

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.036.

崔健, 高君亮, 乔靖然, 等. 乌兰布和沙漠公路“麦草沙障—梭梭”的防护效益[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 250-259.

Cui Jian, Gao Junliang, Qiao Jingran, et al. Research on the Protective Benefits of the ‘Wheat Grass Sand Barrier Haloxylon ammodendron’ on the Ulanbuh Desert Highway[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 250-259.

乌兰布和沙漠公路“麦草沙障—梭梭”的防护效益

崔健^{1,2}, 高君亮^{1,2,3,4}, 乔靖然^{1,2}, 于猛^{1,2}, 许亚欣^{1,2}

(1.中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200;

2.国家林业草原防沙治沙工程技术研究中心, 内蒙古 磴口 015200; 3.乌兰布和沙漠综合治理国家长期科研基地, 内蒙古 磴口 015200; 4.内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: [目的]研究公路防护体系的防风固沙作用为区域公路沙害防治提供科学依据。[方法]以乌兰布和沙漠东北部磴—额线沙漠公路防护体系为研究对象, 并对防护体系的输沙量和风速进行了同步观测。[结果](1) 风沙流穿过防护体系后各高度风速和总输沙量降低, 地表粗糙度增大, 防护体系上风向(B点)和下风向(C点)风速由高到低较A点降低分别48.7%, 14.4%和3.9%; 总输沙率分别较A点降低86.4%和98.3%, 地表粗糙度约由0 cm增大到4.92 cm。(2) 沙物质粒径的垂直分布表现出中砂含量显著降低, 细砂含量显著增加; 表层沉积物颗粒粒级变小, 频率分布曲线部分波段变窄, 分选性变差, 颗粒分布均匀且颗粒向着细粒化方向发展, 易风蚀颗粒范围在180~200 μm 。[结论]对于道路防沙工程要有“以阻为主, 阻固结合”的建设思想, 同时本研究区道路防风固沙体系实践可以为其他区域公路防沙提供重要借鉴经验。

关键词: 公路沙害; 防风固沙体系; 防护效益; 乌兰布和沙漠

中图分类号: X171.4; P425.5⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0250-10

Research on the Protective Benefits of the ‘Wheat Grass Sand Barrier Haloxylon ammodendron’ on the Ulanbuh Desert Highway

Cui Jian^{1,2}, Gao Junliang^{1,2,3,4}, Qiao Jingran^{1,2}, Yu Meng^{1,2}, Xu Yaxin^{1,2}

(1. *Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China*; 2. *Combat Desertification Engineering Technology Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China*; 3. *Ulan Buh Desert Comprehensive Control National Permanent Scientific Research Base, National Forestry and Grassland Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China*; 4. *Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China*)

Abstract: [Objective] Studying the windbreak and sand fixation effects of highway protection systems can provide scientific basis for the prevention and control of sand damage on regional highways. [Methods] The protection system of the Deng-E Desert Highway in the northeast of Ulanbuhe Desert was taken as the research object, and synchronous observation was conducted on the sediment discharge and wind speed of the protective system. [Results] (1) After the sand flow passes through the protection system, the wind speed and total sand transport at each height decrease, and the surface roughness increases. The wind speed in the upwind direction (point B) and downwind direction (point C) of the protection system decreases by 48.7%, 14.4%, and 3.9%, respectively, compared to point A from high to low. The total sand transport rate decreased by 86.4% and 98.3%, respectively, compared to point A, and the surface roughness increases from about 0 cm to 4.92 cm. (2) The vertical distribution of sand particle size shows a significant decrease in

收稿日期: 2023-03-16

修回日期: 2023-04-10

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0125); 巴彦淖尔市科技计划项目(K202125); 国家自然科学基金(32001374)

第一作者: 崔健(1997—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士, 助理工程师, 主要从事荒漠化防治工作。E-mail: 517632533@qq.com

通信作者: 高君亮(1985—), 男, 甘肃静宁人, 博士, 高级工程师, 主要从事荒漠化防治工作。E-mail: gaojl@caf.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

medium sand content and a significant increase in fine sand content. The particle size distribution of surface sediment decreases, the frequency distribution curve narrows in some bands, and the sorting ability deteriorates. The particle distribution is uniform and develops towards fine-grained direction, with a range of easily weathered particles ranging from 180 to 200 μm . [Conclusion] For road sand prevention projects, there should be a construction concept of “putting resistance first and combining resistance and fixation”. At the same time, the practice of road wind and sand prevention and fixation systems in this research area can provide important reference experience for road sand prevention in the other regions.

Keywords: highway sand damage; windproof sand fixation system; protection efficiency; Ulan Buh Desert

由于干旱、半干旱区局部地区生态环境脆弱,加之区域内风大沙多、春冬季风沙活动频繁^[1]。在风力的作用下,沙物质被吹蚀、搬运和沉积,剧烈的风沙活动会对耕地、建筑和交通运输线路等公共设施造成毁坏和破坏^[2]。随着我国西北大开发和“一带一路”倡议的陆续实施,越来越多的沙区公路投入运营,沿线风沙危害,部分线路的行车安全已受到影响。风沙灾害对沙区公路主要形成路基风蚀和沙埋形式的沙害^[3-6],其中,沙埋是路基沙害的主要表现形式^[7]。沙埋不但会造成路面磨蚀,增大养护成本,而且会产生扬沙引发交通事故,甚至会造成道路交通中断,大大增加建设成本^[8]。因此,随着交通建设逐步拓展,道路防沙治沙工作将面临更加复杂的环境和挑战。

自 20 世纪 50 年代包兰铁路成为我国首个流动沙漠区道路风沙防治成功案例起,便为我国沙区道路修筑与防护积累了宝贵经验^[9-10]。随着时代进步,交通线路防沙治沙经验与技术水平得到不断提高。众多学者通过风洞试验^[11-12]、野外观测^[13]和采用固、阻、输、导、挡风输沙型等多种道路防沙体系结构模式^[14-16]对道路沙害防治技术已作出详细研究;借助野外定位监测、三维激光扫描以及无人机航测技术,评价交通公路沿线风沙防护体系的防护效益,并利用计算机技术基于孔隙度、高度、防护间距等工程参数,选择适当的防沙措施并进行优化组合^[17-18];同时为解决公路风沙防护体系以单一的机械防护为主的问题,沙区抗逆植物种筛选培育、节水技术以及微生物材料在风沙防治中日益成熟,形成了生物、机械和化学相结合的综合防护模式^[19-20]。麦草沙障和梭梭作为最常见的机械沙障和防沙治沙先锋树种,在乌兰布和沙漠防沙治沙方面发挥重要作用,而沙漠东北部一直以来是沙化土地治理与开发的主要区域,从目前来看,在开发过程中需要修建公路,而为了避免公路沙害问题,当地就穿沙公路两侧构建的“麦草沙障—梭梭林”防风固沙体系取得显著成效,但对于此防风固沙体系所产生的防护效益还并未作出明确研究,因此,我们目前开展的研究主要是对当前以产生防护作用的防

