

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.006

拉萨河沉积物矿物与元素特征及其对物源和风化的指示

茅昌平¹, 张禾雨鹭¹, 宋政锦¹, 龙睿灵², 栗天宁¹, 饶文波¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究拉萨河沉积物来源与剥蚀过程, 对拉萨河干流及支流堆龙曲和乌鲁龙曲沉积物粒度、矿物和地球化学特征进行了系统分析。结果表明: 拉萨河沉积物平均粒径较粗(砂、粉砂的平均质量分数分别为 65.45%、23.64%) 且分选性整体较差, 偏度大多为正偏, 峰度宽, 具有明显的河砂沉积特点; 拉萨河沉积物矿物组成以石英(38.4%)、钾长石(27.11%)和斜长石(23.64%)为主, 其次是黏土矿物, 碳酸盐矿物含量较低; 黏土矿物中伊利石质量分数高达 83.4%, 绿泥石质量分数略高于高岭石, 蒙脱石质量分数极低; 伊利石化学指数均小于 0.4, 表明以富铁镁伊利石为主; 沉积物化学风化指数较低, 暗示了沉积物处于弱-中等化学风化状态并以物理风化为主; 拉萨河沉积物的化学风化程度不仅受到干燥寒冷气候的控制, 而且还受到大面积出露花岗岩快速剥蚀的影响。

关键词: 拉萨河; 沉积物; 矿物; 常量元素; 风化

中图分类号: P512; P59 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0047-11

Mineralogical and element characteristics of sediments in the Lhasa River and implications for provenance and weathering

MAO Changping¹, ZHANG Heyulu¹, SONG Zhengjin¹, LONG Ruiling², LI Tianning¹, RAO Wenbo¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the sources and erosion process of sediments in the Lhasa River, a systematic analysis was conducted on the grain size, minerals, and geochemical characteristics of the sediments in the main stream of the Lhasa River, as well as its tributaries, Duilongqu River and the Wululongqu River. The results show that: the average particle size of sediments in the Lhasa River is coarser (65.45% sand and 23.64% silt), and the sorting is overall poor; the skewness is mostly positive, and the kurtosis is wide, which reflects the obvious characteristics of river sand sediment. The mineral composition of the Lhasa River sediments is dominated by quartz (38.4%), K-feldspar (27.11%), and plagioclase feldspar (23.64%), followed by clay minerals, and the content of carbonate minerals is relatively low. The illite content in the clay minerals is as high as 83.4%, and the chlorite content is slightly higher than the kaolinite content. Montmorillonite content is very low. The chemical index of illite is less than 0.4, indicating that illite is mainly rich in iron and magnesium. The value of the chemical weathering index (CIA) of the sediments is low, implying that the sediments are in a state of weak and moderate chemical weathering and are dominated by physical weathering. Additionally, the chemical weathering of the sediments in the Lhasa River is not only controlled by the dry and cold climate but also affected by the rapid erosion of extensively exposed granite.

Key words: the Lhasa River; sediment; mineral; major element; weathering

青藏高原作为世界上最高、最广阔的高原以及亚洲重要水系的发源地, 其隆升发展过程对亚洲大气和海洋环流、季风的形成乃至全球的气候变化都具有重要的影响^[1]。高原风化剥蚀的产物通过河流搬运汇入海中, 显著改变了亚洲边缘海的沉积体系以及全球海洋化学的通量^[2-3]。正因如此, 国内外学者对发源于青

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2022QZKK0202)

作者简介: 茅昌平(1981—), 男, 研究员, 博士, 主要从事地质环境及水文地球化学研究。E-mail: maochangping@hhu.edu.cn

引用本文: 茅昌平, 张禾雨鹭, 宋政锦, 等. 拉萨河沉积物矿物与元素特征及其对物源和风化的指示[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 47-57.

MAO Changping, ZHANG Heyulu, SONG Zhengjin, et al. Mineralogical and element characteristics of sediments in the Lhasa River and implications for provenance and weathering[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 47-57.

高原的主要河流开展了大量研究^[4-6]。雅鲁藏布江是青藏高原南部的重要河流,流域面积高达 61 万 km²,几乎覆盖了整个高原南部,其所处的喜马拉雅造山带是青藏高原构造与气候相互作用最为强烈的地区,也是地貌演化最为迅速的区域,现今已成为研究气候构造相互作用的良好野外试验场^[7]。雅鲁藏布江及其支流的风化、剥蚀与气候、构造之间关系的研究也因此引起了广泛的关注^[8-11]。

近年来,随着青藏高原上小流域的研究逐年深入,很多学者发现雅鲁藏布江一些小流域存在不同于下游或其干流的独特性;Li 等^[12]发现雅鲁藏布江源头处的稀土分布模式与下游有巨大的差别,认为这反映了当地小流域独特的水文与地质条件;Zhang 等^[13]对雅鲁藏布江中游的研究发现,基岩类型是造成易贡藏布至帕隆藏布河段 CIA 值与 Rb/Sr 值相关性低于其他河段的主要原因,且其沉积物多为近源、未经充分混合;Hasan 等^[14]通过对孟加拉国布拉马普特拉河沉积物单矿物特征的研究显示,其沉积物主要来源于喜马拉雅东部区域的河流。近几十年来青藏高原及雅鲁藏布江流域的气候和下垫面等条件均发生了明显变化^[15-16],因此青藏高原地区小流域化学风化的影响因素与模式是否有相应的改变有待进一步探究^[14]。

拉萨河是雅鲁藏布江流域面积最大的支流,流经西藏最大的城市——拉萨市,受到人类活动的影响比其他支流更强烈,而且其流域地质状况复杂。以往对拉萨河的研究多集中在水化学特征、水污染等方面^[17-20],鲜有对拉萨河沉积物矿物组成和岩石化学特征等方面的探讨,而且缺乏对流域内沉积物来源与风化剥蚀过程及其影响因素的研究。因此,本文以拉萨河为研究对象,系统地开展拉萨河及其两条支流(堆龙曲、乌鲁龙曲)沉积物粒度、矿物及地球化学的研究,结合前人相关研究探讨河流沉积物源汇过程及其控制因素,以期为进一步深入研究青藏高原的环境气候效应提供参考。

1 研究区概况

拉萨河(29° 20' N ~ 31° 15' N, 90° 05' E ~ 93° 45' E)位于西藏自治区雅鲁藏布江流域中游左岸,发源于念青唐古拉山脉,在大地构造上属于拉萨地体,河流全长 568 km(图 1(a))。多年平均年径流量为 109.72 亿 m³,属于融雪和降雨型河流,径流量的大小主要受降水量的控制,蒸发量大^[21]。流域内平均海拔在 3 600 m 以上,地势总体东北高、西南低。高原气候特征明显,寒冷干燥、日温差大、年温差小。拉萨河源区及上游区域海拔较高、地势平坦,分布有高原草甸,以畜牧业为主,人口较少。在海拔 4 000 m 左右的拉萨河中游开始出现灌木,并沿河谷地带分布,但两侧山体的植被仍以草地为主。下游地区河谷开阔平坦,是人口和耕地集中分布的区域,主要发展农业,也是工商业活动的主要区域^[17]。

