张思悦,李继彦,张姚姚,等.柴达木盆地西南缘山前沙丘区沉积物地球化学特征及其指示意义[J].中国沙漠,2023,43(1):222-233.

柴达木盆地西南缘山前沙丘区沉积物地球化学特征及其指示意义

张思悦, 李继彦, 张姚姚, 徐德华
(太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619)

摘要:以柴达木盆地西南缘山前沙丘区为研究区,采用地球化学元素分析方法,阐明了研究区不同类型地表沉积物的地球化学元素特征,并探讨其风化特征、物质来源及输移过程。结果表明:(1)研究区沉积物常量元素组成以SiO_2、Al_2O_3和CaO为主,三者的平均含量总和超过83%。微量元素以Cl、Ba、Sr和Zr含量较高。与上陆壳(UCC)平均化学元素组成相比,常量元素CaO轻微富集,微量元素As高度富集,Co轻微富集。(2)研究区化学蚀变指数(*CIA*)变化较小,为40.90~53.05,平均47.51,化学风化程度较弱,均处于风化的初期阶段。(3)特征元素比值表明,研究区沉积物具有相同的物质来源。柴达木盆地西南缘东昆仑山中的岩石经过风化剥蚀产生的碎屑物质在季节性流水作用下被搬运至山前堆积,形成广布的山前冲-洪积平原,后经风力吹蚀改造形成现在的地表景观。本研究不仅可以丰富区域风沙地貌研究内容,而且也可为区域风沙灾害的防治提供理论基础。

关键词:物源;地球化学特征;沙丘;柴达木盆地
文章编号:1000-694X(2023)01-222-12 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00154
中图分类号:P931.3 **文献标志码**:A

0 引言

物源研究是风沙地貌研究的重要内容。在沙漠物源研究中,传统方法是沉积物的粒度和重矿物分析,并结合野外地貌调查、古地理及地质资料来推断沙漠物源[1]。近10多年,研究者尝试以地球化学、环境磁学和单颗粒锆石定年的方法探讨沙漠物源。地球化学元素方法可指示地球表层沉积物的组成特征,在分析风尘[2]、黄土[3-7]、沙漠等地表沉积物的物质来源、风化和沉积过程,以及重建古环境等方面有积极意义。塔克拉玛干沙漠石英砂表面保留有冰川、河流、风力等外营力作用留下的痕迹,表明其物质具有多源性,昆仑山和天山是其主要物源区[8-9]。巴丹吉林沙漠的沙物质主要来自沙漠上风向的戈壁区域[10]。库姆塔格沙漠沙物质主要来源于阿尔金山北麓的冲、洪积扇和河湖相地层,而阿奇克谷地和疏勒河下游的河湖相沉积物是库姆塔格沙漠另一个重要沙源[11-12]。毛乌素沙地西部和库布齐沙漠风成沙原始物源区是祁连造山带,毛乌素沙地东部风成沙主要来源于区域河湖相沉积物和下伏砂岩[13-14]。科尔沁沙地沙物质来源具有多源性,西部和南部沉积物多来源于周边河流与湖泊的冲积-湖积物,北部沉积物多为周围高大山体的河流搬运-堆积以及洪水冲积-堆积而成,东部沉积物以风积物来源为主[15]。中国的沙漠物源具有近源性,主要物源类型包括基岩风化的残积物、坡积物、河流冲积物、冲积-湖积物和洪积-冲积物等。

柴达木盆地沙漠海拔高、气候干燥。自20世纪50年代后期以来,研究者们先后对柴达木盆地内不同区域的风沙地貌沉积物展开了包括物质来源、输移过程等方面的研究,且已取得一定的研究成果。在西风环流作用下,柴达木盆地很可能作为主要源区为青藏高原东北部(包含青海湖地区)的黄土-古土壤提供丰富的细碎屑物质[16]。柴达木盆地沿昆

收稿日期:2022-10-17; **改回日期**:2022-11-27
资助项目:国家自然科学基金项目(41930641,41601005)
作者简介:张思悦(1998—),女,陕西大荔人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: zsyjy123@163.com
通信作者:李继彦(E-mail: jyli@tynu.edu.cn)

仑山北麓分布的灌丛沙丘，主要由山前冲积扇碎屑沉积物质经过风化、搬运、沉积而成[17]。察尔汗盐湖线形沙丘的物源来自区域内戈壁表层沉积物和雅丹流沙[18]，而盆地雅丹体内赋存的大量细颗粒可为廊道流沙提供物质供应[19]。Du等[20]认为柴达木盆地沙物质以局地起沙为主，主要来源于盆地内河流和冲积–洪积沉积物。总之，柴达木盆地风成物源具有明显的区域差异性，南部的沙物质主要来自昆仑山，而东北部沙物质主要来自祁连山。

目前，有关柴达木盆地西南缘山前沙丘区沉积物的物源研究相对匮乏。为此，本文主要基于地球化学元素方法，以柴达木盆地西南缘山前沙丘区不同类型地表沉积物为研究对象，对研究区内沉积物风化特征、物质来源及输移路径进行探讨，旨在丰富柴达木盆地沉积物物源研究以及西北干旱区环境形成与演变的内容，以期为该区域内格库铁路、石油开采等工程设施的沙害防护提供科学参考与数据支撑。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

柴达木盆地(35°00′—39°20′N、90°16′—99°16′E)是青藏高原东北缘的一个构造断陷盆地，四周为高山环绕，西北部为阿尔金山，东北部为祁连山，西南部和南部为昆仑山。研究区位于柴达木盆地西南缘东昆仑山脉的祁曼塔格山前，地势自西北向东南缓倾，山前区域是风沙地貌典型分布区。研究区主要风沙地貌类型包括戈壁、雅丹以及新月形沙丘、新月形沙丘链、线形沙丘、格状沙丘等[21]。区内有10条间歇性河流，将山地风化剥蚀产生的大量碎屑物质搬运至山前地区(图1)。研究区多年平均降水量不足30 mm，年蒸发量2 000~3 000 mm，气候极端干旱，属于高原大陆性荒漠气候。该区最大风速出现在春季，最小风速在冬季，风向以NW、WNW、NNW为主[22]。植被类型主要为草原、灌丛等，荒漠植被占植被总面积的63%[23]。