护体系进行科学研究。

基于此,本研究以磴—额线磴口县工业园区穿沙公路两侧设置的“麦草沙障—梭梭林”防护体系为研究对象,运用野外观测和室内分析相结合的方法,分析风速、输沙量及土壤粒度变化情况,从而探究该防护体系的防风固沙效益,以期为该区域内其他公路风沙灾害防治提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北部,行政区划隶属内蒙古自治区磴口县。该区域属温带大陆性干旱季风气候^[20],年均气温为 7.6℃,年平均降雨量为 144.5 mm,年平蒸发量 2 397.6 mm。年均风速为 3.7 m/s,瞬时风速可高达 24 m/s,3—5 月易出现扬沙天气,平均年扬沙日数 77 d;土壤类型包括风沙土、棕钙土、灰漠土等,其中,风沙土面积最大。植被多以旱生及超旱生灌木和草本为主,天然灌木类植物有白刺(*Nitraria tangutorum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)等;草本植物有沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、猪毛菜(*Kali collinum*)、雾冰藜(*Grubonia dasyphylla*)、沙鞭(*Psammochloa yillosa*)等;人工灌木类植物主要有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、花棒(*Cotethrodendron scoparium*)等。

2 研究方法

2.1 样地选择与样点布设

选择磴—额线磴口县工业园区穿沙公路为研究对象,该公路于 2018 年建成通车后,为了防止公路两侧流沙上路产生沙害,当地有关部门在公路两侧的流动沙丘上铺设了草方格沙障(规格约为 1 m×1 m),并在障格内栽植了梭梭(行距约为 2 m×2 m),目前,整体防护效益比较显著。

于 2022 年 4 月 20 日大风天气下,对公路防风固沙体系的防护效益进行监测。

如图1所示在公路两侧布设了3个监测点,分别为公路上风向流动沙丘(A点),公路上风向距离公路近20 m的防护体系内(B点),公路下风向距公路近20 m的防护体系内(C点);分别在A,B,C点布设风速仪和集沙仪,风速仪测量高度分别为20,100,200 cm,集沙仪高度为50 cm高,共25层,每层积沙口规格为2 cm×2 cm,本研究中只收集到0~30 cm高度范围内沙物质。根据刘芳等^[21]的研究表明,该区域流动沙丘风速达到5.1 m/s时集沙仪可收集到风蚀物,而本试验进行风沙观测时风向为270°~290°,与当地主害风向垂直,输沙势与前人研究相一致,风速达到起沙风速,因此对此区域选择2个具有典型代表性的时间段进行风沙活动同步监测,每次监测时间20 min,风速采样间隔2 s。每次记录观测起止时间,观测结束后,将集沙仪各层沙样取出并倒入塑封袋中,袋上标记样品采集时间、位置以及高度信息,同时计算输沙量及输沙率。并将各测点位置处集的沙仪内沙物质带回实验室使用激光粒度仪测量垂直方向的沙粒含量分布,并分别采集A,B,C点处表层土壤装入塑封袋,并使用激光粒度仪测量表层土壤颗粒粒度情况。

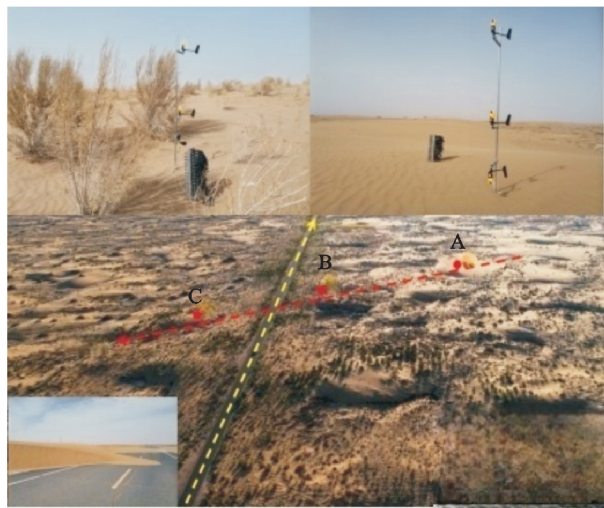


图1 样点布设图

Fig. 1 Layout of Sample Points

2.2 样品处理

(1) 土壤粒度特征。用激光粒度仪(型号:EYE-TECH,产地:荷兰,量程:0.1~3 400 μm)测量土壤粒径体积分数,本试验土壤粒径分级标准采用美国制分级标准^[22]。将土壤样品按粒径划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、极细砂(0.05~0.10 mm)、细砂(0.10~0.25 mm)、中砂(0.25~0.50 mm)、粗砂(0.50~1.00 mm)、极粗砂(1.00~2.00 mm)和砂石(>2.00 mm)。

采用伍登—温德华粒级标准,根据克鲁宾对数转化法,分别将先前输出的各土壤颗粒累积体积分

数对应的颗粒直径进行转换,有利于计算Φ值^[23],见公式(1)

$$\varphi = -\log_2 D \quad (1)$$

式中:D代表颗粒直径(mm)。

通过克伦拜因和福克计算累计频率曲线图上累计百分含量5%,10%,16%,25%,50%,75%,84%,95%所对应粒度对数值 $\varphi_5, \varphi_{10}, \varphi_{16}, \varphi_{25}, \varphi_{50}, \varphi_{75}, \varphi_{84}, \varphi_{95}$,据此计算粒度特征参数平均粒径(d_0)、标准偏差(σ_0)、偏度(S_0)、峰态值(K_0)^[23]。

(2) 粗糙度的计算。粗糙度是衡量下垫性质的指标,即地面风速为零的高度,用下式计算^[24]:

$$\lg Z_0 = \frac{(\lg Z_2 - A \lg Z_1)}{(1-A)} \quad (2)$$

式中: Z_1, Z_2 表示地面任意两个高程(cm); u_1, u_2 表示 Z_1, Z_2 两个高程上的风速(m/s); Z_0 表示该地表的粗糙度(cm); $A = u_2/u_1$; $Z_1 = 200$ cm, $Z_2 = 20$ cm。

