文章编号：1006－4362(2023)01－0090－05

公路隧道入口风吹雪灾害特性与防治研究

李响
（中兵勘察设计研究院有限公司，北京 100053）

摘要： 对公路隧道洞口处的风吹雪雪害进行防治有利于保障公路的正常通行。新疆地区的风吹雪是国内极具代表性的雪害，以乌鲁木齐至尉犁段高速公路（简称“乌尉高速”）天山胜利隧道北洞口路段风吹雪灾害易发点为研究对象：(1)进行现场勘察，测定隧道洞口处0 cm，5 cm，10 cm，15 cm，20 cm，25 cm共6个深度雪样的密度，计算对应深度雪粒子的起动风速；(2)利用隧道洞口附近建立的长期气象观测站的多期风速、风向、积雪量等数据，研判风吹雪灾害的发生概率和变化趋势；(3)根据分析结果，建议合理选择洞门形式、设置导风板、储雪沟等防雪设施，最大程度上降低灾害的发生概率。论文的研究成果将有助于降低乌尉高速的天山胜利隧道在建设和运营过程中遭受风吹雪灾害的概率。

关键词： 公路；隧道入口；雪流调查；防雪漂
中图分类号： P429；U459.2 **文献标识码：** A

RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS AND PREVENTION OF THE SNOW DRIFT DISASTER AT THE ENTRANCE OF HIGHWAY TUNNELS

LI Xiang
(China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., LTD., Bejing 100053, China)

Abstract: The prevention and control of snow drift at the entrance of highway tunnel is beneficial to ensure the normal passage of highway. The snow drift in Xinjiang is a representative snow disaster in China. Taking the snow drift prone points in the north tunnel section of the Tianshan Shengli Tunnel from Urumqi to Yuli Expressway (“Wuyu Expressway”) as the research object: 1) The site survey was conducted to measure the density of the six depths of snows at the north entrance of the tunnal: 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, and the starting wind speed of snows in corresponding depth is calculated; 2) The multi-phase wind speed, wind direction and snow volume from the established long-term meteorological observation station near the tunnel entrance are used to study and judge the occurrence probability and trend of the snow drift disasters; 3) According to the analysis results, it is recommended to reasonably choose the snow protection facilities, such as the type of tunnel doors, wind deflector, snow storage ditch to minimize the probability of disasters. The research results will help reduce the probability of the snow drift during the construction and operation of the Tianshan Shengli Tunnel on Wuyu Expressway.

Key words: highway; tunnel entrance; the snow drift investigation; the snow drift prevention

收稿日期： 2022-05-23 **改回日期：** 2022-08-13

风吹雪灾害主要分布在我国的东北、西北和西南地区[1-2]，每年都会造成道路阻塞，交通拥堵，甚至造成人员伤亡。近几十年来，国内外学者对风吹雪的特征和防治措施进行了许多研究。关于风吹雪特征研究，XiaoHui Lü 等[3](2012)进行风洞试验测量了天然新雪和旧雪的速度分布特征；Shouyun Liang 等[4](2010)进行数值模拟，分析了路堤路面宽度、高度和坡率对风雪流速度的影响；席建锋等[5](2006)探讨了不同的空气速度场对雪粒运动的影响；魏建军等[6](2008)、柳春红等[7](2003)、张家平等[8](2008)对黑龙江省易受雪害影响的公路进行现场观测和统计，分析了不同路基断面风吹雪灾害的形成原因；施佳誉等[9](2020)对白茫雪山防雪走廊段公路的雪深进行监测，以此来分析雪阻的分布规律。

