DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.022
李思瑶，蒙仲举，祁帅. 草原干涸湖床地表粒度特征及其对沙尘释放的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):38-46.
LI Siyao, MENG Zhongju, QI Shuai. Surface particle size characteristics of dry lake beds in grasslands and their effects on dust release[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):38-46.

草原干涸湖床地表粒度特征及其对沙尘释放的影响

李思瑶[1]，蒙仲举[1]，祁 帅[2]
(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;2.内蒙古财经大学旅游学院,呼和浩特 010018)

摘　要:[目的] 为探究干涸湖盆典型地表风蚀过程及盐碱尘暴形成的机理。**[方法]** 以锡林郭勒盟阿巴嘎旗查干淖尔干涸盐湖为研究对象,从湖心到湖岸根据盐湖地表的动态演化过程选择 4 种典型地表(结皮地表、破碎地表、活化地表和沙化地表),分析从湖心到湖岸近地表土壤粒度分布特征、风速廓线及输沙规律等。**[结果]** (1)从湖心向湖岸延伸,地表 0—2 cm 沉积物颗粒粒配整体呈逐渐变粗的趋势,且以黏粒和粉粒为主;(2)干涸盐湖从湖心到湖岸风速整体呈降低趋势,不同地表的风速廓线基本符合 Karman 的速度对数分布规律,且拟合效果较好($R^2>0.90$);(3)破碎地表的输沙量最大,约为结皮地表的 50 倍,且由于有限沙尘供应,导致结皮地表的输沙率随高度变化呈现线性规律($R^2=0.80$),其他 3 种地表的输沙率随高度变化呈现指数函数形式($R^2>0.97$);(4)在近地表 0～50 cm 高度内,风沙流中携带的沙粒平均粒径为 2～8 μm,属于粉粒,分选性较差,偏度以负偏为主,峰态以中等和尖窄为主。**[结论]** 整体来看,破碎地表上的风蚀作用最强,结皮地表上的风蚀作用最弱。可通过提高沙粒的临界启动风速阈值和下垫面的覆盖度等方式减弱该地区的风蚀作用。

关键词: 查干淖尔湖;干涸湖盆;粒度参数;风沙流
中图分类号:P931.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)02-0038-09

Surface Particle Size Characteristics of Dry Lake Beds in Grasslands and Their Effects on Dust Release

LI Siyao[1], MENG Zhongju[1], QI Shuai[2]
(1.*College of Desert Control Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*;
2. *College of Tourism*, *Inner Mongolia University of Finance and Economics*, *Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: [**Objective**] In order to explore the typical surface wind erosion process of the dry lake basin and the mechanism of the formation of saline-alkali dust storm. [**Methods**] Taking the Chagannaoer dry salt lake in Abaga Banner of Xilin Gol League as the research object, four different surface types (crust surface, broken surface, activated surface and desertification surface) were selected according to the dynamic evolution process of salt lake surface from the lake center to the lake shore. The characteristics of soil particle size distribution, wind speed profile and sediment transport law near the surface from the lake center to the lake shore were analyzed. [**Results**] (1) Extending from the center of the lake to the shore of the lake, the grain size of 0—2 cm sediment on the surface showed a trend of gradually thickening, and the clay and silt were the main particles. (2) The wind speed from the center of the dry salt lake to the shore of the lake showed a decreasing trend. Wind speed profiles of different surfaces generally followed the logarithmic distribution of Karman's velocity, and the fitting effect was good ($R^2>0.90$). (3) The amount of sediment transport on the broken surface was the highest, which was about 50 times that of the crust surface, and the sediment transport rate on the crust surface showed a linear law with the change of height due to limited dust supply ($R^2=0.80$), and the sediment transport rate on the other three surfaces showed an exponential function with

收稿日期:2023-08-17　　**修回日期:**2023-10-09　　**录用日期:**2023-11-15　　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-01-29
资助项目:国家自然科学基金项目(42067015)
第一作者:李思瑶(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 1109405178@qq.com
通信作者:蒙仲举(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: mengzhongju@126.com

the change of height (R^2>0.97). (4) Near the surface at a height of 0 to 50 cm, the average particle size of sand particles carried in the wind-sand flow ranges from 2 to 8 μm, which falled under the category of silt, with poor sorting. Skewness was predominantly negative, while kurtosis was mainly medium and sharp. [**Conclusion**] On the whole, the wind erosion effect on the broken surface was the strongest, and the wind erosion effect on the crust surface was the weakest. The wind erosion effect in this area can be weakened by increasing the critical starting wind speed threshold of sand particles and the coverage of underlying surface.

Keywords: Chagannaoer Lake; dry lake basin; granularity parameters; wind-sand flow

Received: 2023-08-17　　**Revised**: 2023-10-19　　**Accepted**: 2023-11-15　　**Online**(www.cnki.net): 2024-01-29

湖泊是湿地的重要组成部分，也是人类主要的生存环境之一，不仅能够储存丰富的水资源，还对维持生态环境的多样性起着至关重要的作用。近年来，由于全球气候变化和人类经济活动的干扰，干旱半干旱区许多湖泊日渐萎缩形成盐漠景观，在大风的作用下可能形成盐碱尘暴。与普通沙尘暴相比，盐暴含有大量的细颗粒盐碱物质及有害重金属元素[1-2]，影响土壤质量和植被生长的同时[3]，对人类的生存和发展带来一定的威胁。有研究[1]表明，地表粉尘释放对全部大气气溶胶的贡献率约占 20%～50%，这些粉尘能在大气中悬浮很长一段时间，直接改变地气系统的辐射收支平衡，进而对全球气候产生影响[4-5]。干涸湖底作为一种新的风蚀尘源[6-8]，具有较高的潜在释尘风险[9]，已成为国内外学者的研究热点[10]。

