

程夏丽,安福元,李善禄,等. 格尔木河上游水成沉积物元素时空变化、流域风化及其驱动机制[J]. 盐湖研究, 2024, 32(1): 10-19.
Cheng X L, An F Y, Li S L, et al. Spatiotemporal variations of elements in hydrogenic sediments, watershed weathering and its driving mechanism in the upper Golmud River[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(1): 10-19.
DOI: 10.12119/j.yhj.202401002

格尔木河上游水成沉积物元素时空变化、流域风化及其驱动机制

程夏丽^{1,2}, 安福元^{1,2,3*}, 李善禄⁴, 司璐^{1,2}, 徐一帆^{1,2}, 张清纯^{1,2}, 柴璐琦^{1,2}

1. 青海师范大学, 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海师范大学地理科学学院, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 西宁 810008;
3. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008;
4. 中国建筑材料工业地质勘查中心青海总队, 青海岩土工程勘察院有限公司, 青海 西宁 810008)

摘要: 格尔木河流域上游山区沉积物元素的风化迁移规律对察尔汗盐湖中盐类资源的补给具有重要意义。文章结合已有的光释光(OSL)年代学数据, 对该流域的上游纳赤台(NCT)和中游小干沟(XGG)剖面进行了主要常量元素变化规律研究, 并对流域内上下游不同类型沉积物的元素特征进行对比分析, 得出如下结论: 1. 末次间冰期以来, 格尔木河中游河谷沉积物中主要元素含量较上游西大滩、昆仑河小流域次级盆地中高, 表现出较为明显的富集状态。2. 流域上游湿冷山前地带河谷沉积物的风化程度明显高于中游干热河谷, 表明上游冰川融水和较充沛的降水条件导致充分的水岩反应过程是主导流域风化的主要因素, 且物质在流域各个次级盆地间物质输送具有跳跃性、传递性和继承性。3. 流域内的风化过程与晚更新世以来的冰期-间冰期气候旋回和季风-西风相互转换密切相关, 即暖湿阶段主要受季风控制, 以化学风化为主; 干冷阶段受西风控制, 以物理风化为主。综上, 格尔木河流域上游山前地带元素的风化迁移和中游河谷沉积物对元素的继承转移是流域内物质流动的主要形式。

关键词: 格尔木河流域; 元素迁移; 化学风化; 季风西风转换

中图分类号: P59

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2024)01-0010-10

格尔木河发源于东昆仑山中段, 属冰川融水河, 是察尔汗盐湖的主要补给河流, 其水量变化、区域风化和气候变化过程对下游察尔汗盐湖的演化具有非常重要的作用^[1]。格尔木河上游为相对湿润且有植被发育的山地气候地带, 地形高差大, 地势陡峭, 河谷深切, 山岳冰川发育, 地貌类型多样, 水成沉积物分布广泛^[2-5]。在格尔木河流域上游, 湖相沉积和冲积扇沉积物广泛填充于各次级宽谷盆地中, 成为显著的地貌类型^{[3][6]}。最新的研究认为, 这些湖相沉积和冲积扇沉积是在万年尺度气候变化主导下两者相互作用形成的地貌^[7]。深入研究堰塞湖和冲积扇沉积物序列的矿物、元素和风化指标, 对进一步理清它们的地貌过程和重建东昆仑山区的风化过程及其驱

动机制具有重要的科学意义。唐启亮等^[8]人研究发现格尔木河水中的K、B、Li含量随矿化度升高而升高, 且呈正相关关系, 尤其在盐湖区富集; 谭红兵等^[9]人从地球化学的角度分析了格尔木河流域水质, 结果表明空间上流域内河水由南向北逐渐咸化, 时间上河水矿化度逐年提升; 安福元等^[10]人对格尔木河流域中的富钾基岩做了相应的化学指标分析, 初步得出风化程度自上游至下游减弱; 而Owen等^[3]人研究发现, 格尔木河流域内的物质搬运过程较为复杂, 且驱动机制不清楚。由此看出, 前人的研究多集中于流域河水中离子迁移规律或关注于某一河段的元素变化, 相对缺乏从上下游对比的角度分析河谷沉积物元素搬运迁移机制。因此本文通过研究格尔木

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-05-24

基金项目: 青海省基础研究计划应用基础研究项目(2020-ZJ-727); 国家自然科学基金项目(41961014); 青海省盐湖地质与环境重点实验室开放基金(202102)

作者简介: 程夏丽(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向为流域地貌与区域风化。E-mail: 1396339681@qq.com。

通讯作者: 安福元(1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事流域地貌演化与地表过程的研究工作。E-mail: dongzhu8@sina.com。

河流域上下游沉积物中元素储存迁移的时空变化过程,探索物质元素在流域内的搬运和迁移机制,为察尔汗盐湖中成盐元素的富集成矿从流域地貌演化和区域风化的角度提供理论基础。

1 研究区背景

1.1 流域概况

格尔木河流域位于东昆仑山东段,北至察尔汗盐湖,南部为昆仑山主脉,西起黑海湖上游,东至布

青山西侧,流域面积为 4.5 万 km²(图 1)。流域内河流以格尔木河为主,发源于东昆仑山主脊,汇入察尔汗盐湖,全长 446 km,支流为昆仑河、雪水河和南沟河等。自晚更新世以来,流域内广泛发育第四纪地貌^[11],形成了昆北断裂、昆中断裂、昆南断裂^[12],而岩性地层在昆中断裂南北两侧具有差异性,南坡以三叠纪砂岩、灰岩为主的海相沉积为主,北坡分布有片麻岩、片岩、大理岩、千枚岩、板岩、闪长岩和花岗岩等。格尔木河流域上游东西向流经昆中断裂,然后由南向北切穿昆仑山,形成了地形陡峭,沟壑纵横,

