

中国北方三流域河流—沙漠过渡带地表沉积物 化学元素空间差异分析

李小妹^{1,2,3} 严平^{1,3} 吴伟^{1,3} 钱瑶^{1,3}

(1.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室 北京 100875;2.陕西师范大学旅游与环境学院 西安 710119;

3.北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心 北京 100875)

摘要 通过对克里雅河、毛布拉克孔兑以及西拉木伦河三流域的河流—沙漠过渡带地表沉积物的7种常量氧化物以及15种微量元素进行因子分析,结果显示:三个流域之间或不同河段因子分析提取的公因子均可以概括为较稳定的铁锰矿物、较不稳定的长石类和方解石(白云石)类等硅酸盐矿物以及稳定的稀土元素和重矿物等类别;河流间因子分析结果表明,自西向东三个流域沿河地表沉积物的化学元素富集与迁移程度呈递增趋势,化学风化程度增强;流域内因子分析结果表明,自上游至下游,样点化学组成均愈变复杂,不同河段或不同河岸沉积物化学元素空间分布规律与其物源、地貌格局以及水分条件等因素有关;自河床至阶地,不同地貌单元地表沉积物化学元素呈相异的递变规律,这与在距离河道远近不同,物源、动力因素的分配不同有关。

关键词 地球化学元素 空间分布 因子分析 河流—沙漠过渡带

第一作者简介 李小妹 女 1979年出生 博士研究生 干旱区地貌 E-mail: lixiaomei8477@sina.com

通讯作者 严平 男 教授 E-mail: yeping@bnu.edu.cn

中图分类号 P59 P512.2 **文献标识码** A

风水交互作用是干旱区常见的地貌现象和重要的地表过程^[1-3],在地层记录中也广泛存在有干旱环境下的风水交互沉积^[2-6],反映出沙漠与河流在沉积物上互为来源,在空间分布上镶嵌交织,在时间演化上断续交错。近年来关于干旱、半干旱沙漠环境下沉积物结构与风力输移^[7-9]、水力输移过程^[10-12]关系的研究越来越引起关注。研究者通过沙漠、沙地原地剖面中的矿物化学风化和元素迁移过程^[13-16]来探讨其物质来源^[17-19]、风化和沉积过程^[20-22]以及古环境重建^[23-25]等方面,而对沙漠地表沉积物现代风化过程研究关注较少^[20,26],缺乏河流上中下游不同风水动力条件下地表沉积物差异的相关分析数据,其难点在于风水交互作用下沉积物高度混合和差异性分选以及与此相关的沉积物输移过程、动力机制、源岩影响等^[10],迫切需要从这一复杂过程中辨析风水交互作用的沉积物信息。本文选择我国西部的克里雅河、中部的毛布拉克孔兑和东部的西拉木伦河三个流域河流—沙漠的过渡地带为研究区(图1),借助R型因子分析法分析三个流域之间、河流不同河段以及不同地貌单元三个尺度上沉积物的化学元素空间分布特点,

探求河流—沙漠过渡带地表沉积物对风、水两相作用的响应机制。

1 方法

1.1 研究区概况

克里雅河位于塔里木盆地塔克拉玛干沙漠南缘,发源于昆仑山北坡主峰乌什腾格山,向北流入塔克拉玛干沙漠腹地,最后消失在达里亚博依附近沙丘间。河流总长860 km(包括古河道90 km),延伸于沙漠中的河道长度约350 km,流域总面积 3.95×10^4 km²。地势呈南高北低,由北到南,沉积物明显地分异为4个地带,即沙漠、戈壁、亚沙土丘陵以及黄土分布区^[15]。气候属暖温带大陆性气候,多年平均降雨量45 mm,多年平均气温11.6℃。

毛布拉克孔兑是汇入黄河河套段的一级支流,源自内蒙古杭锦旗阿门其日格乡龙虎淘劳亥,由南向北流,支流长111 km,集水面积 0.13×10^4 km²,年平均流量为 757×10^4 m³/a,中下游河段穿越库布齐沙漠。流域地势南高北低,西高东低,海拔为1 000~1 500 m,由南向北可分为黄土丘陵沟壑区、库布齐沙漠区、

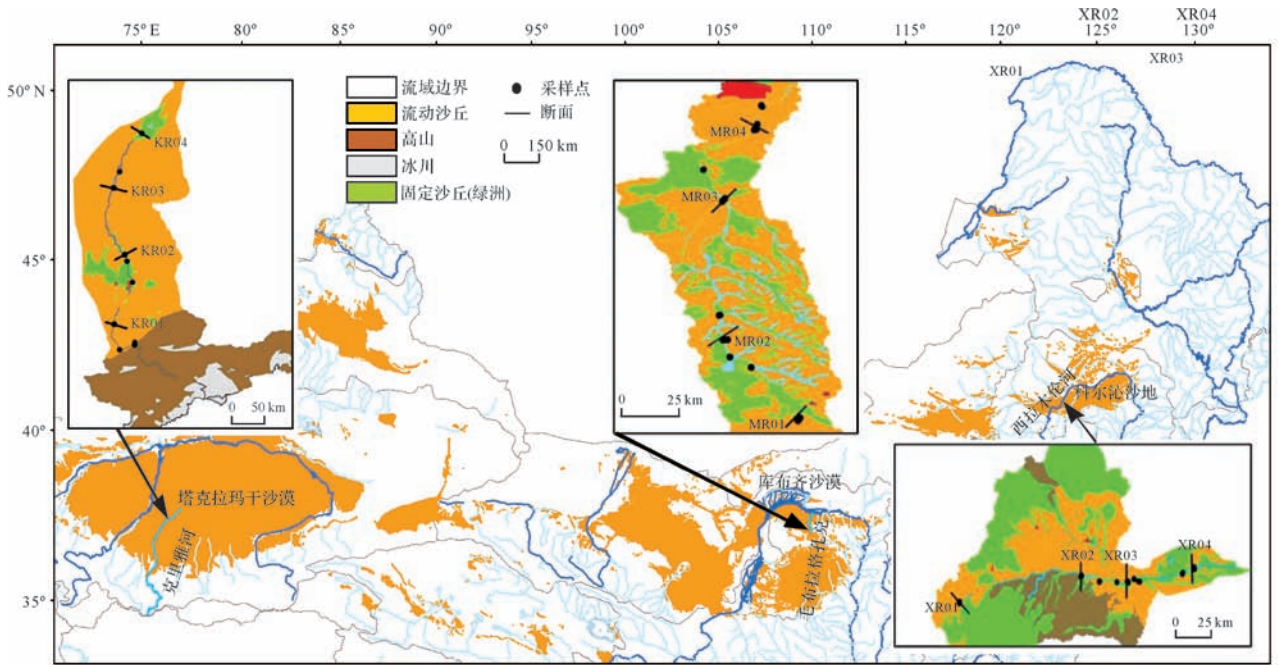


图1 研究区位置及样点分布图

Fig.1 Sampling sites in the three river basins of northern China

黄河南岸冲积平原区三个自然单元^[27]。气候属半干旱草原气候,多年平均降雨量 241 mm,多年平均气温 5.9℃。

西拉木伦河属东北西辽河上游,源于内蒙古克什克腾旗白岔山,源头为高原上的古大型河湖网络盆地,由西向东流,纳入教来河、查干木伦河等支流,西拉木伦河在哲理木盟苏家铺与老哈河汇合后称西辽河,全长约 380 km,流域面积 $3.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。西部流经浑善达克沙地,东部穿越科尔沁沙地。气候属于中温带大陆性季风气候,年平均降水量为 400 mm 左右,年均气温 5℃~7℃,为我国北方干旱区与半干旱—半湿润区的过渡地带^[28]。

