



### 长沙铜官窑遗址剖面地球化学元素特征与物源变化

郭爱鹏, 毛龙江, 莫多闻, 张兴国, 邹春辉, 李焯, 吴又进

#### 引用本文:

郭爱鹏, 毛龙江, 莫多闻, 张兴国, 邹春辉, 李焯, 吴又进. 长沙铜官窑遗址剖面地球化学元素特征与物源变化[J]. 沉积学报, 2023, 41(3): 735-747.

GUO AiPeng, MAO LongJiang, MO DuoWen, ZHANG XingGuo, ZOU ChunHui, LI Ye, WU YouJin. Geochemical Element Characteristics and Provenance Changes at Tongguanyao Site Section in Changsha[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(3): 735-747.

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 沉积有机质中苯基菲成熟度参数及其化学机理

Maturity Parameter of Phenylphenanthrene in Sedimentary Organic Matter and Its Chemical Mechanism Based on Geochemical Data and Quantum Chemical Calculation

沉积学报. 2023, 41(2): 601-609 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.107>

#### 海洋沉积物早期成岩作用研究进展

Research Progress on Geochemical Behavior of Minerals and Elements in Early Diagenesis of Marine Sediments

沉积学报. 2022, 40(5): 1172-1187 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.038>

#### 太平洋CC区西部沉积物地球化学特征及其成因

Geochemical Characteristics and Genetic Mechanisms of Sediments from Western Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean

沉积学报. 2021, 39(5): 1185-1197 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.070>

#### 康滇古陆东缘筇竹寺组地球化学特征及意义——以云南省昭通市昭阳区锌厂沟剖面为例

Geochemical Characteristics and Significance of the Qiongzhusi Formation on the Eastern Margin of the Ancient Kangding-Yunnan Land: Taking the Xinchanggou section of Zhaoyang district, Zhaotong city, Yunnan province as an example

沉积学报. 2021, 39(5): 1305-1319 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.052>

#### 焦作煤田石炭—二叠纪泥质岩地球化学特征及古环境意义

Geochemical Characteristics of Mudstones in the Permo-Carboniferous Strata of the Jiaozuo Coalfield and Their Paleoenvironmental Significance

沉积学报. 2018, 36(2): 415-426 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.034>

文章编号: 1000-0550(2023)03-0735-13

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.128

# 长沙铜官窑遗址剖面地球化学元素特征与物源变化

郭爱鹏<sup>1</sup>, 毛龙江<sup>1,2</sup>, 莫多闻<sup>3</sup>, 张兴国<sup>4</sup>, 邹春辉<sup>1</sup>, 李焯<sup>1</sup>, 吴又进<sup>1</sup>

1. 南京信息工程大学科学技术史研究院, 南京 210044

2. 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044

3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871

4. 湖南省文物考古研究所, 长沙 410008

**摘要** 使用HR-ICPMS对长沙铜官窑遗址石渚坪(SZP)剖面的地球化学元素进行测定,分析了遗址剖面地球化学含量变化特征,揭示其沉积环境演变及其物源变化。结果表明,元素的含量变化特征显著,元素Ti、Cr、Co、V、Ni等在80~230 cm逐渐升高出现峰值,230~310 cm逐渐降低至谷值。Pb、Zr、Mn等分布趋势与其相反。其中,Ti含量最高,平均值达5 405.8 μg/g;最低的是Mo,平均值为0.9 μg/g。含量均值由大到小为:Ti>Mn>Ba>Zr>Rb>Zn>Li>Cr>V>Pb>Sr>Cu>Y>Ni>Th>Cs>Co>Sc>Sn>Hf>U>Be>Mo。SZP剖面记录了一个近1 300年来的沉积环境变化过程:风尘堆积—石渚湖形成—河漫滩沉积—石渚湖再次形成—石渚坪。物质来源也发生相应变化:310 cm以下来源为末次冰期风尘堆积;310~230 cm(年代为1 288~1 094 a B.P.)地层中含大量瓷片,物源主要是铜官窑瓷器煅烧过程中金属矿物开采及冶炼产生的废料;230~80 cm(年代为1 094~380 a B.P.),下层物源是湘江输入的泥沙,主要是上游的石灰岩沉积,上层是中下游地区砂岩的风化侵蚀和水流搬运沉积;80 cm以上(年代为380 a B.P.以来)与人类活动有关,主要为人工垫土和坡地周边风化侵蚀堆积。

**关键词** 主量元素;微量元素;沉积环境;物源;铜官窑遗址

**第一作者简介** 郭爱鹏,男,1995年出生,博士研究生,环境演变与环境考古学,E-mail: gap18551543661@163.com

**通信作者** 毛龙江,男,教授,E-mail: mlj1214@163.com

**中图分类号** K903 **文献标志码** A

## 0 引言

沉积物地球化学的元素含量、元素比值、迁移富集特征、同位素含量等与沉积环境和物质来源密切相关<sup>[1-2]</sup>。因此,前人使用地球化学方法在沉积环境重建<sup>[3]</sup>、古气候极端事件<sup>[4]</sup>、沉积物风化强度<sup>[5]</sup>、物质来源<sup>[6]</sup>等多方面进行了大量研究,并取得了一些研究成果。如刘平贵等<sup>[7]</sup>通过分析银川盆地Y1孔地球化学元素含量及其分布规律,还原了该地层由还原到氧化的地球化学环境,由深水到浅水的水环境以及由湖沼相到河流相的沉积相。陶树等<sup>[8]</sup>测量了川东南—黔中及其周边地区震旦—志留纪地层的主量元素及微量元素含量,利用元素比值分析得出其沉积环境主要为半深海—深海及浅海滞流环境。Wang *et al.*<sup>[9]</sup>研究了内蒙古兴蒙地区元素比值的特征参数,指

出研究区中、晚二叠世之交的主要沉积环境为海相和强还原环境。张文翔等<sup>[10]</sup>用柴达木贝壳堤剖面沉积物常量元素和微量元素含量及其元素比值,重建了43.5~22.4 ka B.P.高潮水位期间的古气候和水位波动历史。周笃珺等<sup>[11]</sup>利用青海湖地区全新世黄土剖面的元素组分、氧和碳同位素等指标,探讨了青海湖湖区温湿—高温—冷干—暖湿—暖干—冷干的气候环境演变过程。Kraft<sup>[12]</sup>对华南南雄盆地白垩系和第三系碎屑沉积岩进行了分析,通过晚白垩世CaCO<sub>3</sub>含量、TOC值、Rb/Ti、Cs/Ti比值等,揭示了华南地区长期的极端干旱气候。Piper *et al.*<sup>[13]</sup>通过对密西西比河水系的河床沉积物和悬沙的地球化学研究,得出沉积物微量元素富集可能与人类活动有关。

湘江是湖南省最大的河流,属于长江流域洞庭湖水系。前人对于湘江流域沉积物开展了地球化学

收稿日期:2020-07-28;修回日期:2021-09-12;录用日期:2021-10-19;网络出版日期:2021-10-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41771218,41271228);国家重点研发计划(2020YFC1521605);国家社科重大项目(19ZDA231)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771218,41271228; National Key Research and Development Project, No. 2020YFC1521605; National Social Science Major Project, No. 19ZDA231]

相关研究,主要关注湘江流域沉积物重金属的地球化学特征<sup>[14-16]</sup>、污染性评价和来源分析<sup>[17-19]</sup>。长沙铜官窑遗址剖面正处于湘江流域中下游地区,铜官窑是外销窑,盛行于中晚唐而衰于五代<sup>[20]</sup>。长沙窑地区的沉积环境及物质来源的研究是解读长沙窑兴衰过程与环境变化关系的前提。因此,本文拟以长沙窑遗址石渚坪(SZP)剖面沉积物为研究对象,对其沉积物进行地球化学元素分析,揭示其元素地球化学特征,探讨其沉积环境。

