

王晓枝,董治宝,南维鸽,等.拉萨河谷爬坡沙丘沉积物特征[J].中国沙漠,2022,42(4):22-31.

# 拉萨河谷爬坡沙丘沉积物特征

王晓枝,董治宝,南维鸽,李超,高冲,张欣

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119)

**摘要:**分析了青藏高原拉萨河谷爬坡沙丘表层及不同深度沉积物的粒度和地球化学元素特征。结果表明:(1)爬坡沙丘表层沉积物以细沙为主,平均粒径为 $2.51\Phi$ (细沙),分选中等,粒度分布曲线为正偏、窄峰。随海拔升高,表层沉积物逐渐变细;随深度增加,沉积物粒径逐渐变细。(2)爬坡沙丘沉积物常量元素中 $\text{SiO}_2$ 含量最高,微量元素中Ba含量最高。常量元素含量多随深度增加而减少,且在0—10 cm深度内变化幅度最大。与上部陆壳平均化学组成相比,除 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Mo}$ 、 $\text{SiO}_2$ 外,其余元素均处于亏损状态。拉萨河谷爬坡沙丘经历了中等的化学风化,处于大陆风化的早期阶段。

**关键词:**拉萨河谷;爬坡沙丘;沉积物;粒度;地球化学元素

文章编号:1000-694X(2022)04-022-10

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00174

中图分类号:P931.3

文献标志码:A

## 0 引言

青藏高原特殊的地理位置和生态环境受到广泛关注。在气候变化和人类活动的共同作用下,青藏高原形成了 $400\,000\text{ km}^2$ 的风成沉积地貌<sup>[1-2]</sup>,风沙地貌分布广泛<sup>[3-6]</sup>,主要分布在柴达木盆地内的昆仑山和祁连山山麓<sup>[7]</sup>、长江和黄河源区、若尔盖盆地<sup>[8]</sup>、青海湖盆地<sup>[9]</sup>、库木库里沙漠<sup>[10]</sup>、羌塘高原和阿里高原的河湖盆地、雅鲁藏布江上游和中游河谷、拉萨河谷及朋曲河谷中下游<sup>[11]</sup>。研究沙丘沉积物的粒度和地球化学元素特征可以反映其物质组成特征与分选特征<sup>[12-15]</sup>,进而判断风沙侵蚀与沉积过程<sup>[16-17]</sup>,推测风沙地貌的形成和演化,并指示沉积物的沉积环境,对古环境重建也有一定作用<sup>[18-19]</sup>。

国内外对爬坡沙丘的研究始于20世纪40年代,Hack<sup>[20]</sup>在描述美国纳瓦霍西部风成地貌时首次提出了爬坡沙丘的概念,Smith<sup>[21]</sup>和Evans<sup>[22]</sup>最早将爬坡沙丘定义为沙物质堆积在山坡而形成的沙丘,全国科学技术名词审定委员会<sup>[23]</sup>将爬坡沙丘定义为沙物质在移动过程中受到山体阻挡,沙物质在风力作用下沿山坡爬升而形成的沙丘。爬坡沙丘多分布于海岸地带和干旱内陆<sup>[24]</sup>,目前对于爬坡沙丘

的研究主要在莫哈韦沙漠<sup>[22,25-26]</sup>、内盖夫沙漠<sup>[27]</sup>、雅鲁藏布江河谷、海南岛西海岸<sup>[28-30]</sup>和昆仑山区<sup>[31]</sup>,且对海岸地带爬坡沙丘的研究更多。此外,也通过火星探测器对火星爬坡沙丘进行了相关研究<sup>[32]</sup>,但对爬坡沙丘沉积物的研究多关于表层,对较深层沉积物的研究较少。鉴于此,本文以青藏高原南部的拉萨河谷爬坡沙丘作为研究对象,分析了0—60 cm深度的沙丘沉积物粒度和地球化学元素特征,为相关研究提供了参考,为拉萨河流域荒漠化治理提供了借鉴。

## 1 研究区概况与研究方法

研究区位于青藏高原雅鲁藏布江支流拉萨河的下游河漫滩北部( $29^{\circ}24'11.64''\text{N}$ 、 $90^{\circ}48'29.15''\text{E}$ ,海拔 $3\,920\text{ m}$ )。在副热带西风急流和高原季风的双重影响下,拉萨河流域的低层大气在一年中表现出两种相反的风场特征,6—9月受暖性低压控制,西南季风携大量水汽通过雅鲁藏布江下游水汽通道<sup>[33]</sup>,形成雨季,降水集中且多暴雨;11月至次年4月受冷性高压控制,冷锋频繁,寒潮大风天气多发,形成风季。同时,平行于风向的河谷加强了风的强度,冬

收稿日期:2021-09-30; 改回日期:2021-11-17

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0403)

作者简介:王晓枝(1998—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为风沙地貌。E-mail: xzwang@snnu.edu.cn

通信作者:董治宝(E-mail: zbdong@snnu.edu.cn)

春季地表非均匀受热强烈加强了山谷风环流,形成了河谷冬春季大风日多、风速大、持续时间长的特点。

2020年8月,沿山脊从爬坡沙丘底部向上进行采样,共设采样点7个,编号依次为P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7,海拔分别为3 883、3 931、3 972、4 027、4 081、4 147、4 245 m(图1),每个采样点分别采集3组500—1 000 g的表层(0—3 cm)沉积物样品,同时在爬坡沙丘底部(P1)、中部(P4)、顶部(P7)分别采

集4—10、10—40、40—60 cm的沉积物样品,共采集样品30个。样品采回后在陕西师范大学实验室自然风干并过2 mm筛,用于粒度、地球化学元素分析。沉积物粒度实验使用英国马尔文公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪,粒度依据Udden-Wentworth的标准划分<sup>[34]</sup>,粒度特征参数采用Folk-Ward公式计算<sup>[34-35]</sup>。沉积物地球化学元素实验使用荷兰Panalytical公司生产的PW2403X-RAY荧光光谱仪进行测定。

