暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

江西省“24·1”回流暴雪天气的锋生与对称不稳定分析

肖安 单九生 刘献耀

Analysis of frontogenesis and symmetric instability of return snowstorm in January 2024 in Jiangxi Province

XIAO An，SHAN Jiusheng，LIU Xianyao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-080

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

皖南山区一次暴雪过程地转适应锋生条件分析

Analysis of geostrophic adjustment to frontogenesis conditions during a heavy snowstorm in the mountainous area of southern Anhui Province

暴雨灾害. 2024, 43(1): 23-31 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-092

一次暴雪过程的高架雷暴环境条件及雷达特征

Synoptic conditions and radar characteristics for elevated thunderstorm during a snowstorm event in Henan Province

暴雨灾害. 2023, 42(5): 541-553 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-219

乌鲁木齐两次极端暴雪天气过程对比分析

Comparative analysis of two extreme blizzard processes in Urumqi

暴雨灾害. 2020, 39(3): 225-233 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.002

对流风暴大气不稳定机制研究的若干问题

Some issues in studies on the atmospheric instability of convective storms

暴雨灾害. 2024, 43(3): 266-275 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-030

2018年12月湖南极端低温暴雪环流特征及成因分析

Circulation characteristics and causes of extreme low temperature and blizzard in Hunan in December 2018

暴雨灾害. 2020, 39(5): 487-495 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.007

基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析

Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data

暴雨灾害. 2024, 43(1): 13-22 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-221

关注微信公众号，获得更多资讯信息

肖安,单九生,刘献耀.2026.江西省“24·1”回流暴雪天气的锋生与对称不稳定分析[J].暴雨灾害,45(1):80−90. XIAO An, SHAN Jiusheng, LIU Xianyao. 2026. Analysis of frontogenesis and symmetric instability of return snowstorm in January 2024 in Jiangxi Province [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):80−90 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−080

江西省“24·1”回流暴雪天气的锋生与对称不稳定分析

肖安[1,2], 单九生[1,2], 刘献耀[1]

(1. 江西省气象台, 南昌 330096; 2. 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330096)

摘　要: 2024 年 1 月 21—23 日江西省出现一次伴有回流天气形势的区域性极端暴雪天气过程, 全省 91.2% 的国家气象观测站出现积雪, 刷新 1959 年以来历史记录, 暴雪站数突破 1991 年以来极值。利用常规气象观测资料和 ERA5 再分析资料, 对此次暴雪天气的环流形势、环境条件进行分析, 重点探讨锋生与对称不稳定演变特征。结果表明: (1) 本次暴雪天气发生前低层无逆温和冷垫; 850 hPa 存在来自海洋的东风暖湿回流; 1 000—600 hPa 比湿均为 3~4 g·kg^{-1}, 水汽充沛; (2) 1 月 22 日 02—20 时 (北京时), 江西省中北部 500 hPa 到地面之间长时间处于暖湿状态, 700 hPa 锋生强度大值中心由湖南省中部向东北方向延伸至江西中北部地区, 并逐渐增强, 有利于垂直上升运动发展; 700 hPa 假相当位温 (θ_{se}) 维持在 340~348 K 的高值状态; 900—800 hPa 高度附近存在 θ_{se} 密集区和锋生强度中心, 低层回流水汽输送带中存在较强的垂直上升运动。(3) 暴雪过程中存在条件性对称不稳定, 850 hPa 的湿位涡正压项 (ζ_{MPV1})≥1 PVU 的区域从江西省南部地区向东北方向伸展, 强度也逐渐加强; 全省湿位涡斜压项 (ζ_{MPV2})<0 PVU 低值中心与 ζ_{MPV1} 重合。垂直方向上, 江西省北部产生不稳定能量的高度大约在 700 hPa, 江西省南部高度在 900 hPa。湿位涡与暴雪的时空分布特征有较好的对应关系。

关键词: 回流暴雪; 锋生函数; 假相当位温; 条件性对称不稳定

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−080

Analysis of frontogenesis and symmetric instability of return snowstorm in January 2024 in Jiangxi Province

XIAO An[1,2], SHAN Jiusheng[1,2], LIU Xianyao[1]

(1. *Jiangxi Meteorological Observatory*, *Nanchang* 330096; 2. *Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention of Jiangxi Province*, *Nanchang* 330096)

Abstract: A regional extreme snowstorm occurred in Jiangxi Province from 21 to 23 January 2024, accompanied by a return-flow weather pattern. Snow cover was recorded at 91.2% of the national meteorological observation stations across the province, setting a new historical record since 1959, with the number of blizzard stations surpassing the extreme value since 1991. Base on meteorological observation data and ERA5 reanalysis data, the circulation background, environmental conditions were analyzed. and frontogenesis dynamical mechanisms of the return flow snowstorm was analyzed. The study focuses on the evolving characteristics of frontogenesis and symmetric instability. The result are as follows. (1) Before the heavy snowfall event, the temperature gradually decreased from the lower to the middle atmosphere, with no inversion or cold layer observed. Warm-moist easterly return flow prevailed at 850 hPa. The specific humidity was 3~4 g·kg^{-1} between 1 000 and 600 hPa. (2) The central and northern regions of Jiangxi Province exhibited prolonged warm and humid conditions between 500 hPa and the surface from 02:00 BT to 20:00 BT on January 22, 2024. The frontal genesis intensity at 700 hPa exhibited a high-value center extending northeastward from central Hunan to central-northern Jiangxi, with gradual intensification, promoting enhanced vertical upward motion. The pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se}) at 700 hPa remained elevated (340~348 K), while a dense θ_{se} zone and frontal genesis center were observed near the 900–800 hPa level. Additionally, strong vertical ascent was identified within the low-level moisture transport belt in the return flow. These conditions contributed to favorable dynamic and

收稿日期: 2024−05−01; **定稿日期**: 2024−08−20

资助项目: 华东区域气象科技协同创新基金合作项目 (QYHZ202317); 江西省气象局科技重点项目 (JX2023Z05); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2021Z012); 中国气象局 2024 年决策服务专项 (低温雨雪冰冻气象灾害风险预估技术研究与应用 10)

第一作者: 肖安, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: mrxiaoan@sohu.com

通信作者: 单九生, 主要从事天气预报技术及相关研究。E-mail: sjs861002@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

thermodynamic environments for convective development. (3) During the snowstorm event, conditional symmetric instability was present. The area with barotropic term of moist potential vorticity $\zeta_{MPV1}\geqslant 1$ PVU at 850 hPa extended northeastward from southern Jiangxi Province with gradually intensifying strength. The baroclinic term of moist potential vorticity $\zeta_{MPV2}<0$ PVU showed a low-value center that coincided with the ζ_{MPV1} region. Vertically, the height of unstable energy generation was approximately at 700 hPa in northern Jiangxi and around 900 hPa in southern Jiangxi. There is a good correspondence between the spatial and temporal distribution characteristics of moist potential vorticity and snowstorm.

Key words: return flow snowstorm; frontal function; pseudo-equivalent potential temperature; conditional symmetric instability

引　言

江西省位于长江中下游以南地区, 暴雪天气相对较少。但暴雪天气来临时, 通常会伴随寒潮、大风、道路结冰等灾害性天气, 往往会严重影响交通, 使电力设施受损、农业减产, 给城乡居民生产生活造成重大影响和危害 (胡菊芳等, 2008; 肖红茹等, 2019)。

一般来说, 暴雪天气发生时低层大气会存在冷垫 (周芳等, 2021; Zhang and Shang, 2022), 暖湿空气沿冷垫爬升 (吴庆梅等, 2014), 有利于出现暴雪天气。对于华北、东北等北方地区而言, 回流天气是指冷空气从东北平原南下, 经渤海以偏东路径侵入华北平原, 造成华北平原降雪。低层东风或偏东风是形成华北平原降雪低层冷垫的重要原因之一 (Zhang et al., 2022; 张桂莲等, 2022); 在南方地区, 冷空气的补充南下是低层大气形成冷垫的主要方式之一 (胡燕等, 2023)。Chen 等 (2019) 对美国东北部 21 个特大城市所在的沿海地区冬季极端暴雪事件进行分析, 发现回流天气形势是造成 925—800 hPa 相对湿度较大的原因之一。中国回流天气也经常导致极端暴雪的产生, 但情况往往更加复杂。如王丽荣等 (2013) 对 2009 年石家庄一次特大暴雪的中尺度风场的分析, 发现这次暴雪过程包含了回流降雪和西来槽降雪两部分。李姝霞等 (2023) 认为回流天气和冷空气扩散南下共同造成了河南 2021 年 2 月 24—25 日的暴雪天气过程。暖湿急流在暴雪中的作用也非常重要, 西南急流形成强垂直风切变和深厚的锋生区, 加强的斜升运动和锋面次级环流, 对暴雪起增幅作用 (冯丽莎等, 2020), 主要表现在垂直运动上升支一方面将低层暖湿空气输送到高层, 另一方面将暖湿急流中的扰动动能向下输送到低层冷暖气流交汇区域, 进一步促进暴雪的发生发展 (Huang et al., 2023; Holley and Smart, 2023)。张迎新等 (2007) 将假相当位温 (θ_{se})≤280 K 的区域定义为干冷空气, 分析了太行山地区干冷空气在暖空气下方逐渐逐渐侵入华北平原的过程, 并以θ_{se}密集区代表锋区。

