

袁敏,王迪,朱国辉,等,2026. 基于环流分型的拉萨机场降雪天气对比分析[J]. 气象,52(5):621-630. Yuan M, Wang D, Zhu G H, et al, 2026. Comparative analysis of snowfall events at Lhasa Airport based on circulation type classification[J]. Meteor Mon, 52(5):621-630(in Chinese).

基于环流分型的拉萨机场降雪天气对比分析*

袁 敏^{1,2} 王 迪¹ 朱国辉³ 田续蔚⁴

1 中国民用航空飞行学院航空气象学院,成都 641419

2 中国气象局航空气象重点开放实验室,成都 641419

3 中国民用航空西藏自治区空中交通管理中心,拉萨 850050

4 北京市气象服务中心,北京 100089

提 要: 为提升拉萨机场降雪预报准确性与航空气象服务水平,文章采用改进的 Jenkinson-Collison(J-C)环流分型方法,对 2013—2020 年拉萨机场 56 次降雪过程进行分型与物理量场诊断。结果表明,改进后的方法分型成功率为 92.9%,识别出气旋型(12.5%)、低压槽型(42.9%)和西风平流型(37.5%),不确定型仅 7.1%(显著低于传统方法)。三类分型特征差异显著:气旋型对应高原涡,动力与水汽条件最强,平均降雪量 3.4 mm、持续 358 min(均最大);低压槽型受南支槽影响,层结最不稳定,动力与水汽较弱,平均降雪量 1.2 mm、持续 170 min(均最小);西风平流型以暖脊和高空急流为主,层结最稳,水汽呈“低层辐合、高层辐散”结构,平均降雪量 1.8 mm、持续 280 min,降雪指标介于前二者之间。研究结果为拉萨机场降雪的精细化预报与航空气象服务提供科学参考。

关键词: 拉萨机场,降雪天气, Jenkinson-Collison 环流分型

中图分类号: P448

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.011701

Comparative Analysis of Snowfall Events at Lhasa Airport Based on Circulation Type Classification

YUAN Min^{1,2} WANG Di¹ ZHU Guohui³ TIAN Xuyu⁴

1 College of Aviation Meteorology, Civil Aviation Flight University of China, Chengdu 641419

2 Key Laboratory for Aviation Meteorology, CMA, Chengdu 641419

3 Civil Aviation Air Traffic Management Bureau of Tibet, Lhasa 850050

4 Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089

Abstract: To improve snowfall forecast accuracy and aviation meteorological services at Lhasa Airport, by employing the improved Jenkinson-Collison (J-C) circulation type classification method, this paper classifies and diagnoses 56 snowfall events that occurred during 2013—2020 at Lhasa Airport. The results are that, with the improved method, a classification success rate of 92.9% is achieved, and three types, i. e., the cyclonic type (12.5%), low-pressure trough type (42.9%) and westerly advection type (37.5%) of snowfall events are identified. There are only 7.1% of snowfall events remaining unclassified-significantly lower than that by the traditional method. The characteristics of the three identified circulation types are significantly different. The cyclonic type, corresponding to plateau vortices, features the strongest dynamics and water vapor conditions, with the most average snowfall (3.4 mm) and longest duration (358 min). The

* 科技部科技基础资源调查专项(2025FY101500)、国家重点研发计划(2021YFB2601701-01)、西南区域人工影响天气能力建设(四川)研究试验项目[SCIT-ZG(Z)-2024100001]和中央高校基本科研业务费专项资金(24CAFUC01003)共同资助

2025 年 6 月 8 日收稿; 2026 年 1 月 17 日收修定稿

第一作者:袁敏,主要从事天气学诊断分析研究. E-mail: yuanm@aliyun.com

low-pressure trough type, influenced by the southern branch trough, shows the most unstable atmospheric stratification but relatively weak dynamics and water vapor, resulting in the lowest mean snowfall (1.2 mm) and shortest duration (170 min). The westerly advection type, dominated by warm ridges and upper-level jets, has the most stable atmospheric stratification, with a “low-level convergence and upper-level divergence” moisture structure. Its intermediate snowfall indicators lie between those of the other two types, that is, the average snowfall is 1.8 mm and the duration is 280 min. These findings could provide a scientific basis for refined snowfall forecasting and help improve the aviation meteorological services at Lhasa Airport.

Key words: Lhasa Airport, snowfall weather, Jenkinson-Collison circulation type classification

引 言

青藏高原是全球高海拔地区气候与天气研究的核心区域(Wu et al, 2015; 马耀明等, 2025), 其降雪天气不仅深刻影响区域生态和水文过程(包文等, 2024), 也对航空运行安全造成严峻挑战(杜娟等, 2024; 黄晓清等, 2018)。作为青藏高原最重要的航空枢纽, 拉萨机场在区域社会经济发展与对外联通中发挥着重要作用。然而, 高海拔地理条件使降雪易引发机身积冰与跑道摩擦系数显著下降, 进而导致航班延误、取消甚至起降事故, 严重制约航空运行效率与安全(范菠等, 2007; 周川等, 2015; Deng et al, 2017)。近年来, 在全球气候变暖背景下, 青藏高原降雪量总体呈上升趋势, 极端降雪事件频发(Li et al, 2024; Sun et al, 2024), 由此对拉萨机场降雪天气精细化研究提出了更为迫切的需求。

大尺度环流形势是影响降雪的重要因素, 其通过影响动力、热力和水汽条件, 从而决定降雪的强度、持续时间与空间分布(索渺清和丁一汇, 2014; 申红艳等, 2024)。对环流分型有助于建立环流类型与局地天气特征的联系, 从而增强降雪可预报性。环流分型主要包括主观分型与客观分型两类, 主观分型依赖天气学理论识别典型环流形势, 但其典型性判据不统一、主观性强, 难以实现业务化应用(Huth et al, 2008); 客观分型通过标准化数据与统计方法实现自动分型, 适用于大样本分析, 但存在参数敏感性、依赖大样本和缺乏天气学意义等方面的局限, 不同方法或参数组合往往导致分型结果差异显著(Philipp et al, 2010)。

