



ECMWF降水相态诊断产品(PTYPE)偏差原因分析及改进

管靓 漆梁波 赵渊明

The reason analysis and improvement of the deviation of the ECMWF precipitation type diagnostic product (PTYPE)

GUAN Liang, QI Liangbo, ZHAO Yuanming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-059>

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

ECMWF模式对2020年夏季江淮流域降水的预报偏差分析

Analysis of the deviation of precipitation forecast of ECMWF model over the Yangtze-Huaihe River Valley in summer 2020

暴雨灾害. 2022, 41(3): 315–323 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.008>

河南北中部一次雨雪冰冻过程的相态特征分析

Characteristics of the precipitation phase during a rainfall/snowfall and freezing event in northern and central Henan

暴雨灾害. 2024, 43(4): 431–439 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-069>

一次春季雨雪天气的降水相态演变特征分析

Analysis on the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in spring

暴雨灾害. 2022, 41(3): 290–297 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.005>

基于GPM与ERA5数据的北太平洋冬季风暴路径降水个例分析

A case study of precipitation along the winter storm track in the North Pacific based on the GPM and ERA5 data

暴雨灾害. 2022, 41(5): 525–535 <https://doi.org/10.12406/byzh.2020-256>

ECMWF模式强降水预报偏差订正方法研究及应用

Research and application of bias correction method for heavy rainfall forecast of ECMWF model

暴雨灾害. 2021, 40(4): 430–436 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.011>

一种改进的数值模式降水预报时间降尺度方法

An improved time downscaling method for numerical model precipitation forecast

暴雨灾害. 2024, 43(5): 542–550 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-210>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

管靛,漆梁波,赵渊明. 2026. ECMWF 降水相态诊断产品 (PTYPE) 偏差原因分析及改进[J].暴雨灾害,45(3):426–435. GUAN Liang, QI Liangbo, ZHAO Yuanming. 2026. The reason analysis and improvement of the deviation of the ECMWF precipitation type diagnostic product (PTYPE) [J]. Torrential Rain and Disasters,45(3):426–435 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–059

ECMWF 降水相态诊断产品 (PTYPE) 偏差原因分析及改进

管靛¹, 漆梁波², 赵渊明²

(1. 上海海洋中心气象台, 上海 200030; 2. 上海中心气象台, 上海 200030)

摘 要: 为改进数值模式降水相态诊断方案, 改善业务降水相态预报结果, 基于地面自动站和探空实况资料、ERA5 再分析资料的降水相态诊断产品 (precipitation type, PTYPE) 以及高空和地面的气温、露点温度数据, 对比 2022 年和 2023 年冬季我国北方、西南和江南 3 个区域不同降水相态天气的诊断探空和实况探空差异, 结合统计概念模型和降水相态物理过程对 PTYPE 偏差的原因进行了分析, 并提出改进方法。结果表明: (1) 北方和江南地区如将 PTYPE 的干湿雪统归为降雪, 其与实测降雪数据更为吻合。西南地区 PTYPE 的降雪较实况偏多, 可用性明显低于其他地区。(2) 当前 PTYPE 对冻雨的诊断方案与冻雨形成的基本物理过程不符, 未充分考量液滴的“过冷”属性, 这可能是 PTYPE“空报”冻雨的主要原因。(3) PTYPE 诊断冰粒时要求 2 m 气温低于 0 °C, 而实况的 2 m 气温高于 0 °C, 这是导致 PTYPE 对冰粒存在较多漏判的主要原因; 此外, PTYPE 诊断方案中只要求到达地面附近的水成物中, 固态比例 ≥ 50%, 而非绝大部分保持固态甚或完全冻结, 这会导致冰粒预报偏多。(4) 基于对比分析, 得到了对 PTYPE 产品的改进方法, 即采用 2 m 湿球温度作为雨夹雪和降雪的辅助判据, 增加近地面液滴的温度作为冻雨的判据, 在冰粒方案中剔除 2 m 气温的影响, 并适当降低“地面液态水含量”的阈值, 可望提升降水相态的诊断准确率。

关键词: 降水相态; PTYPE 产品; ERA5; 偏差原因

中图法分类号: P457.6

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–059

The reason analysis and improvement of the deviation of the ECMWF precipitation type diagnostic product (PTYPE)

GUAN Liang¹, QI Liangbo², ZHAO Yuanming²

(1. Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 200030; 2. Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030)

Abstract: To improve the diagnostic scheme and the forecast results of precipitation types in numerical models, the surface observational and sounding data, precipitation type diagnosis products (PTYPE) from ERA5 reanalysis data, and temperature and dew point of different pressure levels and the surface are used in this study. The PTYPE diagnostic and observational sounding data for different precipitation types in the northern, southwestern, and Jiangnan area of China from the winter of 2022 to 2023 are compared to analyze the causes of forecast biases in the PTYPE products from the aspects of statistical conceptual models and physical processes, and then the improvement methods are proposed. The results are as follows. (1) The combination of dry and wet snow incidents recognized by PTYPE is consistent with the observed snow events in the northern and Jiangnan area. However, in the southwestern area, the PTYPE tends to overestimate the number of snowfall events, suggesting significantly lower reliability in this area. (2) The PTYPE diagnostic scheme is not consistent with the fundamental physical process of freezing rain formation, overlooking the droplets' supercooled characteristics, which could be the primary reason for the “false alarm” of the freezing rain in the PTYPE product. (3) For diagnosing ice pellets, the PTYPE scheme requires a 2-m surface temperature below 0 °C, which is usually not the case for observations. This could be the main reason for the missed alarm of ice pellets. Additionally, the diagnostic scheme only requires that the proportion of the solid particles near the surface is no less than 50%, rather than a percentage of most or even all, which leads to “false alarm”. (4) Base on comprehensive analysis, an improved PTYPE scheme is proposed: using the surface wet-bulb temperature as a criterion for sleet and snow; adding near-surface droplet temperature for freezing rain; removing the surface temperature in the ice pellet scheme, and appropriately lowering the threshold of “near-surface liquid water content”, which are expected to improve the accuracy of these precipitation types.

