

Comparative Grain Size Analysis of Nebkhas and Sand Materials Source in the Kumtagh Desert

Zihao Hu¹, Zhizhu Su², Aimin Liang^{3,4}, Bo Wu⁵, Yijuan Ma^{1*}, Rong Liu¹, Xiongbing Yang¹

¹College of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong Shanxi

²Historical Culture School, Shanxi University, Taiyuan Shanxi

³Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

⁴University of Chinese Academy of Science, Beijing

⁵Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing

Email: huzihao397@163.com, *mayijuan@163.com

Received: Jul. 24th, 2018; accepted: Aug. 9th, 2018; published: Aug. 16th, 2018

Abstract

Nebkhas are developed in sand sediments of arid regions or semi-arid regions with good moisture conditions and plant growth conditions. Studies on the nebkhas helped to understand the provenance and deposition of the sand sediments. The grain size of the sediment samples from nebkhas and other correlative points in the northwestern parts of the Kumtagh Desert in the west of China were analyzed. The main composition of nebkhas is very fine sand and its ratio of 47.52 percent, finer than other sample points. The grain size composition of the nebkhas is similar to that of the interdune lowlands in the west and the southeast. The sediments of nebkhas have a sorting coefficient of medium characteristic, and negative skew distribution, and the kurtosis has a typical medium characteristic. The grain size parameter of the nebkhas is similar to that of the paleo-dune deposit of yardang. The grain size distribution trends of the nebkhas, the interdune lowlands and the paleo-dune deposit of yardang over 1Φ are highly correlated. From the probability cumulative curves, the results showed that the sediments of the nebkhas are mainly composed of the saltation and suspension components. Their transport ways are saltation and suspension. The quantitative analyses of grey relevancy of the nebkhas and the sand materials source showed that sediments of the interdune lowlands and shifting sand dune and paleo-dune deposit of yardang are correlated with nebkhas. The paleo-dune deposit of yardang correlates the most closely with nebkhas ($\gamma = 0.73$). Analyses indicated that besides the neighboring interdune lowlands, the paleo-dune deposit of yardang also helps to form the nebkhas, and the dune deposits of collapsing yardang are from the upwind edge of nebkhas. The surface deposits are carried by the wind, and then they settled when they met the nebkhas. In the process, nebkhas formed gradually. In conclusion, nebkhas are formed with the help of the interdune lowlands in the west and the southeast under the wind deflation, and the paleo-dune deposit of yardang may be one of the sand material sources of the nebkhas.

*通讯作者。

Keywords

Nebkhas, Sand Materials Source, Grain Size Characteristic, Kumtagh Desert

库姆塔格沙漠灌丛沙堆物源之粒度分析

胡子豪¹, 苏志珠², 梁爱民^{3,4}, 吴波⁵, 马义娟^{1*}, 刘蓉¹, 杨雄兵¹

¹太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中

²山西大学 历史文化学院, 山西 太原

³中国科学院 西北生态环境研究院, 甘肃 兰州

⁴中国科学院大学, 北京

⁵中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京

Email: huzihao397@163.com, *mayijuan@163.com

收稿日期: 2018年7月24日; 录用日期: 2018年8月9日; 发布日期: 2018年8月16日

摘要

灌丛沙堆主要发育在干旱、半干旱地区水分和植物生长条件相对较好的富含沙物质的区域, 对其研究有助于理解沙物质来源和堆积过程。本文对库姆塔格沙漠西北缘典型灌丛沙堆及其周围沙源样点的表层沉积物进行了粒度对比分析, 结果表明: 库姆塔格沙漠灌丛沙堆沉积物以极细沙为主(含量47.52%), 较周围对照样点沉积物颗粒要细; 灌丛沙堆沉积物的粒度参数分选性中等, 偏度为负偏, 峰态为中等峰态; 灌丛沙堆与其周围丘间地沙物质和雅丹体中埋藏古风成砂的粒度频率曲线在粒级 $>1\phi$ 范围内的粒度分布趋势表现出明显的一致性; 概率累积曲线反映出灌丛沙堆沉积物以跳跃组分和悬浮组分为主, 即以跃移搬运和悬移搬运为主要运移方式; 通过灰色关联度对灌丛沙堆的沙源做了定量分析, 反映出灌丛沙堆的物源除其周围的丘间地供给外, 其上风向崩塌雅丹体中出露的埋藏古风成砂通过风力运移被灌丛阻拦沉降, 也是灌丛沙堆的沙源之一。

