三峡水库沉积泥沙常量元素氧化物含量沿程分布特征

周 敏[1,2], 李进林[2], 韦 杰[1,3], 贺秀斌[4], 唐 强[5], 吴胜军[2], 黄 平[2]
(1.重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2.中国科学院 重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 3.三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331; 4.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610213; 5.西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

摘 要: [目的]研究三峡水库沉积泥沙常量元素氧化物组成及其含量的沿程空间分布,为山区河道型水库泥沙管理提供科学依据。[方法]以三峡水库泥沙为研究对象,分别采集河床沉积泥沙和悬移质泥沙样品,测定颗粒组成和常量元素氧化物组成及含量,计算化学蚀变指数(CIA)、钠钾比($R_{Na/K}$)、硅铝比($R_{Si/Al}$)、退碱系数(W)和残积系数(I_k),分析沉积泥沙地球化学指标的沿程空间分布特征。[结果]①沉积泥沙以细颗粒为主,粉粒、黏粒和砂粒平均含量分别为87.04%,6.91%和6.05%。泥沙的全局分选性较差,偏度呈细偏至对称分布,峰态为中等。自上游至下游,沉积泥沙粒径沿程逐渐细化,颗粒分选性逐渐明显。②沉积泥沙常量元素以非金属氧化物SiO_2为主,金属氧化物Al_2O_3,Fe_2O_3和CaO次之,K_2O,MgO,Na_2O含量较低,悬移质泥沙的CaO和MgO含量均略高于Fe_2O_3和K_2O。空间分布上,SiO_2和Na_2O含量在沿程方向上呈递减趋势,Al_2O_3,Fe_2O_3,K_2O和MgO含量则逐渐增加,而CaO含量未表现出明显分布规律。相较于平均上陆壳标准化值(UCC),泥沙中的SiO_2,K_2O和Na_2O均呈亏损状态,Al_2O_3,Fe_2O_3,CaO和MgO则相对富集。③三峡水库泥沙正处于温暖湿润气候下的中等化学风化阶段,沉积泥沙和悬移质泥沙的CIA,$R_{Na/K}$,$R_{Si/Al}$,W和I_k均值分别为73.26和70.79,0.39和0.68,5.25和5.68,0.78和0.94,1.07和0.85。④除CaO以外,沉积泥沙的主要氧化物含量与颗粒组成显著相关($p<0.05$)。[结论]三峡水库沉积泥沙常量元素氧化物含量在其沿程方向具有明显的空间分异特征,这主要是受潜在物源的相对贡献、水动力分选引起的粒度效应等因素的影响。

关键词: 沉积泥沙; 氧化物; 地球化学特征; 空间分布; 三峡水库
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0172-11 **中图分类号:** X524, P595

文献参数: 周敏, 李进林, 韦杰, 等.三峡水库沉积泥沙常量元素氧化物含量沿程分布特征[J].水土保持通报, 2026,46(4):172-182. Zhou Min, Li Jinlin, Wei Jie, et al. Distribution characteristics of major element oxide contents in sediments deposited along Three Gorges reservoir [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(4):172-182.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.002 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.002**

Distribution characteristics of major element oxide contents in sediments deposited along Three Gorges reservoir

Zhou Min[1,2], Li Jinlin[2], Wei Jie[1,3], He Xiubin[4], Tang Qiang[5], Wu Shengjun[2], Huang Ping[2]
(1.*School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing* 401331, *China*; 2.*Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing* 400714, *China*; 3.*Chongqing Field Observation and Research Station of Earth Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing* 401331, *China*; 4.*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610213, *China*; 5.*School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial distribution of the composition and contents of major element oxides in sediments along the Three Gorges reservoir was investigated in order to provide a scientific basis for sediment

收稿日期:2025-12-06 **修回日期:**2026-01-19 **采用日期:**2026-01-21
资助项目:三峡后续工作科研项目"三峡水库消落区河库水动力环境下地质灾害活动规律与减灾对策研究"(5000002024CC20004);国家自然科学基金项目(42207411,42371071);重庆市博士后出站留(来)渝资助项目;重庆市两江新区出站博士后科研经费支持项目
第一作者:周敏(2000—),女(汉族),湖南省邵阳县人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email:minzhou202511@163.com。
通信作者:李进林(1991—),男(汉族),重庆市开州区人,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email:chinlin_lee@sina.com。

management in mountainous river-type reservoirs. [Methods] Taking sediments from the Three Gorges reservoir as the research object, riverbed and suspended sediment samples were collected, and their grain-size composition and contents of major element oxides were measured. The chemical index of alteration (CIA), Na/K ratio ($R_{Na/K}$), Si/Al ratio ($R_{Si/Al}$), dealkalization coefficient (W), and residual coefficient (I_K) were calculated to analyze the spatial distribution of sediment geochemical indicators along the reservoir. [Results] ① The sediments were dominated by fine particles, with average contents of silt, clay, and sand of 87.04%, 6.91%, and 6.05%, respectively. Overall, the sediments showed poor sorting, with skewness ranging from fine-skewed to symmetrical, and kurtosis mostly showing mesokurtic characteristics. From upstream to downstream, sediment grain size gradually became finer, and particle sorting became more evident. ② Major element oxides in the sediments were dominated by the nonmetallic oxide SiO_2, followed by the metallic oxides Al_2O_3, Fe_2O_3, and CaO, while K_2O, MgO, and Na_2O were relatively low in content. In suspended sediments, CaO and MgO contents were slightly higher than those of Fe_2O_3 and K_2O. In terms of spatial distribution, SiO_2 and Na_2O contents showed decreasing trends along the reservoir, while Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O, and MgO gradually increased, and CaO showed no obvious spatial pattern. Compared with the upper continental crust (UCC), the sediments were depleted in SiO_2, K_2O, and Na_2O but enriched in Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, and MgO. ③ The sediments of the Three Gorges reservoir were in a moderate stage of chemical weathering under a warm and humid climate. The mean values of CIA, $R_{Na/K}$, $R_{Si/Al}$, W, and I_K were 73.26, 0.39, 5.25, 0.78, and 1.07 for riverbed sediments and 70.79, 0.68, 5.68, 0.94, and 0.85 for suspended sediments, respectively. ④ Except for CaO, the contents of major oxides in sediments were significantly correlated with grain-size composition ($p<0.05$). [Conclusion] The contents of major element oxides in sediments of the Three Gorges reservoir show distinct spatial differentiation along the reservoir, mainly influenced by factors such as the relative contributions of potential source materials and grain-size effects caused by hydrodynamic sorting.