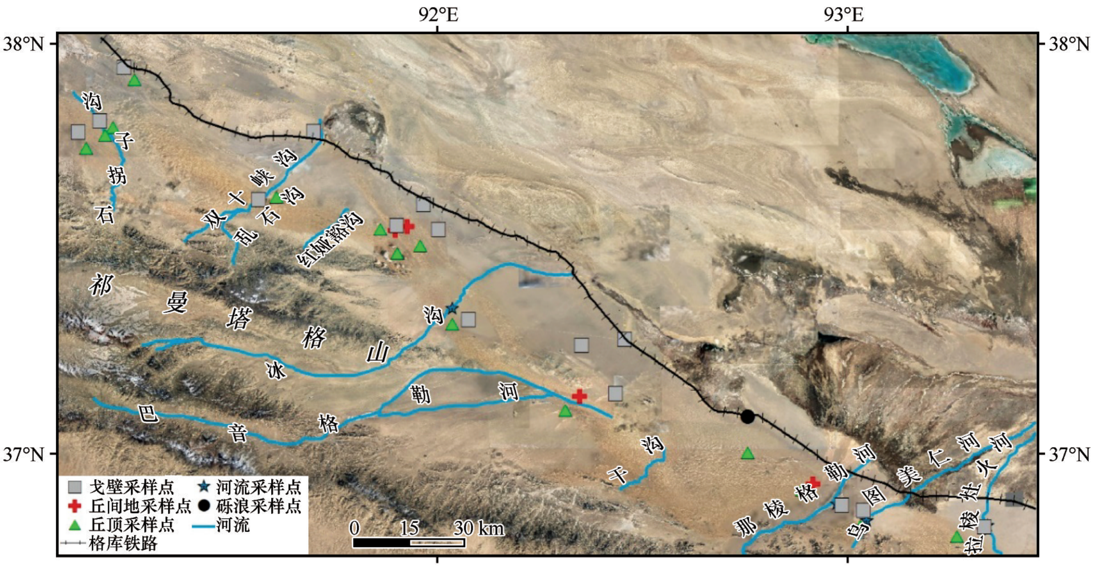

图1　研究区采样点分布

Fig. 1　Distribution of sampling points in the study area

1.2　研究方法

沿祁曼塔格山北麓自西北至东南横跨232.70 km的沙丘分布区域开展采样工作，野外样品采集时，每个样点采集面积约为20 cm × 20 cm，采样深度为0~2 cm，用取样铲将样品装入自封袋内，标记编号，共收集样品53件，每件样品约500 g。对获得的具有代表性的沉积物样品按照其地貌类型不同，划分为戈壁(GB)、丘间地(QJD)、丘顶(QD)、河流(R)、砾浪(L)。戈壁样品为山前冲积–洪积砂砾质戈壁，砾石具有一定磨圆；丘间地样品表层弱固结；丘顶样品取自各类沙丘顶部，沙物质疏松；河流样品多取自河流阶地和河漫滩沉积，分选良好；砾浪样品磨圆度较好。具体的采样点分布及样点位置详见图1和表1，研究区5种地表沉积物类型见图2。

表 1 表层沉积物样品采样点位置

Table 1 Location of surface sediment samples

样品编号	位置	海拔/m	样品编号	位置	海拔/m
GB1	36°49′17″N、93°20′03″E	2 923.0	QD3	37°47′05″N、91°07′40″E	3 179.4
GB2	36°51′41″N、93°02′21″E	2 961.4	QD4	37°48′28″N、91°10′15″E	3 182.8
GB3	36°52′24″N、92°59′11″E	2 994.4	QD5	37°56′31″N、91°13′58″E	2 960.5
GB4	37°08′46″N、92°26′06″E	3 028.6	QD6	37°00′07″N、92°45′25″E	3 018.3
GB5	37°16′45″N、92°27′22″E	2 917.0	QD7	37°32′38″N、91°53′45″E	3 106.8
GB6	37°15′51″N、92°21′03″E	3 009.1	QD8	36°49′19″N、93°01′51″E	3 040.1
GB7	37°19′38″N、92°04′31″E	3 293.1	QD9	36°47′49″N、93°16′01″E	2 969.2
GB8	37°36′24″N、91°57′57″E	3 006.9	QD10	36°47′49″N、93°16′01″E	2 969.2
GB9	37°33′25″N、91°54′02″E	3 077.9	QD11	37°37′11″N、91°33′50″E	3 206.9
GB10	37°32′47″N、91°54′01″E	3 089.8	QD12	36°55′30″N、92°54′57″E	2 987.0
GB11	37°47′02″N、91°07′24″E	3 178.3	QD13	37°08′20″N、92°20′49″E	3 130.2
GB12	37°48′38″N、91°10′30″E	3 169.8	QD14	37°33′10″N、91°55′30″E	3 097.0
GB13	37°56′33″N、91°14′03″E	2 952.7	QD15	37°48′39″N、91°10′31″E	3 166.9
GB14	37°47′09″N、91°41′52″E	2 934.0	R1	36°49′30″N、93°20′29″E	2 914.5
GB15	37°37′11″N、91°33′46″E	3 208.8	R2	36°50′12″N、93°02′45″E	2 987.4
QJD1	37°32′38″N、91°53′45″E	3 108.5	R3	36°52′44″N、92°58′21″E	2 996.2
QJD2	36°55′30″N、92°54′57″E	2 987.0	R4	37°21′21″N、92°02′05″E	3 300.7
QJD3	37°08′20″N、92°20′49″E	3 130.2	R5	37°48′39″N、91°10′40″E	3 139.3
QJD4	37°33′10″N、91°55′30″E	3 096.9	R6	37°37′03″N、91°33′59″E	3 207.7
QD1	37°19′40″N、92°04′33″E	3 293.3	L1	36°49′05″N、93°19′55″E	2 926.5
QD2	37°33′28″N、91°53′45″E	3 074.3	L2	37°05′00″N、92°45′23″E	2 883.5