## 1 研究区概况

SZP剖面(28°25′0.92″ N, 112°49′35.7″ E)位于长沙市望城区丁字镇铜官窑考古遗址(图1),海拔约25 m,处于湘江流域下游地区,洞庭湖平原以南。铜官窑遗址在石渚湖北岸,西南滨湘江,位于觉华山山脚下。地貌呈现为丘陵向平原过渡,高出现代河堤1~2 m。铜官窑遗址距离湘江约1 km,位于湘江的二级阶地,2011年湖南省文物考古研究所考古发掘时出露该遗址剖面。研究区域为亚热带季风气候,四季温差明显,雨热同期。年均气温为17.8℃,年降水

量介于1 250~1 750 mm<sup>[21]</sup>。湘江是洞庭湖水系中流域面积最大的河流,水源至濠河口干流全长856 km,总流域面积94 600 km<sup>2</sup><sup>[22]</sup>。在地质构造上,湘江源头在南岭构造带,向北汇入扬子板块的洞庭湖。流域上游以石灰岩为主,其中南部地区广泛分布石灰岩和砂岩,中下游区域则以砂岩、页岩、砾岩及花岗岩为主<sup>[23]</sup>。地貌特点为低山高丘与盆地相间,丘陵低缓。植被主要是马尾松稀疏草丛和油茶林,部分沟谷中有常绿阔叶林。土壤以红壤和紫色土为主,水土流失比较严重<sup>[24]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料来源

SZP剖面为含文化层剖面,地层界线分明,清晰可见(表1)。该剖面在铜官窑遗址范围内,是专门开挖的平行剖面,距离湘江约50 m,位于河流二级阶地且靠近丘陵。剖面厚度为320 cm,未见底。以每间隔2 cm或10 cm不等距取样,共采集99份样品,样品编号为SZP001~SZP099。文化层为260~290 cm,出土大量的瓷块和瓷片,时间约在唐代中晚期。

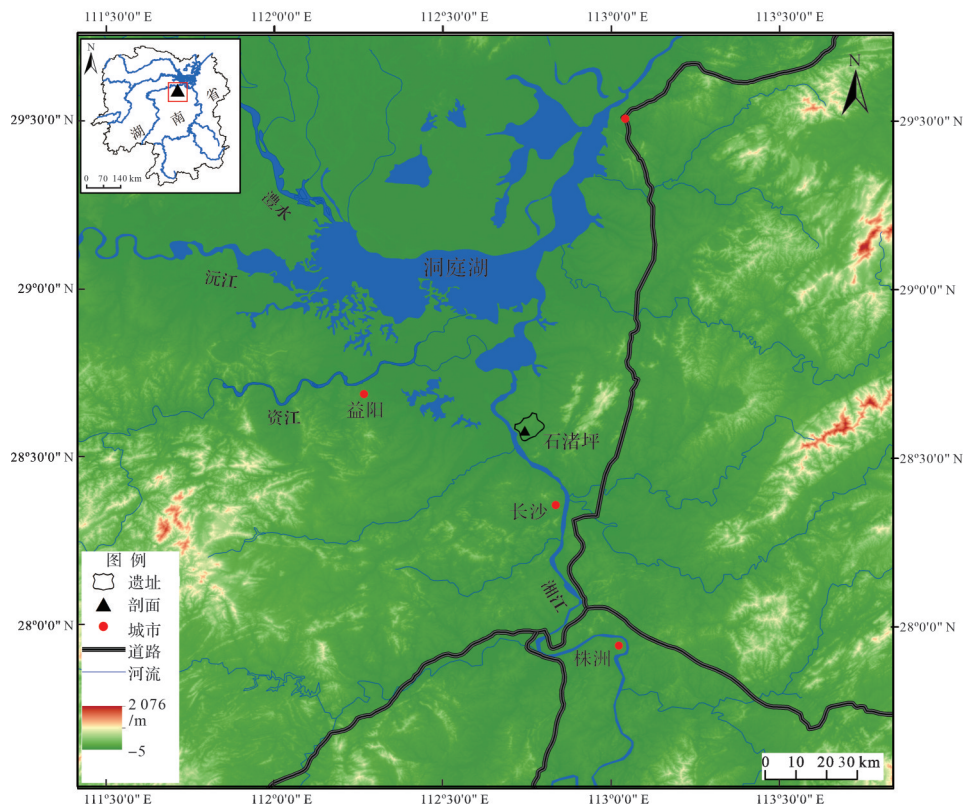


图1 SZP剖面位置示意图

Fig.1 Location of SZP profile



表1 SZP剖面描述  
Table 1 Description of SZP profile

地层深度/cm	地层特征
0~70	灰黄色黏土,含黑色斑块与胶膜、红色碎块、青灰色小砾石(0.5~1 cm)以及大量虫孔。在5~10 cm处发现灰色陶片
70~80	灰黄色黏土,沿裂隙发育大量红色Fe、Mn胶膜
80~145	青灰色淤泥,沿裂隙面发育红黄色胶膜,含虫孔
145~215	浅黄色,粉砂质黏土,无层理
215~230	灰黄色黏土
230~260	灰色淤泥层,含大量陶片
260~290	唐代中晚期文化层,含大量的陶块和陶片、红烧土
290~310	灰黄色,含少量烧土,含大量的碳粒和碳片,厚度约5~10 cm
310以下	浅黄色生土

## 2.2 测试方法

所有样品在实验室进行自然风干,取出5 g样品使用玛瑙研钵进行研磨,过200目筛。然后实验前,对磨好的样品在烘箱内烘干,烘干后称取25 mg样品置于自制高压密闭溶样装置中。加入0.5 mL浓HF后加热蒸干,去除样品中的部分Si。再加入1 mL浓HF和0.5 mL浓HNO<sub>3</sub>于190 °C溶解,蒸干至湿盐状,再加入1 mL HNO<sub>3</sub>蒸干至湿盐状,去除过量HF。蒸干后以5 mL的30%(v/v) HNO<sub>3</sub>在140 °C时提取残渣,冷却后加入1 mL的500 ng/mL的RH内标溶液稀释到50 mL用以减轻基体效应及仪器漂移带来的影响。测得Li、Sc、Ti、V、Cr、U、Be、Pb等共33种微量元素,分析结果与标样测定结果进行比较,误差均小于±10%。微量元素的含量用高分辨率电感耦合等离子体质谱仪(HR-ICPMS)进行测定,实验在南京大学地球科学系内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成<sup>[25]</sup>。分别在94~96 cm、139~141 cm和149~151 cm以及290~292 cm采集了3个OSL和1个AMS<sup>14</sup>C样品进行年代测定(表2),实验在北京大学AMS<sup>14</sup>C/OSL实验室(用CALIB 7.01校准)完成。除此以外,在剖面260~290 cm间的文化层中出土的陶器碎片被确定为中晚唐的器物。利用Tan *et al.*<sup>[26]</sup>基于测年结果和瓷器类型学建立的相对年代学框架,建立了一个年代—深度模型(图2)。

表2 SZP剖面中的AMS<sup>14</sup>C/OSL年代数据<sup>[26]</sup>  
Table 2 AMS<sup>14</sup>C/OSL age data in SZP profile<sup>[26]</sup>

样品编号	深度/cm	校正年代/a B.P.
AB120171	94~96	451±32
AB120172	139~141	879±65
AB120173	149~151	1 182±85
BA120171(AMS <sup>14</sup> C)	290~292	1 320±30

