

基于 BP 神经网络的公路风吹雪雪深预测模型

夏才初^{1,2}, 周开方¹, 程 怡³, 徐冬英²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000;
3. 西安中交公路岩土工程有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 公路风吹雪雪深预测作为国际雪冰学领域的研究热点和难点问题一直未能很好解决。以白茫雪山防雪走廊段安装的自动气象站和当地气象局提供的气象资料为基础, 提取了对公路风吹雪雪深有影响的 4 种因素(降雪量、大气温度、风速和湿度)的指标值, 建立了基于 BP(back propagation)神经网络的公路风吹雪雪深预测模型。对研究区 5 次降雪过程中所记录的 199 组数据进行训练学习, 用 20 组数据来验证建立的模型, 验证结果表明 20h 累计雪深预测值的误差在 10% 以内, 85% 的雪深预测值误差在 20% 以内, 因此所建立的模型具有很强的泛化能力和较高的精度。并对降雪量、大气温度、风速和湿度这 4 个因素进行了敏感性分析, 表明雪深与降雪量成正比, 与其他 3 个因素成反比, 其中降雪量对雪深的影响最大, 风速次之, 湿度最小。

关键词: 雪深; 预测模型; BP(back propagation)神经网络; 敏感性分析

中图分类号: U491

文献标志码: A

snow depth of snowdrift on highway based on Back Propagation Neural Network was established. 199 sets of data during five snowfall in study area were used to train network and establish model, then 20 sets of data were used to validate the model. Validation results show relative error of accumulated snow depth predictions in 20 hours is less than 10% and 85% of relative error of snow depth predictions is less than 20%. Therefore, the model has strong generalization ability and high accuracy. Sensitivity analysis of snowfall, air temperature, wind speed and humidity indicates that snow depth is directly proportional to snowfall and inversely proportional to other three factors, wherein snowfall has the greatest impact on snow depth, followed by wind speed, humidity minimum.

Key words: snow depth; prediction model; BP (back propagation) neural network; sensitivity analysis

Prediction Model of Snow Depth of Snowdrift on Highway Based on Back Propagation Neural Network

XIA Caichu^{1,2}, ZHOU Kaifang¹, CHENG Yi³, XU Dongying²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 3. Xi'an China Highway Geotechnical Engineering Co., Ltd, Xi'an 710075, China)

Abstract: As the research focus on international snow and ice field, snow depth prediction of snowdrift on highway still has not been well solved. Based on meteorological data provided by automatic weather stations installed along the anti snow corridor on White Snow Mountain and meteorological bureau, index values of four factors (snowfall, air temperature, wind speed and humidity) which have influence on snow depth of snowdrift on highway were extracted and prediction model of

风吹雪(又称风雪流)为空气携带着雪粒子运行的非典型的气固两相流, 也就是常说的雪粒子被风卷着运行的一种天气现象, 它对自然积雪有重新分配的作用。风吹雪形成的积雪深度一般为自然积雪深度的 3~8 倍, 通常分为低吹雪、高吹雪和暴风雪三类^[1]。公路风吹雪作为东北、西北和西南地区冬季公路常见的一种自然灾害, 它不仅会埋没道路, 阻塞交通, 造成公路雪阻, 还会导致路面上方能见度降低, 造成大量交通事故和人员伤亡, 给国家和人民带来严重的经济损失^[1-2]。

国内外学者针对公路风吹雪灾害做了很多方面的研究。Uematsu 等^[3]采用有限元方法模拟了公路风吹雪的发展过程, 通过计算吹雪输运率的差异预测了路面积雪深度; Sato 等^[4]通过数值模拟得出防雪栅栏前后风速场和吹雪输运率的分布, 可为防雪栅栏的设计提供依据; Thordarson 等^[5]基于 CFD

