

引用格式:陈碧珊,徐榆婷,廖正旭,等. 2026. 毛乌素沙漠南部古今沙丘微量元素对比分析[J]. 沉积学报, 44(4): 1397-1406.

CHEN BiShan, XU YuTing, LIAO ZhengXu, et al. 2026. Comparison of Trace Elements in Modern and Ancient Sand Dunes in the Southern Mu Us Desert[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1397-1406.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.002

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.002

毛乌素沙漠南部古今沙丘微量元素对比分析

陈碧珊, 徐榆婷, 廖正旭, 招佳彤, 邓家怡, 牛东风

岭南师范学院地理科学学院, 广东湛江 524048

摘要 【目的】毛乌素沙漠南部古今沙丘微量元素记录了风化、搬运和沉积过程的环境信息, 分析这些信息有助于深入认识该区的沉积物来源及气候演化特征。【方法】采集毛乌素沙漠南部现代沙丘与古沙丘样品, 分析磷(P)、铅(Pb)和铷(Rb)等14种微量元素含量特征和相关性, 探讨不同类型沙丘微量元素含量的差异及空间分布特征。【结果】(1)古今沙丘微量元素以Ba、Sr、P元素为主, As、Nb、Cu三种微量元素含量较低, 其分布规律具有一定的区域性。(2)固定沙丘微量元素含量明显高于流动沙丘, 主要与沙丘的性质及植被覆盖有关; 而古沙丘中微量元素的含量高于现代沙丘, 主要受沉积历史、气候变化及特殊的地貌位置等因素影响。(3)古今沙丘中Sr/Cu、Rb/Sr和Sr/Ba的含量比值相当, 表明两者形成于相似的沉积环境。【结论】古今沙丘微量元素含量和不同类型沙丘微量元素存在一定的相似性和差异性; 古沙丘微量元素含量变化规律一定程度上可以为现代沙丘的来源提供线索; 古今沙丘中微量元素比值具有一定的气候环境指示意义。

关键词 毛乌素沙漠; 现代沙丘; 古沙丘; 微量元素

第一作者 陈碧珊, 女, 1982年出生, 博士, 副教授, 第四纪环境演变、孢粉学, E-mail: chenbishan2008@126.com

通信作者 牛东风, 男, 博士, 教授, 晚第四纪气候变化、地层学, E-mail: niudongfeng@lingnan.edu.cn

中图分类号: P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)04-1397-10

0 引言

中国的沙漠沙地是全球脆弱的生态系统之一。最近20年来, 我国学者采用微量元素作为环境代用指标示踪, 对这一广袤区域的生态环境, 特别是涉及以沙丘为标志的沙漠演化进行了颇有意义的探讨。如新疆伊犁盆地的塔克尔莫乎尔沙漠(靳建辉等, 2011)、内蒙古阿拉善高原的巴丹吉林沙漠(Guo *et al.*, 2014)、腾格里沙漠(孟洁等, 2015; 陈敏等, 2022)。相比较而言, 内蒙古鄂尔多斯高原毛乌素沙漠在这方面的工作较多, 起步亦较早, 涉及晚第四纪MIS1-5各个阶段的微量元素指示的气候变化(Yao *et al.*, 2002; 李明启等, 2006; Du *et al.*, 2011; 牛东风等, 2011, 2015; 司月君等, 2012; Si *et al.*, 2013, 2014; Wen *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2022)。然而, 迄今为止毛乌素沙漠乃至我国沙漠对于现代沙丘, 特别是涉及古今沙丘微量元素的对比与分析的探索则鲜为所见。就本文涉及的毛乌素沙漠来说, 古今沙丘微量

元素含量之间是否存在差异, 古沙丘微量元素的信息是否能够现代沙丘的来源提供线索? 古今沙丘和不同类型沙丘微量元素含量的异同及其指示的意义如何? 这些问题尚不明确。因此, 开展本研究的意义不言而喻。

本研究选取鄂尔多斯高原毛乌素沙漠南部的现代沙丘与萨拉乌苏河谷的古沙丘为研究对象, 对比分析古今沙丘的微量元素含量特征和相关性, 探讨不同类型沙丘的微量元素含量与空间分布特点、元素揭示的古今沙丘沉积物之间的关系, 为深入了解该区域沙丘的物质来源和气候环境意义提供科学依据。

1 区域概况与研究方法

1.1 区域概况

鄂尔多斯高原位于黄河“几字湾”之内, 西、北、东三面被黄河所环绕, 南以长城为界, 海拔介于

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2024-12-31; 录用日期: 2025-03-07; 网络出版日期: 2025-03-07

基金项目: 萨拉乌苏考古遗址公园管理局校地合作项目(slws0508); 2022年度广东省教育科学规划课题(2022GXJK258)

1 100~1 500 m。毛乌素沙漠位于高原的东南部,在中国综合自然区划上属西北干旱区温带(II10)与东部季风区暖温带(I3)之间(刘明光,2010)的过渡地带(图1a)。该地区年平均温度 $6.0^{\circ}\text{C}\sim 8.5^{\circ}\text{C}$,一月平均温度平均气温 $-9.5^{\circ}\text{C}\sim -12^{\circ}\text{C}$,七月平均温度为 $22^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$ 。全区平均年降水量为东南部440 mm,向西递减至250 mm,最大降水量集中于7—9月;蒸发强烈,全年蒸发量为1 800~2 500 mm。主要土壤类型为栗钙土、棕钙土,盐碱土以及沙土等(吕珂欣等,2024)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

本研究在毛乌素沙漠南部采集33个现代沙丘样品;古沙丘样品来自萨拉乌苏河谷滴哨沟湾剖面全新统DGS1层段(以下称DGS1)(牛东风等,2015)和米浪沟湾剖面全新统MGS1层段(以下称MGS1)(牛东风等,2016),共34个样品。现代沙丘根据地表植被覆盖状况划分为地表无植被覆盖的流动沙丘(MD)和有植被覆盖的固定沙丘(MFD);古沙丘按沉

积物粒度和化学元素反映的沉积结构特征(舒培仙等,2016;刘振宇等,2019)划分为古流动沙丘(D)和固定沙丘(FD)。现代流动沙丘样品共27个,编号记为MD1~MD27;现代固定沙丘样品6个,编号记为MFD28~MFD33。古沙丘样品共34个,其中滴哨沟湾剖面样品编号记为DGS1-1~DGS1-25;米浪沟湾的剖面样品编号记为MGS1-1~MGS1-9;现代沙丘样点的分布和古沙丘样点的分布如图1b所示。

1.2.2 实验室处理

古沙丘样品分析工作在中国科学院西北生态环境资源研究院公共技术中心实验室进行,采用的分析仪器为荷兰帕纳科公司生产的顺序式波长色散型X射线荧光光谱仪(型号:Axios);现代沙丘样品分析工作在华南师范学院地理科学学院实验室进行,分析仪器为荷兰帕纳科公司生产的偏振能量色散X射线荧光光谱仪(型号:Epsilon 5)。具体的处理步骤如下:将样品低温烘干,去除杂物后使用振动磨样机研磨90 s,然后称取4 g被研磨至过200目筛的样品,将其在 105°C 下烘干后放入制样模具,用硼酸镶边垫

