

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.016

宜昌市龙潭河阶地的沉积特征及其环境指示

张晶^{1,2}, 柴波³, 邵长生⁴, 张傲⁴

(1. 中国水利水电科学研究院, 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038;
2. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074;
4. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘要:河流阶地可以记录河流所属流域的气候变化信息。笔者以宜昌市龙潭河两岸阶地作为研究对象, 选取 4 个典型河流断面横剖面, 利用沉积学、环境地球化学等研究方法, 对龙潭河阶地的沉积特征及其环境指示开展了野外调查研究。运用熔片法-X 射线荧光光谱法(XRF)对阶地沉积物进行物质成分特征分析; 选取化学蚀变指数、风化淋溶系数、硅铝率和硅铝铁率 4 个指标来具体分析龙潭河地区的环境演化过程; 并且运用多元统计方法对分析结果进行解释。研究结果显示: 宜昌市龙潭河普遍发育四级阶地, 东岸形成侵蚀阶地, 西岸基座阶地广泛分布; 通过分析阶地沉积物化学组分之间的相关关系, 可以看出沉积物的性质和物质组成相似, 具有富铝铁化和较强化学淋蚀的特征, 符合龙潭河地区的温暖湿润化学风化环境。测试结果和多元统计方法的结论都反映出龙潭河流域内第四纪以来气候湿热程度趋于减弱, 丰富了宜昌地区河流阶地研究的基础数据, 在一定程度上反映了流域内沉积物形成时期的自然地理条件和古气候特点。

关键词:河流阶地; 沉积特征; 多元统计; 环境演变

中图分类号: P532

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)04-0183-11

Sedimentary Characteristics and Environmental Implications of the Terraces along Longtan River in Yichang

ZHANG Jing^{1,2}, CHAI Bo³, SHAO Changsheng⁴, ZHANG Ao⁴

(1. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 3. School of Environment Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: River terraces can record climate change information of river basins. The terraces of Longtan River in Yichang was selected as the research object and there are four typical river cross-sections, using the methods of sedimentology and environmental geochemical to study the

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2022-01-23; 网络发表日期: 2022-11-15; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“沿长江重大工程区地质环境综合调查(中游)”(12120115044101), 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项“农牧交错带地下水中溶解性有机质特征及其与硝酸盐耦合作用关系研究”(MK2022J05), 草原生态安全协同创新中心重大课题“塔布河流域生态水文特征及生态系统服务评估”(MK0143A032021)联合资助。

作者简介: 张晶(1993-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为环境地球化学。E-mail: 1254080019@qq.com。

sedimentary characteristics and environmental directives. The terrace sediments was tested by X-ray fluorescence spectrometry(XRF) in order to analysis the characteristics of material composition. Four indexes including CIA, ba, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ were selected to analyze the environmental evolution process in Longtan River, and the analysis results were explained by multivariate statistical method. In addition, using multivariable statistics to make further analyze. The results show that there are four level terraces distributing widely along Longtan River in Yichang. East bank developed erosion terraces, however, pedestal terraces are widely distributed in west bank. According to the correlation among chemical composition, it can be seen that the character and composition of the sediment are similar, which are rich in iron, aluminum, and stronger chemical corrosion. It conforms to warm wet chemical weathering environment in Longtan River. The test results and the multivariable statistics'conclusions can reflect that the degree of hot and humid environment in Longtan River tend to be weakened since the quaternary period. In addition, it enrichs the basic data of river terraces in Yichang, which reflects the natural geographical conditions and palaeoclimatic characteristics of sediments in Longtan River in a certain degree.

Keywords: river terrces; sedimentary characteristics; multivariable statistics; environmental evolution

河流阶地是河谷地貌中最突出的地貌类型之一,它记录了河流所属流域内气候变化、新构造运动和侵蚀基准面升降等环境变化的重要信息(沈玉昌,1986)。因此,依据河流阶地,分析环境变化,并对丰富全球变化研究的数据具有积极作用(李建刚等,2020)。1992年,Chatters et al. (1992)研究了10ka以来哥伦比亚河的侵蚀与堆积作用,结果表明河流堆积作用主要发生于气候转型阶段;Fuller et al. (1998)运用热释光测年方法,在西班牙东北部建立了200ka年以来河流对气候变化响应的年代序列,提出可以将河流沉积地层与高精度的冰心和海洋沉积氧同位素气候序列进行对比,结果表明在更新世与全新世,河流的堆积期与冰期相对应,而切割期与间冰期相对应。目前,针对河流阶地的研究方面主要表现为阶地地貌的形成机制和年代分析(Bull, 1979;Brakenridge et al., 1981)。而中国对河流阶地的研究相比国外较晚,研究的区域也主要集中在长江、黄河、珠江等大江、大河的河谷地貌(曹林,2012)。

近年来,许多学者在湖北地区运用沉积物特征[化学蚀变指数(CIA值)、氧同位素特征、Rb/Sr值、Ti元素含量、磁化率、粒度和孢粉分析等]与古气候变化的关系进行了相关研究。赵小明等(2011)通过研究鄂西长阳地区南华系地球化学特征,运用

化学蚀变指数CIA值指示出鄂西长阳流溪地区南沱组较莲沱组具有温暖湿润-温暖干燥气候。毛欣等(2014)通过对湖北清江和尚洞石笋的沉积特征及氧同位素特征进行分析,得出石家河早期温暖潮湿,中期暖湿程度逐渐降低,晚期变干旱、变凉的气候变化特征。王晓翠等(2012)在文献中记录了荆州湖相沉积物中Rb/Sr值、Ti元素含量及磁化率等多项指标,结果表明江汉平原在4402~4200 cal. aBP之间经历了十分显著的干旱事件。朱育新等(1997)在仙桃市沔城M₁孔湖泊沉积物研究中,运用粒度和孢粉分析,发现江汉平原在4400~4200 cal. aBP之间经历了降温事件。邵晓华等(2008)对湖北神农架山宝洞石笋的氧同位素分析结果也反映了该地区在4400~4200 cal. aBP之间为降水较少的干旱期。