收稿日期: 2025–03–24; 定稿日期: 2025–10–27

资助项目: 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2025-044)

第一作者: 管靛, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: genlight@126.com

通信作者: 漆梁波, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: qlb1999@hotmail.com

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

Key words: precipitation type; PTYPE; ERA5; deviation cause

引言

冬季降水不仅影响航空和地面交通,还可能对能源供应、城市基础设施乃至生态系统造成重大损失(张俊等, 2024)。冬季降水相态复杂多变,包括雨、雪、雨夹雪、冰粒、冻雨、湿雪和冻毛毛雨等多种形式,这些相态可单独或以混合形式出现。降水相态的预报偏差可能对城市运行和工农业生产产生严重影响(赵琳娜等, 2021)。降水相态不仅与大气环境条件密切相关,还涉及到复杂的微物理过程(Stewart, 1992)。因此,降水相态预报一直是冬季降水预报的重点和难点。

冬季降水相态预报方法主要分为三类。第一类是依据预报指标进行判识,比如漆梁波和张瑛(2012)综合考虑温度和厚度因子提出的一套适用于我国东部地区冬季降水相态识别的判据,对雨雪相态的识别准确率有所提升;再如黄骄文等(2021)通过深度学习网络技术构建了降水相态判识模型,可较好地提取雨、雪降水相态的结构特征,雨、雪判识的TS评分可达90%以上。这类方法对雨、雪等单一相态预报效果较好,但对混合相态的判识有一定局限性,且对冰粒和冻雨的研究较少。第二类是基于概念模型,采用逐步推理的方式进行判识,如Ahrens(2000)提出的“Top-Down Approach”降水相态分析方法,其思路是当大气环境已经具备了产生降水的基本条件时,通过从大气顶部开始,逐步追踪水汽凝结物的运动轨迹直至地面,可解析降水相态的演变过程。这类方法注重关键层温度阈值的判断,倾向于概念模型推理,决策过程比较主观,不容易完全客观化。第三类方法是基于模式预报和概念模型的融合方法。该方法融合了物理过程和统计经验,客观化程度高,逐渐成为业务预报的主要参考。如佟华和张玉涛(2019)基于GRAPES-MESO中尺度模式,根据降水粒子在下落过程中的热力结构,利用BTC算法、修订的BTC算法、Ramer算法和Bourgouin算法对降水相态进行诊断,通过个例验证发现4种计算方案均能较合理地得到雨雪分界线以及降雨、降雪的落区范围,但这4种方案在冰粒和冻雨判识上的差别较大。

自2015年起,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)根据2 m气温及云中的液态含水量开发了量化的降水相态诊断产品(Precipitation Type, PTYPE)(ECMWF, 2016),该产品的诊断方法属于前文所述的第三类方法。董全等(2020a)对PTYPE的业务检验

表明:其对纯雨或纯雪等单一相态预报效果较好,对混合相态的预报仍存在偏差,对冻雨的预报范围偏大,冰粒往往会漏报。总体而言,基于模式预报和概念模型相结合的量化PTYPE产品逐渐成为冬季降水相态预报的重要依据,但如何提高降水相态预报产品的准确率仍是预报业务的难点。

2022年和2023年冬季我国中东部多次出现持续性雨雪冰冻过程,降水相态复杂(张博和张芳华, 2024; 周悦等, 2024)。PTYPE产品对这两年冬季降水过程中的降水相态,尤其是对混合相态(如冻雨和冰粒)降水类型的预报存在偏差,但偏差的原因尚未见较系统的分析。本文基于ERA5再分析资料,通过对比分析这两年PTYPE产品对应的诊断探空和实况探空的差异,从物理过程的角度探究PTYPE诊断方法对不同降水相态的偏差原因,并提出改进思路,期望更有效地提高降水相态预报技术水平。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文的资料时段为2022年冬季和2023年冬季(某一年冬季指该年12月至次年2月)。由于ECMWF模式预报数据和其再分析资料中都包含PTYPE诊断产品,为避免模式预报偏差对PTYPE诊断结果准确性的影响,本文采用ECMWF的ERA5再分析资料进行诊断对比分析。该资料空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率1 h,气压层范围从1 000 hPa至1 hPa,共37层,是我国降水诊断的重要参考数据源(Ye et al., 2021; 刘婷婷等, 2022; 覃皓等, 2024)。ERA5再分析资料包含降水相态诊断产品PTYPE(以下简称PTYPE产品),可与实况降水相态进行直接对比分析。此外,利用ERA5不同气压层的气温和露点温度等常用要素产品构建诊断合成探空。鉴于冬季降水相态判识中,2 m气温及露点是关键要素(任兆鹏等, 2018),诊断合成探空最底层增加ERA5的2 m气温和露点。考虑到站点地形高度,选择了地形高度以上气压层的气温和露点温度。

观测资料为08时(北京时,下同)和20时中国东部高空测站的地面实况和探空数据(具体见本文第1.2小节),用于与PTYPE产品以及构建的ERA5诊断合成探空产品对比。

