

一种影响公路交通的冰冻强度计算方法

杨静 柳艳香 郜婧婧 戴至修 李宛育

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 从冰冻雨雪对公路交通运行产生影响的角度, 利用1958—2013年近55a的气象资料, 提出了南、北方不同的冰冻过程判别条件。将每次冰冻过程的冰冻持续时间、降水持续时间、日平均降水量和日平均气温4个因子采用灰色关联度分析方法, 探讨了一种影响公路交通的“冰冻强度”综合指标。经评估分析, 该“冰冻强度”综合指标对低温雨雪冰冻过程具有较好的时间和空间可比性, 可较好地表示冰冻天气的时间和空间分布特征, 同时能较好地反映冰冻过程对公路交通运行的影响程度。

关键词: 公路交通, 冰冻强度, 冰冻过程, 灰色关联度, 综合指标

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.021

A Method of Calculating Freezing Intensity in Highway Traffic

Yang Jing, Liu Yanxiang, Gao Jingjing, Dai Zhixiu, Li Wanyu

(China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081)

Abstract: Based on daily data observed at conventional meteorological stations during the period from 1958 to 2013, we developed different criteria for freezing processes selection in the North and South of China according to the impact of freezing rain and snow on the highway traffic operation. Then we set up a composite indicator called “freezing intensity” based on the grey correlation degree analysis, and taking the freezing duration, the rainfall duration, the average precipitation and the average daily temperature in each freezing process as the factors. The test results show that the composite indicator “freezing intensity” may describe the spatial-temporal variation of the freezing weather quite well. What’s more, it can reflect the extent of impact of freezing weather on the highway traffic operation.

Keywords: highway traffic, freezing weather, freezing intensity, grey correlation degree, composite indicator

0 引言

我国每年冬季大部分地区都会出现低温雨雪冰冻天气, 冰冻灾害会对交通运输、电力、能源和农业等产生不同程度的影响。近年来诸多国内学者对冰冻灾害从大气环流特征和天气动力成因等方面进行过详尽的研究^[1-5]。也有不少学者着眼于灾害风险, 通过确定不同的评估指标, 对低温雨雪冰冻灾害进行定量评估。王遵娅等^[6]、万素琴等^[7]、梁平等^[8]和彭贵芬等^[9]定义了低温日数、冰冻日数和降雪量等综合指标评估方法, 对2008年冬季低温雨雪冰冻过程进行了定量评估; 王海军等^[10]定义了由冰冻日数、过程降水总量、过程平均气温和过程最低气温4个指标构建的“冰冻指数”, 并将冰冻指数强度分级, 以此对中国南方7省持续性的冰冻天气时空分布规律进行研究; 王遵娅

等^[11]指出气温在0℃左右、相对湿度在70%以上、平均风速在4m/s以下最有利于冰冻的产生, 并研究构建了可用于冰冻监测与预警的冰冻日判别模型; 王颖等^[12]将冰冻过程划分成两个阶段, 将日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 作为冰冻持续的关键判别标准, 评估了1960—2009年中国低温雨雪冰冻灾害的危险性; 毛淑君等^[13]将日最高气温 $\leq 6^{\circ}\text{C}$ 、日最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 80\%$ 、日照时数 $\leq 1.3\text{h}$ 这一综合气象阈值条件用于评估我国南方地区低温雨雪冰冻事件发生的次数和持续时间。由于对冰冻天气过程研究的角度和侧重点不同, 诸多学者对冰冻过程评估指标的确定也并不完全一致。还有一些学者尝试性地从交通影响角度, 对公路雪灾指标进行了研究。李华蓉等^[14]得出最大雪深、积雪日数和一场降雪的降水量是决定公路雪灾的主要因素。刘明明等^[15]采用主成分分析方法得出温度、湿度、降雪量和积雪日数是决定山区公路雪灾的主要因素。可见, 研究人员大多针对冰冻灾害本身进行指标确定和定量评估, 对冰冻灾害针对某一行业影响的灾害指标和评

收稿日期: 2016年8月30日; 修回日期: 2016年11月29日
第一作者: 杨静 (1984—), Email: yangjing@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201406029)

估研究还相对较少，尤其是冰冻灾害对公路交通行业影响的指标研究还是比较稀缺。

众所周知，低温雨雪冰冻天气对公路交通系统的影响和破坏是显而易见的。本文从冰冻雨雪对公路交通运行是否产生影响的角度，筛选冰冻雨雪过程的气象要素，探讨一种影响公路交通的“冰冻强度”综合评估指标，旨在从另一角度提供一种针对行业需求评估冰冻雨雪过程的新思路，同时期望能为公路交通行业针对冰冻灾害的风险评估和研究提供一定的科学依据。

