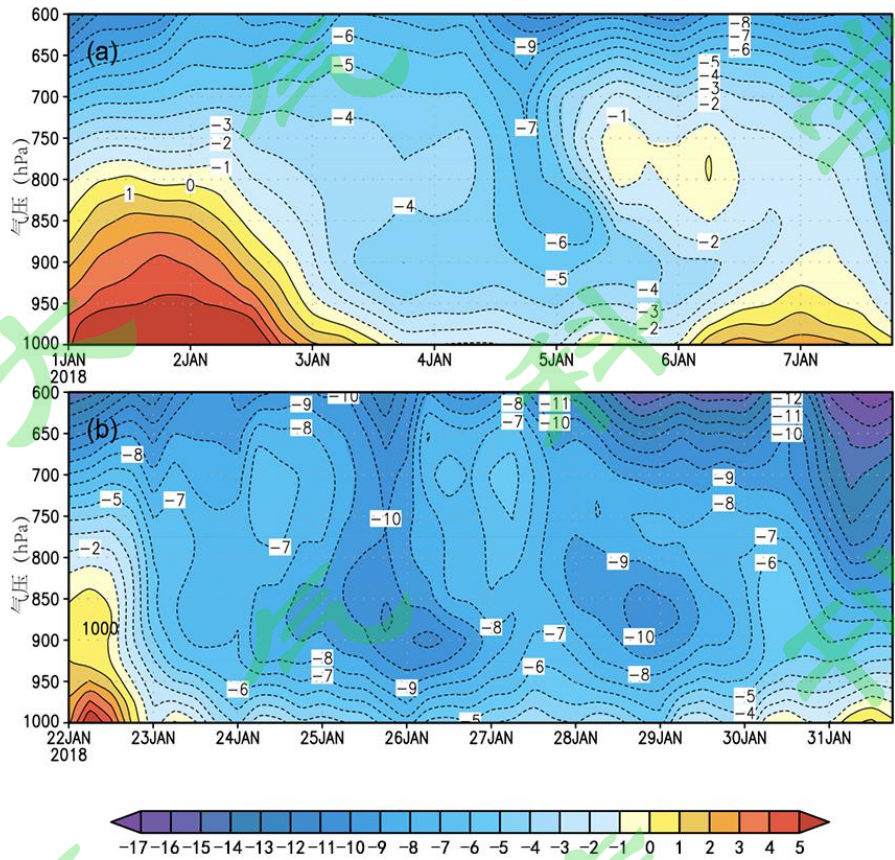


图 3 (a)2018 年 1 月 1-7 日和(b)2018 年 1 月 22-31 日江苏地区区域日平均温度(单位:℃)垂直-时间演变图

Fig. 3 The vertical-time evolution of regional average temperature (units: °C) in Jiangsu on (a) January 1-7, 2018 and (b) January 22-31, 2018

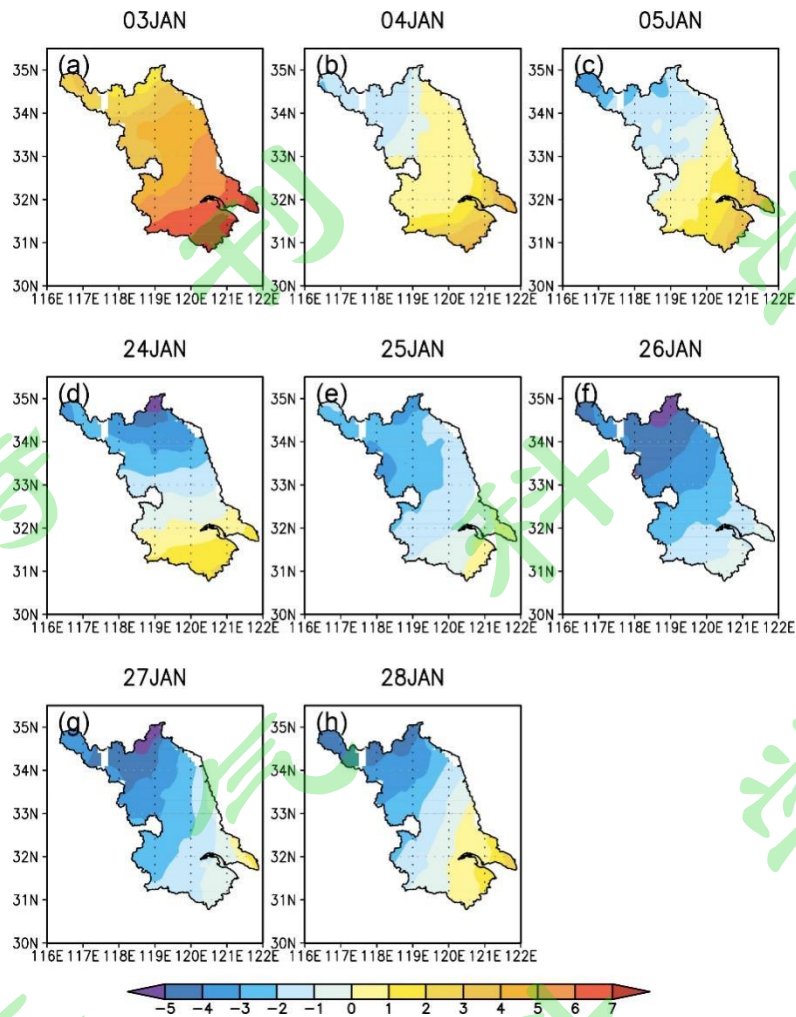


图 4 (a-c)2018 年 1 月 3-5 日和(d-h)2018 年 1 月 24-28 日站点日平均气温(阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 The daily average temperature of the station near the ground (shadings, units: $^{\circ}\text{C}$) on (a-c) January 3-5, 2018 and (d-h) January 24-28, 2018

4.2 水汽条件

水汽作为降水过程必要的物质基础, 直接决定了降雪量的大小; 同时, 空气湿度与积雪量成负相关, 空气越潮湿, 积雪融化越快 (李玉婷等, 2016; 张娟等, 2020)。以下将考查比湿在两次暴雪过程中的演变特征, 揭示空气中水汽含量差异对积雪效率的影响。从比湿的垂直-时间演变图 (图 5) 可知, 第一次降雪过程江苏区域的平均比湿远远大于第二次。具体地, 第一次降雪过程中, 高比湿层从近地面一直延伸到对流层中层 (500 hPa), 2 日近地面比湿在 700 hPa 附近达到最大值 4g/kg , 6 日高比湿层高度略有下降, 7 日高比湿层重新上升到 600-700 hPa, 整层水汽含量十分充足。而第二次过程中, 24-25 日及 27-28 日 600-700 hPa 的比湿最大值仅有 $3\text{-}3.5\text{g/kg}$, 且在 900-800 hPa 存在较干空气层阻隔, 整层水汽条件不如第一次过程。第一次暴雪过程更充沛、更深厚的水汽条件, 有利于暴雪的产生和降雪量的增加, 这与第一次降雪过程降雪量较大的实况特征一致。值得注意的是, 第一次降雪过程近地层 1000 hPa 附近的区域平均比湿在 2-4 日持续在 3g/kg 以上, 形成一个湿空气垫。而第二次降

雪过程，近地层比湿则小得多，最大值在 25 日和 27 日分别达到约 2 g/kg 和 2.5 g/kg。第二次过程近地面水汽含量低，与较高的积雪效率相对应。

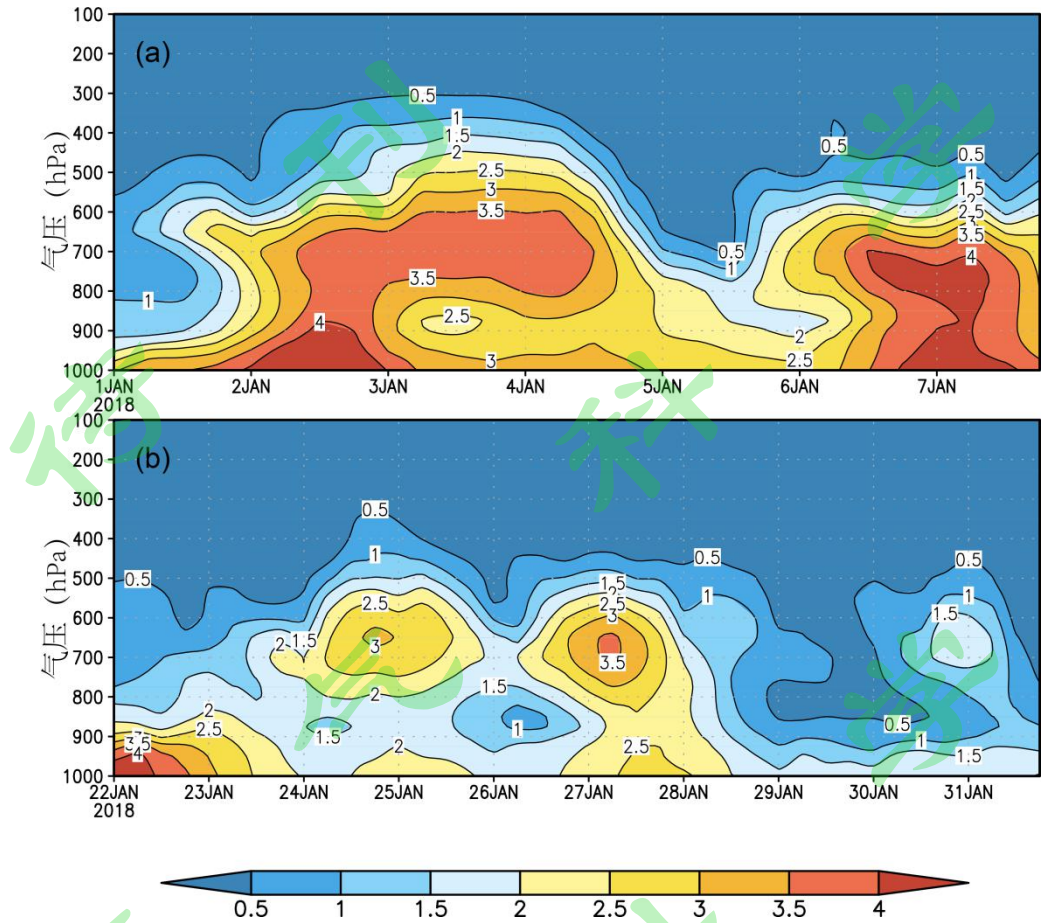


图 5 (a) 2018 年 1 月 1-7 日和 (b) 2018 年 1 月 22-31 日江苏地区区域平均比湿 (单位: g kg^{-1}) 垂直-时间演变图

