丛云燕,刘娜,高福红,等.江西省信江盆地上白垩统塘边组红色砂岩成土作用特征及地质意义.吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):84-97. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20240015.
Cong Yunyan, Liu Na, Gao Fuhong, et al. Pedogenesis Characteristics and Geological Significance of the Red Sandstone in Upper Cretaceous Tangbian Formation, Xinjiang Basin, Jiangxi Province. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2025,55(1):84-97. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240015.

江西省信江盆地上白垩统塘边组红色砂岩成土作用特征及地质意义

丛云燕,刘 娜,高福红,张松旭
吉林大学地球科学学院,长春 130061

摘要:古土壤是研究古气候的重要载体。目前针对成土作用的研究主要围绕着成土过程中元素的迁移行为和成土演化过程等方面,但对成土作用表现形式的相关报道却很少。江西省信江盆地上白垩统塘边组以发育大型交错层理红色砂岩为特征,是华南白垩纪温室气候陆地沉积的典型代表。本文在详细的野外调查基础上,运用岩石学和地球化学方法对信江盆地白垩系塘边组的红色砂岩开展成土作用研究,探究晚白垩世信江盆地的古气候特征。研究区塘边组红色砂岩的岩石类型主要为中粒长石砂岩。塘边组沉积物普遍经历了成土作用,其主要识别特征包括发育于碎屑颗粒边部的黏土膜、微晶—亮晶碳酸盐胶结物和潜育作用。化学蚀变指数(CIA)分布在50.20~83.30之间(平均值58.08),反映该套红色砂岩处于弱化学风化水平。微量元素分析以及成土作用的识别,共同指示研究区砂岩形成于干旱—炎热的古气候,这种干旱—炎热的古气候可能与中国东部晚白垩世高大沿岸山系阻碍古太平洋湿润水汽向华东南内陆地区的流入有关。

关键词:红色砂岩;成土作用;地球化学;古气候;信江盆地;塘边组;晚白垩世
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240015 **中图分类号**:P581 **文献标志码**:A

Pedogenesis Characteristics and Geological Significance of the Red Sandstone in Upper Cretaceous Tangbian Formation, Xinjiang Basin, Jiangxi Province

Cong Yunyan, Liu Na, Gao Fuhong, Zhang Songxu
College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, *China*

Abstract: Paleosol is a significant carrier for studying paleoclimate. Presently, the research on pedogenesis principally focuses on the migratory behavior of elements and the evolutionary process of

收稿日期:2024-01-14
作者简介:丛云燕(1997—),女,硕士研究生,主要从事沉积岩石学和沉积地球化学方面的研究,E-mail: congyy21@mails.jlu.edu.cn
通信作者:刘娜(1984—),女,副教授,硕士生导师,主要从事沉积岩石学和储层沉积学方面的研究,E-mail: liuna_jlu@126.com
基金项目:国家自然科学基金项目(42272146)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (42272146)

pedogenesis, with limited reports on the manifestations of pedogenesis. The Upper Cretaceous Tangbian Formation in Xinjiang basin is dominantly composed of red sandstone with large cross-beddings, which is a typical representative of Cretaceous greenhouse climate terrestrial deposits in South China. Based on detailed field investigation, petrological and geochemical methods were employed to study the pedogenesis of red sandstone during the Cretaceous Tangbian Formation and explore paleoclimate characteristics of the Xinjiang basin during the Upper Cretaceous. The red sandstone of Tangbian Formation in the study area is primarily medium-grained arkose. The sediments have universally experienced pedogenesis, the key identification features of red sandstone include clay films on the edge of the detrital grains, micritic-sparry carbonate cement and gleization. The CIA (Chemical Index of Alteration) ranges from 50.20 to 83.30 (58.08 on average), indicating that the red sandstone is at a low level of chemical weathering. The analysis of microelement and the recognition of pedogenesis collectively indicate that the sandstone in the study area was formed in a hot and dry paleoclimate. This may be attributed to the high coastal mountain system that emerged during the Upper Cretaceous period in Eastern China, hindering the flow of moist water vapor from the Paleo-Pacific Ocean into the inland areas of Southeast China and forming a sedimentary paleogeographic environment dominated by aridity and torridity.

Key words: red sandstone; pedogenesis; geochemistry; ancient climate; Xinjiang basin; Tangbian Formation; Upper Cretaceous

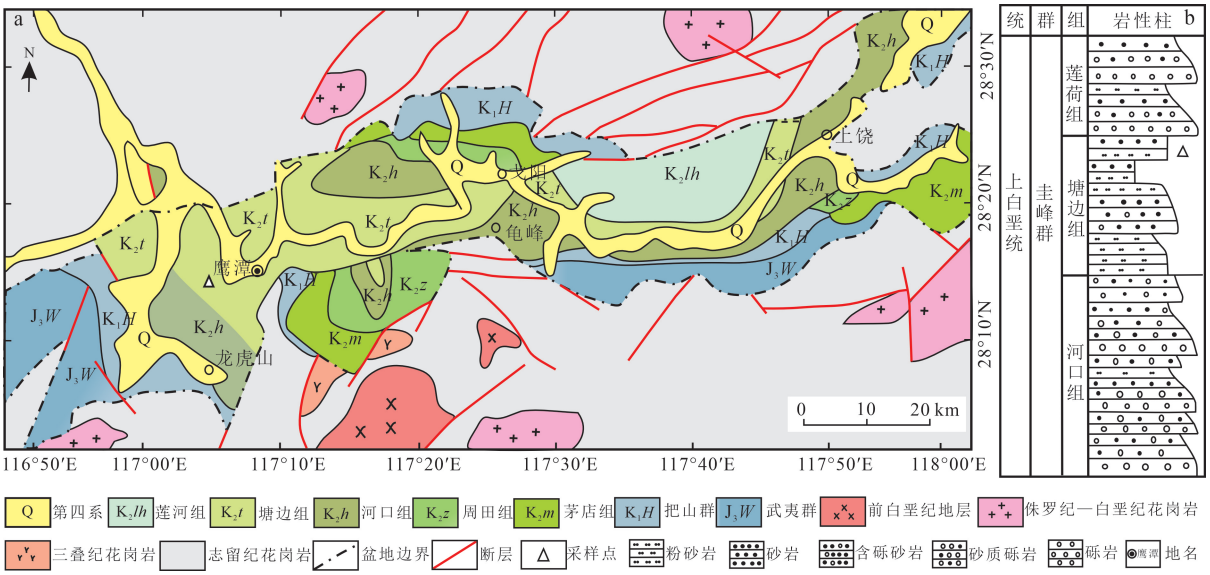
0　引言

白垩纪时期，华南总体为构造隆起区，发育许多陆相断陷盆地，位于江西省东北部的信江盆地是其典型代表。信江盆地上白垩统塘边组以发育红色大型交错层理风成砂岩为特征，在经历了地壳抬升、流水侵蚀和风化剥蚀后形成了著名的以龙虎山—龟峰世界地质公园为代表的丹霞地貌[1-2]。前人对信江盆地的古生物化石[3]、沉积岩石特征[4-5]以及沉积环境[6-7]开展了大量的工作，主要包括利用露头沉积组构进行沉积相分析[4,8-10]、利用砾石成分和砂岩碎屑成分分析物源和物源区构造属性[10-12]，以及研究陆相红层与丹霞地貌的成因关系[13-14]和构造演化[15-16]等。成土作用是指残积物及其他沉积物的表层在一定条件下形成土壤的过程。成土过程一经发生，一定与岩石的风化过程同时进行，两个过程无法分离[17]。成土作用发生在陆相环境沉积和成岩作用初期，包含了沉积、成岩、风化和运移作用等一系列过程[18-19]。郝立波等[20]对吉林省中部地区花岗质岩石及上覆残积土壤进行系统采样分析，研究了表生环境中常量元素和微量元素含量变化，确定了花岗质岩石的风化特征及元素活动性规律。杨社峰等[21]对红土型风化壳中 20 种微量元素含量进行了测定，发现 As、Au、Bi、Cu、Mo 显著富集于高岭土风化带上部。目前针对成土作用的研究主要围绕着成土过程中元素的迁移行为和成土演化过程等方面，但对成土作用表现形式的相关报道却很少。

