

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.11.014

# 含山—无为地区下蜀黄土地球化学特征及物源探讨

陈默<sup>1</sup>, 李龙明<sup>1</sup>, 阚天翔<sup>1</sup>, 蒋仁<sup>2</sup>, 吴雪峰<sup>3</sup>, 李加好<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地质调查局 南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 3. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

**摘要:**第四纪中—晚更新世以来,长江下游广泛发育黄土沉积,下蜀黄土是其中的典型代表。文章研究含山—无为地区下蜀黄土地球化学特征,并与北方西峰黄土、东秦岭黄土和南方镇江、九江、合肥、宣城等地下蜀黄土进行对比分析。结果表明:含山—无为地区下蜀黄土经历了中等化学风化;主、微量元素特征表现出与北方西峰黄土的相对一致性,因此北方黄土高原黄土可能是含山—无为地区下蜀黄土主要物源之一。研究结果可为研究长江中下游地区下蜀黄土的物源及物源区古环境信息提供参考。

**关键词:**含山—无为地区;下蜀黄土;地球化学特征;物源

**中图分类号:**P534.631;P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)11-1524-09

## Geochemical characteristics and provenance of Xiashu loess in Hanshan-Wuwei area

CHEN Mo<sup>1</sup>, LI Longming<sup>1</sup>, KAN Tianxiang<sup>1</sup>, JIANG Ren<sup>2</sup>, WU Xuefeng<sup>3</sup>, LI Jiahao<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China; 3. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China)

**Abstract:** Since the Middle to Late Pleistocene of the Quaternary, a wide range of loess deposits has been widely developed in the lower reaches of the Yangtze River, of which Xiashu loess is a typical representative. This paper studies the geochemical characteristics of Xiashu loess in Hanshan-Wuwei area, and compares them with Xifeng loess and Eastern Qinling loess in north China and Zhenjiang, Jiujiang, Hefei, Xuancheng loess in south China, respectively. The results show that Xiashu loess in Hanshan-Wuwei area has experienced moderate chemical weathering, and the ratios of major and trace elements are relatively consistent with those of Xifeng loess in north China, so the loess of Loess Plateau in north China may be one of the main sources of Xiashu loess in Hanshan-Wuwei area. The study of the provenance of Xiashu loess in this area can not only understand the paleoenvironmental information of the provenance area, but also provide new ideas for the provenance study of Xiashu loess in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

**Key words:** Hanshan-Wuwei area; Xiashu loess; geochemical characteristics; provenance

黄土作为记录古气候、古地理和古环境变化的信息载体,近几十年来受到国内外研究者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。在我国,黄土主要分布在西北、华北和长江中下游地区,对于北方干旱半干旱地区黄

土,相关研究主要以黄土高原为代表,而对于南方黄土,研究最广泛的是“下蜀黄土”,该名称由李四光、朱森以镇江市下蜀镇命名<sup>[6]</sup>。长江中下游地区属于亚热带季风气候,从其独特的黄土沉积序

收稿日期:2021-04-28;修回日期:2021-05-08

基金项目:中国地质调查局地质调查资助项目(DD20190043;DD20190045)

作者简介:陈默(1997—),男,安徽濉溪人,合肥工业大学硕士生;

李龙明(1979—),男,安徽天长人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: Longming-li@hfut.edu.cn.

列观察气候环境变化特征成为近些年的研究热点之一<sup>[7-9]</sup>。关于南方下蜀黄土的成因,主要有风成说和水成说,也有研究者认为其是残、坡积的产物。随着技术手段的进步和研究方法的改进,风积成因成为目前学术界的主流观点<sup>[7,10]</sup>;但对于下蜀黄土的物源仍有较大的争议,大致分为近源堆积和远源堆积 2 种观点。近源的观点认为其物源主要是长江中下游地区的河谷和河漫滩堆积物,如文献<sup>[11]</sup>认为合肥盆地下蜀黄土的潜在物源是淮河沿岸及淮北地区河流相、湖相及湖沼相细粒沉积物,文献<sup>[12]</sup>认为九江地区下蜀黄土来自长江或赣江的古河谷漫滩。远源的观点认为下蜀黄土主要来自西北干旱地区的粉尘。文献<sup>[13-14]</sup>从矿物组合、粒度特征和元素地球化学的角度分析镇江下蜀黄土,认为其主要物源来自黄土高原;文献<sup>[15]</sup>通过研究长江下游地区下蜀黄土的地球化学特征,认为下蜀黄土与西北黄土的原始沉积物有相似的化学组成。

含山—无为地区位于安徽省中南部,西邻巢湖水域,地处长江下游北岸。下蜀黄土在该区内分布广泛,地表大面积出露,岩性稳定且较为单一,总厚度为 0~45 m。关于区内下蜀黄土沉积时代并无过多的争议,安徽省地质调查院对该区下蜀组底部的电子自旋共振(electron spin resonance, ESR)测年结果为(349±3) ka,时代归于中—晚更新世<sup>[16]</sup>,文献<sup>[17-18]</sup>中将区内下蜀组时代归为晚更新世。在已有相关研究中,对该地区下蜀黄土物源的研究很少,本文采用元素地球化学的方法,通过与北方西峰黄土<sup>[19]</sup>、东秦岭黄土<sup>[20]</sup>和南方镇江<sup>[13-14]</sup>、九江<sup>[12,21]</sup>、合肥<sup>[22]</sup>、宣城<sup>[9]</sup>等地下蜀黄土进行对比研究,探讨含山—无为地区下蜀黄土的物源。

### 1 样品采集与测试方法

1) 样品采集。本研究所采集的样品位于含山—无为地区下蜀组上段,采集地点主要为含山县陶厂镇和无为市石涧镇,采样点位置如图 1 所示(基于安徽省地理信息公共服务平台网站审图号为皖 S(2022)12 号的标准地图绘制)。