1.2 样品采集

沿着克里雅河、毛不拉孔兑以及西拉木伦河三个流域,自上游至下游选择 4 个断面(克里雅河 KR01-04,毛布拉格孔兑 MR01-04,西拉木伦河 XR01-04)(图 1),对 4 个断面用 EP90 差分 GPS 进行横断面地形测量,水平与垂直距离测量精度均达到亚米级。样品采集主要并沿着横断面采集地表 0~5 cm 地表土样,样品类型包括河床—漫滩相物质、阶地沙丘沙(丘顶与丘间地),其地貌格局及采样点如图 2、3 所示。共采集样品 364 个,其中,克里雅河 93 个,毛不拉孔兑 129 个,西拉木伦河 142 个。

1.3 样品分析

地球化学元素测定在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完成。采用粉末压片法制样,首先将风干样品碾磨至 200 目以下,称取 4 g 于 105℃ 下烘干后放入制样模具,用硼酸镶边嵌底,在 30 吨压力下形成外径为 32 mm 的圆形样片。测试仪器为荷兰帕纳科公司 Axios 型顺序式波长色散型 X 射线荧光光谱仪,元素测定误差 <5%。

主要元素以氧化物百分含量表示,微量元素以 ug/g 表示其含量。

1.4 因子分析法

因子分析是通过对变量间相关矩阵内部结构研究,找出控制所有变量的公因子,可以用几个公因子代表多组变量,还可以发现一些隐藏变量^[29-30]。对于地球化学元素变量而言,这些公因子代表形成所有元素变量基本关系的地球化学过程^[31-32],元素共生组合已成为反映沉积物地球化学的主要特征之一,对物源有着重要的指示意义。

首先利用 SPSS20.0 对克里雅河、毛布拉格孔兑、西拉木伦三个流域全部样品的常量氧化物和微量元素,利用巴特利特球度检验(Bartlett test of sphericity)和 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)进行检验,Bartlett's 球度检验,显著度为 0.000,KMO 检验结果依次为