流域内地层分布与断裂带走向一致,包括自

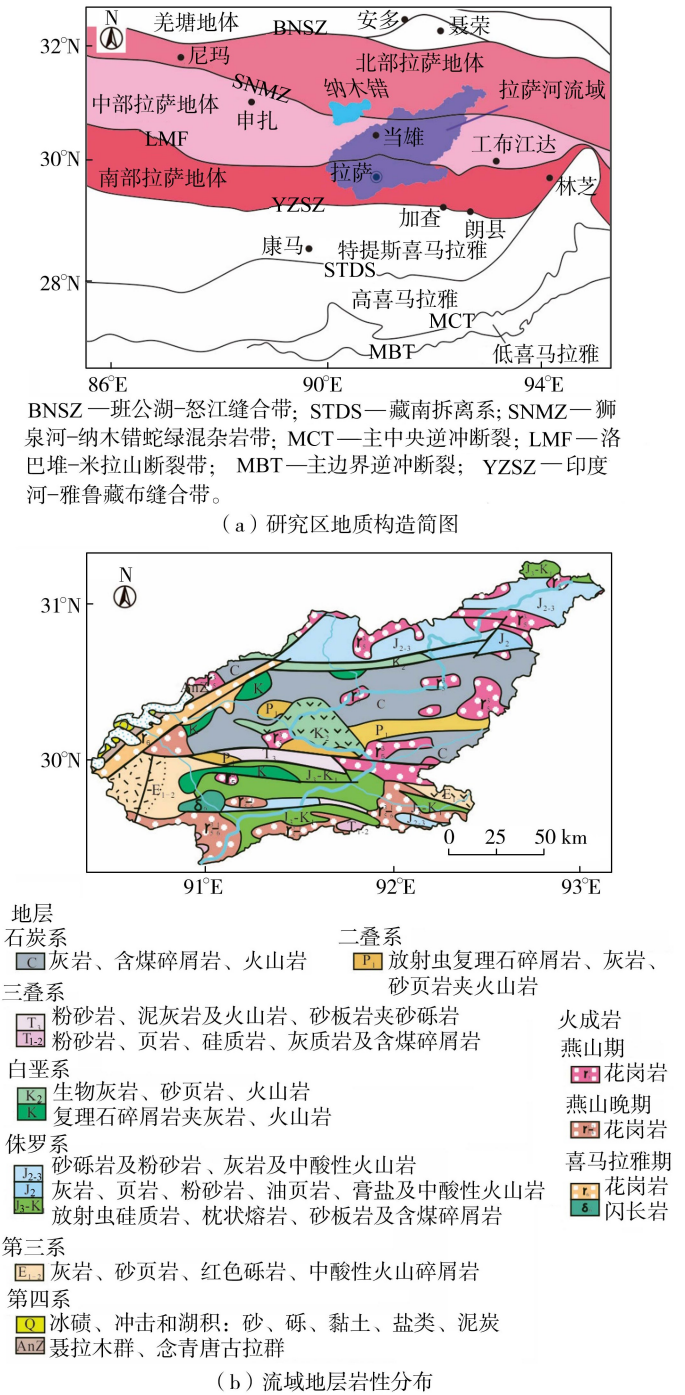


图 1 拉萨河流域地质图

Fig. 1 Geological map of the Lhasa River Basin

石炭系到第四系的所有地层,旁多以上河段以侏罗系和石炭系为主,旁多以下河段则以白垩系为主(图 1(b))。地层厚度大多超过 3 000 m,各地层地质发育史、沉积、变质作用和岩浆活动差异很大。岩相变化复杂,灰岩、砂页岩存在于大多数地层中,中酸性火山岩碎屑在中下游各地层中普遍存在。酸性-中酸性岩类广泛出露,分布面积较大,主要为燕山期和燕山晚期花岗岩。

2 材料与方法

2.1 样品采集

本研究在拉萨河干流和西部两条支流堆龙曲与乌鲁龙曲共设置了 19 处采样点(图 2),其中干流中游 5 处,下游 8 处。拉萨河支流 6 处采样点包括乌鲁龙曲 2 处(L11 和 L12)和堆龙曲 4 处(L4、L8、L9、L10)。采集表层沉积物样品后混合均匀,装入经过超纯水清洗的聚乙烯自封袋中,做好记录。

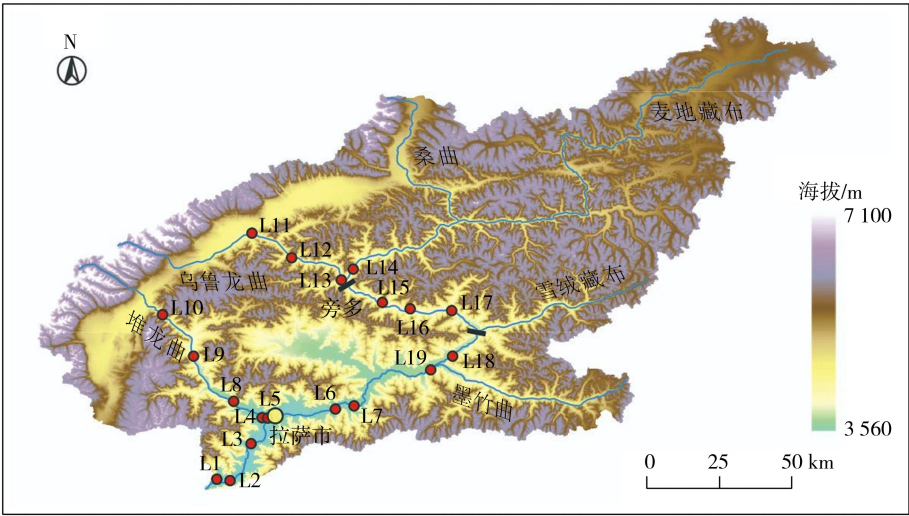


图 2 拉萨河流域采样点分布
Fig. 2 Distribution of sampling sites in the Lhasa River Basin

2.2 粒度分析

河流沉积物粒度在海南省地质测试研究中心激光粒度分析仪上测试,仪器型号为 BT2003(3398)。根据粒度数据,统计黏土(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)、砂(>63~2 000 μm)、砾石(>2 000 μm)不同粒径颗粒的质量分数,并根据 Folk 等^[22]提出的计算方法计算平均粒径(以 Φ 作为单位,Φ = -log₂D, D 为颗粒直径)、分选系数、偏态系数和峰态系数。

2.3 矿物分析

常见矿物在南京大学现代分析中心采用 X 射线衍射仪分析测试,仪器型号为 ARL X'TRA(赛默飞世尔,美国)。原样研磨至 63 μm 以下,仪器测试条件为 Cu 靶,电压 40 kV,电流 40 mA,步宽 0.02°2θ,扫描范围为 3°~65°2θ。