陶厂镇小杜村 ZK01130 钻孔下蜀组地层剖面图如图 2 所示,下伏地层为中更新世戚家砬组。含山—无为地区下蜀黄土野外照片如图 3 所示,野外剖面可见上覆 15~20 cm 厚的腐殖土,在干燥的条件下,黄土质地较为坚硬,遇水后可塑性较好,具有典型的下蜀组特征。黄土岩性为土黄、棕

黄、灰黄色黏土及粉质黏土,多含球粒状铁锰结核;结核大小多为 1~5 mm,体积分数在 1%~5%之间,局部地区可见铁锰结核富集。

2) 测试方法。样品前处理与主、微量元素测定分别在廊坊市诚信地质服务有限公司和南京聚谱检测科技有限责任公司完成。主量元素采用 Agilent 5110 型 ICP-OES(电感耦合等离子体发射光谱仪)。

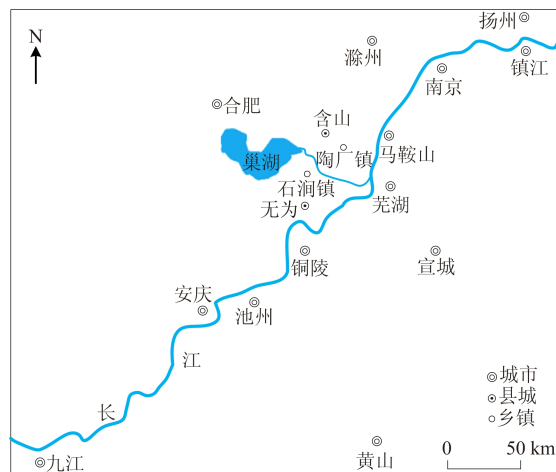


图 1 研究区位置、采样位置示意图

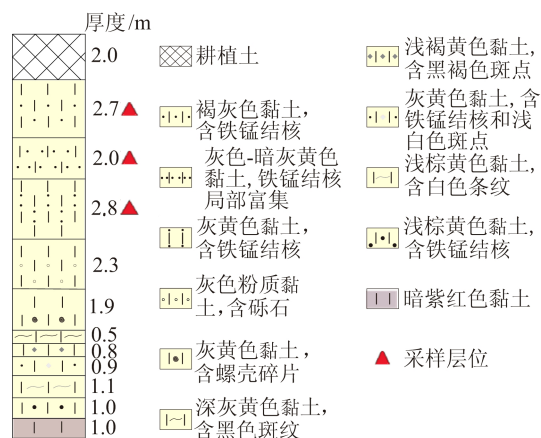
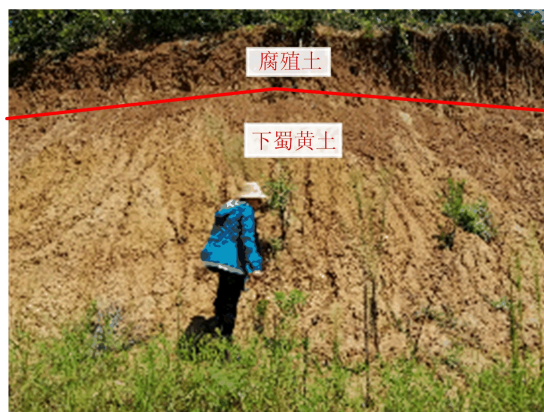
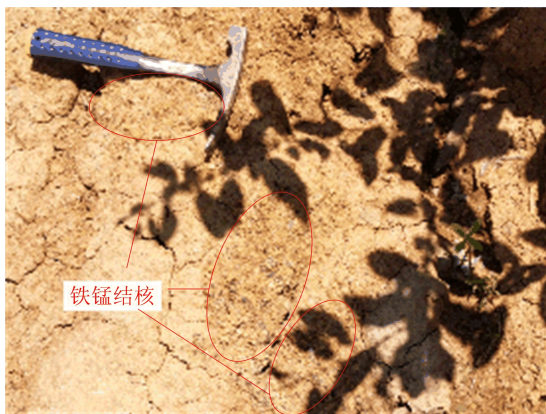


图 2 含山 ZK01130 钻孔下蜀组地层剖面图



(a) 下蜀黄土剖面照片



(b) 铁锰结核照片

图 3 含山一无为地区下蜀黄土野外照片

主要元素测试  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$  质量分数, 采用美国地质调查局安山岩标准物质 AGV-2 和玄武岩标准物质 BHVO-2 作质量监控, AGV-2 (安山岩) 与 BHVO-2 (玄武岩) 测试结果与推荐值基本一致, 测试结果相对误差小于 2%。

表 1 含山一无为地区下蜀黄土 7 个样品主量元素质量分数分析结果

项目	20AH-1003	20AH-1004	20AH-1005-3	20AH-1005-2	20AH-1005-1	20AH-4012	20AH-4014
$\text{SiO}_2$	73.34	66.36	67.16	71.74	69.10	68.20	76.79
$\text{TiO}_2$	0.90	0.87	0.89	0.90	0.84	0.89	0.85
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12.33	15.00	14.73	12.42	13.64	14.13	10.01
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4.45	5.77	5.86	5.07	5.54	5.57	3.93
$\text{MnO}$	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09
$\text{MgO}$	0.67	1.34	1.17	0.97	0.94	1.01	0.68
$\text{CaO}$	0.41	0.68	0.58	0.55	0.56	0.27	0.43
$\text{Na}_2\text{O}$	0.71	0.98	0.79	0.78	0.66	0.65	0.87
$\text{K}_2\text{O}$	1.60	2.08	1.95	1.71	1.79	2.04	1.76
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.04	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06	0.21
烧失量	5.21	6.65	6.51	5.38	6.38	6.51	4.11
总计	99.72	99.87	99.78	99.67	99.58	99.42	99.72