Jenkinson-Collison(以下简称 J-C)环流分型方法(Jenkinson and Collison, 1977)弥补了上述不足,

该方法基于位势高度、风向、风速及涡度等物理量构建分型判据, 无需大样本训练, 具有明确的天气学意义, 既降低了主观分型的人为误差, 又克服了部分客观分型方法在区域适用性和稳定性方面的局限, 得到了广泛应用和发展(Jones et al, 1993; Spellman, 2017; Fernández-Granja et al, 2024)。Jones et al (2014)利用再分析数据验证 J-C 环流分型方法在全球不同区域环流识别中的稳定性和季节一致性; Wang et al(2017)将其应用于乌鲁木齐机场雾天环流分型, 显著提升了低能见度天气预报效果; Osipova and Osipov(2022)基于该方法研究了 1970—2020 年东西伯利亚环流变化及低频振荡对近地面天气的影响。

然而, 传统 J-C 环流分型方法以海平面气压场为分型依据, 在青藏高原等高海拔地区, 复杂地形条件导致海平面气压估值误差显著, 削弱了环流分型结果的可靠性(朱艳峰等, 2007; Fernández-Granja et al, 2023)。已有研究指出, 500 hPa 位势高度场可更有效表征青藏高原天气系统的特征与演变过程, 对降雪预报具有明确指示意义(索渺清和丁一汇, 2014; 罗布坚参等, 2019)。为验证基于 500 hPa 位势高度改进的 J-C 环流分型方法在拉萨机场降雪天气中的适用性, 厘清不同环流分型对应动力场、热力场及水汽场特征, 阐明物理场差异对降雪量与持续时间的影响机制, 本研究以 2013—2020 年拉萨机场 56 次降雪事件为研究对象, 采用改进的 J-C 环流分型方法进行客观分类, 并结合自动气象观测数据与 ERA5 再分析数据进行综合分析, 为提升拉萨机场降雪预报精度和高原航空运行气象保障能力提供科学依据, 也为青藏高原高海拔地区环流分型技术优化提供参考。

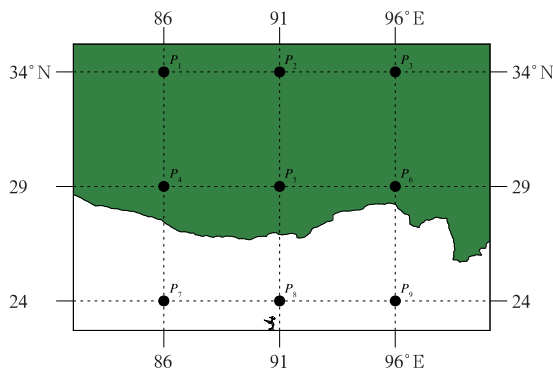
1 数据及方法

1.1 数据

采用 2013—2020 年拉萨机场自动气象观测系统记录的数据和 ERA5 再分析数据(分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$),自动气象观测系统数据包括温度、湿度、风速、天气现象(包括降水类型)、降雪量等,时间分辨率为 1 min;ERA5 再分析数据包括位势高度、水平散度、比湿、相对湿度、温度、风速分量(u 和 v)、垂直速度等。

1.2 方法

使用 500 hPa 位势高度场作为分型依据,以拉萨机场(29.29°N 、 90.91°E)为中心,以 5° 经纬度为间隔,选取 9 个差分格点(图 1),计算式(1)~式(7)的 7 个参数。该格点间隔和空间尺度与青藏高原典



注: P_5 为拉萨机场,绿色填充区域为青藏高原。

图 1 拉萨机场周边 9 个差分格点分布

Fig. 1 Spatial distribution of nine differential grid points around Lhasa Airport

型天气系统的水平尺度相匹配,经测试分型效果较好。

$$C_z = 0.25[(P_7 + 2P_8 + P_9) - (P_4 + 2P_2 + P_3)] \quad (1)$$

$$C_m = \frac{1}{2\cos 29.29^\circ} [0.25(P_3 + 2P_6 + P_9) - 0.25(P_1 + 2P_4 + P_7)] \quad (2)$$

$$D = \arctan\left(\frac{C_z}{C_m}\right) \quad (3)$$

$$F = \sqrt{C_z^2 + C_m^2} \quad (4)$$

$$Z_w = \frac{\sin 29.29^\circ}{\sin(29.29^\circ - 2.5^\circ)} [(P_7 + 2P_8 + P_9) - (P_4 + 2P_5 + P_6)] - \frac{\sin 29.29^\circ}{\sin(29.29^\circ + 2.5^\circ)} [(P_4 + 2P_5 + P_6) - (P_1 + 2P_2 + P_3)] \quad (5)$$

$$Z_s = \frac{1}{\cos 29.29^\circ} \{ [0.25(P_3 + 2P_6 + P_9) - 0.25(P_2 + 2P_5 + P_8)] - [0.25(P_2 + 2P_5 + P_8) - 0.25(P_1 + 2P_4 + P_7)] \} \quad (6)$$

$$Z = Z_w + Z_s \quad (7)$$

式中: P_n 为第 n 个格点上 500 hPa 位势高度; C_z 和 C_m 分别为纬向和经向风分量; D 为风向角; F 为风速模值; Z_w 和 Z_s 分别为切变涡度的西风分量和南风分量; Z 为总切变涡度,按照表 1 中的标准对其计算结果进行分型。

2 分型结果

2.1 分型结果统计

2013—2020 年拉萨机场共发生降雪天气 56 次,分为气旋型、气旋与西风平流混合型(在本研究中呈低压槽形势,称低压槽型)、西风平流型和不确定型。

表 1 拉萨机场 J-C 环流分型客观判断标准

Table 1 Objective criteria for J-C circulation type classification at Lhasa Airport

判断依据	$Z > 6F$	$Z < -6F$	$1/3F < Z < 6F$	$-6F < Z < -4/3F$	$-4/3F < Z < 1/3F$	$F < 6$ 且 $ Z < 6$
$67.5^\circ \leq D \leq 112.5^\circ$ 且 $C_z > 0$	C	A	CW	AW	W	U
$67.5^\circ \leq D \leq 112.5^\circ$ 且 $C_z < 0$	C	A	CE	AE	E	U
$-22.5^\circ \leq D < 22.5^\circ$ 且 $C_m > 0$	C	A	CS	AS	S	U
$-22.5^\circ \leq D < 22.5^\circ$ 且 $C_m < 0$	C	A	CN	AN	N	U
$22.5^\circ \leq D < 67.5^\circ$ 且 $C_z > 0$	C	A	CSW	ASW	SW	U
$22.5^\circ \leq D < 67.5^\circ$ 且 $C_z < 0$	C	A	CNE	ANE	NE	U
$-67.5^\circ \leq D < -22.5^\circ$ 且 $C_z < 0$	C	A	CNW	ANW	NW	U
$-67.5^\circ \leq D < -22.5^\circ$ 且 $C_z > 0$	C	A	CSE	ASE	SE	U

