

# 植被的防治风蚀作用\*

贺山峰<sup>1,2</sup> 蒋德明<sup>1\*\*</sup> 阿拉木萨<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 土壤风蚀是造成干旱、半干旱地区土地荒漠化与沙尘暴灾害的首要因素, 也是目前全球性的主要环境问题之一。许多研究表明, 通过植物防治风蚀是一种最根本、经济而有效的措施。本文在阅读大量国内外该领域文献的基础上, 介绍了目前研究植被防治风蚀作用的风洞实验、野外观测和模型模拟3种主要方法, 阐述了植被防治风蚀作用的机理及影响因素, 并结合当前国内存在的一些问题和不足, 对今后应重点开展的研究和需要解决的问题作了探讨。

**关键词** 防治风蚀; 风洞实验; 模型; 风蚀输沙率

**中图分类号** S151 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2007)05-0743-06

**Roles of vegetation in wind erosion control: A research review.** HE Shan-feng<sup>1,2</sup>, JIANG De-ming<sup>1</sup>, Alamusa<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(5): 743–748.*

**Abstract:** Wind erosion is a leading factor of land desertification and sandstorm disaster, and one of the most serious environment problems in the world. Many researches indicated that planting vegetation is an economical and effective measure in controlling wind erosion. This paper discussed the mechanisms and affecting factors of vegetation in wind erosion control, and introduced three main approaches, *i.e.*, wind tunnel test, field investigation, and model simulation. Some problems needed to be solved and improved in the further study were put forward.

**Key words:** wind erosion control; wind tunnel test; model; sand transport flux.

## 1 引言

土地荒漠化是近百年来出现的许多全球性生态环境恶化问题之一(朱震达和刘恕, 1990; 朱震达, 1991), 主要发生在干旱、半干旱地区和半湿润地区。据估计, 1978—1991年全球土地荒漠化造成的损失达3 000~6 000亿美元, 近年来更是高达每年423亿美元, 而全球每年进行生态恢复而投入的经费达100~224亿美元(Daily, 1995)。中国是世界上受荒漠化影响最严重的国家之一。在中国, 荒漠化土地总面积为 $2.62 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土面积的27.3%(刘国强和张煜星, 2000)。荒漠化导致这些地区植被退化, 生产力下降, 土地风蚀沙化, 水土流失加剧, 生态系统功能失调(蒋德明等, 2001; 任海

和彭少麟, 2003)。

作为陆地生态系统的重要组成部分, 植物强烈地影响着大气圈与土壤圈之间的能量转换与传递, 因而也成为影响土壤风蚀最活跃的因素之一(Woodruff & Siddoway, 1965)。植物覆盖防治风蚀输沙作为一种最根本而经济、有效的措施(吴正, 1987), 很早就已被重视并研究(Siddoway *et al.*, 1965; Gibbens *et al.*, 1983; Brazel & Nickling, 1987; Musick & Gillette, 1990; Higgitt, 1993; Wolfe & Nickling, 1993; 沈晓东等, 1992; 董治宝等, 1996a; 1996b)。自20世纪90年代以来, 以退耕还林还草为核心的植被生态建设及其相关研究成为国内的热点。深入研究和探讨植被覆盖对风蚀地表的防护作用, 不仅具有重要的理论价值, 更具有指导西部植被恢复重建的实践意义。在总结了国内外学者关于植被防治风蚀输沙作用方面文献的基础上, 介绍和评价了目前植被防治风蚀作用的3种主要研究方法、机理以及影响因素,