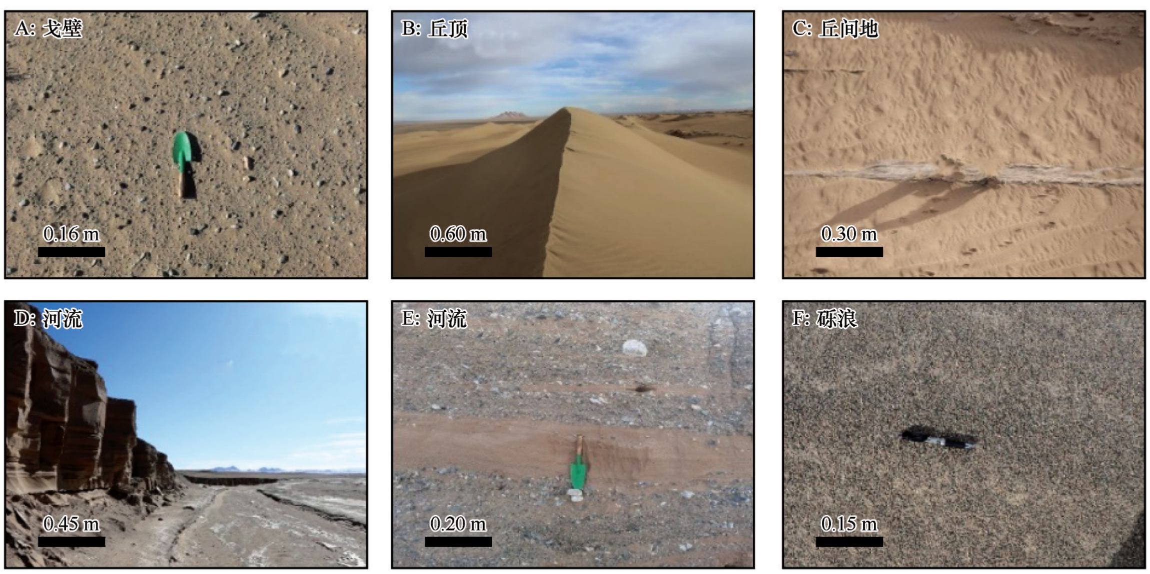

图 2 研究区沉积物类型

Fig. 2 Types of surface sediment in the study area

沉积物样品地球化学元素分析在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完成。样品前处理步骤为：将沉积物样品过2 mm筛，去除砾石组分；将待测沉积物样品置于烘箱中，在80 ℃条件下烘干4 h；用磨样机将烘干样品研磨粉碎；称取4 g粒度小于200目（约75 μm）的样品，将其在105 ℃下烘干后放入制样模具，用硼酸镶边垫底，在30 t的压力下压成镶边内径为32 mm的样品待测。测试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），元素测试的误差范围控制在2%以内，分析软件为SuperQ Version 5.0。测试过程选用国家一级标准物质中的岩石成分分析标准物质（GSR01~GSR15）、土壤成分分析标准物质（GSS01~GSS16）和水沉积物成分分析标准物质（GSD01~GSD14）作为标准样品。以GB/T14506.28—93（硅酸盐岩石化学分析方法X射线荧光光谱法）为依据，确定了各元素的最佳测试条件。

2　结果与分析

2.1　化学元素组成

2.1.1　常量元素

沉积物中的常量地球化学元素以氧化物的形式存在（表2）。研究区沉积物常量元素均以SiO_2、Al_2O_3、CaO为主，三者平均值总和超过83%，变异系数较小，表明其常量元素特征具有相似性。在常量元素组成中，以SiO_2含量最高，平均含量67.41%，与青海湖东岸种羊场风成沉积剖面含量（66.93%）接近。Al_2O_3的平均含量次之，为10.19%，远小于陆源页岩（18.90%），而与青海共和盆地东部黄土披覆区的冬其剖面含量（10.62%）接近。CaO的平均含量为5.41%，居第三，与上陆壳（4.19%）接近。其余常量元素含量均低于5%。

表2　研究区不同地貌单元表层沉积物及对比样品的常量元素含量（%）

Table 2　Contents of major elements in the different landforms' surface sediments and contrast samples（%）

样品		SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	MnO	*CIA*
GB（*n*=15）	平均值	63.78	9.67	2.43	6.37	1.75	2.41	2.43	0.11	0.40	0.05	47.95
	变异系数	0.08	0.08	0.20	0.24	0.18	0.14	0.19	0.19	0.21	0.20	/
QJD(*n*=4)	平均值	67.71	10.24	2.19	5.25	1.55	2.67	2.57	0.09	0.34	0.04	47.55
	变异系数	0.07	0.10	0.30	0.37	0.36	0.14	0.16	0.29	0.38	0.31	/
QD(*n*=15)	平均值	70.49	10.50	1.73	4.59	1.08	2.69	2.92	0.06	0.26	0.03	45.63
	变异系数	0.05	0.07	0.18	0.35	0.24	0.05	0.10	0.12	0.24	0.18	/
R(*n*=17)	平均值	67.41	10.28	2.48	5.46	1.54	2.50	2.50	0.10	0.38	0.05	48.72
	变异系数	0.07	0.06	0.27	0.29	0.31	0.13	0.15	0.32	0.32	0.27	/
L(*n*=2)	平均值	70.98	10.80	1.70	4.30	1.12	2.85	2.63	0.07	0.23	0.04	47.89
	变异系数	0.04	0.03	0.20	0.11	0.22	0.12	0.08	0.13	0.20	0.17	/
DQ	/	58.88	10.62	3.61	7.74	2.14	2.04	2.14	/	0.53	/	71.59
ZYC	/	66.93	12.60	3.56	0.80	1.43	2.73	1.73	0.08	0.65	0.03	64.09
CK	/	71.54	10.91	2.10	0.94	0.96	2.48	1.87	0.03	0.61	0.03	59.63
WL	/	70.49	14.11	2.81	0.68	1.20	3.24	1.55	0.04	0.72	0.02	66.23
GJS	/	69.55	12.34	3.59	0.91	1.42	2.58	1.86	0.06	0.70	0.04	62.70
DDL	/	55.66	11.04	4.46	10.30	2.68	2.38	1.41	0.15	0.71	0.08	60.50
TG	/	62.80	9.63	2.30	9.05	1.96	1.98	2.36	0.09	0.36	0.05	68.75
UCC	/	65.89	15.17	5.00	4.19	2.20	3.39	3.89	0.20	0.50	0.06	47.92
PAAS	/	62.80	18.90	7.22	1.30	2.20	3.70	1.20	0.16	1.00	0.11	70.38

DQ，冬其[24]；DDL，大墩岭[25]；ZYC，种羊场；CK，茶卡；WL，乌兰；GJS，关角山[26]；TG，塔里木盆地[27]；UCC，上陆壳；PAAS，陆源页岩（典型的UCC风化产物）[28]。

2.1.2 微量元素

研究区5种地表沉积物微量元素组成均以Cl、Ba、Sr、Zr、Rb、Ce元素为主（表3）。其中，Cl元素含量最高，平均为833.42 μg·g^{-1}，Ba元素含量次之，平均为583.23 μg·g^{-1}。Sr、Zr元素的含量较高，Sr在5种地表沉积物中平均含量为281.02 μg·g^{-1}，Zr为185.90 μg·g^{-1}。Rb和Ce平均含量稍高，分别为95.97 μg·g^{-1}和67.85 μg·g^{-1}。其余微量元素含量均小于50 μg·g^{-1}。各微量元素的变异系数（*CV*）较大，这表明虽然不同类型沉积物微量元素的主要种类相似，但同一元素在不同类型沉积物中的含量有明显差异。

表3　研究区不同地貌单元表层沉积物微量元素含量（μg·g^{-1}）

Table 3　Content of trace element in different landforms' surface sediments (μg·g^{-1})

样品	GB(*n*=15)		QJD(*n*=4)		QD(*n*=15)		R(*n*=17)		L(*n*=2)	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
Cl	1 937.61	1.51	493.33	0.71	162.11	0.76	605.25	1.31	206.40	0.75
V	49.17	0.19	42.73	0.36	33.02	0.23	47.75	0.29	28.70	0.14
Cr	43.07	0.26	30.35	0.45	24.31	0.30	35.57	0.39	17.10	0.35
Co	20.97	0.20	21.18	0.14	24.03	0.14	22.46	0.11	23.35	0.10
Ni	16.34	0.27	14.53	0.35	12.04	0.24	16.19	0.24	9.20	0.18
Cu	12.43	0.24	10.48	0.43	7.86	0.15	11.95	0.25	7.20	0.14
Zn	32.77	0.24	29.80	0.40	20.80	0.18	32.32	0.31	25.80	0.22
Ga	11.41	0.08	11.98	0.10	11.91	0.11	11.90	0.09	12.30	0.02
As	6.18	0.46	5.83	0.54	3.97	0.45	5.92	0.52	3.80	0.37
Rb	91.32	0.13	100.03	0.16	101.23	0.06	93.06	0.14	107.95	0.20
Sr	271.78	0.18	277.95	0.21	323.35	0.43	251.61	0.16	288.90	0.19
Y	18.43	0.14	16.05	0.24	14.11	0.16	17.35	0.26	13.90	0.32
Zr	264.35	0.42	215.53	0.73	103.30	0.22	190.23	0.50	120.95	0.19
Nb	10.07	0.14	9.10	0.16	8.39	0.21	9.95	0.25	7.05	0.29
Ba	555.85	0.09	590.48	0.05	622.24	0.06	557.42	0.13	700.90	0.10
La	32.46	0.22	30.48	0.23	30.27	0.17	33.17	0.16	37.05	0.17
Ce	68.26	0.27	64.10	0.29	65.15	0.23	69.30	0.17	80.30	0.16
Pb	18.86	0.30	16.78	0.17	15.73	0.14	18.24	0.06	18.00	0.04