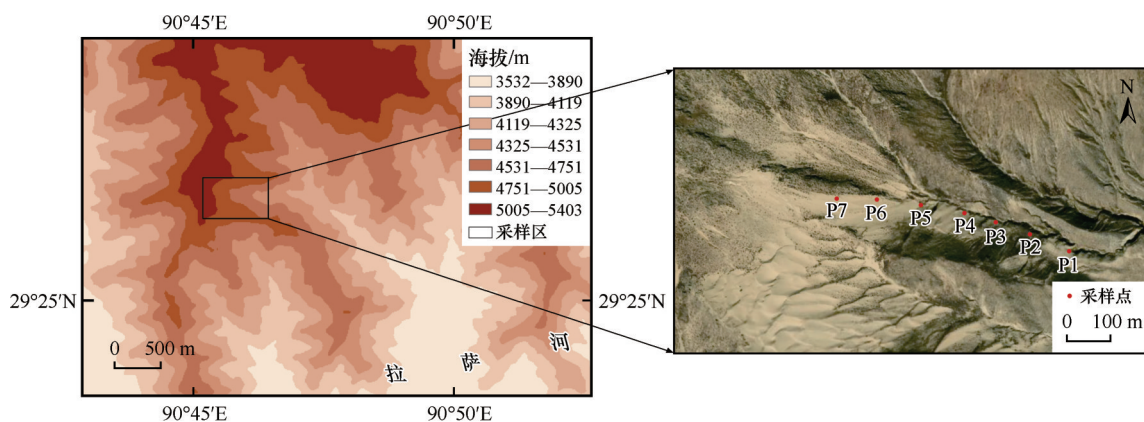


图1 研究区概况和采样点分布

Fig.1 Overview of the study area and sand sampling sites

## 2 结果与分析

### 2.1 粒度

#### 2.1.1 沉积物粒度粒级级配特征

沉积物粒度组成可以反映各粒级沙粒的相对含量。拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物均以细沙为主,含量为29.31%—56.89%,平均为46.34%,其次为中沙和极细沙,含量分别为9.86%—37.02%和4.72%—36.64%,平均含量分别为23.78%和19.73%,粉沙含量较小,粗沙和黏土极少,平均含量不超过2%(表1)。所有样品均不含极粗沙。整体上看,从P1至P7,细的组分含量不断增加,粗的组分含量不断减少,表明爬坡沙丘表层沉积物随海拔升高有逐渐变细的趋势。对比不同深度沉积物粒级组成发现,整体上各深度沉积物粒级级配相似,表层相较深层变化较大,从表层到10 cm深度,细的组分含量不断增加,粗的组分含量不断减少,沉积物逐渐变细(表2)。

自然分布频率曲线可直观地反映出沙丘表层沉积物的主要粒级及不同粒级的相对含量。对沙

丘不同部位表层沉积物而言,P4为单峰分布,P3、P6、P7为双峰分布,P1、P2、P5均为三峰分布,峰值均集中在0.2—0.4 mm,其中P1的峰值粒径最大,为0.34 mm,峰值含量为12.29%,P7的峰值粒径最小,为0.21 mm,峰值含量为7.69%。沙丘不同深度沉积物均为双峰分布,峰值均集中在0.2—0.4 mm,其中4—10 cm的峰值粒径最大,为0.31 mm,峰值含量为7.89%,表层、10—40、40—60 cm的峰值粒径相同,为0.28 mm,表层含量最多,为8.38%(图2)。

概率累积曲线可揭示沉积物搬运方式与粒度分布间的关系,推测其沉积环境<sup>[36]</sup>。风成沉积物概率累积曲线多由1—3个截点分成2—4段独立线段,风沙活动越强烈、频繁,曲线越陡<sup>[37]</sup>。表层沉积物概率累积曲线多为两段式或三段式,粒度累积百分含量相差较大,P7曲线最陡,位于最左侧,表明沙丘顶部颗粒最细,风沙活动最强烈、频繁,P1在0.0—0.4 mm粒径范围内位于最右侧,P5在大于0.4 mm范围内位于最右侧,曲线最缓,风沙活动强度较弱。不同深度沉积物概率累积曲线均为三段式。在0.0—0.3 mm粒径范围内,各深度沉积物粒度累积百分含量相差较小,在大于0.3 mm粒径范围

表 1 爬坡沙丘表层沉积物粒级级配  
Table 1 The surface sediment grain size composition of climbing dune

采样点	粒度分级/%					
	黏土	粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙
	<0.002 mm	0.002—0.063 mm	0.063—0.125 mm	0.125—0.25 mm	0.25—0.5 mm	>0.5 mm
P1	0.00	1.45	4.72	56.89	36.59	0.34
P2	0.00	3.69	8.26	49.68	37.02	1.35
P3	0.05	8.00	14.04	44.55	31.91	1.44
P4	0.67	10.79	23.94	47.70	16.90	0.00
P5	0.18	21.27	24.74	29.31	20.78	3.72
P6	0.32	3.73	25.75	56.77	13.43	0.00
P7	0.04	13.99	36.64	39.47	9.86	0.00

表 2 爬坡沙丘沉积物不同深度粒级级配  
Table 2 The sediment grain size composition of climbing dune at different depths

采样点	粒度分级/%					
	黏土	粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙
	<0.004 mm	0.004—0.063 mm	0.063—0.125 mm	0.125—0.25 mm	0.25—0.5 mm	>0.5 mm
表层	0.18	8.99	19.73	46.34	23.78	0.98
4—10 cm	1.18	13.39	20.63	42.58	21.88	0.33
10—40 cm	0.75	12.89	21.09	43.76	21.26	0.28
40—60 cm	1.03	14.83	21.66	42.06	20.07	0.36