\* 国家“十五”科技攻关项目(2005BA517A08)和国家“十五”科技攻关计划子课题资助项目(2005BA517A02-1)。

\*\* 通讯作者 E-mail: Jiangdeming@iae.ac.cn

收稿日期: 2006-07-10 接受日期: 2007-01-06

并结合植被生态建设的实践初步探讨了今后需要加强研究和解决的问题,试图为将来工作的开展提供一些有益的信息。

## 2 植被防治风蚀作用研究历程

科学的风蚀概念以“侵蚀”概念为基础,相关研究可追溯到19世纪中期,但在当时,风蚀并未受到重视。直到20世纪初期,科学界对风蚀的兴趣逐渐增强。研究者们开始认识到,保护地表(如保留作物残留物,建立植被防风带)可以减少土壤风蚀。20世纪30年代以来,风蚀研究实现了从定性描述到定量研究的飞跃,开始有了较大发展,到60年代中期已初步建立了风蚀研究的理论体系。这段时期贡献最大的当属Bagnold(1941)和Chepil(1963),他们通过大量研究建立了风沙物理学。此后,随着研究方法与手段的不断提高,以及数理分析方法、计算机处理技术等被引入风蚀研究领域,众多学者从不同角度开展相关研究,积累了相当多的成果,尤其是在植被与风蚀关系的模型研究方面(Buckley, 1987; Wasson & Nanninga, 1986),具有广泛的应用价值。中国关于植被防治风蚀的研究起步较晚,与国际水平差距较大。近十几年,研究人员在植被防治风蚀方面开展了大量研究,取得了一些成果(董治宝等, 1996a; 1996b; 黄富祥等, 2001)。

## 3 植被防治风蚀作用的研究方法与评价

### 3.1 风洞实验

风洞是指在一个管道内,用动力设备驱动一股速度可控的气流,用以对模型进行空气动力实验的一种设备,它是空气动力学研究和试验中最广泛使用的工具。在野外观测时,风速、风向等自然因素的多变性给实际工作带来了极大困难,为摆脱这些因素的影响,早期研究植物对地表防护效应的实验大多是在风向固定、风速大小能够控制的风洞中进行的(Bagnold, 1941; Buckley, 1987; 董光荣等, 1987)。

Lettau(1969)利用风洞实验观测数据,建立了地表粗糙度与植被粗糙元密集度之间的定量关系模型; Marshall(1971)和Wooding等(1973)根据风洞实验观测结果发现,一定的植被覆盖可有效防止地表土壤发生风蚀,并给出了植被覆盖防护风蚀地表土壤的2个重要阈值; 俞学曾等(1991)根据7种典型结构型式的防护林模型风洞实验认为,以防沙效应为主的最优结构型是小密度灌木片林与疏透乔木

林带组合结构; 沈晓东等(1992)通过风洞模拟防风固沙林阻沙效果认为,当灌木片林覆盖度达到一定时,其覆盖度的变化对阻沙效果影响不大,而且在林带的影响下,流沙的堆积分布特征主要取决于林带的结构,可以根据防护对象,选用相应类型的林带和最适宜的透风系数,在一定范围内可使林带达到最佳的防护效果; 张克存等(2004)在研究不同下垫面对风沙流特性的影响后发现,对于特定的下垫面,在不同风速下,同一高度层输沙量具有很好的相关性。

风洞实验是利用缩尺模型在环境风洞中进行的模拟实验,可以人为控制模拟条件,风向固定,风速连续可调,不受自然条件制约,不受季节限制,适合进行系统研究。然而,在风洞中模拟的风沙现象难以严格满足相似条件,其原因是按粒径比例缩小的沙粒会导致模拟现象违反风沙流自然规律(贺大良, 1987)。风洞条件与自然界实际状况存在的差异性使得这些风洞观测研究结果更多的是具有理论意义,而不能代表野外真实情况(申建友等, 1988)。

### 3.2 野外观测

由于风洞模拟与自然界真实状况存在着差别,近年来的关于植物防风蚀的观测实验大多在野外实地条件下进行(Taylor, 1988; 李进, 1992; Raupach, 1992; Raupach *et al.*, 1993; Lancaster & Baas, 1998; 黄富祥等, 2001; 赵彩霞等, 2005)。

Lee和Soliman(1977)总结了大量实验观测结果,揭示出植被覆盖率与粗糙元密集度之间的关系: 植被覆盖率越大,粗糙元密集度也越大; 黄富祥等(2001)对毛乌素沙地不同植被覆盖下垫面的风蚀输沙率进行了野外测定; 张华等(2002)通过对流动、半流动、半固定和固定沙地的野外实测发现输沙量与植被盖度呈显著负相关,而与植株高度、地表紧密度和地表粗糙度长度呈微弱负相关; 张继义等(2003)发现,沙米在经过一个生长季后便枯萎死亡,群落生物量大部分以立枯的形式存在,并可存留2~3个生长季,持续发挥防风固沙作用和维持群落生态功能。

