

敦煌沙漠绿洲过渡带地表沉积物粒度特征及沉积环境

张余^{1,2}, 张克存¹, 安志山¹, 蔡迪文^{1,2}

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站 甘肃省风沙灾害防治工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 探究敦煌沙漠绿洲过渡带地表沉积物粒度特征及沉积环境, 为敦煌沙漠绿洲过渡带的生态恢复以及有效控制风沙灾害提供必要的理论依据。[方法] 运用对角线法对敦煌沙漠绿洲过渡带地表沉积物进行采样, 采用矩值法计算粒度参数, 分析其粒度空间分布特征以及沉积环境。[结果] (1) 研究区地表沉积物粒级极粗砂和极细砂含量较少, 沙漠和绿洲分别以粗砂和细砂为主, 过渡带以中砂为主, 沉积物粒径自沙漠到绿洲呈现明显减小的趋势; (2) 3 条样带的分选性都较好, 相比而言, 沙漠的分选性最好, 过渡带次之, 绿洲最差; (3) 偏态除绿洲属于正偏外, 沙漠和过渡带都属于近对称分布, 频率曲线峰型都是平顶峰, 说明不同沉积物粒级对风力作用响应的差异性。[结论] 敦煌绿洲的沙以风成环境为主, 鸣沙山主要为河湖沙或河流冲积沙, 过渡带混合有风成沙和河湖或河流冲积沙。

关键词: 敦煌; 沙漠绿洲过渡带; 粒度特征; 沉积环境

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0069-05

中图分类号: X144

文献参数: 张余, 张克存, 安志山, 等. 敦煌沙漠绿洲过渡带地表沉积物粒度特征及沉积环境[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 69-73. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.012; Zhang Yu, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Topsoil grain size distribution and its sedimentary environment in the desert-oasis transitional zone of Dunhuang City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 69-73. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.012

Topsoil Grain Size Distribution and Its Sedimentary Environment in Desert-oasis Transitional Zone of Dunhuang City

ZHANG Yu^{1,2}, ZHANG Kecun¹, AN Zhishan¹, CAI Diwen^{1,2}

(1. Northwest Institute of Ecological-Environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Desert and Desertification, Dunhuang Gobi and Desert Ecology and Environment Research Station, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Exploring the topsoil grain size distribution and its sedimentary environment, to provide theoretical bases for ecological restoration and effective sand disasters control in the Dunhuang desert-oasis transitional zone. [Methods] Surface sediments were sampled by diagonal method in Dunhuang desert-oasis transitional zone, Grain size parameters were calculated by moment method. The spatial distribution and sedimentary environment of grain size were analyzed. [Results] (1) The contents of extremely coarse sand and extremely fine sand were both low in the research area. Desert and oasis were mainly composed of coarse sand and fine sand, and the transition zone was dominated by mid-sand. The grain size decreased from desert to oasis. (2) The sorting of the 3 sampling belt transects performed all better, among which, the desert was the best, followed by the transition zone, the oasis was the worst. (3) As for skewness, desert and transition zone were nearly symmetrical distribution, while oasis belonged to positive skewness. Kurtosis type was plat, which showed that responses of different sediment grain sizes to wind power were different. [Conclusion] The sand of oasis is dominated by aeolian environment, Mingsha mountain is mainly lacustrine or

收稿日期: 2016-12-30

修回日期: 2017-02-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“沙漠绿洲过渡带近地表风沙动力过程研究”(41371027); 中科院青年创新促进会项目(2014382); 国家重点研究计划项目(2017YFC0504801)

第一作者: 张余(1993—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 研究方向为风沙地貌。E-mail: sxbjqzy@163.com。

通讯作者: 张克存(1978—), 男(汉族), 甘肃省民勤县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事风沙地貌、风沙灾害与防沙工程研究。E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn。

river environment, two different sedimentary sands appeared in the transitional zone.