PTYPE产品主要依据水成物中的液态含量和2 m气温,将降水类型划分为8类,每种降水类型由特定的整数表示。各降水类型及其对应的表征数字和判别条件见表1。

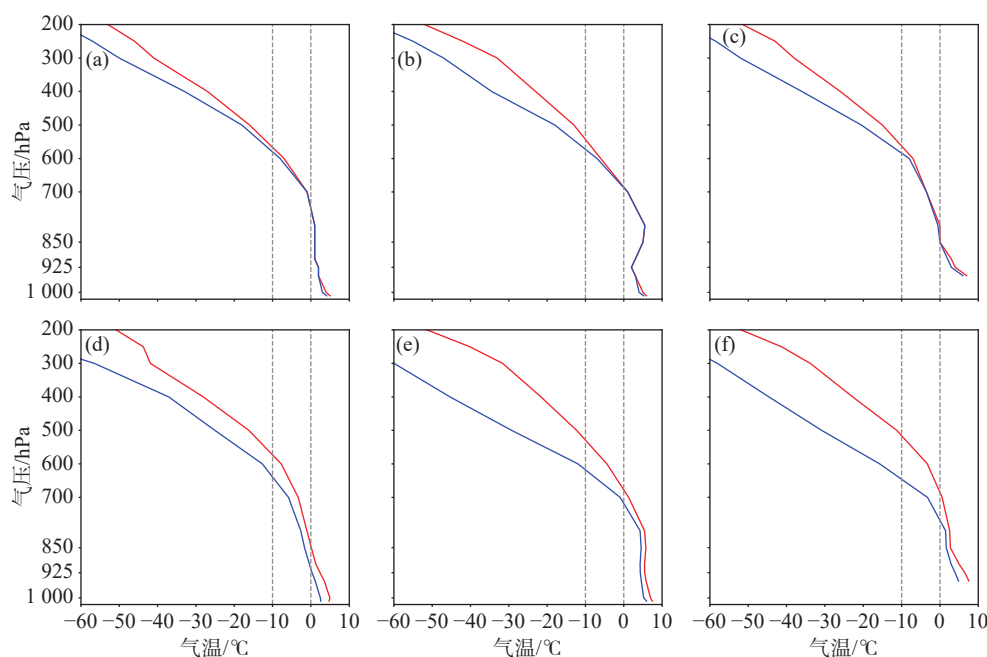


图2 降雨相态时我国北方(a、d)、江南(b、e)、西南(c、f)区域实况(a—c)和ERA5(d—f)探空曲线(红色实线为气温,单位:℃;蓝色实线为露点温度,单位:℃;两条平行于纵轴的虚线分别表示-10℃线和0℃线,下同)

Fig. 2 Soundings of (a-c) observation and (d-f) ERA5 on rainfall type in (a, d) northern, (b, e) Jiangnan and (c, f) south-west (red solid line is temperature, unit: °C; blue solid line is dew point temperature, unit: °C. The dashed lines parallel to y-axis represent -10 °C and 0 °C, the same as after)

表2给出了3个区域降雨相态下实况探空与PTYPE产品诊断为降雨时ERA5探空的云顶高度和2 m气温、露点温度。其中云顶高度由温度-露点差方法(Poore et al., 1995)计算得到。该方法简单实用,具体为:当温度 ≥ 0 ℃且温度露点差 ≤ 2 ℃,或温度在-20~0℃范围内且温度露点差 ≤ 4 ℃,或温度 < -20 ℃且温度露点差 ≤ 6 ℃,满足上述3个判据之一时认为是云内。从表2可见,实况合成探空中,北方区域的云顶高度可达400 hPa,江南和西南地区的云顶高度(550 hPa)低于北方区域,说明纬度越高,降雨天气对应云顶高度越高。ERA5统计的云顶高度也有类似的变化特征,但各区域云顶高度均较实况偏低。同时,已有研究表明,-10℃层高度是区分云中是否有充足冰晶的关键阈值(漆梁波,2012)。结合图2可见,北方区域的云顶高度(图2a)在-10℃层以上,江南(图2b)和西南(图2c)区域的云顶高度均在-10℃层以下高度,说明江南和西南区域的冬季降雨主要以水成云为主,而北方区域云顶高度较高,主要由混合相态云降水主导。而PTYPE产品为降雨时,由于云顶高度偏低,多以水成云为主,在业务应用中,要注意甄别和对云要素进行相应的订正。

图3显示雨夹雪相态时3个区域实况探空和PTYPE产品相应相态的ERA5合成探空。由图可知,雨夹雪相态下,北方和西南地区的PTYPE产品对应的ERA5探空曲线与实况基本一致;实况探空

表2 我国3个区域降雨相态时地面实况和ERA5的合成温度和露点温度廓线

Table 2 Profile of composite temperature and dew point temperature of observation and the ERA5 on rain type in 3 regions

区域	云顶高度/hPa		2 m气温/℃		2 m露点温度/℃	
	实况	ERA5	实况	ERA5	实况	ERA5
北方	400	550	5.0	4.6	4.1	3.1
江南	550	600	5.9	6.6	5.2	5.2
西南	550	650	7.2	6.9	6.6	5.4

中,江南地区在中低层(700—850 hPa)附近存在浅薄的暖层(图3b),表示雨夹雪发生过程中,存在一类中低层轻微融化而导致的雨夹雪(即并非完全由近地面附近的轻微融化所致),ERA5对该暖层刻画并不明显(图3e),表明PTYPE产品将此类型降水诊断为湿雪或降雨。从云顶高度对比可见,雨夹雪天气下,云顶高度也随纬度增加而升高,北方区域云顶最高(图3a),位于400 hPa附近。ERA5对应的云顶高度较实况略低,但在北方和西南区域,大致保持在-10℃层以上(图3d、3f),说明云中仍然有足够冰晶形成雪花;ERA5在江南地区的云顶高度接近-10℃层,造成在此区域PTYPE产品将部分水成云导致的降雨诊断为雨夹雪,使雨夹雪诊断偏多。

鉴于目前实况观测中,雪的观测不再区分干雪和湿雪的具体相态,而PTYPE产品中的降水相态进

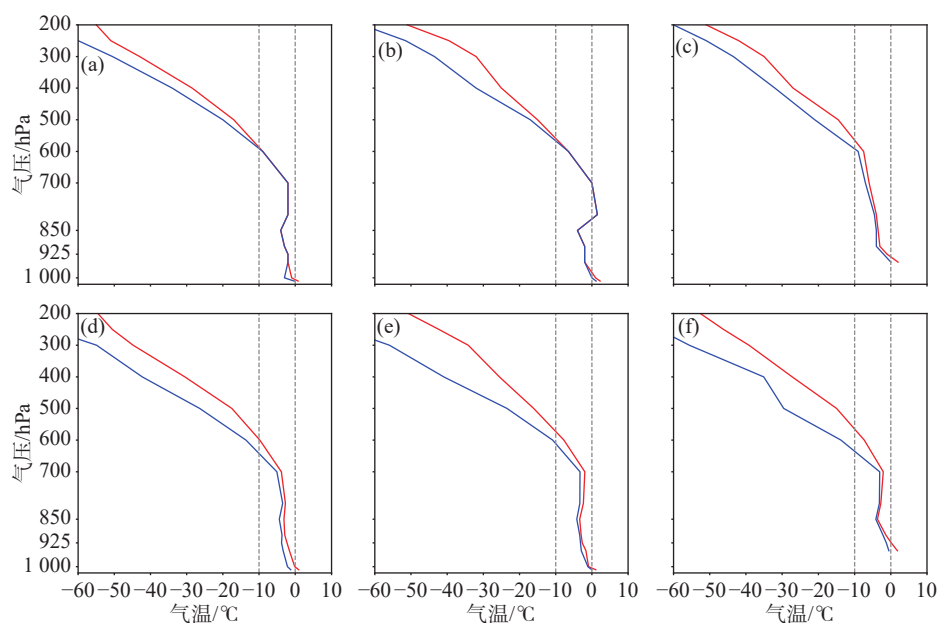


图 3 雨夹雪相态时我国北方 (a、d)、江南 (b、e)、西南 (c、f) 区域实况 (a—c) 和 ERA5 (d—f) 探空曲线

Fig. 3 Soundings of (a-c) observation and (d-f) ERA5 on sleet type in (a, d) northern, (b, e) Jiangnan and (c, f) south-west region