## 3 研究结果

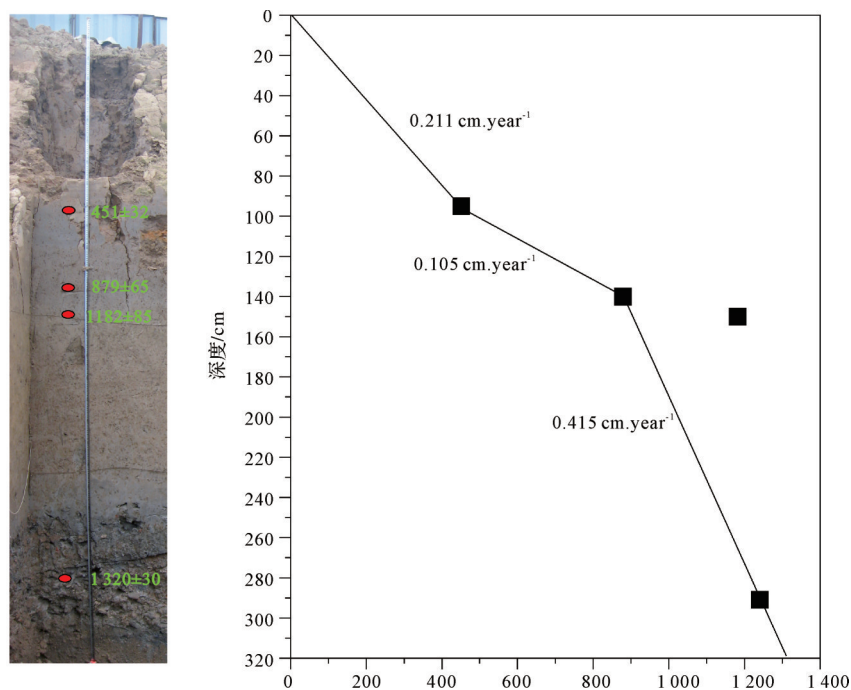
### 3.1 剖面年代序列

剖面选择4个样品完成年代测试,其中AMS<sup>14</sup>C(用Calib7.01校准)1个和OSL年代3个。OSL年代测定使用Riso-TL/OSL-DA15测年系统,在SZP剖面260~290 cm间的文化层中出土的大量瓷器碎片被确定为中晚唐的器物。建立的剖面年代序列如表2和图2。

### 3.2 石渚坪剖面地球化学元素分布

SZP剖面地球化学元素(Ti、Mn、Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Y、Zr、Mo、Sn、Cs、Ba、Hf、Pb、Th、U)含量变化如表3。Ti含量最高,平均值达到5 405.8 μg/g,其次是Mn,平均值为988.8 μg/g。元素中含量平均值较高的有Li、Mn、Zr、Ba、Rb、Zn,均在100 μg/g以上。含量较低的是Be、Mo、Hf、Ta、W、Bi、U,平均值皆在10 μg/g以下。最低的是Mo,平均值为0.9 μg/g。剖面含量均值由大到小为:Ti>Mn>Ba>Zr>Rb>Zn>Li>Cr>V>Pb>Sr>Cu>Y>Ni>Th>Cs>Co>Sc>Sn>Hf>U>Be>Mo。

元素含量随着深度的变化而变化,可能与当时的沉积环境和物质来源相关。元素Sc、V、Ni、Th、Mo、Ti、Cr、Co、Li、U、Zn变化趋势一致,在80~230 cm的地层为高值区,在230 cm以下的地层为低值区。Pb、Cu、Sn、Hf、Zr、Y、Ba、Mn、Sr与上述元素呈相反的变化趋势,230 cm以下的地层为它们的高值区。Pb、Cu在230 cm以上的地层波动不大,在230~310 cm出现最大值,Sn、Hf、Zr、Y、Ba、Mn、Sr在80~230 cm之间出现小幅升高。在80 cm上出现峰值的有Ba、Mn、Mo、Co。

图2 SZP剖面年代—深度曲线<sup>[26]</sup>Fig.2 Age vs. depth plot for SZP profile<sup>[26]</sup>

### 3.3 多变量分析

#### 3.3.1 元素相关性分析

微量元素之间相关性高,表明它们的来源可能一致,若相关性较差,来源可能就不同<sup>[30]</sup>。Ti与微量元素Sc、Li、V、Cr显著相关,相关系数均在0.8以上(置信度为99%)(表4)。Sc与Li、V、Cr、Ni;V与Li、Sr、Cr、Ni;Ni与Mo、Th;Cr与V、Ni;Co与Mo、Th在0.01水平上高度正相关,相关系数在0.8以上。这说明它们可能具有相同的物质来源。Pb与Cu(0.877)、Sn(0.759)呈正相关,与Rb(-0.25)、Cs(-0.456)负相关。Cu与Sn(0.794)正相关,与Sr(0.454)呈弱相关。Hf与Zr(0.983)、Y(0.736)显著相关,Zr与Y(0.668)相关性较高。Ba与Mn(0.744)相关性显著,与Sr(0.594)相关性较高,与Cu(0.444)弱相关。Mn与Sr(0.365)弱相关。

#### 3.3.2 主成分分析

因子分析前的KMO(Kaiser-Meyer-Olkin 检验)=0.534, Bartlett 球度检验结果显示(DF=253, Sig. < 0.001),说明样品数据适用于因子分析。通过主成分分析,可分为五个主成分,第一主成分的特征值为10.053,方差贡献为43.710%;第二主成分的特征值为3.912,贡献了17.007%;第三主成分特征值为3.016,贡献了13.112%;第四主成分特征值为1.802,

贡献了7.836%;第五主成分的特征值为1.520,贡献了6.610%。这五个主成分的总累积解释方差为88.274%,大于85%,说明这五个主成分可反映所有数据的大部分信息(表5)。以累积方差贡献88.274%为准,可以提取五个主成分因子:F1包括Sc、V、Ni、Th、Mo、Ti、Cr、Co、Li、U、Zn;F2包括Pb、Cu、Sn;F3包括Hf、Zr、Y;F4包括Ba、Mn、Sr;F5包括Be。

#### 3.3.3 聚类分析

聚类分析能够直接观察各元素之间的远近距离,距离系数的长短代表元素间来源的相关性程度,最先连接且距离最短的元素之间相关性高且来源相似<sup>[31]</sup>。对SZP剖面的地球化学元素进行R型聚类分析(图3),当距离系数选为15时,可以分成五组,聚类分析结果与主成分分析结果完全一致。

## 4 讨论

### 4.1 多变量分析结果的物源指示

根据多变量分析结果,可以将元素分为5类(F1~F5),F1:Sc、V、Ni、Th、Mo、Ti、Cr、Co、Li、U、Zn;F2:Pb、Cu、Sn;F3:Hf、Zr、Y;F4:Ba、Mn、Sr;F5:Be。

F1解释了方差的43.710%,所占比重最大,说明在石渚坪剖面的沉积物中F1对其他变量的影响占据主导地位。Sc、V、Ni、Ti、Cr、Co、Li、Zn等元素在风

表3 SZP剖面地球化学元素含量( $\mu\text{g/g}$ )  
Table 3 Geochemical element content in the sediments from SZP profile( $\mu\text{g/g}$ )