黏土矿物分析步骤如下:将样品提取出的黏土矿物放入烧杯,加入少量去离子水制成悬浮液后用移液枪滴在载玻片上,制成定向片。依次分别制作自然风干定向片,在 60℃ 乙二醇蒸汽中静置 12 h 后制成乙二醇饱和定向片,在 550℃ 的条件下加热 2 h 后制成加热定向片(Heat 550℃)和用 3mol/L 的盐酸加热到 80℃ 浸泡 2 h 制成盐酸定向片(HCl)。然后将定向片进行上机测试,测试条件为 Cu 靶,电压 40 kV,电流 40 mA,样品扫描范围为 3°~36°2θ,步宽为 0.02°2θ。黏土矿物的半定量计算主要依据乙二醇处理下获得的 X 射线衍射峰的面积分别乘以 Biscaye^[23]给出的权重系数。

2.4 常量元素分析

样品先用 0.5 mol/L 醋酸浸泡 24 h,除去碳酸盐矿物,然后利用 X 射线荧光光谱仪测定沉积物中常量元素含量,测试步骤如下:称取经过前处理的样品 0.6 g,加入熔融剂($m(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) : m(\text{LiBO}_2) = 67 : 33$) 6.6000 g,在坩埚内混合均匀后移至铂金坩埚,加入 LiBr 助熔剂(120 mg/ml),在熔炉上熔融制成玻片后使用 X 射线荧光光谱仪测量。主要元素含量用氧化物含量表示,作为仪器测量的输出结果。Si 和 Al 的绝对误差

分别为±0.5%和±0.2%,其他常量元素的相对误差小于10%。

3 结果与分析

3.1 粒度组成

由表1可知,砂的平均质量分数最高,达到65.45%,主要分布在拉萨河支流乌鲁龙曲、堆龙曲及拉萨河上游;其次是粉砂和砾,平均质量分数分别为23.64%和7.00%。黏土含量最低,仅有3.91%。平均粒径、分选系数、偏态系数、峰态系数是衡量沉积物平均粒径大小、均匀程度和集中程度的指标^[24],研究区沉积物平均粒径主要在(-1.17~5.29) ϕ 之间,以砂和粉砂为主(表1,图3)。个别采样点(L13、L12、L18)含有砾石,L18砾石含量最高,河口附近粒径小。分选系数为0.50~2.99,分选性为一般或差,特别是在几条支流汇入干流处附近,分选性最差的为旁多水库(L13)处所采样品。位于乌鲁龙曲上游(L11)的沉积物含砂量最高且粉砂含量最低,分选性相对较好。偏态系数主要在-0.11~0.60之间,大部分表现为正偏和极正偏,表明大部分沉积物为细颗粒。峰态系数为0.80~3.70,平均值为1.35。流域内峰态系数分布杂乱,河口附近峰度为宽或中等,其余河段峰度为中等或窄(图3)。

表 1 拉萨河沉积物粒度统计

Table 1 A statistical summary of sediment particle sizes in the Lhasa River

统计值	质量分数/%				平均粒径/ ϕ	分选系数	偏态系数	峰态系数
	砾石	砂	粉砂	黏土				
最大值	81.51	99.62	59.91	10.97	5.29	2.99	0.60	3.70
均值	7.00	65.45	23.64	3.91	2.84	1.64	0.27	1.35
最小值	0.00	17.79	0.00	0.00	-1.17	0.50	-0.11	0.80

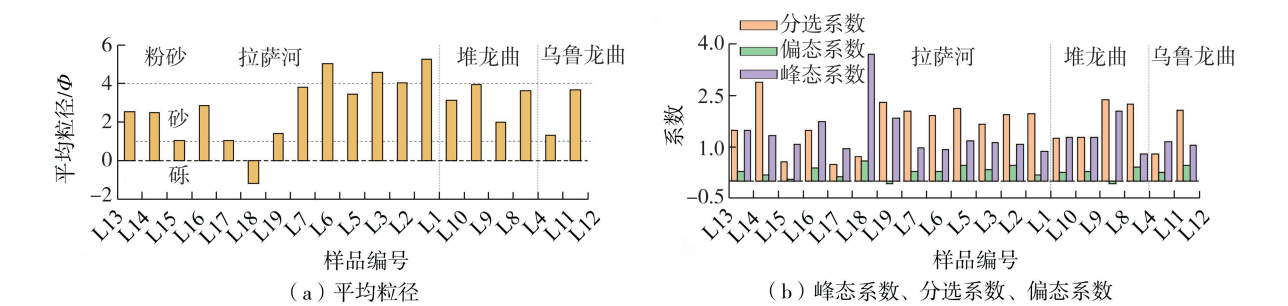


图 3 拉萨河沉积物粒径参数变化趋势

Fig. 3 Variation of sediment particle size parameters in the Lhasa River

3.2 矿物组成

3.2.1 常见矿物

石英和长石是拉萨河沉积物中最主要的矿物,黏土矿物和碳酸盐矿物含量较低(图4)。石英平均质量分数高达38.4%,是拉萨河沉积物含量最高的矿物,其中L18的石英含量最高,达到53%。从直孔(L17)至堆龙曲汇入口之间的河段石英含量有逐渐减少的趋势,流经L3附近时回升至52%,可能受到了周围大面积出露花岗岩的影响。此外,长石含量也很高,其中斜长石平均值为23.64%,在雅鲁藏布江汇入口(L1)处分

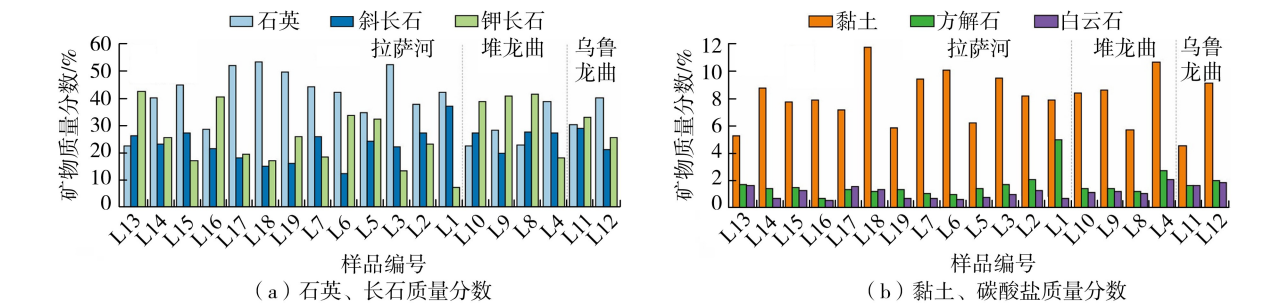


图 4 拉萨河沉积物矿物质量分数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of sediment mineral content in the Lhasa River

布最多,质量分数高达 37%。钾长石平均质量分数 27. 11%,最高值为 42%,出现在 L13(旁多水库)附近。旁多水库(L13)附近的长石质量分数高达 68%,其中钾长石达到 42%,为最高值;样品中斜长石质量分数最高值出现在雅鲁藏布江汇入入口附近(L1),为 37%。自直孔(L17)以下至堆龙德庆段(L6),长石含量有所增加,可能与雪绒藏布沉积物的汇入有关。拉萨河流域碳酸岩矿物含量极低且变化趋势不明显,方解石和白云石的平均质量分数为 1%左右。

