

王是君, 李超, 段知非, 等. 红河流域不同粒级沉积物揭示的风化特征及其控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(4): 4-15.

WANG Shijun, LI Chao, DUAN Zhifei, et al. Weathering characteristics in the Red River catchment and controlling factors revealed by sediments with different grain sizes[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(4): 4-15.

# 红河流域不同粒级沉积物揭示的风化特征及其控制因素

王是君<sup>1</sup>, 李超<sup>1\*</sup>, 段知非<sup>1</sup>, 郭玉龙<sup>1</sup>, 段晓勇<sup>2</sup>, 印萍<sup>2</sup>, 杨守业<sup>1</sup>

(1 海洋地质国家重点实验室, 同济大学, 上海 200092; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

**摘要:**红河曾是青藏高原东缘大河的入海通道,也是现南海北部沉积物的主要供给源之一,是研究南海源-汇过程及构造-气候-风化关系的理想区域。通过对比红河及其支流不同粒级沉积物的主量元素及其 CIA,分析 CIA 和气候、地形及岩性等环境参数的相关性,探究红河流域硅酸盐风化的主要控制因素。结果表明:粗粒级沉积物是石英和长石的混合物,其主量元素组成受粒度和石英稀释的影响显著,与所有环境参数均无相关性,CIA 不能准确反映其化学风化特征;细粒级沉积物可以代表上游流域的平均组成,其 CIA 主要反映流域化学风化程度,通过对 CIA 和环境参数进行相关性分析可知,降雨和坡度是红河流域风化程度的主控因素。

**关键词:**化学风化;红河;沉积物;CIA;粒度效应

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2024.201

## 0 引言

大陆硅酸盐岩的化学风化是全球气候变化和物质循环的主要驱动力之一,在调节全球碳循环中发挥了重要作用<sup>[1-2]</sup>。河流沉积物是大陆风化的产物,蕴含了丰富的流域风化剥蚀与气候环境信息<sup>[3]</sup>。为了定量评估化学风化及其在气候变化及碳循环方面的影响,前人提出了各类基于沉积物地球化学特征的指标,如化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA)<sup>[4]</sup>、帕克风化指数(weathering index of PARKER, WIP)<sup>[5]</sup>、化学风化指数(chemical index of weathering, CIW)<sup>[6]</sup>、 $\alpha$ 值<sup>[7]</sup>及 $\alpha^{Al-E}$ <sup>[8]</sup>等。

CIA 是目前应用最广泛的化学风化指标之一,

NESBITT 和 YOUNG<sup>[4]</sup>首次利用古元古代沉积岩的 CIA 来重建古气候。基于沉积物 CIA 来定量评估流域化学风化的控制因素及其在全球碳循环中的贡献是当前研究的热点,已经被用于指示黄河<sup>[9]</sup>、长江<sup>[10]</sup>、东南亚大河(湄公河、红河、萨尔温江等)<sup>[11-12]</sup>、亚马逊河<sup>[13]</sup>、恒河<sup>[14]</sup>、中国东北和东南地区河流<sup>[15-16]</sup>等流域的化学风化程度。前人研究表明,化学风化受构造(岩性和地形地貌等)、气候(温度和降雨等)、植被和人类活动等多因素影响<sup>[17-20]</sup>。其中,大陆风化主要受构造控制<sup>[21]</sup>还是受气候控制<sup>[1-2]</sup>,一直是困扰学界的难题。因此,探究河流沉积物 CIA 的影响因素,不仅有利于解读风化信号<sup>[22]</sup>和重建古气候变化<sup>[23]</sup>,也有助于理解大陆风化的调控机制<sup>[24]</sup>。在全球尺度上,MCLENNAN<sup>[3]</sup>较早发现了沉积物 CIA 和河流泥沙量的负相关性,暗示了物理侵蚀对化学风化的抑制作用;但之后的研究更强调温度对 CIA 的主导作用<sup>[24-25]</sup>。而在空间尺度上,CIA 的控制因素则因地而异,例如,SHAO 等<sup>[10]</sup>认为季风气候控制了中国大陆大型河流沉积物的 CIA;而 LIU 等<sup>[26]</sup>提出华南及东南亚大河的 CIA 则受气候和构造活动共同影响;此外还有学者指出,青藏高原东

收稿日期:2024-08-17

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0800504);国家自然科学基金(42273057,42076063);亚洲合作资金项目“长江三角洲与红河三角洲海洋地质环境与灾害合作研究”

第一作者:王是君(2000—),男,在读硕士,主要从事沉积地球化学方面的研究工作。E-mail:2231656@tongji.edu.cn

\* 通讯作者:李超(1983—),男,博士,副教授,主要从事沉积地球化学方面的研究工作。E-mail:cli@tongji.edu.cn

缘大河的 CIA 主要反映了沉积再旋回的贡献<sup>[11]</sup>。

青藏高原隆升是新生代全球最重要的构造事件, 其促进了东亚季风的形成和多条大河的发育。大河流域风化剥蚀通量巨大, 能够影响全球气候及碳循环过程, 是探究构造-气候-风化关系的关键区域。在地质历史时期中, 红河可能是青藏高原东缘其他大河的入海通道, 是研究青藏高原构造演变的重要区域<sup>[27]</sup>。此外, 红河位于不同地块交界, 上游处于哀牢山-红河断裂带, 下游发育广袤的红河三角洲。红河流域内地形地貌、气候及岩性差异巨大, 且表现出不同的风化特征<sup>[26,28]</sup>, 有利于探究不同自然条件下的流域风化程度。因此, 本文以红河流域为研究区, 探究不同环境因素对红河沉积物 CIA 的影响, 不仅可以深入理解该流域的风化机制, 还有助于解读红河钻孔记录中的风化气候信号及其反映的青藏高原演变。

## 1 研究区地质概况

红河发源于中国云南省哀牢山, 长约 1 200 km, 流域面积约  $1.45 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。红河在中国境内称之为元江, 自西北向东南流入越南老街省后称为 Thao River。红河有两大支流, 分别为左岸的泸江(Lo River)和右岸的李仙江(Da River)。三者在越南河内西北部 60 km 处汇合, 之后分为多股河流汇入北部湾, 形成了巨大的红河三角洲(约  $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ )。

其中, 泸江也有两大支流, 分别为左岸的锦江(Gam River)和右岸的斋江(Chay River)。

红河流域为亚热带季风气候, 夏季平均温度约 27~29 °C, 冬季平均气温约为 16~21 °C, 年平均降雨量约为 1 300~1 800 mm, 主要集中在夏季<sup>[29]</sup>。红河年径流量约为  $1.23 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , 由于流域内大型水利工程建设, 红河输沙量从 20 世纪 80 年代的 130 Mt/a 锐减至现在的 40 Mt/a<sup>[30]</sup>。

红河干流流经印支地块和华南地块交汇处的哀牢山-红河断裂带, 沿断裂带分布有大量高级变质岩, 此外还分布有中生代沉积岩<sup>[31-32]</sup>。李仙江流域内以中-古生代沉积岩为主, 在断裂带附近长英质火山岩和超基性岩零星分布<sup>[33]</sup>。泸江流域分布有前寒武纪扬子克拉通碎片、低级变质岩及早-中古生代沉积岩等<sup>[34]</sup>。