(3) 风沙流特征值。根据风沙流结构函数,计算0~10 cm各高度的风沙流输沙量,根据吴正提出的判断地表蚀积状况的风沙流特征值的计算公式(3)^[25],计算得到各测点的风沙流特征值(λ),公式如下:

$$\lambda = \frac{Q_{2 \sim 10}}{Q_{0 \sim 2}} \quad (3)$$

式中: $Q_{0 \sim 2}$ 为0~2 cm高度内风沙流的输沙率[$g/(cm \cdot min)$]; $Q_{2 \sim 10}$ 为2~10 cm各高度风沙流输沙率的总和[$g/(cm \cdot min)$]。当 $\lambda > 1$ 时,表明下层沙量处于不饱和状态,气流尚有较大搬运能力,有利于吹蚀;当 $\lambda < 1$ 时,表明搬运沙物质多贴近地面,在地表易形成堆积;当 $\lambda = 1$ 时为蚀积平衡状态。

(4) 风沙流结构。半固定沙地的输沙率一般随高度呈指数函数或者幂函数关系变化(式4),但也随着区域、下垫面条件及天气状况而变化,而固定沙地一般服从多项式关系(式5),但拟合程度不高,没有明显规律^[26]。对各测点集沙仪10个高度的水平输沙通量进行拟合,公式如下:

$$q(x) = a(x)^b \quad (4)$$

$$q(x) = ax^2 + bx + c \quad (5)$$

式中: $q(x)$ 表示某一高度范围的输沙量(g/cm^2); x 表示沙物质所在集沙仪采集层的高度(cm); a, b, c 为拟合系数。

2.3 数据处理与分析

数据统计处理主要使用 Origin 2019b 和 Excel 2010软件完成。

3 结果与分析

3.1 风速变化情况

观测点不同高度处平均风速变化图(图2)可知,

各观测点风速和变化情况均表现出随着高度的增加风速逐渐增大的趋势;且在不同测点位置处平均风速大小出现明显变化,均表现为 A 点(流动沙丘)>B 点(梭梭林上风向)>C 点(梭梭林下风向),在 15 : 55—16 : 15 时间段 A 点位置平均风速依次为 8.61 m/s, 9.91 m/s 和 10.08 m/s; B 点位置平均风速依次为 5.54 m/s, 5.80 m/s 和 7.80 m/s; C 点位置平均风速依次为 2.93 m/s, 5.16 m/s 和 7.47 m/s; 在 16 : 45—17 : 05 时间段内 A 点位置平均风速依次为 8.33 m/s, 9.13 m/s 和 9.81 m/s; B 点位置平均风速依次为 5.63 m/s, 5.69 m/s 和 7.99 m/s; C 点位置平均风速依次为 2.81 m/s, 4.68 m/s 和 7.74 m/s。因此综合分析可以得出,风沙流由 B 点经过 C 点,风速迅速

降低,在 3 种高度下(20 cm, 100 cm 和 200 cm)风速分别降低了 48.7%, 14.4% 和 3.9%, 由此可以看出近地表风速降低明显,但随着高度的增加对于风速的削弱作用逐渐减小,风速降低程度减少;但通过对比 A 点和 B 点、C 点发现, B 点风速较 A 点在 3 种高度下(20 cm, 100 cm 和 200 cm)风速分别降低 34.0%, 39.6% 和 22.4%; C 点风速较 A 点在 3 种高度下(20 cm, 100 cm 和 200 cm)风速分别降低 66.1%, 52.5% 和 23.5%, 在 B 点、C 点两点位置处风速较 A 点风速均有不同程度的降低,但降低程度略有不同,表现出 C 点风速降低程度高于 B 点风速降低程度,说明该防护体系可以有效降低过境风沙流,从而达到保护公路免受沙埋。