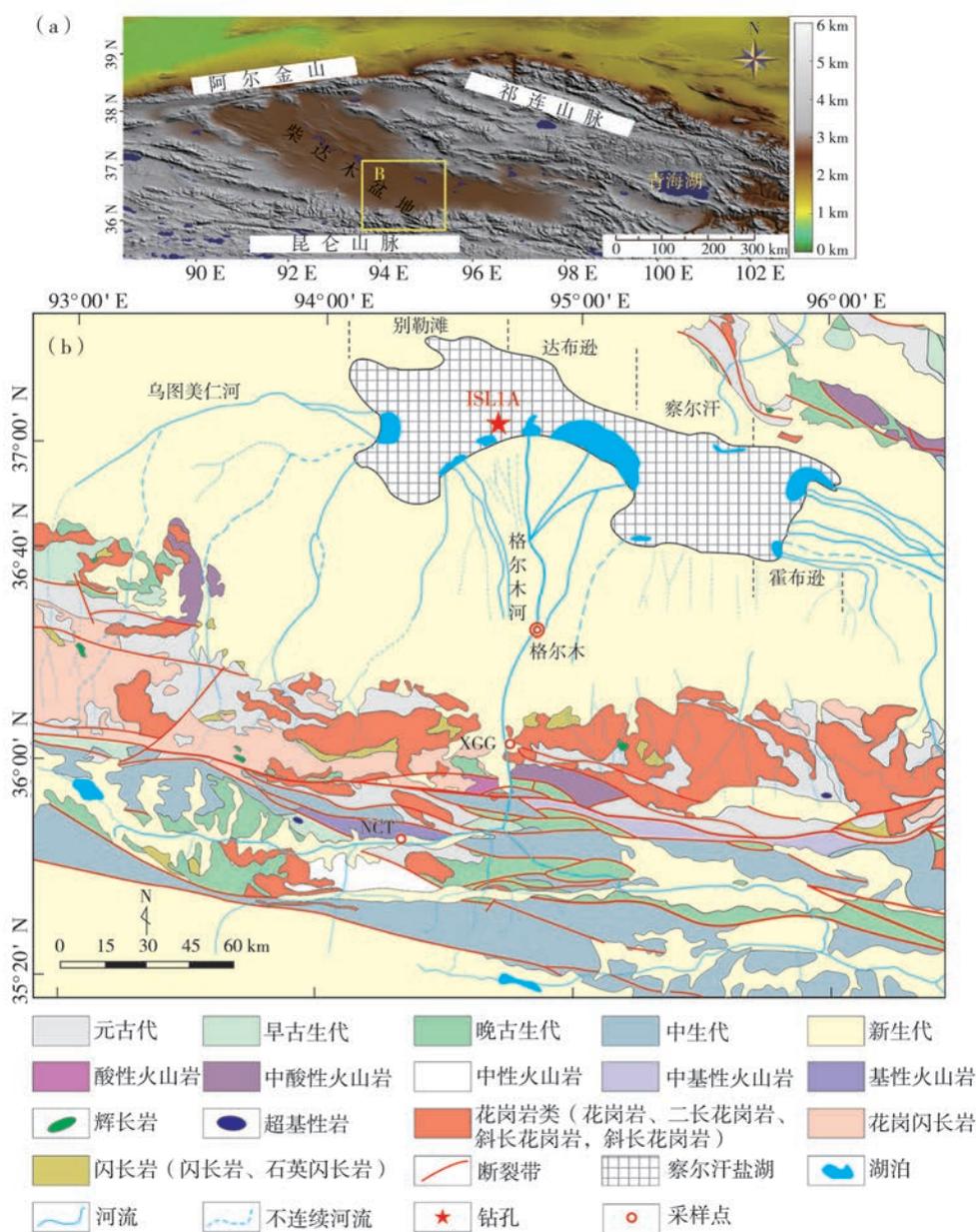


图1 格尔木河流域地理位置、地形和水系分布图(修改自 Miao et al, 2016^[16])

Fig. 1 Geographical location, topography and drainage distribution of Golmud River Basin (modified from Miao et al, 2016^[16])

以峡谷隘口和宽谷盆地串联交错的地形特征^{[3][13]};该流域下游为山前冲洪积组成的两级巨型冲积扇,沉积了巨厚的第四系松散沉积物,为地下水的储存、矿物离子的水-岩交换提供了巨大空间^[14]。流域内地貌类型多样,由磨圆差、分选差的三岔河组冲洪积为基底,磨圆较好的河流相盖层组成的河流堆积阶地广泛分布于流域中上游河段,并在三岔河地区发育有规模宏大的五级河流阶地,二元沉积结构明显^{[5][15]};沿着干流两边南北向对称分布的巨型支流山谷中平铺而下的冲积扇沉积是该流域另一个显著的地貌单元,其沉积厚度普遍超过20 m。由于这些大型冲积扇的南北向对称加积,导致在末次冰期冰阶-间冰阶气候旋回的湿润阶段形成了多个串珠状分布的堰塞湖沉积^[7]。同时,格尔木河下游的一级冲积扇两段还分布有沙丘等风成地貌,在二级巨型冲积扇泉集河流域内分布有大面积的沼泽沉积地貌单元^[5]。

2 样品采集及实验方法

2.1 样品采集

格尔木河上游流域分布有堰塞湖和冲积扇二元地貌单元耦合形成的大面积水成沉积物,因此本研究对上述水成沉积物不同河段的纳赤台(NCT)和小干沟(XGG)两个剖面进行了系统的年代学和矿物学采样(图1)。NCT剖面0~5 m以粉砂层为主,颗粒较细,偶见砾石夹杂,5~20 m由连续沉积的粗砂和砾石互层构成,具水平层理,总厚度为35.0 m,以0.8 m间隔共采集矿物学碎屑样品43个;XGG剖面上部0~10 m的层位由粗砂和细砂互层而成,夹杂有薄砾石层,水平层理明显,10 m以下主要是砂和砾石层的交互堆积,颗粒较粗,磨圆较差,无明显的层理,总厚度为40 m,间隔0.85 m采集碎屑样品46个。该剖面小流域盆地内分布有大面积的肉红色富钾正长花岗岩。我们在已有的研究中对上述两剖面进行了较为详细的光释光年代学定年研究^{[10][17]}。因此,在本研究中,我们引用已有的两剖面年代学数据,并结合新测定的地球化学数据进行区域风化过程的研究和讨论。

2.2 实验方法

NCT和XGG剖面样品的前处理工作在青海师范大学自然地理与环境过程重点实验室完成。首先

将所采样品自然风干后过20目分样筛,接着用球磨机将充分混合的样品研磨至200目以下,最后从混合样中称取10~20 g,装至密封袋,送至西安地质调查中心使用X-射线荧光光谱仪(XRF)测试常量元素的含量。其具体步骤如下:(1)去除样品中的有机质以及碳酸盐,先加入浓度为1:2的过氧化氢溶液10 ml,同时加入蒸馏水,待反应完全后,再加入浓度1:2的HCl溶液10 ml,加热煮沸并不断搅拌;(2)除去溶液中的钙、氯离子,静置样品12 h,抽取上清液;(3)放入压样机,将再次烘干研磨的样品放入YYJ-40压样机,并在周围填充硼酸,加压至 $0\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}$ 维持20 s,取出圆饼状的样品;(4)X-射线荧光光谱仪测试元素含量。样品中的常量元素数据以氧化物形式给出,单位为%。本研究共测试NCT和XGG剖面的11种氧化物元素,包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 。测试的微量元素为Rb、Sr,以单元素形式给出,单位为ppm。