行了区分, 因此图 4 和表 3 分别给出了降雪相态时, 3 个区域的实况探空 (图 4a—c)、PTYPE 产品为干雪 (图 4d—f)、湿雪 (图 4g—i) 以及干湿雪 (图 4j—l) 时 ERA5 的合成探空以及相关特征量。由于降水粒子的温度与湿球温度更接近, 因此利用湿球温度进行

降水相态判别更合理 (陈双等, 2019)。湿球温度的计算方法来自 Knox 等 (2017)。实况探空层面, 三个区域整层气温均在 0°C 以下, 云层较厚, 云顶高度较高 (均超过 -10°C 层), 北方地区云顶达 400 hPa 。2 m 气温和露点温度均较低, 湿球温度也低于 0°C (表 3)。

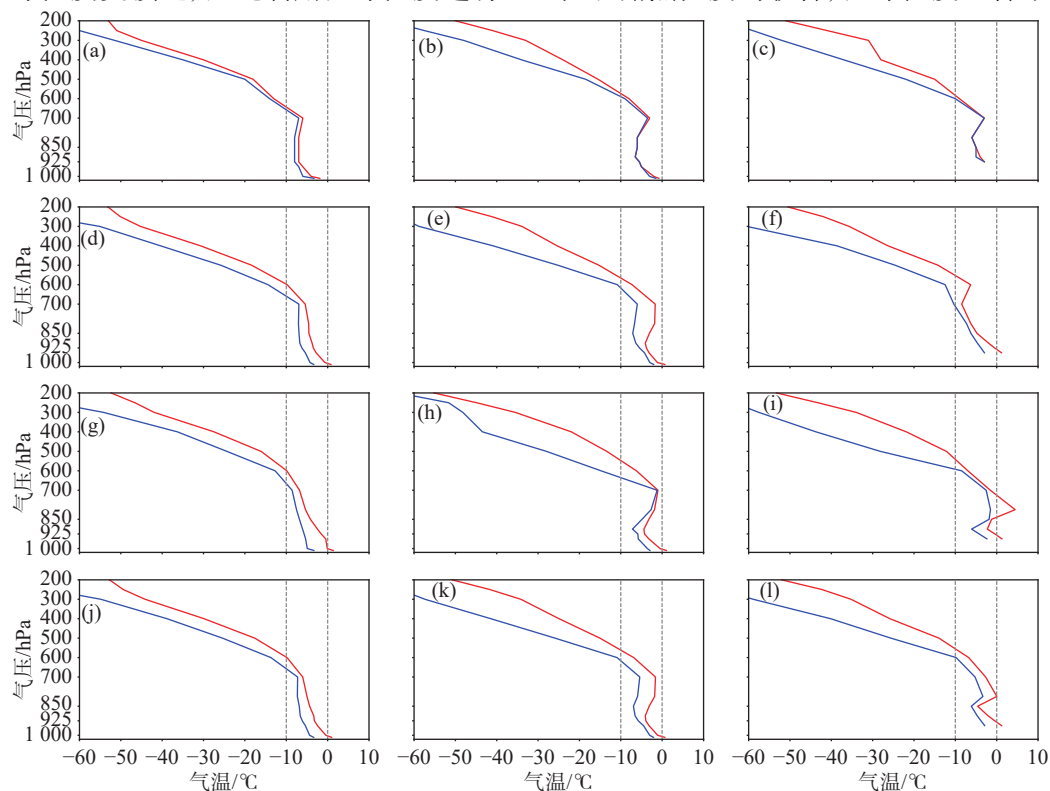


图 4 降雪相态时我国北方 (a、d、g、j)、江南 (b、e、h、k)、西南 (c、f、i、l) 区域实况 (a—c) 和 ERA5 干雪 (d—f)、湿雪 (g—i)、干湿雪合成 (j—l) 探空曲线

Fig. 4 Soundings of (a-c) observation, (d-f) dry snow, (g-i) wet snow and (j-l) composite snow of ERA5 on snow type in (a, d, g, j) northern, (b, e, h, k) Jiangnan and (c, f, i, l) south-west region

北方区域和江南区域, PTYPE 产品诊断为湿雪、干雪对应的 ERA5 探空的差别主要在于融化的程度, 湿雪探空或存在中层的轻微融化, 或 2 m 气温略高于干雪 (表 3)。值得注意的是, 在江南和西南区域, 湿雪探空的云顶高度均低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度, 且西南地区边界层附近存在一浅薄的暖层 (图 4i), 表明 PTYPE 产品较大概率误将降雨和雨夹雪判识为湿雪, 导致湿雪的判识较实况偏多。

比较实况探空 (图 4a—c) 和 PTYPE 产品为干湿雪时对应的 ERA5 合成探空 (图 4j—l) 发现, ERA5 在江南和西南区域的 2 m 气温明显高于实况气温, 其中江南区域在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 云底高度略低。对照 PTYPE 的诊断方案 (表 1) 可知, 2 m 气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时, 诊断为降雪 (干雪或湿雪) 的主要依据是近地面的液态水含量, 如果近地面液态水含量 $\leq 20\%$, 不管 2 m 气温是多少, 均会被判定为湿雪或干雪。但 2 m 气温的高低是判断降水相态的重要依据 (杨晓霞等, 2012)。当 2 m 气温高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 有较大概率会出现雨夹雪或湿雪。对比 ERA5 合成和实况的 2 m 湿球温度 (表 3) 可知, 二者非常接近, 且均在

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 符合湿球温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近或以下时降水粒子容易保持为固态 (Tamang 等, 2020) 的物理过程。因此, 在实际业务中, 是否预报雨夹雪、干雪或湿雪, 用 2 m 湿球温度取代 2 m 气温作为辅助判识依据, 可提升相态判识的准确性。

