

栅栏防护体系空气动力学效应研究进展

罗万银¹, 董治宝¹, 钱广强¹, 马立鹏²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省林业厅防沙治沙办公室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 栅栏防护体系的空气动力学效应研究是揭示其防护机理的重要基础,也是风沙工程学和风沙物理学应用研究的主要组成部分。根据已有的研究成果,全面综述了近半个多世纪以来有关栅栏防护体系空气动力学机制方面的研究进展,对各个时期的主要成果作以介绍,并对几种代表性防护栅栏最佳疏透度的确定方法及范围分别加以对比分析。分析认为,对栅栏空气动力学效应已取得了相对较深的认识,并且积累了大量的研究经验,对于认识栅栏防护机理具有重要的指导和启发作用。但影响栅栏防护效益的因素是复杂的,众多研究都运用了过多的简化与假设,而且研究者们对于栅栏防护效应的理解不同以及所强调的保护侧重点不同导致评判的标准也各不相同,最终得到的最佳疏透度也有所差异,不能直接运用于实践中。鉴于此,在将来的研究中运用现代测量技术获取可靠的数据资料仍然很重要。

关键词: 防护栅栏; 动力学效应; 疏透度

中图分类号: X169 文献标识码: A

近年来,随着科学技术的进步和生存发展的需要,人类获取资源的空间范围已逐步伸向极端干旱的沙漠腹地。在这样大面积的风沙环境地区从事生产活动,开展经济建设,不同程度上都要受到“风沙”的影响,都会涉及到沙害的治理问题,这样,以研究风沙危害及其防治的一门新兴学科——风沙工程学也就应运而生。栅栏防护体系建设被视为各种防沙措施中最基础、最先导,也是最廉价而有效的防沙手段,越来越吸引广大科研工作者和工程界的关注。明确风沙工程学的性质、研究对象和任务,掌握目前栅栏防护体系空气动力学效应研究的现状与问题,对加速风沙工程学及风沙物理学学科建设与发展有极其重要的意义。

1 科学概念及定位

风沙工程学是以物理力学观点研究风沙运动及其动力过程,探索风沙危害的形成机制及有效防治措施与原理的一门新兴学科^[1],是风沙物理学应用研究的一个重要分支^[2],它包括生物、机械(非生物)和化学固沙等几个方面。而栅栏防护体系建设又是风沙工程学的主要组成部分,它以风沙物理学、空气动力学、流体力学、大气边界层动力学以及农业气象学为理论依据,探索减少风沙流输沙量的原理与技

术,削弱近地表风速,延缓或阻止沙丘前移,防治农田、道路、房屋建筑、圈舍等设施遭受流沙危害。因此,栅栏防护体系的空气动力效应研究是对风沙物理学理论与应用的延伸,其研究对象与内容决定该学科本身又处于一个交叉学科的边缘,溶物理、数学、力学及工程学于一体。

2 栅栏防护体系的分类

对风沙工程进行科学的分类,是正确认识和应用风沙工程的前提^[1]。刘贤万^[1]根据风沙工程作用的力学原理将其归纳为封闭、固定、阻拦、输导、改向和消散等 6 种类型。其中阻拦型风沙工程主要包括栅栏、高立式沙障、林带、挡沙墙等,用来阻滞拦截过境风沙流,增大风沙流运动阻力,促使其减速沉积。栅栏在英文文献里通常以 windbreak, windscreen, wind barrier, barrier 和 fence 等词出现, Rosenberg^[3]将防护林(windbreak)定义为任何能够起到减小风速作用的结构,并且这个概念通常与植物栅栏关联,它可以是一个单独的元件或者是系统元件,能够降低风速,影响其迎风和背风面一定距离的防护效益。Cornelis 等^[3]在此基础上又对 windscreen, wind barrier 和 fence 这 3 组词做了进一步的阐释,他认为 windscreen 是指任何阻挡气流的人

收稿日期:2011-11-08; 改回日期:2011-12-02

基金项目:中国科学院“西部之光”西部博士资助项目(Y028701001);国家自然科学基金项目(40901003)共同资助

作者简介:罗万银(1979—),男,甘肃景泰人,博士,副研究员,主要从事风沙物理研究。Email: wyluo@lzb.ac.cn

工或机械屏障,而 wind barrier 和 fence 通常既可以指 windbreaks,又可以指 windscreen。所以根据当地的自然环境条件和可利用的材料,通常人们所说的防护栅栏又可以包括防护林带、防风网以及各种各样的疏透性栅栏。鉴于栅栏、防风网和防护林带的风沙防治原理基本相同,为了叙述方便,笔者在后继叙述中将统一以栅栏的名义出现。

防护林带通常被认为是比较理想的防护措施,因为林带有一定的宽度和内部结构,但直立栅栏受自然条件的限制较小,有很大的生产适用性^[4-5]。

栅栏不同于其他的人工防护措施,比如挡风墙,这是因为栅栏通常可以设置成较大的疏透度^①,而挡风墙却没有疏透性^[6]。根据所用的材料,栅栏可以划分为直立、横条、格状、孔板式和防风网等几种类型(图 1)。选择一种比较适用的栅栏通常要根据它的效率、成本和设置的可行性来考虑。直立栅栏通常用木条、麦秆、芦苇或者树枝等制成,由于其适用性好、成本低以及构造简单等原因,被广泛地用来防治风沙和风雪流,有关其防护效益的空气动力学效应研究也一直倍受关注。