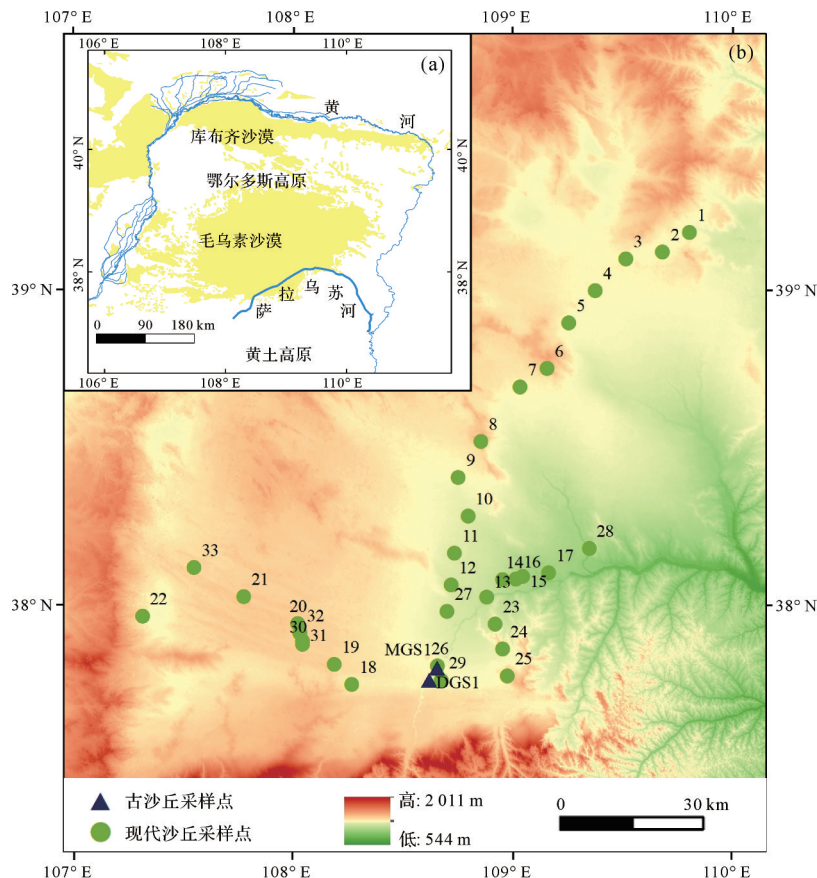


图1 采样点地理位置(a)及分布图(b)

Fig.1 Geographic location (a) and distribution (b) of sampling sites

底,在30 t的压力下压成直径为32 mm的样片,分析测量后经计算机处理得出磷(P)、铅(Pb)、铷(Rb)、铌(Nb)、锆(Zr)、钒(V)、锶(Sr)、铜(Cu)、镍(Ni)、砷(As)、钡(Ba)、钴(Co)、铬(Cr)、锌(Zn)14种微量元素的含量(牛东风等,2015)。

1.2.3 数据分析方法

运用Office2010 Excel软件,对采集到的古今沙丘微量元素含量等数据进行统计和初步分析。计算古今沙丘微量元素的平均值、最大值、最小值、标准差、变异系数等;利用SPSS19.0统计分析软件对微量元素之间进行相关性分析;对比分析不同沉积类型微量元素特征;利用ArcGIS10.8软件对现代沙丘不同微量元素的含量进行可视化分析,探讨现代沙丘微量元素的空间分布规律。

2 结果与分析

2.1 古今沙丘微量元素含量特征

2.1.1 现代沙丘

对毛乌素沙漠南部现代沙丘中P、Pb、Rb等14种微量元素进行统计分析,结果如表1所示。从表1可知,毛乌素沙漠南部现代沙丘中Ba、Sr、P、Zr微量元素的含量较高。Ba、Sr、P、Zr含量的最大值分别为948.00 $\mu\text{g/g}$ 、391.00 $\mu\text{g/g}$ 、345.00 $\mu\text{g/g}$ 和210.00 $\mu\text{g/g}$;而As、Nb、Cu、Pb四种微量元素的含量较低。在现代沙丘中,Ba元素的含量最高、变化范围最广,介于

379.00~948.00 $\mu\text{g/g}$;As元素的含量最低、变化范围最小,介于0~2.60 $\mu\text{g/g}$ 。

沙丘微量元素含量的变异程度可以用变异系数CV来表示,变异系数又称为离散系数或相对离散度,是衡量数据集的变幅大小和稳定性的指标。变异系数的值越大,说明数据的变化幅度越大,稳定性越弱,反之亦然(徐烨等,2018)。由表1可知,As元素的变异系数最高,为525.83%,具有强变异性,即说明As元素的空间异质性非常高,对环境的敏感性极强,影响因素极其复杂。Sr、Ni、Cr三种元素和P、V、Co三种元素的变异系数互相接近,变异系数CV分别在45%和23%左右,均属于中等变异程度;Cu和Ba元素的变异系数分别为33.13%和33.12%,变异系数只相差0.01%,即变异程度相差较小。除此之外,Rb、Nb和Pb三种元素的变异系数均较小,接近弱变异,最小的是Rb元素,变异系数只有10.60%。综合以上分析,大多数微量元素的变异系数均在10%和100%的范围内,属于中等变异程度,受区域的土壤母质、气候、地形和植被等多种因素的综合影响。

2.1.2 古沙丘

对毛乌素沙漠南部古沙丘中P、Pb、Rb等14种微量元素进行统计分析,结果如表2所示。由表2可知,毛乌素沙漠南部古沙丘中微量元素含量最高的也是Ba、Sr、P、Zr元素,其最大值分别是631.10 $\mu\text{g/g}$ 、615.56 $\mu\text{g/g}$ 、455.57 $\mu\text{g/g}$ 、309.00 $\mu\text{g/g}$ 。含量较少的则为Nb、As、Cu、Zn四种微量元素。

表1 毛乌素沙漠南部现代沙丘微量元素含量特征

Table 1 Characteristics of trace element contents in modern sand dunes in the southern part of Mu Us Desert

元素	P	Pb	Rb	Nb	Zr	V	Sr	Cu	Ni	As	Ba	Co	Cr	Zn
最大值/(μg/g)	345.00	16.00	73.00	10.00	210.00	47.00	391.00	13.10	32.60	2.60	948.00	39.30	43.00	32.60
最小值/(μg/g)	116.00	10.00	53.00	6.00	63.00	10.00	100.00	3.50	7.60	0.00	379.00	17.80	3.00	8.00
含量 平均值/(μg/g)	222.21	13.24	63.67	7.61	121.88	27.91	215.82	7.34	19.14	0.08	619.55	27.68	19.79	16.98
标准差	51.97	1.74	6.75	0.81	36.14	6.47	96.07	2.43	8.32	0.45	205.19	6.13	8.95	5.21
CV/%	23.39	13.15	10.60	10.68	29.65	23.19	44.52	33.13	43.45	525.83	33.12	22.13	45.23	30.69