关键词

灌丛沙堆, 潜在沙源, 粒度特征, 库姆塔格沙漠

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

灌丛沙堆是流动碎屑颗粒(砂、粉砂、粘土和盐晶粒)受植物丛的阻挡, 在植物丛风影区发生堆积并随植物生长而不断扩大的生物-风积地貌类型[1] [2] [3], 其高度从几厘米至几米不等, 发育大小主要取决于灌丛植物的冠幅和密度。常见的灌丛沙堆有桉柳沙堆、白刺沙堆、锦鸡儿沙堆和油蒿沙堆等[4] [5] [6] [7]。

在荒漠地区含水分的沙质土地上出现或保留适应性较强的灌丛植物是灌丛沙堆形成的首要条件。我国北方荒漠、半荒漠地区，灌丛沙堆一般发育在洪积扇前缘、沙漠边缘和沙漠腹地中河床两岸、湖盆洼地等水分条件相对较好的地方，是一种广泛存在的生物-风积地貌，自 20 世纪 80 年代以来受到关注。迄今，对灌丛沙堆的研究主要涉及其空间格局[8]、形成演变[9]、沉积特征[10]、形态特征[11]和流场特征[12]以及阻沙效益[13][14][15]等方面。一般认为，植被、风力和物源等因素与灌丛沙堆形成演化密切相关[16][17][18]。在不同的生物气候带，其植被、风力状况存在差异，进而影响到灌丛沙堆的形成与发育。极端干旱地区的库姆塔格沙漠以流动沙丘为主，在沙漠腹地的干涸河床和阿奇克谷地也有灌丛沙堆的发育，对其研究鲜有报道。在对库姆塔格沙漠考察时，受恶劣的自然环境限制，仅对个别灌丛沙堆做了观察描述和采样，未开展该沙漠范围内灌丛沙堆的系统调查，但本文旨在通过测定研究区典型灌丛沙堆及周边可能物源沉积物粒度特征，比较灌丛沙堆周边沉积物与灌丛沙堆沉积物的异同性，探讨灌丛沙堆沙物质的来源，为该区灌丛沙堆的发育和演化提供科学数据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究区位于库姆塔格沙漠西北(图 1)，罗布泊东南，在地质构造上属塔里木盆地的东南拗陷(500~1000 m)东延部分[19]；在库姆塔格沙漠风沙地貌区划中[20]属罗布泊南-阿奇克谷地湖积平原区的罗布泊以南灌丛沙丘亚区。宽广的丘间地主要分布泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)沙堆(图 1)和雅丹体，靠北地区分布有怪柳(*Tamaricaceae*)沙堆[21]。因丘间地砂土含盐量较高，几乎无植被覆盖。由于本区处于小泉沟沟口的洪积(倾斜)平原上，受季节性洪水影响，在丘间地表层可见大小不等的砂砾石覆盖。据位于库姆塔格沙漠西部的测风站(39°46'07"N, 90°57'19"E)观测数据显示，该地年平均风速为 $3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，年起沙风占总观测结果的 26.8%，年风向和起沙风向均为东北和东南两组风向，为钝双峰型风况，两组风向占全年风向的 73.73%，其中东北风占 36.46%，东南风占 37.27% [22]。