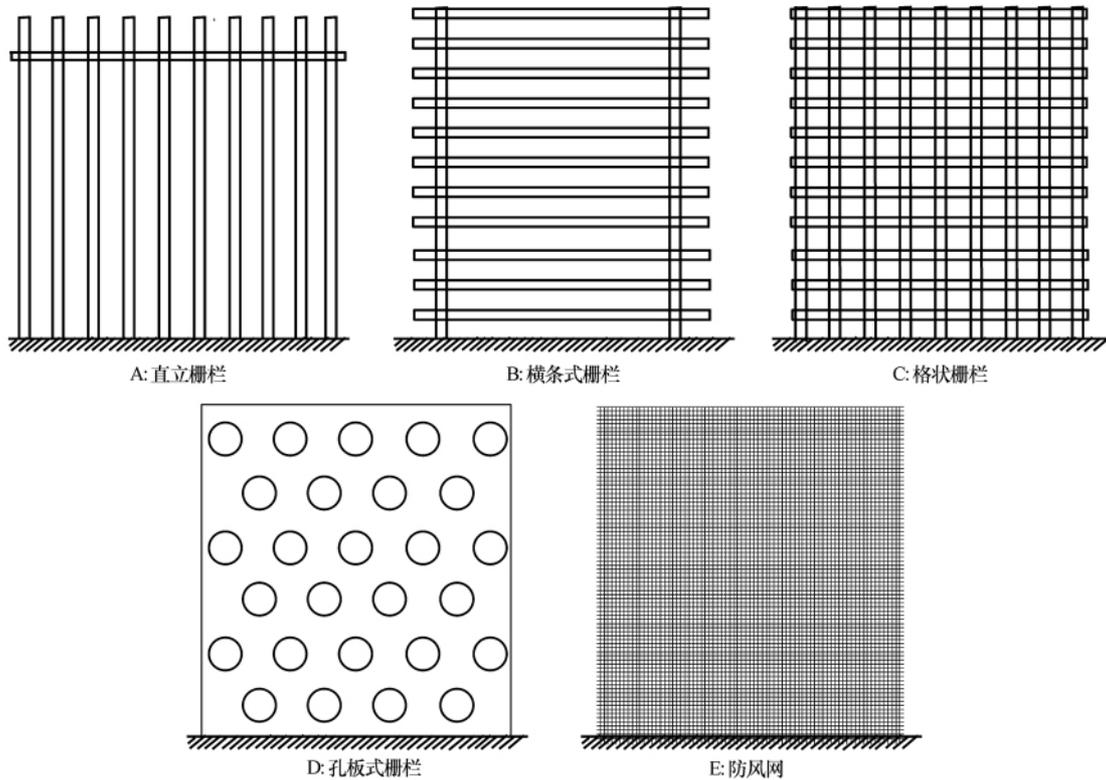


图 1 几种类型防护栅栏的示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of several types of shelter fences; A. Upright fence(vertical slats fence); B. Horizontal slats fence; C. Gridded fence; D. Holed-plank fence; E. Wind screen

3 研究现状

3.1 国外研究进展

人们对栅栏的利用可以追溯到很早以前,在生产力尚不发达的时代,风沙工程的问题还未能引起人们的重视,直到 1880 年里海东岸铁路修建过程中面临到风沙危害的防治问题时才被正式提到议程。

当时的方案是在紧靠路基的地方采用芦苇和旧枕木阻挡流沙侵袭和防止路基被吹蚀。虽然,当时的风沙工程设计并不十分合理,防沙效果不能令人满意,但它揭开了现代风沙工程学的序幕^[2]。随后,中亚地区、澳大利亚、印度、美国等许多国家也相继在修建穿越荒漠地带的铁路和公路时,都根据具体情况采取了多种防沙措施,其中栅栏防护体系的建立是其中最重要的一种非生物防沙手段之一。但真正对

① 根据不同的研究对象和研究目的,栅栏疏透度定义有两种,即空气动力学疏透度(aerodynamic porosity)也称透风系数,指穿过栅栏孔隙的气流与越过栅栏顶部气流的比;光学疏透度(optical porosity)也称透光系数,系指栅栏的透光程度,是栅栏垂直面上透光孔隙的投影面积 S' 与该垂直面上总面积 S 之比。在实际应用中为了简便起见,栅栏的疏透度可以简单的表示为栅栏开口面积占总面积的比例(或百分比),也可以称之为几何疏透度。

其防护机制所开展的研究相对较晚,直至20世纪50—60年代以来,正是栅栏及防护林在防治风沙和风雪灾害中所发挥的巨大作用,逐渐引起了农业、气象及交通等科学工作者的极大兴趣并为此付出了相当大的努力,其目的就是为了寻找和定义栅栏的最佳防护结构。这些工作包括野外观测^[7-14]、风洞模拟实验^[6,15-21]和数值模拟^[22-27]。从原理上讲,栅栏的工作原理是在风场内产生一种拖曳力,导致来流动量的净损失,从而起到防护作用^[28]。最一般的表述栅栏防护原理的方法是考虑它对气流的阻滞作用,或者是一个无量纲的参数,比如阻力系数来表达^[29],这样就开展了大量的关于栅栏阻力作用及阻力系数的研究工作。Ranga等^[30]发现,作用在栅栏上的拖曳力主要受栅栏的疏透度(η)和栅栏高度(H)的影响,而且所有公开发表的研究成果都表明曳力系数(或阻力系数)总是随着栅栏疏透度的增大而减小^[6,8,22,31],这就意味着栅栏的疏透度越小所产生的防护效益越好,并且不透风栅栏(紧密型)将产生最佳的防护效益,这显然与观测到的事实相矛盾。由此说明,虽然阻力系数是描述栅栏对气流干扰程度的一个很重要的参数,但是单纯的一个阻力系数不能决定栅栏防护效益的最佳疏透度,所以必定有其他的因素可以更好地决定栅栏的防护效益。

当用给定的材料来设计直立栅栏时,人们最关心的便是它的防护效益。直立栅栏的防护效益是由栅栏的高度、疏透度、疏透度分布以及方位来确定的^[3]。当栅栏的长度相对于它的高度而言足够长时,栅栏的防护效益由疏透度来确定^[32]。栅栏的防护效益通常用其削减的风速大小、湍流强度以及有效防护距离(风速降低到沙粒开始运动的起动风速之下的距离)来评价。风速降低的最大程度与疏透度紧密相连,较低的疏透度产生较大的减速效应,然而低疏透度要比中等和高疏透度栅栏在下风向产生更大的湍流性,而且低疏透度栅栏所产生的高湍流度会导致气流的恢复距离越靠近栅栏,从而降低栅栏的防护效益。因此,在其他因素都相同的情况下,栅栏最佳疏透度的选择,应当看其能否平衡风速的降低和有效防护距离的相互关系,从而提供最大的防护效应。

研究者们发现在栅栏的防护效益和栅栏后的流场特性之间一定存在某种内在的联系,但是这些参数之间是如何相互作用的,目前仍然不是很清楚。众多的研究者^[33-37]都试图通过测量、分析栅栏后的气流速度、湍流性能、剪切力、压力以及风力的传输