化学元素 Si 是最主要的造岩元素, 在地层中含量最多, 化学性质稳定, 易在湿热条件下富集; Al、Fe 化学性质接近且比较稳定, 不易发生迁移, 在干旱条件下含量相对减少。 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  3 种主要化学成分的平均质量分数之和达 88.7%, 有显著的富硅铝铁现象, 表明该地区晚更新世下蜀黄土沉积时有温暖湿润的气候特点<sup>[24]</sup>。

从图 4 可以看出, 含山一无为下蜀黄土  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  相对富集,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{MnO}$  质量分数略低于上地壳,  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  则相对亏损。

总体上, 各地区黄土的主量元素配分曲线较为相似; 北方黄土(西峰和东秦岭)与南方下蜀黄

微量元素测试方法如下: 称取 40 mg 黄土粉末置于  $-(\text{CF}_2-\text{CF}_2)_n-$  溶样弹中, 加入 0.5 mL  $\text{HNO}_3$  与 1.0 mL  $\text{HF}$ , 溶样弹经钢套密封后放入烘箱; 消解液被稀释后(相对于固体样品, 稀释因子为 2 000 倍), 以雾化形式送入 Agilent 7700x ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)测定微量元素, 固体质量分数大于  $10 \times 10^{-6}$  的微量元素, 偏离范围不超过  $\pm 10\%$ ; 固体质量分数大于  $50 \times 10^{-6}$  的微量元素, 偏离范围不超过  $\pm 5\%$ 。

## 2 主、微量元素及稀土元素分析结果

### 2.1 主量元素

含山一无为地区下蜀黄土 7 个样品的主量元素分析结果见表 1 所列。研究区及其他地区黄土主量元素上地壳<sup>[23]</sup>标准化模式图如图 4 所示。

由表 1 可知,  $w(\text{SiO}_2)$  为 66.36%~76.79%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 10.01%~15.00%,  $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 3.93%~5.86%。

土(含山一无为、合肥、镇江和九江)存在较明显的差别, 北方黄土中  $\text{MgO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和碱性元素(如  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$ )更加富集,  $\text{TiO}_2$  质量分数则低于南方下蜀黄土的平均质量分数。

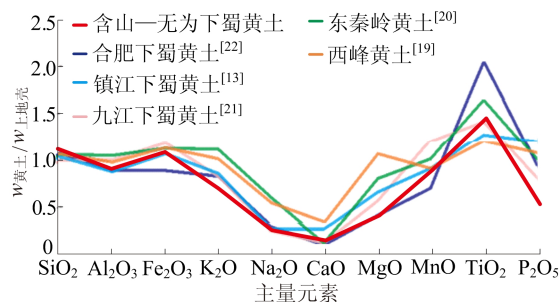


图 4 黄土主量元素上地壳标准化模式图

2.2 微量元素与稀土元素

含山—无为下蜀黄土的微量元素分析结果见

表 2 所列。研究区及其他地区黄土微量元素上地壳<sup>[23]</sup>标准化模式图如图 5 所示。

表 2 含山—无为地区下蜀黄土 7 个样品微量元素质量分数分析结果

10<sup>-6</sup>

微量元素	20AH-1003	20AH-1004	20AH-1005-3	20AH-1005-2	20AH-1005-1	20AH-4012	20AH-4014
Li	39.50	45.80	45.00	41.10	42.60	45.40	32.40
Be	2.04	2.87	2.42	2.15	2.42	2.34	1.87
Sc	10.80	15.50	13.60	12.50	13.20	13.50	11.50
Ti	5 367.00	5 171.00	5 155.00	5 266.00	5 116.00	5 345.00	5 004.00
V	87.90	108.00	104.00	92.60	104.00	107.00	82.70
Cr	74.90	135.00	88.20	90.00	92.80	99.50	72.80
Co	8.39	16.60	13.40	14.70	16.30	15.70	12.40
Ni	27.00	59.10	39.20	31.60	38.80	43.70	22.90
Ga	16.50	20.80	19.60	17.40	19.40	19.90	14.80
Rb	94.00	116.00	106.00	92.50	101.00	110.00	94.90
Sr	66.40	90.60	80.90	82.00	75.20	64.70	75.00
Y	27.40	40.40	32.20	32.90	33.20	35.00	31.70
Zr	359.00	292.00	308.00	375.00	332.00	320.00	428.00
Nb	18.50	17.60	17.70	18.30	17.60	18.40	18.10
Cs	7.26	8.98	8.68	7.14	8.63	8.49	5.42
Ba	375.00	522.00	500.00	428.00	450.00	499.00	370.00
La	34.00	45.00	40.70	40.70	40.90	43.70	41.30
Ce	79.40	85.20	81.50	89.60	88.40	91.40	86.60
Pr	7.81	10.10	9.36	9.36	9.34	10.20	9.43
Nd	29.60	39.20	36.20	36.00	36.10	39.70	36.70
Sm	5.48	7.53	6.79	6.65	6.75	7.51	6.66
Eu	1.00	1.54	1.33	1.29	1.33	1.46	1.25
Gd	4.63	6.99	5.81	5.79	5.94	6.51	5.63
Tb	0.76	1.11	0.93	0.93	0.96	1.02	0.91
Dy	4.59	6.55	5.46	5.47	5.73	5.98	5.36
Ho	0.97	1.36	1.12	1.14	1.17	1.22	1.12
Er	2.78	3.85	3.15	3.26	3.36	3.47	3.20
Tm	0.43	0.58	0.49	0.51	0.52	0.53	0.50
Yb	2.91	3.78	3.23	3.40	3.45	3.47	3.34
Lu	0.42	0.54	0.47	0.49	0.49	0.49	0.49
Hf	9.49	7.86	8.21	9.95	8.88	8.56	11.40
Ta	1.39	1.35	1.35	1.38	1.34	1.44	1.54
Pb	15.10	22.70	23.30	23.70	24.90	24.30	19.90
Th	14.90	15.80	15.50	15.10	15.80	16.60	14.90
U	3.45	3.52	3.38	3.59	3.68	3.75	3.79

