

肖佳奇,武胜利,陈鹏鹏.和田河下游灌丛沙堆表层沉积物粒度和分形特征[J].中国沙漠,2024,44(4):24-36.

和田河下游灌丛沙堆表层沉积物粒度和分形特征

肖佳奇¹,武胜利^{1,2},陈鹏鹏¹

(1.新疆师范大学 地理科学与旅游学院,新疆 乌鲁木齐 830054; 2.新疆维吾尔自治区高等学校师资培训中心,新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:灌丛沙堆的研究对区域生态环境保护、沙漠化防治、环境演变分析具有重要的意义。对和田河下游胡杨(*Populus euphratica*)沙堆、柽柳(*Tamarix*)沙堆不同地貌部位沙堆表层沉积物粒度和分形特征进行了分析。结果表明:(1)沙堆表层沉积物粒级含量有所差异,胡杨沙堆、柽柳沙堆表层沉积物含量分别为93.67%、90.17%,主要由极细砂、细砂、粗粉砂组成。(2)沙堆各地貌部位沉积物粒径具有一定的变化规律,胡杨沙堆、柽柳沙堆的平均粒径均表现为从迎风坡坡脚至沙堆顶部逐渐变细,从沙堆顶部至背风坡坡脚逐渐变粗。胡杨沙堆和柽柳沙堆粒度频率分布曲线呈双峰分布,胡杨沙堆粒度频率分布曲线较高较窄,粒径更集中。(3)在沙堆表层沉积物概率累积曲线中,沿主风向胡杨沙堆表层沉积物粒度概率累积曲线的跃移组分斜率较大,分选性较好,跃移组分含量比柽柳沙堆高7.25%;柽柳沙堆悬移组分含量比胡杨沙堆高5.84%。(4)沙堆表层沙物质分形维数与平均粒径显著负相关($P<0.05$),与分选系数、偏度、峰态均显著正相关($P<0.05$)。不同类型沙堆表层沙物质分形维数与黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂含量均呈极显著正相关($P<0.01$),其中与黏土含量正相关性最高;与细砂呈显著负相关($P<0.01$)。区域风动力条件、植物形态特征、植被覆盖度及沙物质的来源是和田河下游沙堆表层沉积物粒度及分形特征出现差异的主要原因。

关键词:粒径特征;分形维数;沉积环境;和田河下游

文章编号: 1000-694X(2024)04-024-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00012

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

灌丛沙堆是在风力作用下,风沙流中碎屑物质被灌丛阻挡拦截后,在灌丛内部及周围发生沉降堆积形成的风积生物地貌类型^[1-2]。灌丛沙堆主要分布在砂质海岸带、干旱及半干旱地区的冲积扇扇缘和沙漠边缘地带^[3-5]。植物、沙源及风力条件是灌丛沙堆形成发育过程中的主导因素,这3个因素满足一定条件时,灌丛沙堆才能形成^[6]。研究灌丛沙堆对于区域荒漠化防治、生物多样性保护、环境演变分析、生态建设等方面也具有重要意义。灌丛沙堆能够有效拦截风沙流,减少其对绿洲地区的侵袭,有效减弱风沙灾害^[7]。灌丛沙堆为各类动植物和微生物的生存提供了适宜的场所,相对于周边沙漠区域,它成为“沃岛”“肥岛”“生物岛”。

灌丛沙堆发育过程中沙物质和枯枝落叶连续交替堆积,其沉积物中蕴藏的环境演变信息对探索区域环境的演化过程、重建区域环境演化序列等具有重要意义^[8-9]。

近年来学者对灌丛沙堆的研究已经从粒度参数、灌丛形态的计量转化为对不同沙堆粒度的空间分布及影响因素的研究。李向洁等^[10]对不同阶段灌丛沙堆沉积物的粒度参数进行分析,发现不同演化阶段沙堆因灌丛生理、生态特征的不同,表层沉积物的粒度特征表现出一定的差异。毛东雷等^[11]、武胜利等^[12]、王佩等^[13]对于干旱半干旱地区不同灌丛沙堆表层沉积物粒度特征进行了系统分析,发现不同地貌部位沉积物的粒级变化具有一定的规律。不同观测区域,由于灌丛沙堆所处环境不同,风力条件、地形条件、沙物质来源差异导致灌丛沙堆粒

收稿日期:2023-12-07; 改回日期:2024-01-19

资助项目:新疆维吾尔自治区科技支撑专项(HY-2.3)

作者简介:肖佳奇(1999—),女,吉林扶余人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: 3048596834@qq.com

通信作者:武胜利(E-mail: wushengli77@126.com)

度特征具有差异^[14]。同一观测区域,不同植被类型形成的沙堆由于植物生理、形态特征的差异导致植株周围风沙流结构发生变化,改变微地貌流场致使沉积物粒度有所不同^[15]。此外,灌丛沙堆表层沉积物粒径分形维数的引入不仅能更好地表征土壤颗粒大小,还可以表征土壤质地均匀程度^[16-19]和土地荒漠化程度,反映土壤沙化及土壤肥力等^[20]。马剑平等^[21]通过对民勤白刺沙堆土壤粒径分形特征进行探究,发现不同演替阶段白刺灌丛沙堆分形维数呈现先升高后降低的趋势。陈冬梅等^[22]通过对不同沉积环境下的沉积物粒度分形特征对比研究,发现沉积环境不同其分维值表现出一定的差异,并发现分维值也可以表征沉积物粒度组成的复杂程度。对同一区域沙堆不同地貌部位表面沙物质粒径的分形维数进行分析,发现沙物质的粒度特征、运动形式、植被盖度等均是导致区域粒度分形特征产生差异的主要原因^[23]。

目前,学者主要在干旱半干旱地区及沙漠边缘地区对灌丛沙堆进行研究,对于封闭湖泊周边及内陆干旱区河流沿岸的灌丛沙堆缺少系统性研究。和田河流域一直是研究的热点地区,对其下游沙堆表层沙物质的分形特征差异的探究较少,定量地研究灌丛沙堆表层沙物质的运动方式未见报道。因此本

文选取和田河下游胡杨(*Populus euphratica*)沙堆、柽柳(*Tamarix*)沙堆这两种典型沙堆,对表层沉积物粒度、分形特征及沙物质移动方式进行量化分析,探讨不同类型沙堆表层沉积物粒度及分形特征产生差异的原因,这将为深入探讨干旱区风沙治理、生态恢复与重建提供重要的理论依据。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区概况

和田河流域(34°52′—40°29′N、77°25′—81°43′E)位于昆仑山及喀喇昆仑山北麓,新疆维吾尔自治区塔里木盆地中西部,流域面积48 870 km²(图1)。和田河流域属极端干旱的暖温带大陆性气候,年均气温为12.2 °C,多年平均降水量39.6 mm,多年平均蒸发量2 648.7 mm^[24]。春季多风或浮尘天气,偶有沙尘暴,平均风速2.1 m·s⁻¹,平均大风天数11.5 d,大风伴有沙尘。秋季降温较快,冬季雪少不严寒。和田河水系由发源于昆仑山北麓的玉龙喀什河和发源于喀喇昆仑山北麓的喀拉喀什河构成,两河在塔克拉玛干沙漠的阔什拉什交汇,以出山口和两河交汇处作为和田河上游、中游和下游的分界^[25]。