中国西北地区是中重度沙尘高频区[11]，主要沙尘源有冲积扇、干湖及河床[12]，不同季节干涸湖床粉尘扩散的范围和密度不同，集中在春冬两季[13]。查干淖尔湖作为内蒙古四大淡水湖之一，处于干旱与半干旱气候过渡带[14]，降水稀少、蒸发强烈，冬春季节大面积裸露湖床表层土壤受冻融循环作用质地变得疏松，强烈的风蚀致使干涸盐湖发生盐渍荒漠化，成为潜在盐尘源区，给京津冀地区大气质量安全带来极大威胁。目前对于风蚀的研究主要集中在沙漠[15]、戈壁[16]、农田等荒漠化较严重的区域，对于草原干涸湖泊地表风蚀的研究相对较少。盐结皮的破碎程度直接影响其抗风蚀能力和释尘情况。通常情况下，湖心区域拥有较完整的盐结皮，其致密的结构能够有效减少盐尘的释放量。而靠近湖岸的地区，由于受到动态湖面变化、水位波动和人类活动的影响，盐结皮破碎程度增加，地表裸露面积增大，风力将盐尘携带和释放到大气中，导致盐尘问题加剧。基于此，本文以锡林郭勒盟查干淖尔盐湖为研究对象，根据盐湖地表的动态演化过程，从湖心到湖岸依次选取 4 种不同破碎程度的典型地表(结皮地表、破碎地表、活化地表和沙化地表)，分析不同地表类型土壤粒度组成及风沙流结构特征，以期为草原干涸湖泊风蚀防治提供理论依据。

1　研究区概况

研究区位于内蒙古锡林郭勒盟阿巴嘎旗查干淖尔镇境内的查干淖尔湖，是典型的内陆封闭湖盆。该地区处于东亚季风区的边缘地带，冬季受蒙古高压控制，气候干燥寒冷，寒潮与大风天气较多，年平均风速 3.4 m/s。年平均降水量仅为 260 mm，年平均蒸发量却高达 1 970 mm，受季风气候的影响，降雨多集中在夏季，年内分配不均匀。查干淖尔湖的水源补给方式主要为河流补给，天然沙堤把整个湖泊分为东湖、西湖 2 个部分。随着全球气候变暖的加剧，湖泊的蒸发量远大于河流的补给量，使得湖泊出现大面积干涸，到 2010 年，西湖的水体面积已所剩无几，成为裸露的干涸盐湖湖盆，在春季大风的强烈吹蚀下，地表被严重剥蚀，可能导致盐碱尘暴的发生，给当地生态环境和人民生产生活带来严重危害[17-19]。

2　数据源与研究方法

2.1　样品采集

2.1.1　土壤样品采集　于 2021 年 3 月 25 日至 5 月 1 日进行地表风沙活动观测，观测前对不同地表各样点进行取样，取样深度为 0—2 cm，取样选择前后无大的降雨。每个采样点选择 3 个取样点，详细记录采样点是否存在结皮、结皮裂缝、颜色、土壤质地等信息(表 1)。将采集的土壤样品带回实验室内进行预处理。

2.1.2　风沙观测仪器架设与数据采集　选择 5 次强风事件对各地表的输沙与风速进行同步观测采集。采用小型 HOBO－U30 气象站配套风杯及风向标对 4 种典型地表 5 个高度(10，30，50，100，200 cm)的风速进行监测，观测间隔时间 2 min，同时设置阶梯式集沙仪连续观测各个地表的输沙情况，每次观测时长为 60 min，集沙仪高 50 cm，由 25 层同样大小的方形钢管由下而上排列组成(集沙口规格 2 cm×2 cm)，钢管后接尼龙集沙袋用以收集风蚀颗粒。

表1 采样点地表特征

Table 1 Surface characteristics of sampling points

采样地点	类型	地表特征
Site A	结皮地表	该采样点位于湖心处，地表拥有较完整的硬质盐壳结皮，结皮厚度大约2 cm，含水率为19%
Site B	破碎地表	该采样点紧接湖心的外围，地表盐结皮破碎严重，与下层砂粒和盐粒掺杂在一起，形成片状斑盐，含水率为7%
Site C	活化地表	该采样点靠近湖岸，地表处于完全活化状态，几乎没有盐壳结皮，覆盖有松散的颗粒物，含水率为6%
Site D	沙化地表	该采样点位于湖岸处，地表处于完全活化状态，几乎没有盐壳结皮，覆盖有松散的颗粒物，但质地较采样点C粗糙，含水率为4%

2.2 粒度分析方法

称取各采样点样品50 g(去除>4 mm的砾石)进行筛分。对<0.063 mm的沉积物采用Mastersizer 3000激光粒度仪进行测定，每个土壤样品重复测量3次，其测量粒径范围为0.02～2 000 μm，保证重复测量误差<2%，测量完成后，按照美国制土壤分级标准对测量结果进行分级。粒度试验在内蒙古农业大学沙漠治理学院风沙物理重点开放性实验室完成。

根据福克－沃德公式和定义用GRADISTAT粒度分析软件得到各粒度参数，使用美国(US－DA)标准划分为砾石(>2 000 μm)、极粗砂(1 000～2 000 μm)、粗砂(500～1 000 μm)、中砂(250～500 μm)、细砂(100～250 μm)、极细砂(50～100 μm)、粉粒(2～50 μm)和黏粒(<2 μm)。采用Excel 2019软件对数据进行整理，由SPSS 27.0软件对数据进行单因素方差分析和LSD多重检验，由Origin 2022软件绘图。

2.3 风沙流结构分析

从HOBO数据采集器中导出风速数据，根据测定的不同高度风速分别计算：(临界)摩阻速度、空气动力学粗糙度和风速廓线，以定量表现不同下垫面的风速特征。为了获得空气动力学粗糙度的精确值，用高度取自然对数值为纵轴，风速值为横轴，利用最小二乘法对风速廓线数据进行相关分析得到回归模拟方程为：

$$U_Z = a + b\ln Z \tag{1}$$

得到空气动力学粗糙度公式：

$$Z_0 = \exp(-\frac{a}{b}) \tag{2}$$

摩阻速度公式：

$$U^* = Kb \tag{3}$$

式中：a、b为拟合系数；Z_0为近地表空气动力学粗糙度(m)；U^*为摩阻风速(m/s)；K为卡曼常数，值为0.4。

风速廓线定义为近地表自然风速在垂直方向上的分布特性，即风速廓线符合对数规律或幂指数规律。

$$U_Z = (\frac{U^*}{K})\ln(\frac{Z}{Z_0}) \tag{4}$$

式中：U_Z为距地面高度Z处的平均风速(m/s)；U^*为摩阻风速(m/s)；K为卡曼常数，值为0.4；Z为风速廓线上的某点距地面垂直高度(m)；Z_0为近地表空气动力学粗糙度(m)。