收稿日期: 2016-06-13

第一作者: 夏才初(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩石力学、地下结构和能源地下工程。

E-mail: tjxiacbc@126.com

通讯作者: 徐冬英(1977—), 女, 讲师, 工学硕士, 主要研究方向为环境工程。E-mail: xudongying@usx.edu.cn

(computational fluid dynamics)和野外观测分析总结了风吹雪灾害地区公路的设计准则,其研究结果可为道路的规划设计提供科学依据;Yamada等^[6]设计了一种新型的三段式防雪栅栏,与传统集雪式栅栏相比,通过合理安排上中下3段的孔隙率有效地提高了风吹雪地区公路路面的能见度;王中隆等^[7]通过野外观测和风洞试验得到了某地段吹雪输送量和山区风吹雪风速随高度分布的计算方程,并指出贴地气层分离是形成道路雪阻的主要原因;魏江生等^[8]对全国大部分草原牧区公路的雪害状况进行了调查,分析了草原牧区公路风吹雪雪害的影响因素;席剑锋等^[9-10]系统地总结了公路风吹雪及其积雪形成机理的有关理论,分析了积雪形状形成的力学机制,提出了积雪深度的预测模型;应成亮^[11]针对公路风吹雪灾害防治技术和除雪技术展开了深入细致的研究;国际著名风雪流专家 Tabler^[12-13]提出一套有关各类防雪栅的作用机制、适用范围、设计和具体应用方法的工程手册,其中的“平衡流理论”可以预测道路横断面风吹雪引起的雪堆积平衡后的形态,为道路设计提供了理论依据。

虽然国内外学者对公路风吹雪灾害开展了大量研究,但关于公路风吹雪雪深预测的研究成果较少。公路风吹雪雪深预测作为国际雪冰学领域的研究热点和难点问题,一直未能很好地解决。Tsuchiya等^[14]通过大量野外观测、风洞试验证实了积雪系数与近地面水平平均加速度之间呈负相关关系,但该方法只能定性地预测积雪形状和积雪峰值的位置。席剑锋等^[10]在 Tsuchiya 等^[14]研究的基础上对积雪系数与近地面水平平均加速度关系式中的常数进行了标定,实现了积雪深度的预测,该模型在工程实践背景下虽然可行,但实际风吹雪积雪现象还不能简单地用线性关系来表达;张林林^[15]通过引入动网格技术和自主开发的风吹雪堆积、吹蚀算法初步预测出了公路风吹雪雪深,但该方法对于预测结果缺乏必要的验证,无法确定模型的可靠性和精度;目前关于平坦地区房屋周边积雪深度的预测模型已经比较成熟,但公路周边地形条件比较复杂,该类模型并不适用于公路风吹雪雪深的预测^[16-19]。本文基于BP(back propagation)神经网络提出了一种公路风吹雪雪深预测模型。

1 公路风吹雪雪深预测模型

1.1 BP神经网络的原理

BP神经网络是一种按误差逆传播算法训练的

多层前馈网络,是目前应用最广泛的神经网络模型之一。BP神经网络模型拓扑结构包括输入层、隐层和输出层。该网络具有很强的非线性映射能力,一个3层BP神经网络(不含输出层)能够实现任意非线性函数的逼近(根据Kolmogorov定理),一个典型的3层BP神经网络模型如图1所示。其中, $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 和 $\mathbf{y}=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为输入向量和输出向量, w_{ij} 和 w_{jk} 分别为输入层、隐含层间和隐含层、输出层间的连接权值, $J=(J_1, J_2, \dots, J_h)$ 和 $K=(K_1, K_2, \dots, K_o)$ 表示隐含层和输出层的神经元,其中 h, o 分别为隐含层和输出层的神经元的个数, $\theta_J=(\theta_{J1}, \theta_{J1}, \dots, \theta_{Jh})$ 和 $\theta_K=(\theta_{K1}, \theta_{K2}, \dots, \theta_{Ko})$ 分别为隐含层和输出层神经元的阈值。

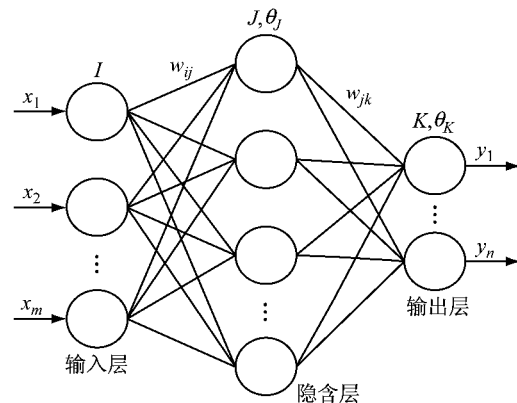


图1 3层BP神经网络

Fig.1 Three-layer BP neural network

BP算法的主要思想是把学习过程分为信号的正向传播与误差的反向传播2个阶段。在正向传播阶段,输入信息从输入层经隐含层传向输出层,在输出端产生输出信号。在信号的向前传递过程中网络的权值固定不变,每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期望的输出,则转入误差信号反向传播。在反向传播阶段,未能满足精度要求的误差信号由输出端开始,以某种方式逐层向前传播,并将误差分摊给各层的所有单元,依据误差信号动态地调整各单元层的连接权值。通过周而复始的正向传播与反向调节,神经元间的权值和阈值得到不断的修正,当输出信号的误差满足精度要求时停止学习,具体计算流程如图2所示。