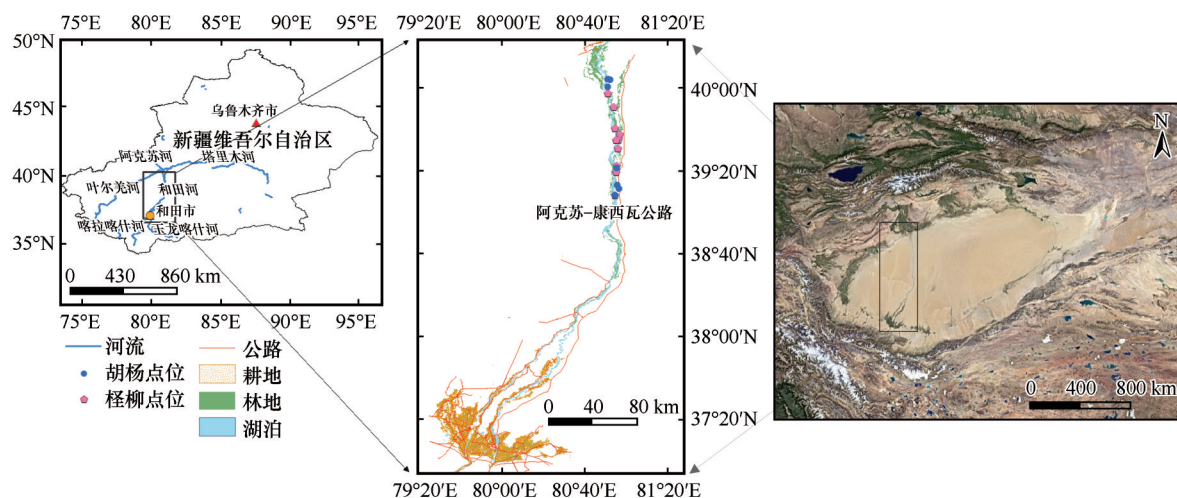


图1 研究区位置及采样点

Fig.1 Location and sampling points of the research area

1.2 研究方法

在和田河下游选取典型区域的柽柳沙堆和胡杨沙堆,沿阿克苏-康西瓦公路西侧由北至南选取柽柳沙堆和胡杨沙堆各10个,其中胡杨沙堆可根据具体情况,在同一点位选取多个典型胡杨沙堆。根

据沙堆剖面特征,胡杨沙堆、柽柳沙堆沿主风向采样部位依次为迎风坡坡脚(G1)、迎风坡坡中(G2)、沙堆顶部(G3)、背风坡坡中(G4)和背风坡坡脚(G5),野外实测灌丛沙堆高度,共计100个粒度样品数据(图2)。

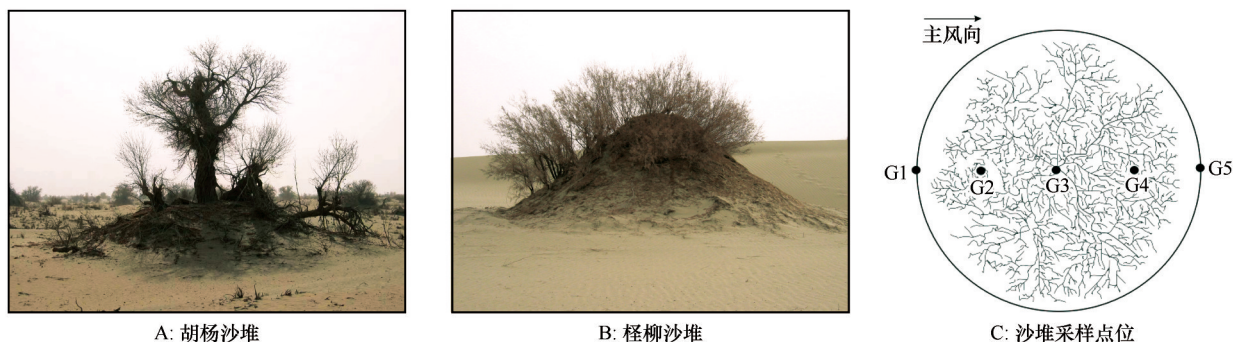


图2 沙堆表层沉积物采样点位

Fig.2 Collection point of surface sediment of nebkhas

对采集的所有沙样用样品袋密封带回实验室。在中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室进行沉积物粒度的测定。粒度样品采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测试。粒度参数计算采用 Folk 等的计算公式。分形维数应用 Wang 等^[26]提出的关系式:

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_v} \right)^{3-D_v} \quad (1)$$

式中: R 为沉积物的粒径, 单位为 mm; $V(r < R)$ 表示小于 R 的颗粒的累积体积百分比; V_T 是沉积物颗粒的总体积; λ_v 是所有颗粒尺寸的上限; D_v 是沉积物的体积分形维数。将某一类的上下限的算术平均值作为 R 的值。对式(1)分别以 $\lg\left(\frac{R}{\lambda_v}\right)$ 和 $\lg\left[\frac{V(r < R)}{V_T}\right]$ 为横坐标、纵坐标, 进行线性拟合, 得到拟合直线的斜率 $3 - D_v$, 最终得到分形维数 D_v 。

$$\lg\left[\frac{V(r < R)}{V_T}\right] = (3 - D_v) \lg\left(\frac{R}{\lambda_v}\right) \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 沙堆表层沉积物粒度组成

胡杨沙堆和柽柳沙堆在沉积物粒组分布中存在着一定的差异。胡杨沙堆表层沉积物粒度组成中黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂、极细砂、细砂、中砂、粗砂、极粗砂含量依次为 0.49%、0.22%、0.50%、1.29%、15.31%、52.95%、25.41%、3.32%、0.47%、0.03%; 柽柳沙堆表层沉积物粒度组成按上述顺序含量依次为 0.95%、0.43%、0.88%、1.79%、20.69%、45.05%、23.56%、5.22%、1.35%、0.07%。胡杨沙堆与柽柳沙堆表层沉积物为极细

砂、细砂、粗粉砂; 胡杨沙堆表层沉积物中极细砂、细砂含量高于柽柳沙堆, 柽柳沙堆表层沉积物中黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂、中砂、粗砂、极粗砂含量高于胡杨沙堆(图3)。

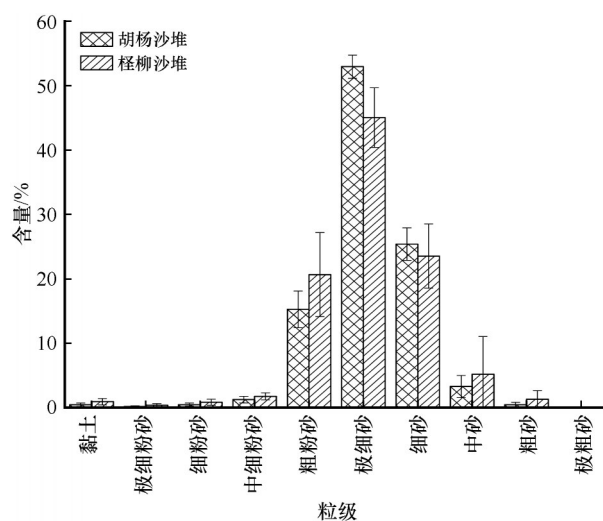


图3 沉积物粒度组成

Fig.3 Composition of sediment grain size

沙堆不同地貌部位的沉积物粒度组成表现出有规律的变换。胡杨沙堆粗砂、极粗砂的含量在迎风坡坡脚最高, 黏土、极细粉砂、细粉砂、粗粉砂、极细砂的含量在沙堆顶部最高; 在背风坡坡脚, 细砂、中砂的含量最高。柽柳沙堆从迎风坡坡脚到沙堆顶部, 沙堆表层沉积物粒度组成中黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂、极细砂含量增加; 中砂、粗砂、极粗砂等粗颗粒被拦截在迎风坡, 在迎风坡含量最高。柽柳沙堆迎风坡坡中、顶部、背风坡坡中、背风坡坡脚中黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂的含量均高于胡杨沙堆相应部位相应粒级的含量; 胡杨沙堆顶部、背风坡坡中、背风坡坡脚中极细砂、细砂、中砂的含量均高