## 2 方法和数据来源

本研究收集了前人发表的红河沉积物主量元素数据(表 1)<sup>[12,26,28,35]</sup>, 采样位置均位于越南境内(图 1)。所收集样品为河道表层沉积物, 其中,  $< 2 \mu\text{m}$  和  $< 63 \mu\text{m}$  的样品数据来自 LIU 等<sup>[12,26]</sup> 经过粒度筛选的样品所测得的数据资料, 统称为“细粒级样品”。砂粒级( $63 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ )样品数据来自 CLIFT 等<sup>[28]</sup> 的砂粒级全岩样品及 HE 等<sup>[35]</sup> 经过粒度筛选的样品所测得的数据资料, 简称为“粗粒级

表 1 样品主量元素组成及 CIA

Table 1 Major element composition and CIA of the samples

粒径/ $\mu\text{m}$	样品编号	SiO <sub>2</sub> /wt%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /wt%	MgO/wt%	CaO/wt%	Na <sub>2</sub> O/wt%	K <sub>2</sub> O/wt%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /wt%	CIA
< 2	RS04	43.24	26.85	1.55	0.19	0.19	3.20	11.43	86.7
	RS05-1	43.67	24.29	1.88	0.21	0.34	3.18	13.02	84.7
	RS06	43.42	24.98	1.51	0.28	0.19	2.94	12.46	86.2
	RS07	41.39	27.73	1.39	0.24	0.19	2.84	11.56	87.9
	RS11	38.92	23.02	2.28	0.78	0.24	2.12	16.88	84.8
	RS12	38.84	22.93	2.26	0.73	0.25	2.18	16.92	84.8
	RS13	40.03	22.74	2.16	0.71	0.23	2.29	16.92	84.5
	RS15	39.30	23.63	2.25	0.66	0.28	2.47	16.85	84.5
	RS16	39.65	23.23	2.42	0.58	0.27	2.66	17.30	84.1
	RS17	40.91	24.17	2.03	0.49	0.24	2.52	14.85	85.7
	RS20	44.31	24.42	2.75	0.50	0.33	3.88	12.02	81.2
	RS21	43.44	24.60	2.29	0.30	0.29	3.16	13.06	84.7
	RS23	48.77	24.96	1.88	0.16	0.39	4.15	9.20	82.1
	RS24	45.38	25.14	2.03	0.16	0.33	3.74	11.44	83.7
	RS25	44.13	24.99	1.99	0.30	0.27	3.32	12.38	84.5
	RS26	42.03	26.14	1.93	0.30	0.27	3.50	12.76	84.5
	RS30	45.34	24.56	2.04	0.29	0.37	3.54	11.79	83.1
	RS32	42.56	25.94	1.94	0.21	0.29	3.43	12.45	85.0

续表 1

粒径/ $\mu\text{m}$	样品编号	SiO <sub>2</sub> /wt%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /wt%	MgO/wt%	CaO/wt%	Na <sub>2</sub> O/wt%	K <sub>2</sub> O/wt%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /wt%	CIA
< 63	RS04	58.34	18.75	1.51	0.74	0.47	3.13	7.57	77.3
	RS05-1	63.66	15.95	1.68	0.48	0.90	2.79	6.74	74.8
	RS06	61.55	16.11	1.55	1.04	0.55	2.85	7.55	73.2
	RS07	66.61	15.10	1.29	0.52	0.47	2.89	5.84	75.7
	RS11	54.75	15.69	2.64	1.81	1.08	2.22	11.79	67.7
	RS12	57.47	15.11	2.37	1.56	1.14	2.37	10.50	67.5
	RS13	55.15	15.23	2.54	1.63	0.96	2.33	11.69	68.3
	RS15	57.34	14.61	2.50	1.83	1.05	2.40	10.28	65.6
	RS16	57.13	14.69	2.37	1.55	1.07	2.54	11.04	66.7
	RS17	65.00	13.91	1.69	1.16	1.18	2.50	7.47	67.3
	RS20	63.51	15.75	1.90	0.80	1.15	2.82	6.91	71.1
	RS21	61.19	15.87	1.86	0.82	0.85	2.70	8.34	73.2
	RS23	67.57	14.24	1.53	0.55	0.81	2.72	6.08	72.9
	RS24	68.83	13.57	1.52	0.50	0.76	2.41	5.85	74.0
	RS25	62.72	16.47	1.72	0.78	0.84	2.76	7.42	74.0
	RS26	62.32	16.44	1.66	0.76	0.79	2.83	7.24	74.1
	RS30	62.41	16.26	1.69	0.69	0.88	2.79	7.34	73.9
RS32	61.58	16.77	1.73	0.70	0.79	2.81	7.29	74.9	
63~2 000	R5937	72.02	10.94	1.67	2.08	1.49	3.00	5.05	57.3
	R5938	76.34	9.15	1.39	2.07	1.33	2.64	3.47	55.8
	R5939	77.82	8.85	1.36	1.62	1.04	2.24	3.47	60.2
	R5940	84.72	6.28	0.72	0.67	0.71	1.91	2.51	58.7
	R5941	84.06	6.85	0.74	0.54	0.74	2.10	2.58	60.5
	M5942	84.80	6.82	0.77	0.50	0.76	1.89	2.52	61.9
	D5943	87.51	5.61	0.68	0.49	0.69	1.72	2.22	59.0
	L5944	77.63	10.29	0.84	0.98	0.95	3.62	2.88	59.3
	L5945	82.39	7.96	0.72	0.76	0.73	2.73	2.72	59.7
	L5946	79.96	8.86	0.80	0.79	0.81	2.78	3.19	60.9
	L5947	79.51	9.10	0.72	0.66	0.88	2.68	3.01	62.1
	VN05060701	85.48	6.90	0.87	0.60	0.49	1.81	3.18	65.9
	VN05060702	80.54	8.03	1.48	2.61	1.02	2.15	3.65	58.5
	VN05060710	72.59	10.75	1.83	3.39	1.32	2.45	5.92	60.6
	VN05060801	71.93	12.01	1.91	3.37	1.20	2.66	5.98	63.7
	VN05060805	66.94	12.76	2.07	2.79	0.92	3.44	9.82	65.4
	VN05060806	86.29	6.89	0.30	0.42	0.61	2.78	1.65	59.0
VN05060807	79.86	10.00	0.87	1.32	0.45	2.71	3.71	69.3	

注: < 2  $\mu\text{m}$ 样品数据引自文献[12], < 63  $\mu\text{m}$ 样品数据引自文献[26], 63~2 000  $\mu\text{m}$ 样品数据引自文献[28,35]。

样品”。其中, LIU 等<sup>[26]</sup>、CLIFT 等<sup>[28]</sup>及 HE 等<sup>[35]</sup>样品的主量元素由 X 射线荧光光谱仪测得, LIU 等<sup>[12]</sup>样品则由电感耦合等离子体光谱仪测得, 两者数据均有较高的准确度和可比性。本文根据收集数据中的主量元素重新计算得到了相关沉积物的 CIA 数据, 详见表 1。CIA 计算公式为:

$$\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100$$

式中: 氧化物为摩尔质量百分比;

