

孟庆爽,左合君,闫敏,等.库布齐沙漠地表沉积物常量元素与粒度的关系[J].中国沙漠,2023,43(4):107-117.

库布齐沙漠地表沉积物常量元素与粒度的关系

孟庆爽,左合君,闫敏,王海兵,席成

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院/风沙物理与防沙治沙工程重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 地表沉积物的风化过程引起元素在各粒级间的迁移或富集,采用粒度分级可以深度解释元素与粒度的关系。选取库布齐沙漠不同植被盖度测定粒度分布特征分级情况下的元素含量。结果表明:(1)库布齐沙漠以细砂和极细砂为主(二者占比85%以上),常量元素以 SiO_2 、 Al_2O_3 为主(二者占比80%以上且呈相反关系),其他元素含量较低;不同粒级组分元素富集情况不同。(2)表层沉积物的化学蚀变指标 $CPA(60.2\sim 85.9)$ 、 $CIA(28.08\sim 53.06)$ 值显示该区域处于未风化或弱风化状态;研究区表现为富 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 贫 Al_2O_3 、 Na_2O 现象; SiO_2 、 K_2O 与粒径段呈显著正相关, Fe_2O_3 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 与粒径段呈显著负相关, Na_2O 不受粒度控制。(3)分级前, CaO 、 SiO_2 、 MgO 、 TiO_2 与粒径有相关性;分级后, SiO_2 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 均与粒径段具有一定的相关性,细化分级后确实能解读更多蕴含在元素中的信息。

关键词: 库布齐沙漠; 沉积物粒度; 地球化学元素; 粒度效应

文章编号: 1000-694X(2023)04-107-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00005

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

0 引言

陆源碎屑物质在经过物理和化学分选后,与其他混合物形成沉积物质,其粒度在搬运和堆积的过程中受到了风动力强度的影响。碎屑物源于不同岩石矿物,具有不同的晶体结构和抗风蚀能力,因此也具有不同的地球化学元素种类及元素组分^[1-2]。元素的迁移、富集及分散作用十分复杂,沉积物的分布和元素赋存情况受原生矿物多种因素的影响,地表物质的发育水平和微量元素地球化学活动均造成部分元素在各种介质中不同粒级的富集和扩散,这种差异被称作“粒度效应”^[3-4]。元素含量、元素组成和元素比值是沉积环境研究的重要指标,不同的元素保留的源区信息不同^[5-8],因此,根据粒度分布特征进行分级处理,既可以减小元素的粒度效应对分析结果的偏差,也可以读出不同粒级内元素蕴含的环境信息。

不同粒级组分中地球化学元素的分布特征反映了其物源的差异,因为不同的元素具有不同的受控粒径区间和受控程度^[9-10],亟需对粒度效应进行

定量研究来缩小对物源效应的偏差。一般认为元素与粒度间具有一定的相关性,不同区域间有所差异。相关学者对北方10个主要沙漠和沙地的细粒级中Nd-Sr同位素进行了系统研究,观察到不同沙漠具有不同的Nd-Sr同位素特征^[11]。王兆夺等^[1]也对泉州湾表层沉积物进行研究得出, SiO_2 、 K_2O 、Ba含量与粒度呈正相关,即元素含量随着粒径的增大而升高, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、Cu、V、Cr、Zn、Pb含量与粒度呈负相关;Ca、Mn、Sr、Zr含量与粒度不具有相关性。在狼山以西沙漠的地表沉积物中, SiO_2 含量与粒度呈正相关; Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 含量与粒径呈负相关; K_2O 、 Na_2O 含量与粒径不具有相关性^[12]。根据其相关性来判断粒度组分对元素的富集贡献率,作为判断其来源的一项指标和生态修复的参考依据^[2]。

近年,已有研究对库布齐沙漠的元素及同位素展开工作。赵万苍等^[13]对中国几大沙漠进行全样的元素检测得出:库布齐沙漠与巴丹吉林、腾格里、毛乌素沙地具有相似的元素特征,平均含量最高的是 $\text{SiO}_2(77.9\%)$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3(10.2\%)$,且二者具有负相关

收稿日期:2022-10-19; 改回日期:2023-02-11

资助项目:“科技兴蒙”行动重点专项(KJXM-EEDS-202006);内蒙古自治区研究生科研创新项目(S20210212Z)

作者简介:孟庆爽(1997—),女,天津人,硕士研究生,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 474897970@qq.com

通信作者:左合君(E-mail: Zuohj@126.com)

关系。桂洪杰^[14]对地表沉积物的全样检测,发现库布齐沙漠以细砂为主、其次是中沙,黏粒的含量最小;元素氧化物平均含量最多的是 SiO_2 (77.09%)和 Al_2O_3 (9.24%),与UCC对比呈现出富 SiO_2 贫 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 CaO 、 K_2O 。库布齐沙漠南缘断面上下层(0~5、5~10 cm)沉积物采样分析结果表明,沙丘粒径与分选参数及其分布随沙丘形态、发育程度和植被生长状况发生变化^[15]。邹宁^[16]以94~105 μm 段粒级作为U-pb对库布齐沙漠物源研究的检测对象,发现由西向东黄河贡献递减,南部山脉和基底物质贡献递增。前人多数基于全样分析对库布齐沙漠的沉积物展开研究,针对物源或粒度效应研究还不够充分。库布齐沙漠的元素是否具有粒度效应?分样之后粒度和元素是一个怎样的关系?不同分样方式结果如何?针对这些问题,在沙漠全域取样的前提下,结合粒度与元素的组成特征,将样品分级处理后进一步阐述粒度与元素的关系,为库布齐沙漠的沉积物研究提供基础资料和理论支撑。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

在库布齐沙漠展开线性调查,采样方式为自东向西(误差<5 km)、自北向南(误差<1 km)等距离取样,挑选典型的示例区域(植被盖度为0、0~10%、10%~20%、20%~30%)地表采样42个(图1)。本文采用目估法^[17]进行植被盖度的划分,为了减小误差,测试全过程由一人完成。根据50 m×50 m的样方,记录样方内的植物信息及比例关系,根据植物总冠幅进行估值^[17]。地表采样时,首先用手持GPS对取样点进行定位,再用铁铲将表面杂物轻轻拨开,用取样铲在25 cm×25 cm的区域内随机铲取0~2 cm厚的地表土样约1 kg装入透明塑料袋内(各类沙丘样品都采集于丘顶)并用记号笔做好标识,带回实验室进行分析,具体点位信息列于表1。

