

青藏高原爬坡沙丘地表沉积物特征分析

——以柴达木盆地托拉海河为例

董苗^{1,2,3}, 严平^{1,2}, 孟小楠^{1,2}, 吴伟^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学地表过程与生态环境重点实验室, 北京 100875; 3. 防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 为了阐明青藏高原爬坡沙丘的物源及沉积学意义并揭示其形成机理, 对托拉海河爬坡沙丘进行断面采样, 分析爬坡沙丘不同地形部位的粒度与地球化学元素特征。结果表明, 托拉海河爬坡沙丘地表沉积物的粒度组成总体以极细砂、细砂、中砂为主, 粒度特征表现出明显的风成特点; 不同地形部位, 粒度特征呈现不同的递变规律, 自河床到迎风坡顶粒径变粗, 分选变好, 迎风坡顶到背风坡, 粒径粗细混杂, 分选变差。沉积物地球化学元素组成以 Si、Al、Ca 为主, 和上陆壳(UCC)相比, 除 Co、As、CaO、SiO₂ 以外, 其余元素都有一定的亏损, 不同部位化学元素分布具有一定相似性, 且常量氧化物之间有良好的相关性, 表明其具有相似的沉积环境。A-CN-K 图解及 CIA 值揭示了托拉海河爬坡沙丘地表沉积物化学风化处于较低程度, 大部分化学元素没有显著的风化或迁移, 整体属于早期去 Na、Ca 的阶段; A-CN-K-FM 图则表明整个断面 Fe、Mg 元素在空间分布上存在一定的差异, Fe、Mg 流失主要是差异风力风选的结果。从化学风化指标来看, 不同地形部位风化程度不同, 河床风化程度最弱, 山地迎风坡的风化程度最强; 河床与河流阶地的物源呈现多样性, 而迎风坡和背风坡物源较为单一, 可能是古沙翻新和就地起沙。因此, 初步认为托拉海河爬坡沙丘的形成经历了两个阶段: 一是古沙丘形成阶段; 二是现代爬坡沙丘形成阶段。在不同空间尺度上, 托拉海河爬坡沙丘地表沉积物的理化特征差异与风动力和水动力的差异有关, 反映出沉积物对风、水交互作用的响应。

关键词: 粒度; 化学元素; 物源; 风化过程; 爬坡沙丘; 托拉海

中图分类号: P931.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)04-0101-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.016

Characteristics of Surface Sediments of the Climbing Dunes on the Qinghai-Tibetan Plateau

——Taking the Tola Hai River in the Qaidam Basin as an Example

DONG Miao^{1,2,3}, YAN Ping^{1,2}, MENG Xiaonan^{1,2}, WU Wei^{1,2}

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University,

Beijing 100875; 3. MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing 100875)

Abstract: In order to clarify the source and sedimentological significance of the climbing dunes on the Qinghai-Tibetan Plateau and reveal its formation mechanism, the climbing dunes section samples were collected in the Tola Hai River, and the grain size and geochemical characteristics of the different terrain parts of the climbing dunes were analyzed. The results showed that the grain size of the climbing dunes of Tola Hai River mainly consisted of very fine, fine and medium sand with an obvious aeolian sedimentary characteristic. The characteristic of particles varied in different terrain; the mean grain size became coarser from the riverbed to upwind slope, meanwhile, the sorting trended to be better, but the opposite trend was observed from the upwind slope to the leeward slope. The geochemical evidence indicated that in the climbing

收稿日期: 2018-03-13

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0601901); 国家重点基础研究计划项目(2013CB956001)

第一作者: 董苗(1989—), 女, 汉族, 山西吕梁人, 博士研究生, 主要从事干旱区地貌研究。E-mail: miaodong@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 严平(1966—), 男, 汉族, 安徽宁国人, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱半干旱地区环境演变、土壤风蚀研究。E-mail: yiping@bnu.edu.cn

dunes of Tola Hai River, Si, Al and Ca were the dominant elements. Compared with the upper continental crust (UCC), all the elements except Co, As, CaO and SiO₂ appeared to a depletion status. The distribution of chemical elements in different terrain was similar, and there was a good correlation between constant oxides, indicating that they had similar sedimentary environment. The A-CN-K ternary diagram and the CIA index showed that chemical weathering of the surface sediments in the climbing dunes was in a low degree, most of the chemical elements had no significant weathering or migration, and the whole was in the stage of early Na and Ca. Moreover, A-CNK-FM ternary diagram showed that the spatial distributions of Fe and Mg were different in the whole section and the loss of Fe and Mg was mainly caused by sorting action of wind. All the chemical weathering index, including CIA, A-CN-K and A-CNK-FM, presented that different topographic parts were in different weathering degrees, the weathering degree of the river bed was the weakest, the weathering degree of the upwind slope was the strongest. The source of the riverbed and river terrace was diverse, while the source of windward slope and leeward slope was relatively single, which may be caused by ancient dunes activated and local sand source or local accumulation. Therefore, we preliminarily believed that the formation of the climbing dunes in the Tola Hai River has undergone two stages; the first was the formation of the ancient dunes and the second was the formation of modern climbing dunes. On different spatial scale, the physical and chemical characteristics of the surface sediment of climbing dunes were related to the difference between power of wind and hydrodynamic force, reflecting the response of the sediment to the interaction of wind and water.