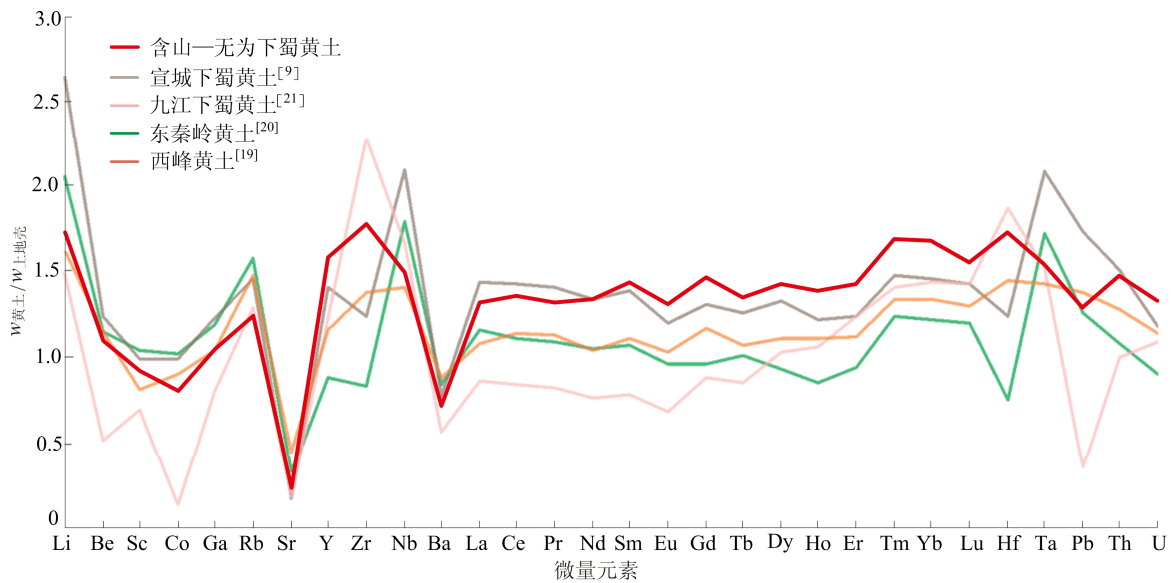
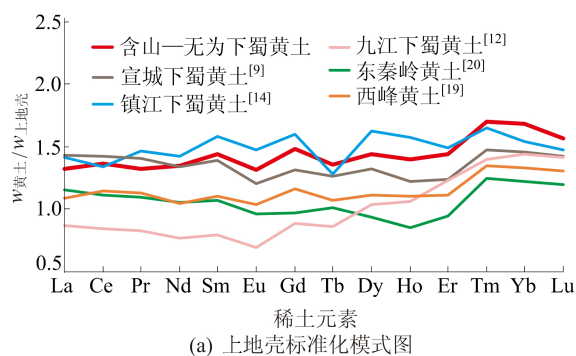


图 5 黄土微量元素上地壳标准化模式图

与上地壳相比,含山一无为下蜀黄土的 Sc、Co、Sr 和 Ba 呈现明显的亏损,其他微量元素质量分数则高于上地壳平均水平。含山一无为下蜀黄土的配分模式与西峰黄土最接近;宣城下蜀黄土和东秦岭黄土呈相似的配分模式,但宣城下蜀黄土的微量元素质量分数与东秦岭黄土相比更高;九江下蜀黄土的微量元素特征明显不同于其他地区黄土。含山一无为下蜀黄土相对于上地壳富集



Nb、Ta、Zr、Hf、Th、U 等高场强元素,亏损 Co、Sr、Ba 等大离子亲石元素。在无为盆地黄土中,Co 元素呈较显著的相对亏损,Zr、Hf 则呈相对富集,而在东秦岭黄土中这 3 种元素的配分与此相反。这种差异显示无为盆地黄土来自火成岩的碎屑供应量少,显著区别于东秦岭黄土的可能源岩。

研究区及其他地区黄土稀土元素图解如图 6 所示。

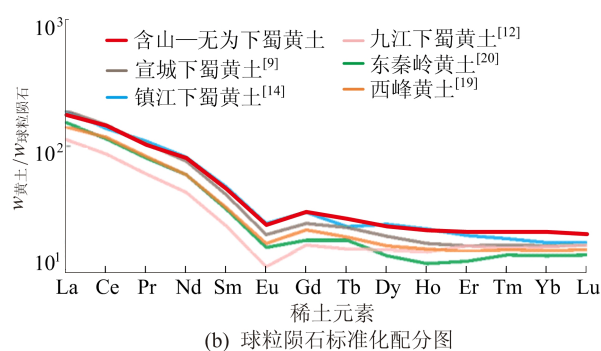


图 6 黄土稀土元素图解

图 6a 中,上地壳数据根据文献[25];图 6b 中,球粒陨石数据根据文献[25]。从图 6a 可以看出,含山一无为下蜀黄土、宣城下蜀黄土、镇江下蜀黄土和西峰黄土的稀土元素质量分数均高于上地壳,九江下蜀黄土的轻稀土元素和中稀土元素(medium rare earth elements, MREE)低于上地壳平均质量分数,东秦岭黄土的 Eu、Gd、Dy、Ho 和 Er 元素质量分数略低于上地壳。含山一无为下蜀黄土的稀土元素(rare earth elements, REE)总质量分数( $w_{\Sigma \text{REE}}$ )为 $(175 \sim 217) \times 10^{-6}$ ,LREE 总质量分数( $w_{\Sigma \text{LREE}}$ )为 $(157 \sim 194) \times 10^{-6}$ ,重稀土元素(heavy rare earth elements, HREE)总质量分数( $w_{\Sigma \text{HREE}}$ )为 $(17.5 \sim 24.7) \times 10^{-6}$ ,轻、重稀土元素质量分数比值( $w_{\Sigma \text{LREE}}/w_{\Sigma \text{HREE}}$ )为 7.62~9.00。

