

王秀娟, 齐彦斌, 江晓玲, 等. 长白山麓东北冷涡天气系统降水云系特征. 应用气象学报, 2024, 35(3): 272-284.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240302

长白山麓东北冷涡天气系统降水云系特征

王秀娟¹⁾²⁾³⁾ 齐彦斌^{1)2)3)*} 江晓玲¹⁾²⁾³⁾ 于冬佳¹⁾²⁾³⁾ 王天琦¹⁾²⁾³⁾

¹⁾(吉林省气象灾害防御技术中心, 长春 130062)

²⁾(中国气象局吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室, 长春 130062)

³⁾(中国气象局吉林云物理野外科学试验基地, 长春 130062)

摘要

利用 2020 年中国气象局吉林云物理野外科学试验基地微波辐射计数据, 结合小时降水量数据、ERA5(ECM-WF reanalysis version 5)再分析数据等对长白山麓东北冷涡降水云系进行统计分析, 将东北冷涡降水划分为强降水、中等强度降水和弱降水 3 类。结果表明: 在长白山麓东北冷涡降水发生前 6 h 首先出现中高云, 水汽、云液态水含量对东北冷涡强降水的发生与维持至关重要。东北冷涡强降水发生前 5 h, 6 km 高度以下水汽出现跃升, 1.0 km 高度以下水汽密度增加至 $12\sim 14\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; 5~6 km 高度温度层结为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 云液态水含量为 $1.0\sim 1.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 有助于冰雪晶的形成; 在温度层结 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内存在中高云, 云底高度从 5.5~7 km 陡降至地面, 出现干冷空气侵入现象, 相对湿度急剧下降, 这些特征一直持续至强降水发生; 在东北冷涡中等强度降水和弱降水发生前 6 h, 云系为中云, 5~6 km 高度的云液态水含量为 $0.4\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 但并未出现水汽跃升、相对湿度下降的特征。

关键词: 东北冷涡; 微波辐射计; 降水; 统计分析

引言

东北冷涡是我国非常重要的天气系统, 在东北地区夏季 42% 的天气过程受东北冷涡系统影响^[1], 常造成东北、华北的雷阵雨。冷涡发展具有斜压性, 冷空气不断补充南下, 在东北地区造成暴雨、洪涝、突发性强对流天气^[2], 给交通运输和人民生活带来巨大影响。大气中的水汽和云液态水含量对降水的发生起重要作用, 水汽是降水发生的必要条件, 云液态水含量与降水形成机制有关^[3]。东北冷涡暴雨常发生在水汽通量辐合区^[4-5], 水汽输送最大区^[6-7]。由于东北冷涡降水时间短、局地性强, 因此有必要连续监测东北冷涡云系的水汽、云液态水含量、温度等气象要素随高度分布和随时间的变化特征。

地基微波辐射计能够全天监测地面至高空 10 km 水汽密度、云液态水含量、垂直积分水汽含

量、垂直积分云液态水含量、相对湿度、温度等物理量, 可以弥补常规探测数据时间间隔长的缺点^[8-11]。地基微波辐射计是云降水、人工影响天气领域的重要观测手段之一。Heggli 等^[12]使用地基微波辐射计观测美国冬季对流云系中的液态水含量。Ruffieux 等^[13]使用微波辐射计反演大气廓线算法, 研究雾形成机理。Revercomb 等^[14]总结了美国使用微波辐射计观测水汽含量的研究进展。Löhnert 等^[15]比较了微波辐射计反演云液态水含量的方法。朱元竞等^[16]研究了地基微波辐射计在人工影响天气的应用。陈洪滨^[17]提出了高频微波被动遥感大气参量的算法。雷恒池等^[18]统计不同季节陕西降水云系, 指出降水发生前约 5~90 min 存在水汽和云液态水含量跃升现象, 提出人工增雨最佳作业区。

近年地基微波辐射计应用于强对流天气预报。李万彪等^[19]使用双通道微波辐射计观测淮河流域大气水汽和云液态水含量, 指出垂直积分云液态水

2024-01-05 收到, 2024-03-06 收到再改稿。

资助项目: 吉林省科技发展计划重点研发项目(20230203126SF), 国家自然科学基金项目(41775140)

* 通信作者, 邮箱: qiyabin88@qq.com

含量超过 0.4 mm 时会发生降水。刘志雄等^[20]分析湖南常德微波辐射计数据指出冰雹前约 1 h 地面水汽由 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著增加至 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。黄治勇等^[21]分析湖北咸宁地基微波辐射计数据发现短时暴雨出现前 3~6 h, 垂直积分云液态水含量从约 1 mm 急增至约 20 mm, 垂直积分水汽含量从 60~70 mm 急增至 90 mm。敖雪等^[22]分析武汉地基微波辐射计数据, 指出垂直积分水汽含量超过 5 cm、垂直积分云液态水含量超过 1 mm 可作为降水的预报指标。黄治勇等^[23]指出冰雹发生前 0.5 h, 垂直积分云液态水含量、垂直积分水汽含量快速增长, 冰雹出现在二者峰值时刻。汪小康等^[24]利用微波辐射计数据统计分析武汉地区强降水、中等强度降水、弱降水过程中水汽密度、相对湿度、云液态水含量等分布特征, 指出强降水发生前 7 h 最大湿度达到饱和、云底高度下降; 低层水汽增幅最大, 云液态水含量显著高于另两类降水。周冰雪等^[25]利用微波辐射计和 L 波段探空数据统计分析陕西地区降水特征, 指出降水发生前 1 h 垂直积分水汽含量达 4 cm、垂直积分云液态水含量达到 0.2 mm, 可作为降水发生的预警指标。

目前, 利用地基微波辐射计数据开展东北冷涡降水云系的研究较少, 尤其是针对水汽、云液态水含量的垂直廓线分布与演变特性研究鲜见报道。本文利用中国气象局吉林云物理野外科学试验基地 2020 年微波辐射计数据, 辅以 ERA5 (ECMWF re-analysis version 5) 再分析数据等, 统计分析东北冷涡降水云系的水汽、云液态水含量、垂直积分水汽含量、垂直积分云液态水含量、云底高度等变化特征, 揭示不同强度东北冷涡降水云系特征, 得到东北冷涡降水预报的物理量指标。

1 数据与方法

本文使用的地基微波辐射计型号为 MWP-967KV, 安装在中国气象局吉林云物理野外科学试验基地, 基地位于吉林省白山市靖宇县 (42.4°N , 126.8°E)。使用的数据包括地基微波辐射计观测的地面至 10 km 高度共 58 层水汽密度、云液态水含量、温度、相对湿度垂直廓线、垂直积分水汽含量、垂直积分云液态水含量、云底高度数据。垂直积分水汽含量指水汽从云底到云顶的垂直积分, 垂直积分云液态水含量指云液态水含量从云底到云顶的垂直

积分。数据时间分辨率为 2 min, 垂直分辨率在 500 m 高度以下为 50 m, 500~2000 m 高度为 100 m, 2000 m 高度以上为 250 m。

结合靖宇站 24 h 降水量 (R)、东北冷涡定义筛选出不同强度东北冷涡降水个例。挑选东北冷涡^[26-27]: 在 500 hPa 高空天气图上, 连续 3 d 或 3 d 以上在 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ 范围内至少有 1 条闭合等高线, 并有明显冷槽或冷中心配合的气旋性环流系统。剔除微波辐射计数据异常、采集不完整的东北冷涡个例。筛选出 3 类东北冷涡降水: 将靖宇站降水分为强降水 ($R \geq 25 \text{ mm}$)、中等强度降水 ($10 \text{ mm} \leq R < 25 \text{ mm}$) 和弱降水 ($0.1 \text{ mm} \leq R < 10 \text{ mm}$)。对于每类东北冷涡降水过程, 记录降水发生为 0 时刻, 提取降水发生前 6 h (标记为 -6 h) 至降水期间 6 h (标记为 6 h) 时间段, 如果两场或以上降水时段有重叠, 则记录为 1 次降水过程。统计得到 2020 年 3 类东北冷涡降水共 23 个个例, 其中强降水 2 个、中等强度降水 9 个、弱降水 12 个 (表 1)。统计不同强度东北冷涡降水特征异同, 对于每类东北冷涡降水, 以降水发生时刻为 0 时刻, 分析降水发生前 6 h 至降水期间 6 h 时间段内微波辐射计观测数据。文中时间均为北京时。