1.2 公路风吹雪雪深影响因素的选择

公路风吹雪雪害的形成必须具备3个条件:大量的雪、搬运雪粒的动力(即风)、适合雪粒子堆积的公路路基断面及其周边地形地貌^[9,11]。其中,一定量的降雪和积雪是雪害形成的物质来源,我国冬季积雪深度变化值和相应降雪量的比值平均为 $0.8 \text{ cm} \cdot$

mm⁻¹,该比值会受到气温的影响,相同降雪量的情况下,气温越低,积雪深度增量也就越大.如当温度维持在一4℃以下时,1 mm 的降雪基本就能够带来 1 cm 的积雪;而温度在 0℃左右时,降雪可能会有部分融化,相应积雪深度增量也比较小.湿度也是影响公路积雪深度的一个重要因素,空气湿度较大时,积雪含水量增加,雪粒子之间结合更加紧密,起动风速会增大,影响风雪流的发育,此时公路积雪主要来自降雪,不易形成公路风吹雪雪阻.因此降雪量、大气温度和湿度是影响公路积雪深度的重要因素.

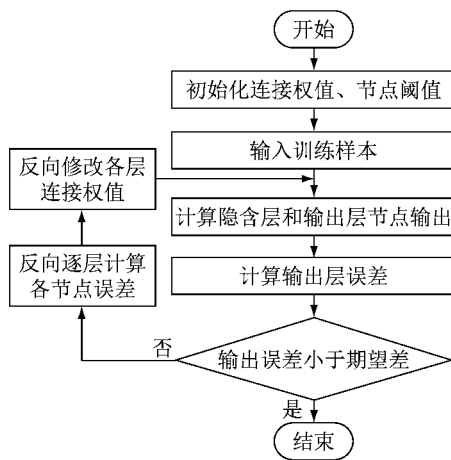


图 2 BP 神经网络计算流程
Fig.2 Calculation process of BP neural network

风是雪害形成的动力,它决定风吹雪的发展方向 and 运动规律.研究表明风速大小与输雪量密切相关,当雪粒子的运动主要是跃移运动时,输雪量与风速的 2~3 次方成正比,若风雪流流经公路路面上空时气流受扰动导致风速下降,其输雪能力将大大减弱,造成雪粒子大量堆积,进而形成严重的公路风吹雪雪阻.因此风速也是影响公路积雪深度的一个重要因素.

仅有风和雪只会形成风吹雪,其最终是否形成公路雪害,还取决于公路路基断面形式及其周边地形地貌特征.通过研究公路及其周边地形地貌下的流场特性发现,对于具有典型全路堑、背风半路堑、迎风半路堑、过高或过低的路堤横断面结构的路段和弯道绕流路段,只有当具有一定风速且风向与公路纵断面形成较大夹角时,才容易形成较为严重的风吹雪雪害.除此之外,影响公路风吹雪雪深的因素还有很多,如雪粒粒径、积雪密度、气压和太阳辐射等,不过这些因素对公路风吹雪雪深的影响相对较小.基于现场监测条件有限,本文采用着重分析主要因素、忽略次要因素的思路,将降雪量、大气温度、湿

度、风速和公路路基断面型式作为影响公路雪深的主要因素.

1.3 模型的建立

考虑到风向在公路上方及两侧小范围内一般都是相同的,且公路路基断面型式主要通过影响公路及两侧风速场分布来影响积雪深度,因此主要考虑降雪量、大气温度、风速和湿度 4 个因素对公路积雪深度的影响,在此基础上结合 BP 神经网络,以白茫雪山防雪走廊段为研究对象,通过在防雪走廊段两侧安装自动气象站获取的温度、湿度、风速和雪深资料,结合从气象局获得的降雪量数据,使用 BP 神经网络,以降雪量、大气温度、风速和湿度为输入、雪深为输出,得到雪深与降雪量、大气温度、风速和湿度的关系(即训练后的 BP 神经网络),然后用验证资料验证 BP 神经网络的泛化能力和精度(即验证后的 BP 神经网络),具体流程如图 3 所示.