表2 毛乌素沙漠南部古沙丘微量元素含量特征

Table 2 Characteristics of trace element contents in ancient sand dunes in the southern part of Mu Us Desert

	元素	P	Pb	Rb	Nb	Zr	V	Sr	Cu	Ni	As	Ba	Co	Cr	Zn
含量	最大值/(μg/g)	455.57	15.71	73.22	11.50	309.00	46.58	615.56	16.76	24.58	17.05	631.10	177.10	72.70	35.80
	最小值/(μg/g)	106.70	8.50	55.00	4.80	56.60	20.70	125.40	2.20	10.18	0.50	315.00	2.50	11.40	0
	平均值/(μg/g)	231.54	11.81	64.70	6.88	122.72	32.26	195.65	8.14	17.67	7.32	502.66	71.87	36.05	10.12
	标准差	78.45	1.84	3.98	1.57	56.82	6.39	87.06	2.33	4.69	4.30	60.41	57.09	12.71	11.39
	CV/%	33.88	15.55	6.15	22.77	46.30	19.82	44.50	28.58	26.56	58.75	12.02	79.44	35.25	112.52

在毛乌素沙漠南部古沙丘中,只有Zn元素的变异系数大于100%,变异系数为112.52%,具有强变异性,影响因素更复杂;而变异程度最小、变异性最弱的是Rb元素,变异系数为6.15%,属于低变异系数范围;其余元素均在中等变异系数范围,受区域环境的综合影响。

2.2 古今沙丘微量元素之间相关性分析

2.2.1 现代沙丘

通过SPSS相关分析方法,探讨现代沙丘微量元素之间的相关性规律。对毛乌素沙漠南部现代沙丘中14种微量元素33个样品进行相关性分析,结果如表3所示。毛乌素沙漠南部现代沙丘中,多数元素之间均存在一定的相关性。P、V、Nb三种微量元素与其余微量元素中的多数微量元素之间具有显著的正相关。例如,P与Pb、Rb、Nb、Zr、V、Sr、Zn七种微量元素的相关系数为0.703**、0.581**、0.715**、0.552**、0.439**和0.467**;V与P、Nb、Zr、As、Cr、Zn六种微量元素的相关系数为0.552**、0.898**、0.737**、0.528**、0.793**和0.760**。

不同微量元素之间相关性良好则表示元素的赋存状态和地球化学行为相似,亲和性强(丁海霞,2009)。P和V元素均与Nb、Zr、Zn元素呈显著正相关,但通过对比发现,V元素与Nb、Zr、Zn元素的相关性均高于P元素与Nb、Zr、Zn元素的相关性。根据戈尔德施密特元素分类法,P是亲铁元素,Zn是亲硫元素,V、Nb、Zr均是亲石元素。在元素周期表中,P、V、Nb、Zr、Zn对应的位置分别是15号、23

号、41号、40号、30号;原子半径分别为1.10Å、1.92Å、2.08Å、2.16Å、1.53Å(徐烨等,2018);电负性分别是2.19、1.63、1.60、1.33、1.65。从元素类型和原子位置看,V和Nb、Zr同属亲石元素且均为过渡族元素,地球化学性质更相近(靳建辉等,2011;徐烨等,2018);从原子半径角度看,V和Nb、Zr、Zn的原子半径较P和Nb、Zr、Zn的原子半径更近;从电负性的多少看,V和Nb、Zr、Zn的电负性较P和Nb、Zr、Zn的电负性相差更小。综上,V和Nb、Zr、Zn能够表现出更显著的相关性。在多种元素的显著正相关关系,Sr与Ba的正相关性最强,主要原因是Sr和Ba同是ⅡA族元素,且均属于亲石元素,原子半径相差较小,电负性非常相近,导致两种元素具有显著的正相关。

除此之外,在毛乌素沙漠南部现代沙丘中,多种元素之间还存在着显著的负相关。例如,Ba和Cu、Ni、Co、Cr、Zn五种微量元素的相关系数为-0.900**、-0.690**、-0.721**、-0.691**、-0.494**;Co与P、Pb、Rb、Sr、Ba五种元素的相关系数-0.537**、-0.692**、-0.773**、-0.764**、-0.721**。在多种元素的显著负相关中,Ba和Cu的负相关性最强,可能是因为Ba是ⅡA族碱土金属元素,易失电子形成Ba²⁺,而Cu是IB族过渡金属元素,化合价多样,两者的化学性质和电子排布差异较大。另外,也可能是Ba元素主要以重晶石的形式存在于自然界,而Cu元素通常以同晶置换方式富集于硫化物、氧化物或硅酸盐矿物中所致(马梁超和孙虎,2015;李静芸等,2023)。

表3 毛乌素沙漠南部现代沙丘微量元素之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between trace elements of modern sand dunes in the southern part of Mu Us Desert

	P	Pb	Rb	Nb	Zr	V	Sr	Cu	Ni	Ba	As	Co	Cr	Zn
P	1.000	0.703**	0.581**	0.582**	0.715**	0.552**	0.439**	-0.124	-0.317	0.356*	0.412*	-0.537**	0.272	0.467**
Pb		1.000	0.824**	0.432*	0.535**	0.373*	0.757**	-0.435*	-0.423*	0.633**	0.278	-0.692**	-0.053	0.208
Rb			1.000	0.243	0.420*	0.157	0.855**	-0.650**	-0.651**	0.836**	0.142	-0.773**	-0.332	-0.062
Nb				1.000	0.744**	0.898**	-0.020	0.321	0.110	-0.141	0.532**	-0.238	0.729**	0.767**
Zr					1.000	0.737**	0.320	-0.075	-0.076	0.210	0.361*	-0.384*	0.415*	0.364*
V						1.000	-0.029	0.392*	0.326	-0.190	0.528**	-0.077	0.793**	0.760**
Sr							1.000	-0.839**	-0.601**	0.956**	-0.072	-0.764**	-0.567**	-0.365*
Cu								1.000	0.742**	-0.900**	0.418*	0.691**	0.798**	0.681**
Ni									1.000	-0.690**	0.238	0.735**	0.566**	0.280
Ba										1.000	-0.126	-0.721**	-0.691**	-0.494**
As											1.000	0.059	0.469**	0.539**
Co												1.000	0.331	0.083
Cr													1.000	0.881**
Zn														1.000