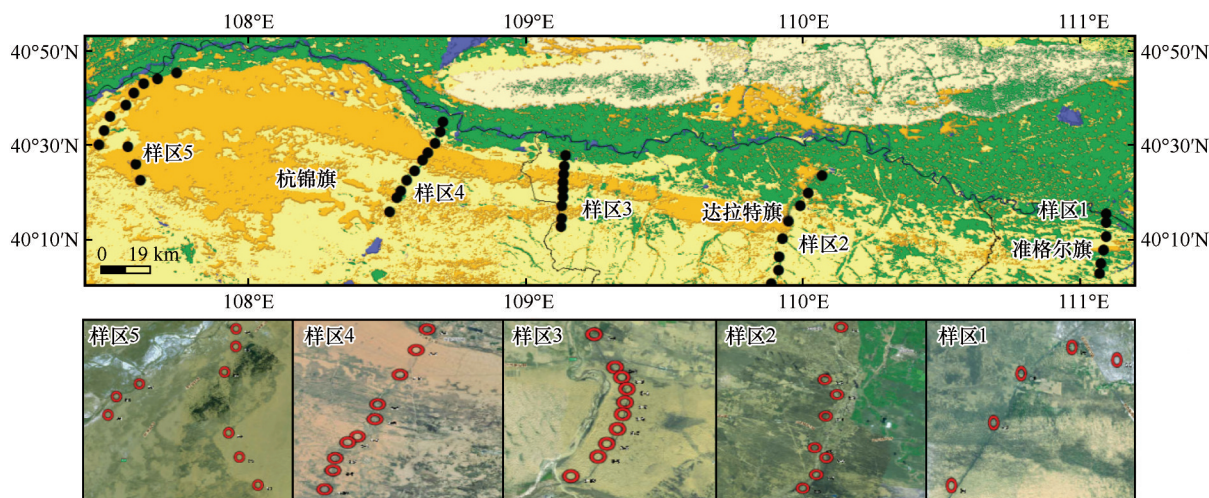


图1 样点分布图

Fig.1 Sample distribution

1.2 方法

1.2.1 粒度的筛分

将地表样自然风干后,取土样100 g进行粒度筛分试验,利用振筛机(震荡8 min)将土样筛分为18个粒径段(0~0.05、0.05~0.063、0.063~0.08、0.08~0.1、0.1~0.125、0.125~0.15、0.15~0.2、0.2~0.25、0.25~0.315、0.315~0.4、0.4~0.5、0.5~0.63、0.63~0.8、0.8~1、1~1.25、1.25~1.6、1.6~2、>2 mm)。筛分后称重,计算各粒径段的百分含量^[18]。

由于库布齐沙漠地表沉积物整体偏细,根据测试后的粒度分布,根据样品体积划分为<0.063、0.063~0.08、0.08~0.1、0.1~0.125、0.125~0.15、0.15~0.2、0.2~0.315、>0.315 mm等8个粒径段展开后续研究。

1.2.2 元素的测定

取适量分装好的样品放入冷冻混合球磨仪MM400的球磨罐中,一般不超过球磨罐的2/3,每个球磨仪中放入一个钢珠,设定转速为30 $\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$,研磨时间为3 min,启动球磨仪进行研磨,完成后装入样

表 1 样点分布信息

Table 1 Sample point distribution information

| 样点个数 | 植物信息 | 图片 | 植被盖度 |
|------|---|---|---------|
| 7 | 没有植物 |  | 0 |
| 11 | 多为 1~1.5 m 的灌木,草本多。藜、猪毛菜、柠条、沙柳、油蒿、大籽蒿、扬柴、花棒、蒺藜。灌草比 3:1 |  | 0~10% |
| 10 | 多为 1 m 以上的灌木,草本很多。猪毛菜、柠条、沙柳、油蒿、大籽蒿、扬柴、花棒、蒺藜。灌草比 3:1 |  | 10%~20% |
| 14 | 多为 1.5 m 以上的灌木,草本很多,有几棵高大乔木。芦苇、猪毛菜、地稍瓜、沙柳、油蒿、柠条、扬柴、花棒、小叶杨、细叶鸢尾、禾草、刺苋、地肤、地锦草、牛筋草、蒺藜。乔灌草比 1:5:2 |  | 20%~30% |

品袋并标记备用。

元素检测所用仪器为 EM-30AX 型扫描电镜能谱仪,将上述研磨好的土样均匀地放在贴有电导胶的样品台上,再将样品台放入喷金器中进行样品的喷金,喷金器所设置的参数为 CHAMNER=10⁻¹Pa, 电流<10 mA,时间=90 s。将制作好的样品放入扫描电镜能谱仪中进行元素检测(SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、MgO、TiO),每个样品重复 3 次,测出元素数据进行分析。

1.2.3 数据处理与分析

平均粒径:

$$M_z = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})}{3} \tag{1}$$

分选系数:

$$\sigma = \frac{(\Phi_{84} - \Phi_{16})}{4} + \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{6.6} \tag{2}$$

偏度:

$$SK = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{84}) - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{(\Phi_5 + \Phi_{95}) - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \tag{3}$$

峰态:

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \tag{4}$$

式中:Φ₅、Φ₁₆、Φ₂₅、Φ₅₀、Φ₇₅、Φ₈₄、Φ₉₀分别代表概率曲线上 5%、16%、25%、50%、75%、84%、90%时所对应的粒径值^[19-20]。

采用化学蚀变指标 CPA、CIA^[21-22]与特征元素比值 Na/K、Ti/Al、Mg/Ca、Al/Na、K/Na 进行分析^[23-24]。

$$CIA = \frac{100 \times nAl_2O_3}{nAl_2O_3 + nCaO + nNa_2O + nK_2O} \tag{5}$$

$$CPA = \frac{100 \times nAl_2O_3}{nAl_2O_3 + nNa_2O} \tag{6}$$

利用 SPSS 分别做粒径段、粒度组分与元素含量的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 粒度分布特征

2.1.1 粒度级配

图 2 为不同植被覆盖度下粒度组分柱状图。库布齐沙漠地表沉积物以极细砂和细砂为主,其组分含量大于 85%,各组分含量平均值极细砂(52.14%)>细砂(39.13%)>中沙(3.85%)>黏粒(1.85%)>粗砂(1.64%)>粉砂(0.72%)>极粗砂(0.66%);植被盖度 0~10% 组分以细砂为主,其他组分均以极细砂为主;在植被覆盖度为 20%~30% 时,黏粒、中砂、粗砂组分含量明显上升,均处于 4 个区域内的最高点,说明该区域沉积环境复杂,人为干扰对粒径的影响较大,沉积物粒度基本靠近极细砂和细砂,说明这两部分含量变化明显,粉粒和极粗砂最小,黏粒和中沙居中。由此推断,对地表沉积物粒度影响最大的组分为极细砂和细砂,黏粒和中沙次之,粉粒和极粗砂对粒度的影响最小。