0.731、0.654,基本上适合做因子分析,再分别对每一条河流所有样品的元素数据分别进行相关性检验,

KMO 值依次为 0.727、0.741、0.825,概率(P)值均为 0.00,也适合做因子分析^[33]。

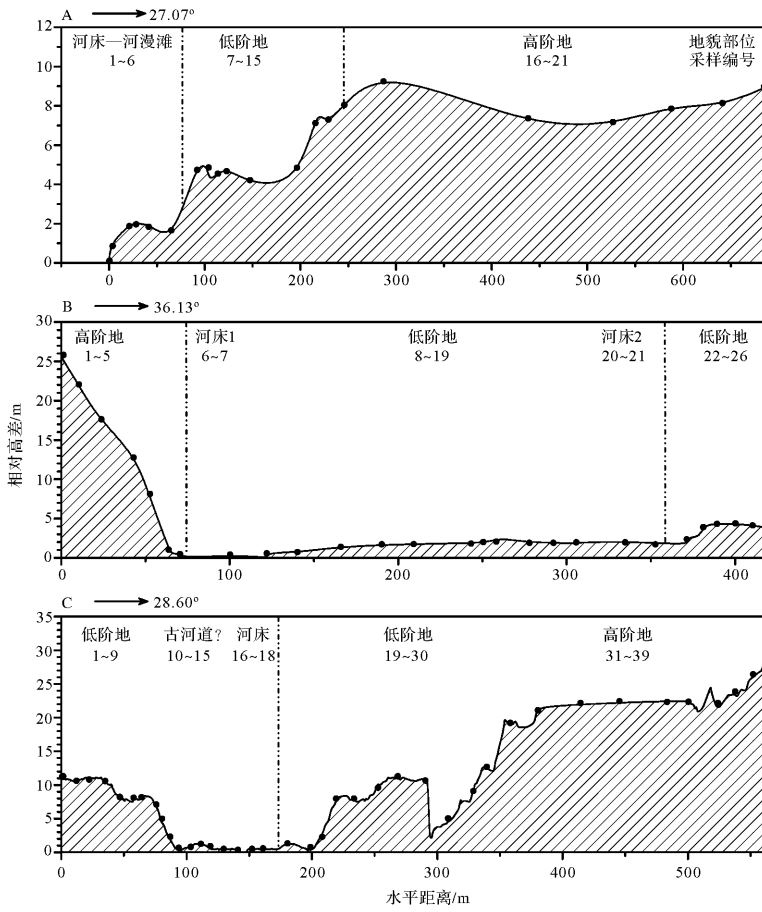


图2 三流域断面采样点示意图

a. 克里雅河 KR02; b. 毛布拉克孔兑 MR03; c. 西拉木伦河 XR02

Fig.2 Schematic diagram of sampling sites in three reaches

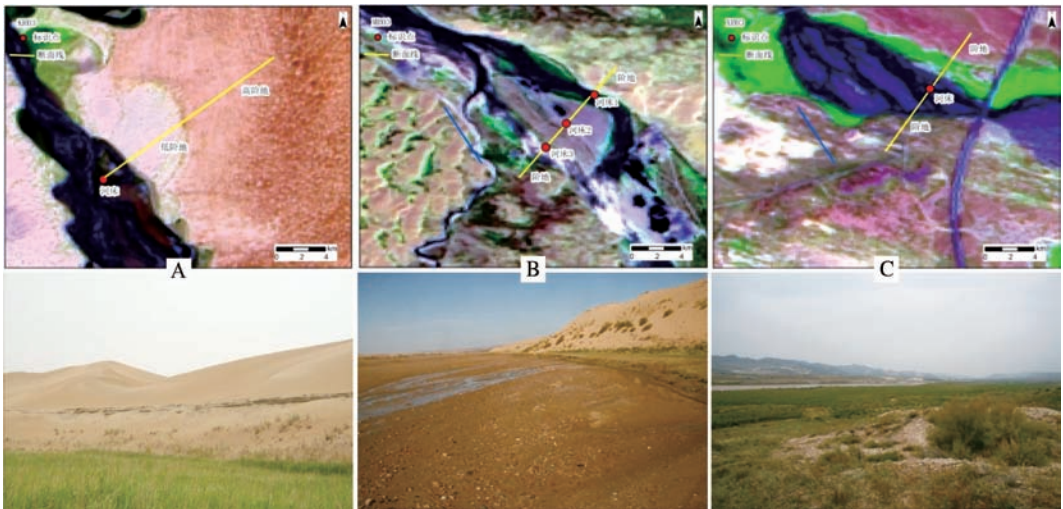


图3 三流域断面遥感影像及照片

A. 克里雅河 KR02; B. 毛布拉克孔兑 MR03; C. 西拉木伦河 XR0

Fig.3 Remote sensing images and photographs of three reaches

2 结果与分析

2.1 流域间因子分析

三个流域沉积物的常量氧化物包括 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 和 Na_2O 共 7 种,其中以 SiO_2 的含量最高 (60.5%~86.5%),其次为 Al_2O_3 含量 (7.53%~9.7%),其他氧化物含量较少。特征根 (Initial Eigenvalues) 解释了各公因子对变量总方差的解释程度,从提取的公因子解释元素含量总方差的情况来看 (表 1),F1、F2 因子特征根分别为 3.241、2.98,分别解释了 7 个元素总方差的 46.35%、42.567% 累计贡献率达到 88.866%,能够解释了绝大部分元素的特征。因子载荷 (Component) 为公因子对变量解释的权重,因子载荷矩阵显示了各个公因子对各个变量 (元素含量) 的解释意义,由于正交旋转因子载荷矩阵比初始因子载荷矩阵所反映的元素组合更具合理性和可解释性^[33],且正载荷为正向影响,负载荷为负向影响。从每个公因子中因子载荷较大的元素组合来看 (表 1),第一公因子在 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 上有较大载荷,除 SiO_2 外均为正载荷,主要是因为 SiO_2 在搬运过程中,通常在较粗粒的陆源碎屑中赋存 (如石英碎屑等)^[34],可以代表较稳定的铝铁矿、钠长石类矿物。第二公因子在 CaO 、 MgO 、 K_2O 上有较大载荷,其中 CaO 、 MgO 为正载荷, K_2O 为负载荷,概括为不稳定的方解石、白云石以及钾长石类矿物。

微量元素含有 Ti、Ba、Sr、Co 等 8 种,其中以 Ti 含量最为丰富 (0.19%~0.29%),其次为 Ba (0.055%~0.068%),其他微量元素含量则很少。同理,微量元素也从中提取特征根大于 1 的四个公因子 (表 1),方

差累计贡献率达到 90.572%,第一公因子在 Mn、P、Co、Ti、Sr 上有较高载荷,除 Co 外均为正载荷,主要代表较为稳定亲铁元素。第二公因子在 Rb、Zr 上有较高的载荷,可以概括为黏土矿物及重矿物类。第三、第四公因子较高载荷分别为 Ba、Ce,分别代表干旱型元素与稀土元素。

三个流域常量氧化物、微量元素的公因子得分及综合得分如表 2 所示。三个流域常量氧化物与微量元素公因子综合得分 (F) 均为克里雅河>毛布拉格孔兑>西拉木伦河,表明公因子各自所代表的元素组合含量较高,这除了与沉积物物源有关之外,其后期的差异性风化也是一个重要因素,表明自西向东三流域的元素亏损程度增强。

从常量氧化物与微量元素的公因子得分散点图可以看出 (图 4),三个流域之间存在明显的界限,且以克里雅河较为集中分布,表明三个流域之间在矿物组成和后期风化过程存在明显的差异,且以克里雅河样点间矿物组成较为一致,表明其可能来自于同一物源和后期风化程度较为相似。中、东部的毛布拉格孔兑和西拉木伦河的常量氧化物 F1 与 F2 之间呈负相关 (图 4a),相关系数 (R^2) 达到 0.715、0.625 ($P=0.01$),指示着两类常量氧化物“此消彼长”的相互关系,即矿物元素的富集与亏损过程相对应,表明其化学风化程度较为明显。而西部的克里雅河没有明显的相关性,氧化物之间相互独立,表明氧化物之间缺少成因上的联系,化学风化程度较弱。在微量元素上 (图 4b),三个流域样点以公因子 F1 所代表的重矿物界限较为明显。三个流域两个公因子 F1 与 F2 得分呈一定的正相关,表明这两类微量元素之间在表生环

表 1 三流域地球化学元素因子正交旋转因子载荷矩阵、特征根和方差

Table 1 Factor orthogonal rotation factor loading matrix, characteristic root and variance of geochemical elements in the three river basins

常量氧化物	因子载荷		微量元素	因子载荷			
	因子 1	因子 2		因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
Al_2O_3	0.951	-0.006	Mn	0.965	0.090	-0.140	0.030
Na_2O	0.800	0.332	P	0.949	-0.084	-0.154	0.011
SiO_2	-0.741	-0.657	Co	-0.925	-0.034	-0.019	0.307
Fe_2O_3	0.708	0.601	Ti	0.880	0.426	-0.029	0.081
CaO	0.559	0.794	Sr	0.697	-0.128	0.662	-0.086
MgO	0.577	0.766	Rb	0.002	0.835	0.092	-0.235
K_2O	0.028	-0.927	Zr	0.138	0.796	0.047	0.327
			Ba	-0.323	0.201	0.903	0.011
			Ce	-0.085	0.015	-0.018	0.953
特征值	3.241	2.980	特征值	4.075	1.587	1.308	1.181
方差贡献率/%	46.300	42.567	方差贡献率/%	45.278	17.636	14.538	13.121
累积贡献率/%	46.300	88.866	累积贡献率/%	45.278	62.914	77.451	90.572

表2 三流域地表沉积物化学元素公因子得分

Table 2 The scores of main factors of sediments in three river basins

流域	常量氧化物			微量元素				
	F1	F2	F	F1	F2	F3	F4	F
克里雅河	0.709	1.328	0.894	1.230	-0.270	-0.480	-0.197	0.414
毛布拉格孔兑	0.208	-0.258	-0.014	0.081	-0.472	0.751	0.123	0.079
西拉木伦河	-0.653	-0.635	-0.573	-0.879	0.606	-0.368	0.017	-0.343

