田华,宋建洋,郜婧婧,等.2024. 2024年初两次雨雪冰冻天气过程对公路通行影响的对比分析[J].暴雨灾害,43(4):490–498. TIAN Hua, SONG Jianyang, GAO Jingjing, et al. 2024. Comparative analysis of two rainfall/snowfall and freezing weather events impact on the highway in early 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):490–498 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–071

2024年初两次雨雪冰冻天气过程对公路通行影响的对比分析

田华[1],宋建洋[1],郜婧婧[1],赵鲁强[1],李坤玉[2],闫明月[3]
(1. 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081;2. 国家气象中心,北京 100081;
3. 交通运输部路网监测与应急处置中心,北京 100029)

摘　要:2024年1月31日—2月5日、2月18—25日我国先后出现两次大范围雨雪冰冻天气过程(分别简称“0131”过程和“0218”过程),两次过程具有相态复杂、雨雪量大、影响范围广、持续时间长等特点。利用全国2 430个国家气象站观测数据以及交通流量和公路阻断信息,对比分析了两次雨雪冰冻天气过程对公路通行的影响;同时,选取降雪量、冻雨、积雪深度、地面温度、地面结冰作为影响公路通行的气象指标,构建冰雪天气指数,探讨冰雪天气强度与公路通行影响的关系。结果表明:两次过程发生于春节前后人口流动高峰期,“0218”过程影响范围更广,造成交通流量的降低幅度总体高于“0131”过程;两次过程中陕西、山西、河南、湖北、湖南以及贵州6省公路通行受积雪或结冰影响严重,路段封闭段次多,但影响程度存在地区差异,其中山西、河南、湖北、湖南“0131”过程影响更重,陕西、贵州“0218”过程影响更重;两次过程中冰雪天气指数强度与公路阻断影响度的变化趋势一致,与交通流量变化率呈反比,反映出冰雪天气指数对于冰雪天气下的公路交通影响研判具有良好指示意义。

关键词:雨雪冰冻天气;交通流量;路段封闭;天气指数;公路阻断信息
中图法分类号:P429　　**文献标志码:**A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024–071

Comparative analysis of two rainfall/snowfall and freezing weather events impact on the highway in early 2024

TIAN Hua[1], SONG Jianyang[1], GAO Jingjing[1], ZHAO Luqiang[1], LI Kunyu[2], YAN Minyue[3]

(1. *Public Meteorological Service Center of CMA, Beijing* 100081; 2.*National Meteorological Center, Beijing* 100081; 3. *Highway Network Monitoring and Emergency Response Center of the Ministry of Transport, Beijing* 100029)

Abstract: In early 2024, from January 31 to February 5 and from February 18 to 25, two widespread rainfall/snowfall and freezing events weather occurred in China, hereinafter referred to as the "0131" and "0218" events. The two events were characterized by complex precipitation phases, large amounts of rainfall and snowfall, a wide range of influence, and long duration. Utilizing the observation data from 2 430 national weather stations, as well as the traffic volume and highway block information, the impact characteristics of the two rainfall/snowfall and freezing weather events on highway traffic were compared and analyzed. In addition, the snowfall, freezing rain, snow depth, surface ground temperature, and surface ground ice were selected as the elemental indexes affecting highway traffic. Then an ice and snow weather index was constructed to explore the relationship between the intensity of ice and snow weather and the impact on highway traffic. The results indicate that the two weather events occurred during the peak periods of people traveling to their hometowns before the Spring Festival and returning after the festival. The "0218" event had a wider impact range, resulting in a higher overall reduction in traffic flow compared to the "0131" event. During the two events, the highway traffic in Shaanxi, Shanxi, Henan, Hubei, Hunan, and Guizhou was severely affected by snow accumulation or ice, with many road section closures. However, there were regional differences in the degree of impact. Specifically, the "0131" event had a stronger impact on Shanxi, Henan, Hubei, and Hunan. While the "0218" event had a more significant impact on Shaanxi and Guizhou. During the two events, the intensity of the ice and snow weather index was consistent with the trend of impact degree of road blockage, and inversely proportional to the rate of change in traffic volume, indicating that the ice and snow weather index has a good guiding

收稿日期: 2024–04–20;**定稿日期:**2024–07–15
资助项目: 中国气象局能力提升联合研究专项(NLTSZ009)
第一作者: 田华,主要从事交通气象预报技术与方法研究。E–mail: tianh1@cma.cn
通信作者: 宋建洋,主要从事交通气象预报技术与方法研究。E–mail: songjy227@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

significance for the assessment of the impact of rain and snow freezing weather on highway traffic.

Key words: rainfall/snowfall and freezing weather; traffic volume; highway section closure; weather index; road blockage information

引 言

雨、雪、冰冻等不利天气严重影响道路交通和运输安全，不仅会降低交通通行效率，造成交通拥堵或阻断，还会增加交通事故风险。Hassan 和 Barker (1999)发现不利天气条件下交通流量平均减少5%，路面有积雪时减少幅度可达10%~15%。吴彦等(2013)利用沿天山高速公路恶劣天气交通管制信息分析指出，高速公路冰雪灾害的危害程度依次是道路结冰、风吹雪、强降雪。Qiu 和 Nixon (2008)通过荟萃分析(Meta-analysis) 研究1967—2005年34个降水事件影响发现，雨天和雪天交通事故率平均增加71%和84%。Becker等(2022)评估了降水情况下不同碰撞类型增加的相对风险，发现雪天对卡车的单车碰撞事故影响最大，弯道和下坡路段相对事故风险最大。宁贵财等(2016)研究了我国2005—2014年雨、雪、雾、沙尘、大风和冰雹等不利天气条件与交通事故的关系，发现雨雪天气造成事故起数、经济损失及伤亡人数位居前二位。王洁等(2020)分析了河北省交通事故天气条件，发现雪天事故总量较雨天、雾天少，但事故等级高，影响恶劣。以上研究表明，雪天或冰冻天气在抑制出行程度和增加交通事故风险方面的影响极为显著。