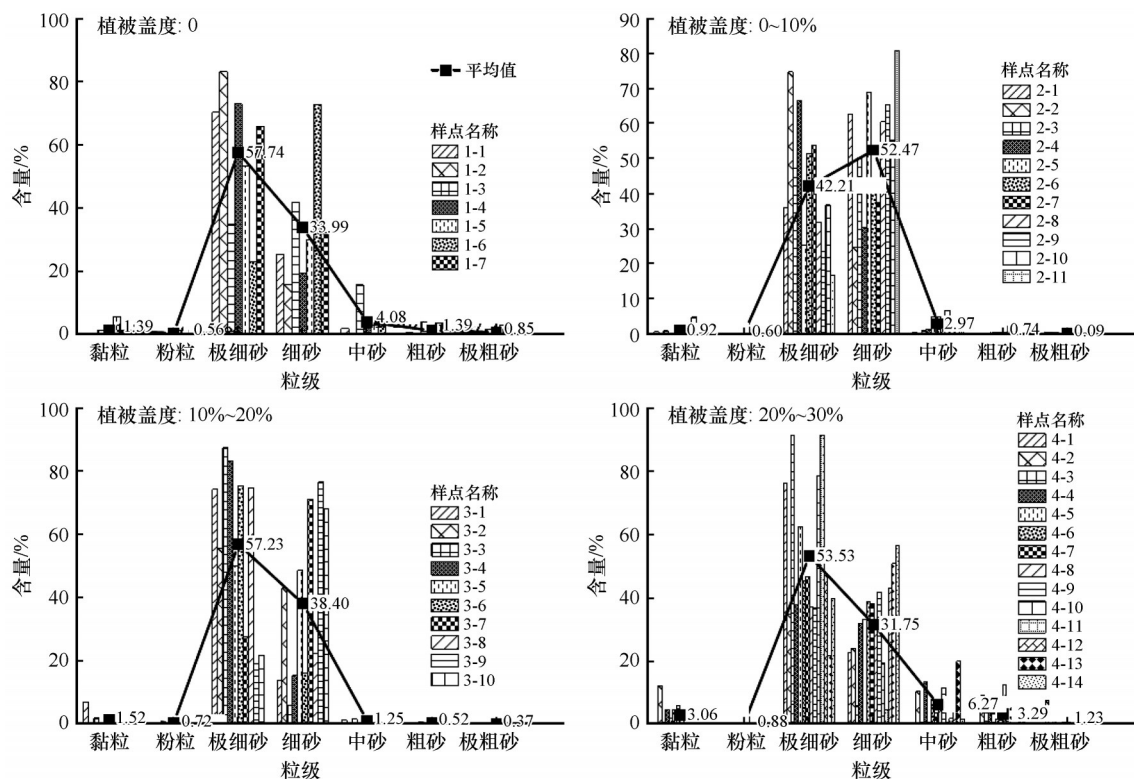


图2 不同植被盖度下粒级组分

Fig.2 Histogram of fractions of different grain sizes

2.1.2 粒度参数特征

根据粒度参数散点图3可知,研究区地表沉积物偏细(平均粒度0.136 mm),分选性极好(0.096 Φ)、沉积物粒度主要在粗粒区(偏度0.33)、粒度分布曲线

很窄(峰态1.69);峰度在植被盖度为0、0~10%、10%~20%、20%~30%的均值分别为1.78、1.31、2.16、1.61,仅植被盖度为0~10%区域沉积物组分以尖窄峰态为主,其他3个区域沉积物表现为很窄峰态分布。

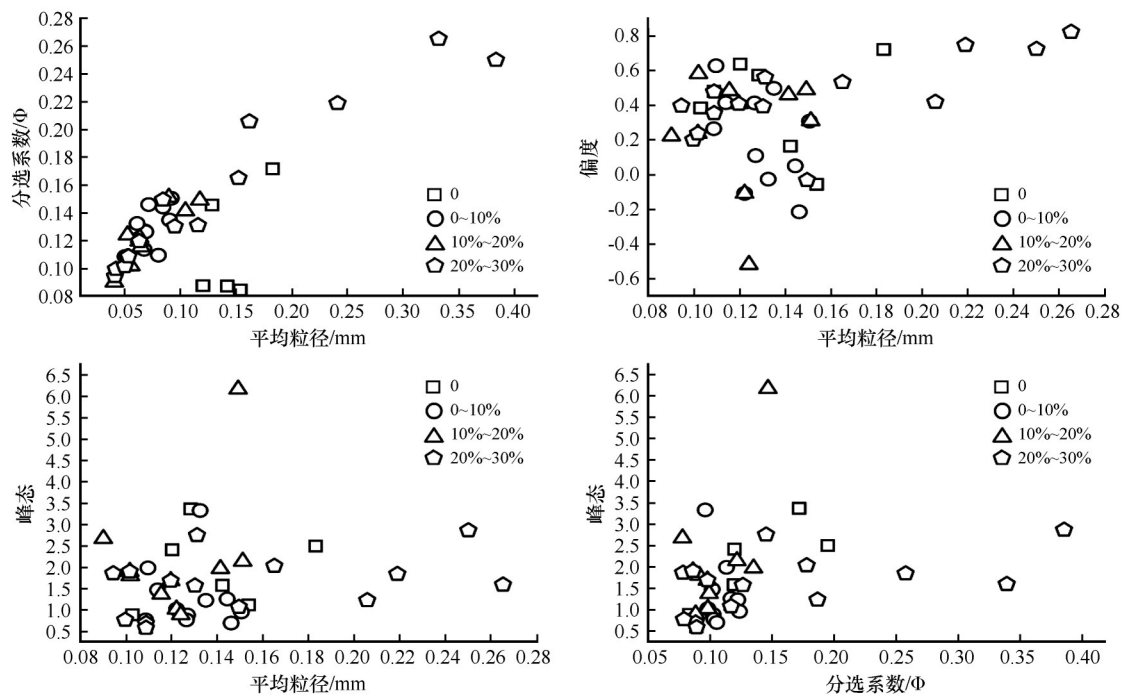


图3 粒度参数结构散点图

Fig.3 Scatter plot of particle size parameter structure

植被盖度为 20%~30% 区域内的参数点分布较为广泛,植被覆盖度为 10%~20% 区域内参数点分布较为集中,其他区域内的参数点分布介于二者之间,没有明显的独立区域。4 个区域内参数点均有重叠部分,植被覆盖度小于 10% 的两个区域内重合度最高,20%~30% 区域内重合度最低,10%~20% 区域介于二者之间。

2.2 地球化学元素分布特征

2.2.1 地球化学元素的丰度对比

砂岩经历了风化作用导致元素含量具有明显的变化(表 2),研究区内地球化学元素化合物平均含量由高到低的排序为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} >$

$\text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{TiO}_2$; 在 4 个区域内,氧化物含量排序只有 20%~30% 区域内的 MgO 的氧化物含量大于 TiO_2 ,其他氧化物排序不变。由变异系数可以看出库布齐沙漠元素氧化物的均衡性为: $\text{SiO}_2 > \text{K}_2\text{O} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{MgO}$; SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 均随植被覆盖度的升高平均含量呈逐渐下降的趋势,其相关系数为 0.888、0.79、0.5273。

不同元素在粒径段中的富集情况也大不相同(图 4)。研究区内 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 富集于 $<0.063 \text{ mm}$ 内; CaO 、 K_2O 富集于 $0.08\sim 0.1 \text{ mm}$ 内; Na_2O 富集于 $0.1\sim 0.125 \text{ mm}$ 内; SiO_2 富集于 $0.125\sim 0.15 \text{ mm}$ 内,说明粒度大的颗粒中不只是有石英,还有其他的矿物。不同区域内元素的富集情况也不