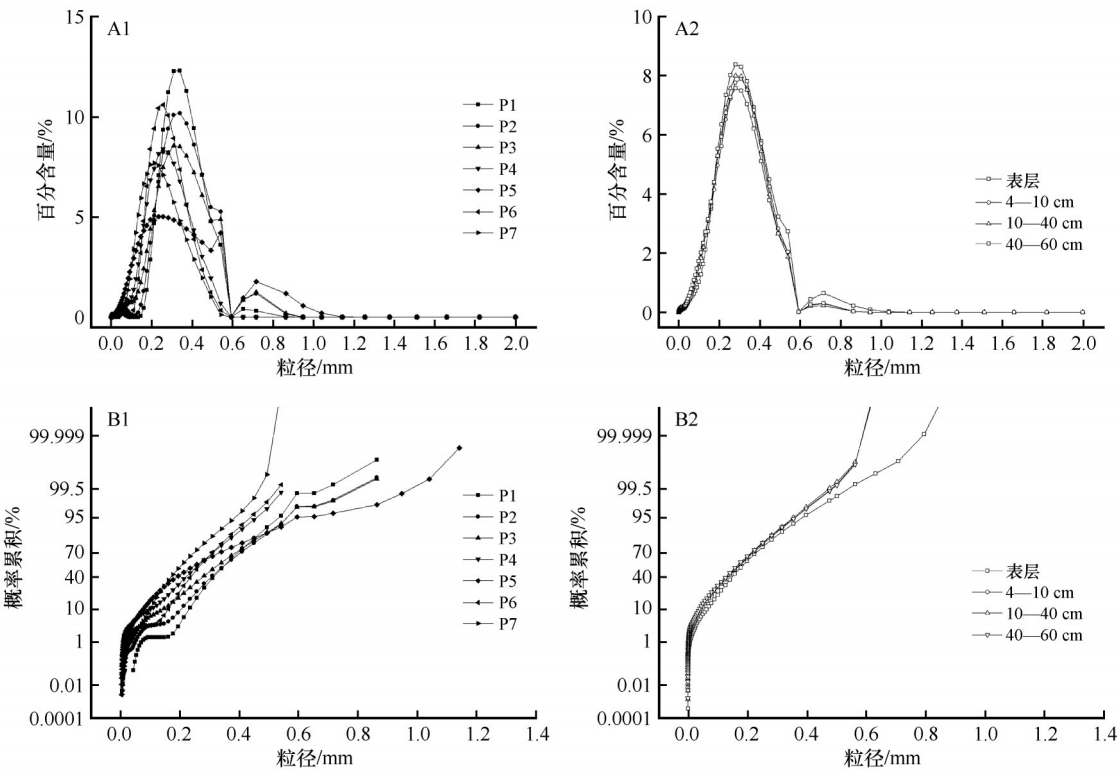


图 2 爬坡沙丘沉积物自然分布频率曲线(A)和概率累积曲线(B)  
Fig.2 The natural frequency curves (A) and cumulative probability plots (B) of climbing dune deposition

内,概率累积曲线整体呈现出表层位于右侧,深层位于左侧的特征,表明表层沉积物粒径较深层更粗,对深层沉积物而言呈现出4—10 cm位于左侧,10—40、40—60 cm位于右侧的特征,表明4—10 cm深度沉积物最细,但整体上深层沉积物累积百分含量相差较小(图2)。

### 2.1.2 粒度参数

对沉积物粒度参数的研究有助于反演和解译沙丘沉积环境<sup>[38]</sup>。拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物平均粒径为 $2.15\sim 3.16\Phi$ ,平均值为 $2.51\Phi$ (细沙);分选系数为0.49—1.40,平均值为0.84,分选中等;偏度为0.00—0.31,平均值为0.15(正偏);峰度为0.94—1.77,平均值为1.16(窄峰度)。4—10 cm沉积物平均粒径为 $2.05\sim 2.82\Phi$ ,平均值为 $2.56\Phi$ (细沙);分选系数为0.49—1.13,平均值为0.89,分选中等;偏度为0.00—0.32,平均值为0.21(正偏);峰度为0.95—1.48,平均值为1.29(窄峰度)。10—40 cm

沉积物平均粒径为 $2.13\sim 2.75\Phi$ ,平均值为 $2.54\Phi$ (细沙);分选系数为0.53—1.05,平均值为0.85,分选中等;偏度为0.02—0.31,平均值为0.19(正偏);峰度为0.96—1.59,平均值为1.28(窄峰度)。40—60 cm沉积物平均粒径为 $2.12\sim 2.96\Phi$ ,平均值为 $2.60\Phi$ (细沙);分选系数为0.55—1.11,平均值为0.88,分选中等;偏度为0.01—0.30,平均值为0.20(正偏);峰度为0.94—1.51,平均值为1.31(窄峰度)。

随海拔升高,爬坡沙丘表层沉积物平均粒径整体呈现逐渐变小的趋势,因为底部细沙粒被风带走,剩下较粗沙粒,随着海拔升高,风的搬运能力逐渐减弱,沙粒逐渐沉积(图3)。分选系数在P6明显减小,表明沉积物粒径在海拔4 147 m以上分布更均匀,这是海拔升高、风力大幅减弱、仅有粒径较小的沉积物迁移沉积导致<sup>[39]</sup>。随深度加深,沉积物平均粒径逐渐变小,这是由于表层粒径较小的颗粒易被风搬运带走,留下了粒径较大的组分。

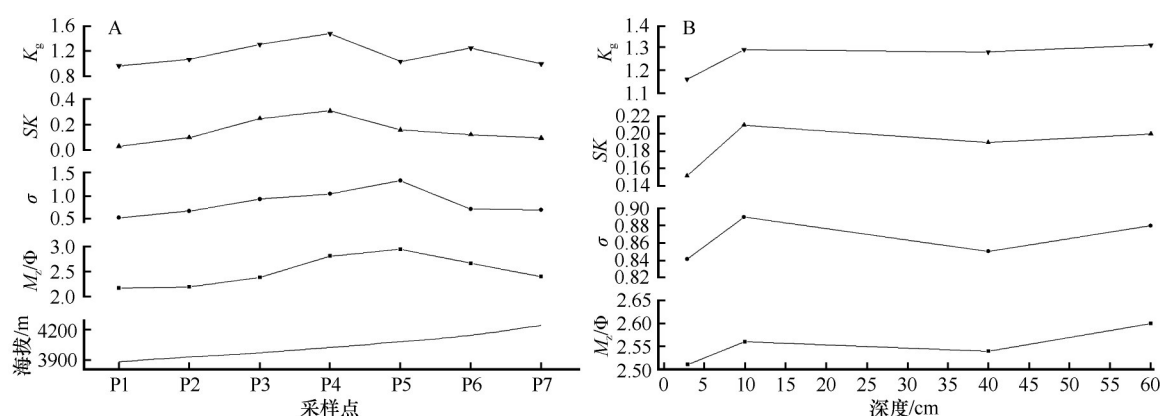


图3 爬坡沙丘沉积物粒度参数变化(A为表层沉积物,B为不同深度沉积物)