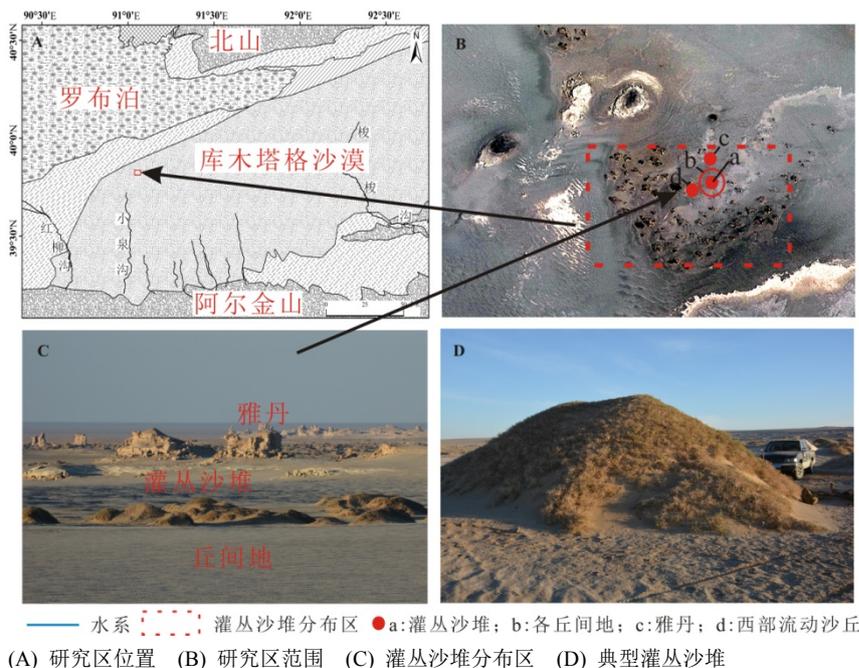


Figure 1. The nebkhas in the Kumtagh Desert

图 1. 库姆塔格沙漠的灌丛沙堆

2.2. 研究方法

2015年10月考察期间,在库姆塔格沙漠选取典型泡泡刺沙堆(图1(D)),地理坐标为 $39^{\circ}55'12''\text{N}$ 、 $91^{\circ}06'29''\text{E}$,沙堆高约4 m,上覆植被株高10~40 cm,盖度70%左右。在该沙堆表层0~5 cm的深度采集代表样品。另外,为探究灌丛沙丘沉积物来源,分别在灌丛沙堆周围的丘间地、位于灌丛沙堆东北部雅丹体中自然出露的埋藏古风成砂、西部的流动沙丘和丘间地、东部和东南部丘间地等不同地貌单元进行样品采集,除雅丹体中的埋藏古风成砂外,其余样品均在 $20 \times 20 \text{ cm}$ 范围内采集0~10 cm的表层沙样。

粒度分析采用 $1/3\Phi$ 间隔筛析法,粒级划分采用乌登-温特沃斯粒级标准[23],即砾石($<-1\Phi$)、极粗沙($-1\sim 0\Phi$)、粗沙($0\sim 1\Phi$)、中沙($1\sim 2\Phi$)、细沙($2\sim 3\Phi$)、极细沙($3\sim 4\Phi$)、粉沙($4\sim 9\Phi$)、黏土($>9\Phi$)。粒度参数计算使用矩法[24],并采用矩法粒度参数进行分级,参数有平均粒径(Mz)、分选系数(σ)、偏度(SK)和峰度(Kg),最后将数据结果在SPSS中进行统计分析,使用Origin软件给予图示化。

3. 结果与分析

3.1. 粒度组成与参数特征

粒度是沉积物特征的重要表征之一,其组成及分布受物质来源、搬运方式、沉积环境的综合影响。为了分析和对比库姆塔格沙漠灌丛沙堆与潜在沙源的粒度组成和参数特征,按照乌登-温特沃斯粒级标准统计现有粒度数据,在表1中给出粒度组成及其参数值。

从表1中可以看出,库姆塔格沙漠灌丛沙堆表层沉积物的粒级以极细沙为主,约占47.52%,表明极细沙是灌丛沙堆沉积物的主要组成部分,细沙和中沙含量次之,约占28.45%和14.34%;其他粒级含量极少,在0.04%~7.02%之间。灌丛丘间地的粒度组成以中沙和极细沙为主,含量分别为22.85%和22.97%。同灌丛沙堆沙粒级配相似的有西部丘间地和东南部丘间地,其粒度组成同样以极细沙为主,含量分别为35.16%和29.73%,且二者的沙粒级配在中粒组分和细粒组分上同灌丛沙堆均有一定的相似性。其余样点地表沉积物粒度含量差异明显。东部丘间地以粗沙含量为主,西部流动沙丘以中沙为主,而雅丹体中埋藏古风成砂以细沙为主。据此,通过各样点粒度组成可以发现,灌丛沙堆中的细粒组分所占比重最高。表明在该地风能条件下,各丘间地沙物质中的细沙和极细沙物质最易吹蚀,并被灌丛沙堆所拦截,小于极细沙粒级颗粒物则易被远距离输送,大于细沙粒级颗粒物则不易被吹蚀与搬运。

