

塔里木河下游荒漠河岸林近地表沙尘通量及粒度特征

王慧娟^{1,2}, 塔依尔江·艾山^{1,2}, 玉米提·哈力克^{1,2}, 王娜^{1,2}, 买尔哈巴·吾买尔^{1,2}

(1.新疆大学生态与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: [目的] 分析主导风向向下塔里木河下游阿拉干断面天然胡杨河岸林迎风面和背风面的沙尘输沙量及粒度特征, 为该区天然河岸林防风固沙提供理论依据。[方法] 利用 BSNE 梯度集沙仪采集两个迎风面样地 (Y_1, Y_2) 和两个背风面样地 (B_1, B_2) 近地表 10, 30, 50, 100 和 150 cm 这 5 个高度的沉积物, 再由 Microtrac S3500 激光衍射粒度分析仪测定沙样粒度特征。[结果] ① 4 个样地沙尘水平通量皆遵循幂函数或指数函数分布, 总输沙量呈现: $Y_1 > Y_2 > B_1 > B_2$, 各样地随着离地表高度的增加输沙量呈减少趋势。② 背风面相较于迎风面输沙量降幅在 35%~80% 之间, 说明塔里木河下游天然胡杨河岸林具有较显著的防风固沙效益。③ 各高度沙粒平均粒径为 80~93 μm , 以极细沙为主, 粒径频率曲线呈单峰分布, 沙尘组成简单, 以局地沙源为主。[结论] 研究区天然胡杨河岸林背风面输沙量低于迎风面、平均粒径小于迎风面、分选性优于迎风面、峰态窄于迎风面、偏度稍小于迎风面。因此胡杨河岸林防风固沙效益较显著, 可作为减少研究区风沙天气危害的有效措施。

关键词: 输沙通量; 粒度特征; 防风效益; 荒漠河岸林; 塔里木河

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0016-07

中图分类号: P931.3

文献参数: 王慧娟, 塔依尔江·艾山, 玉米提·哈力克, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林近地表沙尘通量及粒度特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 16-22. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.003; Wang Huijuan, Tayierjiang Aishan, Yumiti Halike, et al. Flux and particle size characteristics of landscape sediments in a desert riparian forest along lower reaches of Tarim River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 16-22.

Flux and Particle Size Characteristics of Landscape Sediments in a Desert Riparian Forest Along Lower Reaches of Tarim River

Wang Huijuan^{1,2}, Tayierjiang Aishan^{1,2}, Yumiti Halike^{1,2}, Wang Na^{1,2}, Maierhaba Wumaier^{1,2}

(1.College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046,

China; 2.Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of sand and dust transport amount and particle size on the windward and leeward sides of a natural *Populus euphratica* riparian forest at the Arghan section of the lower reaches of the Tarim River under the prevailing wind direction were studied in order to provide a theoretical basis for its windbreak and sand fixation capacity. [Methods] Sediments were collected from two windward sites (Y_1 and Y_2) and two leeward sites (B_1 and B_2) of the forest at five heights of 10, 30, 50, 100, and 150 cm near the surface using a BSNE sand collector. The particle size characteristics of the sand samples were then measured using a Microtrac S3500 laser diffraction particle size analyzer. [Results] ① The horizontal flux of sand and dust in the four sample plots followed either a power function or exponential function distribution, and total sediment transport followed the order of $Y_1 > Y_2 > B_1 > B_2$. The sediment transport for each sample plot decreased with increasing height from the soil surface. ② The reduction of sediment on the leeward side compared with the windward side ranged from 35% to 80% less than on the

收稿日期: 2022-08-27

修回日期: 2022-09-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“塔里木河流域胡杨干材腐朽的定量诊断及驱动机制探析”(32160367), “林窗干扰对胡杨荒漠河岸林更新与演替的影响”(31860134)

第一作者: 王慧娟(1998—), 女(汉族), 河南省商丘市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统生态学。Email: wanghj0520@qq.com。

通讯作者: 塔依尔江·艾山(1984—), 男(维吾尔族), 新疆维吾尔自治区拜城县人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。Email: tayirjan@xju.edu.cn。

windward side, indicating that the natural *P. euphratica* riparian forest in the lower reaches of the Tarim River has obvious windbreak and sand fixation benefits. ③ The average particle size of sand grains at all heights was 80~93 μm , mainly composed of extremely fine sand. The particle size frequency curve showed a single peak distribution, and the sand dust composition was simple, mainly composed of local sand sources. [Conclusion] The sediment transport on the leeward side of the natural *P. euphratica* riparian forest in the study area was lower than that of the windward side. Average particle size was smaller and sorting performance was better on the leeward side than on windward side. The average particle size smaller than that of the windward side, the sorting was better than that of the windward side, the kurtosis was narrower than that of windward side, and skewness is slightly smaller than that of the windward side. The *P. euphratica* riparian forest exhibited obvious windbreak and sand fixation benefits, and can be used as an effective measure to reduce the damage by wind and sand transport in the study area.