Fig. 5 The vertical-time evolution of regional average specific humidity (units: g kg^{-1}) in Jiangsu on (a) January 1-7, 2018 and (b) January 22-31, 2018

从两次降雪期间站点比湿的空间分布特征 (图 6) 来看, 两次降雪期间比湿都呈现由东南向西北减小的趋势, 这与站点气温分布图 (图 4) 类似。在第一次降雪期间, 几乎全省比湿都大于 2.5g/kg , 降雪过程中比湿最大值超过 5g/kg , 仅在淮北北部小部分比湿小于 2g/kg (图 6a)。比湿与第一次降雪期间的积雪效率的空间分布特征大体呈现负相关关系 (表 1), 最大负相关在 1 月 3 日达到 -0.46 (通过 99% 的信度检验), 即: 比湿越小, 积雪效率越大。而第二次过程中, 江苏北部区域一直处在小于 2.5g/kg 的比湿控制下。在降雪前期 (24、27 日) 积雪效率和比湿的空间相关系数为 -0.33, 这说明, 与温度条件类似地, 湿度条件对第一次降雪过程积雪效率分布的影响比第二次降雪过程更显著。

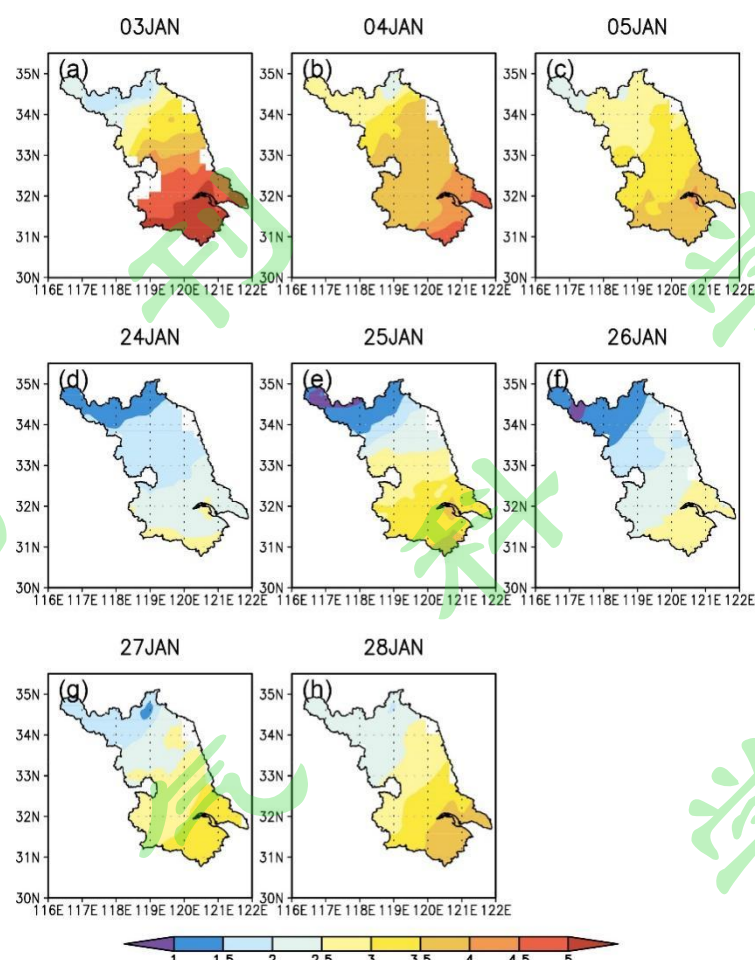


图 6 (a-c) 2018 年 1 月 3-5 日和 (d-h) 2018 年 1 月 24-28 日站点日平均比湿 (阴影, 单位: g kg^{-1})

Fig. 6 The daily average specific humidity of the station (shadings, units: g kg^{-1}) on (a-c) January 3-5, 2018 and (d-h) January 24-28, 2018

为了定量说明温度和湿度条件对两次降雪期间积雪效率分布型影响的差异,逐一对照两次降雪过程中逐日积雪效率和站点气温、站点比湿的空间分布相关系数 (表 1)。基于表 1 可尝试回答两个问题: 1) 江苏两次降雪过程中, 积雪效率的空间差异受温度条件和水汽条件的影响有多大, 该影响在两次过程的差异如何? 2) 针对每一次过程, 温度和水汽条件的作用哪个更大? 关于第一个问题, 结果显示: 在降雪前期, 站点气温、站点比湿均与积雪效率呈负相关, 验证了低温、低湿对积雪的促进作用; 第一次降雪过程中的气温和比湿与积雪效率的相关系数的绝对值均大于第二次降雪过程, 两次过程的相关系数均通过 99% 显著性检验。这说明在第一次降雪期间, 积雪效率的分布由温度和湿度这两个因子主导, 进而使得积雪深度分布和降雪量分布存在较大差异 (如图 1 所示), 尤其第一次降雪前期受气温影响较大。而第二次降雪期间, 积雪效率的分布受温度和湿度影响较第一次小, 而受降雪量影响比第一次大, 使得积雪深度分布和降雪量分布较为一致。这很可能是由于第一次降雪过程中江苏附近区域整体温度偏高、湿度偏大, 积雪效率对温度和湿度的空间差异较为敏感, 而第二次降雪过程, 江苏附近区域整体温度偏低 (大部分区域低于 0°C)、湿度偏低 (大部分区

域低于 2.5g/kg), 已形成有利于积雪的温湿条件, 故积雪效率对温度和湿度的空间差异敏感
度降低。关于第二个问题, 从表 1 可知, 除第一次过程前期 (3 日) 温度与积雪效率的空间
相关系数高达-0.7 以外, 其他时段温度和湿度两个变量分别与积雪效率分布的相关性相当,
可见温度与积雪效率分布的相关性略高于比湿与积雪效率的相关性, 温度和水汽条件对积雪
效率区域差异的相对重要性需要在今后的工作中围绕更多个例进行深入探究。

在降雪中期 4 日和 27 日, 温度、比湿和积雪效率的相关系数较前期突然下降, 这与降
雪后天气晴朗, 强烈的太阳辐射和人为等其他因素决定了积雪效率的大小, 使得温湿参量不
再是决定积雪效率的主要因素。在降雪后期 (5 日、25 日、28 日), 温度、比湿相关系数均
为正值, 但这不能说明降雪期间积雪效率和温度、湿度的关系, 这是由于后期降雪逐渐停止,
没有降雪的补充, 温度增量起主要作用, 影响了积雪融化, 使积雪效率呈现南大北小的分布。

综上, 温度、湿度对江苏两次降雪过程积雪效率的时空变化具有重要影响, 是积雪效率
的两个主导因子。但是值得注意的是, 积雪效率受温度、湿度调控的程度, 可能存在一个温
湿条件的阈值, 在温度和湿度低于一定值时, 温度和湿度对积雪效率的主导作用减弱。

表 1 逐日积雪效率和站点气温、站点比湿的空间分布相关系数

Table 1 Spatial distribution Correlation coefficient of daily snow accumulation efficiency, station
temperature and station specific humidity

日期	01/03	01/04	01/05	01/24	01/25	01/26	01/27	01/28
站点气温	-0.70*	-0.15	0.74*	-0.34*	0.40*	-0.11	-0.43*	0.62*
站点比湿	-0.46*	-0.26	0.76*	-0.33*	0.21	-0.00	-0.33*	0.50*

(注: * 表示通过 99%显著性检验)

5 等熵大气质量环流分析

上述分析阐明了江苏两次暴雪过程在温度和水汽条件方面存在的差异及其对积雪效率
的影响, 本节将应用等熵质量环流理论定量分析纬向和经向等熵空气质量输送和水汽质量输
送, 从而理解引起两次降雪过程中温度和湿度条件存在差异的物理过程。

5.1 等熵大气质量通量

由江苏地区区域积分的经向质量通量垂直-时间演变图 (图 7) 可知: 等熵大气环流在
江苏区域的主要特征表现为较高等熵层内有暖空气的净向极地输送 (向极暖支) 和较低等熵
层内冷空气的净向赤道输送 (向赤冷支), 分界等熵面虽然有显著的逐日变化, 但主要位于
280 K 等熵面附近, 与全球等熵大气环流的特征基本一致 (Yu et al., 2015)。两次过程期间 (尤
其是主要降雪时段 1 月 3-4 日、24-25 日、27 日), 等熵大气经向质量环流的向赤冷支和向
极暖支协同加强, 并引起局地 280K 以下的冷空气和 290-350K 的对流层暖空气质量通量辐
合, 表明冷暖空气在江苏地区交汇, 这与暴雪形成的温度条件 (700 hPa 南风携带暖空气向
北运动、近地面为北风控制以及逆温层的存在) 较为一致。对比两次暴雪过程中等熵经向质
量环流的特征, 主要有两个方面的差异。一方面, 高等熵层内的向极地暖空气输送在第一次