表 4 给出了 3 个区域雨、雨夹雪、雪对应的地面实测和 ERA5 的 PTYPE 产品样本数, 其中 PTYPE 产品雪的样本数为干雪和湿雪样本数之和 (因为实测无干雪和湿雪的区分)。由上述结果分析可知, 对北方地区, PTYPE 产品对雨和雨夹雪天气漏判 (诊断样本数少于实测数); 江南地区则以降雨漏判较明显, 雨夹雪部分空判; 西南地区的主要特征为降雨漏判, 降雪诊断偏多 (如前所述, 这可能与 PTYPE 产品误将降雨和雨夹雪判识为湿雪有关)。总体而言, 在北方和江南, 将 PTYPE 诊断的干、湿雪统归为降雪, 与实况站次较为相当; 对雨夹雪和降雨的判识, PTYPE 可能会诊断成冻雨, 需综合考虑其他判识方法的结果以提高预报的准确性。在西南地区, PTYPE 产品诊断的降雪容易偏多, 其可用性明显不如其他地区, 需要结合当地的其他经验或判识方法来辅助决策。

表 3 我国 3 个区域降雪相态时地面实况和 ERA5 的合成温度、露点温度及地面湿球温度廓线

Table 3 Profile of composite temperature, dew point and surface wet-bulb temperature of observation and the ERA5 on snow type in 3 regions

区域	云顶高度/hPa				2 m 气温/ $^{\circ}\text{C}$				2 m 露点/ $^{\circ}\text{C}$				2 m 湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$			
	实况	ERA5			实况	EAR5			实况	ERA5			实况	ERA5		
		干雪	湿雪	合成		干雪	湿雪	合成		干雪	湿雪	合成		干雪	湿雪	合成
北方	400	550	450	550	-1.9	-2.7	0.8	-1.8	-3.3	-5.7	-3.3	-4.3	-2.5	-3.7	0.0	-2.6
江南	500	600	550	600	-0.8	-0.4	1.0	0.4	-1.6	-2.1	-0.3	-1.4	-1.3	-1.2	0.5	-0.4
西南	600	700	650	700	-0.9	-1.0	1.8	-0.3	-1.7	-2.4	0.7	-2.1	-1.7	-1.7	1.3	-1.0

表 4 我国 3 个区域雨、雨夹雪、雪相态时地面实况和 PTYPE 产品样本数 (单位: 站次)

Table 4 The sample numbers of rain, sleet and snow type between surface observation and PTYPE products in 3 regions (unit: station $\times$ times)

区域	雨		雨夹雪		雪	
	实况	ERA5	实况	ERA5	实况	ERA5
北方	172	160	17	7	93	98
江南	474	435	6	9	28	31
西南	93	98	28	31	3	10

2.2 ERA5 与统计概念模型的冻雨和冰粒天气探空比较

图 5 给出冻雨相态下 3 个区域的统计概念模型探空曲线和 PTYPE 产品相应相态的 ERA5 探空曲线。与统计概念模型 (漆梁波, 2012) 相比, EAR5 在北方和江南区域的探空曲线 (图 5a—b) 与统计概念

模型的探空曲线 (图 5d—e) 较一致, 统计概念模型的探空曲线中层存在暖层, 低层存在明显冷层, ERA5 探空曲线自上而下也为“冷-暖-冷”的三层结构, 且 ERA5 和统计概念模型的 2 m 气温均在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。但是, 两个区域的探空曲线其暖层强度均强于统计概念模型 (气温高于统计概念模型 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上) 的暖层强度, 冷层强度和厚度均不及统计概念模型, 说明 PTYPE 产品诊断认为“近地面液滴如果落在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的地面, 会导致冻雨” (ECMWF, 2016)。该判识标准违背了冻雨形成的基本物理过程, 即过冷液滴落在低于或接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地面, 才形成冻结。PTYPE 产品中未充分考虑液滴的“过冷”状态, 从而导致冻雨的“空报”。在西南区域, ERA5 探空 (图 5c) 与统计概念模型探空 (图 5f) 存在明显差异。表明在西南区域, 诊断探空体现出明显的暖层, 即冻雨以

“暖-冷”(两层结构)为主,这与统计概念模型的探空差异也较大。统计概念模型中,整层探空的温度均在 0°C 以下,冻雨以“暖-冷”(两层结构)和“冷”(一层结构)各占一半的形式出现,二者较为一致的是

2 m 气温均在 0°C 以下。由于诊断探空中,暖层厚度和强度明显强于底下的冷层厚度和强度,显示在西南区域,PTYPE 产品同样未充分考虑液滴的“过冷”状态,西南区域的冻雨“空报”也会较多。

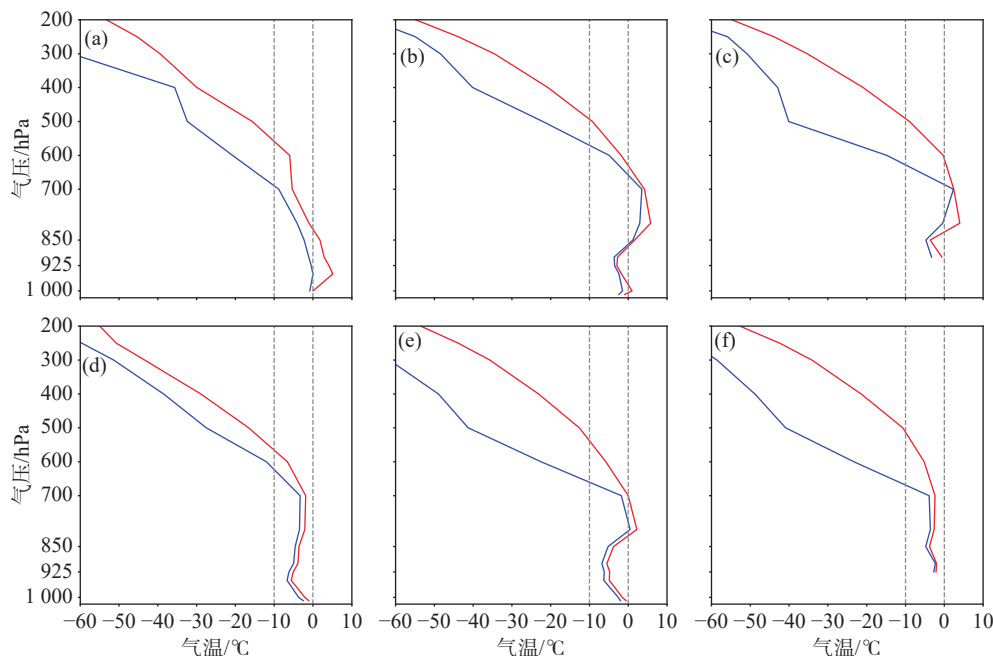


图 5 冻雨相态时我国北方 (a、d)、江南 (b、e)、西南 (c、f) 区域 ERA5 (a—c) 和漆梁波 (2012) 统计概念模型 (d—f) 探空曲线