Keywords: sediment; oxides; geochemical characteristics; spatial distribution; Three Gorges reservoir

侵蚀泥沙是河流系统中物质迁移、转化与沉积埋藏的关键载体,其化学元素组成记录了流域地貌形成演化、风化强度、沉积环境等信息[1]。常量元素通常以氧化物的形式赋存在泥沙颗粒中,其含量不仅反映了泥沙物源区的母岩类型及化学风化强度,也记录了沉积环境的氧化还原状态及物质循环过程[2-3]。因此,研究山区河道型水库沉积泥沙氧化物组成及其空间分布特征是深入理解水库泥沙沉积过程及其生态环境效应的基础,也可以为特大型水库泥沙管理提供科学依据。

水库沉积泥沙的氧化物丰度及其空间分布受物质来源、水动力分选、沉积环境变化、化学风化等多重因素的综合影响[3]。相比而言,化学风化作为地表物质循环的关键地球化学过程,对元素迁移与富集具有深远影响。化学风化过程中,元素的地球化学性质和活动性因元素的类别而异,风化特征进而表现出显著的差异[4]。研究表明,随着风化强度增强,碱金属和碱土金属元素逐渐淋失,而Al,Fe等不活泼元素则逐渐富集,这使泥沙的氧化物地球化学特征呈现出规律性的变化趋势[2,4]。基于此,Nesbitt等[5]提出了元素活动性顺序模型,并将化学风化过程划分为3个阶段,分别是早期Ca,Na的淋失,中期K的迁出和晚期Si的流失。作为泥沙中主要矿物的重要组成部分,常量元素氧化物的含量及比值不仅反映风化演化的阶段与程度,还深刻影响颗粒表面化学性质及吸附性能[6-7]。沉积泥沙中铁、铝氧化物等矿物表面对关键生源要素(如氮、磷等)的吸附与解吸过程具有调节作用,这将进一步影响水体营养盐的迁移行为与再分配过程[8]。山区河道型水库中,河床沉积泥沙的物源组成复杂,既有水库上游流域输沙,也有库区支流河道输沙,还有水库岸坡侵蚀产沙,这些泥沙的风化强度随来源的不同而存在差异。此外,河道型水库的水动力分选可能会使沉积泥沙的氧化物含量呈明显的沿程空间分异,泥沙颗粒表面的反应活性、比表面积及官能团特征也因此而发生沿程变化,进而调节全库河床沉积层的生源物质吸附容量与结合形态[7-8]。该过程通过调节水沙界面的物质交换改变营养盐在固液相间的分布状态,进而对水体营养程度和生态系统产生影响[9]。

长江上游流域是河道型水库分布较为广泛的区域之一,这些水库都面临着不同程度的泥沙沉积。目前,关于这些河道型水库沉积泥沙的研究主要集

中在泥沙输移规律[10]、颗粒特性[11]、重金属污染及生态危害评价等[12]方面。然而，针对常量元素氧化物地球化学特征的研究仍相对较少，这不利于深入理解河道型水库泥沙沉积的生态环境效应。因此，本文以三峡水库泥沙为研究对象，研究库区泥沙的常量元素氧化物组成、含量及其比值的沿程空间分布特征，为山区河道型水库泥沙管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡水库的坝址位于长江上游流域的出口处湖北省宜昌市秭归县，回水末端位于重庆市江津区，干流全长约 660 km，是典型的河道型水库。三峡水库所控制的长江上游流域是中国的重要侵蚀产沙区，多年平均输沙量约为 3.51×10^8 t。因此，三峡水库采用“蓄清排浑”的运行调度模式，即在每年的汛期（5—9 月）采用低水位（145 m）运行，以腾空防洪库容拦截洪水，并使高含沙量洪水快速排向大坝下游。非汛期（10 月至次年 4 月）则采用高水位运行（175 m），以满足蓄水发电和改善航运的要求。据监测，自三峡水库试验性蓄水运行至 2024 年 12 月，泥沙拦截总量约为 2.13×10^9 t，年均泥沙拦截量约 9.90×10^7 t，平均泥沙拦截率为 76.78%。总体上，三峡水库常年回水区（涪陵至坝前段）的泥沙沉积相对较为严重，累计沉积量约 1.90×10^9 m^3，这些泥沙主要沉积在分汊河道、开阔河谷、支流河口等缓流区域，沉积厚度最大可达 60 m。三峡水库的变动回水区（江津至涪陵段）则以冲刷为主，只有少量零星分布的泥沙沉积河道，据监测，变动回水区的累计侵蚀量约为 0.70×10^8 m^3[13]。

1.2 样品采集与前处理

沉积泥沙采样时间为 2022 年 8 月的低水位运行期间。采样点设置在长江干流，自上而下分别是重庆（CQ）、巴南（BN）、坪西坝（PXB）、丰都（FD）、忠县（ZX）、武陵（WL）、万州（WZ）、云阳（YY）、白帝城（BDC）、巫山（WS）、巴东（BD）、秭归（ZG）共 12 处（图 1）。本研究采用两种采样方式，对于受航道管制的主河槽等区域，采用抓斗式泥沙采样器进行采样，采样深度为 30 cm 左右。面积较大的泥沙沉积区则采用美国 SDI 公司生产的 VibeCore-D100 型高频震动取样钻机采集沉积泥芯，采样的总深度为 300 cm，本研究只用 0—50 cm 层的泥沙，并分为 0—25 cm 和 25—50 cm 两层。悬移质泥沙采样时间为 2019 年 6 月至 2020 年 6 月，历时一个完整水文年，涉及汛期与非汛期、水库蓄水与泄洪等关键过程。采样点布设在水库中段的汝溪河与长江交汇处附近，共布设 4 个点，各采样点与库岸距离均超过 100 m，以避免近岸干扰。采样装置是自行研制的悬浮桶，每半个月收集桶内滞留的泥沙，取样时反复清洗悬浮桶直至无残留泥沙。每次取样完成后将悬浮桶恢复原位以收集下一时段的样品。本研究采用 2019 年 6 月 15 日、2019 年 11 月 15 日、2020 年 3 月 15 日和 2020 年 6 月 15 日收集悬移质泥沙样品测试元素组成及含量。所有泥沙样品带回实验室经自然风干后，研磨至全部通过孔径为 2 mm 的网筛，再装入样品袋待测。

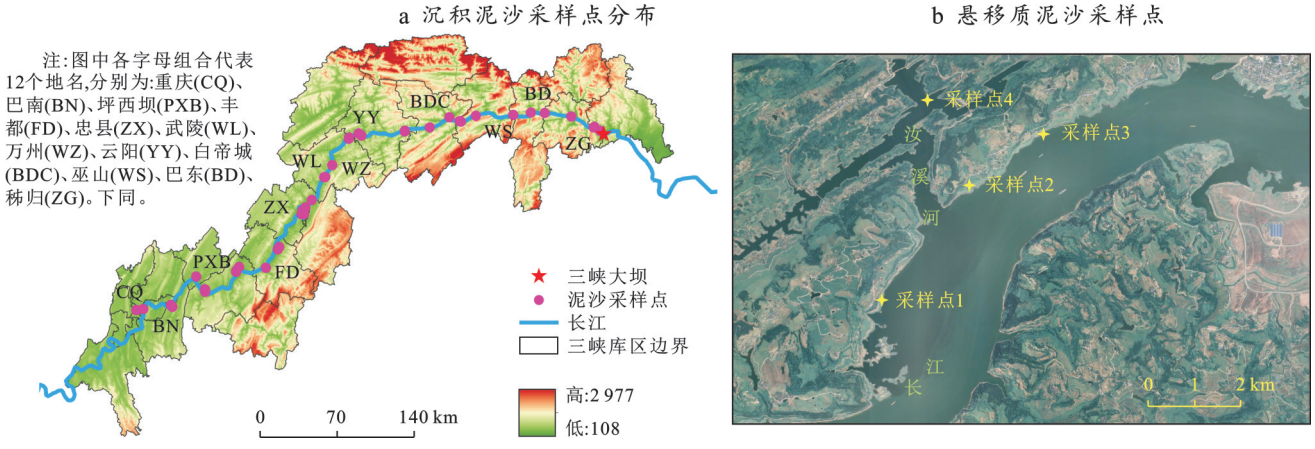


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites

1.3 样品测试与分析方法

沉积泥沙颗粒组成采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测定。样品前处理方法见 Li Jinlin 等[14]研究。上机测试时，每个样品自动测试 3 次并取平均值作为最终结果。测试完毕后，采用美国农业部粒级制分级标准，即划分为黏粒（<0.002 mm）、粉粒（0.002～0.05 mm）和砂粒（>0.05 mm）。