表 1 2020 年靖宇站 3 类东北冷涡降水个例

Table 1 Three-type precipitation induced by Northeast China cold vortex at Jingyu Station in 2020

类别	分类编号	降水起止时间
强降水	1	08-09T10:00—18:00
	2	08-13T12:00—14T01:00
中等强度降水	1	05-17T02:00—07:00
	2	05-24T01:00—08:00
	3	07-19T11:00—20T00:00
	4	08-03T23:00—04T02:00
	5	08-04T16:00—20:00
	6	08-15T16:00—20:00
	7	09-16T01:00—09:00
	8	09-16T18:00—21:00
	9	09-19T01:00—02:00
弱降水	1	05-10T16:00—17:00
	2	05-12T04:00—13:00
	3	05-13T03:00—04:00
	4	05-15T18:00—20:00
	5	05-18T10:00—17:00
	6	06-01T03:00—14:00
	7	06-15T01:00—02:00
	8	08-11T18:00—19:00
	9	08-14T19:00—20:00
	10	09-09T15:00—10T05:00
	11	09-22T14:00—18:00
	12	10-01T17:00—21:00

2 结果分析

2.1 水汽密度垂直分布

水汽是产生降水的必要条件,降水发生前几小时水汽存在预警指标^[18,24]。图 1 为东北冷涡 3 类降水的水汽密度垂直分布,图 2 为东北冷涡 3 类降水的垂直积分水汽含量。由图 1 可见,强降水发生前约 5 h,各层水汽出现跃升,近地层 1.0 km 高度以下水汽密度增加至 12~14 g·m⁻³,这种特征维持至降水发生。降水发生时,水汽密度再次增加,降水发生 1 h 时 1.0 km 高度以下水汽密度跃升为 13~14 g·m⁻³。该特征在降水期间一直维持。对于中等强度降水,各高度层水汽明显小于强降水期间,在降水发生前各高度层水汽密度变化不大,1.0 km 高度以内水汽密度为 8~10 g·m⁻³。降水发生 1 h 时,各高度层水汽含量出现峰值,1.0 km 高度以下

水汽含量增加至 9~12 g·m⁻³。此后各高度层水汽含量略微减小。对于弱降水,各高度层水汽密度较前两类偏小,降水发生前各高度层水汽变化不大,1.0 km 高度以下水汽密度为 6~8 g·m⁻³。降水发生时,各层水汽开始增加,降水发生 1 h 时 1.0 km 高度以下水汽含量增加至 7~9 g·m⁻³。此后,各层水汽迅速减小。

总体而言,在 3 类降水期间水汽密度垂直分布的共同特征是降水发生 1 h 时均出现跃升,不同特征为 3 个方面:①强降水的水汽密度垂直分布明显高于中等强度降水、弱降水;②强降水发生前 5 h 水汽密度跃升明显,中等强度降水、弱降水发生前水汽密度随时间变化不大;③强降水发生 1 h 时,水汽密度出现跃升并维持,中等强度降水期间水汽密度出现跃升后略微减小,弱降水期间水汽密度出现跃升后快速减小。

垂直积分水汽含量可以更清晰地表征 3 类降水

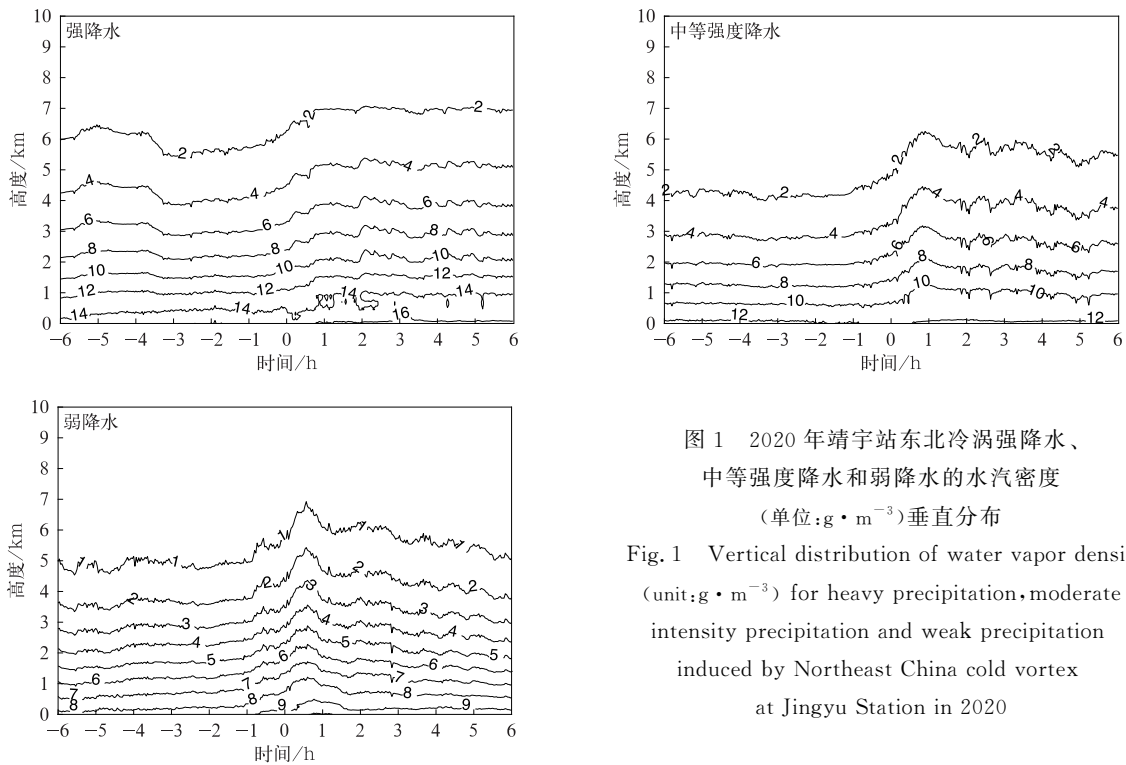


图 1 2020 年靖宇站东北冷涡强降水、中等强度降水和弱降水的水汽密度(单位:g·m⁻³)垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of water vapor density (unit:g·m⁻³) for heavy precipitation, moderate intensity precipitation and weak precipitation induced by Northeast China cold vortex at Jingyu Station in 2020

的整层水汽分布。由图 2 可见,强降水发生前 5 h 垂直积分水汽含量出现 1 次峰值,约为 4.8 cm,之后略减小。降水发生后垂直积分水汽含量显著增加,降水发生 2 h 时跃升为 5.8 cm,并在降水期间一直维持。中等强度降水发生前 6 h 垂直积分水汽含

量基本稳定在 3 cm,降水发生后垂直积分水汽含量陡增,降水发生 1 h 时增至约 4.2 cm,此后出现小幅减小。对于弱降水,垂直积分水汽含量表现特征与中等强度降水相似,即降水发生前 6 h 垂直积分水汽含量稳定在 2.0 cm,降水发生后垂直积分水汽含

量开始增加,在降水发生 1 h 时达到 3.5 cm,之后显著减小。

综上所述,3类降水的水汽含量与水汽密度的垂直分布特征基本一致。许皓琳等^[28]利用地基微波辐射计数据分析高空槽降水云系,指出乌鲁木齐

降水发生前 6 h 低空 1 km 高度以下水汽密度增加至 $10\sim 12\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,降水期间近地面水汽密度达 $16.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。结合上述分析可知,东北冷涡降水云系的水汽也呈现类似特征。