在5种地表沉积物中，戈壁沉积物突出表现为Cl元素含量最高，为1 937.61 μg·g^{-1}，Ba元素含量次之，为555.85 μg·g^{-1}，Sr元素271.78 μg·g^{-1}。河流沉积物的微量元素也表现出Cl、Ba、Sr含量较高，与戈壁组成特征相似，但含量较低，其3种元素的含量为Cl 605.25 μg·g^{-1}，Ba 557.42 μg·g^{-1}，Sr 251.61 μg·g^{-1}。丘间地沉积物表现为Ba元素含量最高（590.48 μg·g^{-1}），Cl元素次之（493.33 μg·g^{-1}），Sr元素277.95 μg·g^{-1}。丘顶与砾浪主要微量元素含量特征相似。其中，丘顶沉积物Ba元素622.24 μg·g^{-1}，Sr元素323.35 μg·g^{-1}，Cl元素162.11 μg·g^{-1}。砾浪沉积物Ba元素700.90 μg·g^{-1}，Sr元素288.90 μg·g^{-1}，Cl元素206.40 μg·g^{-1}。

2.2 UCC标准化值

以上陆壳（Upper Continental Crust，UCC）的平均化学元素组成为标准，对研究区内不同类型地表沉积物、上风向塔里木盆地沉积物以及下风向黄土沉积物样品各元素进行归一化处理，得到各元素的标准化值分布图，用于识别出各元素的富集或者淋失情况。

2.2.1 常量元素UCC标准化值

与上陆壳平均化学元素组成相比，戈壁表层沉积物元素变化趋势呈现高度一致（图3），整体表现为所有样品的CaO轻微富集，少量样品SiO_2、MgO、TiO_2、MnO基本不变，其余各元素均发生不同程度

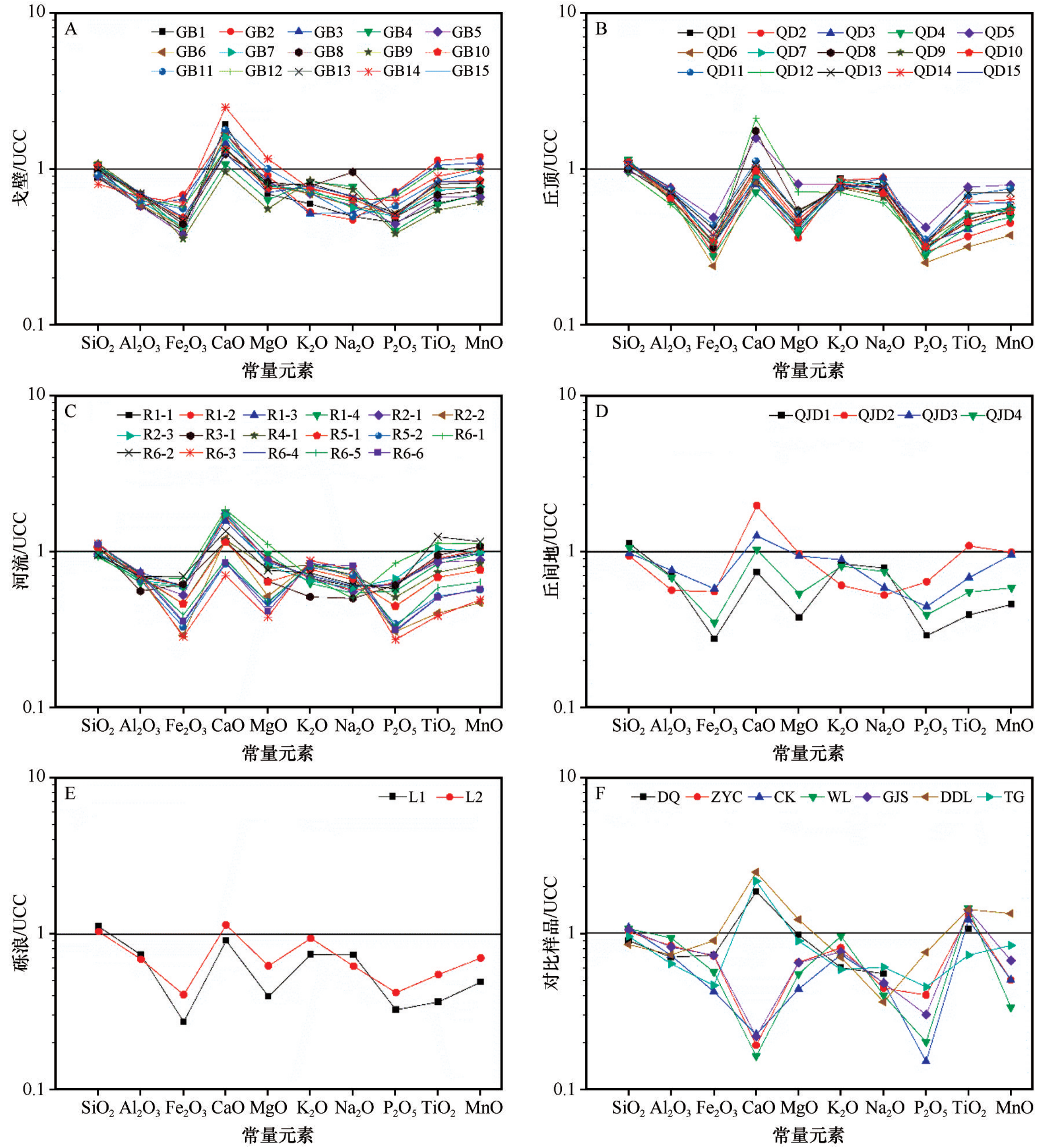

图 3　戈壁（A）、丘顶（B）、河流（C）、丘间地（D）、砾浪（E）与对比样品（F）常量元素 UCC 标准化分布

Fig.3　UCC-normalized pattern of major element composition for gobi (A), dune top (B), river (C), interdune (D), gravel ripple (E) in the study area and contrast samples (F)