根据矩法公式对所有样品的粒度特征参数进行计算(表1)。结果表明:平均粒径(Mz)中,灌丛丘间地、西部流动沙丘、西部丘间地、东部丘间地和东南部丘间地的优势粒级为中沙,范围介于 $1.59\sim 2.07\Phi$,其中灌丛丘间地的平均粒径最粗;灌丛沙堆和雅丹体中埋藏古风成砂均以细沙为主,但灌丛沙堆的平均粒径细于雅丹体中埋藏古风成砂;各样点的分选系数(σ)根据Collias矩法分类标准[24]可知,除灌丛沙堆为中等分选外(0.70~1.00),其他样点的分选均较差(1.00~2.00),说明灌丛沙堆沉积物颗粒组成的均一程度好于其他样点;偏度(SK)除灌丛丘间地、东部丘间地和东南部丘间地为“近对称”分布外,其余样点均为负偏,且其分布趋势与平均粒径(Mz)相关;灌丛沙堆和雅丹体中埋藏古风成砂的峰态(Kg)为中峰态,其余样点沙粒的峰态均为宽峰态,说明灌丛沙堆和雅丹体中埋藏古风成砂粒度分布相对集中。从粒度组成和粒度参数特征可以看出,灌丛沙堆的沉积物平均粒径细于其他样点,且分选性中等,但具有负偏和中峰态的特点。其余样点地表沉积物中,西部丘间地、东南部丘间地表层沉积物的粒度组成上同灌丛沙堆有一定的相似性,但雅丹体中埋藏古风成砂的粒度参数与灌丛沙堆有一定的相似性。

3.2. 粒度频率曲线和概率累积曲线

为进一步探讨库姆塔格沙漠灌丛沙堆的沙源及粒度特征,对各样点沉积物颗粒粒度频率曲线与灌丛沙堆粒度频率曲线进行对比分析(图2),以反映灌丛沙堆的粒度频率特征。

Table 1. The grain size composition and parameter of surface sediments in different geomorphological locations
表 1. 研究区采样点地表沉积物粒度组成与参数特征

地貌类型	粒度组成/%							粒度参数/ Φ			
	砾石 <-1 Φ	极粗砂 -1~0 Φ	粗砂 0~1 Φ	中砂 1~2 Φ	细砂 2~3 Φ	极细砂 3~4 Φ	粉砂 >4 Φ	平均粒径 Mz	分选系数 σ	偏度 SK	峰度 Kg
泡泡刺沙堆	0.00	0.04	2.68	14.34	28.45	47.52	7.02	2.92	0.85	-0.81	3.15
灌丛丘间地	0.75	13.53	21.37	22.85	14.52	22.97	3.99	1.70	1.47	-0.01	1.77
雅丹体埋藏 古风成砂	0.18	2.78	10.30	21.23	29.19	29.05	7.20	2.42	1.16	-0.61	2.76
西部流动沙丘	0.00	0.00	0.15	42.93	42.40	14.32	0.64	2.07	1.65	-0.73	2.11
西部丘间地	0.00	2.95	17.64	14.34	27.74	35.16	2.36	1.82	1.81	-0.63	1.91
东部丘间地	0.02	10.34	34.37	18.05	10.45	23.89	2.94	1.59	1.45	0.32	1.64
东南部丘间地	1.83	13.07	21.21	13.34	17.15	29.73	3.59	1.83	1.57	-0.24	1.68

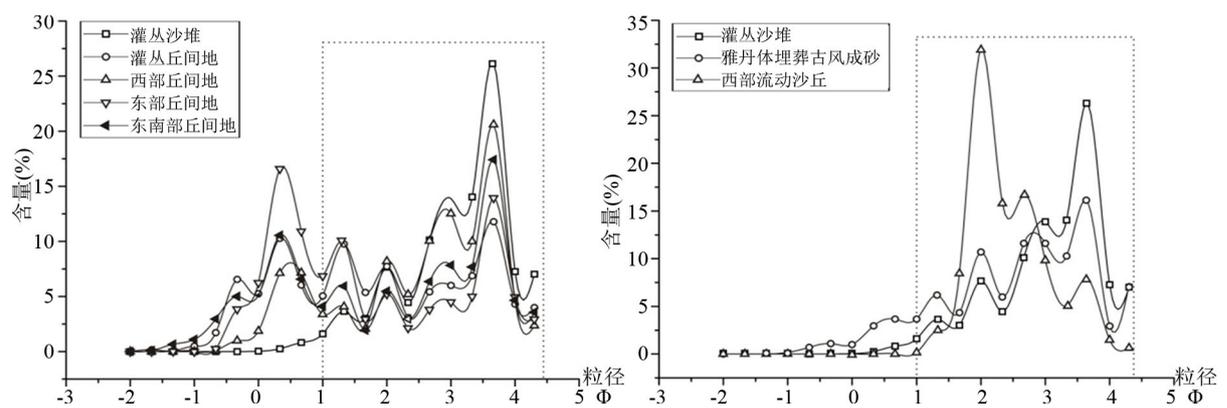


Figure 2. The grain size frequency curves of the nebkhas and other correlative points (different inter-dune lowlands and dunes)
图 2. 灌丛沙堆及相关样点(各丘间地与各沙丘)粒度频率曲线