温度和降水等气候条件的变化可以引起植被、土壤侵蚀、河流水量和泥沙来源的变化,从而导致河流的冲淤变化,部分信息可以反映在河流阶地上(魏全伟等,2006)。气候偏暖湿时,可使流域植被更加发育,侵蚀作用趋缓,化学风化作用加强,风化产物颗粒更细;气候偏干冷时,则情况会相反(苏志珠等,2018)。河流的下切与稳定的湿热气候同期,河流加积作用发生在由干向湿或者由湿向干的过渡时期,气候变化通过流域降水量、

植被发育、风化、侵蚀过程等因素的调控,对各种河流地貌过程和河流沉积物产生重要影响,可以通过对河流阶地沉积的研究反演气候的变化(许应石等,2020)。龙潭河位于湖北省宜昌市夷陵区,两岸阶地保存较为完整,呈块状分布,地势低平宽阔易于取样调查。笔者对龙潭河阶地的调查研究可以进一步丰富前人在宜昌地区河流阶地研究的数据,并通过该河流阶地的沉积学特征,得到龙潭河形成演化的过程,一定程度上反映沉积物形成时期的自然地理条件和古气候特点,为认识该地区第四纪环境演化提供基础支撑。

1 区域地质概况

龙潭河位于湖北省宜昌市夷陵区鸦鹊岭镇龙潭村五组至新场村六组,属于柏林河二级支流,经后河与柏林河相连。宜昌东部地区地势由西北向东南倾斜,地貌呈山区向平原的逐渐变化,区内地貌成因类型主要有侵蚀剥蚀中低山和丘陵、堆积剥蚀岗地和堆积平原;研究区位于堆积剥蚀岗地和堆积平原地貌区,海拔在42~100 m,地形坡度一般小于15°。宜昌地区多年平均降水量为1 215.6 mm,夏季降雨最多,研究区区域位置及水系见图1。研究区内出露地层岩性沿着龙潭河上游至下游分别为上白垩统红花套组砖红色中厚层-块状砂质夹泥岩、跑马岗组棕黄-杂色中厚层粉细砂岩和红色泥岩、罗镜滩组杂色中厚层-块状砾岩。

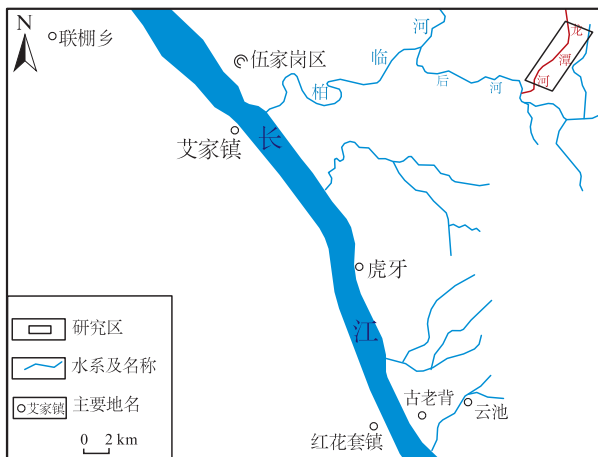


图1 研究区区域位置及水系略图

Fig. 1 Schematic map showing location of the study area and water system

2 研究方法

对河流阶地的野外调查采用从点到线的研究方法,选取了12个调查点(D709~D720)、4条典型河流断面横剖面(P₁~P₄),龙潭河阶地剖面调查及分布类型见图2。沿龙潭河从上游到下游采集阶地沉积物样品共8个(JD016、JD020、JD021、JD023、JD025、JD026、JD027、JD030)。沉积物样品送武汉地质调查中心岩矿测试研究室进行熔片法-X射线荧光光谱法(XRF)全量分析,试样用无水四硼酸锂熔融,以硝酸铵为氧化剂,加氟化锂和少量溴化锂作助熔剂和脱模剂;试样与熔剂的质量比为1:10;在熔样机上于1 150℃熔融后制成玻璃片;再用波长色散X射线荧光光谱仪进行测量。各分析元素均用 α 理论系数校正元素间的吸收-增强效应。沉积物常量元素的数据分析运用SPSS19.0软件进行分析。

3 结果与讨论

3.1 阶地分布结构

研究区内出露地层岩性沿龙潭河上游至下游分别为上白垩统红花套组砖红色中厚层-块状砂质夹泥岩、跑马岗组棕黄-杂色中厚层粉细砂岩和红色泥岩、罗镜滩组杂色中厚层-块状砾岩。在龙潭河发育四级阶地,其中,西岸以基座阶地和堆积阶地为主,东岸阶地以侵蚀阶地为主(图2)。龙潭河各级阶地分布结构见表1,野外阶地采样照片图3。

3.2 阶地沉积特征

沉积物中化学元素的分布、分配和迁移、富集规律有助于分析沉积物物质成分特征及沉积物的堆积环境。运用熔片法-X射线荧光光谱法(XRF)对龙潭河阶地8个沉积物样品进行全量分析,均达到了要求的检出限。测试沉积物样品所属阶地见表2。龙潭河阶地样品的化学组成均以SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃为主(表3),与上地壳(UCC)平均值相比(Taylor et al., 1985),MgO、K₂O、CaO、Na₂O大量淋失,其中除了钾容易被黏土吸附,其质量分数高于1%外,其他易溶组分含量均不足1%。这是因为沉积物中的主元素Na、Mg、Ca等容易发生迁移。因此,一般认为沉积物中MgO、CaO、Na₂O含量较高时可