研究不利天气对公路交通的影响规律，对于保障公路交通通行安全和高效运行具有重要意义。近来年，学者们针对雨雪冰冻天气对公路交通的影响开展了一系列研究。汤筠筠和杨涛(2008)分析总结了2008年雨雪冰冻天气下公路交通滞留、拥堵成因和受灾特点，并指出凝冻造成路面严重结冰、受灾位置处于交通运输主通道、发生时正值春运高峰期是造成大量人员和车辆滞留的原因。李兰等(2011)利用2008年初持续低温雨雪冰冻期间武汉城市公共交通线路逐日停运数据定义持续低温雨雪冰冻天气过程的城市公共交通影响度，并选择积雪深度、日平均气温等关键气象因子建立了气象评估模型。刘明明等(2011)利用主成分分析方法研究得出温度、湿度、降雪量和积雪日数是山区公路雪灾的主要因子，然后通过构建山区公路冰雪灾害强度模型，评估了重庆城口地区2008年冰雪灾害危险性等级。刘勇洪等(2013)依据灾害学原理构建冰雪灾害对北京城市公路交通运行的预警评估模型和评判标准，以此评估了北京历史上38次冰雪灾害事件的影响程度。以上雨雪冰冻天气对公路交通的影响分析多以定量统计为主，在结合交通流量和公路阻断信息等行业资料开展定量化研究方面尚存在不足，且研究选用的气象影响因子主要以气温、降雪量、积雪深度为主，未考虑冻雨、地面温度等对公路通行的影响。而结合交通流量和公路阻断信息等行业资料，综合考虑冻雨、地面温度等气象因子对公路通行的影响开展研究，可以加深认识雨雪冰冻天气对公路通行的影响规律，从而更好地为公路交通气象预报提供服务。

2024年1月31日—2月5日、2月18—25日我国先后出现两次大范围雨雪冰冻天气过程(分别简称“0131”过程和“0218”过程)，造成湖北、湖南、江苏、安徽等20省(区、市) 636万人次不同程度受灾，农作物受灾面积6.7×10^5 hm^2，直接经济损失197.5亿元。同时，两次过程与春运叠加，对公路保畅、电力保供、群众出行和生产生活带来严重影响，是2009年以来春运期间最严重的低温雨雪冰冻灾害(中华人民共和国应急管理部，2024；张芳华等，2024)。为此，本文首先分析了这两次雨雪冰冻天气过程的特点；在此基础上，应用交通流量和公路阻断信息，对比分析了两次过程对公路通行的影响特征；最后选取降雪量、冻雨、积雪深度、地面温度和地面结冰作为影响公路通行的气象指标，构建冰雪天气指数，探讨冰雪天气强度与公路通行影响的变化关系，以期为今后此类天气的公路交通预报服务提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用资料包括：(1) 两次过程期间欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代大气再分析资料 (ERA5)每日08时(北京时，下同) 500 hPa位势高度和850 hPa风场资料，空间分辨率为0.25°×0.25°，用于雨雪冰冻天气过程的高空形势分析。(2) 2024年1—2月全国2 430个国家气象站地面温度、气温、降水量、积雪深度、冻雨日值观测资料，来源于国家气象信息中心，用于两次过程积雪深度、冻雨等对比分析和冰雪天气指数计算，其中降水量、积雪深度日统计时段为08—08时。(3) 2024年1—2月各省公路(包括高速公路、国道和省道，下同)的日交通流量，来源于全国智慧路网监测平台，该资料基于互联网导航和全国重载货运等移动位置信息，通过路段推测、道路匹配等算法计算得到(薛明等，2006)，用于交通流量变化特征分析。(4) 两次过程期间每日07时和17时公路阻断信息，来源于

交通运输部路网监测与应急处置中心，记录了公路编号、公路名称、封闭位置，收费站关闭个数等，用于公路阻断影响分析，其中日公路阻断信息统计时段为07—07时。

1.2 有关定义及冰雪天气指数的构建

为探讨冰雪天气强度与公路通行影响的变化关系，分别定义了交通流量变化率、公路阻断影响度，并构建了冰雪天气指数。

1.2.1 交通流量变化率的定义

借鉴杨珍珍(2023)定义的交通流量数据分类和边界阈值确定方法，构建雨雪冰冻天气过程下的交通流量变化率，其主要由恶劣天气下交通流量和正常情况下交通流量表征，公式如下

$$C_{\mathrm{ADT}}=\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}W_{\mathrm{ADT}}(i)}{n}-\frac{\sum_{j=1}^{m}N_{\mathrm{ADT}}(j)}{m}\right)\Big/\left(\frac{\sum_{j=1}^{m}N_{\mathrm{ADT}}(j)}{m}\right) \quad (1)$$

其中，C_{ADT} 表示某省某过程交通流量变化率，$W_{\mathrm{ADT}}(i)$表示某省过程影响期间第 i 天的省内公路累计日交通流量，n 为过程影响日数，$N_{\mathrm{ADT}}(j)$为某省正常天气期间第 j 天的省内公路累计日交通流量，m 为正常天气日数。选取1月27—29日作为正常日，主要考虑该时段同样处于春运、非节假日期间，且全国大部地区未受到恶劣天气影响。$C_{\mathrm{ADT}}>0$，表示交通流量比正常日增加，$C_{\mathrm{ADT}}<0$，表示交通流量比正常日降低。

1.2.2 公路阻断影响度的定义

参见李兰等(2011)定义的持续低温雨雪冰冻天气过程的城市公共交通影响度，定义公路阻断影响度，其主要由公路路段封闭段次数和公路收费站关闭次数表征，公式如下

$$D=B/\max(B_{i,i=1,n})+C/\max(C_{i,i=1,n}) \quad (2)$$

其中，D 表示某省某日的公路阻断影响度，B 为某省某日的公路路段封闭段次数，$\max(B_{i,i=1,n})$ 为过程日最大封闭段次数，C_i 为某省某日公路收费站关闭次数，$\max(C_{i,i=1,n})$ 为过程日最大关闭次数，n 为两次雨雪冰冻天气过程总日数。

1.2.3 冰雪天气指数的构建

参考标准(GB/T 31443–2015)《冰雪天气公路通行条件预警指标》，选取降雪量、冻雨、积雪深度、地面温度、地面结冰作为影响公路通行的气象指标(表1)，考虑指标强度和影响范围，构建冰雪天气指数，公式如下

$$I_{\mathrm{snow}}=\left(\sum_{i=1}^{3}a_iA_i+b_1B_1+\sum_{i=1}^{3}c_iC_i+\sum\nolimits_{i=1}^{3}d_iD_i+e_1E_1\right)/N \quad (3)$$

