中国西北三省(区)风雪流发生的可能性

张 帅[1,2], 丁国栋[1,2], 赵媛媛[1,2], 高广磊[1,2], 于明含[1,2], 包岩峰[3]

(1. 北京林业大学 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持学院 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 3. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

摘 要: [目的] 揭示新疆、内蒙古和甘肃西北 3 省(区)风雪流发生的可能性,为风雪灾害防治提供理论依据。[方法] 利用 1981—2010 年 3 省(区)130 个区站地面气象资料,划分风雪流发生可能性等级。[结果] ①研究区 65.4%的地区有发生风雪流灾害的可能性,其中 16.9%的地区发生风雪流可能性的等级较高; ②研究区风雪流灾害最严重的月份为 3 和 12 月,少数地区受地形影响有所差异; ③研究区 30 a 间气象数据在一定范围内波动,风雪灾害发生可能性没有减弱趋势。[结论] 西北 3 省(区)需重视风雪灾害防治,尤其是 3 和 12 月应重点防护;同时要加强生态修复工作,降低风雪灾害。

关键词: 风速; 风向; 风雪流; 可能性

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)05-0034-06 **中图分类号**: X43

文献参数: 张帅, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 中国西北三省(区)风雪流发生的可能性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 34-39. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.006. Zhang Shuai, Ding Guodong, Zhao Yuanyuan, et al. Probability of snowstorm disaster in three provinces in Northwest China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 34-39.

Probability of Snowstorm Disaster in Three Provinces in Northwest China

ZHANG Shuai[1,2], DING Guodong[1,2], ZHAO Yuanyuan[1,2], GAO Guanglei[1,2], YU Minghan[1,2], BAO Yanfeng[3]

(1. *Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2. *Yanchi Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 3. *Institute of Desertification, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*)

Abstract: [Objective] To reveal the probability of snow flow in the three northwestern provinces(Xinjiang, Inner Mongolia and Gansu), in order to provide a theoretical basis for disaster prevention and control of snowstorm disasters. [Methods] We used the ground meteorological data from 130 district stations from 1981 to 2010, to classify the probability level of snow flow. [Results] ①In the study area, 65.4% of the regions have the probability for snowstorm disaster, of which 16.9% had a higher level probability for snowstorm disaster. ② The most severe months of snowstorm disaster were March and December, and few areas were affected by terrain. ③ The meteorological data of the study area fluctuated within a certain period during the past 30 years, but the probability of snowstorm disasters was not decreased. [Conclusion] The three provinces in Northwest China should pay attention to the prevention and control of snowstorm disasters, especially in March and December. Meanwhile, ecological restoration should be strengthened to reduce the snowstorm disasters.

Keywords: **wind speed; wind direction; snow flow; probability**

雪害是现今世界所面临的十大灾害之一[1],风吹雪或称风雪流是雪害的重要组成部分,对降雪以及积雪起着重新分配的作用[2-3]。当风力达到一定的强度,雪粒被搬运,输移,随风一起运动便形成了风雪

收稿日期: 2018-05-10 **修回日期**: 2018-05-23

资助项目: 国家自然科学基金项目"西北干旱区城镇风雪灾害防护林格局及结构优化配置"(31270749); 国家自然科学基金"梭梭人工林配置结构对防风固沙效果的影响及机理"(31600581); 国家重点研发计划项目(2017YFC0506705)

第一作者: 张帅(1991—),男(汉族),山东省聊城市人,博士,研究方向为荒漠化防治。E-mail: xxwoshizsxx@163.com。

通讯作者: 丁国栋(1963—),男(汉族),内蒙古自治区赤峰市人,博士,教授,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: dch1999@263.net。