CaO\*是硅酸盐矿物中的 Ca 含量, 不包括碳酸盐和磷酸盐等矿物中的 Ca。

在 CIA 计算过程中, 对于文献中经过酸淋洗的

样品, CaO\*为直接测得的酸不溶组分的 CaO 含量。对于文献中没有经过酸淋洗的样品, 本文采用了 MCLENNAN 等<sup>[3]</sup>提出的校正方法, 即根据沉积物样品中的 CaO/Na<sub>2</sub>O 的摩尔比值来确定 CaO\*。如果该比值 < 1, 则直接以 CaO 摩尔含量作为 CaO\*含量; 如果该比值 > 1, 则以 Na<sub>2</sub>O 的摩尔含量作为 CaO\*含量。

本文基于 Hydrosched 数据库<sup>[36]</sup>提供的流域边界提取了各样品采样点之上河段的流域范围, 并利用 ArcGIS 的分区统计等工具计算了不同采样点对应流域范围内的平均环境参数(表 2)。其中, 温度

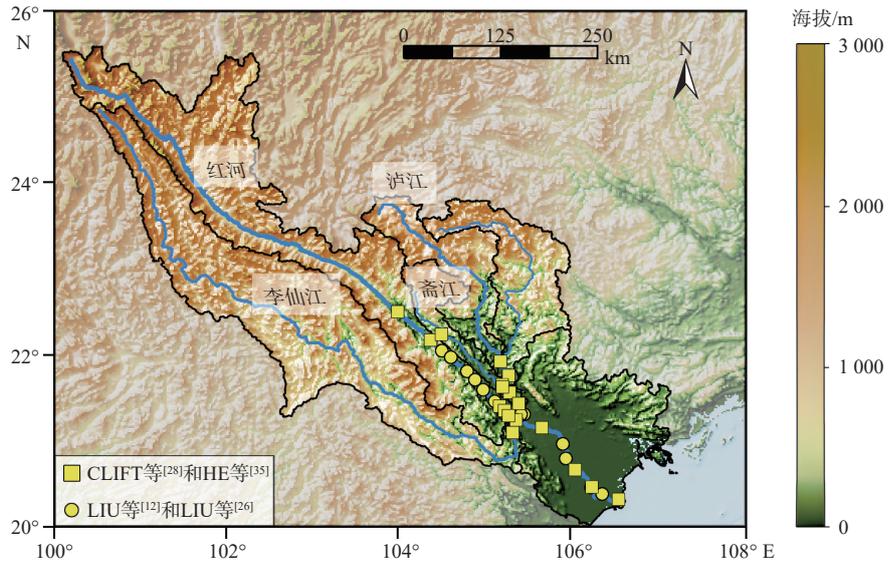


图 1 红河流域地形图及采样点位置

Fig.1 Topography of the Red River catchment and the sampling locations

表 2 各样品上游流域的环境参数

Table 2 Environmental parameters of the upstream catchment

粒径/ $\mu\text{m}$	样品编号	河流	温度/ $^{\circ}\text{C}$	降雨/ ( $\text{mm}/\text{a}$ )	海拔/ $\text{m}$	坡度/ $^{\circ}$	流域面积 $/\text{km}^2$	沉积岩/ $\%$	基性—超基 性岩/ $\%$	中—酸性岩 $\%$	变质岩/ $\%$
< 2 和 < 63	RS04	泸江	19.2	1 590	892	3.4	3.2	75.0	3.3	1.9	19.9
	RS05	红河	18.7	1 342	1 251	4.8	8.9	77.5	6.5	5.0	10.9
	RS06	泸江	19.2	1 588	909	3.4	3.1	75.3	2.6	1.9	20.1
	RS07	嵩江	19.8	1 715	781	3.8	0.6	46.0	13.9	2.4	37.7
	RS11、12、13	红河	17.5	1 158	1 533	5	3.7	68.3	3.4	6.1	22.2
	RS15、16、17	红河	17.7	1 202	1 464	5	4.0	68.2	5.7	5.6	20.4
	RS20、21	红河	18	1 227	1 388	4.8	4.3	67.6	7.7	5.2	19.6
	RS23、24	李仙江	19.4	1 451	1 124	4.9	4.5	87.0	5.4	4.9	2.8
	RS30、32	红河	19.6	1 454	976	3.9	14.5	79.6	4.8	3.9	11.7
	63~2 000	L5946、5947	泸江	19.2	1 590	892	3.4	3.2	75.0	3.3	1.9
R5937、5938、 VN05060702		红河	18	1 227	1 388	4.8	4.3	67.6	7.7	5.2	19.6
D5943、VN05060701		李仙江	19.4	1 451	1 124	4.9	4.5	87.0	5.4	4.9	2.8
M5942		红河	19.6	1 454	976	3.9	14.5	79.6	4.8	3.9	11.7
R5939		红河	18.9	1 407	1 157	4.5	12.0	76.8	5.7	4.2	13.3
L5944		泸江	18.5	1 581	1 060	3.1	1.1	69.2	0.0	3.7	21.1
L5945		泸江	18.9	1 558	955	3.4	2.5	70.2	0.2	1.8	14.4
VN05060710		红河	17.5	1 158	1 533	5	3.7	68.3	3.4	6.1	22.2
VN05060801		红河	17.2	1 100	1 597	5	3.4	70.7	0.9	4.9	23.5
VN05060805		嵩江	18.5	1 694	1 067	4.6	0.4	61.3	2.5	3.5	32.7
VN05060806	嵩江	19.8	1 715	781	3.8	0.6	46.0	13.9	2.4	37.7	
VN05060807	泸江	19.2	1 588	909	3.4	3.1	75.3	2.6	1.9	20.1	

和降雨为 1970—2000 年的年平均值, 数据来源于 WorldClim 数据库<sup>[37]</sup>。高程数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的 ETOPO1 数据库, 并基于此使用 ArcGIS 的坡度分析工具计算了红河流域的坡度分布。沉积岩、变质岩、火成岩的面积占比则根据东亚东南亚地学计划协调委员会(CCOP)东南亚地质数据库的全球岩性分布图计算

得到。以上数据分辨率均为 1 km。

### 3 结果

#### 3.1 红河不同粒径沉积物主量元素特征

河流沉积物中的元素含量由富含该元素的矿

物丰度决定。一般来说,河流沉积物主要为3种矿物的混合物,分别为石英(富含 $\text{SiO}_2$ )、长石(富含Na、K、Ca、Mg等风化易迁移元素)和黏土矿物。前两者的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 较低,主要富集在粗颗粒当中,黏土矿物是长石等矿物的风化产物,富集Al等不易迁移元素, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 较高。因此, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 是反映水动力分选和沉积物粒度的可靠指标<sup>[38-39]</sup>。