Fig.3 Grain size parameters of climbing dune deposition (A refers to surface sediments and B refers to sediments at different depths)

## 2.2 地球化学元素

### 2.2.1 地球化学元素组成特征

拉萨河谷爬坡沙丘表层常量元素组成以 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为主,优势成分 $\text{SiO}_2$ 含量占总量的54.51%—68.41%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量次之,多为9%—12%, $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 含量多为2%—4%, $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和 $\text{MnO}$ 含量均较低(表3)。 $\text{CaO}$ 变异系数达0.52,表明其含量在爬坡沙丘不同部位差异较大, $\text{MgO}$ 和 $\text{MnO}$ 次之,变异系数均大于0.3,其余元素变异系数均相对较小。爬坡沙丘不同深度常量元素组成仍以 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为主, $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 次之,其余元素含量均小于1%(表4)。 $\text{CaO}$ 变异系数较大,

其余元素变异系数均小于0.2。通过爬坡沙丘表层与不同深度沉积物的常量元素含量对比可知, $\text{SiO}_2$ 与 $\text{K}_2\text{O}$ 含量随深度的增加而增加,而其余元素含量大体上均随深度的增加而减少,且元素含量变化在0—10 cm深度最为剧烈,在10—60 cm深度变化幅度较小。

统计的微量元素包括Ba、Sr、Cr、Zr、Rb、V、Co、Zn、La、Pb、Cu、Y、Ga、Ni、Nb、Bi、Hf、Mo。拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物微量元素以Ba、Sr、Cr、Zr为主,平均含量均大于 $110 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,其中Ba的含量最高,平均为 $404.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,变异系数最小,Sr、Cr、Zr变异系数均较大,其中Cr的变异系数达0.77,表明其含量在爬



表3 爬坡沙丘表层沉积物常量元素含量(单位:%)

Table 3 Major elements composition of climbing dune surface deposition (Unit:%)

元素	变化范围	平均值	标准差	变异系数	背景值*
SiO <sub>2</sub>	54.51—68.41	61.60	5.27	0.09	66.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.69—14.03	11.02	1.47	0.13	15.20
Na <sub>2</sub> O	2.07—4.63	3.13	0.84	0.27	3.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.82—3.84	2.86	0.63	0.22	5.00
K <sub>2</sub> O	1.39—2.80	2.24	0.48	0.22	3.40
CaO	0.89—4.23	2.13	1.12	0.52	4.20
MgO	0.52—1.27	0.88	0.27	0.31	2.22
TiO <sub>2</sub>	0.16—0.26	0.21	0.03	0.13	0.50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07—0.13	0.10	0.02	0.17	0.55
MnO	0.03—0.07	0.05	0.01	0.30	0.06

\*数据引用自文献[40]。

表4 爬坡沙丘沉积物不同深度常量元素含量(单位:%)

Table 4 Major elements composition of climbing dune at different depths (Unit:%)

项目		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
常量元素含量	表层	61.93	11.18	3.10	3.02	2.24	2.18	0.97	0.22	0.10	0.05
	4—10 cm	67.11	10.06	2.32	2.38	2.74	1.14	0.70	0.21	0.09	0.04
	10—40 cm	66.99	10.08	2.28	2.48	2.74	1.10	0.71	0.21	0.09	0.04
	40—60 cm	67.14	9.9	2.32	2.53	2.69	1.11	0.67	0.21	0.08	0.03
	变异系数	0.04	0.06	0.16	0.11	0.09	0.38	0.18	0.02	0.09	0.20

UCC 标准化值用于分析沉积物与上部陆壳各元素含量的差异,可在一定程度上反映沉积物物源和搬运迁移过程。

常量元素 UCC 标准化值分别为:SiO<sub>2</sub> 接近 1, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 0.61—0.85, 平均 0.72, Na<sub>2</sub>O 为 0.55—1.10, 平均 0.78, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 0.40—0.70, 平均 0.56, K<sub>2</sub>O 为 0.43—0.81, 平均 0.67, CaO 为 0.23—0.88, 平均 0.48, MgO 为 0.26—0.55, 平均 0.39, TiO<sub>2</sub> 为 0.31—0.43, 平均 0.39, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 0.16—0.24, 平均 0.20, MnO 为 0.51—1.06, 平均 0.78。相较于上部陆壳,除 Na<sub>2</sub>O、MnO、SiO<sub>2</sub> 部分表现为富集外,其余元素均表现为迁移淋失,尤以 P 的淋失最为严重,元素的淋失率 P>Ti>Mg>Ca>Fe>K>Al>Na>Mn>Si。微量元素方面,Co、Cr、Mo 在一些部位大量富集,Cu、Pb、V、Rb、Sr 在一些部位少量富集,其他元素表现为亏损,其中 Bi、Nb、Zn、Ni 有明显的迁移淋失(图 4)。爬坡沙丘在长期反复的风化作用、搬运作用、沉积作用下,地表沉积

坡沙丘不同部位差异较大。Rb、V、Co 含量较高,平均含量均大于 50 μg·g<sup>-1</sup>,变异系数均较大,其中 Co 的变异系数最大,达 1.44。其他微量元素平均含量均在 40 μg·g<sup>-1</sup> 以下,变异系数除 Bi 和 Ga 外均较高(表 5)。对比爬坡沙丘表层与不同深度沉积物的微量元素含量发现不同微量元素含量在不同深度的变化并表现出明显的规律性(表 6),其变化特征大体可分为 5 种:①稳定型,即元素含量整体变化不大,变异系数较小,包括 Ba、Zr、Zn、La、Pb、Y、Ga、Nb、Bi、Hf;②递减型,即元素含量从表层至深层呈明显递减趋势,包括 Sr、V、Cu;③递增型,即元素含量从表层至深层呈明显递增趋势,包括 Rb 和 Ni;④先增后减型,即元素含量从表层至深层先增加后减少,包括 Co 和 Mo;⑤先减后增型,即元素含量从表层至深层先减少后增加,如 Cr。与常量元素相似,微量元素含量变化多在 0—10 cm 深度最为剧烈。