深度	Li	Be	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Mo	Sn	Cs	Ba	Hf	Pb	Th	U
80 cm以上	最小	100.9	3.1	15.9	5 421.7	63.7	60.0	18.0	33.3	35.6	117.5	165.2	47.9	32.0	209.3	0.8	7.1	19.1	484.2	6.6	49.9	30.9	4.9
	最大	115.7	4.0	16.4	5 638.9	66.0	67.3	2 493.1	23.9	36.5	137.1	180.4	50.0	34.3	271.9	1.2	10.9	22.9	646.1	8.2	74.4	32.7	6.2
	均值	107.6	3.5	16.2	5 506.9	64.6	63.6	1 146.1	20.4	34.7	127.3	174.7	49.0	33.2	235.3	1.0	9.2	20.1	526.7	7.3	56.9	31.9	5.5
80~230 cm	最小	104.6	3.3	13.8	5 386.1	58.9	57.4	503.2	14.9	28.8	111.8	171.3	47.5	27.8	199.6	0.7	7.6	18.1	502.1	6.0	53.1	24.5	5.0
	最大	118.9	4.5	17.6	6 023.6	70.7	72.5	1 578.8	24.5	37.4	141.4	186.6	53.5	37.7	260.4	1.3	15.3	22.3	546.8	7.9	66.9	33.4	6.5
	均值	110.0	3.8	16.0	5 676.8	66.2	64.7	876.3	20.3	34.1	129.9	177.1	49.8	32.7	228.3	1.0	11.3	19.3	519.3	7.1	57.9	31.0	5.8
230~310 cm	最小	89.9	3.3	12.9	4 864.8	48.1	49.3	800.9	16.0	26.5	102.2	155.4	45.6	30.5	220.4	0.6	7.0	21.2	506.4	6.5	38.8	22.7	4.7
	最大	106.4	4.0	14.8	5 279.2	57.8	57.6	1 997.9	18.8	29.6	97.3	125.4	183.4	55.4	37.1	317.3	0.8	20.2	27.1	631.3	9.3	129.7	28.4
	均值	97.0	3.6	13.7	5 042.7	51.8	54.1	1 093.2	17.2	28.4	115.5	173.1	50.1	34.2	275.0	0.7	9.9	24.7	543.1	8.2	58.3	25.4	5.1
310~320 cm	最小	100.2	3.5	14.7	5 168.6	53.4	55.8	628.9	15.1	28.4	110.1	178.8	48.8	33.0	241.2	0.8	6.9	25.0	509.3	7.3	37.3	22.3	5.3
	最大	102.2	3.6	14.9	5 230.8	53.6	69.4	695.3	15.4	35.1	29.0	182.7	49.7	34.2	248.3	0.8	7.5	25.1	530.1	7.5	40.4	23.7	5.4
	均值	101.2	3.6	14.8	5 199.7	53.5	62.6	662.1	15.3	31.8	118.1	180.7	49.2	33.6	244.7	0.8	7.2	25.0	519.7	7.4	38.9	23.0	5.3
全剖面	最小	89.9	3.3	12.9	4 864.8	48.1	49.3	503.2	14.9	26.5	102.2	155.4	45.6	27.8	199.6	0.6	6.9	18.1	502.1	6.0	37.3	22.3	4.7
	最大	118.9	4.5	17.6	6 023.6	70.7	72.5	1 997.9	24.5	37.4	141.4	186.6	55.4	37.7	317.3	1.3	20.2	27.1	631.3	9.3	129.7	33.4	6.5
	均值	104.0	3.7	14.9	5 371.0	58.9	60.4	991.6	18.4	31.5	121.9	175.8	50.0	33.3	249.7	0.9	10.7	22.2	532.6	7.6	58.2	27.6	5.4
湖南土壤背景值 <sup>[27]</sup>			1.06	11	136	68	441	14	32	27	95	139	57	27	260				347		27	17	4.2
湘江沉积物背景值 <sup>[28]</sup>		46.7	2.83	4 487	92.1	66.8	855	13.6	29.9	30	87.4	48.6	27	347	1.28	8.45			354		39.7	17.8	4.21
上陆壳UCC <sup>[29]</sup>	20	3	13.6	4 100	107	83	600	17	44	25	71	112	350	22	190	1.5	5.5	4.6	550	5.8	17	10.7	2.8

表4 SZP剖面地球化学元素相关性分析  
Table 4 Correlation analysis of geochemical elements in SZP profile

	Li	Be	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Cu	Ni	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Mo	Sn	U	Th	Pb	Hf	Ba	
Li	1.000																						
Be	0.370	1.000																					
Sc	0.875	0.325	1.000																				
Ti	0.863	0.370	0.910	1.000																			
V	0.898	0.274	0.933	0.937	1.000																		
Cr	0.799	0.443	0.877	0.830	0.838	1.000																	
Mn	-0.165	-0.209	-0.004	-0.155	-0.084	-0.158	1.000																
Co	0.435	0.122	0.681	0.590	0.681	0.522	0.498	1.000															
Cu	0.064	0.122	0.002	0.005	0.062	0.039	0.377	0.275	1.000														
Ni	0.737	0.326	0.900	0.794	0.846	0.936	0.039	0.713	0.135	1.000													
Zn	0.648	0.423	0.731	0.704	0.667	0.722	-0.139	0.527	0.282	0.791	1.000												
Rb	0.480	0.314	0.445	0.399	0.335	0.431	-0.264	-0.010	-0.581	0.305	0.300	1.000											
Sr	0.014	0.379	0.062	0.062	-0.052	0.036	0.365	0.158	0.454	0.149	0.406	0.028	1.000										
Y	-0.263	0.387	0.048	-0.123	-0.132	0.090	0.358	0.327	-0.025	0.156	0.031	0.079	0.215	1.000									
Zr	-0.692	-0.014	-0.518	-0.540	-0.605	-0.433	0.329	-0.114	-0.024	-0.437	-0.464	-0.257	0.026	0.668	1.000								
Mo	0.558	0.281	0.781	0.746	0.766	0.718	0.201	0.840	0.152	0.814	0.566	0.062	0.166	0.240	-0.232	1.000							
Sn	0.390	0.370	0.255	0.332	0.323	0.297	0.019	0.209	0.794	0.276	0.459	-0.250	0.287	-0.199	-0.337	0.208	1.000						
U	0.741	0.414	0.766	0.750	0.720	0.670	-0.223	0.451	-0.040	0.679	0.769	0.559	0.179	0.059	-0.458	0.548	0.240	1.000					
Th	0.630	0.244	0.753	0.726	0.814	0.706	0.148	0.812	0.339	0.803	0.661	0.014	-0.003	0.171	-0.247	0.731	0.367	0.602	1.000				
Pb	0.182	0.139	0.096	0.135	0.192	0.115	0.167	0.276	0.877	0.173	0.313	-0.593	0.197	-0.122	-0.186	0.194	0.759	0.033	0.442	1.000			
Hf	-0.615	0.034	-0.419	-0.462	-0.519	-0.346	0.329	-0.011	-0.013	-0.329	-0.344	-0.202	0.041	0.736	0.983	-0.151	-0.329	-0.328	-0.118	-0.162	1.000		
Ba	-0.194	-0.003	-0.154	-0.259	-0.222	-0.199	0.744	0.252	0.444	-0.039	-0.017	-0.138	0.594	0.274	0.149	0.033	0.157	-0.204	-0.044	0.247	0.151	1.000	
Cs	-0.633	-0.275	-0.625	-0.696	-0.774	-0.674	0.189	-0.332	-0.315	-0.686	-0.530	0.067	0.145	0.217	0.524	-0.589	-0.516	-0.448	-0.771	-0.456	0.458	0.285	

表5 SZP剖面沉积物地球化学元素变量的载荷因子  
Table 5 Load factors of sediment geochemical element variables in SZP profile

元素	成分				
	成分1	成分2	成分3	成分4	成分5
Sc	0.936	-0.095	-0.191	0.009	0.157
V	0.929	0.033	-0.290	-0.110	0.047
Ni	0.927	0.030	-0.072	0.062	0.157
Th	0.889	0.319	0.109	-0.033	-0.040
Mo	0.883	0.084	0.115	0.139	-0.030
Ti	0.873	-0.016	-0.264	-0.124	0.205
Cr	0.862	-0.021	-0.105	-0.135	0.289
Co	0.837	0.158	0.208	0.340	-0.202
Li	0.765	-0.009	-0.466	-0.086	0.259
Cs	-0.716	-0.441	0.221	0.327	0.017
U	0.709	-0.146	-0.182	-0.054	0.453
Zn	0.690	0.168	-0.191	0.095	0.485
Pb	0.157	0.927	-0.094	0.097	0.028
Cu	0.065	0.904	-0.007	0.348	0.095
Sn	0.216	0.786	-0.262	0.062	0.348
Rb	0.287	-0.740	-0.191	-0.011	0.461
Hf	-0.260	-0.045	0.931	0.071	-0.031
Zr	-0.374	-0.039	0.891	0.066	-0.070
Y	0.160	-0.131	0.874	0.227	0.220
Ba	-0.113	0.174	0.087	0.909	0.011
Mn	0.098	0.131	0.303	0.807	-0.362
Sr	0.000	0.168	0.011	0.712	0.547
Be	0.272	0.119	0.213	-0.080	0.820
特征值	10.053	3.912	3.016	1.802	1.520
变量解释/%	43.710	17.007	13.112	7.836	6.610
累积/%	43.710	60.717	73.829	81.664	88.274

