

沙漠公路防护林影响下近地表风沙流 粒度特征的空间分异

俞祥祥^{1,2}, 李生字¹, 马学喜^{1,2}, 贾文茹^{1,2}

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:利用 BSNE 集沙仪对沙漠公路两侧灌木混交防护林影响下的近地表风沙流粒度特征进行了研究,结果表明:在水平方向上,风沙流粒度沿主风向从林带上风侧到下风侧邻近林带流沙地,平均粒径减小,分选变差,而且越向下风向变化越大,但两条阻沙林带间风沙流粒度受沙丘影响不同于其他点,其平均粒径增大,分选性变好;在垂直方向上,风沙流平均粒径随高度先减小后增大,在植物冠层高度之上略有增大。受防护林影响,风沙流粒度的垂直分异减缓,而不同观测点之间的季节变化增大。防护林影响范围内近地表风沙流粒度的时空变化特征与防护林垂直疏透度、季节以及防护林内具体位置的微环境有关。

关键词:沙漠公路;防护林;风沙流;粒度特征

中图分类号:P931.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0334-08

Spatial Variation of Grain-size Characteristics of Near Surface Aeolian Sand Transport Under Desert Highway Shelterbelt

YU Xiangxiang^{1,2}, LI Shengyu¹, MA Xuexi^{1,2}, JIA Wenru^{1,2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: BSNE sampler was used to monitor the grain-size characteristics of near surface aeolian sand transport under desert highway shelterbelt. The results showed that in the horizontal direction, along the main wind direction from windward to leeward moving sand nearby the shelterbelt, the mean grain-size of aeolian sand transport decreased and the sorting coefficient became poor, and that the more downward the wind, the greater the changes. But between the two belts of sand-resisting forest, the grain-size characteristics of aeolian sand transport affected by the sand dunes were different with other points, its mean grain-size increased and the sorting coefficient became large. In the vertical direction, the main grain-size of aeolian sand transport firstly decreased and then increased, and the grain-size slightly increased above the plant canopy. Affected by the shelterbelt, the grain-size of near surface aeolian sand transport decreased in the vertical variation, but the grain-size of aeolian sand transport increased between different points in different seasons. Within the influence of shelterbelt, the spatial variation of grain-size characteristics of near surface Aeolian sand transport were relevant with the vertical porosity of the shelterbelt, season and the micro environment at specific location in the shelterbelt.

Keywords: desert highway; shelterbelt; aeolian sand transport; grain-size characteristics

风沙流中沙粒的粒度分布是风沙运动研究的重要内容之一^[1]。风沙流粒度组成不仅反映了风对沙源物质的搬运和分选情况,还体现了下垫面状况对风沙流移动过程的影响,同时还是风沙形成过程中风力强度的重要体现。通过对风沙流粒度的分析可以判

断沙物质的运移方式,有助于分析风沙危害形成演变过程中的环境条件^[2]。一般认为,离地表越近的气流所含沙粒越粗^[3]。但近年来,国内外学者通过野外观测和风洞模拟对风沙流粒度随高度的变化特征进行了一些研究,认为除沙粒粒径随高度增加而减小

收稿日期:2015-12-25

修回日期:2016-03-17

资助项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项“新疆沙区交通水利工程沙害综合防治新技术新材料研发与应用”(201130106-3)

第一作者:俞祥祥(1990—),男,新疆奎屯人,硕士研究生,研究方向为风沙地貌与荒漠化防治。E-mail: harry_0506@qq.com

通信作者:李生字(1975—),男,河北宣化人,副研究员,主要从事风沙地貌与荒漠化防治研究。E-mail: lishy_hb@163.com

外^[3-6],还存在以下 3 种情况:第一,粒径随高度增加而增大^[7];第二,沙粒粒径随高度无变化^[8];第三,沙粒粒径随高度先减小后增加^[9]。由此可见,尽管以往对沙粒粒径随高度的变化进行了大量研究,但并没有统一的规律。

公路是沙漠地区重要的运输通道,也是经济社会可持续发展的动脉。然而沙漠地区风力强劲,沙源丰富,具备公路沙害形成的风动力和沙物质基础,极易发生风蚀、沙埋等公路沙害,影响公路的正常运营。目前,防治公路风沙危害的措施很多,生物措施以其投资少、防护效益好、环境污染小而被广泛采用,特别是在沙源丰富而又无法大面积控制的情况下,营造防沙林带便成为一种行之有效的沙害治理方式^[10]。这主要是因为植被能通过增加地表粗糙度、降低近地表风速从而改变风沙流结构来达到防沙阻沙的目的^[11-12]。长期以来,国内外学者关于植被对风沙流的影响研究多通过数值模拟、室内风洞模拟或野外观测得出,并取得了一些研究成果^[3,6,13-18]。研究结果表明,植被对风沙流的影响不仅与植被盖度、植被类型、排列方式等因素有关,还与沙粒特征、下垫面状况以及风况有关^[19]。但这些研究主要针对不同植物之间、不同盖度之间或不同排列方式之间风沙流结构的差异而言,关于完整的植物防护体系内外对风沙流粒度的影响的报道不多,而且由于研究方法、沙粒特征、下垫面状况及气流特征不同,造成研究结果具有区域性差异,很难确定一种普遍规律^[12,20]。因此,对于不同地区防护林体系影响下的风沙流应在野外观测的基础上加以确定。

本文以塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区的沙漠公路防护林为研究对象,通过野外实地观测及室内试验分析,研究风沙流粒度特征对沙漠公路防护林体系的响应模式以及空间差异,旨在说明防护林体系下的风沙流粒度的时空变化,弥补植被对风沙流影响研究中的不足,为新疆地区公路沙害治理提供理论依据。