本文以江西省信江盆地鹰潭地区上白垩统塘边组红色砂岩为研究对象，在详细的野外调查基础上，综合运用岩石矿物显微分析和地球化学分析的方法，识别了成土作用的表现形式，对塘边组红色砂岩的母岩岩石类型和物源风化强度进行了分析，为探究信江盆地晚白垩世的古气候和古环境提供依据，同时对热带亚热带地区生态环境的演化过程具有指示意义。

1　区域地质背景

信江盆地位于江西省东北部，地处扬子板块和华夏板块结合带[4]，即九岭东西向隆起带南缘与新华夏系怀玉山—武夷山复式隆起带的复合部位[2]，盆地整体呈近东西向展布，其延伸方向和形态明显受控于早期近东西向构造带。研究区鹰潭地区位于信江盆地的中部[13]，地处武夷山脉向鄱阳湖平原过渡的交接地带[22]（图 1a）。信江盆地上白垩统包括赣州群（茅店组和周田组）和圭峰群（河口组、塘边组和莲荷组）（图 1b）。研究区塘边组为典型的陆相沉积，以河湖相沉积为主，另常见大型交错层理风成砂岩，可见遗迹化石[2,13,24]，与下伏河口组成平行不整



据文献[4,23]修编。

图1 信江盆地地质简图(a)和圭峰群地层柱状简图(b)

Fig.1 Geological schematic map of Xinjiang basin (a) and stratigraphic column diagram of Guifeng Group (b)

合接触。塘边组下部主要发育粉砂岩,产恐龙蛋化石;中部为紫红色砾质粗砂岩、粉砂质细砾岩及含砾中细砂岩;上部发育砖红色砂岩、粉砂岩和含砾砂岩。

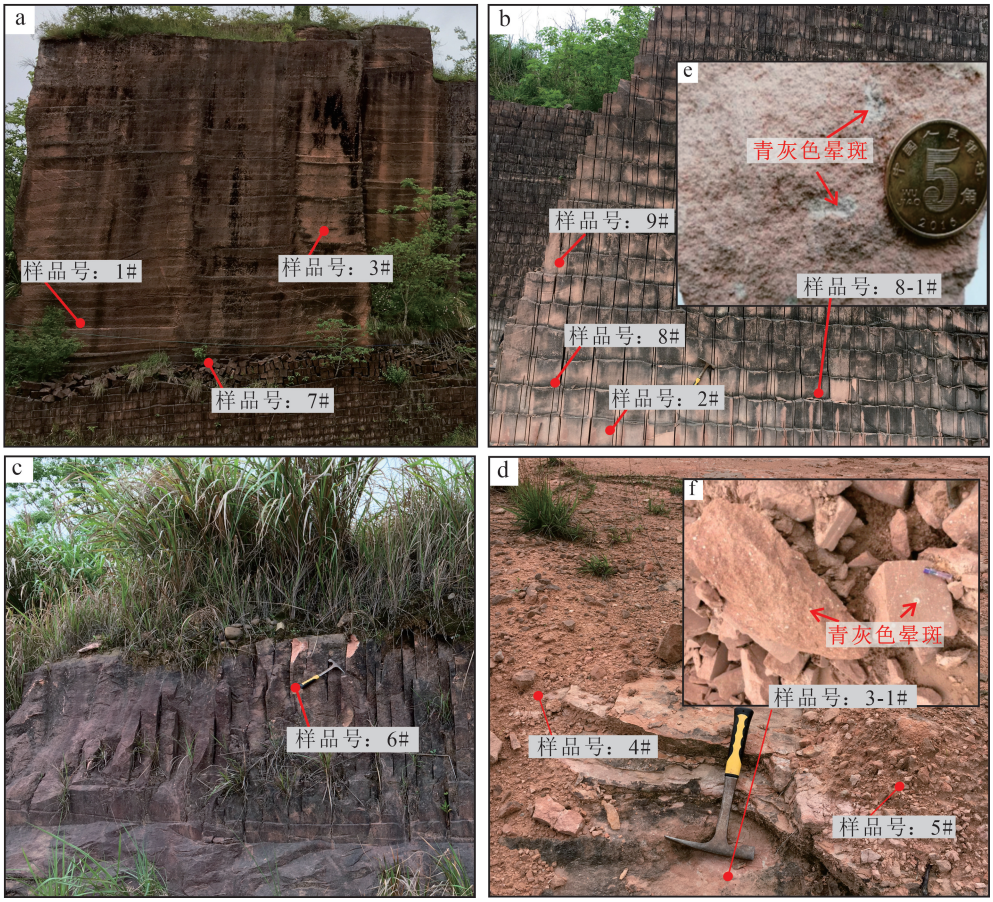
2 样品采集和分析方法

本次研究选取江西省信江盆地鹰潭地区塘边组具有代表性的4个红色砂岩剖面进行采样(图2a—d),其中取自b、d野外剖面的样品中可观察到青灰色晕斑(图2e、f)。样品采集时避开脉体发育的部位,共采集11件新鲜岩石样品,切制薄片11片,样品加工处理及地球化学分析在吉林大学地球科学学院进行。采集的样品粉碎至200目,进行地球化学主微量元素测试分析。主量元素测试采用X射线荧光光谱分析仪,微量元素分析采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),精度误差优于±5%。

研究中通过化学蚀变指数(CIA)计算以及A-CN-K投图对物源区的风化程度进行判别。CIA计算公式为:$CIA = Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$[25],$CaO^*$仅代表硅酸盐矿物中Ca的质量分数,氧化物为摩尔分数。CaO^*物质的量的选取采用Mclernnan的近似估计方法[26],当样品中CaO的摩尔分数< Na_2O的摩尔分数时,将CaO的摩尔分数视为CaO^*的摩尔分数;当样品中CaO的摩尔分数≥Na_2O的摩尔分数时,将Na_2O的摩尔分数视为CaO^*的摩尔分数。根据A-CN-K图解[26],将每个样品中A(Al_2O_3)、CN($CaO^* + Na_2O$)和K(K_2O)的物质的量进行投图,利用CIA数据的趋势线,重建平行于A-CN的母岩理想风化趋势线。校正后的CIA为砂岩样品的投点和A端的连线与理想风化趋势线交点处的值。

3 岩石学特征

信江盆地塘边组红色砂岩为中粒长石砂岩(表1,图3,图4),分选中等,颗粒呈次圆状—次棱角状(图5a)。石英以单晶石英为主,体积分数在38%~55%之间;长石以钾长石为主,偶尔可见斜长石和微斜长石,体积分数在31%~40%之间;岩屑主要以硅质岩屑为主,体积分数在13%~25%之间,另见安山岩岩屑和泥质岩岩屑等,体积分数在3%~6%之间。自生矿物包括次生加大石英、碳酸盐矿物、铁质和黏土矿物(表1)。次生加大石英与碎屑石英光性一致,在次生加大边和碎屑石英之间存在黏土线(图5b)。碳酸盐矿物成分主要为方解石,包括微晶和亮晶方解石。微晶方解石形成早于亮晶方解石,方解石胶结物主要以充填孔隙和交代碎屑长石和碎屑石英两种产状产出(图5c、d、e),其中微晶—亮晶方解石也被作为成土作用特征之一。铁质体积分数为1%~2%,在单偏光镜下呈黑色不透明状,形状



a—d. 红色砂岩样品采集野外剖面；e、f. 红色砂岩内发育的青灰色晕斑，e 取自 b 剖面（样品号为 8－1#），f 取自 d 剖面（样品号为 3－1#）。

图 2　研究区塘边组砂岩人工开挖露头及样品采集位置

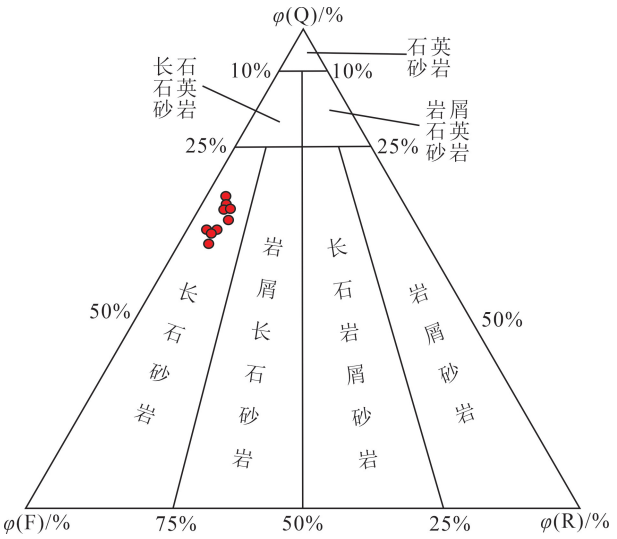
Fig.2　Manual excavation outcrop and sample collection location of sandstone from Tangbian Formation in the study area