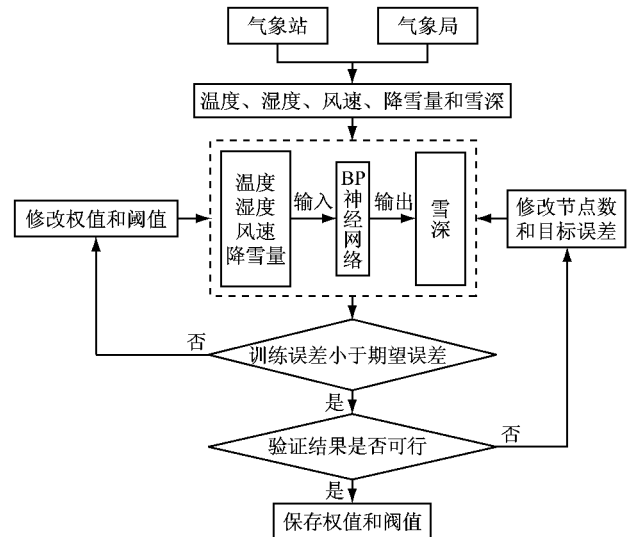


图 3 公路风吹雪雪深预测模型流程
Fig.3 Flowchart of prediction model of snow depth of snowdrift on highway

2 工程案例

2.1 工程概况

白茫雪山防雪走廊段位于海拔高于 4 000 m 的白茫雪山垭口地区,是香德公路的一小段,起始于 K129+830,结束于 K132+310,全长约 2 500 m,图 4 为研究区的航拍图.防雪走廊段总体走向为西北-东南走向,由安装在白茫雪山 1 号隧道处的自动气象站了解到该地区主导风向为西南风,因此该地区主导风向与防雪走廊段走向垂直,风雪流流经公路路面时受到的扰动较大,造成风速减小,进而导

致雪粒堆积,形成严重的公路风吹雪雪阻。

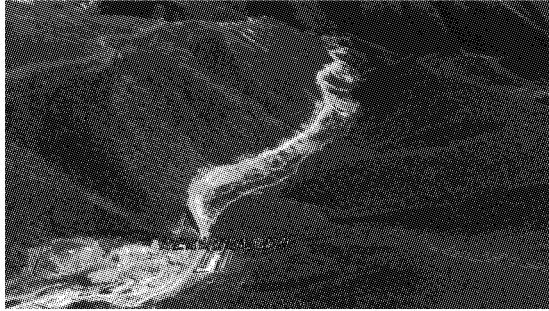


图 4 白茫雪山防雪走廊段(谷歌地球)

Fig.4 The anti snow corridor on White Snow Mountain

根据以往气象资料了解到防雪走廊段所处地区冬季寒冷,每年的 11 月份到次年的 3 月份会出现降雪天气,造成路面积雪.与此同时风引发的风吹雪会影响积雪的重新分布,如果路面设计不合理会产生严重积雪,进而产生风吹雪灾害.为了研究防雪走廊段风吹雪灾害的形成机理和雪深预测方法,在公路沿线布置 5 台自动气象站,以便实时获取现场的气象资料,如图 5 所示。



图 5 防雪走廊段沿线自动气象站

Fig.5 Automatic Weather Station along the anti snow corridor

2.2 原型观测资料的选取

防雪走廊段自动气象站每分钟记录一次温度、湿度、风速和雪深,而当地气象局提供的降雪量是以小时为单位的,因此温度、湿度、风速和积雪深度(即将 1h 内 60 组数据取平均)也以小时为单位统计,其中每小时积雪深度数据可以由该时刻的雪深值减去上一时刻雪深值获得(例如 09:00 时刻雪深减去 08:00 时刻雪深即为小时内的积雪深度值).神经网络训练和验证采用 2015. 11. 23 — 2016. 1. 8 期间 5 次降雪过程中记录的 219 组数据,为了保证所建立的模型能够充分描述雪深和温度、湿度、风速及降雪

量之间的关系,前 199 组数据被用来训练模型,最后 20 组数据用来验证所建立模型的泛化能力和预测精度.气象数据如表 1 所示。

表 1 气象资料
Tab.1 Meteorological data

数据编号	接收时间	大气温度/ ℃	大气湿度/ %	平均风 速/(m· s ⁻¹)	降雪量/ (mm· h ⁻¹)	雪深变 化量/ (mm·h ⁻¹)
1	2015-11-23 22:00:00	-1.5	30.3	0.4	0.1	2
2	2015-11-23 23:00:00	-1.9	31.7	0.3	0.2	4
3	2015-11-24 00:00:00	-2.4	33.3	0.4	0.1	2
4	2015-11-24 01:00:00	-2.6	33.8	1.0	0.2	4
5	2015-11-24 02:00:00	-2.8	35.3	0.6	0.3	6
6	2015-11-24 03:00:00	-3.2	37.5	0.6	0.2	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
217	2016-1-8 07:00:00	-10.0	71.4	0.9	0.4	7
218	2016-1-8 08:00:00	-11.2	74.3	0.7	0.5	9
219	2016-1-8 09:00:00	-11.3	75.0	0.3	0.2	4