1 研究区概况与试验布设

1.1 研究区概况

试验区位于塔克拉玛干沙漠腹地塔中四油田基地路 K9 路段东北侧(39°00′N,83°40′E,1 099 m),距塔中四作业区约 3 km。该区主要的风沙地貌格局是高大纵向复合沙垄和宽广的垄间地相间分布^[21]。本试验布设在宽 1~3 km、长 2~5 km、地势平坦的垄间地内,区内沙物质机械组成以细沙和极细沙为主^[22]。根据塔中气象站观测资料研究,该区年平均气温 12.1℃,气温年较差平均在 33.0~39.0℃,极

端最高气温可达 40.0~46.0℃,极端最低气温达 -25.0~-20.0℃;年均降水量在 25.9 mm 左右,且 90%以上集中在春夏两季;区内蒸发量强烈,年均潜在蒸发量可达 3 812.3 mm;年均风速为 1.5~3 m/s,风向以 E,ENE,NE 为主;大风日数年平均为 10.5 d;该区还是塔里木盆地沙尘暴的高发中心,年沙尘暴日数可达 68~88 d^[23-24]。

1.2 试验布设

试验区位于塔克拉玛干沙漠腹地塔中四油田基地路 K9 处的垄间平沙地。该处油田公路建有阻固结合的防护林体系,见图 1,上风侧有两条阻沙林带和一条固沙林带,下风侧有一条固沙林带,各林带的间距均为 10 m,固沙林带距公路路肩 3 m;阻沙林带主要树种为怪柳和沙拐枣,偶有芦苇生长,林带宽度 7 m,林带高度 1 m 左右;固沙林带主要树种为怪柳、梭梭和沙拐枣林,林带中密集生长着高约 2 m 的芦苇,植被盖度可达 60%~80%,上风侧固沙林带宽 29 m,下风侧固沙林带宽 13 m。

本试验采用 BSNE 集沙仪来采集风沙流输沙。集沙口安装高度分别为 0.1,0.3,0.5,1.0,1.5,2 m。沿公路防护林体系纵断面布设在公路两侧,集沙仪相对位置见图 1,从上风向到下风向分别为流沙地、林间、上风侧固沙林带、下风侧固沙林带和林带下风侧,分别标记为 A,B,C,D 和 E,A 为对照。

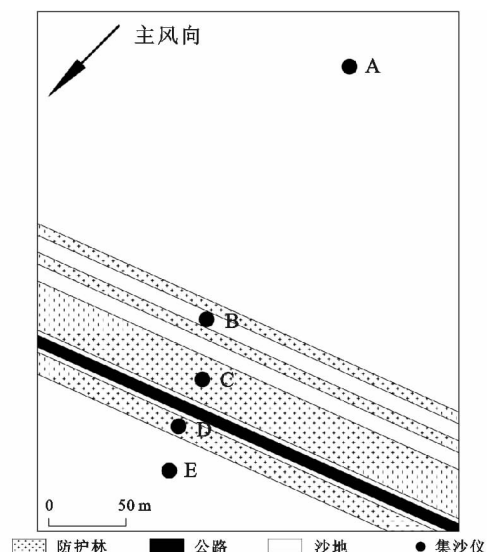


图 1 试验地防护林结构及集沙仪布设位置

本研究共进行 6 次风沙流观测及采样,本文选择其中 3 次进行粒度分析,分别为 2013 年 5 月、8 月和 10 月,主要考虑这 3 个月收集到了足够进行粒度分析的样品,采样频率为 1 个月。在观测期间,防护林体系内外试验观测断面地形见图 2。

在 A 测点附近布设有自动气象观测站,风速、风向数据采用 16 方位自动风速仪记录,风速仪风杯距地面高度为 10 m,观测频率为 2 min,记录频率为 1 h。

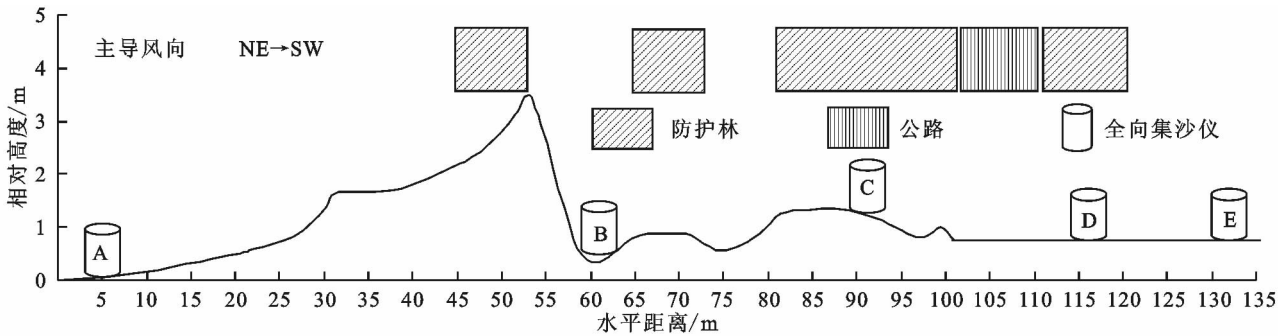


图 2 试验观测断面地形及集沙仪布设位置

1.3 数据处理

粒度分析采用 BT—2001 型激光粒度分布仪(湿法)测量样品粒度。粒度分析结果以体积百分含量表示,根据温德华粒级标准划分方法统计了各输沙样品的颗粒级配^[25],并根据 Folk-Ward 图解法^[26] 计算粒度参数(平均粒径 M_z 、分选系数 σ_ϕ 、峰度 K_G 、偏度 SK_ϕ)。

2 结果与分析

2.1 沙粒级配变化

如图 3 所示,各观测点和各高度不同粒径组分含量存在较大差异。在 0.1 m 高度,A 点风沙流输沙以极细沙和细沙为主,平均含量分别为 62.82% 和 21.72%,粉沙为 15.23%,中沙为 0.23%,不含黏土;而 B 至 E 点基本以极细沙和粉沙为主,其中极细沙