物充分混合,使得沉积物中的地球化学元素部分接近上部陆壳,部分发生淋失和富集。

2.2.2 化学风化特征

Rb/Sr 比值可用于反映沉积物化学风化程度,比值大小与沉积物风化程度呈正比。爬坡沙丘表层沉积物 Rb/Sr 比值为 0.08—0.95,多数处在 0.10—0.80,平均为 0.47,大于毛乌素沙地(0.15—0.56)<sup>[41]</sup>、巴丹吉林沙漠(0.37—0.42)<sup>[42]</sup>、腾格里沙漠(0.40—0.52)<sup>[42]</sup>。表明其化学风化程度相对其他沙漠较高。

化学蚀变指数(CIA)反映了沉积物的风化程度和沉积环境。CIA 值 50—65 反映寒冷、干燥气候下的低等化学风化,65—85 反映温暖、湿润气候下的中等化学风化,85—100 反映炎热、潮湿气候下的强烈化学风化<sup>[43-44]</sup>。上部陆壳的 CIA 值为 48,中国黄土为 52.9,陆源页岩为 70.4,这代表了大陆风化早期的演变过程。拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物 CIA 值为 44.76—54.85,平均值为 50.20,处于上部陆壳

表 5 爬坡沙丘表层沉积物微量元素含量(单位:  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 5 Trace elements composition of climbing dune surface deposition (Unit:  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

元素	变化范围	平均值	标准差	变异系数	背景值*
Ba	321.8—581.5	404.6	59.1	0.15	550.0
Sr	135.7—440.0	264.5	101.6	0.38	350.0
Cr	16.9—288.8	125.0	95.8	0.77	35.0
Zr	62.8—175.4	118.7	29.4	0.25	190.0
Rb	35.7—141.7	93.4	38.9	0.42	112.0
V	33.8—78.3	57.6	16.2	0.28	60.0
Co	1.9—489.9	83.3	120.4	1.44	10.0
Zn	12.2—44.0	32.9	7.5	0.23	71.0
La	10.5—31.8	21.1	5.4	0.26	30.0
Pb	12.1—25.1	19.5	3.9	0.20	15.0
Cu	8.2—46.9	17.5	10.9	0.63	25.0
Y	11.6—19.5	14.8	2.3	0.15	22.0
Ga	11.4—16.2	13.5	1.1	0.08	17.0
Ni	2.5—15.5	9.3	3.3	0.36	20.0
Nb	2.5—10.2	6.5	2.2	0.35	25.0
Bi	5.8—5.8	5.8	0.0	0.00	127.0
Hf	2.0—4.7	3.41	0.7	0.22	5.8
Mo	0.0—7.7	3.0	2.9	0.95	1.5

\*数据引用自[40]。

与中国黄土之间,高于毛乌素沙地(49.88)<sup>[40]</sup>、库姆塔格沙漠(46.7)<sup>[45]</sup>、巴丹吉林沙漠(46.99)<sup>[42]</sup>,表明其化学风化程度相比于其他沙漠较高,经历了中等

的化学风化,反映出其沉积环境的干旱性。

成分变异指数(ICV)可用于衡量沉积物是首次循环沉积物还是再循环沉积物,ICV<1 表明沉积物在组成上是成熟的,且很可能为再循环沉积物,ICV>1 则表明其为首次循环沉积的产物<sup>[46-49]</sup>。拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物ICV 值均大于1,处在1.20—1.71,平均为1.40,接近UCC 的ICV 值(1.5)表明沉积物中黏土矿物含量少,为在干旱、寒冷的气候条件下首次循环沉积的产物,处在风化作用的初期。

A-CN-K 图反映了化学风化趋势及化学风化过程中主成分和矿物学变化<sup>[18]</sup>,直观地反映了大陆风化过程。大陆风化早期以斜长石风化为标志,中期以钾长石、伊利石为标志,晚期风化产物以高岭石-三水铝石-石英-铁氧化物为组成特征。将拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物与上部陆壳、陆源页岩、中国黄土对比可看出,拉萨河谷爬坡沙丘沉积物主要分布在上部陆壳分化趋势线的端点,接近上部陆壳所处的风化阶段,说明其组成特征与上部陆壳的平均组成类似,化学风化和剥蚀过程较为稳定。除P4 和P6 处沉积物处于大陆风化初期到中期的过渡阶段外,其余均处在大陆风化早期阶段的初期,处于较弱的去Na、Ca 阶段。A-CN-K-FM 图通过铁、镁元素的组成差异来反映元素迁移、淋溶过程<sup>[19]</sup>。A-CN-K-FM 图解指示结果显示,P4 和P6 处沉积物Fe、Mg 含量明显小于上部陆壳,其余均与上部陆壳相近,而Al 含量在空间上差异较小,碱金属在空间上略有差异但差异不大,表明爬坡沙丘沉积物中含

表 6 爬坡沙丘沉积物不同深度微量元素含量(单位:  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 6 Trace elements composition of climbing dune at different depths (Unit:  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

项目		Ba	Sr	Cr	Zr	Rb	V	Co	Zn	La
微量元素含量	表层	396.7	259.7	136.7	127.9	96.7	59.5	52.5	36.2	21.6
	4—10 cm	384.2	172.8	70.6	142.5	132.5	42.5	97.6	31.2	22.4
	10—40 cm	375.6	167.6	87.0	137.9	134.4	42.9	80.9	32.5	24.8
	40—60 cm	380.3	170.2	199.4	136.05	131.8	44.5	4.1	34.7	25.5
	变异系数	0.02	0.23	0.47	0.04	0.15	0.17	0.70	0.07	0.08
项目		Pb	Cu	Y	Ga	Ni	Nb	Bi	Hf	Mo
微量元素含量	表层	19.8	19.2	15.5	13.9	10.5	7.2	5.8	3.7	3.5
	4—10 cm	23.0	10.6	17.0	13.3	11.1	8.4	5.8	3.9	1.2
	10—40 cm	24.0	11.8	17.0	13.1	12.2	8.2	5.8	3.8	1.9
	40—60 cm	22.5	12.2	16.7	12.9	13.5	8.3	5.8	3.8	5.2
	变异系数	0.08	0.29	0.04	0.03	0.11	0.07	0.00	0.02	0.60