野外实地观测不仅可用于校验风洞和模型模拟的结果,还是进一步理论研究的基础。虽然野外观测会贴近实际状况,但仍存在很多困难,其中最大的困难是无法控制风速的大小,野外实测耗费的人力财力较多,因此,不易进行系统的观测研究。

### 3.3 模型模拟

模型是某种对现实系统或现象的抽象或简化;

具体地说,模型是对真实系统或现象最重要的组成单元及其相互关系的表述。近十几年,模型的发展十分迅速,在各个领域都取得了很多研究成果。建立风蚀模型可以帮助人们更直观地理解植被对风蚀地表的防护效应,且具有预测的作用。

有关植物减弱风沙活动强度的模型研究,主要集中在植被覆盖率与风蚀输沙率之间的定量关系上。风蚀输沙率是指单位时间内通过单位过沙长度的风蚀输沙量,通常被用来作为度量土壤风蚀输沙状况的指标(Lyles & Allison, 1981; 吴正, 1987; Buckley, 1987; Findlater *et al.*, 1990; Leys, 1991; 董治宝等, 1996b)。人们早就认识到,当下垫面覆盖着一定的植被时,风蚀输沙率会有所降低,但由于风蚀输沙问题的复杂性,怎样定量描述植被盖度与风蚀输沙率之间的关系一直都是风沙动力学研究中的热点和难点问题(Wolfe & Nickling, 1993; 李振山和倪晋仁, 1998)。随着观测手段与建模方法的进步,国际上在该领域的研究工作取得了较大进展(Wasson & Nanninga, 1986; Buckley, 1987; Raupach, 1992; Wolfe & Nickling, 1993; 1996; Lancaster & Baas, 1998)。一些研究者根据风洞实验和野外观测数据,结合风沙动力学中的经典输沙率公式,建立了植被覆盖率与风蚀输沙率之间的定量关系模型。

Buckley(1987)基于风洞实验数据,以Bagnold(1941)模型为基本构架,建立了植被覆盖率与风蚀输沙率之间的关系模型,形式为:

$$q = B[u(1 - kc) - u_{*t}]^3$$

式中,  $q$  为风蚀输沙率,  $u$  为一定高度上的风速,  $k$  为实验参数,  $c$  为地表植被覆盖率,  $u_{*t}$  为沙粒起动风速,  $B$  为实验常数,其计算公式为:

$$B = aC \sqrt{\frac{d \rho}{D g}}$$

式中,  $C$  为沙粒分选系数,  $a$  由  $[0.174/\log(z/z_0)]^3$  计算得到,  $z$  为测定沙粒起动风速的高度,  $z_0$  为地表粗糙度,  $D$  为标准沙粒粒径,  $\rho$  为空气密度,  $g$  为引力常数。

Wasson 和 Nanninga(1986)根据野外实地观测,从2种角度考察了植被对风蚀输沙的影响作用:

模型 I 的形式为:

$$q = B[u \exp(-k_1c - k_2c^2) - u_{*t}]^3 \quad (I)$$

模型 II 的形式为:

$$q = B[u - \exp(-k_3c - k_4^2)u_{*t}]^3 \quad (II)$$

式中,  $u_{*t}$  及意义同前,  $k_1, k_2, k_3$  和  $k_4$  均为正常数, 以

观测数据拟合求得。

可以看出,在模型 I 中,植被覆盖通过降低风速而减少风蚀输沙率,在模型 II 中,植被覆盖通过增大沙粒起动风速而减少风蚀输沙率,这样使得模型具有更加明确的物理学意义。Wasson 和 Nanninga 的模型不仅具有严格风沙动力学理论依据,而且与野外实际观测紧密结合起来,是一种被广泛接受和应用的建模思想和方法。

目前国内对于模型模拟的研究和应用相对薄弱,仅有一些零散研究。黄富祥等(2001)建立了植被覆盖率与风蚀输沙率之间的定量关系模型,并确定了不同风速条件下的有效植被盖度,具有重要的理论和实践意义;何洪鸣和周杰(2002)通过建立微分方程动态模型的方法讨论了防护林对风沙扬尘阻滞作用的机理,并在对模型进行分析的基础上,进一步说明营建防护林的理论与实践意义。