本研究输沙率采用的单位为g/(cm^2·min)。利用集沙仪收集到4种不同地表0～50 cm高度内沙样，对0～50 cm高度范围内的输沙率与高度进行函数拟合，构建输沙率与高度函数关系，统计分析其输沙率随高度的变化特征。拟合公式分别为：

线性模型 $$Q = aH + b \tag{5}$$

指数模型 $$Q = a\mathrm{e}^{-bH} \tag{6}$$

对数模型 $$Q = -a\ln H + b \tag{7}$$

幂函数模型 $$Q = aH^{-b} \tag{8}$$

式中：Q为某一高度层输沙率[g/(cm^2·min)]；H为高度(cm)；a、b为风沙流通量系数。

3 结果与分析

3.1 地表土壤粒度特征

土壤粒度组成是土壤风蚀的重要参数[18-19]。由表2可知，研究区4种典型地表的土壤粒度组成存在显著的差异性。结皮地表、破碎地表土壤颗粒以黏粒和粉粒为主，分别为31.74%，60.50%和32.53%，57.53%，并伴有不同粒径的砂粒；活化地表的粉粒含量较多，达69.33%，无砂粒分布；沙化地表的土壤颗粒黏粒、粉粒、砂粒均存在不同程度的分布，其中，以砂粒为主，为45.32%，粗砂含量占比较大，占总体砂粒含量的16.86%。

表2 地表土壤的粒度组成特征

Table 2 Characteristics of particle size composition of surface soil %

采样地点	黏粒	粉粒	砂粒				
			极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
Site A	31.74±5.33	60.50±6.14	—	3.52±2.38	4.20±1.90	0.04±0.08	—
Site B	32.53±1.83	57.53±10.01	0.44±0.47	3.17±2.08	6.34±5.67	—	—
Site C	30.67±5.32	69.33±5.32	—	—	—	—	—
Site D	22.89±3.75	31.60±0.32	0.26±0.44	1.88±2.25	5.50±5.30	17.20±5.50	20.48±10.07

注：表中数据为平均值±标准差；Site A为结皮地表；Site B为破碎地表；Site C为活化地表；Site D为沙化地表。下同。

土壤粒度分布频率曲线中波峰的数量和位置能够直观地反映土壤颗粒物大小的分布情况，揭示沉积物的来源。通过对研究区典型地表不同沉积物表层(0—2 cm)的土壤粒度分布频率曲线(图 1a)分析得出，不同地表沉积物表层土壤的粒径分布存在不同程度的差异，从湖心到湖岸各地表沉积物颗粒粒径整体上呈逐渐变粗的趋势。

结皮地表和破碎地表的粒度分布曲线均呈三峰分布且变化趋势相似，主峰显著高于次峰，分布范围为 1～7 μm，表明沉积物来源复杂，推测可能来自湖岸的土壤侵蚀、降水径流、河流输入等，且由于湖心区域的水动力条件较弱，对沉积物的搬运有限，沉积物表现为以细颗粒为主。活化地表的粒度分布曲线呈双峰型，主峰略高，峰值出现 3 μm 附近，次峰出现在 20 μm 附近，峰值粒径均为粉粒级，但沉积物颗粒有粗化趋势。沙化地表的粒度分布曲线呈多峰分布，主峰尖窄，峰值在 700～1 600 μm，粒径以极粗砂为主，其含量达 34%，表明其沉积过程不稳定，可能是湖岸区域受到湖泊水动力条件和人类活动干扰等因素的影响较大。

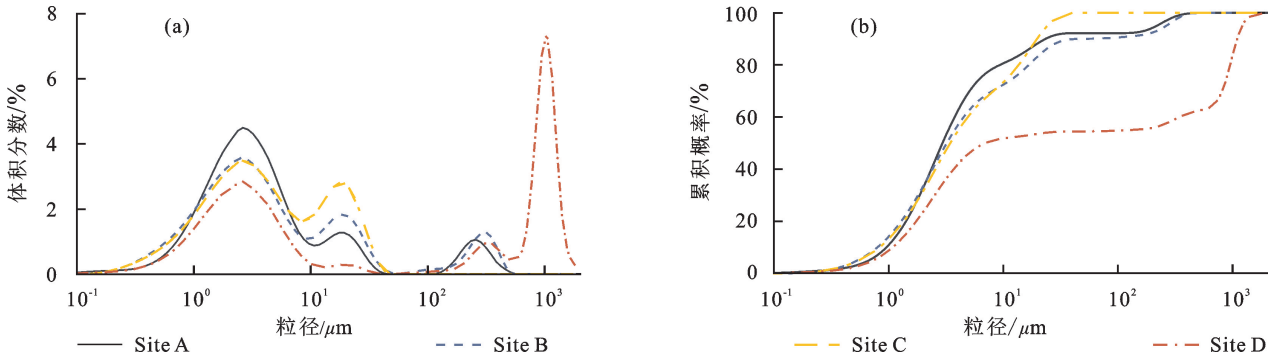

图 1　地表土壤的粒度分布曲线特征

Fig. 1　Characteristics of particle size distribution curve of surface soil

通过对研究区典型地表不同沉积物表层(0—2 cm)的土壤粒度累积频率曲线(图 1b)分析得出，结皮地表的土壤粒度分布最均匀，分选性最好，颗粒主要由<30 μm 的粉黏粒组成，破碎地表、活化地表盐土颗粒的均匀度和分选性次之，以<35 μm 的粉黏粒为主。

沙化地表的土壤颗粒在<10 μm 和>500 μm 的范围内累积曲线快速增长，在 10～500 μm 范围内几乎平坦，说明颗粒主要集中在<10 μm 和>500 μm 范围内且分布较均匀。