流[4]。风雪流是气流挟带着分散雪粒的非典型两相流[5]。风雪流的研究与防治是一个综合性的研究领域,同气象、地形地貌、环境等多方面都有密切的联系[6-7]。针对风雪流的研究能揭示风雪运动规律,减轻风雪灾害,促进风雪灾害区的生产发展。国外在20 世纪 30 年代就已经开始了对风雪流的研究,50—60 年代研究的主要内容是风雪流的基本规律和理论;70 年代至今,对风雪流的研究深入到发生机理;目前国外研究风雪流的机理特征的主要方法是数学模型法[8]。中国在建国初期基于国防建设需要,开始了对风雪流的研究;在 20 世纪 70 年代后,风雪流作为灾害防治的一个研究领域,得到了快速的发展,在风吹雪形成的物理过程、中国雪害区划、分布规律以及灾害的防治等方面都有了详细的研究[9-11]。现有研究建立了众多风吹雪模型,分别讨论了温度、积雪时间、与雪粒粒径对启动摩阻风速的影响,分析了不同雪粒形状对风雪流过程的影响[12-14],但是基于数值模拟的模型研究都是以跟踪单颗雪粒的运动为基础,在平坦床面上建立的一维模型,且雪粒被简化为规则球体的微观分析;王中隆[15]对风吹雪地区的划分主要基于野外观测调查,对于宏观尺度风雪流发生的预测研究较少。风雪流的发生及其差异是气候、地形、人为等多因素综合作用的结果[16],其形成过程需要有丰富的降雪或积雪,同时还需要一定的风力,2 个条件缺一不可,因此风速和雪是影响风雪灾害最重要的两个因素[17]。本研究拟从气象资料入手,分析风雪流形成的条件,在宏观尺度上对风雪流发生可能性进行等级划分。分析气象数据,考量风雪流形成条件,研究风雪流发生可能性,以期为北方地区防治风雪灾害提供理论依据和参考。

1　材料与方法

1.1　研究资料

本研究选取中国新疆、内蒙古、甘肃 3 省有气象资料记录的区站,采集 1981—2010 年 30 a 间的地面气象数据资料。由于风雪流灾害多发生在每年的冬春季节,所以对 1,2,3,10,11,12 这 6 个月的数据进行分析。气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网,区站数共计 130 个。

风雪流的产生需要 2 个必要因素,风力条件是风雪流发生的动力基础,降雪或积雪是风雪流发生的物质基础,因此本研究从风雪流产生的 2 个条件入手,分析各区站气象资料的风速及降雪状况,认为有降雪或存在积雪的地区日平均风速达到起动风速时,便存在着风雪流发生的可能性。

1.2　等级划分方法

风雪流根据风速、雪颗粒的吹扬高度可划分为低吹雪(风速 5～8 m/s)、高吹雪(风速 8～10.7 m/s)、暴风雪(风速＞10.8 m/s)3 个类别[18],风速的大小在一定程度上决定了风雪灾害的严重程度,因此根据风速来划分各区站发生风雪灾害可能性的初始等级:5～8 m/s(和风)为第 1 等级;8～11 m/s(清风)为第 2 等级;＞11 m/s(强风)为第 3 等级。Tominaga 等[19]通过野外观测得出的经验公式表明,长时间的起风天气会加剧风雪流的灾害,因此统计各区站平均每月达到风雪流发生条件的天数,并分析各区站发生风雪灾害前后的气象资料,研究持续性的过境风对风雪流发生的影响,结合野外雪面吹蚀状况,设定每超过 5 d,初始等级上调 1 级,超过 10 d 即上调 2 级,以此类推。

通过对各区站的等级评价来分析风雪流灾害发生可能性在空间上的分布,并分析其在时间尺度上的变化趋势。同时参考中国森林分布,对存在林网的区站进行调查,认为在有森林分布的区域,即使达到风雪流发生的条件,如果没有发生过风雪灾害,则表明林网的防护作用较强,在将来也不会发生风雪灾害。由于区站数量较多,因此结果与分析中在每个省份有风雪流发生可能性的区站中各随机选取 3 个区站和受地形影响较大的特殊区站阿拉山口作为代表区站进行分析。

2　结果与分析

2.1　风雪流的地域分布

根据风雪灾害发生可能性的等级划分标准将 130 个区站进行等级评定,结果如表 1 所示,有 85 个区站约占 65.4%的地区存在发生风雪流的可能性。通过分析各区站的经纬度可以发现,内蒙古几近全境都有发生风雪流灾害的可能,新疆主要集中在北部和东部,甘肃省主要集中在西部;包括新疆中部和南部以及甘肃东部在内的 34.6%的区域几乎不存在风雪流发生的可能性。