1 资料与定义

1.1 资料来源

本文使用的资料为中国气象局国家气象信息中心“中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）”整编的2479个国家站资料，资料时间序列为1958—2013年。选取了时间长度超过40a的2198个站点的气温、地表温度、降水量以及天气现象观测等资料，其中南方地区站点1097个。以1981—2010年1月30a平均气温 0°C 等温线作为南、北方结冰源相态的主要分界线（图1）^[16]。



图1 研究资料站点分布及结冰源相态南北方主要分界线
Fig.1 Map of the data site locations and the division line of the rain-snow phase in China

1.2 冰冻过程的定义

针对公路交通影响的冰冻过程包括两个阶段：1) 雨雪冰冻形成期，即造成交通运行风险的降雪或降雨；2) 冰冻持续期，即雨雪过后，已改变了交通路面物理性质，并有一定持续期，这两个阶段共同构成一次冰冻过程。南北方冰冻过程对道路交通产生影响的原因其实都是产生道路结冰，从而改变路面物理

性质。道路结冰是温度和水汽条件相结合的结果，当南、北方温度不同时，结冰源（水汽条件：或水、或雪）的相态会出现明显的差异，即冰冻形成的物理条件出现明显差异。因此，本文将采用不同的判别条件来分别确定南、北方的冰冻过程。

2 冰冻过程的判别条件

2.1 北方冰冻过程的界定

有研究表明^[17-18]，雨雪天气中，冰路面造成的路面湿滑程度最为严重，对道路交通安全的影响也最为严重，其次是冰雪混合路面、雪路面和雨雪混合路面。北方地区降雪过后，若气温持续在 0°C 及以下，积雪一般难以融化，很容易产生冰路面和冰雪混合路面，对交通造成较大影响。因此，北方地区在冰冻形成期更多考虑降雪的情况，将“日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ”作为北方冰冻过程的温度判别条件。

1) 冰冻形成期：日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 且日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ 的时段。

2) 冰冻持续期：降雪过后，日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的持续时段。

以上两个区间时间段结合构成一次冰冻过程（单位：d）。其中，该过程的冰冻持续时间为冰冻形成期和持续期加起来的总天数。

2.2 南方冰冻过程的界定

南方地区由于平均气温较高的原因，一般强度较弱的雨雪过后，路面积雪很快融化，对交通路面并不会产生严重影响。但较大的雨雪过程或者持续的冻雨天气产生的路面结冰，则会造成南方地区严重的交通阻断和事故，“地穿甲”现象就是一种严重危害地面交通的恶劣天气灾害^[18]。本文以影响交通为判断标准界定的南方冰冻过程，主要是以出现“路面结冰”为关键条件。

南方地区存在着降雪结冰、雨夹雪结冰和降雨结冰三种情况，降雪结冰时，气温在 0°C 上、下都有可能，但降雨结冰时气温一般都在 0°C 以上，不管降雨还是降雪，当地地表最低温度一般都要达到 0°C ，才符合地面结冰的条件；同时，降雨量4mm以下的日降雨量容易发生结冰^[19]。

根据Norrman^[20]提出的路面打滑类型，结合南方地区冰冻形成的特点，以“日最低地表温度持续 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ”的判别标准，将冰冻过程分成三种情况进行判定：

1) “雪降至严寒路面”情况，日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ ，且日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ （冰冻形成期），且日最低地表温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ，直到日最低地表温度 $> 0^{\circ}\text{C}$ 时截

止（冰冻持续期），该过程定为一次冰冻过程；

2) “大雪以上量级降至温暖路面，但未来经历降温过程”情况：日降水量 $\geq 5\text{mm}$ ，且日平均气温 $\leq 0^\circ\text{C}$ ；虽当日最低地表温度 $> 0^\circ\text{C}$ ，但未来24h后日最低地表温度 $\leq 0^\circ\text{C}$ ，直到日最低地表温度 $> 0^\circ\text{C}$ 时截止，定为一次冰冻过程；

3) “雨或雨夹雪降至严寒路面”情况：日降水量 $\leq 4\text{mm}$ ，且日平均气温 $> 0^\circ\text{C}$ ；但日最低地表温度 $\leq 0^\circ\text{C}$ ，直到日最低地表温度 $> 0^\circ\text{C}$ 时截止，定为一次冰冻过程。