表 1　研究区塘边组砂岩样品碎屑颗粒和自生矿物类型

Table 1　Summary of detrital grains and authigenic mineral types of sandstone samples from Tangbian Formation in the study area

样品号	剖面号	岩性	φ（碎屑成分）/%				自生矿物类型			
			石英	长石	硅质岩屑	其他岩屑	石英次生加大边	铁质	方解石	黏土膜
1#	a	长石砂岩	42	34	18	6	○	◔	●	◔
2#	b	长石砂岩	48	34	14	4	◔	◔	●	◔
3#	a	长石砂岩	48	33	15	4	◔	◔	◔	◔
4#	d	长石砂岩	52	31	14	3	○	◑	◔	●
5#	d	长石砂岩	55	32	10	3	○	◔	◑	●
6#	c	长石砂岩	44	32	21	3	◔	◔	●	◑
7#	a	长石砂岩	37	38	20	5	○	◔	●	●
8#	b	长石砂岩	40	39	18	3	◔	◑	◔	◑
9#	b	长石砂岩	40	40	15	5	○	◑	◔	◑

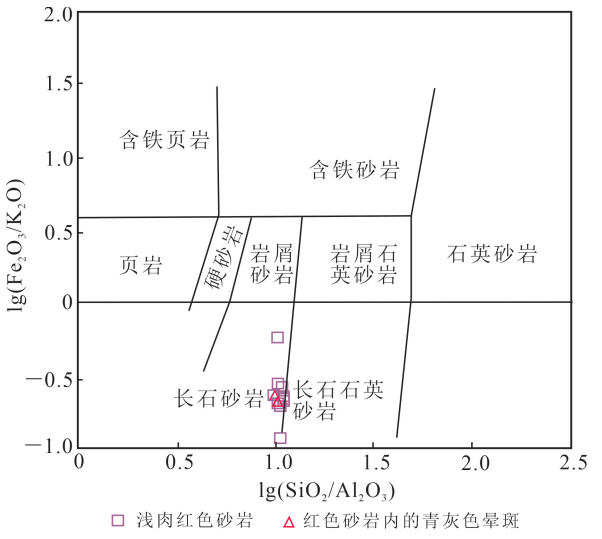
注：○为不发育；◔为发育较少；◑为发育中等；●为广泛发育。



Q. 石英;F. 长石;R. 岩屑。

图3 研究区塘边组砂岩样品QFR三元图解

Fig.3 Ternary diagram of QFR plotting of sandstone samples from Tangbian Formation in the study area



据文献[27]修编。

图4 研究区塘边组砂岩分类判别图

Fig.4 Classificationand discrimination map of sandstone of Tangbian Formation in the study area

为圆状—似圆状,主要生长于颗粒间的孔隙内(图5f)。在偏光显微镜下能明显观察到碎屑长石及石英颗粒的边缘发育呈黄色的黏土薄膜,这类薄膜为黏土膜,与碎屑颗粒边界明显。部分黏土膜呈全包状包裹颗粒状态(图5g),部分黏土膜呈半包状包裹颗粒状态(图5h),还可见黏土膜呈一个大包裹体同时包裹着多个颗粒的状态(图5i)。通过对比同一样品中不同的自生矿物类型,可知黏土膜发育较好的砂岩样品中次生加大石英发育较差(表1),这说明黏土膜形成的时间较早,其发育限制了后期石英次生加大的生长。

4 样品测试结果

红色砂岩样品主量元素中$w(SiO_2)$为79.06%~85.59%,平均值为82.52%,高于澳大利亚页岩标准值(PASS)(62.80%);$w(Al_2O_3)$在6.93%~8.62%之间,平均值为7.52%;$w(Fe_2O_3)$在0.46%~0.96%之间,平均值为0.66%;$w(MgO)$在0.34%~0.65%之间,平均值为0.51%。通过与PASS平均化学成分相比较,这些主量元素除SiO_2外,其他质量分数均具有不同程度上的偏低。相较于平均上地壳标准比值(UCC),研究区红色砂岩样品微量元素Ba、Rb、Cs、Nb等元素相对富集,Co、Cr、Sr、Sc等元素相对亏损(图6a,表2)。样品在稀土元素球粒陨石标准化图解中表现出明显的Eu负异常,其中6#样品中的稀土元素相对富集(图6b,表2)。

5 讨论

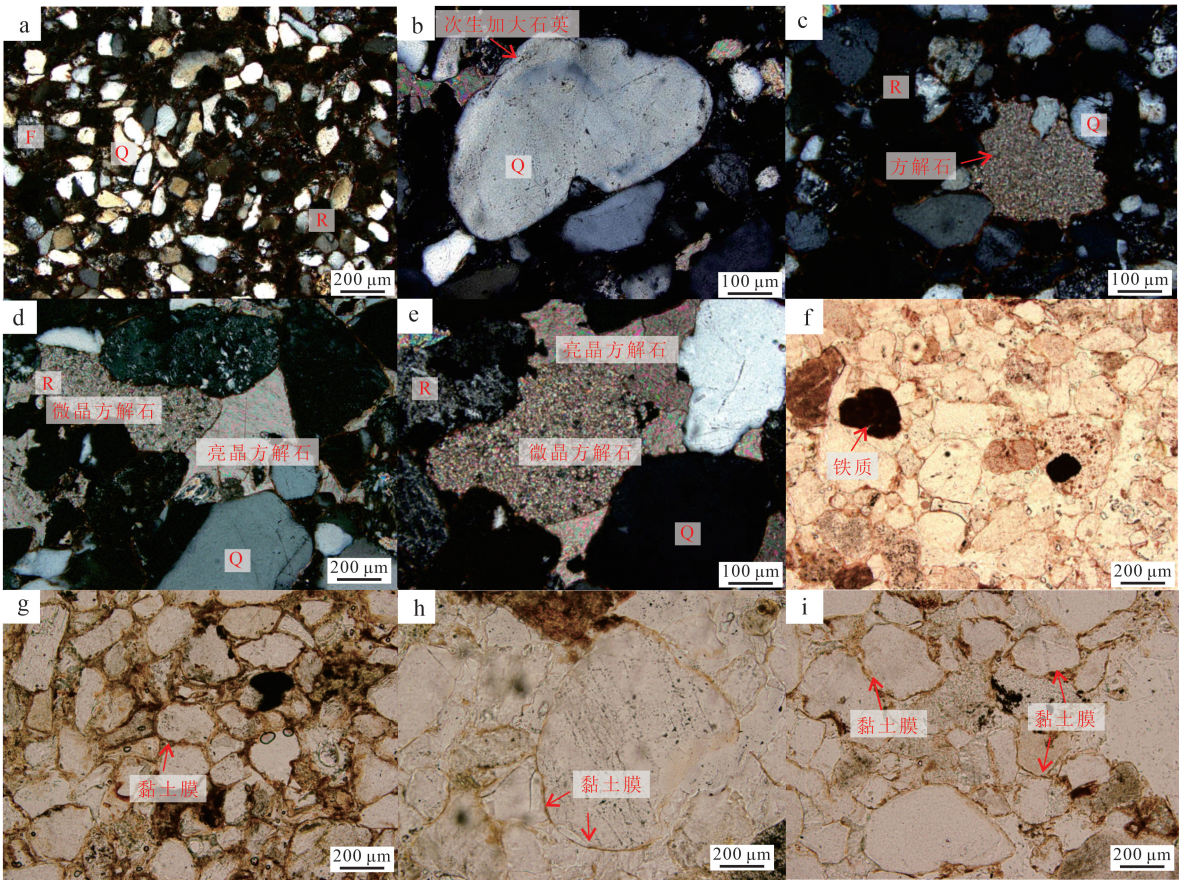
5.1 成土作用特征

成土作用是土壤形成的一个重要过程,属于成岩作用的早成岩机制。研究区塘边组砂岩成土作用的主要表现形式包括发育黏土膜、微晶—亮晶碳酸盐和青灰色晕斑。

5.1.1 黏土膜

黏土膜是成土作用的识别标志之一[30-31]。土壤学中的"黏土"是一个宽泛的术语,指的是颗粒尺寸小于2 μm的任何物质。在成土过程中,上部土壤层中的黏土和可溶性物质在渗流水(雨水)作用下向下部层迁移(淋溶作用),并在下部土壤层中沉淀(淀积作用)形成黏土膜。黏土膜可以完全由黏土矿物组成,也可以由黏土矿物和铁氧化物或强氧化物、黏土矿物及有机质组成。黏土胶膜可描述为骨架颗粒胶膜、土体胶膜、沟道胶膜和孔隙胶膜。从时间上来说,黏土膜的形成是最早发生的成岩事件。黏土膜形成早于溶蚀作用,在铸模孔边缘可见完整的黏土膜保留下来,且黏土膜的存在阻碍了石英加大的生长(表1)。在较干旱的气候条件下,当颗粒表面的水膜受到蒸发作用时,黏土矿物析出则会形成黏