2.3 计算模型及验证

2.3.1 神经网络的训练

由于神经网络隐藏层层数和节点数目过少则无法表达输入与输出的关系,而过多的层数则会导致网络训练结果随机性较大,网络泛化能力差.因此选取了 4 层 BP 神经网络,主要配置参数如下:①4 层节点数目分别为 4,26,26,1;②学习率为 0.1;③动量因子为 0.9;④训练目标误差设为 10⁻³,可防止过拟合的现象发生.模型误差曲线如图 6 所示,从图中可以看出该模型在迭代 32 次后训练的误差达到了 0.000 953 93,模型的训练结果较为理想。

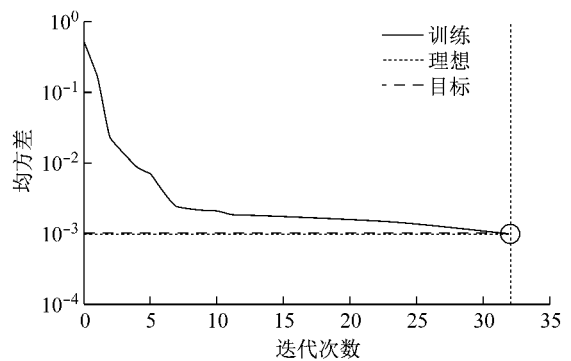


图 6 BP 算法的训练误差曲线

Fig.6 Training error curve of BP algorithm

2.3.2 模型的验证

利用已建立好的模型,选择最后 20 组数据对公路风吹雪雪深进行预测,结果如表 2 所示。

为了更好地观察模型预测结果,绘制了雪深监测值和预测值的变化曲线,具体如图 7 所示,从图中看出模型预测值和现场监测值吻合较好,通过计算

表明 85% 的雪深预测值相对误差在 20% 以内, 20 组数据的最大绝对误差仅为 3 mm, 考虑到现场条件的复杂多变, 这已经是一个比较理想的结果。

表 2 监测值与模型预测雪深结果
Tab.2 Monitoring values and model validation of snow depth results

数据编号	监测值/ (mm · h ⁻¹)	预测值/ (mm · h ⁻¹)	数据编号	监测值/ (mm · h ⁻¹)	预测值/ (mm · h ⁻¹)
200	-10	-8.6	210	7	7.9
201	2	1.9	211	12	11.4
202	2	4.1	212	9	9.7
203	3	6.0	213	8	8.0
204	5	6.5	214	8	9.4
205	8	7.0	215	10	11.4
206	10	9.6	216	7	7.8
207	10	9.7	217	7	7.0
208	6	5.7	218	9	9.1
209	7	7.5	219	4	4.1

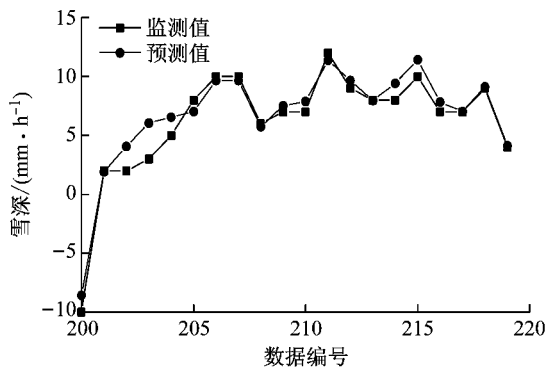


图 7 雪深监测值和预测值

Fig.7 Monitoring values and predicted values of snow depth

工程上更加关注累计雪深值而非每个小时的积雪深度, 因此累计雪深值也是一个重要的模型可行性衡量指标, 为此绘制了累计雪深监测值和累计雪深预测值的变化曲线, 具体如图8所示。由图可知随

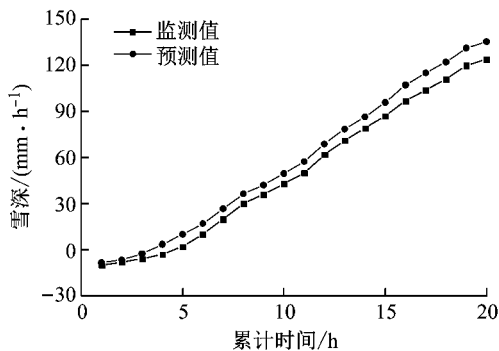


图 8 累计雪深监测值和预测值

Fig.8 Monitoring values and predicted values of cumulative snow depth

着时间的增加, 累计雪深监测值和累计雪深预测值都是逐步增大的且 2 条曲线的距离一直很近. 通过计算表明 20 h 累计雪深预测值相对误差在 10% 以内, 因此预测模型经验证合理可行, 所以可通过当地气象局提供的气象预测数据(降雪量、大气温度、风速和湿度)预测白茫雪山防雪走廊段的积雪深度, 为公路风吹雪灾害预报提供依据。