江西省区域性 (≥10 个国家级气象观测站, 以下简称国家站) 暴雪天气较少, 相关研究不多。郑婧等 (2010) 对区域性大雪天气分析指出, 最容易出现大雪的江西省北部地区 1 000 hPa 温度基本都在 0 ℃ 以下, 江西省中部地区基本都低于 1~2 ℃, 925 hPa 温度一般在−2~−5 ℃, 850 hPa 和 700 hPa 存在逆温结构。其中, 逆温结构的差异也常常导致不同降水相态的变化 (唐明晖等, 2023)。这种逆温结构不仅是江西省大雪/暴雪模型中最常见的温度垂直分布结构, 也是其他省市暴雪天气个例中比较常见的一种逆温结构 (崔慧慧和苏爱芳, 2019; 张爱忠等, 2023)。参照华北回流天气的定义 (吴庆梅等, 2014), 统计发现, 1959 年 1 月—2024 年 1 月江西省仅有 11 个暴雪日伴有回流天气形势。

2024 年 1 月 21—23 日江西省出现区域性暴雪天气过程。由于中低层未出现逆温, 近地面气温和地面温度均较高, 也未考虑回流形势可能会增强这次暴雪天气过程中的水汽输送强度, 导致预报出现误判, 预报结论为“全省部分地区中到大雪, 局部山区有暴雪; 积雪深度部分地区 1~3 cm, 局部山区 5 cm”, 降雪量级、范围和积雪深度的预报均明显偏弱。本文利用常规气象观测资料和 ERA5 再分析资料, 对此次过程的环流形势、环境条件进行了分析, 并重点探讨了江西暴雪天气过程中冷暖空气交汇导致的锋生和对称不稳定的演变特征。以弥补江西省大雪预报模型没有考虑回流天气形势的不足, 初步揭示回流天气形势对江西省暴雪天气的影响, 加深对此类罕见暴雪天气的认识, 提高暴雪天气的预报能力。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文使用的资料包括: (1) 来源于中国气象局国家信息中心“天擎”平台 2024 年 1 月 21—23 日江西省 91 个国家站常规地面、高空观测数据和积雪深度人工加密观测资料, 其中, 积雪深度人工加密观测频次为 21 日 20 时—22 日 08 时 (北京时, 下同) 每 3 h 观测 1 次、22 日 10 时—23 日 23 时每 1 h 观测 1 次, 用于降雪实况分析。(2) 同时段欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的 ERA5 再分析资料 (Hersbach et al., 2020), 水平分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 h, 用于锋生和不稳定条件分析。

1.2 研究方法

锋面强迫对暴雪过程的发生、发展具有非常重要作用，其引发的次级环流有利于暴雪系统的加强和维持 (冯丽莎等, 2020)。冷暖空气交汇对峙有利于锋生并出现较大的降雪量 (刘裕禄等, 2024)。锋区对应温度或θ_{se}等值线密集区，主观上可以通过这一特征判断是否有锋区，但缺少定量化依据。而锋生函数可以定量分析锋面位置，较好反映锋生、锋消及锋面强度变化，本文参考 Bluestein(1993) 和朱乾根等 (2000) 的定义对锋生函数进行计算分析。

湿位涡 (ζ_{MPV}) 是一个综合诊断物理量，单位为 10^{-6} m^2·K·kg^{-1}·s^{-1} (以下用 PVU 表示)，可用来表征大气的不稳定特征 (Yao et al., 2020)，也经常被用在暴雪过程的诊断分析中 (吴国雄等, 1995; 冯丽莎等, 2020)，其计算参考 Liang 和 Tang (2017) 的方法。

2 天气实况

2024 年 1 月 21 日 20 时—23 日 08 时，江西省出现区域性暴雪天气，全省 91 个国家站全部观测到降雪，83 个站出现积雪，其中 64 个站最大雪深超过 5 cm，35 个站超过 10 cm (图 1a)。降雪主要出现在 21 日 20 时—22 日 20 时，积雪主要分布在江西省中北部，其中抚州市崇仁县和宜黄县最大雪深分别达 21 cm 和 20 cm，为全省积雪深度排名第一、第二位。21 日 20 时—22 日 08 时的降雪主要出现在江西省中北部 (图 1b)，22 日 08—20 时降雪主要出现在江西省中南部地区 (图 1c)。这次过程降雪范围广，降雪强度大，积雪站数排江西省 1959 年以来第 1 位 (表 1)；积雪深度≥10 cm 的站数排江西省 1959 年以来第 12 位、1991 年以来第 1 位。

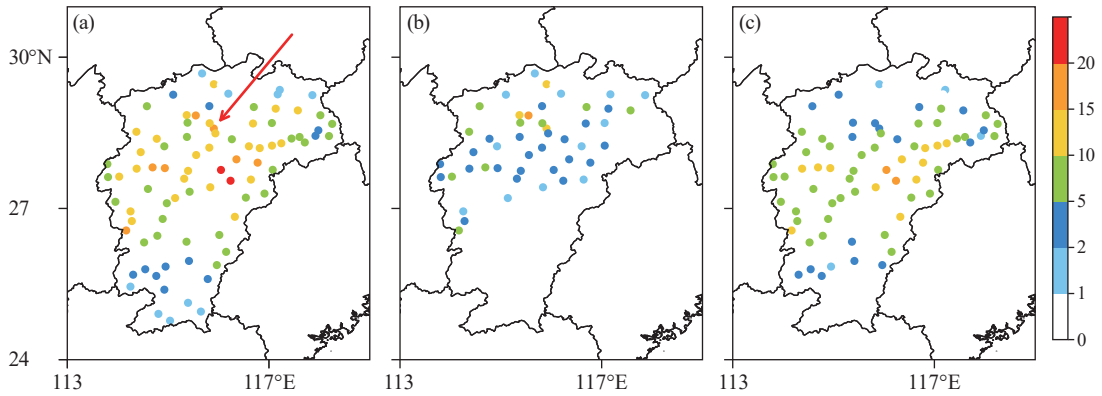


图 1 2024 年 1 月 21 日 20 时—23 日 08 时江西省最大积雪深度 (a, 单位: cm; 箭头所指站点为南昌)、1 月 21 日 21 时—22 日 08 时 (b)、1 月 22 日 09—20 时 (c) 新增积雪深度 (单位: cm)

Fig. 1 (a) Maximum snow accumulation depth (unit: cm, the station indicated by the arrow is Nanchang) from 20:00 BT 21 to 08:00 BT on 23 January 2024, (b) incremental snow depth (unit: cm) from 20:00 BT 21 to 08:00 BT on 22 January and (c) from 09:00 BT to 20:00 BT on 22 January 2024

表 1 1959—2024 年江西省按照全省日积雪站数排位的前 10 次暴雪天气过程

Table 1 The top 10 stations in Jiangxi province by daily snow accumulation from 1959 to 2024

排位(T)	日期/(年-月-日)	积雪站数				d_{max}/cm
		N_d≥0	N_d≥2	N_d≥5	N_d≥10	
T1	2024-01-22	82	59	50	26	21
T2	1991-12-28	81	76	66	43	29
T3	1977-01-30	81	71	52	35	31
T4	1983-12-29	80	80	75	56	30
T5	1972-02-08	80	72	66	55	38
T6	1989-01-14	78	68	48	27	24
T7	2010-12-16	77	65	39	15	26
T8	1979-01-31	77	70	59	25	24
T9	1990-02-01	74	67	35	3	10
T10	1977-01-31	74	70	47	13	28

注: N_d≥0、N_d≥2、N_d≥5、N_d≥10分别表示积雪深度≥0 cm、≥2 cm、≥5 cm、≥10 cm的日积雪站数; d_{max}表示积雪深度极值。