3.2　不同地表的风速廓线特征

在盐湖干涸湖床的不同地表，利用小型气象站测量不同高度的平均风速数据并绘制各自的风速廓线，结果见图 2。

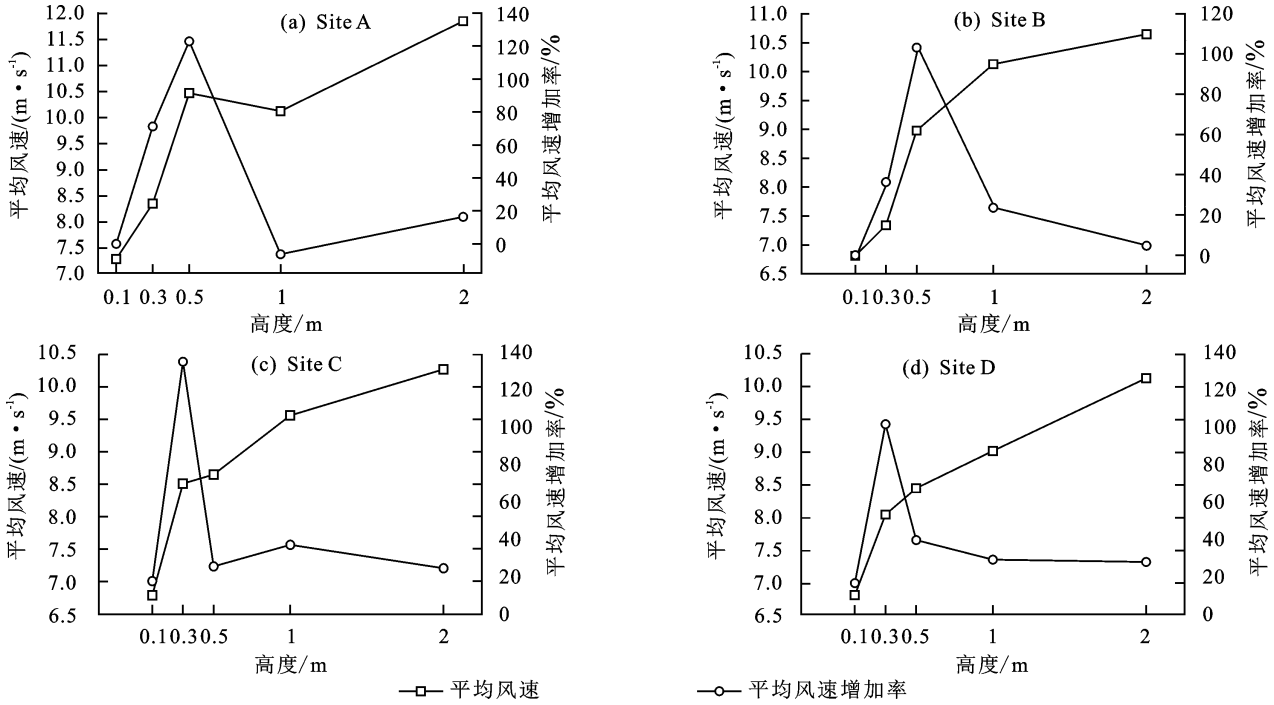

图 2　不同地表的风速廓线特征

Fig. 2　Characteristics of wind speed profiles over different surface

4 种典型地表的平均风速随高度的变化整体呈上升的趋势。其中,在近地表 10 cm 高度内,结皮地表的平均风速略大,约为 7.3 m/s。说明湖心位置地表的盐结皮较为完整而平坦,致密且厚实,近地面风通过此处所受的摩擦力较小,紊流运动减弱,气流能量损耗较少。在 10～30 cm 的高度内,随着高度的增加,4 种典型地表的平均风速有着不同程度的增大。其中活化地表增幅最大,平均风速在 30 cm 处达到 8.5 m/s。在近地表 30～50 cm 高度内,结皮地表风速急速上升,在 50 cm 处风速高达 10.6 m/s,远超其他地表的风速。在 50～200 cm 高度内,4 种典型地表的风速呈缓慢上升的趋势。结皮地表的平均风速显著高于其他地表,在 200 cm 处约为 12 m/s。推测结皮地表在 50～100 cm 高度内风速下降可能是其特殊地形对风速场的扰动和大气层结稳定性的变异等多种因素作用的结果。

按照普朗特—冯·卡曼(L.Prandtl－Von Karman)的速度对数分布规律,将各采样点所测的平均风速 U_x(m/s)与对数尺度的高度 ln Z(m)进行线性拟合,通过拟合系数 a 和 b(a、b 分别为截距和斜率)可以计算出各地表摩阻速度(U^*)和空气动力学粗糙度(Z_0)(表 3)。

根据拟合结果可以看出,由于结皮地表的风速廓线受多种因素影响,拟合效果与其他地表相比较差,R^2=0.90,活化地表和沙化地表的高度对数尺度风速拟合效果较好,R^2值均为 0.98。

表 3 不同地表的风速廓线拟合方程、摩阻速度及空气动力学粗糙度

Table 3 Wind speed profile fitting equation, friction velocity and aero－dynamic roughness of different surface

采样地点	拟合系数 a	拟合系数 b	拟合方程	R^2	摩阻速度(U^*)/(m·s^{-1})	空气动力学粗糙度(Z_0)/m
Site A	10.802 6	1.560 8	u=1.560 8ln Z+10.802 6	0.900 9	0.624 3	0.001 0
Site B	9.774 5	1.417 8	u=1.417 8ln Z+9.774 5	0.929 6	0.567 1	0.001 0
Site C	9.550 0	1.134 3	u=1.134 3ln Z+9.550 0	0.979 1	0.453 7	0.000 2
Site D	9.401 2	1.136 0	u=1.136 4ln Z+9.401 2	0.985 9	0.454 4	0.000 3

在物理学中,摩阻速度(U^*)反映微粒所受空气动力的大小。摩阻速度越大,气流作用于地表使颗粒启动的难度越大。空气动力学粗糙度(Z_0)指地表风速为零时的高度。一般来说,地表粗糙度越大,近地表受到风力的作用越小,其抵抗风蚀的能力越强。由表 3 可知,结皮地表、破碎地表的摩阻速度和粗糙度均显著高于活化地表和沙化地表,说明完整结皮对气流的阻力较大,能够显著提高地表抵抗风蚀能力。