定量模型一般基于实验观测数据与风沙动力学理论的结合,既有比较完备的理论根据,又有实际观测数据支持,定量反映植被覆盖对风蚀地表的防护效应,被认为是风蚀研究领域的重要进展之一(Fryrear, 1985; Leys, 1991; Wolfe & Nickling, 1993)。尽管植被覆盖率模型对植被防治风蚀作用的有些描述还不太准确,但模型变量植被覆盖率具有简洁、直观的优点,模型计算结果也具有更加直观的物理意义(黄富祥等, 2002)。

风洞和野外观测实验数据,不仅可用于检验或验证模型研究结果的真实性和科学性,还得到了许多具有重要理论和实践价值的结论。尤其是关于不同条件下的植被覆盖率阈值及其它风沙动力学重要参数的模拟结果,更加深了人们对植被覆盖保护效应的认识(黄富祥等, 2002)。

#### 4 植物防治风蚀作用的机理

植被的存在有效地抑制了土壤风蚀的发生,在风蚀过程中,植被可通过多种途径对地表土壤形成保护,减少风蚀输沙量。对于植物防风固沙功能机理的研究,目前比较一致的结论是,植物的地上部分主要通过3种生态过程对地表土壤形成保护作用(Bressolier & Thomas, 1977; Wolfe & Nickling, 1993):第一,植物覆盖部分地表,避免了被覆盖部分受风力的直接作用。第二,植物的存在增加了下垫面的粗糙度,这样就可以吸收和分散地面以上一定高度内的风动量,从而减少了气流与地面物质之

间的动量传递,达到减弱到达地表面风动量的目的。地表粗糙度和摩擦速率随植被盖度的增大而提高,临界侵蚀风速也会相应增大,所以在一定范围内,植被对土壤风蚀的抑制作用随盖度的增大而越来越显著。第三,风蚀发生时,气流受到植物地上部分的阻挡、摩擦,消耗大量的运动能量,从而在植被层下形成速度较低的“束缚流”,阻止了被蚀物质的运动,并促使其沉积。上述3种生态过程都是通过下垫面与近地表气流场的相互作用来实现的。除此之外,植物根系(程洪等,2006)和生物结皮(李晓丽和申向东,2006)在抑制地表风蚀的过程中所起的作用也不可忽视。在土壤中,植物根系交错相连成网状,改善了土壤结构,起到了固结土壤的作用,抑制了风蚀的发生。建立植被较长时间后地表可形成生物结皮,它的存在使得土壤变得稳定,使土壤的抗风蚀性有显著的提高,可以有效抵抗冬春季节严重的风蚀,因此在干旱荒漠化地区越来越受到重视。

## 5 植物防风蚀作用的影响因素

植被对土壤风蚀的影响可反映在地表粗糙度及风蚀强度的变化上,其影响作用取决于植被层的特征,包括植被类型、盖度、密度、高度、宽度、植株形状及排列方式、植株弹性等。在防止土壤风蚀的实践中,植被盖度是人们最关心和最具实践意义的特征参数,许多相关研究也是围绕植被盖度与风蚀的关系展开的。有关测量结果表明,当植被覆盖度达到35%~40%时几乎不发生风蚀(Chepil & Woodruff, 1963);Bressolier和Thomas(1977)在法国大西洋沿岸沙丘区的研究结果表明,在植被的诸多特征中,植被盖度对风沙运动的影响最大,其次是植被高度和宽度;Fryear(1985)研究得出,风蚀率随植被盖度的增加呈指数函数减少;Giles等(1995)对卡拉哈里沙漠线形沙丘沙面活动性和植被覆盖度的关系研究中发现,植被覆盖度>14%时,沙面活动趋于稳定,盖度<14%时沙面活动系数显著增大;胡孟春等(1991)通过风洞实验探讨了不同植被盖度抗风蚀的极限值,发现当盖度<60%时,随盖度增加抗风蚀极限风速增大缓慢,而当盖度>60%时,抗风蚀极限风速增大迅速;董治宝等(1996a)研究植被对风沙土风蚀作用的影响也发现保持植被盖度在20%或60%以上将会从根本制止强烈风蚀或风蚀的发生,说明地表植被覆盖度达到一定程度时即可获得理想的防护效果。