的淋失。丘顶沉积物分布模式基本相似，所有样品的 SiO_2 含量与上陆壳接近，QD5、QD8、QD12 样品的 CaO 轻微富集，其余元素均淋失，其中 Fe_2O_3 淋失最为严重。河流沉积物中，所有样品的 SiO_2 含量接近上陆壳，多数样品的 CaO 轻微富集，TiO_2、MnO 在少量样品中轻微富集，其余各元素均表现不同程度的淋失。丘间地沉积物 SiO_2 含量接近上陆壳，QJD1 样品的 CaO 淋失，其余样品的 CaO 轻微富集或保持不变，QJD2 的 TiO_2 轻微富集，QJD2、QJD3 的 MgO 和 MnO 元素含量接近上陆壳，除此之外其余各元素均发生不同程度的淋失。砾浪沉积物中，SiO_2 含量接近上陆壳，L2 样品的 CaO 轻微富集，其余样品各元素均淋失，与丘顶具有相同的分布模式。用来对比的沉积物常量元素呈现两种分布模式，其一为 TG、DQ、DDL，CaO 富集程度较高，SiO_2、MgO 和 TiO_2 轻微富集，其余元素发生不同程度亏损；另一种分布模式为 ZYC、CK、WL、GJS，TiO_2 轻微富集，SiO_2 基本保持不变，CaO 高度亏损，

其余元素均发生不同程度亏损。前者与研究区表层戈壁沉积物分布模式高度相似，说明研究区与下风向黄土具有一定的相似性，推测研究区为下风向黄土提供粉尘堆积。而后者与研究区沉积物差异较大。

2.2.2 微量元素UCC标准化值

研究区不同类型地表沉积物的微量元素UCC标准化值的分布模式有一定差异（图4）。戈壁表层沉积物突出表现为As的富集程度较高，Cl、Co、Zr、La、Ce在大多数样品中富集，Ba、Pb含量与上陆壳接近，其余元素发生不同程度的淋失。丘顶的微量元素与戈壁稍有差异，As富集程度较高，Co轻微富集，Rb、Ba、La、Ce、Pb含量与上陆壳接近，其余元素发生不同程度的淋失，其中Cl元素淋失程度最为严重。河流沉积物中除微量元素Co在所有样品中富集外，其余元素的分布模式与戈壁沉积物相类似。这种分布模式的类似，系部分戈壁与河流沉积物采样位置接近，经历了相同的风化过程。丘间地沉积物由于样品数量有限，分析结果并不具有规律性特征，具体表现为所有样品中As高度富集，Co轻微富集，QJD2和QJD3的Cl元素轻微富集，Rb、Ba、La、Ce、Pb接近上陆壳，其余元素发生不同程度的淋失。砾浪沉积物中，除As、Co、Ba、La、Ce、Pb富集外，其余元素均发生不同程度淋失。

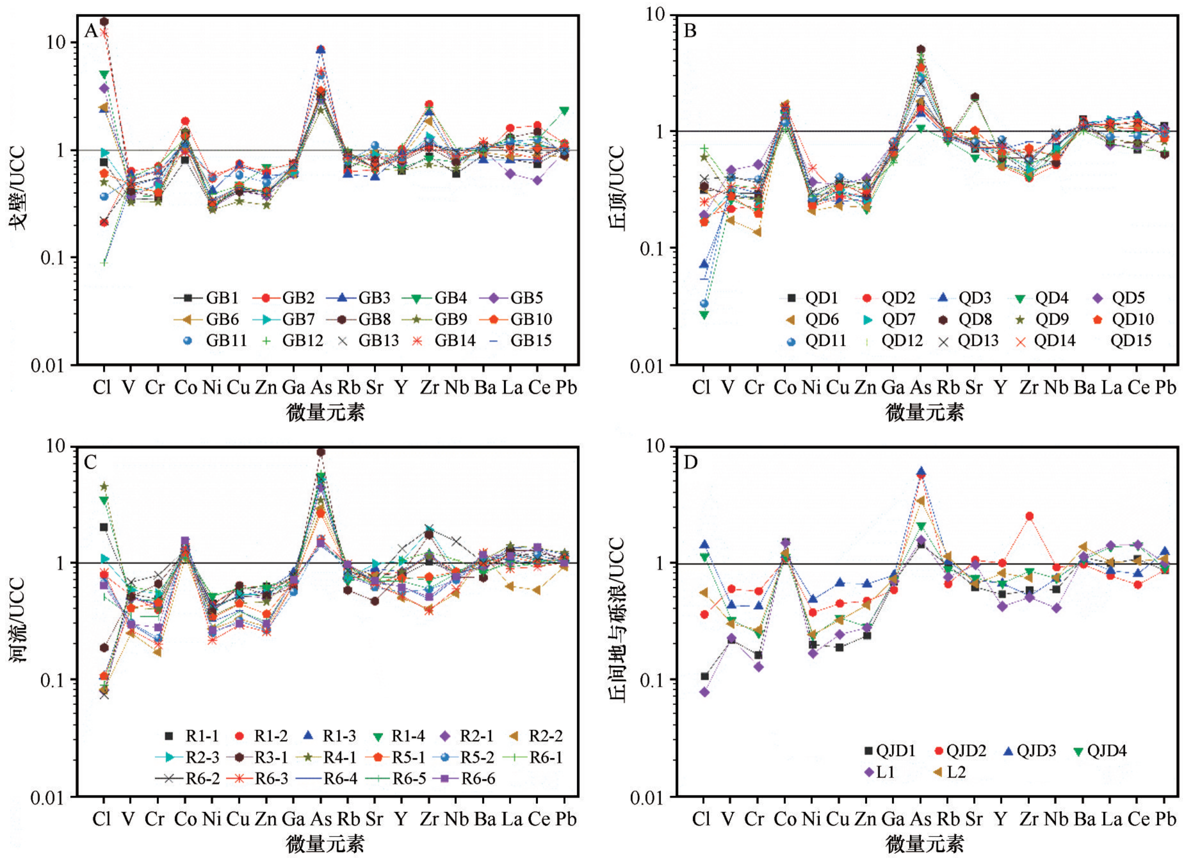

图4 戈壁（A）、丘顶（B）、河流（C）、丘间地与砾浪（D）微量元素UCC标准化分布图

Fig.4 UCC-normalized pattern of trace element composition for gobi (A), dune top (B), river (C), interdune and gravel ripple (D) in the study area

2.3 化学蚀变指数

化学蚀变指数（Chemical Index of Alteration，*CIA*）用于判定沉积物遭受的化学风化程度及沉积时的气候环境[29]。计算公式为：

$$CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)]\times100 \quad (1)$$

式中：各元素的含量均以摩尔分数表示；CaO^*指存在于硅酸盐矿物中的CaO。当$CaO \leqslant Na_2O$时，$CaO^*=CaO$；$CaO>Na_2O$时，$CaO^*=Na_2O$[30]。本文中所有的CaO^*的值据此方法获得。

*CIA*值越大，沉积物所遭受的化学风化程度越强[31]。*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。

研究区沉积物 *CIA* 变化范围较小（表 2），介于 40.90~53.05，平均值（47.51）与上陆壳（47.92）接近，远低于中国黄土（61.93）和陆源页岩（70.38）。戈壁表层沉积物的 *CIA* 平均值为 47.95，丘间地为 47.55，丘顶为 45.63，河流为 48.72，砾浪 47.89。其中丘顶沉积物 *CIA* 值最小，指示其所受化学风化最弱，河流沉积物风化程度最高，所受化学风化最强。