2.4 影响因素的敏感性分析

根据前文所建立的风吹雪雪深预测模型分别对降雪量、风速、气温和湿度进行敏感性分析, 来研究 4 个影响因素对公路积雪深度的影响程度. 为了使分析具有代表性, 基准值综合 5 次降雪过程中各参数出现频率最高的值和平均值来考虑, 变化范围则尽可能地包含 5 次降雪过程中各参数的值, 具体如表 3 所示。

表 3 影响因素基准值和变化范围

参数	降雪量/ (mm · h ⁻¹)	风速/ (m · s ⁻¹)	气温/ ℃	湿度/ %
基准值	0.3	1.6	-5	50
变化范围	0.1~0.6	0~4.0	-10~5	20~70

敏感性分析的思路是对其中一个参数进行分析时其他 3 个参数取基准值并保持不变, 以降雪量为例, 将降雪量分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 和 0.6 mm · h⁻¹, 风速、气温和湿度取基准值时的 6 组数据输入建立好的 BP 神经网络模型, 根据输出的雪深值即可得到雪深对降雪量的敏感性, 其他 3 个参数的敏感性分析也是如此. 图 9 为各影响因素下的雪深变化范围, 纵坐标与横坐标的交点表示 4 个参数取基准值时对应的雪深值. 其中, 降雪量对雪深的影响最大, 降雪量为 0.1 mm · h⁻¹ 时雪深 1.61 mm, 降雪量为 0.6 mm · h⁻¹ 时雪深 9.82 mm, 雪深变化幅度为 8.21 mm; 风速次之, 其影响下的雪深变幅度为 3.69 mm, 然后为气温, 对应的雪深变化幅度为 1.90 mm; 湿度对雪深的影响最小, 雪深变化幅度仅为 0.82 mm. 以降雪量影响下的雪深变化幅度为基准, 风速、气温和湿度影响下的雪深变化幅度分别为其的 45%, 23% 和 10%. 图 10 为雪深与 4 个影响因素变化量的关系曲线, 从图中可以看出雪深与降雪量成正比, 与风速、气温和湿度成反比, 且雪深与 4 个影响因素的变化量近似成线性关系, 当降雪量、风速、气温和湿度增加一个基准值时(即各影响因素变化量为 100%)雪深变化幅度近似为 4.93, -1.47, -0.63 和 -0.82 mm, 以降雪量增加一个基准值时的雪深变化幅度为基准, 风速、气温和湿度分别为其

的 30%,13%和 17%,因此各因素在相同的变化量下降雪量对雪深的影响最大,风速次之,气温最小.虽然在相同变化量下湿度对雪深的影响比气温要大,但整体上气温对雪深的影响较湿度要大.需要注意的是温度在-5℃以下时其对雪深的影响是非常小的.

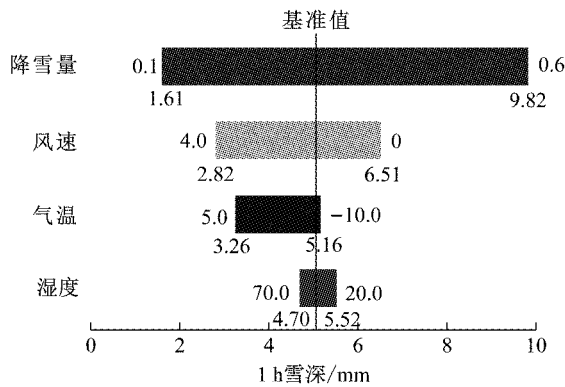


图 9 不同影响因素下的雪深变化范围
Fig.9 Snow depth range with different factors

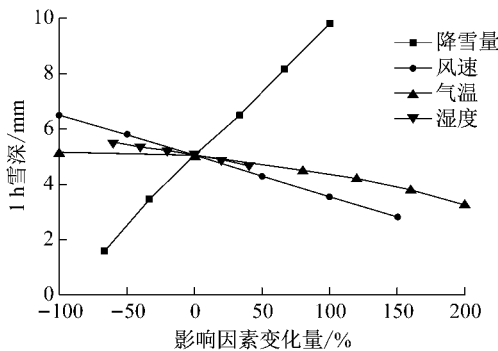


图 10 雪深与影响因素变化量关系
Fig.10 Relationship between snow depth and variation of factors

3 结论

首先分析了影响公路风吹雪雪深的主要因素,在此基础上,以白茫雪山防雪走廊段为项目依托提出了公路积雪深度的预测模型,并对雪深的影响因素进行了敏感性分析,得出了如下结论:

(1)对于一定区域内的特定路基断面型式而言,降雪量、大气温度、风速和湿度是影响公路风吹雪雪深的主要因素.