表 1　西北 3 省(区)风雪流发生可能性各等级区站数

省份	区站数					
	0	1	2	3	4	合计
甘肃	15	10	2	2	0	29
内蒙古	0	34	9	2	2	47
新疆	30	19	1	1	3	54
合计	45	63	12	5	5	130

甘肃省地处黄河上游，连接黄土高原、青藏高原、内蒙古高原，其中中部和东部共计51.7%的区域都没有受到风雪流灾害的威胁，有风雪流发生可能性的区域集中分布在甘肃西部，少数分布在东南地区，受祁连山的影响海拔较高，高山积雪会加大风雪灾害。内蒙古纬度较高，气候寒冷，几乎全境都有风雪流灾害发生的可能性，比较严重的区域如朱日和等都位于内蒙古中部阴山山脉的北麓，主要影响因素是地形，阴山积雪会加大风雪灾害；其他地区气候较干燥，降雪较少，风雪流灾害相对较弱，主要受到气候的影响；东北地区虽然达到风雪流发生的条件，但由于森林分布较广，对风雪流起到很强的防护作用，所以基本上不会受到风雪灾害的威胁。

新疆地处大陆内部，气候干燥，境内半数地区不存在风雪流灾害的威胁，有风雪流发生可能性的地区集中在阿尔泰山及天山附近的绿洲盆地，气候相对湿润，少数区域在昆仑山西麓；山脉之间的沙漠地区由于气候干燥，降雪和积雪都极少，部分绿洲均有植被分布，因此不会发生风雪流灾害。

2.2 风雪流的季节变化

从新疆、甘肃、内蒙古各选取3个满足风雪流发生条件的典型区站以及受地形影响较大的阿拉山口区站作为代表，分析各月份30 a来的平均风速，以及达到风雪流发生条件的天数(表2)。从表2中可以看到，各区站平均每月达到风雪流发生条件的天数最多的月份集中在3,11,12月；平均风速最大的月份在3,12月。阿拉山口各月的平均风速相对稳定，且高于大多数区站，这是由于阿拉山口靠近风源地，水平气压梯度大，极易起风，且阿拉山口地势狭长，过境气流由开阔地带进入狭窄区域时，由于空气质量不能大量堆积，势必加速流出峡谷，形成狭管效应，增大了过境风速。

表2 研究区各区站达到风雪流发生条件的天数及平均风速

气象站	1月		2月		3月		10月		11月		12月	
	天数/d	平均风速/(m·s^{-1})	天数/d	平均风速/(m·s^{-1})	天数/d	平均风速/(m·s^{-1})	天数/d	平均风速/(m·s^{-1})	天数/d	平均风速/(m·s^{-1})	天数/d	平均风速/(m·s^{-1})
阿拉山口	4.5	8.2	7.4	8.7	15.9	8.6	12.2	8.9	10.6	8.4	7.0	7.9
达坂城	20.5	8.1	15.1	7.2	16.9	7.6	11.8	7.5	16.8	7.5	21.3	8.4
哈巴河	13.4	7.1	9.9	6.7	7.8	6.5	6.2	6.3	10.7	6.5	13.3	7.0
十三间房	6.1	9.1	10.3	9.5	18	9.8	14.3	9.1	9.4	9.5	6.8	8.9
华家岭	7.4	6.1	9.5	6.4	14.3	6.7	11.1	6.4	9.6	6.1	8.8	6.1
马鬃山	9.0	6.8	7.9	6.4	10.7	6.3	8.7	6.3	11.8	6.7	10.7	7.3
乌鞘岭	12.2	6.3	14.6	6.7	19.3	7.0	13.2	6.4	11.9	6.5	12.6	6.5
海力素	17.9	6.3	15.3	6.5	17.5	6.8	15.6	6.3	18.9	6.5	18.7	6.5
满都拉	13.2	6.7	9.5	6.5	12.3	6.6	9.8	6.5	14.4	6.7	16.0	7.0
朱日和	16.6	6.7	14.3	6.6	17.9	6.9	15.5	6.6	19.2	6.8	19.1	6.9

