



0.44 Ma以来南方风尘加积型红土物源分析：重矿物和碎屑锆石年代学证据

张晓, 朱丽东, 李凤全, 马桢桢, 熊文婷, 贾佳, 王琳怡

引用本文:

张晓, 朱丽东, 李凤全, 马桢桢, 熊文婷, 贾佳, 王琳怡. 0.44 Ma以来南方风尘加积型红土物源分析：重矿物和碎屑锆石年代学证据[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 494–507.

ZHANG Xiao, ZHU LiDong, LI FengQuan, MA ZhenZhen, XIONG WenTing, JIA Jia, WANG LinYi. Provenance Analysis of Eolian Red Earth Aggradation in Southern China since 0.44 Ma: Heavy minerals and detrital zircon geochronology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 494–507.

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)

[台湾始新统一中新统沉积物源与沉积环境](#)

Eocene–Miocene Sediment Source and Environmental Study of Taiwan

沉积学报. 2020, 38(2): 319–330 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.037>

[皖南志留系唐家坞组物源分析:来自碎屑锆石年代学和岩石地球化学的制约](#)

Provenance Analysis for the Clastic Rocks in Tangjiawu Formation, South Anhui: Constraints from Detrital Zircon Ages and Geochemistry Characteristics

沉积学报. 2018, 36(1): 42–56 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0550.2018.007>

[唐王陵昭陵组砾岩碎屑锆石U–Pb年代学分析](#)

Detrital Zircon U–Pb Geochronology from Zhaoling Formation in Tangwangling

沉积学报. 2016, 34(3): 497–505 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.03.007>

[台湾山溪性小河流碎屑重矿物组成及其示踪意义](#)

Detrital Heavy Mineral Assemblages in the River Sediments from Taiwan and Its Implications for Sediment Provenance

沉积学报. 2016, 34(3): 531–542 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.03.011>

[伊犁盆地南缘中—下侏罗统物源分析及其对南天山造山带演化的启示](#)

Provenance Analysis of the Middle–Lower Jurassic Clastic Rocks in the Southern Margin of the Yili Basin and Their Insight into the Evolution of Southern Tianshan Orogenic Belt

沉积学报. 2018, 36(3): 446–455 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.115>

0.44 Ma 以来南方风尘加积型红土物源分析:重矿物和碎屑锆石年代学证据

张晓,朱丽东,李凤全,马桢桢,熊文婷,贾佳,王琳怡

浙江师范大学地理与环境科学学院,浙江金华 321004

摘要 中亚热带地区的风尘加积型红土是中国南方第四纪环境研究的重要陆相沉积载体。许多典型剖面自0.4 Ma以来红化和网纹化程度明显减弱,气候趋于干凉,物源尚有近源、远源、远近混合源等说法。以九江地区JL剖面为研究对象,基于重矿物组成及碎屑锆石U-Pb年代学证据,重点探讨该沉积剖面第⑥~⑧层加积型红土(底界年龄0.44 Ma)物源问题,初步得出以下结论:1)JL剖面第⑥~⑧层属黄棕色土沉积,黄棕色土、网纹黄棕色土两类样品共鉴定出19种重矿物。22个样品均以不透明矿物为主,含量>50%;其次是锆石、金红石、锐钛矿、电气石、绿帘石、辉石等常见矿物。2)黄棕色土和网纹黄棕色土的极稳定、稳定矿物含量以及矿物成熟度ZTR和石榴子石指数GZi值分别为52.49%和52.88%,32.22%和41.49%,47.53和72.73,0.10和0.06,与可能的远程物源北方黄土(17.77%、19.21%、8.42、0.47)存在明显差异,而与长江沿岸风成砂样品(55.93%、20.15%、43.65、0.02)相似性更大。两类样品物源指数PI、与长江沉积物的相似度指数 $\cos\theta$ 值分别为0.73和0.70、0.76和0.74,均支持长江源的结论。3)典型样品年龄峰多且分布范围广,70~130 Ma、200~300 Ma、390~570 Ma、680~870 Ma、870~3 013 Ma等年龄峰与长江沉积物相应年龄峰吻合度高,而<65 Ma、150~200 Ma年龄段锆石多出现在黄棕色土样品中,且可能与秦岭造山带的贡献有关,但贡献不显著。JL剖面0.44 Ma以来加积型红土近源物质贡献为主,粉尘主要源自长江谷地裸露的河漫滩。4)与JL剖面粉砂粒级稳定元素地球化学物源示踪结果混合源并不完全一致,可能意味加积型红土的物源有粒级效应。重矿物及碎屑锆石年龄更好地示踪了>20 μm 组分的物质来源及贡献,不排除北方物源贡献的可能性,其贡献量可能富集于4~20 μm 组分。

关键词 晚中更新世;加积型红土;重矿物;锆石U-Pb年龄;物源

第一作者简介 张晓,女,1995年出生,硕士研究生,第四纪环境演变,E-mail: xiao_zjnu@163.com

通信作者 朱丽东,女,教授,E-mail: zhulidong@zjnu.cn

中图分类号 P534.63 **文献标志码** A

0 引言

中亚热带加积型红土主要分布于长江以南 $28^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 之间的丘陵岗地、河流高阶地及沉积盆地边缘的坡麓地区,其母质均一,富含风尘粒级;REE、Sm-Nd同位素、石英砂粒度分布及石英颗粒表面形态等证据^[1-3]均证实其风成特性,且具有边沉积边风化的加积特性^[4],是中低纬度地区开展第四纪环境变化研究的良好沉积载体。加积型红土自下而上划分为网纹红土、均质红土、黄棕色土等沉积单元,年代学及典型剖面环境记录研究一致表明,网纹红土形成始于早更新世,中更新世最发育,测年结果主要集中于0.85~0.4 Ma,对应亚洲夏季风异常强盛时期^[5-7],化学风化强烈^[8],被视为南方中更新世标准地层^[9];而

0.4 Ma以来气候逐渐趋向干凉,网纹化过程变弱并渐渐停滞,红化程度也明显降低,上覆黄棕色沉积,可对应北亚热带下蜀组^[9]。早期一些研究认为,南方加积型红土,特别是剖面上段的黄棕色土在物质组成上与北方黄土相似,它们之间存在物质继承关系^[10-11],是北方粉尘南侵的结果^[12]。近年来,一些研究表明下蜀黄土由近源粉尘堆积而成^[13-14],长江沿岸和鄱阳湖周边砂质—粉尘沉积的物源也有类似的结论,长江、赣江、鄱阳湖区裸露的河湖沉积物提供了大量粉尘^[15-16]。还有一些学者持近、远源多源区物质高度混合搬运堆积的观点^[3,17-18]。可见,南方风尘堆积的物源方面尚有争议,加积型红土物源问题的研究对理解该地区0.4 Ma以来风尘沉积分布格局及古气候演化具有重要意义。

收稿日期:2020-07-29;收修改稿日期:2020-10-13

基金项目:国家自然科学基金(41572345,41971111)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41572345, 41971111]