能力等参数来确定栅栏防护的最佳疏透度。他们发现疏透度为0.3~0.4之间的栅栏周围气流特性有一些值得注意的变化。比如,Raine等^[38]在他们的研究中发现,疏透度为0.2的栅栏背风区的平均风速整体降低最大;Hagen等^[7]野外观测表明,疏透度为0.4的防护带能在下风向区域内产生最低的风速;Perera^[33]通过风洞模拟实验,用脉线风速仪测量了栅栏后的速度分布,他发现当栅栏的疏透度小于0.3时,栅栏后的雷诺剪切力和湍流动能最强;反之,当栅栏的疏透度大于0.4时,栅栏后气流的喷射作用(气流穿过栅栏而不是绕过栅栏顶部)非常强烈,而且从实验结果反映的防护效益来看,疏透度为0.1的栅栏防护因子最大,能产生最大的防护区域。Borges等^[39]测量了栅栏近尾流区的平均速度和剪切力分布;Lee等^[5,36,40]对直接影响栅栏防护效益的气流速度场和压力分布特征进行测量,结果发现疏透度在0.3~0.4之间的栅栏能有效的降低栅栏后气流的平均速度和表面压力波动,而且随疏透度的增大栅栏后的湍流性能在减小,平均风速的亏损也在减小。

为了进一步验证栅栏对风速的降低及地表沙粒的阻滞过程,Bofah等^[11]研究了干旱沙区栅栏周围沙子的侵蚀和沉积行为,定量分析了栅栏对沙粒拦截的复杂过程。Raupach等^[41]通过研究林带后颗粒的总沉积量,计算林带对颗粒的捕获及筛选机制,比较预算的颗粒捕获量与野外测量的结果后,他们发现两者的结果十分吻合。Judd等^[42]通过风洞实验研究了单排和多排林带的绕流特征,他们发现多排林带后的回涡要比单排后的小,而且总防护效应也是多排林带大于单排。后来Lee等^[20]在风洞内观测了栅栏后方三角模型表面的沙粒风蚀起动规律,实验结果认为,疏透度为0.3的栅栏对风蚀有很好的抑止作用,因为在他们研究的所有疏透型栅栏内,这种栅栏后方具有最大的沙粒起动风速(能够产生栅栏后沙粒运动所需的最大风速)。但到目前为止,关于疏透型栅栏对地表沙粒的风蚀和沉积规律还是没有得到一个全面彻底的定量解释,这是因为地表的风蚀过程本身就是一个非常复杂的现象,它深受地形、地质和局地气象的影响。

3.2 国内研究进展

中国在栅栏防风固沙的实践方面已经积累了相当丰富的经验,探索出了许多行之有效的防沙治沙措施,为中国沙区工程建设与国际基地建设提供了

一系列实验数据。但是关于各种措施的防沙机理研究相对滞后^[43-44]。20 世纪 80 年代以来,关于防沙工程原理研究主要是基于风沙活动规律的观测,对风沙危害进行评价,并运用风沙物理学原理,借助风洞模拟实验对常用防沙措施的防沙原理进行研究,为风沙危害区的工程建设提供决策和设计依据。这一时期的工作是针对沙区的重大工程建设对风沙危害进行调查与评价^[45-53]。比如,包兰铁路工程建设和沙坡头铁路防沙体系建立的先导实验与示范,提出以直立栅栏作为前沿阻沙带的“五带一体”防护体系,有效的阻止了流沙对铁路干线的侵袭;塔克拉玛干沙漠石油公路防沙体系的建立;新疆 101 线铁路大风翻车风速的测试模拟及防治工程设计;国防公路和酒泉卫星发射基地工程风沙危害原理和工程防沙可行性的理论论证等。

以中国科学院兰州沙漠研究所为首的沙漠科学工作者针对包兰铁路乌(乌达)吉(吉兰泰)支线及兰新铁路哈密段的不同风沙危害方式与程度,开展了大量关于栅栏防沙效益的野外实地观测与风洞模拟实验,总结已建防沙体系的成败经验与教训,基于风沙物理学原理提出了应用栅栏和挡风墙等机械措施及生物措施固、阻结合的防沙体系,并根据线路两侧的地表性质、风沙流运动特征和地貌特征的不同,设置了不同的防治体系^[4,50]。凌裕泉等^[4,47]在已有关于栅栏防沙原理及其影响因素的基础上,根据沙坡头的野外实测资料,估算出该地使用的高度为 0.8~1.0 m,疏透度在 0.3~0.4 之间的栅栏平均阻沙效率为 70%~80%,可以有效地防止防护体系的前沿积沙。卫林^[49]在考虑林带结构、地区风害风速与作物风害指标等 3 个主要因素的基础上,提出防护林带后风速的水平分布方程,并建立了有效防护距离的计算方法。根据所建立的计算方法,得出疏透型结构的林带其防止土壤风蚀的有效防护距离为带高的 11.4 倍。针对中国南疆铁路和兰新铁路一些大风地段火车倾覆与翻车问题,刘贤万等^[54]通过风洞模拟实验研究了挡风墙的作用机理、防风效益、结构形式和最佳配置,设计出高度为 2.5~3.0 m、疏透度为 0~0.1 的紧密型挡风墙应用于实践,有效地防止了大风翻车问题。塔里木沙漠石油公路风沙危害的防治为公路防沙提供了契机,研究者们对沙漠公路沿线的前沿阻沙栅栏进行了大量研究^[53-55]。凌裕泉等^[48]和屈建军等^[51-52]全面评价了敦煌莫高窟防沙体系的防沙效益,根据莫高窟风沙运动规律和风沙危害方式,提出以窟顶沙山前沿

阻沙为先导,以窟顶戈壁输沙及崖体固沙为两翼的“六带一体”防护体系。

近年来随着测速技术及计算机水平的发展,针对栅栏防护动力学机制研究的不足,国内众多学者相继开展了一些更为精细的研究,所用的研究方法有野外观测^[55-58]、风洞模拟实验^[59-63]和数值模拟^[64-66]等。研究内容涉及栅栏防护体系的空气动力学原理和防沙效应的评价。

通过对风载荷以及立柱的受力分析^[65-66],得到了横条式栅栏立柱的最小埋深量与栅栏孔隙度、栅栏高度和立柱间距以及沙粒粒径之间的解析关系式;同时,对此类栅栏的流场进行了数值计算,给出了栅栏的开孔数和孔隙度对流场影响的一般规律。为了提高防沙工程的施工效率,屈建军等^[59-60]还尝试应用尼龙网栅栏来替代传统的防沙栅栏,取得了良好的效果。通过尼龙网栅栏防风沙效应的风洞模拟实验,他们发现采用尼龙网制成的栅栏,兼有疏透和通风两种功能,是一种比木质栅栏更优良的新材料,其最佳孔隙度为 0.4~0.45,保护区达 30H 以上。其积沙效率在中等风速时超过 70%,在特大风时也超过 50%。同时,尼龙网栅栏具有一定的导沙性能,与主风向的临界夹角约为 45°,超过 45°时导沙效率将会降低。周军莉等^[64]分别对紧密、疏透、通风型林带绕林流场进行了数值模拟,分析了林带结构特征对绕林带流场的影响,比较了不同林带结构在同一高度上的沿流相对风速变化情况,并指出了它们各自的适用范围和在防沙治沙中的作用。借助先进的实验流体力学测试手段,罗万银^[63]精确测量直立栅栏周围的流场特征,对阻沙栅栏的防沙机制进行了详细的探讨,并从湍流能量输送的角度栅栏防护的最佳疏透度范围重新进行界定,最终得出的最佳疏透度范围在 0.2~0.3 之间。