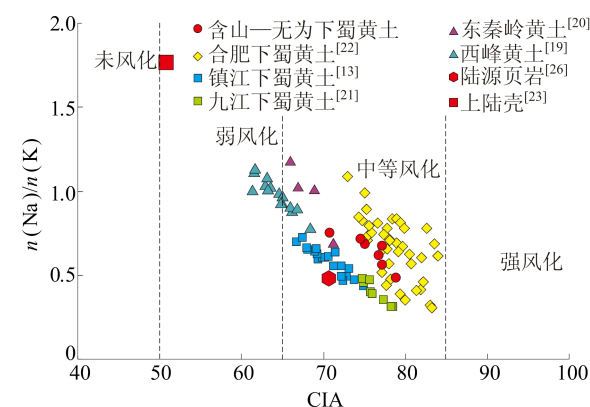
从图 6b 可以看出,含山一无为下蜀黄土呈 LREE 富集、HREE 亏损的右倾配分模式,其中 Eu 呈明显的负异常( $\delta \text{Eu}$  为 0.59~0.64)。本文样品的轻、重稀土元素分异明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 8.37~9.04,LREE 曲线明显较陡;HREE 曲线较为平缓, $(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}}$  为 1.36~1.64,说明 HREE 内部不存在较大的分异。

### 3 讨论

#### 3.1 化学风化强度

化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA)能够有效反映岩石化学风化强度,CIA 值越

高,说明沉积物受到的化学风化强度越强。本文及相关研究的 CIA- $n(\text{Na})/n(\text{K})$  散点图如图 7 所示。



含山一无为下蜀黄土的 CIA 值在 70.8~78.9 之间,平均为 75.8,为中等化学风化强度,远高于上地壳(50.7),显著高于西峰黄土(64.2)和东秦岭黄土(68.3),略高于陆源页岩(70.4)和镇江下蜀黄土(70.6),略低于九江下蜀黄土(76.3)和合肥下蜀黄土(80.0)。一般地,CIA 值在(50,65]之间,指示寒冷和干燥气候条件下的弱化学风化作用,(65,85]指示温暖和潮湿气候条件下的中等化学风化作用,(85,100]指示炎热和湿润气候条件下的强烈化学风化作用[27]。上地壳平均值反映的是几乎未风化条件,西峰黄土在寒冷、干燥的气候条件下处于化学风化早期,而含山一无

为下蜀黄土、东秦岭黄土、镇江下蜀黄土、九江下蜀黄土及合肥下蜀黄土已经处于中等化学风化作用。总体上,CIA 值随着纬度的增加而减小,这与我国北方干燥、南方湿润的气候现象基本一致。

Na<sub>2</sub>O 主要寄存于斜长石中,K<sub>2</sub>O 主要存在于钾长石、伊利石中,而斜长石较钾长石更易风化,因此  $n(\text{Na})/n(\text{K})$  比值是衡量长石风化程度的指标,该比值与 CIA 值成反比<sup>[28]</sup>。含山—无为下蜀黄土的  $n(\text{Na})/n(\text{K})$  比值在 0.48~0.75 之间,平均为 0.63,高于同样属于南方的九江下蜀黄土(0.48)、合肥下蜀黄土(0.53)和镇江下蜀黄土(0.59),低于以西峰黄土(0.97)和东秦岭黄土(0.97)为代表的北方黄土。

文献[29]通过 A-CN-K 三角图来研究大陆化学风化趋势,该图能反映化学风化过程中主要矿物组分的变化趋势。

本文及相关研究的化学风化趋势 A-CN-K 三角图如图 8 所示。由于陆源页岩是上地壳典型的化学风化产物,上地壳向陆源页岩延伸的方向是典型的大陆化学风化趋势。本研究中所收集的样品数据均未沿上地壳—陆源页岩的化学风化趋势线分布,其中北方黄土(东秦岭黄土和西峰黄土)相比于南方下蜀黄土更靠近陆源页岩,并且北方黄土的分布趋势与 A-CN 边界平行,表明斜长

石风化较早,Ca 和 Na 元素滤出速度较快,钾长石相对稳定。与北方黄土相比,南方下蜀黄土的分布趋势更接近 A-K 边界,说明长石等硅酸盐矿物经历了更强的风化作用,导致斜长石中 Ca 和 Na 元素严重浸出。

