

董苗,严平,王晓旭,等.雅鲁藏布江山南宽谷段爬坡沙丘表层沉积物特征[J].中国沙漠,2022,42(2):153-163.

雅鲁藏布江山南宽谷段爬坡沙丘 表层沉积物特征

董苗^{1,2ab}, 严平^{2b,3}, 王晓旭^{2ab}, 张国明^{2cd}, 孟小楠^{2ab},
纪欣然^{2ab}, 王勇^{2ab,4}

(1.太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619; 2.北京师范大学, a.地表过程与资源生态国家重点实验室, b.地理科学学部, c.环境演变与自然灾害教育部重点实验室, d.国家安全与应急管理学院, 北京 100875; 3.北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室珠海基地, 广东 珠海 519087; 4.河南省科学院 地理研究所, 河南 郑州 450052)

摘要:为揭示雅鲁藏布江山南宽谷段爬坡沙丘的形成过程、物源及沉积学意义,对山南宽谷段朗赛岭爬坡沙丘进行断面采样,分析爬坡沙丘不同地貌部位沉积物的粒度和地球化学元素特征。结果表明:爬坡沙丘表层沉积物以细沙和中沙为主,河漫滩和阶地表现出明显的风水交互特点,迎风坡和背风坡则表现为明显的风成特点;不同地貌部位沉积物粒度特征不同,从河漫滩到迎风坡坡顶,沉积物粒度整体变细,分选逐渐变好,从迎风坡顶到背风坡,分选变差。沉积物的地球化学元素以Si、Al、Fe、Na为主,在不同地貌部位分布差异较小,表明其具有相似的沉积环境,和上陆壳(UCC)相比,除Si以外其余常量元素均有亏损。微量元素集中分布于河漫滩沉积物中,部分存在于稳定矿物中的微量元素可分布于坡麓地带。A-CN-K图解及CIA值揭示了朗赛岭爬坡沙丘处于化学风化的初期, A-CN-K-FM图则表明Fe、Mg元素在空间上存在差异,是差异风力风选的结果。从化学风化指标来看,从河漫滩到迎风坡,沉积物的风化程度增强。综上所述,物源和风力是导致爬坡沙丘粒度和化学元素存在空间差异的重要因素,朗赛岭爬坡沙丘属于近源沙丘,沙源主要是雅鲁藏布江河流相沉积物,不同地貌部位沉积物特征的差异性是对风、水交互作用的积极响应。

关键词: 粒度; 化学元素; 物源; 爬坡沙丘; 雅鲁藏布江

文章编号: 1000-694X(2022)02-153-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00176

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

粒度是不同沉积条件下多种物源的综合反映,被看作是揭示沉积环境和区域气候变化的速效指示器^[1-3],其分布组成受风动力、物源、地形和搬运方式等条件的影响^[4-5]。使用地球化学元素和化学风化指标可分析沉积物的沉积环境^[6-11],在古环境的重建中具有积极的作用^[12-13]。青藏高原风沙地貌广泛分布,在干旱区沙漠外围山前或河谷谷坡地带发育有典型的爬坡沙丘,成为高原风沙地貌的重要组成部分,是沙地范围扩展的主要形式和沙漠化的主要结果。爬坡沙丘属于地形障碍沙丘,是风沙流在

地形障碍物迎风坡前堆积而形成的沙丘^[14-15]。关于爬坡沙丘的物源和沉积物特征一直是学者们关注的焦点。目前国内外对爬坡沙丘的研究集中于概念与分类^[16-17]、形态与过程^[18-21]、流场特征^[22-23]、沉积物特征^[24-27]及其在古环境重建中的指示意义^[28]。已有的研究侧重于零星的野外观测、风洞模拟和宏观分布等方面,对于爬坡沙丘物源的探讨也仅是通过分析沉积物的粒度特征。

雅鲁藏布江山南宽谷段具有复杂的山盆结构和多样的山体形态,由此导致的局地气流场多变,使得爬坡沙丘的成因及形态复杂多样,是研究爬

收稿日期:2021-10-17; 改回日期:2021-11-18

资助项目:国家自然科学基金项目(41871010,42101013);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0906);中国林业科学研究院重点项目(CAFYBB2018ZE002);山西省高等学校科技创新项目(2020L0502)

作者简介:董苗(1989—),女,山西吕梁人,博士研究生,讲师,主要从事干旱区环境与风沙地貌研究。E-mail: miaodong@tynu.edu.cn

通信作者:严平(E-mail: yeping@bnu.edu.cn)

坡沙丘的理想场所。本文将通过对雅鲁藏布江山南宽谷段朗赛岭爬坡沙丘表层沉积物的粒度、化学元素和风化指标进行分析,理清爬坡沙丘的粒度组成、地球化学元素及风化程度在不同地貌部位的分布特征,揭示爬坡沙丘的物质来源及沉积学意义,以期为雅鲁藏布江河谷风沙危害防治和生态保护提供科学指导。

1 研究区概况

朗赛岭隶属于山南地区扎囊县,地处藏南雅鲁藏布江河谷的南部,位于西藏“一江两河”中部流域(图1)。该区为温带高原季风半干旱气候,冬春干旱多风,夏季温暖湿润,雨热同季,全年日照时数

2 600—3 300 h,无霜期 138.5 d,年平均气温 9.16°C ,年降水量 296 mm,雨季为 7—8 月,降水占年降水量的 81.6%^[29],年大风日数 107.4 d,年平均风速 $3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,拥有充足的风力资源。朗赛岭地处于雅鲁藏布江的山南宽谷地带,植被稀疏,土壤贫瘠,水流分叉扩散,因此在河漫滩、河谷平原、河流阶地发育有丰富的风积地貌^[30]。该区沙丘地貌十分典型,河谷内沙丘成群分布,形态复杂多样。风积地貌的主要类型有新月形沙丘(链)、复合新月形沙丘(链)、半固定沙丘、沙坡和沙片等。其中,发育在谷坡上的爬坡沙丘最具特色,形态多样,爬升较高。这些沙丘地貌与河床、河滩、河流阶地和谷坡交错镶嵌分布,形成了雅鲁藏布江宽谷地带的特殊自然景观^[31]。