3 冰冻强度的指标建立

3.1 指标选取

单一的气象要素如气温、冰冻持续时间和降水量都不能准确且全面地评判一个冰冻天气过程的影响程度，而多因子综合评判冰冻过程是目前比较普遍的评估方式^[7, 10, 12]。借鉴王颖等^[12]对冰冻强度的确定方法，对各因子代表性和独立性的考虑，经相关性分析，用该冰冻过程的日平均气温、日平均降水量、冰冻持续时间和降水持续时间4个因子指标量来共同综合评估一次持续低温雨雪冰冻过程对交通运行的影响程度，定义为冰冻强度。本文将采用灰色关联度分析法求出冰冻强度值的大小。

3.2 灰色关联模型

灰色关联度分析法是一种多因素统计分析的客观方法，根据所给出的比较数列，通过计算参考数列与比较数列的关联度大小，判断该参考数列与比较数列的接近程度来评定该参考数列的强弱、大小和次序^[21-23]。

将每一次冰冻过程的4个指标量做为比较序列，将所有冰冻过程中的4个指标量的最大值，即最优样本值做为参考序列，通过计算灰色关联度值，来反映每次冰冻过程相对与最大冰冻过程的接近程度，从而表征每次冰冻过程之间的强弱程度。

定义参考序列： $X_0=(x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m))$ ，($m=4$)，令其都为1，即表征冰冻过程最大情况时的转换函数值；

令有 n 个比较序列，任意比较序列可表示为：

$X_i=(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(j))$ ，($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$)。

计算求差序列：

$$\Delta_{oi}(j)=|X_0(j)-X_i(j)|, \quad (1)$$

然后求比较序列和参考序列中的最大差和最小差：

$$\Delta_{\max}=\max_i \max_j |X_0(j)-X_i(j)|, \quad (2)$$

$$\Delta_{\min}=\min_i \min_j |X_0(j)-X_i(j)|. \quad (3)$$

关联系数反映样本值与最优样本值的关联程度，各参考序列与比较序列在各时刻（即曲线上的各点）

的关联系数 $\xi_{oi}(j)$ 可由式（4）计算：

$$\xi_{oi}(j)=\frac{(\Delta_{\min}+\eta\Delta_{\max})}{(\Delta_{oi}(j)+\eta\Delta_{\max})}, \quad (4)$$

式中， η 为分辨系数，其作用在于削弱最大绝对差值因过大而失真的影响，以提高关联系数之间的差异显著性，一般在0~1选取，通常取 $\eta=0.5$ ；

最后，计算关联度：

$$r_{oi}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^m \xi_{oi}(j), \quad (5)$$

因为关联系数 $\xi_{oi}(j)$ 是比较序列与参考序列在各个时刻的关联程度值，其数值不只一个，为便于信息集中比较，采用权重相等求平均值的方法得到关联度 r_{oi} 值，关联度的理论最大值 $r_{oi,\max}=1$ ，最小值 $r_{oi,\min}=1/3$ 。

关联度 r_{oi} 越大，表明比较序列对参考序列的依赖性越强，两者关系越紧密，它所对应的冰冻过程影响就越强；反之越轻。因此，将4个指标因素通过灰色关联方法来计算出灰色关联度值作为冰冻过程的强度值，可以评判不同冰冻过程的强弱程度。

4 冰冻强度的指标评估

对1958—2013年55a的资料进行研究，选取了时间长度超过40a的2198个站点进行资料统计。通过对各指标要素的分布、冰冻过程的时间变化特征和典型的冰冻天气过程的个例特征分析，多方面地评估冰冻强度指标对于冰冻天气过程的度量能力，以及对公路交通影响的反映程度。

4.1 冰冻天气过程各指标要素分布

北方地区在冰冻形成期考虑的是降雪及降雪结冰的情况。北方地区的冰冻持续时间超过50%都在5d以上，持续时间大于9d的有28.9%，比例最高（表1）。从降水日数（即降雪日数）看，北方地区1~2d达到88%。冰冻过程总降水量（即降雪量） $\leq 5\text{mm}$ 量级的比例高达87%，通常在北方降雪结冰的情况多半是降雪量不大，但气温低造成终日不化，车辆持续碾压积累后，成为非常危险的“黑冰”；但也不能忽视其降雪极端性，有0.7%的冰冻过程总降水量达到20mm以

表1 北方地区冰冻天气过程各指标要素频率分布
Table 1 Frequency distribution of meteorological index for freezing process in the northern China