重矿物具有耐磨蚀,易保存等特点,很大程度上因保留了母岩信号而被用于物源示踪研究。如台湾山溪性河流及福建境内闽江、九龙江等中小型河流沉积物的重矿物组合主要受控于流域基岩性质^[19-20];利用重矿物示踪的方法,分辨出长江上游支流比长江中下游支流对长江干流物源输入的贡献更大^[21-22];泰国湾西部表层沉积物重矿物组合揭示出陆源和自生源特征^[23];张青松等^[24]采用重矿物与元素示踪相结合的方法,揭示出腾格里地区白碱湖钻孔 1.8 Ma、1.2~0.6 Ma 时段沉积物中来自青藏高原东北缘的碎屑物质明显增加,响应了青藏高原第四纪期间的阶段性隆升。近年来,碎屑锆石 U-Pb 定年技术也成为沉积物源区示踪研究的有力工具^[25-27]。南方红土化学风化强烈,粒度组成、稳定元素及比值、REE 等物源示踪方法都无法避免风化对物源判别的影响,且风化信号主要富集于细粒组分中。黄颖等^[28]尝试利用九江地区 JL 加积型红土剖面粉砂粒级组分的稳定元素开展物源研究,以削弱细粒级组中风化信息对物源判别的干扰。其示踪结果认为,黄棕色沉积的物源比网纹红土复杂,除了近源物质外,远程物源也有一定贡献,而且随气候渐趋变干凉的过程远程物源的贡献增加。重矿物主要富集在 $>20\ \mu\text{m}$ 粒级,碎屑锆石 U-Pb 定年所选择的锆石颗粒也通常 $>20\ \mu\text{m}$,因此,本文在前期工作的基础上,采用重矿物与锆石 U-Pb 年代学相结合的方法,进一步探讨 JL 剖面加积型红土的物源问题,为其物源研究提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 研究剖面

研究剖面(JL)位于江西省九江市庐山北麓(图 1a),距九江市市区约 5 km,地理坐标 $29^{\circ}42'02''\ \text{N}$, $116^{\circ}01'42''\ \text{E}$,厚度 18.46 m,未见底。剖面通体质地均一,以粉砂($4\sim 63\ \mu\text{m}$)为主,含量达 70% 左右,砂($>63\ \mu\text{m}$)含量极低,不足 2%,未见流水作用痕迹。根据沉积物颜色、沉积结构、土壤学性质、网纹形态等特性,自下而上划分为 8 个地层单元(图 1b)。中下部第①~⑤层(18.46~4.46 m)为网纹红土,层内网纹形态、结构、基质色等存在一定差异;上部第⑥~⑧层(4.46~0 m)为黄棕色土沉积,第⑥和第⑧层为黄土状沉积,第⑦层为浅红色古土壤,含铁锰胶膜。

⑥、⑦两层(4.46~1.20 m)发育浅灰色弱网纹,可视为网纹黄棕色土。第⑥层(4.46~3.16 m)整体呈亮黄棕(10YR 6/6、10YR 6/8)至浊黄橙(10YR 7/4),裂隙发育且被黑色胶膜填充。第⑦层(1.20~3.16 m)呈亮黄棕(10YR 6/8、10YR 7/6)至橙(7.5YR 6/6、7.5YR 6/8),3.08~3.16 m 处富集黑褐色球状铁锰结核,粒径多在 0.5~1.5 mm;第⑧层(0~1.20 m)为黄棕色土,呈亮黄棕(10YR 6/6、10YR 6/8)至浊黄橙(10YR 7/4),质地均一,不含网纹,土质较疏松,见现代植物根系。朱丽东^[4]早年对 JL 剖面进行了 ESR 测年工作,测年材料为石英粉晶, E' 心寿命试验、U、Th、 K_2O 含量及年剂量率(AD/Gy)均符合 ESR 测年要求,第⑥~⑧层共获得 4 个有效年龄(图 1b),第⑥层底界年龄为 0.44 Ma,

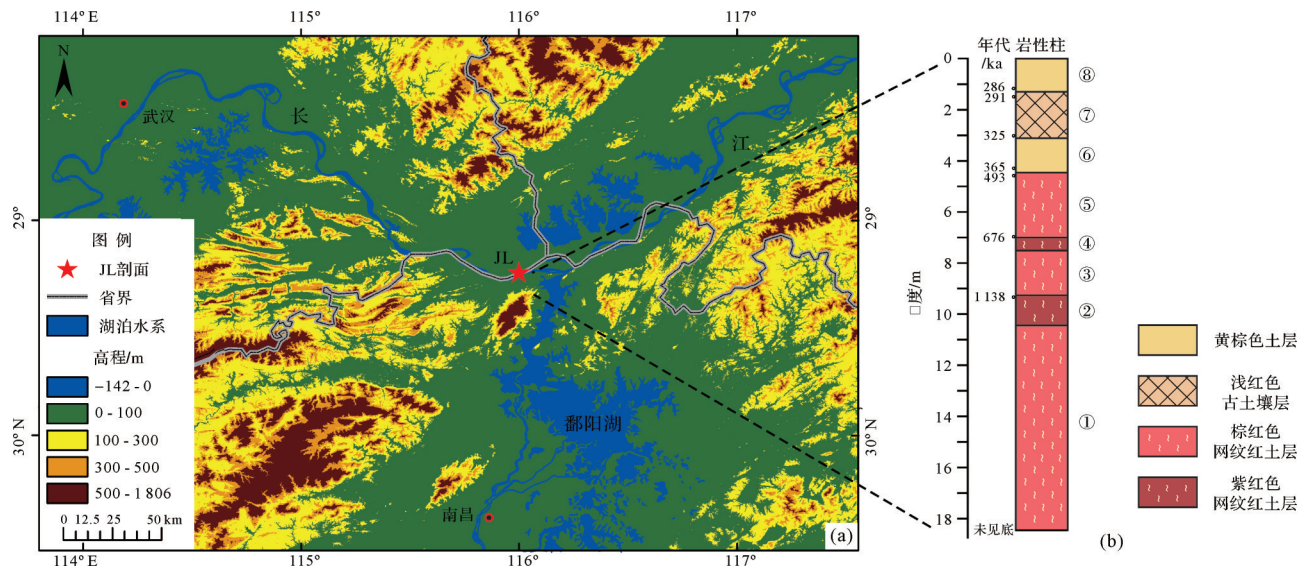


图 1 JL 红土剖面地理位置、地层单元及 ESR 测年结果

Fig.1 Location, lithostratigraphy and ESR dating results of JL red earth section

表1 中国南方风尘堆积无网纹或弱网纹层底界年代

Table 1 Age of bottom boundary of non-reticulated or weakly reticulated eolian deposits in South China

剖面	无网纹或弱网纹层底界年龄/ka	测年方法	参考文献
安徽宣城	400	ESR	[5,29-30]
江西九江南湖村	393	ESR,OSL	[31]
江西九江长虹大道	392	古地磁,TL	[6]
南京老虎山	400	古地磁,TL	[32]

之后网纹明显减弱乃至停滞。与安徽宣城、九江南湖村、九江长虹大道、南京老虎山等剖面网纹减弱或停滞的时间大致相似(表1)。因此, JL剖面网纹黄棕色土和黄棕色土形成于0.44 Ma B.P. 以来。