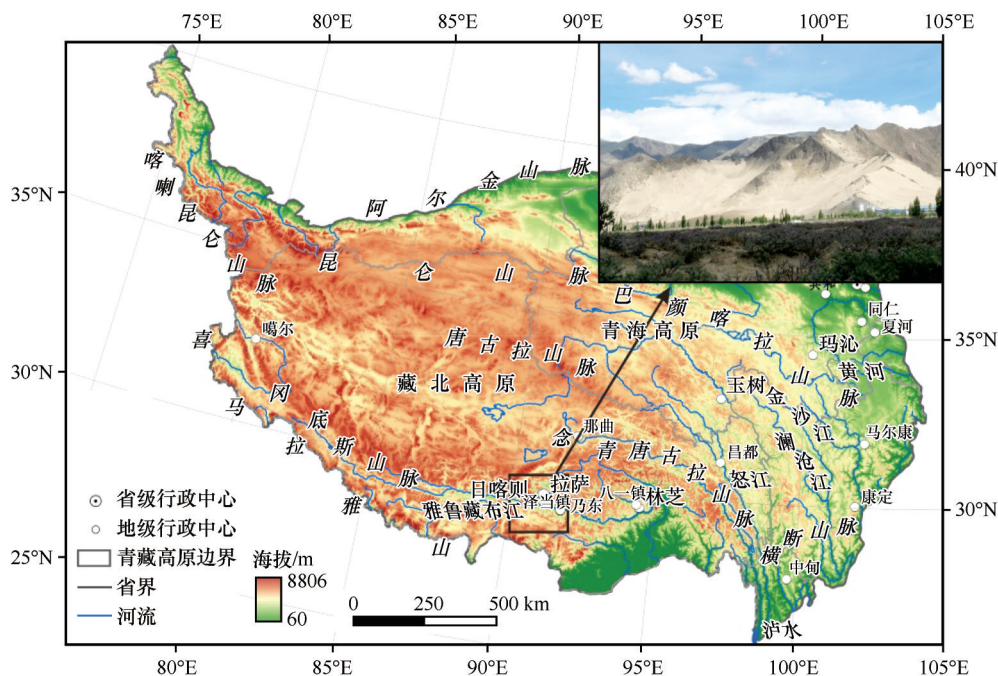


图1 研究区位图

Fig.1 The location of research area

2 研究方法

2.1 样品采集与测定

朗赛岭爬坡沙丘的样品采集于2018年6月,通过Google Earth影像选取一条与沙丘爬升方向一致的断面(图2),沿断面等间距采集河漫滩、河流阶地、山体迎风坡和背风坡表层0—5 cm沉积物样品,其中迎风坡沙丘链样品采集于丘顶。每个样品采集500—1 000 g,共采集样品54个,其中河漫滩为1[#]—5[#],河流阶地为6[#]—11[#],山地迎风坡为12[#]—53[#],

背风坡为54[#]。用手持GPS记录采样点的地理位置,并对采样点周围地形、沉积物特征、植被类型和植被盖度等进行记录。采集的样品在实验室自然风干,过2 mm筛,用于粒度组成和化学元素的测定。

粒度实验于2018年11月完成,采用美国贝克曼库尔特有限公司生产的BECKMAN COULTER LS 13 320对沉积物的粒度进行测量,通过软件将数据按照粒度参数、粒度分级导出,参照Folk等^[32]的公式,计算平均粒径 M_z 、分选系数 σ 、偏度 SK 、峰度 K_g 。化学元素含量的测定于2019年3月完成,首先

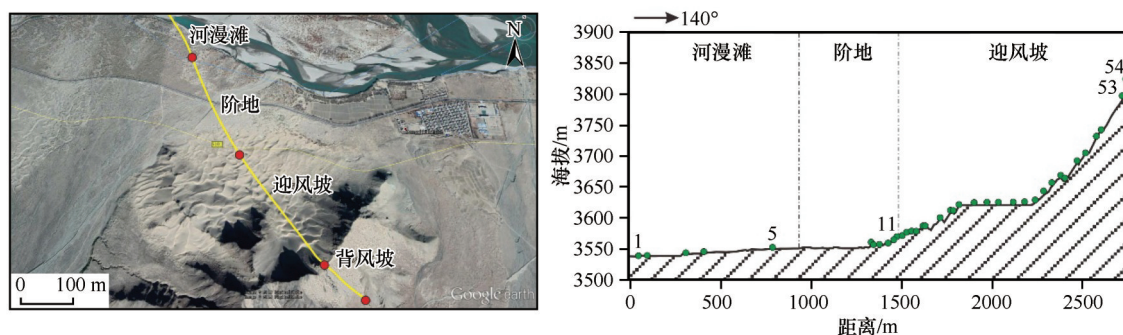


图2 地形剖面与采样点分布

Fig.2 Terrain profile and sampling point distribution

将风干的样品碾磨至200目以下,称取约4 g放入制样模具,外围放入硼酸,在30 t压力下压制成一个圆形待测样片,采用Axios型顺序式波长色散型X射线荧光光谱仪进行检测,元素测量误差<5%。氧化物用百分比表示,常量氧化物使用归一化值,微量元素用 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示。由于沙漠沉积的矿物中,常量化学元素都是以氧化物的形式呈现,本文所有的常量元素均用氧化物百分含量表示。

2.2 参数指标

Na/K 值:Na 和 K 元素的化学性质活跃,在表层风化过程中容易产生淋溶迁移,Na 和 K 的分子摩尔比值常用来衡量沉积物中斜长石的风化程度,与风化程度呈反比^[33]。**Rb/Sr 值:**Rb 一般存在于含 K 的矿物中,Sr 主要存在于风化较强的含 Ca 矿物中,Rb 与 Sr 的分子摩尔比值是指示化学风化程度的另一个指标,与风化程度呈正比^[34]。**化学蚀变指标 (CIA)**是通过衡量沉积物中 Al_2O_3 的含量来判断风化程度,CIA 值越大风化程度越大,其中, $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100\%$, CaO^* 为硅酸盐矿物中的摩尔含量(当 CaO 的摩尔数大于 Na_2O 时, $\text{mCaO}^* = \text{mNa}_2\text{O}$;当 CaO 的摩尔数小于 Na_2O 时, $\text{mCaO}^* = \text{mCaO}$)^[35]。**成分变异指数 (ICV)**是通过沉积物中的黏土矿物含量分析化学风化程度, $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^* + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$,当 $\text{ICV} > 1$ 时,风化程度较低,当 $\text{ICV} < 1$ 时,风化程度较高^[36-37]。**化学蚀变替代指标 (CPA)**代表钠长石淋溶强度, $\text{CPA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ ^[38]。**淋溶系数 β** 通过沉积物中的 SiO_2 含量反映风化程度, $\beta = \text{Si}_2\text{O} / (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$;风化淋溶指数 ba 也是通过沉积物中化学性质较稳定的氧化物反映风化程度, $ba = (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ 。淋溶系数与风化程度呈正比,风化淋溶指数与风化程度呈反

比^[35]。残积指数 R :Fe 和 Al 的氧化物化学性质比较稳定,在风化过程中不易淋失,而碱性金属的氧化物容易发生淋失,残积指数与风化程度呈正比, $R = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ ^[35]。

3 结果与分析

3.1 爬坡沙丘沉积物的粒度特征

沉积物的粒径组成可以反映风成沙的主要粒径范围以及不同粒径组分所占的比例。粒度的配比不仅与沙源密切相关,还与风成沙的搬运与堆积过程有关。山南宽谷朗赛岭爬坡沙丘表层沉积物粒度统计结果表明(表1),爬坡沙丘的沉积物以细沙(49.48%)和中沙(42.32%)为主,其次为极细沙(4.21%),三者组分共占约96%,而黏粒、粉沙、粗沙和极粗沙所占比例较少。