Keywords: Dunhuang City; desert-oasis transitional zone; characteristics of grain size; sedimentary environment

绿洲演化是在人类活动和气候变化影响背景下的水文过程、生物过程、土地变化和大气过程相互作用的结果^[1]。沙漠绿洲过渡带是介于沙漠和绿洲之间的特殊生态脆弱带,是绿洲与沙漠两个极端生态系统之间物质循环、能量转换、信息传递的主要场所^[2]。根据沙漠绿洲过渡带的植被特征、地貌特征和结构模式可将沙漠绿洲过渡带定义为自绿洲边缘(人工防护体系或天然稀疏灌木林边界)到植被盖度 20%~25%的固定一半固定外缘边界(绿洲与流动沙漠之间)的荒漠地带^[3]。有学者^[4]也认为过渡带是一个水分、温度、能量、有机体等要素形成较大的水平递变梯度的带状区域。这些观点都有助于我们划分本研究区的过渡带范围。沉积物粒度空间分布主要受控于外动力环境,在不断地搬运和沉积过程中,其粒度的分布状况也会出现较大的差异。研究^[5-6]指出,离绿洲越近,沉积物平均粒径有变小和变细的趋势,流沙地的分选性要大于半固定沙地和固定沙地。有学者^[7]通过分析计算绿洲沙物质粒度参数,表明了该地区沙丘沙和河流沙的亲缘关系。除此之外,更多研究集中在不同类型沙丘粒度参数的特征方面,对沙丘物质来源及其形成演变机理有重要意义^[8-11]。鉴于此,本文选取常年受风沙危害严重的敦煌沙漠绿洲过渡带为研究对象,通过野外采样分析,探讨该地区地表沉积物粒度分布特征与沉积环境,从而为敦煌沙漠绿洲过渡带的生态恢复以及有效控制风沙灾害提供必要的理论依据。

1 研究区概况

敦煌市位于甘肃省西北部,是甘肃、青海、新疆 3 省的交汇点,东接瓜州县,南邻鸣沙山,西边靠近库姆塔格沙漠与南湖绿洲,北边是戈壁,接天山余脉。总面积 $3.12 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中绿洲面积仅有 1400 km^2 ,平均海拔高度低于 1200 m ,属于典型的暖温带干旱性气候,年降雨量少,仅有 39.9 mm ,蒸发量却达到 2486 mm ,昼夜温差大,极端最高气温可达 $43.6 \text{ }^\circ\text{C}$,最低气温 $-28.5 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均气温 $9.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。敦煌常年受风沙灾害,主导风向是西南风和西北风,地表以风沙土为主,并有少量砾石。研究取样点位于敦煌市南面,鸣沙山西侧 10 km 处的黑山嘴,地理位置 $94^\circ35'9''-94^\circ35'27''\text{E}, 40^\circ03'44''-40^\circ04'28''\text{N}$,鸣沙山是库姆塔格沙漠的延伸段,宽约 15 km ,从西南到东北方向长约 40 km ,沙丘类型以金字塔型沙丘和线性沙丘为主,植被以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为建群

种,白刺(*Nitraria*)为伴生种,同时分布有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等草本植物^[12],沙源主要来自疏勒河及党河水系的冲击洪积沙、三危山前冲积洪积物、龙头山等低山低山丘陵戈壁上的残积物以及南湖古河湖相沉积沙吹蚀^[13]。自流沙地至绿洲内部布设有 3 台气象仪和八方位集沙仪。1 号气象仪位于高大沙丘丘顶,地表无植被分布,代表沙漠;2 号气象仪下有稀疏的人工梭梭林及草本植物,地势较 1 号气象仪平坦,仪器西侧有不均匀的砾石分布,代表过渡带,在仪器西南方向约 350 m 处有数条线性沙丘延伸至过渡带,高约 10 m ;3 号气象仪设置在绿洲内农户房顶,周围为高大乔木。研究区 WSW 方位约 2 km 处为党河河道,位于该地区主导风向的上风向,基于沙源的供应条件和研究区的地貌单元来看,可以推测该地区风沙活动与党河、库姆塔格沙漠及南湖存在相关联系。