3 环流形势和环境条件

3.1 环流形势

此次过程伴随的寒潮天气是由中高纬横槽转竖引导北方强冷空气南下触发的, 是一次较为典型的中路寒潮天气形势 (图略)。1 月 18—20 日, 位于新疆北部的低槽区分裂出一个低槽, 不断加深东移南下影响中国中东部地区; 同时孟加拉湾地区也不断分裂南支小槽东移。受北方低槽和南方南支槽共同影响, 江西省于 19 日自北向南出现明显降温天气, 并伴有中到大雨。20 日中高纬地区的横槽转竖, 槽后强冷空气从河套地区迅速南下, 造成中国中东部地区寒潮天气。21 日 20 时左右, 强冷空气开始影响江西省, 产生强降温和暴雪天气。此时 700 hPa 中纬度南支槽主体仍然维持在孟加拉湾附近, 并不断分裂小槽东移。虽然寒潮过程较为典型, 但暴雪过程却较为极端, 表明这次暴雪过程还存在其他环流异常。

从 850 hPa 环流形势看, 21 日 08 时比湿和气温均呈现东北—西南向分布, 陆地气温和比湿低于同纬度海洋上的气温和比湿。第一支干冷空气自北向南影响中国南方地区, 第二支干冷空气自东北地区从渤海经黄海、东海南下 (图 2a)。14 时, 干冷空气从海上南下过程中逐渐变得暖湿, 比湿比同纬度陆地高 1~2 g·kg^{-1}, 气温高 4 ℃ 左右 (图 2b)。20 时, 海上偏北气流在江苏省南部和浙江省沿海地区转为偏东北风进入长江中下游, 并在江西省境内转为偏东风, 回流形势初步形成。22 日 00 时, 除浙江省北部地区外, 福建省中北部地区也转为偏东风, 回流范围进一步扩大 (图 2c)。北方陆地干冷空气到达 30°N 以北地区, 但比湿低于 2 g·kg^{-1}, 江西省北部沿江地区受到较强冷平流和干冷空气影响, 低层水汽较少, 没有出现暴雪天气。一方面回流气流将海洋上的湿空气输入江西省大部分地区, 另一方面回流气流与等温线近似平行, 冷平流弱或没有冷平流, 不利于在 850 hPa 形成冷垫, 也是这次暴雪天气 850 hPa 附近没有形成冷垫的重要原因之一。08 时 (图 2d), 北方干冷空气进一步南压, 浙江省中北部转为偏北风, 回流形势被破坏, 比湿开始减小, 江西省北部最强暴雪时段结束。此时, 福建回流气流仍然较为强盛, 使得江西省中南部地区 850 hPa 比湿仍维持在 3~4 g·kg^{-1}, 为该地区在 22 日白天的暴雪提供充足水汽和能量。

从以上低层环流形势分析可见, 这次暴雪天气过程中, 江西省低层均有充足水汽供应, 若有足够的动力条件使低层水汽抬升, 就可能产生较强降雪。

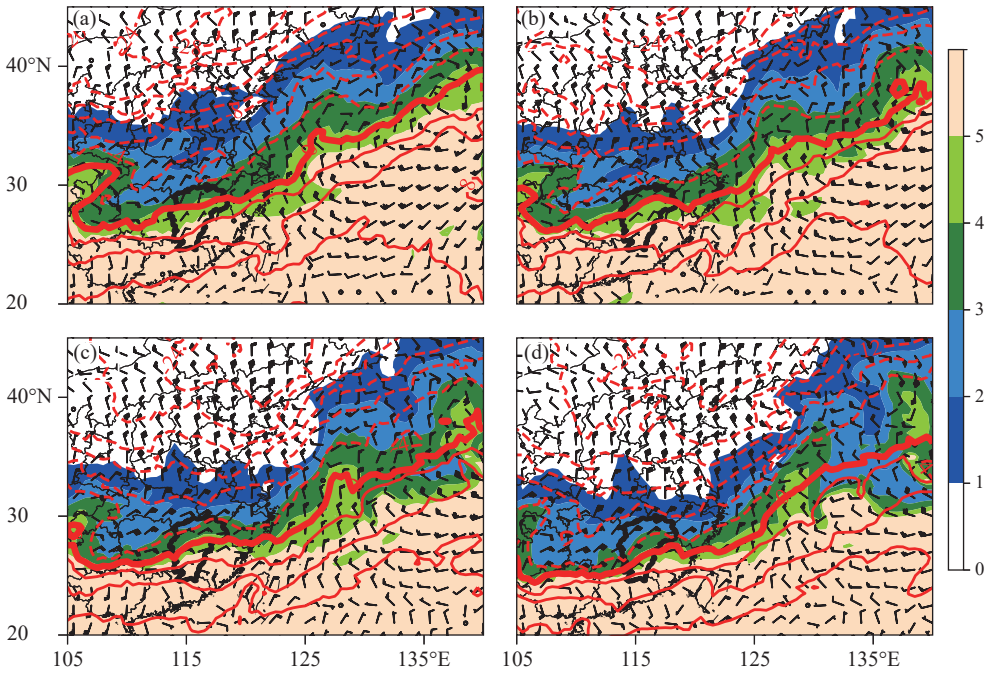


图 2 2024 年 1 月 21 日 08 时 (a)、14 时 (b) 和 22 日 00 时 (c)、08 时 (d) 850 hPa 风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1})、比湿 (填色, 单位: g·kg^{-1}) 与温度场 (红色等值线, 单位: ℃; 等温线间隔 4 ℃, 红色粗实线为 0 ℃, 红色虚线表示 0 ℃ 以下, 红色细实线表示 0 ℃ 以上; 黑色粗实线框区域为江西省)

Fig. 2 Wind field (wind vanes, unit: m·s^{-1}), specific humidity (shaded, unit: g·kg^{-1}) and isothermal line (red lines, unit:℃. The isotherm interval 4 °C, the red thick line denote 0 ℃, the red dashed line indicates temperatures below 0 °C, while the red solid line indicates temperatures above 0 °C, the black thick line denote Jiangxi Province) at 850 hPa at (a) 08:00 BT 21, (b) 14:00 BT on 21 January, (c) 00:00 BT on 22 and (d) 08:00 BT on 22 January 2024

3.2 环境条件

3.2.1 雨雪相态变化与中低层垂直温度结构

此次暴雪发生前期，北方强冷空气南下，导致江西省境内降雨迅速转变为降雪，有利于暴雪天气发生。1 月 21 日 20 时，江西省地面温度仍然偏高，其中南昌站 2 m 气温 ($T_{2\,m}$) 为 4.9 ℃，近地层温度也随高度上升而下降，在 938.2 hPa (高度 770 m) 高空气温已经低至 0 ℃，该高度以上气温全部<0 ℃ (图 3a)，并低于 $T_{2\,m}$。受此影响，21 日 20 时之后，强冷空气开始自北向南影响江西省，22 时江西省西北部山区首先转雪，22 日 01 时江西北部部分地区转雪，02 时江西中北部大部分地区转雪。大部分站点从降水转为纯雪，仅间隔 1 h，在江西省暴雪个例中较少见。22 日白天，冷空气进一步影响到江西省南部地区。该地区雨雪相态变化时间略长，在经历 3~4 h 雨夹雪后才转纯雪。江西最南端的龙南、定南等地仅出现雨夹雪，没有转为纯雪。

江西省大雪/暴雪天气过程中，中低层垂直温度分布一般存在较明显的冷垫和逆温特征。例如 2013 年 1 月 4 日 08 时—5 日 08 时 (图 3b)，江西省北部出现较大范围暴雪天气；2022 年 2 月 22 日 20 时—23 日 20 时 (图 3c)，江西省北部地区出现区域性大雪，局部地区出现暴雪，均能识别出冷垫和逆温结构。因此虽然大雪/暴雪在冷垫高度、强度、逆温厚度等细节上存在一些差异，但冷垫和逆温都是江西省大雪/暴雪天气中低层垂直温度的显著特征，与本次暴雪天气过程的无冷垫和逆温特征有明显差异。

3.2.2 暴雪过程中的水汽增幅

暴雪天气发生前的 1 月 21 日 20 时，江西省中低层水汽较为充足，950—650 hPa 均为饱和状态 (图 3a)；比湿也较大，均在 3.5 g·kg^{-1} 以上 (图 4a)。22 日 00 时，受回流暖湿空气影响，1 000—600 hPa 的比湿均在 3~4 g·kg^{-1}，湿层深厚。02 时，900—800 hPa 的比湿有所降低；08 时，北方干冷空气截断浙江省北部 850 hPa 附近的回流气流并进入南昌，相应高度的比湿进一步下降至 2~3 g·kg^{-1}，最主要的暴雪时段结束。700 hPa 仍存在 3 g·kg^{-1} 的比湿，江西省中北部降雪仍在持续。崇仁站也有相似的比湿分布特征