于怪柳沙堆相应部位(表 1)。不同沙堆各地貌部位沙堆表层沉积物的优势粒级均为极细砂,主要原因是塔克拉玛干沙漠沙的来源整体以极细砂、细砂为主。两种沙堆捕集极细砂、细砂、粗粉砂的能力强,导致这些粒级在沙堆表层相应部位发生富集。

表 1 不同沙堆各地貌部位沉积物粒级组成
Table 1 Composition of sediment grain size in different land forms of different nebkhas

沙堆类型	沙堆部位	粒级百分含量%									
		黏土	极细粉砂	细粉砂	中细粉砂	粗粉砂	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
胡杨沙堆	迎风坡坡脚	0.61	0.24	0.45	1.12	15.39	51.63	25.62	3.61	1.17	0.16
	迎风坡坡中	0.57	0.24	0.49	1.22	16.74	50.78	25.82	3.82	0.33	0.00
	沙堆顶部	0.70	0.29	0.72	1.70	17.53	55.21	22.19	1.32	0.23	0.00
	背风坡坡中	0.67	0.30	0.70	1.83	16.49	53.41	24.34	2.09	0.17	0.00
	背风坡坡脚	0.01	0.04	0.12	0.57	10.39	53.54	29.10	5.76	0.46	0.00
怪柳沙堆	迎风坡坡脚	0.37	0.15	0.34	1.14	12.05	36.86	29.89	15.25	3.67	0.29
	迎风坡坡中	0.99	0.44	0.88	2.01	19.92	46.29	24.45	3.90	1.08	0.03
	沙堆顶部	1.53	0.74	1.49	2.52	28.90	46.63	17.48	0.57	0.13	0.00
	背风坡坡中	1.36	0.58	1.13	1.94	24.87	47.84	19.78	1.54	0.95	0.00
	背风坡坡脚	0.54	0.23	0.56	1.35	17.72	47.66	26.19	4.86	0.89	0.00

2.2 沙堆的粒度参数

受微地貌、风力、沙源和植物的影响,沙堆表面沉积物的各粒度参数表现出一定的规律性。沙堆表层沉积物的平均粒径整体变化趋势一致,最细值出现在沙堆顶部,自沙堆顶部向两坡脚粒径逐渐变粗;与胡杨沙堆相比,怪柳沙堆对应地貌部位的平均粒径均偏细。胡杨沙堆分选系数整体表现出背风坡比迎风坡的分选略差(0.82~0.76);怪柳沙堆整体分选中等(0.78~0.87),沙堆迎风坡坡中的分选最差。胡杨沙堆沉积物偏度值为 0.02~0.09,主要表现为相对于中值对称;怪柳沙堆偏度值均大于胡杨沙堆,怪柳沙堆比胡杨沙堆更正偏,怪柳沙堆表层沉积物粒径整体偏细。怪柳沙堆和胡杨沙堆的峰态平均值分别为 1.20 和 1.09,分别属于窄峰态和中等峰态,表明胡杨沙堆粒度频率曲线的峰态更尖锐,集中程度更高(图 4)。

2.3 沙堆的粒配曲线

怪柳沙堆和胡杨沙堆表层沉积物的粒度频率分布曲线均呈双峰态(图 5)。沙堆粒度频率曲线有一突出的主峰,还有一处弱峰,表明沉积物来自不同物源,受到不同的搬运动力,但总体沉积环境稳定。利用 Sahu 判别公式^[27]对和田河下游胡杨和怪

柳沙堆沉积环境进行综合计算与现场验证,发现和和田河下游沙堆表层沉积物均来自风成沉积环境和河流沉积环境,但主要受到风成沉积环境的影响(表 2)。受当地风力和河流动力条件的影响,胡杨沙堆和怪柳沙堆粒度频率曲线呈现双峰分布。在胡杨沙堆各地貌部位中,迎风坡坡脚、迎风坡坡中、沙堆顶部、背风坡坡中主峰所对应的粒径均为 3.48 Φ,背风坡坡脚主峰所对应的粒径为 3.31 Φ。在怪柳沙堆各地貌部位中,迎风坡坡脚、迎风坡坡中、背风坡坡脚主峰所对应的粒径是 3.48 Φ,沙堆顶部、背风坡坡中主峰所对应的粒径为 3.65 Φ,较细。两种沙堆各地貌部位的粒度频率曲线均较高、较窄,曲线斜率较高,表明分选性较好。在沙堆的各地貌部位,胡杨沙堆迎风坡坡脚的峰值最高,怪柳沙堆背风坡坡脚的峰值最高。胡杨沙堆粒度频率曲线的主峰值均高于怪柳沙堆,表明其粒级分布更集中。胡杨沙堆能够大量拦截极细砂,与怪柳沙堆各地貌部位对比,极细砂含量均较高,所以胡杨沙堆粒径分布相对更集中。

胡杨沙堆与怪柳沙堆表层沉积物粒度概率累积曲线均表现为三段式(悬移-跃移-蠕移)组合特征(图 6)。其中胡杨沙堆悬移、跃移、蠕移颗粒的平均含量依次为 8.59%、90.90%、0.50%;怪柳沙堆悬移、跃移、蠕移颗粒的平均含量依次为 14.43%、