3.2.2 黏土矿物

黏土矿物鉴定方法根据 Mao 等^[25]通过自然风干和经过处理(乙二醇饱和、盐酸处理和加热 550℃)定向片的 X 衍射图谱中各种黏土矿物的(001)系列面的基面衍射峰位来进行判别。由图 5 可知,伊利石 10Å 峰在经过乙二醇饱和、盐酸处理和加热 550℃后保持不变,说明了伊利石的存在。高岭石的 7 Å 的特征峰在经过加热 550℃后消失而在盐酸处理后不会消失,显示存在高岭石。蒙脱石存在 12~15Å 的宽峰,在经乙二醇饱和处理后其增加到 17Å(强度较低),说明存在少量蒙脱石。样品 14 Å(001)的一级衍射峰和 4.7 Å(003)的三级衍射峰在盐酸处理后消失,其 14 Å 的衍射峰在乙二醇饱和后不变,而在 550℃加热后移至 13.8Å,说明含有绿泥石。综上,拉萨河中黏土矿物包括伊利石、蒙脱石、绿泥石、高岭石。

由表 2 可知,拉萨河流域黏土矿物伊利石平均质量分数最高(83. 4%);绿泥石质量分数略多于高岭石,平均质量分数分别为 8. 1%和 7. 4%;蒙脱石是黏土矿物中含量最低的,大部分样品中蒙脱石质量分数不足 1%,部分样品中几乎不含蒙脱石。

表 2 拉萨河流域沉积物黏土矿物组成

Table 2 Clay mineral composition in sediments in the Lhasa River Basin									
样品编号	质量分数/%				样品编号	质量分数/%			
	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石		蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石
L1	0	86	7	7	L11	1	92	3	5
L2	0	86	7	7	L12	1	88	6	6
L3	1	77	11	11	L13	1	85	7	7
L4	0	85	6	8	L14	0	81	9	10
L5	2	84	7	7	L15	0	79	9	12
L6	0	80	10	10	L16	0	85	7	7
L7	0	82	8	10	L17	0	80	7	13
L8	0	84	8	7	L18	1	80	8	11
L9	0	84	9	7	L19	0	80	7	13
L10	2	87	5	6					

3.3 常量元素

常量元素组成常被用于量化物理风化和化学风化^[26]。拉萨河沉积物 SiO₂ 质量分数远超其他氧化物,所有样品值均超过了 60%,平均值为 70. 42%,干流与支流之间差距不大(表 3)。沉积物 Al₂O₃ 质量分数在 10. 91%~17. 96%之间,平均值为 13. 89%,仅次于 SiO₂;Fe₂O₃ 质量分数较低,为 2. 29%~8. 05%,干流质量分数明显要高于两条支流;K₂O 质量分数为 2. 89%~5. 33%,Na₂O 质量分数为 1. 8%~3. 77%;CaO 与 MgO 质量分数较低,分别为 0. 75%~2. 24%与 0. 62%~2. 33%(表 3)。

将各常量元素氧化物与 UCC 值^[27]标准化可以看出(图 6),Ca 是主要亏损的元素,是由于 Ca 属于大离子亲石元素,在表生环境中易流失。斜长石风化使 Na 也呈现亏损趋势,钾长石溶解后 K 更优先吸附于黏土矿物上;Al 具有较强惰性,在水解过程中不易流失;富含 Si 的石英是抗风化性最强的矿物^[28]。因此,Al、K、Si 的氧化物含量十分接近 UCC 值。Fe、Mg 元素在拉萨河干流上游至中游较接近 UCC 值,但在其余区域仍

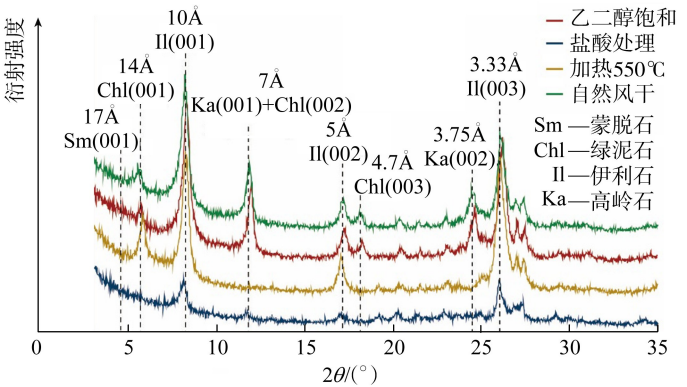


图 5 拉萨河典型沉积物黏土矿物 X 射线衍射图谱(样品 L6)
Fig. 5 X-ray diffraction pattern of clay minerals in typical sediments in the Lhasa River (sample L6)

表3 拉萨河流域常量元素氧化物含量

Table 3 Oxide contents of major elements in the Lhasa River Basin

样品编号	质量分数/%											CIA
	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	
L1	15.52	1.25	4.34	3.37	1.63	0.06	2.02	0.14	66.63	0.64	4.3	62.66
L2	13.68	1.68	3.52	3.46	1.10	0.06	2.95	0.16	70.27	0.59	5.1	53.94
L3	10.91	1.27	2.89	3.12	1.03	0.06	2.27	0.08	76.45	0.45	7.0	53.64
L4	14.26	1.69	3.34	3.78	1.31	0.06	2.86	0.05	70.82	0.50	5.0	54.57
L5	13.21	1.80	2.72	3.48	0.81	0.05	3.16	0.15	72.61	0.50	5.4	51.86
L6	13.14	1.28	3.61	3.23	1.19	0.05	2.01	0.13	71.62	0.56	5.4	58.96
L7	13.54	1.34	5.61	2.89	1.42	0.10	1.80	0.12	70.13	0.74	5.2	61.33
L8	14.57	1.52	2.89	3.80	0.79	0.05	3.40	0.09	70.52	0.41	4.9	53.86
L9	13.36	1.83	2.78	3.72	1.04	0.05	3.22	0.11	72.15	0.42	5.4	51.32
L10	13.96	2.11	3.25	4.12	0.75	0.09	3.77	0.26	70.17	0.58	5.0	49.03
L11	13.89	2.24	2.29	4.24	0.62	0.05	3.46	0.10	71.91	0.32	5.1	49.16
L12	14.21	2.18	3.26	3.69	0.96	0.07	2.87	0.20	70.80	0.51	5.0	52.81
L13	17.96	2.14	4.24	4.24	1.84	0.11	3.75	0.12	63.00	0.61	3.5	55.04
L14	13.50	1.07	3.91	3.89	1.21	0.06	1.86	0.09	72.03	0.57	5.3	59.38
L15	16.45	1.18	8.05	5.33	1.92	0.11	2.51	0.08	61.83	0.70	3.7	57.70
L16	12.86	1.21	3.41	3.66	0.98	0.06	1.96	0.09	73.00	0.55	5.7	57.79
L17	12.69	0.75	3.83	3.75	1.11	0.06	2.01	0.06	73.72	0.43	5.8	59.22
L18	13.18	1.36	5.92	3.02	2.33	0.29	2.40	0.07	68.94	0.56	5.2	57.58
L19	13.01	0.92	5.28	3.29	1.54	0.08	2.24	0.05	71.32	0.58	5.5	59.30
平均值	13.89	1.52	3.95	3.69	1.24	0.08	2.66	0.11	70.42	0.54	5.1	55.74