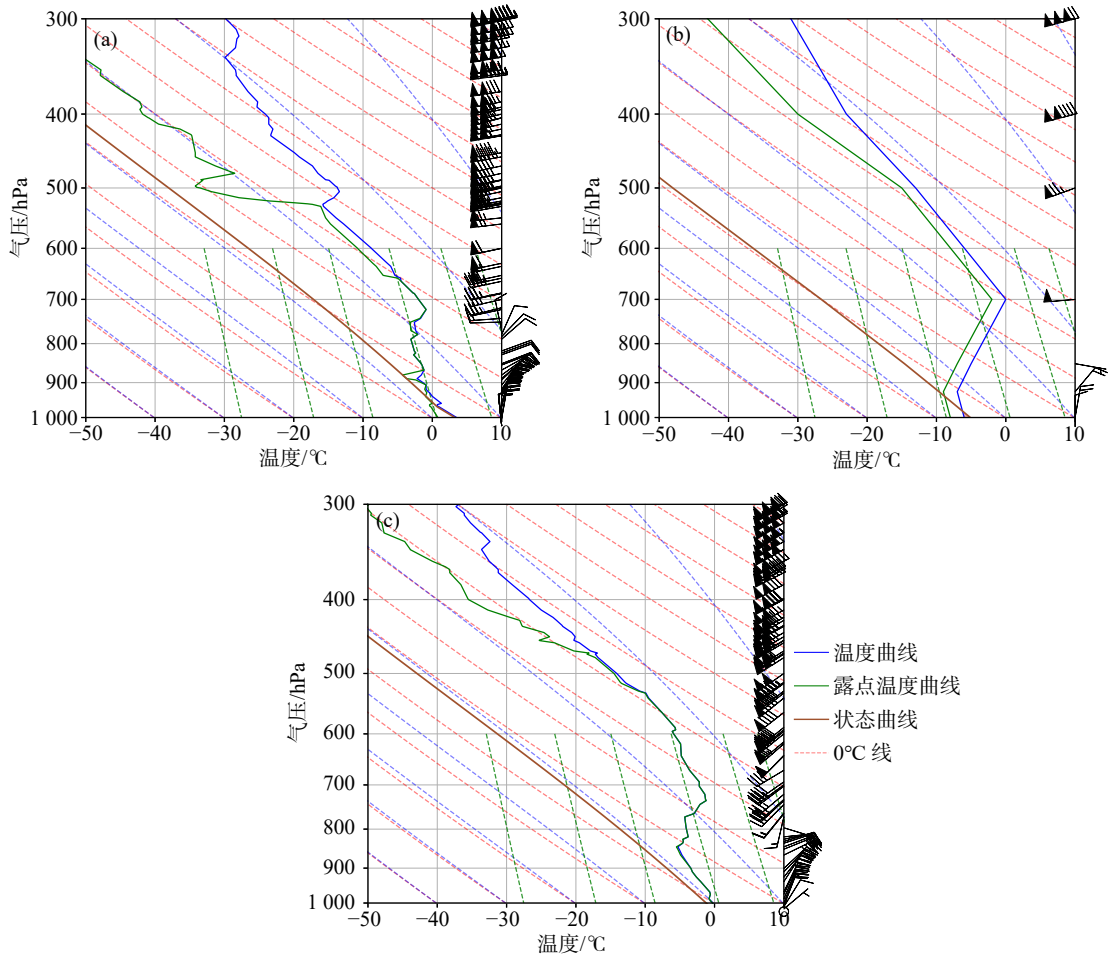


图 3 2024 年 1 月 21 日 20 时 (a)、2013 年 1 月 4 日 08 时 (b) 和 2022 年 2 月 22 日 20 时 (c) 南昌探空站温度-对数压力图

Fig. 3 The T-ln$p$ sounding curves at Nanchang national station at (a) 20:00 BT on 21 January 2024, (b) 08:00 BT on 4 January 2013 and (c) 20:00 BT on 22 January 2022

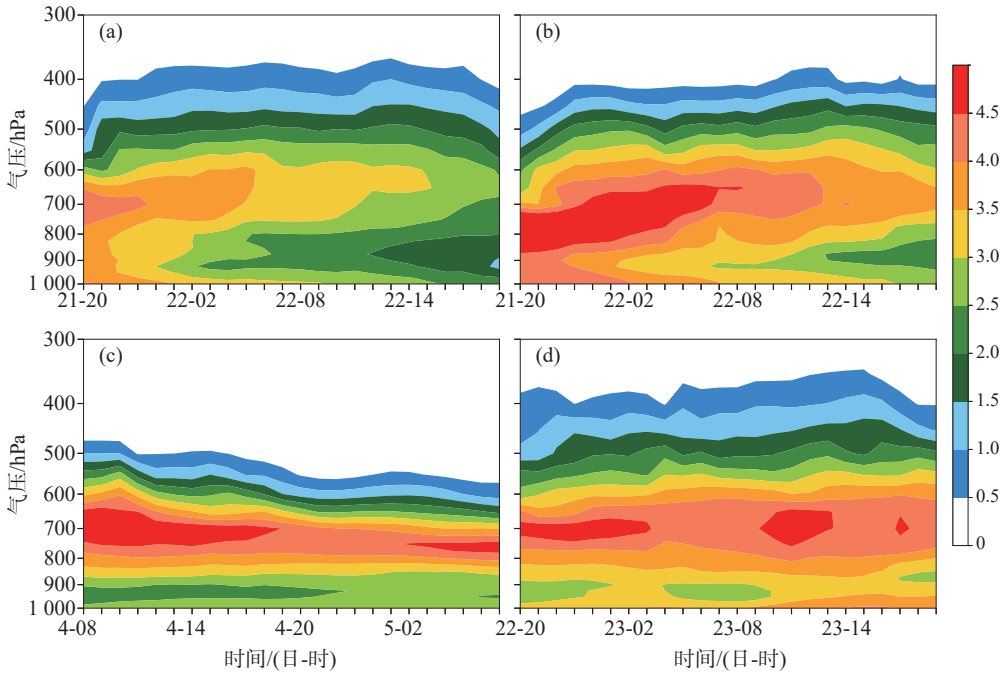


图 4 2024 年 1 月 21 日 20 时—22 日 19 时南昌站 (a)、崇仁站 (b)、2013 年 1 月 4 日 08 时—5 日 07 时 (c) 和 2022 年 2 月 22 日 20 时—23 日 19 时南昌站 (d) 比湿 (单位: g·kg^{-1}) 的时间-高度剖面

Fig. 4 Time-latitude profiles of specific humidity (unit: g·kg^{-1}) for (a) Nanchang and (b) Chongren stations from 20:00 BT on 21 January to 19:00 BT on 22 January 2024, Nanchang station (c) from 08:00 BT on January 4 to 07:00 BT on 5 January 2013 and (d) from 20:00 BT on 22 February to 19:00 BT on 23 February 2022

(图 4b), 21 日 20 时, 从 1 000—600 hPa 的比湿均在 3~4 g·kg^{-1}, 其中 900—700 hPa 的比湿超过 4.5 g·kg^{-1}。22 日 08—14 时, 虽然有弱冷空气开始逐渐进入崇仁站的低层, 但范围和强度比南昌弱一些, 900—700 hPa 的比湿 3 g·kg^{-1} 以上, 仍然较大; 14—20 时, 随着福建省回流气流被干冷空气截断, 900—800 hPa 比湿逐渐降至 2 g·kg^{-1}, 江西省中部最主要的暴雪时段结束。

对比 2013 年 1 月 4 日 (图 4c) 和 2022 年 2 月 22 日 (图 4d) 暴雪过程的比湿分布, 均可明显看到在 700 hPa 附近有比湿大值中心, 最大值均超过了 4.5 g·kg^{-1}, 1 000—850 hPa 高度的比湿分别为 2~3 g·kg^{-1} 和 2.5~3.5 g·kg^{-1}, 图 3d 中 850 hPa 以下高度的比湿比 1 月略偏大的原因是 2 月 850 hPa 和 925 hPa 平均比湿均比 1 月偏高 1 g·kg^{-1} (包慧濛等, 2021)。

由以上分析可见, 发生在回流天气形势下的暴雪, 900—700 hPa 之间比湿均较大; 在无回流的暴雪天气过程中, 700 hPa 附近是比湿大值区, 900—800 hPa 的比湿较低。此外, 由图 4a 可见, 虽然 700 hPa 最大比湿比图 3c 要低 0.5~1 g·kg^{-1}, 但仍在 3 h 内出现暴雪天气, 表明除了水汽供应外, 必然有一定的锋生动力机制以加强降雪效率。