2 研究方法

沉积物粒度分布特征是沙漠绿洲过渡带极其重要的指标之一,其与当地风力搬运环境、沉积环境有着密切的联系。2014 年 3 月对研究区的地表沉积物进行取样调查,流沙前沿至绿洲取样点分别记为 1—12 号,沿气象仪和集沙仪的布设断面取样,每个取样点选取 $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ 大小的沙面,按照对角线法在 4 个样方拐角及中间均匀采取表面 $0-1 \text{ cm}$ 的沉积物,混合并装入密封袋后带回实验室分析。取样点地理位置用精度小于 5 m 的 GPS 定位。粒度分析是在敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站完成,先将样品中的杂质去除,经自然风干后,用 $1/3\Phi$ 间隔的套筛对粒径大于 0.1 mm 的沙样进行筛分,小于 0.1 mm 的采用吸管法分析,最后结果以质量百分数表示。

计算粒度参数有 Folk-Word(1957)的图解法和 McManus(1988)的矩值法,图解法是根据分析得到的数据做出累计分布曲线,从曲线上得出某一累计百分数所对应的粒径值,代入公式计算。矩值法是根据数理统计的思想计算粒度分布的一次矩、二次矩、三次矩、四次矩,并计算得到平均粒径、分选系数、偏态和峰态。由于矩值法在计算时全面考虑了样品的粒度分布,结果更为精确,因此本文采用矩值法计算各粒度参数。计算公式为:

$$\text{平均粒径: } X_{\phi} = (f_i m_i) / f_i$$

$$\text{分选系数: } \delta_{\phi} = [f_i (m_i - X_{\phi})^2 / f_i]^{1/2}$$

$$\text{偏度: } SK_{\Phi} = f_i(m_i - X_{\Phi})^3 / f_i \delta_{\Phi}^3$$

$$\text{峰态: } KG = f_i(m_i - X_{\Phi})^4 / f_i \delta_{\Phi}^4$$

式中: f_i ——每个粒级的权重; m_i ——各粒级的平均粒径。

3 结果与分析

3.1 地表沉积物粒度分布

根据我国土壤机械组成的分级标准,由图 1 中可以看出,该地区主要以沙土为主,砾石和黏土含量极少。研究区内极粗砂和极细砂分布较少,优势粒级是粗砂、中砂和细砂,粗砂含量是极粗砂的 9.9 倍,细砂是极细砂的 4 倍。粗砂集中分布在沙漠,平均含量在 75% 以上,另外含有 4.9% 的极粗砂和 0.21% 的极细砂;过渡带地表最多的是中砂,含量为 51.48%,其次是 26.18% 的粗砂和 21.14% 的细砂;绿洲地表物质以细砂为主,含量达 62.78%,并且含有 18.44% 的中砂和 18.02% 的极细砂。从沙漠到绿洲,沉积物粒度差异明显,越接近绿洲,随着地表植被覆盖度增加,风力携沙能力降低,沉积物级配就越接近细砂。说明沉积物粒度除了与源区物质有关外,也与沙物质在风沙流中搬运和沉积的过程密切相关。在过渡带,特别是在 5 号点附近,优势粒级则表现的不太明显,粗砂和中砂含量接近相等,分别为 45.93% 和 42.48%,在 9

号点附近,则是细砂和中砂的含量最为接近,分别为 43.17% 和 54.96%,这说明沙漠到绿洲粒级的变化是逐渐过度的,每个样点的构成包含多个粒级成分,其中过渡带沉积物粒级级配最为复杂。