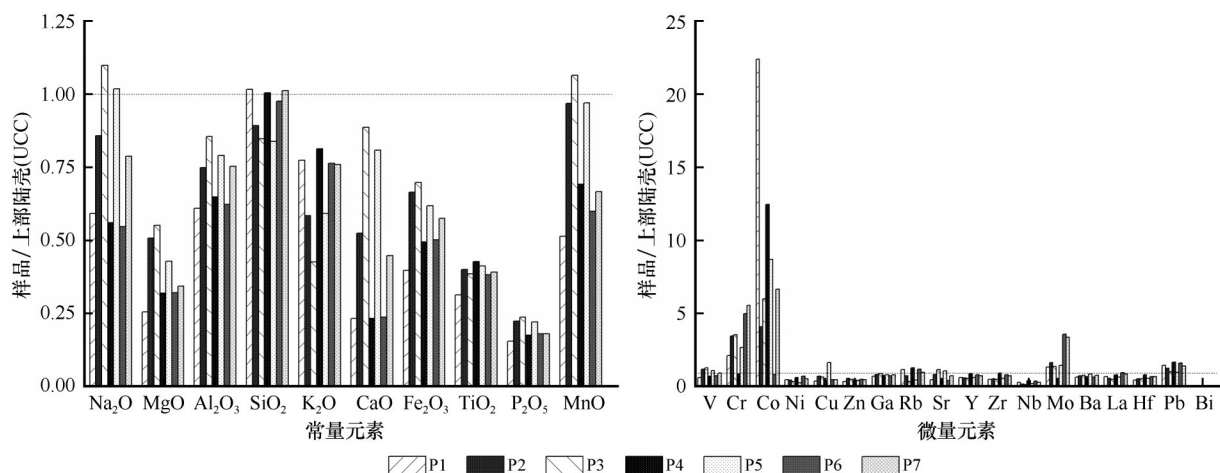


图4 爬坡沙丘表层沉积物地球化学元素UCC标准化

Fig.4 UCC-normalized pattern of geochemical elements for climbing dune surface deposition

Na、K的矿物含量变化相对较小,而Fe、Mg质矿物由于化学稳定性较差,容易遭受破碎和风化,从而造成元素含量的亏损(图5)。

### 3 讨论

长江流域沉积物粒度与CIA值相关程度较高,颗粒越细,黏土组分越富集,CIA值越高<sup>[50]</sup>;戈壁沉积物总体表现为细颗粒CIA值小、粗颗粒CIA值大<sup>[49]</sup>。整体上看,拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物粒径变化也与CIA值变化趋势相似,CIA值先随沉积物粒径变小而降低,再随粒径变大而增大(图6)。

Fe、Mg含量大体呈现先升高再降低的趋势,与粒径变化相反,这是因为铁镁质矿物稳定性较差,解理发育,导致其在搬运、沉积过程中易破碎风化,并经后期分选在较细的组分中大量富集,使得粒径较大的组分Fe、Mg含量降低,而粒径较小的组分Fe、Mg相对富集。Si、Al含量变化趋势与Fe、Mg相反,SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为黏土矿物的重要组成部分,可在一定程度上反映沉积物中黏土组分的含量,而风化作用是黏土矿物形成的主要地质营力,同时,Si、Al含量与CIA值变化趋势相似,表明研究区黏土矿物的形成可能与化学风化作用相关性较大。

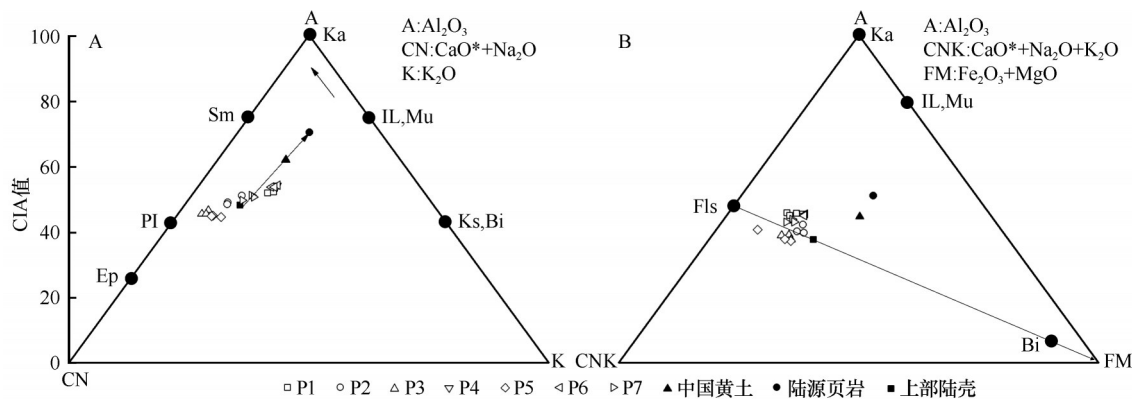


图5 爬坡沙丘表层沉积物A-CN-K (A)及A-CN-K-FM (B)三角图解(长实箭头表示大陆风化趋势;Ka=高岭石、Sm=蒙脱石、Pl=斜长石、Ep=绿帘石、IL=伊利石、Mu=白云母、Bi=黑云母、Ks=钾长石、Fls=长石)

Fig.5 A-CN-K (A) and A-CN-K-FM (B) ternary plots of climbing dune surface deposition (The long solid arrows represent the weathering direction of the continent; Ka=kaolinite, Sm=smectites, Pl=plagioclase, Ep=epidote, IL=illite, Mu=Muscovite, Bi=biotite, Ks=K-feldspar, Fls=feldspar)