1.2 实验方法

在JL剖面0~4.46 m第⑥~⑧层段内以20 cm间隔选取22个样品进行重矿物鉴定,并对碎屑锆石U-Pb定年均由河北廊坊诚信地质服务公司完成。实验方法如下:先将样品烘干称重,用铝制圆形流浪盘进行粗淘,并用三溴甲烷进行轻重矿物分离,分离出来的重矿物部分用乙醇反复冲洗,将冲洗后的重矿物部分放入恒温烘箱烘干备用;之后将分离出来的重矿物部分放在双目镜下采用条带法随机选取10个视域进行矿物鉴定,并取其平均值来减小分析误差。每个重矿物样品鉴定颗粒数不低于600粒,然后计算出每种矿物所占百分含量。

锆石U-Pb同位素定年和微量元素测试采用LA-ICP-MS分析完成。激光剥蚀使用New Wave UP-213激光烧蚀进样系统,质谱仪为Agilent 7900型四极杆等离子体质谱仪。激光光束直径为25 μm ,激光能量密度10 J/cm^2 ,剥蚀频率10 Hz。使用标准锆石91500作为外标进行同位素比值校正,标准锆石Plesovice(337 Ma)为监控盲样。采用Glitter4.0软件进行同位素比值及元素含量的计算,普通铅的校正采用了Andersen^[33]给出的方法。实验得出的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)均在 1σ 水平。年龄计算及谐和图利用Isoplot4.0处理,并作图。对于 $\geq 1\ 000$ Ma样品,由于含大量放射性成因的Pb,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值;对于 $< 1\ 000$ Ma样品,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄值。

2 重矿物特征

2.1 重矿物类型及含量

JL剖面0.44 Ma以来22个样品共鉴定出19种重矿物,包括锆石、白钛石、金红石、锐钛矿、电气石、

钛铁矿、赤褐铁矿、绿帘石、榍石、黄铁矿、石榴子石、磁铁矿、辉石、角闪石、独居石、磷灰石、透闪石、磷钇矿、海绿石,其中磷灰石、透闪石、磷钇矿、海绿石只出现个别样品中且含量低,文中将不做分析。

将22个样品的重矿物含量按黄棕色土(YB)和网纹黄棕色土(YBV)两类样品进行统计,结果如表2所示。两类样品均以白钛石、赤褐铁矿、钛铁矿、黄铁矿和磁铁矿等不透明矿物占主导,含量均值分别为57.35%、60.31%,其次是锆石、金红石、锐钛矿、电气石、绿帘石、辉石等,属常见重矿物类型,平均含量介于1%~20%;两类样品的锆石和绿帘石含量存在比较明显的差异,网纹黄棕色土样品的锆石含量(16.49%)明显高于黄棕色土(9.15%),相反,黄棕色土样品的绿帘石含量(12.68%)明显高于网纹黄棕色土(2.77%)。鉴于前人提供了长江沿岸砂质沉积的风成证据以及与现代长江河谷漫滩沉积物物源一致的证据^[35-36],本文以北方黄土^[34]和采自湖口附近红光沙场(HGSC)的长江沿岸风成砂样品为潜在的远、近程物源分析对比样,通过对比发现JL剖面黄棕色土和网纹黄棕色土两类样品的不透明矿物含量明显高于北方黄土(27.76%)和长江沿岸风成砂(35.50%),电气石含量也较北方黄土和长江沿岸风成砂样品偏高;绿帘石含量则明显低于北方黄土(28.70%)和长江沿岸风成砂(22.41%)。其他矿物类型的比较来看,锆石、金红石、锐钛矿、石榴子石和辉石的相对含量与湖口红光沙场风成砂样品较为相似,除石榴子石外含量均明显高于北方黄土;榍石、角闪石、独居石等少见矿物的含量与北方黄土及湖口红光沙场风成砂样品相比也有一定偏差,特别是角闪石含量明显低于北方黄土。

根据重矿物易风化程度或稳定性,重矿物可划分为极稳定、稳定、较不稳定、不稳定四个等级^[37]。按重矿物稳定性做三角图得到图2,黄棕色土和网纹黄棕色土两类样品均属稳定型。其中,极稳定矿物含量最高,分别为52.49%和52.88%;稳定矿物含量次之,分别为32.22%和41.49%;较稳定矿物分别为

表2 0.44 Ma以来加积型红土重矿物类型及相对含量(%)

Table 2 Content of heavy minerals in red earth aggradation since 0.44 Ma (%)

样品类型	不透明矿物	锆石	金红石	锐钛矿	电气石	绿帘石	榍石	石榴子石	辉石	角闪石	独居石
YB	57.35	9.15	5.62	6.09	5.47	12.68	0.41	0.83	1.63	0.54	0.24
YBV	60.31	16.49	6.11	5.52	5.21	2.77	0.20	0.65	1.55	0.83	0.35
北方黄土 ^[34]	27.76	3.03	0.54	0.28	2.50	28.70	0.18	2.67	0.35	33.97	0
HGSC	35.50	22.03	3.39	12.24	2.73	22.41	0	0.47	1.13	0.09	0

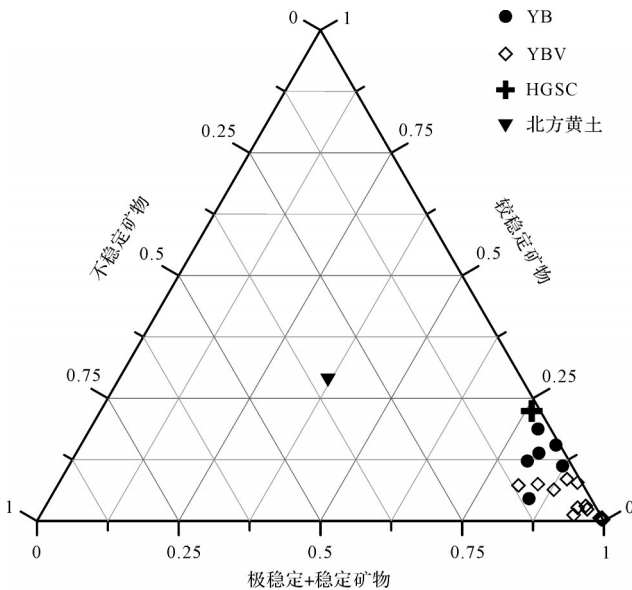


图2 0.44 Ma以来加积型红土重矿物稳定性三角图
Fig.2 Ternary diagram of stability of heavy minerals in red earth aggradation since 0.44 Ma

12.92%和3.12%;不稳定矿物最少,含量仅为2.37%和2.51%。与潜在端元样品相比,与长江沿岸风成砂样品更相似。

2.2 重矿物组合及特征指数

重矿物组合能有效反映物源区或者母岩类型^[38]。将JL剖面第⑥~⑧层(0.44 Ma以来)黄棕色沉积的22个样品的重矿物相对含量进行排序,以排序前四位的重矿物类型作为该样品的重矿物组合,其结果表明,黄棕色土样品的重矿物组合呈现“钛铁矿—赤褐铁矿—绿帘石+α”组合,网纹黄棕色土样品的重矿物组合呈现“钛铁矿—赤褐铁矿—锆石+β”组合,α代表锆石、金红石、锐钛矿、磁铁矿、电气石;β代表白钛石、锐钛矿、金红石、电气石、磁铁矿。就平均状况而言,黄棕色土重矿物组合体现为“钛铁矿—赤褐铁矿—绿帘石—锆石”组合(平均含量依次26.56%、22.02%、12.68%、9.15%),网纹黄棕色土重矿物组合表现为“钛铁矿—锆石—赤褐铁矿—金红石”组合(平均含量依次37.21%、16.49%、14.18%、6.11%)。