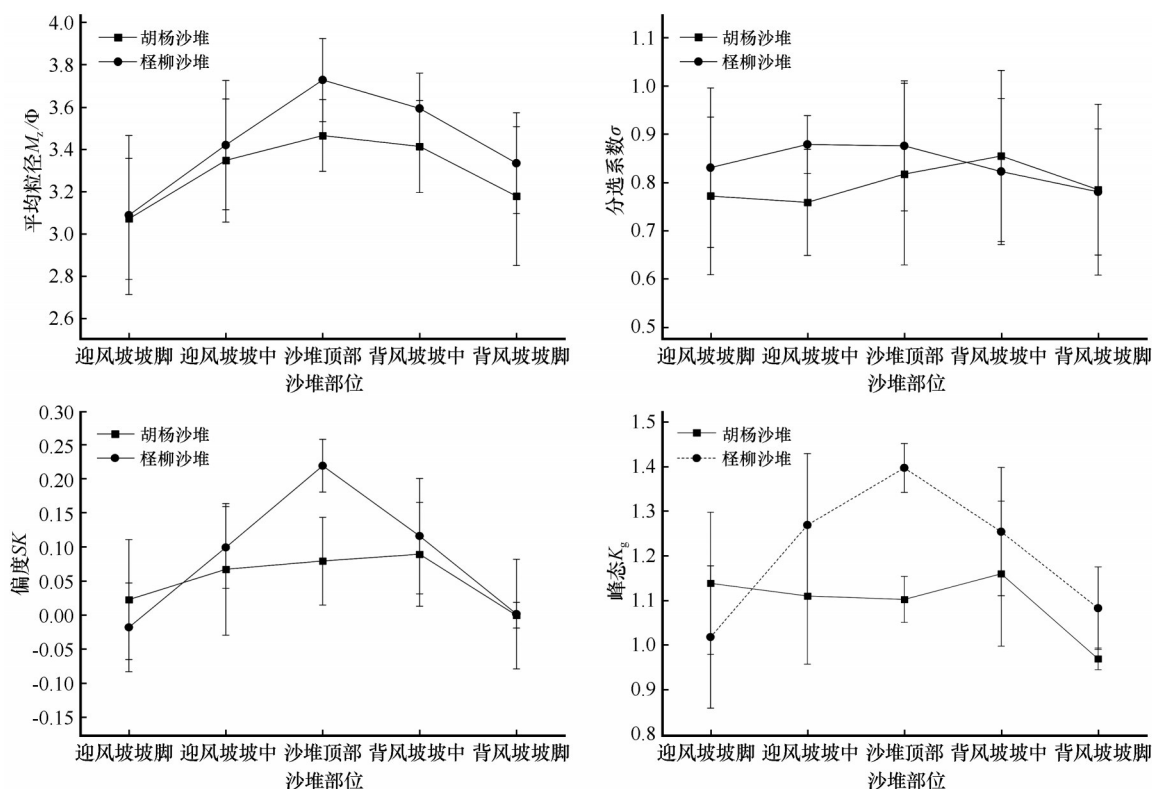


图4 不同沙堆粒度指标变化曲线

Fig.4 Change curves of particle size indexes of different nebkhas

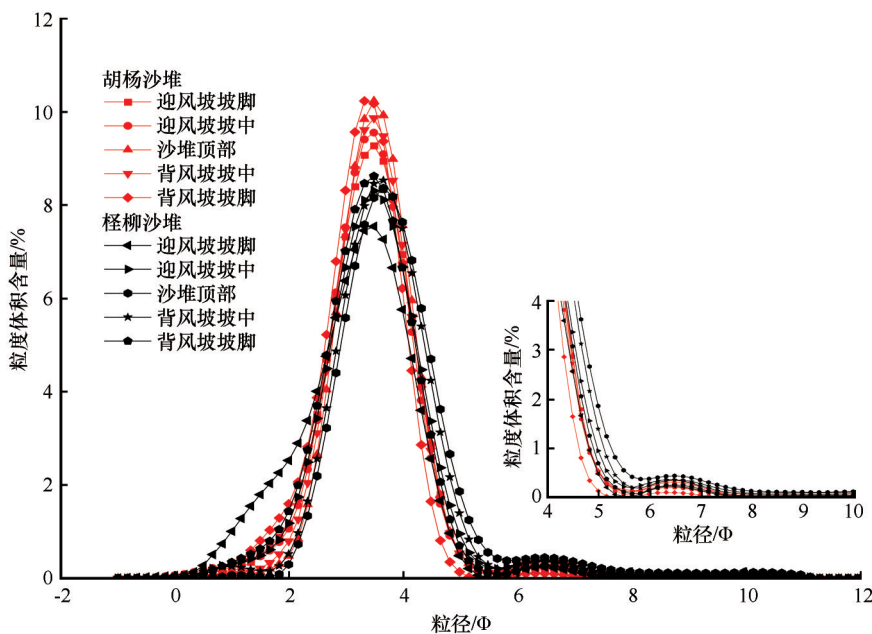


图5 不同沙堆各地貌部位的沉积物粒度频率分布曲线

Fig.5 Grain size frequency curves of sediments in different landforms of different nebkhas

83.65%、1.51%。胡杨沙堆与柽柳沙堆主要粒度成分以跃移组分为主,含量为74.64%~95.71%。胡杨沙堆表层沉积物粒度平均概率累积曲线的跃移组分斜率明显大于柽柳沙堆,说明胡杨沙堆表层沉积物粒度跃移组分分选程度更好。对胡杨沙堆和柽

柳沙堆各地貌部位表层沉积物概率累积曲线进行分析,沙堆均是由悬移、跃移、蠕移组分组成,其中跃移组分含量最高。在迎风坡坡脚、迎风坡坡中、沙堆顶部、背风坡坡脚、背风坡坡中,胡杨沙堆跃移组分含量均比柽柳沙堆高,分别高0.61%、5.40%、

表 2 沉积环境判别公式及判定标准

Table 2 Sedimentary environment identification formula and criteria

环境鉴别	判别公式	判定标准
风成与海滩	$Y_1=-3.568 M_z+3.7016\sigma^2-2.0766 SK+3.1135 K_g$	$Y<-2.7411$, 为风成沉积环境
		$Y>-2.7411$, 为海滩沉积环境
海滩与浅海	$Y_2=15.6534 M_z+65.7091\sigma^2+18.1071 SK+18.5043 K_g$	$Y<65.3650$, 为海滩沉积环境
		$Y>65.3650$, 为浅海沉积环境
浅海与河流	$Y_3=0.2825 M_z-8.7604\sigma^2+4.8932 SK-0.0482 K_g$	$Y<-7.4190$, 为河流沉积环境
		$Y>-7.4190$, 为浅海沉积环境
河流与浊流	$Y_4=0.7215 M_z-0.40304\sigma^2+6.7322 SK+5.2927 K_g$	$Y<9.8433$, 为浊流沉积环境
		$Y>9.8433$, 为河流沉积环境