Keywords: grain size; chemical elements; sediments provenance; weathering process; climbing dunes; Tola Hai River

地表沉积物的粒度特征、地球化学元素和矿物组成可以用来指示沉积物的沉积环境,分析沉积物的组成特征、物质来源和沉积过程等,并对古环境的重建方面也有积极的作用^[1-2]。地壳中各种化学元素的分布和迁移具有不同的特性,除了元素自身的理化性质外,气候环境也会对元素的迁移、沉积过程产生一定的影响^[3]。在我国的西北地区发育着广泛的风成地貌,这些风成沉积物的物源问题一直是地表过程研究的重要内容之一。20世纪50年代以来,学者们从矿物、地球化学元素入手,全面分析黄土沉积物的稀土元素、微量元素、分布特征、化学组成等^[4],探讨黄土沉积物的物质来源、古环境变迁、堆积过程的古气候等。20世纪80年代后,逐步开始对沙漠、粉尘等沉积物开展了一系列的研究,主要涉及到物源^[5]、侵蚀和沉积过程^[6]、粉尘输送^[7]、大陆风化和古环境重建^[8]等,分析沙漠、黄土沉积物、粉尘对现代环境的影响。

关于地表物质组成特征和来源,现有的研究主要集中于大型沙漠^[9]、沙地^[6,10]、盆地^[11]、河流^[12-14]、流域^[15]、湖泊沼泽^[16-18]、戈壁^[19]、风水交互作用的过渡带^[15]以及海岸沙丘^[20]等,对于旱区爬坡沙丘的沉积物特征的研究相对较少。本文从地球化学元素及沉积学的角度对托拉海河爬坡沙丘的样品进行详细的分析,以探讨爬坡沙丘的粒度组成、化学元素的空间分布特征,揭示爬坡沙丘的物质来源及沉积学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

托拉海河发源于昆仑山脉沙松乌拉山的北坡,是柴达木盆地南部的一条间歇性河流,向北汇入盆地中心,全长140 km,山区流域面积约100 km²。该区海拔高、温度低、降水少,具有高、寒、干的特性;年平均温度3.5℃,冬季寒冷,夏季凉爽,气温年较差大;受昆仑山冰雪融水的补给,年平均降水量25 mm,蒸发量大于降水量;无霜期小于100天,常年盛行西风,风力强劲,全年风沙日数达70多天,属于大陆性高原荒漠气候。由于柴达木盆地地势西高东低、常年风沙自西向东吹袭,使得托拉海河道向东偏移,古河道已被流沙所埋,现代河床也有局部地段开始为流沙所覆盖。风蚀与风积大大改变了该区的原始地貌,形成了类型多样的风沙地貌,在南部山前为平坦的砂砾地,在河流的西岸发育有大面积的沙地、戈壁,在河流的东岸分布有高大的爬坡沙丘(图1)。因此在洪积物不断堆积的基础上,风力作用、流水作用将长期对该区风沙地貌的形成起着重要的作用^[21]。

1.2 样品采集与测定

托拉海爬坡沙丘的样品采集于2015年7月和2016年5月,利用GoogleEarth影像选取了一条走向与风向一致的断面,沿断面采集河道、河流阶地、山地迎风坡、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 53 个,其中河床为 1#~9#,河流阶地为 10#~21#,山地迎风坡为 22#~36#,背风坡为 37#~53#。用 GPS 记录每个采样点的地

理位置,并对采样点周围的地貌、沉积物、植被特征等进行记录,采集的样品在实验室自然风干,过 2 mm 筛,用于化学元素、粒度组成的测定。

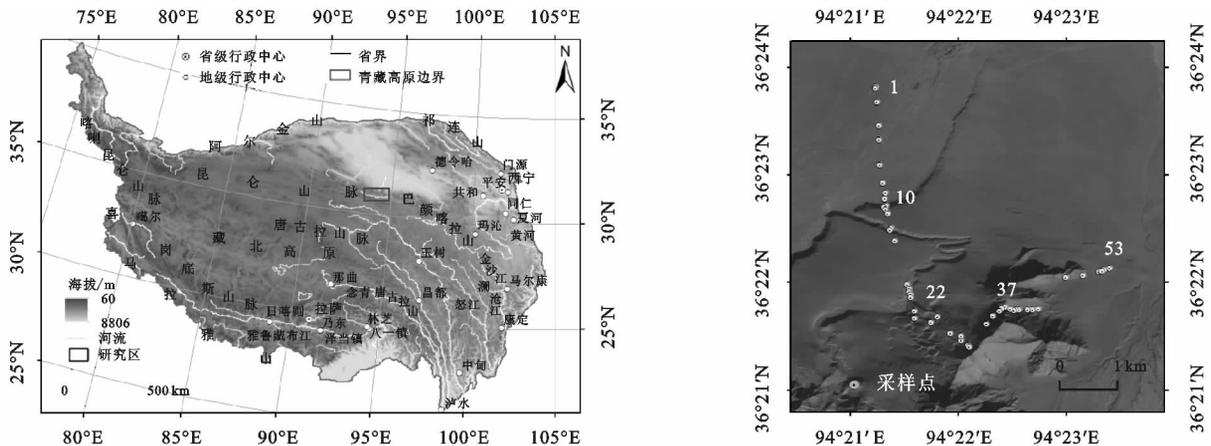


图 1 研究区位置与采样点分布

粒度试验于 2016 年 10 月在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室完成,采用 Master-size 2000 激光粒度仪进行分析,通过软件将数据按照粒度参数、粒度分级模板导出,参照 Folk 等^[22]的公式,计算粒径平均值 M_z 、分选系数 $\delta 1$ 、偏度 SK1 和峰度 KG。化学元素含量的测定于 2017 年 4 月在中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室完成,首先将风干样品碾磨至 200 目以下,称取 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,微量元素用 $\mu\text{g/g}$ 表示。