Fe、Mg含量和Si、Al含量变化在整体上表现出规律性的同时,在局部上也表现出特殊性。Fe、Mg含量从P3到P4随沉积物粒径变小而减小,Si、Al含

量也在P4突然增大,这是因为P4处由于植物阻挡,风沙流在沿坡爬升时受阻,沉积在植物周围,形成平行于坡面走向的灌丛沙丘,同时,又由于黏土矿

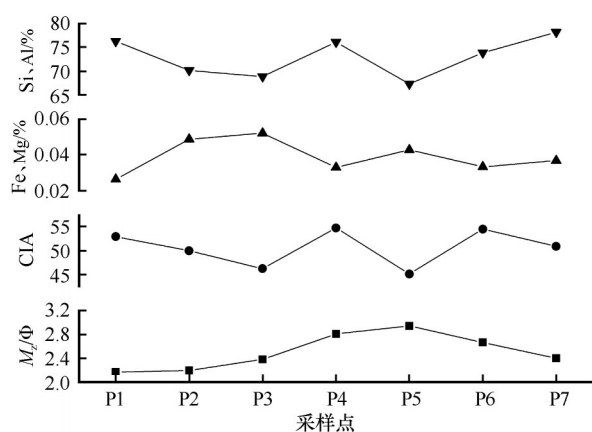


图6 爬坡沙丘平均粒径, CIA, Fe, Mg, Si, Al 含量变化

Fig.6 Relationship between average particle size, CIA, Fe, Mg, Si and Al content of climbing dune

物对水动力作用反应敏锐<sup>[51]</sup>,在雨季,坡面径流使表层沉积物在P4处大量聚集,表现为Si、Al含量在P4处突然升高。沉积物中的黏土矿物因其巨大的比表面可直接吸持重金属,也可作为沉积物中铁氧化物的机械基质从而间接影响沉积物对重金属的吸持<sup>[52-55]</sup>,因此在从P3到P4,Fe、Mg含量并未表现出随沉积物粒径变粗而减少,反而有所增加,可能是由于黏土矿物的含量增加,使更多的Fe被吸持,从而影响了Fe、Mg含量变化。

## 4 结论

拉萨河谷爬坡沙丘表层沉积物以细沙为主,中沙和极细沙次之,粉沙较少,粗沙和黏土极少,所有样品均不含极粗沙,平均粒径为2.51Φ(细沙),分选中等,粒度分布曲线正偏、窄峰。随海拔升高,表层沉积物粒径逐渐变细,随深度加深,沉积物粒径逐渐变粗,0—10 cm范围变化最大。

拉萨河谷爬坡沙丘沉积物常量元素中SiO<sub>2</sub>含量最高,CaO的变异系数最大,微量元素中Ba含量最高,Co的变异系数最大,常量元素除SiO<sub>2</sub>与K<sub>2</sub>O外,含量从表层至深层逐渐减小,微量元素从表层至深层的含量变化分为稳定型、递减型、递增型、先增后减型和先减后增型5种,无论是常量元素还是微量元素,含量变化均在0—10 cm最为强烈。与上部陆壳平均化学组成相比,除Na<sub>2</sub>O、MnO、Cr、Co、Mo表现为部分富集,SiO<sub>2</sub>含量与上部陆壳相当,其余均处于亏损状态。从风化程度来看,拉萨河谷爬坡沙丘化学风化程度相对其他沙漠较高,经历了中等的化学风化,是干旱、寒冷环境下首次循环沉积的产物,组成特征多与上部陆壳相似,处于大陆风

化的早期阶段。

## 参考文献:

- [1] 董玉祥. 青藏高原沙漠化研究的进展与问题[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 251-255.
- [2] Dong M, Yan P, Liu B L, et al. Distribution patterns and morphological classification of climbing dunes in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Aeolian Research, 2018, 35: 58-68.
- [3] Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55(4): 864.
- [4] 安庆, 安萍, 徐汝汝, 等. 青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2017(4): 1-11.
- [5] 钟诚, 何宗宜, 刘淑珍. 西藏生态环境稳定性评价研究[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 573-578.
- [6] 张佩民, 张振德, 李晓琴, 等. 青藏高原荒漠化遥感信息提取及演变分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 710-717.
- [7] 陈涛, 宋友桂, 李云. 柴达木盆地末次盛冰期与全新世大暖期风沙活动的对比研究[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 877-883.
- [8] 董治宝, 胡光印, 颜长珍, 等. 江河源区沙漠化[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 126-138.
- [9] 张登山, 高尚玉, 石蒙沂, 等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 18-38.
- [10] 李栓科. 我国海拔最高的沙漠: 库木库里沙漠形成时代的初步探讨[J]. 中国沙漠, 1991, 11(3): 29-35.
- [11] 李森, 杨萍, 董玉祥, 等. 西藏土地沙漠化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 24-51.
- [12] Livingstone I. Grain-size variation on a 'complex' linear dune in the Namib Desert[J]. Geological Society London Special Publications, 1987, 35(1): 281-291.
- [13] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, et al. Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea[J]. Sedimentary Geology, 2003, 161: 1-14.
- [14] Friedman G M. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1961, 31(4): 514-529.
- [15] Ahlbrandt T S. Textural parameters of eolian deposits [M]// McKee E.A Study of Global Sand Seas. Washington, USA: U.S. Government Printing Office, 1979: 21-51.
- [16] 龙黎, 董玉祥, 孙忠. 海岸沙丘表面现代风成沙地球化学元素分异的典型研究: 以河北昌黎黄金海岸横向沙脊为例[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 724-730.
- [17] 邵学敏, 屈欣, 王萌, 等. 柴达木盆地西北部长垄状雅丹沉积物地球化学元素组成及指示意义[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 127-136.
- [18] 徐志伟, 鹿化煜, 赵存法, 等. 库姆塔格沙漠地表物质组成、来源和演化过程[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 53-64.
- [19] 崔徐甲, 孙虎, 董治宝, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山沉积物地球化学元素组成及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 17-25.