从第⑥层至第⑧层,钛铁矿、锆石含量趋于减少,赤褐铁矿、绿帘石则趋于增加。可见,两类样品重矿物组合的主导重矿物类型存在相似性,但细节上仍有一定差异。

北方黄土和湖口红光沙场风成砂样品的重矿物组合分别为“角闪石—绿帘石—磁铁矿—赤褐铁矿”组合(含量依次33.97%、28.70%、14.72%、11.41%)和“绿帘石—锆石—钛铁矿—锐钛矿/白钛石”组合(含量依次22.41%、22.03%、19.68%、12.24%)。比较而言,北方黄土含有较多的角闪石、绿帘石、赤褐铁矿和磁铁矿^[39],来自长江沉积物的风成砂样品含有较多的绿帘石、锆石、钛铁矿、锐钛矿和白钛石,JL剖面黄棕色土和网纹黄棕色土重矿物组合与长江沿岸风成砂样品更为相似。

ZTR和GZi等稳定重矿物比值通常能更好地反映沉积物物源特征^[20,40]。ZTR指数是指透明矿物中锆石、金红石、电气石含量(ZTR指数=锆石%+电气石%+金红石%),值越大表明极稳定矿物锆石、金红石和电气石的含量越高,从而指示矿物成熟度。GZi指数=石榴子石%/(石榴子石%+锆石%),对含有石榴子石的母岩(变质岩)岩性具有指示作用。从JL剖面黄棕色土和网纹黄棕色土样品的ZTR、GZi指数计算结果来看(表3),虽然两类样品间仍有一定差异,ZTR指数前者偏低,而GZi指数前者偏高,但两者均与北方黄土差异显著,而与长江沿岸风成砂样品更为相似。

表3 黄棕色土、网纹黄棕色土、长江风成砂、北方黄土重矿物特征指数对比

Table 3 Comparison of heavy mineral characteristic indices for yellowish brown soil, reticular yellowish brown soil, eolian sand of Yangtze River and loess of North China

	ZTR	GZi
YB	47.53	0.10
YBV	72.73	0.06
HGSC	43.65	0.02
北方黄土 ^[34]	8.42	0.47

2.3 重矿物物源判别

物源指数(PI)和相似度指数($\cos\theta$)是物源判别的

$$PI = (\sum |C_{ix} - C_{i1}| / \text{range}(i)) / [(\sum |C_{ix} - C_{i1}| / \text{range}(i)) + (\sum |C_{ix} - C_{i2}| / \text{range}(i))] \quad (1)$$

式中: C_{ix} 是待判别样品中重矿物*i*的百分含量; C_{i1} 和 C_{i2} 分别为端元沉积物1和2中重矿物*i*的百分含量; $\text{range}(i)$ 为待判别样品中重矿物*i*的极差。PI值范围介于0~1, <0.5表示待判别沉积物物源与标准端元1更接近,相反其物源则与标准端元2更相似。而相似度指数主要用于表达任意两种沉积样品之间或者是沉积样品与原岩之间是否具有相似性。常采用夹角余弦法计算,公式为:

$$\cos\theta = (\sum X_{ik} \cdot X_{jk}) / (\sqrt{\sum X_{ik}^2} \cdot \sqrt{\sum X_{jk}^2}) \quad (2)$$

式中: $\cos\theta$ 为样品*i*和样品*j*的相似度值; X_{ik} 为样品*i*的指标*k*的重矿物相对含量; X_{jk} 为样品*j*的指标*k*的重矿物相对含量。 $\cos\theta$ 值越接近1,则说明两个沉积物越相似。本文基于JL剖面黄棕色土及网纹黄棕色土两类样品的重矿物数据,选取北方黄土和长江沿岸风成砂样品为端元1和端元2,计算得到两类样品的PI指数,并且利用相似度指数法分别计算两类样品与端元1和端元2之间的 $\cos\theta$ 值得到表4。

虽然JL剖面黄棕色土和网纹黄棕色土两类样品的重矿物类型、含量、组合特征存在一些差异,但物源指数PI值和相似度指数 $\cos\theta$ 值的计算结果表明,两类样品的PI值均大于0.5,分别为0.73和0.70,与端元2更相似;两类样品与端元1的 $\cos\theta$ 值仅为0.41和0.21,但与端元2的 $\cos\theta$ 值可达0.76和0.74,均显示两者有相似的物源,并且更倾向于长江河谷漫滩等近源沉积物。然而有研究揭示,暗色矿物经历风化后产生的磁铁矿、赤褐铁矿、钛铁矿和白钛石等次生矿物会与原生矿物混合在一起,对物源分析造成较大的干扰^[20]。JL剖面⑥~⑧三层的化学风化指数(CIA)分别为82.67%、83.16%、78.49%^[4],属中等风化强度,故不排除不透明矿物中存在次生成因的磁铁矿、赤褐铁矿、钛铁矿和白钛石。鉴于这些不透明矿物为黄棕色土和网纹黄棕色土的主导矿物,物源分析中也不宜剔除,因此有必要进行其他思路的验证。

重要方法^[41-43]。物源指数(PI)通常用于判别沉积样品与两个已知端元样品之间的相似程度。计算方法为:

3 锆石年龄

3.1 锆石形态及成因

JL剖面黄棕色土jl-877号样品中的锆石呈无色、粉色、玫瑰色,粒径长轴以20~60 μm 为主,个别达80 μm ,延长系数(长:宽)介于1.2~2.0。多数粉色、玫瑰色锆石为不规则滚圆粒状,说明他们可能经历了长距离的搬运,而无色锆石晶体呈次棱角到棱角自形晶,其可能来源于较近的源区。阴极发光图像CL(图3)显示,大部分锆石发育岩浆震荡环带,表明其岩浆成因^[44]。前人研究表明,锆石因成因不同而具有不同的U、Th含量,其Th/U比值亦不同。岩浆锆石U、Th含量高,其Th/U比值一般>0.4;变质锆石Th、U含量低,Th/U比值一般<0.1;Th/U比值介于0.1~0.4的锆石颗粒,可能反映后期地质作用的改造或者变质重结晶作用不彻底^[44-45]。jl-877号样品中大部分锆石颗粒具有较高的Th/U比值(图3),比值介于0.4~2.65,表明其岩浆成因,这与CL图结果一致;仅有2颗锆石Th/U比值<0.1,极少数的锆石属于变质成因。