从整个断面来看,不同地貌部位沉积物粒径总体仍以细沙和中沙为主(表1),其中河流阶地与其他地貌部位的差异较大。河漫滩沉积物以细沙(48.13%)含量最高,中沙含量(31.2%)次之,粉沙(3.56%)、极细沙(8.18%)、粗沙(5.04%)和极粗沙(3.02%)的含量差异较小,且河漫滩沉积物的平均粒径最大,风选最差,偏度正偏,峰度尖锐。河流阶地沉积物以中沙含量(55.98%)最高,其次为细沙(28.54%),其他组分的含量差异较小。山体迎风坡和背风坡的沉积物粒径以细沙和中沙为主,两者组分分别占到了94%、96%。从整个断面来看(表1、图3A),河漫滩—阶地—迎风坡—背风坡,沉积物平均粒径 M_z 呈现出细—粗—细—粗的变化趋势,分选系数 σ 减小、分选变好。从断面的各粒级含量百分比可以看出,河漫滩—阶地中沙的含量明显增加了24.78%,细沙减少了19.59%,其他组分也均在减少;阶地—迎风坡,细沙明显增加了24.05%,而中沙及

表1 朗赛岭爬坡沙丘沉积物粒径组成与粒度参数

Table 1 Grain size composition and parameters of climbing dunes sediments at Langsailing

地貌 部位	各粒级含量/%							M_z/Φ	σ/Φ	SK	K_g
	黏粒	粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙	极粗沙				
	<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— 1 mm	1— 2 mm				
河漫滩(n=5)	0.67	3.56	8.18	48.13	31.20	5.04	3.02	2.11	0.81	0.08	1.34
河流阶地(n=6)	0.63	3.05	5.41	28.54	55.98	4.48	1.92	1.86	0.77	0.20	1.35
迎风坡(n=42)	0.41	1.31	3.62	52.59	41.65	0.37	0.05	2.11	0.45	0.12	1.08
背风坡(n=1)	0.50	1.41	2.16	51.53	44.40	0.00	0.00	2.07	0.41	0.11	1.07
平均值(n=54)	0.46	1.73	4.21	49.48	42.32	1.25	0.53	2.08	0.52	0.13	1.14

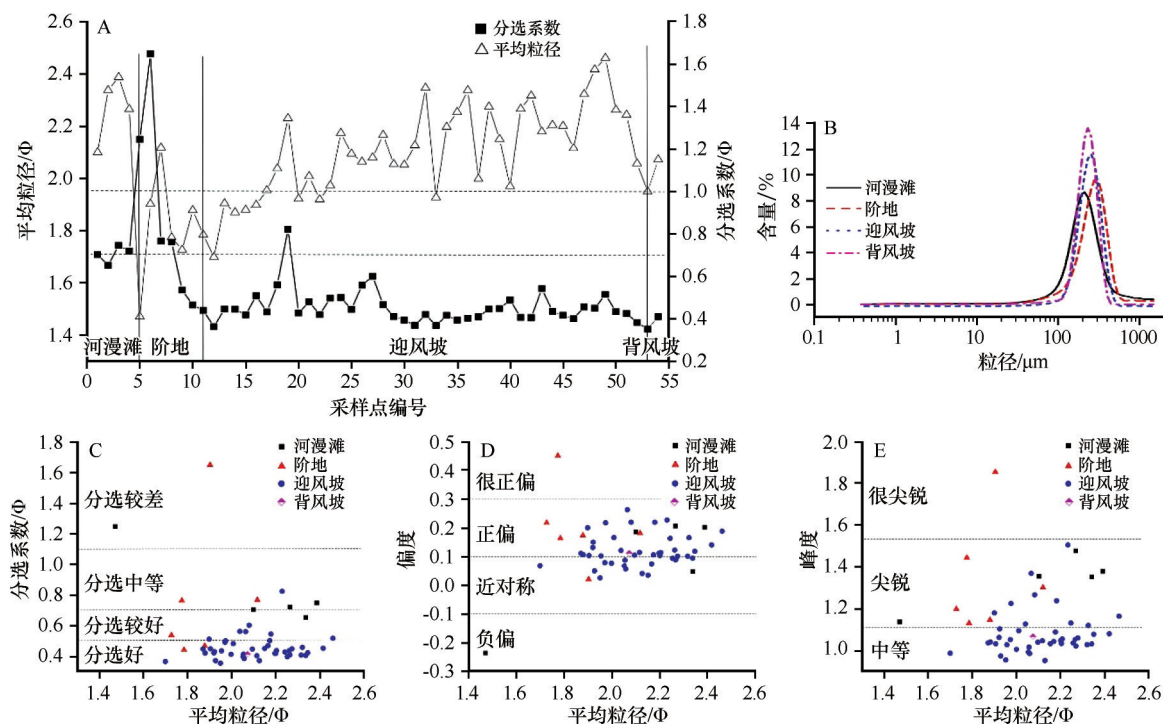


图3 朗赛岭爬坡沙丘沉积物粒度参数特征

Fig.3 Particle size parameter characteristics of climbing dunes sediment at Langsailing

其他组分的含量下降,这与风力能够搬运较细的沙物质向坡麓输送有关;迎风坡—背风坡中沙、黏粒和粉沙的含量增加,其他组分的含量减少。因此,与河漫滩相比,迎风坡的细沙含量明显增加了4.46%,中沙含量增加了10.45%;与阶地相比,迎风坡的细沙含量明显增加了22.99%,中沙含量减少14.33%,朗赛岭爬坡沙丘具有爬升潜力的粒径是细沙(0.125—0.25 mm)和中沙(0.25—0.5 mm)。

爬坡沙丘断面沉积物粒径频率分布曲线表明(图3B),不同地形部位沉积物粒径频率均表现为单峰型,河漫滩、迎风坡和背风坡沉积物的峰值粒径相似,为150—310 μm,但河漫滩的沉积物较细。

阶地沉积物的粒径偏大,峰值粒径213—370 μm。因此,朗赛岭爬坡沙丘断面沉积物的粒径组分差异较小,整体以细沙和中沙为主,在个别地貌部位有所不同。

从爬坡沙丘断面沉积物的平均粒径与分选系数散点图可以看出(图3C),不同地貌部位沉积物整体分布较为集中,分选水平较好,分选差异小。迎风坡与背风坡的沉积物粒径较小,风选较好,而河漫滩沉积物的粒径组成混杂,分选属于中等至较差水平。从平均粒径与偏度的散点图来看(图3D),整个断面偏度为近对称到正偏分布,不同地形部位偏度差异较小,说明沉积物粒径整体偏向粗颗粒—