化学蚀变指数(CIA)、成分变异指数(ICV)从不同角度反映沉积物中矿物的化学风化程度,其中 $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100\%$; $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^* + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$, 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, $\text{mCaO}^* = \text{mCaO}$)。CIA、ICV 的计算均使用摩尔质量百分比。矿物成熟度(M)是判断砂岩或其他碎屑岩成熟度高低的指标, $M =$

$\text{SiO}_2 / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 。淋溶系数 $\beta = \text{SiO}_2 / (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$; 风化淋溶指数 $ba = (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$, 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^[9]。

2 结果与分析

2.1 沉积物的粒度特征

从粒度组成来看(表 1),托拉海河爬坡沙丘地表沉积物的粒径组成以细砂(37.38%)所占比例最高,其次为极细砂(27.73%)和中砂(20.21%),三者共占到了 85% 左右,粉砂占 10.13%,黏土、粗砂、极粗砂所占比例较少,不到 5%。从河床到背风坡,粒度组成有着明显的递变规律(表 1),其中河床的极细砂含量较高,粉砂、黏土、粗砂、极粗砂含量高于河流阶地、迎风坡和背风坡,细砂、中砂的含量偏低,平均粒径偏细,由于河流的携沙作用,使得河床中粗颗粒物质的含量较高。从河流阶地到迎风坡,粉砂、极细砂的含量减少,细砂和中砂的含量增加,平均粒径变粗,分选变好。从坡顶到背风坡,细砂、中砂、粗砂的含量相对减少,粉砂、极细砂的含量有所增加,平均粒径变细,分选由好逐渐变差(图 2)。

表 1 托拉海河爬坡沙丘不同地形部位沉积物粒度组成与粒度参数

地形部位	各粒级含量/%							$M_z(\Phi)$	$\delta 1$	SK1	KG
	黏土 ($< 0.002 \text{ mm}$)	粉砂 ($0.063 \sim 0.002 \text{ mm}$)	极细砂 ($0.125 \sim 0.063 \text{ mm}$)	细砂 ($0.25 \sim 0.125 \text{ mm}$)	中砂 ($0.2 \sim 0.25 \text{ mm}$)	粗砂 ($1 \sim 0.5 \text{ mm}$)	极粗砂 ($2 \sim 1 \text{ mm}$)				
河床	1.27	20.50	32.87	25.39	12.77	6.39	0.82	3.12	1.37	-0.01	1.14
河流阶地	0.59	12.90	37.77	35.16	10.95	2.47	0.15	3.02	0.96	-0.02	1.18
迎风坡	0.00	4.22	21.34	42.13	28.27	4.02	0.01	2.41	0.85	0.05	0.96
背风坡	0.38	8.07	24.15	40.97	23.02	3.08	0.32	2.65	0.95	0.11	1.09
平均值	0.47	10.13	27.73	37.38	20.21	3.80	0.28	2.74	1.00	0.05	1.08

从平均粒径与粒度参数之间的散点图来看(图 3),样点呈混杂分布,整个断面平均粒径与标准偏差

有着很好的正相关,即粒径越细,分选越差。其中河床沉积物的粒径分布范围较大,沉积物粗细混杂,分

选最差, 偏度处于近对称~正偏, 峰态为中等~尖锐; 河流阶地沉积物粒径分布范围较河床小, 以粉砂、极细砂、细砂为主, 分选开始变好, 偏度接近对称, 峰度多为中等, 部分处于尖锐; 迎风坡粒径分布范围最小, 粒径较粗且均匀, 分选最好, 偏度近对称, 峰度为正态分布; 背风坡粒径分布范围趋于增加, 以较粗粒径为主, 但有些较细的沉积物混杂进来, 分选由好逐渐变差, 偏度为近对称~正偏, 峰度中等~尖锐。

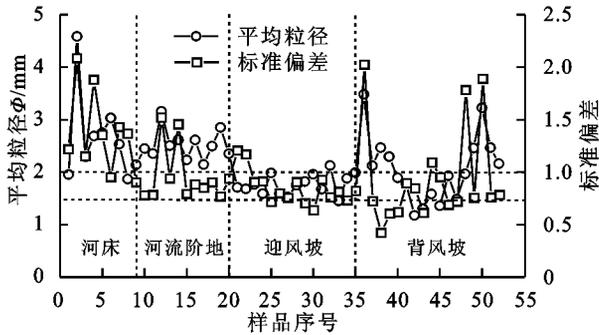


图 2 托拉海河爬坡沙丘平均粒径与粒度参数分布

2.2 地球化学元素分布特征

托拉海河爬坡沙丘地表沉积物的常量氧化物有 7 种, 包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、K₂O(表 2), 微量元素包括有 Ti、Co、Zn、Ba、Sr、Zr 等 20 种, 其中常量氧化物中 SiO₂ 含量最高, 为 66.42%, Al₂O₃ 含量为 9.52%, CaO 含量为 5.49%, Fe₂O₃、MgO、Na₂O、K₂O 的含量为 1%~3%, 其中 MgO 含量最低。常量元素中变异系数较大的有 Fe₂O₃、MgO、CaO, 变异系数较小的为 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、K₂O, 约 0.1%。微量元素丰度较高的有 Ti(0.24%)、Ba(0.05%)、Mn(0.04%)、Sr(0.03%)、Zr(0.02%), 其他微量元素的含量均小于 0.01%。