Keywords: sediment flux; particle size characteristics; windbreak effect; desert riparian forest; Tarim River

风沙天气在中国西北地区频发,其不仅对人畜健康带来影响,而且对居民日常生活、绿洲农业、交通及供电线路构成严重威胁^[1]。沙尘天气携带的大量粉尘进入高空,可被风吹至数千公里外,造成严重的空气污染,加剧土地荒漠化^[2]。上述危害在塔里木河下游地区明显显现,对该区的生态、社会和经济产生严重影响^[1]。定量风沙运动中的输沙量和分析其所运移沙粒的垂直分布规律有助于开展相应的防治措施^[3],而粒度特征分析是了解风成沉积物的基本方法^[4]。

塔里木河下游植被稀疏、沙尘天气频发,已对当地居民的健康福祉及河道旁连接新疆与内地的 218 国道的道路运营产生严重影响^[5]。流沙堆积导致道路维护成本增加,并且各种防风固沙设施(如:芦苇草方格沙障、篱笆沙障、黏土沙障等)的建造费用高昂^[6]。塔里木河天然河岸植被具有减轻沙尘暴的潜力^[7-9]。针对塔克拉玛干沙漠的沙尘粒度特征^[10-14]、沙尘水平通量^[15-17]的研究成果已有报道,但是研究区天然胡杨荒漠河岸林植被防风效益评估方面的研究较少。为此,本文将利用 BSNE 集沙仪收集风沙天气后样地近地表沙尘,计算塔里木河下游胡杨河岸林迎风面与背风面沉积物通量,探讨粒度特征及风沙运动规律。以此增补塔里木河下游沙尘水平输沙通量及其粒度特征研究内容,为塔里木河下游天然河岸林防风阻沙效益的提高提供理论依据和支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区设立在塔里木河下游阿拉干断面的天然胡杨河岸林。该区属大陆性暖温带荒漠干旱气候,地理位置为 40°08'50"N, 88°21'28"E,高温和降雨主要集中在 6—8 月,年降水量小于 15 mm,年潜在蒸发量为 2 500~3 000 mm,年平均气温为 10.8 $^{\circ}\text{C}$,极端高温为 43.6 $^{\circ}\text{C}$ (图 1),太阳年总辐射量为 5 692~

6 360 MJ/m^2 ^[18],是中国最干旱的地区之一。每年平均风沙天气为 14.6 d^[9]。研究区植被稀少,植被盖度随河道的距离增加而降低,植被组成以杨柳科、柽柳科、豆科、夹竹桃科、禾本科等植物为主,与灌木和草本植物形成荒漠植被群落,研究区胡杨主要以中龄林和成熟林为主,在生态输水工程的作用下,以胡杨为主的天然河岸林植被逐渐恢复好转,目前生长状态较为良好^[18]。河岸两侧土壤母质以沉积母质和风积母质为主,沉积母质主要由砂、粉砂和黏粒组成,风积母质主要由细砂和粉砂组成^[19]。

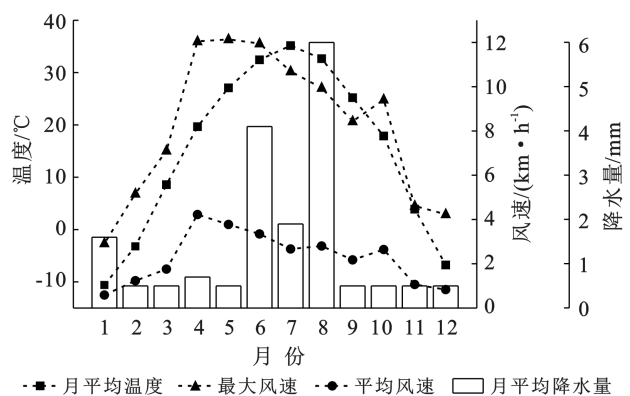


图 1 研究区气温、风速与降水情况

Fig.1 Temperature, wind speed and precipitation in the study area

1.2 样地选取与研究方法

2019 年 3 月,根据主风向在塔里木河下游胡杨河岸林地设置 4 个具有代表性的样地,其中两个迎风面样地(Y_1, Y_2),两个背风面样地(B_1, B_2)。本研究气象数据由研究区布设的小型气象站(WatchDog 2900ET,美国)记录,时间分辨率为 1 h。气象站周边为流沙地, Y_1 与气象站同属一个区域。 B_1, Y_2, B_2 植物种群相似,主要是生长有胡杨(*Populus euphratica*)乔木、柽柳(*Tamarix chinensis*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等的混生

群落。4 个样地距离河道距离呈现： $B_2 > Y_2 > B_1 > Y_1$ ，样地详情如图 2 所示，图中集沙仪 1 号和集沙仪 4 号简称为 B_1, B_2 ，集沙仪 2 号和集沙仪 3 号简称为 Y_1, Y_2 。在每个样地安装一个进沙口高为 2 cm，宽 5 cm 的 BSNE 全向集沙仪来采集风沙运动中的沙尘，每个集沙仪分 5 个高度梯度，分别距地表 10, 30, 50, 100, 150 cm。集沙仪积累的输沙样品应用 1/1

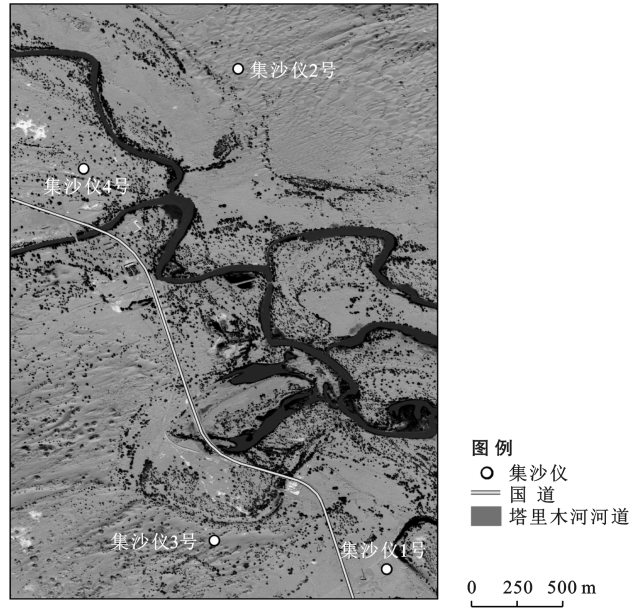
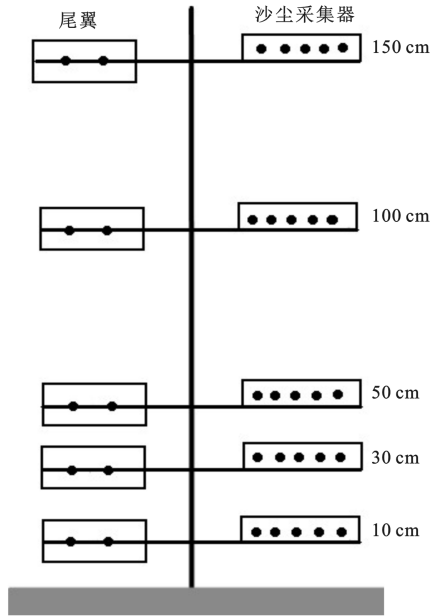