根据 Folk & Ward 的公式和定义,用 GRADISTAT 粒度分析软件获得了平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(S_k)、峰度(K_g)共 4 个粒度参数(表 1)。试验前先将泥沙样品用粉末压片法制样,使用 Bruker 公司的 S8 TIGER 型高性能波长色散型 X 射线荧光光谱仪进行元素测试分析。本研究中,常量元素以百分含量表示,氧化物的比值以及地球化学参数的计算均以氧化物分子摩尔数为基础。

表 1　几何图解法沉积物粒度参数(Folk & Ward 1957)的分级

Table 1　Classification of sediment grain-size parameters based on geometric graphical method of Folk and Ward (1957)

分选系数	定性描述术语	偏度	定性描述术语	峰度	定性描述术语
<1.27	分选极好	−1.0～−0.3	极细偏	<0.67	极宽平
1.27～1.41	分选好	−0.3～−0.1	细 偏	0.67～0.90	宽 平
1.41～1.62	分选较好	−0.1～0.1	对 称	0.90～1.11	中 等
1.62～2.00	分选中等	0.1～0.3	粗 偏	1.11～1.50	尖 锐
2.00～4.00	分选较差	0.3～1.0	极粗偏	1.50～3.00	极尖锐
4.00～16.00	分选差			>3.00	极端尖锐
>16.00	分选极差				

1.4　元素地球化学参数

本研究采用氧化物比值定量表征泥沙的化学风化强度,计算化学蚀变指数(CIA)、钠钾比($R_{Na/K}$)、硅铝比($R_{Si/Al}$)、退碱系数(W)和残积系数(I_K)。计算公式如下:

$$CIA=\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3+CaO^*+K_2O+Na_2O}\times 100 \quad (1)$$

式中:CIA 指示长石向黏土矿物转化的程度,该值越高,泥沙的化学风化作用越强。CaO^*表示硅酸盐中 CaO 含量,依据 Bock 等[15]的方法进行相关换算:当 $CaO\leqslant Na_2O$ 时,$CaO^*=CaO$;$CaO>Na_2O$ 时,$CaO^*=Na_2O$。沉积泥沙的 CIA 也常作为判断泥沙风化时所处气候环境的重要指标,当 CIA<65 时,为寒冷干燥条件下低等的化学风化程度;当 65<CIA<85 时,为温暖湿润条件下中等的化学风化程度;当 CIA>85 时,为炎热潮湿条件下强烈的化学风化程度[16]。

$$R_{Na/K}=\frac{Na_2O}{K_2O} \quad (2)$$

式中:$R_{Na/K}$ 表征斜长石相对于钾长石的风化程度。$R_{Na/K}$ 值越小,表明化学风化程度越强。

$$R_{Si/Al}=\frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (3)$$

式中:$R_{Si/Al}$ 指示泥沙的淋溶状况。随着气温的升高和风化作用的加强,泥沙淋溶作用加剧,$R_{Si/Al}$ 值降低;反之则升高。

$$W=\frac{Na_2O+CaO}{Al_2O_3} \quad (4)$$

式中:W 指示泥沙成壤过程中易溶性元素(Ca,Na)的淋溶迁移过程。W 值越低,表示风化作用越强,气候暖湿。

$$I_K=\frac{Al_2O_3+Fe_2O_3}{CaO+MgO+Na_2O} \quad (5)$$

式中:I_K 表征元素淋溶特征。I_K 值升高说明易迁移元素(Ca,Mg,Na)发生强烈淋溶,而稳定性元素(Al,Fe)相对富集,从而指示较强的化学风化作用。

1.5　元素地球化学图解

本研究采用 A-CN-K 和 A-CNK-FM 三角图解分析泥沙的化学风化趋势及其过程中主要元素和矿物的变化特征[5-6]。A-CN-K 图解中,当样品风化趋势接近含钾矿物(如蒙脱石、伊利石等)连线时,说明风化程度高;趋势靠近斜长石和钾长石连线时,表明斜长石未完全风化;趋势平行 A-CN 连线时,表明样品遵循典型的斜长石风化;趋势平行 A-K 连线时,说明风化进一步增强,含钾矿物发生脱钾,并向高岭石等富铝矿物转化。A-CNK-FM 图中,当样品落点位置远离 CNK-FM 连线时,反映铁镁质矿物在风化中发生变化;当样品落点位置靠近母岩组成线(斜长石与 FM 连线)和图解边缘时,说明化学风化较弱;反之则表示风化增强。

1.6　数据分析

本研究中,试验数据的初步整理和分析在 Microsoft Office 2019 软件中完成;采用 Spearman 秩相关系数分析泥沙常量元素氧化物含量及其比值的沿程空间分布规律,运用 Pearson 相关系数和曼特尔检验(Mantel test)研究粒度特征对元素含量空间分布格局的影响;其中,Spearman 和 Pearson 相关性分析在 IBM SPSS 26.0 软件中完成,曼特尔检验在 R 语言(version 4.4.1)的 linkET 包中完成,插图绘制在 Origin 2024 和 R 语言(version 4.4.1)的 ggplot2 包中完成。

2 结果与分析

2.1 沉积泥沙的粒度特征

总体来看,三峡水库沉积泥沙以粉粒为主,平均含量达87.04%;其次是黏粒,平均含量为6.91%;砂粒含量最少,平均含量为6.05%。这说明沉积泥沙以细粒组分为主(表2)。从空间分布来看,沉积泥沙颗粒组分从上游至下游呈现出逐渐细化的趋势。具体来看,在上游CQ,BN样点,泥沙的砂粒含量相对较高,分别为16.33%和14.25%,而在下游的BD,ZG样点,砂粒的含量分别低至0.86%和1.71%。相反,沉积泥沙的黏粒和粉粒含量从上游至下游逐渐增加,其最小值和最大值分别出现在上游的CQ样点和下游的ZG,BDC样点(表2)。沉积泥沙的平均粒径随采样位置的不同而存在差异,分布在14.52 μm至28.08 μm间,多数则在20 μm左右。分选系数为3.14~4.04,整体呈现分选较差至分选差的特征,表明沉积泥沙粒径分选程度较低,粒径组成较为分散。颗粒组成的偏度值为-0.232~-0.027,即细偏至对称分布,说明粒度分布曲线向细粒方向轻微偏移。峰度为0.902~1.036,说明峰度分布区间差异较小,泥沙粒度集中度处于中等水平。从参数间的相关性来看,平均粒径与分选系数呈极显著正相关($p<0.01$),平均粒径和分选系数与偏度均呈极显著负相关($p<0.01$)(图2),说明泥沙平均粒径越细,分选性就越好,即泥沙颗粒越细,粒径分布则越集中。