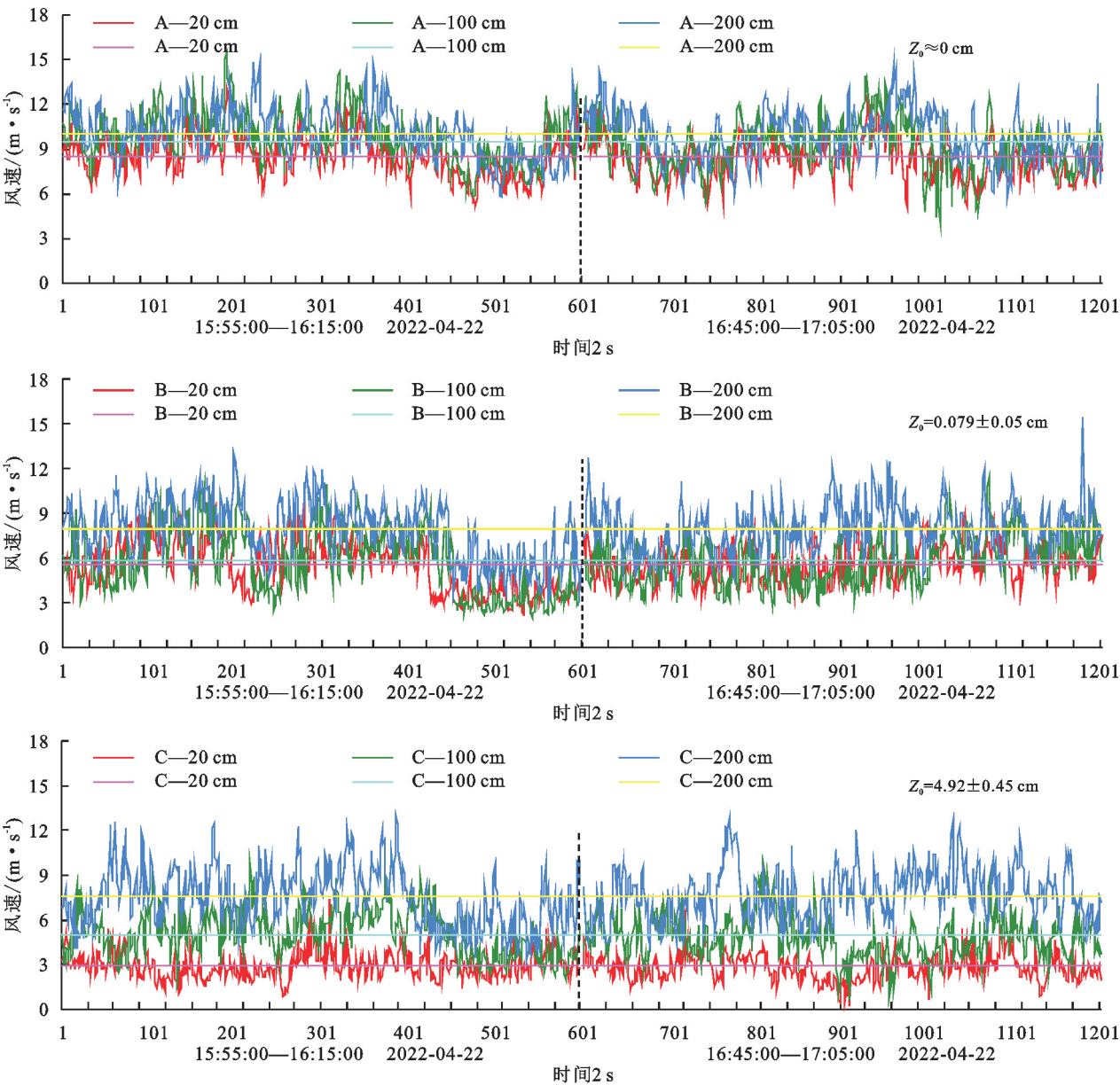


图 2 观测点不同高度风速变化

Fig. 2 Wind speed variation chart at different heights at observation point

由各观测点地表粗糙度(cm)可知(表 1),A 点地表粗糙度平均值约为 0 cm,B 点地表粗糙度平均值为 0.078 5 cm,C 点地表粗糙度平均值为 4.92 cm;由此表明 B,C 两点地表粗糙度均显著大于 A 点,即在此防护体系下能有效降低近地表风速并且增大地表粗糙度。因此可以看出防护体系防风效益显著。

由同一高度不同观测点位置风速变化图(图 3)可知,在 20 cm 高度处不同测点位置处的风速变化呈现出明显的分层现象,风速变化大小表现出 A 点>B 点>C 点,且由 A 点平均风速为 8.5 m/s 到 B 点平均风速为 5.6 m/s,风速有减小的趋势,但变化不大,由此说明再由 A 点到 B 点的过程中由于距离较远受到其他沙丘的影响,风速有所降低;但在经过阻挡后降低至 C 点平均风速为 2.9 m/s,风速迅速降低,降低至 A 点风速的 2 倍,由此可见能有效降低地表风速,对近地表风速有较强的削弱作用;在 100 cm 高度处,仍然表现出 A 点>B 点>C 点,但 B 点和 C 点两点风速变化较为接近,无明显变化。

表 1 不同观测点地表粗糙度

Table 1 Surface roughness at different observation points

测点位置	A	B	C
地表粗糙度/cm	≈0	0.079±0.05	4.92±0.45

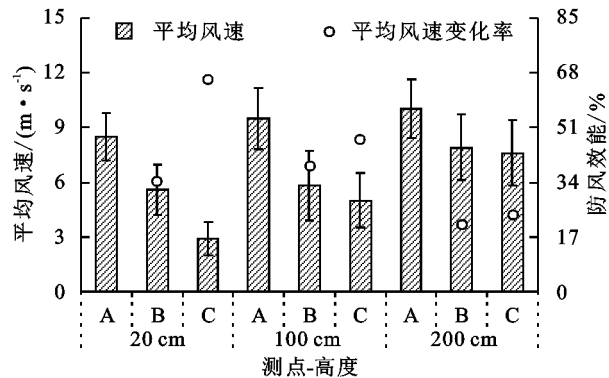


图 3 相同高度不同观测点风速变化

Fig. 3 Wind speed variation chart at different observation points at the same height

3.2 地表蚀积变化

由各观测点风沙流特征值(λ)可知(图 4),A 点 λ 平均值为 1.62,表明该位置风力强劲,流动沙丘地表沙源供给相对不足,地表呈现风蚀状态;B 点 λ 平均值为 1.05,表明该位置位于梭梭林上风向,由于受到梭梭林对风沙流的拦截,导致风沙流处于不饱和的状态,地表同时出现风蚀的状态;C 点 λ 平均值为 0.94,表明该位置在梭梭林的固定作用下沙物质迅速沉降,达到堆积状态;并且 C 点 λ 值小于 B 点,说明梭梭林下风向沙源供给比梭梭林上风向更加丰富。

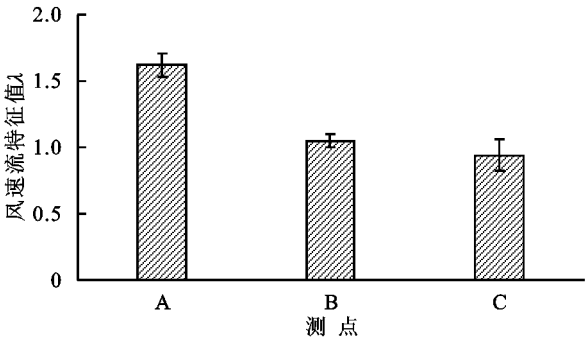


图 4 不同观测点的风沙流特征值

Fig. 4 Characteristic values of wind sand flow at different observation points

3.3 输沙率变化

图 5 为不同观测点输沙率变化图。由图可知,不同观测点输沙率均有所不同且均呈现出随着高度的增加输沙量逐渐减少,输沙量整体上表现出 A 点>B 点>C 点,不同观测点总输沙率依次为 10.5 g/cm/min, 1.43 g/cm/min, 0.18 g/cm/min, B 点、C 点总输沙率依次较 A 点总输沙率降低 86.4% 和 98.3%,由此可以看出,在梭梭林的拦截和固定下,地表沙源供给不充分,风沙流可搬运沙物质量大幅降低,从而表现为输沙量减小,并在一定程度上减小风沙对公路的侵害。由图可以看出,输沙量最大值均在 0~2 cm 范围内,而且输沙量主要集中在 0~10 cm 高度内,A 点在 0~10 cm 高度范围内输沙量为 9.7 g/cm/min,约占总输沙量的 90%,B 点在 0~10 cm 高度范围内输沙量为 1.37 g/cm/min,占总输沙量的 95%,C 点在 0~10 cm 高度范围内输沙量为 0.14 g/cm/min,占总输沙量的 78%。

3.4 风沙流结构

图 6 为各观测点不同高度水平输沙通量拟合曲线,在防风固沙体系公路上风向流动沙丘(A 点),公路上风向距离公路近 10 m 的防护体系内(B 点)水平输沙通量随着高度的增加而下降,水平输沙通量与高度符合幂函数关系,决定系数 R^2 分别为 0.89, 0.95;公路下风向距公路近 20 m 的防护体系内(C 点),水平输沙通量虽然也随着高度的增加而减小,但不符合幂函数关系,决定系数 R^2 为 0.81。在相同高度下,C 点水平输沙通量均远小于 A 点和 B 点,但随着高度的增加,差异逐渐减小,在 10~20 cm 高度范围内非常接近。

对各观测点风沙流结构(图 7)分析可知,A 点和 B 点在 8 cm 以下的水平输沙总量分别占总输沙量的 89.18% 和 94.54%,而 C 点占比仅为 75.27%;三者 在 10 cm 高度处的输沙比例非常接近分别是 A 点为 3.25%、B 点为 1.29% 和 C 点为 4.86%。然而在 12~