注:**表示在0.01级别(双尾),相关性显著;*表示在0.05级别(双尾),相关性显著。

2.2.2 古沙丘

对毛乌素沙漠南部古沙丘 34 个样品 14 种微量元素进行相关性分析,结果如表 4 所示。据统计分析可知,毛乌素沙漠南部古沙丘中,多数元素之间也存在一定的相关性。P、Rb 两种微量元素与其余微量元素中的多数微量元素之间具有显著的正相关。例如, P 与 Pb、Rb、V、Sr、Cu、Cr 六种微量元素的相关系数为 0.585**、0.834**、0.584**、0.453**、0.565** 和 0.518**; Rb 与 P、Pb、Cu、Ni、Ba 五种微量元素的相关系数为 0.585**、0.461**、0.648**、0.587** 和 0.508**。在多种元素的显著正相关中,Zr 与 Nb 的正相关性最强,相关系数为 0.966**。Zr 和 Nb 同是过渡族且均属于亲石元素,原子序数相邻,原子半径相差较小,电负性相近,导致两种元素具有显著的正相关。

在毛乌素沙漠南部古沙丘中,Ba 元素与其他元素的负相关性是最多的,其与 Nb、Zr、Co 和 Cr 的负相关系数分别为 -0.648**、-0.676**、-0.527** 和 -0.802**。除此之外,Co 和 Zn 也分别与三种、两种元素之间呈负相关,其中,Zn 和 Co 元素的负相关性最显著。Zn 和 Co 原子半径和电负性相似,原子序数接近,但 Zn 和 Co 在地壳中的丰度不同,地壳中 Zn 的丰度较高,Co 的丰度较低,可能致使两种元素在土壤与岩石中的含量呈负相关;Zn 主要以氧化物、硫化物和碳酸盐等形式存在,Co 通常以硅酸盐和氧化物形式存在,Zn 和 Co 的存在形式不同也可能是导致两者存在负相关的原因。此外,当 Zn 和 Cu 竞争相同的反应位点或者

反应条件时,两者也会呈现显著的负相关。因此,元素的原子半径、电负性、原子序数并不是两种元素呈现负相关的唯一影响因素,元素的存在形式以及反应条件等均可能是促使元素之间呈现负相关的原因(代启先,2021;李煜等,2022)。

2.3 不同类型沙丘微量元素对比分析

根据微量元素在不同类型沙丘的变化情况,将其含量的平均值和标准差进行统计汇总,做方差分析并制作柱状图,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,在不同类型沙丘中,微量元素的含量和变化特征存在着较大差异,可以归纳为五类。第一类含量变化主要表现为 MD 和 D<MFD 和 FD,包括 P、Zr、V、Cu、Ni 五种微量元素(图 2a~e),但五种元素含量的变化顺序又有不同体现。以 P、Ni、Zr 三种元素为例,P 和 Ni 的含量变化具体呈现为 FD>MFD>MD>D; Zr 含量变化顺序为 MFD>FD>MD>D。第二类含量变化顺序为 FD>D>MFD>MD,包括 Cr、As、Co 三种元素(图 2f~h)。第三类主要是 MD 和 MFD>D 和 FD,包括 Pb 和 Nb 元素(图 2i,j)。Pb 含量变化顺序为 MFD>MD>D>FD; Nb 含量变化顺序为 MFD>MD>FD>D。第四类含量变化主要是 MD 和 FD>MFD 和 D,包括 Sr 和 Rb 元素(图 2k,l)。Sr 含量变化顺序为 MD>FD>D>MFD; Rb 含量变化顺序为 FD>MD>D>MFD。最后一类则是与其他元素含量变化规律完全不同的 Ba 和 Zn 元素(图 2m,n)。其中,Ba 含量变化为 MD>D>FD>MFD; Zn 含量变化为 MFD>D>MD>FD。

表 4 毛乌素沙漠南部古沙丘微量元素之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between trace elements of ancient sand dunes in the southern part of Mu Us Desert

	P	Pb	Rb	Nb	Zr	V	Sr	Cu	Ni	Ba	As	Co	Cr	Zn
P	1.000	0.585**	0.834**	0.312	0.279	0.584**	0.453**	0.565**	0.288	-0.307	0.315	-0.048	0.518**	0.244
Pb		1.000	0.461**	-0.063	-0.044	0.227	0.272	0.378*	-0.246	0.037	0.022	-0.626**	0.199	0.727**
Rb			1.000	0.060	0.029	0.348*	0.401*	0.648**	0.587**	-0.035	0.508**	0.070	0.227	0.000
Nb				1.000	0.966**	0.833**	-0.150	-0.153	0.047	-0.648**	-0.211	0.504**	0.889**	-0.261
Zr					1.000	0.823**	-0.148	-0.184	0.019	-0.676**	-0.155	0.477**	0.900**	0.275
V						1.000	0.189	0.265	0.224	-0.425*	-0.110	0.216	0.821**	0.019
Sr							1.000	0.722**	0.284	-0.004	0.510**	-0.063	0.054	0.209
Cu								1.000	0.614**	0.398*	0.311	-0.209	-0.103	0.229
Ni									1.000	0.259	0.410*	0.449**	-0.083	-0.518**
Ba										1.000	-0.217	-0.527**	-0.802**	0.276
As											1.000	0.369*	0.016	-0.286
Co												1.000	0.376*	-0.895**
Cr													1.000	-0.100
Zn														1.000

注:**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

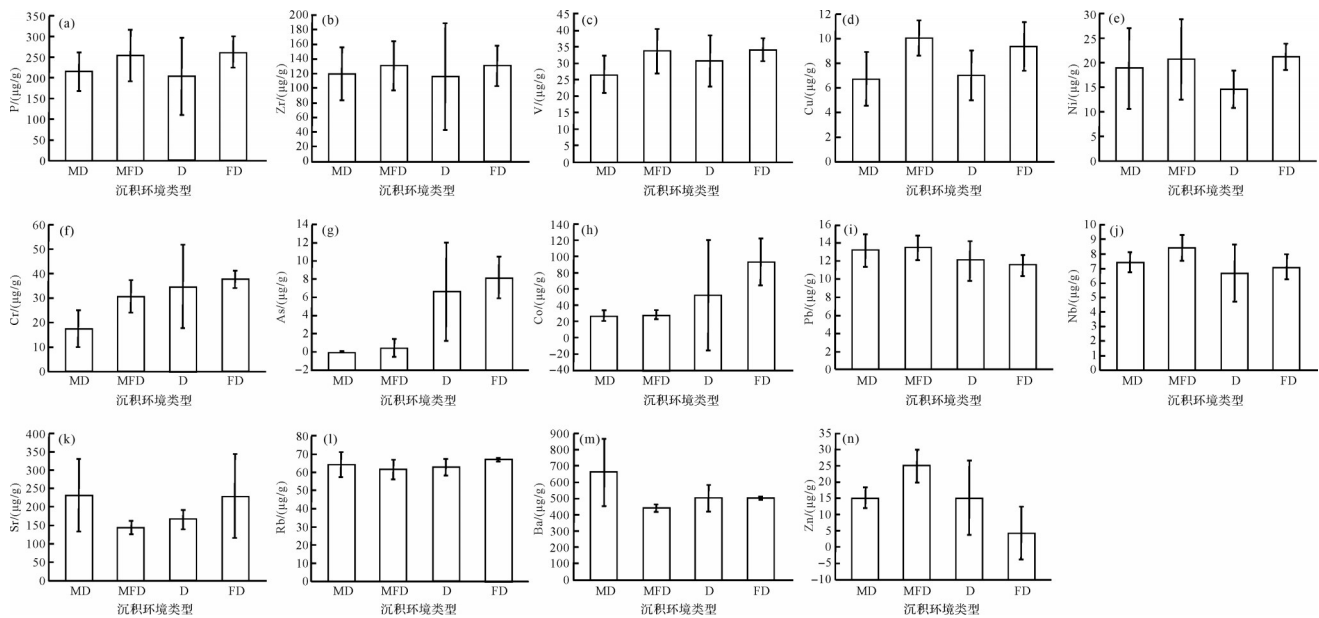


图2 毛乌素沙漠南部不同类型沙丘微量元素含量差异(误差线表示标准差)