3 结果

3.1 NCT和XGG剖面年代标尺的构建

通过构建NCT和XGG剖面的年代-深度模型框架,获得了所采样品不同深度的年代数据。据前人研究,NCT剖面所采样品最顶部年代为 $(13.1 \pm 1.0)\text{ ka}$ ^[17],即末次冰消期阶段,最底部的年代为 $(89.7 \pm 11.6)\text{ ka}$,为末次间冰期,即MIS 5晚期。该剖面年代自上而下随深度的加深增大,上部3个年代数据呈现较好的线性关系,然而最底部样品数据在模型中线性关系稍差,这可能与纳赤台剖面中颗粒较粗的近源快速混杂堆积层,造成年轻样品的混入有关,也有可能底部层位存在沉积间断,但不影响底部以上大部分环境过程的重建。XGG剖面所采样品顶部年代为 $(17.1 \pm 1.0)\text{ ka}$,同样为末次冰消期,最底部的年代为 $(95.9 \pm 10.5)\text{ ka}$,亦为末次间冰期,该剖面从年代-深度的模型图可以看到,具有较好的线性关系,年代比纳赤台剖面更加稳定可靠,这可能与小干沟剖面具有更细的颗粒,更好的分选层,使得石英颗粒更好地曝光衰退有关。两个不同地点的剖面都是从末次间冰期后期开始堆积,至末次冰消期或早全新世结束,其堆积的沉积速率大约为 0.041 mm/a 。因此,NCT剖面的年代的深度模型为 $\text{Age}=2.5847 \times \text{Depth} \pm 1.4854$,根据上述年龄模型外推得出,NCT剖面沉积年代约为6.65~99.93 ka之间,XGG剖面的年代的深度模

型为 $Age=2.4166 \times Depth+10.638$, 外推得出 XGG 剖面的沉积年代约为 (10.64 ~ 97.64) ka, 两剖面的时间跨度为末次间冰期至早中新世。

3.2 格尔木河流域元素地球化学特征

格尔木河流域元素含量对下游盐湖中元素的补给具有重要作用, 因此本文在对 NCT 和 XGG 剖面元素分析的基础上, 结合位于格尔木河流域上游西大滩以及昆仑河的元素含量^[10], 系统分析了格尔木河流域中常微量元素的分布特征, 具体如下。

3.2.1 NCT 剖面常量元素特征

由表 1 可知, NCT 剖面常量元素以 SiO_2 为主, 最大值 68.26%, 最小值 58.93%, 平均含量 63.99%, Al_2O_3 含量次之, 介于 9.13% ~ 11.28% 之间, 平均值

为 10.50%, CaO 含量介于 5.09% ~ 11.91% 之间, 平均含量为 7.31%, 元素 Na_2O 、 K_2O 平均含量较为接近, 分别为 2.40%、2.46%, 其它矿物的含量均不足 2%, 依次为 MgO (1.91%) > Fe_2O_3 (1.66%) > FeO (1.18%) > TiO_2 (0.40%) > P_2O_5 (0.11%) > MnO (0.06%)。图 3 为 NCT 剖面部分常量元素含量随深度变化的曲线, 其氧化物含量自上而下都存在一定的波动, 元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 的含量在剖面 15 ~ 25 m 之间有降低的趋势, 而元素 Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 以及 Na_2O 含量升高, 元素含量变化的转折点主要出现在距剖面顶部 10 m 和 30 m 的位置, 这可能是由于区域气候的干湿变化导致剖面沉积物颗粒从粉砂过渡至粗砂和砾石层, 造成不同粒径沉积物中元素的富集或淋溶。