粒度频率曲线可以显示粒度分布的峰态和趋势。从图 2 中可以看出,灌丛沙堆的粒度分布以 4 个众数、负偏态、1 个明显主峰为特征,且与 4 个丘间地样点的沉积物在粒径 $>1\Phi$ 范围内的粒度分布趋势表现出明显的一致性,这 5 个样点沉积物粒度的主峰值大多出现在 $3.7\sim 4\Phi$ 之间,属极细沙组分。灌丛沙堆与雅丹体中埋藏古风成砂沉积物在粒径 $>1\Phi$ 范围内的粒度分布趋势较为相似,而与西部流动沙丘差异明显;在粗砂 ($0\sim 1\Phi$) 至细砂 ($2\sim 3\Phi$) 范围 ($1\sim 3\Phi$),雅丹体中埋藏古风成砂所对应的粒度频率含量高于灌丛沙堆,但在细砂 ($2\sim 3\Phi$) 至极细砂 ($3\sim 4\Phi$) 范围,灌丛沙堆所对应的粒度频率含量高于雅丹体中埋藏古风成砂;灌丛沙堆与雅丹体中埋藏古风成砂样品的主峰值主要出现在 $3.7\sim 4\Phi$ 之间,属极细沙组分。这说明在 $>1\Phi$ 粒径范围内的沙物质为灌丛沙堆和周围样点地表沙物质的主要粒径组分,灌丛沙堆中极细沙含量所占比重高于其他样点。据此,反映出灌丛沙堆的沙物质来源很可能是其丘间地沙物质和雅丹体中埋藏古风成砂。

概率累积曲线可以揭示沉积物与搬运力间的关系,也可以将碎屑组分中含量较少的粗、细尾部特征放大,便于沉积成因分析[25]。灌丛沙堆的概率累积曲线表现出“滚动-多跳跃-悬浮”式组合的粒度特征(图 3)。其中,滚动组分 ($0\sim 0.67\Phi$) 含量极少所占比重约 1.10%,可能与其形成过程中短时或瞬时强风将粗粒物质吹蚀沉降于灌丛沙堆有关;跳跃组分 ($1\sim 3.33\Phi$) 含量占 58.40%,悬浮组分 ($>3.33\Phi$) 含量占 40.40%,二者合计所占比重 98.80%。由此可知,灌丛沙堆沉积物主要以跳跃组分和悬浮组分为主。

概率累积曲线的斜率可以反映特定粒度组分样品的分选性。图 3 中显示,滚动组分的斜率为 1.38,

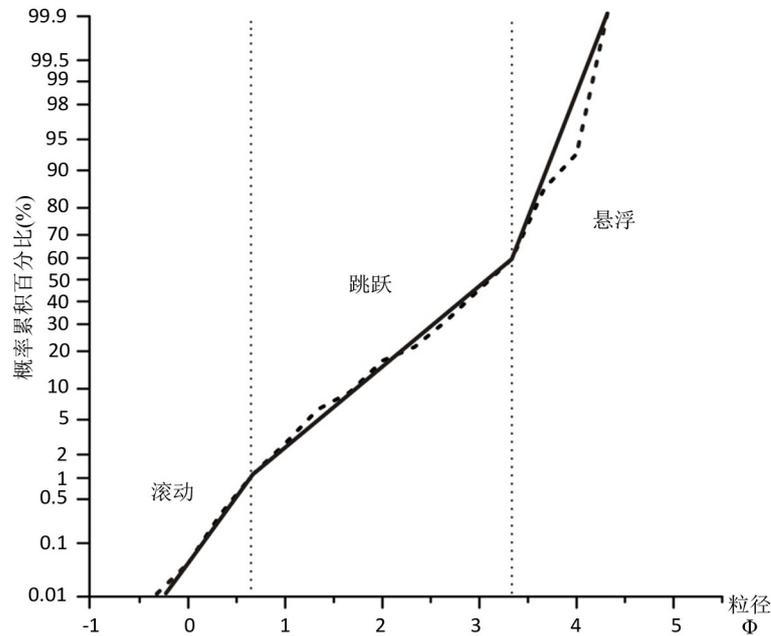


Figure 3. The grain size probability cumulative curves of the nebkhas in the Kumtagh desert

图 3. 库姆塔格灌丛沙堆沉积物粒度概率累积曲线

跳跃组分的斜率为 0.81，悬浮组分的斜率为 2.70。据此说明悬浮组分的分选性最好，即灌丛沙堆中细沙(2~3 Φ)和极细沙(3~4 Φ)的分选性较其他粒级组分好。粒度概率累积曲线表现出的这种特征，与研究区风力[22] [29]适中有关，即在中风能环境下以跃移搬运和悬移搬运方式为主。