Fig.2 Differences in trace element contents among different types of sand dunes in the southern part of Mu Us Desert (error bars represent standard deviations)

2.4 不同类型沙丘微量元素空间分布特征

根据前人的研究结果, Ba、Sr、Rb 等微量元素含量及其比值具有一定的气候和环境指示意义(牛东风等, 2016; 陈浩等, 2024; 周国议等, 2024)。本研究利用 ArcGIS 软件对 Ba、Sr、Rb、Co、Ni 和 Cu 六种微量元素平均含量值进行制图, 获得毛乌素沙漠南部不同类型沙丘微量元素的空间分布情况(图3)。从图中可以看出: (1) Ba 和 Sr 的含量高值均分布在东北部, 主要来自现代流动沙丘。而现代固定沙丘、古流动沙丘以及古固定沙丘中, Ba 和 Sr 的含量较低, 不同类型沙丘含量差异较小。现代流动沙丘中, 东北部为 Rb 的含量高值区, 中部为含量低值区, 少部分现代固定沙丘和古流动沙丘微量元素含量较高, 不同类型沙丘含量差异较小。(2) Co 的最高值主要来自古流动沙丘和现代流动沙丘, 主要分布在中部和西部; 东部为低值区, 不同类型沙丘含量差异大。Ni 元素的最高值集中在西、中、东部, 主要来自现代固定沙丘和现代流动沙丘; 而古流动沙丘、古固定沙丘样品中 Ni 的含量低。Cu 元素在现代固定沙丘中和现代流动沙丘中的含量较高。

Ba、Sr、Rb 三种元素的空间分布具有一定的相似性, 含量高值区主要分布在区域的东北部, 南部与西南部主要为含量低值区; Co、Ni、Cu 三种元素的空间分布也具有一定的相似性, Co、Ni、Cu 三种元素的含量高值区主要分布在区域的南部和西南部, 东北部

为含量低值区。结合微量元素的相关性分析结果可知, 现代沙丘中的 Ba、Sr、Rb 和 Co、Ni、Cu 两组元素中, 每组元素的两两元素之间均存在显著性相关; 在古沙丘微量元素相关性结果中, Co 和 Ni、Ba 和 Cu 元素之间存在相关性, 表明这几种元素的形成过程、来源、反应条件等存在类似的特点。

3 讨论

3.1 不同类型古今沙丘微量元素含量差异

微量元素的含量与分布情况不仅受沉积环境类型、母质等控制, 还会受到迁移及形成过程、反应条件等的影响。从微量元素的组成上看, 毛乌素沙漠南部古今沙丘以 Ba、Sr、P 三种微量元素含量高, 而 As、Nb、Cu 三种微量元素含量低; 其结果与毛乌素沙漠南部的米浪沟湾及附近的范家沟一带等现代流动沙丘微量元素含量分布具有相似的规律(牛东风等, 2015)。而甘肃青土湖沙丘微量元素以 Cr、Mn、Co、Sr、Ba、Ti 等含量最高(潘美慧等, 2024); 新疆伊犁塔克尔莫乎尔沙漠全新世晚期沉积物微量元素含量分布表明, 在风沙层 Sr 和 Ba 元素含量较高; Cu、Ti、Mn 等元素含量较低(靳建辉等, 2011)。这反映古今沙丘沉积物微量元素含量分布具有一定的区域性, 不同地区由于沉积环境类型、母质和沉积过程等影响因素, 微量元素组成存在一定的差异。