Fig. 5 Soundings of (a-c) ERA5 and (d-f, from Qi (2012)) statistical conceptual model on freezing rain type in (a, d) northern, (b, e) Jiangnan and (c, f) south-west region

图 6 给出冰粒相态时 ERA5 和统计概念模型 (漆梁波, 2012) 的探空曲线 (江南和西南地区由于样本较少, 未进行对比)。从中看出, 在北方区域, ERA5 探空 (图 6a) 展示的相关特征与统计概念模型探空 (图 6b) 较为相似, 但是暖层的强度和厚度较统计概念模型更强更厚, 下层冷层的厚度薄于统计模型, 而 2 m 气温在 0°C 以下, 此时 PTYPE 产品诊断方案可能将降雪或雨夹雪判识为“冰粒”, 这一点, 从诊断方案中的条件“2 m 气温 $< 0^{\circ}\text{C}$, 云中暖层底部的液态含水量 $\geq 20\%$ 且地面液态含水量 $< 50\%$ ”也可以看出。诊断方案只要求到达地面附近的水成物中固态比例 $\geq 50\%$, 并未要求绝大部分为固态甚至完全冻结, 而实际冰粒天气发生时, 到达地面时多为固态 (Stewart, 1992), 这会导致较多的误判。2 m 气温方面, ERA5 在北方地区诊断的 2 m 气温在 0°C 以下 (这是诊断方案所设定的阈值), 而实况统计冰粒主要出现在 0°C 以上, 由此可见, PTYPE 产品对北方地区冰粒可能会存在较多漏判。

综上所述, PTYPE 产品在诊断冻雨时, 未以近地面液滴为“过冷”状态作为冻雨的必要约束条件是导

致冻雨“空报”较多的主要原因。对于冰粒的诊断, 一方面方案设定的 2 m 气温低于 0°C 与统计概念模型不符导致漏报; 另一方面, 即使 2 m 气温低于 0°C 时, 方案中只是要求到达地面附近的水成物中固态比例 $\geq 50\%$, 并未要求绝大部分为固态甚至完全冻结, 将导致冰粒天气的“空报”。

3 PTYPE 产品诊断方案的改进思路

ERA5 的 PTYPE 产品诊断方案在雨、雨夹雪、雪天气下对应的探空曲线与实况较一致, 但 PTYPE 产品诊断为降雪天气时, 2 m 气温往往大于 0°C , 这多与实况不符, 然而样本数对比分析表明 (表 4), PTYPE 产品对于干雪和湿雪的判识, 总体较为准确。鉴于 ERA5 对应的 2 m 湿球温度大致低于 0°C , 与实况较为吻合, 因此业务应用中, 宜采用湿球温度作为雨夹雪和降雪天气的辅助判据。

对于冻雨和冰粒天气, 则需要增加和调整相关判识标准, 即在冻雨判识中, 增加近地面水成物过冷状态的判据, 以便减少“空报”, 这需要模式产品后处理人员根据相关云物理方案去设计这一物理量的诊

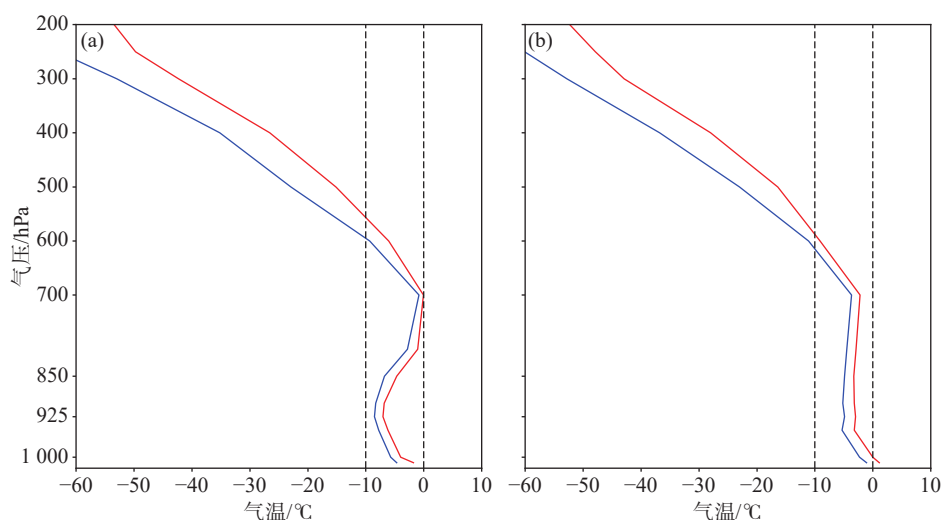


图6 PTYPE 诊断为冰粒时我国北方区域 ERA5 (a) 和统计概念模型探空 (b, 摘自漆梁波 (2012)) 探空曲线

Fig. 6 Soundings of (a) ERA5 and (b, from Qi (2012)) statistical conceptual model on ice pallet type in northern region

断方案,以便得到更为精准的冻雨诊断结果;而冰粒天气的判识中,剔除“2 m 气温 $<0^{\circ}\text{C}$ ”的判据,以减少“漏报”,并适当调整(降低)地面液态含水量的比例以减少“空报”。

4 结论与讨论

本文利用自动站实况和探空资料、ERA5 的降水相态诊断产品 (PTYPE) 以及地面和高空气象要素产品,对比 2022 年冬季和 2023 年冬季我国北方、江南和西南 3 个区域不同降水相态时 ERA5 和实况及统计概念模型探空,分析了 PTYPE 产品诊断方案出现偏差的可能原因,并给出改进途径。得出如下主要结论:

(1) 在北方和江南地区,如将 PTYPE 产品的干、湿雪统归为降雪,与实测降雪数据较为吻合;雨夹雪和降雨的诊断方案也大致合理。在西南地区,PTYPE 产品的降雪较实况偏多,其可用性明显不如其他地区,需要结合当地的其他经验或判识方法来进行辅助决策。此外,PTYPE 产品的云顶高度普遍低于实际观测值,这一系统性偏差在降水相态诊断和业务预报中需予以特别关注。

(2) PTYPE 产品诊断方案在判识冻雨时,存在“近地面液滴如果落在 0°C 以下的地面,会导致冻雨”的问题,不符合冻雨形成的基本物理过程,未充分考虑液滴的“过冷”属性,可能是业务预报中 PTYPE 产品“空报”冻雨的主要原因。在 PTYPE 产品对应的 ERA5 探空中,中层暖层明显强于低层冷层,也与统计概念模型探空明显不符。

(3) PTYPE 产品诊断方案在判识冰粒时,要求 2 m 气温低于 0°C ,与实况相反,这是 PTYPE 产品对冰粒

漏判的主要原因。此外,PTYPE 产品诊断方案中的条件“云中暖层底部的液态含水量 $\geq 20\%$ 且地面液态含水量 $<50\%$ ”只是要求到达地面附近的水成物中,固态比例 $\geq 50\%$,并未要求绝大部分为固态甚至完全冻结,而实际冰粒天气发生时,到达地面时多为固态,这又会导致较多的误判。

(4) 根据上述分析结果,最后给出了 PTYPE 产品诊断方案的改进思路,主要包括雨夹雪和降雪判识以 2 m 湿球温度为辅助判据,对冻雨的诊断需增加近地面或地面液滴的温度判据(必须为过冷液滴),冰粒判识中,剔除“2 m 气温 $<0^{\circ}\text{C}$ ”判据并适当降低“地面液态含水量”的比例。

降水相态预报的不确定性除了来自诊断方案的偏差,还包括了模式本身对气象要素预报的偏差 (Reeves et al., 2014),包括地面和高空的气象要素的分布 (Ding et al., 2014; 蓝俊等, 2023; 牛嫣静等, 2020) 以及降水预报本身的准确度 (熊秋芬, 2011)。地面要素的预报偏差可通过人工智能等先进技术改进 (韩念霏等, 2022); 高空气象要素的预报偏差订正则需融合预报员经验以及引入新型观测资料 (赵恩蓉等, 2023)。降水相态还与复杂的云微物理过程有关,仅用温湿廓线难以准确描述实际的相态特征 (胡宁等, 2021),还需要通过多源观测资料应用和数值模式的模拟提高对降水相态机制的认识。另外,已有研究表明,ECMWF 模式的降水相态集合概率预报产品较确定性预报具有更高的预报能力 (董全等, 2020b),因此在改进诊断方案的同时,如何利用集合概率预报产品提升降水相态的预报准确性也是未来研究的重点。

参考文献 (References):

- 陈双, 谌芸, 何立富, 等. 2019. 我国中东部平原地区临界气温条件下降水相态判别分析[J]. *气象*, 45(8): 1037–1051. Chen S, Chen Y, He L F, et al. 2019. Discrimination analysis of snow and rain occurring under critical temperature conditions in central and eastern China [J]. *Meteorological Monthly*, 45(8): 1037–1051 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.001
- 董全, 胡宁, 宗志平. 2020a. ECMWF 降水相态预报产品 (PTYPE) 应用和检验[J]. *气象*, 46(9): 1210–1221. Dong Q, Hu N, Zong Z P. 2020a. Application and verification of the ECMWF precipitation type forecast product (PTYPE) [J]. *Meteorological Monthly*, 46(9): 1210–1221 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.008
- 董全, 张峰, 宗志平. 2020b. 基于 ECMWF 集合预报产品的降水相态客观预报方法[J]. *应用气象学报*, 31(5): 527–542. Dong Q, Zhang F, Zong Z P. 2020b. Objective precipitation type forecast based on ECMWF ensemble prediction product [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 31(5): 527–542 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20200502
- 韩念霖, 杨璐, 陈明轩, 等. 2022. 京津冀站点风温湿要素的机器学习订正方法[J]. *应用气象学报*, 33(4): 489–500. Han N F, Yang L, Chen M X, et al. 2022. Machine learning correction of wind, temperature and humidity elements in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 33(4): 489–500 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20220409
- 胡宁, 符娇兰, 孙军, 等. 2021. 北京一次冬季极端降水过程中相态转换预报的误差分析[J]. *气象学报*, 79(2): 328–339. Hu N, Fu J L, Sun J, et al. 2021. Errors in the forecast of precipitation type transition in an extreme winter precipitation event in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(2): 328–339 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.019
- 黄骅文, 蔡荣辉, 姚蓉, 等. 2021. 深度学习网络在降水判识和预报中的应用[J]. *气象*, 47(3): 317–326. Huang J W, Cai R H, Yao R, et al. 2021. Application of deep learning method to discrimination and forecasting of precipitation type [J]. *Meteorological Monthly*, 47(3): 317–326 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.005
- 蓝俊, 韩伟中, 张祖熠, 等. 2023. 福建省 ECMWF 细网格模式 2 m 温度预报误差分析与订正[J]. *气象与减灾研究*, 46(3): 196–202. Lan J, Han W Z, Zhang Z Y, et al. 2023. Analysis and correction of 2 m temperature forecast error of ECMWF fine grid model in Fujian province [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 46(3): 196–202 (in Chinese). doi:10.12013/qxyjzyj2023-027
- 李杰, 郭学良, 周晓宁, 等. 2015. 2011–2013 年中国冻雨、冻毛毛雨和冻雾的特征分析[J]. *大气科学*, 39(5): 1038–1048. Li J, Guo X L, Zhou X N, et al. 2015. Characteristics of freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog in China from 2011 to 2013 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 39(5): 1038–1048 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14239
- 刘婷婷, 朱秀芳, 郭锐, 等. 2022. ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析[J]. *干旱区地理*, 45(1): 66–79. Liu T T, Zhu X F, Guo R, et al. 2022. Applicability of ERA5 reanalysis of precipitation data in China [J]. *Arid Land Geography*, 45(1): 66–79 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2021.132
- 牛嫣静, 徐向军, 郭欢, 等. 2020. 三种全球预报产品中国区近地面气温短期预报效果检验[J]. *气象与环境学报*, 36(4): 18–27. Niu Y J, Xu X J, Guo H, et al. 2020. Verification of the short-term forecast of near-surface temperature using different global forecast products in China [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 36(4): 18–27 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2020.04.003
- 漆梁波. 2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J]. *气象*, 38(7): 769–778. Qi L B. 2012. Formation mechanism and forecast on freezing rain and ice pellet in winter of China [J]. *Meteorological Monthly*, 38(7): 769–778 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.07.001
- 漆梁波, 张瑛. 2012. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. *气象*, 38(1): 96–102. Qi L B, Zhang Y. 2012. Research on winter precipitation types' discrimination criterion in eastern China [J]. *Meteorological Monthly*, 38(1): 96–102 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.01.011
- 覃皓, 农孟松, 翟丽萍, 等. 2024. 广西沿海“23.6”弱热带低压破纪录暴雨过程的诊断分析[J]. *气象学报*, 82(3): 289–305. Qin H, Nong M S, Zhai L P, et al. 2024. Diagnosis of the June 2023 record-breaking rainstorm caused by a weak tropical depression in the coastal area of Guangxi, China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 82(3): 289–305 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2024.20230121
- 任兆鹏, 张苏平, 马艳, 等. 2018. 青岛冬半年降水相态统计分析及判别方法研究[J]. *海洋气象学报*, 38(1): 27–33. Ren Z P, Zhang S P, Ma Y, et al. 2018. Statistical analysis and discrimination criterion on precipitation types of winter half year in Qingdao [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 38(1): 27–33 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.004
- 佟华, 张玉涛. 2019. GRAPES-MESO 模式预报降水相态诊断及应用研究[J]. *大气科学学报*, 42(4): 502–512. Tong H, Zhang Y T. 2019. Diagnosis of precipitation types and its application in the GRAPES-MESO forecasts [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 42(4): 502–512 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190416001
- 熊秋芬. 2011. GRAPES_Meso 模式的降水格点检验和站点检验分析[J]. *气象*, 37(2): 185–193. Xiong Q F. 2011. Verification of GRAPE-Meso precipitation forecasts based on fine mesh and station datasets [J]. *Meteorological Monthly*, 37(2): 185–193 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.2.008
- 杨晓霞, 吴炜, 万明波, 等. 2012. 山东省两次暴雪天气的对比分析[J]. *气象*, 38(7): 868–876. Yang X X, Wu W, Wan M B, et al. 2012. A comparative analysis of two snowstorms in Shandong Province [J]. *Meteorological Monthly*, 38(7): 868–876 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.07.013
- 张博, 张芳华. 2024. 2024 年 2 月我国中东部两次持续性低温雨雪冰冻过程的环流异常特征分析[J]. *暴雨灾害*, 43(4): 384–394. Zhang B, Zhang F H. 2024. Characteristics of circulation anomalies of two continuous low temperature rain and snow freezing weather processes in eastern China in February 2024 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(4): 384–394 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-108
- 张俊, 于碧馨, 李如琦, 等. 2024. 西天山南麓两次暴雪过程对比分析[J]. *沙*