中国在铁路和公路防沙方面已建立了若干大规模的防沙体系,其中最具代表性的是包兰铁路沙坡头段的铁路防沙体系和塔里木沙漠石油公路综合防沙体系,取得许多成功经验。但这些经验可否推广到其他地区,还需要对其进行全面的评价。为此,胡孟春等^[61]利用野外风洞,对沙坡头铁路风沙防护体系各组成要素的阻沙率和输沙量进行了模拟实验研究,分析了防护体系各要素的阻沙效益,以输沙量、阻沙率概念为基础,确立了风沙防护体系宽度计算公式,计算了不同风速下的防护宽度。该研究结果对于中国荒漠区铁路、公路风沙防护体系的设计具有一定的借鉴意义。王训明等^[55]根据野外实测和

室内风洞实验的数据分析认为,塔里木沙漠公路沿线高立式沙障和半隐蔽式沙障发挥了较大的防沙效益,平沙地上高立式沙障的防护距离在 $18H$ 左右;3种高立式沙障防沙效益各不相同,芦苇栅栏最佳,抗紫外线尼龙网栏次之,白尼龙网栏最差;随设置路段、地貌部位、风沙活动强度不同,各种高立式沙障使用年限也有差异。Dong 等^[56]对塔里木沙漠公路的防沙成就进行了比较全面的总结后认为,塔里木沙漠公路防沙体系的成功之处在于各种防沙措施(包括芦苇方格沙障、高立式芦苇把栅栏、高立式芦苇栅栏、高立式尼龙栅栏、化学固沙剂和人工植被等)的综合应用,芦苇沙障应该是主要采用的措施,因为芦苇是当地最容易获得的防沙材料。而且 Dong 等^[56]还建议,充分利用路基断面形式对气流和风沙流的影响,也可在一定程度上减弱风沙危害。

纵观国内外栅栏防护体系空气动力学研究现状不难发现,虽然经过一个多世纪的实践活动,人们已实践了多种材料、形式和规格的栅栏模式,并对其防护效益进行了分析评价,总结出了一系列的防沙治沙工程措施,但其防护效益差异较大,寻求最佳的栅栏疏透度范围仍是摆在风沙工程学面前的重大课题。因此,有必要对栅栏防护体系的最佳疏透度研

究历史加以回顾,以供后继研究参考借鉴。

4 栅栏防护体系最佳疏透度范围研究

4.1 Plate 及早期的研究

Plate 于 1971 年对栅栏防风体系的空气动力学研究进行了系统的总结。他结合自己关于二维栅栏绕流研究的经验,系统的总结了 20 世纪 40—60 年代关于防风林带和栅栏动力学机制研究的成果,并对栅栏防护体系的最佳疏透度进行了回顾。Plate^[67]的回顾表明,是 Nägeli(1946)最早通过野外实地观测获得了大量精确的风速资料,并绘制出了林带迎风侧和背风侧风速恢复的相对大小随水平距离的变化关系图(图 2)。Nägeli 认为,中间密度的栅栏能产生最佳的防护效益,所以将这种疏透度定义为最佳疏透度(optimum porosity)。随后,Jensen(1954)、Blenk 和 Trienes(1956)在风洞内做了类似的实验,发现疏透度为 0.35~0.5 的栅栏能产生最大的防护效果,可以算是对 Nägeli 工作的补充,对最佳疏透度范围进行了量化。之后 van Eimern 等(1964)又对以上研究结果加以总结,提出了一个新的最佳疏透度范围,他们认为疏透度在 0.4~0.5 的

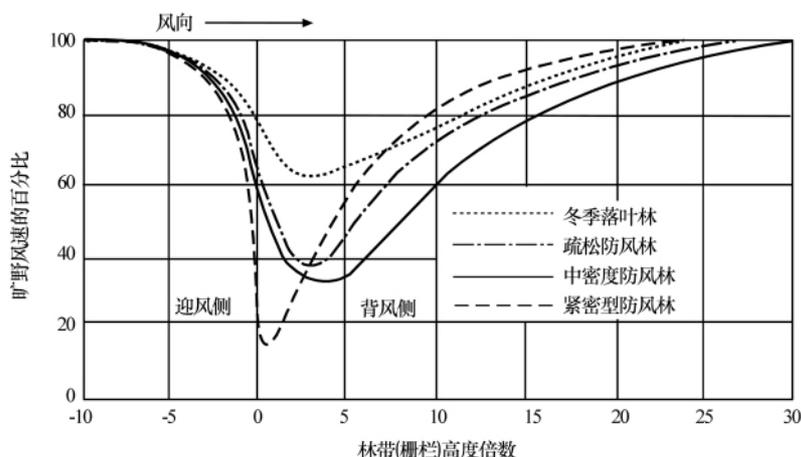


图 2 Nägeli 实际观测的不同疏透度栅栏防护范围(根据文献^[67]修改)

Fig. 2 Sheltering effects at different porosity of shelter fences according to Nägeli's observation (modified from Plate, 1971)

林带对风速的降低最有效。

4.2 Hagen 等研究

为了掌握防护林对农田土壤风蚀的抑制机理,以 Hagen 等^[7,68]为代表的美国农业部土壤风蚀研究组织(USDA-WERU)率先研究了林带与地表气流间的相互作用。通过野外模拟观测,Hagen 等^[7]研究了模型栅栏的疏透度对气流的湍流脉动速度和

垂直速度的影响。他们发现,随着疏透度的增大,最小风速出现的位置向下风向推移,而且最小风速等值线所围成的区域高度也在减小,这意味着栅栏尾流剪切层的厚度在减小;最大风速的降低程度随疏透度的增加而减小,疏透度为零时风速降低 70%,疏透度为 0.6 时只降低了 50%,而对整个背风侧平均风速的降低而言,疏透度为 0.4 的栅栏要比其他疏透度栅栏大 5%~10%。湍流脉动和垂直速度随