从整个断面来看, SiO₂ 含量从河床到背风坡呈

现增加的趋势, 而其他氧化物则有微小的变化。平均 SiO₂ 含量与 UCC 接近, 迎风坡、背风坡的含量高于 UCC, CaO 含量均大于 UCC 的含量, 其余氧化物元素的含量均低于 UCC 的含量。

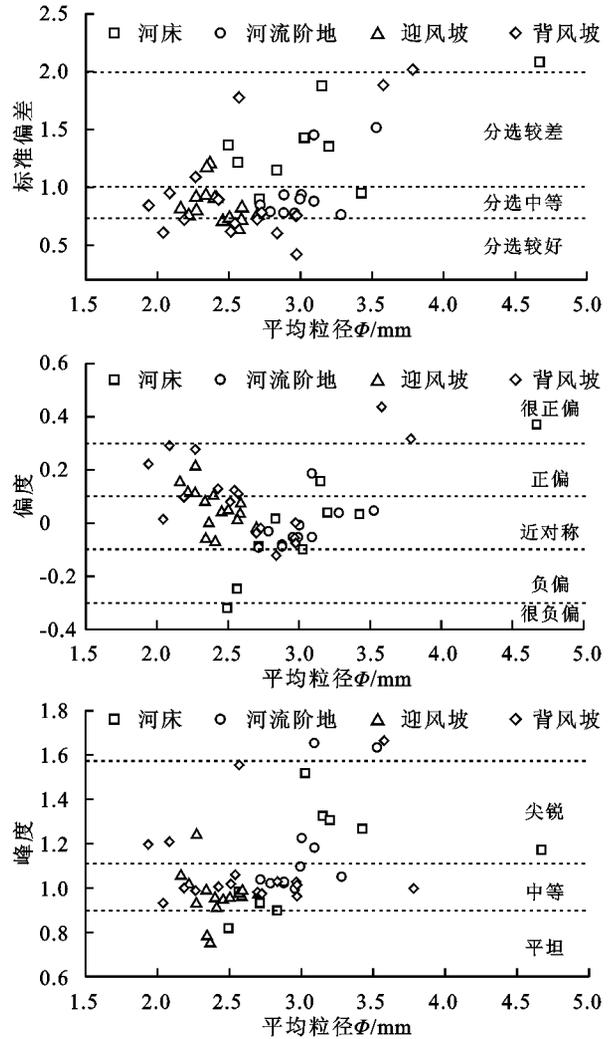


图 3 托拉海河爬坡沙丘断面粒度参数散点图

表 2 托拉海河爬坡沙丘不同地形部位常量氧化物含量

单位: %

地形部位	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
河床	64.54	9.72	3.06	1.49	5.96	2.83	2.01
低阶地	65.86	9.25	2.67	1.35	5.69	2.74	1.87
迎风坡	68.47	9.90	2.39	1.03	4.94	2.98	2.09
背风坡	69.04	9.56	2.46	1.06	5.00	2.83	2.03
变化范围	14.72~74.8	4.53~11.12	1.00~4.00	0.65~2.41	3.32~15.42	1.54~3.26	0.61~2.60
平均值	66.42	9.52	2.09	1.19	5.49	2.83	1.98
变异系数	0.12	0.10	0.25	0.29	0.30	0.10	0.14
上陆壳 UCC 均值 ^a	66.00	15.20	5.00	2.20	4.20	3.90	3.40
陆源页岩 PAAS 均值 ^b	62.80	18.90	7.22	2.20	1.30	1.20	3.70

注: a 上陆壳和 b 陆源页岩原始数据来自文献[23]。

整个断面内不同地形部位地球化学元素与上陆壳(UCC)标准线相比(图 4), 除 Co、As、CaO 有富集, SiO₂ 含量与 UCC 接近, 其余化学元素均处于亏损状态。4 种地形部位的地球化学元素变化趋势基本一致, 其中以河床的差异较为明显, 这可能与河床中沉积物的来源不同

有关。微量元素中损失严重的是 P、Cu、Zn、Ga、Rb、Nb, 表明这些元素经过了明显的迁移淋失过程, 爬坡沙丘经过长期反复的风化、搬运、沉积后, 使得地表沉积物充分混合, 因此沉积物中的化学元素一部分趋近于 UCC, 一部分发生化学淋失和富集。

从氧化物之间以及与平均粒径的相关性(图 5)可以看出,大部分的元素存在一定的相关性,如 SiO_2 、 Al_2O_3 与 Na、K、Ca 有较好的相关性, Fe_2O_3 与 MgO 相关性较好;CaO 与 Si、Al、Na、K 呈负相关; Na_2O 与 Si、Al、K 呈正相关,与 Ca 呈负相关; K_2O 与 Si、Al、Na 呈正相关,与 Ca 呈负相关,元素之间的相关系数 R^2 达到 0.7 以上。由于 SiO_2 含量较高且存在于粗颗粒中,因此除了 Na_2O 、 K_2O 以外, SiO_2 与其他元素均呈负相关。 MgO 与平均粒径之间呈很好的相关性,且在 0.01 显著水平下相关系数为 0.74,其余元素与平均粒径关系较差,多为负相关,表明 MgO 含量与粒径大小有一定的关系。