综合分析各区站的气象资料我们可以发现，平均风速以及达到风雪流发生条件的日数的最大值均出现在3和12月，表明这2个月发生风雪流灾害时，严重程度最大，在有风雪流发生可能性的区站应提前制定防护措施。

2.3 风雪流的年际变化

1981—2010年风雪流逐年平均风速如表3所示，阿拉山口由于独特的地形条件，受人为、环境等因素干扰较小，平均风速在一个稳定的区间内波动；达坂城和13间房的平均风速年际变化较大，达坂城平均风速有明显下降的趋势，13间房平均风速在1999年出现急剧跳涨，随后一直保持在较高水平。其他区站在30 a内平均风速基本稳定，上下波动较小。

图1为研究区内代表区站30 a符合风雪流条件的天数统计。由图1和表3可以看出，各区站达到风雪流发生条件的天数和平均风速呈正相关关系，达坂城和13间房的天数变化趋势同平均风速一致，其余区站虽有波动，但无明显变化趋势。结合表3可知，平均风速和达到风雪流发生条件的天数在指示风雪流发生可能性及灾害程度上有较为一致的正相关关系，可以将2个指标结合进行分析。从数据我们可以看到，大多数区站在30 a内生态环境没有得到改善，一直存在着风雪流发生的可能性，风雪灾害仍然是威胁中国西北地区生产发展的重大灾害之一。

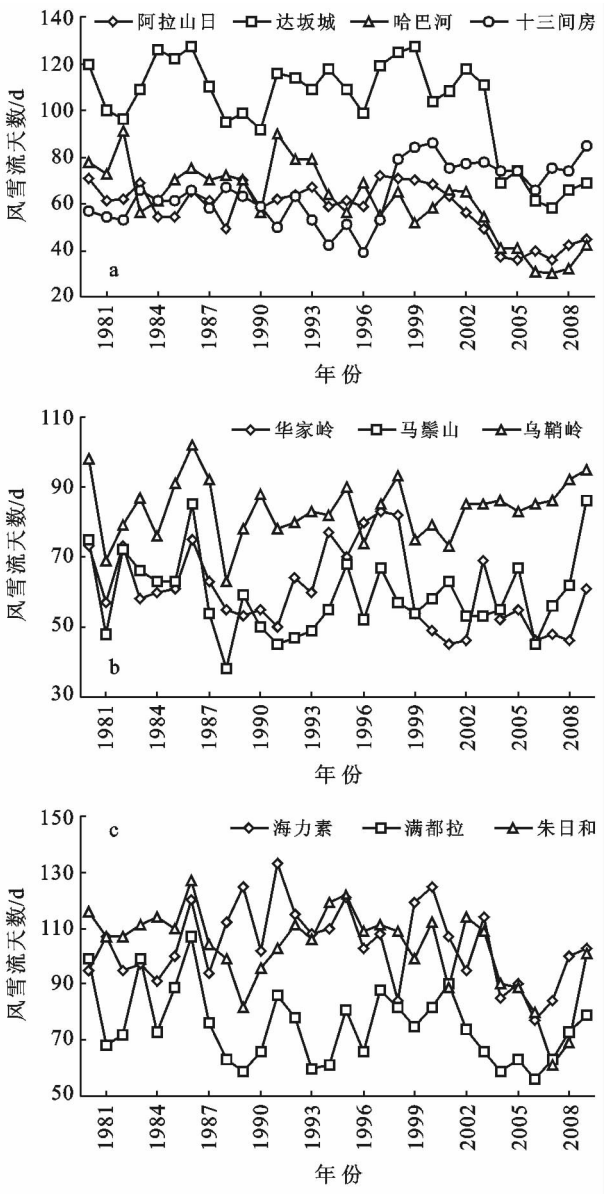


图 1　不同地区代表区站 30 a 符合风雪流发生条件的天数

2.4　风向变化

由图 2 可以看出,新疆主要受西伯利亚的西北风以及来自太平洋的东南风影响,有害风向为东北风。西北风较为干燥,雪源以高山积雪为主,另外由于部分地区地处山区海拔较高,风向还受到山脉走势的影响;内蒙古主要受西风的影响,有害风向西北风偏多,部分地区由于蒙古高原及阴山山脉的影响,风向偏西南方向;甘肃主要受西北风,由于祁连山山脉也是西北—东南走向,所以对风向的影响作用很小。防护林及防护措施应针对有害风向合理布设,最大化发挥防护作用。