过程中贯穿整个对流层上层，持续时间长，前期（3-4 日）输送量值远大于第二次过程前期（24-25 日）；另一方面，第二次过程的低等熵层内的向赤冷支输送量值较大，配合在更低等熵层内的冷空气辐合，解释了为何第二次过程的近地温度低于第一次过程，是造成积雪的有利低温条件。值得注意的是，低层向赤冷支大值区出现的时间（2-3 日和 22-23 日）比区域平均温度低值区（图 3）早 2-3 天，结合降雪期间等熵经向冷暖空气的输送情况，经向质量通量是降雪期间气温变化的有效前兆因子。

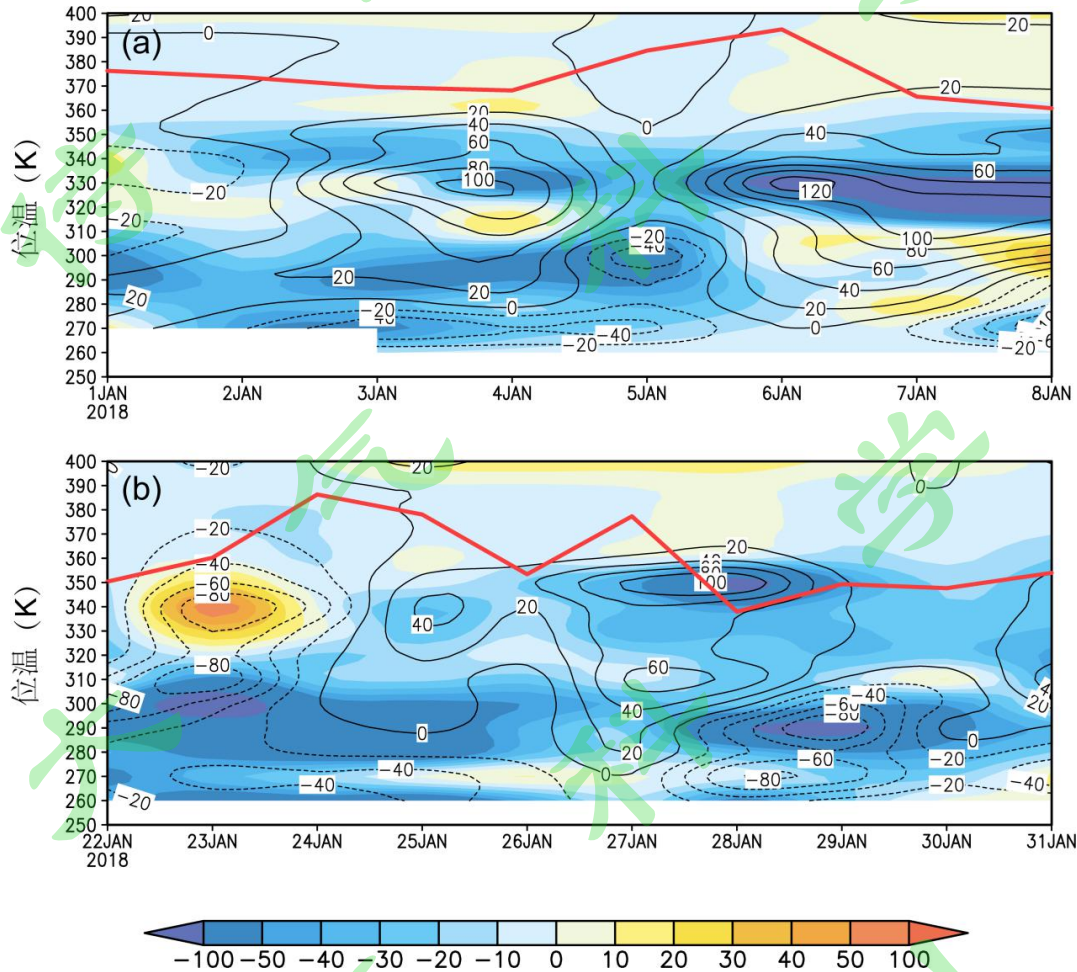


图 7 (a) 2018 年 1 月 1-7 日和 (b) 2018 年 1 月 22-31 日江苏地区区域平均等熵经向质量通量（等值线，单位： 10^8kg s^{-1} ）及其散度（阴影，单位： 10^8kg s^{-1} ）的垂直-时间演变图。

红实线表示由 NCEP/NCAR Reanalysis 1 再分析资料对流层顶温度和气压数据（<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.tropopause.html>）计算所得的对流层顶位温（单位：K）

Fig. 7 The vertical-time evolution of regional average isentropic meridional mass flux (contours, units: 10^8kg s^{-1}) and its divergence (shadings, unit: 10^8kg s^{-1}) in Jiangsu on (a) January 1-7, 2018 and (b) January 22-31, 2018. Red lines represent potential temperature at tropopause derived from the air temperature and pressure at tropopause level in NCEP/NCAR Reanalysis 1 dataset (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.tropopause.html>).

江苏经度范围内（116.25°E-121.5°E）纬向积分的经向质量通量的高度-纬度分布图（图 8a-d、图 9a-f）进一步表明两次降雪过程冷、暖空气的经向输送在江苏地区南北部存在显著差异。两次降雪期间在江苏南部地区对流层高层都出现明显的向极暖支输送大值区，北部地区低层呈现出更为深厚、更强的向赤冷支，有利于江苏地区出现显著的“南暖北冷”地面温度特征（图 4）。第二次过程这样的特征更为清晰，冷支的输送强度南北差异大，北部辐合明显，清楚显示出北方冷空气与南方暖空气交汇的锋面系统。

江苏纬度范围内（30°N-36°N）经向积分的纬向质量通量（图 8e-h、图 9g-l）纬向分布差异小，只在低层存在西部纬向质量通量辐合略弱于东部的特征，这与空气的纬向热力差异远小于经向热力差异有关。两次过程均伴随向西的暖空气质量输送，280K 以下存在小于 $50 \times 10^8 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极弱的向东较冷空气质量输送，纬向大气质量通量散度在整个事件中也可引起冷暖空气质量通量辐合，大部分时间与经向质量通量散度协同作用。

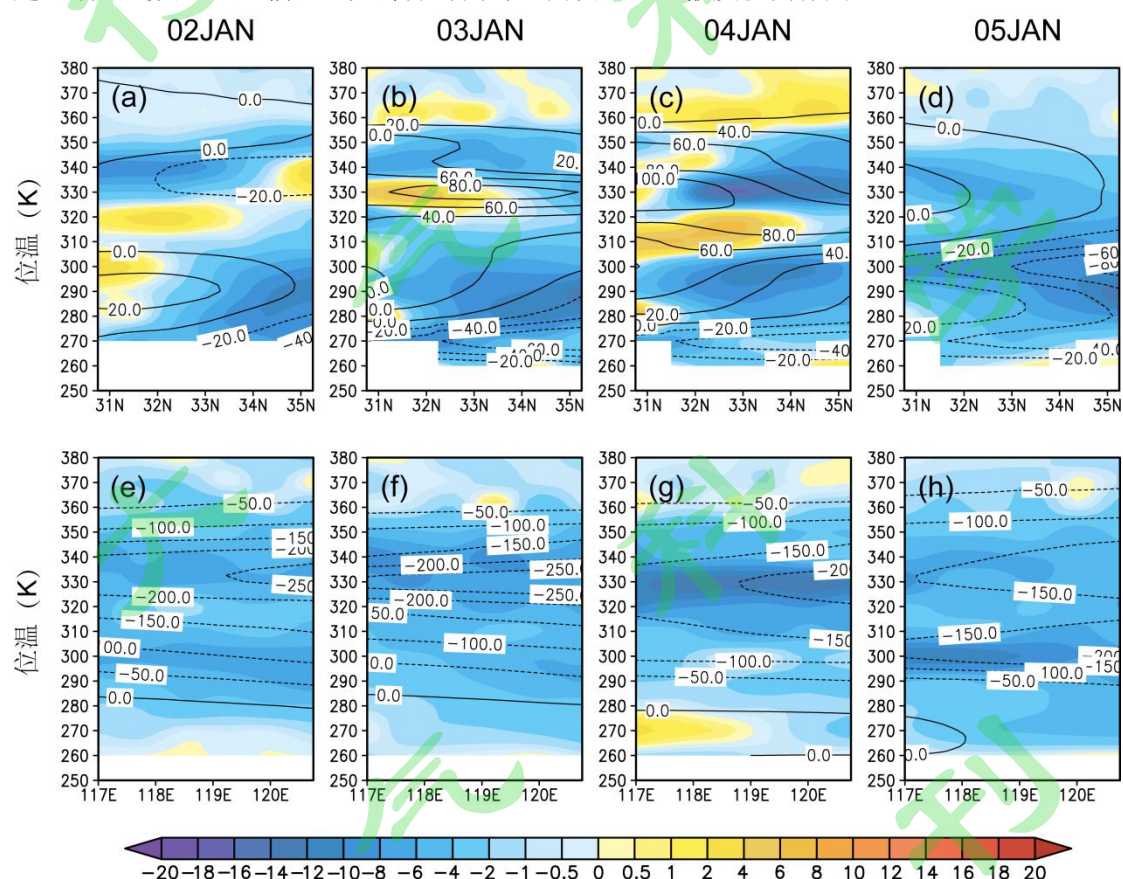


图 8 (a-d) 2018 年 1 月 2-5 日江苏地区纬向积分（116.25°E-121.5°E）的等熵经向质量通量（等值线，单位： 10^8kg s^{-1} ）及其散度（阴影，单位： 10^8kg s^{-1} ）和 (e-h) 经向积分（30°N-36°N）的等熵纬向质量通量（等值线，单位： 10^8kg s^{-1} ）及其散度（阴影，单位： 10^8kg s^{-1} ）的垂直-纬向剖面图

Fig. 8 The vertical-meridional profile of (a-d) the zonal integration (116.25°E-121.5°E) of meridional mass flux (contours, units: 10^8kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^8kg s^{-1}) and (e-h) the meridional integration (30°N-36°N) of zonal mass flux (contours, units: 10^8kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^8kg s^{-1}) in Jiangsu on January 2-5, 2018