注: C、A、U 分别代表气旋型、反气旋型和不确定型, N、E、S、W 分别代表北风、东风、南风、西风平流型, NE、SE、SW、NW 分别代表东北风、东南风、西南风、西北风平流型, C、A 与各风向平流型的组合代表混合型(例如 CW 为气旋与西风平流混合型)。

如图 2 所示,气旋型 7 次(小雪 4 次,雨夹雪 2 次,中雪 1 次),平均降雪量为 3.4 mm,持续时间为 358 min;低压槽型 24 次(小雪 19 次,中雪 4 次,大雪 1 次),平均降雪量为 1.2 mm,持续时间为 170 min;西风平流型 21 次(小雪 18 次,中雪 2 次,大暴雪 1 次),平均降雪量为 1.8 mm,持续时间为 280 min;不确定型 4 次(小雪 2 次,雨夹雪 2 次),平均降雪量为 3.1 mm,持续时间为 220 min。不确定型的 4 次事件环流形势复杂(鞍型场 1 次、高低压过渡区 2 次、弱高压脊 1 次),缺乏统一特征。基于 8 年样本可知,低压槽型和西风平流型是拉萨机场降雪主要的环流类型。除不确定型之外,气旋型占比最低,但平

均降雪量最大、持续时间最长;低压槽型占比最高,但平均降雪量最小、持续时间最短;西风平流型的占比、平均降雪量和持续时间介于前两者之间。改进的 J-C 环流分型方法识别出拉萨机场 52 次(占比 92.9%)降雪的天气形势,不确定型仅 4 次(占比 7.1%),明显低于 Kysely and Huth(2006)两阶段聚类法对 500 hPa 位势高度场分型的不确定型比例(冬季 19.7%和夏季 34.5%),分型效果明显提升。

2.2 天气形势分析

2013—2020 年拉萨机场降雪天气各分型的 500 hPa 位势高度场、温度场和风场如图 3 所示。

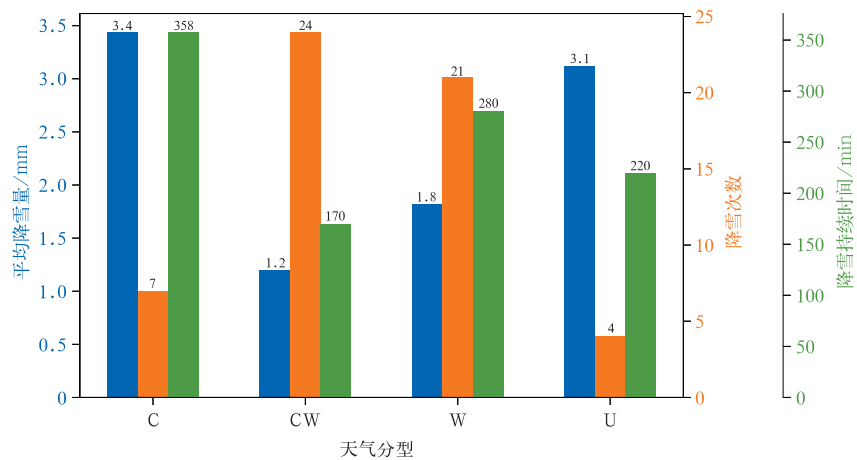


图 2 2013—2020 年拉萨机场降雪天气各分型的平均降雪量、降雪次数和降雪持续时间

Fig. 2 Average snowfall, number of snowfall event, and snowfall duration for each snowfall classification of snow weather at Lhasa Airport during 2013—2020

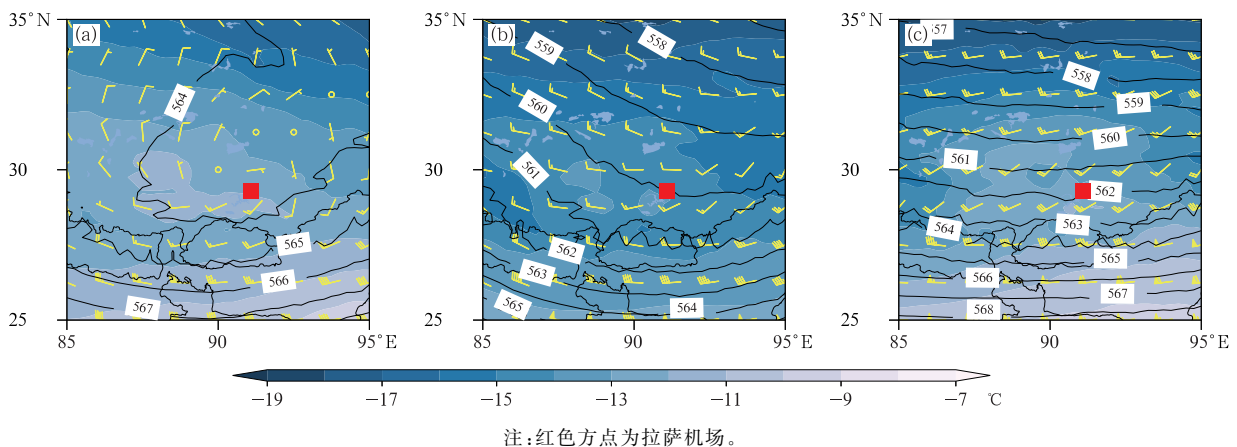


图 3 2013—2020 年拉萨机场降雪天气(a)气旋型,(b)低压槽型,(c)西风平流型的 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)、温度场(填色)与风场(风羽)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), temperature (colored) and wind (barb) for (a) cyclonic type, (b) low-pressure trough type and (c) westerly advection type of snowfall weather at Lhasa Airport during 2013—2020