境下具有相似的化学行为^[34]。

2.2 流域内因子分析

2.2.1 不同河段的因子分析

根据正交旋转因子载荷,分别对三个流域进行常量氧化物与微量元素公因子提取(表3)。克里雅河提取5个公因子,其累积贡献率达到92.07%,能反映沉积物的化学元素组成。第一公因子包括Al₂O₃、K₂O、Fe₂O₃、Rb、Mn,这些元素对公因子具有较高的载荷,且元素间呈较强的正相关,可以概括为较稳定铁锰矿物和铝矿。第二公因子在CaO、MgO、SiO₂、Co上有较高载荷值,前两者为正载荷,后两者为负载荷,可以概括为不稳定的方解石、白云石类矿物。第三公因子在Ce、Zr、Ti上有较高载荷,可以概括为较稳定的稀土元素与重矿物类。第四主因子在P、Ba、Sr上有较高载荷,其中P为正载荷,Ba、Sr为负载荷,分别代表稳定的非金属矿物和干旱型元素。第五公因子在Na₂O上有较高载荷,可以代表钠长石类矿物。毛不拉孔兑提取三个公因子,其累积贡献率达到87.55%,能够代表此流域的沉积物化学元素组成特征。第一公因子在CaO、MgO、Co、SiO₂、P、Fe₂O₃、Mn上有较高载荷,其中Co、SiO₂为负载荷,其他为正载荷,可以代表方解石、白云石类矿物与铁锰矿物。第

二公因子在Na₂O、Al₂O₃、K₂O、Sr、Rb、Ba上有较高的载荷,可以代表长石类矿物及黏土矿物。第三公因子在Zr、Ce、Ti在上具有较高的载荷,代表较稳定的稀土元素与重矿物。西拉木伦河提取三个公因子,累积贡献率达到89.51%,能反映沉积物的化学元素组成。第一公因子在Fe₂O₃、MgO、CaO、SiO₂、Al₂O₃、Mn、Ti、Co上具有较高载荷,可以概括为方解石、白云石与铁锰矿物的混合体。第二公因子在K₂O、Ba、Rb、Zr上具有较高的载荷,可以概括为钾长石类矿物与重矿物,在水中不易迁移。第三公因子在Na₂O、Ce上具有较高的载荷,可以概括为钠长石类矿物及稀土元素。

从上述三流域的公因子载荷可以看出,三个流域均表现出稳定矿物与不稳定矿物的混合体,表明三个流域的化学风化程度较低,还处于化学风化初等阶段。不同河流之间元素的组合差异较大,反映三河流不同的源岩组成和相异的地球化学过程,但三河流中有些元素总是相伴生,如MgO与CaO,Co与SiO₂,Fe₂O₃与Mn,表明三河流中均含有一定量的白云石、方解石以及铁锰等矿物。

从克里雅河的公因子得分F1和F3散点图可以看出(图5a),断面之间以KR04与其他断面界限较

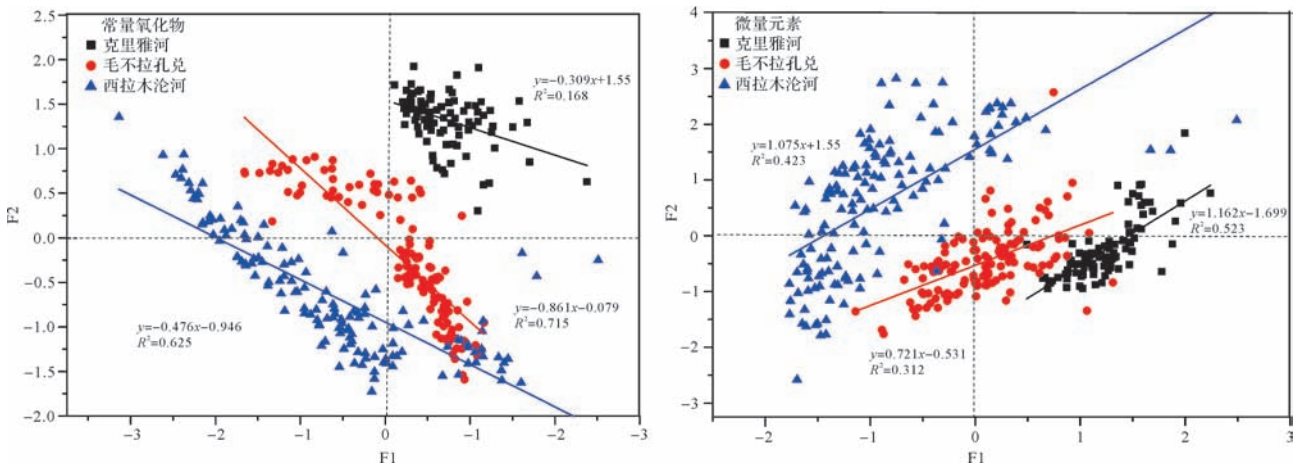


图4 三流域地表沉积物化学元素公因子得分散点图

Fig.4 The scatter plots of main factor of sediments in three river basins

表3 三流域地表沉积物地球化学元素正交旋转因子载荷

Table 3 The orthogonal rotation factor loading of sediments in three river basins

氧化物 /元素	克里雅河					毛不拉孔兑			西拉木伦河		
	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子1	因子2	因子3	因子1	因子2	因子3
SiO ₂	-0.221	-0.883	-0.143	-0.226	-0.275	-0.879	-0.355	-0.265	-0.885	-0.252	-0.344
Al ₂ O ₃	0.945	-0.093	0.208	-0.076	0.003	0.137	0.932	0.108	0.801	0.516	0.264
Fe ₂ O ₃	0.765	0.076	0.560	0.254	-0.024	0.739	-0.305	0.569	0.979	0.145	0.072
MgO	0.470	0.790	0.131	0.123	0.273	0.913	-0.163	0.093	0.976	0.063	0.094
CaO	-0.299	0.891	0.073	0.175	-0.091	0.924	-0.105	0.162	0.937	0.229	0.091
Na ₂ O	-0.252	0.080	-0.122	-0.034	0.910	-0.056	0.933	-0.003	0.465	0.452	0.632
K ₂ O	0.888	0.168	-0.145	-0.116	-0.275	-0.263	0.923	0.082	0.037	0.969	0.137
P	0.228	0.504	0.481	0.625	0.105	0.861	0.009	0.389	0.962	-0.007	0.077
Ti	0.497	0.195	0.744	0.354	-0.047	0.587	-0.041	0.782	0.827	0.417	0.199
Mn	0.645	0.094	0.632	0.304	-0.089	0.678	-0.189	0.671	0.973	0.155	0.029
Co	-0.199	-0.722	0.197	0.372	0.237	-0.882	0.088	-0.024	-0.720	-0.329	-0.540
Rb	0.941	0.204	0.006	0.190	0.003	-0.106	0.887	0.079	0.438	0.843	0.133
Sr	0.013	0.102	-0.124	-0.871	0.303	0.184	0.898	-0.037	0.654	0.623	0.356
Zr	-0.209	0.178	0.862	0.250	-0.058	0.199 0	0.159 0	0.894	0.282	0.521	0.118
Ba	-0.137	-0.296	-0.128	-0.824	0.105	-0.278	0.877	0.068	-0.057	0.915	0.117
Ce	0.136	-0.132	0.907	-0.079	-0.028	0.065	0.197	0.796	-0.026	-0.144	-0.942
特征值	4.412	3.257	3.257	2.470	1.335	5.585	5.316	3.106	8.209	4.085	2.028
贡献率/%	27.574	20.359	20.358	15.436	8.342	34.909	33.227	19.412	51.309	25.530	12.672
累积贡献率/%	27.574	47.933	68.291	83.727	92.069	34.909	68.137	87.548	51.309	76.840	89.511