3　讨论

3.1　沉积物的化学风化特征

Nesbitt 等[32]基于质量平衡原理、长石淋溶实验和矿物稳定性热力学计算的大陆化学风化趋势预测模型（A−CN−K 图）被广泛用于反映化学风化趋势以及化学风化过程中主成分和矿物学变化[33−34]。该模型认为陆源页岩为典型的上陆壳初级风化产物，UCC 指向 PAAS 方向代表了典型的大陆风化趋势。大陆风化过程主要包括 3 个阶段，即早期的脱 Na、Ca 阶段，中期的去 K 阶段，晚期的去 Si 阶段。

将研究区内的沉积物及对比样品投影到 A−CN−K 三角图中，并与上陆壳（UCC）和陆源页岩（PAAS）的分析结果进行对比。沉积物在 A−CN−K 图中集中分布在上陆壳附近，且呈条带状近平行于 A−CN 连线（图 5）。该分布模式表明，研究区地表沉积物的大陆风化程度较低，总体处在基本未受或较弱的大陆化学风化的初级阶段，即早期的脱 Na、Ca 阶段。结合采样点分布来看，河流沉积物和部分采自河流附近的戈壁风化程度较高，砾浪、丘间地风化程度次之，丘顶风化程度最小，与 *CIA* 指示结果一致。影响化学风化的因素主要包括母岩成分、气候条件、地形条件、排水条件等[2]。河流沉积物在重力和水流的作用下被分选为不同的粒度组分[35]，而位于山前的戈壁、丘间地和砾浪等地貌单元均受到不同程度的流水作用，因此均含有一定的粉沙、黏土等细颗粒组分。沙丘沉积物则主要是风力分选、堆积作用形成的，以细沙和中沙物质含量较高[36]。因此，细颗粒组分含量更高的河流、戈壁、砾浪、丘间地等地貌单元的表层沉积物的风化程度稍高于丘顶沉积物。

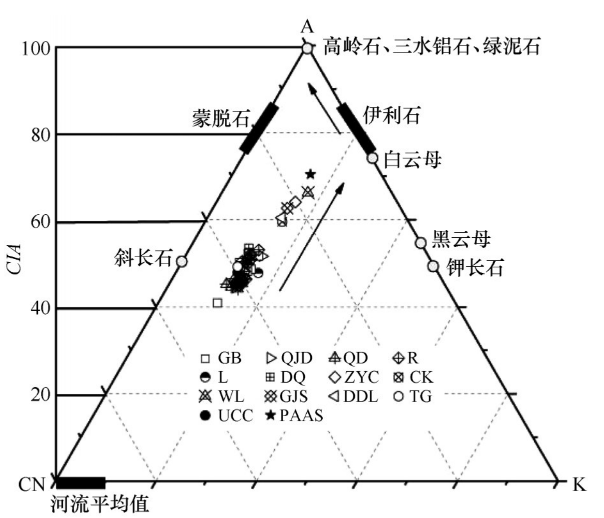

图 5　不同地貌单元表层沉积物及对比沉积物 A-CN-K 三角图

Fig.5　A-CN-K ternary plot for surface sediment of different landforms in the study area and the contrast samples

为探究研究区沉积物与其他区域沉积物的风化关系，选取上风向塔里木盆地沉积物样品和下风向柴达木盆地内黄土样品进行对比。用来对比的塔里木盆地沉积物（TG）和冬其剖面黄土（DQ）落于 UCC 附近，与研究区内沉积物化学风化特征一致；而其余剖面黄土均位于 UCC 至 PAAS 的连线之间，且距研究区沉积物较远，距 PAAS 较近，表明这些剖面的黄土化学风化程度远高于研究区地表沉积物，说明相较于柴达木盆地其他区域，研究区沉积物的风化程度更低。

3.2　物源及物质输移过程

特征元素 Ca、K、Mg、Ti 化学性质稳定，在搬运和沉积过程中其含量基本保持不变，元素 Na、Fe 在搬运、沉积和成岩过程中绝对含量会发生变化，但化学性质相似性较好，具有一致的富集程度和富集规律，相对含量基本保持不变，均可作为物源对比的示踪指标[37]。特征元素比值能够消除由矿物组成和粒度所造成的化学元素变化的影响，从而更加准确地判断沉积物的物源方向[38−39]。$MgO/Al_2O_3-K_2O/Al_2O_3$ 和 $K_2O/Al_2O_3-TiO_2/Al_2O_3$ 对沉积物物源具有一定的指示意义，而 $Na_2O/Al_2O_3-K_2O/Al_2O_3$ 和 $MgO/CaO-Fe_2O_3/K_2O$ 则对沉积物的输移路径具有一定的指示意义[40−41]。

由图 6A 和图 6B 可以看出，部分戈壁、丘顶、丘间地、河流沉积物存在一定重合，表明 4 种沉积物具有相同的物质来源。就研究区物质输移路径而言，戈壁和河流重合度较高，戈壁、丘顶、丘间地和河流