除水汽水平输送外, 低层水汽还需要通过垂直运动上升到大气中高层形成雪。考虑到积雪深度排位前列的崇仁、宜黄、南昌等站均位于 116°E 附近, 本文沿 116°E 作纬度-高度剖面图来分析水汽特征。21 日 20 时 (图 5a) 水汽辐合主要位于低层, 其中, 24°—27°N 的水汽通量辐合区域在 850 hPa 附近呈水平分布, 27°—29°N 的水汽通量辐合区域则从 850 hPa 附近倾斜向北抬升至 600 hPa 附近, 水汽通量散度为 -2×10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}。22 日 02 时 (图 5b), 24°—27°N 的水汽通量辐合区域开始向北倾斜抬升, 27°—29°N 的水汽通量辐合区域转为垂直抬升, 在 900—800 hPa 附近形成一个 -2×10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1} 的辐合中心, 与经浙江省回流到江西省北部地区的时间相吻合 (图 2c)。低层水汽辐合也进一步增强, 水汽辐合增强为 -3×10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}。此时, 江西省北部地区是降雪中心。04 时 (图 5c), 水汽通量辐合进一步增强, 27°—29°N 的水汽通量辐合中心强度达到 -4×10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}, 中心高度也抬升至 600 hPa。500 hPa 存在明显水汽通量辐散区域, 中心强度达到 1×10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}。对应江西省北部地区降雪强度显著增加。08 时 (图 5d), 27°—28°N 附近的水汽通量辐合区域仍集中在 700—600 hPa 高度上。而江西省南部地区 (24°—26°N) 受到福建省回流气流影响, 900—800 hPa 高度上仍有水汽通量辐合中心, 中心强度最大为 -4×10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}, 有利于江西省中南部地区继续出现较强的降雪天气。

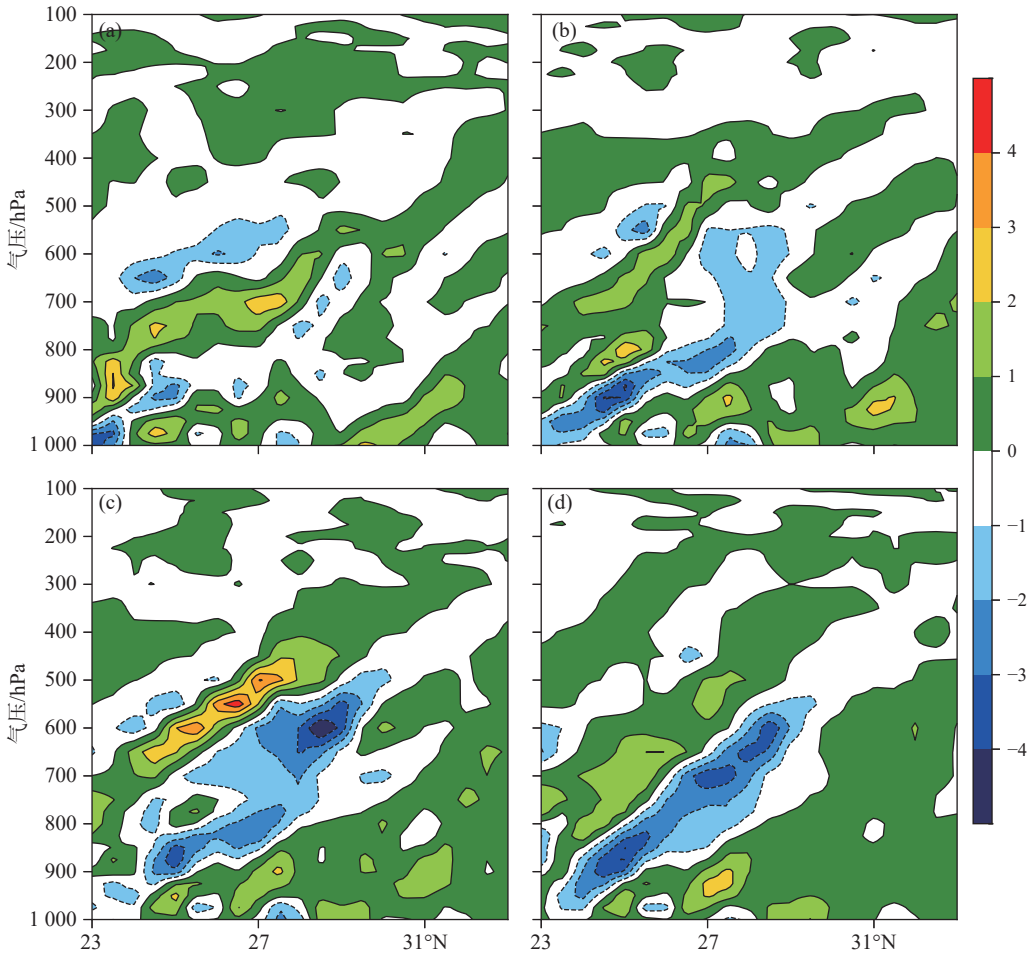


图 5 2024 年 1 月 21 日 20 时 (a) 和 22 日 02 时 (b)、04 时 (c)、08 时 (d) 沿 116°E 的水汽通量散度 (单位: 10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) 纬度-高度垂直剖面

Fig. 5 Latitude-height vertical profiles of water vapour flux divergence (unit: 10^{-8} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) along 116°E at (a) 20:00 BT on 21 January, (b) 02:00 BT, (c) 04:00 BT and (d) 08:00 BT on 22 January 2024

4 暴雪锋生和对称不稳定分析

4.1 暴雪过程中的锋生特征

水汽的垂直输送需要较强的动力作用。本文利用锋生函数强度研究暴雪过程中锋生及锋区强度变化等动力机制 (齐道日娜等, 2024), 利用θ_{se}分析暴雪过程中的热力机制。结果表明, 21 日 20 时 (图 6a) 北方冷空气南下在湖北省北部形成θ_{se}密集带, 与湖北省北部锋生强度的大值区相对应, 约为 15×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}。江西省北部 700 hPa 的θ_{se}密集区范围较小, 对应锋生强度也相对较小, 最大只有 10×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}。湖南省西部地区存在一个范围较小的θ_{se}密集带, 范围也较小, 是由湖北省冷空气沿江汉平原进入两湖盆地形成的冷空气锋区。θ_{se}在 348 ~ 352 K 之间, 表明该地区空气更为暖湿。23 时 (图 6b), 湖北省北部冷空气进一步增强, 锋生强度大值区范围明显增加, 湖南省西部地区的θ_{se}等值线在逐渐加密, 锋生强度中心增加到 45×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}, 锋生作用有所增强。22 日 02 时 (图 6c), 湖南省中部至江西省北部全部为θ_{se}密集区, 一条显著的锋生强度大值区与该密集区相对应, 最强区域在湖南省境内, 最大值为 38×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}。湖北省冷空气锋生强度大值区位于湖北省南部地区, 且有所减弱。05 时 (图 6d), 最显著的θ_{se}密集区位于湖南省和江西省中部地区, 与锋生强度中心相吻合。江西省北部地区虽然还存在一条锋生强度大值区, 但该区域θ_{se}仅为 336 K, 比江西省中部空气干冷, 因此江西省最北部的暴雪反而没有中部明显。08 时 (图 6e), θ_{se}密集区主要位于湖南省南部和江西省中部地区, 最东段位于抚州市附近, 强烈的锋生作用, 有利于江西省中部地区产生大面积暴雪天气。20 时 (图 6f), 江西省南北方向上的θ_{se}梯度达到最大, 为 24 K。但锋生强度大值区位于江西省南部地区, 最大值为 30×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}, 江西省中北部地区虽然也有较密集的θ_{se}密集区, 但没有较明显的锋生强度大值区, 结合地形可见, 在这次气过程中, 强冷空气沿江汉平原进入两湖盆地导致

湖北省、湖南省先出现明显降温, 再与江西省高温高湿区形成明显θ_{se}梯度并触发锋生。

分析沿 116°E 的θ_{se}和锋生强度垂直分布 (图 7a—c) 可知, 自南向北, θ_{se}等值线分布随纬度增加而升高, 未见明显θ_{se}随高度增加而降低的区域, 大气在垂直方向上是对流稳定, 在水平方向上为惯性稳定。21 日 20 时 (图 7a), 30°N 南北两侧 900—800 hPa 高度上, 分别有一个较弱的锋区, 并伸展到 650 hPa 附近高