本文中,粗粒级样品的 $\text{SiO}_2$ 含量均 $>65\%$ ;细粒级样品中 $<2\ \mu\text{m}$ 样品的 $\text{SiO}_2$ 含量明显偏低( $<50\%$ ),而 $<63\ \mu\text{m}$ 样品的 $\text{SiO}_2$ 含量则介于前两者之间(表1)。所有样品的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 呈负相关( $R=-0.97$ ,图2a),该相关性在粗粒级样品中最为显著( $R=-0.96$ ),但细粒级样品( $<2\ \mu\text{m}$ 和 $<63\ \mu\text{m}$ )的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 则无明显相关性。粗粒级样品的

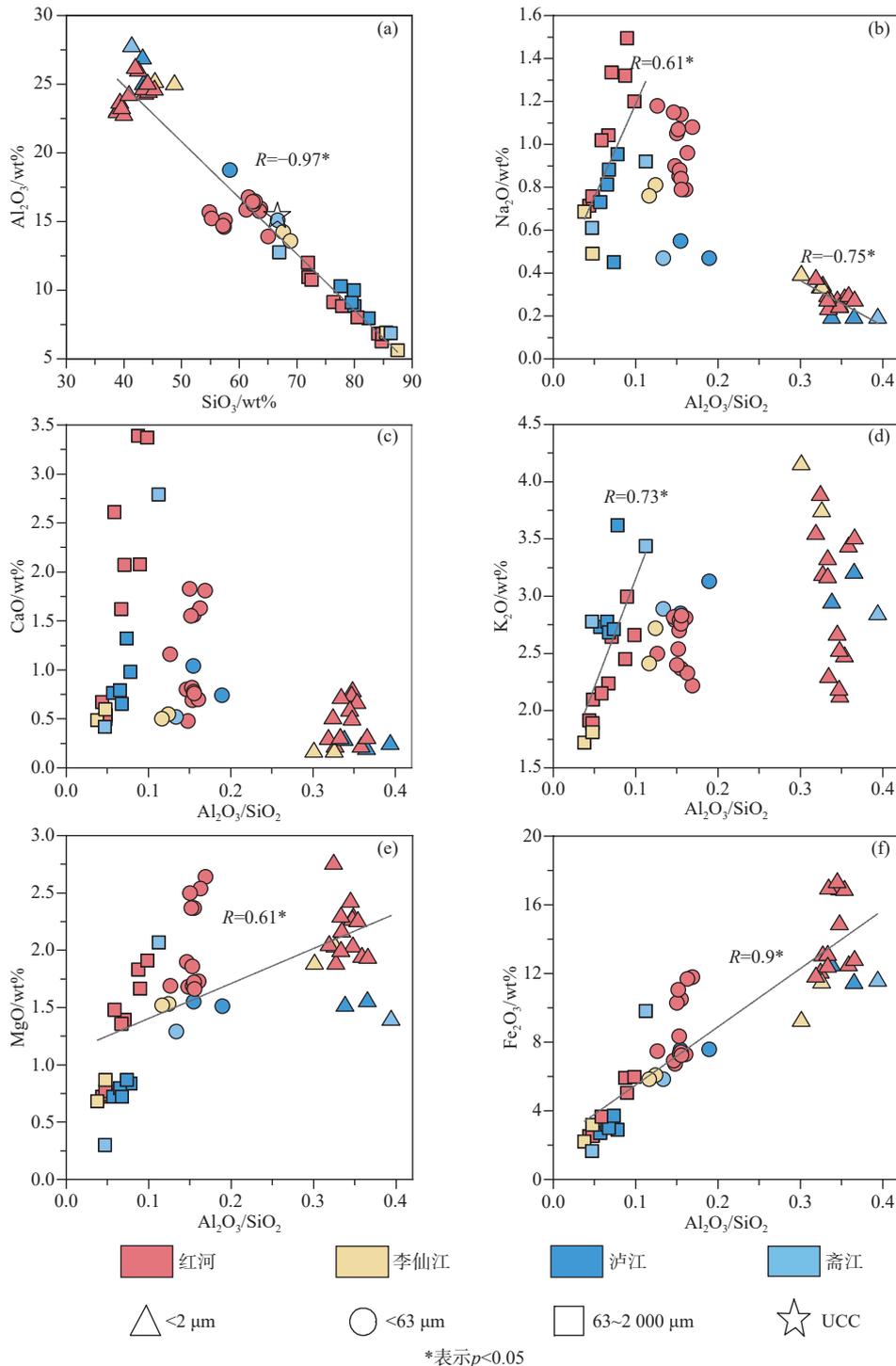


图2 红河沉积物主量元素组成与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 的关系

Fig.2 The correlation of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  with major elements in the Red River sediments

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 均 < 0.1, < 63 μm 样品为 0.1~0.2, 而 < 2 μm 样品则明显偏高 (> 0.3)。

本文根据红河沉积物主量元素含量与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 的关系, 来比较不同粒级下各元素在化学风化和河流搬运过程中的行为差异 (图 2)。不同粒级的 Na<sub>2</sub>O 呈现不同的规律, 在粗粒级样品中, Na<sub>2</sub>O 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 呈正相关 (R=0.61), 在 < 2 μm 的样品中呈负相关 (R=-0.75); 在 < 63 μm 的样品中则无明显规律 (图 2b)。CaO 在粗粒级样品中变化较大, 在 < 2 μm 样品中明显亏损 (图 2c)。K<sub>2</sub>O 在粗粒级样品中与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 呈正相关 (R=0.73), 在细粒级样品中含量变化范围较大, 无明显规律 (图 2d)。MgO 整体上与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 呈正相关 (R=0.61), 但在细粒级沉积物中规律并不明显 (图 2e)。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 则呈良好的正相关 (R=0.9, 图 2f)。

### 3.2 红河及其支流沉积物的化学风化特征

本文根据收集数据的主量元素重新计算了各红河沉积物样品的 CIA 值 (表 1、图 3)。对于粗粒级样品来说, 其 CIA 介于 55.8~69.3, 平均为 61, 反映了较弱的风化程度。在与李仙江和泸江汇合前, 红河干流沉积物 CIA 呈沿程下降趋势, 平均为 59.2, 而李仙江、泸江和斋江等支流沉积物的 CIA 平均值分别为 62.5、62.3 和 62.2, 明显高于干流。在汇合后, 红河沉积物 CIA 升高至 60.3。对于粒径 < 63 μm 的样品来说, 其 CIA 介于 65.6~77.3, 平均为 71.8, 反映了中等的风化程度。在与李仙江和泸江汇合前, 红河干流沉积物 CIA 沿程逐渐升高, 平均为