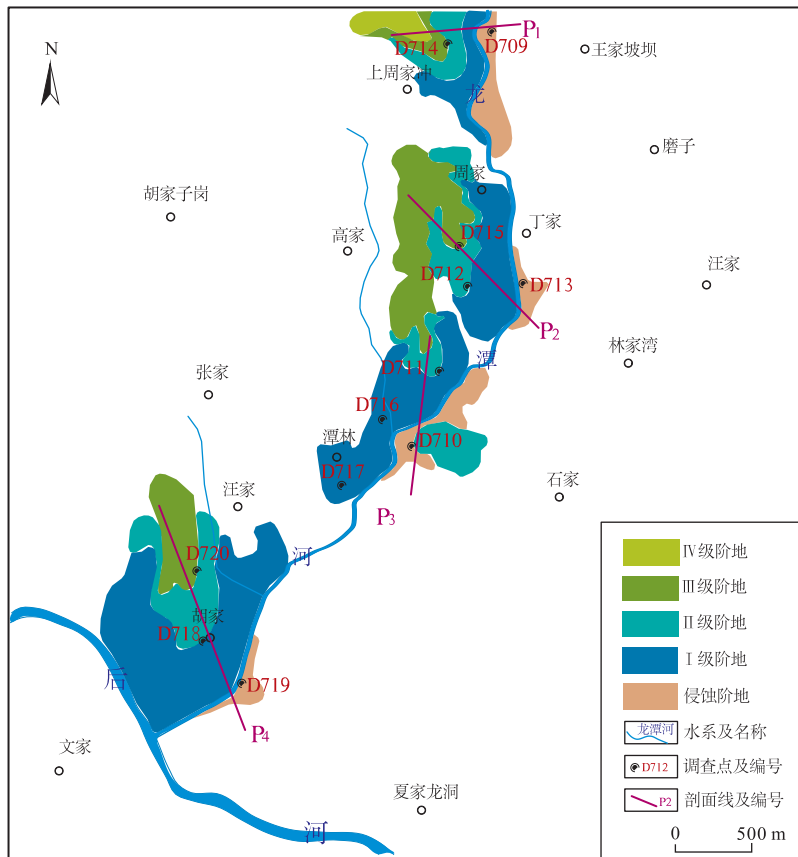


图 2 龙潭河阶地剖面调查及分布类型图

Fig. 2 Schematic map of profiled delivery and distribution types of Longtan River terrace

表 1 龙潭河阶地的分布结构表

Tab. 1 Summary of the distribution structure of Longtan River terrace

剖面	发育阶地	阶地高程(m)	阶地类型	描述
P ₁	IV	133	基座阶地	阶面上覆明显砾石层,基岩为白垩系上统红花套组(K ₂ h)砖红色细砂岩
	III	129	堆积阶地	无
	II	121	基座阶地	阶面上覆明显砾石层,基岩为白垩系上统红花套组(K ₂ h)砖红色细砂岩
	I	西 116/ 东 124	西岸堆积阶地/ 东岸侵蚀阶地	东岸侵蚀阶地的基岩裸露为白垩系上统红花套组(K ₂ h)砖红色细砂岩
P ₂	III	127	基座阶地	阶面上覆明显砾石层,基岩为白垩系上统红花套组(K ₂ h)砖红色细砂岩
	II	105	堆积阶地	无
	I	均为 95	西岸堆积阶地/ 东岸侵蚀阶地	东岸侵蚀阶地的基岩裸露为白垩系上统红花套组(K ₂ h)砖红色细砂岩
P ₃	II	105	堆积阶地	阶地剖面可见明显砾石层,砾石层随地面起伏分布
	I	西 97/ 东 86	西岸堆积阶地/ 东岸侵蚀阶地	东岸侵蚀阶地的基岩裸露为白垩系上统跑马岗组(K ₂ p)厚层状浅红色含砾粉细砂岩,砾石含量较少,且砾径较小,表层呈强风化石状,局部可见含砾粉砂岩,砂可见矿物成分,且砾石含量较多,呈条带状
P ₄	III	99	堆积阶地	无
	II	93	基座阶地	阶面上覆明显砾石层,基岩为白垩系上统红花套组(K ₂ h)砖红色细砂岩
	I	西 84/ 东 77	西岸堆积阶地/ 东岸侵蚀阶地	东岸侵蚀阶地的基岩裸露为砖红色细砂岩,基岩裸露为白垩系上统跑马岗组(K ₂ p)红褐色含砾粉细砂岩,表面较湿润,有水渗出