侧,分选较好。河漫滩与阶地有个别采样点处于很正偏或负偏,表明个别样点细颗粒与粗颗粒组分含量突增,分选相对变差。从平均粒径和峰度的散点图来看(图 3E),沉积物的峰度属于中等到尖锐,河漫滩和阶地与其他地貌部位差异明显,河床粒径较小且阶地颗粒较粗,沉积物峰度尖锐,迎风坡与背风坡峰度为中等到尖锐。综上所述,朗赛岭爬坡沙丘沉积物整体差异较小,由坡底到迎风坡顶粒径变小,分选变好,尤其在河漫滩和阶地沉积物兼具风成和水成的特征,而在坡麓地带表现为明显的风成特征。

3.2 爬坡沙丘沉积物的地球化学元素特征

对爬坡沙丘沉积物的常量氧化物统计得出,朗赛岭爬坡沙丘沉积物中 SiO₂(75.77%)含量最高, Al₂O₃(12.33%)、Fe₂O₃(3.13%)和 Na₂O(2.49%)含量次之,其他氧化物差异较小(表 2)。与其他风成沉积物对比, SiO₂的含量高于黄土、古土壤、上陆壳(UCC)和陆源页岩(PAAS)。CaO 的含量高于黄土、古土壤、低于 UCC;Na₂O 的含量高于黄土、古土

壤和 PAAS,低于 UCC,其他常量元素含量均低于黄土、古土壤、UCC 和 PAAS。爬坡沙丘表层沉积物与上陆壳对比得知,除了 SiO₂有一定富集外,其他氧化物都存在一定的亏损;与陆源页岩相比, SiO₂和 Na₂O 相对富集, Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 和 K₂O 则相对存在亏损。

从爬坡沙丘不同地貌部位来看(表 2),沉积物中的氧化物仍以 SiO₂含量为主,从河漫滩到山体背风坡, SiO₂、K₂O 的含量逐渐增加, Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O 和 Na₂O 则逐渐减少,石英和长石的含量增加,而黏土矿物的含量减少。与其他风成沉积物比较,不同地貌部位沉积物中 SiO₂的含量均高于黄土、古土壤、UCC 和 PAAS。河漫滩与阶地的 Na₂O 含量高于黄土、古土壤和 PAAS,而低于 UCC;迎风坡与背风坡的 Na₂O 含量高于黄土和古土壤,低于 UCC 和 PAAS。背风坡的 CaO 含量均小于这 4 种风成沉积物,河漫滩、阶地和迎风坡的 CaO 含量高于黄土、古土壤和 PAAS,低于 UCC。爬坡沙丘断面沉积物中的 Al₂O₃、Fe₂O₃和 K₂O 含量均低于其他 4 种沉积物,但河漫滩中 MgO 的含量高于其他 4 种沉积物。

表 2 朗赛岭爬坡沙丘断面沉积物的常量氧化物含量
Table 2 Primary oxide content of climbing dunes sediments at Langsailing

地貌部位	参数	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MgO/%	CaO/%	Na ₂ O/%	K ₂ O/%
河漫滩 (n=5)	变化范围	67.69—75.07	12.48—14.23	3.21—5.22	1.61—8.48	1.45—2.42	1.87—2.59	2.33—2.99
	均值	71.09	13.35	4.47	3.17	1.98	2.39	2.82
阶地 (n=6)	变化范围	69.41—78.54	11.61—12.64	1.99—4.73	0.89—6.54	1.05—1.63	2.00—2.56	2.48—3.17
	均值	75.57	12.24	2.93	2.08	1.32	2.38	2.98
迎风坡 (n=42)	变化范围	70.43—78.76	11.54—13.05	1.93—7.22	0.80—3.10	0.96—1.88	2.40—2.72	2.74—3.23
	均值	76.32	12.22	3.02	1.09	1.22	2.52	3.05
背风坡 (n=1)	变化范围	77.59—77.59	12.10—12.10	2.31—2.31	0.89—0.89	1.08—1.08	0.49—0.49	3.09—0.39
	均值	77.59	12.10	2.31	0.89	1.08	0.49	3.09
平均值 (n=54)	变化范围	67.69—78.76	11.54—14.23	1.93—7.22	0.80—8.48	0.96—2.42	1.87—2.72	2.33—3.23
	均值	75.77	12.33	3.13	1.39	1.30	2.49	3.03
黄土	均值	66.40	14.20	4.81	2.29	1.02	1.66	3.01
古土壤	均值	65.18	14.79	5.12	2.21	0.83	1.41	3.15
上陆壳	均值	66.00	15.20	5.00	2.20	4.20	3.90	3.40
陆源页岩	均值	62.80	18.90	7.22	2.20	1.30	1.20	3.70

常量氧化物使用归一化值;黄土、古土壤、UCC、PAAS 数据来自于参考文献[39]。

朗赛岭爬坡沙丘不同地貌部位常量氧化物的 UCC 标准曲线变化趋势较大(图 4A),沉积物中 SiO₂含量富集,Fe₂O₃、MgO 和 CaO 的含量与其他氧化物相

比变异系数较大。其中,河床中 MgO 的含量高于 UCC,阶地的 MgO 含量,接近 UCC;Al₂O₃的含量均接近 UCC,CaO、Na₂O 和 K₂O 的含量均处于亏损状态。