栅栏疏透度的增加而减小,所以认为,疏透度为 0.4 的栅栏能在下风向区域内出现最低的风速,风速降低程度最大,而且风速的脉动小,能起到最佳的防护效果。后来由于缺乏一个定量的理论来解释大气边界层内防风带周围的气流特征,导致栅栏防风的实验研究及实践中的最佳设计非常困难。为此, Hagen 等^[68]采用数值模拟和实验研究相结合的方法对不同疏透度的防风绕流场及湍流特性进行了细致的分析,提出了一个定量的理论模型,可以精确的模拟不同疏透度条件下模型栅栏周围的气流运动特征,能细致的描述疏透度较小的模型栅栏后的回涡区。根据该模型发现,栅栏后的涡旋尺寸随着地表粗糙程度的增大而减小。后来的研究结果被应用到土壤风蚀预报系统中(Wind Erosion Prediction System, WEPS),也启发了一些关于地表粗糙度对栅栏防护效果影响的研究^[15,17]。

4.3 Perera 的研究

Perera^[33]在风洞中用脉线风速仪测定了 3 种不同开孔方式栅栏(竖条式栅栏、横条式栅栏和圆孔型栅栏)后的风速随疏透度的变化,结果发现开孔方式对栅栏后的流场影响不大,疏透度较小的栅栏后方会出现回涡,且随疏透度的增大,穿过栅栏的喷射气流也会增强,回涡的大小随之减小并向下风向移去,当疏透度 $\eta > 0.3$ 以后回涡就会消失。采用公式(1)中 Gandemer 所定义的防护因子来评价栅栏的防护效益,该防护因子考虑了气流的平均水平速度和湍流特性,计算结果是疏透度为 0.1 的栅栏能产生最大的防护因子。所以最后的结论认为,是疏透度决定了栅栏的尾流特征,而不是栅栏的结构;不透风栅栏很好的保护了近尾流区域,而疏透度为 0.1 的栅栏却在远尾流区表现出较好的防护特征。因此,他认为很难确定那种疏透度的栅栏会产生最好的防护效益,最终也没有给出一个明确的最佳疏透度范围。

4.4 凌裕泉等的研究

在大面积的固沙防沙体系中,防护带的前沿积沙一直是铁路和公路防沙的威胁,为了研究栅栏在防止前沿积沙中的作用,凌裕泉等^[4]在已有的栅栏防沙原理及其影响因素的基础上,在沙坡头地区的防护带前沿分别采用荆条笆、杨树枝、玉米秸、旧枕木和竹条笆等 5 种试验材料制成竖条和格状栅栏,

开展直立栅栏的阻沙试验,同时还对阻沙工程进行风洞模拟实验研究。室内外试验结果均表明,栅栏的疏透度是影响栅栏防护效益的最重要因素,虽然疏透度为零的不透风挡板也能阻沙,不过它只能把流沙阻挡于前后各一倍栅高的范围之内;随着疏透度的增大,栅栏的阻沙能力和防护范围也相应增大;高度为 0.8~1.0 m,疏透度为 0.3~0.4 时栅栏平均阻沙效率为 70%~80%,可以有效地防止防护体系的前沿积沙,所以得到的最佳疏透度范围在 0.3~0.4 之间,其有效防护范围在栅栏高度的 8~11 倍。

为了提高防沙工程的施工效率,屈建军等^[59-60]做了关于尼龙网栅栏作为传统防沙栅栏的替代品实验。通过尼龙网栅栏防风沙效应的风洞模拟实验,他们发现采用尼龙网制成的栅栏,其作用兼有疏透和通风两种形式,是一种比木质栅栏更优良的新材料,其最佳孔隙度为 0.40~0.45,保护区达 30H 以上。其积沙效率在中速时超过 70%,在特大风时也超过 50%。

4.5 Bofah 等的研究

Bofah 等^[11]在沙特阿拉伯贾富拉沙漠对栅栏周围沙子的侵蚀和堆积特征进行了实地观测,定量分析了不同疏透度栅栏对沙粒拦截的复杂过程,其目的就是为了进一步验证栅栏对风速的降低及对地表沙粒的阻滞过程。通过野外观测发现,疏透度为 0.5 的栅栏对两侧堆积沙丘的横截面积最大,所以他们的结论是野外阻沙栅栏的最佳疏透度为 0.5。

与 Bofah 等^[11]不同的是 Raupach 等^[41]通过数值分析的办法,推导了栅栏对沙粒的拦截方程,并通过该方程计算栅栏对沙粒的捕获量。为了验证方程的预报的精度,他们还在野外进行了实地测量。通过比较方程预算的沙粒捕获量与野外实际测量的结果,发现两者的结果十分吻合,疏透度为 0.2 的栅栏捕获沙粒的能力最强,可达 50%。由此认为,栅栏拦截沙粒的最佳疏透度为 0.2,这与 Raine 等^[38]的研究结论一致,而与 Bofah 等^[11]的结果却相差很大。由此可见,受气候、地形、地貌等条件的影响,不同研究者所得到最佳疏透度有很大的差别。

4.6 Lee 等的研究

以上研究都是针对沙区灾害所开展的,而在矿

区,风蚀引起的粉尘扩散也是当地的一个重大环境问题。为了防治矿场粉尘的扩散, Lee 等^[69]先后通过野外观测和风洞实验开展了一系列实验,以寻找最佳的防护疏透度。最后认为,疏透度为 0.3 的栅栏对粉尘的扩散有很好的抑止作用,通过观测栅栏后地表沙粒的起动现象后,他们发现在所有的疏透型栅栏内,只有疏透度为 0.3 的栅栏后沙粒的起动风速最大(能够产生栅栏后沙粒运动所需的最大风速)。Lee 等^[70]及 Park 等^[21]对直接影响栅栏防护效益的气流速度场和压力分布特征进行了测量,结果表明,疏透度在 0.4 到 0.5 之间的栅栏能有效的降低栅栏后气流的平均速度和表面压力波动,而且随疏透度的增大栅栏后的湍流性能在减小,平均风速的亏损也在减小。由此,得到的栅栏最佳疏透度范围在 0.3~0.5 之间。

4.7 Cornelis 和 Gabriels 的研究

防护林带的设计与其疏透度紧密相关,为了寻找其最佳的设计, Cornelis 等^[3]对不同孔隙分布结构的栅栏进行了系统的风洞实验。在实验过程中发现,栅栏后 0.2H 高度处的风速亏损随疏透度的变化满足下式的高斯峰值函数分布规律:

$$TRC_{0.2} = a + be^{-(1/2)[(\tau-\sigma)/d]^2} \quad (1)$$

根据该函数拟合的栅栏最佳疏透度范围在 0.2~0.35 之间。他们还指出,孔隙均匀的疏透度分布结构要比其他分布类型的疏透度有更大的防护面积;在远尾流区($x/H > 10$)单排栅栏的防护区域要比多排栅栏大,其减速效果也是单排比多排好,但在近尾流区($3H \sim 8H$)范围内,两排和 3 排栅栏的减速效果更加有效。