关于风吹雪防治研究，Alexander Prokop[10](2016)通过分析空间积雪深度图等方式来综合判断积雪的堆积模式，据此调整防雪栅栏的结构和布置方式；Peter D. Blanken[11](2009)设计了一种活动防雪栅栏用于美国科罗拉多公园内公路的风吹雪灾害预防，发现当防雪栅栏高 1.61 m，距离道路 56.4 m，且孔隙率为 50% 时，防雪效果最好；吴鹏[12](2019)结合新疆公路的风吹雪特点，介绍了挡雪墙、防雪栅栏、导风板、防雪林这 4 种防雪设施并给出相应参数的确定方法；房华[13](2014)针对 S229 线吉木乃至黑山头段和 S319 线吉木乃至吉木乃口岸段的公路风吹雪雪害，给出了不易遭受雪害的路基施工参数；徐茂祥[14]和王初一[15](1987)分别针对新疆伊犁地区和天山地区的公路风吹雪，运用下导风设施和修建土石方工程来治理雪害；李楚鹏等[16](2015)运用 Fluent 软件进行数值模拟，得到当挡雪板透风率为 25%，距路肩 50 m 时的防雪效果最好；武鹤等[17](2008)研究了不同高度和透风率防雪栅栏的阻雪效果；高卫东等[18](2004)分析了铁路风吹雪路段路堤和路堑的设计参数和风吹雪害的治理原则。

目前的研究主要集中于风速、风向、雪深、路基断面形式对风吹雪灾害形成的影响上，而雪粒本身的粒径和密度等性质对雪害的发生也有重要影响，当前对这一方面的研究不足；研究范围也大多围绕路堤和路堑，而对隧道洞口处受风吹雪灾害影响的研究较少；研究方法通常仅限于现场观测、风洞试验、数值模拟 3 种，研究手段不足；提出的防雪栅栏、挡雪墙等防雪措施与实际工程结合较少，且并不适用于所有路段。本次以乌尉高速的天山胜利隧道北洞口路段为研究对象，测量隧道口处不同深度的积雪密度，并由此计算风吹雪的起动风速，对隧道口范围内的风向、风速、积雪量等数据进行统计和综合分析；根据前面的研究结果结合工程实际，提出有针对性的防治措施。

1　工程概况

G0711 乌鲁木齐至尉犁段高速公路(以下简称“乌尉高速”)位于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐县及巴音郭楞蒙古自治州和静县境内(图 1)，是连接南北疆的国家战略性通道、重要的资源通道和国防通道。天山胜利隧道穿越天山主脉，长约 22 km，是本项目关键控制性工程，总体走向 SW，2017 年开始修建，该隧道建成后将成为世界上最长的高速公路隧道。根据前期的现场调查，隧道北洞口路段位于高寒山区的狭窄沟谷，受区域气象条件影响，冰雪灾害对公路运营造成较大影响。因此，调查隧道北洞口风吹雪情况，并研究采取相应治理措施，对保障本项目全天候畅通和行车安全意义重大。