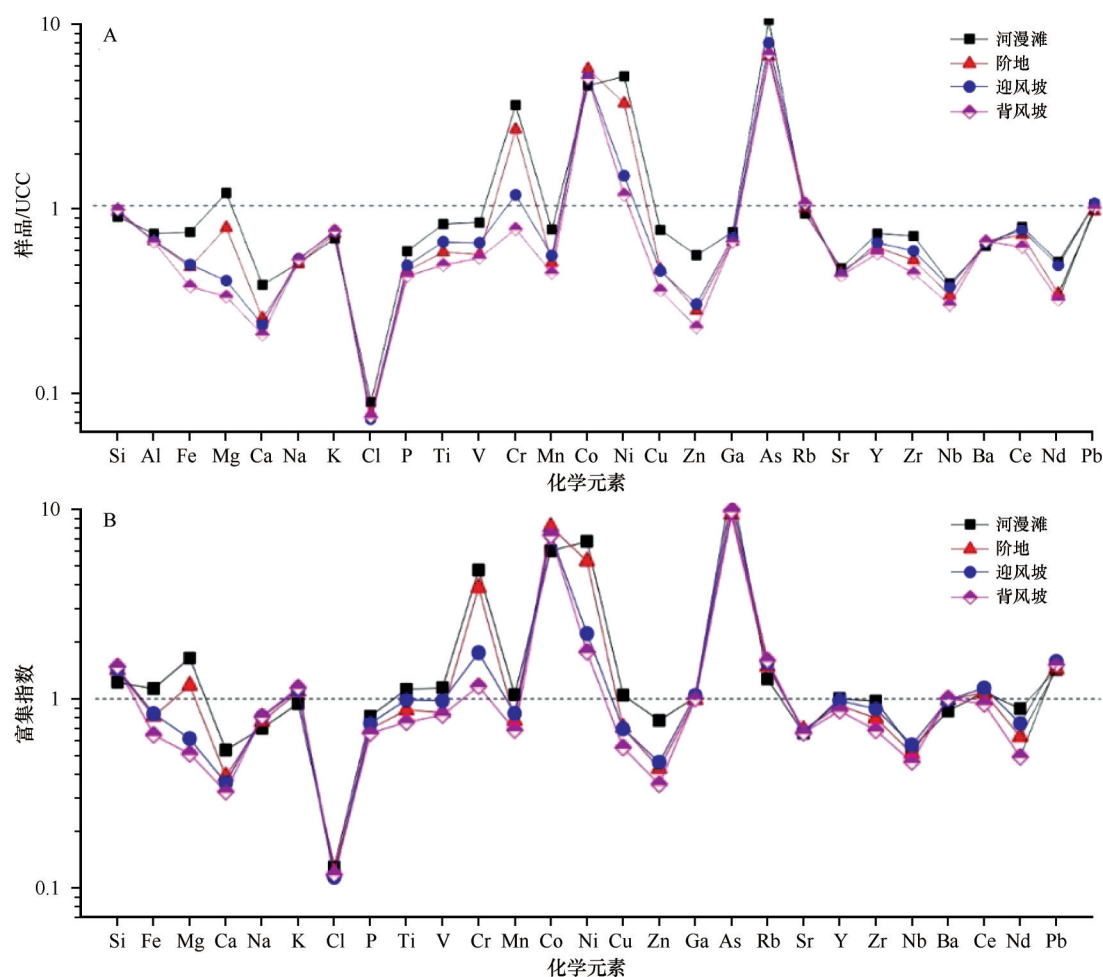


图4 朗赛岭爬坡沙丘不同地貌部位地球化学元素富集因子

Fig.4 Geochemical element enrichment factors in different topographic parts of climbing dunes at Langsailing

不同地貌部位微量元素没有明显的变化趋势,元素 Cr、Co、Ni、As、Rb 和 Pb 的平均含量均高于 UCC,处于富集状态,其他元素则处于亏损状态。元素 Co、Rb、Ba 和 Pb 则主要分布在坡麓地带,而其他微量元素则主要分布在河漫滩和阶地沉积物中。

从沉积物化学元素的富集指数来看(图 4B),不同地貌部位的变化趋势基本一致,其中不稳定元素受沉积环境影响较为敏感。从河漫滩到背风坡, Si、Fe、Mg、Cr、Co、Ni 和 As 相比 UCC 明显富集, Ca、Na、Cl、Cu、Zn、Sr、Zr、Nb 及 Nd 相比 UCC 明显亏损。因此,爬坡沙丘在不同地貌部位的沉积物表现出明显的同源性,但后期沉积环境的塑造又引起了地球化学元素在空间上的富集差异。

3.3 爬坡沙丘沉积物的化学风化特征

朗赛岭爬坡沙丘沉积物在不同地貌部位的 Na/K 值均高于 UCC 和 PAAS 均值, Rb/Sr 值高于 UCC 而低于 PAAS(表 3)。从沉积物的淋溶系数 β 、风化淋溶

指数 ba 和残积指数 R 来看,淋溶系数超过 UCC, 风化淋溶指数超过 PAAS 而低于 UCC, 残积指数超过 UCC 而低于 PAAS。不同地貌部位沉积物的 CIA 值均高于 UCC 而低于 PAAS, 且 CIA 值为 50—65, 属于寒冷干燥气候条件下低等的化学风化程度。沉积物的 ICV 值均超过 PAAS 而小于 UCC, 表明沉积物中多为非黏土矿物, 属于较弱化学风化程度下的首次沉积。 CPA 的值均高于 UCC 而低于 PAAS, 其中河漫滩沉积物中的钠长石的淋溶强度最大。

从化学风化指数散点图来看, 不同地貌部位沉积物样点分布比较集中, 沉积物的淋溶系数与风化淋溶指数呈反比(图 5A), 与残积指数呈正比(图 5B), 朗赛岭爬坡沙丘沉积物的风化程度在迎风坡和背风坡最大, 河漫滩最小。从成分变异指数 (ICV) 与化学风化指数 (CPA) 和 $CaCO_3$ 的散点图来看(图 5C 和 5D), 不同地形部位沉积物的 ICV 值均大于 1, 表明沉积物中含有较少的黏土矿物, 属于没

表 3 朗赛岭爬坡沙丘沉积物的化学风化指标

Table 3 The chemical weathering index of climbing dunes sediments at Langsailing

地貌部位	Na/K	Rb/Sr	淋溶系数	风化淋溶指数	残积指数	CIA	ICV	CPA
河漫滩	1.29	0.63	7.10	0.78	1.77	56.08	1.06	84.82
阶地	1.21	0.69	8.95	0.71	1.77	56.16	0.98	83.73
迎风坡	1.25	0.75	9.71	0.65	1.93	55.82	0.10	82.90
背风坡	1.22	0.77	10.25	0.63	1.90	56.18	0.94	82.87
平均值	1.25	0.73	9.40	0.67	1.90	55.89	1.00	83.17
UCC	1.03	0.32	4.82	0.90	1.47	48.00	1.50	70.32
PAAS	0.29	0.80	7.48	0.44	3.11	70.40	0.80	90.54