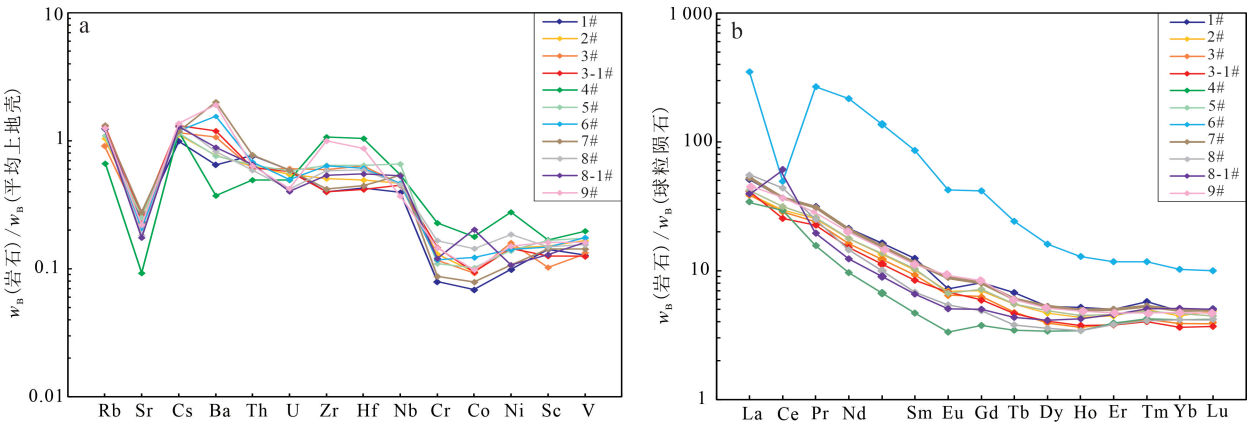
土膜。而在气候湿润、地表径流量大和沉积物粒度较粗的条件下，黏土膜则难以保存[32]。研究区塘边组发育全包边、半包边和呈大包裹体的黏土膜（图5g、h、i），反映了当时干旱的气候条件。



a. 长石砂岩（正交偏光）；b. 次生加大石英（正交偏光）；c、d、e. 微晶和亮晶方解石（正交偏光）；f. 铁质（单偏光）；g. 全包边的黏土膜（单偏光）；h. 半包边的黏土膜（单偏光）；i. 呈大包裹体的黏土膜（单偏光）。

图 5　研究区塘边组砂岩样品偏光显微镜下照片

Fig.5　Polarization microscopic photos of sandstone samples of Tangbian Formation in the study area



平均上地壳、球粒陨石数据据文献[28－29]。

图 6　研究区红色砂岩样品微量元素平均上地壳标准化蛛网图（a）和稀土元素球粒陨石标准化配分图（b）

Fig.6　Standardized spider map of trace element arerage upper crust (a) and standardized partition map of rare earth element chondrices (b) of red stone samples in the study area

表2 研究区塘边组红色砂岩主量元素和微量元素质量分数

Table 2 Content of major element and trace element in red sandstone from Tangbian Formation in the study area

样品号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	CIA
1#	79.06	6.93	0.61	0.10	4.35	0.34	3.09	1.07	0.09	0.03	0.03	50.20
2#	79.24	7.35	0.65	0.18	3.78	0.44	2.83	1.28	0.15	0.03	0.03	50.23
3#	85.27	7.28	0.64	0.18	0.27	0.59	2.88	0.91	0.15	0.04	0.02	58.74
3-1#	85.47	7.25	0.53	0.18	0.26	0.54	2.99	0.87	0.13	0.04	0.02	58.47
4#	84.43	8.62	0.96	0.22	0.03	0.65	1.33	0.14	0.26	0.01	0.02	83.30
5#	80.39	7.48	0.70	0.21	2.87	0.49	2.68	1.35	0.19	0.03	0.03	50.44
6#	83.35	7.46	0.67	0.16	1.32	0.56	2.99	0.82	0.13	0.03	0.03	55.66
7#	79.13	7.30	0.57	0.18	3.83	0.38	3.07	1.17	0.10	0.03	0.02	50.41
8#	84.38	7.96	0.76	0.19	0.30	0.56	2.68	0.66	0.18	0.02	0.02	63.68
8-1#	85.59	7.75	0.46	0.20	0.28	0.51	2.77	0.61	0.15	0.02	0.04	63.17
9#	81.42	7.36	0.69	0.20	2.40	0.57	2.82	0.93	0.14	0.04	0.03	54.60

样品号	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Se	Y	Zr	Nb	Cd	Cs
1#	12.39	7.31	1.17	4.66	5.97	6.58	0.96	11.24	77.28	4.75	0.61	4.86
2#	16.14	11.93	1.62	6.82	6.14	7.47	1.11	9.47	97.95	5.60	0.75	5.49
3#	12.95	10.68	1.58	7.50	5.63	6.99	0.88	7.40	115.10	5.53	0.71	5.65
3-1#	12.15	13.44	1.60	6.75	6.03	7.59	0.99	8.35	76.81	5.40	0.52	6.42
4#	19.14	21.05	3.02	13.04	6.35	7.53	0.86	7.39	205.60	6.51	1.23	5.77
5#	16.80	10.14	1.73	6.52	6.28	7.48	1.08	10.22	123.70	7.93	0.91	5.60
6#	16.95	10.78	2.09	6.66	5.42	8.29	1.70	26.94	122.80	5.57	1.08	5.84
7#	13.84	8.01	1.34	5.02	5.26	7.58	1.07	10.95	81.25	6.46	0.54	5.82
8#	14.96	15.28	2.45	8.73	5.47	7.95	0.94	7.59	112.80	5.45	0.78	6.64
8-1#	15.62	11.12	3.43	5.02	4.87	7.83	1.06	9.02	103.50	6.42	0.79	6.30
9#	15.55	13.34	1.67	7.08	5.88	7.42	0.92	14.38	192.70	4.43	1.38	6.69

样品号	La	Ce	Gd	Yb	Pb	Ba	Th	U	Sc	Mn	Rb	Eu
1#	18.80	35.14	2.46	1.20	12.80	408.30	8.03	1.60	2.13	125.80	103.00	0.63
2#	14.47	28.42	2.14	1.10	14.44	483.70	6.64	1.48	2.25	146.60	85.35	0.60
3#	14.11	27.50	1.92	0.96	14.52	673.90	6.34	1.63	1.54	68.62	74.90	0.56
3-1#	15.21	24.40	1.81	0.90	14.57	750.30	6.45	1.55	1.89	65.44	107.40	0.59
4#	12.60	28.15	1.15	1.03	14.73	235.00	5.18	1.33	2.51	91.66	54.35	0.29
5#	15.42	30.19	2.19	1.15	16.23	478.50	6.80	1.56	2.50	151.40	89.66	0.58
6#	128.20	47.05	12.74	2.53	19.06	978.70	7.16	1.34	2.22	150.40	103.10	3.69
7#	19.24	35.12	2.45	1.22	14.84	1 261.00	8.11	1.60	2.14	138.30	109.40	0.77
8#	20.17	41.80	1.49	1.03	20.44	519.10	6.19	1.13	2.23	116.10	100.20	0.47
8-1#	14.49	58.19	1.53	1.26	25.03	558.40	6.89	1.09	1.94	260.80	101.60	0.44
9#	17.00	35.96	2.59	1.19	17.41	1 194.00	6.71	1.14	2.42	182.70	103.40	0.81