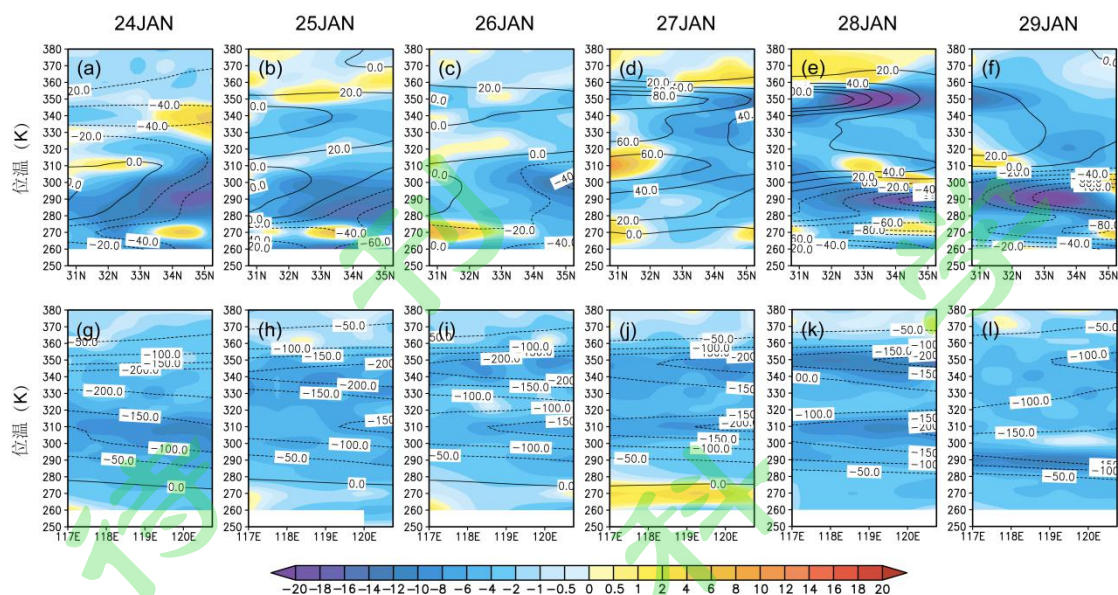


图9 (a-f) 2018年1月24-29日江苏地区纬向积分(116.25°E-121.5°E)的等熵经向质量通量(等值线, 单位: 10^8kg s^{-1})及其散度(阴影, 单位: 10^8kg s^{-1})和(g-l)经向积分(30°N-36°N)的等熵纬向质量通量(等值线, 单位: 10^8kg s^{-1})及其散度(阴影, 单位: 10^8kg s^{-1})的垂直-纬向剖面图

Fig. 9 The vertical-meridional profile of (a-f) the zonal integration (116.25°E-121.5°E) of meridional mass flux (contours, units: 10^8kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^8kg s^{-1}) and (g-l) the meridional integration (30°N-36°N) of zonal mass flux (contours, units: 10^8kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^8kg s^{-1}) in Jiangsu on January 24-29, 2018

图10是江苏地区较低等熵层(低于280K)垂直积分的经向质量通量, 表征冷空气输送及其散度的空间分布特征。第二次过程的向赤冷支输送更为强盛, 通量量值是第一次的1~2倍, 且在第一阶段降雪中(24-25日), 南部地区配合有显著的冷空气质量辐合, 进一步解释了为何第二次降雪过程0°C以下的地面温度几乎控制整个江苏地区(图4)。在空间分布上, 冷支输送强度由西南向东北递增, 辐合中心位于东南部, 理应带来近地温度从东南向西北递减的特征。然而对比图4可知, 低等熵层大气质量的经向输送与温度的空间分布并不一致, 可见, 原有海陆分布和太阳辐射经向差异影响了近地温度由东南向西北递减的分布特征。温度日变化在1月5日、24日、26日、28日与低等熵层大气质量的经向通量散度有一定一致性, 说明这几日经向输送带来的冷空气质量变化主导了地面温度变化的空间分布, 在其他时间, 纬向输送也起到不可忽视的重要作用。

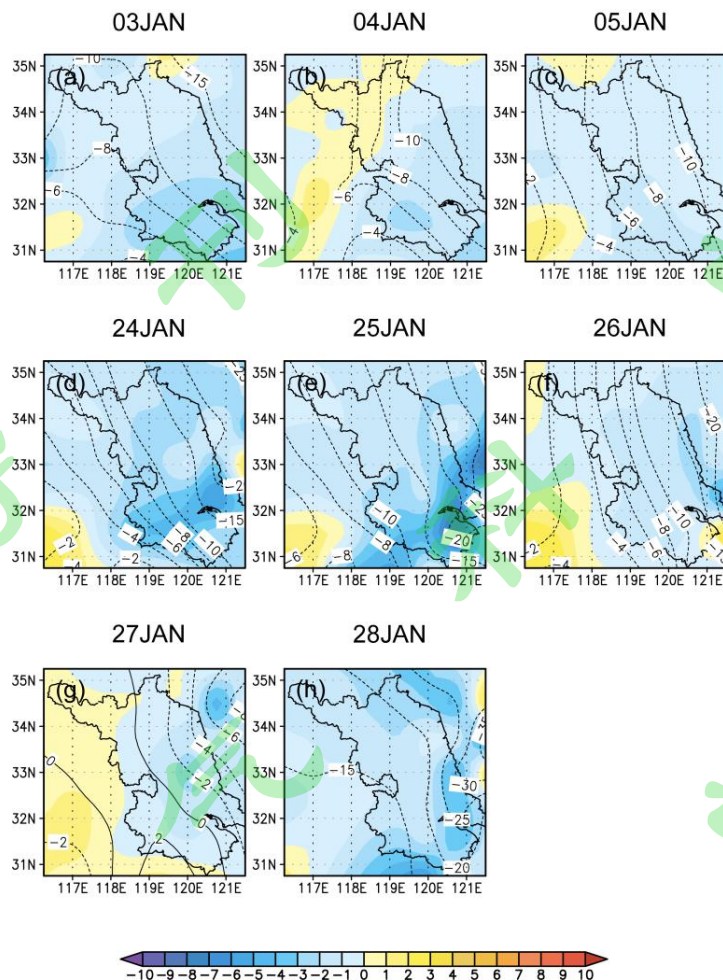


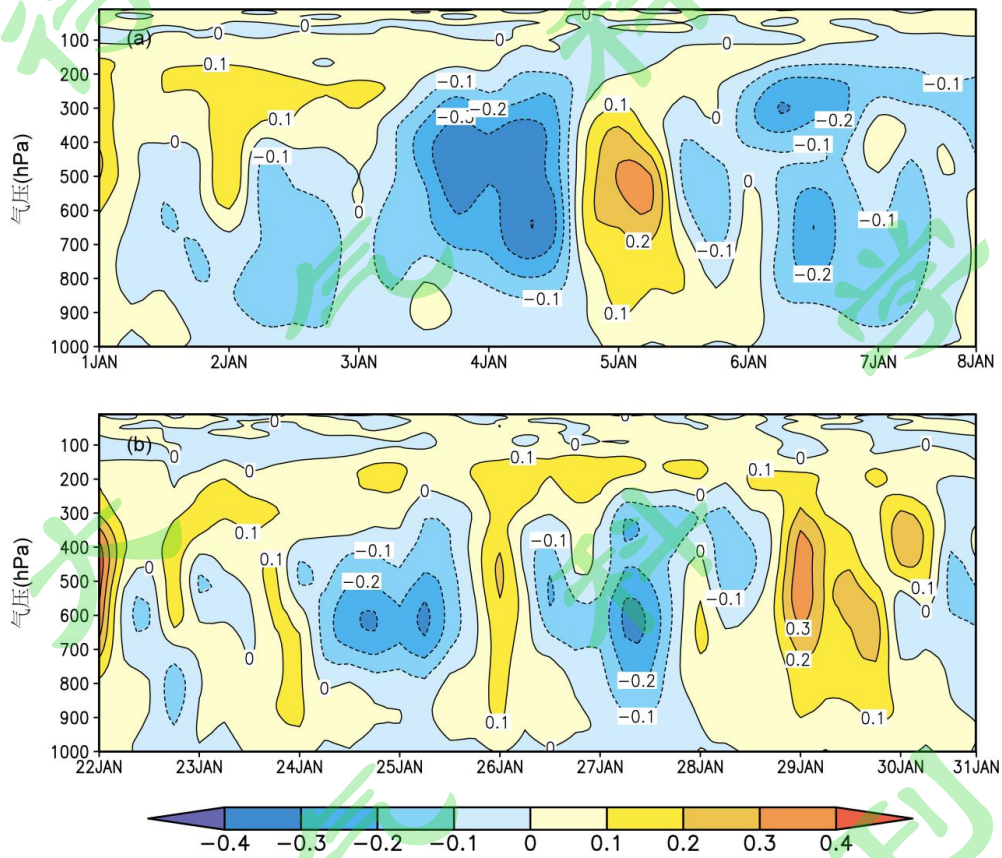
图 10 2018 年 1 月 (a-c) 3-5 日和 (d-h) 24-28 日江苏地区低于 280K 等熵层积分的经向质量通量 (等值线, 单位: 10^3kg s^{-1}) 及其散度 (阴影, 单位: 10^3kg s^{-1})

Fig. 10 The isentropic layer integration of meridional mass flux (contours, units: 10^3kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^3kg s^{-1}) below 280K in Jiangsu on (a-c) January 3-5 and (d-h) January 24-28