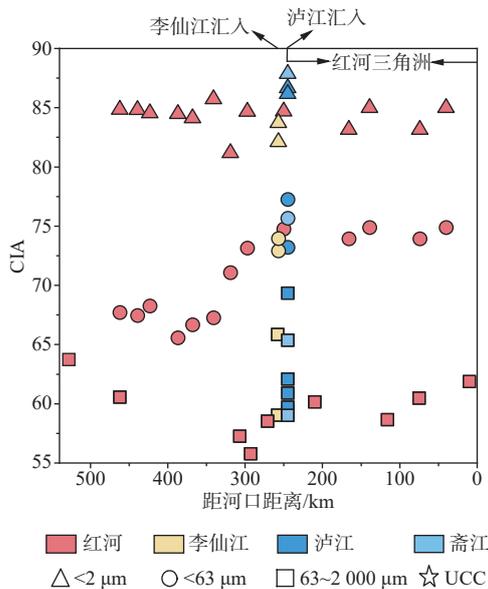


图 3 红河及其支流沉积物的 CIA

Fig.3 CIA of the sediments from the Red River and its tributaries

68.4, 而李仙江、泸江和斋江等支流沉积物的 CIA 平均值分别为 73.4、75.2 和 75.7, 明显高于干流。在汇合后, 红河沉积物 CIA 升高至 74.2。对于 < 2 μm 的样品, 其 CIA 介于 81.2~87.9, 平均为 84.6, 反映了较强的风化程度。与李仙江和泸江汇合前后的红河沉积物 CIA 无明显变化, 平均值分别为 84.3 和 84.1, 而李仙江、泸江和斋江等支流沉积物的 CIA 平均值分别为 82.9、86.4 和 87.9。

### 3.3 环境参数和沉积物 CIA 的相关性

本文提取了各采样点之上的流域范围, 并计算了对应流域的环境参数 (表 2)。相比于各支流, 红河干流流域的温度和降雨量较低, 海拔和坡度较高。李仙江和红河干流有相似的气候和地形特征, 而泸江及其支流斋江则更加温暖潮湿且地形平坦。从岩性组成来看, 各流域均以沉积岩为主, 其中, 李仙江流域的沉积岩出露面积占比达 87%, 红河干流和泸江流域内有较多变质岩分布 (约 20%), 而斋江流域的岩性则明显不同于其他流域, 以沉积岩 (46%) 和变质岩 (37%) 为主, 还分布有较多基性—超基性岩 (13.9%)。

不同粒级样品的 CIA 和各环境参数的相关性分析结果如图 4 所示。其中, 粗粒级样品的 CIA 与所有参数均无相关性。粒径 < 63 μm 样品的 CIA 与温度、降雨和海拔的相关性较高 (|R| > 0.8), 与坡度和中-酸性岩面积占比的相关性次之, 分别为 -0.68 和 -0.72。粒径 < 2 μm 样品的 CIA 与中-酸性岩和变质岩面积占比的相关性较高 (|R| > 0.7), 与降雨和坡度的相关性次之, 分别为 0.68 和 -0.69。总体来看, 细粒级沉积物的 CIA 与气候和地形参数的相关性趋势基本相似, 但与岩性参数的相关性有较大差异。

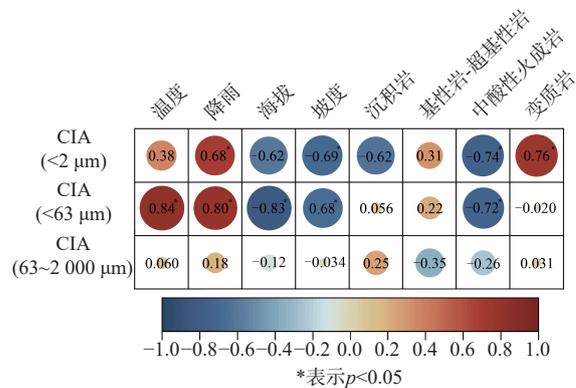


图 4 不同粒级沉积物的 CIA 与环境参数的相关性

Fig.4 The correlation between environmental parameters and CIA of sediments with different grain sizes

## 4 讨论

### 4.1 不同粒度沉积物的化学风化特征差异

沉积物碎屑组分的地球化学组成往往受沉积物粒度特征的影响<sup>[38,40-43]</sup>。本文中,红河沉积物粗粒级和细粒级样品的主量元素组成有明显差异。粗粒级样品的 $\text{SiO}_2$ 含量较高( $>66\%$ ),甚至高于上地壳中的含量(图2a),反映了石英的富集,这也导致了 $\text{Na}_2\text{O}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 的正相关性。而 $<2\ \mu\text{m}$ 样品的 $\text{Na}_2\text{O}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 呈负相关则是由于化学风化过程中Na被淋出导致。Ca同样会优先淋滤,因此,黏土粒级的CaO明显亏损,但粗粒级的CaO含量变化范围较大,可能是受流域内碳酸岩的影响(图2c)。粗粒级样品中 $\text{K}_2\text{O}$ 的分布规律和 $\text{Na}_2\text{O}$ 类似,即与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 成正相关,仍取决于石英稀释作用。但 $\text{K}_2\text{O}$ 在细粒级样品中的含量则主要由样品所处的化学风化阶段决定。在风化早期,K几乎不发生淋滤,主要富集在伊利石中。随着风化加强,K开始淋失,伊利石转化为高岭石。 $\text{Mg}$ 在化学风化中易亏损,但其含量同样会受到碳酸盐岩的影响,并没有呈现明显的规律。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 主要富集于自生的细颗粒铁锰氧化物中,且易被黏土矿物吸附,因此,与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 呈良好的正相关( $R=0.9$ ,图2f)。总之,粗粒级样品的主量元素特征主要由水动力分选导致,即反映的可能是石英和长石的混合程度。相比之下,细粒级样品更能体现化学风化中的元素行为,对沉积物进行粒度分级能够有效避免水动力分选造成的粒度效应<sup>[24,44-45]</sup>。通过可迁移碱金属和碱土金属与二氧化硅及氧化铝含量的对比可以鉴别化学风化、粒度效应及再旋回过程中石英富集对沉积物地球化学组成的影响<sup>[46]</sup>。粗粒级样品分布基本平行于石英富集趋势线,而细粒级沉积物尤其是 $<2\ \mu\text{m}$ 的样品则主要受化学风化控制(图5)。

粗粒级沉积物的CIA普遍较低且分布无明显规律,即使是上游流域几乎相同的两个样品之间也可能存在较大差异(如泸江和李仙江的近河口样品),这可能是由于多次沉积旋回导致,并不能反映实际风化状况。枯水季采集的表层细粒沉积物可以近似代替悬浮物,其在搬运过程中已经充分混合,因此可以指示采样点之上流域的化学风化。粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 的样品中红河干流样品的CIA沿程逐渐增加,可能与红河从上游断裂带到下游三角洲的构造及气候条件差异有关。在与李仙江和泸江两大支流汇合

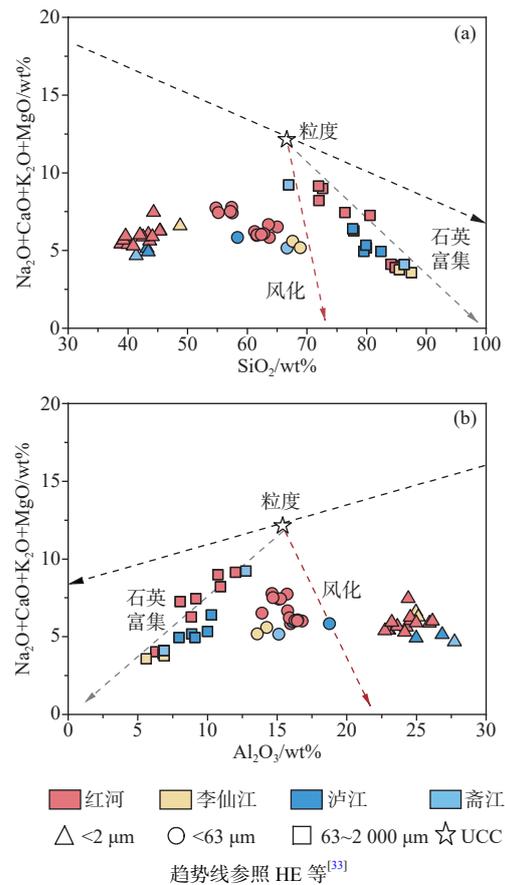


图5 粒度、风化和石英富集对红河沉积物主量元素的影响

Fig. 5 The influence of grain size, weathering, and quartz enrichment on major elements of sediment in the Red River