注:SiO₂/Al₂O₃ 代表两者的质量分数之比,下同。

是呈明显亏损的状态,在拉萨市附近(L5)达到最低值,在堆龙曲汇入后又逐渐增加。

4 讨论

4.1 拉萨河沉积物沉积特征

拉萨河沉积物体现了明显的河砂沉积特点,表现为分选差、峰度宽,偏度以正偏为主(图3)。拉萨河干流及支流位于雅鲁藏布缝合带附近,该缝合带在历史上经历多期沉积-构造演化运动^[29]。强烈的构造运动对源岩产生的破碎作用以及随河流坡降变化的水动力条件使得进入河流中的沉积物具有粒度不均的特征。粒度组成和粒度参数受到沉积环境的影响,可以反映当地的水动力特征,平均粒径大(Φ 值小)一般反映水动力条件较强^[30]。由图3粒度参数可知,拉萨河水动力总体较强,受到了坡降变化的影响,呈自上游到下游变弱的趋势。旁多水库可能对当地的水动力条件产生了一定影响(图2, L13),水库区附近的水动力条件有所减弱,河流在流经水库后,水动力条件变强。拉萨河下游特别是河口地区地势最平坦,坡降最缓,水动力条件最弱。

SiO₂/Al₂O₃ 常用来反映沉积岩中石英、黏土和长石的含量^[31]。石英在沉积物风化和分选中容易被保留下来,高 SiO₂/Al₂O₃ 被认为是沉积岩成分成熟的体现。通常,未蚀变的火成岩从基性到酸性其 SiO₂/Al₂O₃ 在 3~5 之间,而碎屑沉积岩通常会因为石英的富集而大于此值,通常大于 5^[32]。拉萨河沉积物样品 SiO₂/Al₂O₃ 在 3.5~7.0 之间,平均值为 5.1。由图4可知,拉萨河沉积物主要矿物为石英和长石,二者质量分数之和在 80%以上。石英和钾长石是花岗岩风化的主要产物,斜长石是花岗闪长岩中的主要矿物,因此,石英和长石的富集与流域内广泛分布的砂页岩、中酸性火山岩碎屑及岩浆岩相关(图1(b))。

Fe₂O₃/K₂O 是含 Fe 或含 K 矿物稳定性的度量,反映岩浆岩中原生物质含量,可通过 lg(Fe₂O₃/K₂O) 与 lg(SiO₂/Al₂O₃) 作图显示^[33]。由图7可知,拉萨河干流沉积物大部分落在硬砂岩区域,支流点落在

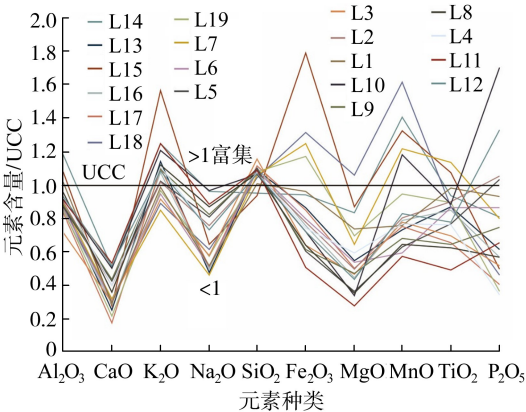


图6 拉萨河沉积物常量元素含量 UCC 标准化值

Fig. 6 UCC-normalized values of major element contents in sediments in the Lhasa River

长石砂岩和硬砂岩交界处。硬砂岩为一种杂基主要为云母、黏土矿物的杂砂岩,杂砂岩主要成分是正长石与石英,且杂砂岩大多形成于造山带区域^[33-34],与拉萨河流域所处的拉萨地体多褶皱、多断裂带的情况类似。如图 4 和图 7 所示,拉萨河沉积物主要成分是石英与长石,其成熟度较低,具有低到中等成熟的特点^[35]。这与雅鲁藏布江干流沉积物成熟度相似^[36]。同时,拉萨河沉积物 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ 较低,表明铁镁质矿物对沉积物的贡献较小;支流的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ 更低,表现出源区岩性的差别(图 1(b)和图 7)。结合沉积物粒度分析、矿物特征和元素分析,拉萨河干流和堆龙曲、乌鲁龙曲的河砂相沉积物主要来自花岗岩和花岗闪长岩剥蚀产物。

4.2 风化特征及影响因素

化学风化指数(chemical index of alteration, CIA)是评估研究区域化学风化程度的常用指标^[28],越大表明风化蚀变越强。通常, CIA 在 50~65 之间反映寒冷干燥气候条件下较弱的化学风化,在 65~85 之间反映温暖湿润条件下中等的化学风化,在 85~100 之间反映炎热潮湿的热带亚热带条件下强烈的化学风化^[37]。

拉萨河干流沉积物的 CIA 在 51.86~62.66 间变化,平均值 57.57(表 3)。支流沉积物 CIA 值较低,其中堆龙曲平均值为 52.20,乌鲁龙曲平均值为 50.99,这可能是因为堆龙曲和乌鲁龙曲都位于更为干旱的流域西部。沉积物 CIA 值反映了拉萨河流域在海拔高寒冷干燥气候条件下经历了较弱的化学风化,化学风化过程分为早期脱 Ca 和 Na、中期脱 K 和晚期脱 Si 这 3 个阶段^[38]。Ca 主要赋存于易风化的斜长石和辉石中,在化学风化的初始阶段遭受强烈的淋失;Na 赋存于长石(主要是斜长石)和云母等矿物中,在风化过程中伴随着矿物的分解而淋失;K 为钾长石、云母和伊利石等矿物所含的主要碱金属元素,在钾长石和云母风化成伊利石时,几乎不发生淋失,且易被黏土矿物吸附^[34,39]。化学风化程度通常使用 A-CN-K 图解来表示(图 8),其中 A 是指 Al_2O_3 , CN 指 $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$ (CaO^* 为硅酸盐部分的 CaO 含量), K 指 K_2O 。拉萨河及其支流沉积物总体呈现出与 A-CN 轴平行的风化趋势,但未到达 A-K 线,表明河流沉积物化学风化处于脱 Na 和 Ca 的斜长石风化阶段但未进入钾长石风化阶段,且母岩类型为长英质岩石,这符合拉萨河流域广泛分布酸性-中酸性岩浆岩的特征。