样品号	Sr	Hf	Tb	Dy	Pr	Nd	Sm	Ho	Er	Tm	Lu
1#	74.25	2.26	0.39	2.01	4.31	15.12	2.88	0.44	1.25	0.21	0.19
2#	80.48	2.61	0.32	1.79	4.49	12.64	2.35	0.37	1.10	0.18	0.18
3#	72.25	3.39	0.28	1.50	3.27	11.51	2.13	0.31	0.96	0.15	0.15
3-1#	84.01	2.12	0.27	1.54	3.10	10.74	1.94	0.32	0.94	0.14	0.14
4#	29.75	5.52	0.20	1.29	2.15	6.84	1.08	0.29	0.97	0.15	0.16
5#	81.14	3.42	0.32	1.87	3.55	12.64	2.38	0.38	1.14	0.17	0.17
6#	66.53	3.25	1.40	6.11	36.68	154.30	19.82	1.10	2.93	0.42	0.38
7#	88.65	2.36	0.35	2.01	4.24	14.86	2.66	0.42	1.24	0.19	0.19
8#	58.36	3.13	0.22	1.36	3.42	10.33	1.57	0.29	0.95	0.15	0.16
8-1#	56.07	2.93	0.25	1.57	2.68	8.75	1.52	0.36	1.14	0.18	0.19
9#	70.29	4.63	0.35	1.97	3.92	14.31	2.61	0.42	1.19	0.17	0.18

注:主量元素质量分数单位为%;微量元素质量分数单位为10^{-6}。

5.1.2　微晶—亮晶碳酸盐

与成土作用(风化作用、蒸发作用和生物活动)有关的碳酸盐称为成土碳酸盐。通过偏光显微镜观察到塘边组砂岩发育微晶—亮晶方解石，这类呈环带状包裹碎屑颗粒的微晶方解石一般形成于渗流带，多发育于干旱炎热的大陆环境[33]，部分微晶方解石通过重结晶作用会形成后期的亮晶方解石(图 5d、e)。

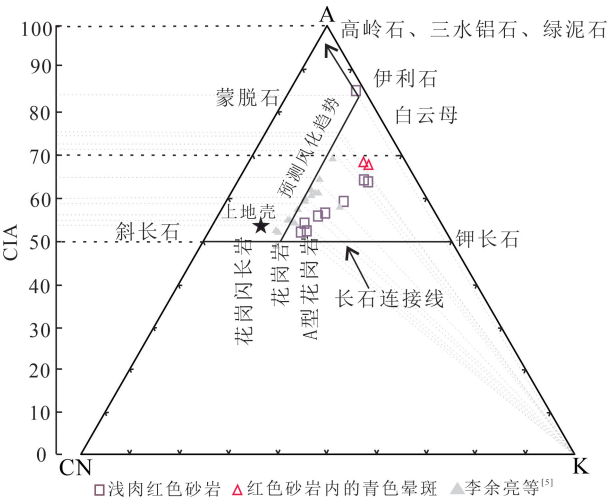
5.1.3　潜育作用

塘边组红色砂岩中可见一些青灰色的晕斑(图 2e、f)，晕斑分布不均，大小不一，直径在 0.1～1.0 cm之间，青灰色晕斑主要为潜育作用的产物。由于潜育作用发生的两个必要条件为渍水和有机质嫌气性分解[34]，因此推测塘边组砂岩可能在成岩过程中周期性或长期处于渍水条件下，进而广泛发生潜育作用。大量有机质在分解的过程中产生还原物质，使下层的土壤长期处于还原状态，三价铁被还原成二价铁，表现为青灰色晕斑。

5.2　风化程度与古气候条件

除 4＃样品的 CIA 为 83.30 外，其他塘边组红色砂岩样品的 CIA 分布在 50.20～63.68 之间，整体平均值为 58.08。对比主量元素特征可知，4＃样品的 Na_2O 和 K_2O 质量分数明显偏低，可知是 Na 元素和 K 元素的质量分数过低导致 CIA 偏大。但对比采集部位、外观以及镜下特征，4＃样品与其他样品并没有很大区别，因此整体上认为，塘边组红色砂岩处于较弱的风化程度，其沉积期以物理风化作用为主，化学风化程度较低。根据 Nesbitt 等[25]的 A－CN－K 三角图解校正(图 7)，红色砂岩样品都位于低化学风化区，且整体趋势与 A－CN 线平行，表明物源区相对缺乏斜长石。

相对于主量元素，微量元素对环境的变化更加敏感，可以更好地指示氧化还原条件。由于沉积环境的氧化还原条件不同，导致水体微量元素发生迁移、沉淀、自生贫化或富集，这些微量元素被称为氧化还原敏感微量元素。U、V、Co、Cr、Cu 等元素均属于氧化还原敏感微量元素，处于氧化环境下 U、V、Cr、Co、Cu 等元素表现为溶解态，处于还原环境下为不溶解状态，在弱还原环境中会以硫化物、低价氧化物或络合物形态沉积富集，因此可以将他们作为划分氧化还原环境的指标[35-37]。国内外学者[38-43]利用微量元素地球化学指标来示踪古沉积环境，并建立了 U/Th、V/(Ni＋V)、V/Cr、Ni/Co 等地球化学指标判别氧化还原环境。通过计算，研究区 U/Th 的平均值为 0.21、V/(Ni＋V)的平均值为 0.70、V/Cr 的平均值为 1.33、Ni/Co 的平均值为 3.67，暗示了研究区主体为氧化的沉积环境(图 8)。



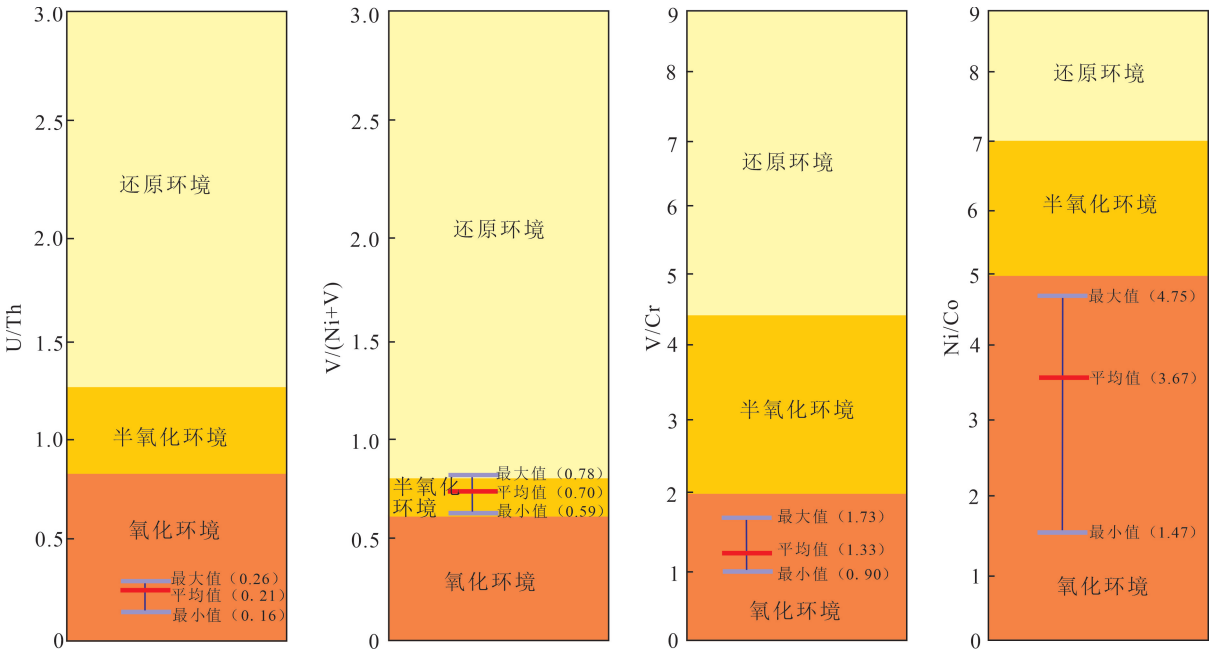
据文献[25]修编。

图 7　研究区塘边组红色砂岩样品 CIA 及 A－CN－K 投图

Fig.7　CIA and plot of A－CN－K of the red sandstone samples from Tangbian Formation in the study area