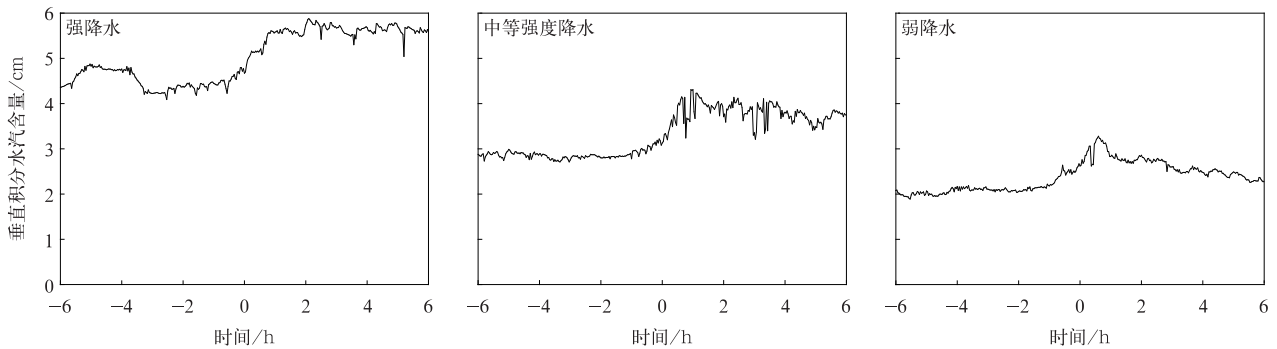


图2 2020年靖宇站东北冷涡强降水、中等强度降水和弱降水的垂直积分水汽含量

Fig. 2 Vertical distribution of integrated water vapor for heavy precipitation, moderate intensity precipitation and weak precipitation induced by Northeast China cold vortex at Jingyu Station in 2020

2.2 云液态水含量垂直分布

云液态水含量是云水资源条件的关键物理量。图3为东北冷涡3类降水的云液态水含量及温度垂直分布。由图3可见,东北冷涡强降水发生前约4 h, 5~6 km 高度云液态水含量迅速增至 $1.0\sim 1.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,该高度温度层结范围为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$;此时低层 2 km 高度以下也存在 $1.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 云液态水含量。降水发生后,各高度层的云液态水含量迅速减小,仅在降水发生 3.5 h 时 5 km 高度以下存在 $0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的云液态水含量。中等强度降水发生前 0~6 h,云液态水主要分布在 3 个高度层,即 1 km、2.5 km、5.2 km,对应温度层分别为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,云液态水含量随时间变化不大,分别为 $0.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。降水发生后,云液态水含量分布特征变化明显,3 km 高度以下云液态水含量增加至 $0.6\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,该特征在 6 h 降水期间一直维持。对于东北冷涡弱降水,云液态水含量小于前两类降水,降水发生前 6 h 云液态水主要分布在约 5 km 高度,温度层结为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,云液态水含量为 $0.4\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。降水发生后,云液态水主要分布在低层 1~3 km 高度,云液态水含量为 $0.4\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。齐彦斌等^[29]利用飞机观测东北冷涡对流云带,表明最大云液态水含量达到 $3.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。利用微波辐射

计数据统计的东北冷涡降水云系的液态水含量分布符合该特征。张佃国等^[30]利用飞机观测高空槽背景下的层状云系,指出北京地区云液态水含量在 5 km 高度以下随高度缓慢减小,多为 $0.1\sim 0.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。李聪等^[31]利用南京地基微波辐射计分析冷涡云系,指出降水前 2 h 垂直积分云液态水含量显著增加至 $1.5\sim 5.5\text{ mm}$,同时大量水汽聚集在 3 km 高度以下,垂直积分水汽含量为 4 cm,水汽密度分布在 $12\sim 15\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。聂浩浩等^[32]利用机载微波辐射计观测高空槽层状云系,发现云液态水主要分布在 1~3 km 高度,云液态水含量峰值约在 1.5 km 高度,达到 $0.74\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。水汽自地面向上逐渐减小,垂直积分水汽含量约为 1.5 cm,3 km 高度以下水汽密度为 $0.97\sim 12.74\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。可见,与高空槽层状云系、冷涡云系相比,东北冷涡云系的云液态水含量更丰富。

以上分析可知,3类东北冷涡降水发生前 6 h 的 5~6 km 高度均有云液态水分布,但特征不同:强降水发生前 0~4 h, 5~6 km 高度云液态水含量开始迅速增加至 $1.0\sim 1.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,温度层结在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明在强降水发生前,云中存在丰富的云液态水,贡献于降水的发生;中等强度降水、弱降水发生前 0~6 h, 5 km 高度云液态水含量分别为 $0.6\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.4\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

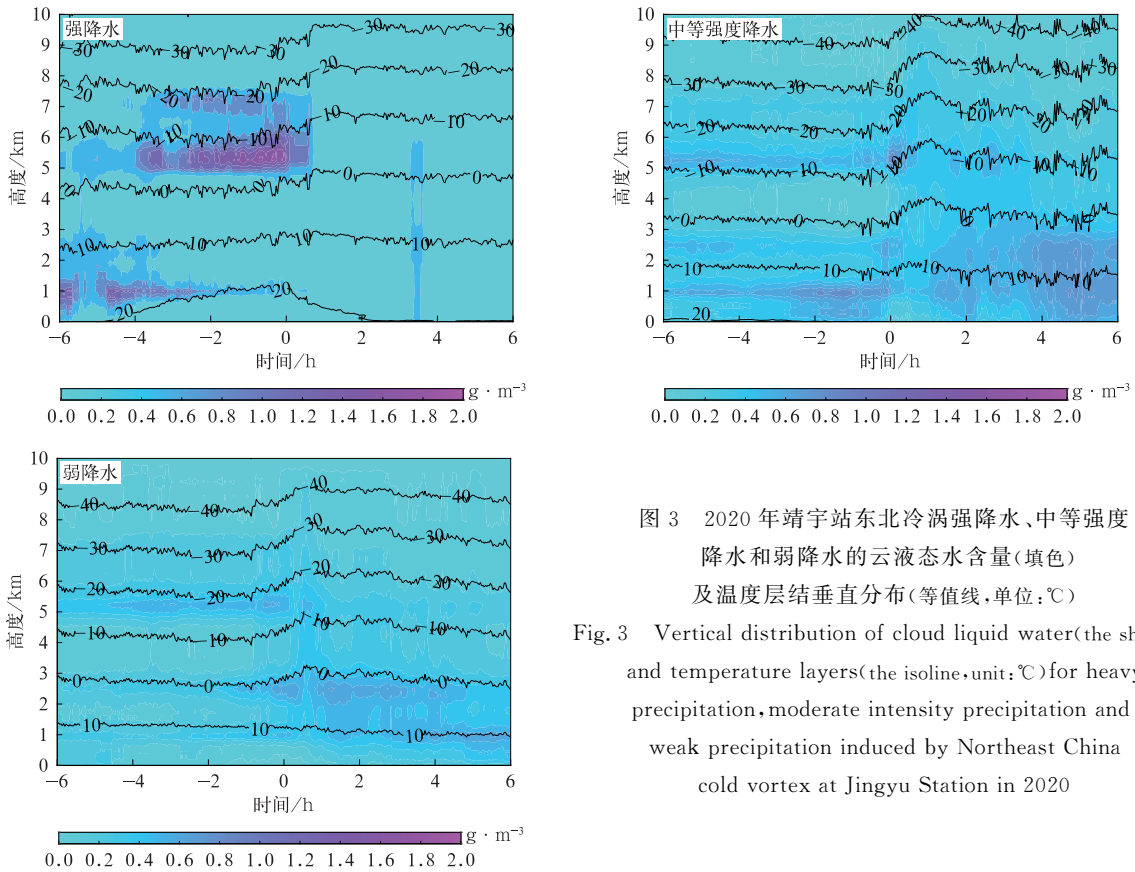


图 3 2020 年靖宇站东北冷涡强降水、中等强度降水及弱降水的云液态水含量(填色)及温度层结垂直分布(等值线,单位:℃)

Fig. 3 Vertical distribution of cloud liquid water(the shaded) and temperature layers(the isoline,unit:℃)for heavy precipitation, moderate intensity precipitation and weak precipitation induced by Northeast China cold vortex at Jingyu Station in 2020

垂直积分云液态水含量(图 4)可以清晰地反映 3 类东北冷涡降水的差异。由图 4 可见,在东北冷涡强降水发生前 6 h,积分垂直云液态水含量出现多次小幅扰动,范围主要为 4.2~4.8 mm。降水发生后,垂直积分云液态水含量略微减小,范围为 3.8~4.4 mm。在东北冷涡中等强度降水发生前 6 h,垂直积分云液态水含量随时间变化较小,约为 3.0 mm;降水期间,垂直积分云液态水含量增加至