4.3 黏土矿物的指示意义

黏土矿物组成的变化是指示化学风化强度的重要指标,主要受到气候条件和地质条件影响。伊利石和绿泥石是低变质岩和深成岩物理风化作用的产物,受化学风化作用影响较弱^[42]。伊利石还可在寒冷少雨、弱碱性的环境中,由云母、长石等矿物脱钾形成^[42]。绿泥石由于其极易水解,主要存在于化学风化受抑制的地区。相反,高岭石在湿热气候酸性介质中由长石、云母、辉石等矿物遭受强烈化学风化作用而形成,是典型的化学风化产物^[43]。拉萨河流域岩浆岩分布广泛,全域均出露有酸性-中酸性岩类,且分布面积较大,主要为燕山期和燕山晚期花岗岩(图 1(b))。在弱风化阶段,花岗岩风化的主要产物为绢云母和绿泥石,而且伊利石和绿泥石多由母岩破碎崩解产生^[11,43],所以高伊利石含量(表 2)表明拉萨河流域以物理风化为主。Segall 等^[44]在对雅鲁藏布江和恒河的研究中将沉积物中高伊利石含量归因于其源区强烈的新构造活动和白云母的风化作用,指出雅鲁藏布江与恒河有较高的物理风化速率,其研究结果也印证了本文的观点。

由于河流沉积物中黏土矿物受岩性、气候、植被等因素控制,不同地区黏土矿物组成有很大差别。由图 9 可知,拉萨河与雅鲁藏布江-布拉马普特拉河有相似的黏土矿物组成,即主要由伊利石与绿泥石组成,其

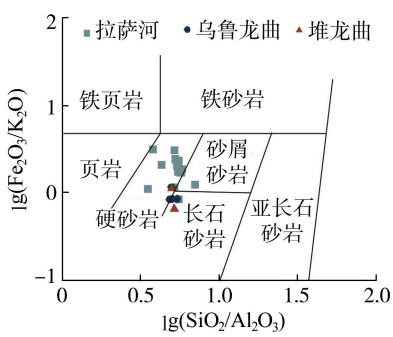


图 7 拉萨河及其支流沉积物 $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 与 $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 关系

Fig. 7 Relationship diagram of $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ and $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ from sediments in the Lhasa River and its tributaries

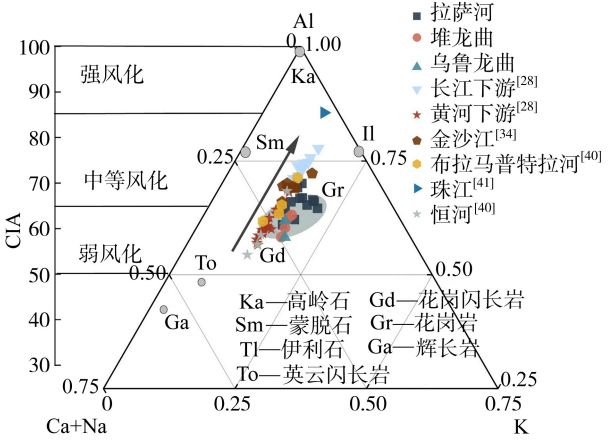


图 8 拉萨河流域沉积物 A-CN-K 三元图
Fig. 8 Ternary diagram of sediment A-CN-K in the Lhasa River Basin

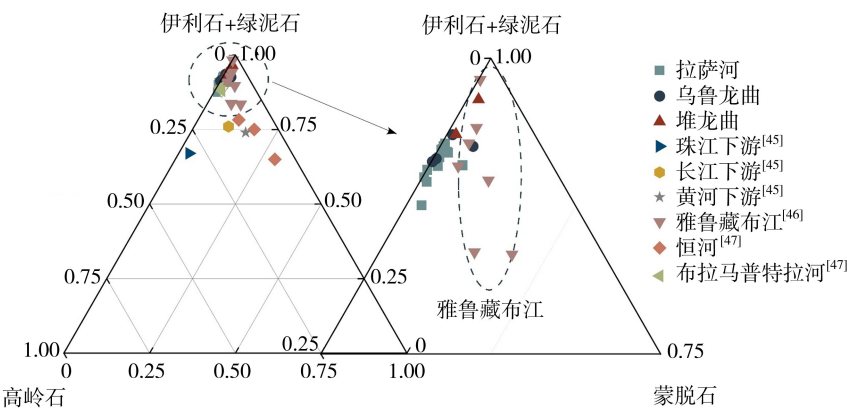


图 9 亚洲河流沉积物黏土矿物三元图

Fig. 9 Ternary diagram of clay minerals in sediments in the Asian rivers

质量分数和大于 80%。而长江下游、黄河下游的伊利石与绿泥石含量较低,珠江含量更低,指示了自干冷到湿热气候条件下黏土矿物组成变化特征。拉萨河黏土矿物组成还与在强物理剥蚀和弱化学风化条件下花岗岩主要以物理风化为有关^[48]。

伊利石作为拉萨河含量最高的代表性黏土矿物,其化学指数和结晶度可以用来指示化学风化程度。伊利石的化学指数值大于 0.5 时,为富铝伊利石,是强水解作用的结果;化学指数小于 0.5,表明该伊利石为富铁镁伊利石,是物理风化的结果。一般说来,伊利石结晶度值高表示高退变的伊利石,低值则表示相对新鲜的伊利石^[25]。拉萨河干流伊利石化学指数为 0.12~0.32,平均值为 0.21,伊利石结晶度为 0.24~0.54,平均值为 0.44(图 10)。拉萨河沉积物的伊利石化学指数普遍偏低,均小于 0.4,表明沉积物中主要为富铁镁伊利石,经历了较强的物理风化。如图 10 所示,长江流域和珠江流域伊利石化学指数明显高于拉萨河,因为我国东部地区有更湿热的环境,有利于化学风化的进行^[25]。恒河和布拉马普特拉河伊利石化学指数和结晶度与拉萨河类似,这两条河流位于构造活动强烈的喜马拉雅地区,有较强的物理风化作用^[47]。湄公河和红河伊利石化学指数高于拉萨河,Liu 等^[43]认为红河和湄公河伊利石化学指数能很好地指示其沉积物的风化,这也与本文的研究结果相似。

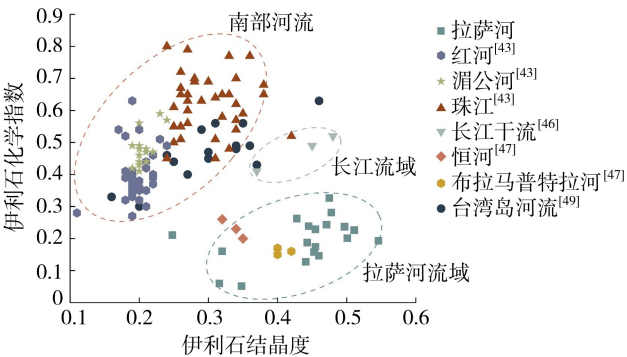


图 10 拉萨河及部分亚洲河流伊利石化学指数和结晶度散点图

Fig. 10 Illite's chemical index and crystallinity scatter plot of the Lhasa River and some Asian rivers