3.3 不同地表的输沙特征

对比 0～50 cm 高度内干涸湖床不同地表的单位面积输沙量发现,结皮地表收集到的风蚀物显著少于其他地表,表明盐湖干涸形成完整的盐结皮,提高土壤的抗风蚀能力,团结成整体的土壤具有更小的风蚀可蚀性(图 3)。

破碎结皮地表、活化地表和沙化地表累积输沙量主要集中在 0～20 cm 高度,分别占总输沙量的 94.08%,87.92%,97.75%,表明各地表风沙流活动主要集中在近地表层。破碎结皮地表在 0～50 cm 高度内的累积输沙量显著高于活化地表和沙化地表,表明破碎结皮地表由于水分减少,蒸发作用强烈,形成丰富的破碎成松散的非团聚土层,为风沙活动创造更多的易蚀颗粒,具有较高的风蚀可蚀性,是查干淖尔盐湖的主要沙尘源。

为了进一步分析湖底不同地表的风沙流结构特征,将湖底不同地表的输沙率与高度进行函数拟合(表 4)。在地表 0～50 cm 高度内,结皮地表输沙率随高度的变化呈线性函数关系,破碎结皮地表、活化地表和沙化地表与高度的拟合函数关系呈指数函数,拟合相关度较好,均在 0.95 以上。因此,指数函数能够反映绝大部分近地表沙颗粒物的运动状况。

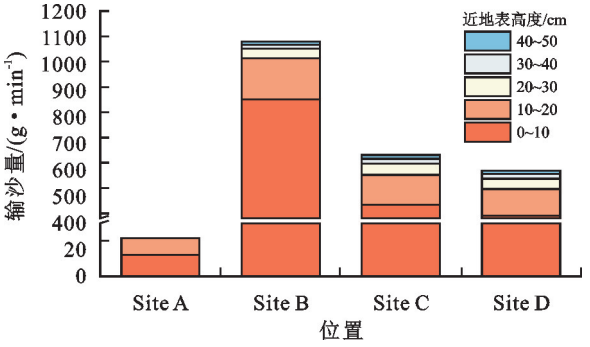

图 3 不同地表的单位面积输沙量

Fig. 3 Sediment transport per unit area on different surface

表 4 不同地表输沙率与高度的拟合方程

Table 4 Fitting equations for sediment transport rates and heights on different surface

采样地点	拟合方程	R^2
Site A	$y_A=-0.141\ 0x+0.692\ 8$	0.795 3
Site B	$y_B=91.613\ 6e^{-0.145\ 0x}-0.118\ 1$	0.977 4
Site C	$y_C=42.770\ 6e^{-0.129\ 4x}+0.499\ 0$	0.996 1
Site D	$y_D=46.500\ 0e^{-0.171\ 1x}+1.142\ 8$	0.986 5

3.4　风蚀物粒度特征

对比 0～50 cm 高度内干涸湖床不同地表的单位面积输沙量发现，结皮地表收集到的风蚀物显著少于其他地表，表明盐湖干涸形成完整的盐结皮，提高土壤的抗风蚀能力，团结成整体的土壤具有更小的风蚀可蚀性。破碎结皮地表、活化地表和沙化地表累积输沙量主要集中在 0～20 cm 高度，分别占总输沙量的 94.08%，87.92%，97.75%，表明各地表风沙流活动主要集中在近地表层。破碎结皮地表在 0～50 cm 高度内的累积输沙量显著高于活化地表和沙化地表，表明破碎结皮地表由于水分减少，蒸发作用强烈，形成丰富的破碎成松散的非团聚土层，为风沙活动创造更多的易蚀颗粒，具有较高的风蚀可蚀性，是查干淖尔盐湖的主要沙尘源。

在一定风速条件下风沙流中沙粒粒度参数的空间变化特征见图 4。

由图 4 可知，结皮地表风沙流中所携带沙粒的平均粒径集中在 8～16 μm，破碎地表、活化地表和沙化地表风沙流中所携带沙粒的平均粒径大部分集中在 2～8 μm，均属于粉粒。4 种典型地表所携带风沙流中沙粒的分选系数均在 1.5～4.0，属于较差和很差。偏度主要集中在 −0.1～−0.6，属于负偏和极负偏，说明 4 种典型地表风沙流中所携带的沙颗粒物粒径均偏细。结皮地表的峰态值主要在 0.4～0.9，属于宽平峰态，说明沙颗粒物分布较复杂，没有占绝对优势的颗粒，其他 3 种地表的峰态值大部分集中在 0.9～1.3，表现为中等和尖窄峰态。