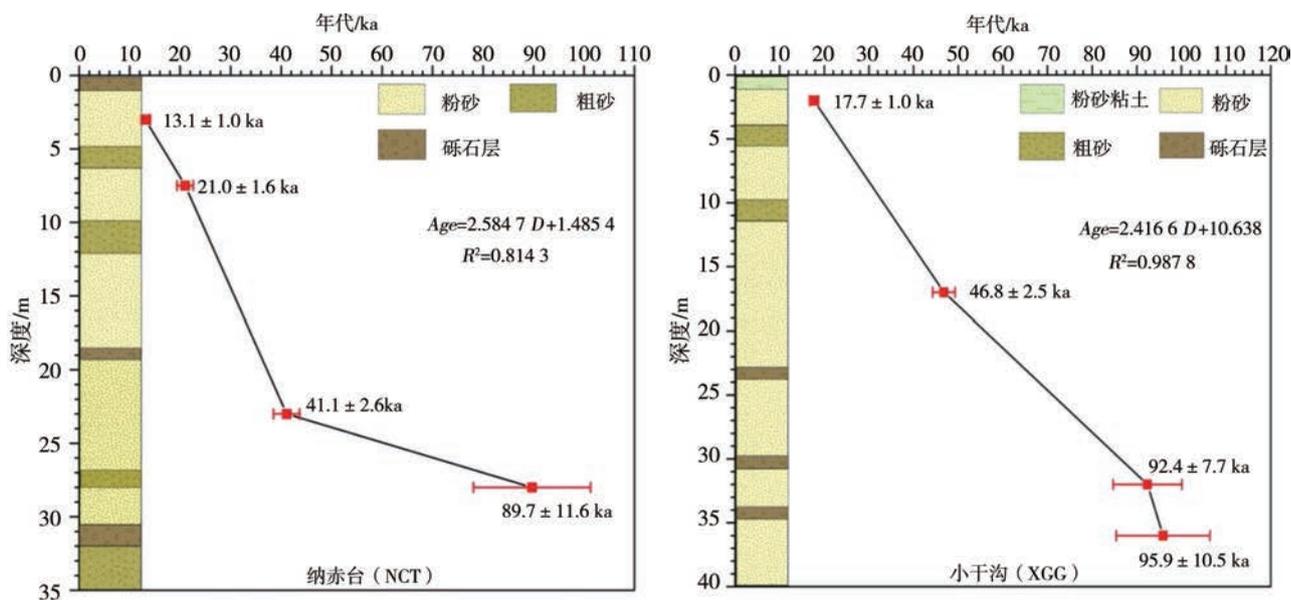


图2 NCT和XGG剖面深度-年代框架

Fig. 2 Depth-age framework of NCT and XGG profiles

3.2.2 XGG 剖面常量元素特征

XGG 剖面常量元素以 SiO_2 居多, 变化范围为 52.10% ~ 75.07%, 平均含量为 66.10%, Al_2O_3 含量次之, 介于 8.73% ~ 11.93% 之间, 平均值为 10.50%; CaO 含量介于 2.18% ~ 10.14% 之间, 平均含量为 6.35%; 元素 Na_2O 、 K_2O 平均含量分别为 2.57%、2.41%; 其它元素含量依次为 Fe_2O_3 (1.56%) > MgO (1.48%) > FeO (1.10%) > TiO_2 (0.40%) > P_2O_5 (0.10%) > MnO (0.06%)。从图 4 可以看出, XGG 剖面的元素含量在 25 ~ 30 m 之间出现较大幅度的波动, 在剖面的其它深度元素含量变化不显著, 从中可以看出, 元

素 SiO_2 、 Al_2O_3 含量随深度的变化趋势相同, 而 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 含量曲线变化相似, 但对比其它元素含量, 活动性强的 K 元素含量随深度的波动比较频繁, 可能与周围流域内近源的富钾花岗岩风化和物源供给有关。

为了进一步了解格尔木河流域整体的风化强度, 本文对比分析了格尔木河流域上游昆仑河和西大滩的元素含量, 其元素含量都以 SiO_2 、 Al_2O_3 最多, 成盐物质 (Na_2O 、 K_2O) 含量次之, 其它元素含量不足 3%。综上, 格尔木河上游流域中成盐元素的风化迁移应该是下游察尔汗盐湖的潜在物源之一。

表1 格尔木河流域不同河段常量元素含量

Table 1 Content of major elements in different reaches of Golmud River Basin

河段		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	CIA 指数
NCT	最大值	68.26	11.28	2.52	1.60	2.67	11.91	2.83	3.23	0.07	0.14	0.55	53.78
	最小值	58.93	9.13	0.93	1.00	1.24	5.09	1.98	1.90	0.04	0.08	0.27	46.55
	平均值	63.99	10.50	1.66	1.18	1.91	7.31	2.40	2.46	0.06	0.11	0.40	49.68
XGG	最大值	75.07	11.93	2.80	1.28	2.83	10.14	3.85	3.60	0.08	0.14	0.56	50.98
	最小值	52.10	8.73	0.74	0.90	0.54	2.18	1.99	1.46	0.04	0.05	0.19	40.69
	平均值	66.10	10.40	1.56	1.10	1.48	6.35	2.57	2.41	0.06	0.10	0.40	48.38
昆仑河 ^[10]	平均值	71.01	13.86	0.73	1.68	0.89	2.53	3.21	3.16	0.07	0.14	0.29	54.25
西大滩 ^[10]	平均值	69.56	13.90	1.24	2.20	1.15	2.73	2.65	3.16	0.06	0.06	0.38	54.13
UCC ^[18]	平均值	66.00	15.20	5.00	4.50	2.20	4.20	3.90	3.40	0.08	0.16	0.50	47.92

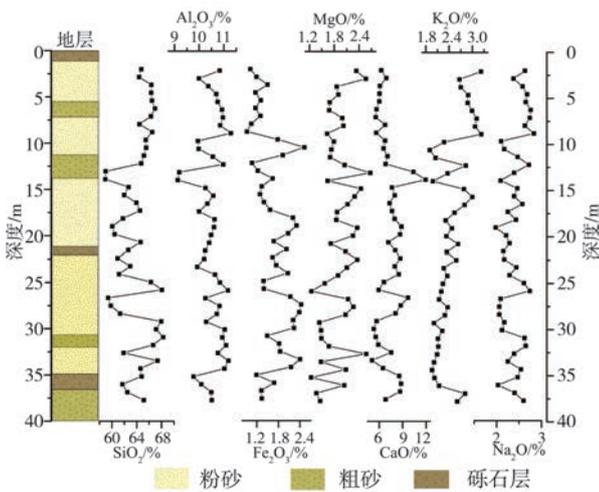


图3 NCT剖面常量元素曲线图

Fig. 3 Curve of NCT profile constant elements

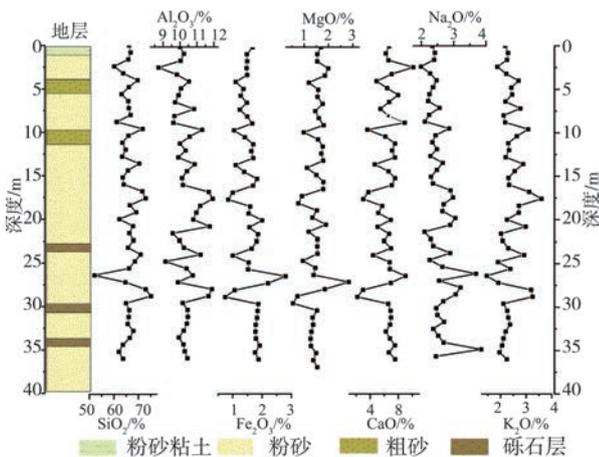


图4 XGG剖面常量元素曲线图

Fig. 4 Curve of XGG profile constant elements

文对 NCT、XGG 剖面以及格尔木河流域上游昆仑河、西大滩的常量元素含量进行了 UCC 标准化处理,并与柴达木盆地中的各类沉积物做了对比分析^[18]。从图 5 中可以看出,NCT 和 XGG 剖面的元素迁移富集规律相同, SiO₂ 元素组成与上地壳平均化学组成(UCC)相似, Al₂O₃、MgO、Na₂O、K₂O、MnO、P₂O₅、TiO₂ 位于 UCC 的下方,表现出明显的亏损状态,而 CaO 位于 UCC 曲线上方,明显富集,且与柴达木盆地中的各类沉积物元素富亏特征具有相似之处,说明上述两剖面的碎屑物质具有明显的混合源,且与盆地中的物质基本一致,进一步揭示了格尔木河谷中自上游至下游的各串珠状次级盆地是下游柴达木盆地物质的“中转站”,流域河谷内物质搬运具有反复性、跳跃性^[3],并出现常量元素向下游逐渐富集的趋势。而西大滩和昆仑河剖面的元素富集亏损规律相近且与流域中下游的元素特征表现出较大差异:除 SiO₂ 元素组成与上地壳平均化学组成(UCC)相似外,其余元素均呈亏损状态。这说明,在格尔木