含量多大于 A 点(E 点略小于 A 点),粉沙含量均大于 A 点,细沙含量均小于 A 点;B 和 E 点的中沙含量小于 A 点,C 点含有微量黏土 $[(0.02\pm0.03)\%]$ 。

在其他观测高度,各点均以极细沙和粉沙为主,细沙其次,部分含有微量的黏土,均不含中沙;从 0.3 m 到 2.0 m,B 点和 C 点的极细沙含量多大于 A 点(1.5 m 高度 C 点小于 A 点),D 点和 E 点多小于 A 点(0.3 m 高度 D 点略大于 A 点);从 0.3 m 到 2.0 m,E 点粉沙含量均大于 A 点,B,C 点多小于 A 点(0.3 m 高度 C 点略大于 A 点),D 点从 0.3 m 到 0.5 m 小于 A 点,而从 1.0 m 到 2.0 m 大于 A 点;从 0.1 m 到 0.3 m A 点不含黏土,而 B,C,D,E 含有一定量的黏土,从 0.5 m 到 2.0 m A 点含有黏土,而 C,D,E 含的黏土含量大于 A 点,B 点不含黏土或含量小于 A 点。

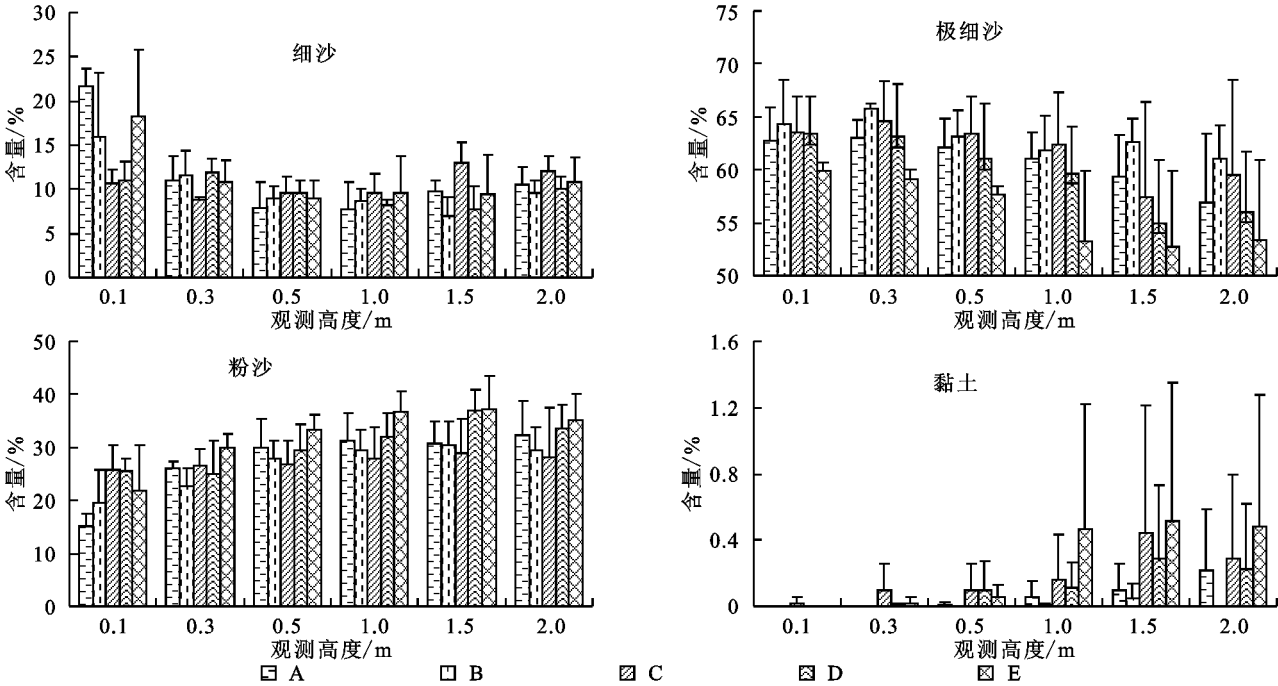


图 3 各点不同高度不同粒径组分含量变化

综上,公路防护林体系对近地表风沙流输沙的沙粒级配产生了很大影响,沙漠公路防护林内外的近地表风沙流输沙均以极细沙为优势组分,其含量可达 44.78%~67.98%;粉沙和细沙多为第二、三优势

组分,其含量分别为 20.65%~40.94%,4.30%~14.76%(部分点在部分观测时段 0.1 m 高度细沙和粉沙为第二、三优势组分);多数不含中沙和黏土,仅部分点、部分观测时段和高度含有微量中沙和

黏土,含量分别为 0.06%~0.41%,0.02%~1.49%。不同粒径组分含量随高度而变化,其中极细沙含量随高度增加而降低,而粉沙和黏土含量则随高度增加而增大,细沙含量则随高度增加先降低后增加。

2.2 粒度参数变化

不同测点风沙流输沙的粒度参数平均值见图 4。不同观测点粒度参数存在较明显的差异。在 0.1 m 观测高度上,从 A 点到 E 点平均粒径呈先减小后增加的变化规律,其中 C 点和 D 点平均粒径最小, E 点与 B 点相近;但在 0.3 m 至 2.0 m 观测高度上,平均