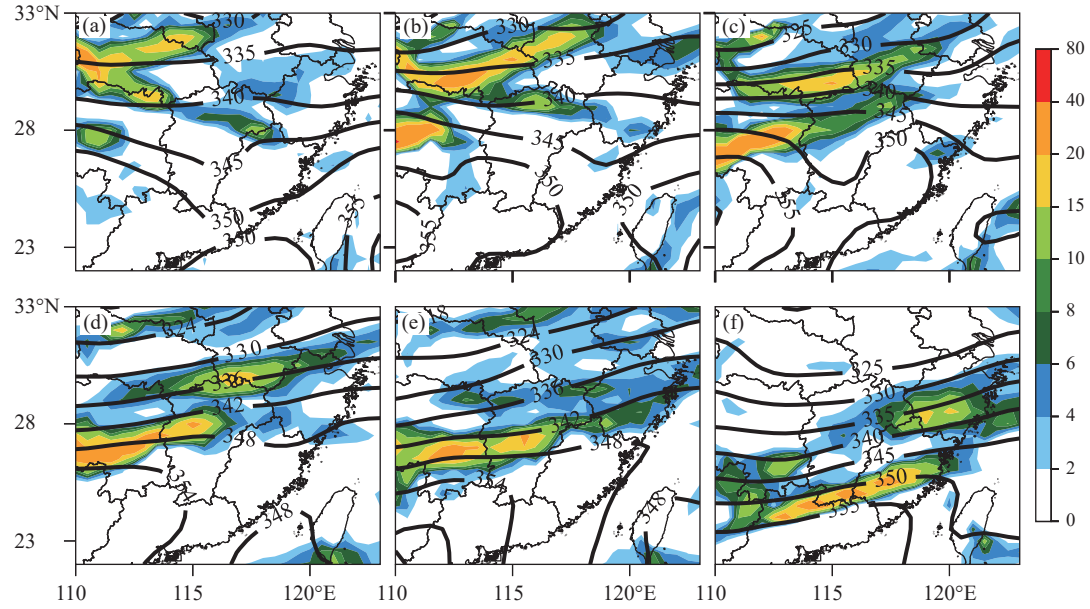


图 6 2024 年 1 月 21 日 20 时 (a)、23 时 (b) 和 22 日 02 时 (c)、05 时 (d)、08 时 (e)、20 时 (f) 700 hPa 锋生函数 (填色, 单位:10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}) 与θ_{se}(等值线, 单位: K) 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of frontal function (unit: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}) and θ_{se} (unit: K) at 700 hPa at (a) 20:00 BT 21 January, (b) 23:00 BT 21 January, (c) 02:00 BT 22 January, (d) 05:00 BT 22 January, (e) 08:00 BT 22 January, and (f) 20:00 BT on 22 January 2024

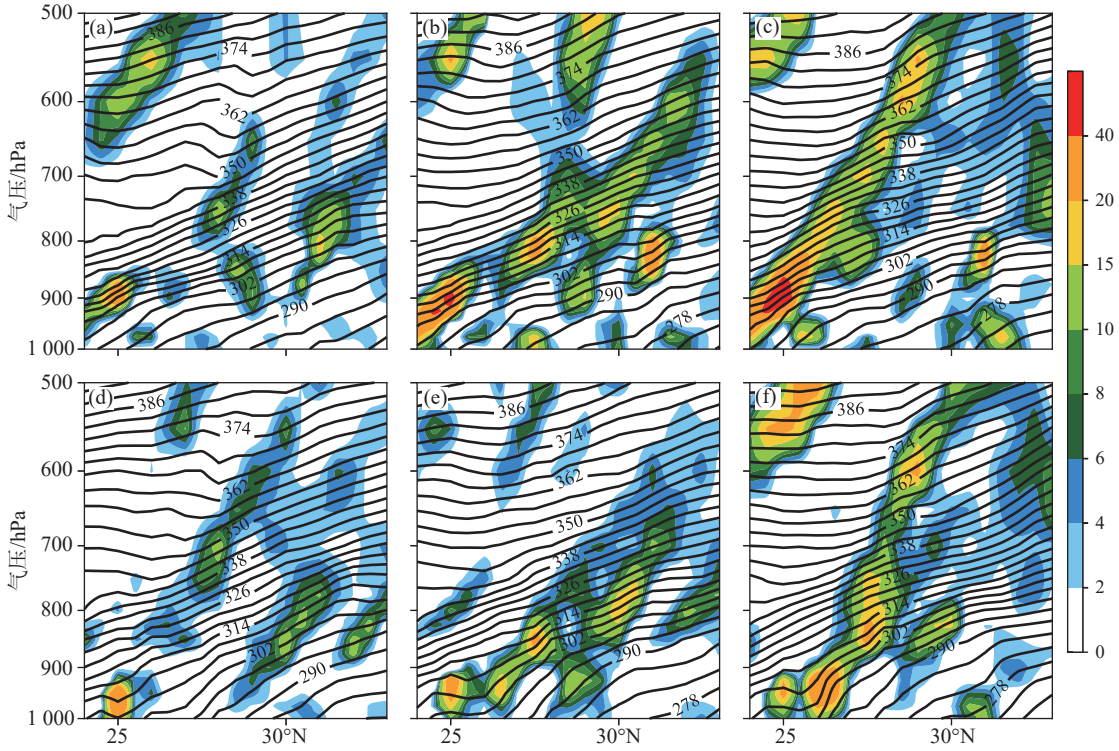


图 7 2024 年 1 月 21 日 20 时 (a, d) 和 22 日 02 时 (b, e)、08 时 (c, f) 沿 116°E (a—c) 和 118°E (d—f) 的锋生函数 (填色, 单位:10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}) 与θ_{se}(等值线, 单位: K) 纬度-高度垂直剖面

Fig. 7 Latitude-height vertical profiles of frontal function (unit: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}) and pseudo-equivalent potential temperature (unit: K) along (a-c) 116°E and (d-f) 118°E at (a, d) 20:00 BT 21 January, (b, e) 02:00 BT 22 January, (c, f) 08:00 BT on 22 January 2024

度。22 日 02 时 (图 7b), 从 25°—30°N 垂直方向上超过 10×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1} 的锋生强度大值区范围明显增大, 且与等θ_{se}线呈现一定的夹角。08 时 (图 7c), 锋生强度大值区在垂直方向上为明显的线状, 最高高度接近 500 hPa。其中, 28°N 附近的锋生强度大值区位于 550 hPa, 中心最大值有 20×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}, 与等θ_{se}线倾角也进一步增大。随高度逐渐抬升的锋生强度, 表明北方冷空气在南下过程中, 将南侧暖湿空气逐渐抬升到高空, 并形成高空锋区。

分析沿 118°E 的θ_{se}和锋生强度垂直分布 (图 7d—f) 可知, 21 日 20 时 (图 7d) 主要有 2 条锋生强度大值区, 第一条位于 27°—28°N 附近 700 hPa, 是暖湿气流沿与周围干冷空气交汇形成的锋区; 第二条位于 30°N 附近 850 hPa, 是从海上沿浙江省回流进入江西省的暖湿气流与北方干冷空气交汇形成的弱锋区。22 日 02 时 (图 7e), 30°N 附近的锋生强度大值区增大到 15×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}, 垂直方向上延展到 700 hPa, 表明北方冷空气开始进入江西省北部地区, 锋区逐渐被冷空气抬高。27°—28°N 850 hPa 附近的锋生强度大值区是从海上沿福建省回流进入江西省的暖湿气流与北方较冷气团交汇形成的弱锋区。08 时 (图 7f), 锋生强度大值区在垂直方向上表现为明显的线状, 最高高度接近 600 hPa, 锋生强度中心值达 20×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}, 其与等θ_{se}线倾角也进一步增大。850 hPa 存在锋生强度中心, 位置约在 27°N 附近, 位于福建省境内, 表明从福建省沿海 850 hPa 回流作用形成的低层暖湿气流在低层仍较为强盛, 并持续向江西省中南部地区低层输入暖湿气流。