后,红河干流沉积物CIA升高至74.2,近似于三者均值(73.9)。DUAN等<sup>[47]</sup>基于红河河口沉积物Sr-Nd同位素推算出在汇合点之前的3条河流对红河三角洲的泥沙贡献大致相等,也表明河口区 $<63\ \mu\text{m}$ 的样品可以代表红河沉积物的平均组成。三角洲样品的CIA相对稳定,可能是由于该河段自然条件稳定且没有较大支流输入。 $<2\ \mu\text{m}$ 样品的CIA差异较小,泸江及斋江沉积物CIA较高,李仙江较低。而红河干流样品并没有呈现明显的沿程变化,这可能由于各沉积物样品的黏土矿物组成相似,均呈现伊利石为主、高岭石和绿泥石次之的特征<sup>[26]</sup>。

### 4.2 红河流域环境参数对河流沉积物CIA的影响

#### 4.2.1 气候因素——温度和降雨

流域的温度和降雨是影响河流沉积物CIA的主要因素之一,温暖和潮湿的环境更有利于化学风化<sup>[24,48-49]</sup>,但二者究竟哪个占主导地位在不同时空尺度上结论并不一致<sup>[24]</sup>。本研究中,红河流域沉积物中 $<63\ \mu\text{m}$ 样品的CIA与温度有较好的正相关性( $R=0.84$ ),而 $<2\ \mu\text{m}$ 的样品则没有显示明显相关

性。在全球空间尺度上, 温度通过控制长石类矿物的溶解来影响细粒沉积物的 CIA<sup>[24]</sup>, 其中  $\Delta\text{MAT} = \Delta\text{CIA}/1.02$ 。本文各样品采样点上游流域平均温

度相近, 仅相差 1~2 °C, 而 <2 μm 样品的 CIA 差异本身较小, 因此, CIA 与温度没有明显相关性 (图 6a)。但 <63 μm 和 <2 μm 样品的 CIA 与降雨

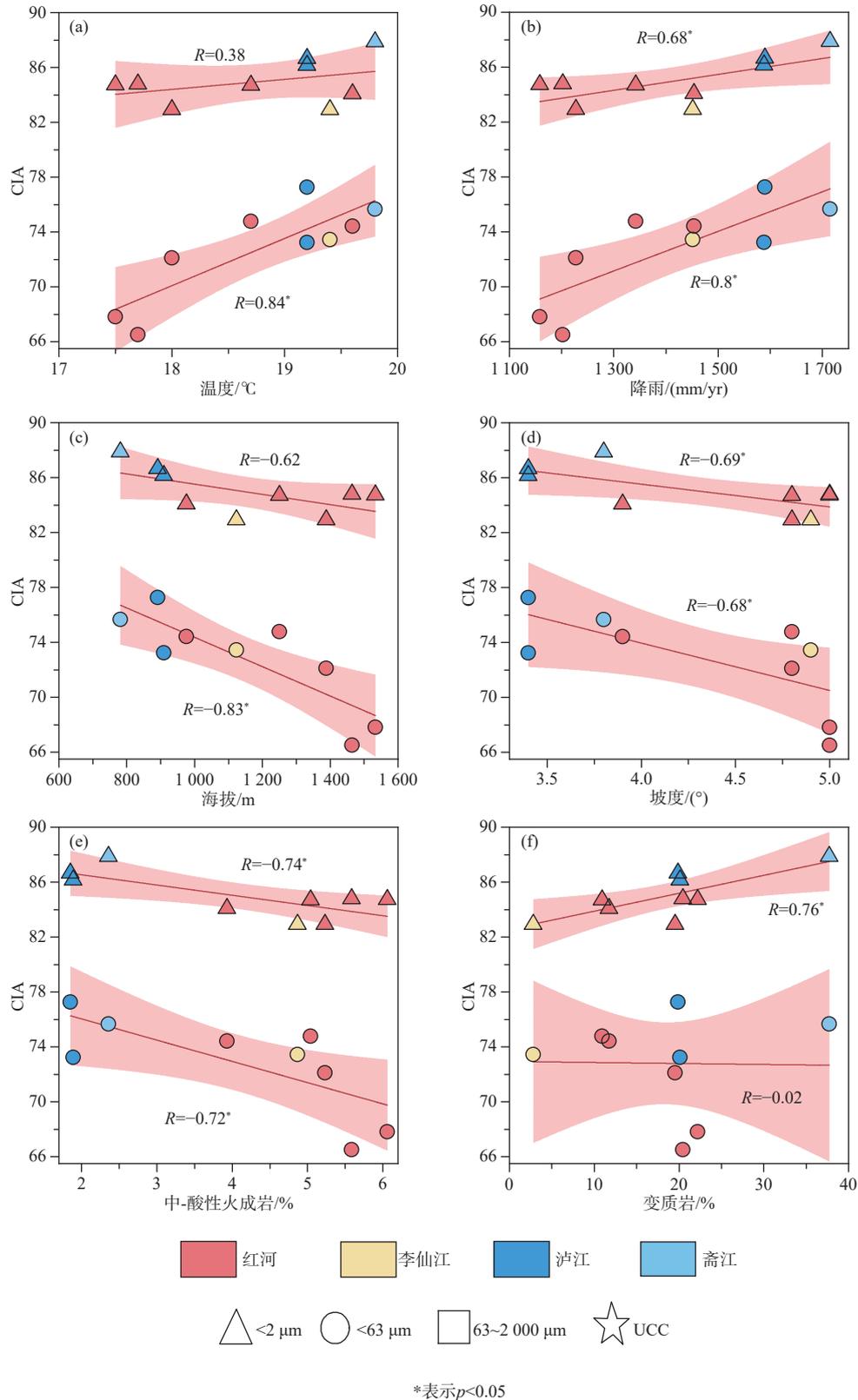


图 6 细粒级沉积物的 CIA 和环境参数的相关性

Fig.6 The correlation between environmental parameters and CIA of the fine-grained sediments in the Red River

均有良好的正相关性,  $R$  分别为 0.8 和 0.68, 表明了降雨对化学风化的主导作用。降雨可以为化学风化提供流体环境从而促进阳离子溶解<sup>[50]</sup>。红河上游山区较为干燥, 下游河谷及三角洲降雨充沛, 沉积物 CIA 也表现出沿程增加的趋势。此外, 泸江及其支流斋江的降雨量明显高于其他河流, 其沉积物表现出较高的 CIA(图 6b)。总之, 由于红河内部各流域温差较小, 因此, 降雨的差异对沉积物 CIA 的影响更为突出。