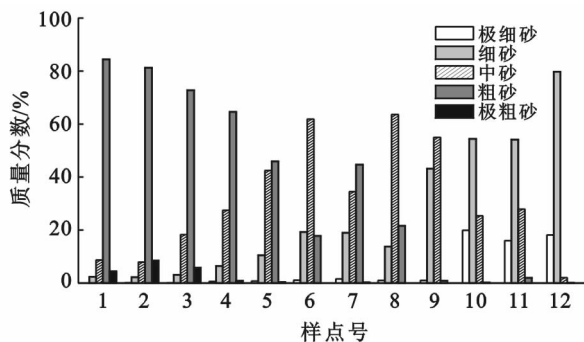


图 1 沙漠绿洲过渡带各样点粒度分布

3.2 粒度参数

研究区 3 个站点的地表沉积物粒度参数有明显的差异(图 2),平均粒径介于 $0.39 \sim 2.81\Phi$,其中地表沉积物最粗的是沙漠,平均粒径为 0.6Φ ,其次是过渡带 1.51Φ 和绿洲 2.59Φ 。为了能清晰的说明平均粒径的空间变化规律,对平均粒径进行曲线拟合,拟合结果如图 2 所示,拟合得出最佳关系式为幂函数,相关系数 $r^2 = 0.942$,呈强相关,即越接近绿洲,平均粒径(Φ)呈现幂函数的增长模式。

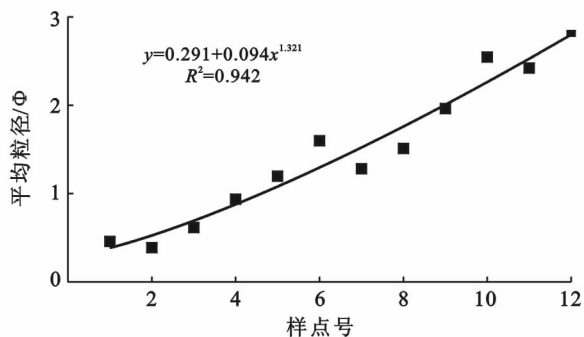
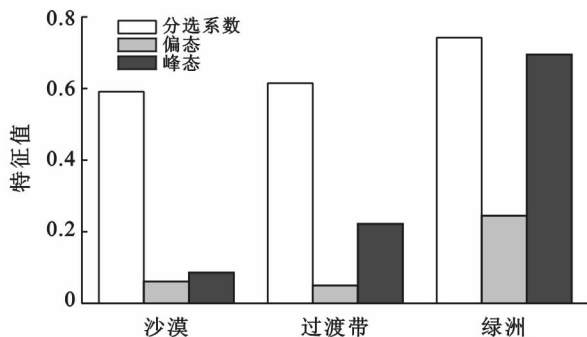


图 2 沙漠绿洲过渡带粒度参数



如图 2 所示,沙漠、过渡带和绿洲的分选系数差异较小,分选系数均值分别为 0.591,0.615,0.742,都介于 0.5~0.75 之间,分选程度较好,且沙漠的分选性要好于过渡带和绿洲,对毛乌素沙地的调查也有同样结论:沙丘的分选性要好于绿洲内林地和草地的分选性^[14]。一般来说,对于同一源区的物质,沉积物的分选系数会随着搬运距离的增加而减小,研究区地表沉积物平均粒径(1.57Φ)要粗于塔克拉玛干沙漠(3.25Φ)^[15]、巴丹吉林沙漠(2.22Φ)^[16]、库姆塔格沙漠(2.23Φ)^[17],分选系数(0.65Φ)大于塔克拉玛干沙

漠(0.34Φ)和巴丹吉林沙漠(0.55Φ),小于库姆塔格沙漠(0.76Φ),说明本研究区沙物质的分选性好于最邻近的库姆塔格沙漠,结合该地区的地理位置,从侧面反映出库姆塔格沙漠是敦煌沙漠绿洲过渡带的沙尘源区之一。就偏态来说,除绿洲属于正偏外,沙漠和过渡带都属于近对称分布,偏态均大于 0,未出现负偏和极负偏,极正偏出现的频率为 8.33%。沙漠、过渡带和绿洲的峰态分别介于 0.04~0.168,0.003~0.184,0.239~1.279,频率曲线都表现为平顶峰,绿洲峰态曲线宽,过渡带和沙漠峰态曲线很宽,表明