表 2 地球化学元素氧化物含量
Table 2 Geochemical element oxide content

| 采样区域 | | 氧化物含量/% | | | | | | | | CIA | CPA |
|-----------------------|-----|------------------|--------------------------------|--------|------------------|--------------------------------|-------------------|------|------------------|--------|--------|
| | | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | K ₂ O | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | MgO | TiO ₂ | | |
| 全域 (n=42) | 最大值 | 82.424 | 10.070 | 12.590 | 5.51 | 14.510 | 4.35 | 5.86 | 4.11 | 53.060 | 85.919 |
| | 最小值 | 47.731 | 3.040 | 3.052 | 2.73 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 28.080 | 60.193 |
| | 均值 | 76.279 | 5.287 | 5.901 | 4.14 | 8.847 | 2.83 | 2.15 | 1.83 | 39.840 | 73.518 |
| | SD | 5.249 | 1.294 | 1.548 | 0.77 | 2.975 | 1.00 | 1.83 | 0.97 | 8.271 | 7.566 |
| | CV | 6.9 | 24.5 | 26.2 | 19 | 33.6 | 35 | 85 | 53 | 21.1 | 10.4 |
| 植被盖度 0(n=7) | 最大值 | 80.721 | 6.618 | 6.440 | 5.10 | 12.780 | 3.78 | 5.57 | 3.28 | 51.760 | 81.041 |
| | 最小值 | 72.182 | 4.556 | 5.481 | 3.43 | 3.600 | 1.59 | 0.00 | 1.47 | 20.390 | 51.064 |
| | 均值 | 77.722 | 5.326 | 5.926 | 4.47 | 7.192 | 2.99 | 2.17 | 2.31 | 33.780 | 69.007 |
| | SD | 2.875 | 0.643 | 0.330 | 0.60 | 2.968 | 0.73 | 2.08 | 0.60 | 9.135 | 9.249 |
| | CV | 3.7 | 12.1 | 5.6 | 14 | 41.3 | 24 | 96 | 26 | 27.0 | 13.4 |
| 植被盖度 0~10%(n=11) | 最大值 | 80.844 | 7.603 | 8.716 | 5.37 | 14.000 | 4.18 | 3.26 | 3.29 | 52.650 | 84.485 |
| | 最小值 | 70.267 | 3.962 | 4.306 | 3.17 | 6.084 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 29.610 | 61.783 |
| | 均值 | 76.768 | 5.620 | 6.337 | 4.63 | 9.313 | 2.55 | 1.50 | 1.83 | 40.660 | 73.593 |
| | SD | 2.907 | 0.970 | 1.187 | 0.74 | 2.379 | 1.32 | 1.41 | 0.91 | 8.444 | 7.009 |
| | CV | 3.8 | 17.3 | 18.7 | 16 | 25.5 | 52 | 94 | 50 | 20.8 | 9.5 |
| 植被盖度 10%~20%(n=10) | 最大值 | 80.307 | 8.652 | 6.835 | 5.51 | 11.360 | 4.35 | 5.00 | 4.11 | 51.700 | 83.127 |
| | 最小值 | 72.803 | 3.535 | 3.783 | 3.19 | 0.000 | 1.71 | 0.00 | 0.00 | 32.240 | 62.409 |
| | 均值 | 76.653 | 5.461 | 5.498 | 4.06 | 7.560 | 2.86 | 2.55 | 2.25 | 36.150 | 74.524 |
| | SD | 1.925 | 1.274 | 1.009 | 0.66 | 3.057 | 0.73 | 1.63 | 1.13 | 13.850 | 6.015 |
| | CV | 2.5 | 23.3 | 18.3 | 16 | 40.4 | 25 | 64 | 50 | 38.3 | 8.1 |
| 植被盖度 20%~30%(n=14) | 最大值 | 82.424 | 10.07 | 12.59 | 4.70 | 14.510 | 4.24 | 5.86 | 2.51 | 56.150 | 95.023 |
| | 最小值 | 47.731 | 3.040 | 3.052 | 2.73 | 5.763 | 0.61 | 0.00 | 0.00 | 30.100 | 65.515 |
| | 均值 | 74.904 | 4.881 | 5.834 | 3.64 | 10.230 | 2.95 | 2.37 | 1.27 | 44.740 | 76.946 |
| | SD | 8.124 | 1.626 | 2.243 | 0.60 | 2.530 | 0.94 | 1.97 | 0.72 | 8.304 | 7.991 |
| | CV | 10.8 | 33.3 | 38.4 | 16 | 24.7 | 32 | 83 | 57 | 18.6 | 10.4 |

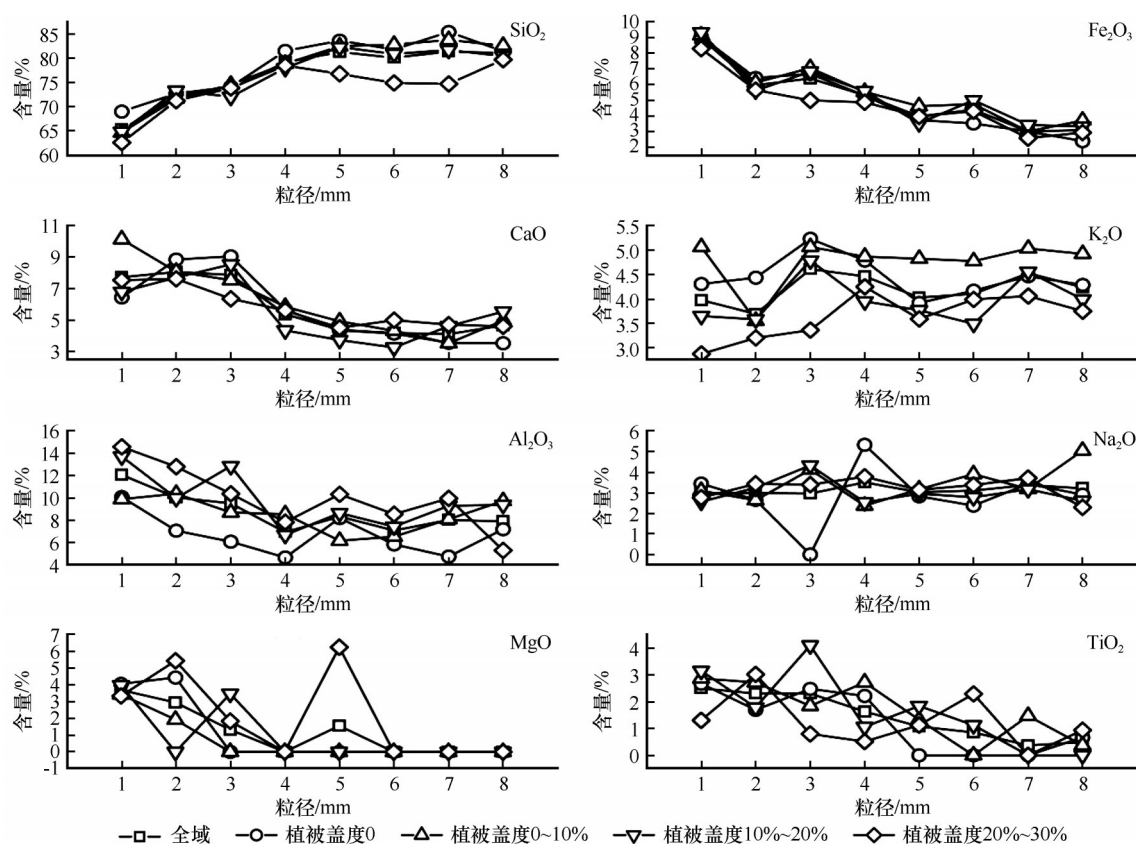


图4 不同粒径段内元素氧化物的分布情况

Fig.4 Distribution of elemental oxides in different particle sizes

同,在裸砂中,Na₂O除0.1~0.125 mm粒径段外,在其他粒径段内均有分布;在0.08~0.1 mm时含量为0,在0.1~0.125 mm时含量最高。这说明在裸砂区域,Na₂O多富集于0.1~0.125 mm内的颗粒,MgO仅分布于<0.08 mm的粒径段内,TiO₂仅分布于<0.125 mm粒径段,其他元素在所有粒径段中均有分布。常量元素含量受人类活动影响较小,造成研究区内氧化物含量差异的是源区被风蚀的母岩成分。