含山—无为下蜀黄土与其他地区沉积物主量元素比值、CIA 值统计分析的最小值、最大值、平均值及变异系数见表 3 所列,本文及相关研究的变异系数对比如图 9 所示。

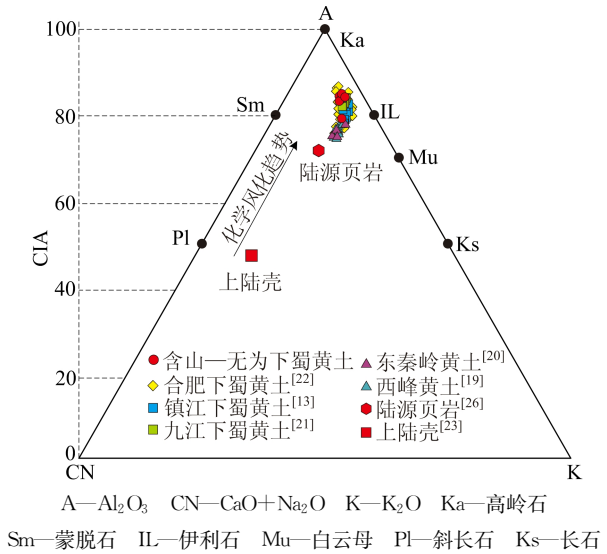


图 8 化学风化趋势 A-CN-K 三角图

表 3 含山—无为下蜀黄土与其他地区沉积物主量元素比值、CIA 值统计分析结果

样品位置	样品数	统计类别	CIA	$n(\text{Na})/n(\text{K})$	$n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$
含山—无为下蜀黄土	7	最小值	70.76	0.48	7.52
		最大值	78.90	0.75	13.05
		平均值	75.77	0.63	9.30
		变异系数	0.03	0.14	0.19
合肥下蜀黄土 <sup>[22]</sup>	42	最小值	68.70	0.21	5.51
		最大值	84.00	1.09	13.63
		平均值	78.69	0.66	9.22
		变异系数	0.03	0.27	0.21
九江下蜀黄土 <sup>[21]</sup>	10	最小值	74.50	0.31	6.93
		最大值	78.44	0.48	7.61
		平均值	76.27	0.40	7.31
		变异系数	0.02	0.16	0.03
镇江下蜀黄土 <sup>[13]</sup>	20	最小值	66.64	0.44	8.07
		最大值	74.91	0.73	9.77
		平均值	70.56	0.59	8.66
		变异系数	0.03	0.13	0.04
东秦岭黄土 <sup>[20]</sup>	23	最小值	66.00	0.69	7.03
		最大值	71.20	1.17	7.99
		平均值	68.25	0.97	7.45
		变异系数	0.03	0.18	0.05
西峰黄土 <sup>[19]</sup>	15	最小值	61.34	0.78	7.31
		最大值	68.35	1.12	8.58
		平均值	64.24	0.97	8.04
		变异系数	0.03	0.09	0.04
上地壳 <sup>[23]</sup>			50.73	1.77	7.35
陆源页岩 <sup>[26]</sup>			70.36	0.51	5.60

注: $n(\text{Na})/n(\text{K})$ 、 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为摩尔比值;变异系数为标准差与平均值的比值。

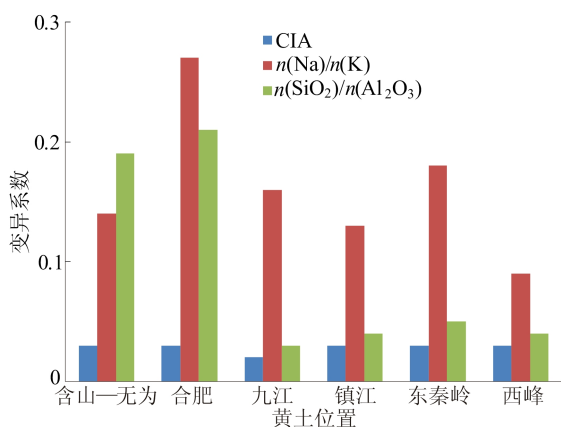


图 9 地球化学分析指标的变异系数对比

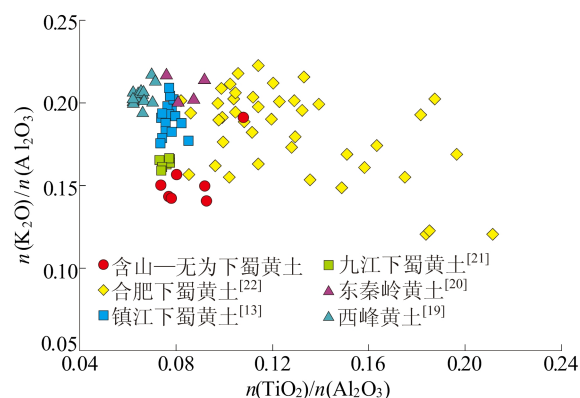
从区域位置角度看,含山—无为地区、合肥、镇江和九江地区都位于长江中下游,气候环境条件相当、与北方沙漠和黄土高原的距离相近,风尘沉积并经后期风化后,相关地球化学指标的变异系数也应相似,然而这些地区 CIA、 $n(\text{Na})/n(\text{K})$  和  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  的变异系数都各不相同。含山—无为下蜀黄土的 CIA 变异系数与合肥、镇江下蜀黄土及北方黄土相似,却与距离更近的九江地区有较大差异;其  $n(\text{Na})/n(\text{K})$  变异系数也表现出与镇江下蜀黄土的高度相似性,远小于合肥下蜀黄土;其  $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  变异系数与同属安徽省内的合肥类似。

### 3.2 物源

在不同沉积物的物源识别中,可以采用主量元素的摩尔比值进行物源示踪。Ti 含量在不同类型的岩石中会有较大变化;Al 主要赋存于铝硅酸盐矿物中,含量较为固定;K 主要赋存于钾长石和白云母中,在岩石中的含量变化较为明显。 $n(\text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  比值在不同类型的岩石中变化较大,在页岩和泥岩等沉积岩中,该比值较高,而在火成岩中该比值较低<sup>[21]</sup>。本文及相关研究的  $n(\text{TiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  与  $n(\text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  散点图如图 10 所示。

合肥下蜀黄土的  $n(\text{TiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  和  $n(\text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  比值分布范围最广,且  $n(\text{TiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  比值明显高于其他地区;镇江、九江、含山—无为下蜀黄土和北方黄土的  $n(\text{TiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  比值较为接近,但是它们的  $n(\text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  比值相差较大。北方黄土的  $n(\text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  比值高于南方下蜀黄土,这可能是由于南方气候温暖湿润,钾长石受后期化学风化作用的影响较严重,沉积物中 K 含量减少所致。总体上,西北黄土和南方下蜀黄土的分布范