#### 4.2.2 地形因素——海拔和坡度

本研究细粒级样品的 CIA 与海拔和坡度有良好的负相关性(图 6c、d)。红河上游海拔较高, 地形陡峭, 流域物理侵蚀强, 侵蚀速率可达  $0.2 \text{ mm/a}$ <sup>[51]</sup>。沉积物在风化壳的滞留时间短, 难以充分风化, 其 CIA 较低。下游为炎热潮湿的三角洲平原, 其土壤层内细颗粒沉积物 CIA 可达 90<sup>[35]</sup>, 沉积物充分风化, CIA 较高。此外, 红河干流和李仙江的沉积物 CIA 明显低于泸江水系(图 3)。前两者大部分河段位于构造活跃的高原山区, 平均海拔  $> 1\ 000 \text{ m}$ , 平均坡度约为  $5^\circ$ , 物理侵蚀速率较高, 含沙量分别为  $2.4$  和  $2.1 \text{ kg/m}^3$ <sup>[30]</sup>。而泸江大部分流域位于山地-平原的过渡带, 平均海拔  $< 1\ 000 \text{ m}$ , 平均坡度约为  $3^\circ$ 。物理侵蚀弱, 含沙量仅为  $0.52 \text{ kg/m}^3$ <sup>[30]</sup>, 明显低于前两者。总之, 海拔、坡度等地形差异也是造成红河流域沉积物 CIA 差异的主要原因之一, 陡峭的地形和活跃的构造活动会加速物理侵蚀, 减少风化反应时间, 导致化学风化程度低。

#### 4.2.3 流域基岩岩性

流域源区母岩的岩性也可能会对流域风化产生重要影响<sup>[52]</sup>, 其对于河流水化学的控制作用已经被广泛报道<sup>[7,52-53]</sup>。本研究对不同粒级沉积物的 CIA 及其对应流域内不同岩性的出露面积占比做了相关性分析。结果表明, 粗粒沉积物的 CIA 与各岩性均无相关性, 细粒级沉积物的 CIA 与中酸性火成岩和变质岩的出露面积占比有良好的相关性(图 6e、f)。沉积岩普遍经历过 1 次或多次的“风化-搬运-沉积-成岩-再风化”的旋回过程, 其风化剥蚀产生的沉积物会继承先前旋回的风化历史, 是各旋回的累积产物, 从而表现出较高的风化程度(如较高的 CIA)<sup>[54]</sup>。此外, 沉积岩也是流域沉积物重要的物质来源<sup>[7]</sup>。本文的沉积岩出露面积占比与 CIA 并没有明显相关性, 且沉积岩分布最广的李仙江的 CIA 最低, 分布最少的斋江的沉积物 CIA 最

高。细粒沉积物的 CIA 与中—酸性火成岩面积占比呈负相关(图 6e), 但火成岩在各流域分布较少 ( $< 7\%$ ), 不太可能对沉积物的 CIA 产生明显影响。中—酸性火成岩多分布在上游构造活跃区, 该区域温度降雨较低, 海拔坡度较高, 因此, 导致了火成岩面积占比和沉积物 CIA 的负相关性。变质岩面积占比和  $< 2 \mu\text{m}$  样品 CIA 的正相关性主要依赖于斋江样品的贡献, 因为斋江流域变质岩面积占比明显超出其他流域(图 6f、表 2)。总体来看, 岩性参数和 CIA 的相关性可能并没有直接的因果性, 而是由于不同岩石在分布空间上气候及地形的差异所造成的 CIA 差异。

## 5 结论

(1) 本文对比了红河及其支流不同粒级沉积物的主量元素特征并计算其 CIA, 结果表明, 粗粒级沉积物的主量元素分布主要受粒度效应和石英稀释效应控制, 细粒沉积物则主要反映化学风化。红河干流沉积物的 CIA 沿程升高, 直至与李仙江和泸江汇合后保持稳定, 其中, 李仙江沉积物的 CIA 较低, 泸江及其支流斋江的 CIA 较高。

(2) 红河流域沉积物 CIA 与采样点之上流域的气候、地形及岩性参数相关性分析表明, 粗粒级沉积物的 CIA 与所有环境参数均无相关性, 这可能说明粗粒级沉积物的地球化学组成难以准确反映流域化学风化信息。细粒级沉积物的 CIA 与气候和地形, 尤其是降雨和坡度有良好的相关性, 说明气候湿润、地形陡峭的流域有更强的化学风化; 而 CIA 与岩性参数的相关性可能是由于岩性分布区域的气候和地形导致, 岩性并不是红河各流域沉积物 CIA 差异的直接因素。

#### 参考文献:

- [1] BERNER R A, LASAGA A C, GARRELS R M. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years[J]. *American Journal of Science*, 1983, 283(7): 641-683.
- [2] WALKER J C G, HAYS P B, KASTING J F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of earth's surface-temperature[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 1981, 86(10): 9776-9782.
- [3] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [4] 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.
- [5] PARKER A F W. An index of weathering for silicate rocks[J]. *Geological Magazine*, 1970, 107: 501-504.
- [6] HARNOIS L. The CIW index: a new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3): 319-322.
- [7] GAILLARDET J, DUPRÉ B, ALLÈGRE C J. Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(23): 4037-4051.
- [8] GARZANTI E, PADOAN M, SETTI M, et al. Weathering geochemistry and Sr-Nd fingerprints of equatorial upper Nile and Congo muds[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(2): 292-316.
- [9] CHETELAT B, LIU C Q, WANG Q, et al. Assessing the influence of lithology on weathering indices of Changjiang River sediments[J]. *Chemical Geology*, 2013, 359: 108-115.
- [10] SHAO J Q, YANG S Y, LI C. Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: inferences from analysis of fluvial sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 265/266: 110-120.
- [11] 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.
- [12] LIU Z F, ZHAO Y L, COLIN C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [13] VITAL H, STATTEGGER K. Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River[J]. *Chemical Geology*, 2000, 168(1): 151-168.
- [14] TRIPATHI J K, GHAZANFARI P, RAJAMANI V, et al. Geochemistry of sediments of the Ganges alluvial plains: evidence of large-scale sediment recycling[J]. *Quaternary International*, 2007, 159(1): 119-130.
- [15] 方海超, 黄朋, 孙家文, 等. 鸭绿江端元粒度分级样品常量元素控制因素分析及物源识别 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 72-83.
- FANG H C, HUANG P, SUN J W, et al. Provenance and controlling factors of major elements in graded components of sediments from the Yalu River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 72-83.
- [16] 苏妮, 毕磊, 郭玉龙, 等. 木兰溪河口及邻近海域表层沉积物稀土元素组成与物源判别 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 150-159.
- SU N, BI L, GUO Y L, et al. Rare earth element compositions and provenance implications: a case from sediments of the Mulanxi River Estuary and surrounding sea area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 150-159.
- [17] DINIS P, GARZANTI E, VERMEESCH P, et al. Climatic zonation and weathering control on sediment composition (Angola)[J]. *Chemical Geology*, 2017, 467: 110-121.
- [18] WEST A, GALY A, BICKLE M. Tectonic and climatic controls on silicate weathering[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(1/2): 211-228.
- [19] EGLI M, MIRABELLA A, SARTORI G. The role of climate and vegetation in weathering and clay mineral formation in Late Quaternary soils of the Swiss and Italian Alps[J]. *Geomorphology*, 2008, 102(3): 307-324.
- [20] JU M, WAN S, CLIFT P D, et al. History of human activity in South China since 7 cal ka BP: evidence from a sediment record in the South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2024, 333: 108683.
- [21] RAYMO M E, RUDDIMAN W F. Tectonic forcing of Late Cenozoic climate[J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 117-122.
- [22] BI L, YANG S Y, LI C, et al. Geochemistry of river-borne clays entering the East China Sea indicates two contrasting types of weathering and sediment transport processes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(9): 3034-3052.
- [23] YANG J H, CAWOOD P A, DU Y S, et al. Reconstructing Early Permian tropical climates from chemical weathering indices[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2016, 128(5/6): 739-751.
- [24] DENG K, YANG S Y, GUO Y L. A global temperature control of silicate weathering intensity[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1781.
- [25] LI C, YANG S Y. Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins?[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(2): 111-127.
- [26] LIU Z F, COLIN C, HUANG W, 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.
- [27] CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns[J]. *Tectonics*, 2004, 23(1): 601-620.
- [28] CLIFT P D, LONG H V, HINTON R, et al. Evolving East Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(4): Q04039.
- [29] LI Z, SAITO Y, MATSUMOTO E, et al. Climate change and human impact on the Song Hong (Red River) Delta, Vietnam, during the Holocene[J]. *Quaternary International*, 2006, 144(1): 4-28.
- [30] LE T P Q, GARNIER J, GILLES B, et al. The changing flow regime and sediment load of the Red River, Viet Nam[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(1): 199-214.
- [31] LAN C Y, CHUNG S L, SHEN J J S, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rocks from northern Vietnam[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(3): 267-280.
- [32] LELOUP P H, ARNAUD N, LACASSIN R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia[J]. *Journal of Geo-*