20 cm 高度范围内, C 点占总输沙量 19.87% 的比例均高于 A 点和 B 点, 占比分别为 9.62% 和 4.18%。由此分析可以得出, 在流动沙丘 A 点和防护体系上风向 B 点沙源供给相对丰富, 风沙搬运量随着距离地表越近而逐渐增加, 但同时搬运量却随着高度的增

加而逐渐减少; 而在防护体系下风向的 C 点, 由于防护体系内的梭梭林和草方格沙障具有很好的固沙作用, 输沙量大幅降低, 因此呈现出与固定沙地相似的风沙流结构特征, 由此证明, 在本研究内此防护体系具有很好的防风固沙作用。

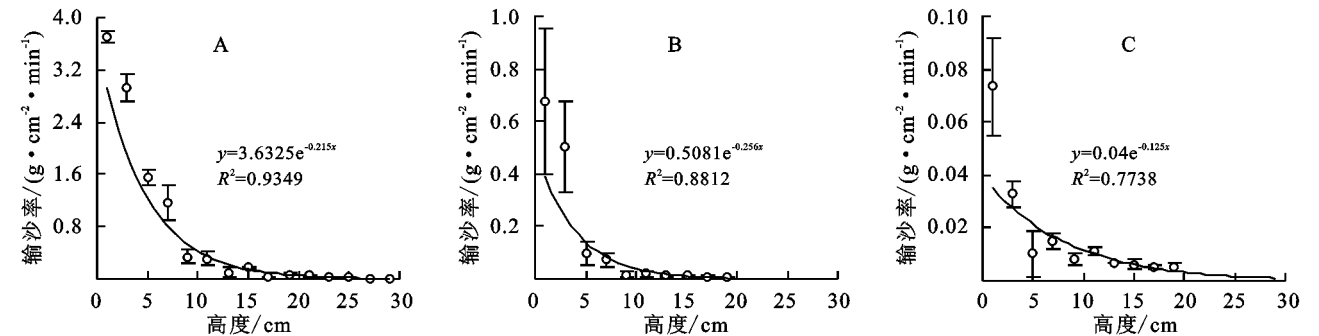


图 5 不同观测点输沙率变化

Fig. 5 Changes in sediment transport rate at different observation points

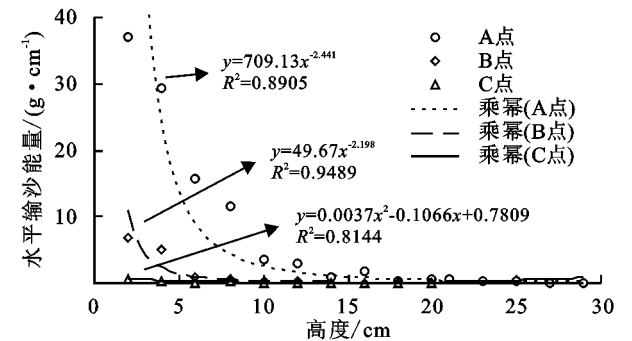


图 6 各观测点水平输沙通量的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of horizontal sediment flux at each observation point

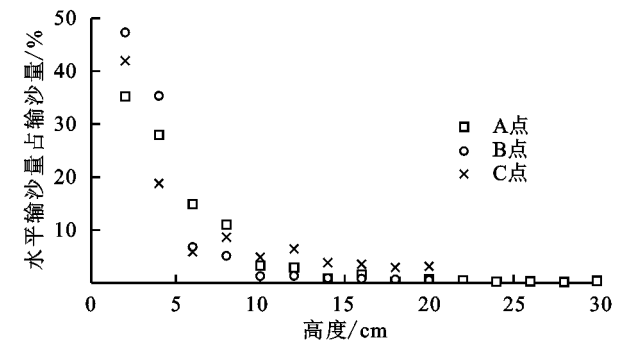


图 7 各观测点风沙流结构

Fig. 7 Wind sand flow structure at each observation point

3.5 不同观测点表层土壤沉积物粒度特征

图 8 为不同观测点表层土壤沉积物颗粒分布图。由图可以看出, 3 个测点位置表层土壤颗粒分布存在明显差异。A 点位置土壤粒级最大值为 654 μm , 而 B 点和 C 点位置土壤粒级最大值仅为 409 μm , 由此说明土壤颗粒粒级变小, 土壤颗粒向着细粒化方向发展。具体来看, A 点和 B 点呈现单峰式分布, 其波峰分别出现在 255 μm 和 227 μm 附近; C 点呈现双峰式分布, 其波峰分别在 202 μm 和 255 μm 出现; 进一

步分析可以看出在 202 μm ~255 μm 范围内土壤颗粒含量出现明显差异, 同时在 227 μm 处出现明显的分界点, A 点表现出随着土壤粒级增大土壤颗粒含量呈现逐渐增大的趋势并在 255 μm 处达到最大值 12.71%; B 点表现出随着土壤粒级增大土壤颗粒含量呈现先增大后减小的趋势, 在 227 μm 处达到最大值 13.45%; C 点表现出随着土壤粒级增大土壤颗粒含量呈现出先减少后增加的趋势, 在 227 μm 处达到最小值为 11.33%, 在 255 μm 处达到最大值为 12.34%。

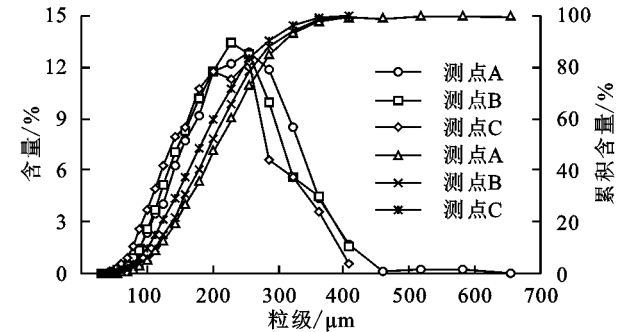


图 8 不同观测点表层土壤沉积物颗粒频率分布

Fig. 8 Frequency distribution of surface soil sediment particles at different observation points

表 2 不同观测点表层土壤沉积物粒度参数特征

Table 2 Characteristics of particle size parameters of surface soil sediment at different observation points

粒度参数	A 点	B 点	C 点
MEAN/ Φ (平均粒径)	8.770	8.732	8.662
SORTING/ Φ (标准偏差)	0.337	0.331	0.336
SKEWNESS(偏度)	-0.020	-0.003	-0.011
KURTOSIS(峰态)	0.958	0.993	0.959