冰冻持续时间/d	频率/%	降水日数/d	频率/%	过程总降水量/mm	频率/%	日平均气温/ $^\circ\text{C}$	频率/%
0~2	20.5	1	63.9	≤ 5	87.0	-3.0~0.0	26.0
3~4	24.8	2	25.2	5~10	9.0	-7.0~-3.0	28.9
5~8	25.9	3~4	9.3	10~20	3.4	-13.0~-7.0	24.0
≥ 9	28.9	5~22	1.6	20~50	0.68	≤ -13.0	21.1
				50~100	0.02		

上量级,这种情况就非常容易造成“道路雪阻”。对北方冰冻过程挑选时,都是控制在日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 范围内,从统计数据可看出,日平均气温分布比例比较均匀。同时,因以日最低地表温度作为冰冻过程控制条件,即均控制在“日最低地表温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ”范围内,因此,在北方地区本文不再对其频率分布进行讨论。

由于降水相态的不同,南方冰冻过程各要素的频率分布与北方也有所不同。南方冰冻持续时间1~2d比例达48.2%(表2),这与南方地区气温回升快,道路结冰消融快的情况比较吻合;但从持续时间 $>5\text{d}$ 占33%的比例来看,南方大范围、高强度的冰冻天气过程也从中有所反映。从降水日数看,南方1~2d达到90.7%,这点与北方地区相差不大。南方冰冻过程总降水量 $\leq 5\text{mm}$ 量级的比例达86.4%,但值得注意的是,这其中并不都是降雪量,因此过程总降水量尤其是20mm以上量级的比例明显高于北方地区。在南方冰冻过程挑选时,将日最低地表温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 做为控制条件,日最低地表温度在 $-4.0\sim 0.0^{\circ}\text{C}$ 还是占80.9%,占非常高的比例;而日平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的比例占到52.1%,说明并不是所有的冰冻过程日平均气温都会 $<0^{\circ}\text{C}$,这一点在诸多文献中也有同样的印证^[13, 16, 19]。

4.2 冰冻天气过程时间变化特征

为了更好地反映冰冻过程对该年冰冻情况强弱

的度量能力,本文使用了自然年统计方式(如1964年为1964年的1—12月,非跨年处理),对冰冻过程进行年平均。在1958—2013年共55a中,我国北方地区年平均冰冻持续时间为9.31d,最多为12.67d,发生在1968年,其次为1975,1984,1982和1958年(表3),最少出现在2013年(6.34d)。但从冰冻强度值的年平均来看,排在前五位的依次是1968,1958,2007,2009和1966年。从冰冻过程各要素指标的年平均时间变化(图2)可看出,冰冻持续时间最多的年份并不都是冰冻强度值最大的年份,冰冻持续时间年平均排第二、三位的1975和1984年,其冰冻强度值排名分别为第三十三和第八位。

值得关注的是,北方地区的过程总降水量年平均最大值出现在2009年,而该年的冰冻强度年均值为0.786,排名第四位;据文献[24],2009年11月华北出现大范围暴雪寒潮天气,石家庄出现94mm的单日最大降雪量极值,而过程总降水量和冰冻强度值的年变化都非常好地反映出这一特征。

我国南方地区,平均冰冻持续时间为4.51d,最多为10.83d,发生在1975年,其次为1962,2004,1958和1977年(表4),最少出现在1973年(2.83d)。从冰冻强度值的年平均来看,排在第一位是2008年,冰冻强度年均值为0.999;其他依次是1964,1969,1979

表2 同表1, 但为南方
Table 2 As same as in Table 1, but for the southern China

冰冻持续时间/d	频率/%	降水日数/d	频率/%	过程总降水量/mm	频率/%	日平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	频率/%	日最低地表温度/ $^{\circ}\text{C}$	频率/%
0~2	48.2	1	76.8	≤ 5	86.4	>4.0	23.3	$-2.0\sim 0.0$	52.7
3~4	19.8	2	13.9	5~10	6.3	$2.0\sim 4.0$	24.5	$-4.0\sim -2.0$	28.2
5~8	17.0	3~4	6.6	10~20	4.7	$0.0\sim -2.0$	29.3	$-8.0\sim -4.0$	17.3
≥ 9	15.0	5~33	2.7	20~50	2.4	$-2.0\sim 0.0$	18.3	< -8.0	1.7
				50~100	0.2	≤ -2.0	4.5		

表3 1958—2013年, 北方地区冰冻持续时间和冰冻强度年均值排名前10的年份
Table 3 The top 10 years of the annual average of the freezing duration and intensity in the northern China (1958–2013)