2.2.2 UCC标准化与化学风化特征

将8种氧化物与上陆壳氧化物含量做比较可以看出,研究区内SiO₂、CaO、Fe₂O₃、K₂O、TiO₂等5种氧化物表现为富集状态(图5);Al₂O₃、Na₂O两种元素表现为亏损状态;MgO在植被覆盖度>10%时表现为富集状态,在<10%时表现为亏损状态。MgO在0~10%区域内亏损严重,说明该区域的养分不足;CaO、K₂O在0~10%区域内显示强富集,MgO显示强亏损说明二者之间具有对立关系。整体看,库布齐沙漠表现为富SiO₂、CaO、Fe₂O₃、K₂O、TiO₂贫Al₂O₃、Na₂O现象。

沉积物中的某些元素化学性质较为稳定,可用来作为沉积物物源的示踪元素,虽然某些元素在风

化、淋湿作用下其绝对含量发生了变化,但是与其他元素的比值不会发生变化。4个植被盖度区域的比值不同且分布趋势也有所差异,但4个区域的走势相似,表明它们具有相同的源区,但比值大小略有差异,说明源区母岩之间具有一定的差异。

对化学风化指标的分析可知,CPA(60.2~85.9,均值73.52)、CIA(28.08~53.06,均值39.83)和Na/K(0.17~1.19,均值0.75)值显示库布齐沙漠处于未风化或弱风化状态(较弱的去Na、Ca阶段)。将三者做相关性分析散点图可知,Na/K与CPA具有负相关性($r=0.572$),且二者所指示的风化程度一致,风化程度均表现为随着植被盖度的升高而加剧;Na/K与CIA不具有明显的相关性(图5)。

2.3 地球化学元素的粒度效应

2.3.1 元素含量与粒度组分的关系

在植被盖度为0~10%区域内,SiO₂与粉粒呈正相关,K₂O与极粗砂组分呈正相关,Na₂O与细砂呈显著负相关(表3),说明在该区域内,粉粒组分和极粗砂组分对该区域中SiO₂和K₂O含量富集贡献大,元素含量富集,在细砂组分对Na₂O的含量贡献低,

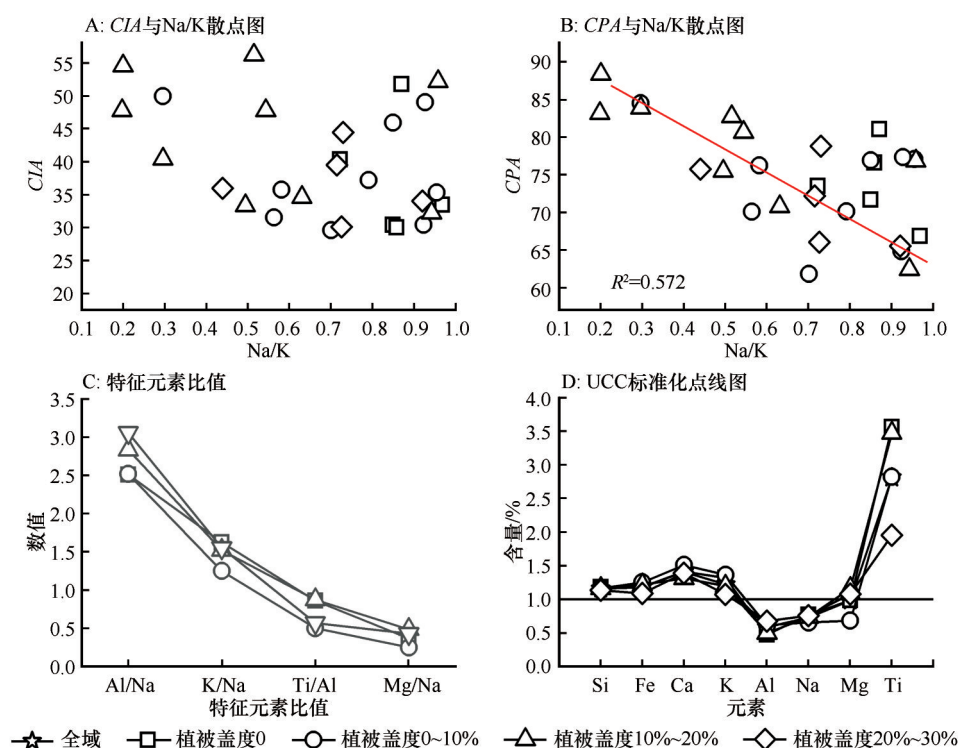


图5 UCC标准化与化学风化特征对比图

Fig.5 Comparison of UCC standardization and chemical weathering characteristics

元素含量低。不同区域内与粒度组分相关的元素种类不同,这与区域内植物本身特性及固沙能力的强弱有关,在植被盖度最大时,与粒度组分具有相关性的元素种类最多。不同区域内的粒度组分与元素含量的关系还可以说明该区域内富含的矿物情况,在植被盖度为0时,极粗砂与 SiO_2 含量显著负相关($r=-0.894$),与 CaO ($r=0.684$)、 Fe_2O_3 ($r=0.784$)含量显著正相关,说明该区域的粗颗粒内不仅有石英颗粒,还有一些富含 CaO 和 Fe_2O_3 的矿物成分; MgO 与粒度组分没有关系,说明 MgO 可赋存于任意颗粒上其含量与粒度无关,不受粒度控制;黏粒组分与 Al_2O_3 呈显著正相关,与 SiO_2 呈显著负相关,说明黏粒组分中长石与石英呈负相关,具有此消彼长的关系。粒径与 CaO 、 MgO 、 TiO_2 含量显著负相关,与 SiO_2 呈显著正相关,均为受控元素;其他与粒径不具有相关性的元素为不受控元素。

2.3.2 元素含量与粒径段的关系

不同区域内氧化物与粒径段的关系不同(图6)。在裸砂区域, SiO_2 含量与粒径呈负指数函数关系($A<0$),元素含量随着粒径段的增大而增大,说明它富集在抗风能力较强的粗颗粒矿物中; Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 与粒径段呈正指数函数关系($A>0$),说明它的抗风沙能力较弱,存在于容易破碎或蚀变的矿物中,风化过程中破碎颗粒表面积越大所