土壤颗粒累积频率分布曲线能反映土壤颗粒的分布情况, 通常表现为曲线越陡, 土壤颗粒分布越均匀。分析各测点位置表层土壤的分布均匀程度发现,

在 $100\sim 400\ \mu\text{m}$ 范围内斜率最大,说明各位置表层土壤颗粒粒径大部分集中在 $100\sim 400\ \mu\text{m}$,且斜率大小依次为 C 点>B 点>A 点,由此说明 C 点位置土壤颗粒分布最均匀,B 点次之,A 点土壤颗粒分布均匀程度最差。

不同测点土壤粒度累积频率百分量反映出颗粒差异变化情况,即定性描述颗粒在一定范围内受到风蚀的影响。由图 8 可知,各测点位置土壤粒度累积频率间平均距离粒径最大值出现在 $180\sim 200\ \mu\text{m}$ 区间内,说明各测点位置整体颗粒粒径在 $180\sim 200\ \mu\text{m}$ 区域间较大,因此可认为研究区易风蚀颗粒范围在 $180\sim 200\ \mu\text{m}$ 。

由表 2 可知,3 个观测位置表层土壤粒度参数平均粒径由大到小依次为 B 点>A 点>C 点;标准偏差由大到小依次为 A 点>C 点>B 点;偏度等级依次为负偏、近于对称和近于对称;3 各观测点峰态均属于中等。即 B 点土壤分选性相比于其他位置较差,B 点土壤颗粒分布最均匀,同时 B 点平均粒径最大,其细粒物质含量最多,这与图 8 中 B 点土壤颗粒百分含量分布情况相符。

4 讨论

风沙灾害防治工程在实际应用中很少使用单一措施进行防护,多依据生物措施与工程措施相结合的方式,而工程措施作为生物措施的基础,它的配置同样讲究“固、阻、输(导)”的相互搭配^[27]。控制沙源是防治沙害的治本措施,机械防沙措施见效快、效果好,而且造价低^[28]。防沙体系中机械沙障的应用迅速提高了研究区对风沙流的拦截能力,防沙植物的种植则可以弥补破损机械的功能损失,还可以对风沙流进行再次拦截;植被种植和灌溉可以提高土壤的有机质含量和含水率,表层土壤盐分含量增加,提高了地表起沙风速,可降低土壤风蚀^[29-30]。而通过实践证明,流动沙丘上设置机械沙障后,风沙活动强度下降,影响植物生长的风蚀沙埋作用减轻,为沙生先锋植物的定居创造了良好条件。因此,设立道路工程防沙体系要尽量促进植被的恢复,在适宜植物生长的地方,应选择一些耐旱、耐盐、耐风蚀沙埋的植物进行飞播或者人工种植;以补充机械沙障防护效益方面的不足或缺陷,同时延长机械沙障的使用年限,并逐步形成以生物措施为主的防沙体系,从根本上解决沙害问题^[31]。在本研究中,在机械措施和生物措施相结合的工程防护体系下,风速变化情况由初始的 $8.47\ \text{m/s}$ 、 $9.52\ \text{m/s}$ 和 $9.94\ \text{m/s}$ 减小到 $2.87\ \text{m/s}$ 、 $4.92\ \text{m/s}$ 和 $7.60\ \text{m/s}$,风速降低程度最大约能达到初始的 2 倍,最小的为初始的 30%,这与李生宇等^[15]在研

究新疆 S214 省道防沙体系中得到的部分结论相似。粗糙度是描述下垫面对气流的阻碍作用,防护体系的构建使得近地表粗糙度增大,对过境气流起到削弱作用,本研究显示流动沙地粗糙度约为 $0\ \text{cm}$,该结果与吴晓旭^[32]观测结果相似,防护体系上风向和下风向粗糙度为流动沙地的数倍以上,可知在防护体系的干扰下地表粗糙度增大,地表风蚀潜力降低。

风沙流活动集中在地表一定高度内,由于防护体系的建设使得下垫面和风速发生改变,导致沙物质输移出现差异。本研究中各个测点位置集中在 $0\sim 10\ \text{cm}$ 高度范围内输沙量分别占各位置总输沙量的 92.7%,94.4%和 79.5%,这与张华等^[33]指出科尔沁沙地 80%以上的输沙量集中在 $0\sim 10\ \text{cm}$ 高度层内相一致。输沙量的变化情况在很大程度上能够很好地反映防护体系的固沙效益,通过观察不同测点位置的输沙量情况,过境携沙气流由流动沙地经过防护体系后输沙量降低,且随着深入防护体系内部,输沙量呈现降低的趋势,本研究显示上风向输沙量为流动沙地输沙量的 13.7%,下风向输沙量为流动沙地输沙量的 1.7%,而且处于防护体系下风向的输沙量显著低于在流动沙丘处的输沙量,这与李生宇等^[15]对于新疆 S214 省道防沙体系的风沙观测结果相似。由此可见,该区域的防护体系可以较好地控制地表流沙输移,使风沙流结构在 $2\sim 6\ \text{cm}$ 高度范围内发生显著变化。风沙流中沙物质粒径的垂直分布与风沙流搬运量和沙粒运动方式关系密切,随着下垫面微地形发生变化,地表气流状况发生改变,而沙粒分布情况随之改变。如表 3 所示本研究中只收集到 $0\sim 30\ \text{cm}$ 高度范围内的风沙流,结果显示风沙流优势粒级为细砂,流动沙地(A 点) $0\sim 20\ \text{cm}$ 高度细砂占 47.16%~70.48%,防护体系上风向(B 点) $0\sim 20\ \text{cm}$ 高度细砂占 50.27%~74.24%;防护体系下风向(C 点) $0\sim 20\ \text{cm}$ 高度细砂占 62.29%~73.19%,B 点和 C 点中砂含量较 A 点明显降低,细砂含量明显升高。由此看出,在防护体系作用下,可有效降低风速,削弱风沙流携沙能力,这与包岩峰等^[34]研究结果相似。

地表沉积物粒度特征是研究沙漠风沙和沉积环境极其重要的指标之一,与局部分风力条件、沉积环境、地形和植被等因素关系密切^[35]。本区域研究结果显示,防护体系表层土壤沉积物颗粒中细砂含量最多,为 54.74%~61.42%,粉砂含量最少,为 0.1%~0.23%,这与罗凤敏等^[36]研究得到的变化趋势相似,但具体数值有所区别。吴正^[37]发现粒径 $70\sim 500\ \mu\text{m}$ 的砂粒是跃移运动的主体, $20\sim 70\ \mu\text{m}$ 的砂砾可做短期悬浮。本研究中得到各测点位置表层土壤粒