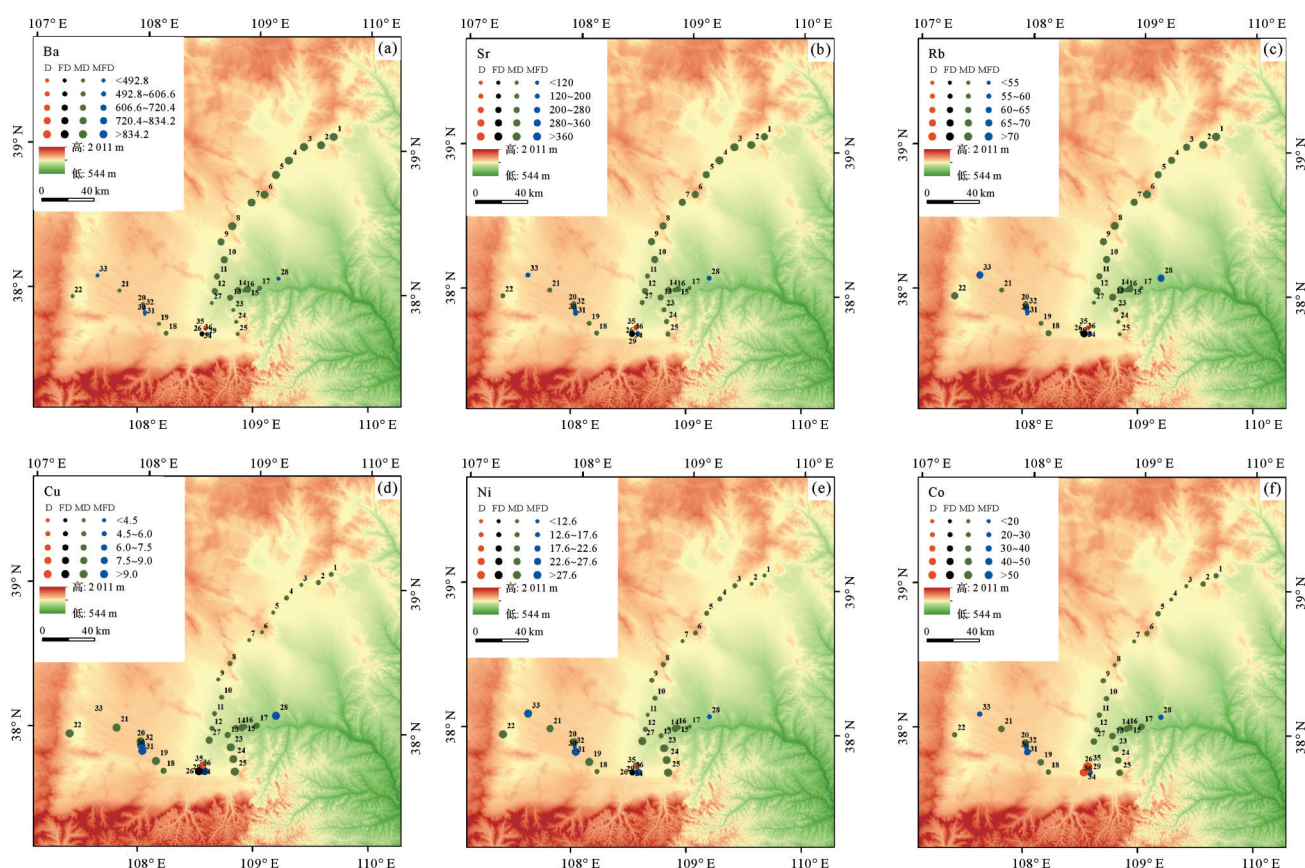


图3 毛乌素沙漠南部不同类型沙丘微量元素平均含量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of the average content of trace elements in different types of sand dunes in the southern part of Mu Us Desert

从不同类型沙丘微量元素含量看,总体表现为 $FD > MFD > D > MD$,固定沙丘的微量元素含量明显高于流动沙丘;古沙丘微量元素的含量高于现代沙丘。这很大程度上与沙丘的性质和植被覆盖有关:流动沙丘没有被植被所固定,其位置和形态易在风力作用下发生位移和变化,微量元素也会随着沙丘的移动而流失;而固定沙丘部分被植物所固定,虽然受风力影响发生一定的位移,但植物根系的固定能够大幅度地有效减缓沙丘的位移速度,因此很大程度上减少了微量元素的流失。而在固定沙丘中,古固定沙丘中的微量元素较现代固定沙丘微量元素高,这可能与沙丘形成过程和时间相关;现代沙丘在形成的过程中,受人类活动影响的程度较大,也会导致微量元素的含量变化(丁海霞,2009;李静芸等,2023)。潘美慧等(2024)在甘肃青土湖地区不同类型沙丘微量元素的研究也发现V、Zn、Sr、Ba等含量具有随着植被覆盖度增大而增加的特点。孟洁等(2015)在腾格里沙漠南缘末次间冰期土门剖面沉积物微量元素

特征研究中发现古流动沙丘中微量元素含量最低,其次为古固定沙丘;而且风成砂沉积物微量元素含量明显低于湖相沉积物。从六种主要微量元素的空间分布差异特征来看,Ba、Sr、Rb三种元素总体呈现出东北部含量高,南部和西南部含量低;而Co、Ni、Cu三种元素则呈现出东北部含量低,南部和西南部含量高的特征。这不仅与受到元素自生表生地球化学性质的影响相关,同时与不同区域特殊的地貌位置及沉积环境差异密切相关,其成因还有待进一步的研究。

3.2 古今沙丘沉积物微量元素含量指示的环境意义

前人研究发现沉积物中微量元素Sr/Cu、Rb/Sr和Sr/Ba等比值对沉积环境变化具有重要的指示意义,因此着重讨论古今沙丘Sr/Cu、Rb/Sr和Sr/Ba等比值的差异对解译沉积环境变化具有重要作用。Sr/Cu的比值可以反映古气候环境条件,总体上 $Sr/Cu < 10$ 指示温湿气候, $Sr/Cu > 10$ 指示干热气候(王峰等,

2017)。通过对毛乌素沙漠南部古今沙丘样品的Sr/Cu值进行统计分析,发现所有样品Sr/Cu的比值介于13~105,其最小值均大于10,可以初步推断毛乌素沙漠南部古今沙丘的形成具有类似的干热气候环境。由于Sr与Rb存在方式不一样,Sr主要以碳酸盐结合态和残留状态存在,暖湿条件下会随碳酸盐的分解而淋失迁移,而Rb主要存在于稳定的残留态中,暖湿环境中相对富集,因此Rb、Sr含量及其Rb/Sr值的大小可以作为指示冬夏季风强度的重要气候代用指标(陈骏等,1998,1999,2001)。通过统计分析毛乌素沙漠南部古今沙丘样品的Rb/Sr的比值发现,古沙丘Rb/Sr的比值介于0.11~0.49,平均值为0.34;现代沙丘Rb/Sr的比值介于0.18~0.54,平均值为0.36,古今沙丘Rb/Sr的比值可以推断毛乌素沙漠南部不同时期沙丘的形成主要受东亚季风环流的影响,主要与冬季风的加强有关。而Sr/Ba值的大小与风化强度相关,Sr/Ba值增大,反映沉积环境趋于干旱,风化强度减弱(靳建辉等,2013)。通过对古今沙丘Sr/Ba值的对比发现,古今沙丘Sr/Ba平均比值介于0.33~0.39,古沙丘Sr/Ba值略高于现代沙丘,可以推断受不同沉积历史的影响,古今沙丘风化程度有所差异;而且风成砂的Sr/Ba值往往要低于河湖相沉积物(李明启等,2006)。由此可见,利用沙丘中的Sr/Cu、Rb/Sr和Sr/Ba等比值对解译该区域沙丘形成的沉积环境具有一定的指示意义。

4 结论

(1) 毛乌素沙漠南部古今沙丘中微量元素以Ba、Sr、P元素为主,As、Nb、Cu三种微量元素含量较低,其分布规律具有一定的区域性;但与甘肃、新疆等地沙丘的微量元素组成存在一定的差异。

(2) 毛乌素沙漠南部不同类型沙丘微量元素变化整体表现出固定沙丘微量元素含量明显高于流动沙丘的特征,主要与沙丘的性质及植被覆盖有关;而古沙丘微量元素的含量高于现代沙丘,主要受沉积历史、气候变化及特殊的地貌位置等因素影响。

(3) 通过对毛乌素沙漠南部古今沙丘微量元素比值对比分析发现,该地区古今沙丘Sr/Cu、Rb/Sr和Sr/Ba的比值相当,表明古今沙丘的形成具有类似的沉积环境,微量元素比值对气候环境、季风强度和风化强度变化等具有一定的指示意义。

致谢 李保生、司月君、舒培仙等老师参加了本项目的野外工作,审稿专家提出了许多建设性的修改意见,谨致谢忱!