3　讨 论

(1) 由于区站数量较多,文中选取 10 个代表区站进行分析,对 85 个有风雪流发生可能性的区站的季节变化、年际变化分析结论与代表区站结论相一致。西北 3 省份区站的有害风向以西北风为主,个别区站由于地形等条件会产生差异。综上,代表区站的研究结论可用来说明西北 3 省(区)风雪流发生可能性的特征。

(2) 大风造成的风雪灾害具有极强的破坏力,因此大风日数可以作为风雪流发生危害程度的指标补充,通过分析 130 个区站的大风日数资料,发现 3 和 12 月是大风日数最多的 2 个月,发生风雪流时危害最严重,与上述数据一致。风雪同发期是是风雪流极易发生的时期,也是发生风雪流灾害最严重的时期,在生产实践中要加强对这一时期的防范,防灾减灾,减少损失。

(3) 王中隆等[20]在研究中对中国发生风吹雪的区域进行划分,本研究在研究区内的结果与之相吻合,并进一步对风雪流发生灾害等级进行预测;刘洪鹄等[21]在其研究中统计发现,风雪流最早发生在 10 月,最晚结束在 3 月,这一统计结果表明本研究中对气象资料的选取是适当的。

(4) 建立防护林是防止吹蚀的有效措施,但中国西北地区气候相对干旱,不适合大面积的造林活动,因此在营造农田防护林、防雪林等人工林时,应结合当地气候和生态条件,合理安排种植密度,适度经营,促进防护林的可持续发展。