3.3. 灰色关联度分析

灰色关联度分析是一种量化的比较分析方法，适用于处理多因素非典型数据[26]。将研究区内各样点的粒度组成与参数特征同灌丛沙堆各粒度组成与参数特征作为相应的因子参数序列进行关联度分析。结合表 1 可知砾石组分和极粗沙组分在灌丛沙堆中所占比例很低，不宜做为参考因子与比较因子进行比较，因此予以剔除。将其余各样点粒度组成与参数数据作为关联因子，运用无量纲化方法进行规范标准化处理，将其规范为极差化数据并建立矩阵(表 2)。

表 2 中 X_0 至 X_6 依次为灌丛沙堆、灌丛丘间地、雅丹体中埋藏古风成砂、西部流动沙丘、西部丘间地、东部丘间地和东南部丘间地。其中 X_0 为参考数列， X_i 为比较数列。根据所得数据将参考数列 X_0 与各比较数列 X_i 进行求差序列，并结合公式(1)求出关联系数(表 3)，而后按公式(2)计算求出其关联度。

$$\xi_{ij}(K) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{\Delta |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (1)$$

式中， ρ 为分辨系数，一般取 $\rho = 0.5$ 。

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (2)$$

由关联系数经运算可得各样点对灌丛沙堆的关联度，即各样点对于灌丛沙堆的等权关联度。由于各影响因子对于整体贡献各不相同，为客观评价各样点同灌丛沙堆的相关性，需运用加权关联度。为此，将各因子根据不同的重要性赋予权重 W_k ，依据公式(3)运算得到加权关联度。

Table 2. Dimensionless data of correlative factors**表 2.** 关联因子的无量纲化值

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_0	0.07	0.03	0.56	1.00	0.97	1.00	0.00	0.00	1.00
X_1	0.62	0.32	0.13	0.26	0.51	0.08	0.65	0.71	0.09
X_2	0.30	0.27	0.59	0.44	1.00	0.62	0.32	0.18	0.74
X_3	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.36	0.83	0.07	0.31
X_4	0.51	0.03	0.54	0.63	0.26	0.17	1.00	0.16	0.18
X_5	1.00	0.16	0.00	0.29	0.35	0.00	0.63	1.00	0.00
X_9	0.62	0.00	0.21	0.46	0.45	0.18	0.75	0.50	0.03

Table 3. Grey correlative coefficients of the different sample points**表 3.** 各样点灰色关联系数

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ζ_1	0.48	0.63	0.53	0.40	0.52	0.35	0.43	0.41	0.35
ζ_2	0.69	0.68	0.96	0.47	0.94	0.57	0.61	0.74	0.66
ζ_3	0.88	0.34	0.53	0.33	0.34	0.44	0.38	0.88	0.42
ζ_4	0.53	1.00	0.96	0.57	0.41	0.38	0.33	0.76	0.38
ζ_5	0.35	0.79	0.47	0.41	0.45	0.33	0.44	0.33	0.33
ζ_6	0.48	0.94	0.59	0.48	0.49	0.38	0.40	0.50	0.34
权重(WK)	0.12	0.15	0.14	0.09	0.11	0.09	0.09	0.13	0.09

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^n WK \times \zeta_i(k) \quad (3)$$

运算结果为： $\gamma_1 = 0.47$ ， $\gamma_2 = 0.73$ ， $\gamma_3 = 0.52$ ， $\gamma_4 = 0.63$ ， $\gamma_5 = 0.45$ ， $\gamma_6 = 0.54$ ， $\gamma_2 > \gamma_4 > \gamma_6 > \gamma_3 > \gamma_1 > \gamma_5$ ，即各样点与灌丛沙堆的关联度大小依次为雅丹体中埋藏古风成砂>西部丘间地>东南部丘间地>西部流动沙丘>灌丛丘间地>东部丘间地。不难看出，雅丹体中埋藏古风成砂与灌丛沙堆关联度最高，其次为西部丘间地和东南部丘间地，这与粒度分析所体现出来的相似性较为一致。据此，说明雅丹体中埋藏古风成砂、西部丘间地及东南部丘间地沉积物都可能是灌丛沙堆的物质来源。