5 结 论

- a. 拉萨河沉积物的平均粒径较粗,以砂为主,粉砂次之,黏土含量低,并含有少量的砾石。沉积物分选性整体较差,偏度大多为正偏,峰度宽。拉萨河下游粉砂与黏土含量高于中游,水动力条件较弱。受地形变化的影响,中游水动力条件强于下游。
- b. 拉萨河沉积物矿物主要为石英和长石,其中,石英质量分数最高(平均 38.4%),钾长石(27.11%)和斜长石(23.64%)次之,黏土矿物和碳酸盐矿物质量分数较低。拉萨河沉积物处于低到中等成熟阶段,与流域内广泛分布的砂页岩、中酸性火山岩碎屑及岩浆岩相关。
- c. 拉萨河整体 CIA 值较低,在 49.03~62.66 之间,表明其化学风化程度低。拉萨河流域的风化受到干燥寒冷气候条件的影响,大面积出露的花岗岩与强烈的物理风化也是造成流域低化学风化的原因。
- d. 拉萨河沉积物黏土矿物伊利石质量分数最高(平均 83.4%),绿泥石含量略高于高岭石,蒙脱石含量极低。高伊利石含量表明拉萨河流域以物理风化为,是气候寒冷干燥的标志。同时,伊利石化学指数普遍偏低,均小于 0.4,表明沉积物经历了较强的物理风化。

参考文献:

[1] 郑度,姚檀栋. 青藏高原隆升及其环境效应[J]. 地球科学进展,2006,21(5):451-458. (ZHENG Du,YAO Tandong. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects[J]. Advances in Earth Science,2006,21(5):451-458. (in Chinese))

[2] 王二七,陈良忠,陈智樑. 在构造和气候因素制约下的雅鲁藏布江的演化[J]. 第四纪研究,2002,22(4):365-373. (WANG Erqi,CHEN Liangzhong,CHEN Zhiliang. Tectonic and climatic element-controlled evolution of the Yalungzangbu River in southern Tibet[J]. Quaternary Sciences,2002,22(4):365-373. (in Chinese))

[3] CLIFT P D. Controls on the erosion of Cenozoic Asia and the flux of clastic sediment to the ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters,2006,241(3/4):571-580.

[4] 杨守业. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. 地球科学进展,2006,21(6):648-655. (YANG Shouye. Advances in sedimentary geochemistry and tracing applications of Asian rivers[J]. Advances in Earth Science,2006,21(6):648-655. (in Chinese))

[5] BORGES J B,HUH Y,MOON S,et al. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East[J]. Chemical Geology,2008,254(1/2):52-72.

[6] 梁文栋,胡修棉. 现代河流沉积物碎屑及矿物组分研究新进展[J]. 地质学报,2023,97(9):2975-2991. (LIANG Wendong,HU Xiumian. Research progress of sand composition in modern river sediments[J]. Acta Geologica Sinica,2023,97(9):2975-2991. (in Chinese))

[7] VAN DER BEEK P,LITTY C,BAUDIN M,et al. Contrasting tectonically driven exhumation and incision patterns,western versus central Nepal Himalaya[J]. Geology,2016,44(4):327-330.

[8] HREN M T,CHAMBERLAIN C P,HILLEY G E,et al. Major ion chemistry of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra river:chemical weathering,erosion,and CO₂ consumption in the southern Tibetan Plateau and eastern syntaxis of the Himalaya[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,2007,71(12):2907-2935.

[9] KUMAR S,LUO Chuanxiu,RAHMAN A,et al. Modern alluvial pollen distribution in Ganges-Brahmaputra-Meghna (GBM) floodplain and its paleoenvironmental significance[J]. Review of Palaeobotany and Palynology,2019,267:1-16.

[10] YU Zhengliang,YAN Ni,WU Guangjian,et al. Chemical weathering in the upstream and midstream reaches of the Yarlung Tsangpo basin,southern Tibetan Plateau[J]. Chemical Geology,2021,559:119906.

[11] 罗豪,彭辉,刘佳,等. 雅鲁藏布江上游支流沉积物的矿物组成特征[J]. 冰川冻土,2023,45(5):1451-1462. (LUO Hao,PENG Hui,LIU Jia,et al. Mineral composition characteristics of sediments from different tributaries in upper reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2023,45(5):1451-1462. (in Chinese))

[12] LI Chaoliu,KANG Shichang,ZHANG Qianggong,et al. Rare earth elements in the surface sediments of the Yarlung Tsangpo (Upper Brahmaputra River) sediments,southern Tibetan Plateau[J]. Quaternary International,2009,208(1/2):151-157.

[13] ZHANG Wenfang,WU Jinglu,ZHAN Shuie,et al. Environmental geochemical characteristics and the provenance of sediments in the catchment of lower reach of Yarlung Tsangpo River,southeast Tibetan Plateau[J]. CATENA,2021,200:105150.

[14] HASAN A S M M,HOSSAIN I,RAHMAN M A,et al. Signature of Himalayan orogenic features in Brahmaputra River sediments, Bangladesh:evidence from single-grain heavy mineral chemistry[J]. Geochemistry,2022,82(3):125897.

[15] 徐冉,铁强,代超,等. 雅鲁藏布江奴下水文站以上流域水文过程及其对气候变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):288-293. (XU Ran,TIE Qiang,DAI Chao,et al. Study on hydrological process in upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station and its response to climate change[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(4):288-293. (in Chinese))

[16] 张建云,刘九夫,金君良,等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. 中国科学院院刊,2019,34(11):1264-1273. (ZHANG Jianyun,LIU Jiufu,JIN Junliang,et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2019,34(11):1264-1273. (in Chinese))

[17] 李政,陈虎林,余璨,等. 拉萨河表层沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价[J]. 高原科学研究,2019(1):58-70. (LI Zheng,CHEN Hulin,YU Can,et al. Spatial and temporal distribution characteristics of heavy metals in surface sediment and ecological risk assessment in the Lhasa River[J]. Plateau Science Research,2019(1):58-70. (in Chinese))

[18] ZHANG Jian,XU Jilei,TAN Xiang,et al. Nitrogen loadings affect trophic structure in stream food webs on the Tibetan Plateau, China[J]. Science of the Total Environment,2022,844:157018.