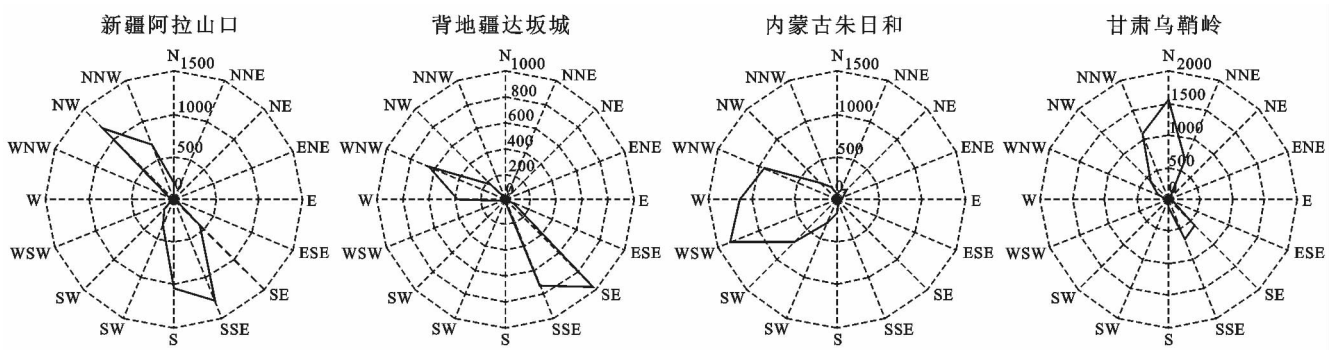


图 2　西北三省(区)代表区站风向玫瑰图

表 3 研究区各代表区站 30 a 平均风速

年份	平均风速/(m·s^{-1})									
	阿拉山口	达坂城	哈巴河	十三间房	华家岭	马鬃山	乌鞘岭	海力素	满都拉	朱日和
1981	8.3	8.4	7.3	7.3	6.7	7.1	6.6	6.8	7.3	6.9
1982	9.5	8.1	6.9	7.7	6.2	7.1	6.6	6.3	6.6	6.8
1983	8.9	8.1	7.2	8.3	6.1	6.5	6.3	6.1	6.7	6.8
1984	9.1	8.2	6.7	7.9	6.6	6.7	6.5	6.3	6.8	7.0
1985	9.8	8.7	6.6	7.5	6.5	6.7	6.8	6.2	6.9	6.7
1986	9.5	8.5	6.8	7.4	6.9	6.5	6.5	6.4	6.8	7.0
1987	9.3	8.7	7.4	7.7	6.7	6.5	6.9	6.7	6.9	7.0
1988	8.3	7.8	7.1	7.1	6.2	6.7	6.7	6.4	6.6	6.7
1989	8.3	7.6	7.0	8.1	6.4	6.4	6.4	6.4	6.1	6.5
1990	9.4	8.4	6.7	8.6	6.6	6.7	6.6	6.4	6.5	6.4
1991	8.8	7.9	6.8	7.9	6.2	6.6	6.7	6.6	6.5	6.9
1992	8.9	8.3	6.9	7.4	6.4	6.3	6.7	6.5	6.8	6.9
1993	8.7	7.6	7.2	7.3	6.3	6.7	6.7	6.6	6.9	7.0
1994	8.5	7.2	6.7	7.0	6.4	6.4	6.9	6.5	6.6	6.6
1995	8.5	8.1	6.6	7.3	6.5	6.8	6.7	6.4	6.7	6.7
1996	9.0	8.1	6.9	7.2	6.2	7.1	6.7	6.8	6.8	7.2
1997	8.5	7.9	7.1	7.2	6.5	6.5	6.6	6.5	6.6	6.5
1998	8.5	7.4	6.4	7.4	6.4	6.5	6.4	6.5	6.8	6.9
1999	8.0	7.4	6.6	11.5	6.1	6.5	6.6	6.3	6.7	6.7
2000	8.3	7.4	6.7	12.0	6.2	6.4	6.7	6.7	6.7	6.6
2001	7.9	7.4	6.8	10.7	6.0	6.6	6.4	6.9	7.0	6.5
2002	8.0	7.5	6.6	11.4	6.2	6.5	6.5	6.6	6.9	6.9
2003	7.1	7.8	6.6	12.1	6.6	6.4	7.0	6.2	6.5	6.3
2004	6.7	7.3	6.2	11.4	6.2	6.8	6.5	6.6	6.7	6.5
2005	7.4	7.2	6.1	11.0	6.3	6.5	6.7	6.1	6.7	6.7
2006	7.6	7.3	6.1	10.5	6.2	6.3	6.5	6.1	6.3	6.7
2007	8.6	7.2	6.1	11.6	6.7	6.4	6.5	6.3	6.3	6.7
2008	7.7	6.4	6.0	11.3	6.6	6.8	6.4	6.4	6.3	6.3
2009	8.4	6.5	6.1	10.8	5.9	6.9	6.5	6.5	6.5	6.7
2010	8.4	6.7	6.3	11.7	6.3	7.3	6.5	6.8	6.9	7.1

4 结论

通过分析中国西北 3 省 130 个区站 1981—2010 年达到风雪流形成条件的天数及平均风速，可以发现，北方 3 省 65.4%的地区有发生风雪流灾害的可能性，48.5%的区域风雪流发生可能性等级较低，16.9%的区域风雪流发生可能性等级较高；3 和 12 月是平均风速最高，过境时间最长的月份，且大风日数也最多，是风雪流发生可能性最大、风雪灾害最严重的月份，应采取有效措施进行防范；从时间尺度上看，30 a 间西北 3 省各区站发生风雪流灾害的基础条件还在，环境没有改善的趋势，大部分地区仍持续遭受风雪灾害的威胁。

[参 考 文 献]

[1] 徐玉春. 综合雪害防治技术在风雪灾害公路的应用效果[C]// 中国公路学会养护与管理分会学术年会，2016.

[2] 吕晓辉，黄宁，郭磊，等. 风吹雪廓线的风洞试验研究[J]. 力学与实践，2013，35(1)：20-25.