4. 讨论

灌丛沙堆发育的影响因素主要有沙源、风况、植被，其中灌丛植被为灌丛沙堆形成的首要条件。地处极端干环境条件下的库姆塔格沙漠也不例外，灌丛沙堆的形成首先与其表面覆盖泡泡刺(*Nitraria schoberi*)植物且盖度较大有关。灌丛植物的生长增加了沙堆表面的粗糙度，有利于拦截通过风力运移的细颗粒物，并使其沉积于灌丛沙堆表面。Leenders J K 等[27]在萨赫勒地区通过野外观测灌丛对风沙拦截的研究结果证实了这种现象，李志忠等[28]对灌丛沙堆风洞模拟实验的结果也与之类似。王训明等[12]的研究认为较低的风能环境有利于灌丛沙堆的发育，对库姆塔格沙漠进行野外风沙活动观测结果显示[22][29]，风况特征是决定风沙地貌的动力因子，研究区属中风能环境，风向变率为中等变率，促使灌丛沙堆分布区丘间地及其周围地表沙物质颗粒在中等风力条件下通过跃移和悬移运移方式堆积发育灌丛沙堆。

荒漠半荒漠地区能否发育为灌丛沙堆其沙源是关键因素之一，且灌丛沙堆沙物质来源多为短距离风

力搬运产物[5]。因此,对灌丛沙堆邻近各样点进行了粒度分析,并在进一步对粒度组分及参数特征分析的基础上,得出灌丛沙堆沙物质组成与西部丘间地、东南部丘间地的沙物质颗粒组成上具有相似性,其粒度参数特征与雅丹体中埋藏古风成砂有相似性。这似乎暗示了灌丛沙堆沙物质除部分来源于其周围丘间地外,仍有部分来源于雅丹体中埋藏古风成砂。有学者对新疆策勒绿洲沙漠过渡带、南非 *Molopo* 盆地和非洲博茨瓦纳地区灌丛沙堆的研究表明[30],灌丛沙堆的沙物质来源以周围丘间地为主。由于库姆塔格沙漠以流动沙丘为主,丘间地的细颗粒物经长期吹蚀在表层残留厚度极薄(3~8 mm 不等)的中粗沙粒级的粗颗粒,并覆盖下层的细沙和极细砂物质免遭进一步吹蚀起到保护作用,这种“保护作用”也称之为“保护理论”在董治宝、钱广强等[22]的研究中予以证实。但应用灰色关联相关性分析表明,在加权灰色关联度中与灌丛沙堆关联度最高的为雅丹体中埋藏古风成砂,不难理解,这是由于灌丛沙丘所处的上风向有崩塌垮落的破碎雅丹体,使得埋藏古风成砂出露被吹蚀运移至灌丛阻拦沉降原因所致。显然,库姆塔格沙漠发育的灌丛沙堆,沙物质来源主要是其周围丘间地及雅丹体中的埋藏古风成砂。

5. 结论

通过对库姆塔格沙漠灌丛沙堆及其丘间地沉积物和雅丹体中埋藏古风成砂粒度组成与参数特征的比较,并运用灰色关联度进行定量分析研究,对灌丛沙堆的可能物质来源获得以下认识:

1) 库姆塔格沙漠灌丛沙堆的优势粒级为极细沙,平均粒径为 2.92ϕ ,分选性中等,偏度为负偏,峰态为中等峰态;西部丘间地和东南部丘间地在粒度组成上同灌丛沙堆有相似性;雅丹体中埋藏古风成砂的粒度参数与灌丛沙堆也有一定的相似性。这反映出灌丛沙堆的沙物质来源除丘间地沙物质外,雅丹体中埋藏古风成砂也是沙源之一。

2) 库姆塔格沙漠灌丛沙堆周围丘间地、流动沙丘和雅丹体各采样点同灌丛沙堆的加权灰色关联度大小依次为雅丹体中埋藏古风成砂 > 西部丘间地 > 东南部丘间地 > 西部流动沙丘 > 灌丛丘间地 > 东部丘间地,表明丘间地沙物质、流动沙丘及其雅丹体中埋藏古风成砂都可能是灌丛沙堆的物质来源。

3) 灌丛沙堆的物质来源是影响其发育的因素之一,雅丹体中埋藏古风成砂与灌丛沙堆的相关性较大,表明埋藏古风成砂是灌丛沙堆的物源之一,这是特定环境所造成的,即与上风向崩塌垮落的破碎雅丹体出露埋藏古风成砂被吹蚀运移至灌丛阻拦沉降有关。