3.5~4.0 mm。在东北冷涡弱降水发生前 6 h,垂直积分云液态水含量变化不大,约为 2.3 mm,降水发生时垂直积分云液态水含量迅速增至约 3.5 mm,之后快速减小,降水发生 4 h 时垂直积分云液态水含量减小至约 2.5 mm。对于降水性层状云,垂直积分云液态水含量的临界值为 0.3 mm^[33],而东北冷涡降水垂直积分云液态水含量远高于该阈值。

云系降水的强弱不仅取决于水汽、云液态水含

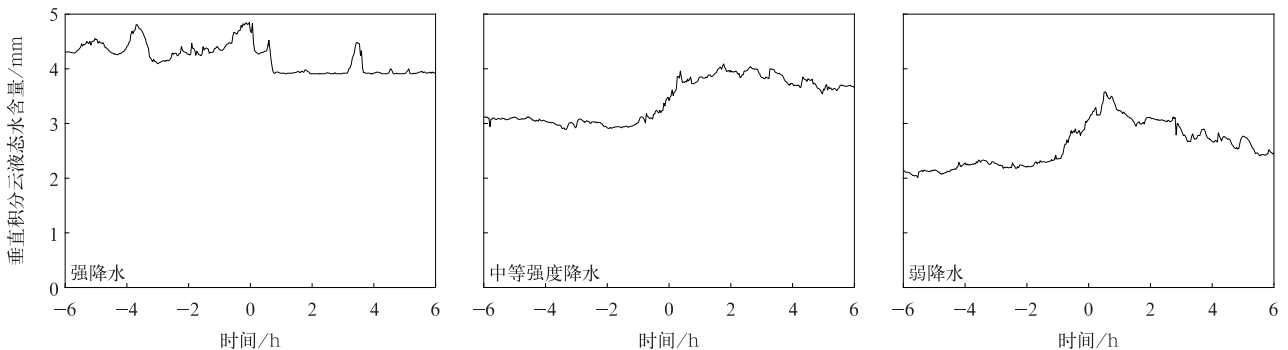


图 4 2020 年靖宇站东北冷涡强降水、中等强度降水和弱降水的垂直积分云液态水含量

Fig. 4 Vertical distribution of integrated cloud liquid water for heavy precipitation, moderate intensity precipitation and weak precipitation induced by Northeast China cold vortex during at Jingyu Station in 2020

量,水汽到云液态水转化率也是关键因素。为了分析由水汽到云液态水转化率,图 5 为 3 类东北冷涡降水期间垂直积分水汽含量、垂直积分云液态水含量、水汽到云液态水转化率。由图 5 可见,在东北冷涡强降水、中等强度降水、弱降水发生前 6 h,垂直积分云液态水含量随时间的变化趋势与垂直积分水汽含量的变化特征基本一致,水汽到云液态水转化率随时间变化较小,分别为 9%~11%、10%~12%、

10%~12%。在东北冷涡强降水期间,水汽到云液态水含量转化率先由 11%减小至 7%,这可能是由于水汽主要转化为雨滴粒子,导致其他相态粒子转化率显著降低。随着降水的发生,水汽到云液态水转化率小幅增加至 8%,再小幅降落至 7%,这表明云液态水含量的增加对降水的维持有积极贡献。在东北冷涡中等强度降水期间,水汽到云液态水转化率呈波动特征。在东北冷涡弱降水期间,水汽到

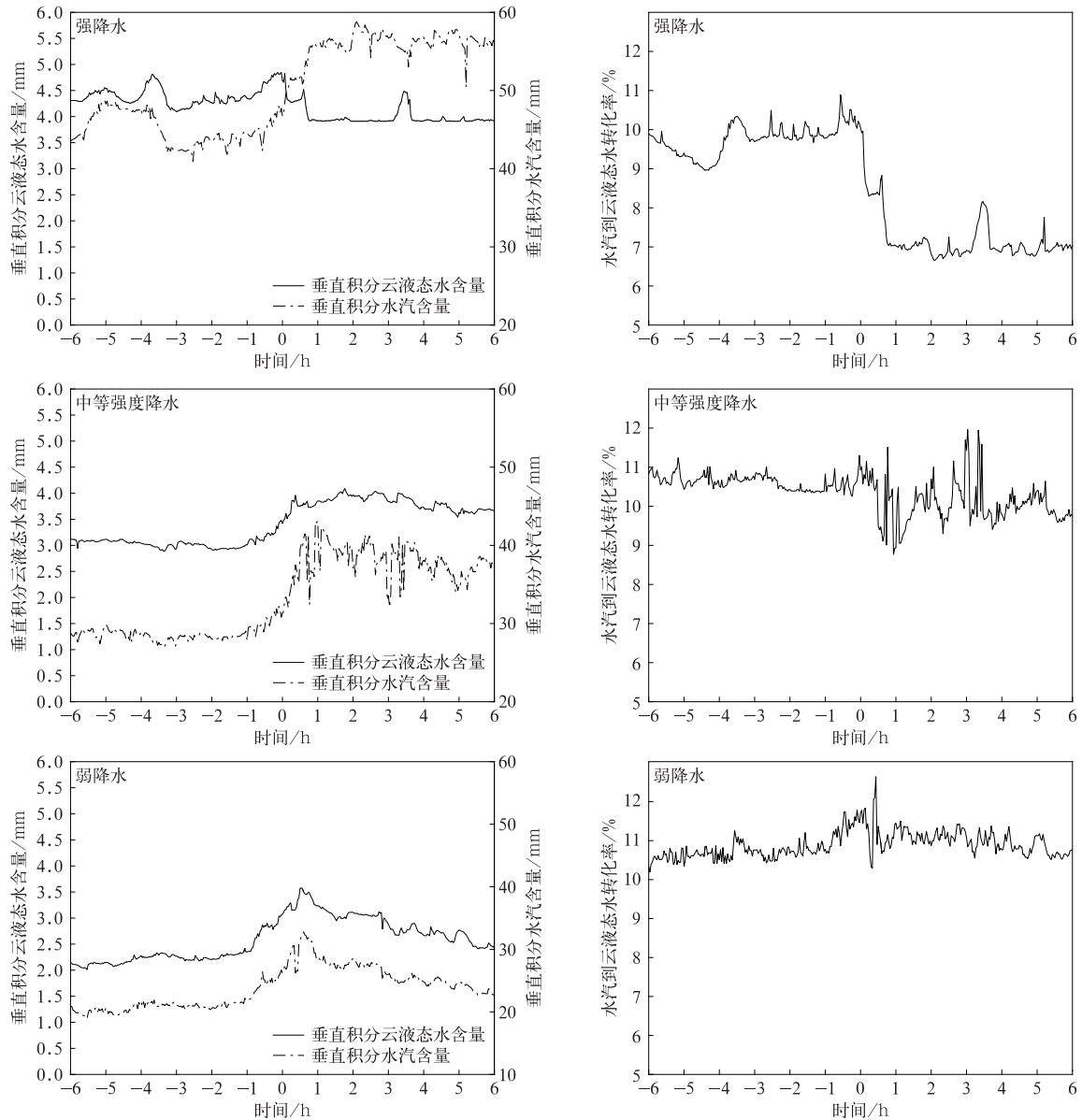


图 5 2020 年靖宇站东北冷涡强降水、中等强度降水和弱降水的垂直积分云液态水含量和垂直积分水汽含量、水汽到云液态水转化率

Fig. 5 Vertical distribution of integrated cloud liquid water and integrated water vapor, conversion rate of water vapor to cloud liquid water for heavy precipitation, moderate intensity precipitation, weak precipitation induced by Northeast China cold vortex at Jingyu Station in 2020

云液态水转化率也呈波动特征,转化率稳定在10%~11%,进一步表明水汽到云液态水转化率对降水的维持具有重要作用。

2.3 云体特征

3类东北冷涡降水的云体特征明显不同。在东北冷涡强降水发生前4~6 h(图6),云底高度约为5.5~7.0 km,温度层结为-6℃至-16℃(图3),此后云体高度急剧下降,云体接地时,降水发生;此时段相对湿度值由86%迅速下降为65%,5~8 km高度温度也显著下降(图3),近地面1 km高度以下温度上升,这表明中高层有干冷空气侵入,形成不稳定大气层结;降水发生后,相对湿度开始增加,充足的水汽维持了降水的发生。在东北冷涡中等强度降水发生前2~6 h(图6),云底高度几乎维持在4~6 km,温度层结为-4℃至-16℃(图3),相对湿度维持在约70%。降水发生前2 h至降水发生,云体高度迅速下降,相对湿度显著增大,当降水发生2 h时,相对湿度增加到90%。在降水期间,云底高度