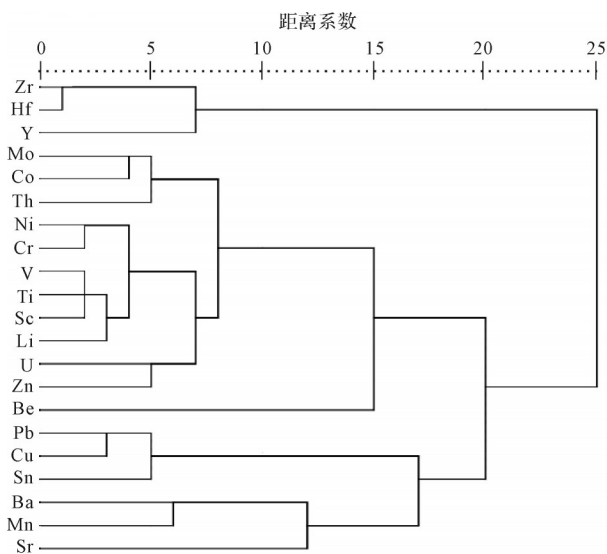


图3 SZP剖面地球化学元素R型聚类分析  
Fig.3 R-type cluster analysis of geochemical elements in SZP profile

化、侵蚀搬运和沉积的表生环境下较为稳定<sup>[32]</sup>。其中,铁族元素居多,包括Ti、Cr、Co、V、Ni、Ti、Cr、V,同时也为造岩元素,说明F1因子以陆源碎屑为主。Ti是亲碎屑元素,Ti离子在水溶液中迁移微弱,但Ti能在风化作用下富集,尤其是在玄武岩和一些其他基性岩风化形成的土壤中Ti含量明显居多<sup>[33]</sup>。Ti与微量元素Sc、Li、V、Cr显著的相关性说明它们的来源相似。Zn作为亲铜元素被分在F1因子中也许是因为其原生矿物较难风化或次生矿物稳定难溶,而后吸附于黏土矿物,在风化过程中得以保留<sup>[34]</sup>。在湘江流域广泛分布的古生代碳酸盐岩和印支—燕山期花岗岩体,这些岩石均是在地表条件下易于风化分解的地质体,其中,上游主要是泥盆系砂、页岩和泥盆系—石炭系的石灰岩,中下游区域中新生的紫色砂岩与花岗岩<sup>[24]</sup>。但是,铁族元素在基性岩与超基性岩中分布广泛,在石灰土及石灰岩地区土壤中含量最



高<sup>[28]</sup>。因此,可以推断F1主要来源于上游地区的石灰岩。

F2包括Pb、Cu、Sn,贡献了17.007%。3个元素皆是亲硫元素,易形成硫化物。湖南省内的侵入岩发育,与铜铅锌矿有关的主要是印支—燕山期花岗岩体<sup>[35]</sup>,铜矿很少有单一铜矿,共伴生铜的矿床比重大,铜常和铅、锌、锡、钴等形成多金属矿床<sup>[36]</sup>。F2可能来源于对湘江流域附近铜铅锡矿等有色金属矿的人为开采活动。

F3包括Hf、Zr、Y,贡献了13.112%。Hf与Zr的地球化学性质相似,矿物中Hf常与Zr伴生。在风化前期或风化成熟度较低的情况下,Zr和Hf往往呈弱相关。随着矿物风化增大,Zr和Hf显著相关,Zr和Hf会迁移,仅以锆石的形式保留下来<sup>[37]</sup>。锆石在火成岩中广泛存在,在花岗岩矿岩内属于副矿物<sup>[38]</sup>。因此,F3可能来源于中下游地区花岗岩风化侵蚀。

F4包括Ba、Mn、Sr,贡献了7.836%。Ba、Sr同属碱土金属元素,同时也是亲石元素。Ba在细粒陆源沉积岩如粉砂岩、泥岩中含量较高,Sr在泥岩、钙质泥岩和碳酸盐岩中含量较高<sup>[39]</sup>。在湖南地区,Ba在砂页岩中含量最高,在石灰岩发育的土壤中含含量低<sup>[28]</sup>。所以F4可能与中下游地区的砂岩的风化剥蚀有关。但在SZP剖面中,Ba均值是湖南背景值均值的1.53倍,湘江沉积物均值的1.5倍,Mn均值是湖南背景值均值的4.53倍,湘江沉积物均值的2.34倍,远

高于湘江沉积物和湖南土壤背景值。可以推断F4物源主要与锰矿物的人为开发有关。

F5包括Be。湖南地区大部分有色金属矿床与中酸性花岗岩有成因联系,燕山期不同成因类型的花岗岩成矿专属性不同,花岗岩会形成Ta-Be、Sn、Mo、Bi-Cu、Pb、Zn-U等矿床系列<sup>[40]</sup>。SZP剖面中Be含量平均值是湖南背景值的4.27倍,是湘江沉积物的1.06倍,说明SZP剖面中Be富集可能与中下游地区花岗岩有色金属矿床的人为开采有关。

#### 4.2 遗址剖面地球化学元素特征及其物源演化

310 cm以下为生土层,此时生土多为末次冰期时的风尘堆积<sup>[41]</sup>。晚更新世冰期最盛时,长江中下游地区气候普遍寒冷且降水量减少,黄土高原堆积厚层的马兰黄土,在长江中下游地区的下蜀黄土开始堆积<sup>[42]</sup>。如江西定山砂山剖面的下层灰黄色土—淤泥沉积是末次冰期间冰阶晚期的区域降尘堆积<sup>[43]</sup>,鄱阳湖地区的彭泽红光、小学剖面皆为黄土状土—中细砂堆积,分别对应末次冰期早、中期及末次冰期中、后期的堆积<sup>[44]</sup>。末次冰期期间,全球大范围气候寒冷干旱,海平面大幅降低,大陆架出露成陆<sup>[45]</sup>。海平面降低,河流下切侵蚀能力加强,河谷漫滩加深。此时强劲的冬季风吹蚀河谷漫滩,产生大量粉尘,河流台地开始形成堆积<sup>[46]</sup>,SZP剖面的下部就是典型的下蜀黄土层,F1因子中的Cr、Ni、Ti、Zn出现峰值(图4),生土层的物源主要是上游的石灰石风化剥蚀。

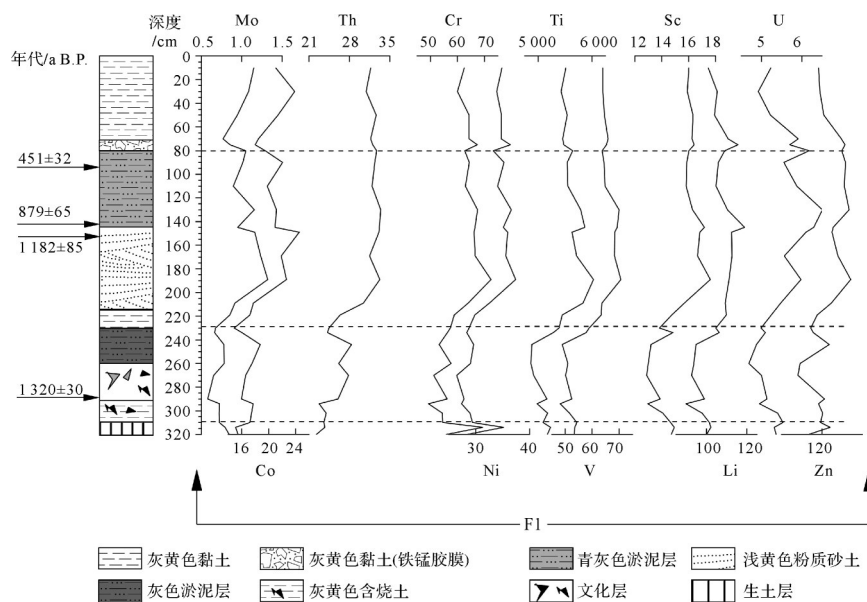


图4 SZP剖面第一主成分元素( $\mu\text{g/g}$ )随深度变化曲线

Fig.4 First principal component elements ( $\mu\text{g/g}$ ) vs. depth in SZP profile