3.2 碎屑锆石年代结果

jl-877号样品位于JL剖面第⑧层,为黄棕色土样品。对jl-877样品的100颗锆石进行年龄分析,有92颗锆石U-Pb年龄数据落在谐和线上或者谐和线附近,锆石U-Pb年龄谐和度>90%,仅有8颗锆石U-Pb年龄数据偏离谐和线(图4a),表明jl-877样品数据谐和度较好,具有可靠性。图4b是jl-877样品的碎屑锆石U-Pb年龄谱,网纹黄棕色土样品的碎屑锆石U-Pb年龄谱(图4c)引自文献^[46]九江剖面(JJ剖面,29°42'40.27" N, 116°00'13.7" E),该剖面距离本文研究剖面(JL)非常近,地层结构相似, JJ-02号样品取自JJ剖面有弱网纹化特征的黄棕色土层内,与本文网纹黄棕色土相对应。

表4 0.44 Ma以来加积型红土物源指数计算结果

Table 4 Results of provenance index of red earth aggradation since 0.44 Ma

端元	PI		$\cos\theta$	
	YB	YBV	YB	YBV
北方黄土	0.27	0.30	0.41	0.21
HGSC	0.73	0.70	0.76	0.74

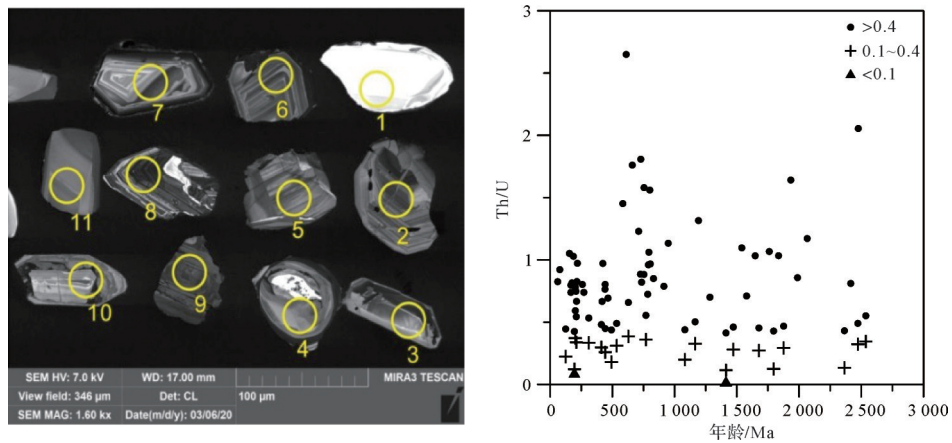


图3 JL剖面jl-877号样品中代表性锆石阴极发光(CL)图像以及锆石Th/U-年龄关系图
Fig.3 CL images and Th/U-age plots from jl-877 sample in JL profile

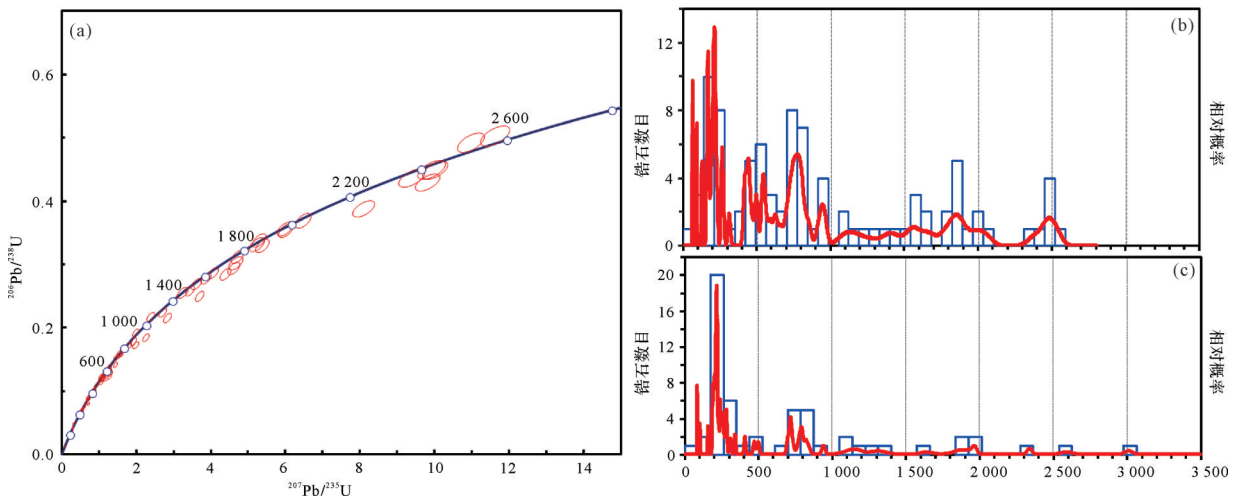


图4 0.44 Ma以来加积型红土碎屑锆石U-Pb谐和图和年龄谱图

(a)JL剖面jl-877号样品碎屑锆石U-Pb年龄谐和图;(b)JL剖面jl-877号样品碎屑锆石U-Pb年龄谱;(c)九江剖面JJ-02样品碎屑锆石U-Pb年龄谱^[46]

Fig.4 U-Pb concordia plots and U-Pb age spectra of detrital zircon of aggradation red earth since 0.44 Ma

(a) U-Pb concordia plots of detrital zircon from jl-877 sample; (b) U-Pb age spectra of detrital zircon from jl-877 in JL section; (c) U-Pb age spectra of detrital zircon from JJ-02 sample in Jiujiang profile^[46]

黄棕色土和网纹黄棕色土样品的碎屑锆石U-Pb年龄值分布较宽,分别为61~2 537 Ma和83~3 013 Ma,且呈现多峰的特征,反映沉积物物源的广泛性和复杂性。黄棕色土(jl-877)锆石U-Pb年龄测试结果大致呈现5组年龄区间,<130 Ma、150~330 Ma、390~1 000 Ma、1 060~2 100 Ma、2 300~2 600 Ma。前三个区间年龄峰值较强,由强到弱依次为150~330 Ma、<65Ma、70~130 Ma、680~870 Ma、390~570 Ma;后两个区间年龄峰值较弱,主要出现在1 700~2 100 Ma、2 300~2 600 Ma。网纹黄棕色土(JJ-02)锆石U-Pb年龄数据^[46]主要呈现6组年龄区间,分别为<110 Ma、120~350 Ma、400~530 Ma、680~1 280 Ma、1 400~2 100 Ma、2 400~3 013 Ma。主要年龄峰值为80~110 Ma、150~300 Ma、400~520 Ma、680~

870 Ma,其中150~300 Ma和80~110 Ma峰值较强。对比jl-877和JJ-02样品的锆石U-Pb年龄谱特征,两者相似度较高。首先是年龄峰值段相似,两者均在70~130 Ma、150~350 Ma、680~870 Ma处出现年龄峰高值,年龄峰值由强到弱的排序依次是150~350 Ma、70~130 Ma、680~870 Ma;其次是870~3 013 Ma区间两类样品年龄峰值均很弱。但两个样品间也存在一些差异,主要表现在:1)jl-877样品中存在<65 Ma年龄峰值,且峰值较强, JJ-02样品中则不存在该峰值;2)jl-877样品390~570 Ma年龄峰明显强于JJ-02;3)如表5所示,150~350 Ma和390~570 Ma两个年龄峰值段的锆石颗粒数百分比相差较大,前一个峰值段(150~350 Ma)锆石颗粒百分含量网纹黄棕色土(47.37%)明显高于黄棕色土(20.65%)、而后一峰值