- physical Research: Solid Earth, 2001, 106(B4): 6683-6732.
- [33] BORGES J, HUH Y. Petrography and chemistry of the bed sediments of the Red River in China and Vietnam: provenance and chemical weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 194(3/4): 155-168.
- [34] TRAN H, POLYAKOV G V, TRAN A T, et al. Intraplate Magmatism and Metallogeny of North Vietnam[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [35] HE J, GARZANTI E, JIANG T, et al. Mineralogy and geochemistry of modern Red River sediments (North Vietnam): provenance and weathering implications[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2022, 92: 1169-1185.
- [36] LEHNER B, GRILL G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(15): 2171-2186.
- [37] FICK S E, HIJMANS R J. World Clim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [38] BOUCHEZ J, GAILLARDET J, FRANCE-LANORD C, et al. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: clues from Amazon River depth profiles[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(3): Q03008.
- [39] LI F L, YANG S Y, BREECKER D O, et al. Responses of silicate weathering intensity to the Pliocene-Quaternary cooling in East and Southeast Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 578: 117301.
- [40] GARZANTI E, ANDÓ S, FRANCE-LANORD C, et al. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments: 2. suspended-load silt (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1): 107-120.
- [41] GARZANTI E, ANDÓ S, FRANCE-LANORD C, et al. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments: 1. bed-load sand (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 299(3): 368-381.
- [42] LUPKER M, FRANCE-LANORD C, GALY V, et al. Predominant floodplain over mountain weathering of Himalayan sediments (Ganga Basin)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 84: 410-432.
- [43] 宁泽, 张勇, 林学辉, 等. 闽北近岸海域表层沉积物的风化特征及物源指示[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(10): 12-21.  
NING Z, ZHANG Y, LIN X H, et al. Weathering characteristics and provenance of the surface sediments in the offshore of northern Fujian[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(10): 12-21.
- [44] HATANO N, YOSHIDA K, SASAO E. Effects of grain size on the chemical weathering index: a case study of Neogene fluvial sediments in southwest Japan[J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 386: 1-8.
- [45] EYNATTEN H V, TOLOSANA-DELGADO R, KARIUS V. Sediment generation in modern glacial settings: grain-size and source-rock control on sediment composition[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 280: 80-92.
- [46] GARZANTI E, VERMEESCH P, VEZZOLI G, et al. Congo River sand and the equatorial quartz factory[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 197: 102918.
- [47] DUAN Z F, LI C, GUO Y L, et al. Sr-Nd isotopic fingerprints of Red River sediments and its implication for provenance discrimination in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2023, 457: 106997.
- [48] PANG H L, PAN B T, GARZANTI E, et al. Mineralogy and geochemistry of modern Yellow River sediments: implications for weathering and provenance[J]. *Chemical Geology*, 2018, 488: 76-86.
- [49] RASHID S A, GANAI J A, MASOODI A, et al. Major and trace element geochemistry of lake sediments, India: implications for weathering and climate control[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(8): 5677-5684.
- [50] MAHER K. The role of fluid residence time and topographic scales in determining chemical fluxes from landscapes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312(1): 48-58.
- [51] SCHOENBOHM, MARIE L. Cenozoic tectonic and geomorphic evolution of the Red River region, Yunnan Province, China[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [52] MEYBECK M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. *American Journal of Science*, 1987, 287(5): 401-428.
- [53] CHETELAT B, LIU C Q, ZHAO Z Q, et al. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: anthropogenic impacts and chemical weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(17): 4254-4277.
- [54] GUO Y L, YANG S Y, SU N, et al. Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 227: 48-63.

## Weathering characteristics in the Red River catchment and controlling factors revealed by sediments with different grain sizes

WANG Shijun<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1\*</sup>, DUAN Zhifei<sup>1</sup>, GUO Yulong<sup>1</sup>, DUAN Xiaoyong<sup>2</sup>, YIN Ping<sup>2</sup>, YANG Shouye<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Historically, the Red River served as the outlet to the sea for major rivers in the eastern edge of the Tibetan Plateau and is currently one of the main sources of sediment to the northern South China Sea. It is an ideal region for studying the source-sink processes and tectonic-climate-weathering relationships in the South China Sea since the uplift of the Tibetan Plateau. To understand the main controlling factors of silicate weathering in the catchment, we compared the major element characteristics and CIA (chemical index of alteration) of sediments with different grain sizes in the Red River and its tributaries, and analyzed the correlation between CIA and environmental parameters regarding climate, topography, and lithology. Results indicate that coarse-grained sediments are a mixture of quartz and feldspar, and their major element content is significantly influenced by grain size effects and quartz dilution effects, showing no correlation with any environmental parameters. Hence, their CIA may not accurately reflect chemical weathering. In contrast, fine-grained sediments can represent the average composition of the upstream catchment, and their CIA primarily reflects the degree of chemical weathering in the catchment. Through the correlation analysis between the CIA of fine-grained sediments and environmental parameters, we found that rainfall and slope are the main controlling factors on weathering in the Red River catchment.

**Key words:** chemical weathering; Red River; sediments; CIA; grain-size effect