参考文献(References)

- 陈浩,肖宝珠,崔培龙,等. 2024. 湖北襄阳地区龙潭组富锂黏土岩地球化学特征及其对物源和古沉积环境的指示[J]. 资源环境与工程, 38(2): 137-146. [Chen Hao, Xiao Baozhu, Cui Peilong, et al. 2024. Geochemical characteristics, provenance and palaeosedimentary environment of lithium-rich claystone in Longtan Formation in Xiangyang area, Hubei province[J]. Resources Environment & Engineering, 38(2): 137-146.]
- 陈骏,安芷生,汪永进,等. 1998. 最近800 ka洛川黄土剖面中Rb/Sr分布和古季风变迁[J]. 中国科学, 28(6): 498-504. [Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin, et al. 1998. Distribution of Rb and Sr in the Luochuan loess-paleosol sequence of China during the last 800 ka[J]. Science in China, 28(6): 498-504.]
- 陈骏,汪永进,陈畅,等. 2001. 中国黄土层Rb和Sr地球化学特征及其古季风气候意义[J]. 地质学报, 75(2): 259-266. [Chen Jun, Wang Yongjin, Chen Yang, et al. 2001. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for Palaeomonsoon climate[J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 259-266.]
- 陈骏,汪永进,季峻峰,等. 1999. 陕西洛川黄土剖面的Rb/Sr值及其气候地层学意义[J]. 第四纪研究, (4): 350-356. [Chen Jun, Wang Yongjin, Ji Junfeng, et al. 1999. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a loess-paleosol profile from Luochuan, Shaanxi province[J]. Quaternary Science, (4): 350-356.]
- 陈敏,李保生,王丰年,等. 2022. 腾格里沙漠西南缘土门剖面微量元素记录的MIS3高分辨率季风环境变化[J]. 中国沙漠, 42(4): 253-263. [Chen Min, Li Baosheng, Wang Fengnian, et al. 2022. High-resolution monsoonal environment change in MIS3 based on trace elements in the Tumen section on the southwest edge of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 42(4): 253-263.]
- 代启先. 2021. 关于贵州省兴仁县表层土壤微量元素丰缺评价及相关性分析[J]. 西部探矿工程, 33(1): 147-150, 153. [Dai Qixian. 2021. Evaluation and correlation analysis of trace elements abundance and deficiency in topsoil in Xingren county, Guizhou province[J]. West-China Exploration Engineering, 33(1): 147-150, 153.]
- 丁海霞. 2009. 绿洲农田土壤中主要微量元素的生物地球化学特征及环境影响研究:以张掖甘州区和临泽县为例[D]. 兰州:兰州大学:24-25. [Ding Haixia. 2009. Studies on biogeochemical characteristics and environmental influence of main microelements in farmlands of oasis: Take Ganzhou district and Linze county of Zhangye for example[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 24-25.]
- 靳建辉,曹相东,李志忠,等. 2013. 艾比湖周边灌丛沙堆风沙沉积记录的气候环境演化[J]. 中国沙漠, 33(5): 1314-1323. [Jin Jianhui, Cao Xiangdong, Li Zhizhong, et al. 2013. Record for climate

- revolution in aeolian deposit of nabkhas around the Ebinur Lake [J]. *Journal of Desert Research*, 33(5): 1314-1323.]
- 靳建辉,李志忠,陈秀玲,等. 2011. 新疆伊犁塔克尔莫乎尔沙漠全新世晚期沉积微量元素反映的古气候变化[J]. *沉积学报*, 29(2): 336-345. [Jin Jianhui, Li Zhizhong, Chen Xiuling, et al. 2011. Paleoclimatic significance of geochemical elements from Takermohur Desert, Xinjiang since Late Holocene[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(2): 336-345.]
- 李静芸,傅天阳,申玉龙,等. 2023. 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*, 43(2): 226-232. [Li Jingyun, Fu Tianyang, Shen Yulong, et al. 2023. Grain-size characteristics of surface sediments of barchan and parabolic dunes in the Mu Us Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 43(2): 226-232.]
- 李明启,靳鹤龄,董光荣,等. 2006. 萨拉乌苏河流域微量元素揭示的气候变化[J]. *中国沙漠*, 26(2): 172-179. [Li Mingqi, Jin Heling, Dong Guangrong, et al. 2006. Climate change indicated by trace elements in Salawusu River basin[J]. *Journal of Desert Research*, 26(2): 172-179.]
- 李煜,张萍,吴红,等. 2022. 六盘水市六枝特区茶园茶叶与土壤中微量元素的相关性分析[J]. *现代农业科技* (11): 6-10. [Li Yu, Zhang Ping, Wu Hong, et al. 2022. Correlation analysis on tea and soil trace elements in tea garden of Liuzhi Special District, Liupan-shui city[J]. *Modern Agricultural Science and Technology* (11): 6-10.]
- 刘明光. 2010. 中国自然地理图集[M]. 3版. 北京:中国地图出版社: 110. [Liu Mingguang. 2010. Atlas of physical geography of China, [M]. 3rd ed. Beijing: SinoMaps Press: 110.]
- 刘振宇,靳鹤龄,刘冰,等. 2019. 粒度特征揭示的中全新世以来毛乌素沙地演化过程[J]. *中国沙漠*, 39(1): 88-96. [Liu Zhenyu, Jin Heling, Liu Bing, et al. 2019. Desert evolution during the Mid Holocene reflected by grain-size variation of aeolian sand and paleo-soil sequence records from Mu Us sandy land[J]. *Journal of Desert Research*, 39(1): 88-96.]
- 吕珂欣,赵爽,张文昌,等. 2024. 萨拉乌苏河流域全新世风成砂—湖沼相沉积物磁学性质[J]. *中国沙漠*, 44(1): 75-85. [Lü Kexin, Zhao Shuang, Zhang Wenchang, et al. 2024. Magnetic properties of Holocene aeolian sand and lacustrine sediments from the Salawusu River basin[J]. *Journal of Desert Research*, 44(1): 75-85.]
- 马梁超,孙虎. 2015. 秦岭南坡低山区不同土地利用类型土壤微量元素对比分析[J]. *河南科学*, 33(5): 827-831. [Ma Liangchao, Sun Hu. 2015. Comparison of soil trace elements among different land use types in low mountains area of southern slope of Qinling[J]. *Henan Science*, 33(5): 827-831.]
- 孟洁,温小浩,李保生,等. 2015. 腾格里沙漠南缘末次间冰期5e亚段的微量元素特征及其反映的古气候[J]. *中国沙漠*, 35(3): 592-601. [Meng Jie, Wen Xiaohao, Li Baosheng, et al. 2015. Trace element characteristics and indicative paleoclimate during marine isotope stage 5e(MIS5e) in the southern Tengger Desert, northwestern China[J]. *Journal of Desert Research*, 35(3): 592-601.]
- 牛东风,李保生,王丰年,等. 2015. 微量元素记录的毛乌素沙漠全新世气候波动:以萨拉乌苏流域 DGS1 层段为例[J]. *沉积学报*, 33(4): 735-743. [Niu Dongfeng, Li Baosheng, Wang Fengnian, et al. 2015. Holocene climate fluctuations from the record of trace elements in the Mu Us Desert: Evidence from the DGS1 segment of the Salawusu River valley[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(4): 735-743.]
- 牛东风,李保生,魏建国,等. 2016. 萨拉乌苏河流域 MGS1 Rb 和 Sr 记录的全新世千年尺度气候变化[J]. *地球化学*, 45(2): 155-163. [Niu Dongfeng, Li Baosheng, Wei Jianguo, et al. 2016. Holocene millennium-scale climatic variations as recorded by Rb and Sr concentrations for the MGS1 stratigraphical segment of Milanggouwan section in the Salawusu River valley of southeast Mu Us Desert[J]. *Geochimica*, 45(02): 155-163.]
- 牛东风,李保生,温小浩,等. 2011. 萨拉乌苏河流域 MGS1 层段微量元素记录的全新世千年尺度的气候变化[J]. *地质学报*, 85(2): 300-308. [Niu Dongfeng, Li Baosheng, Wen Xiaohao, et al. 2011. The Holocene ka-scale climate variation indicated by trace elements of the MGS1 segment in the Salawusu River valley, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 300-308.]
- 潘美慧,李娜,龚逸夫,等. 2024. 甘肃青土湖地区不同类型沙丘的表沙理化特征及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 44(2): 69-80. [Pan Meihui, Li Na, Gong Yifu, et al. 2024. Physical and chemical characteristics of surface sand in different types of dunes in Qingtu Lake, Gansu, NW China, and their environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 44(2): 69-80.]
- 舒培仙,牛东风,李保生,等. 2016. 毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义[J]. *中国沙漠*, 36(1): 158-166. [Shu Peixian, Niu Dongfeng, Li Baosheng, et al. 2016. Grain size characteristics of modern dune sand and its significance in the Mu Us sandy land, China[J]. *Journal of Desert Research*, 36(1): 158-166.]
- 司月君,李保生,温小浩,等. 2012. 萨拉乌苏河流域 MGS4 层段记录的末次冰期早冰阶气候波动[J]. *中国沙漠*, 32(4): 938-946. [Si Yuejun, Li Baosheng, Wen Xiaohao, et al. 2012. Climate fluctuations during the earlier last glacial reflected by the MGS4 segment in the Salawusu River valley, China[J]. *Journal of Desert Research*, 32(4): 938-946.]
- 王峰,刘玄春,邓秀芹,等. 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. *沉积学报*, 35(6): 1265-1273. [Wang Feng, Liu Xuanchun, Deng Xiuqin, et al. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265-1273.]
- 徐烨,邓艳,曹建华,等. 2018. 云南小江流域不同土地利用类型土壤微量元素的对比分析[J]. *中国岩溶*, 37(5): 752-760. [Xu Ye, Deng Yan, Cao Jianhua, et al. 2018. Comparative analysis of soil trace elements in different land use types in Xiaojiang River basin, Yunnan[J]. *Carsologica Sinica*, 37(5): 752-760.]
- 周国议,曹新星,夏嘉,等. 2024. 北部湾中东部全新世沉积地球化学特征及其指示意义[J]. *地球化学*, 53(5): 745-759. [Zhou Guoyi, Cao Xinxing, Xia Jia, et al. 2024. Holocene sedimentary geo-