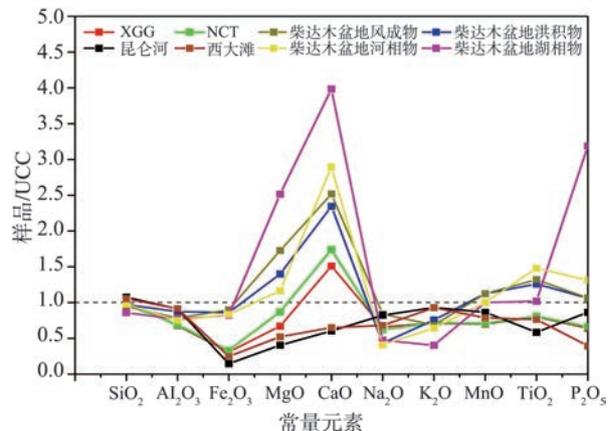


图5 格尔木河流域常量元素的UCC标准化

Fig. 5 UCC standardization of major elements in Golmud River Basin

4 讨论

4.1 格尔木河流域常量元素风化迁移规律

为了理清格尔木河流域常量矿物分布特征,本

河流域上游的山麓地带强降水以及较大的湿度加剧了流域上游的风化程度,使得上游盆地内的常量元素出现明显的亏损。

4.2 格尔木河流域化学风化强度

4.2.1 A-CN-K 三角模型分析

格尔木河流域上游元素的风化过程对下游矿物含量的富集程度有重要影响,因此研究 NCT 和 XGG 的物质沉积过程以及元素迁移路径对认识格尔木河流域整体的风化过程具有重要意义。A-CN-K(即 Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O)三角模型图由 Nesbitt 提出,反映化学风化趋势以及预测未来化学风化趋势^[19]。图 6 显示,NCT 和 XGG 常量元素比值集中分布于斜

长石-钾长石连线两侧,分布较为密集。从总趋势上来看基本平行于 A-CN 连线,说明剖面中的斜长石最先风化,Ca、Na 流失,风化产物主要是伊利石、蒙脱石以及高岭石。整个流域的 Ca、Na 丢失率从中游小干沟至上游的昆仑河、西大滩区段逐渐增大,而钾长石相对稳定。由于硅酸盐风化首先表现为脱钙脱钠和脱钾^[20],因此这种现象说明整个流域内上游山麓地带碎屑物质的风化程度比中游较为干旱的各次级盆地中要高。另一方面,昆仑河和西大滩的数据点有逐渐转向 A-K 连线的趋势,表明其上游碎屑物中脱钙脱钠过程接近尾声,逐步转向含钾矿物,如黑云母、伊利石和钾长石等矿物的进一步风化。

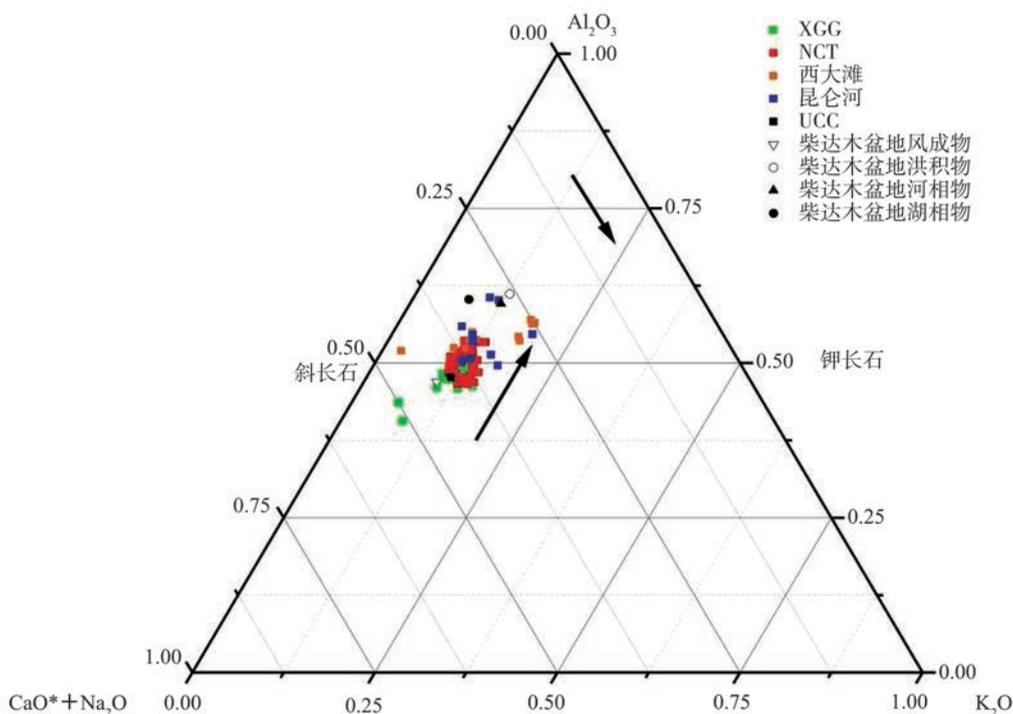


图6 格尔木河流域 A-CN-K 化学风化趋势图(箭头指示风化趋势)

Fig. 6 A-CN-K Chemical weathering trends in Golmud River Basin (arrows indicate weathering trends)

4.2.2 化学蚀变指数(CIA)分析

化学蚀变指数(CIA)作为一个判断化学风化程度的地化指标被广泛应用^[21],其CIA计算公式如下:

$$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + MgO + Na_2O)$$

式中元素均为氧化物分子摩尔数,其中 CaO^* 为硅酸盐矿物中的摩尔含量,不包括碳酸盐和磷酸盐中的 CaO 含量。由于硅酸盐中的 CaO 与 Na_2O 通常以 1:1 的比例存在,所以 S.M. McLennan 认为当 CaO 的摩尔数大于 Na_2O 时,可认为 $mCaO^* = mNa_2O$,而