(2)提出了一种基于 BP 神经网络的公路风吹雪雪深预测模型.该模型 20 h 累计雪深预测值误差在 10%以内,表明模型具有良好的泛化能力和较高的预测精度,可与当地气象局合作预测公路风吹雪雪深,为当地公路风吹雪灾害预报提供依据.

(3)降雪量对雪深的影响最大,降雪量从 0.1 mm·h⁻¹增加到 0.6 mm·h⁻¹时雪深变化幅度为 8.21 mm;风速次之,雪深变化幅度为 3.69 mm;湿度的影响最小,雪深变化幅度仅为 0.82 mm.以降雪量影响下的雪深变化幅度为基准,风速、气温和湿度影响下的雪深变化幅度分别为其的 45%,23%和 10%.

(4)各因素在相同变化量下,降雪量对雪深的影响最大,风速次之,气温最小.以降雪量增加 0.3 mm·h⁻¹(一个基准值)时的雪深变化幅度 4.93 mm 为基准,风速、气温和湿度在相同变化量下的雪深变化幅度分别为其的 30%,13%和 17%.

(5)随着温度的上升,气温对雪深的影响越来越大,但在-5℃以下时气温对雪深的影响很小,可以忽略不计.

参考文献:

[1] 王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.
WANG Zhonglong. China snowdrift and its research of prevention[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001.

[2] 陈晓光, 李俊超, 李长林, 等. 风吹雪对公路交通的危害及其对策研讨[J]. 公路, 2001(6): 113.
CHEN Xiaoguang, LI Junchao, LI Changlin, et al. Hazards caused by snowdrift to highway traffic and discussion of countermeasures[J]. Highway, 2001(6): 113.

[3] UEMATSU T, KANEDA Y, TAKEUCHI K, et al. Numerical simulation of snowdrift development[J]. Annals of Glaciology, 1988, 13(505): 265.

[4] SATO T, UEMATSU T, NAKATA T, et al. Three dimensional numerical simulation of snowdrift[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1993(46/47): 741.

[5] THORDARSON S, NOREM H. Design criteria for roads in snow-drifting areas[EB/OL]. [2016-06-01]. http://xueshu.baidu.com/s?wd=design+criteria+for+roads+in+snowdrifting+areas&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&cl=3&ie=utf-8&bs=applicability+of+CFD+prediction+to+three-dimensional+snowdrift+around+a&f=3&rsv_bp=1&rsv_sug2=0&sc_f_para=sc_tasktype%3D%7BfirstSimpleSearch%7D&rsv_spt=3&rsp=0.

[6] YAMADA T, ITO Y, MATSUZAWA M, et al. Development of an advanced collector snow fence for high embankment road and its effect[J]. Journal of Snow Engineering of Japan, 2008, 24(4): 260.

[7] 王中隆, 李长治. 艾肯达坂风雪流形成机制及其治理[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 105.
WANG Zhonglong, LI Changzhi. The formation mechanism of snow drift in aiken daban and its control[J]. Journal of Desert Research, 1995, 15(2): 105.