表2 三峡水库沉积泥沙粒度组成统计描述

Table 2 Statistical description of grain-size composition of sediments in Three Gorges reservoir

样点	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	平均粒径	分选系数	偏度	峰度
CQ	5.62	78.05	16.33	28.08	4.010	-0.196	0.973
BN	5.96	79.80	14.25	26.28	4.003	-0.194	0.958
PXB	6.20	78.58	15.22	27.14	4.040	-0.232	0.954
FD	5.88	91.34	2.79	18.62	3.260	-0.083	0.985
ZX	7.11	89.46	3.43	18.49	3.456	-0.102	0.941
WL	6.64	86.59	6.77	20.14	3.678	-0.078	0.959
WZ	7.06	88.98	3.96	18.82	3.468	-0.105	0.947
YY	7.35	88.30	4.35	19.09	3.556	-0.121	0.902
BDC	7.49	91.54	0.97	14.64	3.149	-0.027	1.036
WS	7.67	90.36	1.97	17.01	3.402	-0.078	0.957
BD	7.52	90.77	1.71	15.69	3.272	-0.042	1.001
ZG	8.42	90.73	0.86	14.52	3.391	-0.064	0.980

2.2 常量元素氧化物组成及其沿程分布

沉积泥沙和悬移质泥沙中检测出的常量元素氧化物主要包括SiO_2,Al_2O_3,Fe_2O_3,CaO,K_2O,MgO和Na_2O(表3)。其中,非金属氧化物SiO_2的平均含量分别为51.37%,52.76%,均明显高于其他氧化物。金属氧化物中,沉积泥沙平均含量由高到低依次为Al_2O_3(16.75%),Fe_2O_3(6.65%),CaO(6.33%),K_2O(3.17%),MgO(2.76%)和Na_2O(0.81%)。悬移质泥沙的CaO和MgO含量均略高于Fe_2O_3和K_2O,平均含量由高到低依次为Al_2O_3(15.83%),CaO(6.38%)、Fe_2O_3(5.94%),MgO(3.07%),K_2O(2.63%)和Na_2O(1.12%)。总体上,这些氧化物的相对含量的变异系数为3.05%~26.53%,说明这些元素的相对含量存在明显的空间异质性。从沿程分布来看,沉积泥沙中的SiO_2和Na_2O含量均表现为自上游至下游明显降低趋势,秩相关系数分别为-0.44和-0.38,但没有通过统计学意义的显著性检验。相反,沉积泥沙中的Al_2O_3,Fe_2O_3,K_2O和MgO的含量则呈显著增加趋势,秩相关系数分别为0.59,0.80,0.64,0.58,且通过了统计学意义的显著性检验($p<0.05$)。相比之下,沉积泥沙中的CaO含量在沿程方向的变化趋势不明显(表3)。

相比于UCC丰度,三峡水库沉积泥沙和悬移质泥沙中的SiO_2,K_2O和Na_2O均呈现亏损状态,其余元素则为富集状态(图3)。其中,Na_2O的亏损程度与CaO的富集程度均高于其他元素,这说明Al,Fe,Ca,Mg等元素在山区河道型水库的沉积层中更容易富集,而Si,K,Na等元素则因细颗粒的"排斥效应"而亏损。从空间差异来看,沉积泥沙在ZX,WS和ZG样点的K_2O呈现轻微富集状态,而在CQ样点的Al_2O_3,Fe_2O_3,MgO和FD样点的Al_2O_3呈现出轻微的亏损状态(图3a)。

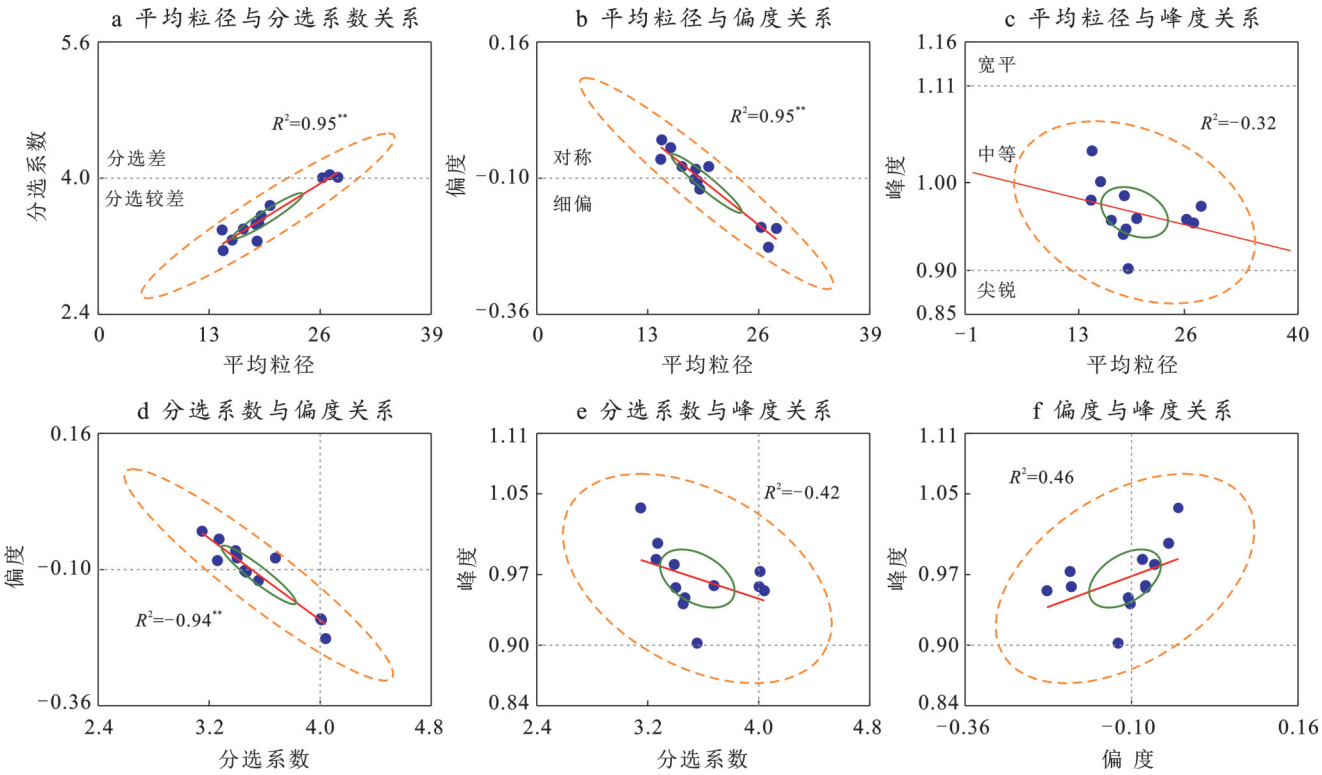


图 2　三峡水库沉积泥沙粒度参数

Fig.2　Grain-size parameters of sediments in Three Gorges reservoir

表 3　三峡水库泥沙常量元素氧化物含量统计描述

Table 3　Statistical description of contents of major element oxides in sediments of Three Gorges reservoir