- chemical characteristics of the mid-eastern part of the Beibu Gulf and their implications[J]. *Geochimica*, 53(5): 745-759.]
- Du S H, Li B S, Niu D F, et al. 2011. Age of the MGS5 segment of the Milanggouwan stratigraphical section and evolution of the desert environment on a kiloyear scale during the Last Interglacial in China's Salawusu River valley: Evidence from Rb and Sr contents and ratios[J]. *Geochemistry*, 71(1): 87-95.
- Guo Y J, Li B S, Wen X H, et al. 2014. Holocene climate variation determined from rubidium and strontium contents and ratios of sediments collected from the BadainJaran Desert, Inner Mongolia, China[J]. *Geochemistry*, 74(4): 571-576.
- Si Y J, Li B S, David D Z, et al. 2013. Climate fluctuation record from China's Salawusu River valley during the early Last Glacial[J]. *Geochemistry International*, 51(3): 240-248.
- Si Y J, Li B S, David D Z, et al. 2014. Climate fluctuation on a kiloyear scale during the late Last Glacial in Mu Us Desert, China: evidence from Rb and Sr contents and ratios[J]. *Environmental Earth Sciences*, 72(11): 4521-4530.
- Wang F N, Si Y J, Li B S, et al. 2022. Variations in the aeolian sequence Zr/Rb ratios in the Mu Us Desert during the Holocene and their implications for the East Asian monsoon[J]. *Aeolian Research*, 54: 100753.
- Wen X H, Li B S, Zheng Y M, et al. 2016. Early Holocene multi-centennial moisture change reconstructed from lithology, grain-size and chemical composition data in the eastern Mu Us Desert and potential driving forces[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 459: 440-452.
- Yao C X, Li B S, Jin H L, et al. 2002. Sedimentary cycles of trace elements in Salawusu River valley since 150 ka BP[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 12(1): 65-71.

Comparison of Trace Elements in Modern and Ancient Sand Dunes in the Southern Mu Us Desert

CHEN BiShan, XU YuTing, LIAO ZhengXu, ZHAO JiaTong, DENG JiaYi, NIU DongFeng

School of Geographical Sciences, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048, China

Abstract: [Objective] Trace elements in modern and ancient dunes from the southern Mu Us Desert record environmental information related to weathering, transportation, and deposition. Analysis of this information facilitates a better understanding of sediment provenance and climatic evolution in the region. [Methods] Samples of modern and ancient dunes in the southern Mu Us Desert were collected, and the content characteristics and correlations of 14 trace elements including phosphorus (P), lead (Pb), and rubidium (Rb) were analyzed to explore the differences in trace element contents and spatial distribution characteristics among different types of dunes. [Results] (1) The trace elements in modern and ancient dunes are mainly barium (Ba), strontium (Sr), and phosphorus (P), whereas the contents of arsenic (As), niobium (Nb), and copper (Cu) are relatively low. Their distribution patterns show certain regional characteristics. (2) The trace element contents in fixed dunes are significantly higher than those in mobile dunes owing to the nature of the dunes and vegetation coverage; however, the trace element contents in ancient dunes are higher than those in modern dunes, owing to the influence of sedimentary history, climate change, and special geomorphic positions. (3) The values of Sr/Cu, Rb/Sr, and Sr/Ba in modern and ancient dunes are comparable, indicating that they were formed in similar sedimentary environments. [Conclusion] There are certain similarities and differences in the trace element contents of modern and ancient dunes and different types of dunes. The changes in trace element contents in ancient dunes can provide clues to the sources of modern dunes to a certain extent. The ratios of trace elements in modern and ancient dunes have certain implications for climate and environmental conditions.

Key words: Mu Us Desert; modern sand dune; ancient sand dune; trace elements

Foundation: School-Local Cooperation Project of the Salawusu Archaeological Site Park Administration, No. slws0508; Guangdong Provincial Education Science Planning Project of 2022, No. 2022GXJK258

Corresponding author: NIU DongFeng, E-mail: niudongfeng@lingnan.edu.cn