[8] 魏江生, 张贵平, 董智, 等. 影响草原牧区公路风吹雪雪的

- 因素分析[J]. 公路, 2005(8): 159.
- WEI Jiangsheng, ZHANG Guiping, DONG Zhi, *et al.* Analysis of effect of drifting snow disasters on highways in grassland pastoral area[J]. Highway, 2005(8): 159.
- [9] 席建锋. 公路风吹雪雪害形成机理及预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- XI Jianfeng. Research on the mechanism and forecast of highway snowdrift hazard[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [10] 席建锋, 李江, 朱光耀, 等. 公路风吹雪积雪力学原理与积雪深模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(S2): 152.
- XI Jianfeng, LI Jiang, ZHU Guangyao, *et al.* Hydromechanical mechanism of road snowdrift deposit and its depth model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(S2): 152.
- [11] 应成亮. 公路风吹雪雪害防治技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- YING Chengliang. Research on the countermeasures of the blowing snow hazards on highways [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [12] TABLER R D. Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design[R]. Niwot: Tabler and Associates, 2003.
- [13] TABLER R D. Design guidelines for the control of blowing and drifting snow [M]. Washington D C: National Research Council, 1994.
- [14] TSUCHIYA M, TOMABECHI T, HONGO T, *et al.* Wind effects on snowdrift on stepped flat roofs[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (12-15): 1881.
- [15] 张林林. 公路风吹雪雪害仿真技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- ZHANG Linlin. Research on snowdrifts and snow disaster simulation technology of road [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [16] BEYERS J H M, SUNDSBØ P A, HARMS T M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2004, 92(9): 725.
- [17] BEYERS M, WAECHTER B. Modeling transient snowdrift development around complex three-dimensional structures[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11): 1603.
- [18] TOMINAGA Y, OKAZE T, MOCHIDA A. CFD modeling of snowdrift around a building: An overview of models and evaluation of a new approach [J]. Building & Environment, 2011, 46(4): 899.
- [19] TOMINAGA Y, OKAZE T, MOCHIDA A, *et al.* Applicability of CFD prediction to three-dimensional snowdrift around a cubic building model[EB/OL]. [2016-06-01]. [http://xueshu.baidu.com/s?wd= paperuri= 3A%282cf85ba4e2cba3e1ba84191985edfd07%29&filter=sc_long_sign&sc_ks_para=q%3DApplicability%20of%20CFD%20prediction%20to%20three-dimensional%20snowdrift%20around%20a%20cubic%20building%20model&us=17449194344691972917&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8](http://xueshu.baidu.com/s?wd=&paperuri=3A%282cf85ba4e2cba3e1ba84191985edfd07%29&filter=sc_long_sign&sc_ks_para=q%3DApplicability%20of%20CFD%20prediction%20to%20three-dimensional%20snowdrift%20around%20a%20cubic%20building%20model&us=17449194344691972917&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8).
- ~~~~~
- (上接第 713 页)
- [9] KERNER B S, DEMIR C, HERRTWICH R G, *et al.* Traffic state detection with floating car data in road networks[C]//Proc. IEEE Int'l Conf Intelligent Transportation Systems (ITS 05). [S. l.]: IEEE Press, 2005: 44-49.
- [10] 徐建闽, 邹亮. 浮动车与感应线圈检测技术融合模型[C]//第二十四届中国控制会议论文集(下册). [S. l.]: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2005: 1288-1291.
- XU Jianmin, ZHOU Liang. Fusion model from probe vehicle and loop detector [C]//Twenty-fourth Chinese Control Conference (Volume II). [S. l.]: Chinese Association of Automation Control Theory Professional Committee, 2005: 1288-1291.
- [11] 邹亮, 徐建闽, 朱玲湘. 基于融合技术的道路交通状态判别模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007(2): 1822.
- ZHOU Liang, XU Jianmin, ZHU Lingxiang. Estimation model of road traffic state based on fusion technology [J]. Tsinghua University Journal (Natural Science), 2007(2): 1822.
- [12] 张存保, 严新平. 固定检测器和移动检测器的交通信息融合方法[J]. 交通与计算机, 2007, 25(3): 14.
- ZHANG Cunbao, YAN Xinping. Fusion method of traffic information of fixed detectors and mobile detectors [J]. Computer and Communications, 2007, 25(3): 14.
- [13] 王春娥. 基于数据融合的城市道路交通状态估计算法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- WANG Chune. Estimation algorithm based on data fusion of urban road traffic state [D]. Jinlin: Jinlin University, 2008.
- [14] 皮晓亮, 王正, 韩皓, 等. 基于环形线圈检测器采集信息的交通状态分类方法应用研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 115.
- PI Xiaoliang, WANG Zheng, HAN Hao, *et al.* Application research of traffic state classification method based on collected information from loop detector [J]. Highway and Transportation Research, 2006, 23(4): 115.
- [15] 姜桂艳, 郭海锋, 吴超腾. 基于感应线圈数据的城市道路交通状态判别方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(增刊): 37.
- JIANG Guiyan, GUO Haifeng, WU Chaoteng. Identification method of urban road traffic state based on inductive coil data [J]. Jilin University Journal (Engineering Science), 2008, 38 (Sup.): 37.
- [16] LIU H, MA W, WU X, *et al.* Real-time estimation of arterial travel time under congested conditions [J]. Transportmetrica, 2009, 8(2): 87.
- [17] THOMAS K, DIA H, COTTMAN N. Simulation of arterial incident detection using neural networks [C]//8th World Congress on Intelligent Transport Systems. Sydney: [s. n.], 2001: 1-8.
- [18] 曲昭伟, 魏强, 别一鸣, 等. 基于固定检测器的区域交通状态判别方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 403.
- QU Zhaowei, WEI Qiang, BIE Yiming, *et al.* Method for traffic state identification based on fixed detector [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(1): 403.