维持在1~3 km。在东北冷涡弱降水发生前2~6 h云底高度在4~5 km(图6),温度层结为-10℃至-20℃(图3),相对湿度较低,小于70%;降水发生前2 h云体下降,相对湿度增加至80%。降水发生6 h期间,云体高度抬升至约4~5 km,相对湿度仍然大于70%。

东北冷涡降水发生前6 h,云系云底高度在4~7 km,对应温度层结在-4℃至-16℃。根据地面观测云分类规范^[34],低云云底高度小于2.5 km,中云云底高度不低于2.5 km并且小于6 km,高云云底高度大于6 km,东北冷涡强降水云底高度最高,为5.5~7.0 km,以中高云为主,中等强度降水、弱降水云系云底高度分别为4~6 km、4~5 km,呈现中云特征。在降水发生前2~4 h云体高度迅速下降,但东北冷涡强降水云系下降速度最快,从5.5 km高度迅速下降至地面,相对湿度减小速度也最快,不稳定大气层结特征明显。

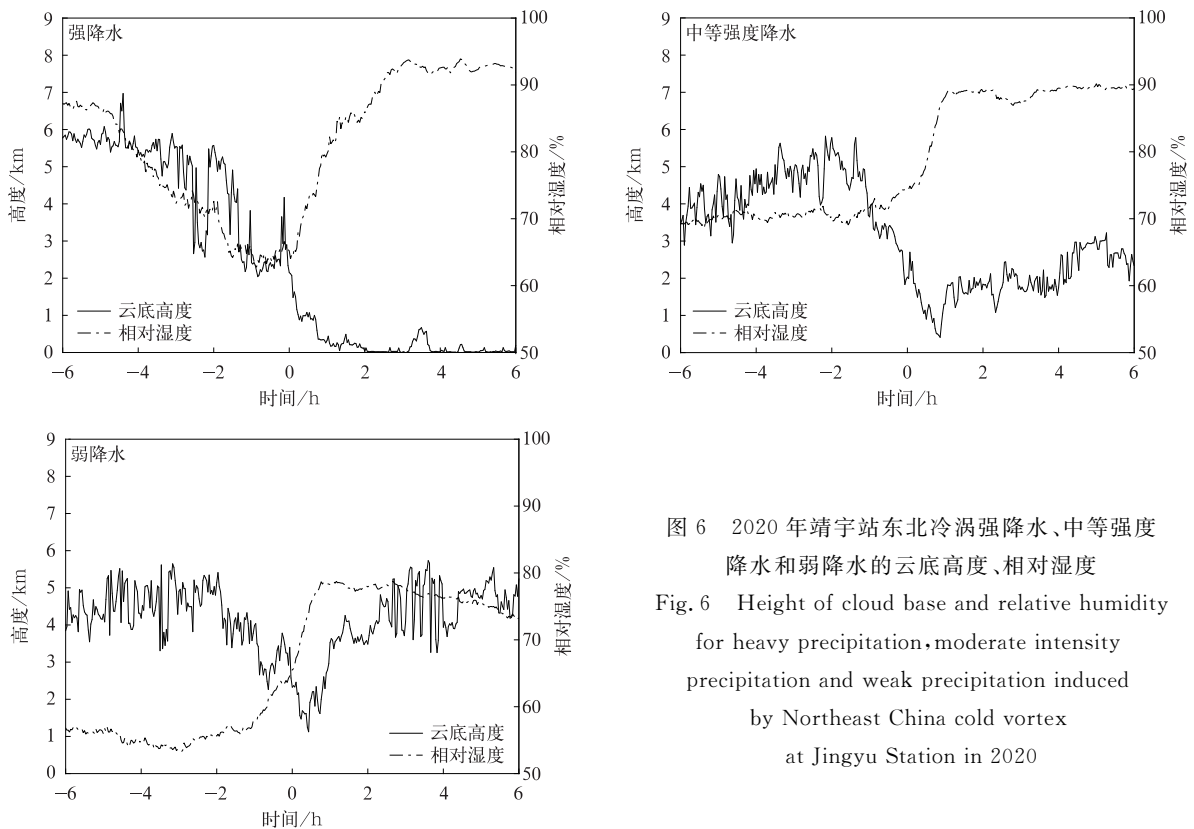


图6 2020年靖宇站东北冷涡强降水、中等强度降水和弱降水的云底高度、相对湿度

Fig. 6 Height of cloud base and relative humidity for heavy precipitation, moderate intensity precipitation and weak precipitation induced by Northeast China cold vortex at Jingyu Station in 2020

2.4 东北冷涡强降水预警指标

上述分析可见,有些物理量特征可作为东北冷涡强降水的预警指标。在强降水发生前5 h,水汽

跃升现象明显,6 km高度以下各高度层水汽密度显著增加,近地层1.0 km高度以下水汽跃增至 $12\sim 14\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。垂直积分水汽含量也相应出现峰值

4.8 cm。同时,在强降水发生前 4 h, 5~6 km 高度云液态水含量增加至 $1.0\sim 1.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 垂直积分云液态水含量为 4.2~4.8 mm。此时段内云体高度显著下降,由 5.5 km 高度下降至地面,相对湿度陡降。

由统计结果可以看到,东北冷涡强降水发生前会有云液态水含量、水汽跃升。为了研究上述现象,以 2020 年 8 月 13 日 12:00—14 日 01:00 东北冷涡强降水为例,结合再分析数据进一步分析。图 7 为利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析数据计算的大气整层水汽通量。图 8 为利用 NCEP 再分析数据计算得到的沿强降水区 127°E 等熵位涡、假相

当位温和风场垂直剖面。图 9 为利用 ERA5 再分析数据得到的冰相粒子、雪粒子、云液态水含量、雨水含量垂直分布。其中,等熵位涡是研究大气对流稳定性、斜压稳定性的常用物理量,能够综合反映动力、热力、水汽条件^[35]。假相当位温^[36]表示大气温度、湿度、压力分布特征。

由大气整层水汽通量(图 7)可知,8 月 13 日 08:00 有一条水汽通道影响东北地区,水汽主要来源为西北太平洋副热带高压后部西南路径的水汽输送、冷涡前部的水汽输送。受水汽输送带影响,整层水汽通量最大值位于辽宁、吉林省中部地区,达到 $10000\text{ g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})^{-1}$ 。

由等熵位涡、假相当位温垂直剖面(图 8)可见,

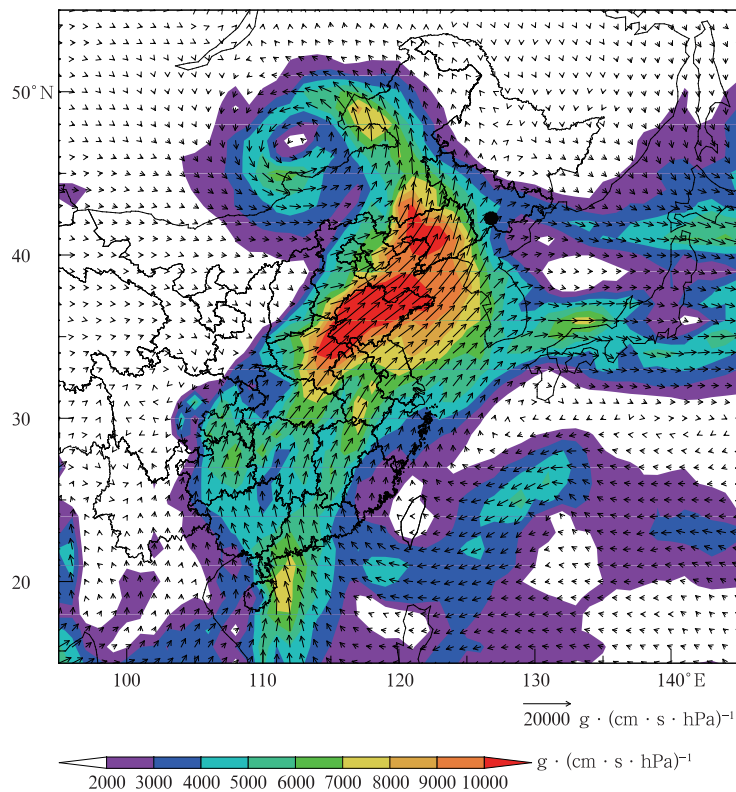


图 7 2020 年 8 月 13 日 08:00 大气整层水汽通量(黑色圆点表示观测点)
Fig. 7 Integrated atmospheric moisture flux at 0800 BT 13 Aug 2020
(the black dot denotes location of observation site)