图 2 集沙仪结构示意图及集沙仪安装地点分布

Fig.2 BSNE sand collecting instrument and its distribution in the study area

1.3 数据处理

本文 BSNE 集沙仪的基础数据由 Microsoft Excel 2010 统计分析。输沙沙尘的平均粒径、标准差、偏度与峰态等粒度特征由 Microtrac S3500 激光衍射粒度分析仪设置直接导出三次重复测试数据，再由 Microsoft Excel 2010 和 SPSS Statistics 26 进行分析处理，文中表格由 Microsoft Word 2010 制作完成，图片由 Origin 2021 版软件制作完成。

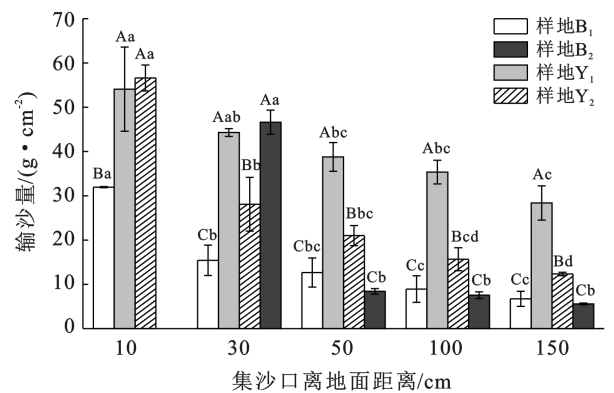
2 结果与分析

2.1 水平输沙通量的垂直分布特征及差异

由图 3 可见，4 个样地输沙量皆随着高度（注：高度均为集沙仪距地表的距离。）的增加呈减少趋势，且 4 个样地垂直高度水平输沙量遵循一定的幂函数或指数函数分布曲线（图 4）。沿主风向可见，不同高度上两个背风面样地总输沙量明显低于迎风面样地总输沙量。4 个样地间，在各高度上背风样地 B_1, B_2 的输沙量没有显著性差异（ $p < 0.05$ ），而 B_1, B_2 输沙量与 Y_1, Y_2 的输沙量存在显著性差异（ $p < 0.05$ ），两个迎风样地 Y_1, Y_2 之间的输沙量也存在显著性差异

000 天平称重，根据进沙口长宽计算每个样地不同高度的输沙通量。本次用于试验的沙尘物质为 2019 年 5 月风沙运动的沉积物，其粒度特征由 MicrotracS3500 激光衍射粒度分析仪测定，分析结果中包括平均粒径、标准差、偏度、峰态和每一粒级百分含量、粒级分布曲线及累积曲线。 B_2 流沙地 10 cm 高度集沙仪损坏沙样数据缺失，故其输沙量为 0，不做分析。

（ $p < 0.05$ ）。各高度间， B_1, Y_1, Y_2 的 10 cm 处输沙量显著差异于其他 4 个高度；50 cm 和 100 cm 之间存在显著性差异（ $p < 0.05$ ），而其他高度之间均无显著性差异（ $p < 0.05$ ）。 B_2 的 30 cm 处输沙量显著差异于其他高度，而其他高度之间输沙量无显著性差异（ $p < 0.05$ ）。



注：大写字母表示样地之间差异有统计学意义，小写字母表示高度之间差异有统计学意义（ $p < 0.05$ ）。

图 3 各样地不同高度 BSNE 水平输沙量

Fig.3 Horizontal sediment transport at different heights of BSNE in sample sites

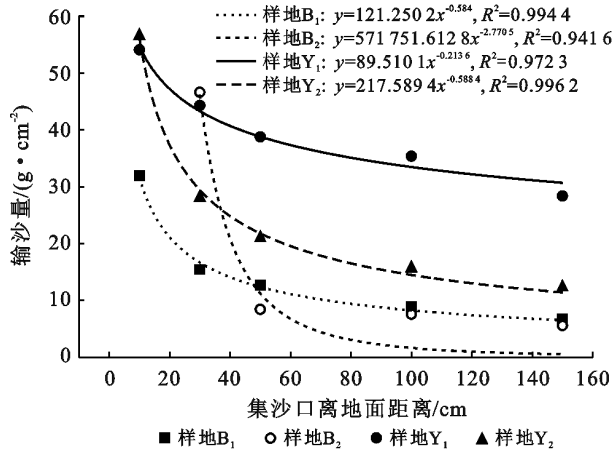
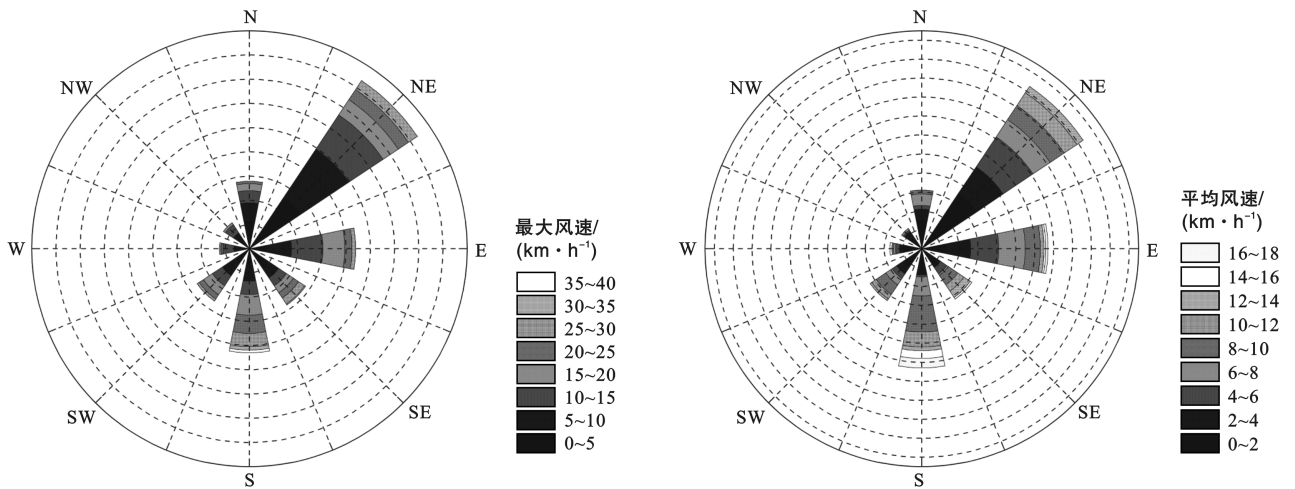