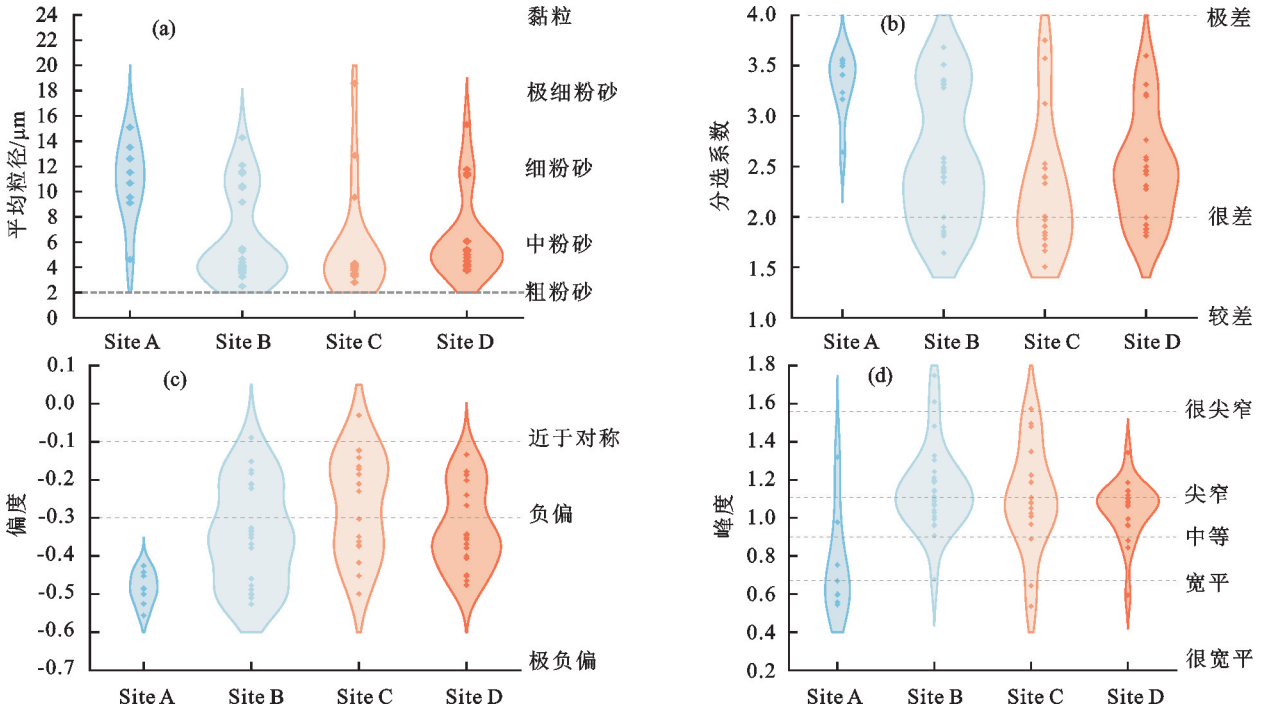

图 4　风蚀物的粒度参数特征

Fig. 4　Characteristics of particle size parameters of wind erosion materials

对不同地表风沙流中沙粒粒度参数进行相关性分析（表 5）可知，沙粒的平均粒径与分选系数呈显著正相关，与偏度、峰态呈负相关，即随着沙粒平均粒径的增大，分选系数变大，分选性变差，这与安福元等[20]的研究结果一致。偏度值随着平均粒径的增大而变小，表明粗颗粒物增多；峰度值随着平均粒径的增大而减小，表明沙粒粒径分布范围变得分散。分选系数与偏度、峰态之间均呈现负相关，表明分选系数越小，偏度值和峰度值越大，即沙粒的分选性越好，其粒径分布越偏细、越集中。

根据不同地表风沙流中沙粒的粒度参数相关关系，4 种典型地表风沙流中沙物质的平均粒径均与分选系数呈极显著正相关性（$p<0.01$）。结皮地表风沙流中沙粒的平均粒径与峰度值呈极显著负相关性（$p<0.01$），其分选系数与峰度值呈极显著负相关关系（$p<0.01$），破碎地表风沙流中沙粒的平均粒径与偏度值呈极显著负相关性（$p<0.01$），与峰度值呈显著负相关性（$p<0.05$），其分选系数与偏度值呈极显著负相关关系（$p<0.01$）。活化地表风沙流中沙粒的平均粒径与偏度、峰度均呈极显著负相关关系（$p<0.01$）。其分选系数与偏度值呈极显著负相关关系（$p<0.01$）。沙化地表风沙流中沙粒的平均粒径与偏度值呈极显著负相关性（$p<0.01$），其分选系数与偏度值呈极显著负相关关系（$p<0.01$）。

表5 风蚀物的粒度参数相关性矩阵

Table 5 Correlation matrix of particle size parameters of wind erosion materials

采样地点	项目	平均粒径	分选系数	偏度	峰度
Site A	平均粒径	1			
	分选系数	0.867**	1		
	偏度	−0.014**	−0.481	1	
	峰态	−0.913**	−0.887**	0.261	1
Site B	平均粒径	1			
	分选系数	0.944**	1		
	偏度	−0.836**	−0.966**	1	
	峰态	−0.492*	−0.253	0.064	1
Site C	平均粒径	1			
	分选系数	0.898**	1		
	偏度	−0.653**	−0.915**	1	
	峰态	−0.668**	−0.341	−0.011	1
Site D	平均粒径	1			
	分选系数	0.924**	1		
	偏度	−0.746**	−0.934**	1	
	峰态	−0.509*	−0.227	−0.045	1

注：*表示在0.05水平上相关性显著；**表示在0.01水平上相关性显著。

4 讨论

湖泊沉积物受所处湖盆位置、地下水埋深、蒸发强度和干涸时间等多种因素的影响，在沉降过程中表现出明显的分选现象。距离湖心越近，水流速度越小，较大和较密的颗粒优先沉积，而较小和较轻的颗粒则悬浮在水中较长时间。通过对干涸盐湖不同地表0～2 cm的沉积物进行土壤粒度分析发现，由湖心向湖岸延伸，砂粒含量逐渐增加，土壤颗粒逐渐粗化，符合湖泊沉积学原理[21-22]。

4种典型地表的平均风速随高度的上升整体呈现增大的趋势，这与陈京平等[23]的研究结果一致。对比发现，结皮地表在不同高度范围内的平均风速均最大，结皮地表所收集的风蚀物显著低于其他地表。这是由于结皮地表地势相对低洼平坦，地下水埋深较浅，地下水中所携带盐分沿毛细管的表聚作用更为突出，大气降水由周围地势较高的坡面汇聚在此，也携带更多的盐分在此积聚[24]。与此同时，平坦的微地形减少水力侵蚀对地表形态的破坏，地表形成的完整硬质盐壳结皮抗风蚀能力较强，只有通过多次碰撞击溅才有起尘的可能[25]。破碎地表的平均风速在30 cm高度内相对较低，这是因为破碎盐结皮形成地表的起伏结构，增大地表的粗糙度，从而阻碍风沙流正常运动，在风沙流通过时生成湍流和不均匀流场，影响低处风速的分布。在30～200 cm高度范围内受地表粗糙度影响较小，风沙流能够越过结皮恢复到自由流动的状态，因此风速增加较快。破碎地表的单位面积输沙量显著高于其他地表，这是因为破碎地表在各种外营力的作用下形成较为疏松的盐漠，与下层细颗粒掺杂在一起，其边缘的裂隙使贴近地表的风产生狭管效应，风更容易顺着裂隙吹蚀地表更深处的沉积物，在大风天气该区域地表更容易起沙。活化地表和沙化地表的平均风速变化趋势相近。地表上的沙粒通常聚集在30 cm高度范围内，与风力的交互作用较为密集，从而导致风速在该高度内增加相对较快。在30～200 cm高度范围内，沙粒逐渐减少，风沙流受到沙粒的干扰作用减少，因此风速增加相对缓慢。活化地表的单位面积输沙量相对较高，可能是因为活化地表存在相对较多的坑穴、凸起和沟壑等起伏结构，对风沙流的运动产生一定的影响，导致沙粒沉积和聚集较多，且沙化地表沙粒偏粗，在长距离悬浮过程中难以被风沙流携带输送。