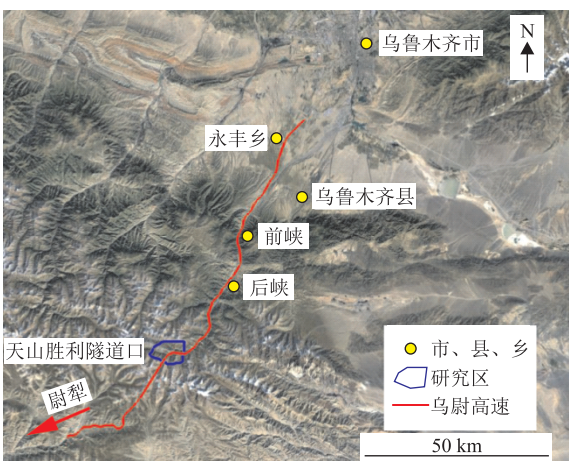

图 1　乌尉高速越岭段路线走向图

2　天山胜利隧道北洞口风雪害特性研究

2.1　雪粒起动风速

根据王中隆[19-20]等(1982)的研究，在气温相同的情况下，雪粒子的起动速度主要与雪粒粒径和积雪密度相关。起动风速与积雪密度之间的关系如式 1 所示。

$$V = 3.123 + 11.99\rho + 0.013\ 5e^{12.08\rho} \quad (1)$$

式中，V 为雪粒子起动风速；ρ 为积雪密度。

课题组于 2019 年 12 月 28 日(降雪两天后)对天山胜利隧道口分别在 0 cm，5 cm，10 cm，15 cm，

20 cm,25 cm 共 6 个深度下取雪样测定积雪密度,以确定雪粒子的起动风速,如表 1 所示。

由表 1 可知,隧道洞口处的最小雪粒密度为 0.10 g/cm^3,最大雪粒密度为 0.18 g/cm^3,因此由式 1 可计算出天山胜利隧道口处雪粒的最小起动风速为 4.77 m/s,最大起动风速为 6.47 m/s。这意味着在一次降雪过程中,当风速大于 4.77 m/s 时,地表的雪粒子就会被吹起,当风速大于 6.74 m/s 时,大风将能带起相当一部分量的积雪。若这些雪堆积在隧道口或路面上,就会掩埋路面,阻塞交通。值得注意的是,随着测量深度的增加,各点的积雪密度均有增大的趋势,这可能是由于下层雪的堆积时间较长,在压实作用和冻融作用下雪体的含水量增加、雪粒之间的粘滞力增大而造成。

2.2 风速与风向

课题组利用在天山胜利隧道北洞口附近建立的长期气象观测站的相关观测数据,对 2014～2015 年的年均风速、最大风速、年主导风向和年主导风向频率进行统计,数据见表 2 所示。

表 1 天山胜利隧道北洞口不同深度积雪密度

深度/cm	0	5	10	15	20	25	最大密度	最小密度
天山胜利隧道口处积雪密度/g·cm^{-3}	0.11	0.11	0.10	0.13	0.16	0.18	0.18	0.10

表 2 2014 年和 2015 年隧道北洞口处风速风向统计

年份	海拔/m	年均风速/m·s^{-1}	最大风速/m·s^{-1}	年主导风向 1	年主导风向 1 频率/%	年主导风向 2	年主导风向 2 频率/%	年主导风向 3	年主导风向 3 频率/%
2014	2 997	2.00	15.44	SSW	15.2	SW	25.5	WSW	12.8
2015	2 997	2.00	12.55	SSW	14.19	SW	23.88	WSW	13.59

根据表 2 中数据绘制 2014 年和 2015 年度的风玫瑰图,如图 2、图 3 所示。

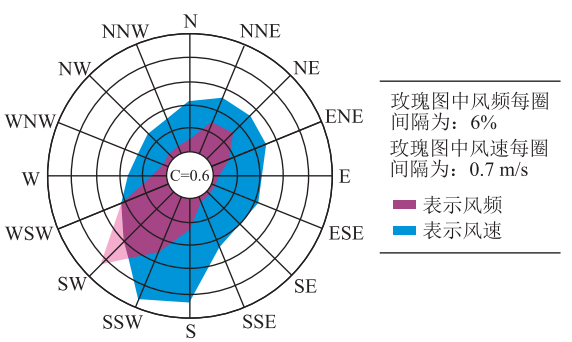

图 2 隧道口路段 2014 年风玫瑰图

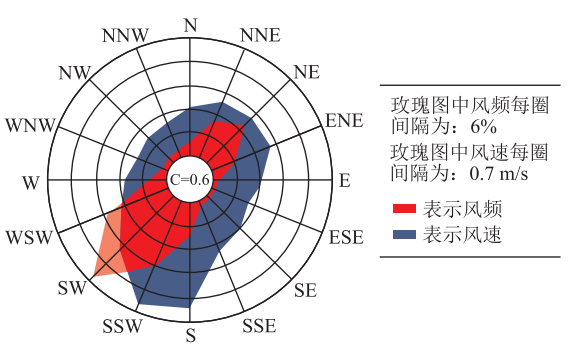

图 3 隧道口路段 2015 年风玫瑰图

由表 2、图 2、图 3 可知,研究路段 2014～2015 年的年平均风速为 2.0 m/s,最大瞬时平均风速为 14.0 m/s,集中在降雪期间,远超 2.1 节中计算的雪粒临界起动风速,同时主导风向和最大风速风向基本一致,与隧道口走向平行。对于路堤和半路堑而言,线路走向与主导风向平行一般不会造成雪害,而对于隧道口却不同[21],风从隧道后方吹来,在到达隧道口顶部时由于断面突然增大,导致附面层分离,并在隧道口顶部形成漩涡减速区,此时大风携带的雪粒就有可能在此堆积,在隧道口上方形成“雪檐”,随着风吹雪过程的进行,雪粒最终会掉落到隧道口前方的路面上,可能形成雪害。