粒径呈先增加后减小的变化规律, E 点平均粒径均最小,而 0.3 m 观测高度 B 点最大,0.5 m 至 2.0 m 高度 C 点最大。在各观测高度上,从 A 点到 E 点分选系数呈先减小后增加趋势, B 点分选系数最小, E 点分选系数最大,该点 1.0 m 以上均属中等分选。在 0.1 m 观测高度上,从 A 点到 E 点峰度值呈先增加后降低变化, C 点峰度值最大, A 点峰度值最小;从 0.3 m 到 2.0 m,从 A 点到 E 点峰度值先减小后增加, B 点峰度值最小。偏度值变化模式与峰度值相似。在 0.1 m 观测高度上, C 点偏度值最大,从 0.3 m 到 2.0 m, B 点偏度值最小。

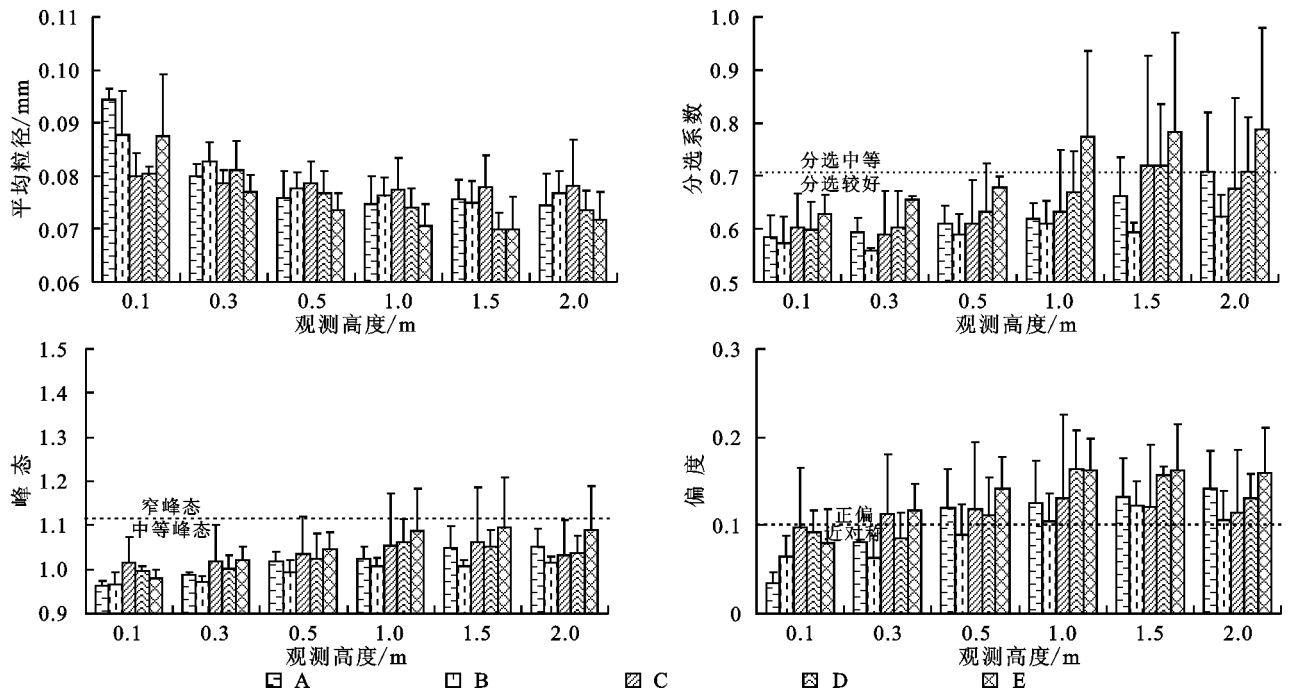


图 4 不同测点不同高度的粒度参数

综上,防护林内外风沙流沙平均粒径为 0.070~0.094 mm,多为较好分选(部分为中等分选),均呈中等峰态,多呈近对称分布(部分呈正偏分布)。随观测高度增加,平均粒径 M_z 呈减小趋势,分选系数 σ_c 、峰度值 K_G 、偏度值 SK_c 均呈增大趋势,表明近地表风动力逐渐降低,分选性变差,中位数向细颗粒方向偏移(正偏),颗粒组成整体细化。

粒度参数在垂直和水平方向的变差系数见图 5,各粒度参数垂直变化程度不同,其中峰态最小,偏度最大,平均粒径和分选系数居中。这种变化程度在各观测点之间也有差异,但差别多未达到显著程度(图 5A)。B、C、D 观测点各粒度参数的垂直变差系数多小于 A 观测点,而 E 观测点多进一步增大(偏度减小);在 C 观测点,平均粒径、峰态、偏度垂直方向上的变差系数最小,其中平均粒径和偏度达到显著水平($p<0.01$)。可见,受防护林影响,近地表风沙流输沙粒度参数的垂直分异得到

一定程度减缓,上下层之间趋同性增强。

在同一观测高度,粒度参数在各观测点之间存在明显的水平变化,而变化程度也因观测高度而不同,但差别多未达到显著程度(图 5B)。在 6 个观测高度中,0.5 m 高的水平变差系数最小,其中平均粒径差异达到了显著水平($p<0.01$);0.1 m 高平均粒径和偏度变差系数最大,1.0 m 高分选系数和峰度变差系数最大,但都没有达到显著水平($p>0.01$)。

从 3 个时段间的风沙流输沙粒度参数的变差系数来看,各观测点的季节变化也不同,防护林内观测点变化程度都大于 A 点,尤其以 C 点表现最为明显,其中偏度、峰度和分选系数的变异系数差异达到显著水平($p<0.01$),而平均粒径变异系数差异不明显($p>0.01$)(图 6A);从各观测点间粒度参数变差系数来看,3 个观测时段也存在较明显差异,8 月份各粒度参数均小于 5 月份和 10 月份,只有峰度变