常量元素	样 品	最大值/%	最小值/%	平均值	变异系数/%	变异程度	秩相关系数	UCC	PAAS
SiO_2	沉积泥沙	54.28	49.26	51.37	3.05	弱	−0.44	66	62.8
	悬移质泥沙	56.77	50.08	52.76	6.14	弱	—		
Al_2O_3	沉积泥沙	19.32	13.98	16.75	9.02	弱	0.59*	15.2	18.9
	悬移质泥沙	17.30	14.83	15.83	6.60	弱	—		
Fe_2O_3	沉积泥沙	7.72	4.85	6.65	11.43	中等	0.80*	5	7.22
	悬移质泥沙	7.02	4.75	5.94	18.39	中等	—		
CaO	沉积泥沙	8.11	4.59	6.33	15.64	中等	−0.16	4.2	1.3
	悬移质泥沙	7.88	4.55	6.38	26.53	中等	—		
K_2O	沉积泥沙	3.80	2.53	3.17	11.04	中等	0.64*	3.4	3.7
	悬移质泥沙	2.97	1.90	2.63	18.81	中等	—		
MgO	沉积泥沙	3.18	1.96	2.76	11.96	中等	0.58*	2.2	2.2
	悬移质泥沙	3.58	2.46	3.07	15.16	中等	—		
Na_2O	沉积泥沙	0.96	0.62	0.81	12.35	中等	−0.38	3.9	1.2
	悬移质泥沙	1.30	0.90	1.12	18.77	中等	—		

注:*表示 $p<0.05$,具有统计学显著性。上陆壳(UCC)和陆源页岩(PAAS)数据来自参考文献[17]。“—”表示无数据。下同。

2.3　常量元素氧化物地球化学参数特征

沉积泥沙和悬移质泥沙的 CIA 范围分别为 70.57～75.92, 67.19～73.20, 均值分别为 73.26, 70.79,说明这些泥沙所处的环境为温暖湿润的气候条件,对应中等的化学风化程度(表 4)。泥沙的 $R_{Na/K}$ 均值分别为 0.39 和 0.68,说明斜长石的风化程度远远高于钾长石,泥沙遭受了较强的化学风化作用。泥沙的 $R_{Si/Al}$ 均值分别为 5.25 和 5.68,说明 Si 在风化与淋溶作用下的流失较为明显,而 Al 元素相对富集,这进一步说明泥沙经历了温暖湿润的气候条

件下较强的化学淋溶作用。泥沙的退碱系数 W 均值分别为 0.78 和 0.94，说明泥沙中的易溶性元素（Ca，Na）较少，这也说明泥沙处于较强程度的化学风化状态。泥沙的残积系数 I_K 均值分别为 1.07 和 0.85，说明泥沙中的 Ca，Mg，Na 等易迁移元素均经历淋溶过程，而 Al、Fe 等在风化过程中相对富集，说明泥沙在其物源地经历了成壤作用。从沿程分布来看，沉积泥沙的 CIA 和 I_K 值自上游至下游呈现逐渐增加的趋势，秩相关系数分别为 0.51，0.28。相反，沉积泥沙的 $R_{Na/K}$，$R_{Si/Al}$ 和 W 则明显降低，秩相关系数分别为 −0.53、−0.47 和 −0.46，但都未通过统计学意义的显著性检验（表 4）。

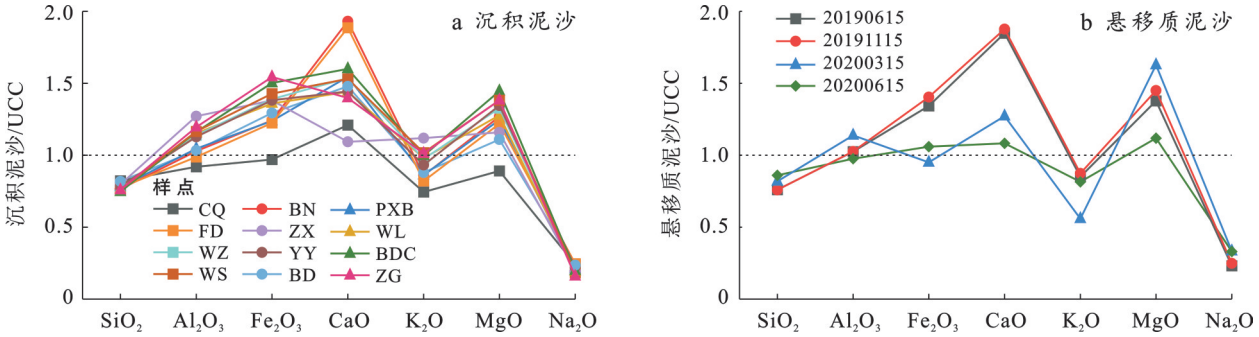


图 3 三峡水库泥沙常量元素氧化物的 UCC 标准曲线

Fig.3 UCC-normalized curves of major element oxides in sediments of Three Gorges reservoir

表 4 三峡水库沉积泥沙常量元素氧化物比值

Table 4 Ratios of major element oxides in sediments of Three Gorges reservoir

地化参数	样品	最大值	最小值	平均值	秩相关系数	UCC	PAAS
CIA	沉积泥沙	75.92	70.57	73.26	0.51	47.93	70.4
	悬移质泥沙	73.20	67.19	70.79	—		
$R_{Na/K}$	沉积泥沙	0.56	0.27	0.39	−0.53	1.74	0.49
	悬移质泥沙	1.04	0.47	0.68	—		
$R_{Si/Al}$	沉积泥沙	6.59	4.62	5.25	−0.47	7.37	5.64
	悬移质泥沙	6.50	5.30	5.68	—		
W	沉积泥沙	1.06	0.50	0.78	−0.46	0.92	0.23
	悬移质泥沙	1.10	0.84	0.94	—		
I_K	沉积泥沙	1.48	0.83	1.07	0.28	0.94	2.37
	悬移质泥沙	1.02	0.68	0.85	—		

2.4 泥沙风化三元图解特征

A-CN-K 图解中，泥沙样品落点位置整体趋向蒙脱石和伊利石的连线，分布于 PAAS 的上方，并向 A 端偏移，化学风化趋势线大致平行于 A-CN 连线（图 4a）。这说明三峡水库泥沙经历了以斜长石脱钙、钠为特征的中等强度化学风化过程，但尚未达到以高岭石、三水铝石占优势的强烈化学风化程度。沉积泥沙和悬移质泥沙落点位置分布相对集中，这说明泥沙的物理剥蚀和化学风化处于相对稳定状态。A-CNK-FM 图解中，样品落点位置远离 CNK-FM 线，表明泥沙风化过程中铁镁质矿物相对富集。此外，泥沙落点位置分布在图件内部且远离斜长石与 FM 的连接线，这表明其化学风化程度较高（图 4b）。总体而言，三元图解所揭示的三峡水库泥沙地球化学特征与常量元素氧化物指标的指示意义一致，表明库区泥沙整体上处于温暖湿润条件下的中等化学风化程度，并记录了泥沙在物源区经历的较为充分的成壤过程。