此外，风沙流所携带沙粒的平均粒径多为粉粒级。在传输过程中由于沙粒之间的碰撞摩擦，导致相互作用力增大，从而增强沙粒之间的沉降能力。粗颗粒物沉降较快，而细颗粒物在传输过程中能被携带更远，导致沙粒的分选性偏向负偏。

5 结论

(1)干涸湖盆地表0～2 cm沉积物粒度分布，从湖心到湖岸，大体呈逐渐变粗的趋势，均以黏粒和粉粒为主，且粉粒含量更多。

(2)干涸湖盆不同地表的风速廓线基本符合Karman的速度对数分布规律，且拟合效果较好($R^2>0.90$)。平均风速从湖心到湖岸大体呈逐渐降低的趋势。干涸盐湖湖盆各地表的摩阻速度和空气动力学粗糙度变化基本一致，且结皮地表上最大。

(3)干涸湖盆在结皮地表上的输沙量最少，在破碎地表、活化地表和沙化地表上的输沙量主要集中在0～20 cm高度内，分别占总输沙量的94.08%，87.92%，97.75%。在结皮地表上输沙率随高度变化呈现出线性函数关系($R^2=0.80$)，其他3种地表上输沙率与高度呈现出指数函数形式，且拟合效果较好($R^2>0.97$)。

(4)在近地表0～50 cm高度内，风沙流所携带沙粒的平均粒径在2～8 μm，属于粉粒，分选系数在1.5～4.0，分选性表现为较差、很差，偏度值在−0.1～0.6，表现为负偏、极负偏，峰态值大体集中在0.8～1.2，表现为中等、尖窄峰态。

综合来看，结皮地表的风蚀作用最弱，风蚀潜力较小；破碎地表的风蚀作用最强，风蚀潜力最大，是该盐湖最主要的沙尘源；活化地表和沙化地表的风蚀作用较强，风蚀潜力较大。可以通过保护结皮地表免受外界扰动，增大破碎地表上疏松盐漠颗粒的临界启动

风速阈值来抑制跃移颗粒运动和提高活化地表、沙化地表的下垫面覆盖程度等方式减弱该地区风蚀强度。

参考文献:

[1] GHOLAMPOUR A, NABIZADEH R, HASSANVAND M S, et al. Characterization of saline dust emission resulted from Urmia Lake drying[J].Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2015,13(1):e82.

[2] VAN PELT R S, TATARKO J, GILL T E, et al. Dust emission source characterization for visibility hazard assessment on Lordsburg Playa in Southwestern New Mexico, USA[J]. Geoenvironmental Disasters, 2020, 7(1):e34.

[3] ABUDUWAILI J, ZHANG Z Y, QING J F, et al. The disastrous effects of salt dust deposition on cotton leaf photosynthesis and the cell physiological properties in the Ebinur Basin in Northwest China[J].PLoS One,2015,10(5):e0124546.

[4] GE Y X, ABUDUWAILI J, MA L. Lakes in arid land and saline dust storms[C].Chinese Academy of Sciences. E3S Web of Conferences. DOI: 10.1051/e-3sconf/20199901007.

[5] 史莹莹,张镭,田鹏飞,等.黄土高原半干旱区沙尘气溶胶光学和微物理特性[J].高原气象,2018,37(1):286-295.
SHI Y Y, ZHANG L, TIAN P F, et al. The optical and microphysical characteristics of dust aerosol over a typical semi-arid region in Loess Plateau[J]. Plateau Meteorology,2018,37(1):286-295.

[6] QI S, REN X M, DANG X H, et al. Mechanisms of dust emissions from lakes during different drying stages in a semi-arid grassland in Northern China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: e1110679.

[7] BOROUGHANI M, HASHEMI H, HOSSEINI S H, et al. Desiccating lake urmia: A new dust source of regional importance[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2020,17(9):1483-1487.

[8] FAREBROTHER W, HESSE P P, CHANG H C, et al. Dry lake beds as sources of dust in Australia during the Late Quaternary: A volumetric approach based on lake bed and deflated dune volumes[J]. Quaternary Science Reviews,2017,161:81-98.

[9] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等.新疆艾比湖干涸湖底不同景观单元蒸发盐分布与变化特征[J].湖泊科学,2014,26(4):616-624.
GE Y X, ABUDUWAILI J, MA L, et al. Variation and distribution of evaporated salt under different landscape units in the playa of Lake Ebinur, Xinjiang Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2014,26(4): 616-624.

[10] LIU D W, HAN L J, KOU Z H, et al. Exploration of playa surface crusts in Qehan Lake, China through field investigation and wind tunnel experiments[J]. Journal of Arid Land,2023,15(5):491-507.

[11] 徐冉,张碧辉,安林昌,等.2000—2021 年中国沙尘传输路径特征及气象成因分析[J].中国环境科学,2023,43(9):4450-4458.
XU R, ZHANG B H, AN L C, et al. Analysis of sand and dust storm transport paths characteristics andmeteorological causes in China from 2000 to 2021[J].China Environmental Science,2023,43(9):4450-4458.

[12] 张晔,王海兵,左合君,等.中国西北春季沙尘高发区及沙尘源解析[J].中国环境科学,2019,39(10):4065-4073.
ZHANG Y, WANG H B, ZUO H J, et al. Identify high frequent dust areas and their sources in spring in the Northwest of China[J]. China Environmental Science, 2019,39(10):4065-4073.