由于在该实验中测速仪器的采集频率只仅仅为 1 Hz,所观测到的风速资料无法用来计算湍流统计参数,所以在他们的讨论中没有考虑气流的脉动对栅栏防护效应的影响。最后分析指出,栅栏的最佳疏透度很大程度上依赖于人们栽设栅栏时的目的,评判其最佳疏透度范围要根据所保护的物体而定,保护的物体不同,要求的疏透度大小和分布结构也有所不同。而且栅栏栽设的位置与保护设施之间的距离也随保护物体的性质而异,如果是保护交通道路免受风沙掩埋,则栅栏栽设的位置要保持一定的距离,避免栅栏所拦截的沙粒沉积到路基和路面上,但也不能太远,以防止二次起沙。

4.8 罗万银等的研究

罗万银等^[71]的研究主要从风沙物理学的角度出发,借助先进的实验流体力学测试手段,精确测量直立栅栏周围的流场特征,运用风洞中 PIV 所测风速资料,从湍流能量输送的角度对直立栅栏的最佳疏透度范围进行了讨论与评价,对已有的栅栏最佳疏透度范围提供补充解释。根据 PIV 资料评价的栅栏最佳疏透度在 0.2~0.3 之间,这与 Cornelis 等^[3]的结果非常吻合,但与罗万银等^[72]栅栏周围沙粒起动的观测结果以及凌裕泉等^[4]的野外监测结果略有出入。PIV 测量结果得到的栅栏最佳疏透度只是从纯气流的角度来评价,所得结果理论上属于防沙的最佳疏透度,但野外实际的应用中,风沙边界层内挟沙气流的运动特征会受跃移沙粒的影响,气流运移行为十分复杂^[72],一旦风沙流发生,栅栏周围的高度脉动气流会改变沙粒的空间分布形态,使得沙粒的运动更加复杂,蚀积形式复杂多变。所以认为,实践操作中为了降低成本,阻沙栅栏的实际疏透度可适度增大,放宽到 0.3~0.4 左右,但为了有效抑制风蚀,栅栏的疏透度不宜超过 0.4。

总之,栅栏最佳疏透度根据防护的要求和目的不同而有所不同,所有的实验和野外观测所提供的最佳疏透度都只是一个参考范围,在实际应用中,受气候、地形、地貌条件以及防护对象和目的的影响,栅栏的最佳疏透度会有所变化,设计者应当根据保护对象的具体环境条件,选择适当的栅栏结构。随着沙漠地区资源开发的扩大和持续发展的需要,沙区交通、建筑、采矿等建筑活动及潜在沙漠化地区环境保护中的风沙工程问题越来越受到重视。风沙工程学力图摆脱过去模糊经验设计,需要有坚实的风沙物理学理论作指导,以达到最佳设计。

5 问题与展望

纵观栅栏防护体系的研究历史,不难发现,虽然关于栅栏防沙动力学效应研究已经走过了一段很精彩的路程,并且积累了大量的研究经验,为防沙治沙工程做出了巨大的贡献,但仍然存在一些不足之处,某些地方还是不能达成共识。主要表现在:

其一,由于野外条件比较苛刻,许多在野外开展的关于栅栏防沙效益的观测与研究一般很难进行力学行为的定量观测。主要是因为野外条件下,风

况存在很大的不确定性,而且许多精密的测试仪器很难发挥作用,这就使得研究者们关心的只是一些容易获得的资料,比如多大的风产生多大的风沙危害,多大的疏透度才能积累更多的沙粒,并通过建立能描述风沙危害强度的物理量(输沙强度与风速)与栅栏疏透度之间的简单相互关系,来确定风沙的危害程度与防沙效益。

其二,由于缺乏翔实的基础实验数据,使得众多的数值与理论模式无法得到很好的验证,各家的模式很难达成共识。这点尤以 Wilson^[22] 和 Wang 等^[73] 的模型为例,两者前后分别对各自的模型公开提出意见并做出解释性答复。其争论的焦点,就是相互怀疑对方模型与实验结果吻合的精确性,而两者参照的实验数据都是 Bradley 等^[74] 的实验结果。其原因归根结底还是缺乏足够翔实的实验数据,而这对栅栏防沙的空气动力学解释又是非常重要的。因此,笔者认为,只有通过精细的模拟实验,提供精确可靠的实验数据和边界条件,才能使数值模拟和理论推导结果得到准确的验证,提高其模拟精度。

其三,栅栏周围气流的湍动性对其防护效益有很大的影响,其防护效益不能简单的仅从风速的平均降低效果单方面来评价。以往的研究由于测试仪器的限制,缺乏对栅栏前后的湍流剪切作用及湍流特征的细致研究,无法从湍流输送的角度对栅栏防护的机理做出解释。而要解决目前风沙工程研究中的这些缺陷,必须从测试的仪器设备上加以改进,引入高精度的测试手段,以弥补先前研究中的不足。

栅栏防护的动力学效应评价是一项复杂而富有挑战性的论题,所涉及的学科范围很广,需要风沙物理学、空气动力学、实验流体力学、数学、地理学和农业生态工程等各个学科的共同努力。后继的研究主要应当从风沙物理学的角度出发,借助先进的实验流体力学测试手段,精确测量直立栅栏周围的流场特征,对已有的栅栏最佳疏透度范围提供补充解释。同时,野外地形、地貌复杂多变,对局部气流的改变不容忽视,实际的大气边界层运动要复杂的多,栅栏起主要拦截作用的还是挟沙气流,沙粒与气流之间的反馈作用会导致相间的气流运动行为发生改变。此外,栅栏裁设的部位、方位都会影响其防沙效果。目前大部分结论都是建立在理想的风洞实验基础之上得出的,而风洞内受实验条件所限很难兼顾这些条件。

有鉴于此,结合目前风沙工程研究的现状及存在的主要问题,笔者认为栅栏防沙工程还需要从以下几个方向继续努力探索:

1) 加强野外实地监测。风洞实验仅从理论上给予解释,为野外监测提供借鉴,但不足以如实反映栅栏绕流状况,野外实地监测才是防沙工程研究的基础。虽然目前已有许多工作开展,但限于野外测速手段的限制,对栅栏周围速度场的精确测量很少,主要工作都集中在风沙蚀积形态的定性描述和相对输沙量的变化,尚缺乏野外栅栏周围气流场的详细资料,这与栅栏的广泛应用很不协调。所以,笔者认为应当采用超声风速仪等高级测风仪器,在野外直接测量栅栏防护体系周围的流场信息,从湍流输送和能量平衡的角度分析其防护效益,以完善室内实验所得理论模型。