表5 黄棕色土和网纹黄棕色土不同年龄区间锆石颗粒百分含量(%)

Table 5 Content of zircon grains in different age ranges for yellowish brown soil and reticular yellowish brown soil (%)

	70~130 Ma	150~350 Ma	390~570 Ma	680~870 Ma
YB	3.26	20.65	14.13	18.48
YBV	3.51	47.37	5.26	19.30

段(390~570 Ma)锆石颗粒百分含量黄棕色土(14.13%)明显高于网纹黄棕色土(5.26%)。

3.3 与潜在物源区碎屑锆石年龄谱对比

搬运沉积过程一般不会引起锆石年龄特征的变化,因此碎屑锆石年龄分布可以有效指示沉积碎屑物质来源^[47]。为了更好地判定0.44 Ma以来加积型红土的潜在物源区,选择长江湖口段和武汉段沉积物、赣江沉积物、北方黄土等样品已发表的数据^[22,25,46,48]进行对比研究,对黄棕色土及网纹黄棕色土的碎屑年龄谱及可能的物源信息进行解读。

如图5a、图5b所示,jl-877和JJ-02样品古太古代一中元古代锆石数量少、年龄峰弱。比较而言,jl-877样品在1 700~2 100 Ma、2 300~2 600 Ma处存在两个锆石年龄弱峰,与长江武汉段(图5c)、湖口段(图5d)样品十分相似;JJ-02样品则缺乏1 700~2 100 Ma、2 300~2 600 Ma弱峰,与赣江段样品(图5e)及北方黄土(图5g)更为相似。鉴于北方黄土在1 000~3 500 Ma弱峰段上锆石年龄区间更窄,峰值也更低特征,jl-877和JJ-02样品在锆石年龄弱峰段上的信号更趋向于长江沉积物。有研究认为,长江沉积物太古宙锆石含量很少,主要来自扬子克拉通和华夏地块内部多处太古宙陆壳;古元古代锆石(1 700~2 100 Ma)Hf同位素组成与扬子克拉通和华夏地块相近^[48]。

jl-877、JJ-02样品<1 000 Ma年龄段锆石数量多、年龄峰强、呈多峰现象。其中最强峰值均位于150~350 Ma,对应晚泥盆世—侏罗纪。jl-877和JJ-02样品该年龄段的锆石数量分别占总锆石数的20.65%和47.37%。解读150~350 Ma年龄段发现,JJ-02以200~300 Ma的二叠纪—三叠纪锆石为主,而jl-877则主要为150~200 Ma侏罗纪锆石。长江武汉段、湖口段、赣江段沉积物(图5c~e)及北方黄土(图5g)在该年龄段的锆石分布及年龄峰特征呈现与JJ-02相似的特征。然而有研究表明,长江沉积物和北方黄土200~300 Ma锆石的源区完全不同。长江流域沉积物中200~300 Ma二叠纪—三叠纪锆石主要与川滇贵地区峨眉山火成岩省(ELIP)、金沙江缝合带酸性侵入岩、

以及湘江赣江流域二叠纪花岗岩岩体的物质贡献有关^[48-49];而北方黄土200~350 Ma锆石的贡献主要来自中亚造山带^[50]。鉴于JJ-02锆石粒径偏粗(40~100 μm),推测长江沉积物等近源物质贡献的可能性更大。jl-877样品150~200 Ma的侏罗纪锆石可能与秦岭造山带有关^[51],而与长江沉积物及北方黄土的物源关系不大。

除最强的150~350 Ma锆石年龄峰外,jl-877与JJ-02还一致呈现680~870 Ma、70~130 Ma年龄峰。其中,680~870 Ma年龄峰在长江沉积物中有明显表现,北方黄土中却较弱(图5)。长江沉积物中该年龄段的锆石来源则与扬子克拉通内部及其边缘地区的花岗岩体有关,是新元古代期间华夏板块和扬子克拉通发生碰撞,750~830 Ma岩浆频繁活动的结果^[52-53]。70~130 Ma年龄峰也仅见于长江沉积物中,北方黄土则缺失,而长江流域白垩纪锆石主要来自扬子地块东缘和东南缘及大别山造山带^[51]。再次表明加积型红土与长江沉积物之间存在物源联系。

jl-877与JJ-02相比,390~570 Ma及<65 Ma锆石年龄峰存在显著差别。前者390~570 Ma年龄峰较强,且存在新生代<65 Ma年龄峰;后者390~570 Ma峰较弱,且不存在新生代<65 Ma年龄峰。从对比样品来看,长江武汉段、赣江段沉积物及北方黄土的390~570 Ma峰值较强,而长江湖口段沉积物与及北方黄土的新生代<65 Ma年龄峰却非常明显。jl-877和JJ-02在这两个年龄段上锆石的物源倾向不明显。但网纹黄棕色土至黄棕色土,样品中新世代锆石的贡献增加。Yang *et al.*^[54]认为长江沉积物中<65 Ma的锆石主要来源于青藏高原,可以指示长江贯通的时间。但也有研究表明,长江沉积物中新世代锆石主要出现在长江金沙江段和长江下游段,它们之间的江段则缺失。湖口段出现新生代锆石可能与及下扬子板块出露的新生代玄武岩有关^[48]。而北方黄土新生代锆石的源区相距JL剖面太远。JL剖面位于秦岭—大别山造山带东南下风方向,网纹黄棕色土至黄棕色土又指示冬季风增强趋势^[55-56],来自秦岭—大别山造山带以及下扬子板块的北方粉尘有可能为JL剖面