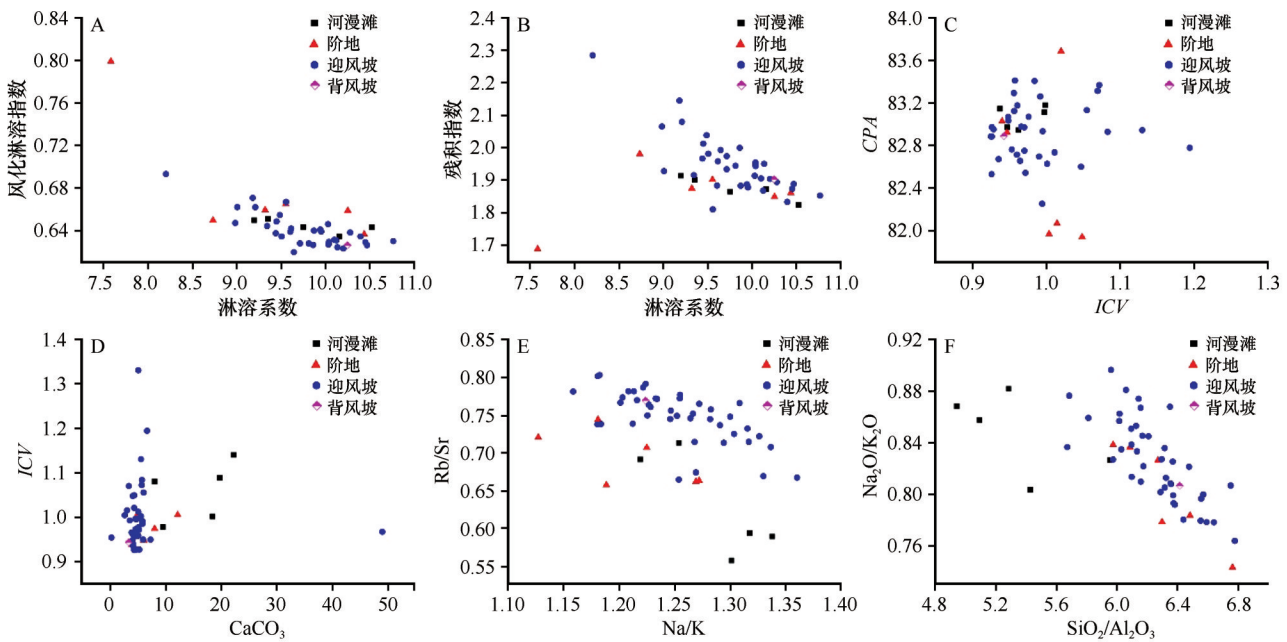


图 5 朗赛岭爬坡沙丘沉积物的化学风化指数散点图

Fig.5 Scatter diagrams of chemical weathering index of climbing dunes at Langsailing

有经历再循环的低等化学风化条件下的首次沉积；CPA 值越大代表钠长石的淋溶强度越强,坡麓地带淋溶强度较大, CaCO₃ 含量最少, 化学风化程度最大。从 Na/K 和 Rb/Sr 的散点图来看(图 5E), Na/K 和 Rb/Sr 呈负相关关系, 从河漫滩—阶地—迎风坡—背风坡, 沉积物的风化程度呈现逐渐增加的趋势, 其中河漫滩沉积物的风化程度最低。从 SiO₂/Al₂O₃ 与 Na₂O/K₂O 的散点图来看(图 5F), 河漫滩沉积物的 Na₂O/K₂O、SiO₂/Al₂O₃ 低于其他地貌部位, 这可能与河漫滩的水成环境及其沉积物的粒径大小有关。综上所述, 山南宽谷朗赛岭爬坡沙丘沉积物河漫滩—阶地—迎风坡—背风坡, 风化程度呈现逐渐增加的趋势, 但不同地貌部位沉积物风化程度差异较小, 指示着物质同源性的特征。化学风化程度与物

源、沉积环境以及近地表气流均有密切的关系。

A-CN-K 图反映了沉积物的风化过程, PAAS 是 UCC 的初级风化产物, UCC 指向 PAAS 的方向代表着大陆初期的风化趋势。朗赛岭爬坡沙丘表层沉积物在 A-CN-K 图中的 UCC 附近, 且采样点连线与 A-CN 线平行, 表明爬坡沙丘沉积物与 UCC 化学风化程度相似, 处于较弱的去 Na、Ca 阶段(图 6)。4 个地貌部位的 CIA 值均小于 65, 说明从河漫滩到坡麓沉积物经历了相似的地球化学过程, 在风化程度上基本一致, 半干旱气候使得朗赛岭爬坡沙丘沉积物缺乏有效的化学风化, 以物理风化过程为主。

A-CN-K-FM 可通过 Fe、Mg 元素的组成差异揭示元素的迁移、淋溶过程。由图 6 可知, 碱性金属和 Al 元素的含量在空间上差异不大, 但 Fe、Mg 元素的

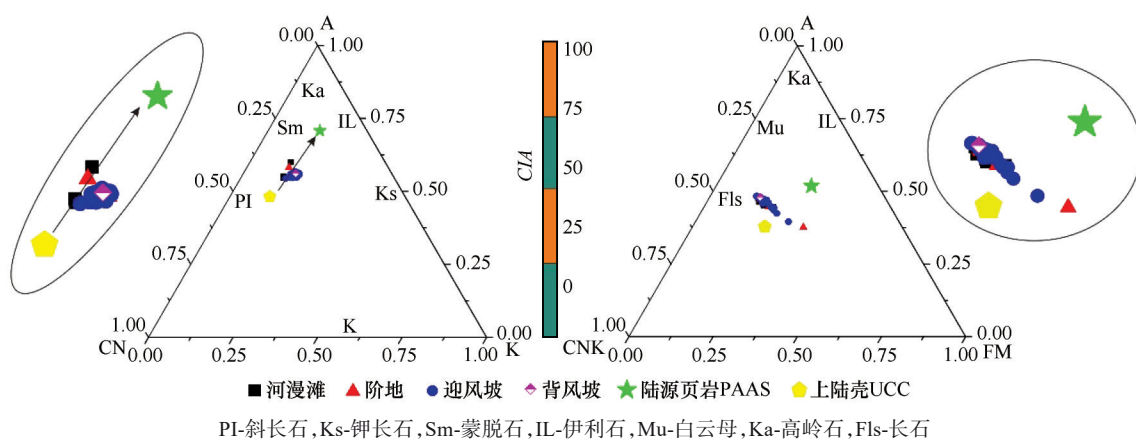


图6 朗赛岭爬坡沙丘沉积物的A-CN-K和A-CN-K-FM图解
Fig.6 A-CN-K and A-CN-K-FM ternary diagram of climbing dunes sediment at Langsailing

组成在空间上存在差异性,这与元素自身稳定性有关。从河漫滩到坡麓,Fe元素呈现先降低再增加的趋势,而Mg元素呈现逐渐降低的趋势,表明沉积物在向坡麓搬运的过程中Fe、Mg含量出现亏损且在细颗粒中相对富集。爬坡沙丘在形成过程中,细颗粒物质在携沙风的作用下被搬运堆积于迎风坡中,而背风坡由于重力作用沉积物相对较粗,因此Fe、Mg元素在空间上的分布差异是风力风选的结果。

4 讨论

4.1 爬坡沙丘粒度分异的原因

王晓旭等^[40]指出,地形的抬升对近地表气流有一定的阻滞和抬升作用,使得气流在坡前减速而在坡面逐渐加速,直到坡顶风速达到最大。野外近地表气流表明,在爬坡沙丘坡面上风速也呈现逐渐增加的趋势,这与风洞试验结果一致,山南宽谷朗赛岭爬坡沙丘断面沉积物的粒径特征与近地表风况密切相关。由表1看出,从河漫滩到河流阶地,沉积物中沙含量明显增加了24.78%,而其余组分均在减少且共减少了24.57%,河漫滩沉积物由于受水成环境的影响加之物源多样,颗粒组成复杂且分选最差,而阶地沉积物由于脱离了水成环境而受风力影响较大。风洞试验证明,受地形的抬升作用,气流会在坡前遇阻,然后被迫抬升,坡前对气流的阻碍作用会增加坡脚和坡顶间的气压差,从而使得气流在坡面加速^[40]。阶地沉积物由于刚刚脱离水成环境,气流在此遇阻并相对减速,只有较细的颗粒物被风带走,剩余的沉积物粒径相对变大,分选相对变好。