对于气旋型(图 3a),拉萨机场处于近似闭合的 564 dagpm 等高线包围的低压环流系统内,气流呈逆时针旋转,形成明显的低涡结构,温度场显示机场南侧为弱暖区,这类环流形势有利于气流辐合和抬升,为降雪提供有利的动力条件。薛建康(1988)研究表明,高原低涡是冬半年青藏高原地区重要的降水系统,并常与强降雪事件相关(梁潇云等,2002)。对于低压槽型(图 3b),拉萨机场位于低压槽控制下,槽前为西南气流,槽后转为偏西气流,并受弱的暖脊影响。槽前西南气流通常与南支槽活动相联系,将孟加拉湾的暖湿气流持续输送至青藏高原,对高原降雪过程具有重要贡献(刘胜胜等,2021;罗布坚参等,2019)。西风平流型(图 3c)表现为等高线纬向均匀分布,拉萨机场受暖脊和西南气流控制。

图 4 给出了 2013—2020 年拉萨机场降雪天气各分型 500 hPa 位势高度场、风场和温度场与冬半年气候平均的距平场。气旋型的位势高度距平场呈现出显著的北正南负特征(图 4a),正、负距平幅度分别达到 5 dagpm 和 -2 dagpm,这增强了南北向位势高度梯度,斜压性不稳定性明显增强(对应图 3a 中等温线密集分布),为锋区的生成与发展提供有利的动力条件。温度场距平整体表现为偏冷,负距平区分布较为分散,其值小于 -2℃。机场西北侧同时出现位势高度场和温度场正距平,指示暖脊发展加强,进而有利于其前侧低涡发展及冷空气南下。风场距平以偏东风为主,表明西风较气候态偏弱,机场

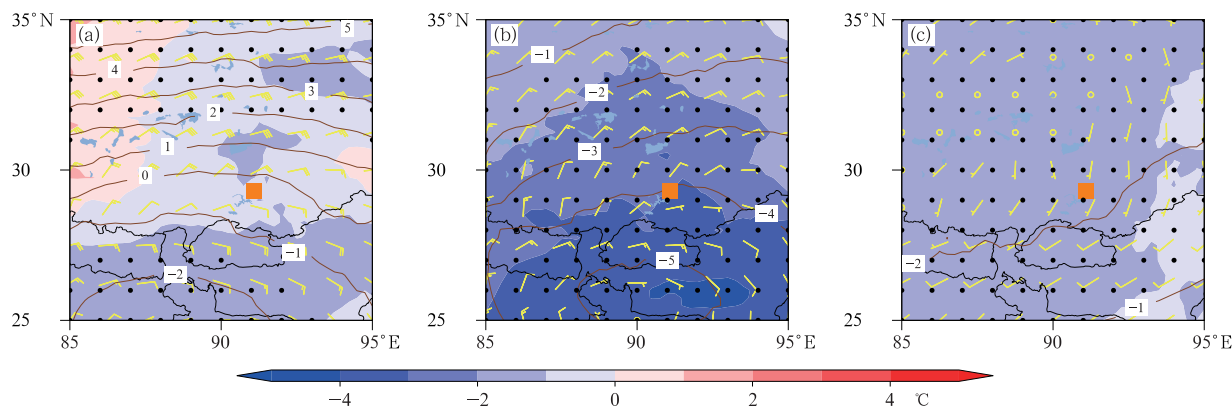
东北侧的弱偏北风距平和东南侧的弱偏南风距平有利于冷暖空气在机场附近交汇。

低压槽型的位势高度场和温度场距平整体为负距平(图 4b),负距平中心位于机场以南,幅度分别达到 -5 dagpm 和 -4℃,风场距平显示机场北侧存在较强的偏北风异常,反映出低压槽加深、冷空气活动强盛,为降雪过程提供关键的动力条件。西风平流型的位势高度场和温度场距平整体呈弱负距平分布(图 4c),表明低槽发展和冷空气活动受限,风场距平显示存在明显的偏南风异常,显示暖湿平流过程较强,增强了降雪所需的水汽供给。

2.3 动力场分析

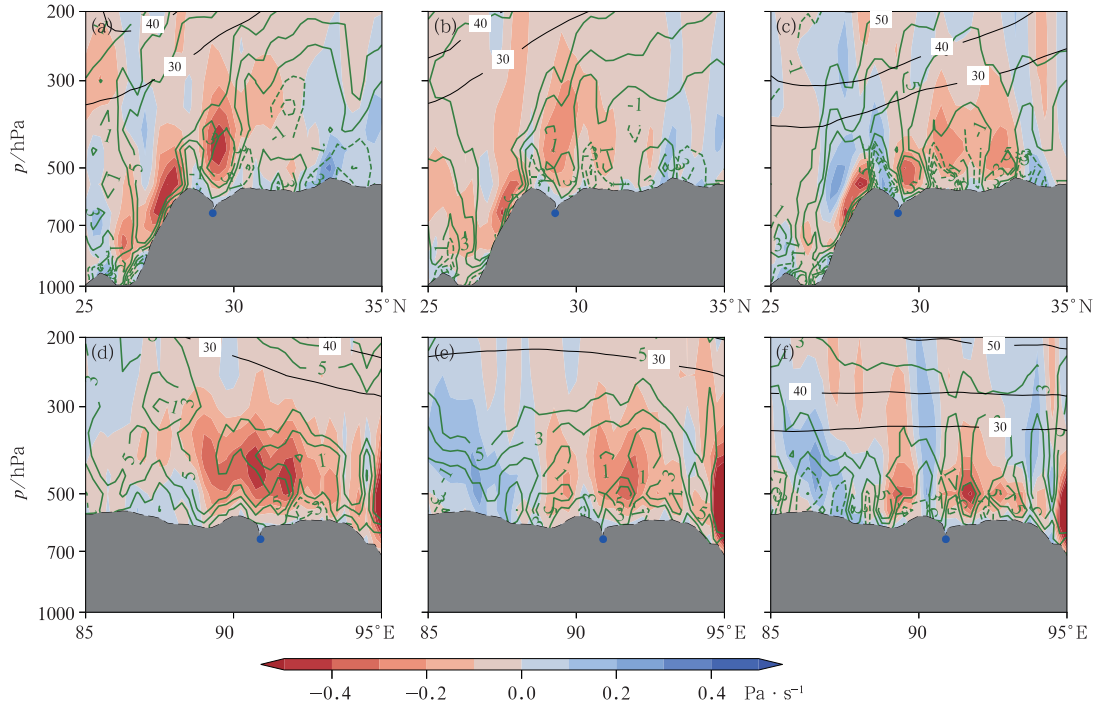
图 5 为 2013—2020 年拉萨机场降雪天气各分型涡度、垂直速度及高空风场的经向和纬向垂直剖面。气旋型的经向剖面(图 5a)显示,30°N 以北为大范围负涡度与下沉气流区,对应位势高度正距平区;30°N 以南为正涡度和上升气流区,对应位势高度负距平区(图 4a)。最大正涡度和上升气流位于机场上空,分别达到 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $-0.4 \text{ Pa} \cdot \text{ s}^{-1}$ 。气旋型的纬向剖面(图 5d)显示,88°E 以西出现大范围下沉气流,对应图 4a 中暖脊发展区域,其他区域均呈现正涡度和上升气流。急流轴位于 200 hPa 左右,机场位于急流轴的西北侧。