异系数达到显著水平($p < 0.01$),而其他参数差异不明显($p > 0.01$)(图 6B)。可见,防护林使近地表风

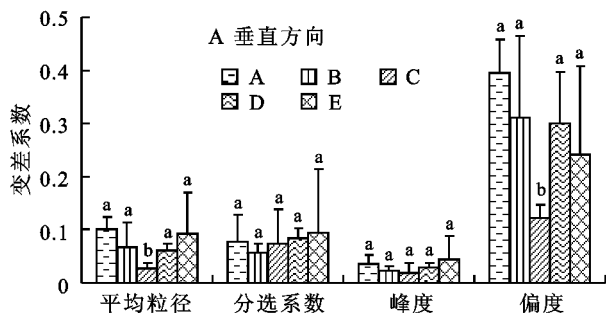


图5 粒度参数在垂直和水平方向的变差系数

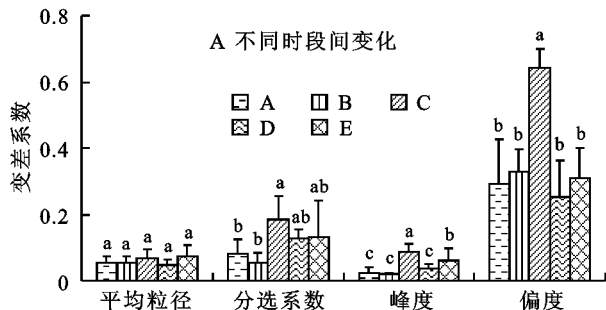


图6 粒度参数的季节、测点变差系数

2.3 概率累积曲线变化

防护林内外各点不同高度的风沙流输沙的概率累积曲线均为四段式(图 7),第一段左端点粒径为0.179 7~0.275 8 mm,第一、二段的截点粒径为0.116 9~0.150 3 mm,第二、三段的截点粒径为0.031 0~0.039 1 mm,第三、四段的截点粒径为0.003 8~0.012 6 mm,第四段右端点粒径为0.000 5~0.001 0 mm。第二组分含量最高(73.58%~87.29%),属于粗粉沙、极细沙或细沙,第一组分含量(5.47%~21.87%)其次,属于极细沙、细沙或中沙,第三组分含量(1.63%~8.44%)么三,属于粗粉沙、中粉沙、细粉沙、极细粉沙或黏土,第四组分含量最低(0.14%~0.29%),属于细粉沙、极细粉沙或黏土。概率累积分布图上左边两个组分属于两个跃移组分,右边两个组分属于悬移组分。根据累积频率曲线的斜率,第一跃移组分和第二悬移组分分选最好,而第二跃移组分分选其次,第一悬移组分分选最差。

由图 7 可知,各观测点概率累积曲线均有一定差异,主要表现为各段的斜率以及段间截点横坐标值的大小,其中第一组分、第四组分较第二组分和第三组分差异明显;在 1.0 m 高度以上,各观测点概率累积曲线差异明显,而在 0.3 m 和 0.5 m 高度,差异最小;各观测点曲线多在第一、二段截点处相交(0.1 m 高度除外),且曲线在截点左右相对排列顺序相反。在交点右侧,从 A 到 E 点,各段截点均向右偏移(粒径减小);而在交点左侧,从 A 到 E 点,各段截点均向

沙流输沙的粒度参数变化增大,尤其以夏季表现最为明显。

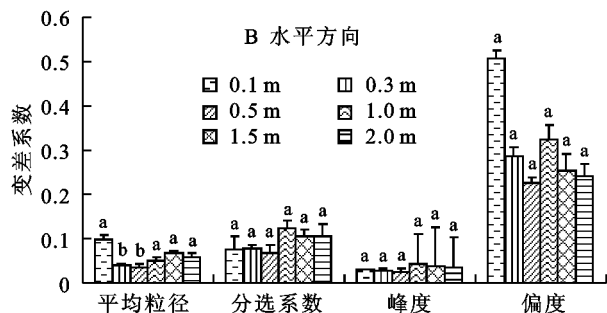


图7 粒度参数在水平方向的变差系数

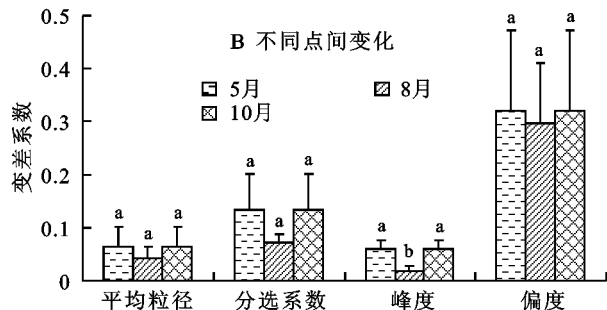


图8 粒度参数的季节、测点变差系数

左偏移(粒径增加);B点较特殊,在 0.5 m 高度以上,第二、三、四段粗化明显,而第一段细化明显;E点在 0.1 m 高度上粗化明显,而在其他高度细化明显。

3 讨论

3.1 风沙流输沙粒度的水平分异及影响因素

风沙流输沙的粒度主要与沙源和风况有关。一般认为,沙源区地表沙物质在风力作用下被吹蚀起动,并向下风向搬运,在这一过程中沙物质被重新分选,不同粒径范围的沙粒运动方式不同,向下风向搬运的距离也不同,一般表现为沿主导风向沙粒变细、分选变好^[2]。观测期间,研究区起沙风的风向较为单一,变化幅度较小,主要以 NE,ENE,E 三个方向为主,占有起沙风的 75.63%(图 8)。因此,在单一风向的影响下,风沙流中沙粒应该存在沿风向粒径变细、分选变好的趋势。

A 点在林带上风侧较远距离处,基本不受防护林带的影响,可代表自然流沙地表风沙流输沙的特征:粒径较粗,分选性较好,中等峰度,偏度近对称至正偏分布。作为风沙输移路径上的较大障碍物,防护林能强烈影响局地的风沙流输沙的粒度特征。与 A 点相比,B点至 E 点风沙流输沙均受到防护林的影响,粒度参数变化有两种情况,见图 9:C,D,E 点,平均粒径依次逐渐降低,分选系数、峰度值、偏度值均依次逐渐增加,E 点变化程度最大;而 B 点则相反,平均粒径略有增加,而分选系数、峰度值、偏度值均降低。可见,