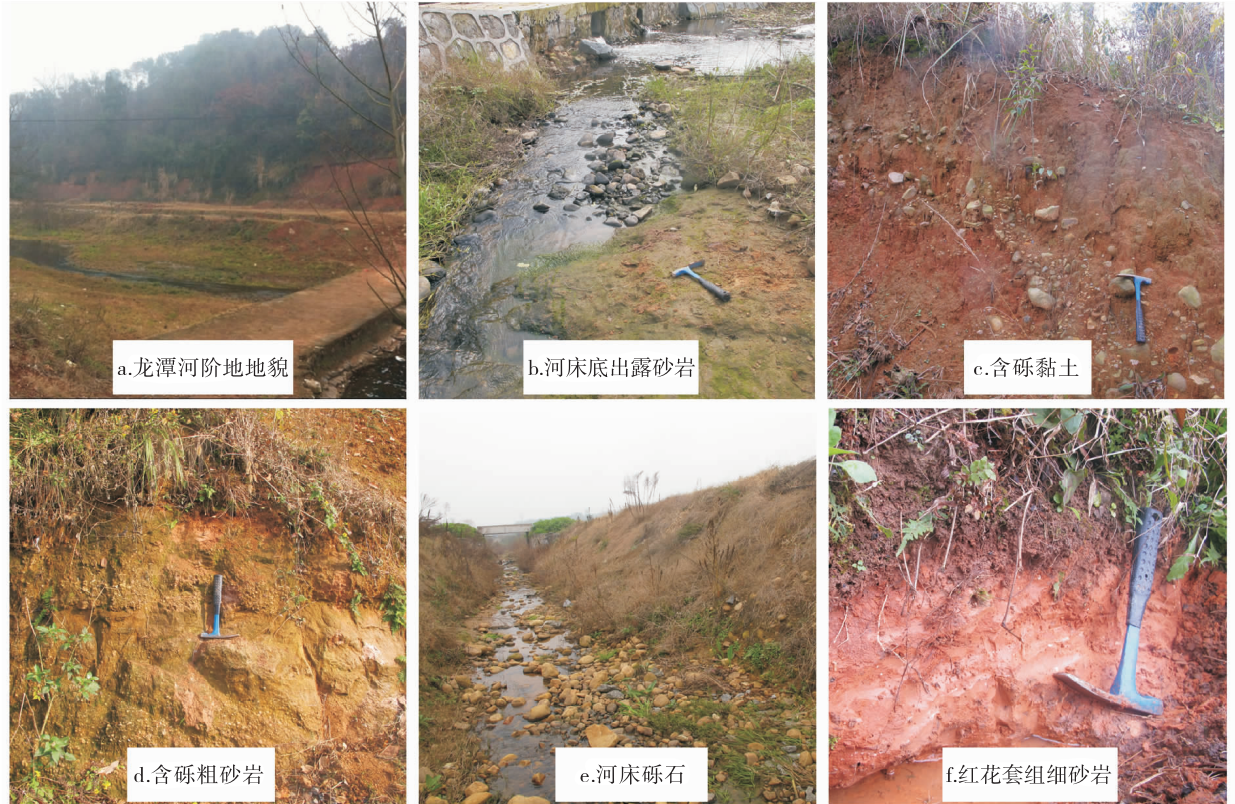


图 3 野外阶地采样照片
Fig. 3 Field terrace sampling photos

表 2 XRF 测试样品表
Tab. 2 Testing samples using XRF

阶地	样品数量	分布剖面			
		P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
I	2	JD016	JD023	—	—
II	3	JD025	—	JD020、JD021	—
III	2	—	JD027	—	JD030
IV	1	JD026	—	—	—

以反映当时气候条件比较干旱,降水较少;相反,则风化作用较强,反映了气候湿润(朱宏博等,2019)。

龙潭河阶地沉积物中的 MgO、CaO、Na₂O 含量较低的特征反映了当时气候条件较湿润,经历了较强的风化淋溶作用。而 Al 和 Fe 元素的迁移能力较弱,往往残留在原地形成红土。因此,一般认为沉积物中 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的含量较高时可以反映当时的气候比较湿润,反之气候比较干旱(曾允孚,1986)。龙潭河阶地沉积物中的 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量较高的特征可以反映出当时气候条件较湿润。

通常采用常量元素的比值来表征沉积物化学风化强度(张丽敏等,2016;马晓晨等,2018)。笔者选用 4 个风化指标来具体分析龙潭河地区的环境演化过程(表 4)。其中,有化学蚀变指数(CIA 值)、风化淋溶系数(*ba*)、硅铝率(SiO₂/Al₂O₃)和硅铝铁率(SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃))。

化学蚀变指数(CIA 值)作为一个判断化学风化程度的常用指标被国内外学者广泛用于化学风化强度评价和古气候重建方面的研究(陈骏等,2001;王立强等,2013),CIA 值与样品中黏土矿物/长石值呈正相关,因此可以有效地指示长石风化成黏土矿物的程度,从而可以定量表示出硅酸盐矿物的化学风化强度(Nesbitt and Young,1982)。CIA 计算公式为:

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

其中 CaO* 为硅酸盐组分中的钙质成分,根据 McLennan 等(1993)提出的校正公式 $CaO^* = CaO - (10/3 \times P_2O_5)$ 进行了校正。通常,沉积物的风化程度越强,脱硅富铝化程度越高,CIA 值就越大(应

表3 沉积物样品常量元素(%)组成与上地壳(%)比较表

Tab. 3 Composition of constant elements(%) of sediments' samples comparing with upper crust(%)

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	灼减量 (LOI)	总和		
上地壳(UCC)	66.00	15.20	4.50	4.20	2.20	3.40	3.90	0.50	0.16	0.06	—	—		
Ⅳ级	JD026	70.85	12.42	4.70	0.11	0.56	0.90	1.59	0.12	0.65	0.04	0.07	7.84	99.85
	JD027	79.90	7.82	4.05	0.20	0.28	0.31	1.32	0.33	0.78	0.04	0.03	4.78	99.85
Ⅲ级	JD030	73.19	11.55	4.66	0.25	0.36	0.59	1.49	0.31	0.74	0.05	0.06	6.57	99.81
	JD020	81.75	6.98	2.88	0.16	0.54	0.39	1.65	0.42	0.59	0.05	0.07	4.37	99.85
Ⅱ级	JD021	78.48	8.70	3.44	0.18	0.48	0.50	1.67	0.61	0.92	0.06	0.10	4.7	99.83
	JD025	75.26	10.67	4.38	0.12	0.35	0.64	1.70	0.31	0.90	0.05	0.09	5.34	99.81
Ⅰ级	JD016	79.97	7.69	4.08	0.12	0.48	0.48	1.26	0.27	0.64	0.06	0.12	4.67	99.84
	JD023	75.34	10.20	4.11	0.22	0.52	0.63	1.72	0.61	0.88	0.07	0.14	5.38	99.81

立朝等,2012)。结合 Nesbitt 等(1984)的研究成果,现代沉积物 CIA 值反映的气候条件大致为:当 CIA 值在 50~65 时,反映寒冷、干燥气候条件下的低等化学风化作用;CIA 值介于 65~85,反映温暖、湿润条件下中等化学风化程度(刘兵等,2007);当 CIA 值在 85 以上时,反映炎热、潮湿气候条件下的强烈化学风化作用。龙潭河阶地沉积物的 CIA 值介于 75~85(表 4),表明龙潭河流域经历了温暖、湿润条件下的中等化学风化环境,并表现出由Ⅳ级阶地向Ⅰ、Ⅱ级阶地逐渐递减的趋势。

风化淋溶系数(*ba*)值指沉积物中的盐基与氧化铝的分子比值,可以反映沉积物的淋溶程度,被许多学者用来分析淋溶程度(朱丽东,2007;马晓晨等,2018),*ba* 值的计算公式为:

$$ba = (K_2O + Na_2O + CaO + MgO) / Al_2O_3$$

一般情况下,*ba* 值越大,表示风化淋溶作用越弱;反之,*ba* 值越小,表示风化淋溶作用越强。该阶地 *ba* 值的变化范围为 0.26~0.37(表 4),较稳定且变化很小,这表明龙潭河流域经历的风化淋溶作用较强。