低压槽型的经向剖面(图 5b)显示,机场以南的正涡度和上升气流区范围较气旋型大,对应位势高



注:橙色方点为拉萨机场,黑色打点区域为通过 0.05 显著性水平检验。

图 4 2013—2020 年拉萨机场降雪天气(a)气旋型,(b)低压槽型,(c)西风平流型的 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)、温度场(填色)和风场(风羽)与冬半年气候平均的距平场
Fig. 4 Anomalies of 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), temperature (colored) and wind (barb) relative to the winter half-year climate mean for (a) cyclonic type, (b) low-pressure trough type and (c) westerly advection type of snowfall weather at Lhasa Airport during 2013—2020



注:灰色阴影为地形,蓝点为拉萨机场。

图 5 2013—2020 年拉萨机场降雪天气(a,d)气旋型,(b,e)低压槽型,(c,f)西风平流型的涡度(绿色等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})、垂直速度(填色)和水平风速(黑色等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的(a~c)经向和(d~f)纬向剖面

Fig. 5 (a—c) Meridional and (d—f) zonal profiles of vorticity (green contour, unit: 10^{-5} s^{-1}), vertical velocity (colored) and wind speed (black contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) for (a, d) cyclonic type, (b, e) low-pressure trough type and (c, f) westerly advection type of snowfall weather at Lhasa Airport during 2013—2020

度强负距平中心(图 4b),反映出低压槽强烈发展。但正涡度和上升气流的强度较气旋型弱,机场上空的值分别达到 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。低压槽型的纬向剖面(图 5e)呈现槽后下沉、槽前上升结构(以 88°E 为界),高空风场显示机场位于急流轴北侧。

西风平流型的涡度和垂直速度剖面(图 5c,5f)均表现为正负相间的分布特征,机场上空对应弱正涡度和弱上升运动。尽管抬升强度明显弱于气旋型和低压槽型,但仍为降雪天气提供必要的动力条件。高空急流覆盖范围最大、风速最强,机场位于急流轴西北侧,急流次级环流的发展及对流层中上层的抽吸作用增强高空辐散(图略),促进机场上空垂直运动的维持与加强。高空急流引发的降雪增强效应已被 Dai et al(2024)的研究证实。

2.4 热力场分析

图 6 示出 2013—2020 年拉萨机场降雪天气各

分型相当位温和温度平流的经向和纬向剖面。气旋型(图 6a,6d)的温度平流表现为机场以北和以西以冷平流为主,对应力场(图 5a,5d)中的负涡度和下沉气流区,其他区域为暖平流,对应正涡度和上升气流区。机场上空暖平流强度随高度增加而增大,有利于上升运动的发展。相当位温等值线较稀疏(地面约 318 K ,500 hPa 约 322 K),表明层结稳定度较弱。

低压槽型(图 6b,6e)的温度平流分布特征与气旋型类似,但冷平流的强度较气旋型强,对应更强的负温度距平(图 4b)。机场上空的温度平流表现为低层暖平流与高层(500~300 hPa)冷平流,造成层结稳定度减弱,促进上升气流发展。相当位温随高度增加的值较气旋型小(地面约 316 K ,500 hPa 约 318 K),层结稳定度较气旋型弱。

西风平流型(图 6c,6f)表现出整个区域受暖平流控制,机场地面至 500 hPa 的暖平流随高度增强,

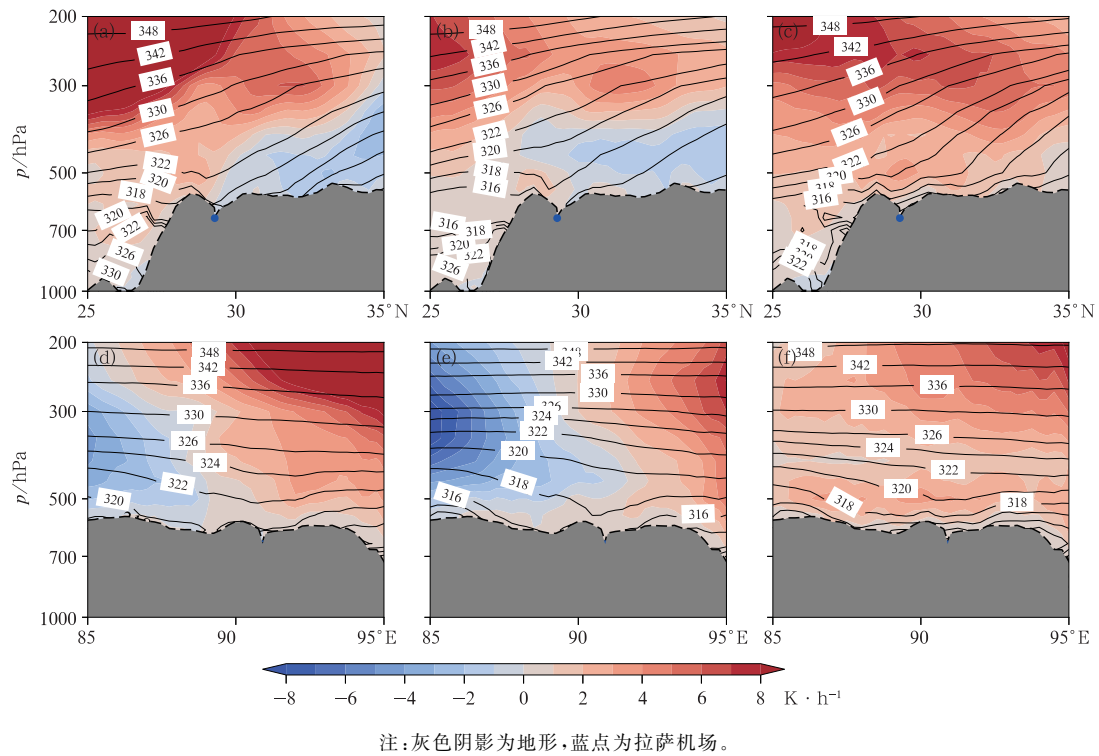


图 6 2013—2020 年拉萨机场降雪天气(a,d)气旋型,(b,e)低压槽型,(c,f)西风平流型相当位温(等值线,单位:K)和温度平流(填色)的(a~c)经向和(d~f)纬向剖面