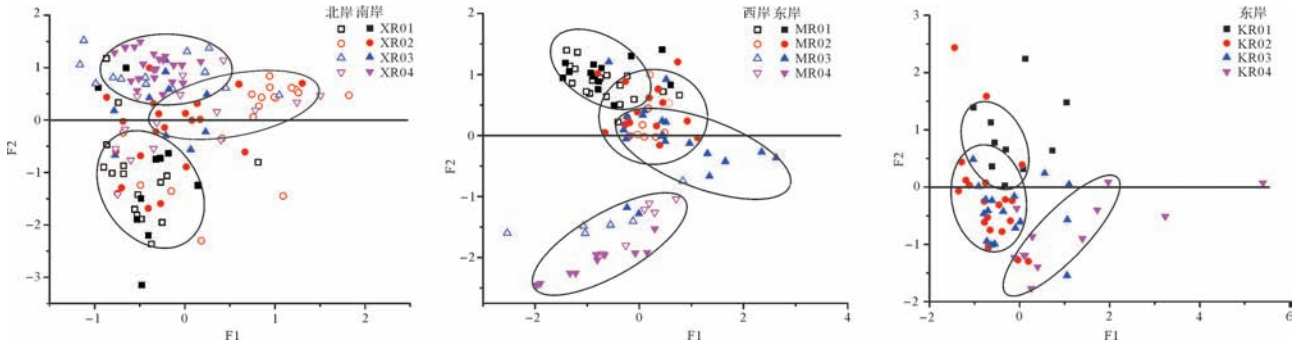


图5 三流域断面地表沉积物主因子得分散点图

Fig.5 The scatters plots of scores of main factors in three river basins

为明显,表明河流尾间段物源较为复杂,其他三断面样点相对混杂分布,尤以 KR02 与 KR03 样点重叠性较高,表明其可能存在相同物源和经历相似化学过程。不同河段以 F3 差异较大,自上游至下游总体呈递减趋势,F3 主要是 Ce、Zr、Ti 等微量元素是重矿物的主要成分,比较稳定,不易风化,一方面可能是沿程不同物源加入导致稳定矿物含量降低。另一方面,沿途矿物经历沿途流水搬运,矿物破碎,而粉沙等细颗粒物质是 Ce、Zr、Ti 等微量元素的主要携带者^[34],在风力长期吹蚀作用下细颗粒物质流失,也可能会引起其含量降低。

从毛不拉孔兑 F1 与 F2 散点图可以看出(图 5b),上游断面样点分布较下游断面集中,表明上游

断面沉积物主要源于上游源岩碎屑物,组成较简单,下游断面样点则较为复杂。以 F2 差异较大,且自上游至下游递减,反映了化学风化程度的增强和不稳定矿物含量的减少,尤其以下游断面 MR04 与其他三断面差异较大。不同河岸公因子得分也存在一定的差异,上游断面 MR01 两岸样点混杂分布,差异相对较小,但下游断面两岸规律表现不一,如断面 MR03(图 2、图 3),西岸的样点 F1 与 F2 均小于东岸,表明化学风化程度西岸较东岸强,这与断面局地的地貌组合有关,由于河道的摆动,西岸为覆盖于阶地上的高大沙丘,继承了下伏地貌阶地沉积物的特征,东岸遍布分汊河道,样点多代表河床/河漫滩沉积物,脱离水成环境较短,沉积物相对较为年轻,化学风化程度较弱。

从西拉木伦河 F1 与 F2 得分散点图可以看出(图 5b),下游断面 XR03 与 XR04 样点混杂分布,表明具有相似的风化过程。不同河段 F2 差异较大,且自上游至下游递增,即第二公因子代表的元素逐渐富集,表明易迁移元素的亏损,化学风化程度增强。从不同河岸来看,下游断面两岸差异较大,其中 XR02 北岸样点分布较南岸集中,F1 得分较南岸高,即北岸化学风化程度较南岸弱,反映了地貌格局、沙源与风向组合、植被覆盖等对风化过程的影响。

2.2.2 不同地貌单元的因子分析

自河床至阶地,可以划分为河床—河漫滩、低阶地沙丘和高阶地沙丘三个地貌沉积单元^[35-36](图 2)。分别选择三个流域中下游断面(克里雅河 KR02、毛不拉孔兑 MR03、西拉木伦河选择断面 XR02),利用公因子得分来分析不同地貌单元的元素空间分布(图 6)。

在克里雅河断面 KR02(图 6a),自河床至高阶地,公因子得分总体趋势为 F1 递增,F2 递减(图 5a),表明稳定矿物含量递增,不稳定矿物含量递减,化学风化程度递增。其中,F1 依次为增→减→增,F2 为减→增→减。这是由于河床—河漫滩物质来源于上游冲洪积物经历流水搬运更新较快,表现为稳定矿物含量较低,不稳定矿物含量较高,低阶地呈波动变化,与其物质来源受河床和高阶地沙丘沙混合影响较大,而相对不稳定。高阶地变化相对较为稳定,表现为稳定矿物含量较高,不稳定矿物含量较低,这与沉积物受河流影响较小,多为就地起沙^[37],因而对阶地下伏物质具有一定的继承性,在风力长期筛选下,不稳定矿物的迁移,稳定矿物则富集,即沙丘越老,不稳定矿物含量越低^[38]。

在毛不拉孔兑断面 MR03,如前所述,断面东岸 F1 和 F2 均较西岸低。自河床至低阶地,F1 和 F2 均递减(图 6b),化学风化程度增强,程度上稍有差异。究其原因,河床—河漫滩物质主要来自于上游山体源岩风化产物经流水搬运至河流下游,经历的物质更新较快,其相对阶地沙丘较为年轻,其矿物含量损失较少,化学风化程度较弱。其中,在河流的西岸,河床至阶地过渡带(样点序号 5-8) F1 和 F2 发生突变,这主要与西岸为高阶地沙丘受偏西风的影响以及河道的摆动而逼近河道(图 3),河床物质与高阶地沙丘沙物质组成差异较大。