其中，I_{snow} 表示某省当日冰雪天气指数，指数越大，表示冰雪强度越强，其中 i 为降雪量、积雪深度、地面温度的分级，a_i、b_1、c_i、d_i、e_1 分别为降雪量、冻雨、积雪深度、地面温度和结冰的指标权重，指标权重采用层次分析法计算得出。A_i 为不同降雪量等级站点数，B_1 为冻雨站点数，C_i 为不同积雪深度等级站点数，D_i 为不同地面温度等级站点数，E_1 为结冰站点数，N 表示总站点数。此外，A_i/N 表示不同降雪量等级的影响范围，其他指标影响范围同上。

表1 影响公路通行的气象指标分级

Table 1 Rating of meteorological indicators affecting highway traffic

气象指标	指标等级		指标权重
	级别	取值范围或条件	
降雪量	大雪及以上	⩾ 5.0 mm	0.05
	中雪	2.5 ~ 4.9 mm	0.03
	小雪或雨夹雪	0.1 ~ 2.4 mm	0.02
冻雨	有冻雨	/	0.30
	无冻雨	/	0.00
积雪深度	特重级积雪	⩾ 5.0 cm	0.10
	重级积雪	3.0 ~ 4.9 cm	0.07
	中级积雪	1.0 ~ 2.9 cm	0.03
地面温度	地面最低温度很低	⩽ −2℃	0.04
	地面最低温度低	−2 ~ 0℃	0.04
	地面最低温度较低	0 ~ 2℃	0.02
地面结冰	有地面结冰	地面最低温度⩽ 0℃且有降水且观测有结冰	0.30
	无地面结冰	地面最低温度> 0℃或无降水或观测无结冰	0.00

注：“/”表示无取值。

2 两次雨雪冰冻天气过程概况

图1为两次过程开始日和结束日08时的500 hPa位势高度场和850 hPa风场叠加图，可见两次过程均是由冷暖空气共同作用引起；期间高层副热带高压(以下简称副高)系统均比较强盛，588 dagpm线位于华南沿海一带，副高中心区域位势高度出现较大范围的592 dagpm闭合线，850 hPa也均出现明显的西南低空急流，有利于低层孟加拉湾、中南半岛、南海一带暖湿气流北上输送。“0218”过程的冷暖空气活动较“0131”过程强。“0131”过程以南支槽东移为主，暖湿气流仅北上至长江中下游及黄淮、江淮、江汉平原一带，在此与中纬度冷槽带动下的冷空气交汇并维持，暖湿空气缓慢爬升到冷空气上方，导致河南南部、苏皖北部、湖北、湖南北部、贵州等地出现雨夹雪、雨转雪、雪、冻雨等降水相态反复变化；陕西中部、山西南部、河南东部、湖北中部、安徽北部、江苏北部等地最大积雪深度达15 ~ 25 cm (图2a)。而“0218”过程暖湿气流北上至

华北、东北地区，与较强冷空气相遇后，在华北北部、东北地区产生降雪。19—20日冷空气主力在中纬度冷槽的带动下东移南下，迫使暖湿空气南退，天气区明显分为两部分，一部分在安徽、江苏地区，另一部分维持在湖北东部、湖南、贵州等地。21—24日冷空气由安徽北部、湖北东部、湖南北部等地逐步南压，25日南压至江南南部。期间黄淮至江南北部均出现雨转雪或雨夹雪或冻雨的复杂降水相态转换，且多地伴有强对流天气。虽然“0218”过程影响范围广，冷暖空气强度大，但积雪程度总体低于“0131”过程，最大积雪深度有10～15 cm，出现在河北中部、山西中部、河南中部、安徽北部等地(图2b)。

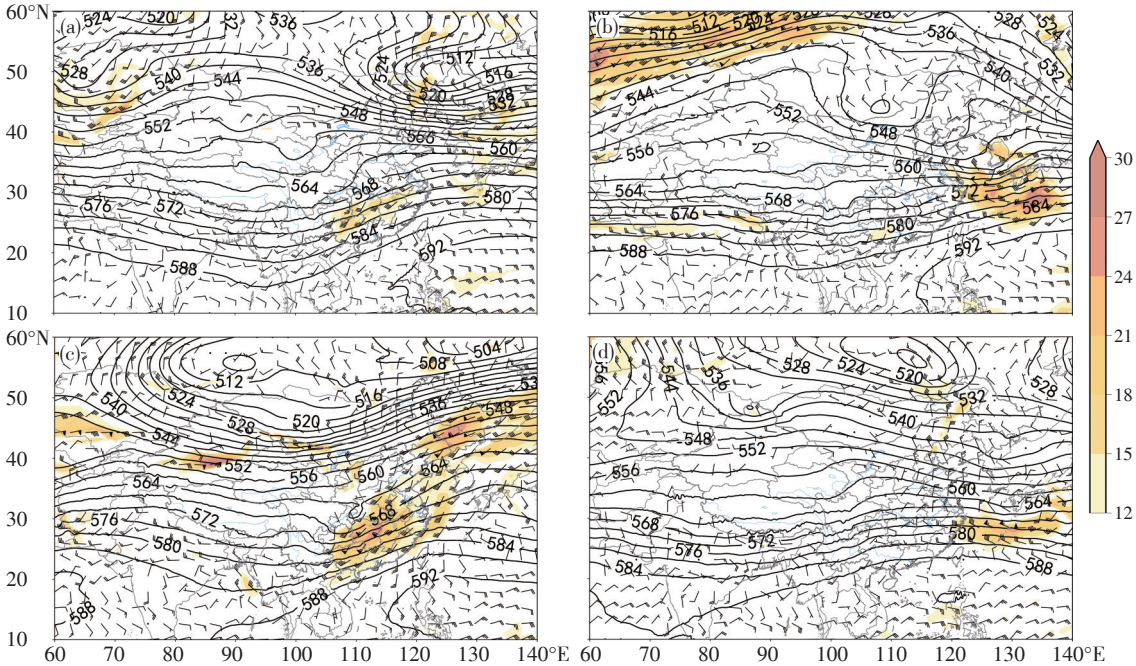


图1　2024年1月31日08时(a)、2月5日08时(b)、2月18日08时(c)和2月25日08时(d) 500 hPa位势高度场(等值线，单位：dagpm)、850 hPa风场(风羽)与低空急流(阴影，单位：m·s^{-1})

Fig. 1 500 hPa height field (contour, unit: dagpm), 850 hPa wind field (barb) and low-level jet stream (shaded, unit: m·s^{-1}) at 08:00 BT on (a) 31 January, (b) 5 February, (c) 18 February, and (d) 25 February, 2014