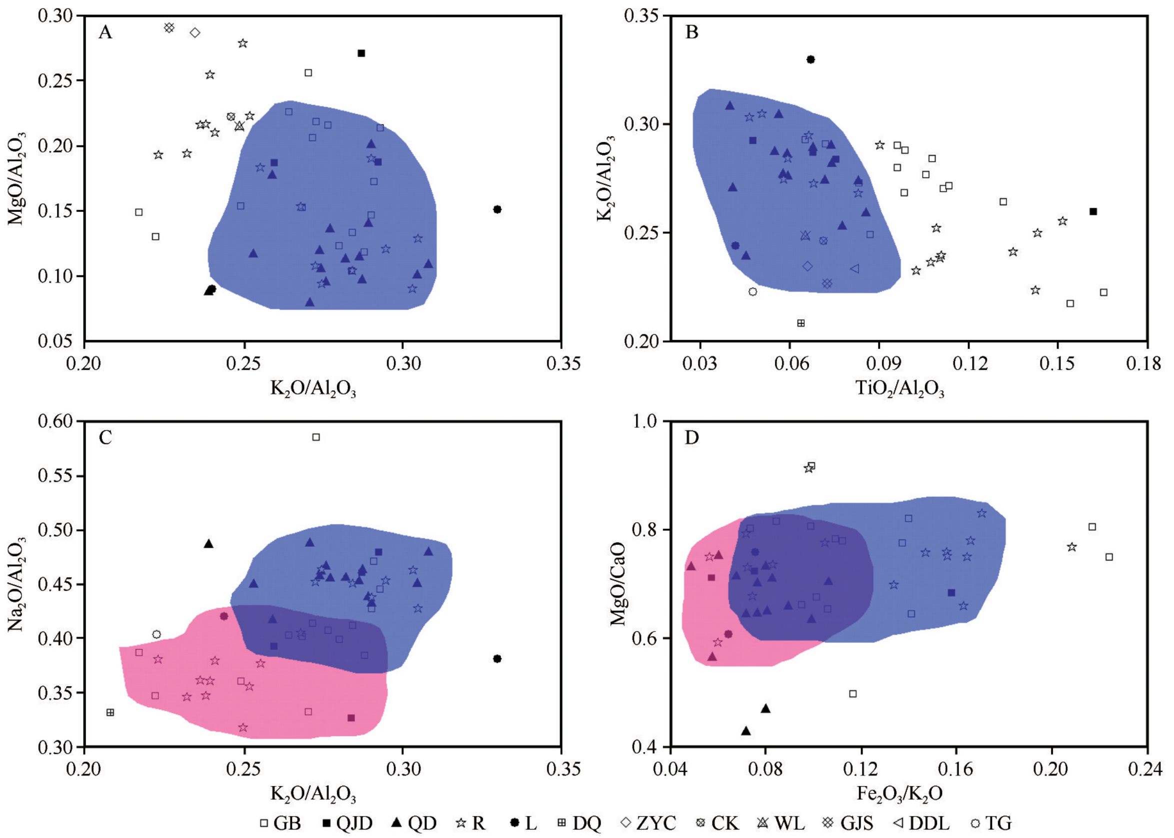

图6　不同地貌单元表层沉积物及对比沉积物特征元素比值散点图

Fig. 6　Bi-plots of selected elemental ratios for surface sediment of different landforms in the study area and the contrast samples

也有一定重合(图6C和6D)。将研究区内5种地表沉积物的特征元素比值与上风向塔里木盆地沉积物和下风向柴达木盆地内黄土样品对比,发现关角山、茶卡、乌兰、种羊场、大墩岭等剖面黄土与河流、丘顶以及部分戈壁沉积物的分布模式接近,而其余剖面黄土常量元素分布模式与研究区内地表沉积物分布差异较大。

由于常量元素在物源示踪方面存在多解性[42],特选取微量元素示踪模型作为补充,用以探讨物源。干旱区表层沉积物中,微量元素Ba和Sr的主要载体矿物是钾长石、斜长石。相较于其他微量元素,Ba和Sr的性质较稳定,在矿物分解过程中基本保持着原始状态下的丰度特征。加之这些矿物是风成沉积的主要成分,所以Ba、Sr元素在一定条件下也可作为识别沙物质来源的示踪元素[43]。将研究区不同地貌单元表层沉积物的Ba、Sr含量投影到散点图中,结果显示不同地貌单元表层沉积物的Ba-Sr散点投影总体比较集中(图7)。同时,各类型沉积物的Ba-Sr散点分布相对分散,离散程度较高。这表明研究区内的沉积物具有相对一致的物源区,以近源沉积为主,没有经过远距离、大范围的搬运

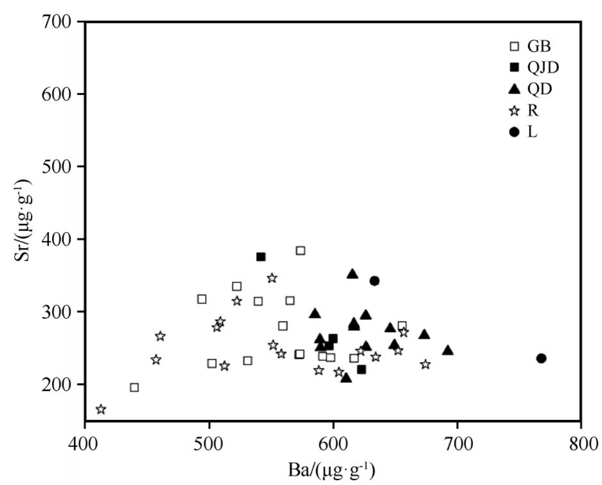

图7　不同地貌单元表层沉积物微量元素Ba-Sr含量散点图

Fig.7　Trace elements Ba-Sr component diagram for surface sediment of different landforms

和混合,沙物质主要来自昆仑山,物源类型以河流冲积物、洪积-冲积物和基岩风化的残积物、坡积物为主,与Du等[20]研究结果一致。

综上分析,研究区沙丘覆盖在东昆仑山脉祁曼塔格山前广泛发育的厚冲积、洪积扇和河湖相地层上,发源于东昆仑山脉的季节性径流及古水系将山

前的大量剥蚀产物和河湖相沉积物搬运至沙漠腹地堆积，后经风力吹蚀、分选形成沙漠。研究区可为盆地下风向黄土提供粉尘物质，但供应量有限。由于选取对比样点有限，塔里木盆地是否为研究区物源还需进一步探讨。

4 结论

柴达木盆地西南缘山前沙丘区沉积物常量元素分布具有高度一致性，沉积物的常量元素组成以 SiO_2、Al_2O_3 和 CaO 为主，平均含量总和超过 83%；微量元素以 Cl、Ba、Sr 和 Zr 为主。与上陆壳平均化学元素组成（UCC）相比，常量元素除 CaO 轻微富集，SiO_2 基本不变外，其余常量元素均不同程度淋失；微量元素 As、Co 富集，其余元素淋失。

柴达木盆地西南缘山前沙丘区沉积物 *CIA* 变化较小，为 40.90~53.05，平均 47.51。沉积物在 A-CN-K 三角图中集中分布在上部陆壳附近，且呈条带状近平行于 A-CN 连线，研究区地表沉积物的大陆风化程度较低，均处于基本未受或较弱的大陆化学风化的初级阶段，即早期的脱 Na、Ca 阶段。河流沉积物和部分采自河流附近的戈壁，风化程度较高，砾浪、丘间地风化程度次之，丘顶风化程度最小，与化学蚀变指数（*CIA*）指示结果一致。

柴达木盆地西南缘山前沙丘区沉积物属于近源沉积，没有经过远距离、大范围的搬运和混合，研究区沙物质来源与东昆仑山脉密切相关，河流冲积-洪积作用将祁曼塔格山前的大量剥蚀产物和河湖相沉积物带入盆地腹地，后经风力吹蚀、分选形成沙漠。研究区为盆地内下风向黄土提供粉尘堆积，下风向黄土物质可能是研究区戈壁、河流、沙丘的细粒物质经风力分选、搬运再堆积风化的产物，但堆积量有限。本文采用的是沉积物全样分析，细粒组分的物源及输移还需进一步分析。

参考文献：

[1] 朱震达，吴正，刘恕，等．中国沙漠概论[M]．北京：科学出版社，1980：8-35.

[2] 陈骏，安芷生，刘连文，等．最近 2.5Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]．中国科学（D辑：地球科学），2001，31（2）：136-145.

[3] 陈骏，季峻峰，仇纲，等．陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]．中国科学（D 辑：地球科学），1997，27（6）：531-536.

[4] 赵万苍，刘连文，陈骏，等．中国沙漠元素地球化学区域特征及其对黄土物源的指示意义[J]．中国科学：地球科学，2019，49（9）：1425-1438.

[5] 薛红盼，曾方明．青海湖东岸全新世风成沉积的地球化学特征及其古气候意义[J]．沉积学报，2021，39（5）：1198-1207.

[6] 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.

[7] Campodonico V A，Rouzaut S，Pasquini A I.Geochemistry of a Late Quaternary loess-paleosol sequence in central Argentina：implications for weathering，sedimentary recycling and provenance[J].Geoderma，2019，351：235-249.