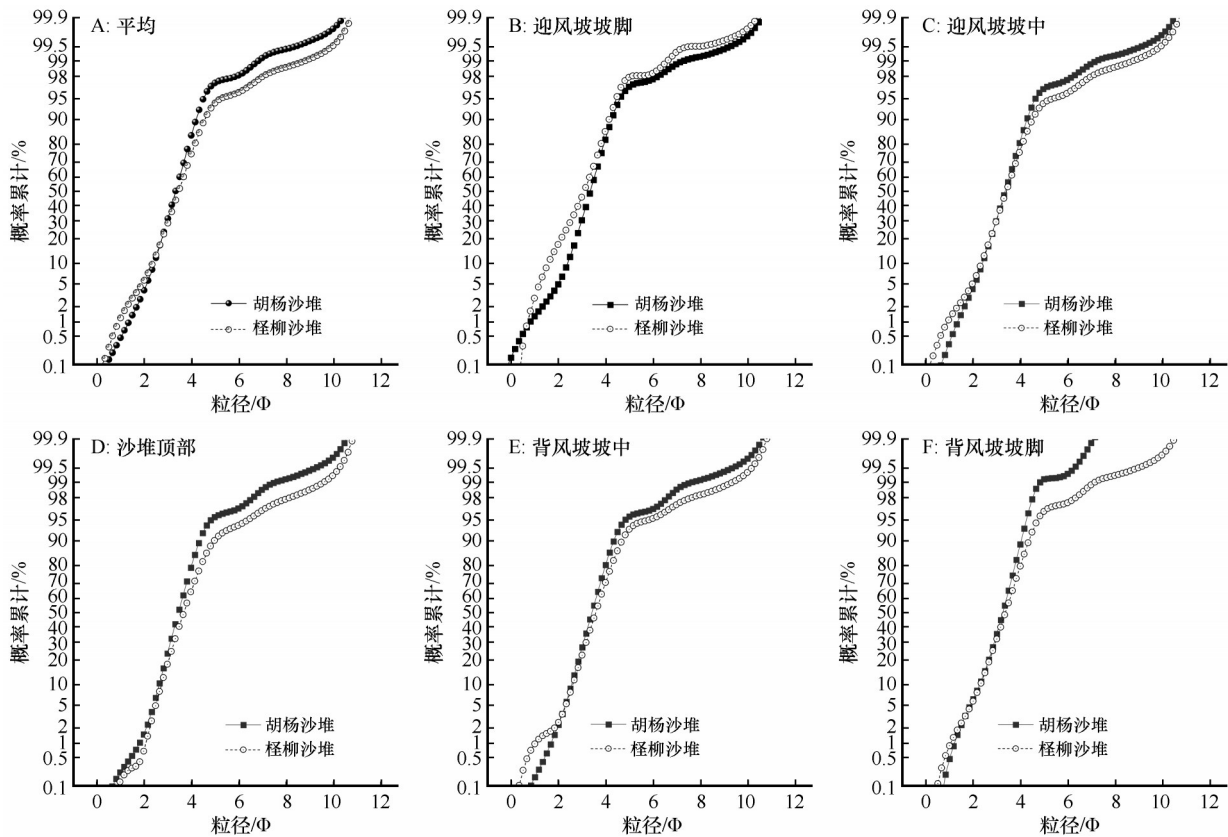


图 6 不同沙堆沉积物概率累积曲线

Fig.6 Probability accumulation curve of different hebkhas

14.56%、8.41%、7.27%；柽柳沙堆除迎风坡坡脚悬移组分含量比胡杨沙堆低 1.92%（由于柽柳沙堆迎风坡坡脚没有柽柳的覆盖，发生大量风蚀，致使悬移质大量流失），其余地貌部位均高于胡杨沙堆，分别高 4.61%、12.01%、7.62%、6.85%。各地貌部位基本表现为胡杨沙堆跃移组分含量更高，柽柳沙堆悬移组分含量更高。沙堆在沙漠化防治过程中能够有效拦截沙物质，胡杨沙堆在拦截跃移质方面比柽柳

沙堆更具有优势，柽柳沙堆在拦截悬移质方面比胡杨沙堆更有优势。

2.4 沙堆表层沙物质粒径分形特征

沙堆表层沙物质的分形维数不仅能够表征沙物质颗粒组成，还能够反映沙物质质地均一化程度。分形维数越接近数值 3，沙物质自相似性越好，表明区域土壤肥力好。胡杨沙堆表层沙物质的平

均分维值为1.93,沙堆顶部沙物质的分维值比迎风坡、背风坡高,差值分别为0.12、0.09。这说明沙堆顶部沙物质自相似性最好,背风坡次之,这与胡杨的枯枝落叶在沙堆顶部和背风坡大量堆积密切相关。怪柳沙堆表层沙物质的平均分维值为1.98,沙堆迎风坡沙物质的平均分维值为1.56~2.11、顶部沙物质的平均分维值为2.07~2.23、背风坡沙物质的平均分维值为1.63~2.15(图7)。在沙堆迎风坡、沙堆顶部、沙堆背风坡,怪柳沙堆沙物质的分维值均大于胡杨沙堆,说明怪柳沙堆的分形程度较好,自相似性较好,土壤肥力好于胡杨沙堆。无论是怪柳沙堆还是胡杨沙堆,均是沙堆顶部的分维值>背风坡的分维值>迎风坡的分维值,这与枯枝落叶在沙堆顶部和背风坡大量堆积所致有关,与野外实际观测结果一致。

分形维数可以反映沙物质颗粒损失状况,在一定程度上表征各区域土地风蚀程度^[28]。怪柳沙堆各地貌部位表层沙物质的平均分形维数从迎风坡坡脚至背风坡坡脚经历了先增大后减小的过程,在沙堆顶部平均分形维数取得最大值。胡杨沙堆各地貌部位表层沙物质平均分形维数的变化规律与怪柳沙堆一致。怪柳沙堆与胡杨沙堆背风坡坡脚沙物质平均分形维数均比迎风坡坡脚大,分别大0.04、0.06(图8)。这说明在沙堆的迎风坡坡脚发生风蚀,在背风坡坡脚发生风积,这与野外实地观

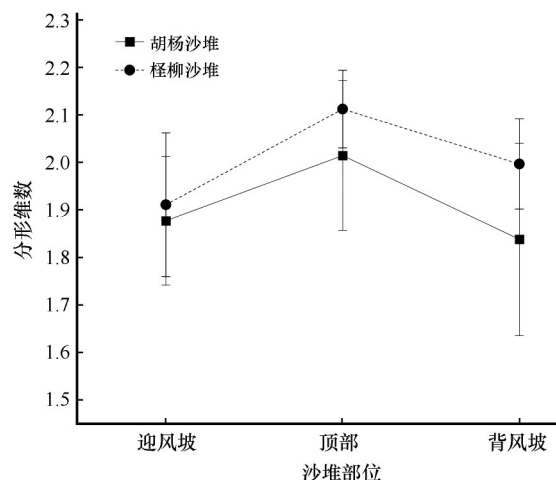


图7 不同沙堆的分形维数

Fig.7 Fractal dimension of different nebkhas

测是一致的。对怪柳沙堆迎风坡坡脚与背风坡坡脚表层沉积物粒径的百分含量进行分析,发现背风坡坡脚表层沉积物的黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂、极细砂百分含量大于迎风坡坡脚,这些粒径的沙物质在背风坡坡脚发生富集、在迎风坡坡脚发生风蚀,而一些颗粒较大的沙物质在迎风坡坡脚沉积;胡杨沙堆中黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂这些粒径的沙物质在迎风坡坡脚受到严重风蚀而在背风坡坡脚发生富集;细砂、中砂、粗砂、极粗砂这些粒径的沙物质在迎风坡坡脚堆积。

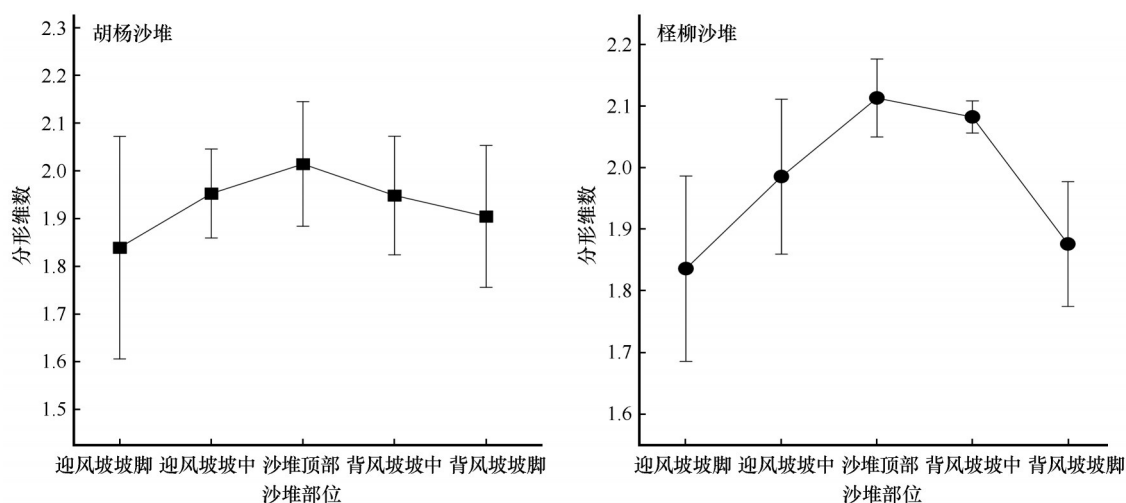


图8 不同沙堆各地貌部位分形维数

Fig.8 Fractal dimension of various geomorphic parts of different nebkhas

对于不同类型沙堆,在风力作用下沙堆迎风坡坡脚表层细颗粒沙物质发生损失而较粗粒径的沙物质由于自身重力以及植物阻碍作用发生堆积,土

地风蚀程度强,土地沙化加剧,分形维数较小;沙堆背风坡坡脚由于风影效应形成涡流风速骤减,粒径较细的物质大量堆积,土地风蚀程度弱,枯枝落叶

大量堆积,抑制土地沙化的发展,分形维数较大。

2.5 沙堆表层沙物质的分形维数与粒级组成相关分析

胡杨沙堆表层沙物质分形维数与黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂含量极显著正相关($P<0.01$),与细砂、中砂含量极显著负相关($P<0.01$)。怪