植被的其他特征对风蚀的影响较为复杂,很难进行量化。Lee和Soliman(1977)总结了大量实验观测结果后指出,植株的形状是影响植被覆盖防护效应的重要因素,植被类型的不同可能造成防护效应的显著差异。不同的植被类型防治风蚀的性能也是不同的,有研究表明(赵彩霞等,2005),在干旱、半干旱地区灌木的防风蚀作用最大,其次分别是多年生牧草、林木、作物及一年生牧草。刘小平和董治宝(2002)通过风洞试验发现植被高度对防风蚀效应的影响较密度大。董治宝等(1996b)的研究表明,以植物对风力作用影响的角度来看,植被密度、作用区面积及分布形式均影响土壤风蚀,但作用形式与效果不尽相同,并发现植被覆盖度相同的条件下,均匀分布形式比丛状植物对土壤风蚀有较好的防止作用。

## 6 存在问题及展望

由于全球荒漠化问题日益突出,近年来,国内外学者对植物防风固沙作用的研究有增热趋势(Lancaster & Baas, 1998;董治宝等,2000;海春兴等,2002;Hupy, 2004;王晓东等,2005)。虽然近年来国内在植被防风蚀作用方面的研究取得了一些成果,但仍旧处于起步阶段,基础还比较薄弱,对诸多问题的认识存在着不足(Dong et al., 2000)。因此结合当前西部植被生态建设的实践的迫切需要,今后应该重点研究和解决以下几个问题:1)在研究手段方面,由于研究植物防风蚀作用的3种主要手段各自存在缺点和不足,在以后的研究中应该将风洞实验、野外观测与模型模拟互相结合起来,取长补短(何兴东等,2002)。随着计算机技术和观测手段的迅速提高,模型模拟研究具有很大发展潜力。目前国内用于测试风沙的实验仪器种类较少,自动化程度较低,另外有些仪器(如集沙仪)不规范也使得测试结果缺乏可比性,降低了资料的使用价值。国外虽然有精密先进的科研仪器,但专门测试风沙环境的仪器并不多,测试精度也不高,因此在引进国外先进仪器的同时,还必须注重对仪器自行研制、改装,以提高实验仪器在风沙环境中的适用性和精确性;2)影响植物防风蚀作用的因素除植被覆盖度之外,植被高度、宽度、植物的形状、植株弹性及排列方式等对风蚀地表的防护作用的影响也很重要,但以往的研究往往偏重于植被盖度,而对其它因素防护效应的影响有所忽略,今后应该得到进一步的深入研究;

3) 保护和建立人工植被是增加土壤抗风蚀能力的重要措施。由于风蚀发生的时间大多在春季,而此时大多数植物尚未萌发,因此对防风蚀植被恢复工程来说,注意植被覆盖地面的状况与风蚀发生季节在时间上的匹配性显得特别重要。以往在植被生态建设中“重乔木,轻灌草”的倾向是要不得的。因为灌木植被一般可在春季风蚀最为严重的时期保持较高的覆盖率和防护性能,而且灌木防风蚀的效果要优于乔木(Lal, 1987)。因此,在干旱半干旱区植被生态建设中,灌木植被应该成为优先发展的植被类型。

今后对植被防治风蚀作用的研究应在下列几个方面开展工作:1) 不断改进实验仪器,改善现有的研究手段和方法,提高实验和模型模拟结果的可靠性和准确度;2) 加强诸如植被密度、高度、植株形状及排列方式等植被特征对风蚀地表防护效应的研究;3) 对植被防治风蚀作用机理的研究还需深入;4) 建立和改进风蚀预报模型;5) 结合水分条件确定达到最大防护效应时的临界植被覆盖度。