排名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
冰冻持续时间	年份	1968	1975	1984	1982	1958	1962	2004	1967	1960
	冰冻持续时间/d	12.67	12.54	11.94	11.61	11.59	11.33	11.19	10.76	10.72
冰冻强度	年份	1968	1958	2007	2009	1966	1993	2012	1984	2010
	冰冻强度年均值	0.999	0.993	0.829	0.786	0.765	0.738	0.694	0.688	0.677

表4 同表3, 但为南方
Table 4 As same as in Table 3, but for the southern China

排名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
冰冻持续时间	年度	1975	1962	2004	1958	1977	1987	1968	1983	1984
	冰冻持续时间/d	10.83	6.92	6.12	5.95	5.63	5.61	5.52	5.50	5.42
冰冻强度	年度	2008	1964	1969	1979	1991	1977	1985	1984	1966
	冰冻强度年均值	0.999	0.902	0.891	0.858	0.853	0.819	0.773	0.761	0.731

和1991年。从图3可看出,2008年,南方地区冰冻过程4个指标要素——冰冻持续时间、过程总降水量的年平均值都不是排名最大,但其冰冻强度却是最大

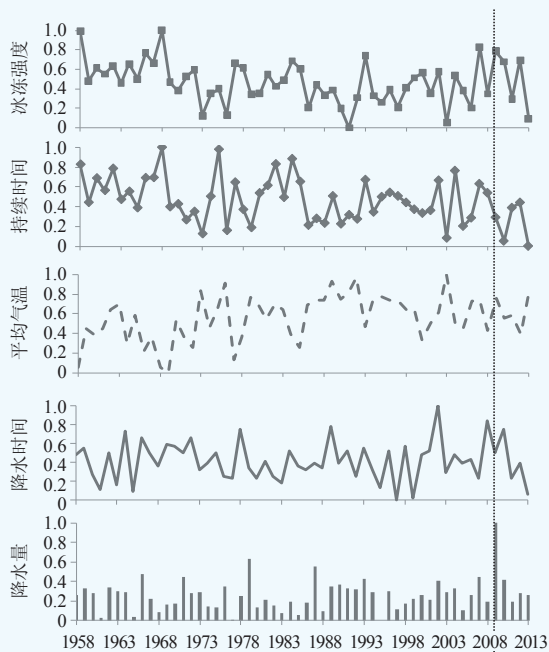


图2 北方地区冰冻过程各要素指标与冰冻强度值年变化 (无量纲)

Fig. 2 The annual variation of the freezing process index and freezing intensity in the northern China (dimensionless)

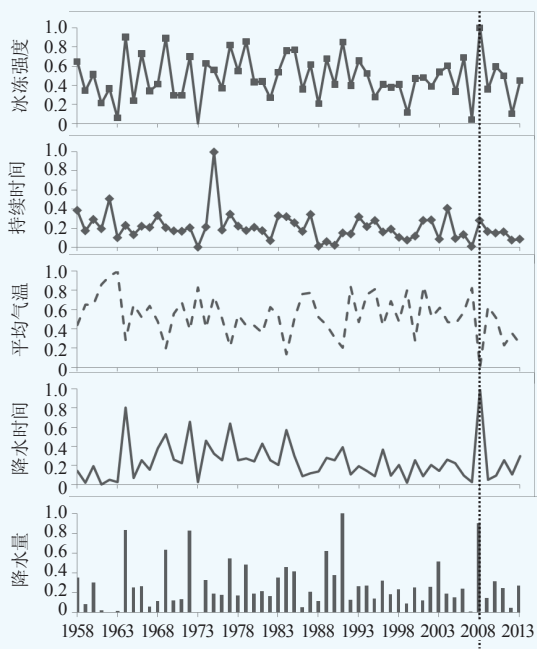


图3 同图2, 但为南方

Fig. 3 As same as in Fig.2, but for the southern China(dimensionless)

值,这与诸多文献^[1-7]对2008年大范围冰冻雨雪过程的研究结果相吻合。因此,一种指标并不能很好地反映一个冰冻天气过程总体影响程度,多因子综合指标才能更全面地反映。

4.3 冰冻天气过程个例分析

为进一步分析“冰冻强度”指标在反映道路交通运行影响上的合理性,分别选择了2008年1月南方区域、2009年11月北方区域,以及2016年11月北方区域冰冻雨雪天气过程,进行数据再分析。