强降水区中低层 850 hPa 至地面 $\frac{\partial\theta_{sc}}{\partial p} > 0$, 中高层 850 hPa 以上 $\frac{\partial\theta_{sc}}{\partial p} < 0$, 850 hPa 以下出现了锋区(图中棕色实线), 这表明中低层大气层结不稳定。强降水区上空中高层 800 hPa 以上为正值位涡区, 500 hPa 以上盛行偏西风。低层假相当位温锋区出现正位涡

扰动,在 600~850 hPa 存在强度为 0.8 PVU 的干冷空气侵入。这表明东北冷涡强降水发生前出现了不稳定层结, 累积了对流不稳定能量, 具有触发强对流天气的有利条件。

在降水发生前 6 h(8 月 13 日 06:00)受东北冷涡天气系统带来的西南路径水汽输送影响,水汽条件充沛,大气中约 9%~11%水汽含量转化为云液

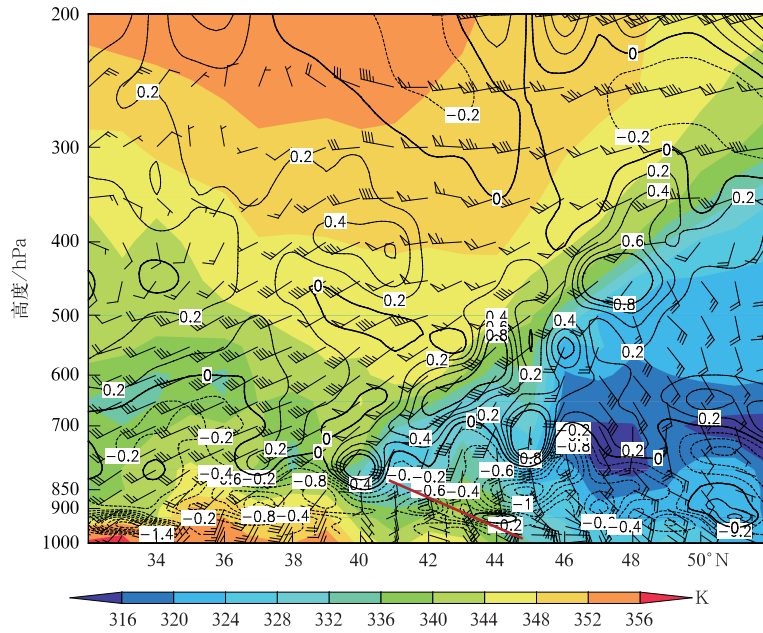


图 8 2020 年 8 月 13 日 08:00 沿强降水区 127° E 等熵位涡(等值线,单位:PVU)、假相当位温(填色)和风场垂直剖面(棕色实线表示锋区)

Fig. 8 Vertical section of potential vorticity(the isoline, unit:PVU), pseudo-equivalent potential temperature(the shaded) and vertical velocity along 127°E at 0800 BT 13 Aug 2020 (the brown solid line denotes the frontal zone)

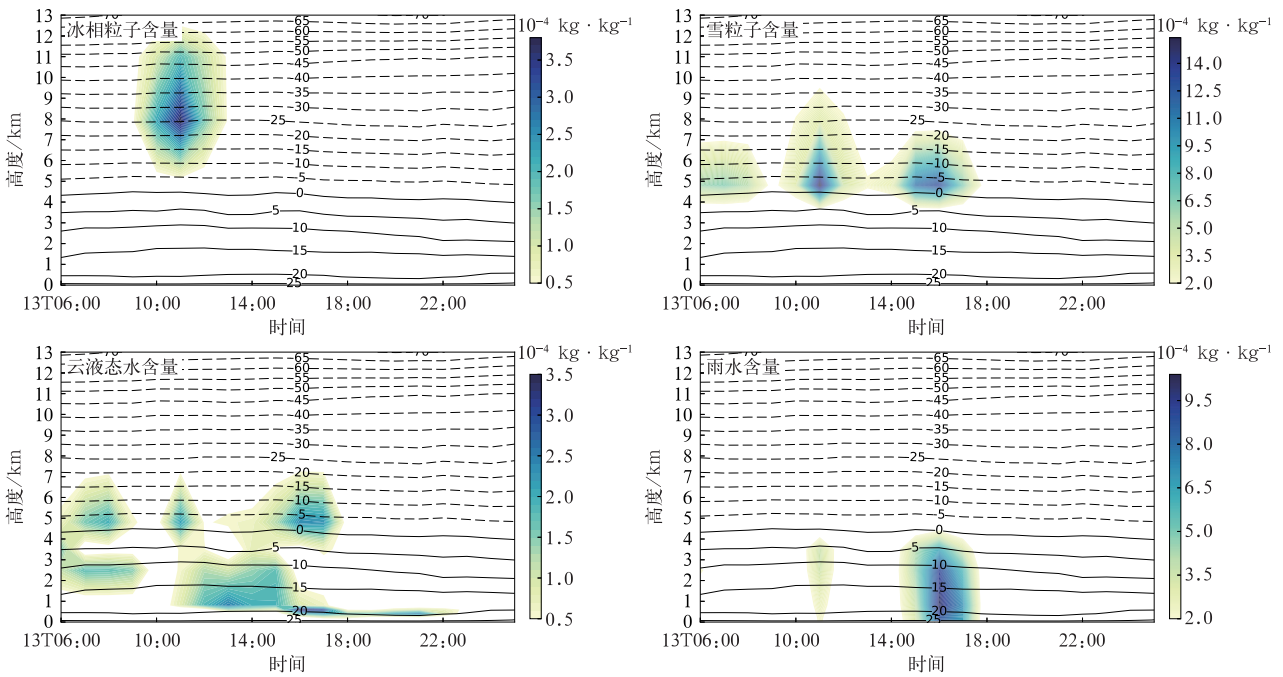


图 9 2020 年 8 月 13 日 06:00—14 日 01:00 靖宇站冰相粒子含量、雪粒子含量、云液态水含量、雨水含量的高度-时间分布(等值线表示温度,单位:°C)

Fig. 9 Height-time distribution of ice water content, snow water content, cloud liquid water content, rain water content at Jingyu Station from 0600 BT 13 Aug to 0100 14 Aug in 2020 (the isoline denotes temperature, unit: °C)

态水含量(图5),云液态水出现在4.5~6 km高度,含量为 $1.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,温度层结为 $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,该高度云内有雪粒子存在(图9),说明云液态水含量促进了雪粒子的形成。不稳定的大气层结、充足的水汽条件为强降水发生提供了有利条件,8月13日10:00—12:00产生了大量冰相粒子,冰、雪粒子分别分布在6~10 km、4~6 km高度,最大值分别为 $4 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $16 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明云体发展旺盛,云体高度扩展至10 km,冰雪粒子下沉融化产生雨水,进而降水发生。在降水期间(8月13日12:00—14日01:00),云液态水含量、雪粒子也对降水有贡献。有研究指出,水汽输送是东北冷涡强降水的重要影响机制,东北冷涡强降水发生前期会有水汽输送,水汽输送值最大的区域对应暴雨发生区^[7]。当干冷空气侵入暖湿气流中,配合中尺度切变线,会触发雷电、冰雹、暴雨等^[37]。此次东北冷涡强降水也体现了上述特征。

3 小 结

通过微波辐射计观测的水汽、云液态水含量、云底高度、相对湿度等数据,结合降水量数据、ERA5再分析数据等,统计分析了长白山麓2020年23个东北冷涡降水云系特征,得到以下主要结论:

1) 3类东北冷涡降水期间的共同特征:在东北冷涡降水发生前约4 h,5~6 km高度均出现云液态水,贡献于降水的发生;降水发生前2 h云体均出现急剧下降;在强降水、中等强度降水、弱降水发生1 h时,均出现水汽密度跃升,1 km高度以下分别为 $13 \sim 14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $9 \sim 12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $7 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。垂直积分水汽含量在强降水、中等强度降水、弱降水发生1~2 h时分别跃升至5.8 cm、4.2 cm、3.5 cm。

2) 水汽对东北冷涡强降水发生与维持至关重要。在东北冷涡强降水发生前5 h,6 km以下各高度层水汽密度出现峰值,近地层1.0 km高度以下水汽密度为 $12 \sim 14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,水汽总量约为4.8 cm。在东北冷涡中等强度降水、弱降水发生前6 h,并未出现水汽跃升的特点。虽然水汽密度在3类降水发生1 h时均出现了跃升,但该特征仅在强降水期间维持;垂直积分水汽含量也体现了该特征。水汽到云液态水转化率对降水的维持同样重要。

3) 云液态水含量对东北冷涡降水的发生有促进作用。云液态水主要存在于5~6 km高度,其在

强降水、中等强度降水、弱降水发生前0~4 h分别为 $1.0 \sim 1.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.6 \sim 0.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.4 \sim 0.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。云液态水含量贡献于冰雪晶的生成,伴随干冷空气侵入,形成不稳定层结,促进了东北冷涡强降水的发生。在东北冷涡强降水、中等强度降水、弱降水发生前6 h垂直积分云液态水含量分别为4.2~4.8 mm、3.0 mm、2.3 mm。

4) 东北冷涡降水发生前6 h,云底高度为4~7 km,温度层结为 $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。东北冷涡强降水发生前6 h存在中高云,降水发生前4 h,云底高度从5.5 km急剧下降至地面,伴随干冷空气侵入,相对湿度显著下降,该特征持续至降水发生。东北冷涡中等强度降水、弱降水发生前2 h,虽然也出现了云体高度快速下降的特点,但云体高度陡降程度明显弱于东北冷涡强降水,云体呈现中云特征,也未出现相对湿度明显下降的特点。

水汽、云液态水含量分布特征与季节、天气条件相关,本文仅使用2020年东北冷涡降水云系过程的微波辐射计数据,未来需要增加样本观测数据进行统计分析。

参 考 文 献

- [1] 孙力,安刚,廉毅,等. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析. 气象学报,2000,58(6):704-714.
Sun L, An G, Lian Y, et al. A study of the persistent activity of northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics. *Acta Meteor Sinica*, 2000, 58(6): 704-714.
- [2] 徐玥,邵美荣,唐凯,等. 2021年黑龙江两次超级单体龙卷过程多尺度特征. 应用气象学报,2022,33(3):305-318.
Xu Y, Shao M R, Tang K, et al. Multiscale characteristics of two supercell tornados of Heilongjiang in 2021. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3): 305-318.
- [3] 高洋,蔡森,曹治强,等. “21·7”河南暴雨环境场及云的宏观特征. 应用气象学报,2022,33(6):682-695.
Gao Y, Cai M, Cao Z Q, et al. Environmental conditions and cloud macro and micro features of “21·7” extreme heavy rainfall in Henan Province. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 682-695.
- [4] 孙力,廉毅,白乐生. 东北地区一次突发性暴雨分析. 高原气象,1995,14(4):103-111.
Sun L, Lian Y, Bai L S. Analysis of a sudden rainstorm in Northeast China. *Plateau Meteor*, 1995, 14(4): 103-111.
- [5] 应爽,袁大宇,李尚锋. 一次东北冷涡不同阶段强对流天气特征对比分析. 气象与环境学报,2014,30(4):9-18.
Ying S, Yuan D Y, Li S F. Comparative analysis of severe convective weather characteristics in different stages of Northeast

- China cold vortex. *J Meteor Environ*, 2014, 30(4):9-18.
- [6] 王培,沈新勇,高守亭.一次东北冷涡过程的数值模拟与降水分析. *大气科学*, 2012, 36(1):130-144.
Wang P, Shen X Y, Gao S T. A numerical study and rainfall analysis of a cold vortex process over Northeast China. *Chinese J Atmos Sci*, 2012, 36(1):130-144.
- [7] Yang Y T, Cui X P, Zou Q L. Moisture sources tracking of a cold vortex rainstorm over Northeast China using FLEX-PART. *Atmos Sci Lett*, 2022, 23(3). DOI: 10.1002/asl.1123.
- [8] 王振会,李青,楚艳丽,等.地基微波辐射计工作环境对K波段亮温观测影响. *应用气象学报*, 2014, 25(6):711-721.
Wang Z H, Li Q, Chu Y L, et al. Environmental thermal radiation interference on atmospheric brightness temperature measurement with ground-based K-band microwave radiometer. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(6):711-721.
- [9] 刘晓璐,刘东升,郭丽君,等.国产MWP967KV型地基微波辐射计探测精度. *应用气象学报*, 2019, 30(6):731-744.
Liu X L, Liu D S, Guo L J, et al. The observational precision of domestic MWP967KV ground-based microwave radiometer. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6):731-744.
- [10] 王洪,周后福,王琛,等.基于微波辐射计和探空的FY-4A温度廓线检验. *应用气象学报*, 2023, 34(3):295-308.
Wang H, Zhou H F, Wang C, et al. Accuracy validation of FY-4A temperature profile based on microwave radiometer and radiosonde. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3):295-308.
- [11] 林晓萌,尉英华,张楠,等.基于地基遥感设备构建遥感探空廓线. *应用气象学报*, 2022, 33(5):568-580.
Lin X M, Wei Y H, Zhang N, et al. Construction of air-sounding-profile system based on foundation-remote-sensing equipment. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5):568-580.
- [12] Heggli M, Rauber R M, Snider J B. Field evaluation of a dual-channel microwave radiometer designed for measurements of integrated water vapor and cloud liquid water in the atmosphere. *J Atmos Oceanic Technol*, 1987, 4(1):204-213.
- [13] Ruffieux D, Nash J, Jeannot P, et al. The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign; TUC. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(1):5-10.
- [14] Revercomb H E, Turner D D, Tobin D C, et al. The ARM program's water vapor intensive observation periods; Overview, initial accomplishments, and future challenges. *Bull Amer Meteor Soc*, 2003, 84(2):217-236.
- [15] Löhnert U, Crewell S, Simmer C, et al. Profiling cloud liquid water by combining active and passive microwave measurements with cloud model statistics. *J Atmos Oceanic Technol*, 2001, 18(8):1354-1366.
- [16] 朱元竞,胡成达,甄进明,等.微波辐射计在人工影响天气研究中的应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 1994, 30(5):597-606.
Zhu Y J, Hu C D, Zhen J M, et al. Application of microwave radiometer in weather modification research. *Acta Sci Nat Univ Pekin*, 1994, 30(5):597-606.
- [17] 陈洪滨.利用高频微波被动遥感探测大气. *遥感技术与应用*, 1999, 14(2):49-54.
Chen H B. Using high frequency microwave passive remote sensing to detect the atmosphere. *Remote Sens Technol Appl*, 1999, 14(2):49-54.
- [18] 雷恒池,魏重,沈志来,等.微波辐射计探测降雨前水汽和云液水. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊I):73-79.
Lei H C, Wei Z, Shen Z L, et al. Detection of water vapor and cloud liquid water before rainfall by microwave radiometer. *J Appl Meteor Sci*, 2001, 12(Suppl I):73-79.
- [19] 李万彪,刘盈辉,朱元竞,等. HUBEX 试验期间地基微波辐射计反演资料的应用研究. *气候与环境研究*, 2001, 6(2):203-208.
Li W B, Liu Y H, Zhu Y J, et al. An application of the measurements by the ground-based microwave radiometers in HUBEX. *Clim Environ Res*, 2001, 6(2):203-208.
- [20] 刘志雄,戴泽军,彭菊香,等.基于LAPS的一次局地强冰雹过程分析. *暴雨灾害*, 2009, 28(4):313-320.
Liu Z X, Dai Z J, Peng J X, et al. Mechanism analysis of a local strong hail based on LAPS. *Torrential Rain Disasters*, 2009, 28(4):313-320.
- [21] 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用. *应用气象学报*, 2013, 24(5):576-584.
Huang Z Y, Xu G R, Wang X F, et al. Applications of ground-based microwave radiation data to short-term rainstorm and potential forecast. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(5):576-584.
- [22] 敖雪,王振会,徐桂荣,等.地基微波辐射计资料在降水分析中的应用. *暴雨灾害*, 2011, 30(4):358-365.
Ao X, Wang Z H, Xu G R, et al. Apply of ground-based microwave radiometer observation in precipitation events. *Torrential Rain Disasters*, 2011, 30(4):358-365.
- [23] 黄治勇,周志敏,徐桂荣,等.风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用. *高原气象*, 2015, 34(1):269-278.
Huang Z Y, Zhou Z M, Xu G R, et al. Monitoring application of hailstorm event with the observation of wind profile radar and ground-based microwave radiometer. *Plateau Meteor*, 2015, 34(1):269-278.
- [24] 汪小康,徐桂荣,院琨.不同强度降水发生前微波辐射计反演参数的差异分析. *暴雨灾害*, 2016, 35(3):227-233.
Wang X K, Xu G R, Yuan K. Different characteristic analysis of inversion parameters for heavy rainfall and weak rainfall by microwave radiometer data. *Torrential Rain Disasters*, 2016, 35(3):227-233.
- [25] 周冰雪,朱朗峰,吴昊,等.微波辐射计反演大气廓线精度及降水预报应用. *应用气象学报*, 2023, 34(6):717-728.
Zhou B X, Zhu L F, Wu H, et al. Accuracy of atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer and its application to precipitation forecast. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6):717-728.
- [26] 孙力,郑秀雅,王琪.东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大