基金项目

国家自然科学基金项目(编号:41271030);国家科技基础性工作专项(编号:2012FY111700)资助。

参考文献

- [1] Nickling, W.G. and Wolfe, S.A. (1994) The Morphology and Origin of Nabkhas, Region of Mopti, Mali, West Africa. *Journal of Arid Environments*, **28**, 13-30. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(05\)80017-5](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80017-5)
- [2] 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义[J]. 干旱区研究, 1994, 11(1): 34-41.
- [3] Tengberg, A. and Chen, D. (1998) A Comparative Analysis of Nebkhas in Central Tunisia and Northern Burkina Faso. *Geomorphology*, **22**, 181-192.
- [4] 夏训诚, 赵元杰, 王富葆, 等. 罗布泊地区红柳沙包年层的环境意义探讨[J]. 科学通报, 2005, 50(19): 2176-2177.
- [5] 张萍, 哈斯, 岳兴玲, 等. 白刺灌丛沙堆形态与沉积特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 926-932.
- [6] 韩磊, 张媛媛, 马成仓, 等. 狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)灌丛沙堆形态发育特征及固沙能力[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1305-1309.
- [7] 陈东, 张宇清, 吴斌, 等. 毛乌素沙地南缘油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛沙堆形态特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 565-572.
- [8] 彭飞, 王涛, 刘立超, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 593-599.

- [9] Dougill, A.J. and Thomas, A.D. (2002) Nebkha Dunes in the Molopo Basin, South Africa and Botswana: Formation Controls and Their Validity as Indicators of Soil Degradation. *Journal of Arid Environments*, **50**, 413-428. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0909>
- [10] 李晋昌, 高婧, 苏志珠, 等. 毛乌素沙地西南缘灌丛沙丘沉积物的粒度和元素特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 1-8.
- [11] 刘金伟, 李志忠, 武胜利, 等. 新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 628-635.
- [12] Wang, X., Wang, T., Dong, Z., et al. (2006) Nebkha Development and Its Significance to Wind Erosion and Land Degradation in Semi-Arid Northern China. *Journal of Arid Environments*, **65**, 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.06.030>
- [13] 杨婷婷, 姚国征, 王满才, 等. 乌兰布和沙漠天然灌丛防风阻沙效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008(1): 194-197.
- [14] 梁爱民, 马杰, 张瑾, 等. 民勤荒漠 - 绿洲过渡带不同沙障的阻沙粒度分析[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2016, 15(01): 87-92.
- [15] 唐艳, 刘连友, 哈斯, 等. 毛乌素沙地南缘 3 种灌草丛形态与阻沙能力的对比研究[J]. 水土保持研究, 2008(2): 44-48.
- [16] Hesp, P. and McLachlan, A. (2000) Morphology, Dynamics, Ecology and Fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* Nabkha Dunes. *Journal of Arid Environments*, **44**, 155-172. <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0590>
- [17] Nield, J.M. and Baas, A.C.W. (2008) The Influence of Different Environmental and Climatic Conditions on Vegetated Aeolian Dune Landscape Development and Response. *Global and Planetary Change*, **64**, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.10.002>
- [18] 武胜利, 李志忠. 灌丛沙堆的研究进展与意义[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 734-738.
- [19] 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠的形成时代及发展过程[J]. 干旱区地理, 1994, 17(3): 1-9.
- [20] 董治宝, 屈建军, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 805-814.
- [21] 张锦春, 刘长仲, 姚拓, 等. 库姆塔格柽柳沙包年层粒度特征及其沉积环境探讨[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1155-1162.
- [22] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 129-164.
- [23] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 1-230.
- [24] Blott, S.J. and Pye, K. (2001) Gradistat: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments. *Earth Surface Processes & Landforms*, **26**, 1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- [25] 安福元, 马海州, 樊启顺, 等. 粒度在沉积物物源判别中的运用[J]. 盐湖研究, 2012(1): 49-56.
- [26] 高贵生, 宋理明, 马宗泰. 青海省降尘量时空分布及其影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1124-1130.
- [27] Leenders, J.K., Boxel, J.H.V. and Sterk, G. (2010) The Effect of Single Vegetation Elements on Wind Speed and Sediment Transport in the Sahelian Zone of Burkina Faso. *Earth Surface Processes & Landforms*, **32**, 1454-1474. <https://doi.org/10.1002/esp.1452>
- [28] 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(1): 15-19.
- [29] 张正偲, 董治宝, 赵爱国, 钱广强. 库姆塔格沙漠风沙活动特征[J]. 干旱区地理, 2010(6): 939-946.
- [30] 孙涛, 唐进年, 韩福贵, 等. 旱区荒漠灌丛沙堆研究进展及展望[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 351-356.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org