2) 阻沙栅栏对近地表风沙运移规律的影响。栅栏防沙的实质就是改变了风沙流的饱和程度,所以运用 PIV 系统直接测量栅栏周围的风沙流速度和浓度分布特点。从栅栏尾流边界层内气流与沙粒的相互反馈关系入手,可以更加确切的反映栅栏对风沙流的阻滞作用。

3) 地面粗糙程度和来流风向对栅后气流的恢复也有一定的影响,配合生物和化学防沙措施,观测不同粗糙元配置和来流风向对栅栏周围的气流场和风沙流结构的影响,以加深人们对栅栏防沙的空气动力学机制认识。

4) 风沙危害防护体系合理宽度的确定。风沙防护体系的合理宽度一直是风沙工程学研究的重点与难点之一,尽管,在研究者们共同努力下提出了一些风沙防护体系合理宽度的计算方法和理论宽度模型,但至今还没有一个在实践中令人满意的普适性结果。所以,这也是今后栅栏防护体系研究中需要努力的方向之一。

总之,由于栅栏防沙过程涉及很多复杂的物理问题,而这些机理在目前看来大部分还是未知的。针对这一问题,不同的研究者有不同的理解,以至于所得最佳疏透度范围差异很大。该领域研究中未探明的是不同疏透形式的栅栏结构对气流分割作用以及栅栏后方涡旋的脱落过程与地表沙粒运动的相互影响,由于测试手段的局限,使得这一问题的研究主要靠理想化的数值模拟手段或理论推导,但过多的简化和假设使研究的问题与本质相去甚远。所以栅

栏防护的空气动力学机制研究还有很大的探索空间,在目前机理研究尚有很大难度的情况下,实验资料的积累和经验结果的应用仍然是很重要的。

参考文献 (References):

- [1] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] 董治宝, 董光荣, 陈广庭. 风沙物理学研究进展与展望[J]. 大自然探索, 1995, 14(53): 30-38.
- [3] Cornelis W M, Gabriels D. Optimal windbreak design for wind-erosion control[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61: 315-332.
- [4] 凌裕泉, 金炯, 邹本功, 等. 栅栏在防止前沿积沙中的作用[J]. 中国沙漠, 1984, 4(3): 16-25.
- [5] Lee S J, Kim H B. Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 80: 311-326.
- [6] Guan D, Zhang Y, Zhu T. A wind-tunnel study of windbreak drag[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118: 75-84.
- [7] Hagen L J, Skidmore E L. Turbulent velocity fluctuations and vertical flow as affected by windbreak porosity[J]. *Transactions of the ASAE*, 1971, 14: 634-637.
- [8] Hagen L J, Skidmore E L. Windbreak drag as influenced by porosity[J]. *Transactions of the ASAE*, 1971, 14: 464-465.
- [9] Miller D R, Rosenborg N J, Bragley W T. Wind reduction by a highly permeable tree shelterbelt[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1975, 14: 321-333.
- [10] Jacobs A. The normal force coefficient on a thin closed fence [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 32: 329-335.
- [11] Bofah K K, Al-Hinai K G. Field tests of porous fences in the regime of sand laden wind[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, 23: 309-319.
- [12] Schwartz R C, Fryrear D W, Harris B L, et al. Mean flow and shear stress distributions as influenced by vegetative windbreak structure [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 75: 1-22.
- [13] Wilson J D. A field study of the mean pressure about a windbreak[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, 85: 327-358.
- [14] Boldes U, Colman J, Leo J M D, et al. Field study of the flow behind single and double row herbaceous windbreaks [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89: 665-687.
- [15] Iversen J D. Comparison of wind tunnel modeling and full-scale snow fence drifts[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981, 8: 231-249.
- [16] Ranga Raju K G, Garde R J, Singh S K, et al. Experimental study on characteristics of flow past porous fences[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 29: 155-163.
- [17] Judd M J, Raupach M R, Finnigan J J. A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: velocity fields[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 80(1-2): 127-165.
- [18] Boldes U, Colman J, Nadal Mora V, et al. Velocity fluctuations in the wake behind wind breakers and at the edge of the shear layer, and their correlations with the free stream[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 58: 217-229.
- [19] Yaragal S C, Ram H S G, Murthy K K. An experimental investigation of flow fields downstream of solid and porous fences[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 66: 127-140.
- [20] Lee S J, Park K C, Park C W. Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 1453-1463.
- [21] Park C W, Lee S J. Experimental study on surface pressure and flow structure around a triangular prism located behind a porous fence[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91: 165-184.
- [22] Wilson J D. Numerical studies of flow through a windbreak [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1985, 21: 119-154.
- [23] Fang F M, Wang D Y. On the flow around a vertical porous fence[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67-68: 415-424.
- [24] Pattone E G, Shaw R H, Judd M J, et al. Large-eddy simulation of windbreak flow [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1998, 87: 275-306.
- [25] Packwood A R. Flow through porous fences in thick boundary layers: comparisons between laboratory and numerical experiments[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 88: 75-90.
- [26] Vigiak O, Sterk G, Warren A. Spatial modeling of wind speed around windbreaks[J]. *Catena*, 2003, 52: 273-288.
- [27] Alhajraf S. Computational fluid dynamic modeling of drifting particles at porous fences [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19: 163-170.
- [28] Raine J K, Stevenson D C. Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer[J]. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1977, 2: 159-180.
- [29] Jacobs A. The normal force coefficient on a thin closed fence [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 32: 329-335.
- [30] Ranga Raju K G, Garde R J, Singh S K, et al. Experimental study on characteristics of flow past porous fences[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 29: 155-163.
- [31] Seginer I D O. Windbreak drag calculated from the horizontal velocity field[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1972, 3: 87-