2008年1月10—2月2日,南方大部经历了4次大范围长时间的低温雨雪冰冻天气过程^[6]。从图4可见,该时段内南方大部过程冰冻强度值都在0.40以上,贵州中西部、湖南大部、江西中北部和东部、湖北中部和南部、安徽南部和西部等地过程冰冻强度值在0.45以上的高值区内,这与诸多文献^[4-6]反映的“2008年冰冻灾害发生最严重的5个省份为安徽、贵州、湖北、湖南和江西”的研究结果很吻合。尤其是,过程冰冻强度的大值区(≥ 0.50)出现在贵州西部、湖南南部和江西中东部等地,可反映出包括厦蓉高速贵州段、京港澳高速湖南至广东段(尤其是广东韶关段)、沪昆高速、京港澳高速湖北段、大广高速,以及福银高速江西段等在内的周边不同等级公路路段出现了非常严重的道路结冰,该结果在王凌等^[4]和王遵娅等^[6]相关文献中也同样得到印证。

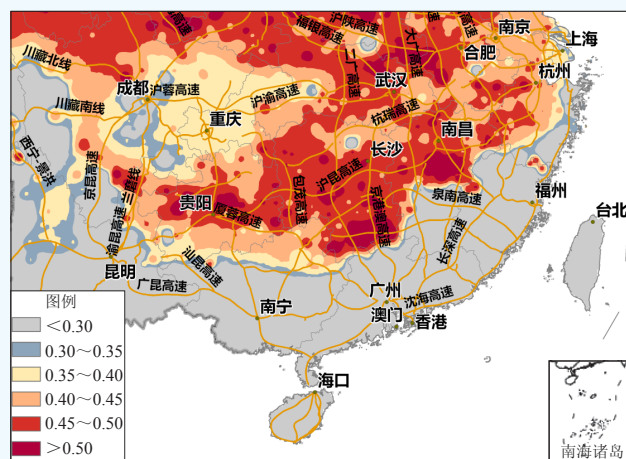


图4 2008年1月10—2月2日南方区域过程冰冻强度分布

Fig. 4 The freezing intensity distribution of the freezing weather on 10 January to 2 February, 2008 in the southern China

2009年11月9—12日,北方地区经历一次罕见的大到暴雪天气过程。如图5所示,这次降雪过程华北大部地区过程冰冻强度值普遍都在0.45以上,冰冻强度的大值区(≥ 0.60)出现在山西大部、河北西南部、河南北部和陕西东部等地,可以反映出这些区域

内的周边不同等级公路路段出现了非常严重的道路雪阻和道路结冰,该结果在相关文献^[24]中得到反映:这次暴雪过程使得河北、山西、山东、河南和陕西等地的降雪量和积雪深度都突破历史同期极值,造成北京、天津、河北、内蒙古、山西、湖北和山东7个省(自治区、直辖市)共计21条高速、3条国道、9条省道局部交通中断。尤其是河北石家庄至山西阳泉一带积雪深度达到40~55cm,部分路面结冰高达15cm;造成山西境内忻州高速、太原高速等多条高速公路和国、省道干线关闭或严重拥堵。

为了更好地通过公路阻断实况信息检验冰冻强度指标对交通运行影响的反映程度,本文选取2016年11

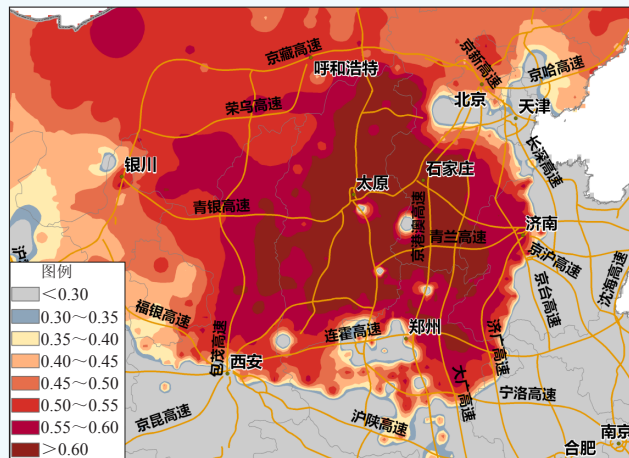


图5 2009年11月9—12日北方区域过程冰冻强度分布
Fig. 5 The freezing intensity distribution of the freezing weather on 9 to 12 November, 2009 in the northern China