Fig. 6 (a—c) Meridional and (d—f) zonal profiles of equivalent potential temperature (contour, unit: K) and temperature advection (colored) for (a, d) cyclonic type, (b, e) low-pressure trough type, and (c, f) westerly advection type of snowfall weather at Lhasa Airport during 2013—2020

有利于上升运动发展。机场上空相当位温等值线最密集(地面约 312 K,500 hPa 约 320 K),表明层结稳定度最强。

2.5 水汽场分析

图 7 为 2013—2020 年拉萨机场降雪天气各分

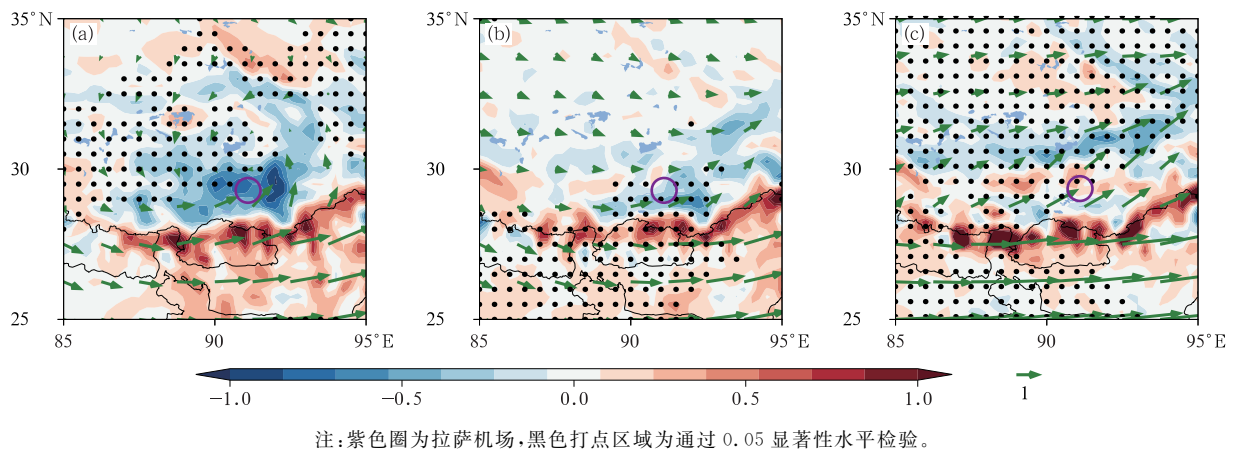


图 7 2013—2020 年拉萨机场降雪天气(a)气旋型,(b)低压槽型,(c)西风平流型 500 hPa 水汽通量(绿色箭头,单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)与水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)

Fig. 7 The 500 hPa water vapor flux (green vector, unit: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-7} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) for (a) cyclonic type, (b) low-pressure trough type and (c) westerly advection type of snowfall weather at Lhasa Airport during 2013—2020

型 500 hPa 水汽通量和水汽通量散度。气旋型(图 7a)的水汽通量场呈明显的气旋性环流分布,水汽主要从南侧输送至机场,在环流南侧形成最强水汽辐合区,水汽通量散度最大值达到 $-1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。低压槽型(图 7b)的水汽输送为自西向东,输送强度在三类分型中最弱,机场位于较弱的水汽辐合区,水汽通量散度最大约为 $-5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。西风平流型(图 7c)的水汽来源于西南侧输送,输送强度最强,机场附近的水汽通量散度为弱辐散。

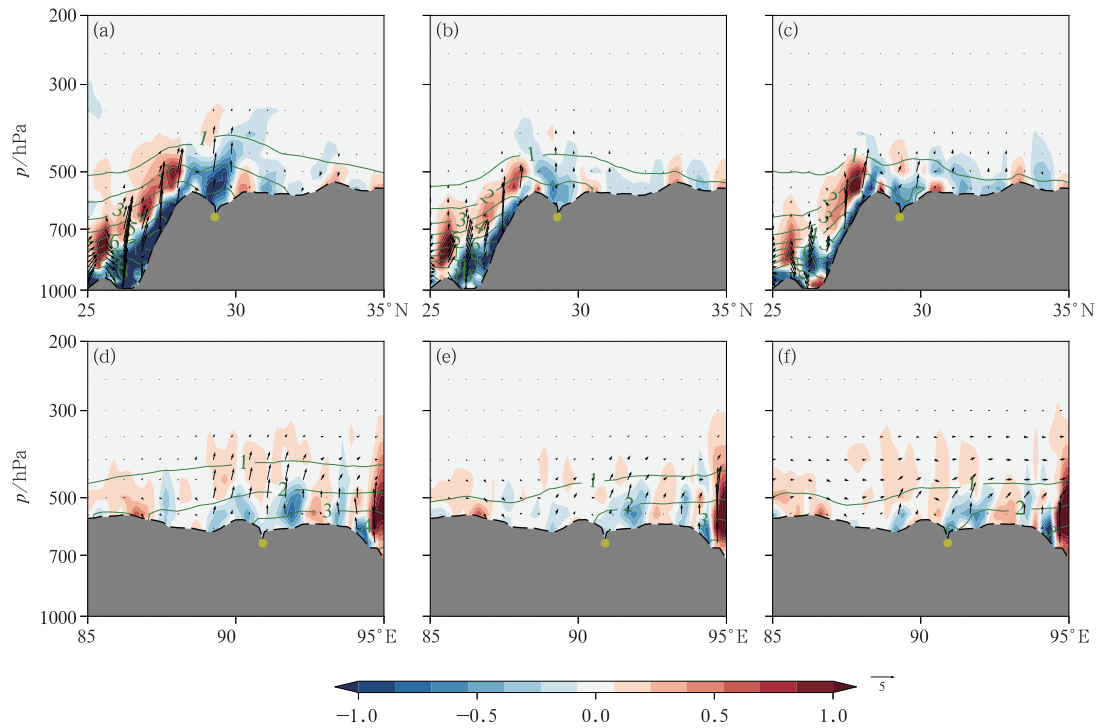
2013—2020 年拉萨机场降雪天气各分型水汽通量、水汽通量散度和比湿的经向和纬向剖面如图 8 所示。气旋型(图 8a,8d)的水汽向上通量和辐合程度最强、范围最大。西风平流型(图 8c,8f)则表现为 500 hPa 以下辐合、500 hPa 以上辐散的特征,这与高空急流的上层抽吸作用引起的低层辐合、高层辐散密切相关。比湿场显示,气旋型的机场地面