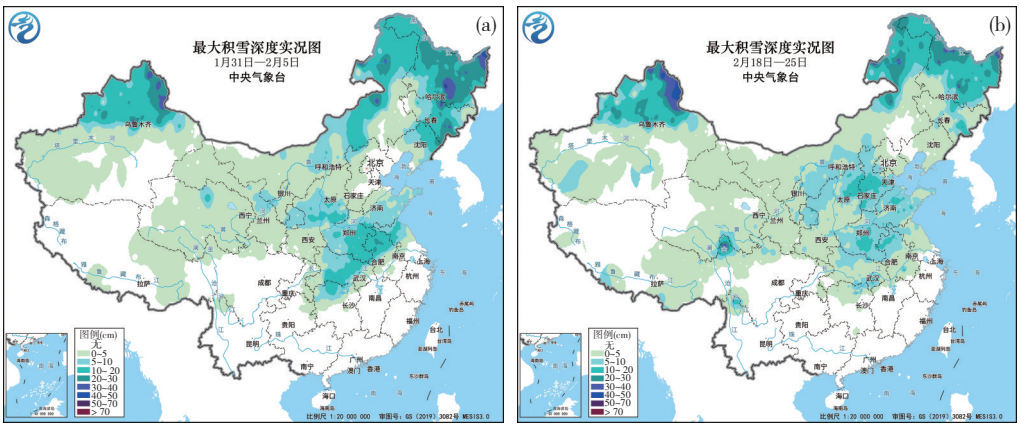


图2 “0131”过程(a)和“0218”过程(b)最大积雪深度实况图

Fig. 2 Spatial distribution of maximum snow depth during (a) the “0131” event and (b) the “0218” event

针对两次雨雪冰冻天气过程影响的华北、华东、华中、华南、西南以及西北地区东部(以下简称“中东部地区”)，对比两次过程冻雨和降雪情况(图3)可见，两次过程均具有相态复杂、雨雪量大、影响范围广、持续时间长等特点，其中冻雨持续时间及最大降雪量相当，但“0131”过程的最大积雪深度更深，“0218”过程的冻雨影响范围更广。

3 两次雨雪冰冻天气过程对公路交通的影响分析

3.1 对交通流量的影响

从两次过程交通流量变化率(图4)空间分布来看，雨雪冰冻天气均造成公路服务水平降低。其中，“0131”过程对山西、河南、陕西的公路通行影响最严重，交通流量降低率为41%～62%；“0218”过程对山

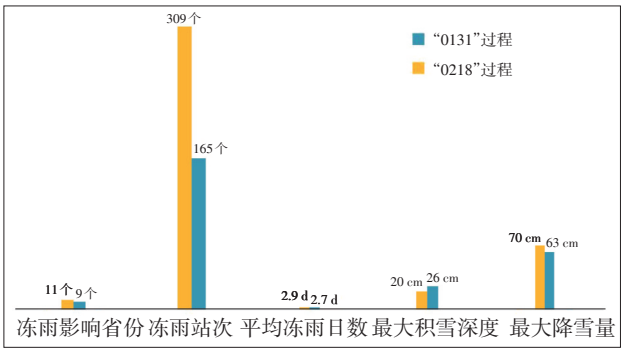


图3 “0131”过程和“0218”过程中东部地区冻雨和降雪情况

Fig. 3 Freezing rain and snowfall in central and eastern China during the “0131” event and the “0218” event

西、湖北、河南的公路通行影响最严重，交通流量降低率为40%～49%。对比来看，“0218”过程对公路交通影响范围更广，除山西、河南、陕西外，中东部大部份省份的交通流量降低率高于“0131”过程。

3.2 对公路阻断的影响

两次过程均导致10余省(市)境内多条公路因降雪或道路结冰发生路段封闭。其中，“0218”过程影响涉及18余省(市)，较“0131”过程影响范围大(图5a)。两次过程对陕西、山西、河南、湖北、湖南以及贵州6省公路通行影响严重，6省境内均涉及20余条公路，累计发生路段封闭100余段次(图5b)。

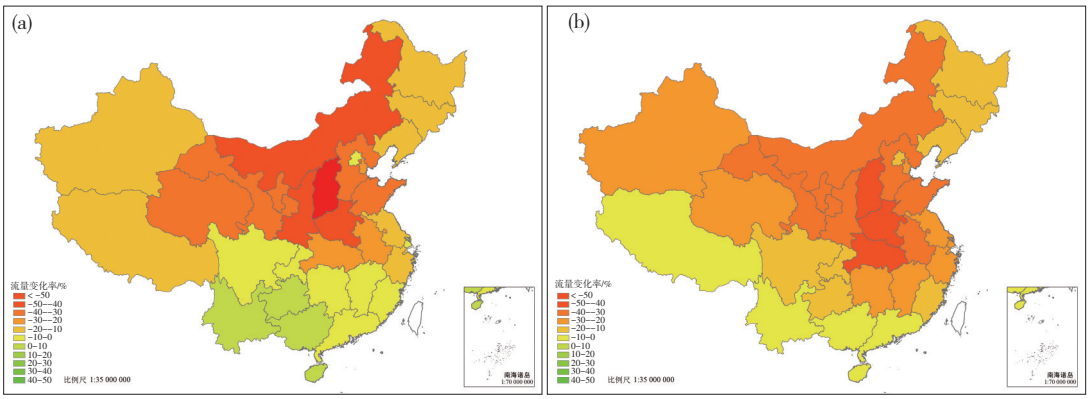


图4 “0131”过程(a)和“0218”过程(b)交通流量变化率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of traffic volume change rate during (a) the “0131” event and (b) the “0218” event

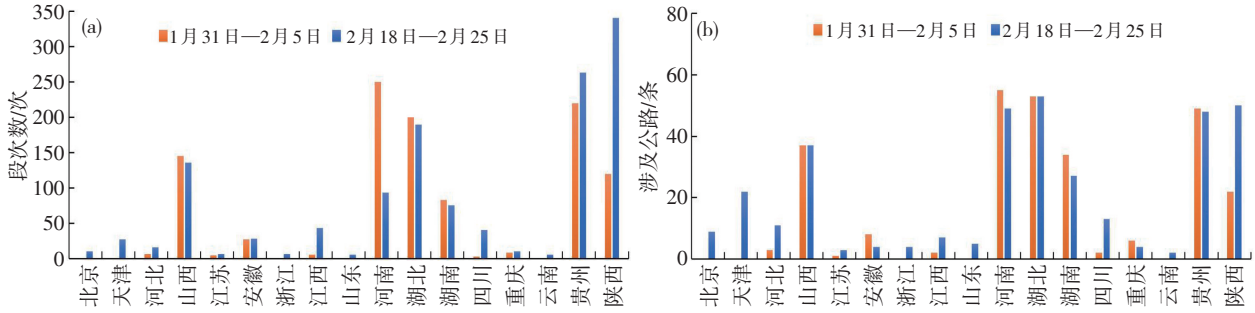


图5 “0131”过程和“0218”过程不同省(市)公路路段封闭段次数(a)和涉及公路数(b)