吸附的元素越多,碳酸盐矿物和碱金属物质化学性质较为活泼,化学性质与温度有关且在自然界中分布较广,高温下极易与其他元素结合,在风化过程中容易发生不同程度的淋溶和富集。由于区域的不同,发生风化的程度有所差异,导致元素与粒度的关系也有所差异,根据相关性可将元素种类分为3种: SiO_2 、 K_2O (与粒径呈负指数关系); Fe_2O_3 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 (与粒径呈正指数关系或线性关系); Na_2O (与粒度没有关系)。

沉积物粒径与常量元素之间极为显著的相关性是因沉积物中不同粒级的矿物成分不同造成的。一般来说,粒径较大的沉积物颗粒主要由耐风化的石英、长石和云母等原生矿物所构成,这些矿物中 Si 含量较高,而 Al 、 Fe 、 Mg 、 K 等元素含量较低。细粒级沉积物则主要由层状硅酸盐和铁、锰氧化物等次生黏土矿物构成,其特点是 Si 含量相对较低,而 Al 、 Fe 、 Mg 、 K 等元素含量较高,从而造成了常量元素含量随沉积物粒径变化发生有规律的变化。

3 讨论与结论

3.1 讨论

沉积物的粒度组成受多种因素的影响^[25-27],粒度分布的复杂性和元素自身的特性使得它们之间

表 3 不同区域元素氧化物与粒度组分的相关系数

Table 3 Relationship between elemental oxides and particle size components in different regions

| 不同区域 | 元素氧化物 | 黏粒 | 粉粒 | 极细砂 | 细砂 | 中沙 | 粗砂 | 极粗砂 | 粒径 |
|-----------------|--------------------------------|----------|----------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 植被盖度 0 | SiO ₂ | -0.344 | -0.244 | 0.068 | 0.054 | -0.108 | -0.351 | -0.469 | 0.789** |
| | Fe ₂ O ₃ | 0.173 | 0.426 | -0.619 | 0.734 | -0.173 | -0.117 | 0.033 | -0.772** |
| | CaO | 0.649 | 0.829* | -0.278 | 0.140 | 0.068 | 0.441 | 0.552 | -0.695* |
| | K ₂ O | 0.385 | 0.433 | -0.551 | 0.332 | 0.569 | 0.623 | 0.511 | 0.019 |
| | Al ₂ O ₃ | -0.055 | 0.216 | 0.490 | -0.552 | -0.077 | 0.100 | 0.134 | 0.210 |
| | Na ₂ O | 0.276 | 0.567 | 0.007 | -0.021 | -0.187 | 0.100 | 0.264 | -0.486 |
| | MgO | 0.216 | -0.119 | -0.063 | -0.052 | 0.234 | 0.270 | 0.231 | 0.035 |
| | TiO ₂ | -0.578 | -0.279 | -0.174 | 0.480 | -0.365 | -0.736 | -0.786* | -0.871** |
| 植被盖度 0~10% | SiO ₂ | 0.488 | 0.698* | -0.012 | -0.07 | 0.024 | 0.487 | 0.276 | 0.795** |
| | Fe ₂ O ₃ | -0.151 | -0.059 | -0.281 | 0.193 | 0.807** | 0.287 | 0.154 | -0.625* |
| | CaO | -0.536 | -0.447 | 0.309 | -0.294 | 0.249 | -0.211 | 0.105 | -0.662* |
| | K ₂ O | 0.244 | 0.592 | 0.003 | -0.161 | 0.659* | 0.838** | 0.666* | 0.006 |
| | Al ₂ O ₃ | 0.152 | -0.030 | -0.076 | 0.129 | -0.374 | -0.305 | -0.115 | -0.043 |
| | Na ₂ O | -0.589 | -0.300 | 0.637* | -0.645* | 0.172 | 0.142 | 0.486 | 0.037 |
| | MgO | -0.415 | -0.529 | 0.586 | -0.485 | -0.503 | -0.416 | -0.215 | -0.520 |
| | TiO ₂ | 0.146 | 0.014 | -0.600 | 0.543 | 0.563 | 0.109 | -0.311 | -0.018 |
| 植被盖度 10%~20% | SiO ₂ | -0.081 | -0.259 | -0.288 | 0.241 | 0.690* | 0.542 | 0.294 | 0.631** |
| | Fe ₂ O ₃ | -0.403 | -0.168 | -0.048 | 0.116 | -0.368 | -0.398 | -0.199 | -0.498 |
| | CaO | -0.232 | -0.009 | -0.135 | 0.186 | -0.358 | -0.566 | -0.128 | -0.523* |
| | K ₂ O | -0.123 | 0.121 | 0.073 | -0.052 | -0.235 | -0.281 | 0.222 | -0.002 |
| | Al ₂ O ₃ | 0.606 | 0.588 | 0.372 | -0.465 | 0.449 | 0.421 | 0.294 | 0.155 |
| | Na ₂ O | 0.058 | 0.179 | 0.666* | -0.606 | -0.498 | -0.494 | -0.631 | 0.025 |
| | MgO | -0.101 | -0.025 | 0.470 | -0.449 | -0.292 | 0.077 | 0.314 | 0.278 |
| | TiO ₂ | -0.276 | -0.401 | -0.296 | 0.312 | 0.094 | 0.046 | 0.123 | -0.562** |
| 植被盖度 20%~30% | SiO ₂ | -0.829** | -0.455 | 0.284 | 0.183 | -0.265 | -0.640* | -0.894** | 0.629* |
| | Fe ₂ O ₃ | 0.644* | 0.319 | -0.249 | -0.094 | 0.160 | 0.491 | 0.784** | -0.525* |
| | CaO | 0.287 | 0.847** | -0.360 | 0.004 | 0.315 | 0.803** | 0.684** | -0.708** |
| | K ₂ O | -0.444 | -0.167 | -0.172 | 0.437 | 0.061 | -0.187 | -0.363 | -0.058 |
| | Al ₂ O ₃ | 0.574* | 0.243 | -0.051 | -0.264 | 0.032 | 0.428 | 0.532 | 0.332 |
| | Na ₂ O | -0.206 | -0.668** | 0.160 | 0.079 | 0.018 | -0.586* | -0.661* | -0.145 |
| | MgO | 0.480 | 0.221 | 0.019 | -0.206 | -0.146 | 0.209 | 0.449 | 0.062 |
| | TiO ₂ | 0.077 | -0.058 | -0.152 | 0.083 | 0.155 | 0.089 | 0.280 | -0.641* |

*在 0.05 级别(双尾)相关性显著;**在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

的相关性可作为物源研究的重要指标^[11-13]。刘娜娜^[12]在狼山以西沙漠研究得出, SiO₂ 含量与粒度正相关, Fe₂O₃、MgO、CaO、Al₂O₃ 含量与粒径呈负相关, K₂O、Na₂O 含量与粒径不具有相关性; 本文研究也证实库布齐沙漠粒度与元素之间具有一定的相关性, 但是呈现 SiO₂、K₂O 含量与粒径段显著正相