柳沙堆表层沙物质分形维数与黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂含量极显著正相关($P<0.01$),与极细砂含量显著正相关($P<0.05$),与细砂、中砂、粗砂含量极显著负相关($P<0.01$)。对分形维数与粒级组成进行相关分析,不同地貌部位粒级含量不同,分形维数与粒级组成中的细粒级相关性较高,细粒级含量越多,分形值越高,土壤肥力越好(表 3)。

表 3 不同沙堆表层沙物质分形维数与粒级组成的相关性矩阵表
Table 3 Correlation matrix of fractal dimension and particle size composition of surface sand material in different nebkhas

沙堆类型	指标	分形维数	黏土	极细粉砂	细粉砂	中细粉砂	粗粉砂	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
怪柳沙堆	分形维数	1										
	黏土	0.833**	1									
	极细粉砂	0.811**	0.954**	1								
	细粉砂	0.807**	0.929**	0.981**	1							
	中细粉砂	0.750**	0.868**	0.939**	0.952**	1						
	粗粉砂	0.860**	0.939**	0.922**	0.954**	0.856**	1					
	极细砂	0.486*	0.312	0.136	0.156	0.198	0.319	1				
	细砂	-0.871**	-0.923**	-0.856**	-0.894**	-0.807**	-0.966**	-0.740*	1			
	中砂	-0.829**	-0.741**	-0.631**	-0.645**	-0.643**	-0.758**	-0.837**	0.815**	1		
	粗砂	-0.661**	-0.635**	-0.569**	-0.610**	-0.618**	-0.703**	-0.746**	0.713**	0.896**	1	
	极粗砂	0.168	0.044	0.007	-0.059	-0.062	-0.035	0.066	-0.013	-0.079	0.242	1
胡杨沙堆	分形维数	1										
	黏土	0.643**	1									
	极细粉砂	0.407**	0.910**	1								
	细粉砂	0.250**	0.914**	0.948**	1							
	中细粉砂	0.110**	0.772**	0.789**	0.910**	1						
	粗粉砂	0.383**	0.850**	0.726**	0.829**	0.689**	1					
	极细砂	0.259	-0.352	-0.465**	-0.366**	-0.467**	-0.004	1				
	细砂	-0.470**	-0.433*	-0.262	-0.404*	-0.226*	-0.738**	-0.626**	1			
	中砂	-0.403*	-0.122	0.009	-0.120	0.018	-0.476**	-0.840**	-0.836**	1		
	粗砂	0.030	0.128	0.217	0.128	0.134	-0.054	-0.523**	0.214**	0.523**	1	
	极粗砂	0.089	0.093	0.040	0.001	0.003	0.000	-0.206	-0.001	0.195*	0.891**	1

注:**,在 0.01 水平(双尾)相关性显著;* ,在 0.05 水平(双尾)相关性显著。

2.6 沙堆表层沙物质的分形维数与粒度特征值相关分析及回归分析

胡杨沙堆各地貌部位表层沙物质的分形维数与分选系数、偏度、峰态整体显著正相关($P<0.05$),与平均粒径显著负相关($P<0.05$),分形维数与各粒度特征值拟合度一般, $0.10<R^2<0.60$ 。怪柳沙堆各

地貌部位表层沙物质分形维数与分选系数、偏度整体极显著正相关($P<0.01$),与峰态显著正相关($P<0.05$),与平均粒径极显著负相关($P<0.01$),其中分形维数与各粒度特征值拟合度中等偏上, $R^2>0.50$ (表 4)。对同一沙堆各地貌部位进行分析,在沙堆顶部,分形维数与平均粒径的相关系数最大,在迎

表 4 不同沙堆表层沙物质分形维数(y)与粒度参数(x)相关关系及回归分析
 Table 4 Correlation between fractal dimension and particle size parameters and regression analysis of surface sand material in different nebkhas

沙堆类型	指标	沙堆部位	R^2	相关系数	显著性	线性回归方程
胡杨沙堆	平均粒径	迎风坡坡脚	0.51	-0.717	*	$y = -0.7620x + 1.7727$
		迎风坡坡中	0.17	-0.414	**	$y = -0.4408x + 2.4924$
		沙堆顶部	0.20	-0.789	**	$y = -0.0737x + 3.3238$
		背风坡坡中	0.31	-0.557	**	$y = -0.4022x + 2.6398$
		背风坡坡脚	0.36	-0.603	*	$y = -0.6501x + 1.9927$
	分选系数	迎风坡坡脚	0.11		**	
		迎风坡坡中	0.10	0.478	*	$y = 0.1351x + 0.4969$
		沙堆顶部	0.15	0.441	**	$y = 0.2988x + 0.1470$
		背风坡坡中	0.17	0.408	*	$y = 0.3481x + 0.0791$
		背风坡坡脚	0.60	0.778		$y = 0.4522x + 1.4626$
	偏度	迎风坡坡脚	0.03		**	
		迎风坡坡中	0.24	0.489	**	$y = 0.1735x - 0.2693$
		沙堆顶部	0.18	0.564	**	$y = 0.0867x - 0.0868$
		背风坡坡中	0.30	0.547		$y = 0.1744x - 0.2462$
		背风坡坡脚	0.24	0.490		$y = 0.0303x + 0.0552$
	峰态	迎风坡坡脚	0.13	0.370	*	$y = 0.2700x + 0.5898$
		迎风坡坡中	0.17	0.409	**	$y = 0.3046x + 0.5192$
		沙堆顶部	0.14	0.470	**	$y = 0.2322x + 0.6571$
		背风坡坡中	0.24	0.485		$y = 0.4054x + 0.3800$
		背风坡坡脚	0.10	0.696	*	$y = 0.2055x + 0.9796$
桉柳沙堆	平均粒径	迎风坡坡脚	0.88	-0.672	**	$y = -1.6247x + 0.1061$
		迎风坡坡中	0.78	-0.664	**	$y = -1.1905x + 1.0565$
		沙堆顶部	0.89	-0.846	**	$y = -2.2724x - 1.0718$
		背风坡坡中	0.82	-0.789	**	$y = -1.2724x - 0.1087$
		背风坡坡脚	0.54	-0.738	**	$y = -0.7955x + 1.8425$
	分选系数	迎风坡坡脚	0.53	0.548	**	$y = -0.4218x + 1.6587$
		迎风坡坡中	0.18	0.429	**	$y = -0.1129x + 0.6821$
		沙堆顶部	0.91	0.526	**	$y = 1.5763x - 2.3577$
		背风坡坡中	0.87	0.637	**	$y = 4.1017x - 7.8004$
		背风坡坡脚	0.21	0.467	**	$y = 0.2758x + 0.2966$
	偏度	迎风坡坡脚	0.51	0.713	**	$y = 0.1627x - 0.3165$
		迎风坡坡中	0.76	0.876		$y = 0.5792x - 1.0504$
		沙堆顶部	0.89	0.827	**	$y = 0.4719x - 0.7774$
		背风坡坡中	0.80	0.789	**	$y = 2.7188x - 5.6404$
		背风坡坡脚	0.63	0.911	**	$y = 0.3617x - 0.6767$
	峰态	迎风坡坡脚	0.81	0.903	*	$y = 0.5057x + 0.0898$
		迎风坡坡中	0.68	0.826	*	$y = 0.6906x - 0.1019$
		沙堆顶部	0.86	0.824	*	$y = 0.6576x + 0.0077$
		背风坡坡中	0.82	0.711	*	$y = 5.6368x - 10.6810$
		背风坡坡脚	0.63	0.798	*	$y = 0.3340x + 0.4564$