Fig. 5 Number of (a) closed road sections and (b) involved highways in various provinces (cities) during the “0131” event and the “0218” event

综合交通流量和公路阻断信息，以下重点针对上述6个公路通行影响严重省份的公路阻断影响度、高速公路交通流量逐日变化以及冰雪天气强度与公路通行影响的关系特点进行分析。两次过程中，6省的公路阻断影响度具有一定差异(图6)。“0131”过程较“0218”过程对河南的交通影响明显严重，具有时间长、程度大的特点，连续5 d公路阻断影响度大于1.0；“0218”过程对河南的交通影响仅在21日的公路阻断影响度大于1.0，具有时间短、程度大的特点。此外，“0131”过程中山西、湖北、湖南公路阻断影响度大于1.0的连续日数在2~3 d左右，明显高于“0218”过程。两次过程对陕西、贵州的交通影响也具有时间长的特点，但“0218”过程中陕西、贵州公路阻断影响度大于1.0的连续日数均较“0131”过程明显增多，影响更为严重。

从2024年1—2月高速公路交通流量逐日变化(图7)可见，陕西、河南、湖北、湖南、贵州的高速公路日交通流量总体高于山西。春运(1月26日)开始后，各省日交通流量均呈现明显增加，而后出现3次阶段性降低。第一次(1月31日开始)和第三次(2月18日开始)受雨雪冰冻天气影响，日交通流量急剧下降并至过程结束后才开始缓慢回升；第二次(2月9—10日)，受春节假日出行影响，日交通流量出现短暂回落后，又迅猛增加。总体来看，两次过程分别发生在春运期间节前出程和节后返程交通流量迅猛增加的高峰时段，受其影响，车行缓慢或滞留，其中“0218”过程影响的交通流量下降幅度明显高于“0131”过程，日最

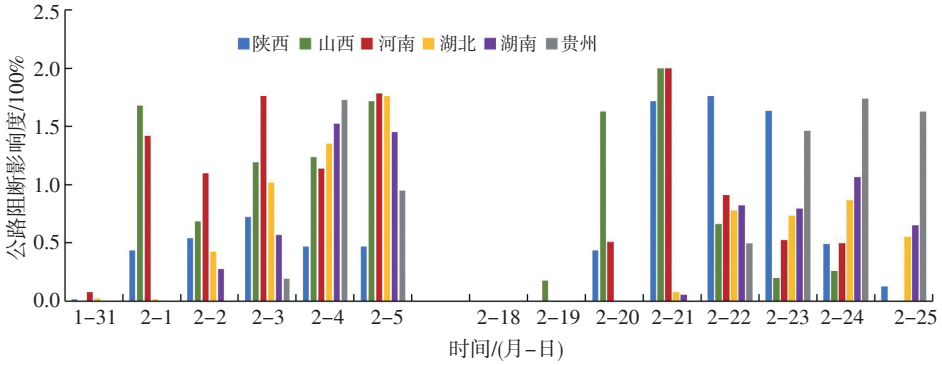


图6 “0131”过程和“0218”过程6个公路通行影响严重省份的公路阻断影响度逐日变化

Fig. 6 Daily variation of the impact degree of road blockage in six provinces with severe road traffic impact during the “0131” event and the “0218” event

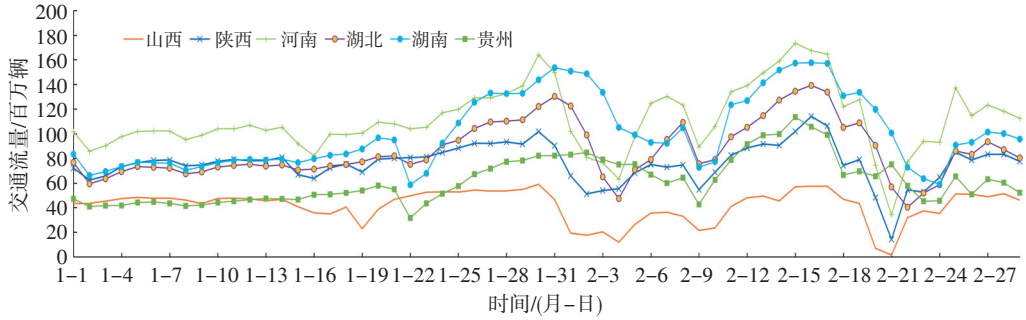


图7 2024年1—2月6个公路通行影响严重省份的高速公路交通流量逐日变化

Fig. 7 Daily variation of traffic volume on expressways in six provinces with severe road traffic impact from January to February 2024

低交通流量低于1月正常水平，公路通行受到严重影响。

统计6省高速公路的道路封闭情况(表略)发现，两次过程对南北走向的高速公路影响显著。比如，“0131”过程中途径陕西、山西、河南、湖南、湖北等地境内的京昆(G5)、二广(G55)、呼北(G59)、银百(G69)，以及“0218”过程中途径山西、陕西、四川、贵州等地境内的京昆(G5)、包茂(G65)、银百(G69)等高速公路均多日发生路段封闭，封闭路段多为位于高海拔的山区路段或临近湖泊、水体等桥梁占比较多的路段。

3.3 冰雪天气强度与公路通行影响的关系

从两次过程平均冰雪天气指数的空间分布(图8)来看，冰雪天气强度较强的省份主要集中在中东部地区。两次过程强度对比来看，河南“0131”过程强度明显偏强，贵州、湖南则“0218”过程偏强；陕西、山西和湖北两次过程强度相当。

从两次过程期间冰雪天气指数、公路阻断影响度、气象指标占比和交通流量下降变化率的逐日变化(图9)来看，冰雪天气指数与公路阻断影响度呈现一致的变化趋势，即冰雪天气强度越强，对公路通行的影响程度越严重；交通流量变化率与冰雪天气指数、公路阻断影响度呈反比，即冰雪天气强度增大，交通流量下降变化率幅度越大，说明冰雪天气指数对于研判冰雪天气对公路交通的影响具有较好的指示作用。具体来看，“0131”过程中陕西、山西、河南、贵州逐日冰雪天气指数变化幅度小，交通流量下降变化率幅度也较平缓；而湖北、湖南逐日冰雪天气指数变化幅度