围较为接近,表明它们有相似的母质成分,只是沉积后经历了不同的化学风化过程,这种特征指示南方下蜀黄土物源可能来源于西北黄土。

图 10  $n(\text{TiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  与  $n(\text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$  散点图

本文及相关研究的黄土微量元素图解如图 11 所示。稀土元素被广泛应用于各种沉积物的物源表征, $w_{\Sigma\text{LREE}}/w_{\Sigma\text{HREE}}$  和  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  反映了 LREE 和 HREE 的分异。

由图 11a 可知:含山—无为下蜀黄土和镇江下蜀黄土的  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  变化范围较小,比值较低;但含山—无为下蜀黄土  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  明显低于镇江下蜀黄土,而与西峰黄土和宣城下蜀黄土相近。

从图 11b 可以看出:含山—无为下蜀黄土  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值明显低于东秦岭黄土、镇江下蜀黄土和宣城下蜀黄土,高于九江下蜀黄土,与西峰黄土最接近;其  $\delta\text{Eu}$  也表现出与西峰黄土的相对一致性。

上述 REE 特征的差异可能反映了沉积原岩的变化,虽然 REE 通常是相对稳定的元素,但是有证据表明,岩石中 HREE 比 LREE 的变化程度更大,强烈的风化作用会导致  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  降低,而  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  增加<sup>[9]</sup>。

来源于北方沙漠的黄土在经历沉积后的风化作用时,其 REE 组分会发生严重改变,镇江下蜀黄土的物源被认为来自北方沙漠,基本符合此特征;含山—无为下蜀黄土在此特征上表现不是特别明显,是否来源于北方沙漠有待商榷;九江下蜀黄土与此相反,说明物源与北方沙漠关系不大。

La、Co、Sc 元素和 Nb、Th、Zr、Hf 等高场强元素化学性质稳定,表生作用下为惰性组分,不易迁移,被认为最适合用作物源示踪的元素<sup>[30]</sup>。这些元素在经过风化、搬运及并入碎屑沉积岩的过

程中,蚀变程度较小,具有母质特征。从图 11c、图 11d 可以看出:含山—无为下蜀黄土与西峰黄土具有近似一致的  $w(\text{Hf})/w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Zr})/w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Th})/w(\text{Nb})$  和  $w(\text{La})/w(\text{Nb})$

比值,表明其黄土沉积物中具有相似的微量元素组成;宣城下蜀黄土和东秦岭黄土的上述微量元素比值明显偏低;九江下蜀黄土上述微量元素比值的变化范围较大,显著区别于其他地区黄土。

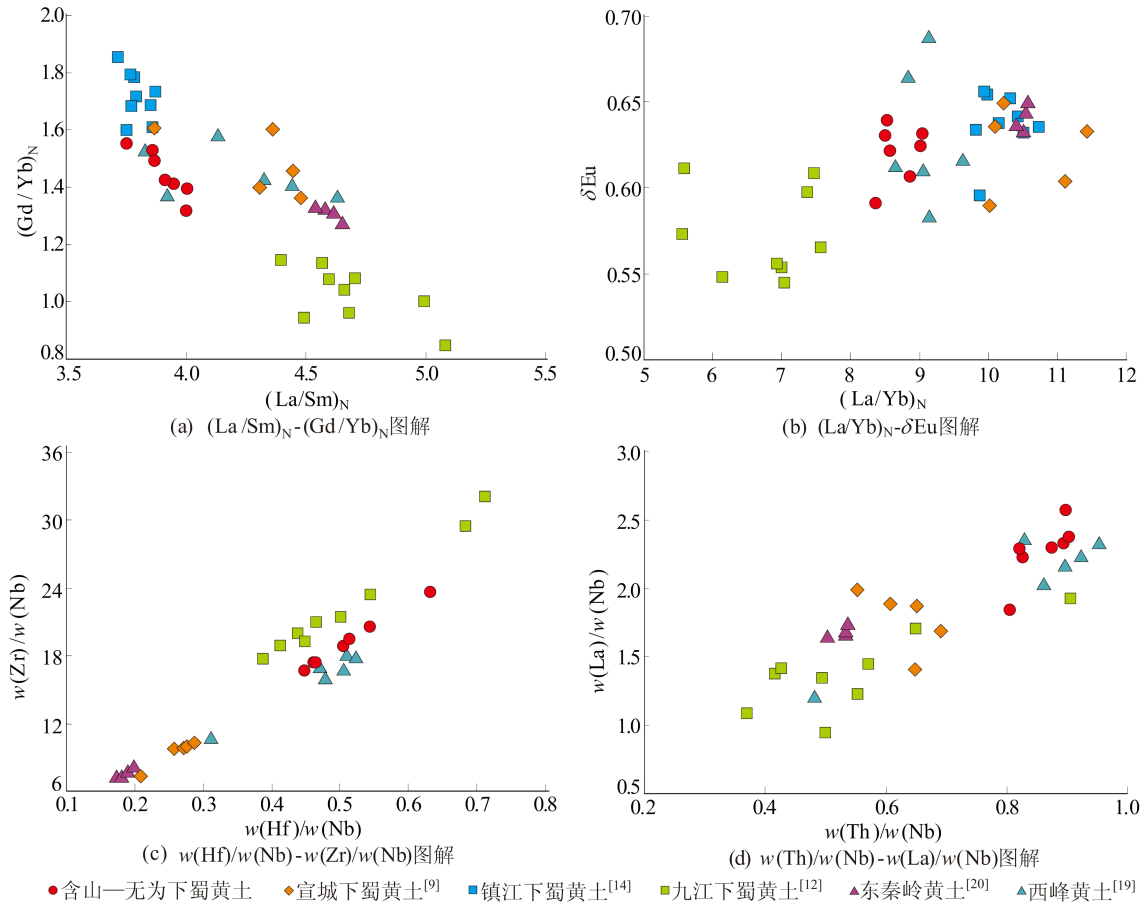


图 11 黄土微量元素图解

综上所述,含山—无为下蜀黄土表现出与西峰黄土的高度近似性,说明黄土高原黄土可能是其最主要的潜在物源,而被认为物源来自长江河漫滩的九江下蜀黄土与含山—无为下蜀黄土差异明显,暗示长江河漫滩沉积物不是含山—无为下蜀黄土的主要物源。