- 漠与绿洲气象,18(5):120–127. Zhang J, Yu B X, Li R Q, et al. 2024. Comparative analysis of two blizzard processes in the south slope of the western Tianshan Mountains [J]. *Deseret and Oasis Meteorology*, 18(5):120–127 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.05.016
- 赵恩榕, 潘筱龙, 姚蓉, 等. 2023. 基于卫星与双极化多普勒天气雷达的湖南中部地区一次极端暴雪应用分析[J]. *高原山地气象研究*, 43(4): 134–145. Zhao E R, Pan X L, Yao R, et al. 2023. Application analysis of an extreme snowstorm in central Hunan based on satellite and dual-polarization Doppler weather radar [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 43(4):134–145 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2023.04.017
- 赵琳娜, 慕秀香, 马翠平, 等. 2021. 冬季稳定性降水相态预报研究进展[J]. *应用气象学报*, 32(1):12–24. Zhao L N, Mu X X, Ma C P, et al. 2021. A review on stable precipitation type forecast in winter [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 32(1):12–24 (in Chinese). doi:10.10.11898/1001-7313.20210102
- 周悦, 吕晶晶, 高正旭, 等. 2024. 2024 年 2 月湖北省一次大范围冻雨过程的宏微观特征及形成机制初探[J]. *暴雨灾害*, 43(4):458–468. Zhou Y, LV J J, Gao Z X, et al. 2024. Study on the macro and micro characteristics of a large-scale freezing rain weather event in Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(4):458–468 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-131
- Ahrens C D. 2000. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment* [M]. America: Brooks/Cole: 182–199
- Ding B H, Yang K, Qin J, et al. 2014. The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization [J]. *Journal of Hydrology*, 513:154–163. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.03.038
- ECMWF. 2016. IFS documentation Cy43R1 Part IV: physical processes[R]. Reading: ECMWF: 118–120. doi:10.21957/sqvo5yxja
- Knox J A, David S N, Knox P N. 2017. Two simple and accurate approximations for wet-bulb temperature in moist conditions, with forecasting applications [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(9):1897–1906. doi:10.1175/BAMS-D-16-0246.1
- Poore K D, Wang J H, Rossow W B. 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. *Journal of Climate*, 8(3):550–568. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0550:CLT-FAC>2.0.CO;2
- Reeves H D, Elmore K L, Ryzhkov A, et al. 2014. Sources of uncertainty in precipitation-type forecasting [J]. *Weather Forecasting*, 29:936–953. doi:10.1175/WAF-D-14-00007.1
- Stewart R E. 1992. Precipitation types in the transition region of winter storms [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73:287–296. doi:10.1175/1520-0477(1992)073<0287:PTITTR>2.0.CO;2
- Tamang S K, Ebtehaj A M, Prein A F, et al. 2020. Linking global changes of snowfall and wet-bulb temperature [J]. *Journal of Climate*, 33:39–59. doi:10.1175/JCLI-D-19-0254.1
- Ye M S, Yao X P, Zhang T, et al. 2021. Intercomparison of CRA-Interim precipitation products with ERA5 and JRA-55 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 27(2):136–147. doi:10.46267/j.1006-8775.2021.013
- (责任编辑 张 文)