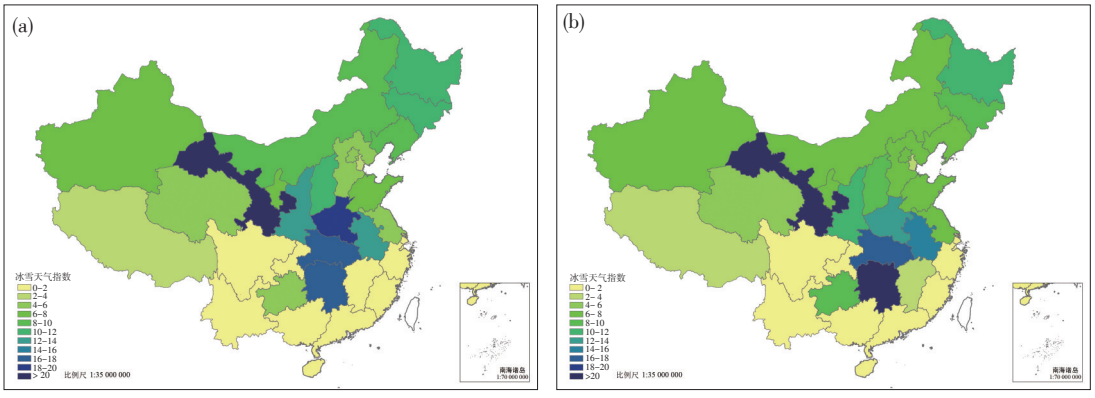


图8 “0131”过程(a)和“0218”过程(b)平均冰雪天气指数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the average ice–snow index in (a) the “0131” event and (b) the “0218” event

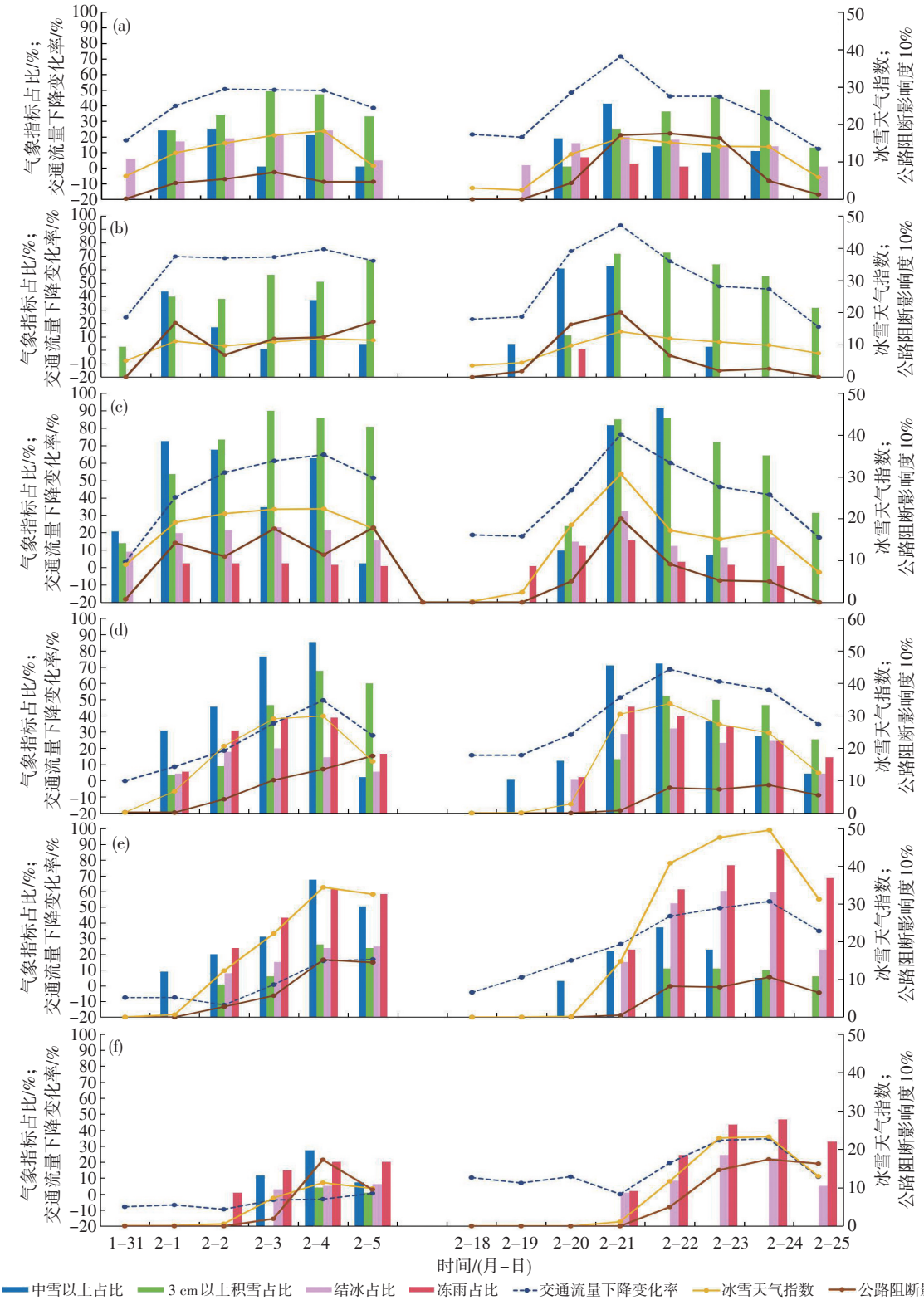


图9 “0131”过程和“0218”过程陕西(a)、山西(b)、河南(c)、湖北(d)、湖南(e)、贵州(f)冰雪天气指数、公路阻断影响度、气象指标占比和交通流量下降变化率逐日变化

Fig. 9 Daily variation of ice and snow weather index, the impact degree of road blockage, station proportion of meteorological indicators, and traffic volume decrease rate in (a) Shaanxi, (b) Shanxi, (c) Henan, (d) Hubei, (e) Hunan, and (f) Guizhou during the “0131” event and the “0218” event