硅铝率(SiO_2/Al_2O_3)和硅铝铁率($SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$)也可以作为气候变化的标志之一(杨元根等,2000;朱丽东,2007),反映了黄土-古土壤形成的氧化-还原条件和风化作用(崔王,2007)。在物源基本没有变化的条件下,硅铝率越高,表明地球化学沉积环境越干旱,即化学风化强度越弱。根据地球化学理论(文启忠,1989),当 $SiO_2/Al_2O_3 > 2$ 时,表明此区域属于偏碱性环境, SiO_2 大量迁移,

Al_2O_3 相对增加。该阶地沉积物硅铝率的变化范围为 5.7~11.71(表 4),均大于 2,表明该地区属于偏碱性环境,同时由Ⅳ级阶地向Ⅰ、Ⅱ级阶地化学沉积环境逐渐变得更为干旱。一般来说,硅铝铁率值越大,表明化学作用越弱,气候较为干凉;该值越小,表明化学作用越强烈,气候较为温暖湿润,硅迁移而铝和铁富集。该阶地硅铝铁率的变化范围为 4.14~6.59(表 4),表明龙潭河流域经历的化学作用程度由Ⅳ级阶地向Ⅰ、Ⅱ级阶地逐渐减弱,气候由湿润转为干凉。

综合沉积物的元素组成及风化指标来看,龙潭河流域内整体经历了温暖、湿润条件下的中等化学风化环境,其中Ⅳ级阶地含砾黏土层经历的风化程度最强,Ⅱ级阶地黏土层经历的风化程度最弱,Ⅰ、

表4 龙潭河四级阶地风化指标表

Tab. 4 The weathering index of four level terraces in Longtan River

阶地级数	编号	CIA(%)	<i>ba</i>	硅铝率	硅铝铁率
Ⅳ级	JD026	85.31	0.26	5.70	4.14
	JD027	81.38	0.29	10.22	6.73
Ⅲ级	JD030	85.29	0.24	6.34	4.52
	JD020	73.99	0.43	11.71	8.29
Ⅱ级	JD021	77.35	0.37	9.02	6.46
	JD025	82.91	0.28	7.05	5.00
Ⅰ级	JD016	81.03	0.32	10.40	6.79
	JD023	79.52	0.34	7.39	5.26

Ⅲ级阶地处于两者之间。因此,可以反映出龙潭河流域内第四纪以来气候湿热程度趋于减弱,由湿润环境转向干燥环境。

3.3 多元统计分析

根据分析沉积物常量元素之间的相关关系发现,某些指标之间可能存在较强的相关性,运用 SPSS19.0 进行相关性分析,该阶地 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 、 MgO 、 MnO 和 P_2O_5 含量间线性相关较好,呈明显正相关(表 5),相关系数分别为 0.813、0.887、0.861;而 SiO_2 与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MgO 含量间线性相关较好,呈明显负相关,相关系数分别为

0.996、0.823、0.903。

根据黄英等(2002)的方法,以倍半氧化物($\text{R}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$)的形式来讨论沉积物中 R_2O_3 与 SiO_2 含量间的关系时,发现在龙潭河阶地沉积物中二者也具有很好的线性负相关性,相关系数 R^2 达 0.974(图 4a)。从龙潭河各级阶地沉积物性质和物质组成上的相似性,以及富铝铁化和较强化学淋蚀的特征来看,基本符合所在亚热带地区脱硅富铝(脱硅富铝铁)的基本成土过程,这进一步地验证了龙潭河地区属于温暖湿润的化学风化环境。

表 5 龙潭河阶地沉积物常量元素间的相关系数矩阵表

Tab. 5 Correlation coefficients of constant elements insediments of Longtan River terrace

常量元素	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
SiO_2	1										
Al_2O_3	-0.996*	1									
Fe_2O_3	-0.823*	0.813*	1								
FeO	0.003	0.007	-0.014	1							
CaO	-0.076	0.032	-0.307	-0.338	1						
MgO	-0.903*	0.887*	0.645	-0.343	0.42	1					
K_2O	-0.308	0.347	-0.197	0.01	0.389	0.409	1				
Na_2O	0.373	-0.353	-0.569	0.514	0.128	-0.383	0.468	1			
TiO_2	-0.174	0.216	0.134	0.274	-0.368	0.034	0.442	0.577	1		
P_2O_5	0.245	-0.248	-0.223	0.195	0.251	-0.153	0.099	0.693	0.4	1	
MnO	-0.005	0.001	-0.106	-0.081	0.507	0.217	0.385	0.536	0.324	0.861*	1

注: * 表示 $p < 0.05$, 相关性较强。

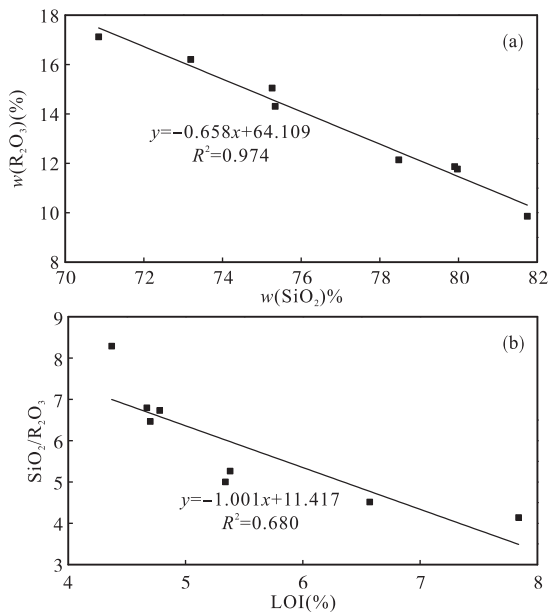
根据朱丽东(2007)的研究方法,对龙潭河阶地沉积物样品测试过程中的灼失量(LOI)进行分析,结果显示土样的灼失量为 4.37%~7.84%,发现其与 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ (分子比)也存在线性负相关关系(图 4b),相关系数 R^2 为 0.68。由此可以印证朱丽东得出的结论“沉积物的灼失量具有指示沉积物脱硅富铝程度的意义”这一观点。其中,灼失量越大,相对应硅铝率或者硅铝铁率值越小,说明脱硅富铝程度就越强。