#### 4 结 论

1) 含山—无为下蜀黄土经历了中等化学风化作用, CIA 值高于北方西峰黄土和东秦岭黄土,与南方其他地区下蜀黄土相近,表明南方下蜀黄土沉积时处于温暖潮湿的气候条件。

2) 含山—无为下蜀黄土的地球化学特征表现出与西峰黄土的高度相似性,说明本研究中的含山—无为下蜀黄土最主要的物源可能来自北方黄土高原。

#### [参 考 文 献]

[1] 刘东生,张宗祜. 中国的黄土[J]. 地质学报, 1962, 42(1): 1-18.

[2] 李福春,潘根兴,谢昌仁,等. 南京下蜀黄土古土壤剖面的不同粒组稀土元素地球化学分布[J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 477-478.

[3] 吴鹏,谢远云,康春国,等. 哈尔滨荒山黄土的成因: 粒度、地球化学、磁化率、沉积和地貌特征的整合记录[J]. 地球学报, 2020, 41(3): 420-430.

[4] HELLER F, LIU T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China[J]. Nature, 1982, 300: 431-433.

[5] MAHER B A. Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 154: 23-84.

[6] 郑乐平,胡雪峰,方小敏. 长江中下游地区下蜀黄土成因研究的回顾[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(1): 54-57.

(下转第 1579 页)

- [5] ZHOU Z H, LIU X Y. Training cost-sensitive neural networks with methods addressing the class imbalance problem [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2006, 18(1): 63-77.
- [6] BAHNSEN A C, AOUADA D, OTTERSTEN B. Ensemble of example-dependent cost-sensitive decision trees [J]. *Expert Systems with Application*, 2015, 42(19): 6609-6619.
- [7] ZELENKOV Y. Example-dependent cost-sensitive adaptive boosting [J]. *Expert Systems with Application*, 2019, 135: 71-82.
- [8] DAVIS J, GOADRICH M. The relationship between precision-recall and ROC curves [C]//ICML'06: Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning. New York: Association for Computing Machinery, 2006: 233-240.
- [9] TING K M. An instance-weighting method to induce cost-sensitive trees [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2002, 14(3): 659-665.
- [10] LIU X Y, WU J, ZHOU Z H. Exploratory under-sampling for class-imbalance learning [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2009, 39(2): 539-550.

(责任编辑 朱晓临)

## (上接第 1531 页)

- [7] 陈玉美,舒张,张茂恒,等. 南京下蜀黄土记录的 250~150 ka 期间的环境演化信息 [J]. *地质科技情报*, 2014, 33(6): 55-59.
- [8] 任翌成,李徐生,韩志勇,等. 基于地磁场相对古强度变化的下蜀黄土年代序列及其古气候意义 [J]. *地球物理学报*, 2020, 63(5): 2024-2035.
- [9] HAO Q Z, GUO Z T, QIAO Y S, et al. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 3317-3326.
- [10] 孟宝航,郑坤,银雪琴. 我国南方下蜀黄土的一些研究进展 [J]. *地质论评*, 2015, 61(增刊 1): 33-35.
- [11] 管后春,李运怀,刘道彬,等. 合肥盆地地下蜀黄土年龄及物源探讨 [J]. *中国地质*, 2015, 42(2): 664-675.
- [12] 凌超豪,张智,贾玉连,等. 元素地球化学揭示的长江中游鄱阳湖地区中更新世以来粉尘堆积的物源特征及其环境意义 [J]. *第四纪研究*, 2019, 39(5): 1103-1115.
- [13] 李徐生,韩志勇,杨守业,等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征 [J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1174-1184.
- [14] 李徐生,韩志勇,杨达源,等. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 1-7.
- [15] 杨守业,李从先,李徐生,等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究 [J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 402-406.
- [16] 安徽省地质调查院. 1:5 万无为幅区域地质调查报告 [R]. 合肥:安徽省地质调查院, 2013.
- [17] 安徽省地质矿产局区域地质调查队. 安徽省地层志: 第四系分册 [M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 1988: 36-42.
- [18] 安徽省地质调查院. 1:25 万合肥幅区域地质调查报告 [R]. 合肥:安徽省地质调查院, 2007.
- [19] LIANG M Y, GUO Z T, KAHMANN A J, et al. Geochemical characteristics of the Miocene eolian deposits in China: their provenance and climate implications [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2009, 10(4): Q04004.
- [20] 李楠,郝青振,张绪教,等. 东秦岭黄土物源的常量元素和微量元素地球化学证据 [J]. *第四纪研究*, 2016, 36(2): 332-346.
- [21] 曾方明. 九江下蜀黄土和红土的化学风化特征 [J]. *盐湖研究*, 2018, 26(1): 36-42.
- [22] 宋为娟. 合肥下蜀组的年代学研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2014.
- [23] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the continental crust [M]//HOLLAND H D, TUREKIAN K K. *Treatise on Geochemistry*, Vol 3. [S. l.]: Elsevier Ltd., 2003: 1-64.
- [24] 路硕,尹功明,宋为娟,等. 合肥下蜀土地球化学特征及其古气候意义 [J]. *地质力学学报*, 2019, 25(3): 132-143.
- [25] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [26] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. London: Blackwell, 1985: 78-84.
- [27] 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.
- [28] 陈旻,陈骏,刘连文. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征 [J]. *地质力学学报*, 2001, 7(2): 73-81.
- [29] 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.
- [30] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.

(责任编辑 张淑艳)