图 4 各样地输沙量与高度的关系

Fig.4 Relationship between sediment transport and height in various fields



注:玫瑰风向图中径向刻度代表此风速出现频次。

图 5 监测点平均风速和最大风速玫瑰图

Fig.5 Rose chart of average wind speed and maximum wind speed at monitoring points

表 1 背风面各监测点较迎风面各监测点输沙量降低幅度

Table 1 Sediment transport reduction of each monitoring point on the leeward side compared with that on the windward side

高度/cm	输沙量降低幅度%				
	I	II	III	IV	V
10	40.92	0	43.56	0	-4.67
30	65.18	-5.25	45.10	-65.93	36.57
50	67.34	78.27	39.74	59.92	45.79
100	74.76	78.63	74.76	51.81	55.66
150	76.32	80.36	45.50	54.86	56.48
总量	62.32	66.06	43.41	49.03	33.42

注: I 类代表背风面样地 B₁ 较迎风面样地 Y₁ 输沙量降幅; II 类代表背风面样地 B₂ 较迎风面样地 Y₁ 输沙量降幅; III 类代表背风面样地 B₁ 较迎风面样地 Y₂ 输沙量降幅; IV 类代表背风面样地 B₂ 较迎风面样地 Y₂ 输沙量降幅; V 类代表迎风面样地 Y₂ 较迎风面样地 Y₁ 输沙量降幅。

2.3 沙尘粒度分布特征

迎风面和背风面的 BSNE 集沙仪沙样粒径分布曲线趋势表现基本一致。4 个样地不同高度的 BSNE

2.2 天然胡杨河岸林植被防风效应

由图 1 显示,观测期间研究区风速较大,无降雨发生,且温度处于持续攀升的状态,为风沙运动的发生提供了良好条件。从图 5 可以看出,最大风速以及平均风速最大值都出现在东北方向,由此说明东北风为本研究区的主导风向。由表 1 可以看出, I, II, V 类的输沙量降低幅度随高度的增加而增加,且 I, II 类降幅最为明显,分别降低了 66.32%, 66.06%; III 和 IV 类无此规律,其降幅分别为 43.41% 和 49.03%, B₁ 和 B₂ 的总输沙量比 Y₁ 和 Y₂ 的总输沙量减少约 42.99%。同属于迎风面的 Y₁ 和 Y₂, 在有无植物的情况下其输沙通量存在较大差异。不同高度上最大降幅出现在 II 类的 150 cm 处。

集沙仪中的沙尘粒径分布范围在 10~1 184 μm 之间,主要分布区间在 10~200 μm,从 40~150 μm 之间最为集中,其中 50~125 μm 的沙粒占到各自高度输沙沙粒的 75% 以上(除 Y₂ 10 cm 积沙样两个峰值未能同时出现在 50~125 μm 范围内),其中粒径在 70~80 μm 的沙粒占比最大,在 11%~21% 之间,大于 210 μm 的沙粒含量在 0.5% 以内(图 6)。

4 个样地不同高度沙粒粒级概率累积分布曲线趋势基本一致(图 7),在河岸两旁分布的胡杨、柽柳以及其他植物的作用下, B₁ 和 B₁ 背风面样地各高度的粒级分布范围稍广于 Y₁ 和 Y₂ 迎风面样地各高度的粒级分布。0~210 μm 的沙粒粒级占各高度总沙粒的 95% 以上,从 210~440 μm 之间沙粒只占各自总输沙沙粒的 5% 以内。小于 125 μm 的极细沙占到各自沙样 80% 以上,剩余粒级中只有 10% 之内分布的是细沙,中砂和粗砂粒级的输沙量累积占总输沙量的 10% 以内。