5.2 等熵大气水汽质量通量

江苏地区区域平均垂直速度的垂直-时间演变图 (图 11) 和水汽质量通量散度的垂直-时间演变图 (图 12) 反映了两次降雪过程中的水汽质量垂直和水平方向上的变化特征。垂直方向上, 两次降雪过程都存在显著上升运动, 为降雪提供了良好的动力条件。后期 (6 日、26 和 28 日) 下沉支显著增强, 雪量逐渐减小至停止。在两次暴雪过程中, 我们发现: 1) 等熵经向水汽质量通量与其散度基本反号, 即: 向极地输送的暖 (冷) 空气携带的水汽往往带来强水汽辐合 (辐散), 这是由于南方水汽充沛, 向极的水汽输送自身带来更大的水汽, 导致净的水汽辐合, 而从北边来的干冷水汽含量少, 与辐散对应。而等熵经向质量通量散度 (图 7) 则没有这样的对应关系, 空气质量从北边和南边都有净流入, 导致整层的辐合形势即低层冷空气辐合高层暖空气辐合, 更有利于降雪产生和地面降雪累积; 2) 水汽质量通量的垂直分布与空气质量通量一致: 以 280K 为界, 高等熵层为向极暖支携带的净的水汽质量

420 输送，近地面低等熵层为向赤冷支携带的净的水汽质量输送；3）低层辐合、高层辐散的环
 421 流配置大值区与垂直上升区对应。在有利的垂直环流形势作用下，冷暖空气与水汽密切配合
 422 触发了强降雪过程。两次暴雪过程中的差异在于：第一次过程高层水汽辐合层强烈且延伸至
 423 对流层中上层（330K），上升运动较强，导致第一次过程降雪量大于第二次过程；第二次过
 424 程水汽质量输送集中于对流层中层（280-300K），低层（270K 以下）向赤冷支携带的水汽输
 425 送比第一次过程少，且辐散明显，可解释为什么第二次过程的近地面湿度较低（图 6）。此
 426 外，第一次过程的 3-4 日、6-7 日和第二次过程的 25 日、27-28 日，高层大量水汽由南向北
 427 输送并配合上升运动，使得高层出现明显的湿度大值区。受经向水汽质量输送的影响，4-5
 428 日、27-28 日近地面湿度有所增大（图 5），说明降雪期间可以通过经向水汽输送情况指示与
 429 积雪效率紧密相关的湿度变化。



430
 431 图 11 (a) 2018 年 1 月 1-7 日和 (b) 2018 年 1 月 22-31 日江苏地区区域平均垂直速度（单
 432 位：hPa s⁻¹）垂直-时间演变图

433 Fig. 11 The vertical-time evolution of regional average vertical velocity (units: hPa s⁻¹) in Jiangsu
 434 on (a) January 1-7, 2018 and (b) January 22-31, 2018

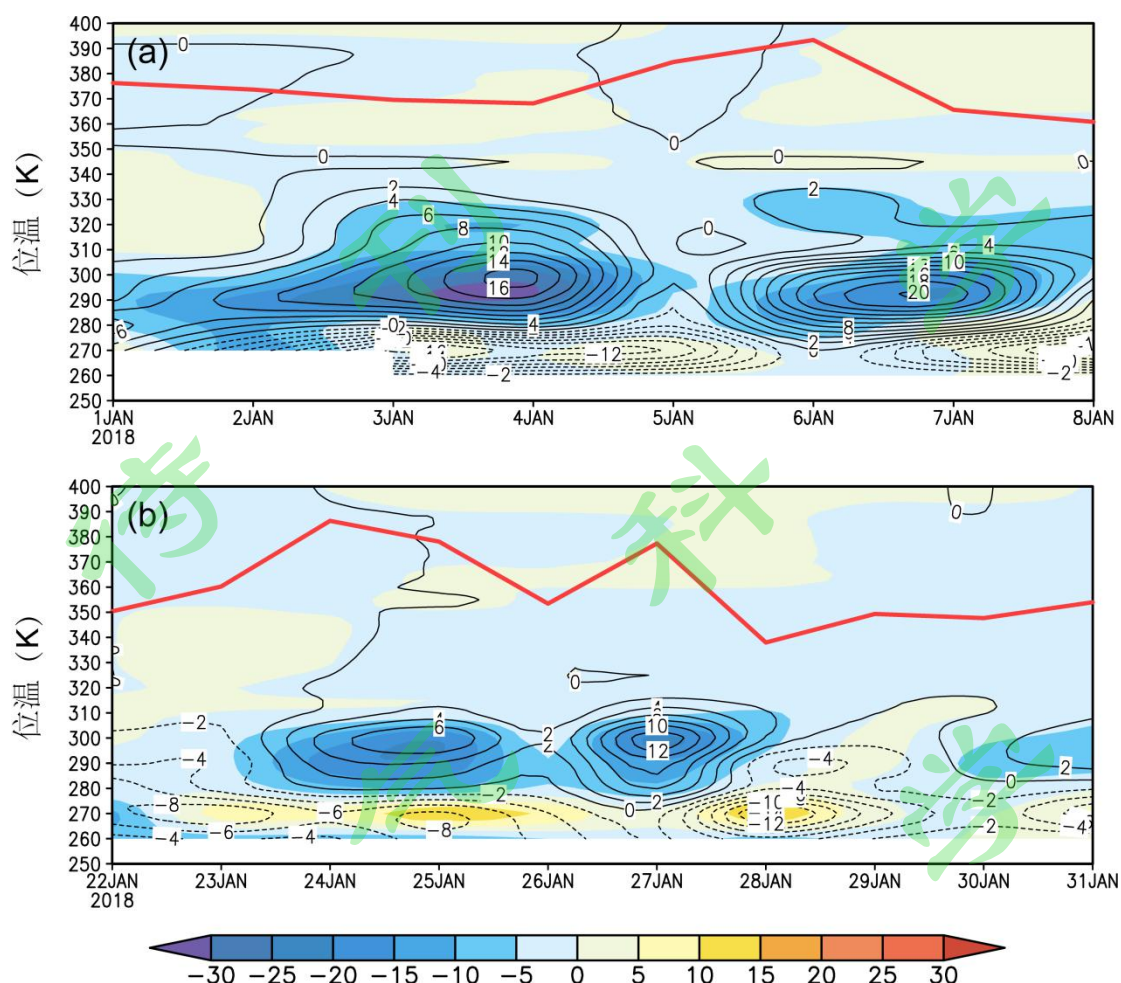


图 12 (a) 2018 年 1 月 1-7 日和 (b) 2018 年 1 月 22-31 日江苏地区区域平均等熵经向水汽质量通量（等值线，单位： 10^6kg s^{-1} ）及其散度（阴影，单位： 10^6kg s^{-1} ）的垂直-时间演变图。红实线表示对流层顶位温（单位：K）

Fig. 12 The vertical-time evolution of regional average isentropic meridional water vapor flux (contours, units: 10^6kg s^{-1}) and its divergence (shadings, unit: 10^6kg s^{-1}) in Jiangsu on (a) January 1-7, 2018 and (b) January 22-31, 2018. Red lines represent potential temperature at tropopause (units: K)

江苏区域纬向积分的经向水汽质量通量的高度-纬度分布图（图 13a-d、图 14a-f）进一步展现了两次降雪过程中伴随冷暖空气输送的水汽质量经向通量在江苏地区南北部的差异。首先可以看到与经向大气质量通量相比，1）向极水汽质量通量的较大值所处的等熵层偏低，这与水汽含量随高度显著减小的垂直分布特征有关；2）在两次过程中，高等熵层向极暖支伴随的水汽质量输送在江苏的南部地区较强，为降雪提供充足的水汽条件，因此降雪量大值区域集中在苏南地区，低等熵层向赤冷支伴随的水汽质量输送经向分布较均匀。第一次降雪过程中，向极暖支携带的水汽在苏南区域辐合明显，且具有强度更大的辐合层，深厚的水汽层利于降雪量的增大， 33°N 以南的区域在低层也略有辐合，使得地面比湿在江苏地区整体偏高且由北向南递增（图 6a-c）。