比湿($> 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)大于其他两类分型($> 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

3 讨论

3.1 各分型降雪的物理机制

本研究得出三类分型的降雪形成机制存在区别。气旋型受高原涡驱动,在强正涡度、深厚抬升、随高度增强的暖平流及强水汽辐合共同作用下触发强降雪;低压槽型受南支槽扰动,表现为正涡度与上升运动“广而弱”以及水汽供应有限的特征,多出现短时弱降雪;西风平流型受高空急流的抽吸作用,造成低层辐合与高层辐散,部分抵消稳定层结对上升运动的抑制效应,并在西南暖湿气流配合下产生降雪。



注:灰色阴影为地形,黄点为拉萨机场。

图 8 2013—2020 年拉萨机场降雪天气(a,d)气旋型,(b,e)低压槽型,(c,f)西风平流型水汽通量(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和比湿(绿色等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的(a~c)经向和(d~f)纬向剖面

Fig. 8 (a–c) Meridional and (d–f) zonal profiles of water vapor flux (vector, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and specific humidity (green contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) for (a, d) cyclonic type, (b, e) low-pressure trough type and (c, f) westerly advection type of snowfall weather at Lhasa Airport during 2013–2020

3.2 分型方法的局限

本研究以 500 hPa 位势高度场为分型依据,避免了高原地区海平面气压误差对分型结果的影响。但该方法存在不足:分型指标未包含急流、温度平流以及低层水汽通量等影响降雪的关键物理量,从而限制了对高层动力强迫、热力结构以及水汽输送等因子的表征。未来可构建融合多高度层和多物理量的综合分型指标体系,提升方法适用性与分型精度。

3.3 不确定型降雪案例的启示

4 次不确定型降雪(占比 7.1%)均出现在季节转换期(4 月 2 次,10 月 2 次),其环流形势复杂,平均降雪量(3.1 mm)仅次于气旋型。因此,在业务预报中,除关注典型环流类型和天气系统外,需特别重视季节转换期间局地热力因子与环流背景协同作用引发的降雪,以降低漏报风险。

3.4 极端降雪事件的启示

2 次极端降雪事件(大雪及以上)分别出现在低压槽型与西风平流型,而平均降雪量最大的气旋型则没有出现极端降雪事件。这可能是因为本文的样本量(56 次)有限,未涵盖气旋型中的极端案例,也可能是由于区域和局地降雪量的差异造成:气旋型可能造成区域性强降雪,但局地降雪量还与局部环流和地形等因素有关。极端降雪是大尺度系统伴随局地辐合和地形抬升等多尺度系统耦合作用的结果。后续研究可增加样本或考虑局地因素,提升对极端降雪事件的识别与预报能力。

4 结 论

本研究基于改进的 J-C 环流分型方法,对 2013—2020 年拉萨机场 56 次降雪过程进行分型,通过对物理量场的诊断分析,得出不同分型的环流特征与物理机制,主要结论如下:

(1)改进的 J-C 环流分型方法识别出拉萨机场 52 次(占比 92.9%)降雪天气形势,得出气旋型、低压槽型和西风平流型三类主要环流型,不确定型的比例(7.1%)较传统客观方法显著降低。

(2)三类分型的天气系统与物理场结构特征存在明显差异。气旋型对应高原涡系统表现为最强的正涡度和上升运动、整层水汽辐合、明显的暖平流发

展;低压槽型受南支槽影响,正涡度与上升运动范围广但强度弱,低层暖平流与高层冷平流叠加导致层结最不稳定;西风平流型受暖脊与强盛的高空急流控制,层结稳定度最强,水汽场表现为低层辐合、高层辐散。

(3)各分型的物理场结构与降雪关键指标存在关联。气旋型的动力抬升最强,水汽供应最足,平均降雪量最大(3.4 mm),持续时间最长(358 min);低压槽型的动力抬升和水汽供应较弱,平均降雪量最小(1.2 mm),持续时间最短(170 min);西风平流型的高空急流抽吸作用部分抵消了稳定层结对抬升运动的抑制,降雪量(1.8 mm)与持续时间(280 min)介于二者之间。

参考文献

- 包文,段安民,游庆龙,等,2024. 青藏高原气候变化及其对水资源影响的研究进展[J]. 气候变化研究进展,20(2):158-169. Bao W, Duan A M, You Q L, et al, 2024. Research progress on climate change and its impact on water resources over the Tibetan Plateau[J]. Adv Climate Change Res, 20(2): 158-169(in Chinese).
- 杜娟,于晓晶,黎小东,等,2024. 近 60 年三江源地区降水集中度和季节性降水特征变化分析[J]. 高原气象,43(4):826-840. Du J, Yu X J, Li X D, et al, 2024. Analysis of changes in precipitation concentration and seasonal precipitation characteristics in the Three River Headwaters Region over the past 60 years[J]. Plateau Meteor, 43(4): 826-840(in Chinese).
- 范波,旺杰,旦增,等,2007. 西藏林芝机场飞行气象条件分析[J]. 气象,33(9):59-63. Fan B, Wang J, Dan Z, et al, 2007. Flight weather conditions in Nyingchi Airport in Tibet[J]. Meteor Mon, 33(9): 59-63(in Chinese).
- 黄晓清,唐叔乙,次旺顿珠,2018. 气候变暖背景下青藏高原雪灾变化及其与大气环流的关系[J]. 高原气象,37(2):325-332. Huang X Q, Tang S Y, Ciwang D Z, 2018. Variation of the snow disasters under global warming and its relationship with general circulation over Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteor, 37(2): 325-332(in Chinese).
- 梁潇云,钱正安,李万元,2002. 青藏高原东部牧区雪灾的环流型及水汽场分析[J]. 高原气象,21(4):359-367. Liang X Y, Qian Z A, Li W Y, 2002. Analyses on circulation patterns and water vapor fields of snow disaster weather in eastern pasture areas of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 21(4): 359-367(in Chinese).
- 刘胜胜,周顺武,吴萍,等,2021. 青藏高原东部冬季降水对北极涛动异常的响应[J]. 气象学报,79(4):558-569. Liu S S, Zhou S W, Wu P, et al, 2021. Response of winter precipitation in eastern Tibetan Plateau to Arctic Oscillation[J]. Acta Meteor Sin, 79(4): 558-569(in Chinese).
- 罗布坚参,假拉,德庆,等,2019. 南支槽影响下青藏高原南部 3 次暴