注: **, 在 0.01 水平(双尾)相关性显著; *, 在 0.05 水平(双尾)相关性显著。

风坡坡中,分形维数与平均粒径的相关系数最小。迎风坡坡脚,分形维数与偏度的相关系数最小。对不同沙堆各地貌部位进行分析,怪柳沙堆各地貌部位表层沙物质分形维数与粒度参数的相关系数值整体大于胡杨沙堆,说明怪柳沙堆各地貌部位的粒度参数更能表征分维值。

3 讨论

和田河流域胡杨沙堆、怪柳沙堆表层沙物质粒级组成以极细砂、粉砂为主^[12,29],本文研究得出了类似的结果,沿着主风向,胡杨沙堆、怪柳沙堆均以极细砂、细砂、粗粉砂为主。由于本研究均是在和田河下游采集样品,在外界条件基本相似的情况下,植被、沙物质来源可以成为影响沙堆形态发育的决定性因素^[30-33]。

植物形态特征是沙堆不同地貌部位沉积物粒级发生有规律变化的主要原因。怪柳具有茂密的灌丛,高度3~5 m(怪柳沙堆高度3.02~5.06 m),怪柳灌丛枝繁叶密整体通透性差,能够大量有效拦截、捕集分布在风沙流中较高层位的悬移物质,怪柳多分布在沙堆的中上部,致使沙堆的顶部细粒较多,因此沙堆顶部沙物质黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂含量较高,平均粒径最小。在怪柳沙堆的迎风坡坡脚,蠕移质、跃移质较粗的颗粒被大量拦截,细砂、中砂、粗砂、极粗砂含量较高。灌丛能够改变流场结构,干扰风沙流的运行轨迹。沙堆迎风坡为气流爬坡加速区,当气流移动到迎风坡坡脚时,由于地表粗糙程度和地形变化,气流上升,使得一小部分细沙物质以悬移方式被搬运,较粗的沙物质停留在原地^[34-35]。沙堆顶部为弱涡流区,灌丛沙堆顶部由于植被导致流场结构发生变化,植被在风沙流运行过程中进行干扰和拦截,促使粉尘等颗粒较细的沙物质沉降堆积。沙堆背风坡为强涡流区,涡流中心区紧贴植物丛和整个沙堆的背风坡,能够使风沙流粉尘在背风坡及沙堆顶部沉降堆积^[36]。怪柳沙堆沉积物的分形维数在沙堆顶部最大,主要是由于分形维数与粒级组成中的细粒级组分高度正相关,沙堆顶部细粒级含量较多,故分形值较高。

和田河流域胡杨整体冠型为上密下疏,能够有效改变局地的流场结构。胡杨植株高度15~30 m,从沙堆表面到1.5 m内仅有胡杨的树干,几乎无其他植被覆盖。胡杨树干与上方枝叶能够有效地拦截悬浮在空中的悬移质,树干则直接拦截、改变沙

物质运移方向。胡杨由于枝干较高,能拦截高处漂浮的较细沙物质并使其降落在胡杨根部,因此沙堆顶部平均粒径最细;树干能够阻拦沙物质移动,细砂、中砂、粗砂、极粗砂在迎风坡坡脚、迎风坡坡中堆积,致使这两个地貌部位沉积物颗粒较粗。胡杨沙堆的迎风坡为风蚀区,背风坡为积沙区,所以迎风坡整体沉积物的平均粒径较背风坡粗。

研究区内怪柳沙堆各地貌部位沉积物的平均粒径均比胡杨沙堆对应部位的细。研究区内由北至南胡杨沙堆高度1.37~5.96 m,怪柳沙堆高度3.02~5.06 m,由于沙堆高度的差异,怪柳沙堆在距地表2~5 m植被覆盖度高于胡杨沙堆。怪柳植株形态密集地覆盖于沙堆表面到3 m的范围内,胡杨沙堆从沙堆表面到1.5 m的范围内仅有胡杨的树干,几乎无其他植被覆盖,黏土等细颗粒物容易被风蚀,这就导致这两种植物捕集风沙流中不同粒组沉积物的差异。怪柳沙堆各地貌部位相对于胡杨沙堆能够拦截大量粉砂和黏土,因此怪柳沙堆相对于胡杨沙堆平均粒径较细。怪柳的覆盖度、枯枝落叶量远远高于胡杨,捕集风沙流中固体颗粒物的能力高于胡杨。

和田河下游怪柳沙堆和胡杨沙堆的土壤颗粒平均分形维数值分别为1.99、1.93,与新疆策勒地区半固定沙地、固定沙地表层沙物质的分形值相比较^[4]。朱震达等^[37]指出,河流下游沉积物平均粒径较细。土壤质地越细,土壤颗粒大小的分形维数越高^[38-39]。一般认为,沙物质在风力作用下沿主导风向吹蚀搬运并沉积,沙物质经过分选,较粗的沙粒或砾石因难以吹蚀而留在迎风坡,较细的沙粒随着风力作用向下风向搬运,遇到植被的阻碍作用在沙堆顶部降落并沉积^[12]。这与本文在沙堆顶部分形维数最大结论一致。怪柳沙堆表层沙物质平均分维值比胡杨沙堆大0.06,分维值更接近于3,说明在怪柳沙堆区域土壤肥力,土壤自相似性较好。对和田河流域不同类型沙堆分形维数与粒级特征的相关性分析结果表明,分形维数与土壤黏土、粉砂含量呈极显著正相关,与前人已有研究结论相同^[40]。也有研究表明分形维数与黏粒含量相关性最强,而与粉粒、砂粒相关性弱^[39]。本文结论为不同类型沙堆表层沙物质分形维数与平均粒径显著负相关。

4 结论

和田河下游胡杨沙堆、怪柳沙堆表层沉积物系

由河流搬运来的碎屑物质经风力的分选在植物附近堆积而成,百分含量分别为93.67%、90.17%,主要由极细砂、细砂、粗粉砂组成。沿主风向不同沙堆各地貌部位表层沉积物平均粒径由迎风坡至背风坡出现先减小后增大的趋势,在沙堆顶部平均粒径最细。

胡杨沙堆与怪柳沙堆表层沉积物粒度概率累积曲线均表现为三段式(悬移-跃移-蠕移)组合特征。胡杨沙堆悬移质含量8.59%、跃移质含量90.90%、蠕移质含量0.50%;怪柳沙堆悬移质含量14.43%、跃移质含量83.65%、蠕移质含量1.51%。胡杨沙堆在拦截跃移质方面比怪柳沙堆更具有优势,怪柳灌丛捕集悬移质的能力比胡杨植株更强。

在沙堆各地貌部位,分形维数从沙堆迎风坡至背风坡先增大后减小,在沙堆顶部为最大值。怪柳沙堆表层沙物质分维值在迎风坡坡中、沙堆顶部、背风坡坡中比胡杨沙堆分别高0.03、0.10、0.16;胡杨沙堆表层沙物质分维值在迎风坡坡脚、背风坡坡脚比胡杨沙堆分别高0.01、0.03。怪柳沙堆表层沙物质的分维值比胡杨沙堆大0.06。