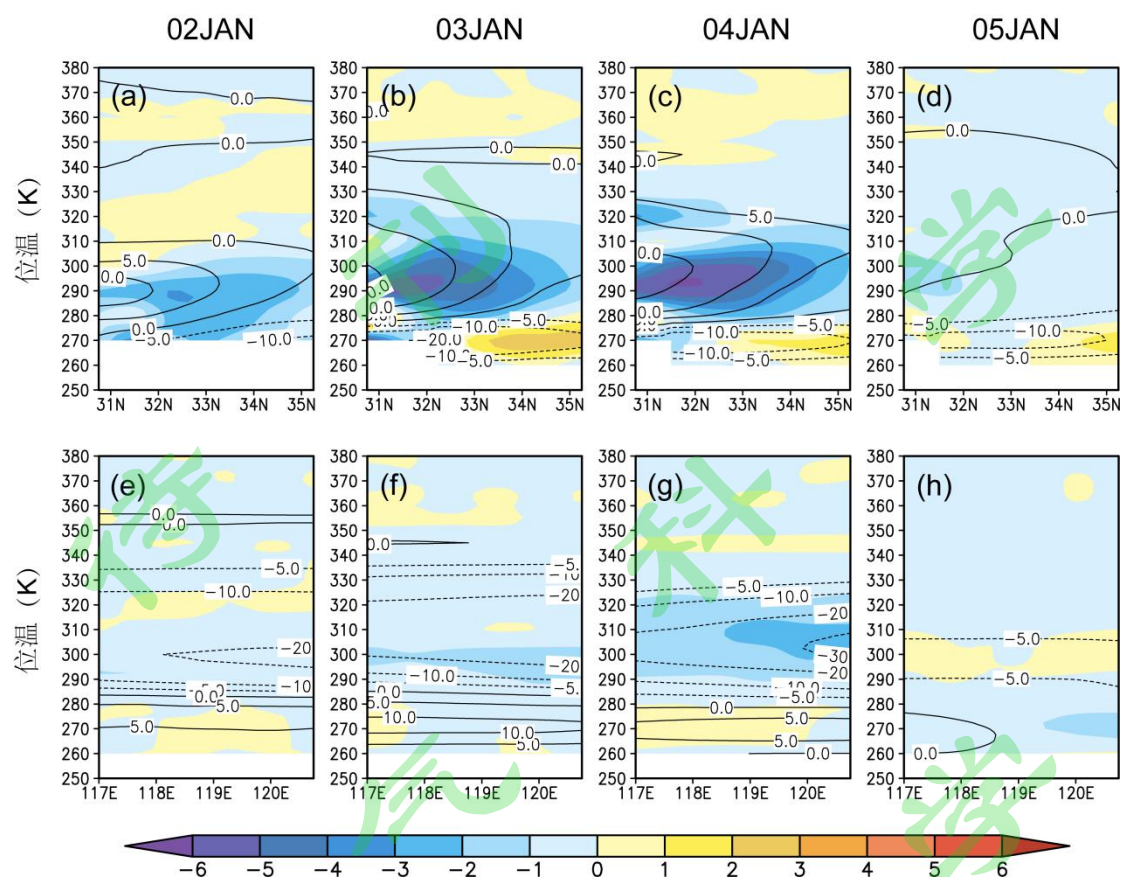


图 13 (a-d) 2018 年 1 月 2-5 日江苏地区纬向积分 (116.25°E - 121.5°E) 的等熵经向水汽质量
通量 (等值线, 单位: 10^6kg s^{-1}) 及其散度 (阴影, 单位: 10^6kg s^{-1}) 和 (e-h) 经向积分
(30°N - 36°N) 的等熵纬向水汽质量通量 (等值线, 单位: 10^6kg s^{-1}) 及其散度 (阴影, 单
位: 10^6kg s^{-1}) 的垂直-纬向剖面图

Fig. 13 The vertical-meridional profile of (a-d) the zonal integration (116.25°E - 121.5°E) of
meridional water vapor mass flux (contours, units: 10^6kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units:
 10^6kg s^{-1}) and (e-h) the meridional integration (30°N - 36°N) of zonal water vapor mass flux
(contours, units: 10^6kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^6kg s^{-1}) in Jiangsu on January 2-5,
2018

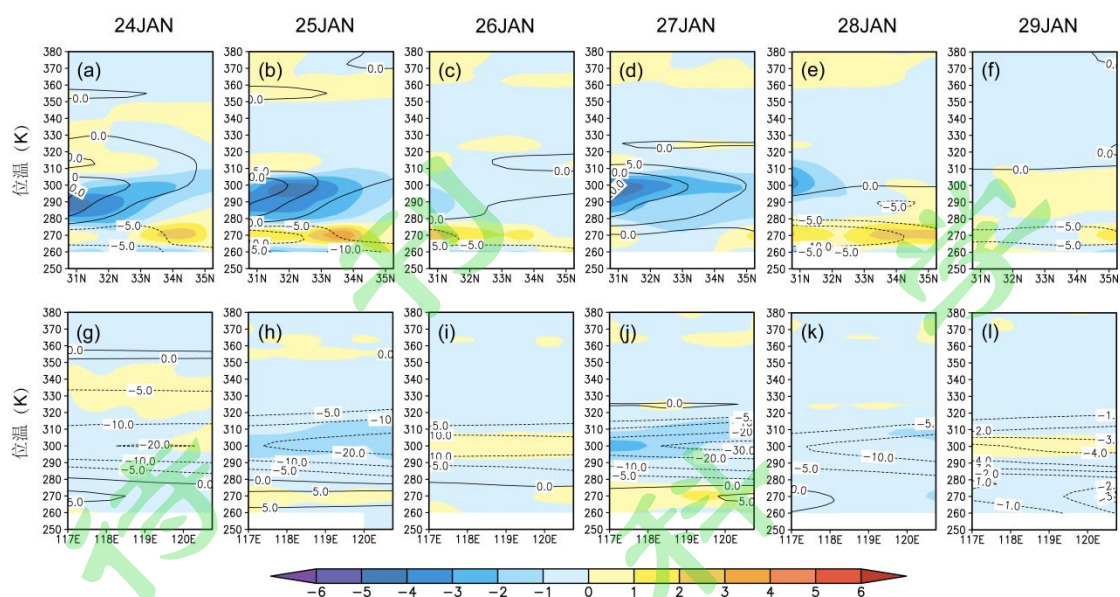


图 14 (a-f) 2018 年 1 月 24-29 日江苏地区纬向积分 (116.25°E-121.5°E) 的等熵经向水汽质量通量 (等值线, 单位: 10^6kg s^{-1}) 及其散度 (阴影, 单位: 10^6kg s^{-1}) 和 (g-l) 经向积分 (30°N-36°N) 的等熵纬向水汽质量通量 (等值线, 单位: 10^6kg s^{-1}) 及其散度 (阴影, 单位: 10^6kg s^{-1}) 的垂直-纬向剖面图

Fig. 14 The vertical-meridional profile of (a-f) the zonal integration (116.25°E-121.5°E) of meridional water vapor mass flux (contours, units: 10^6kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^6kg s^{-1}) and (g-l) the meridional integration (30°N-36°N) of zonal water vapor mass flux (contours, units: 10^6kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10^6kg s^{-1}) in Jiangsu on January 24-29, 2018

两次暴雪过程的纬向水汽质量通量在纬向和垂直上的分布、量值大小和辐合辐散强度基本相当 (图 13e-h、图 14g-l)。江苏区域有明显的高等熵层内向西的水汽质量输送, 引起降雪时段 (2-4 日和 24-25 日、27-28 日) 全区一致的纬向水汽通量辐合, 量值小于经向水汽质量通量辐合, 经向与纬向水汽质量协同作用为江苏地区输送充足的水汽。在低等熵层内 (280K 以下) 第一次过程向东的水汽质量输送略强, 但其纬向差异较小。地面比湿的纬向分布差异不明显 (图 6), 推测可能主要由经向水汽质量通量主导, 呈现明显的南北梯度。

进一步研究 280K 以下等熵层内经向 (图 15) 和纬向 (图 16) 水汽质量通量和散度的分布对地面湿度的影响。可以看到, 江苏南部地区在第一次过程的冷空气质量辐合强度不如第二次 (图 10), 由冷空气带来的水汽质量输送却与第二次过程大小相当, 且在降雪初期水汽辐合甚至略强于第二次过程, 说明第一次降雪期间水汽辐合造成低层冷空气湿度增大, 也解释了为何第一次, 江苏尤其是南部地区的积雪效率偏低。此外, 经向水汽质量通量辐合强度南大北小的水平分布与地面比湿由南向北递减的分布对应良好。纬向水汽质量通量在两次过程中都主要以辐散为主, 第二次过程低层向西气流带来的水汽质量辐散较第一次过程稍强, 尤其在南部地区, 与经向水汽质量通量协同作用, 使得第二次过程的江苏整体 (尤其是) 南部地区地面湿度偏低, 有利于积雪。

结合大气质量通量的结果,可知经向和纬向环流在暴雪过程中影响温度和湿度条件的相对贡献: 经向大气质量输送主导冷暖空气的汇聚, 决定地面气温变化, 且向极地暖支往往带来一部分水汽, 贡献于湿度变化; 而纬向大气质量输送带来的冷暖空气交汇很弱, 但可带来大量水汽, 对湿度的影响较为显著。

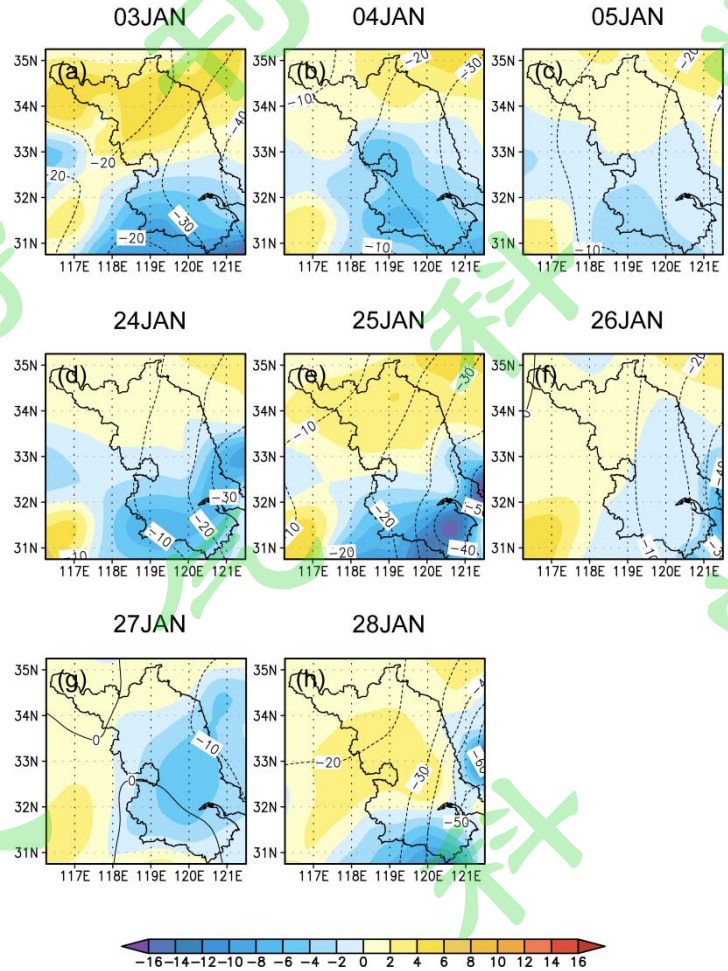


图 15 2018 年 1 月 (a-c) 3-5 日和 (d-h) 24-28 日江苏地区低于 280K 等熵层积分的经向水汽质量通量 (等值线, 单位: 10kg s^{-1}) 及其散度 (阴影, 单位: 10kg s^{-1}) 图