## 参考文献

- 程洪, 谢涛, 唐春, 等. 2006. 植物根系力学与固土作用机理研究综述. 水土保持通报, 26(1): 97-102.
- 董光荣, 李长治, 金炯, 等. 1987. 关于土壤风蚀风洞试验的某些结果. 科学通报, 32(4): 297-301.
- 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 1996a. 植被对风沙土风蚀作用的影响. 环境科学学报, 16(4): 437-443.
- 董治宝, 陈渭南, 李振山, 等. 1996b. 植被对土壤风蚀影响作用的实验研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 2(2): 1-8.
- 董治宝, Fryrear DW, 高尚玉. 2000. 直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验. 中国沙漠, 20(3): 260-263.
- 海春兴, 刘宝元, 赵烨. 2002. 土壤湿度和植被盖度对土壤风蚀的影响. 应用生态学报, 13(8): 1057-1058.
- 何洪鸣, 周杰. 2002. 防护林对沙尘阻滞作用的机理分析——建立微分方程的动态模型. 中国沙漠, 22(2): 197-200.
- 何兴东, 赵爱国, 段争虎, 等. 2002. 塔里木沙漠公路灌木固沙林带的防护效应. 生态学杂志, 21(4): 26-30.
- 贺大良. 1987. 风沙现象的相似问题. 中国沙漠, 1(7): 18-23.
- 胡孟春, 刘玉章, 乌兰, 等. 1991. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究. 中国沙漠, 11(1): 22-29.
- 黄富祥, 牛海山, 王明星, 等. 2001. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系. 地理学报, 56(6): 700-710.
- 黄富祥, 王明星, 王跃思. 2002. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展. 植物生态学报, 26(5): 627-633.
- 蒋德明, 曹成有, 范士香, 等. 2001. 科尔沁沙地荒漠化对辽宁北部地区的危害及其防治对策. 应用生态学报, 12(suppl.): 6-8.
- 李进. 2002. 人工樟子松-差不巴嘎蒿植被及其固沙作用. 生态学杂志, 21(3): 17-21, 27.
- 李晓丽, 申向东. 2006. 结皮土壤的抗风蚀性分析. 干旱区资源与环境, 20(2): 203-207.
- 李振山, 倪晋仁. 1998. 风蚀流研究的历史、现状及其趋势. 干旱区资源与环境, 12(3): 89-97.
- 刘国强, 张煜星. 2000. 中国荒漠化状况及其防治. 北京: 中国林业出版社.
- 刘小平, 董治宝. 2002. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究. 中国沙漠, 22(1): 82-87.
- 任海, 彭少麟. 2003. 恢复生态学导论. 北京: 科学出版社.
- 申建友, 董光荣, 李长治. 1988. 风洞与野外输沙率的分析和讨论. 中国沙漠, 8(3): 23-30.
- 沈晓东, 程致力, 区柏森, 等. 1992. 防风固沙林阻沙效果的风洞模拟实验. 林业科学研究, 5(2): 219-224.
- 王晓东, 岳德鹏, 刘永兵. 2005. 土壤风蚀与植被防护研究. 西部林业科学, 34(2): 108-112.
- 吴正. 1987. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社.
- 俞学曾, 区柏森, 沈晓东. 1991. 防护林防沙效应风洞模拟实验. 气动实验与测量控制, 5(4): 46-52.
- 张华, 李锋瑞, 张铜会, 等. 2002. 科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征. 水土保持学报, 16(2): 20-28.
- 张继义, 赵哈林, 崔建垣, 等. 2003. 科尔沁沙地流动沙丘沙米群落生物量特征及其防风固沙作用. 水土保持学报, 17(3): 152-154.
- 张克存, 屈建军, 祖瑞平, 等. 2004. 不同下垫面对风沙流特性的影响的风洞模拟研究. 干旱区地理, 27(3): 352-355.
- 赵彩霞, 郑大伟, 何文清. 2005. 植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应. 植物生态学报, 29(1): 68-73.
- 朱震达, 刘恕. 1990. 中国的荒漠化及其治理. 北京: 科学出版社.
- 朱震达. 1991. 中国的脆弱生态带与土地荒漠化. 中国沙漠, 11(4): 11-22.
- Bagnold RA. 1941. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Chapman and Hall.
- Braze AJ, Nickling WG. 1987. Dust storms and their relation to moisture in the Sonoran-Mojave desert region of the South-Western United States. *Journal of Environmental Management*, 24: 279-291.
- Bressolier C, Thomas YF. 1977. Studies on wind and plant interactions on French Atlantic coastal dunes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 47(1): 331-338.
- Buckley R. 1987. The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind. *Nature*, 325: 426-428.
- Chepil WS, Woodruff NP. 1963. The physics of wind erosion and its control. *Advance of Agronomy*, 15: 211-302.
- Daily GC. 1995. Restoring value to the world's degraded