此外，Al、K、Rb 和 Ga 元素质量分数也记录了气候的变化[44]。Ga/Rb 值和 K_2O/Al_2O_3 值已被用作风化作用指标。Al 和 Ga 主要与细晶硅酸铝体积分数有关，富集在与温暖潮湿气候有关的高岭石中[35]；K 和 Rb 与伊利石弱化学风化有关[34]。因此，富伊利石沉积物应具有低 Ga/Rb 值和高 K_2O/Al_2O_3 值，而富含高岭石的沉积物则具有高 Ga/Rb 值和低 K_2O/Al_2O_3 值。分析结果显示，在 Ga/Rb－K_2O/Al_2O_3 二元图(图 9)中，K_2O/Al_2O_3 值较高、Ga/Rb 值较低，表明伊利石丰度较高，可能与干燥的气候条件有关，以物理风化作用为主。

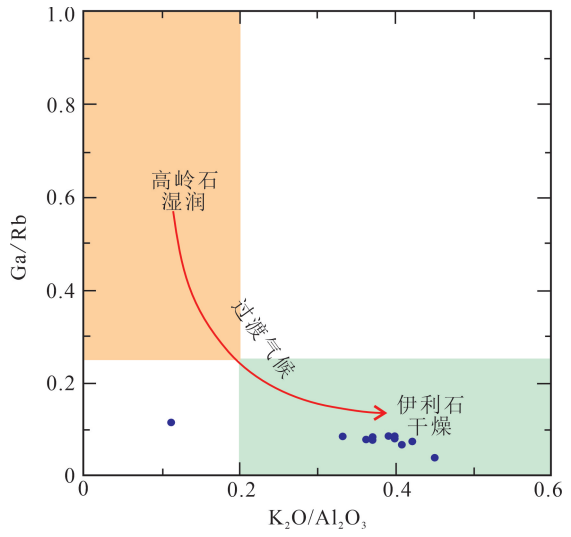
塘边组红色砂岩在沉积过程中经常暴露于大气中，使得该区广泛发育古土壤层[46]，为成土作用提供了时间和条件。微量元素分析、CIA 的计算以及成土作用的识别都指示着塘边组形成于极度干燥炎热的环境。前人[47-52]研究认为，K、Na 和 Ca 元素在早期风化成土过程中易被淋失，所以后期淋溶较弱。同时，该地区保有丰富的钙板层和钙质结核，这是古土壤淋溶淀积的产物，这些地质现象的出现充



据文献[40－43]修编。

图8 研究区塘边组红色砂岩的氧化还原环境判别图

Fig.8 Redox environment discriminant map of red sandstone of Tangbian Formation in the study area



据文献[45]修编。

图9 研究区塘边组红色砂岩 $Ga/Rb-K_2O/Al_2O_3$ 关系图

Fig.9 $Ga/Rb-K_2O/Al_2O_3$ relational graph of red sandstone from Tangbian Formation in the study area

分证实了研究区的古环境为高温干燥的氧化沉积环境。塘边组砂岩中的动物潜穴遗迹、植物根迹、青灰色晕斑以及干裂构造等都为研究该地区成土作用提供了理想的条件。另外,前人[46]利用碳氧同位素的研究结果显示,塘边组的碳氧同位素变化范围较小,可能沉积于干旱的气候背景。前人在该地区有关化石(恐龙蛋化石及孢粉)[53-55]、CIA[56]、风成沙丘和冲积扇体系[4]的研究总体上表明塘边组为干旱炎热的古气候条件,这与晚白垩世华东南地区亚热带干燥炎热的古气候背景一致[57-59]。这种干燥炎热的古气候与现今湿润的亚热带气候形成了鲜明的对比,可能与中国东部在晚白垩世时期发育高大沿岸山系(古武夷山脉、仙霞岭、戴云山、鹫峰山、雁荡山等)有关[57-58],晚白垩世早中期中国东南沿岸山脉的高度在海拔3 500～4 000 m之间,东西宽度近500 km,这样高大而宽阔的屏障,阻碍了古太平洋湿润水汽向华东南内陆地区的侵入并抑制对流降水,使得当时的沿岸山脉西侧气候干旱炎热,环境逐渐干旱化[24],一直持续到晚白垩世末。

6 结论

1)江西省信江盆地上白垩统塘边组红色砂岩为中粒长石砂岩,自生矿物包括次生加大石英、碳酸盐矿物、铁质和黏土矿物,成土作用主要识别特征包括黏土膜、微晶—亮晶碳酸盐和潜育作用。

2)塘边组砂岩的物源主要来自富含石英质的沉积岩。化学蚀变指数在50.20～83.30之间,平均值为58.08,处于弱化学风化水平,说明沉积作用以物理风化为主,化学风化的程度偏低。结合微量元素

的分析和成土作用的识别，说明信江盆地晚白垩世塘边组为干旱、炎热的古气候条件。

参考文献(References)：

[1] Guo Fusheng, Chen Liuqin, Xu Huan, et al. Origin of Beaded Tafoni in Cliffs of Danxia Landscapes, Longhushan Global Geopark, South China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(11): 2398－2408.

[2] 陈留勤，郭福生，邵崇建，等.江西省丹霞地貌特征及其控制因素探讨[J].地质学报，2022，96(11)：4023－4037.
Chen Liuqin, Guo Fusheng, Shao Chongjian, et al. Characteristics and Controlling Factors of Danxia Landscapes in Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(11): 4023－4037.

[3] 巫建华.江西信江盆地早白垩世晚期轮藻及其地层意义[J].微体古生物学报，1995，12(1)：79－88.
Wu Jianhua. Late Early Cretaceous Charophytes from the Xinjiang Basin, Jiangxi and Their Stratigraphic Significance[J]. Acta Micropaleontologica Sinica, 1995, 12(1): 79－88.

[4] 郭福生，朱志军，黄宝华，等.江西信江盆地白垩系沉积体系及其与丹霞地貌的关系[J].沉积学报，2013，31(6)：954－964.
Guo Fusheng, Zhu Zhijun, Huang Baohua, et al. Cretaceous Sedimentary System and Their Relationship with Danxia Landform in Xinjiang Basin, Jiangxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 954－964.

[5] 李余亮，刘鑫，陈留勤，等.江西贵溪塘边组细粒碎屑岩地球化学特征及其地质意义[J].地层学杂志，2018，42(2)：224－237.
Li Yuliang, Liu Xin, Chen Liuqin, et al. Geochemistry and Geological Significance of Fine-Grained Sandstone of the Tangbian Formation in the Guixi Area of Northeastern Jiangxi Province[J]. Journal of Stratigraphy, 2018, 42(2): 224－237.

[6] 王宇佳，陈留勤，李文灏，等.江西弋阳晚白垩世塘边组风成砂岩碎屑锆石 U－Pb 定年及其物源意义[J].地质通报，2019，38(4)：667－679.
Wang Yujia, Chen Liuqin, Li Wenhao, et al. Detrital Zircon U－Pb Dating of the Late Cretaceous Aeolian Sandstones from the Tangbian Formation in the Yiyang Area of Jiangxi Province and Its Provenance Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(4): 667－679.

[7] 李二恒.信江地区晚石炭世早期沉积背景的研究[D].南京：南京大学，2012.
Li Erheng. Study on Depositional Background (Earlier Late Carboniferous) in Xinjiang Area, Jiangxi Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.

[8] 巫建华.赣东北白垩纪沉积相及其构造意义[J].华东地质学院学报，1994，17(4)：313－319.
Wu Jianhua. Sedimentary Facies of the Cretaceous in the Northeastof Jiangxi Province and Its Tectonic Significance[J]. Journal of East China Geological Institute, 1994, 17(4): 313－319.

[9] 廖瑞君，衷存堤，肖晓林.江西白垩纪—新近纪陆相红色盆地的盆缘类型划分与盆地充填样式[J].地质通报，2003，22(9)：680－685.
Liao Ruijun, Zhong Cundi, Xiao Xiaolin. Basin-Margin Types and Basin-Fill Types of Cretaceous-Neogene Terrestrial Red Basins in Jiangxi[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(9): 680－685.