大，交通流量下降变化率幅度也较大。“0218”过程中上述6省交通流量变化率幅度大，均呈现急剧下降和快速回涨的特点。

雨雪相态变化、降雪量、积雪深度、地面温度以及降雪性质是造成冰雪天气强度与公路通行影响差异的主要原因。对比两次过程期间各省冰雪天气指数与气象指标占比和交通流量下降变化率、公路阻断影响度变化(图9)可知，陕西、河南对公路通行影响的主

要因素为降雪结冰和积雪，山西主要为积雪，湖北主要为积雪、降雪结冰和冻雨结冰，湖南、贵州主要为降雪结冰和冻雨结冰。

两次过程期间陕西的冰雪天气指数差异不大，降水相态均以雪和雨夹雪为主。“0218”过程中期(2月20—22日)，西安和陕北部分地区出现冻雨，导致部分高架桥和隧道路段发生交通事故，公路阻断影响度和交通流量下降变化率明显高于“0131”过程(图9a)。

两次过程期间山西的降水相态以雪和雨夹雪为主。“0131”过程降雪范围大，持续时间长(5 d以上)，中雪以上站点占比达20%～40%，平均地面温度≤0 ℃的站点占比超过90%，积雪深度≥3 cm的站点占比达40%～60%。而“0218”过程降雪主要集中在2月20—21日，中雪以上站点占比达50%以上，但因过程初期平均地面温度偏高，积雪深度不厚。两次过程冰雪天气强度总体差异不大，但“0131”过程影响时间长，对公路通行的影响程度高于“0218”过程(图9b)。

“0131”过程期间河南降水相态以雪和雨夹雪为主，个别站点出现冻雨，降雪的站点占比接近100%，积雪深度≥3 cm的站点占比达60%～80%。“0218”过程中河南冻雨范围虽然大于“0131”过程，但积雪范围和强度明显小于“0131”过程，故冰雪天气强度及公路阻断影响度总体不及“0131”过程(图9c)。

两次过程期间湖北均出现雨、雨夹雪、雪和冻雨天气，降雪站点数多于冻雨站点数，且积雪深度≥3 cm的站点占比高于40%。两次过程湖北平均的冰雪天气强度相当，但“0131”过程大雪以上范围和积雪深度≥5 cm的范围均明显大于“0218”过程，公路阻断影响度高于“0218”过程(图9d)，其中公路封闭段次数和高速公路收费站关闭数分别是“0218”过程的1.03倍(图5a)和2.3倍(图略)。

“0131”过程中湖南出现降雪和冻雨的站点数相当，约20%的站点出现积雪和结冰。湖南“0218”过程前期(2月20—22日)出现降雪和冻雨的站点数相当，约20%的站点出现积雪，过程后期(2月23—24日)约60%的站点出现结冰，平均冰雪天气强度明显高于“0131”过程，但中雪以上的范围以及积雪深度≥3 cm的范围明显低于“0131”过程，公路阻断影响度低于“0131”过程(图9e)。“0131”过程中湖南公路封闭段次数和高速公路收费站关闭数分别是“0218”过程的1.06倍(图5)和1.2倍(图略)。

两次过程期间贵州的冰雪天气强度差异明显，尽管均呈复杂雨雪相态变化和积雪少的特征，但“0218”过程冻雨范围广、持续时间长，冰雪天气强度明显高于“0131”过程，造成的公路通行影响也更为严重(图9f)。

杨琨和薛建军(2013)对我国不同地区的积雪深度与降雪量的关系进行分析指出，积雪深度变化值和相应降雪量的比值平均在0.79 cm·mm^{-1}左右，且具有明显的地域差异；其中北方地区比值波动较小，在1～1.15 cm·mm^{-1}，以干雪为主，南方地区比值波动较大，普遍小于1 cm·mm^{-1}，以湿雪为主。干雪的水分含量少，不易融化，积雪深度更深；湿雪由于含水量较高，积在地面的雪密度大，导致积雪深度相对较小。湿雪落地后冻结成冰速度较快，使得路面摩擦系数减小明显，因而对交通安全影响更严重。本文规定若积雪深度变化值和相应降雪量的比值≥1 cm·mm^{-1}，则为干雪，否则为湿雪。表2给出两次过程期间6个公路通行影响严重省份的平均干雪站点占比。由此可知，两次过程的降雪性质存在地区差异，其中陕西、山西、河南、湖北4省干湿并存，“0131”过程干雪占比较“0218”过程略高，湖南、贵州以湿雪为主，这可能也是两省积雪相对较少的原因之一。

表2 “0131”和“0218”过程6个公路通行影响严重省份的平均干雪站点占比(单位：%)

Table 2 Average percentage of dry snow stations in six provinces with severe road traffic impact during the “0131” event and the “0218” event (unit: %)

过程	陕西	山西	河南	湖北	湖南	贵州
“0131”	24.53	31.18	17.78	5.08	0	0
“0218”	16.59	22.18	8.28	2.49	0.29	0

4 结论与讨论

利用全国2 430个国家气象站观测数据以及交通流量和公路阻断信息，分析了2024年初(1月31日—2月5日、2月18—25日)中东部地区两次雨雪冰冻天气过程对公路交通的影响特点，探讨了冰雪天气强度与公路通行影响的关系特征，得到如下主要结论：

(1) 两次过程均具有相态复杂、雨雪量大、影响范围广、持续时间长等特点；两次过程的冻雨持续时间及最大降雪量相当，但“0131”过程的最大积雪深度更深，“0218”过程的冻雨影响范围更广。

(2) 两次过程分别发生在节前出程和节后返程公路交通流量迅猛增加的高峰时段，造成中东部地区公路服务水平明显降低。“0131”过程中，山西、河南、陕西公路交通流量降低幅度大，降低率为41%～62%；“0218”过程中，山西、湖北、河南公路交通流量降低率为40%～49%；“0218”过程对公路交通流量降低的影响范围和幅度总体高于“0131”过程。

(3) 两次过程中陕西、山西、河南、湖北、湖南以及贵州受降雪或结冰影响，路段封闭段次多，公路阻断严重，但公路阻断影响度存在地区差异。其中，山西、河南、湖北、湖南“0131”过程公路阻断影响度更严重；

陕西、贵州“0218”过程公路阻断影响度更严重。

(4) 两次过程中冰雪天气指数和公路阻断影响度的变化趋势一致，即冰雪天气强度越强，对公路通行的影响程度越重；交通流量变化率与冰雪天气指数、公路阻断影响度呈反比，冰雪天气指数对于研判冰雪天气下公路交通影响具有良好的指示意义。雨雪相态变化、降雪量、积雪深度、地面温度以及降雪性质是造成冰雪天气强度与公路通行影响差异的主要原因。