2.3 积雪量

同样引用观测站所提供的观测数据,统计 2014 年和 2015 年隧道口的月积雪量和累计积雪量,见表 3 所示。

由表 3 数据可知隧道口路段积雪量的最大值集中在每年的 3～5 月和 9～11 月,2014 年分别为 13～41 cm、6～15 cm,2015 年分别为 17～37 cm、2～17 cm。占到总积雪量的 88.6%和 80.4%,占比非常大,由 2.2 节中的分析可知隧道北洞口段已具备发生风吹雪的风速和风向条件,且在并行线 G216 线的对应位置几乎每年都会因此形成风吹雪害,严重时甚至会直接封山,由此推断当隧道修建完成后,这几个月也是风吹雪的高发期,应特别引起注意。另外观察到 2015 年的累计积雪量要大于 2014 年,且天山地区近几十年来的冬季积雪日数呈上升趋势[22-24],受全球和区域气候条件的变化影响,降雪量存在周期性变化,应增强冬季风吹雪灾害的防范意识。

表 3　2014 年和 2015 年隧道北洞口路段月积雪量和累计积雪量(cm)

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	累计
2014	0.5	1.0	13.2	41.0	36.9	13.3	0	0	9.8	14.5	6.0	0.8	137.0
2015	1.5	2.1	17.8	36.5	35	10	0	11.5	16.3	8.5	2.5	3.3	145.0

3　天山胜利隧道口风雪害防治研究

3.1　天山胜利隧道口防雪设计建议

根据前面的分析，天山胜利隧道口处的主导风向与隧道走向平行，风速均大于雪粒的起动风速，在达到隧道口顶部时可能产生漩涡减速区，容易形成风吹雪。考虑到隧道口位于陡峭沟谷内，易发生高位崩塌落石，影响行车安全。针对这些情况，参考前人的设计经验[21,25-26]，防雪设施的类型和具体布设方案如下：

(1) 隧道洞门设计采用防雪棚洞式洞门，设置加长棚洞形成防雪走廊，这样既可以降低风吹雪灾害的发生概率，又可以避免崩塌和落石灾害。

(2) 在隧道口上风侧利用自然地形，可形成垂直于风向的储雪沟，防止雪粒堆积到路面上。

(3) 在洞口上风侧设置多道侧导风板，导风板与主风向夹角范围应为 90°～150°，且导风板距离洞口至少应在 10 m 以上。

(4) 隧道洞口前方道路两侧护栏采用不易积雪的缆索护栏，在护栏外两侧设置积雪标杆，中央隔离带处设置透风型防眩板以提高积雪严重时视认性。

3.2　其他防雪设施

除了上面介绍的几种防雪设施外，对车辆进行主动引导也极为重要，因此在风吹雪路段前应提前设置警示标志，内容为告知驾驶员风吹雪路段的起终点，提醒驾驶员谨慎驾驶，标明风吹雪灾害的救援电话，在路面上标出限速标志等；同时在风吹雪灾害易发季节，准备除雪使用的除雪车、车载式雪犁、清障车和其他救援养护车辆等，保证道路发生雪阻时能及时重新开通，有车辆发生事故时能第一时间进行救援。

4　结论

新疆地区的风吹雪是国内极具代表性的雪害，本文以拟建乌尉高速天山胜利隧道北口处风吹雪灾害易发点为研究对象，通过研究得出：

(1) 天山胜利隧道北洞口处的积雪在 25 cm 深度范围内，雪粒的最小起动风速为 4.77 m/s，最大起动风速为 6.47 m/s；降雪期间的最大瞬时风速已超过雪粒子起动风速，主导风向与隧道走向平行，容易发生风吹雪，本年 11 月～次年 2 月发生概率最大。

(2) 对于防治隧道洞口处风吹雪雪害，洞门采用加长防雪棚洞形成防雪走廊；洞口上风侧设置储雪沟和多道导风板，导风板与主风向夹角为 90°～150°，距离隧道洞口 10 m 以上；路侧采用缆索护栏，中央隔离带设置透风型防眩板；路侧或路面上设置主动引导标志，准备除雪设备与救援车辆。

参考文献

[1] 王中隆，张志忠. 中国风吹雪区划[J]. 山地学报，1999，17(4)：312-317.