各观测点的具体位置与其受影响程度有关。本文与张正偲等^[1]对人工卵石床面模拟戈壁下垫面情况下风沙流、董玉祥等^[3,5]对海岸沙丘表面风沙流、冯大军

等^[6]对粗沙和细沙两种床面上的风沙流研究成果不同,造成这种差异的主要原因是本研究中下垫面的复杂程度不同,植被对风沙流粒度的影响更大\更复杂。

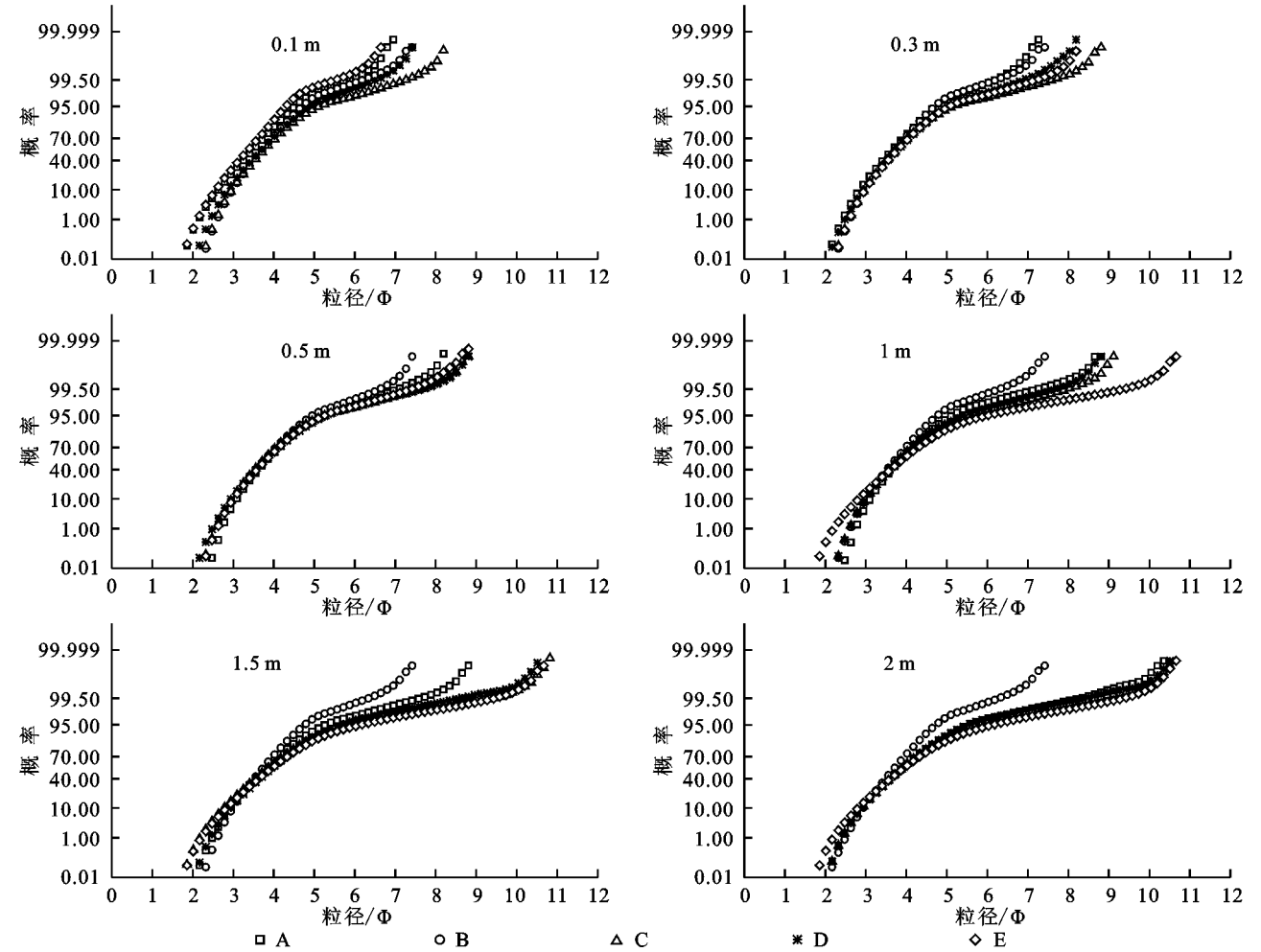


图 7 5 月各点不同观测高度概率累积曲线观测

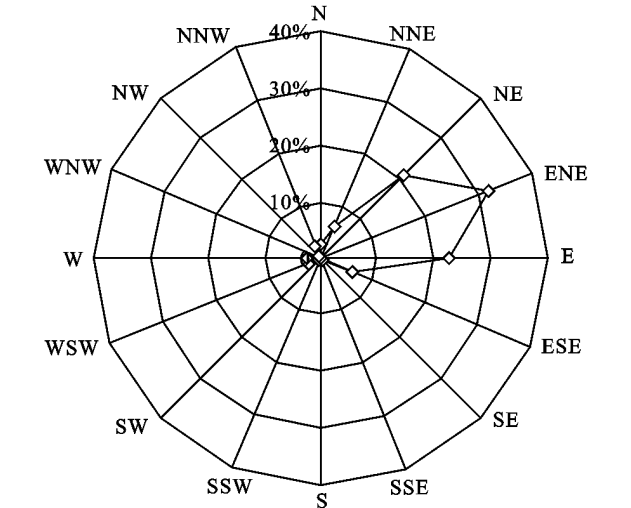


图 8 观测期间起沙风向频率玫瑰图

C 点和 D 点处于防护林体系中,防护林植被阻断了风对地表的直接作用,减少就地起沙,地表基本呈净堆积状态,因而地表风沙流输沙均为上风侧搬运来细粒物质,同时防护林植被能增加地表粗糙度,大