关, Fe₂O₃、CaO、Al₂O₃、MgO、TiO₂ 含量与粒径段显著负相关, Na₂O 含量不受粒度控制; 结果显示不同区域粒度与元素的相关性有所差异, SiO₂、Fe₂O₃、CaO、Al₂O₃、MgO、Na₂O 含量与粒度的相关性与前人研究结果一致, 但是 K₂O 含量显示的差异主要是由于研究区内的矿物成分不同或是沉积物来源不同导致

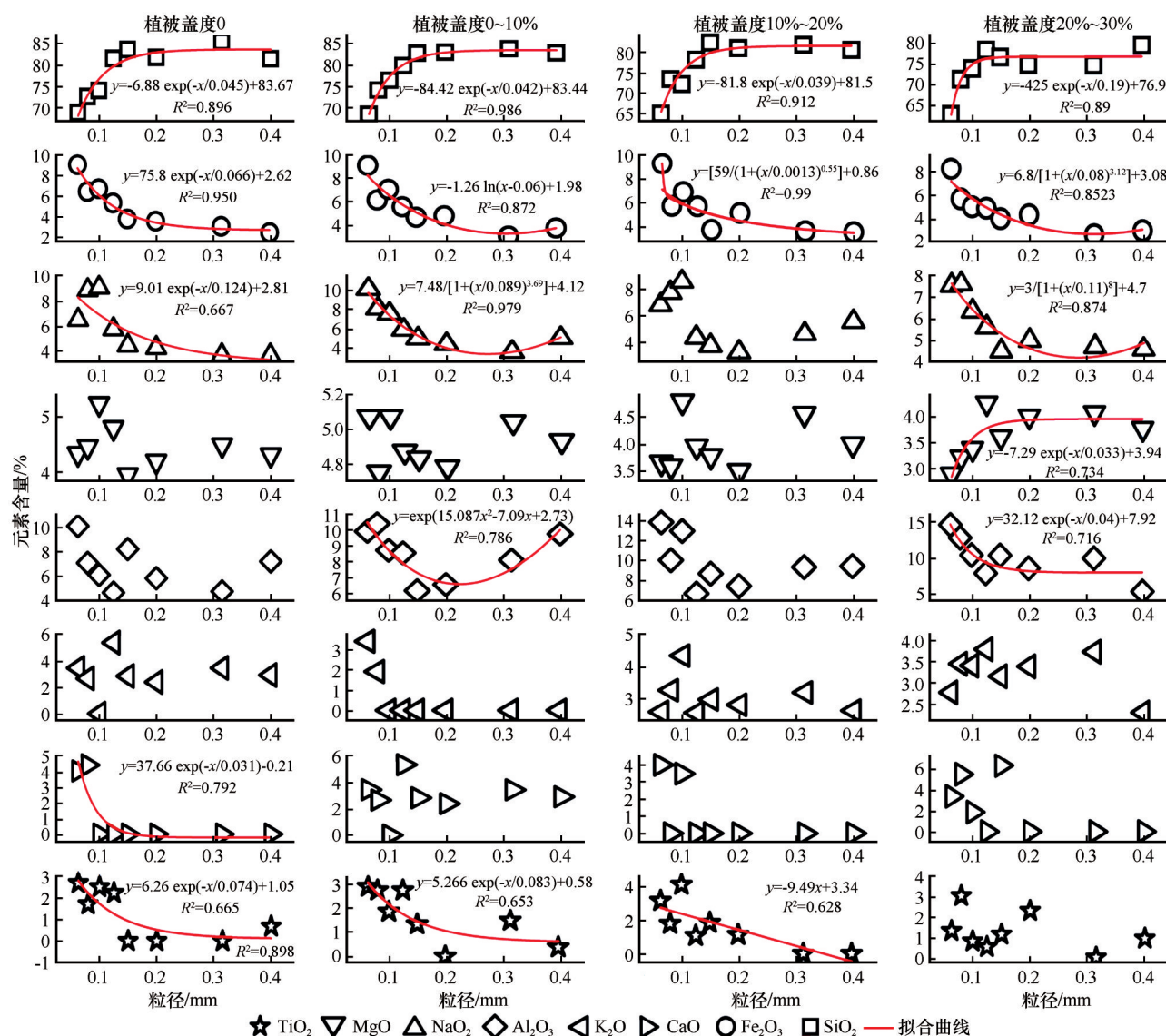


图6 元素氧化物与粒径段的相关性散点图

Fig.6 Scatter plot of correlation between elemental oxides and particle size segment

的。桂洪杰^[14]认为库布齐沙漠以细砂为主、其次是中砂，黏粒的含量最小；元素氧化物平均含量最多的是SiO₂ (77.09%)和Al₂O₃ (9.24%)，与UCC对比呈现出富SiO₂、贫Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、Na₂O、CaO、K₂O；本文得出库布齐沙漠确实以细砂和极细砂为主（二者占比超85%），元素氧化物含量以SiO₂和Al₂O₃为主（二者占比超80%），但与UCC对比呈现富SiO₂、CaO、Fe₂O₃、K₂O、TiO₂、贫Al₂O₃、Na₂O现象，两项实验结果对比差异主要由于取样方式和分级处理导致的。

地球化学元素的粒度效应对沉积物研究具有显著影响，分级前后元素与粒度的关系差异明显，在分级前，粒度与SiO₂含量显著正相关，与CaO、MgO、TiO₂含量显著负相关；Fe₂O₃、K₂O、Al₂O₃、TiO₂

含量与粒度无关。分级后，SiO₂、K₂O含量与粒度呈负指数函数关系；Fe₂O₃、CaO、Al₂O₃、MgO、TiO₂含量与粒度呈正指数函数或线性函数关系；Na₂O含量与粒度无关。这说明分级处理可以分析出更多的信息，缩小了粒度效应对沉积物研究的误差。不同粒径组分对元素富集贡献不同，张立娟等^[2]在雷州半岛区域对稀土元素与粒度的关系展开研究，发现稀土元素与黏粒组分呈显著正相关，与粉粒组分呈显著负相关。本文主要针对常量元素与粒度的关系展开研究，结果显示，黏粒组分对Al₂O₃ ($r=0.574$)的富集贡献大；粉粒组分对SiO₂ ($r=0.829$)、CaO ($r=0.829$)的富集贡献大；中砂组分对Fe₂O₃ ($r=0.807$)的富集贡献大；粗砂组分对K₂O ($r=0.838$)的富集贡献大；极细砂组分对Na₂O ($r=0.637$)的富集贡献大。

结合不同粒度组分对元素含量的富集贡献率可以推测沉积物的搬运堆积过程以及元素的敏感组分。本研究区显示细颗粒对 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 Na_2O 的贡献率大,将细颗粒组分进一步分级可以缩小元素研究的误差;粗颗粒对 Fe_2O_3 、 K_2O 的贡献率大,可以根据粒度分布特征选取粗颗粒进行元素的示踪研究。基于以上结果,本文对元素与粒度的关系进行拟合得出: SiO_2 、 K_2O 含量与粒度呈负指数函数关系; Fe_2O_3 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 含量与粒度呈正指数函数或线性函数关系。对比两项研究结果,前者没有对数据进行适当的拟合,只用简单的相关性来说明元素与粒度的关系,在对元素含量与粒径进行数据拟合的时候发现,元素本身的化学性质对分布情况有一定的影响,元素与粒度的关系应具体地表现出来。本文以常量元素为例阐述了分级处理的优势以及分级处理前后8种元素与粒度关系,分析了库布齐沙漠元素的粒度效应,证实了粒度分级处理能解读出更多蕴含在细颗粒物中的环境信息。