4.2 条件性对称不稳定对暴雪的作用

南昌站 6 h (22 日 02—08 时) 积雪深度达 11 cm, 表明此次暴雪可能存在一定的对流性。前文分析表明, 此次暴雪过程在垂直方向上是对流稳定, 在水平方向上为惯性稳定, 但锋区存在倾斜特征, 表明这次过程可能存在对称不稳定 (施俊杰等, 2022), 利用湿位涡对这种不稳定的增强减弱进行分析。从 850 hPa 湿位涡正压项 (ζ_{MPV1}) 和斜压项 (ζ_{MPV2}) 的水平分布及垂直分布 (图 8) 可见, 21 日 20 时 (图 8a), $\zeta_{MPV1}\geqslant$ 1 PVU 的区域主要在湖南省和江西省中南部地区, 为条件性对称不稳定, 数值范围为 1.0~1.5 PVU。$\zeta_{MPV2}<$ 0 PVU 的范围略偏大, 大值中心范围与 $\zeta_{MPV1}\geqslant$1 PVU 一致。江西省北部地区正压项 $\zeta_{MPV1}<$1 PVU, 处对流稳定状态。22 日 02 时 (图 8b), $\zeta_{MPV1}\geqslant$1 PVU 区域开始自江西省南部向东北方向延伸, 最北伸展至 28°N 附近并持续到 22 日 14 时 (图 8c、d)。江西省北部地区也位于 $\zeta_{MPV1}>0$ PVU 区域内, 且 $\zeta_{MPV2}<0$ PVU, 表明江西省中北部地区也有一定的对称不稳定能量。从 21 日 20 时沿 116°E 的 ζ_{MPV1} 和 ζ_{MPV2} 垂直分布 (图 8e) 可见, $\zeta_{MPV1}\geqslant$1 PVU 而 $\zeta_{MPV2}<0$ PVU 最强区域主要出现在 31°N 以北的 200 hPa 以上高度, 且明显向南方倾斜, 表明高层冷空气正在向低纬扩散下

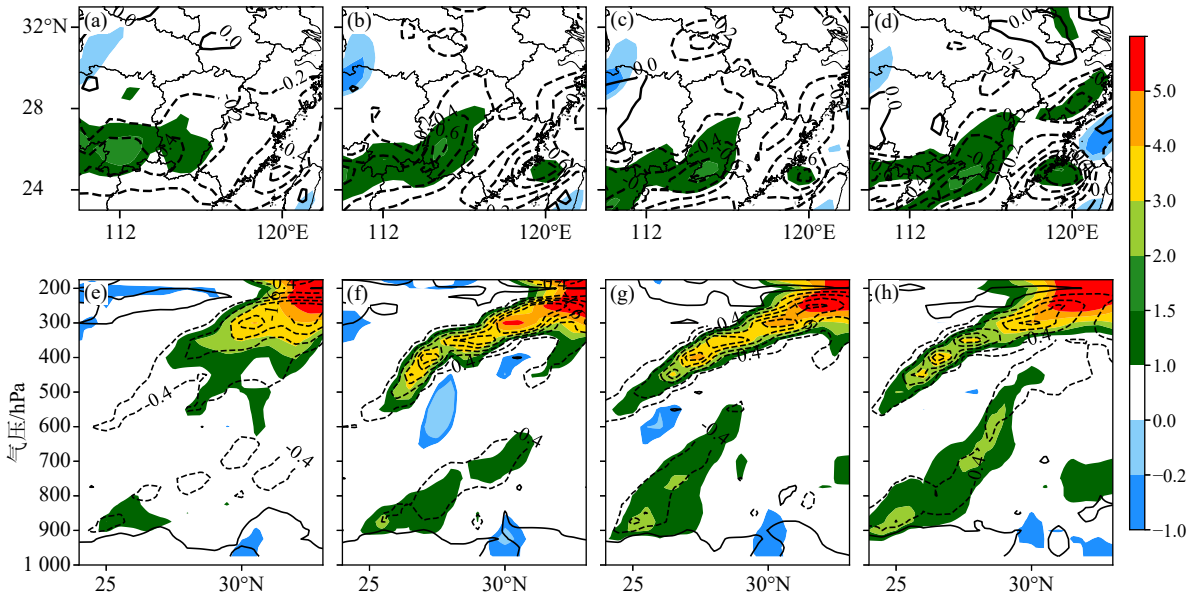


图 8 2024 年 1 月 21 日 20 时 (a, e) 和 22 日 02 时 (b, f)、08 时 (c, f)、14 时 (d, h) 850 hPa 湿位涡 ζ_{MPV1} (填色) 与 ζ_{MPV2} (黑色虚线) (a—d) 空间分布及其沿 116°E 的纬度-高度垂直剖面 (e—h) (单位: PVU)

Fig. 8 Spatial distribution of (a-d) moist potential vorticity (unit: PVU) barotropic term ζ_{MPV1} (shaded) and baroclinic term ζ_{MPV2} (black dashed lines) at 850 hPa and (e-h) latitude-altitude vertical profiles of them along 116°E at (a, e) 20:00 BT on 21, (b, f) 02:00 BT on 22 (c, g) 08:00 BT and (d, h) 14:00 BT on 22 January 2024

沉。800 hPa 以下高度 $\zeta_{MPV1}\geqslant 1$ PVU 区域也位于江西省南部地区, 低层 ζ_{MPV2} 较为零散。22 日 02 时 (图 8f), $\zeta_{MPV1}\geqslant 1$ PVU 而 $\zeta_{MPV2}<0$ PVU 最强区域未明显变化, 但高层冷空气扩散下沉高度进一步伸展至 25°N 的 600 hPa 附近。低层 $\zeta_{MPV1}\geqslant 1$ PVU 区域也开始发展, 并逐渐向北方倾斜抬升; $\zeta_{MPV2}<0$ PVU 发展为带状, 与 $\zeta_{MPV1}\geqslant 1$ PVU 区域相重叠, 范围为 25°—30°N。全省均存在一定程度的对称不稳定能量, 其中江西省北部出现不稳定能量的高度约在 700 hPa, 江西省南部出现不稳定能量的高度约在 900 hPa, 这种情况一直持续到 22 日 14 时 (图 8g—h), 这也是 22 日中午江西省北部降雪仍然较明显的主要原因。同时看到, 14 时低层 $\zeta_{MPV1}\geqslant 1$ PVU 的区域不断向高空偏北伸展。23 日 01 时, 江西省南部低层条件性对称不稳定区域也逐渐消失 (图略), 全省暴雪过程结束。

5 结论与讨论

2024 年 1 月 21—23 日江西省发生了一次区域性回流暴雪天气过程, 降雪范围广, 强度大, 积雪站数和积雪深度≥10 cm 的站数分别排江西省 1959 年和 1991 年以来第一位, 本文利用常规气象观测资料和 ERA5 再分析资料, 对此次过程的环流形势、环境条件、锋生条件和对称不稳定的演变特征进行研究, 得到以下主要结论:

(1) 暴雪天气发生前的探空曲线上 1 000—850 hPa 没有冷垫, 700 hPa 与 850 hPa 之间也未出现逆温, 850 hPa 存在来自海洋的东风暖湿回流; 暴雪发生时 1 000—600 hPa 的比湿均为 3~4 $g\cdot kg^{-1}$, 水汽较为充沛, 当 850 hPa 的比湿低于 2 $g\cdot kg^{-1}$ 时, 降雪明显减弱, 与江西省大雪预报模型中低层存在明显逆温且 850 hPa 水汽更低有较大差异。

(2) 暴雪过程中, 锋生动力作用将低层水汽垂直输送到 500 hPa 附近。1 月 22 日 02 时—20 时, 700 hPa 湖南省中部地区锋生强度大值区向东北方向延伸到江西省中北部地区, 并逐渐增强, 该层 θ_{se} 也长时间处在 340~348 K 的高温高湿区域内; 900—800 hPa 附近存在 θ_{se} 密集区和锋生强度大值区, 表明在回流水汽输送带中也存在较强的垂直上升运动。

(3) 暴雪过程中, 850 hPa 的正压项 (ζ_{MPV1})≥1 PVU 的区域从江西省南部地区向东北方向伸展, 强度也逐渐加强; 全省斜压项 (ζ_{MPV2})<0 PVU, 中心与 ζ_{MPV1} 中心重合。垂直方向上, 江西省北部不稳定能量出现高度约在 700 hPa, 江西省南部不稳定能量出现高度约在 900 hPa。湿位涡与暴雪的时空分布特征有较好的对应关系。

这次暴雪过程中的回流形势, 不仅给暴雪天气提供了更加丰沛的水汽, 强烈的锋生作用也伴随有更强的热动力条件, 很可能会导致出现极端降雪。但这种回流形势在以往江西省暴雪天气中较少出现, 如果按照江西省大雪预报模型对其预报, 很容易出现漏报或者雪量偏小。本文提出了江西省存在这种特殊形势暴雪天气, 并对这一次天气过程进行了初步诊断。由于这种发生在回流形势下的暴雪天气较少, 后期将对多个相似个例进行总结归纳分析, 以便完善江西省大雪预报模型, 为江西省大雪或者暴雪预报提供技术支撑。