幅降低近地表风速,使风沙流携沙能力下降,较粗沙粒迅速沉降^[27-29],因而沿风向平均粒径减小,粒度分布趋于正偏,峰度变窄,分选性变差,而且越向下风向深入防护林体系,变化程度越大。虽然 E 点位于防护林下风侧相邻的流沙地,但其风沙流路径最长,受防护林影响最大,因此变化程度有一定加强。

B 点处于公路迎风侧两条阻沙林带之间的林间地(宽度约 10 m),地表裸露,无植被生长,沙物质活动较强,观测时,第一条阻沙林带拦截了大量流沙,形成了形体高大(3 m 左右)的垄状积沙体,积沙体的落沙坡已前移至 B 点所在的林间。高大积沙体迎风坡引起气流辐合抬升加速,气流作用于地表沙粒的剪切力增大,使较粗沙粒更易进入风沙流中^[2],而在背风坡由于地形骤然变化,附面层分离,气流减速,涡流发育,风沙流卸载堆积;随着远离落沙坡脚,风速一定程度恢复增加,风沙流侵蚀搬运能力增强,地表有一定程度风蚀,导致更多的粗颗粒进入气流中^[4]。处于积

沙体落沙坡前区的B点必然受此过程影响,风沙流输沙的粒级范围更广,平均粒径更粗,颗粒分布更趋于负偏,分选性更好。

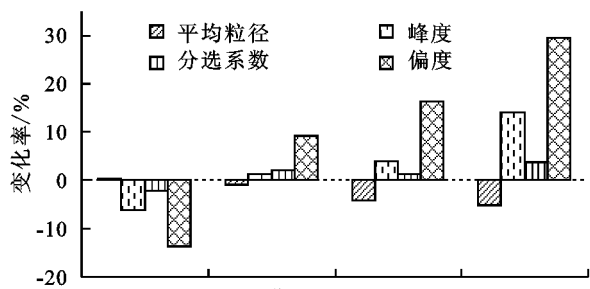


图9 B至E点粒度参数相对于A点的变化率

3.2 风沙流输沙垂直分异及植物的影响

董玉祥^[3,5]、冯大军^[6]、王翠^[29]、Leys^[30]和Zobeck^[31]等在均匀或非均匀流沙地表的研究表明:风沙流输沙在垂直方向上有较大分异,离地表越高平均粒径越细,粒级分布越窄、越趋向正偏,分选性越差,与本文中流沙地对照点A的规律基本符合。受防护林影响,B至E点粒度的垂直分异性较A点低,尤其以C点最为明显;垂直方向上,在1.5 m高度以下,各粒度参数变化规律同A点,但到2.0 m高度处骤然改变,相对1.5 m高度,平均粒径变粗、分选性变好,粒级分布范围变宽,粒级趋于负偏。这显然与防护林植被垂直疏透度不均匀分布有关。防护林种植的梭梭、怪柳、沙拐枣均为灌木,生长高度约2 m,上部(0.5~1.5 m)冠层枝叶茂密,疏透度小,对风沙流的拦截作用很大;地表层(0.1 m)受地表微起伏和枯枝落叶等影响较大,对风沙流的拦截作用也很大;而树冠顶部(2.0 m)疏透度相对较小,风沙流较易通过,而且防护林带使气流发生垂直抬升加速绕流,下层较粗颗粒可被携带到上层^[32]。因此,在2.0 m高度处,风沙流粒度参数发生了与前人研究成果不同的变化。

同时,自然条件的改变对风沙流粒度特征变化也有影响,相对A点,B至E点粒度的季节变化增大,各点之间粒度差异在夏季(8月)最小,而春(5月)秋(10月)相对较大。显然,这与植物的季相变化有关:夏季植物生长旺盛,枝叶茂密,对风沙流拦截作用达到最强,进入防护林体系内的风沙颗粒多为悬移的细小颗粒,不同点之间差异较小;而春秋季节植物枝叶刚萌发生长或已部分凋落,对风沙流拦截作用相对较小,不同粒级的沙粒均可进入防护林体系中,而跃移沙粒搬运距离小于悬移,不同点之间差异较大。

由此可见,人工林带对林带内部及其下风侧一定范围内风沙流粒度有明显影响,表现为平均粒径沿风向减小,分选变差(公路上风侧林间平均粒径增大、分

选变好);受植被垂直疏透度变化的影响,平均粒径随高度先减小后增大,在植物冠层高度之上粒径略有增大;季相变化对植被生长的影响使各月风沙流粒度特征变化不同。

4 结论

综上所述可知,在沙漠公路防护林影响下,近地表风沙流输沙粒度产生了较明显的变化,并具有一定的空间分异规律:在水平方向上,风沙流粒度沿主风向从林带上风侧到下风侧邻近林带流沙地,平均粒径减小,分选变差,而且越向下风向变化越大,但两条阻沙林带间风沙流粒度受沙丘影响不同于其他点,其平均粒径增大,风选性变好;在垂直方向上,风沙流平均粒径随高度先减小后增大,在植物冠层高度之上略有增大。受防护林影响,风沙流粒度的垂直分异减缓,而不同观测点之间的季节变化增大。防护林影响范围内近地表风沙流粒度的时空变化特征与防护林垂直疏透度、季节以及防护林内具体位置的微环境有关。

参考文献:

- [1] 张正偲,董治宝. 人工卵石床面风沙流粒度特征[J]. 中国沙漠,2014,34(3):639-644.
- [2] 钱广强,董治宝,罗万银,等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1357-1364.
- [3] 董玉祥,马骏. 海岸横向沙脊表面风沙流结构粒度响应的野外观测研究[J]. 中国沙漠,2008,28(6):1022-1028.
- [4] 何清,杨兴华,艾力,等. 塔克拉玛干沙漠风蚀起沙观测研究:试验介绍与观测结果初报[J]. 中国沙漠,2011,31(2):315-322.
- [5] 董玉祥,马骏. 输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的影响[J]. 中山大学学报:自然科学版,2009,48(3):102-108.
- [6] 冯大军,倪晋仁,李振山. 风沙流中沙粒粒度的垂直和水平分布特征[J]. 泥沙研究,2008(5):22-30.
- [7] Wai D V D. Grain-size-selective aeolian sand transport on a nourished beach[J]. Journal of Coastal Research, 2000,16(3):896-908.
- [8] Arens S M, Van Boxel J H, Abuodha J O Z. Changes in grain size of sand in transport over a foredune[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2002,27(11):1163-1175.
- [9] Farrell E J, Sherman D J, Ellis J T, et al. Vertical distribution of grain size for wind blown sand[J]. Aeolian Research, 2012,7(140):51-61.
- [10] 刘钰华,张纯. 新疆防沙林带优化模式的研究[J]. 干旱区研究,1992,9(2):13-26.
- [11] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geogra-

phy, 1993,17(1):50-68.

[12] 刘千枝. 景电灌区植被类型对风沙流结构的影响[J]. 甘肃林业科技,1997,22(3):13-17.

[13] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J]. 科学通报,2004,49(11):1099-1104.

[14] 武建军,罗生虎,闫光虎,等. 脉动风场下风沙流结构的数值模拟[J]. 中国沙漠,2011,31(3):602-606.

[15] 任春勇,武生智. 沙源供给条件对风沙流结构的影响[J]. 中国沙漠,2011,31(3):597-601.

[16] Zhang K, Qu J, Zu R, et al. Characteristics of wind-blown sand on Gobi/mobile sand surface[J]. Environmental Geology, 2008,54(2):411-416.

[17] 王自龙,赵明,冯向东,等. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流结构的观测研究[J]. 水土保持学报,2009(4):72-75.

[18] 张克存,屈建军,俎瑞平,等. 不同下垫面对风沙流特性影响的风洞模拟研究[J]. 干旱区地理,2004,27(3):352-355.

[19] 钟卫,孔纪名,杨涛. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞实验[J]. 干旱区研究,2009,26(6):872-876.

[20] 汪季,胡志敏. 近地表风沙流结构对不同植被覆盖度的响应[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(5):30-33.

[21] 范冬冬,李生字,雷加强,等. 塔克拉玛干沙漠腹地高大复杂纵向沙垄区沙丘分形特征[J]. 干旱区地理,2009,32(6):941-947.

[22] 凌裕泉. 塔克拉玛干沙漠的流场特征与风沙活动强度的关系[J]. 中国沙漠,1988,8(2):25-37.

[23] 杨兴华,何清,艾力,等. 1996—2008 年塔中地区的风沙环境特征[J]. 沙漠与绿洲气象,2010,4(2):21-25.

[24] 杨兴华,何清,艾力. 塔克拉玛干沙漠塔中地区春夏季风蚀起沙研究[J]. 中国沙漠,2010,30(4):770-776.

[25] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1922,30(5):377-392.

[26] Folk R L. Brazos river bar; a study in the significance of grain size parameter[J]. Jour. Sediment Petrol, 1957,27(1):3-26.

[27] 徐满厚,刘彤,赵新俊,等. 绿洲—荒漠交错带防护林与自然植被的协同防风效能及优化模式探讨[J]. 中国沙漠,2012,32(5):1224-1232.

[28] 刘芳,郝玉光,辛智鸣,等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1200-1207.

[29] 王翠,李生字,雷加强,等. 近地表风沙流结构对过渡带不同下垫面的响应[J]. 水土保持学报,2014,28(3):52-56.

[30] Leys J, McTainsh G. Soil loss and nutrient decline by wind erosion-cause for concern[J]. Australian Journal of Soil and Water Conservation, 1994,7(3):30-35.

[31] Zobeck T M, Fryrear D W. Chemical and physical characteristics of windblown sediment I. Quantities and physical characteristics[J]. Transactions of the ASAE,1986,29(4):1032-1036.

[32] Dong Z, Liu X, Wang H, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2003,49(3):219-230.



(上接第 333 页)

[23] 宋淑亚,刘文兆,王俊,等. 覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(2):210-212.

[24] 王德梅,于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(9):1965-1970.

[25] 褚鹏飞,王东,张永丽,等. 灌水时期和灌水量对小麦耗水特性、籽粒产量及蛋白质组分含量的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(4):1306-1315.

[26] 王志敏,王璞,李绪厚,等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报,2006,8(5):38-44.

[27] 张永玲,肖让,成自勇. 膜上灌对河西绿洲灌区玉米水分利用效率和产量的影响[J]. 节水灌溉,2010(5):9-10.

[28] 高延军,张喜英,陈素英,等. 冬小麦品种间水分利用效率的差异及其影响因子分析[J]. 灌溉排水学报,2004,23(5):45-49.

[29] Kang S, Zhang L, Liang Y, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management,2002,55(3):203-216.

[30] 苑涛,何秉宇. 干旱区水资源承载力分析及应用[J]. 水土保持研究,2007,14(3):341-342.

[31] 张显双,李秋梅,李红蕊,等. 水土保持是水土资源可持续利用的基础[J]. 水土保持研究,2007,14(6):79-80.

[32] 张小红,张绪成. 半干旱区旱地不同覆盖方式对糜子耗水和产量的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(5):29-34.