3.2 结论

库布齐沙漠地表沉积物以细砂和极细砂为主,二者含量大于85%;平均粒径偏细,分选性极好,呈现尖峰态;元素氧化物以 SiO_2 、 Al_2O_3 为主,二者占比在80%以上,呈此消彼长的关系;不同粒径段的元素含量有差异, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 富集于<0.063 mm内; CaO 、 K_2O 富集于0.08~0.1 mm; Na_2O 富集于0.1~0.125 mm; SiO_2 富集于0.125~0.15 mm,说明粒度大的颗粒中不只是有石英,还有其他的矿物。

库布齐沙漠不同区域表层沉积物的源区相似但具体成分有所差异,表现为富 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 贫 Al_2O_3 、 Na_2O 现象;化学风化系数 CI_A (39.83)、 CPA (73.52) 显示处于未风化或弱风化状态;不同粒径段对元素的富集贡献不同。

分级前后元素与粒度的关系差异明显,在分级前,粒度与 SiO_2 呈显著正相关,与 CaO 、 MgO 、 TiO_2 含量显著负相关; Fe_2O_3 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 Na_2O 含量与粒度无关。分级后, SiO_2 、 K_2O 含量与粒度呈负指数函数关系; Fe_2O_3 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 含量与粒度呈正指数函数或线性函数关系; Na_2O 含量与粒度无关。

参考文献:

- [1] 王兆奇,于东生.泉州湾表层沉积物粒度与元素地球化学特征分析[J].应用海洋学学报,2015,34(4):568-579.
- [2] 张立娟,李徐生,李德成,等.雷州半岛玄武岩母质土壤剖面稀土元素分布及其与常量元素、粒度的关系[J].土壤学报,2011,48(1):1-9.
- [3] 张俊,孟宪伟,王湘芹.晚第四纪南海北部陆坡沉积物常量元素比值对气候变冷事件的指示意义[J].海洋学报,2013,35(4):106-111.
- [4] 杜德文,石学法,孟宪伟,等.黄海沉积物地球化学的粒度效应[J].海洋科学进展,2003(1):78-82.
- [5] 赵一阳,鄯明才,李安春,等.中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义[J].中国地质,2002(2):181-185.
- [6] Pyle D. Principles of geochemistry[J]. Choice Reviews Online, 1998,35(7):743-748.
- [7] 伍永秋,王立辉,杜世松,等.青藏高原典型地区沉积物地球化学特征与矿物组成的粒度效应[J].冰川冻土,2022,44(4):1140-1149.
- [8] Liu Z T, Yang X P. Geochemical-geomorphological evidence for the provenance of aeolian sands and sedimentary environments in the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2013, 87(3):871-884.
- [9] Dong X, Tian J, Zhang R H, et al. Study on the relationship between soil emissivity spectra and content of soil elements[J]. Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi, 2017,37(2):557-565.
- [10] Ali A, Fayez-Hassan M, Mansour N A, et al. Elemental analysis and radionuclides monitoring of Beach Black Sand at North of Nile Delta, Egypt[J]. Pure and Applied Geophysics, 2018(6):2269-2278.
- [11] 饶文波,陈骏,杨杰东,等.中国北方沙漠风成沙不同粒级组分的 Sr-Nd 同位素特征[J].高校地质学报,2009,15(2):159-164.
- [12] 刘娜娜.风成作用对狼山以西沙漠沉积物理化性质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [13] 赵万苍,刘连文,陈骏,等.中国沙漠元素地球化学区域特征及其对黄土物源的指示意义[J].地球科学,2019,49(9):1425-1438.
- [14] 桂洪杰.黄河宁蒙河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [15] 吴霞,哈斯,杜会石,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.
- [16] 邹宁.库布齐沙漠碎屑锆石 U-Pb 年龄组成及其物源分析[D].西安:西北大学,2017.
- [17] 杨琴,蒲红梅,赵学春,等.3种人工草地不同植被覆盖度实地测量方法比较[J].应用与环境生物学报,2021,27(1):220-227.
- [18] Lancaster N. Grain size characteristics of linear dunes in the southwestern Kalahari[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1986,56:395-495.
- [19] 贾建军,高抒,薛允传.图解法与矩法沉积物粒度参数的对比

- [J]. 海洋与湖沼, 2002(6): 577–582.
- [20] Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3–26.
- [21] 金秉福. 末次冰期东海南部沉积物特征和物源分析[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [22] 张小梅, 靳鹤龄, 刘冰. 末次盛冰期以来库布齐沙漠环境变化[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5): 81–93.
- [23] Björn B. An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies [J]. *Quaternary International*, 2010, 240(1): 12–21.
- [24] Zhang H Y. Provenance of loess deposits in the Eastern Qinling Mountains (central China) and their implications for the paleoenvironment [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 43: 94–102.
- [25] 李继彦, 周玲, 刘益, 等. 晋西北地区表层土壤粒度与地球化学元素组成[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 155–162.
- [26] 李小妹, 严平, 吴伟, 等. 毛布拉格孔兑地表风沙沉积物粒度与地球化学元素分布特征[J]. *干旱区地理*, 2016, 36(3): 468–476.
- [27] 刘倩倩, 杨小平. 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数的空间变化及其成因[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 158–168.

Relationship between constant elements and granularity of the surface sediment in the Kubuqi Desert

Meng Qingshuang, Zuo Hejun, Yan Min, Wang Haibing, Xi Cheng

(College of Desert Control Science and Engineering / Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The weathering process of surface sediments causes the migration or enrichment of elements in each grain level. Granularity classification can deeply explain the relationship between elements and granularity. The coverage of different vegetation in the Kubuqi Desert was selected to determine the element content of grain size distribution characteristics. The results show that: (1) The Kubuqi Desert is mainly dominated by fine sand and extremely fine sand (both account for more than 85%), and the constant elements are mainly SiO_2 and Al_2O_3 (accounting for more than 80% and showing the opposite relationship), while other elements have low content; the enrichment of different granular components is different. (2) CPA (60.2–85.9), CIA (28.08–53.06) value of surface sediment shows that the area is in unweathered or weakly weathered state; the study area shows rich SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 poor Al_2O_3 and Na_2O ; SiO_2 and K_2O are significantly positively correlated with particle size, Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , MgO and TiO_2 are significantly negatively correlated with particle size, and Na_2O is not controlled by particle size. (3) Before classification, the four elements of CaO , SiO_2 , MgO and TiO_2 are related with the particle size; after classification, SiO_2 , K_2O , Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , MgO and TiO_2 all have certain correlation with the particle size segment, detailed grading can indeed interpret more information contained in the elements.

Key words: Kubuqi Desert; sediment particle sizes; geo-chemistry elements; granularity effect