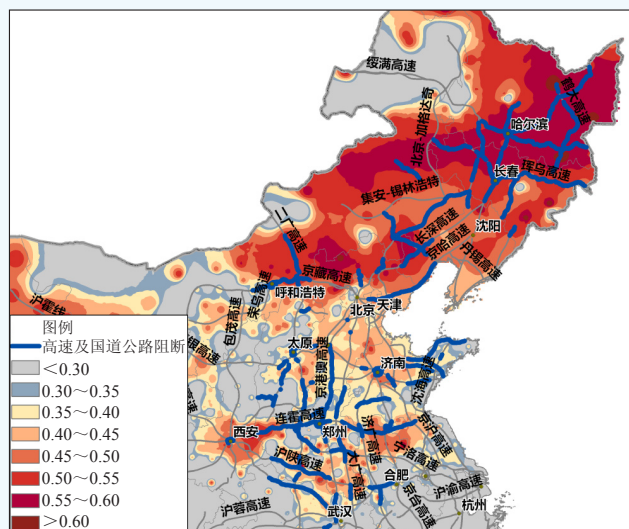


图6 2016年11月19—24日我国中东部寒潮暴雪过程冰冻强度及高速公路阻断路段分布
Fig. 6 The freezing intensity distribution during the cold wave freezing weather and the distribution of highway blocks on 19 to 24 November, 2016 in the eastern China

月19—24日我国中东部大范围寒潮暴雪天气过程,整理了11月19—24日受降雪、积雪及道路结冰原因造成的全国公路阻断信息共864条(数据来源于中华人民共和国交通运输部路网中心公路通阻数据库),其中公路类型包括国家高速、国道及省道。如图6所示,本次寒潮暴雪过程造成东北、华北及黄淮地区10余个省份出现严重积雪和道路结冰,图中公路阻断路段几乎均出现在冰冻强度 ≥ 0.40 的区域内,阻断数据表明,基本上落在冰冻强度 ≥ 0.45 高值区内的公路阻断路段都表现为道路封闭状态。

5 结论

1) 根据南、北方冰冻过程形成物理条件的不同,本文采用不同的判别条件来确定南、北方的每次冰冻过程。

2) 将每次冰冻过程的冰冻持续时间、降水持续时间、日平均降水量和日平均气温4个因子,从灾害成因角度构建了一种影响公路交通的冰冻强度指标,综合评估一次持续低温雨雪冰冻过程对交通运行的影响程度。

3) 在计算冰冻强度指标值时,采用了灰色关联度分析法;通过计算四个指标因子的灰色关联度值来表征冰冻过程的强度值,从而达到客观评判不同冰冻过程之间强弱程度的目的。

4) 利用1958—2013年近55a的气象资料,通过对各指标要素的分布、冰冻过程的时间变化特征和冰冻过程的个例分析,本文提出的冰冻强度指标对低温雨雪冰冻过程具有较好的时间和空间可比性,可较好地表示冰冻天气的时间和空间分布特征,同时能较好地反映冰冻过程对公路交通运行的影响程度。

参考文献

- [1] 杨贵名,孔期,毛冬艳,等. 2008年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析. 气象学报, 2008, 66(5): 737-750.
- [2] 李崇银,杨辉,顾薇. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析. 气候与环境研究, 2008, 13(2): 113-122.
- [3] 马晓刚. 2008年1月我国南方罕见冰冻雨雪灾害性天气诊断分析. 气象与环境学报, 2009, 25(1): 23-27.
- [4] 王凌,高歌,张强,等. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析. 气象, 2008, 34(4): 95-100.
- [5] 陶诗言,卫捷. 2008年1月我国南方严重冰冻灾害过程分析. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 337-350.
- [6] 王遵亲,张强,陈峪,等. 2008年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 63-67.
- [7] 万素琴,周月华,李兰,等. 低温雨雪冰冻极端气候事件的多指标综合评估技术. 气象, 2008, 34(11): 40-46.
- [8] 梁平,白慧,田楠,等. 黔东南州2008年低温雨雪冰冻灾害气象因素影响定量评价. 气象科技, 2009, 37(4): 496-502.
- [9] 彭贵芬,段旭,舒康宁. 云南2008年冰冻灾害评估. 气象, 2010, 36(10): 72-77.
- [10] 王海军,覃军,张峻. 中国南方7省冰冻天气时空分布规律研究. 长江流域资源与环境, 2010, 19(7): 839-846.