Fig. 15 The isentropic layer integration of meridional water vapor mass flux (contours, units: 10kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10kg s^{-1}) below 280K in Jiangsu on (a-c) January 3-5 and (d-h) January 24-28

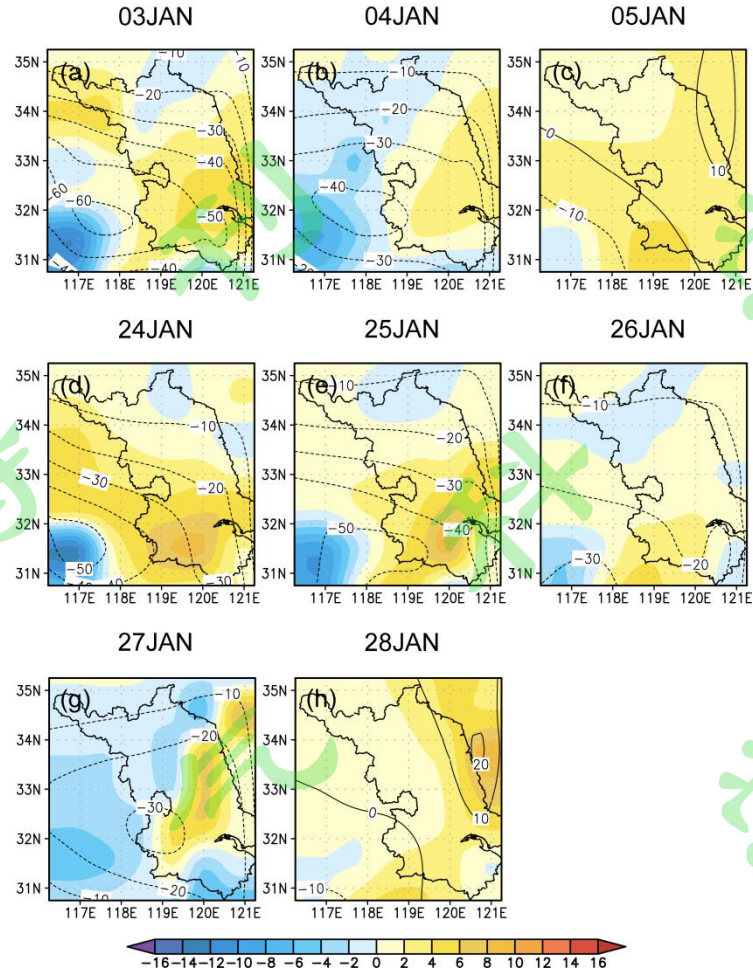


图 16 2018 年 1 月 (a-c) 3-5 日和 (d-h) 24-28 日江苏地区低于 280K 等熵层积分的纬向水汽质量通量 (等值线, 单位: 10kg s^{-1}) 及其散度 (阴影, 单位: 10kg s^{-1})

Fig. 16 The isentropic layer integration of zonal water vapor mass flux (contours, units: 10kg s^{-1}) and its divergence (shadings, units: 10kg s^{-1}) below 280K in Jiangsu on (a-c) January 3-5 and (d-h) January 24-28

6 结论

在江苏 2018 年 1 月 3-5 日和 24-28 日两段暴雪天气过程中, 第一次暴雪过程整体降雪量大、积雪效率偏低, 且降雪量和积雪效率的空间分布型差异较大, 而第二次降雪过程降雪量小、积雪效率高, 降雪量和积雪均呈现南大北小的分布特征, 雪深在苏西南地区甚至超过第一次过程。本文针对两次过程中积雪效率的显著差异成因展开了深入研究。

首先, 温度、比湿参量在两次过程中存在显著差异。从温度条件来看, 第二次过程的温度在同一高度上明显低于第一次过程, 存在强度更大、低层冷空气持续时间更长的逆温结构, 在 24-29 日内多次由北至南入侵江苏地区, 有利于积雪累积, 积雪效率增加。从水汽条件来看, 第一次过程整层水汽充沛, 有利于产生较大的降雪, 但同时整个江苏区域低层及地面水汽含量达到 2.5g/kg 以上, 降雪落至地面容易融化。该结果进一步证明了高温、高湿条件下, 积雪效率较低, 而低温、干燥条件下, 积雪效率较高。进一步通过分析江苏地区温度和比湿

与积雪效率空间分布型的相关性,发现两个因子对第一次过程积雪效率的负相关关系较第二次过程更为紧密,说明了高温、高湿条件下,积雪效率对温湿变化的响应更为敏感。

本文基于等熵质量环流理论定量,进一步考查了两次暴雪天气过程中决定温度变化的冷暖空气质量输送和决定湿度变化的水汽质量输送情况,探究了引起两次过程温度和湿度条件差异的原因。结果表明,两次降雪过程主要以江苏地区低等熵层内的向赤冷支输送和高等熵层内的向极暖支输送为主。第一次过程前期江苏南部地区高等熵层内表现为强盛的向极暖支输送,将大量暖空气和水汽输送至该地区,营造了高温、高湿的环境,为充沛的降雪提供了有利条件;低层冷空气带来的经向水汽辐合显著,尤其在南部地区,增大地面湿度,导致片到底的积雪效率;而第二次过程低等熵层内表现为更加强盛且深厚的向赤冷支输送,地面温度普遍低于 0°C ,同时江苏南部地区低层内纬向水汽质量通量辐散更强,低温低湿的环境导致积雪效率较高。在两次降雪过程中,纬向冷暖空气质量输送强度较弱,对近地温度的影响不明显,但第二次过程低层向西冷空气携带而来的水汽输送和辐散形势对江苏区域近地面水汽偏少、积雪效率偏高起到了不可忽视的贡献。大气经向质量通量和水汽质量通量辐合超前于降雪期间气温、比湿变化,具有一定的前兆指示意义。在未来工作中将通过多个例观测分析对本研究结果的普适性进行验证。

参考文献:

- 白淑英, 史建桥, 沈渭寿, 等. 2014. 近 30 年西藏雪深时空变化及其对气候变化的响应[J]. 国土资源遥感, 26 (1) : 144-151. Bai Shuying, Shi Jianqiao, Shen Weishou, et al. 2014. Temporal and spatial changes of snow depth in Tibet and its response to climate change in the past 30 years[J]. Remote Sensing for Land&Resources (in Chinese), 26 (1): 144-151.
- 陈红专, 叶成志, 龙丽华. 2012. 2011 年 1 月湖南罕见持续性暴雪天气成因分析[J]. 暴雨灾害, 31 (02) : 141-148. Chen Hongzhuan, Ye Cengzhi, Long Lihua. 2012. Cause analysis of rare continuous blizzard occurring in January 2011 in Hunan province[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 31 (02): 141-148.
- 陈丽芳. 2007. 南方两次相似降雪(雨)过程的对比研究[J]. 气象, (8): 68-75. Chen Lifang. 2007. Comparison Study of Two Similar Rain and Snow Processes in South China[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), (8): 68-75.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 137 (656): 553-597.
- ECMWF. 2012. ERA Interim, daily. European centre for medium-range weather forecasts. Subset used: 1 November 1979-28 February 2011, accessed 1 July 2012. [Available online at <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/>]
- 傅云燕, 杨修群, 沈伟. 2013. 江苏省冬季气温、降水年代际异常及相关分析[J]. 气象科学, 33 (2) : 178-183. Fu Yunyan, Yang Xiuqun, Shen Wei. 2013. The interdecadal variations and the correlation analysis of temperature and precipitation during winter in Jiangsu province[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 33 (2): 178-183.
- 甘文强, 蓝伟, 杜小玲, 等. 2018. 2018 年 1 月底至 2 月初贵州低温雨雪天气成因初探[J]. 暴雨灾害, 37 (5) : 410-420. GAN Wenqiang, Lan Wei, Du Xiaoling, et al. 2018. Tentative analysis on the cause of a low-temperature, freezing rain and snow event in Guizhou between the end of January and the beginning of February in 2018[J]. Torrential Rain and Disasters (in

Chinese), 37 (5): 410-420.

顾佳佳, 武威. 2015. 2014 年 2 月 4-7 日河南暴雪过程的环流特征及其持续原因[J]. 暴雨灾害, 34 (2) : 117-125. Gu Jiajia, Wu Wei. 2015. The circulation features and sustaining mechanism of a snowstorm event occurred in Henan from February 4 to 7 in 2014[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34 (2): 117-125.

胡淑娟, 雷晓云, 白磊, 等. 2016. 投影寻踪法在建立积雪深度模型上的应用[J]. 水文, 36 (05) : 17-21. Hu Shujuan, Lei Xiaoyun, Bai Lei, et al. 2016. Application of Projection Pursuit Method in Establishing Snow Depth Model[J]. Journal of China Hydrology (in Chinese), 36 (05): 17-21.

Huang Jinlong, Tian Wenshou, Zhang Jiankai, et al. 2016. The Connection between Extreme Stratospheric Polar Vortex Events and Tropospheric Blockings[J]. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 143 (703): 1148-1164.

姜有山, 束宇, 李力, 等. 2017. 基于湿位涡和积雪效率的降雪预报技术探讨[J]. 气象科学, 27 (5) : 659-665. Jiang Youshan, Shu Yu, Li Li, et al. 2017. Investigation on snowfall forecasting skills based on moist potential vorticity and efficiency of snow accumulation[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 27 (5): 659-665.

李德俊, 熊守权, 柳草, 等. 2014. 鄂西北两次强降雪的滴谱特征和积雪深度预估方法[J]. 气象, 40 (5) : 612-618. Li Dejun, Xiong Souquan, Liu Cao, et al. 2014. Droplet Spectrum Characteristics and Depth Forecast Method of Two Snowstorms in Northwest of Hubei[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40 (5): 612-618.