230~310 cm,对应年代为1 288~1 094 a B.P。沉积层下部颜色由灰黄色转为黑色,显示此时水位逐渐上升,石渚洼地开始积水形成石渚湖,其沉积物为黑色湖沼相淤泥沉积。此时,长沙窑先民利用此地进行制窑,在黑色淤泥层中发现烧土和大量的碳粒、碳片,这也表明约在盛唐开元年间,石渚制瓷业已经有所发展。根据考古发掘发现长沙窑纪年瓷中最早的记录正是记有“开元三年”字样的瓷碗<sup>[47]</sup>。此沉积层的上部为唐朝文化层,大量的瓷片和缸片表明当地制瓷业在唐朝中晚期的繁荣,现有的研究也可佐证长沙窑发展的繁荣期是在唐朝中晚期<sup>[20]</sup>。唐朝气候总体上趋于湿润,唐末30年更是多雨阶段,唐末集中的水灾记录也体现了湿润的气候<sup>[48]</sup>,这些都充分表明了此时的高水位,石渚湖初步形成。Pb、Cu、Sn、Ba、Mn、Sr皆在文化层出现峰值(图5)。长沙窑瓷器以与当时主流不符的彩瓷闻名,制造原料多就地取材,其釉彩制作以磷灰石、方解石为熔剂,用Cu、Fe、Mn等矿物做釉彩着色剂<sup>[20]</sup>。方解石中含有Mn、Sr、Ba、Pb、Co、Fe、Zn、Mg等类质同象替代物,釉彩中的乳浊现象主要是因为含Cu矿物中含有部分SnO<sub>2</sub><sup>[49]</sup>。在瓷器的制作过程中,各种矿物的开采和冶炼活动中产生的废料被沉入水中,随着水位的上升,窑址逐渐被洪水掩盖。可以看出此时物源主要是长沙铜官窑瓷器的煅烧过程中,各种金属矿物开采及冶炼产生的废料。

80~230 cm对应年代为1 288~1 094 a B.P。沉积层为黏土—粉砂质黏土—淤泥层,该层沉积相分为上下两层,下层为河漫滩相。说明此时石渚湖水位发生

多次变化,这种变化与湘江水位变化有着密切的关系。

粉砂质黏土层为湘江洪水期泛滥时期,水流漫溢天然堤,河流流速降低,悬浮沉积物大量堆积形成河漫滩沉积。此层F1元素含量较下层大量增加(图4),证明此时物源主要是湘江的泥沙。湘江大部分泥沙集中在洪水时期,洪水越大含沙量越高<sup>[50]</sup>。随着湘江水位的变化,各种元素以碎屑形式在泥沙中被冲上岸。下层变为湖相后,湘江水位提高。元素Co、Sc、V、Li、U等F1因子皆出现较明显的峰值(图4),且含量远高于其他因子,说明沉积物主要来源于上游的泥盆系—石炭系的石灰岩风化剥蚀与水流搬运。洪水退去后,石渚坪低洼处开始积水,淤泥层中植物根系形成的铁锰胶膜和虫孔说明因为长期潮湿的环境,动植物开始生长,逐渐形成漫滩沼泽。此层上部为黑色淤泥层,水位明显上涨,即石渚湖再次形成。此时沉积环境较为封闭,只有F4因子和U的元素含量分布发生明显波动,铜官窑的人类活动痕迹已经消失,与文化层的锰矿物人为开发不同,物源主要来自中下游地区砂岩的风化剥蚀。

80 cm以上地层为人工垫土和表土层,含砾石、灰色瓷片、红烧土等。1964年铜官窑—石渚湖一带修建石渚新河和堤垸,破坏了部分窑址<sup>[17]</sup>,故沉积物中的瓷片和红烧土主要与人类活动有关。F4因子出现峰值(图5)。Ba、Mn、Zn、Cu等元素远高于湘江沉积物和湖南土壤背景值,可能与湘江流域有色金属矿藏的开采有关。

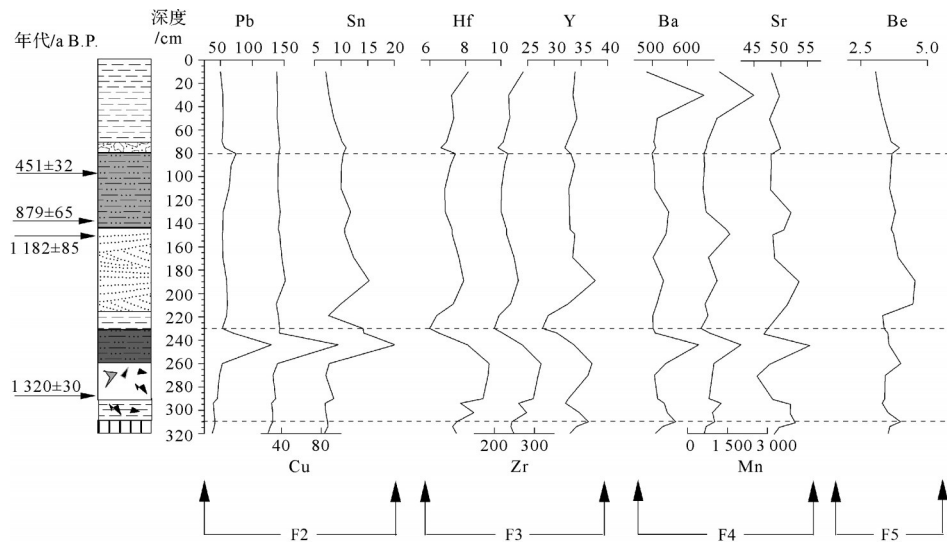


图5 SZP剖面第二至第五主成分地球化学元素(μg/g)随深度变化曲线

Fig.5 Variation curve of the second-fifth principal component elements (μg/g) with depth for SZP profile

## 5 结论

(1) SZP剖面元素的含量变化显著,以80 cm为界,上层变化平缓,下层变化剧烈。元素Sc、V、Ni、Th、Mo、Ti、Cr、Co、Li、U、Zn在80~230 cm逐渐升高出现峰值,230~310 cm逐渐降低至谷值。元素Hf、Zr、Y、Ba、Mn、Sr、Be与其分布趋势相反。其中Ti含量最高,平均值达到5 405.8  $\mu\text{g/g}$ 。最低的是Mo,平均值为0.9  $\mu\text{g/g}$ 。剖面含量均值由大到小为:Ti>Mn>Ba>Zr>Rb>Zn>Li>Cr>V>Pb>Sr>Cu>Y>Ni>Th>Cs>Co>Sc>Sn>Hf>U>Be>Mo。

(2) SZP剖面沉积物地球化学特征揭示了沉积环境变化过程及其物质来源演化。310 cm以下的浅黄色生土层为末次冰期风成堆积;310~230 cm,对应年代1 288~1 094 a B.P.,湘江水位上升,石渚洼地开始积水形成石渚湖。物源主要是长沙铜官窑瓷器的煅烧过程中,各种金属矿物开采及冶炼产生的废料。230~80 cm,对应年代1 094~380 a B.P.,水位变化显著,其沉积相为河漫滩相—湖相,洼地再次积水形成石渚湖。此层下层沉积物来源于湘江输入的泥沙,是来自上游的泥盆石炭系的石灰岩沉积物风化侵蚀和水流搬运沉积。上层沉积物来源于中下游地区砂岩的风化侵蚀。80 cm以上,水位下降,周边坡地遭遇水土侵蚀,同时人为活动垫土形成此时的石渚坪,物源可能与现代人类工业活动有关。