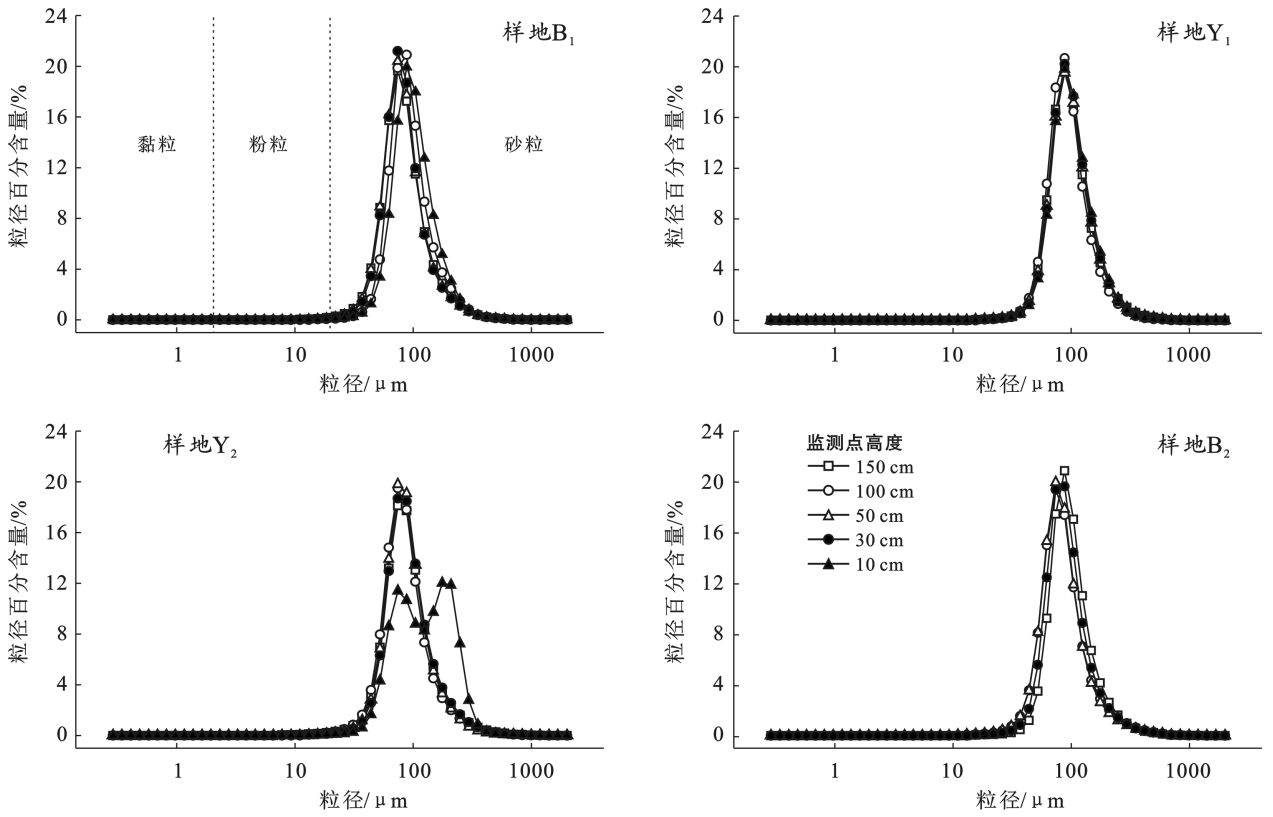


图 6 不同高度监测点 BSNE 集沙样粒径分布曲线

Fig.6 Particle size distribution curves of BSNE gather samples at different monitoring points