[19] 史轩,陈喜,高满,等. 青藏高原拉萨河流域水化学时空变化特征控制因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2023,32(1):183-193. (SHI Xuan,CHEN Xi,GAO Man,et al. Study on the spatiotemporal pattern and controlling factors of river water hydro-

- chemical characteristics in the Lhasa River Basin, Tibet Plateau[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(1):183-193. (in Chinese))
- [20] 谢银财,于爽,缪雄谊,等. 青藏高原流域岩石风化机制及其 CO₂ 消耗通量:以拉萨河为例[J]. *地学前缘*, 2023, 30(5):510-525. (XIE Yincai, YU Shi, MIAO Xiongyi, et al. Chemical weathering and its associated CO₂ consumption on the Tibetan Plateau: a case of the Lhasa River Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(5):510-525. (in Chinese))
- [21] 张启凡,胡铁松,戴凌全,等. 考虑生态流量的梯级水库主从博弈优化调度研究[J]. *水资源保护*, 2024, 40(5):69-77. (ZHANG Qifan, HU Tiesong, DAI Lingquan, et al. Research on leader-follower game optimal operation of cascade reservoirs considering ecological flow[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5):69-77. (in Chinese))
- [22] FOLK R L, WARD W C. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1):3-26.
- [23] BISCAYE P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7):803-832.
- [24] 吴帅虎,傅旭东. 雅鲁藏布江中游古洪水滞流沉积物性质研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(5):1058-1067. (WU Shuaihu, FU Xudong. Characteristics of the palaeoflood slackwater deposits in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(5):1058-1067. (in Chinese))
- [25] MAO Changping, CHEN Jun, YUAN Xuyin, et al. Seasonal variation in the mineralogy of the suspended particulate matter of the lower Changjiang river at Nanjing, China[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2010, 58(5):691-706.
- [26] RODDAZ M, VIERS J, BRUSSET S, et al. Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226(1/2):31-65.
- [27] MCLENNAN S M, TAYLOR S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends [J]. *The Journal of Geology*, 1991, 99:1-21.
- [28] YANG Shouye, JUNG H S, LI Congxian. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: geochemical evidence from river sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(1/2):19-34.
- [29] 许志琴,杨经绥,侯增谦,等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. *中国地质*, 2016, 43(1):1-42. (XU Zhiqin, YANG Jingsui, HOU Zengqian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1):1-42. (in Chinese))
- [30] 周森,周银军,闫霞,等. 澜沧江源河床沉积物分布特征:以扎曲囊谦河段为例[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(6):46-52. (ZHOU Sen, ZHOU Yinjun, YAN Xia, et al. Sediment distribution on Nangqian Reach in the source area of Lancang River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(6):46-52. (in Chinese))
- [31] POTTER P E. Petrology and chemistry of modern Big River Sands[J]. *The Journal of Geology*, 1978, 86(4):423-449.
- [32] ZHANG Kaijun, XIA Bangdong, WANG Guanmin, et al. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China[J]. *GSA Bulletin*, 2004, 116(9/10):1202-1222.
- [33] HERRON M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(5):820-829.
- [34] WU Weihua, ZHENG Hongbo, XU Shijun, et al. Geochemistry and provenance of bed sediments of the large rivers in the Tibetan Plateau and Himalayan region[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2012, 101(5):1357-1370.
- [35] HOSSAIN H M Z. Major, trace, and REE geochemistry of the Meghna River sediments, Bangladesh: Constraints on weathering and provenance[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(5):3321-3343.
- [36] HUYAN Yuying, YAO Wensheng. Geochemical comparisons of weathering, provenance and tectonics in the fluvial sediments from Yarlung Zangbo to Brahmaputra River[J]. *CATENA*, 2022, 210:105944.
- [37] 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.
- [38] NESBITT H W, FEDO C M, YOUNG G M. Quartz and feldspar stability, steady and non-steady state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds[J]. *The Journal of Geology*, 1997, 105(2):173-192.
- [39] LIM D, JUNG H, XU Zhaokai, et al. Elemental and Sr-Nd isotopic compositional disparity of riverine sediments around the Yellow Sea: constraints from grain-size and chemical partitioning[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 63:272-281.
- [40] GALY A, FRANCE-LANORD C. Higher erosion rates in the Himalaya: geochemical constraints on riverine fluxes[J]. *Geology*, 2001, 29(1):23-26.
- [41] 常海钦,付亚龙,林鑫,等. 流域盆地化学风化强度空间分布及控制因素研究:以长江和珠江为例[J]. *地球科学进展*,

2019,34(1):93-102. (CHANG Haiqin, FU Yalong, LIN Xin, et al. Spatial distribution and controlling factors of chemical weathering intensity in drainage basins: a case study in the Yangtze River Basin and Pearl River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(1): 93-102. (in Chinese))

[42] LI Yuting, CLIFT P D, MURRAY R W, et al. Asian summer monsoon influence on chemical weathering and sediment provenance determined by clay mineral analysis from the Indus Submarine Canyon[J]. Quaternary Research, 2020, 93: 23-39.

[43] LIU Zhifei, COLIN C, HUANG Wei, et al. Climatic and tectonic controls on weathering in South China and Indochina Peninsula: clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, 8(5): Q05005.

[44] SEGALL M P, KUEHL S A. Sedimentary processes on the Bengal continental shelf as revealed by clay-size mineralogy [J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(4): 517-541.

[45] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 336-346. (YANG Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(4): 336-346. (in Chinese))

[46] HE Mengying, ZHENG Hongbo, HUANG Xiangtong, et al. Yangtze River sediments from source to sink traced with clay mineralogy [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 60-69.

[47] KHAN M H R, LIU Jianguo, LIU Shengfa, et al. Clay mineral compositions in surface sediments of the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system of Bengal Basin, Bangladesh [J]. Marine Geology, 2019, 412: 27-36.

[48] HEROY D C, KUEHL S A, GOODBRED JR S L. Mineralogy of the ganges and brahmaputra rivers; implications for river switching and Late Quaternary climate change [J]. Sedimentary Geology, 2003, 155(3/4): 343-359.

[49] LI Chuanshun, SHI Xuefa, KAO S, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(6): 673-681.

(收稿日期: 2024 - 11 - 13 编辑: 刘晓艳)

(上接第 17 页)

[22] 徐杰, 李致家, 霍文博, 等. 半湿润流域洪水预报实时校正方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 317-322. (XU Jie, LI Zhijia, HUO Wenbo, et al. Comparison of real-time correction methods of flood forecasting in semi-humid watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 317-322. (in Chinese))

[23] 李致家, 孔祥光, 张初旺. 对新安江模型的改进[J]. 水文, 1998(4): 19-23. (LI Zhijia, KONG Xiangguang, ZHANG Chuwang. Improving Xin'anjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1998(4): 19-23. (in Chinese))

[24] 李致家, 黄鹏年, 张永平, 等. 半湿润流域蓄满超渗空间组合模型研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 1-6. (LI Zhijia, HUANG Pengnian, ZHANG Yongping, et al. Study on spatial combination model of infiltration-excess and saturation-excess runoff in semi-humid watersheds [J]. Yellow River, 2015, 37(10): 1-6. (in Chinese))

[25] LIU Yuhuan, ZHANG Ke, LI Zhijia, et al. A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125440.

[26] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xin'anjiang model using geographically based information [J]. Journal of Hydrology, 2012, 468-469: 47-62.

[27] 姚成, 纪益秋, 李致家, 等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 42-47. (in Chinese))

[28] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, MILLER N. Green-Ampt infiltration parameters from soils data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(1): 62-70.

[29] CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research, 1988, 24(5): 755-769.

[30] ANDERSON R M, KOREN V I, REED S M. Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates [J]. Journal of Hydrology, 2006, 320(1/2): 103-116.

[31] 石朋, 陆美霞, 吴洪石, 等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 19-25. (SHI Peng, LU Meixia, WU Hongshi, et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin'anjiang model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 19-25. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 01 - 21 编辑: 刘晓艳)