致谢 衷心感谢审稿专家和编辑部老师为本研究提出的意见和指导。

## 参考文献(References)

- [1] 牛彩香, 雒昆利. 陕西蓝田段家坡黄土剖面地球化学元素特征及古气候效应分析[J]. 西北地质, 2010, 43(1): 66-74. [Niu Caixiang, Luo Kunli. Characteristics of geochemical element and paleoclimate effect—a case studying of Duanjiapo section during Late Neogene and Quaternary, in Lantian, Shaanxi [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(1): 66-74.]
- [2] 毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 337-348. [Mao Guangzhou, Liu Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 337-348.]
- [3] Yan Y, Xia B, Lin G, et al. Geochemistry of the sedimentary rocks from the Nanxiong Basin, South China and implications for provenance, paleoenvironment and paleoclimate at the K/T boundary[J]. Sedimentary Geology, 2007, 197(1/2): 127-140.
- [4] 高华中. 沂沭河流域7470~2550a BP气候变化的元素地球化学记录[J]. 地球与环境, 2016, 44(6): 595-599. [Gao Huzhong. Elemental geochemistry for climate change of Yishu River Basin during 7470-2550 a B. P. [J]. Earth and Environment, 2016, 44(6): 595-599.]
- [5] Das B K, Al-Mikhlaifi A S, Kaur P. Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26(6): 649-668.
- [6] Jia X P, Wang H B, Xiao J H. Geochemical elements characteristics and sources of the riverbed sediment in the Yellow River's desert channel[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(8): 2159-2173.
- [7] 刘平贵, 范淑贤, 李雪菊. 银川盆地第四纪地球化学元素特征及沉积环境[J]. 地质力学学报, 2000, 6(4): 43-50, 94. [Liu Pinggui, Fan Shuxian, Li Xueju. The geochemical element characteristics and paleosedimentary environment of the Quaternary deposits in Yinchuan Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2000, 6(4): 43-50, 94.]
- [8] 陶树, 汤达祯, 周传祯, 等. 川东南—黔中及其周边地区下组合烃源岩元素地球化学特征及沉积环境意义[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 397-403. [Tao Shu, Tang Dazhen, Zhou Chuanyi, et al. Element geochemical characteristics of the lower assemblage hydrocarbon source rocks in southeast Sichuan-central Guizhou (Chuangongnan-Qianzhong) region and its periphery areas and their implications to sedimentary environments[J]. Geology in China, 2009, 36(2): 397-403.]
- [9] Wang H, Huang Q H, Bai X F, et al. Geochemical characteristics and depositional environment of trace elements and rare earth elements of sedimentary rocks of Middle-Upper Permian boundary in Xing-Meng area[M]//Lin J E. Proceedings of the international field exploration and development conference 2019. Singapore: Springer, 2020.
- [10] 张文翔, 张虎才, 雷国良, 等. 柴达木贝壳堤剖面元素地球化学与环境演变[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 917-928. [Zhang Wenxiang, Zhang Hucui, Lei Guoliang, et al. Elemental geochemistry and paleoenvironment evolution of shell bar section at Qarhan in the Qaidam Basin[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 917-928.]
- [11] 周笃珺, 马海州, 高东林, 等. 青海湖南岸全新世黄土地球化学特征及气候环境意义[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 144-148. [Zhou Dujun, Ma Haizhou, Gao Donglin, et al. Geochemical characteristics and climatic environmental significance of Holocene loess on south Qinghai Lake shore[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(2): 144-148.]
- [12] Kraft R A. Reconstruction of Holocene and Early Eocene terrestrial environments using multiple stable isotope proxies [D]. Washington: The Johns Hopkins University, 2012.
- [13] Piper D Z, Ludington S, Duval J S, et al. Geochemistry of bed and suspended sediment in the Mississippi River system: Provenance versus weathering and winnowing[J]. Science of the To-



- tal Environment, 2006, 362(1/2/3): 179-204.
- [14] Zhang S, Dong W J, Zhang L C, et al. Geochemical characteristics of heavy metals in the Xiangjiang River, China[M]//Sly P G, Hart B T. Sediment/water interactions. Dordrecht: Springer, 1989: 253-262.
- [15] 吴雅霁, 彭渤, 杨霞, 等. 湘江竹埠港段河床沉积物元素地球化学特征[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(4): 274-282. [Wu Yaji, Peng Bo, Yang Xia, et al. Geochemical characteristics of elements in the sediments of Zhubugang Xiangjiang River[J]. Geological Survey and Research, 2014, 37(4): 274-282.]
- [16] 徐婧喆. 湘江长沙段沉积物重金属污染地球化学分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012. [Xu Jingzhe. Geochemical study on heavy metal contamination developed in bed sediments of the Xiangjiang River, Hunan province, China[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2012.]
- [17] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 260-265. [Liu Chunzao, Huang Yizong, Lei Ming, et al. Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River Basin[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, 33(1): 260-265.]
- [18] Mao L J, Mo D W, Guo Y Y, et al. Multivariate analysis of heavy metals in surface sediments from lower reaches of the Xiangjiang River, southern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 69(3): 765-771.
- [19] 彭渤, 唐晓燕, 余昌训, 等. 湘江入湖河段沉积物重金属污染及其Pb同位素地球化学示踪[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 282-299. [Peng Bo, Tang Xiaoyan, Yu Changxun, et al. Heavy metal contamination of inlet sediments of the Xiangjiang River and Pb isotopic geochemical implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(2): 282-299.]
- [20] 长沙窖课题组. 长沙窖[M]. 北京: 紫禁城出版社, 1996: 7-28. [Project Team of Changsha cellar. Changsha Kiln[M]. Beijing: Forbidden City Press, 1996: 7-28.]
- [21] 封昊阳. 湘东地区传统村落及民居空间分布与形态文化地理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [Feng Haoyang. The research of spatial distribution and form of traditional villages and houses in eastern Hunan basing on the cultural geography[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]
- [22] 廖小红, 王维俊, 宋平, 等. 湘江流域径流特性分析[J]. 湖南水利水电, 2019(02): 46-48. [Liao Xiaohong, Wang Weijun, Song Ping, et al. Analysis of runoff characteristics in Xiangjiang River Basin[J]. Hunan Hydro & Power, 2019(02): 46-48.]
- [23] 高冠民, 窦秀英. 湖南自然地理[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1981: 179-180. [Gao Guanmin, Dou Xiuying. Hunan physical geography [M]. Changsha: Hunan People's Press, 1981: 179-180.]
- [24] 唐晓燕, 彭渤, 余昌训, 等. 湘江沉积物重金属元素环境地球化学特征[J]. 云南地理环境研究, 2008, 20(3): 26-32. [Tang Xiaoyan, Peng Bo, Yu Changxun, et al. Environmental-geochemical characteristics of heavy metals in sediments from the Xiang River [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2008, 20(3): 26-32.]
- [25] 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 等. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(6): 844-850. [Gao Jianfeng, Lu Jianjun, Lai Mingyuan, et al. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2003, 39(6): 844-850.]
- [26] Tan Z H, Mao L J, Han Y M, et al. Black carbon and charcoal records of fire and human land use over the past 1300 years at the Tongguan Kiln archaeological site, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 504: 162-169.
- [27] 潘佑民. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 159-275. [Pan Youmin. Soil background values and research methods in Hunan[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 159-275.]
- [28] 王晓丽. 河口沉积物采样代表性研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006. [Wang Xiaoli. Research on representativeness of estuarine sediment sampling[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.]
- [29] McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2001, 2(4): 203-236.
- [30] 王建丰, 雷天柱, 张生银, 等. 刘家峡水库表层沉积物微量元素地球化学特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2018, 38(3): 51-59. [Wang Jianfeng, Lei Tianzhu, Zhang Shengyin, et al. Trace element geochemistry of the surface sediments in the Liujiaxia reservoir, Gansu [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2018, 38(3): 51-59.]
- [31] 刘良, 张祖陆. 南四湖表层沉积物重金属的空间分布、来源及污染评价[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(6): 7-15. [Liu Liang, Zhang Zulu. Spatial distribution, sources and pollution assessment of heavy metals in the surface sediments of Nansihu Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(6): 7-15.]
- [32] 金秉福, 林振宏, 季福武. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 99-106. [Jin Bingfu, Lin Zhenhong, Ji Fuwu. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance [J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1): 99-106.]
- [33] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1997: 26-176. [Zhang Hucai. Epigenetic geochemical characteristics and theoretical basis of elements[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1997: 26-176.]
- [34] 张元培, 黄春娟, 孙卫国, 等. 秭归地区闪长岩岩体风化壳微量元素地球化学特征[J]. 物探与化探, 2012, 36(5): 755-759. [Zhang Yuanpei, Huang Chunjuan, Sun Weiguo, et al. Geochemical characteristics of trace elements in the diorite weath-