[8] Jiang Q D，Yang X P.Sedimentological and geochemical composition of aeolian sediments in the Taklamakan Desert：implications for provenance and sediment supply mechanisms[J].Journal of Geophysical Research：Earth Surface，2019，124（5）：1217-1237.

[9] Chen B，Yang X P，Jiang Q D，et al.Geochemistry of aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin Sandy Land，northern China：implications for weathering，recycling，and provenance[J].Catena，2022，208：105769.

[10] Zhang Z C，Liang A M，Zhang C X，et al.Gobi deposits play a significant role as sand sources for dunes in the Badain Jaran Desert，Northwest China[J].Catena，2021，206：105330.

[11] 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.

[12] Liang A M，Dong Z B，Su Z Z，et al.Provenance and transport process for interdune sands in the Kumtagh Sand Sea，Northwest China[J].Geomorphology，2020，367：107310.

[13] Shu P X，Li B S，Wang H，et al.Geochemical characteristics of surface dune sand in the Mu Us Desert，Inner Mongolia，and implications for reconstructing the paleoenvironment[J].Quaternary International，2018，479：106-116.

[14] Liu Q Q，Yang X P.Geochemical composition and provenance of aeolian sands in the Ordos Desert，northern China[J].Geomorphology，2018，318：354-374.

[15] 朱孟娜．科尔沁沙地沙丘砂的来源分析[D]．长沙：湖南师范大学，2017.

[16] 曾方明，薛红盼．青藏高原东北部晚第四纪黄土-古土壤的元素组成及其物源指示[J]．中国沙漠，2020，40（6）：105-117.

[17] 凌智永，王建萍，陈亮，等．柴达木盆地灌丛沙丘稀土元素地球化学特征与物源[J]．中国沙漠，2018，38（5）：963-971.

[18] 李继彦，赵二丹，柳文龙，等．察尔汗盐湖线形沙丘沙物质来源及输移路径[J]．中国沙漠，2018，38（5）：909-918.

[19] 郜学敏，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.

[20] Du S S，Wu Y Q，Tan L H.Geochemical evidence for the provenance of aeolian deposits in the Qaidam Basin，Tibetan Plateau[J].Aeolian Research，2018，32：60-70.

[21] 王萌，郜学敏，屈欣，等．柴达木盆地西南缘山前沙丘区沙丘地貌形态特征[J]．中国沙漠，2021，41（5）：166-174.

[22] 陈宗颜,董治宝,汪青春,等.柴达木盆地风况及输沙势特征[J].中国沙漠,2020,40(1):195-203.

[23] 钟泽兵,周国英,杨路存,等.柴达木盆地几种荒漠灌丛植被的生物量分配格局[J].中国沙漠,2014,34(4):1042-1048.

[24] 刘冰,靳鹤龄,孙忠,等.青藏高原东北部共和盆地风成沉积地球化学特征及其揭示的气候变化[J].地球科学进展,2012,27(7):788-799.

[25] 张西营,马海州,谭红兵.青藏高原东北部黄土沉积化学风化程度及古环境[J].海洋地质与第四纪地质,2004,24(2):43-47.

[26] 曾方明.青海湖地区晚第四纪黄土的物质来源[J].地球科学,2016,41(1):131-138.

[27] Honda M,Shimizu H.Geochemical,mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert Sands[J].Sedimentology,1998,45(6):1125-1143.

[28] Taylor S R,McLennan S M.The Continental Crust:It's Composition and Evolution[M].London,UK:Blackwell,1985.

[29] 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.

[30] Bock B,Mclennan S M,Hanson G N.Geochemistry and provenance of the middle Ordovician Austin Glen member (Normanskill formation) and the Taconian orogeny in New England[J].Sedimentology,1998,45(4):635-655.

[31] 冯连君,储雪蕾,张启锐,等.化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J].地学前缘,2003,10(4):539-544.

[32] Nesbitt H W,Young G M.Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J].Pergamon,1984,48(7):1523-1534.

[33] 李徐生,韩志勇,杨守业,等.镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J].地理学报,2007,62(11):1174-1184.

[34] 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.

[35] Caracciolo L.Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective:review,application and future development[J].Earth-Science Reviews,2020,209:103226.

[36] 王萌,郜学敏,屈欣,等.柴达木盆地西南缘沙丘沉积物粒度特征及其沉积环境[J].水土保持通报,2022,42(5):57-64.

[37] 操应长,王艳忠,徐涛玉,等.特征元素比值在沉积物物源分析中的应用:以东营凹陷王58井区沙四上亚段研究为例[J].沉积学报,2007,25(2):230-238.

[38] 蒋富清,李安春.冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义[J].沉积学报,2002,20(4):680-686.

[39] 杨守业,李从先,张家强.苏北滨海平原全新世沉积物物源研究:元素地球化学与重矿物方法比较[J].沉积学报,1999,17(3):458-463.

[40] Hao Q Z,Guo Z T,Qiao Y S,et al.Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China[J].Quaternary Science Reviews,2010,29(23):3317-3326.

[41] Liang X L,Niu Q H,Qu J J,et al.Geochemical analysis of yardang strata in the Dunhuang Yardang National Geopark,Northwest China,and implications on its palaeoenvironment,provenance,and potential dynamics[J].Aeolian Research,2019,40:91-104.

[42] 杜世松,伍永秋,黄文敏,等.风成沉积物源分析方法及其应用研究进展[J].干旱区研究,2015,32(1):184-191

[43] 钱亦兵,吴兆宁,石井武政,等.塔克拉玛干沙漠沙物质成分特征及其来源[J].中国沙漠,1993,13(4):36-38.

Geochemical characteristics and implications of sediments in the piedmont of southwestern Qaidam Basin, China

Zhang Siyue, Li Jiyan, Zhang Yaoyao, Xu Dehua

(*School of Geography Science*, *Taiyuan Normal University*, *Jinzhong* 030619, *Shanxi*, *China*)

Abstract: This paper selected the piedmont dune area in southwest margin of Qaidam Basin as the study area, used geochemical element analysis, elucidated the characteristics of geochemical elements of different types of surface sediments in the study area, discussed the weathering characteristics, material sources and transport process. The results indicated that major elements of the sediments are predominated by SiO_2, Al_2O_3, and CaO, and the average total content was more than 83%, while the higher content of trace elements were Cl, Ba, Sr and Zr. Compared to the average content of chemical elements for the upper continental crust, the main element CaO was slightly enriched, and the trace element As was highly enriched, and Co was slightly enriched. The variation range of *CIA* in the study area was small, between 40.90 and 53.05, with an average of 47.51. The degree of chemical weathering was weak, and all of them were in the early stage of weathering. The ratio of characteristic elements indicated that the sediments in the study area had the same material source. The clastic materials generated from the weathering and denudation of the rocks in the East Kunlun Mountains at the southwest margin of the Qaidam Basin were transported to the piedmont and accumulated under the action of seasonal water flow, forming a widespread piedmont alluvial proluvial plain, and then formed the current surface landscape through wind erosion. This study can not only enrich the research content of regional aeolian geomorphology, but also provide theoretical basis for the prevention and control of regional aeolian sand disasters.

Key words: sand source; geochemical characteristics; sand dune; Qaidam Basin