在西拉木伦河断面 XR02(图 6c),两岸 F1、F2 均表现出自河床至河漫滩呈递减,化学风化程度增强,

河漫滩至低阶地波动较大,活跃低阶地至高阶地呈锯齿状缓慢递增,化学风化程度减弱。前者原因与毛布拉格孔兑相似,而稳定高阶地多分布半固定沙丘至流动沙丘,植被盖度降低,化学风化淋溶作用减弱,地表不稳定矿物含量较高。其中,在河流北岸,河床至河漫滩 F1、F2 均表现出最低值(样品序号 11-16),从实地考察发现,此处疑似为古河道分布,植被分布茂密,淋溶作用较强,地表不稳定矿物含量较低。

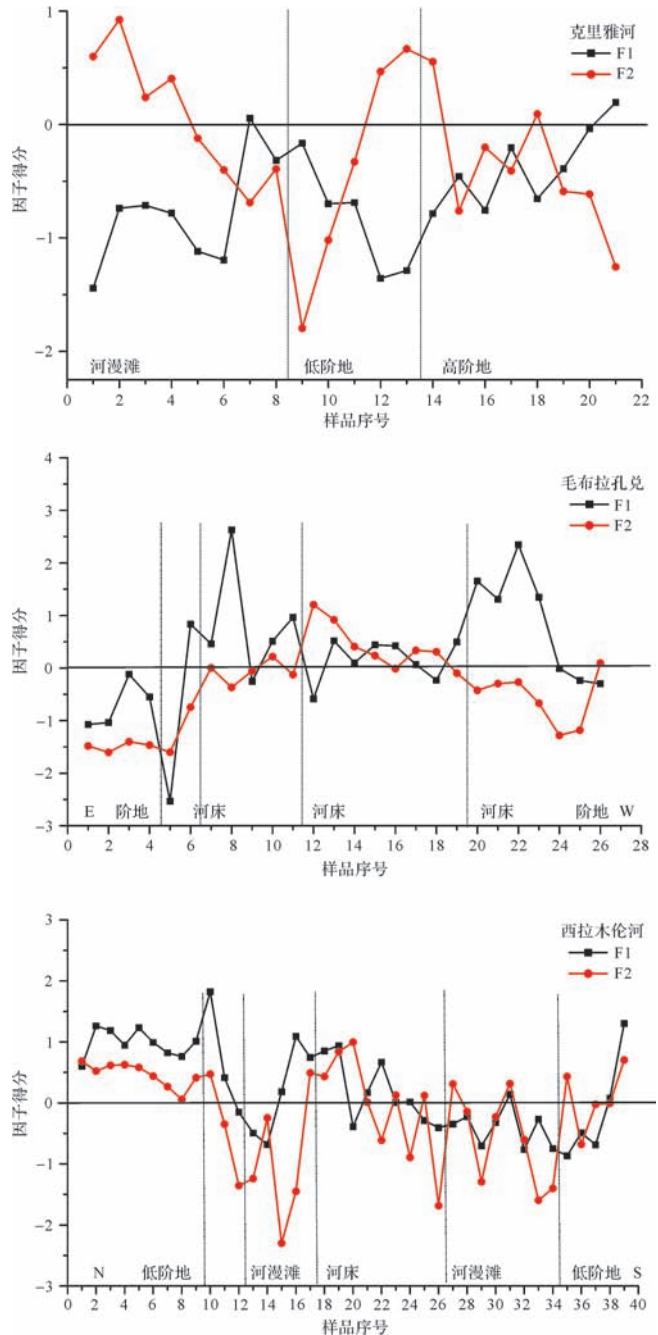


图 6 三流域地表沉积物断面公因子得分 (a 克里雅河 KR02;b 毛布拉格孔兑 MR03;c 西拉木伦河 XR02)

Fig.6 The scores of main factors in three river reaches

3 讨论

沉积物中元素地球化学特征是沉积环境和物源的函数,控制地表沉积物化学元素组成的主要因素包括源区物质组成、气候、搬运过程中的磨损和分选作用^[39-41],在不同尺度上表现不一。

在流域尺度上,气候因素是控制地表沉积物地球化学过程的关键因素,具体表现为,西部的克里雅河流域所处的干热环境决定其缺乏表生化学过程,化学元素的富集与迁移不明显,且在风力作用下,产生高度分选和混合,在化学元素特征上表现为样点混合分布,具有相似的元素组成;中、东部的毛布拉格孔兑和西拉木伦河两流域,虽然两河流发源地不同,源岩组成相差较大,但与克里雅河相比,二者在水热条件方面更接近,表现为受地表水或地下水的影响,化学元素富集与迁移比较明显,化学风化程度较强,化学元素之间存在一定的成因上的关联。

在中尺度的河段上,三个流域不同河段化学元素组成均存在一定程度的混杂分布,中游河段更为明显,一方面反映了不同河段对母岩物质的继承性,另一方面也表明地表沉积物经历环境改造的相似性,即三个流域均属于季节性河流,且沙物质均采自河流-沙漠过渡带,受雨季高能量的水动力条件和风季风动力条件的反复搬运与沉积作用,表现为当沙漠越过河道,风成沙进入河道,河道沉积物的特征由此改变,同样河床沉积物由风动力作用脱离水成环境,其特征发生改变^[42-43],上述沉积物特征也远不同于山前源岩特征。总之,新、老物质的叠加、混合,使得沉积物在元素组成上存在一定程度的相似性和复杂性。由于不同河段地貌格局及水分条件等的差异,造成物源以及动力条件迥异。克里雅河自上游至下游,河床—河漫滩沉积物表现为不稳定矿物含量递减,这与下游沉积物主要来源于上游山体源岩的风化产物经流水的搬运作用,不稳定矿物的损失有关;而阶地上沙物质表现出不稳定矿物含量的波动变化,还与不同河段的气候干旱程度有关,一般来说,不稳定矿物含量与其气候干旱程度成正相关^[38]。对中东部的毛布拉格孔兑和西拉木伦河两条河,不同河段化学风化程度递变规律不是太明显,尤其是下游河段出现分异,这由于其物源并不完全来自于流水搬运的上游碎屑物,还与支流汇入带来外来物质有关。不同河岸的化学元素的空间分布规律不同,这是因为河型、河流流向与风向关系、局部地貌等组合上的差异,也会改变沉积物