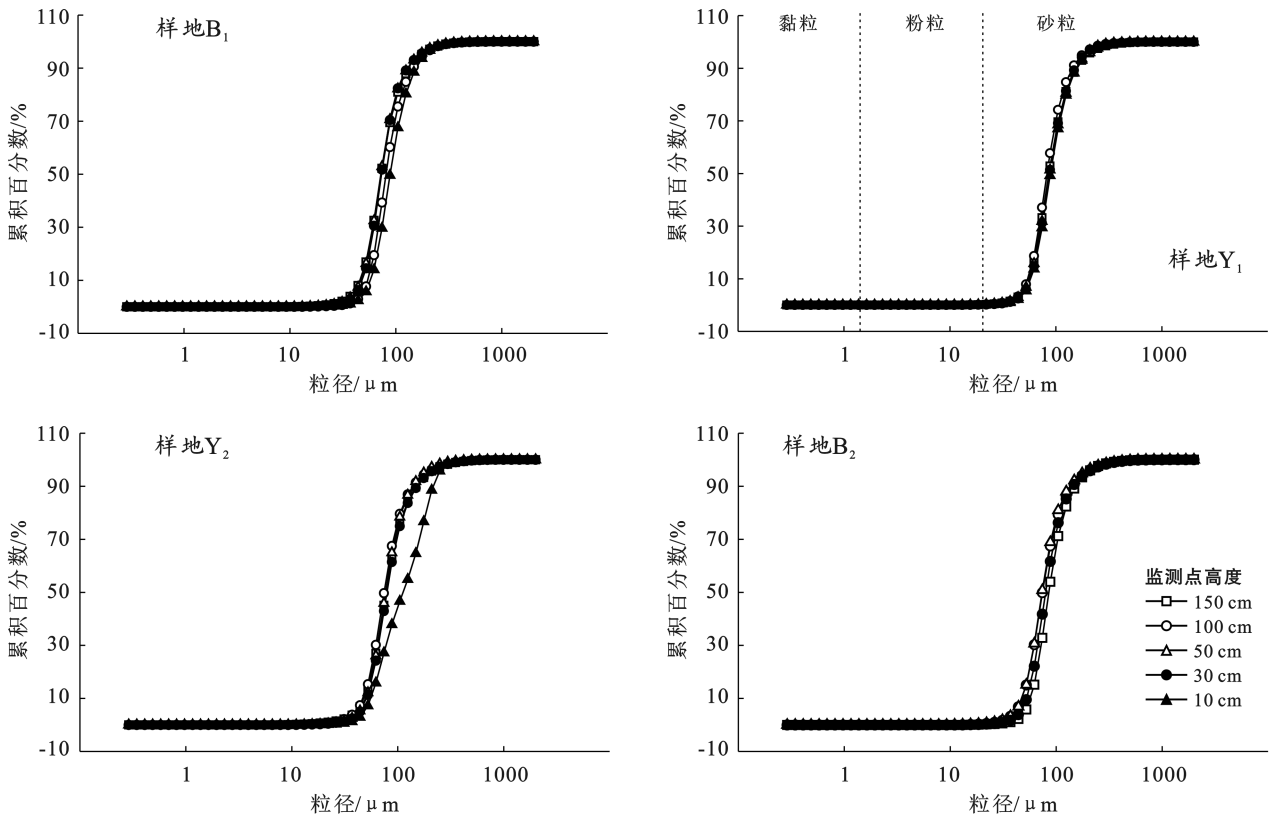


图 7 不同高度监测点 BSNE 集沙样粒级概率累积分布曲线

Fig.7 Probability cumulative distribution curve of BSNE gather sand particle size at monitoring points of different heights

由图 8 能够看出,此次集沙过程除 Y_2 的 10 cm 处样点平均粒径,其他样地各高度的沉积物平均粒径都集中在 $75\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间,属于极细沙。在垂直梯度上,各样地不同高度输沙沙粒的平均粒径变化趋势呈现随高度的增加而逐渐减小。迎风面和背风面各粒度特征中, B_1, B_2 各个高度的平均粒径和 Y_1, Y_2 各个高度的平均粒径没有明晰的规律性变化,但总体趋势随着高度的增加而有变细的趋势。各样地中不同高度的输沙沙样分选系数分布在 $0.3\sim 0.55$ 之间,除 Y_1 的 100 cm 处分选系数是 0.37,处于分选性好,以

及 Y_2 的 10 cm 处分选系数大于 0.5 小于 0.71,处于分选性较好外,其余所有监测点分选性均为极好,说明 4 个样地中粒径分布较为集中。输沙沙样的峰态分布范围在 $0.75\sim 1.7$ 之间,其中迎风面样地峰态值在 $1.33\sim 1.65$ 之间,峰态属窄和很窄。背风面样地峰态值在 $1.25\sim 1.47$ 之间,峰态属窄,说明迎风面样地各个高度沙粒级分布比背风面样地各个高度沙粒级分布更为集中。输沙沙粒偏度分布在 $0.25\sim 0.5$ 之间,除 Y_2 的 10 cm 处偏度小于 0.3,其余样点偏度都分布在 $0.3\sim 0.5$ 之间,为极正偏。

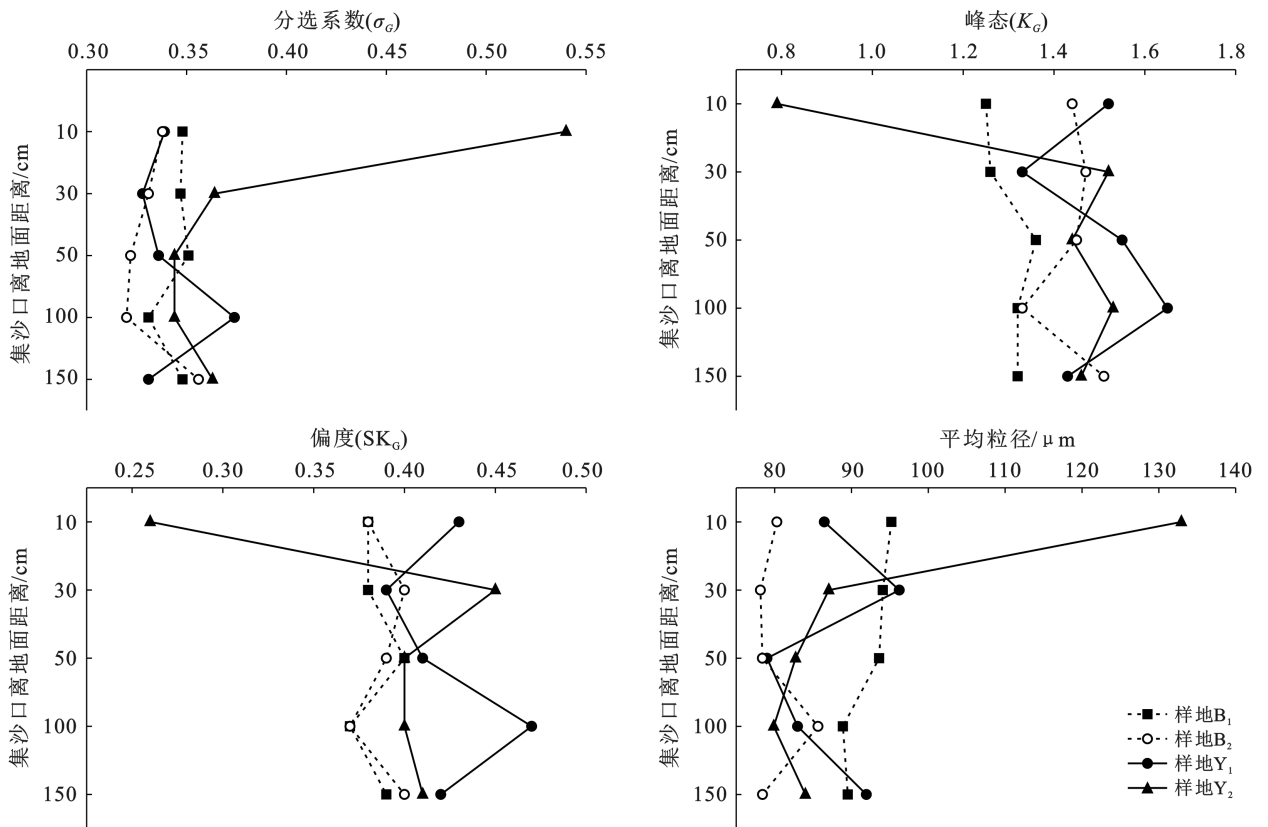


图 8 不同监测点 BSNE 集沙样粒度分布特征

Fig.8 Grain size distribution characteristics of BSNE sand collector samples at different monitoring points