绿洲地表沉积物分布范围比过渡带和沙漠更集中。根据统计结果看,12个样点中10号样点的偏态值最大,峰态值也大于1,呈现尖顶峰,分析原因是10号取样点接近公路和耕地,过往车辆和人类活动对附近沉积物组成成分影响较大。

3.3 粒度参数间的关系与沉积环境

利用粒度参数散点图可以简单区分不同的沉积环境及挑选出异常点。从平均粒径—分选系数散点图(图3)可以看出,沙漠和绿洲的沉积环境差别较大,但过渡带与两者的区分不是很明显,且研究区分选系数随着平均粒径(Φ)的增大而增大,呈现较弱的正相关关系。9号点出现异常,其分选系数、偏态和峰态都达到最小值,原因是由于9号点位于绿洲和过渡带的交错区,种植有防护林带,牛羊踩踏的痕迹明显,人为活动的干扰频繁。根据分选系数—峰态散点图可以得出同样的结论,峰态随分选系数的增加而增加,呈现较强的正相关关系。其中7和9号点为异常点,7号点峰态过宽,粒径偏粗,分选性较差。通过实地观测分析,7号点位于线性沙丘迎风坡坡底,有研究表明^[16,18],线性沙丘迎风侧沉积物粒径偏粗,分选性较差。结合两张散点图不难看出,绿洲和过渡带的植被覆盖度高,真实粒径值小,分选性反而差,表现出相对的滞后性,而且过渡带与沙漠和绿洲的沉积环境差异不明显,这就需要对研究区地表沉积物做进一步定量化分析。

本研究采用 Suhu 建立的风成沙、海滩沙、浅海沙、河流沙、浊流沙4个经验判别公式:

$$Y(\text{风成与海滩}) = -3.568 M_z + 3.701 6\sigma^2 - 2.076 6 SK_1 + 3.113 5 KG \quad (1)$$

$Y < -2.741 1$, 为风成沙; $Y > -2.741 1$, 为海滩沙。

$$Y(\text{海滩和浅海}) = 15.653 4 M_z + 65.709 1\sigma^2 + 18.107 1 SK_1 + 18.504 3 KG \quad (2)$$

$Y < 65.365 0$, 为海滩沙; $Y > 65.365 0$, 为浅海沙。

$$Y(\text{浅海与河流}) = 0.282 5 M_z - 8.760 4\sigma^2 + 4.893 2 SK_1 - 0.048 2 KG \quad (3)$$

$Y < -7.419 0$, 为河流沙; $Y > -7.419 0$, 为浅海沙。

$$Y(\text{河流与浊流}) = 0.721 5 M_z - 0.403 0\sigma^2 + 6.732 2 SK_1 + 5.292 7 KG \quad (4)$$

$Y < 9.843 3$, 为浊流沙; $Y > 9.843 3$, 为河流沙。

将12个样点的粒度特征值代入公式(1)计算得:数值分别为0.33, 0.65, 0.26, -0.49, -1.18, -3.29, 0.48, -2.98, -5.66, -2.98, -4.39, -7.19。可以看出6, 8, 9, 10, 11, 12号样点为风成环境,其余的为海滩沉积环境。将上述海滩沉积环境的数据代入公式(2),经计算得:1, 2, 3, 4, 5, 7号样点的Y值分别为42.91, 42.90, 53.66, 64.09, 69.43, 91.61。1—4号样点为海滩沉积环境,5, 7号样点为浅海沉积环境。将浅海沉积环境的样点数据代入公式(3),经计算得:数值分别为-5.64和-6.13,都为浅海沉积环境。由于这4个经验公式缺少河湖沙的判别公式^[19-20],而本研究只是从粒度的角度来判别沉积环境,并未涉及到矿物成分和碳酸盐含量,因此在区分海滩、浅海沉积环境和河湖沉积环境方面较困难。结合研究区地理位置和库姆塔格沙漠的沉积环境^[20],我们推测海滩沙和浅海沙实际上应是河湖沙或河流冲积沙。综合上述结果,可知敦煌绿洲的沙以风成环境为主,鸣沙山主要为河湖沙或河流冲积沙,过渡带沙粒沉积环境较复杂,混合有风成沙和河湖或河流冲积沙,其中风成沙占60%,河湖或河流冲积沙占40%。