的空间分布和沉积环境,从而引起对沉积物的分选作用以及部分元素分异模式的差异。

在小尺度的河流断面上,三个流域断面化学元素也呈现出明显的递变规律,首先,物源是影响其分布规律的重要原因之一,河漫滩或低阶地地表物质主要受流水反复搬运自源头的碎屑物有关,而表现出不稳定矿物含量较高,且呈波动变化,而高阶地物质距河相对较远,受现代河流影响相对较小,其地表物质受下伏沉积物影响较大,而呈现出不稳定矿物含量较低,稳定矿物含量较高。其次,三个流域不同地貌类型之间的递变幅度以克里雅河较为明显,这与其气候干旱,水分条件随距离河道远近不同递变比较明显有关。而对于中东部流域,气候相对较为湿润,地表水或地下水相对较为丰富,因此随着距离河道远近不同,水分条件递变不明显,因此不同地貌单元之间化学元素富集与迁移界限也不明显。三个流域自低阶地至高阶地段,不稳定矿物含量降低程度均增加,风化程度增强,但引起原因不同。对克里雅河来说,阶地多为流动沙丘,其风化程度较强主要受下伏古沙丘物质影响以及风力机械风化的双重叠加作用所致^[44]。而对于中东部流域,由于高阶地受降水或地表水、地下水的作用,植被覆盖较好,多为古沙丘固化,甚至有一定土壤的发育,所以不稳定矿物遭受淋溶作用损失,化学风化程度较强。因此其距河道远近的不同,由于影响其物源、水分条件、植被等的差异,进而引起同一元素的地球化学过程也不同。

上述三个流域上地表沉积物在不同空间尺度上,表现出化学元素特征上的差异,在一定程度上反映了风动力和水动力的差异性分选^[45]。如何确定风、水动力对沉积物化学组成特征上的贡献率问题,进而得到判别风成沉积物与水成沉积物的化学特征综合指标,还需要从沉积学、土壤学、地球化学等方面的综合研究。再者,相对于剖面沉积物,地表沉积物更具复杂性,在后续的研究中可以在河流上不同河段以及不同地貌部位选择一些典型剖面,并结合测年数据,综合分析沙漠演化与河流变迁二者的关系,重建古环境演化序列与过程。

4 结论

通过因子分析方法,探讨了三个流域在不同空间尺度上化学元素递变规律,得出的主要结论有:

(1) 三个流域之间或不同河段总体因子分析结果均表明,提取的公因子基本上可以概括为较为稳定

的铁锰矿物、较不稳定的长石类和方解石(白云石)类矿物以及稳定的稀土元素和重矿物组成。

(2) 不同矿物组合可以较好地地区分三个流域,可以指示不同气候自然带下地球化学过程的差异性,即自西向东三个流域上样点的化学元素富集或迁移程度呈递增趋势,化学风化程度增强。

(3) 三个流域不同河段,自上游至下游,样点化学组成均愈变复杂。不同河段或不同河岸沉积物的化学元素空间分异规律除与物源有关外,其地貌格局以及水分条件等因素也影响其空间分布。

(4) 对于不同地貌单元,自河床至阶地,化学元素递变规律可以划分为河床—河漫滩型、活跃低阶地型、稳定高阶地型三种类型,这与距离河道远近不同引起物源不同以及动力因素的分配不同有关。

参考文献(References)

- Langford R P, Chan M A. Fluvial-aeolian interactions: Part II, ancient systems[J]. *Sedimentology*, 1989, 36(6): 1037-1051.
- Kocurek G. Aeolian system response to external forcing factors—a sequence stratigraphic view of the Saharan region[M]//Alsharhan A S, Glennie K W, Whittle G L, et al. *Quaternary Deserts and Climatic Change*[M]. Rotterdam: Balkema, 1998, 327-349.
- Bullard J E, McTainsh G H. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments: examples, concepts and Australia case study[J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27(4): 471-501.
- Thomas D S. Arid geomorphology[J]. *Progress in Physical Geography*, 1990, 14(2): 221-231.
- 史培军,王静爱. 论风水两相作用地貌的特征及其发育过程[J]. 内蒙古林学院学报, 1986, 8(2): 88-97. [Shi Peijun, Wang Jing'ai. The landform features and development of aeolian-fluvial interactions [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1986, 8(2): 88-97.]
- Middleton L T, Blakey R C. Processes and controls on the intertonguing of the Kayenta and Navajo Formations, northern Arizona: eolian-fluvial interactions[M]//Brookfield M E, Ahlbrandt T S. *Eolian Sediments and Processes, Developments in Sedimentology*. Amsterdam: Elsevier, 1983, 38: 613-634.
- Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*[M]. London: Methuen & Co., Ltd., 1941: 265.
- Bagnold R A, Barndorff-Nielsen O. The pattern of natural size distributions[J]. *Sedimentology*, 1980, 27(2): 199-207.
- Khalaf F I, Misak R, Al-Dousari A. Sedimentological and morphological characteristics of some nabkha deposits in the northern coastal plain of Kuwait, Arabia[J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 29(3): 267-292.
- Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- Bagnold R A. Bed load transport by natural rivers[J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(2): 303-312.
- Allen J R L. *Principles of Physical Sedimentology*[M]. London Boston: G. Allen & Unwin, 1985, 272.
- Nesbitt H W, Markovics G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliclastic sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(8): 1653-1670.
- 董光荣,陈惠忠,王贵勇,等. 150ka 以来中国北方沙漠、沙地演化和气候变化[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(12): 1303-1312. [Dong Guangrong, Chen Huizhong, Wang Guiyong, et al. The evolution of deserts with climatic changes in China since 150 ka B.P. evolution and climate change in deserts or sandy lands of northern China around 150ka B. P [J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(12): 1303-1312.]
- Ohta T, Arai H. Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering[J]. *Chemical Geology*, 2007, 240(3/4): 280-297.
- Yang Xiaoping, Wang Xulong, Liu Ziting, et al. Initiation and variation of the dune fields in semi-arid China - with a special reference to the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 369-380.
- Honda M, Shimizu H. Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands [J]. *Sedimentology*, 1998, 45(6): 1125-1143.
- Weltje G J, von Eynatten H. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171(1/2/3/4): 1-11.
- 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.
- 龙进,贾玉连,张智,等. 末次冰期以来鄱阳湖东北缘下蜀黄土常量元素地球化学特征及其物源指示[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 932-940. [Long Jin, Jia Yulian, Zhang Zhi, et al. Geochemical characteristics of loess from northeast of Poyang Lake since last glacial and its provenance implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 932-940.]
- 牛东风,李保生,王丰年,等. 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, 2015, 33(4): 735-743. [Niu Ddongfeng, Li Baosheng, Wang Fengnian, et al. 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*, 2015, 33(4): 735-743.]
- Muhs D R. Mineralogical maturity in dunefields of North America, Africa and Australia[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/2/3/4): 247-269.
- Nesbit 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.
- Ding Z L, Sun J M, Yang S L, et al. Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for