3 讨论与结论

3.1 讨论

研究区近地表 150 cm 高度内的沙尘水平通量随高度的增加而逐渐减少,与杨兴华等^[13]在塔克拉玛干沙漠不同区域的地表 200 cm 内的沙尘水平通量结果相似,与张正德等^[20]在 8 m 高度内沙尘水平通量的研究结果部分相似。以上研究结果均显示在近地表 2 m 和 8 m 高度内的沙尘水平通量随高度的增加呈降低趋势。然而,在塔克拉玛干沙漠腹地及其他地区更大垂直高度内的沙尘水平通量结论^[10-12]对

本文参考意义较小,但相关的粒度特征对本文具有较大参考意义。

河岸胡杨林背风面样地输沙量低于迎风面输沙量说明植被对风沙运动有一定削弱作用,这与吉启慧^[21]、钟卫^[22]、汪季等^[23]人得出的植物具有防风固沙效益结论相符。同为迎风面的 Y_1 和 Y_2 的各个高度输沙量存在显著性差异,可能是 Y_1 是流沙地,无任何植被覆盖,这也可能是导致 I, II 类各个高度输沙量降幅有规律且大于 III 类和 IV 类的原因。由单一树种成林的树种,其树高在 2~3 m 时具有最佳防风固沙效益^[23],而胡杨平均树高大于 3 m,因此,若要减

小近地表被风蚀还需加强对草本和灌木的管护^[24]。另外, Betz 等^[25]通过模型估算塔里木河下游胡杨河岸林防风固沙效益, 得出在约 10 km² 区域内的乔灌木植被能够固定沙尘通量为 11 656 kg, 并且沙尘固定量遵循随距河道距离的增加而逐渐降低, 本文与其结论相似。

本研究区输沙样的平均粒径均大于代亚亚等^[26]在塔克拉玛干沙漠腹地与毛冬雷^[14, 24]在策勒绿洲—荒漠过渡区得出的平均粒径。其原因可能是采样期间该研究区盛行东北风^[27], 其次研究区处于塔克拉玛干沙漠东南边缘, 沙样处于被初步风蚀状态, 粒径较大。沙源可由沙质粒级推出, 70 μm 以下属于悬浮物, 20 μm 以下属于远源物, 20~70 μm 之间的沙质属于区域物质, 大于 70 μm 的沙质属于局地物质^[28-29]。可知不同高度的沙尘来源较为复杂, 包括局地沙尘源、区域沙尘源和远距离沙尘输送源^[26]。本文沉积物粒径大于 70 μm 的含量在 65%~85% 之间。由此可知本研究区的沙源主要是局地物质。通常认为沙样粒级随着高度的增加而减小^[30-31], 本文也有相同的趋势, 这是由于气流将较细的沙质输送至较高位置^[32]。研究区沉积物主要是极细沙和细沙, 而其较高位置上出现少量中沙和粗沙, 其原因是强阵风将河岸林边缘较粗沙质吹到空中后随气流到达地较高位置集沙仪中^[10]。各个高度分选性处于好、偏极好, 偏度为极正偏, 与塔克拉玛干沙漠其他区域有较大差异, 其原因可能是研究区植被稀疏输沙源属于局地输沙源且风速作用不强烈, 粗颗粒不易被吹起^[29]。所以近地表各个高度沙样粒径细、分选性好。

3.2 结论

对塔里木河下游天然胡杨荒漠河岸林近地表水平沙尘通量和粒度特征数据分析结果显示, 研究区所有样地输沙量均随高度的变化遵循幂函数或指数函数。其次, 天然胡杨荒漠河岸林背风面样地输沙量降幅随高度的增加而增加, 其中最大降幅可达 80.36%, 最小降幅也达到了 35%, 与迎风面样地输沙量具有显著差异, 由此可见塔里木河下游天然胡杨河岸林在防风固沙中起到不容小觑的作用。天然胡杨河岸林的健康状态和风沙天气的破坏性有着较大的联系, 因此, 在今后应着重保护天然胡杨荒漠河岸林。研究区输沙样粒级组成以极细沙和细沙为主, 两者总含量高达 95% 左右, 沙尘粒度呈单峰型, 表示沙尘来源简单。背风面样地沉积物的平均粒径分布范围普遍小于迎风面样地沉积物粒径分布范围; 背风面输沙样分选性普遍好于迎风面; 背风面输沙样峰态分布范围比迎风面窄; 所有输沙样偏度绝大部分表现为极正偏。

[参 考 文 献]