沙堆表层沙物质分形维数与黏土、极细粉砂、细粉砂、中细粉砂、粗粉砂含量均极显著正相关($P < 0.01$),其中与黏土含量正相关性最高,与细砂显著负相关($P < 0.01$)。不同类型沙堆粒径分形维数与分选系数、偏度、峰态显著正相关($P < 0.05$),与平均粒径显著负相关($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 邱国玉. 江西亚热带风沙化土地的生态特征及防护对策[J]. 中国沙漠, 1992, 12(2): 37-41.
- [2] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙漠化[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 39-81.
- [3] 李向洁, 李志文, 杜建会, 等. 南昌市厚田沙地蔓荆灌丛沙堆的形态与沉积特征[J]. 地理科学, 2021, 41(11): 2042-2051.
- [4] 苏松领, 毛东雷, 蔡富艳, 等. 新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 124-132.
- [5] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 回涡沙丘的形态特征与表面物质组成[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 587-592.
- [6] 李小乐, 魏亚娟, 党晓宏, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 933-942.
- [7] 王湘, 焦菊英, 曹雪, 等. 柴达木盆地尕斯库勒湖白刺灌丛沙堆剖面土壤养分的分布和富集特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 765-774.
- [8] 殷婕, 哈斯额尔敦, 安晶, 等. 鄂尔多斯高原油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛沙堆风沙气流结构及其地貌学意义[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 184-195.
- [9] Liu B, Zhao W Z, Yang R. Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* Nebkhas in desert-oasis ecotones [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1446-1455.
- [10] 李向洁, 李志文, 杜丁丁, 等. 南昌厚田沙地蔓荆(*Vitex trifolia*)灌丛沙堆的沉积物与空间格局特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 211-220.
- [11] 毛东雷, 吴云霞, 蔡富艳, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带灌丛沙堆与回涡沙丘的粒度分布特性[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 48-54.
- [12] 武胜利, 李志忠, 焦黎, 等. 新疆和田河流域怪柳沙堆表面沙物质粒度特征[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 745-751.
- [13] 王佩, 马倩, 朱元璞, 等. 新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1644-1653.
- [14] 马瑞, 赵锦梅, 马彦军, 等. 巴丹吉林沙漠南缘近流沙区白刺灌丛沙堆形态特征与空间分布[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 217-221.
- [15] 李得禄, 满多清, 朱国庆, 等. 丘间低地不同部位风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1210-1215.
- [16] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999(2): 162-167.
- [17] Prosperini N, Perugini D. Particle size distributions of some soils from the Umbria Region (Italy): fractal analysis and numerical modelling[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4): 185-195.
- [18] Filgueira R R, Fournier L L, Cerisola C I, et al. Particle-size distribution in soils: a critical study of the fractal model validation [J]. Geoderma, 2006, 134(3/4): 327-334.
- [19] 曾宪勤, 刘和平, 路炳军, 等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2008(1): 65-70.
- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [21] 马剑平, 王飞, 郭树江, 等. 民勤白刺灌丛沙堆演替过程中土壤粒径分形特征[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 46-52.
- [22] 陈冬梅, 穆桂金. 不同沉积环境下沉积物的粒度分形特征的对比研究[J]. 干旱区地理, 2004(1): 47-51.
- [23] 毛东雷, 蔡富艳, 方登先, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 88-98.
- [24] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 和田河流域土地生态系统服务价值变化及敏感性研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 334-340.
- [25] 刘海涛, 张向军, 郭全水, 等. 和田河流域半世纪来气温、降水突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 58-62.
- [26] Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 550.
- [27] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments [J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34

- (1):73-83.
- [28] 高君亮,李玉宝,虞毅,等.毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J].水土保持研究,2010,17(6):220-223.
- [29] 来凤兵,孙虎,张展赫,等.塔克拉玛干沙漠和田河西侧胡杨沙堆的形态特征及空间分布格局[J].中国沙漠,2015,35(2):284-293.
- [30] 韩章勇,王雪芹,杨帆,等.策勒绿洲-沙漠过渡带两个建群种阻沙能力对比研究[J].干旱区研究,2013,30(4):659-665.
- [31] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11(5):505-514.
- [32] Fan D, Qin S, Zhang Y, et al. Effects of sand-fixing vegetation on topsoil properties in the Mu Us Desert, northwest China [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2015, 14(4):749.
- [33] 李静芸,傅天阳,申玉龙,等.毛乌素沙地新月形和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2023,43(2):226-232.
- [34] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(II)[J].中国沙漠,2007,27(1):15-19.
- [35] 武胜利,李志忠,海鹰,等.新疆和田河流域单株柽柳灌丛流场的实验研究[J].干旱区研究,2006,23(4):539-543.
- [36] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(I)[J].中国沙漠,2007,27(1):9-14.
- [37] 朱震达,陆锦华,江伟铮.塔克拉玛干沙漠克里雅河下游地区风沙地貌的形成发育与环境变化趋势的初步研究[J].中国沙漠,1988,8(2):4-13.
- [38] 李德成,张桃林.中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J].土壤与环境,2000(4):263-265.
- [39] 张世熔,邓良基,周倩,等.耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J].土壤学报,2002(2):221-226.
- [40] 王德,傅伯杰,陈利顶,等.不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2007,27(7):3081-3089.

Grain size and fractal characteristics of surface sediments of nebkhas in the lower reaches of Hetian River, Xinjiang, China

Xiao Jiaqi¹, Wu Shengli^{1,2}, Chen Pengpeng¹

(1.School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2.Xinjiang Uygur Autonomous Region Higher Education Teacher Training Center, Urumqi 830054, China)

Abstract: The study of nebkha is of great significance to regional ecological environment protection, desertification control and environmental evolution analysis. The grain size and fractal characteristics of surface sediments of *Populus euphratica* nabkha and *Tamarix* nabkha in different geomorphologic parts of Hetian River Basin were analyzed, and the differences were analyzed. The results show that: (1) The surface sediment content of different nebkhas is different. The surface sediment of *Populus euphratica* nabkha and *Tamarix* nabkha is mainly composed of extremely fine sand, fine sand and coarse silt, and the total percentage content is 93.67% and 90.17% respectively. (2) Sediment grain size of each geomorphologic part of different types of nebkhas has a certain rule of change. The average grain size of *Populus euphratica* nabkha and *Tamarix* nabkha is gradually thinner from the foot of the windward slope to the top of the sand pile, and gradually coarser from the top of the sand pile to the foot of the lee slope. The grain size frequency distribution curves of *Populus euphratica* nabkha and *Tamarix* nabkha are bimodal, in which the grain size frequency distribution curve of *Populus euphratica* nabkha is higher and narrower, and the particle size is more concentrated. (3) In the surface sediment probability cumulative curve, the saltation component slope of *Populus euphratica* nabkha along the main wind direction is larger, the sorting ability is better, and the saltation component content is 7.25% higher than that of *Tamarix* nabkha. The suspended component content of *Tamarix* nabkha is 5.84% higher than that of *Populus euphratica* nabkha. (4) There is a significant negative correlation between the fractal dimension of surface sand and the average particle size ($P < 0.05$). The sorting coefficient, skewness and peak state are significantly positively correlated ($P < 0.05$). There is a significant positive correlation between the fractal dimension and the content of clay, very fine silt, fine silt, medium fine silt and coarse silt ($P < 0.01$), and the positive correlation between the fractal dimension and clay content is the highest. There is a significant negative correlation with fine sand ($P < 0.01$). Regional wind dynamic conditions, plant morphologic characteristic, vegetation coverage and the source of sand material are the main reasons for the difference in grain size and fractal characteristics of surface sediments of different types of sand piles in Hetian River Basin.

Key words: particle size characteristics; fractal dimension; sedimentary environment; lower reaches of Hetian River