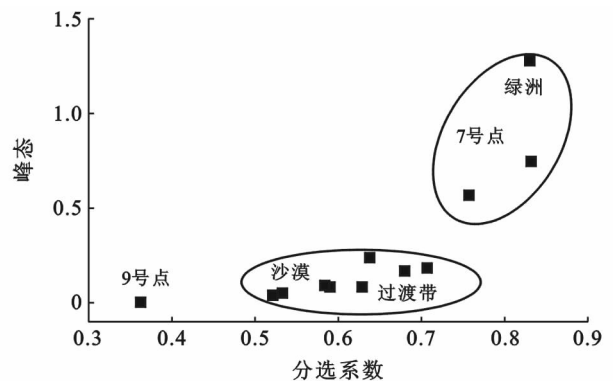
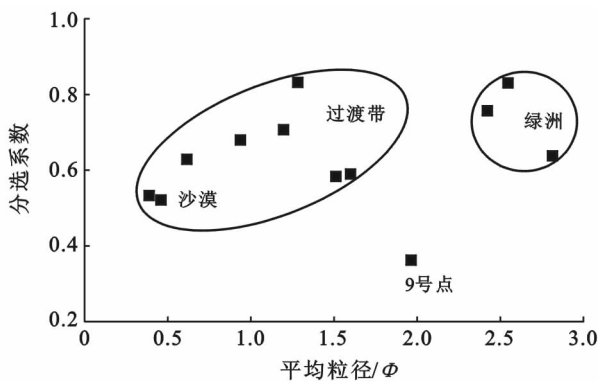


图3 研究区粒度参数散点图

4 讨论

根据粒度参数的计算结果,自沙漠到绿洲方向,地表沉积物的分选性逐渐变差,但对于同一源区的沙

物质来说,随着风力搬运分选性应该变好,可见本研究区地表沉积物不属于同一源区,结合对沉积环境的分析结果可知,绿洲和过渡带的风成沙主要是库姆塔格沙漠沙或南湖古河湖相沉积沙在风力长途搬运作

用下沉积的,鸣沙山主要由党河或山前洪积冲积形成。同时,对比我国塔克拉玛干沙漠沙漠、巴丹吉林沙漠、库姆塔格沙漠内部的粒级组成,都是以细砂或者中砂为优势粒级^[15-17],而本研究代表沙漠的区域75%都为粗砂,分析其原因很大程度上与鸣沙山特殊的地理位置有关,东与三危山、火焰山等山地相连,西侧为南湖绿洲,南边毗邻党河河谷,鸣沙山距离这几处沙源都较近,沙物质搬运距离短。而其他沙漠中的沙物质是在风力作用下将源区物质经过长时间的搬运与沉积,在分选作用下,较粗的沙粒会沉积下来留在原地,较细的沙粒会被吹蚀到沙漠内部。因此,沙漠中的沙物质粒级多以细砂和中砂为主,本研究区的沙漠地带因沙粒搬运距离短,则多以粗砂为主。通过对比几者的平均分选系数,本研究区沙漠沙的分选性(0.59 Φ)要差于塔克拉玛干沙漠(0.34 Φ)和巴丹吉林沙漠(0.55 Φ)内的沙粒,而且有学者研究塔克拉玛干沙漠南缘河流附近沙丘沙和冲积沙粒度特征表明:该地段的沙物质分选性(0.96 Φ)要远远差于沙漠内部(0.34 Φ)^[7],从而证实了这一推测。