[10] 陈留勤，郭福生，杨庆坤，等.江西永丰—崇仁盆地晚白垩世沉积体及其演化模式[J].山地学报，2015，33(4)：416－424.
Chen Liuqin, Guo Fusheng, Yang Qingkun, et al. The Late Cretaceous Depositional Systems and Evolution Model of the Yongfeng-Chongren Basin in Jiangxi Province[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 33(4): 416－424.

[11] 陈留勤，郭福生，梁伟，等.江西抚崇盆地上白垩统河口组砾石统计特征及其地质意义[J].现代地质，2013，27(3)：568－576.
Chen Liuqin, Guo Fusheng, Liang Wei, et al. Gravel Fabric Characteristics of the Upper Cretaceous Hekou Formation in Fuzhou-Chongren Basin, Jiangxi and the Geological Significance[J]. Geoscience, 2013, 27(3): 568－576.

[12] 唐超，陈留勤，郭福生，等.江西永丰—崇仁盆地上白垩统砾石岩性和磨圆度列联表分析及其对物源的指示[J].现代地质，2014，28(5)：971－979.
Tang Chao, Chen Liuqin, Guo Fusheng, et al. Contingency Table Analysis of Pebble Lithology and Roundness and Provenance Implications for the Upper Cretaceous of Yongfeng-Chongren Basin, Jiangxi[J]. Geoscience, 2014, 28(5): 971－979.

[13] 姜勇彪，郭福生，胡中华，等.江西信江盆地红层及其地貌发育研究[J].资源调查与环境，2010，31(4)：235－244.
Jiang Yongbiao, Guo Fusheng, Hu Zhonghua, et al. A Study on the Red Beds and Its Landforms in Xinjiang Basin[J]. Resource Survey & Environment, 2010, 31(4): 235－244.

[14] 朱志军，黄宝华，郭福生，等.江西龙虎山世界地质公园白垩系辫状河相沉积及其丹霞地貌发育特征[J].地球学报，2012，33(3)：379－387.
Zhu Zhijun，Huang Baohua，Guo Fusheng，et al. Cretaceous Braided River Facies Sediments and Danxia Landform Development Characteristics in Longhushan World Geopark，Jiangxi[J]. Acta Geogeologica Sinica，2012，33(3)：379－387.

[15] 张志，薛重生，赵良政，等.赣东北白垩纪盆地等时性地层界面识别及意义[J].国土资源遥感，1998，17(2)：35－42.
Zhang Zhi，Xue Chongsheng，Zhao Liangzheng，et al. Picking Out Chronostratigraphic Interface and Their Importance on Cretaceous Period Basin in the North-Eastern of Jiangxi Province[J]. Remote Sensing for Land & Resources，1998，17(2)：35－42.

[16] 张志，廖群安.江西信江白垩纪陆相盆地地质作用与构造演化[J].中国区域地质，2000，19(1)：39－43.
Zhang Zhi，Liao Qun'an. Geological Process and Tectonic Evolution of the Cretaceous Xinjing Terrestrial Basin，Jiangxi Province[J]. Regional Geology of China，2000，19(1)：39－43.

[17] 王数.地质学与地貌学[M].北京：中国农业大学出版社，2013.
Wang Shu. Geology and Geomorphology[M]. Beijing：China Agricultural University Press，2013.

[18] 朱锦旗，龚绪龙，苟富刚，等.长江三角洲北翼第一硬土层理化特征及其地质成因[J].地质通报，2024，43(1)：1－12.
Zhu Jinqi，Gong Xulong，Gou Fugang，et al. Physicochemical Characteristics and Geological Formation of the First Hard Soil Layer of the North Wing of the Yangtze River Delta[J]. Geological Bulletin of China，2024，43(1)：1－12.

[19] 邱甜，邱运鑫，郑朝群，等.硅酸盐溶解与成土作用[J].贵州地质，2008，25(1)：51－58.
Qiu Tian，Qiu Yunxin，Zheng Chaoqun，et al. The Silicate Solution and the Soil Formation Process[J]. Guizhou Geology，2008，25(1)：51－58.

[20] 郝立波，董菁，赵玉岩，等.吉林省中部地区花岗质岩石风化地球化学特征[J].吉林大学学报(地球科学版)，2011，41(5)：1441－1447.
Hao Libo，Dong Jing，Zhao Yuyan，et al. Geochemical Characteristics of Granite Weathering in Central Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2011，41(5)：1441－1447.

[21] 杨社锋，方维萱，胡瑞忠，等.老挝南部安东花岗闪长岩砖红土型风化壳分带及微量元素地球化学特征[J].地质与勘探，2006，42(5)：46－51.
Yang Shefeng，Fang Weixuan，Hu Ruizhong，et al. Geochemical Character Istics of Trace Elements in Lateritic Regolith Profile of Granodiorite in Area，Laos[J]. Geology and Prospecting，2006，42(5)：46－51.

[22] 曹珂.中国陆相白垩系地层对比[J].地质论评，2013，59(1)：24－40.
Cao Ke. Stratigraphic Correlation of Continental Cretaceous in China[J]. Geological Review，2013，59(1)：24－40.

[23] 江西省地质矿产厅.江西省岩石地层[M].武汉：中国地质大学出版社，1997.
Jiangxi Province Department of Geology and Mineral Resources. Rock Stratigraphy in Jiangxi Province[M]. Wuhan：China University of Geosciences Press，1997.

[24] 王凤之.信江盆地晚白垩世塘边组沉积特征与古气候研究[D].赣州：东华理工大学，2017.
Wang Fengzhi. Sedimentary Characteristics and Paleoclimate of Late Cretaceous Tangbian Formation of the Xinjiang Basin in Jiangxi Province[D]. Ganzhou：East China University of Technology，2017.

[25] Nesbitt H W，Young G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. Nature，1982，299：715－717.

[26] Mclennan S M. Weathering and Global Denudation[J]. Journal of Geology，1993，101(2)：295－303.

[27] Herron M M. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Cores or Log Data[J]. Journal of Sedimentary Research，1988，58(5)：820－829.

[28] Mclennan S M. Relationships Between the Trace Element Composition of Sedimentary Rocks and Upper Continental Crust[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems，2001，2(4)：1021.

[29] Taylor S R，Mclennan S M. The Continental Crust：Its Composition and Evolution[J]. Blackwell Scientific Publications，1985，122(6)：673－674.

[30] 张惠良，张荣虎，王月华，等.黏土膜对砂岩储集性能的影响：以塔里木盆地群6井区泥盆系东河塘组下段为例[J].石油实验地质，2006，28(5)：493－498.
Zhang Huiliang，Zhang Ronghu，Wang Yuehua，et

al. Influence of Clay Minerals Membrane on Sandstone Reservoirs: A Case Study on the Lower Donghetang Reservoirs of the Devonian of Well Qun 6 in the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(5): 493 - 498.

[31] 田建锋，喻建，张庆洲.孔隙衬里绿泥石的成因及对储层性能的影响[J].吉林大学学报(地球科学版)，2014，44(3)：741 - 748.
Tian Jianfeng, Yu Jian, Zhang Qingzhou. The Pore-Lining Chlorite Formation Mechanism and Its Contribution to Reservoir Quality[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(3): 741 - 748.

[32] 伏美燕，张哨楠，丁晓琪，等.松辽盆地松科 1 井明水组砂岩黏土膜特征及油气地质意义[J].石油实验地质，2012，34(6)：587 - 592.
Fu Meiyan, Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, et al. Characteristics and Petroleum Geologic Significances of Clay Rims in Sandstones of Mingshui Formation, Well Songke 1, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(6): 587 - 592.

[33] Hameed A, Raja P, Ali M, et al. Micromorphology, Clay Mineralogy, and Geochemistry of Calcic Soils from Western Thar Desert: Implications for Origin of Palygorskite and Southwestern Monsoonal Fluctuations over the Last 30 ka[J]. Catena, 2018, 163: 378 - 398.

[34] 董元华，徐琪.土壤潜育化作用的特点及其研究进展[J].土壤学进展，1990，18(1)：9 - 15.
Dong Yuanhua, Xu Qi. Characteristics of Soil Gleization and Its Research Progress[J]. Advances in Soil Science, 1990, 18(1): 9 - 15.

[35] Tribovillard N, Algeo J T, Lyons T, et al. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: Anupdate[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1): 12 - 32.