[13] 阿布拉·吐合提,吉力力·阿不都外力,葛拥晓,等.中亚咸海干涸湖床粉尘潜在扩散的时空变异分析[J].中国环境科学,2020,40(9):3756-3766.
TUHETI·A, ABUDUWAILI·J, GE Y X, et al. Potential spatiotemporal variability of dust from the playa of the dry lake bed of the Aral Sea in Central Asia[J]. China Environmental Science, 2020, 40(9): 3756-3766.

[14] 江南,王永,董进,等.内蒙古查干淖尔湖 2000a 以来气候环境演变的沉积记录[J].地质通报,2016,35(6):953-962.
JIANG N, WANG Y, DONG J, et al. Sedimentary record of environmental evolution since ca 2000calyr B P ago in Qehan Lake, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2016,35(6):953-962.

[15] 郭树江,杨自辉,王强强,等.青土湖干涸湖底风沙流结构及输沙粒径特征[J].生态学杂志,2021,40(4):1166-1176.
GUO S J, YANG Z H, WANG Q Q, et al. The structure and grain size of wind-sand flow in the dry bottom of Qingtu Lake[J].Chinese Journal of Ecology,2021,40(4):1166-1176.

[16] 高君亮,吴波,庞营军,等.内蒙古狼山东麓堆积戈壁表层沉积物粒度特征[J].干旱区资源与环境,2020,34(11):97-103.
GAO J L, WU B, PANG Y J, et al. Grain-size characteristics of surface sediments of the accumulation formed Gobi in eastern piedmont of Langshan Mountain, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2020,34(11):97-103.

[17] 陈亮,王建萍,韩进军,等.近 20a 察尔汗盐湖区景观格局变化与趋势分析[J].盐湖研究,2022,30(2):19-26.
CHEN L, WANG J P, HAN J J, et al. Changes andtrends of landscape pattern in qarhan salt lake region in recent 20 years[J]. Journal of Salt Lake Research,2022,30(2):19-26.

[18] 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.
LI J Y, FU T Y, SHEN Y L, et al. Grain-size characteristics of surface sediments of barchan and parabolic dunes inthe Mu Us Desert[J].Journal of Desert Research,2023,43(2):226-232.

[19] 范亚伟,杜鹤强,卢善龙,等.长江源卓乃湖流域地表沉积物粒度分布与风沙流结构[J].中国沙漠,2023,43(3):47-56.
FAN Y W, DU H Q, LU S L, et al. Surface particle size composition and aeolian-sand flow structure of Zuo Lake Basin in the source of Yangtze River[J]. Journal of Desert Research,2023,43(3):47-56.

[20] 安福元,马海州,魏海成,等.柴达木盆地察尔汗湖相沉积物的粒度分布模式及其环境意义[J].干旱区地理,2013,36(2):212-220.
AN F Y, MA H Z, WEI H C, et al. Grain-size distribution patterns of lacustrine sediments of Qarhan area and its environmental significance[J]. Arid Land Geography, 2013,36(2):212-220.

[21] 韩旭娇,张国明,刘连友,等.呼伦湖西南部咸水湖干涸湖滨带沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2019,39(2):158-165.
HAN X J, ZHANG G M, LIU L Y, et al. Grainsize characteristics of sediments in the dry lakeside of salt lake in the southwest of Hulun lake[J].Journal of Desert Research,2019,39(2):158-165.

[22] 张西营,李雯霞,耿鋆,等.柴达木盆地盐尘暴及其资源生态环境影响[J].盐湖研究,2020,28(1):11-17.
ZHANG X Y, LI W X, GENG J, et al. Saltdust storms and their impacts on resources and ecological environment in Qaidam Basin[J].Journal of Salt Lake Research,2020,28(1):11-17.

[23] 陈京平,余子莹,杨帆,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴和地表沙物质粒度特征[J].中国沙漠,2023,43(2):150-158.
CHEN J P, YU Z Y, YANG F, et al. Particle size characteristics of sandstorm and surface sand at Tazhong area of Taklimakan Desert, China[J].Journal of Desert Research,2023,43(2):150-158.

[24] 韩旭娇,张国明,雷洁,等.干涸湖床不同类型盐土地表净风吹蚀实验研究[J].干旱区研究,2019,36(1):262-268.
HAN X J, ZHANG G M, LEI J, et al. Winderosion on different solonchaks in dried lake bed[J].Arid Zone Research,2019,36(1):262-268.

[25] 吴盈盈,刘旭阳,王振亭.干燥致密土壤在沙粒流冲击下的磨蚀规律[J].农业工程学报,2022,38(8):315-320.
WU Y Y, LIU X Y, WANG Z T. Abrasion law of dry and dense soil under the bombardment of sand grain flows[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(8):315-320.

(上接第37页)

[28] CEN L P, PENG X D, DAI Q H, et al. Creep leakage process of remaining soils in near-surface fissures in a karst area with bedrock outcrops[J].Catena,2023,221:e106802.

[29] PENG X D, WANG X D, DAI Q H, et al. Soil structure and nutrient contents in underground fissures in a rock-mantled slope in the karst rocky desertification area[J].Environmental Earth Sciences,2020,79(3):10.1007/s12665-019-8708-z.

[30] IMESON A C, LAVEE H, CALVO A, et al. The erosional response of calcareous soils along a climatological gradient in Southeast Spain[J].Geomorphology,1998,24:3-16.

[31] 陈红星,李法虎,郝仕玲,等.土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):21-25.
CHEN H X, LI F H, HAO S L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(2):21-25.

[32] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,2008:56-64.
CHEN Z Y, ZHOU J X, WANG H J. Soil Mechanics [M].Beijing: Tsinghua University Press,2008:56-64.

[33] 雷俐,魏兴琥,徐喜珍,等.粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J].地理研究,2013,32(12):2204-2214.
LEI L, WEI X H, XU X Z, et al. Vertical distribution of migration channels and grain-size change features of soil in karst mountainous areas of northern Guangdong [J].Geographical Research,2013,32(12):2204-2214.

[34] 李法虎.土壤物理化学[M].北京:化学工业出版社,2006:26-31.
LI F H. Soil physicochemistry[M].Beijing: Chemical Industry Press,2006:26-31.