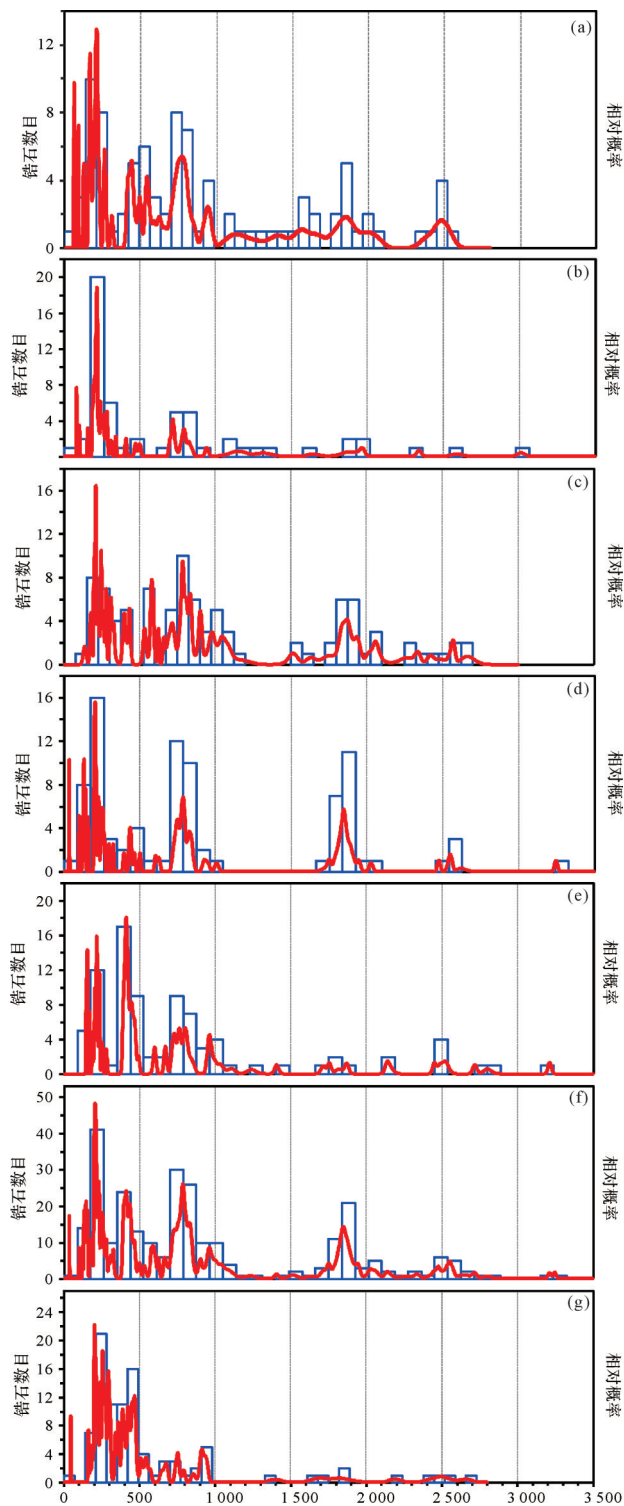


图5 0.44 Ma以来加积型红土与潜在物源区碎屑锆石U-Pb年龄谱对比

(a)jl-877;(b)JJ-02;(c)长江武汉段;(d)长江湖口段;(e)赣江沉积物;
(f)长江武汉段、湖口段和赣江段综合;(g)北方黄土

Fig.5 Comparison of detrital zircon U-Pb age spectra of red earth aggradation since 0.44 Ma and potential provenance
(a) jl-877; (b) JJ-02; (c) Wuhan section of Yangtze River; (d) Hukou section of Yangtze River; (e) Ganjiang River; (f) synthesis of Wuhan and Hukou sections of Yangtze and Ganjiang Rivers; (g) loess in North China

面0.44 Ma以来的加积型红土提供物源,且黄棕色土较网纹黄棕色土北方物源的贡献增加。

为了更好的分析南方加积型红土是长江源还是北方源,同时考虑到长江支流赣江及长江干流湖口段、武汉段沉积物碎屑锆石U-Pb年龄谱存在一定差异,本文综合长江湖口段、武汉段沉、赣江南昌段沉积物的锆石U-Pb年龄数据,得到图5f,并与北方黄土锆石U-Pb年龄谱(图5g)进行对比,发现0.44 Ma以来的风尘堆积与综合后的长江沉积物碎屑锆石U-Pb年龄谱更加相似,均表现出比较明显的<65 Ma、70~160 Ma、200~300 Ma、390~570 Ma和680~880 Ma等,这与前文锆石U-Pb年龄谱和重矿物相似度指数分析结果一致。

4 JL剖面0.44 Ma以来加积型红土物源讨论

基于JL剖面0.44 Ma以来加积型红土的重矿物组成和碎屑锆石U-Pb年龄谱特征,裸露的长江沉积物可能是长江以南加积型红土的主要粉尘源区,但黄棕色土与网纹黄棕色土相比,增加了来自秦岭—大别山造山带的北方物源。然而,环境信息的解译存在粒度效应^[57-59]。有研究认为次生风化信息主要富集于细粒组分,而粗粒组分则更多地记录物源信号和源区风化状况^[60]。JL剖面0.44 Ma以来黄棕色沉积的化学风化指数(CIA)介于77%~84%,为中等风化强度。而重矿物和碎屑锆石主要富集在粗粒组分中,单粒矿物和碎屑锆石的粒径多在20 μm以上,某种程度上消除了细粒组分,特别是湿热条件下<2 μm化学风化组分的干扰,物源判别结果有一定可靠性,这与黄颖等^[28]针对该剖面粉砂粒级样品的稳定元素地球化学物源示踪的研究结论也较为相似,即0.44 Ma以来亚热带地区气候渐趋干凉,东亚冬季风不断增强,导致北方远源粉尘在黄棕色土物源贡献中的比例增加。所不同的是,黄颖等的结果更倾向于混合源,而本文的结果更倾向于近源,究其原因还是与粒度效应有关。

就粉尘沉积而言,<20 μm组分可以在空中悬浮时间较长,能被风力携带至高空并做远距离传输^[61-62],往往被看做远源粉尘的示踪组分。如利用该组分稳定元素地球化学特征示踪下蜀黄土的物源,发现其与北方黄土的物质联系并不密切^[13,63]。考虑到<20 μm组分中包含风化信息,且JL剖面0.44 Ma

以来黄棕色沉积的化学风化指数CIA值(77%~84%)明显高于下蜀黄土(66%~76%)^[64]和北方黄土(63~68%)^[65],加之九江JL红土剖面上段的黄棕色沉积的粘粒含量较高(25.45%)、砂粒含量极少(1.28%),黄颖等^[28]选择该剖面粉砂粒级(4~63 μm)样品的稳定地球化学元素来进行物源示踪,结果得出网纹红土层段以近源物质贡献为主,黄棕色土则体现混合源的特征,且随冬季风逐渐增强,北方远程物源的贡献增加。现代气象资料亦表明,北方粉尘可以输移至30°N以南地区,粉尘粒径主要集中于2~16 μm,其中4~16 μm组分的含量约占61%^[66-68]。可见,JL剖面0.44 Ma以来的加积型红土中不排除北方远程物源的影响,但信号可能体现在4~20 μm粒级组分中。要想解译南方风尘沉积中来自北方物源的贡献,有必要对该粒级做更加细致的研究。而本文基于重矿物组成和碎屑锆石年龄的物源示踪证据,充分表明加积型红土中>20 μm组分的物质与近源长江沉积物的物质贡献有关。

从长尺度气候记录来看,0.44 Ma正直中布容气候转型期。中布容事件(MBE)为全球性气候转型事件,对应MIS12/MIS11,主要表现为0.43 Ma以来全球冰量的显著增加^[69]以及冰期—间冰期气候反差的进一步增大^[70]。该阶段气候系统的变化在深海沉积^[71]、南极Vostok和Dome C冰芯^[72-73]、中国黄土^[74-76]中均有记录。近年来,我国中低纬度南海ODP1143C孔^[77]、苏北盆地XH-2孔^[78]、成都平原胜利红土剖面^[79]中也发现了该事件的记录。中布容事件以来,间冰期强大的夏季风带来充足的降水,长江谷地拓宽,流域内侵蚀量增加,大量碎屑物质沿长江干支流搬运至中下游地区堆积;冰期时长江水量减少、水位下降,有大面积碎屑物质裸露于地表,加之,秦岭自中更新世以来快速抬升^[80]产生大量侵蚀碎屑,在冬季风强盛时期,长江沉积物及来自秦岭地区的侵蚀碎屑可以为下风向的粉尘堆积提供丰富的物源。