[2] 胡汝骥，魏文寿. 试论中国的雪害区划[J]. 冰川冻土，1987，9(S1)：1-12.

[3] L(U) Xiao Hui，HUANG Ning，TONG Ding. Wind tunnel experiments on natural snow drift [J]. Science China Technological Sciences，2012，55(4)：927-938.

[4] Shouyun Liang，Xiangxian Ma，Haifeng Zhang. Numerical Simulation of Snow Drifting Disaster on Emban km ent Project [J]. 2010，5(1)：139-143.

[5] 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)：152-156.

[6] 魏建军，武鹤，吴辰龙. 公路路基断面形式与路基高度对风吹雪灾害形成的影响分析[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版)，2008，22(2)：4-6.

[7] 柳春红，张俊杰，于秀娟. 关于公路风吹雪的流场结构与积雪规律的探讨[J]. 鸡西大学学报，2003，3(3)：70-72.

[8] 张家平，武鹤，孟上九，等. 黑龙江省公路风吹雪灾害形成机理与分布特征[J]. 自然灾害学报，2008，17(3)：130-133.

[9] 施佳誉，徐冬英，夏才初，等. 公路风吹雪雪阻分布规律及雪灾形成机理研究[J]. 公路，2020，65(1)：257-264.

[10] Prokop，Alexander，Procter，Emily S.. A new methodology for planning snow drift fences in alpine terrain [J]. Cold regions science and technology，2016，132(Dec.)：33-43.

[11] Peter D. Blanken. Designing a Living Snow Fence for Snow Drift Control [J]. Arctic，Antarctic，and Alpine Research，2009，41(4)：418-425.

[12] 吴鹏. 新疆公路风吹雪雪害防治措施的研究[J]. 西部交通科技，2019，14(6)：54-57.

[13] 房华. 雪害地段路基施工技术[J]. 交通标准化，2014，42(14)：64-66.

[14] 徐茂祥. 新疆伊犁地区公路雪害治理(摘要)[J]. 冰川冻土，1987，9(S1)：25-26.

[15] 王初一,王中隆,陈世功. 天山公路防风吹雪土石型工程及其效应[J]. 冰川冻土,1987,9(S1):40-42.
[16] 李楚鹏,陈芳,高崇. 基于 Fluent 的挡雪板设置方式研究[J]. 交通科技与经济,2015,17(5):107-110.
[17] 武鹤,朱光耀,魏建军,等. 防雪栅在公路风吹雪雪害防治中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报,2008,22(1):23-25.
[18] 高卫东,刘明哲,魏文寿,等. 铁路沿线雪害形成机制及其工程防治措施[J]. 自然灾害学报,2004,13(5):90-96.
[19] 王中隆,白重瑗,陈元. 天山地区风雪流运动特征及其预防研究[J]. 地理学报,1982,37(1):51-64.
[20] 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.
[21] 王中隆,潘遐华,刘贤万. 路堑和隧道风雪流的风洞模拟实验研究[J]. 地理学报,1988,43(3):265-273.
[22] 王春学,李栋梁. 中国近 50a 积雪日数与最大积雪深度的时空变化规律[J]. 冰川冻土,2012,34(2):247-256.
[23] 王澄海,王芝兰,沈永平. 新疆北部地区积雪深度变化特征及未来 50a 的预估[J]. 冰川冻土,2010,32(6):1059-1065.
[24] 徐兴奎. 1970～2000 年中国降雪量变化和区域性分布特征[J]. 冰川冻土,2011,33(3):497-503.
[25] 张威伟. 隧道口及公路防风雪研究[D]. 武汉理工大学,2006.
[26] 张家平. 黑龙江省公路风吹雪灾害时空分布与防治技术研究[D]. 长安大学,2012.

作者简介： 李响(1996－),男,北京人,硕士,研究方向:从事岩土工程勘察和施工方面研究。E-mail:xiangli_146@163.com