[3] 刘海平，陈晓光. 基于新疆风吹雪区域合理断面形式设计的探讨[J]. 电大理工，2015，6(2)：5-6.

[4] 李弘毅，王建，郝晓华. 祁连山区风吹雪对积雪质能过程的影响[J]. 冰川冻土，2012，34(5)：1084-1090.

[5] Sugiura K, Nishimura K, Maeno N, et al. Measurements of snow mass flux and transport rate at different particle diameters in drifting snow[J]. Cold Regions Science & Technology, 1998, 27(2): 83-89.

[6] 于莉丽. 锡林郭勒盟暴风雪天气特征分析[J]. 内蒙古科

技与经济,2017,1(1):67-68.
[7] 黄宁,王正师,李广.高寒山区降雪与风吹雪过程及其对积雪分布影响的研究进展[C]//上海:中国力学大会,2015.
[8] Durand Y, Guyomarc'H G, Mérindol L, et al. Improvement of a numerical snow drift model and field validation [J]. Cold Regions Science & Technology, 2005,43(1/2):93-103.
[9] 吴鹏,陈发明,刘健,等.基于 Fluent 防雪栅栏数值仿真研究[J].交通科技与经济,2016,18(6):57-60.
[10] 包岩峰,丁国栋,赵媛媛,等.风吹雪灾害防护林格局及配置研究[J].东北农业大学学报,2012,43(11):109-115.
[11] 薛万新.新疆风吹雪害养护防治典型工程应用[C]//成都:中国公路学会,2016.
[12] 刘多特,李永乐,汪斌.风雪绕流数值模拟的积雪预测模型研究[J].工程力学,2016,33(8):122-131.
[13] 周晅毅,刘长卿,顾明,等.拉格朗日方法在风雪运动模拟中的应用[J].工程力学,2015,32(1):36-42.
[14] 代晓晴.跃移层风吹雪升华的数值模拟[D].兰州:兰州大学,2015.
[15] 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.
[16] Trokop A, Procter E S. A new methodology for planning snow drift fences in alpine terrain [J]. Cold Regions Science & Technology, 2016,132:33-43.
[17] Schmidt R A. Measuring particle size and snowfall intensity in drifting snow[J]. Cold Regions Science & Technology, 1984,9(2):121-129.
[18] 张威伟,张光辉.风吹雪的成形机理分析[J].中国水运:理论版,2006(3):67-68.
[19] 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):899-910.
[20] 王中隆,张志忠.中国风吹雪区划[J].山地学报,1999,17(4):312-317.
[21] 刘洪鹄,林燕.中国风雪流的变化趋势和时空分布规律[J].干旱区研究,2005,22(1):125-129.

(上接第 33 页)

[8] 张莹花,康才周,刘世增,等.沙地云杉(*Picea mongolica*)农田防护林带不同配置模式的防风效果[J].中国沙漠2017,37(5):859-866.
[9] 杨红艳,戴晟懋,乐林,等.不同分布格局低覆盖度油蒿群丛防风效果[J].林业科学,2008,44(5):11-16.
[10] 杨文斌,董慧龙,卢琦,等.低覆盖度固沙林的乔木分布格局与防风效果[J].生态学报,2011,31(17):5000-5008.
[11] 梁海荣,王晶莹,卢琦,等.低覆盖度乔木两种分布格局内风速流场和防风效果风洞试验[J].中国沙漠,2009,29(6):1021-1028.
[12] 李雪琳,马彦军,马瑞,等.不同带宽的防风固沙林流场结构及防风效能风洞试验[J].中国沙漠,2018,38(5):1-9.
[13] Torita H, Satou H. Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007,145(3):186-194.
[14] Wang Hao, Takle E S. On shelter efficiency of shelterbelts in oblique wind[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996,81(1):95-117.
[15] 马瑞,王继和,刘虎俊,等.不同密度梭梭林对风速的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):249-252.
[16] Ma Rui, Wang Jihe, Qu Jianjun, et al. Effectiveness of shelterbelt with a non-uniform density distribution [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010,98(12):767-771.
[17] Heisler G M, Dewalle D R. Effects of windbreak structure on wind flow[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1988,22/23(88):41-69.