李玉婷, 柳锦宝, 王增武, 等. 2016. 2003-2012 年四川省积雪时空动态变化与气候响应研究[J]. 冰川冻土, 38 (06) : 1491-1500. LI Yuting, LIU Jinbao, WANG Zengwu, et al. 2016. Study of spatiotemporal dynamics and climate response of snow cover in Sichuan Province from 2003 to 2012[J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 38 (06) : 1491-1500.

刘梅, 尹东屏, 张备, 等. 2008. 江淮流域暴雪天气形成的条件探讨[J]. 安徽农业科学, 29: 12813-12818. Liu Mei, Ying Dongping, Zhang Bei, et al. 2008. Study on the Formation Condition of Heavy Snow in Jianghuai River Basin[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 29: 12813-12818.

李隆基, 郝晓光, 贾志东, 等. 2017. 湿雪的导电性能及对其闪络特性的影响[J]. 绝缘材料, 50 (11) : 38-43. Li Longji, Xi Xiaoguang, Jia Zhidong, et al. 2017. Conductivity of Wet Snow and Its Influence on Flashover Characteristics[J]. Insulation material (in Chinese), 50 (11): 38-43.

李正金, 李菁, 刘冬晴, 等. 2018. 南京 2018 年 1 月两次强降雪过程的对比分析[J]//第 35 届中国气象学会 S1 灾害天气监测、分析与预报. 中国气象学会, 7. Li Zhengjin, Li Jing, Liu Dongqing, et al. 2018. Comparative Analysis of Two Heavy Snowfalls in Nanjing in January 2018[C]//The 35th Chinese Meteorological Society S1 Disaster Weather Monitoring, Analysis and Forecast. Chinese meteorological society, 7.

Martin J E. 1998a. The Structure and Evolution of a Continental Winter Cyclone. Part I: Frontal Structure and the Occlusion Process[J]. Mon. Wea. Rev., 126 (2): 303-328.

Martin J E. 1998b. The Structure and Evolution of a Continent a Winter Cyclone. Part II: Front a Forcing of an Extreme Snow Event[J]. Mon. Wea. Rev., 126 (2): 329-348.

Molarius R, Tuomaala P, Piira K, et al. 2014. Systemic vulnerability and resilience analysis of electric and transport network failure in cases of extreme winter storms[J]. Vulnerability, Uncertainty, and Risk.: 608-617.

Pauluis O. 2008. Thermodynamic Consistency of the Anelastic Approximation for a Moist Atmosphere[J]. J. Atmos. Sci., 65 (8): 2719-2729.

Pauluis O, Czaja A, Korty R. 2010. The Global Atmospheric Circulation in Moist Isentropic Coordinates[J]. Journal of Climate, 23 (11): 3077-3093.

Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. 2006. ERA- Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsl. 2006, 110, 26 – 35.

沈玉伟, 孙琦旻. 2013. 2010 年冬季浙江两次强降雪过程的对比分析[J]. 气象, 39 (2): 218-225. Shen Yuwei, Sun Qimin. 2013. Contrast Analysis of Two Heavy Snowfall Events in Zhejiang[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39 (2): 218-225.

王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J]. 气象学报, 03: 405-422. Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snowstorm event over the Southern China in January 2008[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 03: 405-422.

吴庆梅, 杨波, 王国荣. 2014. 北京地区一次回流暴雪过程的锋区特征分析[J]. 高原气象, 33 (2): 539-547. Wu Qingmei, Yang Bo, Wang Guorong. 2014. An analysis of the frontal characteristics of a backflow blizzard in Beijing area[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (2): 539-547.

杨成芳, 李泽椿, 李静, 等. 2008. 山东半岛一次持续性强冷流降雪过程的成因分析[J]. 高原气象, 02 : 442-451. Yang Chengfang, Li Zechun, Li Jing, et al. 2008. A Diagnostic Analyses on Peculiar Persistent Cold Airflow Snowstorm Process in Shandong Peninsula[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 02: 442-451.

杨成芳, 周淑玲, 刘畅, 等. 2015. 一次入海气旋局地暴雪的结构演变及成因观测分析[J]. 气象学报, 73 (6) : 1039-1051. Yang Chengfang, Zhou Shuling, Liu Chang, et al. 2015. Case Study of the Cause and the Dynamic Structure for a Small-scale Snowstorm Event Associated with a Cyclone[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73 (6): 1039-1051.

杨成芳, 刘畅. 2019. 一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子分析[J]. 气象, 2019, 45 (2) : 191-202. Yang Chengfang, Liu Chang. 2019. Study on Snow Cover and Its Meteorological Influence factors of Jianghuai Cyclone Snowstorm[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45 (2): 191-202.

杨璐瑛, 张芹, 郭俊建, 等. 2018. 鲁南初冬一次罕见特大暴雪的成因分析[J]. 海洋气象学报, 38 (1) : 100-107. Yang Luying, Zhang Qin, Guo Junjian, et al. 2018. Case study on the historic blizzard in the southern region of Shandong in early winter[J]. Journal of Marine Meteorology (in Chinese), 38 (1): 100-107.

杨琨, 薛建军. 2013. 使用加密降雪资料分析降雪量和积雪深度关系[J]. 应用气象学报, 24(3): 349-355. Yang Kun, Xue Mingjun. 2013. Use encrypted snowfall data to analyze the relationship between snowfall and snow depth[J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 24(3): 349-355.

姚晨, 杨祖祥, 朱月佳, 等. 2018. 2018 年初安徽省两次罕见大暴雪过程的对比分析[J]. 暴雨灾害, 37 (5) : 401-409. Yao Chen, Yang Zuxiang, Zhu Yuejia, et al. 2018. Comparative analysis of two rare heavy snowstorm events in Anhui during January 2018[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 37 (5): 401-409.

姚蓉, 叶成志, 田莹, 等. 2012. 2011 年初湖南暴雪过程的成因和数值模拟分析[J]. 气象, 38 (7) : 848-857. Yao Rong, Ye Chengzhi, Tian Ying, et al. 2011. The Numerical Simulation Analysis and Causes of Snowstorm Occuring in Hunan Province, early 2001[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (7): 848-857.

尹东屏, 张备, 刘梅, 等. 2009. 2006 年江苏两次降雪天气过程分析[J]. 气象科学, 29 (3): 398-402. Ying Dongping, Zhang Bei, Liu Mei, et al. 2009. The weather situation analysis of two snowfalls in Jiangsu[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 29 (3): 398-402.

刘超, 江琪, 桂海林. 2018. 2018 年 1 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 44 (4) : 590-596. Liu Chao, Jiang Qi, Gui Meilin. 2018. Analysis of the January 2018 Atmospheric Circulation and Weather[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44 (4): 590-596.

Yu Y Y, Ren R C, Hu J G, et al. 2014. A Mass Budget Analysis on the Interannual Variability of the Polar Surface Pressure in the Winter Season[J]. *J. Atmos. Sci.*, 71(9): 3539-3553.

虞越越. 2015. 大气经向质量环流与北半球冬季寒潮爆发[D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Yu Yueyue. 2015. On the Meridional Mass Circulation and Cold Air Outbreaks in Northern Hemisphere Winter[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences University, 2015. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.

张备, 尹东屏, 严雯莲, 等. 2012. 2008 年江苏持续性降雪中的水汽和动力抬升机制分析[J]. *灾害学*, 27 (2) : 29-42. Zhang Bei, Ying Dongping, Yan Wenlian, et al. 2012. Water vapor and Analysis of dynamic lifting mechanism in the continuous snowfall in Jiangsu in 2008 [J]. *Journal of Catastrophology* (in Chinese), 27 (2): 29-42.

Zhang Jiankai, Tian Wenshou, Chipperfield M P, et al. 2016. Persistent shift of the Arctic polar vortex towards the Eurasian continent in recent decades[J]. *Nature Climate Change* 6: 1094-1099.

Zhang Jiankai, Tian Wenshou, Xie Fei, et al. 2020. The Influence of Zonally Asymmetric Stratospheric Ozone Changes on the Arctic Polar Vortex Shift[J]. *Journal of Climate*, 33 (11): 4641-4658.

张娟, 王维真, 梁继. 2020. 三江源腹地积雪过程中近地层空气温湿度垂直观测分析[J]. *高原气象*, 39 (06) : 1155-1166. Zhang Juan, Wang Weizhen, Liang Ji. 2020. Vertical Characteristics on Temperature and Humidity of Surface Layer Air during Snow Processes in the Hinterland of Sanjiangyuan[J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 39 (06): 1155-1166.

张俊兰, 万瑜, 闵月. 2017. 乌鲁木齐“2015.12.11”极端暴雪天气的综合分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 11 (1) :1-10. Zhang Junlan, Wan Yu, Min Yue. 2017. Comprehensive analysis of the extreme snowstorm on "2015.12.11" in Urumqi[J]. *Desert and Oasis Meteorology* (in Chinese), 11 (1):1-10.

周后福, 刘英, 翟菁, 等. 2018. 2008 年安徽雪深全国之最佳的成因探讨[J]. *安徽农业科学*, (18): 8. Zhou Houfu, Liu Ying, Zhai Jing, et al. 2018. Discuss on the Causation of Depth Snow in Anhui 2008[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (in Chinese), (18): 8.

周石桥, 中尾正义, 桥本重将, 等. 2002. 湿雪的密实化与颗粒粗化过程研究[J]. *冰川冻土*, 24 (3) : 275-281. Zhou Shiqiao, Masayoshi Nakawo, Hashimoto, et al. 2002. Study on the process of wet snow's densification and particle coarsening[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 24 (3): 275-281.

周之栩, 尹浩, 向华. 2018. 2016 年湖州地区两次降雪过程对比分析[J]. *浙江气象*, 39 (3): 12-16. Zhou Zhixu, Ying Hao, Xiang Hua. 2018. Comparative analysis of two snowfall processes in Huzhou in 2016[J]. *Meteorology in Zhejiang* (in Chinese), 39 (3): 12-16.