参考文献 (References):

包慧濛,肖安,李葳,等.2021.南方比湿特征及其与暴雨的关系[J].气象与环境科学,44(2):33−42. Bao H M, Xiao A, Li W, et al. 2021. Characteristics of specific humidity in south China and its relationship with rainstorm [J]. Meteorological and Environmental Sciences,44(2):33−42 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2021.02.005

崔慧慧,苏爱芳.2019. 2018 年初豫南特大暴雪过程的特征与成因分析[J].暴雨灾害,38(2):169−176. Cui H H, Su A F. 2019. Analysis on characteristics and causes of a heavy snowstorm event in southern Henan in the beginning of January 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):169−176 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.02.009

冯丽莎,宋攀,郑飞,等.2020. 2016 年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J].大气科学,44(1):13−26. Feng L S, Song P, Zheng F, et al. 2020. Diagnostic analysis of a severe regional snowstorm event in the early winter of 2016 in Henan Province, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,44(1):13−26 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1909.18170

胡菊芳,王怀清,彭静,等.2008. 2008 年 1—2 月江西低温雨雪冰冻灾害分析评估[J].气象与减灾研究,31(1):67−72. Hu J F, Wang H Q, Peng J, et al. 2008. Analysis and evaluation of the low temperature, sleet and frost disaster during January to February 2008 in Jiangxi [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,31(1):67−72 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−9033.2008.01.011

胡燕,刘红武,赵恩榕,等.2023. 2022 年初湖南两次灾害性大暴雪成因分析[J].灾害学,38(1):80−87. Hu Y, Liu H W, Zhao E R, et al. 2023. Analysis of causes of two disaster heavy snowstorms in Human in early 2022 [J]. Journal of Catastrophology,38(1):80−87 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2023.01.013

李姝霞,袁小超,王国安,等.2023.一次暴雪过程的高架雷暴环境条件及雷达特征[J].暴雨灾害,42(5):541−553. Li S X, Yuan X C, Wang G A, et al. 2023. Synoptic conditions and radar characteristics for elevated thunderstorm during a snowstorm event in Henan Province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):541−553 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−219

刘裕禄,岳如画,姚叶青.2024.皖南山区一次暴雪过程地转适应锋生条件分析[J].暴雨灾害,43(1):23−31. Liu Y L, Yue R H, Yao Y Q. 2024. Analysis of geostrophic adjustment to frontogenesis conditions during a heavy snowstorm in the mountainous area of southern Anhui

Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):23−31 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−092

齐道日娜,何立富,张乐英.2024. “21·11”极端暴雪过程多系统结构演变及热动力机制[J].气象,50(1):18−32. Chyi D R N, He L F, Zhang L Y. 2024. Multi-system structure evolution and thermodynamic mechanism of the extreme snowstorm during 6-8 November 2021 [J]. Meteorological Monthly,50(1):18−32 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.091401

施俊杰,孙鸣婧,吕新生,等.2022.南疆西部春季一次极端暴雪天气综合分析[J].干旱区地理,45(1):131−140. Shi J J, Sun M J, Lü X S. et al. 2022. Comprehensively analysis of an extreme snowstorm in the west of southern Xinjiang in spring [J]. Arid Land Geography,45(1):131−140 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000−6060.2021.110

唐明晖,俞小鼎,王青霞,等.2023.湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析[J].暴雨灾害,42(3):293−302. Tang M H, Yu X D, Wang Q X, et al. 2023. Analysis on environmental conditions and dual-polarization radar characteristics of the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in Hunan [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):293−302 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−065

王丽荣,刘黎平,王立荣,等.2013. “09.11.10”石家庄特大暴雪中尺度风场分析[J].气象,39(8):1023−1030. Wang L R, Liu L P, Wang L R, et al. 2013. Analysis on mesoscale wind field of “09.11.10” blizzard in Shijiazhuang [J]. Meteorological Monthly,39(8):1023−1030 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.08.009

吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁.1995.湿位涡和倾斜涡度发展[J].气象学报,53(4):387−405. Wu G X, Cai Y P, Tang X J. 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. Acta Meteorological Sinica,53(4):387−405 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb1995.045

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 Q M, Yang B, Wang G R. 2014. Analysis of the frontal characteristics of the backflow snowstorm process in Beijing area [J]. Plateau Meteorology,33(2):539−547 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00194

肖红茹, 伍清, 蒋兴文, 等.2019.四川盆地两次冬季寒潮天气过程对比分析[J].高原山地气象研究,39(4):46−52. Xiao H R, Wu Q, Jiang X W et al. 2019. Comparative analysis of two cold wave events in the Sichuan Basin wininter [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,39(4):46−52 (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2019.04.007

张爱忠,阎琦,高磊,等.2023.辽宁地区东北风回流暴雪预报偏差成因初探[J].气象与环境学报,39(5):28−33. Zhang A Z, Yan Q, Gao L, et al. 2023. Preliminary study on the causes of deviation of the northeast wind backflow snowstorm forecast in Liaoning region [J]. Journal of Meteorology and Environment,39(5):28−33 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2023.05.004

张桂莲,刘澜波,孟雪峰,等.2022.冷垫背景下回流暴雪成因与雷达回波特征分析[J].干旱气象,40(3):500−506. Zhang G L, Liu L B, Meng X F, et al. 2022. Causes of a backflow snowstorm in southeastern Inner Mongolia under the background of cold pad and its radar echoes characteristics [J]. Journal of Arid Meteorology,40(3):500−506 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639

张迎新,侯瑞钦,张守保.2007.回流暴雪过程的诊断分析和数值试验[J].气象,33(9):25-32. Zhang Y X, Hou R Q, Zhang S B. 2007. Numerical experiments and diagnosis on a heavy snow of return flow events [J]. Meteorological Monthly,33(9):25-32

郑婧,许爱华,刘波,等.2010.江西大雪天气的时空变化及其影响系统分析[J].气象,36(4):30−36. Zheng J, Xu A H, Liu B, et al. 2010. Analyses on the space time distribution characteristics and their influence systems of heavy snow in Jiangxi [J]. Meteorological Monthly,36(4):30−36 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.4.006

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2000.天气学原理和方法:第 3 版[M]. 北京:气象出版社:120-122. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2000. Principles and Methods of Synoptic Meteorology, Third Edition [M]. Beijing:Science Press:120-122 (in Chinese)

周芳,王晓东,毛连海.2021.一次高空急流背景下江西暴雪过程分析[J].沙漠与绿洲气象,15(1):36−45. Zhou F, Wang X D, Mao L H. 2021. Analysis of a snowstorm influenced by upper troposphere jet steam in Jiangxi province [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(1):36−45 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2021.01.005

Bluestein H B. 1993. Observations and theory of weather systems. Volume II [M]. Synoptic-Dynamic meteorology in midlatitudes:Oxford University Press:608

Chen G X, Wang W C, Tao L J, et al. 2019. Extreme snow events along the coast of the northeast united states: Analysis of observations and hiram simulations [J]. Journal of Climate,32(21):7561−7574. doi:10.1175/JCLI−D−18−0874.1

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,146(730):1999−2049. doi:10.1002/qj.3803

Holley D, Smart D. 2023. Snowfalls in the cotswolds and home counties on 11 December 2022 [J]. Weather,78(2):46−47. doi:10.1002/wea.4367

Huang H, Tao R, Zhao K, et al. 2023. Potential of snowfall nowcasting using polarimetric radar data and its link to ice microphysics: Study of two snowstorms in East China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,128:e2022JD037654. doi:10.1029/2022JD037654

Liang J, Tang Y. 2017. Climatology of the meteorological factors associated with haze events over northern China and their potential response to the Quasi-Biannual Oscillation [J]. Journal of Meteorological Research,31(5):852−864. doi:10.1007/s13351−017−6412−z

Yao X P, Gao Y, Ma J L. 2020. MPV-Q view of vorticity development in a saturated atmosphere [J]. Atmospheric Research,244:105058. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105058

Zhang X, Shang G W. 2022. Case study on a snowfall event in Beijing from March 17 to 18, 2022 [J]. Journal of Geoscience and Environment Protection,10(8):259−266. doi:10.4236/gep.2022.108016

Zhang W L, Cui X P, Duan B L, et al. 2022. A case study on the rapid rain-to-snow transition in late spring 2018 over northern China: Effects of return flows and topography [J]. Journal of Meteorological Research,36(1):107−127. doi:10.1007/s13351−022−1068−8

(责任编辑　唐国瑛)