2.5 常量元素氧化物与颗粒特性间的关系

三峡水库沉积泥沙中，除 CaO 外的其他主要氧化物含量与颗粒参数间均呈较高的相关性，相关系数均在 0.5 以上，说明常量元素氧化物的含量受到泥沙颗粒特征的显著影响（图 5）。具体来看，SiO_2 与砂粒、平均粒径、分选系数间呈显著正相关，而与粉粒和偏度间呈显著负相关（$p<0.05$），这说明 Si 元素主要赋存在粗颗粒泥沙中。沉积泥沙中的 Al_2O_3，Fe_2O_3 和 K_2O 含量均与黏粒、粉粒和偏度间呈极显著正相关（$p<0.01$），MgO 含量则与黏粒和粉粒含量呈极显著正相关（$p<0.01$），与偏度呈显著正相关（$p<0.05$），这几种氧化物含量均与砂粒、平均粒径和分选系数呈极显著负相关（$p<0.01$），说明这些金属元素更易富集在细颗粒泥沙中。然而，沉积泥沙的 Na_2O 含量与其他元素不同，与黏粒呈极显著负相关（$p<0.01$），与偏度呈显著负相关（$p<0.05$），与平均粒径则呈显著正相关（$p<0.05$），这说明沉积泥沙中的 Na 元素主要赋存在粗颗粒中。沉积泥沙的 CaO 含量与泥沙颗粒参数间的相关性均未通过统计学意义的显著性检验，说明泥沙粒度对 Ca 元素的影响较小。从氧化物的属性类别来看，非金属氧化物与黏粒呈极显著相关（$p<0.01$），与粉粒、砂粒、平均粒径和分选系数呈显著相关（$p<0.05$）；金属氧化物与黏粒呈极

显著相关关系($p<0.01$),与粉粒、砂粒、分选系数和偏度呈显著相关关系($p<0.05$)(图 5)。总体而言,泥沙颗粒特性显著调控着不同类型氧化物的空间分布、迁移与富集过程。

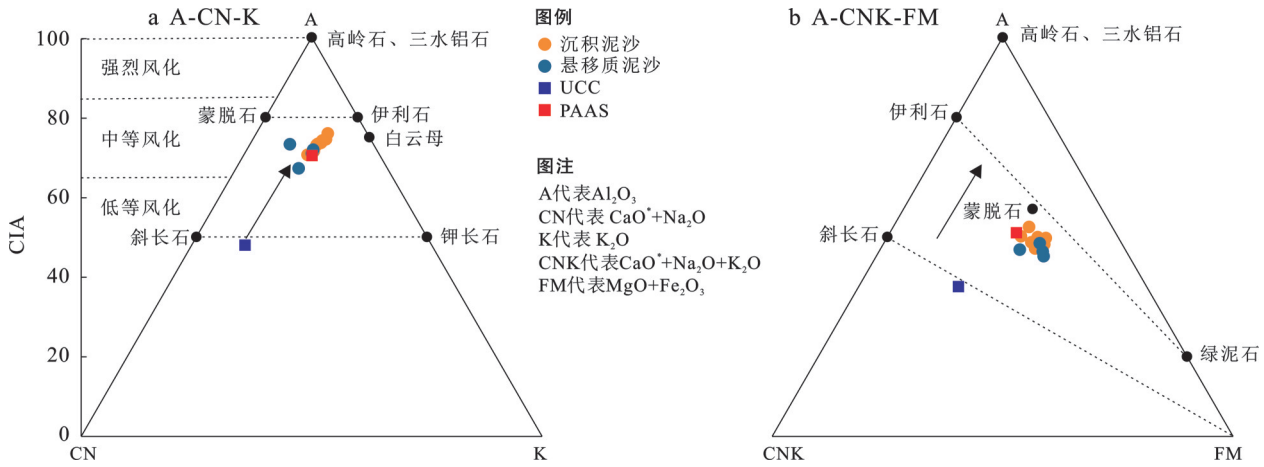
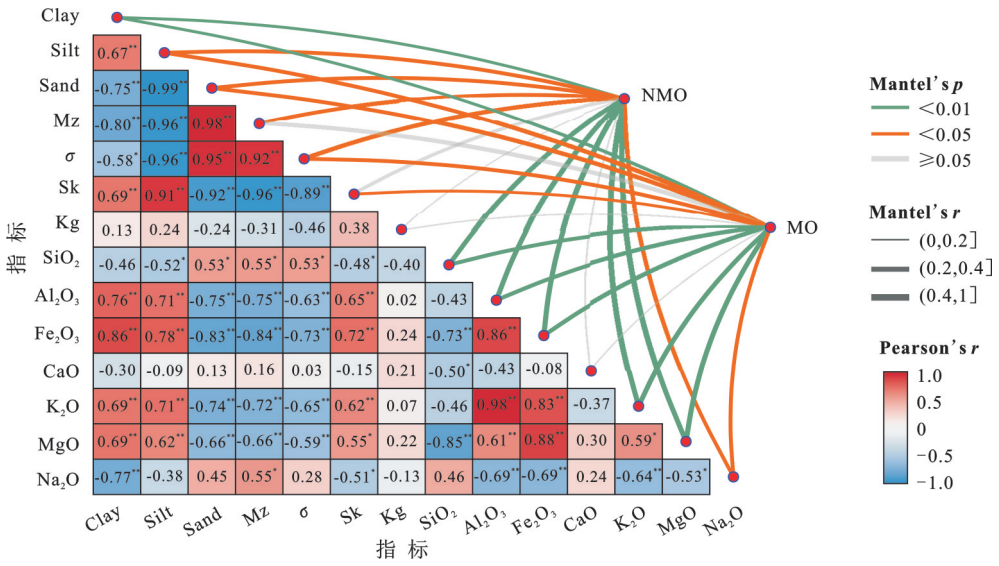


图 4　三峡水库沉积泥沙 A-CN-K 和 A-CNK-FM 图解(箭头表示风化趋势)

Fig.4　A-CN-K and A-CNK-FM ternary diagrams of sediments in Three Gorges reservoir (arrows indicate weathering trends)



注:①Clay 为黏粒;Silt 为粉粒;Sand 为砂粒;Mz 为平均粒径;σ 为分选系数;Sk 为偏度;Kg 为峰度。 ②*表示 $p<0.05$;**表示 $p<0.01$。

图 5　三峡水库沉积泥沙理化性质指标间相关性

Fig.5　Correlations among physicochemical property indicators of sediments in Three Gorges reservoir