- its origin, source provenance and paleoclimate change[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(6): 901-913.
- 25 Chen Jun, An Zhisheng, Liu Lianwen, 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: Earth Sciences*, 2001, 44(5): 403-413.
- 26 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. [Xu Zhiwei, Lu Huayu, Zhao Cunfa, et al. Composition, origin and weathering process of surface sediment in Kumtagh Desert, Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 53-64.]
- 27 许林军,杨亚娟,朱莉莉,等. 毛不拉孔兑水土流失特征与防治布局[J]. *水土保持应用技术*, 2011(6): 32-34. [Xu Linjun, Yang Yajuan, Zhu Lili, et al. The characteristics and the prevention and control of water and soil erosion layout[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2011(6): 32-34.]
- 28 吴建华,安娜,季颺,等. 西拉木伦河流域降水和径流特征分析[J]. *内蒙古气象*, 2014(4): 23-25. [Wu Jianhua, An Na, Ji Yang, et al. Analysis on characteristics of precipitation and runoff in Silas Mulun river basin[J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2014(4): 23-25.]
- 29 Tripathi V S. Factor analysis in geochemical exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1979, 11(3): 263-275.
- 30 Gramowska H, Krzyzaniak I, Baralkiewicz D, et al. Environmental applications of ICP-MS for simultaneous determination of trace elements and statistical data analysis[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1/2/3/4): 479-490.
- 31 戴慧敏,宫传东,鲍庆中,等. 区域化探数据处理中几种异常下限确定方法的对比——以内蒙古查巴奇地区水系沉积物为例[J]. *物探与化探*, 2010, 34(6): 782-786. [Dai Huimin, Gong Chuandong, Bao Qingzhong, et al. A comparison of several threshold determination methods in geochemical data processing: A case study of stream sediments in Chabaqi area of Inner Mongolia[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2010, 34(6): 782-786.]
- 32 Ijmker J M, Stauch G, Hartmann K, et al. Environmental conditions in the Donggi Cona lake catchment, NE Tibetan Plateau, based on factor analysis of geochemical data[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 44: 176-188.
- 33 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 218-220. [Zhang Wentong. *Advanced Tutorial on SPSS Statistical Analysis* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 218-220.]
- 34 多布罗沃利斯基 B B. 微量元素地理学[M]. 朱颜明,译. 北京: 科学出版社, 1987: 167-171. [Добровольский В В. География Микроэлементов [M]. Zhu Yanming, trans. Beijing: Science Press, 1987: 167-171.]
- 35 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): 地球科学*, 1999, 29(1): 88-96. [Li Sen, Dong Guangrong, Shen Jianyou, et al. Formation mechanism and development pattern of aeolian sand landform in Yarlung Zangbo River valley[J]. *Science China (Seri D): Earth Sciences*, 1999, 29(1): 88-96.]
- 36 Amini A, Moussavi-Harami R, Lahijani H, et al. Sedimentological, geochemical and geomorphological factors in formation of coastal dunes and nebkha fields in Miankaleh coastal barrier system (Southeast of Caspian Sea, North Iran)[J]. *Geosciences Journal*, 2012, 16(2): 139-152.
- 37 Yang Xiaoping, Zhu Zhengda, Jaekel D, et al. Late Quaternary palaeoenvironment change and landscape evolution along the Keriya River, Xinjiang, China: the relationship between high mountain glaciation and landscape evolution in foreland desert regions[J]. *Quaternary International*, 2002, 97-98: 155-166.
- 38 吴兆宁,钱亦兵. 和田河与克里雅河流域不同类型沙物质的地球化学探讨[J]. *干旱区地理*, 1992, 15(4): 71-77. [Wu Zhaoning, Qian Yibing. Geochemical studies of various sand sediments in the Hotan river and the Keliya River basins[J]. *Arid Land Geography*, 1992, 15(4): 71-77.]
- 39 Blatt H, Middleton G, Murray R. *Origin of Sedimentary Rocks*[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1980: 766.
- 40 Johnsson M J, Stallard R F, Meade R H. First-cycle quartz arenites in the Orinoco River basin, Venezuela and Colombia[J]. *The Journal of Geology*, 1988, 96(3): 263-277.
- 41 Újvári G, Varga A, Balogh-Brunstad Z. Origin, weathering, and geochemical composition of loess in southwestern Hungary[J]. *Quaternary Research*, 2008, 69(3): 421-437.
- 42 王勇,韩广,杨林,等. 河岸沙丘粒度分布特征[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(1): 210-214. [Wang Yong, Han Guang, Yang Lin, et al. Grain size distribution of sand dunes at river banks[J]. *Arid Land Research*, 2016, 33(1): 210-214.]
- 43 Xu Jiongxin, Yang Jishan, Yan Yunxia. Erosion and sediment yields as influenced by coupled eolian and fluvial processes: The Yellow River, China[J]. *Geomorphology*, 2006, 73(1/2): 1-15.
- 44 Yang Xiaoping, Zhu Bingqi, White P D. Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data[J]. *Quaternary International*, 2007, 175(1): 71-85.
- 45 李小妹,严平. 中国北方地区沙漠与河流景观格局[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(9): 1198-1208. [Li Xiaomei, Yan Ping. Landscape pattern characteristics of deserts and rivers in northern China[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(9): 1198-1208.]

The Spatial Distribution Difference of Surface Elements in the River-desert Transition Zone of Three Drainages in Northern China

LI XiaoMei^{1,2,3} YAN Ping^{1,3} WU Wei^{1,3} QIAN Yao^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xian 710119, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: As the geochemical characteristics of surface sediments usually recorded the information of the sediments, such as the transport medium and sedimentation process, analyses of their mineral composition and provenance can provide valuable indications for paleoenvironmental reconstruction. This study provides factor analyses of 7 major dioxides and 15 micro elements in the surface sediments taken from the river-desert transition zones in the Keriya River, Mu Bulag River, and Xi Xar Moron River basins. It was found that the common factors derived from the factor analyses among the three river basins or their upper, middle, and lower reaches mainly included stable Fe and Mn minerals, less stable feldspars, calcite (dolomite) and other silicate minerals, and stable rare earth elements and heavy minerals. The factor analysis of the relationships between the rivers indicated that the surface sediments along the rivers from west to east showed progressively increasing abundance and movement of chemical elements and degrees of chemical weathering. The factor analyses at a river basin scale indicated that from the upper reaches to the lower reaches, samples exhibiting increasingly complex chemical compositions. The spatial distribution patterns of the chemical elements in the surface sediments from different river sections or different river banks showed correlations with their provenance, geomorphic pattern, water conditions, and other factors. From the riverbed to the river terrace, the surface sediments on the three geomorphic units, from riverbed-flood plain, low river terrace composed of sand dunes to the high terrace, exhibited heterogeneous, progressive variations in their chemical compositions. This may result from their varying distances from the river courses, provenances and dynamic factors. The preliminary results of the study are expected to provide references for research into the chemical composition characteristics of surface sediments in river-desert transition zones and their variation mechanisms in response to changes of aeolian-fluvial interactions.

Key words: Geochemical elements; spatial distribution; factor analysis; river-desert transition zone