[36] 王国平，张玉霞，翟正丽，等.半干旱区沼泽沉积剖面特征元素比值及其物源、氧化还原变化信息[J].吉林大学学报(地球科学版)，2006，36(3)：449 - 454.
Wang Guoping, Zhang Yuxia, Zhai Zhengli, et al. Ratios of Specific Elements and Their Implications for Original Source of Sediments and Redox Condition Within Sedimentation on Profile of the Marsh in Semi-Arid Areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(3): 449 - 454.

[37] 蔡灵慧，余烨，郭建华，等.湘中南地区中奥陶统烟溪组黑色页岩地球化学特征与有机质富集[J].吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(5)：1362 - 1379.
Cai Linghui, Yu Ye, Guo Jianhua, et al. Geochemical Characteristicsand Organic Matter Enrichment of Black Shale in the Middle Ordovician Yanxi Formation in Centraland Southern Hunan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1362 - 1379.

[38] 张桓，陈亚军，伍宏美，等.火山喷发间歇期沉积岩层古沉积环境的地球化学示踪与判别[J].吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(5)：1417 - 1436.
Zhang Huan, Chen Yajun, Wu Hongmei, et al. Geochemical Trancing and Discrimination of Paleosedimentary Environment of Sedimentary Rock Intercalation During Volcanic Eruption Intervals[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1417 - 1436.

[39] 张国宾，陈兴凯，赵越，等.张广才岭南部中侏罗世似斑状二长花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版)，2022，52 (6)：1907 - 1925.
Zhang Guobin, Chen Xingkai, Zhao Yue, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Middle Jurassic Porphyritic Monzogranite in the Southern Zhangguangcai Range, Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (6): 1907 - 1925.

[40] Elderfiel D H, Greaves M J. The Rare Earth Elements Distribution in Seawater[J]. Nature, 1982, 296: 214 - 219.

[41] Jones B, Manning D A C. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mud Rock [J]. Chemical Geology, 1994, 111(1): 111 - 129.

[42] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship Between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Penn-Sylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA[J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/2/3): 65 - 82.

[43] 张茜，王剑，余谦，等.川西南构造复杂区龙马溪组泥页岩地球化学特征及古环境[J].新疆石油地质，2017，38(4)：399 - 405.
Zhang Qian, Wang Jian, Yu Qian, et al. Geochemical Features and Paleoenvironment of Shales in Longmaxi Formation of Complicated Structure Area, Southwestern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology

of Xinjiang, 2017, 38(4): 399-405.

[44] 解兴伟, 袁华茂, 宋金明, 等.东海季节性低氧海区柱状沉积物中氧化还原敏感元素对沉积环境变化的响应[J].海洋学报, 2020, 42(2): 30-43.
Xie Xingwei, Yuan Huamao, Song Jinming, et al. Response of Redox Sensitive Elements to Changes of Sedimentary Environment in Core Sediments of Seasonal Low-Oxygen Zone in East China Sea[J]. Journal of Oceanography, 2020, 42(2): 30-43.

[45] 冯兴雷, 付修根, 谭富文, 等.羌塘盆地沃若山地区上三叠统土门格拉组烃源岩沉积环境分析[J].沉积与特提斯地质, 2018, 38(2): 3-13.
Feng Xinglei, Fu Xiugen, Tan Fuwen, et al. Sedimentary Environment of the Upper Triassic Tumengela Formation in Woruo Area in the Qiangtang Basin, Xizang[J]. Sedimentation and Tethys Geology, 2018, 38(2): 3-13.

[46] 王凤之, 陈留勤, 郭福生, 等.江西信江盆地晚白垩世塘边组成壤碳酸盐岩碳、氧同位素特征[J].岩石矿物学杂志, 2018, 37(1): 143-151.
Wang Fengzhi, Chen Liuqin, Guo Fusheng, et al. Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Pedogenic Carbonates from the Late Cretaceous Tangbian Formation in the Xinjiang Basin, Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(1): 143-151.

[47] Huang C M, Gong Z T, He Y R. Elemental Geochemistry of a Soil Chronosequence on Basalt on Northern Hainan Island, China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2004, 23(3): 245-254.

[48] 张新荣, 焦洁钰.黑土形成与演化研究现状[J].吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 553-568.
Zhang Xinrong, Jiao Jieyu. Formation and Evolution of Black Soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 553-568.

[49] 田密, 王志华, 白荣杰, 等.长白山区暗棕壤成土作用地球化学特征[J].世界地质, 2014, 33(3): 695-701.
Tian Mi, Wang Zhihua, Bai Rongjie, et al. Geochemistry of Pedogenesis of Dark Brown Soil in Changbai Mountain Area[J]. Global Geology, 2014, 33(3): 695-701.

[50] 武鹏飞, 毛深秋, 赵旭阳, 等.西秦岭尖藏花岗闪长岩地球化学特征、岩石成因及构造背景[J].世界地质, 2020, 39(4): 784-795.
Wu Pengfei, Mao Shenqiu, Zhao Xuyang, et al. Geochemical Characteristics, Petrogenesis and Tectonic Setting of Jianzang Granodiorite in Western Qinling[J]. Global Geology, 2020, 39(4): 784-795.

[51] 鞠楠, 张森, 毕中伟, 等.辽宁凤城赛马铌矿床成矿岩体地球化学特征及其地质意义[J].世界地质, 2019, 38(1): 130-139.
Ju Nan, Zhang Sen, Bi Zhongwei, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Metallogenic Rock Bodies of Saima Niobium Deposit in Fengcheng, Liaoning[J]. Global Geology, 2019, 38(1): 130-139.

[52] 师文文, 杨兆林, 尹洪荣, 等.米仓山构造带下寒武统筇竹寺组砂岩球状风化特征及成因机制[J].世界地质, 2022, 41(1): 173-185.
Shi Wenwen, Yang Zhaolin, Yin Hongrong, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Sandstone Spherical Weathering in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Micangshan Structural Zone[J]. Global Geology, 2022, 41(1): 173-185.

[53] 高远, 秦天, 李瑞红, 等.松辽盆地梨树断陷嫩江组孢粉记录及古气候特征[J].吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1391-1402.
Gao Yuan, Qin Tian, Li Ruihong, et al. Palynological Records and Paleoclimatic Characteristics of Nenjiang Formation in Lishu Fault Depression, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1391-1402.

[54] 陈平, 王任, 覃军干, 等.琼东南盆地深水区WN-A井渐新世—中新世孢粉地层学及古气候[J].吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 390-402.
Chen Ping, Wang Ren, Qin Jungan, et al. Oligocene-Miocene Palynostratigraphy and Paleoclimate of Well WN-A from Deep Water Area, Southeast Hainan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 390-402.

[55] 许玩宏.江西信江盆地周家店组的介形类化石[J].微体古生物学报, 1993, 10(3): 337-362.
Xu Wanhong. Ostracoid Fossils from the Zhoujiadian Formation in Xinjiang Basin, Jiangxi Province[J]. Journal of Micropaleontology, 1993, 10(3): 337-362.

[56] 赵英利, 刘永江, 韩国卿, 等.大兴安岭中南段二叠纪砂岩主量元素地球化学特征及物源区构造环境的判别[J].吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 285-297.
Zhao Yingli, Liu Yongjiang, Han Guoqing, et al. Geochemical Characteristics of Major Elements in the

Permian Sandstones from the Central and Southern Great Xing'an Ranges and Discriminations on Their Tectonic Environment of the Provenance [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 285-297.

[57] 陈云华.中国东南地区晚白垩世沉积响应与古气候[D].成都：成都理工大学，2008.
Chen Yunhua. Late Cretaceous Sedimentary Response to the "Coast Range" and Paleoclimate Changes in Southeast China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.

[58] 陈丕基.晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐湖化[J].地层学杂志，1997，21(3)：44-54.
Chen Peiji. Coastal Mountains of SE China, Desertization and Saliniferous Lakes of Central China During the Upper Cretaceous [J]. Journal of Stratigraphy, 1997, 21(3): 44-54.

[59] 张旗，王元龙，金惟俊，等.晚中生代的中国东部高原证据、问题和启示[J].地质通报，2008，27(9)：1404-1430.
Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, et al. Eastern China Plateau During the Late Mesozoic: Evidence, Problems and Implication[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(9): 1404-1430.