通过以上分析可知,沉积物的某些常量元素指标之间确实存在着较强的相关性,所以不能直接用这些指标进行综合评价,否则会造成信息的重叠,影响评价结果的客观性(向东进等,2005)。多元统计方法中的主成分分析方法可以把多个指标转化为少

数几个不相关的综合指标,因此,考虑利用主成分进行综合评价。利用 SPSS19.0 软件对 11 个常量元素指标进行主成分分析,相关矩阵的特征根及其对应的贡献率、累计贡献率铜陵见表 6。主成分分析得出的前 4 个特征根的累计贡献率就已经达到 90%以上,表明主成分分析的效果很好,基本能够反映龙潭河阶地大部分沉积环境信息。

根据 SPSS19.0 软件分析所得,前 4 个特征根对应的特征向量分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 (表 7)。

根据主成分的系数可以初步推断,第一主成分主要反映在地球表生条件下抗风化作用强的元素(SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量)及易受降雨淋溶的 MgO 含量的信息;第二主成分主要反映 2 个易溶组分指标(Na_2O 、 MnO 含量)的信息;第三主成分主要反映



a. 主元素; b. 灼失量

图4 龙潭河阶地沉积物相关性分析图

Fig. 4 Correlation analyze of sediments in Longtan River terrace

表6 主成分分析的特征根及其贡献率表

Tab. 6 Characteristic roots and rate of contribution in principal component analyze

序号	特征根	贡献率	累积贡献率
1	4.017	36.516	36.516
2	3.065	27.866	64.382
3	1.974	17.944	82.326
4	1.057	9.613	91.939
5	0.737	6.702	98.641
6	0.115	1.047	99.688

表7 4个主成分的特征向量表

Tab. 7 Characteristic vector of four principal component

主成分	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
SiO ₂	-0.46	-0.18	-0.10	0.02
Al ₂ O ₃	0.46	0.19	0.13	-0.05
Fe ₂ O ₃	0.42	0.00	0.24	0.39
FeO	-0.13	0.08	0.51	-0.12
CaO	0.01	0.25	-0.59	-0.09
MgO	0.43	0.24	-0.19	0.00
K ₂ O	0.05	0.42	-0.06	-0.62
Na ₂ O	-0.34	0.37	0.18	-0.17
TiO ₂	-0.03	0.35	0.45	-0.03
P ₂ O ₅	-0.25	0.39	0.00	0.51
MnO	-0.11	0.47	-0.19	0.39

经历还原作用(FeO、CaO 含量)及惰性元素 TiO₂ 含量的信息;第四主成分主要反映可能受到人为施肥影响的元素(K₂O、P₂O₅ 含量)的信息。综合来看,龙潭河各级阶地样品的沉积特征存在着较大的差异。IV级阶地经历的风化程度最强,主要表现在SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 含量方面,而I、II、III级阶地样品体现出各自所经历的风化程度有强有弱,可能是取样剖面分布不均一的原因。

分别以4个主成分的贡献率为权重,构建主成分综合评价模型,可以得到各样品沉积特征的综合评价价值及排序结果(表8)。其中,IV-1为IV级阶地在P₁剖面的样品JD026,III-2为III级阶地在P₂剖面的样品JD027,III-4为III级阶地在P₄剖面的样品JD030,II-3a为II级阶地在P₃剖面的a样品JD020,II-1为II级阶地在P₁剖面的样品JD025,II-3b为II级阶地在P₃剖面的b样品JD021,I-1为I级阶地在P₁剖面的样品JD016,I-2为I级阶地在P₂剖面的样品JD023。因此,大致可以反映出龙潭河流域内第四纪以来气候湿热程度趋于减弱。

表8 龙潭河阶地各个样品的综合评价价值及排序结果表

Tab. 8 Comprehensive evaluation and ranking results of every sample in Longtan River terrace

样品	IV-1	I-2	III-4	II-3b
名次	1	2	3	4
综合评价价值	97.77	74.35	72.38	68.06
样品	II-1	I-1	III-2	II-3a
名次	5	6	7	8
综合评价价值	-13.67	-65.29	-80.94	-152.21

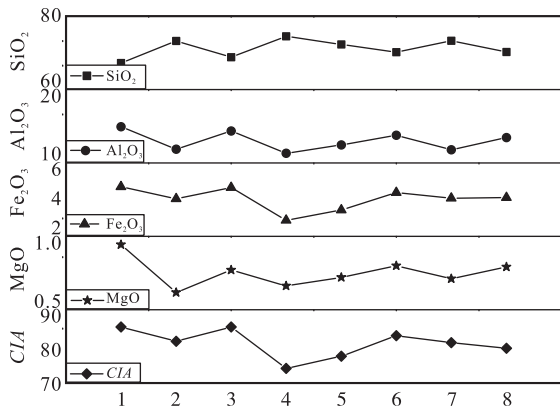
分析第一主成分与化学蚀变指数(CIA)之间的关系也得到了一个规律:第一主成分Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 含量曲线与CIA 值变化趋势非常相似,而SiO₂ 含量因为与Al₂O₃ 含量呈负相关,含量曲线变化趋势与CIA 值变化正好相反(图5)。通常,沉积物的风化程度越强,脱硅富铝化程度越高,CIA 值越大(应立朝等,2012)。因此,从这个角度第一主成分反映了龙潭河流域的化学风化作用强度,在相对暖湿气候条件下,第一主成分含量高;在冷干气候条件下,第一主成分含量低。

以CIA 值为因变量,以4个主成分为自变量,建立多元线性回归模型,运用SPSS19.0 软件对模

型参数进行逐步回归分析,最终得到回归方程为:

$$CIA = 80.848 + 1.676a_1 = 80.848 + 1.676(-0.46SiO_2 + 0.46Al_2O_3 + 0.42Fe_2O_3 - 0.13FeO + 0.01CaO + 0.43MgO + 0.05K_2O - 0.34Na_2O - 0.03TiO_2 - 0.25P_2O_5 - 0.11MnO) = 80.848 - 0.771SiO_2 + 0.771Al_2O_3 + 0.704Fe_2O_3 - 0.218FeO + 0.017CaO + 0.721MgO + 0.084K_2O - 0.570Na_2O - 0.050TiO_2 - 0.419P_2O_5 - 0.184MnO$$