公路通行除了受天气影响外，与公路所处地理位置、道路线型关系密切。冬季山区、桥梁等特殊位置易发生结冰，弯坡道路受降雪、结冰影响易引发交通事故。此外，公路通行也与恶劣天气交通安全管理措施(如限速限行、增加巡逻、加强道路维护)、应对处置能力(如扫雪除冰设备和人员力量储备、机械化和智慧化除冰除雪作业模式)等密切相关。由于缺乏阻断起止地点、影响时间和影响里程等更为详细的公路封闭信息，本文重点从天气角度分析了雨雪冰冻天气对公路通行的影响，后续可以收集更详实的交通影响资料，进一步开展研究。

参考文献(References)：

GB/T 31443-2015 冰雪天气公路通行条件预警分级[S].北京:中国标准出版社. GB/T 31443-2015 Rating of pre-warning of highway traffic condition under snow and icy weather conditions [S]. Beijing:China Standards Publishing House (in Chinese)

李兰,陈正洪,刘敏,等.2011. 2008年低温雨雪冰冻对武汉城市公共交通的影响评估[J].长江流域资源与环境,20(11):1400-1404. Li L, Chen Z H, Liu M, et al. 2011. Evaluation of effect of sleeting and freezing process with low temperature on public traffic of Wuhan city in 2008 [J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin,20(11):1400-1404 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:CJLY.0.2011-11-019

刘明明,潘建平,杨海明.2011.山区公路冰雪灾害预警评估模型研究[J].公路交通技术,27(3):27-30. Liu M M, Pan J P, Yang H M. 2011. Research on ice and snow disasters on highways in mountainous areas by early warning and evaluation model [J]. Technology of Highway and Transport,27(3):27-30(inChinese).doi:10.3969/j.issn.1009-6477.2011.03.008

刘勇洪,扈海波,房小怡,等.2013.冰雪灾害对北京城市交通影响的预警评估方法[J].应用气象学报,24(3):373-379. Liu Y H, Hu H B, Fang X Y, et al. 2013. Early warning and evaluating impacts of ice and snow disasters on Beijing urban transportation [J]. Journal of Applied Meteorological Science,24(3):373-379 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.03.014

宁贵财,康彩燕,陈东辉,等.2016.2005-2014年我国不利天气条件下交通事故特征分析[J].干旱气象,34(5):753-762. Ning G C, Kang C Y, Chen D H, et al. 2016. Analysis of characteristics of traffic accidents under adverse weather conditions in China during 2005-2014 [J]. Journal of Arid Meteorology,34(5):753-762 (in Chinese). doi:10.11755/ j.issn.1006-7639.2016.05.0753

汤筠筠,杨涛.2008.2008年冬季低温雨雪冰冻灾害对公路交通影响分析[C]//2008中国科协防灾减灾论坛论文集.中国科学技术学会:5-7. Tang J J, Yang T. 2008. Analysis of the impact of low temperature rain, snow, and frozen disasters on highway traffic in the winter of 2008 [C]//Proceedings of the 2008 China Association for Science and Technology Disaster Prevention and Reduction Forum.CAST:5-7 (in Chinese)

王洁,曲晓黎,张金满,等.2020.基于序关系分析法的河北省交通事故天气条件分析[J].暴雨灾害,39(4):427-432. Wang J, Qu X L, Zhang J M, et al. 2020. Analysis of the relationship between adverse weather conditions and traffic accidents in Hebei Province based on order relationship [J]. Torrential Rain and Disasters,39(4):427-432 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.013

吴彦,陈春艳,路光辉,等.2013.沿天山高速公路冰雪灾害分析及其对交通安全的影响[J].沙漠与绿洲气象,7(5):66-70. Wu Y, Chen C Y, Lu G H, et al. 2013. Ice and snow disasters along the Tianshan expressway and its impact on traffic safety [J]. Desert and Oasis Meteorology,7(5):66-70 (in Chinese). doi:10.3969/ j.issn.1002-0799.2013.05.013

薛明,吕卫锋,诸彤宇. 2006. 浮动车信息处理系统关键技术的研究[J]. 微计算机信息,22(11-1):244-246. Xue M, Lü W F, Zhu T Y. 2006. Study on the key technology of floating car information processing system [J]. Microcomputer Information,22(11-1):244-246 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1008-0570.2006.31.087

杨琨,薛建军.2013.使用加密降雪资料分析降雪量和积雪深度关系[J].应用气象学报,24(3):349-355. Yang K, Xue J J. 2013. The relationship between snowfall and snow depth using intensive snowfall observations [J]. Journal of Applied Meteorological Science,24(3):349-355 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20130311

杨珍珍.2023. 重大突发事件下路段中断状态判断方法[J].交通工程,23(4):35-41. Yang Z Z. 2023. Judgement method of road interrupted state under major emergencies [J]. Traffic Engineering,23(4):35-41 (in Chinese). doi:10.13986/j.enki.jote.2023.04.006

张芳华,许先煌,权婉晴,等.2024. 2024年春运期两次极端雨雪冰冻天气过程对比分析[J].暴雨灾害. Zhang F H, Xu X H, Quan W Q, et al. 2024. Comparison of two extreme rainfall/snowfall and freezing weather events during the Spring Festival transportation period in 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-095

中华人民共和国应急管理部.2024年一季度全国自然灾害情况[EB/OL]. [2024-04-12]. http://www.mem.gov.cn/xw/xwfbh/2024n04y12rxwfbh_6023. Ministry of emergency management of the People''s Republic of China. National natural disasters in the First Quarter of 2024 [EB/OL]. [2024-04-12]. http://www.mem.gov.cn/xw/xwfbh/2024n04y12rxwfbh_6023 (in Chinese)

Becker N, Rust H W, Ulbrich U. 2022. Weather impacts on various types of road crashes: a quantitative analysis using generalized additive models [J]. European Transportation Research Review,14:37. doi:10.1186/s12544-022-00561-2

Hassan Y, Barker D J. 1999. The impact of unseasonable or extreme weather on traffic activity within Lothian region, Scotland [J]. Journal of Transport Geography,7(3):209-213. doi:10.1016/ S0966-6923(98)00047-7

Qiu L, Nixon W A. 2008. Effects of adverse weather on traffic crashes: Systematic review and meta-analysis [J]. Transportation Research Record, 2055(1):139-146. doi:10.3141/2055-16

(责任编辑 唐永兰)