从河流阶地到山地迎风坡,随着坡长加长,风速增加,不同粒径的沉积物移动方式不同,粒径小于0.15 mm的悬移组分,因颗粒间的粘结力强而不易被风带走;粒径0.15—0.7 mm的跃移组分分选较好,构成沙漠沙粒度的主要组分中值粒径0.1—0.3 mm;粒径大于0.7 mm的蠕移组分难以进行长距离搬运^[41]。因此,迎风坡沉积物中的细沙组分明显增加了24.05%,其余组分也均在减少且中沙组分减少了14.33%,分选较好,这与风速、沉积物的搬运方式有关。具有爬升潜力的粒径组分是细沙(0.125—0.25 mm)和中沙(0.25—0.5 mm),且细沙的爬升能力最强^[26-27]。背风坡沉积物黏粒、粉沙、中沙分别增加了0.09%、0.1%、2.75%,极细沙、细沙含量减少了1.06%、1.46%。受地形的抬升作用,风速在坡顶达到最大,越过坡顶后风速开始降低,再加上沉积物自身的重力分选作用,使得粒径相对变大。此外,背风坡由于水分条件相对较好,生长有灌丛,山体基岩风化物也参与其中,因此沉积物中黏粒、粉沙含量相对增加,风选相对变差。

综上所述,由于细沙和中沙在整个断面的搬运和沉积作用,使得不同地貌部位沉积物的粒径含量百分比发生变化,因此,爬坡沙丘粒度分异是沙源、风力搬运、沉积及风力筛选的结果。

4.2 爬坡沙丘化学元素分异的原因

地球化学元素是研究沉积物特征的重要指标,受气候、母岩、近地表气流、下伏地形和构造运动等影响,不同区域沉积物的地球化学元素组分不同。研究表明,沉积物中化学元素的迁移和风化程度均受粒径的影响,SiO₂和CaO存在于颗粒较粗的沉积

物中, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO 多存在于粒径较小的沉积物中, K_2O 和 Na_2O 存在于淋溶作用较强的沉积物中^[25]。朗赛岭爬坡沙丘从坡底到背风坡, 粒径呈现细—粗—细—粗的变化规律, SiO_2 在高阶地和背风坡的沉积物中含量较高, 而 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 和 Na_2O 在河漫滩和迎风坡沉积物中含量较高, 尤其在水成环境下, 沉积物中 Fe_2O_3 、 MgO 含量较高。朗赛岭爬坡沙丘沉积物的微量元素在河漫滩和阶地中含量最高, 这些微量元素均存在于不稳定的矿物中, 在长距离搬运过程中由于发生磨蚀或化学分解而矿物元素含量逐渐减少^[35], 而Rb、Sr、Ba、Zr等4种元素由于存在于稳定的矿物中且抗风化能力强, 可经过长距离搬运而存在于坡麓沉积物。因此, 朗赛岭爬坡沙丘沉积物很好地继承了雅鲁藏布江河漫滩的性质, 母岩性质和风选作用是造成沉积物地球化学元素空间差异的主要因素。

4.3 爬坡沙丘的物质来源

爬坡沙丘的物源一直是众多学者关注的焦点, 本文认为爬坡沙丘多为近源沙丘, 沙源主要来自于河流冲洪积物和下伏古沙。研究表明, 柴达木盆地托拉海河上游爬坡沙丘主要为古沙翻新和就地起沙, 托拉海河的河流相沉积物是重要的沙源^[25]。西藏定结地区爬坡沙丘、雅鲁藏布江山南宽谷佛掌沙丘、雅鲁藏布江米林宽谷爬坡沙丘以及美国加利福尼亚莫哈韦沙漠中爬坡沙丘的沙源都以河漫滩物质为主, 沉积物在风力的作用下不断堆积于山坡上^[24, 26-27]。朗赛岭爬坡沙丘地处雅鲁藏布江山南宽谷, 河流流速平稳且辫状水系发育, 冬春季节河漫滩裸露, 植被稀疏, 在风力的作用下河漫滩沉积物向山坡爬升。其他地貌部位沉积物与河漫滩沉积物存在一定的继承性和差异性, 因此可以判断, 朗赛岭爬坡沙丘的沉积物主要来自于雅鲁藏布江的河流相沉积物, 其中, 山体的基岩风化物也是爬坡沙丘的物源。朗赛岭爬坡沙丘形成仍离不开风水交互作用的影响, 这与柴达木盆地托拉海爬坡沙丘、米林宽谷爬坡沙丘、定结地区爬坡沙丘以及莫哈韦沙漠爬坡沙丘的形成过程相似。

5 结论

雅鲁藏布江山南宽谷朗赛岭爬坡沙丘沉积物粒度总体以细沙和中沙为主, 分选较好, 偏度为正偏, 峰态尖锐。河漫滩—阶地—迎风坡—背风坡,

粒径呈现细—粗—细—粗的变化规律, 具有爬坡潜力的细沙和中沙, 细沙的爬升能力最强。沙源和风选作用是导致爬坡沙丘粒度在不同地貌部位存在差异的主要因素。

爬坡沙丘沉积物的常量氧化物以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 Na_2O 为主, 氧化物的含量与沉积物粒径相关, SiO_2 、 Na_2O 和 K_2O 存在于较粗的沉积物中, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO 则在细颗粒沉积物中含量高。沉积物中的 SiO_2 、 Na_2O 有一定富集, 其余氧化物均存在亏损。微量元素在整个断面没有明显的变化趋势且主要分布于河漫滩中。母岩是控制沉积物地球化学元素种类和丰缺的主要因素, 风选作用使得沉积物在地表被重新分配, 进而影响着地球化学元素在空间上的分布差异。

爬坡沙丘的风化程度总体处于初等化学风化阶段, 从河漫滩到迎风坡顶风化程度逐渐增加, 不同地貌部位沉积物风化程度差异较小, 指示着物质同源性的特征。山南宽谷朗赛岭爬坡沙丘是风水交互作用的产物, 属于近源沙丘, 其物源主要为雅鲁藏布江的河流沉积物, 山体的基岩风化物也是参与爬坡沙丘形成的物源。

致谢: 特别感谢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孙忠老师、张彩霞老师在模具制样、化学元素测试中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Streetperrott F A, Holmes J A, Waller M P, et al. Drought and dust deposition in the West African Sahel: a 5500-year record from Kajemarum Oasis, Northeastern Nigeria [J]. *Holocene*, 2000, 10(3): 293-302.
- [2] 强明瑞, 陈发虎, 周爱锋, 等. 苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究[J]. *第四纪研究*, 2006, 36(6): 915-922.
- [3] Liu X X, Vandenberghe J, An Z S, et al. Grain size of Lake Qinghai sediments: implication for riverine input and Holocene monsoon variability [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 449: 41-51.
- [4] Brooks G R, Doyle L J, Davis R A, et al. Patterns and controls of surface sediment distribution: west-central Florida inner shelf [J]. *Marine Geology*, 2003, 200(1): 307-324.
- [5] Flemming B W. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(3): 425-435.
- [6] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.