- 雪天气特征分析[J]. 气象, 45(6):862-870. Luobu J C, Jia L, De Q, et al, 2019. Analysis of three snowstorms in southern Tibetan Plateau affected by southern branch trough[J]. Meteor Mon, 45(6):862-870(in Chinese).
- 马耀明, 王宾宾, 姚楠, 等, 2025. 青藏高原地-气相互作用过程及其天气、气候效应观测研究进展[J]. 气象学报, 83(4):887-903. Ma Y M, Wang B B, Yao N, et al, 2025. Progress in observational research on the land-atmosphere interaction and its weather and climate effects over the Qingzang Plateau[J]. Acta Meteor Sin, 83(4):887-903(in Chinese).
- 申红艳, 乔少博, 封国林, 等, 2024. 青藏高原冬季降雪特征及相关环流分析[J]. 高原气象, 43(4):841-854. Shen H Y, Qiao S B, Feng G L, et al, 2024. Snowfall characteristics in winter over Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its key circulation[J]. Plateau Meteor, 43(4):841-854(in Chinese).
- 索渺清, 丁一汇, 2014. 南支槽与孟加拉湾风暴结合对一次高原暴雪过程的影响[J]. 气象, 40(9):1033-1047. Suo M Q, Ding Y H, 2014. A case study on the effect of southern branch trough in the subtropical westerlies combined with storm over the bay of Bengal on plateau snowstorm[J]. Meteor Mon, 40(9):1033-1047(in Chinese).
- 薛建康, 1988. 冬半年青藏高原及其附近地区低涡的气候统计特征[J]. 高原气象, 7(3):279-281. Xue J K, 1988. The climatic statistical features of vortexes over Qinghai-Xizang Plateau and its neighborhood in winter half year[J]. Plateau Meteor, 7(3):279-281(in Chinese).
- 周川, 张序, 谭力, 等, 2015. 强降雪天气对飞行的影响分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 32(3):78-83, 91. Zhou C, Zhang X, Tan L, et al, 2015. The influence of heavy-snow weather on flight[J]. J Shenyang Aerosp Univ, 32(3):78-83, 91(in Chinese).
- 朱艳峰, 陈德亮, 李维京, 等, 2007. Lamb-Jenkinson 环流客观分型方法及其在中国的应用[J]. 南京气象学院学报, 30(3):289-297. Zhu Y F, Chen D L, Li W J, et al, 2007. Lamb-Jenkinson circulation type classification system and its application in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 30(3):289-297(in Chinese).
- Dai Y F, Wang T, Sheng Y W, et al, 2024. Westerly-triggered lake-effect snowfall enhanced with climate warming over the Tibetan Plateau[J]. Sci Bull, 69(7):968-977.
- Deng H, Pepin N C, Chen Y, 2017. Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau[J]. J Geophys Res Atmos, 122(14):7323-7341.
- Fernández-Granja J A, Bedia J, Casanueva A, et al, 2024. The signature of the main modes of climatic variability as revealed by the Jenkinson-Collison classification over Europe[J]. Int J Climatol, 44(11):4076-4088.
- Fernández-Granja J A, Brands S, Bedia J, et al, 2023. Exploring the limits of the Jenkinson-Collison weather types classification scheme: a global assessment based on various reanalyses[J]. Climate Dyn, 61(3-4):1829-1845.
- Huth R, Beck C, Philipp A, et al, 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications[J]. Ann N Y Acad Sci, 1146:105-152.
- Jenkinson A, Collison F, 1977. An initial climatology of gales over the North Sea[R]. London: Meteorological Office: 18.
- Jones P D, Hulme M, Briffa K R, 1993. A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme[J]. Int J Climatol, 13(6):655-663.
- Jones P D, Osborn T J, Harpham C, et al, 2014. The development of Lamb weather types: from subjective analysis of weather charts to objective approaches using reanalyses[J]. Weather, 69(5):128-132.
- Kysely J, Huth R, 2006. Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods[J]. Theor Appl Climatol, 85(1-2):19-36.
- Li C Y, Hao J S, Zhang G T, et al, 2024. Extreme snowfall variations in the southeastern Tibetan Plateau under warming climate[J]. Atmos Res, 311:107690.
- Osipova O P, Osipov E Y, 2022. Objective classification of weather types for the eastern Siberia over the 1970—2020 period using the Jenkinson and Collison method[J]. Atmos Res, 277:106291.
- Philipp A, Bartholy J, Beck C, et al, 2010. Cost733cat—a database of weather and circulation type classifications[J]. Phys Chem Earth Parts A/B/C, 35(9-12):360-373.
- Spellman G, 2017. An assessment of the Jenkinson and Collison synoptic classification to a continental mid-latitude location[J]. Theor Appl Climatol, 128(3-4):731-744.
- Sun F, Chen Y N, Li Y P, et al, 2024. Decreasing trends of mean and extreme snowfall in High Mountain Asia[J]. Sci Total Environ, 921:171211.
- Wang N, Zhu L, Yang H R, et al, 2017. Classification of synoptic circulation patterns for fog in the Urumqi Airport [J]. Atmos Climate Sci, 7(3):352-366.
- Wu G, Duan A, Liu Y, et al, 2015. Tibetan Plateau climate dynamics: recent research progress and outlook[J]. Nat Sci Rev, 2(1):100-116.

(本文责编:侯翠梅)