度累积频率平均距离最大值出现在 180~200 μm 处, 指明土壤颗粒主要以跃移方式运动, 从沉积物频率分布曲线和粒度参数来看, 证明土壤粒径有减小趋势, 土壤颗粒变细, 粒径较大的颗粒以跃移的方式被

吹蚀。同时由此可表明, 在此区域范围内, 运用机械措施和生物措施相结合方式构建的公路防沙体系, 能有效降低风速, 减少输沙量, 能有效避免扬沙上路, 交通线路免受沙埋沙害。

表 3 不同观测点垂向沙物质粒度特征

Table 3 Plasmid density characteristics of vertical sand at different observation points												
高度/cm	颗粒含量/%											
	测点 A				测点 B				测点 C			
	粒径/μm				粒径/μm				粒径/μm			
	<50	50~100	100~250	250~500	<50	50~100	100~250	250~500	<50	50~100	100~250	250~500
	粉沙+黏土	极细沙	细沙	中沙	粉沙+黏土	极细沙	细沙	中沙	粉沙+黏土	极细沙	细沙	中沙
0~2	0.31	12.35	65.50	21.83	0.19	9.23	68.42	22.16	0.25	13.51	67.40	18.81
2~4	0.45	14.82	68.07	16.66	0.15	9.87	71.51	18.46	0.15	17.95	63.93	17.85
4~6	0.40	14.70	67.87	17.02	0.27	13.83	71.76	14.13	0.18	22.73	73.19	3.69
6~8	0.37	11.70	67.09	20.83	0.40	14.60	74.24	10.74	0.34	31.82	66.22	1.59
8~10	0.31	13.71	70.48	15.48	0.24	20.14	68.44	11.08	0.19	24.06	72.35	3.31
10~12	0.50	16.37	67.44	15.54	0.51	25.96	63.45	10.02	0.31	27.57	71.31	0.79
12~14	1.47	19.19	63.85	15.49	0.59	28.9	62.68	7.83	0.41	37.3	62.29	—
14~16	2.32	30.26	62.05	5.36	0.59	34.62	63.97	0.82	0.32	31.24	67.19	1.24
16~18	4.34	44.85	49.58	1.12	1.31	48.42	50.27	—	0.35	31.07	68.08	0.48
18~20	6.85	43.47	47.16	2.51	0.84	47.44	51.71	—	0.49	36.19	62.96	0.36
20~22	7.85	35.36	32.42	5.76	—	—	—	—	—	—	—	—
22~24	19.65	46.74	32.42	1.08	—	—	—	—	—	—	—	—
24~26	25.30	50.92	22.28	1.39	—	—	—	—	—	—	—	—
26~28	18.95	51.59	28.82	0.57	—	—	—	—	—	—	—	—
28~30	27.56	52.48	18.85	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—

5 结 论

(1) 有效降低地表风速和输沙量, 增大地表粗糙度, 风沙流经过防护措施后, 防护体系上风向(B点)和下风向(C点)风速由高到低较 A 点分别降低 48.7%, 14.4% 和 3.9%; 总输沙量分别较 A 点降低 86.3% 和 98.3%, 地表粗糙度由约为 0 cm 增大到 4.92 cm。

(2) 沙物质粒径的垂直分布表现出中砂含量显著降低, 细砂含量显著增加, 风沙流携沙能力明显削弱。

(3) 表层土壤沉积物颗粒粒级变小, 沉积物颗粒频率分布曲线部分波段变窄, 分选性变差, 颗粒分布均匀且颗粒向着细粒化方向发展, 易风蚀颗粒范围在180~200 μm。

综上所述, 在本研究区域内, 应当以机械措施与生物措施相结合的方式, 逐步构建“以阻为主, 阻固结合”的公路防沙体系建设思想。

参考文献:

[1] 刘虎俊, 袁宏波, 王多泽, 等. 两种不同配置灌木林防风

固沙效益[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 63-66, 74.
Liu H J, Yuan H B, Wang D Z, et al. The benefits of wind prevention and sand fixation of two different configurations of shrublands[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2017, 37(3): 63-66, 74.
[2] 王涛. 中国风沙防治工程[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 3-5.
Wang T. China's wind and sand control project[M]. Beijing: Science Press, 2011: 3-5.
[3] Dong Z, Chen G, He X, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(3): 329-344.
[4] 李生字, 雷加强, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路对近地表风沙运动过程的影响[J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 247-254.
Li S Y, Lei J Q, Xu X W, et al. The impact of the Tarim Desert Highway on the near surface wind sand movement process[J]. Arid Area Research, 2007, 24(2): 247-254.
[5] Li C J, Wang Y D, Lei J Q, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway in China[J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(1): 98-106.
[6] Mao X, Wang F, Wang B. Nationwide desert highway