- [7] Nesbitt H W, Young G. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy [J]. *Sedimentology*, 1996, 43 (2): 341–358.
- [8] Nesbitt H W, Markovics G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(8): 1653–1670.
- [9] Chen J, An Z S, Liu L W, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. *Science in China: Series D*, 2001, 31(2): 136–145.
- [10] Weltje G J, Eynatten H V. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171(1/4): 1–11.
- [11] Garzanti E, Vezzoli G, Andò S, et al. Quantifying sand provenance and erosion (Marsyandi River, Nepal Himalaya) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258(3/4): 500–515.
- [12] 徐志伟, 鹿化煜, 赵存法, 等. 库姆塔格沙漠表层物质组成、来源和风化过程 [J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 53–64.
- [13] 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.
- [14] 董治宝, 吕萍. 70年来中国风沙地貌学的发展 [J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 509–528.
- [15] Thomas D S G, Bateman M D, Mehrshahi D, et al. Development and environmental significance of an eolian sand ramp of Last-Glacial age, central Iran [J]. *Quaternary Research*, 1997, 48 (2): 155–161.
- [16] Pye K, Tsoar H. *Aeolian Sand and Sand Dunes* [M]. Berlin, Germany: Springer, 1990: 185–195.
- [17] Bateman M D, Bryant R G, Foster I D L, et al. On the formation of sand ramps: a case study from the Mojave Desert [J]. *Geomorphology*, 2012, 161–162(1): 93–109.
- [18] Evans J R. Falling and climbing sand dunes in the Cronese "Cat" mountains, San Bemardino County, California [J]. *Journal of Geology*, 1962, 70: 107–113.
- [19] Howard A H. Interaction of sand transport with topography with local winds in the northern Peruvian coastal desert [C]//Barn-dorff-Nielsen O E, Moller J T, Rasmussen, K R, et al. *Proceedings of the International Workshop on the Physics of Blown Sand*. Aarhus, Denmark: Department of Theoretical Statistics, Institute of Mathematics, University of Aarhus, 1985: 511–544.
- [20] Arens S M. Transport rates and volume changes in a coastal foredune on a Dutch Wadden island [J]. *Journal of Coastal Conservation*, 1997, 3(1): 49–56.
- [21] Tirsch D, Craddock R A, Platz T, et al. Spectral and petrologic analyses of basaltic sands in Ka'u Desert (Hawaii): implications for the dark dunes on Mars [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2012, 37(4): 434–448.
- [22] White B R, Tsoar H. Slope effect on saltation over a climbing sand dune [J]. *Geomorphology*, 1998, 22(2): 159–180.
- [23] Hesp P A, Smyth T A G. Jet flow over foredunes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(12): 1727–1732.
- [24] 周娜, 张春来, 刘永刚. 雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘粒度分异特征研究 [J]. *地理研究*, 2012, 31(1): 82–94.
- [25] 董苗, 严平, 孟小楠, 等. 青藏高原爬坡沙丘表层沉积物特征分析: 以柴达木盆地托拉海为例 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32 (4): 101–108.
- [26] 潘美慧, 薛雯轩, 伍永秋, 等. 西藏定结地区爬坡沙丘粒度特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2019, 42(6): 1337–1345.
- [27] 潘美慧, 杨安娜, 伍永秋, 等. 雅江河谷佛掌沙丘表层沉积物粒度特征 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 3076–3088.
- [28] Rowell A, Thomas D, Bailey R M, et al. Controls on sand ramp formation in southern Namibia [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2018, 43(1): 150–171.
- [29] 其米玉珍, 洛桑旺姆, 赤桑单吉. 西藏山南地区农业气候资源特点及主要气象灾害分析 [J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(26): 161–162.
- [30] 杨逸畴. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌的初步观察 [J]. *中国沙漠*, 1984, 4(3): 16–19.
- [31] 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: 地球科学*, 1999, 29(1): 88–96.
- [32] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27: 3–26.
- [33] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1659–1666.
- [34] Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1969, 33(12): 1521–1552.
- [35] 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.
- [36] Cox R. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United State [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919–2940.
- [37] Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling [J]. *Precambrian Research*, 2000, 104(1): 77–93.
- [38] Buggle B, Glaser B, Hambach U, et al. An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies [J]. *Quaternary International*, 2011, 240(1/2): 1–21.
- [39] Taylor S R, McLennan S M. *Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. London, UK: Blackwell, 1985: 277.
- [40] 王晓旭, 严平, 王勇, 等. 坡度和坡形对爬坡沙丘形成影响的风洞模拟实验 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 118–126.
- [41] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(2): 343–351.

Characteristics of surface sediments on the climbing dunes in Shannan wide valley section of Yarlung Tsangpo River, China

Dong Miao^{1,2ab}, Yan Ping^{2b,3}, Wang Xiaoxu^{2ab}, Zhang Guoming^{2cd}, Meng Xiaonan^{2ab},
Ji Xinran^{2ab}, Wang Yong^{2ab,4}

(1.School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. a.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology / b.Faculty of Geographical Science / c.MOE Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster / d.College of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology Zhuhai Base, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, Guangdong, China; 4.Institute of Geographical Sciences, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to reveal the formation process, material source and sedimentological significance of the climbing dunes in the Shannan wide valley section of Yarlung Tsangpo River, cross-sectional sampling was conducted on the climbing dunes of Langsailing, and the particle size and geochemical elemental characteristics of the climbing dunes sediments in different topography parts were analyzed. The results show that the grain size composition of the surface sediments of the climbing dunes is mainly fine and medium sands, while the river floodplain and terraces show obvious wind-water interaction, and the windward and leeward slopes show obvious aeolian characteristics; The particle size characteristics are different in different terrain. The particle size gradually becomes finer and better sorted from the riverbed to upwind slope, while the opposite trend is observed from upwind slope to the leeward slope. The geochemical element composition of the sediments is dominated by Si, Al, Fe and Na, and the small difference in the climbing dune section indicates that they have similar depositional environment. Compared with the upper continental crust (UCC), all the elements are deficient except Si. The A-CN-K ternary diagram and CIA index reveal that chemical weathering of the surface sediments is in the early stage, while the A-CN-K-FM diagram indicates that the spatial distributions of Fe and Mg elements are spatially different, which is the result of sorting action of wind. From the chemical weathering index perspective, the weathering of the sediment is enhanced from the river bed to the windward slope. In summary, material source and wind dynamics are important factors leading to the spatial differences in grain size and chemical elements. Therefore, we determine the climbing dunes of Langsailing are near-source dunes, and the material source is mainly from the river sediments of the Yarlung Tsangpo River. Meanwhile, the variance of sediment characteristics at different topography part are the active response to the interaction of wind and water.

Key words: particle size; chemical elements; material source; climbing dunes; Yarlung Tsangpo River