3　讨　论

3.1　三峡水库沉积泥沙常量元素氧化物沿程分布的影响因素

三峡水库是典型山区河道型水库,河床沉积泥沙常量元素氧化物含量呈现出明显的沿程空间分异(表 3),这主要是受泥沙的物源组成、河道的水力分选、泥沙的粒度效应等因素的共同影响。三峡水库的入库泥沙来源包括 3 类,分别是上游流域侵蚀泥沙、库区小流域侵蚀泥沙和库岸侵蚀泥沙[14]。其中,上游来沙中富含以石英和碳酸盐颗粒为主的粗颗粒组分,这使得水库的入库河段沉积泥沙中的 SiO_2 含量相对较高[18]。河床沉积泥沙颗粒自上游至下游逐渐细化,这主要是由于干流水动力沿程逐渐减弱所致。库区虽有多条支流汇入,但支流来沙量相对较小,其影响主要局限于局地范围。在干流主导的水动力作用下,粗颗粒泥沙因其质量大而在库尾端优先沉降,而细颗粒组成的粒径和比重小,可随水流迁移至更远的距离[11,19]。研究表明,泥沙的比表面积和活性随着粒径减小而逐渐增大,表面能和吸附能随之而增强,这使氧化物分子与颗粒表面形成更稳定的结合态[9,20]。本研究表明,三峡水库沉积泥沙中的

Al_2O_3,Fe_2O_3,K_2O和MgO的含量呈现出在沿程方向逐渐增大的趋势,这说明泥沙中的细颗粒在物质吸持和赋存方面具有明显优势,而粗颗粒组分对元素的稀释作用更明显[14]。已有研究表明,常量元素的赋存特征和空间分布受载体"粒度效应"的影响,在沉积介质的不同粒级中表现出差异化的富集与扩散特征。此外,泥沙的矿物成分因源区的不同而存在差异,这进而使元素与粒度间的相关性存在差异[21]。因此,可通过分析元素含量与富集的相关性来评估各粒级泥沙对元素富集的相对贡献程度。本研究表明,三峡水库沉积泥沙中主要氧化物含量与粒度特征值间具有显著相关性。其中,砂粒对SiO_2和Na_2O富集的贡献较大,黏粒和粉粒对Al_2O_3,Fe_2O_3,K_2O和MgO的富集具有较大的贡献(图5),这说明不同元素对粒级效应的响应具有差异,这可能存在两个方面的原因。一方面是并非所有的元素都具有粒度效应,另一方面是受粒度控制的元素也仅在特定的粒级范围内才体现出这种控制关系[22]。综上所述,山区河道型水库沉积泥沙中的常量氧化物含量在沿程方向的分布反映了物源输入、水动力分选和泥沙粒度效应的综合作用。

3.2 三峡水库泥沙常量元素氧化物的地球化学特征

本研究表明,三峡水库泥沙经历了温暖湿润气候条件下中等强度的化学风化和成壤作用,具有典型的碱性元素淋失与铝铁组分相对富集的特征,这与刘俊延等[23]的研究结果相似。已有研究表明,硅是地壳中主要的造岩元素,通常在碱性环境下发生溶解和迁出;铁和铝的迁移能力较弱,通常在暖湿条件下因其他盐基离子迁移淋失而逐渐相对富集;钠、钾、钙、镁等碱土和碱金属元素的化学活性较高,在强风化、高水分风化背景下易淋溶迁移[24-25]。本研究中,SiO_2,K_2O和Na_2O在库区泥沙中呈相对亏损状态,其余氧化物则处于富集状态。泥沙中CaO的富集,可能与水库控制的流域内广泛分布的碳酸盐岩有关。在表生环境下,石灰岩极易受到溶蚀,溶解出的Ca^{2+}在水动力相对减弱的库区中沉积,从而导致CaO富集[25]。已有研究表明,泥沙的风化过程和强度受区域气候、物源组成、沉积搬运、颗粒组成等因素共同控制。其中,沉积空间分异通过影响泥沙矿物组成使不同粒径组分在元素富集方面呈现差异化,进而影响化学风化特征[1,26]。本研究表明,三峡水库泥沙的CIA和I_k值沿程呈逐渐增大的趋势,而$R_{Na/K}$,$R_{Si/Al}$和W值逐渐降低。这说明泥沙的化学风化强度自上游向下游逐渐增强,其主要原因可能是细粒组分在河道水动力条件下经历了更长时间的风化作用,较大的比表面积和反应活性的泥沙颗粒更易发生元素淋失和矿物转化,从而表现出更强风化程度的特征[24,26]。从区域尺度来看,三峡水库泥沙的CIA显著高于上陆壳的平均值(47.93)[17]和青藏高原土壤(49.98)[24],也明显高于晋西北土壤(54.06)[27],但略低于澧阳平原(74.37)[28],还明显低于石林红土(96.45)[29]。这些差异表明,三峡水库泥沙的化学风化水平在全球背景下处于中等强度区间,与亚热带湿润气候区普遍表现出来的中等至偏强的风化特征相一致[23,30]。综上所述,三峡水库泥沙的地球化学特征既反映了亚热带湿润气候下源区风化的背景效应,也体现了水库河道水动力分选过程对泥沙沉积过程的调节效应。

4 结 论

(1)三峡水库沉积泥沙的整体分选性较差,偏度呈细偏至对称分布,峰度多表现为中等峰态。沿程空间分布上,泥沙自上游至下游逐渐细化,颗粒分选性逐渐变好。

(2)三峡水库沉积泥沙常量元素氧化物含量依次为:SiO_2>Al_2O_3>Fe_2O_3>CaO>K_2O>MgO>Na_2O,而悬移质泥沙的CaO和MgO含量均分别略高于Fe_2O_3和K_2O含量。沿程空间分布上,沉积泥沙的SiO_2和Na_2O含量自上游至下游逐渐降低,而Al_2O_3,Fe_2O_3,K_2O和MgO逐渐增加,CaO含量则无明显变化趋势。

(3)三峡水库泥沙常量元素氧化物含量相比于UCC而言,其SiO_2,K_2O和Na_2O均呈亏损状态,而Al_2O_3,Fe_2O_3,CaO和MgO则表现出相对富集。

(4)三峡水库泥沙整体处于温暖湿润气候条件下的中等化学风化阶段,其CIA均值分别为73.26,70.79,并且这些泥沙在物源区经历了中等程度的化学蚀变与成壤作用。

参考文献(References)

[1] 李晨晨,吴立,毛龙江,等.安徽巢湖沉积物常量元素特征及其揭示的流域风化强度演变[J].地球科学与环境学报,2024,46(6):758-774.
Li Chenchen, Wu Li, Mao Longjiang, et al. Characteristics of macroelements and revealed evolution of weathering intensity in sediments of Chaohu Lake, Anhui, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(6):758-774.

[2] 王利杰,肖锋军,董治宝,等.柴达木盆地巨型沙波纹条带表层沉积物粒度和地球化学元素组成特征[J].干旱区地理,2023,46(11):1826-1835.
Wang Lijie, Xiao Fengjun, Dong Zhibao, et al. Charac-

teristics of grain size and geochemical elements composition of surface sediments of megaripple stripes in the Qaidam Basin [J]. Arid Land Geography, 2023,46(11):1826-1835.

[3] 马立,杨静,张峰.腾格里沙漠表沙常量元素地球化学特征及其空间分布[J].第四纪研究,2025,45(1):91-104.
Ma Li, Yang Jing, Zhang Feng. Geochemical element characteristics and spatial distribution of surface sand major elements in the Tengger Desert [J]. Quaternary Sciences, 2025,45(1):91-104.