- 型环流系统之间的关系. 应用气象学报, 1994, 5(3): 297-303.
- Sun L, Zheng X Y, Wang Q. Temporal and spatial distribution characteristics of northeast cold vortex and its relationship with large circulation system in East Asia. *J Appl Meteor Sci*, 1994, 5(3): 297-303.
- [27] 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 东北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992: 129-137.
- Zheng X Y, Zhang T Z, Bai R H. Northeast Rainstorm. Beijing: China Meteorological Press, 1992: 129-137.
- [28] 许皓琳, 郑佳锋, 姜涛, 等. 乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件的分析研究. 气象, 2020, 46(11): 1440-1449.
- Xu H L, Zheng J F, Jiang T, et al. Analysis and research on water vapor condition of thunderstorm precipitation in Urumqi and Chengdu Airports. *Meteor Mon*, 2020, 46(11): 1440-1449.
- [29] 齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究. 大气科学, 2007, 31(4): 621-634.
- Qi Y B, Guo X L, Jin D Z. An observational study of macro/microphysical structures of convective rainbands of a cold vortex over Northeast China. *Chinese J Atmos Sci*, 2007, 31(4): 621-634.
- [30] 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2003年8~9月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究. 大气科学, 2007, 31(4): 596-610.
- Zhang D G, Guo X L, Fu D H, et al. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its surrounding regions during august-september 2003. *Chinese J Atmos Sci*, 2007, 31(4): 596-610.
- [31] 李聪, 姜有山, 姜迪, 等. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析. 气象, 2017, 43(9): 1084-1094.
- Li C, Jiang Y S, Jiang D, et al. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi-source data. *Meteor Mon*, 2017, 43(9): 1084-1094.
- [32] 聂皓浩, 王婉, 郭晓军, 等. 基于机载微波辐射计的天津地区典型层状云水汽和液态水分布特征分析. 干旱气象, 2023, 41(4): 599-606.
- Nie H H, Wang W, Guo X J, et al. Distribution characteristics of typical stratiform clouds water vapor and liquid water in Tianjin Area based on airborne microwave radiometer. *J Arid Meteor*, 2023, 41(4): 599-606.
- [33] 段英, 李云川, 赵亚民. 华北平原对流风暴的个例分析. 气象, 1999, 25(11): 25-28.
- Duan Y, Li Y C, Zhao Y M. A case study of a convective storm over the North China Plain. *Meteor Mon*, 1999, 25(11): 25-28.
- [34] 李响英, 方乐锌, 寇雄伟. 卫星-地基-模式统一的自动观测云分类原则和标准的研究. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2433-2441.
- Li Y Y, Fang L X, Kou X W. Principle and standard of auto-observation cloud classification for satellite, ground measurements and model. *Chinese J Geophys*, 2014, 57(8): 2433-2441.
- [35] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, 53(4): 387-405.
- Wu G X, Cai Y P, Tang X J. Development of wet potential vorticity and inclined vorticity. *Acta Meteor Sinica*, 1995, 53(4): 387-405.
- [36] 王秀娟, 姜忠宝, 马晓华, 等. 2018年吉林省一次暴雨过程成因分析. 气象与环境学报, 2020, 36(2): 1-8.
- Wang X J, Jiang Z B, Ma X H, et al. Causes analysis of heavy rainfall in 2018 in Jilin Province. *J Meteor Environ*, 2020, 36(2): 1-8.
- [37] 刘英, 王东海, 张中锋, 等. 东北冷涡的结构及其演变特征的个例综合分析. 气象学报, 2012, 70(3): 354-370.
- Liu Y, Wang D H, Zhang Z F, et al. A comprehensive analysis of the structure of a Northeast China-cold-vortex and its characteristics of evolution. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 70(3): 354-370.

Characteristics of Precipitation Cloud System in Northeast China Cold Vortex at Changbai Mountain Foothills

Wang Xiujuan¹⁾²⁾³⁾ Qi Yanbin¹⁾²⁾³⁾ Jiang Xiaoling¹⁾²⁾³⁾ Yu Dongjia¹⁾²⁾³⁾ Wang Tianqi¹⁾²⁾³⁾

¹⁾ (Jilin Province Technology Center for Meteorological Disaster Prevention, Changchun 130062)

²⁾ (Joint Open Laboratory for Weather Modification of China Meteorological Administration/
People's Government of Jilin Province, Changchun 130062)

³⁾ (Jilin Cloud Physics Field Scientific Test Base, CMA, Changchun 130062)

Abstract

Utilizing the microwave radiometer data and hourly rainfall data in Jilin Cloud Physics Field Scientific Test Base, CMA, the precipitation cloud system in Northeast China cold vortex at the Changbai Mountain foothills is analyzed. Rainfall events are divided into heavy precipitation, moderate intensity precipitation, and weak precipitation. Assisted by ERA5 reanalysis data, results show that the middle and high clouds appear first by 6 hours before the precipitation occurrence at the Changbai Mountain foothills. Water vapor and cloud water are both important for the occurrence and maintenance of heavy precipitation induced by Northeast China cold vortex. The cloud liquid water appears approximately with the height of 5–6 km by 4 hours before the precipitation induced by Northeast China cold vortex. Two hours before precipitation, the cloud descends sharply. During one hour after the three types precipitation occurrence, the vapor density respectively leap to 13–14 g · m⁻³, 9–12 g · m⁻³, and 7–9 g · m⁻³ below 1 km height. Integrated water vapor during three types of precipitation increase to 5.8 cm, 4.2 cm, and 3.5 cm, respectively. The water vapor increases 5 hours before the occurrence of strong precipitation below 6 km height. The vapor density increases to 12–14 g · m⁻³ below 1 km height. There is cloud liquid water with 1.0–1.6 g · m⁻³ at the height of 5–6 km in the temperature layers of -5–-10 °C, which contributes to the formation of ice and snow crystals. Six hours before the heavy precipitation, moderate intensity precipitation, and weak precipitation, the integrated cloud liquid water are 4.2–4.8 mm, 3.0 mm, 2.3 mm, respectively. There are middle and high clouds in the temperature layers of -6 °C and -16 °C. The height of cloud base drops sharply from 5.5–7 km to the ground, while the relative humidity drops sharply. These characteristics continue until the beginning of heavy rainfall. For moderate and weak precipitation induced by Northeast China cold vortex, there is middle cloud before the precipitation, and the cloud liquid water is 0.4–0.8 g · m⁻³ at the height of 5–6 km. However, there is no characteristic of water vapor jumping or relative humidity decreasing.

Through the study of these physical quantity characteristics, indicators with indicative and predictive significance for precipitation induced by Northeast China cold vortex have been established.

Key words: Northeast China cold vortex; microwave radiometers; precipitation; statistical analysis