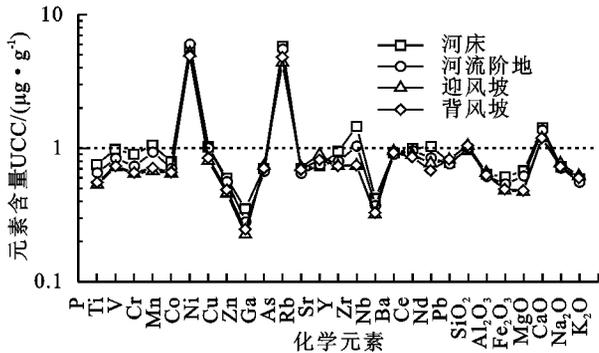


图 4 托拉海河爬坡沙丘断面元素 UCC 标准化值分布

2.3 化学风化程度

从 Na : K 与 Na : Ca 的散点图来看(图 6a),Na : K

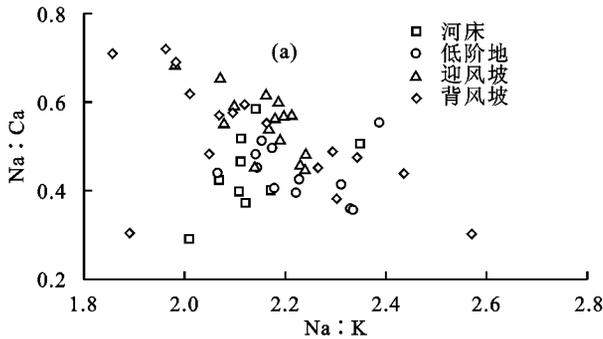


图 6 托拉海河不同断面化学风化参数散点图

A-CN-K 图反映了大陆的风化过程,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,晚期以高岭石—三水铝石—石英—铁氧化物为主要风化产物^[1]。托拉海河爬坡沙丘地表沉积物在 A-CN-K 图中集中分布于上陆壳 UCC 附近(图 7),且采样点连线与 A-CN 线平行,表明爬坡沙丘沉积物处于大陆风化早期,与上陆壳所处的风化阶段相似。4 个地形部位的 CIA 值均小于 50,说明从河床到背风坡沉积物经历了相似的地球化学过程,在风化趋势上高度一致,干旱气候条件使得托拉海河爬坡沙丘缺乏有效的化学风化,以强烈的物理风化过程为主,属于较弱的去 Na、Ca 阶段。

A-CN-K-FM 图除了可以通过碱性金属和 Al 元

与 Na : Ca 呈负相关,不同地形部位的沙物质分布混杂,除了迎风坡以外,河床、河流阶地、背风坡分布较为分散,说明断面沉积物的整体化学风化程度较低,风化过程相似,但不同采样点存在差异性。从沉积物微量元素 Ba—Sr 散点图(图 6b)可以看出,沿河床到背风坡,Ba—Sr 散点趋向分散,分布相差较远,河床、河流阶地的 Ba—Sr 散点图相比迎风坡和背风坡趋向集中,分散程度变小,表明河床、河流阶地的沉积物可能具有多源性,而迎风坡、背风坡的沉积物物源可能具有单一性,可能为局部范围内的就地起沙^[19]。

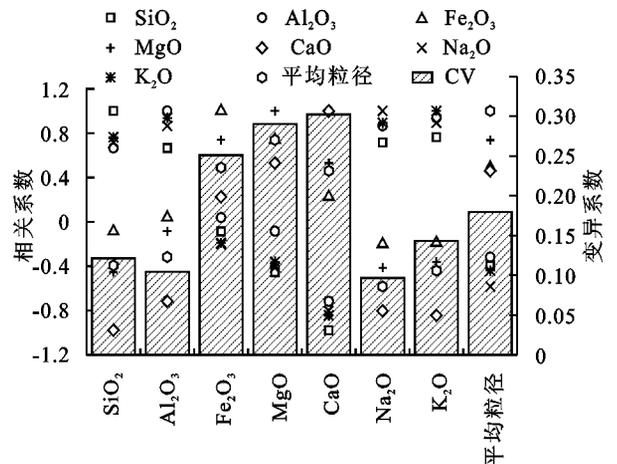
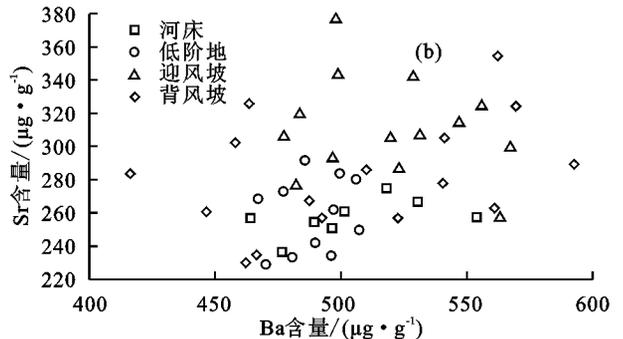