- assessment: a case study in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(7): 2734-2746.
- [7] 罗俊宝. 我国不同沙漠类型区公路沙害防治技术与机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- Luo J B. Research on the prevention and control technology and mechanism of highway sand damage in different desert types in China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005.
- [8] 张兴鑫, 张凯, 史博源, 等. 流动沙丘区公路路基风沙流场数值模拟及路面沙害形成机制[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4): 1184-1191.
- Zhang X X, Zhang K, Shi B Yn, et al. Numerical simulation of windblown sand flow field and formation mechanism of road sand damage in mobile sand dune areas [J]. *Research on Arid Areas*, 2021, 38(4): 1184-1191.
- [9] 马奔腾, 程建军, 雷加强, 等. 南疆塔中-38 团沙漠公路沿线风沙输移规律与防沙体系研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1663-1672.
- Ma B T, Cheng J J, Lei J Q, et al. Study on the law of wind and sand transport and sand control system along the desert highway of Tazhong-38 regiment in southern Xinjiang[J]. *Arid Area Research*, 2022, 39(5): 1663-1672.
- [10] 张克存, 安志山, 何明珠, 等. 中国沙区公路风沙危害及防治研究进展[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(3): 222-232.
- Zhang K C, An Z S, He M Z, et al. Research progress on the hazards and prevention of sandstorms on highways in sandy areas of China [J]. *Desert of China*, 2022, 42(3): 222-232.
- [11] 鱼燕萍, 肖建华, 屈建军, 等. 两种典型高等级公路路基断面风沙过程的风洞模拟[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 68-79.
- Yu Y P, Xiao J H, Qu J J, et al. Wind tunnel simulation of wind and sand processes on two typical high-grade highway subgrade sections[J]. *Desert of China*, 2019, 39(1): 68-79.
- [12] 尤全刚, 薛嫻, 王涛, 等. 戈壁地区公路防沙措施防沙效应的风洞试验[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 550-557.
- You Q G, Xue X, Wang T, et al. Wind tunnel test on the sand prevention effect of highway sand prevention measures in the Gobi region [J]. *Desert of China*, 2011, 31(3): 550-557.
- [13] 韩致文, 王涛, 董治宝, 等. 塔克拉玛干沙漠公路沿线风沙活动的时空分布[J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 73-78.
- Han Z W, Wang T, Dong Z B, et al. The spatiotemporal distribution of sandstorm activity along the Taklamakan Desert Highway [J]. *Geographic Science*, 2005, 25(4): 73-78.
- [14] 李生字, 雷加强, 徐新文, 等. 中国交通干线风沙危害防治模式及应用[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 665-674.
- Li S Y, Lei J Q, Xu X W, et al. Prevention and control model and application of wind and sand hazards on China's traffic arteries [J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(6): 665-674.
- [15] 李生字, 李文明, 孙熠, 等. 新疆 S214 省道防沙体系对近地表风沙流的影响[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 1093-1102.
- Li S Y, Li W M, Sun Y, et al. The impact of the sand prevention system of the S214 provincial road in Xinjiang on surface wind and sand flow [J]. *Arid Area Geography*, 2022, 45(4): 1093-1102.
- [16] 蔡东旭, 李生字, 王海峰, 等. 新疆 S214 公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 1-11.
- Cai D X, Li S Y, Wang H F, et al. Wind and sand hazards and prevention measures in the dry lake basin section of Taitema Lake on the S214 highway in Xinjiang[J]. *Desert of China*, 2020, 40(1): 1-11.
- [17] Wang C, Li S, Li Z, et al. Effects of windblown sand damage on desert highway guardrails[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103: 283-298.
- [18] Cornelis W M, Gabriels D. Optimal windbreak design for wind-erosion control[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(2): 315-332.
- [19] Huang Y, Wang Y, Zhao Y, et al. Spatiotemporal distribution of soil moisture and salinity in the Taklimakan Desert highway shelterbelt[J]. *Water*, 2015, 7(8): 4343-4361.
- [20] He J Y, Liu G H. Study on stability of highway subgrade slope in desert region [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 639: 974-977.
- [21] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙区不同下垫面的土壤风蚀特征[J]. *林业科学*, 2017, 53(3): 128-137.
- Liu F, Hao Y G, Xin Z M, et al. Soil wind erosion characteristics of different underlying surfaces in the Ulanbuhe sandy area [J]. *Forestry Science*, 2017, 53(3): 128-137.
- [22] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 293-299.
- Zhang X W, Wang J, Gao Y, et al. Surface soil particle size characteristics of wind erosion pits in Hulunbuir sandy grassland [J]. *Arid Area Research*, 2017, 34(2): 293-299.
- [23] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of*

- Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [24] 武俊瑛, 高永, 浑善达克沙地公路机械沙障防风固沙效益分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 161-166.
Wu J Y, Gao Y. Analysis of the benefits of mechanical sand barriers for wind prevention and sand fixation on highways in Hunshandak Sandy Land[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2010, 24(12): 161-166.
- [25] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 27.
Wu Z. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 27.
- [26] 毛东雷, 雷加强, 王翠, 等. 新疆策勒县沙漠—绿洲过渡带风沙流结构及输沙粒度特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 25-33.
Mao D L, Lei J Q, Wang C, et al. The structure and grain size characteristics of windblown sand flow in the desert oasis transition zone of Cele county, Xinjiang[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2015, 35(1): 25-33.
- [27] 闫敏. 乌兰布和沙漠防沙技术措施复合作用机制及其优化配置[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
Yan M. Composite mechanism and optimal configuration of sand control measures in Ulanbuhe Desert[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [28] 李生宇, 范敬龙, 王海峰, 等. 315 国道策勒恰恰桥段风沙灾害成因初步分析与治理对策[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 754-760.
Li S Y, Fan J L, Wang H F, et al. Preliminary analysis of the causes of wind and sand disasters in the Celechaha Bridge section of national highway 315 and countermeasures for control[J]. Arid Area Geography, 2016, 39(4): 754-760.
- [29] 王佳庭, 于明含, 杨海龙, 等. 乌兰布和沙漠典型植物群落土壤风蚀可蚀性研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1543-1550.
Wang J T, Yu M H, Yang H L, et al. Study on soil wind erosion erodibility of typical plant community in Ulanbuhe Desert[J]. Geography of Arid Areas, 2020, 43(6): 1543-1550.
- [30] 王旭, 田长彦, 赵振勇, 等. 滴灌条件下盐地碱蓬(Suaeda salsa)种植年限对盐碱地土壤盐分离子分布的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 211-217.
Wang X, Tian C Y, Zhao Z Y, et al. The effect of planting years of Suaeda salsa under drip irrigation on the distribution of salt ions in saline alkali soil[J]. Geography of Arid Areas, 2020, 43(1): 211-217.
- [31] 左合君, 刘力, 董智, 等. 库布齐沙漠穿沙公路工程防沙体系维护技术[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 166-170.
Zuo H J, Liu L, Dong Z, et al. Maintenance technology for sand prevention system of the Kubuqi desert sand crossing highway project[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2005, 19(3): 166-170.
- [32] 吴晓旭, 邹学勇, 王仁德, 等. 毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 828-835.
Wu X X, Zou X Y, Wang R D, et al. Characteristics of windblown sand movement on different underlying surfaces in Maowusu sandy land[J]. Desert of China, 2011, 31(4): 828-835.
- [33] 张华, 李锋瑞, 张铜会, 等. 科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 20-23, 28.
Zhang H, Li F R, Zhang T H, et al. Structure and variation characteristics of wind sand flow on different underlying surfaces in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Water and Soil Conservation, 2002, 16(2): 20-23, 28.
- [34] 包岩峰, 丁国栋, 吴斌, 等. 毛乌素沙地风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 118-123.
Bao Y F, Ding G D, Wu B, et al. Study on the structure of wind sand flow in Maowusu sandy land[J]. Resources and Environment of Arid Areas, 2013, 27(2): 118-123.
- [35] 王陇, 高广磊, 张英, 等. 毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1003-1010.
Wang L, Gao G L, Zhang Y, et al. Particle size distribution characteristics and influencing factors of wind-blown sand soil in Maowusu sandy land[J]. Arid Area Geography, 2019, 42(5): 1003-1010.
- [36] 罗凤敏, 高君亮, 郝玉光, 等. 乌兰布和沙漠东北缘 5 种土地利用类型土壤粒度特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 172-177.
Luo F M, Gao J L, Hao Y G, et al. Soil particle size characteristics of five land use types in the northeastern edge of the Ulanbuhe Desert[J]. Soil and Water Conservation Research, 2017, 24(5): 172-177.
- [37] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 42.
Wu Z. Windblown sand landform and sand control engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003: 42.