- 97.
- [32] Heisler G M, Dewalle D R. Effects of windbreak structure on wind flow[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 22-23: 41-69.
- [33] Perera M D A E S. Shelter behind two-dimensional solid and porous fences[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981, 8: 93-104.
- [34] Loeffler A E, Gordon A M, Gillespie T J. Optical porosity and wind speed reduction by coniferous windbreaks in southern Ontario[J]. *Agroforestry Systems*, 1992, 17: 119-133.
- [35] Wilson J D. A field study of the mean pressure about a windbreak[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, 85: 327-358.
- [36] Lee S J, Kim H B. Velocity field measurements of flow around a triangular prism behind a porous fence[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 77 & 78: 521-530.
- [37] Lee S J, Park C W. Surface pressure characteristics on a triangular prism located behind a porous fence[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 80: 69-83.
- [38] Raine J K, Stevenson D C. Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer[J]. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1977, 2: 159-180.
- [39] Borges A R, Viegas D X. Shelter effects on a row of coal piles to prevent wind erosion[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 29: 145-154.
- [40] Lee S J, Lim C. A numerical study on flow around a triangular prism located behind a porous fence[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2001, 28: 209-221.
- [41] Raupach M R, Woods N, Dorr G, et al. The entrainment of particles by windbreaks[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 3373-3383.
- [42] Judd M J, Raupach M R, Finnigan J J. A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: velocity fields[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 80 (1/2): 127-165.
- [43] 董治宝. 中国风沙物理研究 50 年(I) [J]. *中国沙漠*, 2005, 25 (3): 293-305.
- [44] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50 年(II) [J]. *中国沙漠*, 2005, 25(6): 795-815.
- [45] 邹本功, 丛自立, 刘世雄. 沙坡头地区风沙流的基本特征及防治效益的初步观察[J]. *中国沙漠*, 1981, 1(1): 33-39.
- [46] 董光荣, 邹桂香, 李长治, 等. 巴盟河套西部防沙林带防风阻沙效益的初步观测: 以磴口县坝楞公社为例[J]. *中国沙漠*, 1983, 3(1): 9-19.
- [47] 凌裕泉. 铁路沙害治理体系的风沙物理学原理——以包兰铁路为例[M]//*流沙治理的研究(二)*. 银川: 宁夏人民出版社, 1991: 297-308.
- [48] 凌裕泉, 屈建军, 樊锦诗, 等. 莫高窟崖顶防沙工程的效益分析[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(1): 13-18.
- [49] 卫林. 论林带的有效防护距离[J]. *科学通报*, 1985, 19: 1567-1569.
- [50] 李银芳, 周兴佳, 潘伯荣, 等. 兰新铁路哈密地区的沙害[J]. *中国沙漠*, 1986, 6(4): 56-62.
- [51] 屈建军, 张伟民, 彭期龙, 等. 论敦煌莫高窟的若干风沙问题[J]. *地理学报*, 1996, 51(5): 418-424.
- [52] 屈建军, 董光荣, 文子祥, 等. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治问题[J]. *中国科学*, 1997, 27(1): 82-88.
- [53] 董治宝, 陈广庭, 韩致文, 等. 塔里木沙漠石油公路风沙危害[J]. *环境科学*, 1997, 18(1): 4-9.
- [54] 刘贤万, 崔志刚. 特大风区防翻车挡风墙工程设计的风洞实验研究[J]. *中国沙漠*, 1994, 14(3): 38-46.
- [55] 王训明, 陈广庭, 韩致文, 等. 塔里木沙漠公路机械防沙体系效益分析[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(2): 120-127.
- [56] Dong Z B, Chen G T, He X D, et al. Controlling the blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 329-344.
- [57] 韩致文. 塔克拉玛干沙漠公路沿线风沙运动与风沙危害防治[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [58] 金昌宁, 董治宝, 李吉均, 等. 高立式沙障处的风沙沉积及其表征的风沙运动规律[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(5): 652-657.
- [59] 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 276-280.
- [60] 屈建军, 凌裕泉, 刘贤万, 等. 尼龙网栅栏防沙效应研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(2): 171-176.
- [61] 胡孟春, 赵爱国, 李农. 沙坡头地区铁路防护体系阻沙效益风洞实验研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 598-601.
- [62] 金文, 王元, 张玮. 防护林搭配灌草条件下的 PIV 实验研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(5): 600-603.
- [63] 罗万银. 直立阻沙栅栏二次流特征的风洞模拟实验 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [64] 周军莉, 王元, 徐忠. 不同类型林带防护效益的数值模拟[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 201-204.
- [65] Wang Z T, Zheng X J. A numerical simulation of fluid flowing through a windbreak[J]. *Key Engineering Materials*, 2003, 243-244: 607-612.
- [66] 薄天利, 郑晓静. 防沙栅栏风洞实验的数值模拟[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(5): 97-101.
- [67] Plate E J. The aerodynamics of shelterbelts[J]. *Agricultural Meteorology*, 1971, 8: 203-222.
- [68] Hagen L J, Skidmore E L, Miller P L, et al. Simulation of effect of wind barriers on airflow[J]. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24(1): 1002-1008.
- [69] Lee S J, Park C W. The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 84: 101-118.
- [70] Lee S J, Park C W. Surface-pressure variations on a triangular prism by porous fences in a simulated atmospheric boundary layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 73: 45-58.

- [71] 罗万银,董治宝,钱广强,等. 栅栏绕流减速效应风洞实验模拟[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 1-7. 1995, 75: 141-173.
- [72] 罗万银,董治宝,钱广强,等. 栅栏对颗粒起动风速影响的实验研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 201-205. [74] Bradley E F, Mulhearn P J. Development of velocity and shear stress distributions in the wake of a porous shelter fence[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 15: 145-156.
- [73] Wang H, Takle E S. A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts [J]. Boundary-Layer Meteorology,

A Research Review on Aerodynamic Effects of Shelter Fences

LUO Wan-yin¹, DONG Zhi-bao¹, QIAN Guang-qiang¹, MA Li-peng²

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Desertification Control Office of Gansu Forestry Bureau, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Research on aerodynamic effects of fence protective system is among the important issues to reveal its protective mechanism, and it also is a main part of application study of sand control engineering and blown sand physics. Based on published literatures, we review the half past century's research progress on the aerodynamic mechanisms of fence protective system, cite some representative examples for each shelter type for discussion, and analyze some typical research conclusion on optimal porosity of sand fences. A deep understanding on aerodynamic effect of shelter fences has achieved and some massive research experience has accumulated, which provide import guiding role and reference for further study. It is thought that the factors influencing shelter fences protective effects are complex. The complexity of air flow patterns around the fence system makes the research of this problem depend mainly on model simulation and theoretical analysis, just as same as some simplification and hypothesis in the past study. Furthermore, the different understanding on the fence shelter process by researchers and their different emphases on the fence shelter make the judge standard of optimal porosity of sand fences to be different, which leads to the optimal porosity of fences reported by various investigators varies in a large ranges, hence cannot be put into directly practice. So it is still be very important to gather more experimental data by using modern high-accuracy measurement technology in further study.

Keywords: shelter fence; aerodynamic effect; porosity