- ered crust of Zigui area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(5): 755-759. ]
- [35] 付胜云,唐分配,李大江,等. 湖南省铜矿成矿规律[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(6): 36-43. [Fu Shengyun, Tang Fenpei, Li Dajiang, et al. Metallogenic regularities of copper mines in Hunan province[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2015, 67(6): 36-43. ]
- [36] 李振红,赵亚辉,周厚祥. 硫同位素地质特征及其在湖南省铜矿床成矿物质来源示踪中的应用[J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(1): 72-77. [Li Zhenhong, Zhao Yahui, Zhou Houxiang. Sulfur isotopic characteristics of copper deposits in Hunan province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2018, 34(1): 72-77. ]
- [37] 魏晓,文雪峰,杨瑞东. 贵州从江县大融砖厂新元古界浅变质岩现代风化壳剖面中微量元素分布特征与相关性分析[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 304-313. [Wei Xiao, Wen Xuefeng, Yang Ruidong. Trace element distribution characteristics and correlation analysis of modern weathering crust profile of Neoproterozoic epimetamorphic rocks in Darong, Congjiang county, Guizhou province [J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(3): 304-313. ]
- [38] 陈卫锋,陈培荣,黄宏业,等. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2007, 37(7): 873-893. [Chen Weifeng, Chen Peirong, Huang Hongye, et al. Chronological and geochemical studies of granite and enclave in Baimashan pluton, Hunan, South China[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2007, 37(7): 873-893. ]
- [39] 邓宏文,钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1993: 8-10. [Deng Hongwen, Qian Kai. *Sedimentary geochemistry and environmental analysis* [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 8-10. ]
- [40] 赵海权. 湖南省主要稀有稀土金属矿床特征研究[J]. 世界有色金属, 2019(3): 273-274. [Zhao Haiquan. Study on the characteristics of the major rare earth metal deposits in Hunan province[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(3): 273-274. ]
- [41] 黄春长. 环境变迁[M]. 北京:科学出版社, 1998: 110. [Huang Chunchang. *Environmental change* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 110. ]
- [42] 杨达源. 晚更新世冰期最盛时长江中下游地区的古环境[J]. 地理学报, 1986, 41(4): 302-310. [Yang Dayuan. The paleoenvironment of the mid-lower regions of Changjiang in the full-glacial period of Late Pleistocene [J]. *Journal of Geography*, 1986, 41(4): 302-310. ]
- [43] 庄检平,贾玉连,马春梅,等. 末次冰期间冰阶晚期长江中游风尘堆积及环境意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(3): 424-428. [Zhuang Jianping, Jia Yulian, Ma Chunmei, et al. Eolian deposits in the middle reaches of the Yangtze River during Late Interstadial of the Last Glacial (40-22 ka B. P.) and its environmental significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3): 424-428. ]
- [44] 于玲玲,贾玉连,陈晓玲,等. 长江中游末次冰期风成堆积及其环境指示[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2010, 44(1): 158-162. [Yu Lingling, Jia Yulian, Chen Xiaoling, et al. Aeolian deposits in the middle reaches of Changjiang River during the Last Glaciation and their environmental implication[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2010, 44(1): 158-162. ]
- [45] 包浪,李海平. 第四纪末次间冰期—冰期的气候变化和驱动机制[J]. 城市地理, 2017(18): 108. [Bao Lang, Li Haiping. Climate change and driving mechanism of the Last Interglacial Glaciation in Quaternary [J]. *Urban Geography*, 2017(18): 108. ]
- [46] 贾玉芳. 末次冰期以来鄱阳湖沙山沉积及其环境意义研究[D]. 济南:山东大学, 2012. [Jia Yufang. Research on sand hills and their environmental significance in Poyang Lake region since Last Glacial Period[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2012. ]
- [47] 刘美观. 长沙窑纪年瓷研究[J]. 收藏, 2010(2): 56-58. [Liu Meiguan. Research on chronological porcelain of Changsha Kiln [J]. *Collection*, 2010(2): 56-58. ]
- [48] 李偏,张茂恒,孔兴功,等. 近2000年来东亚夏季风石笋记录及与历史变迁的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 206-213. [Li Pian, Zhang Maoheng, Kong Xingong, et al. A stalagmite-record of East Asian summer monsoon in the last 2000 years and its correlation with historical records [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 206-213. ]
- [49] 林亦秋. 长沙窑蓝釉与铜红釉器及宗教纹饰:黑石号沉船的发现[C]//2009年古陶瓷科学技术国际学术讨论会(ISAC'09)论文集. 北京:中国科学院上海硅酸盐研究所, 2009. [Lin Yiqiu. Changsha kiln blue glaze and copper red glaze ware and religious decoration: Discovery of the wreck of the black stone [C]//Proceedings of the 2009 international symposium on ancient ceramic science and technology. Beijing: Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 2009. ]
- [50] 廖政文. 湘江上游泥沙的产生和特性[J]. 湖南水利水电, 2004(1): 28-29. [Liao Zhengwen. Sediment formation and characteristic in upstream of Xiangjiang River [J]. *Hunan Hydro & Power*, 2004(1): 28-29. ]



## Geochemical Element Characteristics and Provenance Changes at Tongguanyao Site Section in Changsha

GUO AiPeng<sup>1</sup>, MAO LongJiang<sup>1,2</sup>, MO DuoWen<sup>3</sup>, ZHANG XingGuo<sup>4</sup>, ZOU ChunHui<sup>1</sup>, LI Ye<sup>1</sup>, WU YouJin<sup>1</sup>

1. Institute of Scientific & Technical History, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2. School of Marine Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

4. Archaeology Institute of Hunan Province, Changsha 410008, China

**Abstract:** High-resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (HR-ICPMS) was applied to determine the geochemical element content in sediments from the Shizhuping (SZP) profile of the Tongguan kiln site in Changsha, Hunan province, China. The variation of geochemical content was analyzed to reveal environmental evolution and provenance change. The content varies significantly. The elements Ti, Cr, Co, V, Ni, etc. gradually increase at depths from 80 cm to peak at 230 cm, then decrease from 230 cm to 310 cm to the lowest values; Pb, Zr and Mn show the opposite trend. Of these, Ti content is the highest (average 5 405.8  $\mu\text{g/g}$ ). The lowest is Mo, with an average of 0.9  $\mu\text{g/g}$ . The order of the average content from higher to lower is Ti > Mn > Ba > Zr > Rb > Zn > Li > Cr > V > Pb > Sr > Cu > Y > Ni > Th > Cs > Co > Sc > Sn > Hf > Be > Mo. The SZP section has recorded the changes in the sedimentary environment over the past 1 300 years: loess sediment-SZP lake formation-flood plain sediment-SZP lake reformed-SZP terrace. Correspondingly, the provenance of the section has changed significantly. The source below 310 cm is dust accumulated in the most recent glacial period. The formation at 310-230 cm depths (1 288-1 094 a B.P.) contains a large number of ceramic tablets, and the sediments are mainly the waste products of mining and smelting of metal minerals in the calcination process of Tongguan kiln porcelain. From 230 cm to 80 cm (1 094-380 a B.P.), the lower sediment source is from the Xiangjiang River; the upper sediment is weathering erosion and water transport of sandstone in the middle-to-lower reaches. Above 80 cm (380 a B.P. to present) the sediments are related to human activity, comprising mainly an artificial soil cushion and weathering erosion accumulation around the slope.

**Key words:** major elements; trace elements; sedimentary environment; provenance; Tongguan kiln site