调整后的 $R^2 = 0.705$,可以看出第一主成分对 CIA 值有很强的解释能力,方程通过了 F 显著性检验(方差齐性检验,针对方程),参数估计通过了 t 显著性检验(学生 t 检验,针对方程参数);Durbin-Watson 检验值为 2.24,属于 1.7~2.3 正常范围内,提示残差间无明显的相关性;共线性统计量 VIF 值为 1,说明方程均不存在多重共线性。因此,可以确定对回归模型进行回归诊断,均符合假定,参数的估计和有关的假设检验都是可靠的。同时,说明逐步回归的拟合程度很好,得出的回归方程说明了第一主成分与 CIA 值线性相关,CIA 值与第一主成分关系曲线图结果一致(图 5),很好的印证了这一结论。



(图中横坐标的 1~8 分别代表样品 IV-1、III-2、III-4、II-3a、II-1、II-3b、I-1、I-2)

图 5 第一主成分含量曲线与 CIA 值曲线对比图

Fig. 5 Comparison of the first principal component and CIA

4 结论

(1)龙潭河的阶地级数共分为 4 级。西岸阶地类型主要是基座阶地和堆积阶地,东岸阶地类型主要为侵蚀阶地。其中,IV 级阶地为基座阶地;III 级阶地

地在 P_1 、 P_4 剖面为堆积阶地,在 P_2 剖面为基座阶地;II 级阶地在 P_2 、 P_3 剖面为堆积阶地,在 P_1 、 P_4 剖面为基座阶地;I 级阶地在东岸多为侵蚀阶地,在西岸为堆积阶地。从龙潭河两岸地貌差异来看,东岸地面坡度较大,剥蚀作用较为强烈,多属于侵蚀阶地;西岸地区地势相对较为平缓,基座阶地分布较为广泛,I、II 级阶地多属于堆积阶地。

(2)阶地的沉积特征分析结果从 2 个方面表明了龙潭河流域内第四纪以来气候湿热程度趋于减弱。①据分析化学组分之间的相关关系和灼失量,发现阶地沉积物性质和物质组成上的较为相似,都具有富铝铁化和较强化学淋蚀的特征,符合所属亚热带地区脱硅富铝(脱硅富铝铁)的基本成土过程,反映了龙潭河地区的温暖湿润化学风化环境。②运用多元统计的分析方法对沉积物常量元素指标进行主成分综合评价,提取的第一主成分与化学蚀变指数 CIA 值两者相关性较好,之后再用 4 个主成分与 CIA 值进行的回归分析,拟合程度较高,得出的回归方程证实了第一主成分与 CIA 值线性相关,与文中得出的 CIA 值与第一主成分关系曲线图结果一致。

致谢:在野外工作中得到中国地质调查局武汉地质调查中心陈立德教授、杨艳林、路韬等相关地质人员的大力支持与协助,在此一并致谢。

参考文献(References):

陈骏,安芷生,刘连文,等.最近 2.5Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J].中国科学(D 辑),2001,31(2):136-145.
 CHEN Jun, AN Zhisheng, LIU Lianwen, et al. The changes in chemical composition of dust from the Loess Plateau and the chemical weathering of Asian inland since the last 2.5Ma[J]. Science in China(Series D),2001,31(2):136-145.
 崔王.大别山北麓晚更新世沉积过程中古气候变化的研究[D].合肥:合肥工业大学,2007:1-69.
 CUI Wang. Study on change of paleoclimatic climate of late-pleistocene in course of Sediment in the north of Dabie Mouniain[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007:1-69.
 曹林.金衢盆地河流阶地发育和环境变化[D].浙江师范大学,2012:1-69.
 CAO Lin. The terrace development and environmental