- [1] 管梦鸾, 张正偲, 董治宝. 基于 RS 和 GIS 的河西走廊风沙灾害风险评估[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 830-835.
- [2] 秦豪君, 杨晓军, 马莉, 等. 2000—2020 年中国西北地区区域性沙尘暴特征及成因[J]. 中国沙漠, 42(06): 1-12.
- [3] 樊瑞静, 李生字, 俞祥祥, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙粒胶结体的粒度特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1059-1065.
- [4] 田敏, 钱广强, 杨转玲, 等. 柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风成沉积物粒度特征与空间差异[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 68-78.
- [5] Wang Haibing, Jia Xiaopeng. Field observations of windblown sand and dust in the Taklimakan Desert, NW China and insights into modern dust sources [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(4): 323-333.
- [6] Lei Jiaqiang, Li Shengyu, Fan Dongdong, et al. Classification and regionalization of windblown sand disasters along the Tarim Desert highway [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53: 1-7.
- [7] 武建军, 罗生虎, 闫光虎, 等. 脉动风场下风沙运动结构的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 602-606.
- [8] 任春勇, 武生智. 沙源供给条件对风沙运动结构的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 597-601.
- [9] Thevs N, Zerbe S, Schnittler M, et al. Structure, reproduction and flood-induced dynamics of riparian Tugai forests at the Tarim River, Xinjiang, NW China [J]. Forestry, 2008, 81(1): 45-57.
- [10] 杨兴华, 何清, 程玉景, 等. 策勒绿洲—荒漠过渡带风沙前沿近地表沙尘水平通量观测[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1100-1105.
- [11] 杨东亮, 王雪芹, 胡永锋, 等. 风沙运动输沙通量垂向分布研究: 以塔克拉玛干沙漠南缘流沙地表风沙运动观测为例[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 631-639.
- [12] 杨兴华, 何清, 霍文, 等. 沙漠地区不同下垫面近地表沙尘水平通量研究[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 564-568.
- [13] 杨兴华, 何清, 艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠东南缘沙尘暴过程中近地表沙尘水平通量观测研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1299-1303.
- [14] 毛东雷, 雷加强, 李生字, 等. 策勒沙漠—绿洲过渡带不同下垫面的输沙通量及粒度差异特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 167-174.
- [15] 李志忠, 关有志, 孙忠, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地纵向沙垄的粒度分布特征[J]. 干旱区研究, 1996, 13(2): 37-43.
- [16] 孙艳伟, 李生字, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠大气降尘粒度特征: 以塔里木沙漠公路沿线为例[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 785-0792.
- [17] 贺佳嘉, 全占军, 潘美慧, 等. 塔克拉玛干沙漠高大沙垄区垄间地沿主风向连续分布新月形沙丘表面沙粒粒度特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 292-297.

- [34] 张登山,田丽慧,鲁瑞洁,等.青海湖湖东沙地风沙的粒度特征[J].干旱区地理,2013,36(2):203-211.
- [35] 移小勇,赵哈林,李玉霖,等.科尔沁沙地不同风沙土的风蚀特征[J].水土保持学报,2006,20(2):10-13,53.
- [36] 张志山,何明珠,谭会娟,等.沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性:以沙坡头沙漠研究试验站为例[J].土壤学报,2007,44(3):404-410.
- [37] 鲁瑞洁,唐清亮,桑艳礼,等.青海湖克土沙区不同类型沙丘土壤水分的动态变化[J].水土保持研究,2012,19(2):111-115.
- [38] 卢立娜,赵雨兴,胡莉芳,等.沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响[J].中国沙漠,2015,35(5):1171-1176.
- [39] 冯起,高前兆,苏培玺,等.半湿润地区植被影响下的沙地水分动态[J].干旱区研究,1994,11(4):58-63.
- [40] Richards J H, Caldwell M M. Hydraulic lift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots [J]. *Oecologia*, 1987, 73(4):486-489.
- [41] 张立恒,李清雪,王学全,等.高寒沙区中间锦鸡儿人工林细根动态及其周转[J].干旱区研究,2020,37(1):212-219.
- [42] Meinzer F C, Clearwater M J, Goldstein G. Water transport in trees; current perspectives, new insights and some controversies [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2001,45(3):239-262.
- [43] Wang Haijiao, Tian Lihui, Zhang Hongwei, et al. Water uptake by *Artemisia ordosica* roots at different topographic positions in an Alpine Desert Dune on the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Frontiers in Earth Sciences*, 2022,10:686441.
- [44] 孙姗姗,刘新平,魏水莲,等.沙地植物幼苗生长对降水和风速变化的响应[J].干旱区研究,2019,36(4):870-877.

(上接第 22 页)

- [18] Aishan T, Halik Ü, Kurban A, et al. Eco-morphological response of floodplain forests (*Populus euphratica* Oliv.) to water diversion in the lower Tarim River, Northwest China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,73(2):533-545.
- [19] 杨玉海,陈亚宁,李卫红.新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J].生态学报,2008,28(2):602-611.
- [20] 张正偲,董治宝,赵爱国.腾格里沙漠东南部近地层沙尘水平通量和降尘量随高度的变化特征[J].环境科学研究,2010,23(2):165-169.
- [21] 吉启慧.粒度分析在塔克拉玛干沙漠研究中的应用[J].中国沙漠,1996,16(2):173-179.
- [22] 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试验[J].干旱区研究,2009,26(6):872-876.
- [23] 汪季,胡志敏.近地表风沙运动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.
- [24] 王倩,毛东雷,赵枫,等.策勒绿洲—沙漠过渡带不同植被沙丘表面风沙沉积物粒度特征分析研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(3):96-102.
- [25] Betz F, Halik Ü, Kuba M, et al. Controls on aeolian sediment dynamics by natural riparian vegetation in the Eastern Tarim Basin, NW China [J]. *Aeolian Research*, 2015,18:23-34.
- [26] 代亚亚,何清,陆辉,等.塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄区近地层沙尘水平通量及粒度特征[J].中国沙漠,2016,36(4):918-924.
- [27] 俎瑞平,张克存,屈建军,等.塔克拉玛干沙漠风况特征研究[J].干旱区地理,2005,28(02):167-170.
- [28] 张正偲,董治宝.腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征[J].中国环境科学,2011,31(11):1789-1794.
- [29] 霍文,何清,刘新春.塔克拉玛干沙漠及其大气降尘点粒度特征分析[J].水土保持研究,2009,16(4):207-211.
- [30] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:61-88.
- [31] 朱震达,陈治平,谭见安,等.沙漠地区风沙地貌调查方法[M].北京:科学出版社,1961:27-35.
- [32] Shao Yaping. Similarity theory for saltation and application to Aeolian mass flux [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005,115:319-338.