(下转158页)

表2 2015年汉江上游面雨量预报试验评分
Table 2 The test scores of rainfall forecasts for the upper reach watershed in the Hanjiang River for 2015

月份	上段(石泉以上)			中段(石泉至白河)			下段(白河至丹江口)		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
201505	93.3	83.5	73.2	92.0	84.7	80.3	91.0	83.6	82.5
201506	95.0	90.8	86.7	90.8	85.7	83.3	98.3	91.7	90.8
201507	88.3	80.9	71.5	86.1	80.9	70.5	90.7	75.9	71.1
201508	85.9	84.7	83.1	89.5	94.4	89.5	92.7	93.1	90.5
201509	94.3	89.3	85.8	96.7	88.0	86.9	98.0	90.8	92.5
201510	95.2	91.6	90.7	91.9	90.3	91.8	98.4	91.2	90.4
平均	92.0	86.8	81.8	91.2	87.3	83.7	94.9	87.7	86.3

表3 2016年汛期汉江上游面雨量预报评分
Table 3 Scores of rainfall forecasts for the upper reach watershed in the Hanjiang River for flooding season in 2016

流域区间	24h	48h	72h	平均
上段(石泉以上)	91.5	84.2	83.5	86.4
中段(石泉至白河)	92.8	88.9	86	89.2
下段(白河至丹江口)	93	89.3	87.5	89.9
平均	92.4	87.5	85.7	88.5

分,可见预报模型稳定,在不同年份均有较好的评定得分,取得理想的预报效果,满足了汉江集团丹江口水库调度业务要求和社会需要。

4 小结

通过对大量水文、气象资料的对比分析研究,对汉江上游面雨量估算和预报有了进一步的认识,实现了客观预报模型的业务化运行,使得水文气象预报技术与决策服务能力有了新的提高。其主要特点体现于我国T639、德国和日本三个数值预报模式产品的加权处理,克服了单一产品所存在的不确定性,得到估算雨量和面雨量预报产品预报能力高,是洪水预警的客观科学依据,在业务使用中成效显著,为水文气象服务和大型水库调水提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 徐晶,林建,姚学祥,等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用. 气象, 2000(11): 13-16.
- [2] 丁太盛,刘惠敏. 汛期强降水面雨量分析和预报. 气象科学, 2003(3): 346-351.
- [3] 王仁乔,李武阶. 日本降水预报的客观订正及三峡区间面雨量的估算. 空军气象预报, 1999, 17(2): 175-180.
- [4] 徐晶,姚学祥. 流域面雨量估算技术综述. 气象, 2007, 33(7): 15-21.
- [5] 高琦,徐明,李武阶,等. 我国面雨量研究及业务应用进展. 气象科技进展, 2014, 4(2): 66-69.
- [6] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 1990: 49-60.
- [7] 彭涛,沈铁元,高玉芳,等. 流域水文气象耦合的洪水预报研究及应用进展. 气象科技进展, 2014, 4(2): 52-58.

(上接154页)

- [11] 王遵娅,赵珊珊,张强. 我国冰冻日出现的气象条件分析及其判别模型. 高原气象, 2011, 30(1): 158-163.
- [12] 王颖,王晓云,江志红,等. 中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划. 气象, 2013, 39(5): 585-591.
- [13] 毛淑君,李栋梁. 基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估. 冰川冻土, 2015, 37(1): 14-26.
- [14] 李华蓉,赵一,潘建平. 山区公路雪灾预警评估模型初探. 城市勘测, 2010, (2): 116-119.
- [15] 刘明明,潘建平,杨海明. 山区公路冰雪灾害预警评估模型研究. 公路交通技术, 2011, (3): 27-30.
- [16] 王颖,王晓云,江志红,等. 1960—2008年南方地区冰冻时空分布特征. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2011, 3(1): 28-35.
- [17] 谢静芳,吕得宝,王宝书. 高速公路路面摩擦气象指数预报方法. 气象与环境学报, 2006, 22(6): 18-21.
- [18] 蒋建莹,史历,倪允琪. 一次“高影响天气”的弱降雪过程的数值研究. 应用气象学报, 2005, 16(2): 232-237.
- [19] 刘梅,尹东屏,王清楼,等. 南京地区冬季路面结冰天气标准及其预测. 气象科学, 2007, 27(6): 685-690.
- [20] Norrman J. Slipperiness on roads—an expert system classification. Meteorol Appl, 2000, 7(1): 27-46.
- [21] 刘伟东,扈海波,程从兰,等. 灰色关联度方法在大风和暴雨灾害损失评估中的应用. 气象科技, 2007, 35(4): 563-566.
- [22] 魏海宁. 灰色关联度方法在灾害性天气评估中的应用研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [23] 张继权,李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用. 北京: 北京师范大学出版社, 2007.
- [24] 孙健,毛恒青,姚秀萍. 全国气象服务典型案例集(2009—2010). 北京: 气象出版社, 2011.