- change in the Jinhua-Quzhou Basin[D]. Zhejiang Normal University, 2012: 1-69.
- 黄英, 符必昌. 红土化学成分的变化特征[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2002, 27(4): 63-70.
- HUANG Ying, FU Bichang. The change properties of the chemical compositions for laterite[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2002, 27(4): 63-70.
- 李建刚, 刘晓燕, 袁四化, 等. 伊犁盆地三道河河流阶地沉积物粒度特征及其古气候响应[J]. 西北地质, 2020, 53(04): 11-19.
- LI Jiangang, LIU Xiaoyan, YUAN Sihua, et al. Grain-size characteristics and paleoclimate response of terrace sediments in Sandaohu river of Yili basin[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(04): 11-19.
- 刘兵, 徐备, 孟祥英, 等. 塔里木板块新元古代地层化学蚀变指数研究及其意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1664-1670.
- LIU Bin, XU Bei, MENG Xiangying, et al. Neoproterozoic strata in the Tarim plate and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7): 1664-1670.
- 毛欣, 李长安, 张玉芬, 等. 湖北天门谭家岭遗址全新世中晚期气候变化及其对人类活动的影响[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(10): 1545-1553.
- MAO Xin, LI Chang'an, ZHANG Yufen, et al. Impact of middle to late Holocene climate changes on human activities at Tanjialing Site, Tianmen, Hubei Province[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2014, 39(10): 1545-1553.
- 马晓晨, 王家生, 陈燊, 等. 华北房山景儿峪组顶部古风化壳常量元素地球化学特征及其古气候意义[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 3853-3872.
- MA Xiaochen, WANG Jiasheng, CHEN Can, et al. Major element compositions and paleoclimatic implications of paleo-regolith on top Jingeryu formation in Fangshan, north China [J]. Earth Science, 2018, 43(11): 3853-3872.
- 苏志珠, 吴宇婧, 孔梦园, 等. 常量元素记录的毛乌素沙地东南缘全新世气候变化[J]. 中国沙漠, 2018, 38(03): 516-523.
- SU Zhizhu, WU Yujing, KONG Mengyuan, et al. Climate change revealed by geochemical major elements during Holocene in the southeastern Mu US desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(03): 516-523.
- 沈玉昌, 龚国元. 河流地貌学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 61-63.
- SHEN Yuchang, GONG Guoyuan. An introduction to fluvial geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1986: 61-63.
- 邵晓华, 汪永进, 程海. 179~129 ka B. P. 时段千年尺度气候事件的湖北神农架石笋记录[J]. 地球化学, 2008, 37(2): 107-117.
- SHAO Xiaohua, WANG Yongjin, CHENG Hai. Millennial-scale variability of East Asian summer monsoon during 179~129 ka B. P. from Shanbao Cave at Mountain Shennongjia, Hubei Province [J]. Geochimica, 2008, 37(2): 107-117.
- 王立强, 王亲. 河西走廊及其毗邻地区地表物沉积元素特征[J]. 西北地质, 2013, 46(02): 69-80.
- WANG Liqiang, WANG Qin. Elemental compositions of surface deposits in Hexi corridor and its adjacent areas, northwestern China[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(02): 69-80.
- 王晓翠, 朱诚, 吴立, 等. 湖北江汉平原 JZ-2010 剖面沉积物粒度特征与环境演变[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 480-486.
- WANG Xiaocui, ZHU Cheng, WU Li, et al. Grain-size characteristics and sedimentary environment change of JZ-2010 section in Jiangnan Plain, Hubei Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3): 480-486.
- 魏全伟, 谭利华, 王随继. 河流阶地的形成、演变及环境效应[J]. 地理科学进展, 2006, 25(03): 55-61.
- WEI Quanwei, TAN Lihua, WANG Suiji. Formation and evolution of river terrace and environment responses[J]. Progress in Geography, 2006, 25(03): 55-61.
- 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 12-20.
- WEN Qizhong. The geochemistry of loess in China[M]. Beijing: Science Press, 1989: 12-20.
- 向东进, 李宏伟, 刘小雅. 实用多元统计分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005: 131-144.
- XIANG Dongjin, LI Hongwei, LIU Xiaoya. Applied multivariate statistical analysis[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2005: 131-144.
- 许应石, 欧健, 郭刚, 等. 西昆仑依格孜也尔河阶地沉积特征及其对河流演化的指示[J]. 华东地质, 2020, 41(03): 237-245.
- XU Yingshi, OU Jian, GUO Gang, et al. Sedimentary characteristics of Yigeziyer River terraces of West Kunlun, China and its implications for river evolution[J]. East China Geology, 2020, 41(03): 237-245.
- 杨元根, 刘丛强, 袁可能, 等. 南方红土形成过程及其稀土元

- 素地球化学[J]. 第四纪研究, 2000, 20(05): 469-480.
- YANG Yuangen, LIU Congqiang, YUAN Keneng, et al. Laterite formation process in southern China and its earth element(REE) geochemistry[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(05): 469-480.
- 应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 川西平原中更新世网纹红土主量元素地球化学特征[J]. 高校地质学报, 2012, 18(04): 759-764.
- YING Lichao, LIANG Bing, WANG Quanwei, et al. Major elements characters of the middle Pleistocene vermicular red clay from the western Sichuan plain[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(04): 759-764.
- 曾允孚. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社, 1986.
- ZENG Yunfu. *Sedimentary Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- 赵小明, 刘圣德, 张权绪, 等. 鄂西长阳南华系地球化学特征的气候指示意义及地层对比[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 576-585.
- ZHAO Xiaoming, LIU Shengde, ZHANG Quanxu, et al. Geochemical characters of the Nanhua system in Changyang, western Hubei Province and its implication for climate and sequence correlation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 576-585.
- 张丽敏, 李永军, 向坤鹏, 等. 新疆达尔布特蛇绿混杂岩带硅质岩地球化学及沉积环境[J]. 西北地质, 2016, 49(02): 70-83.
- ZHANG Limin, LI Yongjun, XIANG Kunpeng, et al. Geochemical characteristic and depositional environment of the silicalite from the Darbut phiolitic Melange zone in north Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(02): 70-83.
- 朱宏博, 向芳, 王金元, 等. 三峡及邻区第四纪沉积物地球化学特征及其对古气候的指示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(06): 746-753.
- ZHU Hongbo, XIANG Fang, WANG Jinyuan, et al. The geochemical characteristics of sediments in the Three Gorges of Yangtze River and its adjacent areas: Implication for Quaternary paleoclimate[J]. *Journal of Chendu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2019, 46(06): 746-753.
- 朱育新, 薛滨, 羊向东, 等. 江汉平原沔城 M1 孔的沉积特征与古环境重建[J]. 地质力学学报, 1997, 3(4): 79-86.
- ZHU Yuxin, XUE Bin, YANG Xiangdong, et al. Characteristic features of the sedimentary samples from the borehole M₁ in Jianghan Plain and reconstruction of palaeo environment [J]. *Journal of Geomechanics*, 1997, 3(4): 79-86.
- 朱丽东. 中亚热带加积型红土及其所记录的第四纪环境变化探讨[D]. 兰州:兰州大学, 2007: 1-132.
- ZHU Lidong. Aggradation red earth sediments in mid-subtropics of China and their recorded environmental changes during Quaternary[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 1-132.
- Brakenridge G. R. Late quaternary floodplain sedimentation along the Pomme de Terre River, southern Missouri [J]. *Quaternary Research*, 1981, 15(1): 62-76.
- Bull W B. Threshold of critical power in streams[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1979, 90(5): 453-464.
- Chatter J C, Hoover K A. Response of the Columbia River fluvial system to Holocene climatic change[J]. *Quaternary Research*, 1992, 37(1): 42-59.
- Fuller I C, Macklin M G, Lewin J. River response to high-frequency climate oscillations in Southern Europe over the past 200ka[J]. *Geology*, 1998, 26(3): 275-278.
- Nesbitt H W and Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- Nesbitt H W and 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.
- Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- Tribovillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Tracematerials as pale-oredox and paleoproductivity proxies: an update [J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1-2): 12-32.