图 5 托拉海河爬坡沙丘氧化物间以及与平均粒径的相关关系

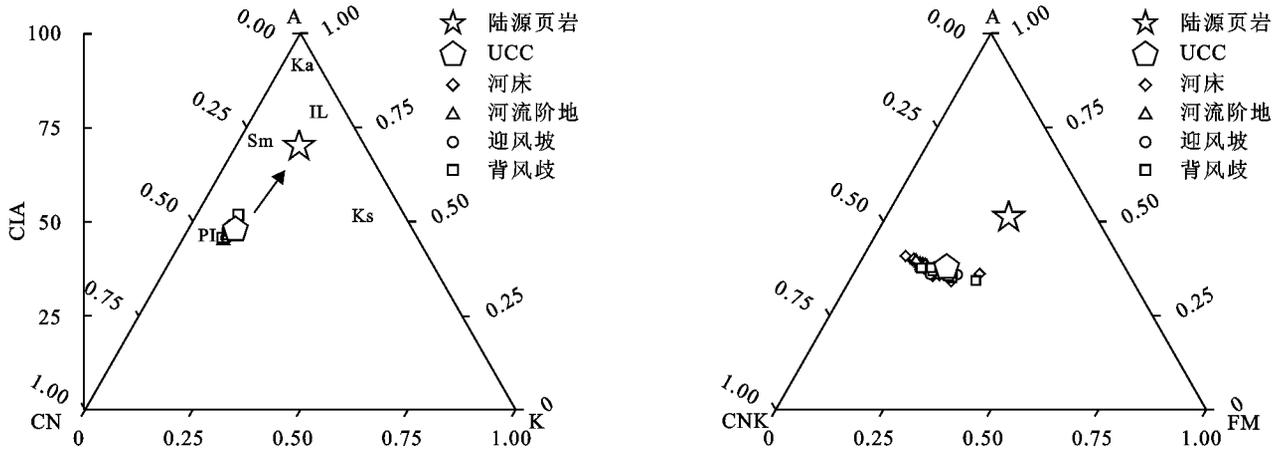


素反映沉积物中元素的迁移过程外,还可以通过 Fe、Mg 元素的组成差异揭示元素的迁移、淋溶过程。从 A-CN-K-FM 图上可以得出(图 7),Fe、Mg 元素存在显著的空间差异,含量低于 UCC,而碱性金属和 Al 含量在空间上的差异变化不大,表明爬坡沙丘沉积物中含 Na、K、Al 的矿物含量相对变化较小,而 Fe、Mg 质矿物的含量有明显的缺失,这与铁、镁元素自身化学稳定性较差有关。从河床到背风坡, Fe_2O_3 、 MgO 的含量呈现先缓慢降低再缓慢增加的趋势,表明地表沉积物在向迎风坡移动的过程中,Fe、Mg 亏损程度增加,这种亏损主要是由差异风力风选而引起的,因此 Fe、Mg 元素在细颗粒物中相对富集,而在粗颗粒物中相对缺失。托拉海河爬坡沙丘在形成过程

中,从坡底到坡顶沉积物中的细粒物质被风带走,从而造成 Fe、Mg 元素缺失。

从风化指数分布图来看(图 8),从河床到迎风坡,矿物成熟度(M)、淋溶系数(β)递增;成分变异指数(ICV)、风化淋溶指数(ba)递减,从迎风坡顶到背风坡底,矿物成熟度(M)、淋溶系数(β)递减,成分变异指数(ICV)、风化淋溶指数(ba)递增。说明从河床到迎风坡顶,风化程度加强,从迎风坡顶到背风坡底,风化程度减弱,且河床至河流阶地与迎风坡、背风坡存在明显的界限。化学风化指数以河床到河流阶地,坡顶到背风坡波动较大,迎风坡变化较为平稳,

其原因在于从河床到河流阶地,沙源主要来自现代河床物质、洪积扇、古河流相沉积物,化学风化作用较弱,不稳定;而迎风坡的沉积物除了受现代物源的影响外,还与下伏古沙丘有关,受现代河流影响较小,化学风化程度较强;背风坡的沙源一部分来自于迎风坡的落沙,一部分由背风坡底向坡上吹拂,沉积物上覆盖有花岗岩的风化碎屑物,化学风化较弱,因此由坡顶向坡底风化强度减弱。整个断面成分变异指数(ICV)均大于 1,表明沉积物中含有很少的黏土矿物,没有经历再循环或是在较弱的化学风化条件下首次沉积。