本研究主要是从粒度特征方面出发,探讨了研究区地表沙物质的沉积环境,明显具有一定的局限性,要具体判别这几种沙源,就需对沙洋的理化性质做进一步分析。可以看出,敦煌沙漠绿洲过渡带在保护绿洲生态安全方面有重要意义,一方面要缓冲来自南侧鸣沙山的沙物质,另一方面要阻止西侧风沙活动对绿洲的危害,本研究通过对敦煌沙漠绿洲过渡带沙粒沉积环境的分析,结果为该地区的防沙治沙提供了理论基础。

5 结论

(1) 研究区沉积物粒径集中分布在0.125~1.0 mm,极粗砂和极细砂含量只有1.7%和5%。沙漠以粗砂(75%)为主,绿洲以细砂(63%)为主,过渡带由多个粒级沉积物组成,中砂、粗砂、细砂含量分别为52%,26%,21%。由此可知,自沙漠到绿洲地表沉积物粒级逐渐减小。

(2) 沙漠到绿洲沉积物分选性逐渐变差,偏态除绿洲属于正偏外,沙漠和过渡带都为近对称分布,频率曲线峰型都表现为平顶峰,绿洲峰型最宽,沙漠相比而言较窄,过渡带处于两者之间。

(3) 通过粒度特征值对沉积环境进行分析,反映出敦煌沙漠绿洲过渡带沙的沉积环境复杂,绿洲的沉积物主要是风力搬运沉积,过渡带主要是风力沉积和河湖或河流冲积沉积,沙漠为河湖或河流冲积沉积。

[参考文献]

- [1] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1-9.
- [2] 王玉朝, 赵成义. 绿洲—荒漠生态脆弱带的研究[J]. 干旱区地理, 2001, 24(2): 182-188.
- [3] 穆桂金, 贺俊霞, 雷加强, 等. 再议绿洲—沙漠过渡带: 以策勒绿洲—沙漠过渡带为例[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 195-202.
- [4] 韩艳, 万年庆, 何青. 绿洲与荒漠过渡带气候特征对比分析[J]. 许昌学院学报, 2009, 28(5): 128-131.
- [5] 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.
- [6] 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沉积物度特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 25-33.
- [7] 钱亦兵, 张希民, 李晓明. 塔克拉玛干沙漠南缘绿洲沙物质粒度特征[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 131-135.
- [8] 魏怀东, 徐先英, 王继和, 等. 库姆塔格沙漠沙丘的粒度特征[J]. 水土保持通报, 2007, 21(3): 6-9.
- [9] 张瑞军, 何清, 孔丹, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘沙尘暴源区地表沉积物粒度特征[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 887-893.
- [10] 吴霞, 哈斯, 社会石, 等. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面粒度特征[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 937-944.
- [11] 崔徐甲, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山沉积物粒度特征及其与植被、地貌关系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 857-864.
- [12] 张克存, 安志山, 蔡迪文, 等. 典型天气背景下沙漠绿洲过渡带近地表风动力空间变化特征[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1-7.
- [13] 胡世雄, 吴正. 敦煌鸣沙山金字塔沙丘的形成模式研究[J]. 地理研究, 1997, 16(1): 60-67.
- [14] 李占宏, 海春兴, 丛艳静, 毛乌素沙地土粒度特征及其空间变异[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 74-79.
- [15] Wang Xunming, Dong Zhibao, Zhang Jiawu, et al. Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea[J]. Sedimentary Geology, 2003, 161(1/2): 1-14.
- [16] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1357-1364.
- [17] 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: 67-124.
- [18] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 590-596.
- [19] 赵澄林. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [20] 何清, 杨兴华, 霍文, 等. 库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 18-22.