[4] 范淑花,秦富仓,车志晖,等.内蒙古准格尔旗下侏罗统延安组砒砂岩地球化学特征及其对风化、物源的指示[J].水土保持通报,2024,44(4):196-204.
Fan Shuhua, Qin Fucang, Che Zhihui, et al. Geochemical characteristics and their indication to weathering and provenance of Pisha sandstone from Lower Jurassic Yan'an Formation in Jungar Banner, Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(4):196-204.

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

[6] Chen Bo, Yang Xiaoping, Jiang Qida, et al. Geochemistry of aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin sandy land, northern China: Implications for weathering, recycling, and provenance [J]. Catena, 2022, 208: 105769.

[7] Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils: A myth revisited [J]. Geoderma, 2016,262:213-226.

[8] 朱豪,肖指柔,明安刚,等.中国南亚热带乡土针阔树种人工林土壤不同形态铁铝氧化物对有机碳含量的影响[J].水土保持通报,2022,42(5):386-392.
Zhu Hao, Xiao Zhirou, Ming Angang, et al. Effects of different forms of iron and aluminum oxides on soil organic carbon content under native coniferous and broadleaf plantations in south subtropical region of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):386-392.

[9] 郭长城,喻国华,王国祥.河流泥沙对污染河水中污染物的吸附特性研究[J].生态环境,2006(6):1151-1155.
Guo Changcheng, Yu Guohua, Wang Guoxiang. Adsorption properties of sediment to pollutants of contaminated river water [J]. Ecology and Environment, 2006(6):1151-1155.

[10] Yang Yunping, Zheng Jinhai, Zhu Lingling, et al. Influence of the Three Gorges dam on the transport and sorting of coarse and fine sediments downstream of the dam [J]. Journal of Hydrology, 2022,615:128654.

[11] Li Jinlin, Bao Yuhai, Wei Jie, et al. Fractal characterization of sediment particle size distribution in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges reservoir, China [J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(9):2028-2038.

[12] 郭宜薇,丁文峰,朱秀迪,等.三峡库区重金属含量空间分布及污染状况[J].水土保持通报,2021,41(6):105-112.
Guo Yiwei, Ding Wenfeng, Zhu Xiudi, et al. Spatial distribution and pollution characteristics of heavy metal contents in Three Gorges reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):105-112.

[13] 许全喜,董炳江,张为,等.基于洪峰沙峰异步传播规律的三峡水库排沙调度研究[J].人民长江,2025,56(10):11-20.
Xu Quanxi, Dong Bingjiang, Zhang Wei, et al. Sediment discharge operation of Three Gorges reservoir based on asynchronous propagation of flood peak and sediment peak [J]. Yangtze River, 2025, 56(10): 11-20.

[14] Li Jinlin, He Xiubin, Wei Jie, et al. Multifractal features of the particle-size distribution of suspended sediment in the Three Gorges reservoir, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(4): 489-500.

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

[16] 冯连君,储雪蕾,张启锐,等.化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J].地学前缘,2003,10(4):539-544.
Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(4):539-544.

[17] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [J]. The Journal of Geology, 1985,94(4):57-72.

[18] Wang Shuai, Rao Wenbo, Qian Jin, et al. Clay mineralogy of surface sediments in the Three Gorges reservoir: Implications for sediment provenances and weathering regimes [J]. Clays and Clay Minerals, 2021, 69(1): 52-67.

[19] 段金宝,李进林,韦杰,等.三峡水库消落带沉积泥沙与

土壤的养分特征差异[J].水土保持学报,2025,39(6):57-65.
Duan Jinbao, Li Jinlin, Wei Jie, et al. Differences in nutrient characteristics between deposited sediment and original soil in water-level fluctuation zone of Three Gorges reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(6):57-65.

[20] Wang Hao, Shadman F. Effect of particle size on the adsorption and desorption properties of oxide nanoparticles [J]. AIChE Journal, 2013,59(5):1502-1510.

[21] 孟庆爽,左合君,闫敏,等.库布齐沙漠地表沉积物常量元素与粒度的关系[J].中国沙漠,2023,43(4):107-117.
Meng Qingshuang, Zuo Hejun, Yan Min, et al. Relationship between constant elements and granularity of the surface sediment in the Kubuqi Desert [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(4):107-117.

[22] 杜德文,石学法,孟宪伟,等.黄海沉积物地球化学的粒度效应[J].海洋科学进展,2003,21(1):78-82.
Du Dewen, Shi Xuefa, Meng Xianwei, et al. Geochemical granularity effect of sediment in the Yellow Sea [J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1): 78-82.

[23] 刘俊延,陈林,慈恩,等.巫山黄土成因及其发育土壤特征研究[J].土壤通报,2022,53(2):262-269.
Liu Junyan, Chen Lin, Ci En, et al. The origin of Wushan loess and the characteristics of soil derived from it [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 262-269.

[24] 胡梦珺,庄静,孙文丽,等.青藏高原东北部全新世常量元素地球化学特征及环境演变[J].中国沙漠,2023,43(2):11-20.
Hu Mengjun, Zhuang Jing, Sun Wenli, et al. Geochemical characteristics of major elements and environmental evolution in the Holocene in the northeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2):11-20.

[25] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等.汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J].地理学报,2017,72(2):279-291.
Mao Peini, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Chemical weathering characteristics and regional comparative study of the loess deposits in the upper Hanjiang River [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(2): 279-291.

[26] 贾飞飞,沈雪艳,魏露露,等.常量化学元素记录的科尔沁沙地地表沉积物风化特征[J].水土保持通报,2025,45(5):25-34.
Jia Feifei, Shen Xueyan, Wei Lulu, et al. Weathering characteristics of surface sediments in Horqin sandy land revealed by major chemical elements [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(5):25-34.

[27] 李继彦,周玲,刘益,等.晋西北地区表层土壤粒度与地球化学元素组成[J].中国沙漠,2019,39(5):155-162.
Li Jiyan, Zhou Ling, Liu Yi, et al. Grain-size and geochemical element composition for topsoil in northwestern Shanxi, China [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(5):155-162.

[28] 郭媛媛,莫多闻,毛龙江,等.澧阳平原岩板垱剖面地球化学特征与风化强度研究[J].地理科学,2013,33(3):335-341.
Guo Yuanyuan, Mo Duowen, Mao Longjiang, et al. Geochemical characteristics and weathering intensity of the Yanbandang profile in Liyang Plain, the middle reach of the Changjiang River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013,33(3):335-341.

[29] 张晓娟,季宏兵,冯晓静,等.岩溶盆地红土风化剖面的元素地球化学研究[J].地理科学,2017,37(6):944-951.
Zhang Xiaojuan, Ji Hongbing, Feng Xiaojing, et al. Element geochemistry characteristic of the red soil weathering profiles in the Karst basin [J].Scientia Geographica Sinica, 2017,37(6):944-951.

[30] Selvaraj K, Chen C T A. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: Constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks [J]. The Journal of Geology, 2006,114(1):101-116.