- lands. *Science*, **269**: 350–354.
- Dong ZB, Wang XM, Liu LY. 2000. Wind erosion in arid and semi-arid China: An overview. *Journal of Desert Research*, **20**(2): 134–139.
- Findlater PA, Carter DJ, Scott WD. 1990. A model to predict the effects of prostrate ground cover on wind erosion. *Australian Journal of Soil Research*, **28**: 609–622.
- Fryrear DW. 1985. Soil cover and wind erosion. *Transactions of the ASAE*, **28**: 781–784.
- Gibbens RP, Tromble JM, Hennessy JT. 1983. Soil movement in mesquite dunelands and former grasslands of southern New Mexico from 1933 to 1980. *Journal of Range Management*, **36**: 145–148.
- Giles FS, David SG, Joanna E, et al. 1995. Dune mobility and vegetation cover in the southwest Kalahari Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, **20**(6): 515–529.
- Higgitt D. 1993. Soil erosion and soil problems. *Progress in Physical Geography*, **17**: 461–472.
- Hupy JP. 2004. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate. *Journal of Arid Environments*, **58**: 167–179.
- Lal R. 1987. Tropical Ecology and Physical Edaphology. New York: Wiley and Sons.
- Lancaster N, Baas A. 1998. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: Field studies at Owens lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**: 69–82.
- Lee BE, Soliman BF. 1977. An investigation of the forces on three dimensional bluff bodies in rough wall turbulent boundary layers. *Journal of Fluids Engineering*, **5**: 503–510.
- Lettau H. 1969. Notes on the aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description. *Journal of Applied Meteorology*, **8**: 828–830.
- Leys JF. 1991. Towards a better model of the effect of prostrate vegetation cover on wind erosion. *Vegetatio*, **91**: 49–58.
- Lyles L, Allison BE. 1981. Equivalent wind erosion protection from selected crop residues. *Transactions of the ASAE*, **24**: 405–408.
- Marshall JK. 1971. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution. *Agricultural Meteorology*, **8**: 269–292.
- Musick HB, Gillette DA. 1990. Field evaluation of relationships between a vegetation structural parameter and sheltering against wind erosion. *Land Degradation and Rehabilitation*, **2**: 87–94.
- Raupach MR. 1992. Drag and drag partition on roughness surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, **60**: 375–395.
- Raupach MR, Gillette DA, Leys JF. 1993. The effect of roughness elements on wind erosion threshold. *Journal of Geophysical Research*, **98**: 3023–3029.
- Siddoway FH, Chepil WS, Armbrust DV. 1965. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control. *Transactions of the ASAE*, **8**: 327–331.
- Taylor PA. 1988. Turbulent wakes in the boundary layer// Stenfen WL, ed. *Flow and Transport in the Natural Environment: Advances and Applications*. Berlin: Springer-Verlag: 270–292.
- Wasson RJ, Nanninga PM. 1986. Estimating wind transport of sand on vegetated surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**: 505–514.
- Wolfe SA, Nickling WG. 1993. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progress in Physical Geography*, **17**: 50–68.
- Wolfe SA, Nickling WG. 1996. Shear stress partitioning in sparsely vegetated desert canopies. *Earth Surface Process and Landforms*, **21**: 607–620.
- Wooding RA, Bradley EF, Marshall JK. 1973. Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. *Boundary-Layer Meteorology*, **5**: 285–308.
- Woodruff NP, Siddoway FH. 1965. A wind erosion equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, **29**(3): 602–608.

**作者简介** 贺山峰,男,1980年,硕士研究生。主要从事荒漠化研究。E-mail: heshanfeng@163.com

**责任编辑** 王伟