小于 Na_2O 时则 $mCaO^* = mCaO^{[22]}$ 。本文中所有 $mCaO^*$ 值的计算即据此方法获得。NCT 剖面的 CIA 值介于 46.55 ~ 53.78 之间,平均值为 49.68,低于柴达木盆地中湖相沉积物,表明此剖面风化程度较弱(表 1);而 XGG 剖面 CIA 平均值为 48.38,和 NCT 剖面沉积物比较接近,说明中游各次级盆地中的风化程度较为一致。对比上游昆仑河、西大滩的 CIA 值,发现格尔木河流域的风化程度从中下游至上游逐渐升高。由于上游山区虽然气温较低,但冰川融水较多,降水较

丰沛,水岩反应充足,相对于中下游干旱的河谷,其化学风化程度较强,从而造成了盆山系统中上下游风化程度的差异性。

4.3 格尔木河流域物质搬运过程

在风化过程中,元素K和Na具有不同的地表环境性质,K一般赋存于钾长石、伊利石和云母等矿物中,而Na一般赋存于易于风化的斜长石中,从而上述元素在地表环境的化学风化过程会发生分异,造成沉积物中元素的淋溶或堆积,而常量元素的比值可以较好的避免外界环境因子的影响^[23],因此 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 之比可作为衡量沉积物中斜长石风化程度的指标,并反映沉积物在表生环境中粘化的程度^[17]。在本文中,将CIA- $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 做了散点图分析,从图7可以看出,XGG、NCT剖面至昆仑河和西大滩河段,其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值随CIA值的增大而减小,呈负相关性,这与前人的研究一致^[24-25],说明昆仑河和西大滩剖面沉积物风化程度较高,较为活泼的Na元素淋溶流失,而K元素富集,造成 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 减小;而NCT和XGG剖面由于风化程度较低,造成大量的Na、K元素堆积在此地,从而 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 增大,并且上述两剖面常量元素比值的散点图具有重合性,说明NCT、XGG剖面的物质来源具有相似性,其物质搬运过程具有继承性和传递性。

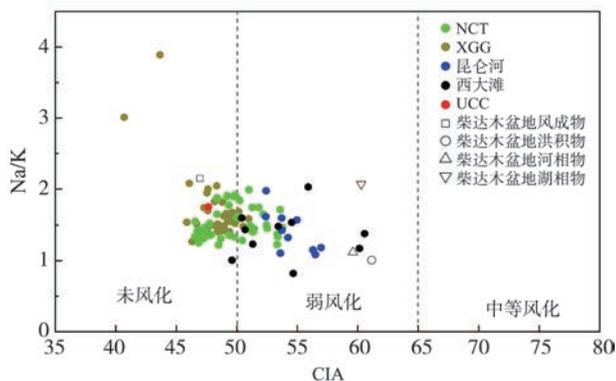


图7 格尔木河流域CIA-Na/K散点图

Fig. 7 CIA-Na/K scatter plot of Golmud River Basin

Rb、Sr元素在表生环境下具有不同的地球化学性质,Rb通常存在于含有钾长石和云母等的矿物中,Sr常赋存于方解石、斜长石、钾长石、云母等矿物中,大多以离子形式随土壤溶液迁移,导致地层中Sr元素的缺失,因此Rb/Sr可作为气候待用指标反映流域古气候^[26];这两剖面的Rb/Sr比值数据可以得到

验证:同为三岔河组的沉积地层,在纳赤台次级盆地中其Rb/Sr数据与100 ka以来印度季风区的干湿变化具有很好的正相关,表现出明显的“源区”特点;而在小干沟剖面中,两者则呈显著负相关,表现出“汇区”特征(源区沉积物的Rb/Sr与风化强度呈正相关,而汇区则呈反相关,详见An et al, 2018b)^[27],说明流域内上下游不同次级盆地中相同地层的沉积物具有明显的“源—汇”变换特征,其物质流动具有多期跳跃搬运,多期旋回的特点。

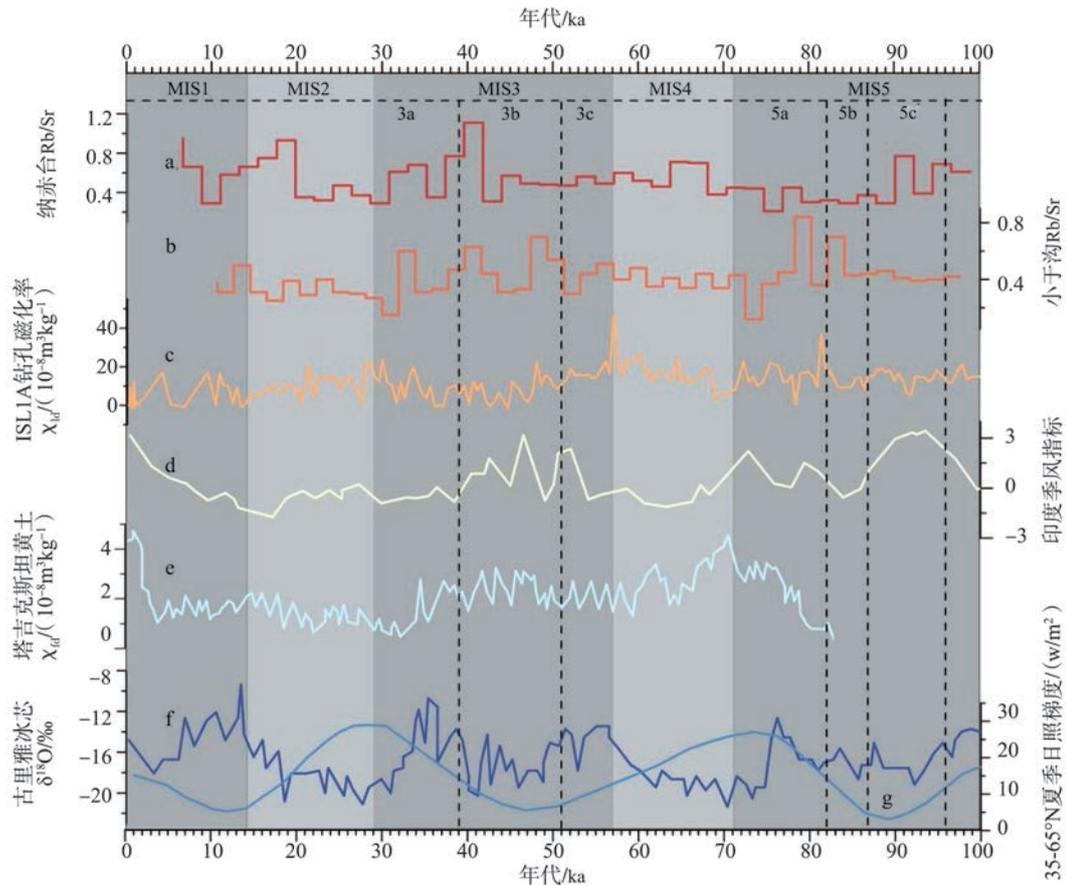
4.4 格尔木河流域化学风化的驱动机制

我们结合上述构建的年代框架和古里雅冰芯氧同位素揭示的氧同位素5阶段以来(MIS 5)的气候记录^[28],将NCT和XGG的Rb/Sr与中亚干旱区黄土^[29]、印度季风集成记录以及中纬度的日照梯度^[30]对比分析,发现自晚更新世以来,格尔木河流域内的风化程度主要受区域的气候过程所控制。