注:箭头表示大陆风化趋势。

图 7 沉积物 A-CN-K 及 A-CN-K-FM 三角图

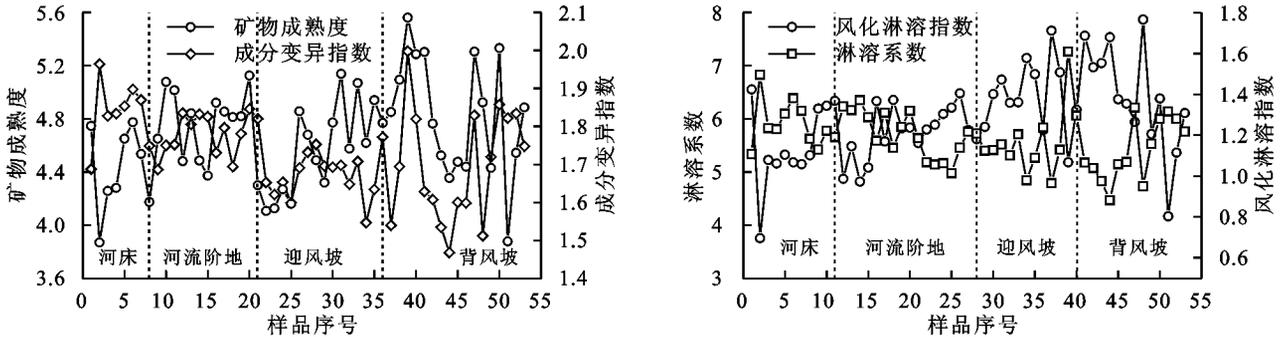


图 8 托拉海河爬坡沙丘断面风化指数分布

3 讨论

母岩、构造、气候、沉积地形影响着沉积物的组成,沉积物粒度、化学风化特征在不同空间尺度下影响因素不同。托拉海河属于大陆性高原荒漠气候,常年盛行西风,在托拉海河狭长的河滩地以及平原区有着明显的风季与洪水期交替的现象,因此河流两岸沉积物受到了风、水交互作用的影响。沉积物的粒径受到风水交互作用而被有规律的分选和重新分配,从而引起了矿物和地球化学元素的迁移,进而控制着化学蚀变指数(CIA)。已有的研究^[24]表明,长江流域沉积物粒度与 CIA 值存在较好的相关性;巴丹吉林高大沙山沉积物,随着粒径的减小, SiO₂ 与 CIA 值呈减

小的趋势^[19],本文中平均粒径与 CIA 值与 SiO₂ 含量也有一定的相关性,表明地表沉积物在运移过程中化学元素的迁移以及 CIA 值的变化都会受到粒径的影响,但是 CIA 值与 SiO₂ 含量的变化趋势与以往的研究结果不同,随着平均粒径的减小, CIA 值呈增加趋势而 SiO₂ 的含量呈减少趋势(图 9)。

关于爬坡沙丘沉积物的来源一直是研究的重点。相关研究^[1]表明,高大沙山的沙源多属于就地起沙,沙山下伏的砂岩、砂砾岩、砂砾石等碎屑岩,经过长期的风化过程后形成具有多源性的沙源;也有学者^[25]提出河流的冲积扇也是沙漠风成沙的来源。从不同地形部位沉积物的 Ba-Sr 图可以看出,迎风坡与背风坡的散点图

趋于分散,相互独立,说明它的物质来源具有单一性,从野外考察的过程中,发现托拉海河现代爬坡沙丘下覆盖有古沙丘,因此该地古沙翻新和就地起沙的可能性很大,但是不能排除托拉海河冲洪积扇的沉积物对其的贡献。河床与河流阶地的散点图相对趋向集中,说明它们的物质来源具有多样性,其中粒度特征也表明该

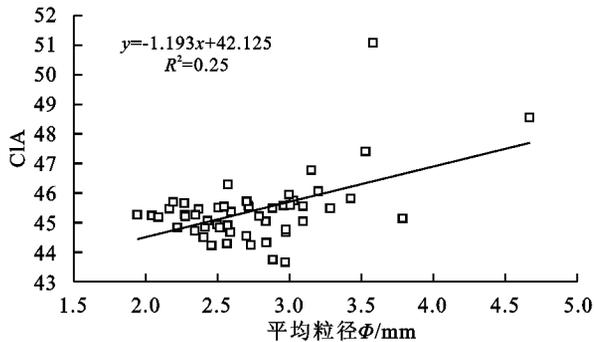
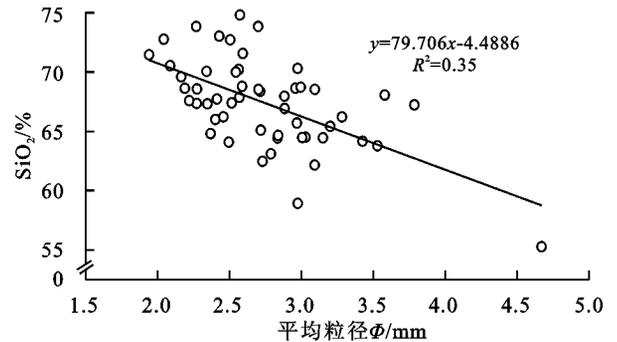


图9 托拉海河爬坡沙丘沉积物 CIA 值、 SiO_2 含量与平均粒度的关系

地形部位的沉积环境具有风水交互的特点。因此,初步认为托拉海河爬坡沙丘的形成经历了两个阶段:一为古沙丘形成时期,此阶段受风、水交替影响,古沙丘的沙源多样;二为爬坡沙丘的形成时期,此阶段主要受到了风力的影响,沉积物经过分选后粒径组成趋于一致,这与巴丹吉林高大沙山的形成过程具有相同之处^[19]。



4 结论

(1)托拉海河爬坡沙丘地表沉积物的粒度主要为极细砂、细砂、中砂,属于中等风选水平,偏度近对称,峰度为近对称的窄峰,表现出较强的风成特点;不同地形部位,粒度组成特征差异较大,自河床到迎风坡顶,粒度变粗,分选性变好,迎风坡顶到背风坡底,粒度变细,分选变差。