- [20] Hack J T. Dunes of the Western Navajo County [J]. *Geographical Review*, 1941, 31(2): 240–263.
- [21] Smith R S U. Eolian sand on desert mountains [C]// *Geological Society of America Annual Meeting Abstract*, 1954: 102–103.
- [22] Evans J R. Falling and climbing sand dunes in the Cronese (“cat”) Mountain area, San Bernardino County, California [J]. *Journal of Geology*, 1962, 70(1): 107–113.
- [23] 全国科学技术名词审定委员会. 地理学名词 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 96.
- [24] 孟小楠, 严平, 董苗. 爬坡沙丘的研究进展 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018(3): 391–396.
- [25] Lancaster N, Tchakerian V P. Geomorphology and sediments of sand ramps in the Mojave desert [J]. *Geomorphology*, 1996, 17(1/3): 151–165.
- [26] Bateman M D, Bryant R G, Foster I, et al. On the formation of sand ramps: a case study from the Mojave Desert [J]. *Geomorphology*, 2012, 161/162: 93–109.
- [27] White B R, Tsoar H. Slope effect on saltation over a climbing sand dune [J]. *Geomorphology*, 1998, 22(2): 159–180.
- [28] 李森, 董光荣, 申建友, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌形成机制与发育模式 [J]. *中国科学D辑*, 1999, 29(1): 88–96.
- [29] 李森, 王跃, 哈斯, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类与发育问题 [J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 342.
- [30] Li S, Liu X W, Li H C, et al. A wind tunnel simulation of the dynamic processes involved in sand dune formation on the western coast of Hainan Island [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 7: 453–459.
- [31] 赵子允. 东昆仑山区风沙地貌的特征 [J]. *中国沙漠*, 1983, 3(3): 35.
- [32] Chojnacki M, Burr D M, Moersch J E. Valles Marineris dune fields as compared with other martian populations: diversity of dune compositions, morphologies, and thermophysical properties [J]. *Icarus*, 2014, 230: 96–142.
- [33] 杨逸畴, 高登义, 李渤生. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探 [J]. *中国科学B辑*, 1987, 17(8): 893–902.
- [34] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [35] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 8–15.
- [36] Visher G. Grain size distribution and depositional process [J]. *Journal of Sediment Research*, 1969, 39(3): 1074–1106.
- [37] 陈渭南. 塔克拉玛干沙漠 84°E 沿线沙物质的粒度特征 [J]. *地理学报*, 1993, 48(1): 33–46.
- [38] 周娜, 尤源, 雷加强, 等. 毛里塔尼亚努瓦克肖特沙丘粒度分布特征及其环境意义 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 252–261.
- [39] 邵天杰, 赵景波, 董治宝. 巴丹吉林沙漠沙山粒度组成与沙山地貌分带 [J]. *山地学报*, 2013, 31(4): 434–441.
- [40] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Boston, USA: Blackwell Scientific, 1985.
- [41] 陈国祥. 毛乌素沙地风成沉积物沉积学特征 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [42] 李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
- [43] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 229: 715–717.
- [44] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129–147.
- [45] 董治宝. 库姆塔格沙漠风沙地貌 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 116–117.
- [46] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919–2940.
- [47] Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies [J]. *Lithos*, 2000, 51: 181–203.
- [48] Cullers R L. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uj group, southeastern Russia [J]. *Precambrian Research*, 2002, 117: 157–183.
- [49] 罗万银, 董治宝, 钱广强, 等. 戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1441–1453.
- [50] 邵菁清, 杨守业. 化学蚀变指数(CIA)反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候? [J]. *科学通报*, 2012, 57(11): 933–942.
- [51] 韩宗珠, 张军强, 邹昊, 等. 渤海湾北部底质沉积物中黏土矿物组成与物源研究 [J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(11): 95–102.
- [52] Horowitz A J. A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry [M]. Chelsea, Michigan, USA: Lewis Publishers, 1991: 136.
- [53] Jenne E A. Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and water: the significant role of hydrous Mn and Fe oxides [M]// Baker R. *Trace Inorganic in Water*. 1968: 337–387.
- [54] Jenne E A, Kennedy V, Burchard J, et al. Sediment collection and processing for selective extraction and for total metal analysis [M]// Baker R. *Contaminants and Sediments*. 1980: 169–189.
- [55] 陈静生, 王飞越, 宋吉杰, 等. 中国东部河流沉积物中重金属含量与沉积物主要性质的关系 [J]. *环境化学*, 1996, 15(1): 8–14.

## Sediment characteristics of climbing dunes in Lhasa River Valley, China

Wang Xiaozhi, Dong Zhibao, Nan Weige, Li Chao, Gao Chong, Zhang Xin

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In order to promote the research on climbing dunes in Lhasa River Basin, this paper takes the climbing dune in Lhasa River Valley in the south of Qinghai Tibet Plateau as the research object, and analyzes the characteristics of grain size and geochemical elements of dune sediments on the surface and at the depth of 0–60 cm. The results show that: (1) Fine sand is the dominant particle size of surface sediments of climbing dune in Lhasa River Valley, followed by medium sand and very fine sand, with less silt content and very few coarse sand and clay. All samples do not contain very coarse sand, with an average particle size of  $2.51 \Phi$  (fine sand), medium sorting, positive skewness and narrow kurtosis. With the increase of altitude, the particle size of surface sediment gradually becomes smaller, and with the deepening of depth, the particle size of sediment gradually becomes thicker, with the maximum change in the range of 0–10 cm. (2) The  $\text{SiO}_2$  content of major elements is the highest, the variation coefficient of CaO is the largest, the Ba content of trace elements is the highest, and the variation coefficient of Co is the largest. Except  $\text{SiO}_2$  and  $\text{K}_2\text{O}$ , the content of major elements decreases gradually from surface to deep layer, and the content change of trace elements from surface to deep layer can be divided into stable type, decreasing type, increasing type. The content of both major and trace elements changes most strongly at 0–10 cm. Compared with the average chemical composition of the upper continental crust, except that  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ , Cr, Co and Mo are partially enriched, and the  $\text{SiO}_2$  content is equivalent to that of the upper continental crust, the rest are in a loss state. In terms of weathering degree, the chemical weathering degree of climbing dunes in Lhasa River Valley is higher than that of other deserts. They have experienced moderate chemical weathering. They are the products of the first cyclic deposition in arid and cold environment. Their composition characteristics are mostly similar to the upper continental crust and are in the early stage of continental weathering.

**Key words:** Lhasa River Valley; climbing dunes; sediment; grain size; geochemical elements