在末次间冰期期间(MIS 5),NCT和XGG的Rb/Sr与印度季风指数较为一致,都表现为高值,说明此阶段矿物的风化受东亚季风、印度季风的共同驱动,且夏季日照梯度减弱,西风带北移,风力减弱,东亚夏季风增强,随之印度季风北上,因此在气候湿润阶段,亚洲季风控制了区域的风化强度。因此,利用两个剖面的地球化学指标,可重建晚更新以来东昆仑山地区的风化强度和气候演化的耦合过程:在MIS 5a-c (71~96 ka)阶段,季风指标表明亚洲季风增强,察尔汗钻孔磁化率表明区域内的风化加强,而作为“源”的NCT剖面Rb/Sr指标与季风指标呈正相关,而作为“汇”的XGG剖面Rb/Sr正好呈负相关,说明格尔木河流域内的风化强度和亚洲季风的加强密切相关;MIS 4(57~71 ka)阶段,中亚黄土指示的西风明显增强,日照梯度下降,同时印度季风减弱,相对增强的流域Rb/Sr和磁化率说明在该阶段区域的风化强度更大程度上受西风控制,亚洲季风次之;MIS 3(29~57 ka)阶段,前期(MIS 3c)印度季风为代表的亚洲季风增强,磁化率为代表的区域风化加强,但两剖面的Rb/Sr指标则响应不灵敏,可能跟局部小气候和近源物源的加入有关。中期(MIS 3b)流域内的风化强度增强跟西风指标呈正相关,而与亚洲季风呈负相关,说明在干冷时期,西风成为区域风化的主导因素。在后期(MIS 3a)亚洲季风轻微增强,西风大幅减弱,区域风化强度的主要环流完成转换;MIS 2

(14 ~ 29 ka)阶段,NCT、XGG 的 Rb/Sr 指标的变化波动与西风的变化趋势更加接近,说明在末次冰期西风成为区域大气环流的主导;在 MIS 1(<14 ka)亚洲季风的增强,开始重新主导区域的风化强度。另外,在 NCT 剖面 Rb/Sr 较好地响应了新仙女木事件(YD),该时期表现出了极低的区域风化强度(图 8a)。综上所述,自晚更新世以来,格尔木河流域在气候暖湿

时,季风主导了区域的风化程度,大量的元素淋溶迁移至下游区域,成盐离子输送到察尔汗盐湖中,成为其主要的成盐物质来源;气候干冷时,西风成为区域风化强度变化的主导因素,风化强度相对较低。另外,格尔木河流域上游冰川的活动也增强了流域内部的物理风化过程,成为区域风化强度变化的重要因素。



a-b. NCT、XGG 剖面 Rb/Sr 指标;c. 察尔汗盐湖 ISL1A 钻孔磁化率;d. 印度季风堆叠记录^[30];e. 塔吉克斯坦黄土频率磁化率^[29];f. 古里雅冰芯氧同位素^[28];g. 35-65°N 夏季日照梯度^[30]
 a-b. Rb/Sr indices of NCT and XGG profiles; c. Magnetic susceptibility grain size curves of ISL1A core from Qarhan Salt Lake; d. Indian monsoon stacking record^[28]; e. Frequency magnetic susceptibility of Tajikistan loess^[27]; f. Oxygen isotope of Guliyu ice core^[26]; g. summer insolation gradient between 65°N and 35°N^[28]

图8 格尔木河流域气候指标对比图

Fig. 8 Comparison of climatic indicators in Golmud River Basin

5 结论

1) 格尔木河流域中游 NCT 和 XGG 两剖面主要形成于末次间冰期至早中全新世之间。其沉积物主要剖面的沉积物元素以 SiO₂、Al₂O₃、CaO 为主,其次为 Na₂O、K₂O 和 Mg₂O,而 Fe₂O₃、FeO、MnO、P₂O₅、TiO₂ 的平均含量较少。主要成盐矿物较上游西大滩、昆仑河小流域次级盆地中高,表现出较为明显的

富集状态。

2) 两剖面的 CIA 指数、UCC 标准化数据、A-CN-K 三角图模型和 CIA-Na₂O/K₂O 散点图分析等结果表明,格尔木河流域上游湿冷山前地带河谷沉积物的风化程度明显高于中游干热河谷,表明上游冰川融水和较充沛的降水下渗造成的较充分的水岩反应过程是主导流域风化的主要因素。同时,元素分析和 Rb/Sr 比值等指标显示,格尔木河流域上游至中

游的各个次级盆地间物质输送表现出跳跃性、传递性和继承性,具有周期性搬运-沉积特征。

3) 自晚更新世以来,格尔木河流域内的风化过程与冰期-间冰期的气候旋回和季风-西风相互转换密切相关:在湿润的气候阶段(MIS 5、MIS 3a, c 和 MIS 1),流域内的风化强度主要受亚洲季风控制,风化类型主要以化学风化为主;而在干旱的气候阶段(MIS 5 和 MIS 3b),则受西风带大气环流所控制,流域风化可能以上游山区的物理风化为主。

4) 格尔木河流域内上游湿冷山前沉积物的风化以及中游各次级干热盆地中河谷沉积的矿物元素继承、转移和再风化过程成为流域内物质流动的主要形式,通过这种形式,上游昆仑主脊山区为察尔汗盐湖提供了充足的碎屑和盐类物质来源。

致谢:感谢鄂崇毅教授团队在论文写作过程中给予的帮助,以及感谢高靖易、俞红军和周学伟在野外采样工作中予以协助。感谢匿名审稿专家和编辑提出的宝贵意见和建议。

参考文献:

- [1] 于升松,谭红兵,刘兴起,等. 察尔汗盐湖资源可持续利用研究[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [2] 朱允铸,李争艳,吴必豪,等. 从新构造运动看察尔汗盐湖的形成[J]. 地质学报, 1990(1): 13-21.
- [3] Owen L A, Finkel R C, Ma H, *et al.* Late Quaternary landscape evolution in the Kunlun Mountains and Qaidam Basin, Northern Tibet: A framework for examining the links between glaciation, lake level changes and alluvial fan formation[J]. *Quaternary International*, 2006, 154-155.
- [4] Yu L P, Lai Z P, An P. OSL Chronology of paleo-dunes in the middle and southwestern Qaidam Basin, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 453-462.
- [5] An F Y, Liu X J, Wang Y X, *et al.* Drainage geomorphic evolution since 12.8 ka in response to the paleoclimatic changes in eastern Kunlun Mountain, NE Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 2018a, 319: 117-132.
- [6] 赵希涛,胡道功,吴中海,等. 青海格尔木早更新世昆仑河砾岩的发现及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2010, 16(1): 1-10.
- [7] An F Y, Ba D Q Y, Li S L, *et al.* Glacier-Induced Alluvial Fan Development on the Northeast Tibetan Plateau Since the Late Pleistocene [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 1-14.
- [8] 唐启亮,张西营,苗卫良,等. 格尔木河流域河水钾硼锂元素分布特征及富集规律[J]. 盐湖研究, 2016, 24(2): 26-31.
- [9] 谭红兵,于升松. 格尔木河流域水环境地球化学研究[J]. 盐湖研究, 2001(2): 66-67.
- [10] 安福元,张西营,程夏丽,等. 格尔木河流域富钾花岗岩中成盐元素风化迁移的时空演变[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(1): 14-26.
- [11] Chen Y, Li Y, Zhang Y, *et al.* Late Quaternary Deposition and Incision Sequences of the Golmud River and Their Environmental Implications[J]. *Quat. Int.* 2011, 236, 48-56.
- [12] 祁生胜. 青海省东昆仑造山带火成岩岩石构造组合与构造演化[D]. 中国地质大学(北京), 2015.
- [13] 陈艺鑫,张梅,李川川,等. 末次冰盛期后格尔木河下切的时空变化及其构造意义[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1540-1550.
- [14] 汪生斌,祁泽学,王万平,等. 格尔木河水化学特征及成因[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 93-98.
- [15] 王岸,王国灿,向树元. 东昆仑山东段北坡河流阶地发育及其与构造隆升的关系[J]. 地球科学, 2003(6): 675-679.
- [16] Miao W L, Fan Q S, Wei H C, *et al.* Clay mineralogical and geochemical constraints on late Pleistocene weathering processes of the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 127: 267-280.
- [17] An F Y, Chen T Y, Li X Z, *et al.* Formation, mechanism and significance of alluvial-dammed lakes in Golmud River cathment, NE Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 高彦军,吴宏伟,曲永新. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比—以香港九龙地区为例[J]. 地质科学, 2001(3): 279-294.
- [21] 李拓宁,莫多闻,朱高儒,等. 晋南全新世黄土剖面常量元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1411-1420.
- [22] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101: 295-303.
- [23] 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.
- [24] 牛晓露,庞奖励,黄春长,等. 陕西周原地区全新世黄土—古土壤序列风化程度研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 306-312.
- [25] 梁敏豪. 青藏高原东北部黄土的元素地球化学特征及其环境意义[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
- [26] 陈骏,汪永进,陈咏,等. 中国黄土地层Rb和Sr地球化学特征及其古季风气候意义[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 259-266.
- [27] An F Y, Lai Z P, Liu X J, *et al.* Abnormal Rb/Sr ratio in lacustrine sediments of Qaidam Basin, NE Qinghai-Tibetan Plateau: A significant role of aeolian dust input [J]. *Quaternary International*, 2018b, 469: 44-57.

- [28] 姚檀栋, THOMPSON L G, 施雅凤, 等. 古里雅冰芯中末次冰期以来气候变化记录研究[J]. 中国科学: D 辑, 1997, 27: 447-452.
- [29] Wang Y J, Jia J, Liu H, *et al.* The magnetic susceptibility recorded millennial-scale variability in Central Asia during Last Glacial and Interglacial [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(3): 1781-1788.
- [30] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1).

Spatiotemporal Variations of Elements in Hydrogenic Sediments, Watershed Weathering and its Driving Mechanism in the upper Golmud River

CHENG Xiali^{1,2}, AN Fuyuan^{1,2,3*}, LI Shanlu⁴, SI Lu^{1,2}, XU Yifan^{1,2},
ZHANG Qingchun^{1,2}, CHAI Luqi^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining, 810008, China*; 2. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining, 810008, China*; 3. *Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining, 810008, China*; 4. *Qinghai Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Qinghai Geotechnical Engineering Survey Institute Co. Ltd., Xining, 810008, China*)

Abstract: The weathering and migration of elements in the sediments in the middle and upper reaches of Golmud River catchment is of great significance to the replenishment of salt resources in Qarhan Salt Lake. In this paper, the formation ages of Nachitai (NCT) and Xiaogangou (XGG) profiles in the Golmud River catchment and the variation of some major and trace elements were studied, and the element characteristics of different sediment types in the upper and lower reaches of the catchment were compared and analyzed, and the conclusions are as follows: (1) Since the last Interglacial period, the major elements in the sediments of the middle Golmud River valley are higher than those in the upper Xidatan and Kunlun River sub-basins, showing an obvious enrichment state. (2) The degree of weathering of the sediments in the wet and cold foothills in the upper reaches of the catchment is significantly higher than that in the hot and dry valleys of the middle reaches, indicating that the meltwater of glaciers, abundant precipitation and strong water-rock reaction process in the upper reaches are the main factors influencing the weathering of the catchment, and the material transport among the sub-basins of the basin has the characteristics of jumping, transferring and inheriting. (3) The weathering process in the catchment is closely related to the glacial-interglacial climatic cycles and monsoon-westerly interactions since the late Pleistocene, that is, the warm and wet stages is mainly controlled by monsoon, and chemical weathering. The dry and cold stage is subject to westerly control, and physical weathering dominates. In conclusion, the weathering and migration of elements in the foothills of the upper reaches of Golmud River catchment, and the inheritance and transfer of elements in the sediments of the middle reaches of Golmud River catchment are the main forms of material flow in the drainage basin.

Key words: Golmud River catchment; Element migration; Chemical weathering; Monsoon westerly transformation