(2)爬坡沙丘地表沉积物的地球化学元素,除 Co、As、CaO 有富集, SiO_2 含量与 UCC 接近,其余化学元素均处于亏损状态;常量氧化物之间均有着很好的相关性,有些氧化物与平均粒径关系密切。从风化程度来看,地表沉积物总体处于初等化学风化阶段,不同的地形部位风化程度有一定差异,自河床到迎风坡顶风化程度呈递增趋势,从迎风坡顶到背风坡底风化程度呈缓慢递减趋势。

(3)托拉海河爬坡沙丘从河床到河流阶地,物源主要来自于现在河流及其阶地沉积物;迎风坡到背风坡的物源主要为古沙翻新与就地起沙,受现代河流及其冲洪积扇沉积物的影响较小。

(4)在不同空间尺度上,托拉海河爬坡沙丘的地表沉积物特征具有明显的差异,这与物源有很大的关系。尤其在尺度较小的不同地貌部位表现比较明显,这反映了在爬坡沙丘形成演变的过程中,风力作用和流水作用的差异引起了沉积物的空间分异,不同地形部位沙源不同表明地形在时间尺度的演化过程。

致谢:特别感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所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] 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.
- [2] 徐志伟,鹿化煜,赵存法,等. 库姆塔格沙漠地表物质组成、来源和风化过程[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 53-64.
- [3] 刘英俊,王鹤年,曹励明,等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [5] 尚媛,鲁瑞洁,贾飞飞,等. 青海湖湖东风成剖面化学元素特征及其环境指示意义[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 463-469.
- [6] 谢远云,孟杰,郭令芬,等. 松嫩平原杜蒙沙地地表物质的地化组成及风化特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1009-1018.
- [7] 刘佳. 兰州市大气降尘粒度分布特征与来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [8] 王斌,曾琳,赵万苍,等. 对黄土高原风尘搬运动力与沉积控制因素的新认识[J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 237-246.
- [9] 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.
- [10] Xie J, Ding Z L. Compositions of heavy minerals in north-eastern China sandlands and provenance analysis[J]. Science in China: Series D, 2007, 50(11): 1715-1723.
- [11] 王峰,刘玄春,邓秀芹,等. 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, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [12] 陈鹏飞,李潮流,康世昌,等. 雅鲁藏布江表层沉积物地球化学元素研究[J]. 地球化学, 2012, 41(4): 387-392.
- [13] 高文华,高抒,王丹丹,等. 废黄河沉积记录中来自不同河流物质的信息: 基于重矿物与地球化学元素分析[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1631-1639.

- [14] 毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J]. 地理学报, 2017, 72(2): 279-291.
- [15] 李小妹, 严平, 吴伟, 等. 克里雅河中下游流域地表沉积物的粒度与化学元素空间分布[J]. 地理科学, 2016, 36(8): 1269-1276.
- [16] 梁丽, 师育新, 戴雪荣, 等. 苏州澄湖湖底硬粘土地球化学特征及其成因意义[J]. 地球与环境, 2010, 38(4): 449-455.
- [17] 魏志强, 钟巍, 陈永强, 等. 亚热带季风区湖沼流域表生地球化学元素研究: 以江西定南大湖为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(7): 909-917.
- [18] 颜永毫, 周杰, 何忠, 等. 3 万年来卤阳湖沉积物地球化学元素变化特征及其环境意义[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 208-212, 219.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 杨纫章. 柴达木盆地托拉海河西地区的自然景观[J]. 地理学报, 1959(6): 422-434.
- [22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the signification of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27: 3-27.
- [23] Taylor S R, McLennan S M. Continental crust: Its composition and evolution[M]. London: Blackwell, 1985: 277.
- [24] 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.
- [25] Muhs D R, Lancaster N, Skipp G L. A complex origin for the Kelso Dunes, Mojave National Preserve, California, USA: A case study using a simple geochemical method with global applications[J]. Geomorphology, 2017, 276: 222-243.

(上接第 94 页)

- [16] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources [J]. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [17] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models[J]. Ecology Letters, 2008, 11(5): 470-480.
- [18] 李玉山. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, 2: 1-17.
- [19] Ma J, Xiao X M, Bu R C, et al. Application of the space-for-time substitution method in validating long-term biomass predictions of a forest landscape model[J]. Environmental Modelling and Software, 2017, 94: 127-139.
- [20] 陈锡云, 刘文兆. 半干旱黄土丘陵区果园水分蒸散特征研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 67-71.
- [21] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 27-37.
- [22] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1977-1983.
- [23] 王亮, 郭小平, 毕华兴, 等. 晋西地区不同树龄富士苹果树群体冠层结构特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 115-120.

(上接第 100 页)

- [22] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(8): 928-934.
- [23] 刘谦, 陈亚宁, 李卫红. 干旱荒漠区新垦荒地的土壤理化状况研究[J]. 新疆农业科学, 2007, 44(3): 318-321.
- [24] 贾晓红, 李新荣, 王新平, 等. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 46-50.
- [25] 徐丽恒, 王继和, 李毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 690-695.
- [26] 李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 251-257.
- [27] Rosenzweig M L. Species diversity in space and time [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [28] 王晓龙, 常龙飞, 李恒鹏, 等. 巢湖低丘山区典型植被群落与土壤环境因子特征研究[J]. 土壤, 2011, 43(6): 981-986.