综上所述,JL剖面0.44 Ma以来的黄棕色沉积的物源应该以近源粉尘为主,粉尘主要来源于冰期时裸露的长江谷地及河漫滩地;但不排除北方粉尘的贡献,其贡献量可能富集于4~20 μm组分,有待于进一步细致的工作。

5 结论

通过对江西九江JL加积型红土剖面上段

0.44 Ma以来黄棕色沉积的重矿物组成及碎屑锆石U-Pb定年研究,初步得到以下结论:

(1) JL剖面上段22个加积型样品共鉴定出19种重矿物。重矿物组成均以不透明矿物为主,且以锆石、金红石、锐钛矿、电气石、绿帘石、辉石等为常见重矿物,重矿物稳定度高。但黄棕色土和网纹黄棕色土两类样品的锆石和绿帘石含量存在差异,前者锆石含量(9.15%)明显低于后者(16.49%),而绿帘石含量(12.68%)则明显高于后者(2.77%)。

(2) 黄棕色土和网纹黄棕色土极稳定矿物和稳定矿物含量较高,分别为52.49%和52.88%,32.22%和41.49%,明显高于北方黄土(17.77%、19.21%),与长江风成砂(55.93%、20.15%)较为相似。两类样品ZTR指数和GZi指数分别为47.53和0.10,72.73和0.06略高于风成砂(43.65和0.02),而明显不同于北方黄土(8.42和0.47)。以北方黄土和长江沉积物为端元进行物源指数计算,黄棕色土和网纹黄棕色土的PI值分别为0.73和0.70,偏长江源;与长江沿岸风成砂样品间的相似度指数 $\cos\theta$ 值可达0.76和0.74,亦支持长江源的结论。

(3) 典型样品锆石年龄峰多且分布范围广,<65 Ma、70~130 Ma、150~300 Ma、390~570 Ma以及680~870 Ma等处年龄峰强,870~3 013 Ma年龄峰弱,特别是70~130 Ma、200~300 Ma、390~570 Ma、680~870 Ma、870~3 013 Ma等年龄峰与长江沉积物相应年龄峰吻合度高。<65 Ma、150~200 Ma年龄段锆石多出现在黄棕色土样品中,且可能与秦岭造山带的贡献有关,但贡献不显著。JL剖面0.44 Ma以来加积型红土的物源主要是长江源。

(4) 与该剖面粉砂粒级稳定元素地球化学物源示踪结果(混合源)相比并不完全一致,这可能意味加积型红土的物源存在粒级效应。因此,我们推测0.44 Ma以来南方风尘加积型红土以近源物质贡献为主,粉尘主要源自长江谷地裸露的河漫滩;但不排除北方物源贡献的可能性,其贡献量可能富集于4~20 μm组分。本文的研究结论来自有限的数据分析,期待进一步细致的工作和更多量化分析工作的检验或修正。

致谢 感谢审稿专家和编辑部给予本文的意见和建议,使得本文得以完善!

参考文献(References)

- [1] Xiong S F, Sun D H, Ding Z L. Aeolian origin of the red earth in Southeast China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2002, 17(2): 181-191.
- [2] 夏应菲, 杨浩. 安徽宣城第四纪红土剖面石英颗粒扫描电镜研究[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 1998, 21(1): 120-124. [Xia Yingfei, Yang Hao. SEM scanning of quartz of the Quaternary red earth in Xuancheng, Anhui[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 1998, 21(1): 120-124.]
- [3] 徐洪阳, 郑祥民, 周立旻, 等. 南京周家山下蜀黄土石英颗粒特征及其物源意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1176-1186. [Xu Hongyang, Zheng Xiangmin, Zhou Limin, et al. Characteristics of quartz grains of the Xiashu loess in Zhoujiashan Nanjing and its provenance significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1176-1186.]
- [4] 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.]
- [5] 杨浩, 赵其国, 李小平, 等. 安徽宣城风成沉积-红土系列剖面ESR年代学研究[J]. *土壤学报*, 1996, 33(3): 293-300. [Yang Hao, Zhao Qiguo, Li Xiaoping, et al. ESR dating of eolian sediment and red earth series from Xuancheng profile in Anhui province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 293-300.]
- [6] 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 九江地区网纹红土的时代[J]. *地质力学学报*, 1997, 3(4): 27-32. [Jiang Fuchu, Wu Xihao, Xiao Huaguo, et al. Age of the vermiculated red soil in Jiujiang area, central China [J]. *Journal of Geomechanics*, 1997, 3(4): 27-32.]
- [7] 尹秋珍, 郭正堂. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期[J]. *科学通报*, 2006, 51(2): 186-193. [Yin Qiuzhen, Guo Zhengtang. Mid-Pleistocene vermiculated red soils in southern China as an indication of unusually strengthened East Asian monsoon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 186-193.]
- [8] Qiao Y S, Hao Q Z, Peng S S, et al. Geochemical characteristics of the eolian deposits in southern China, and their implications for provenance and weathering intensity[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308(3/4): 513-523.
- [9] 袁宝印, 夏正楷, 李保生, 等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 1-13. [Yuan Baoyin, Xia Zhengkai, Li Baosheng, et al. Chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in southern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1): 1-13.]
- [10] 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 赣北红土与北京邻区黄土及沙漠砂的粒度特征对比[J]. *科学通报*, 1999, 44(11): 1216-1219. [Xiong Shangfa, Ding Zhongli, Liu Tungsheng. The comparison of particle characteristics among laterite in northern Jiangxi province, loess near Beijing and sand of desert [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(11): 1216-1219.]
- [11] 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. [Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Dayuan, et al. REE geochemistry of Xiashu loess in Zhenjiang, Jiangsu province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 1-7.]
- [12] 邵家骥, 李长生, 陈舒舒, 等. 江苏南部常熟虞山下蜀土成因探讨[J]. *江苏地质*, 2007, 31(4): 305-309. [Shao Jiaji, Li Changsheng, Chen Shushu, et al. Genetic discussions on Xiashu soil of Yushan in Changshu, south Jiangsu[J]. *Jiangsu Geology*, 2007, 31(4): 305-309.]
- [13] Han L, Hao Q Z, Qiao Y S, et al. Geochemical evidence for provenance diversity of loess in southern China and its implications for glacial aridification of the northern Subtropical region [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 212: 149-163.
- [14] Liu F, Li G J, Chen J. U-Pb ages of zircon grains reveal a proximal dust source of the Xiashu loess, Lower Yangtze River region, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(20): 2391-2395.
- [15] 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. [Ling Chaohao, Zhang Zhi, Jia Yulian, et al. Geochemical evidence for provenance of Aeolian deposition from Poyang Lake region in the middle reaches of Yangtze River since the Middle Pleistocene and its environmental significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(5): 1103-1115.]
- [16] 龙进, 贾玉连, 张智, 等. 末次冰期以来鄱阳湖东北缘下蜀黄土常量元素地球化学特征及其物源指示[J]. *沉积学报*, 2015, 33(5): 932-940. [Long Jin, Jia Yulian, Zhang Zhi, et al. Geochemical characteristics of loess from northeast of Poyang Lake since last glacial and its provenance implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 932-940.]
- [17] Qian P, Zheng X M, Cheng J, et al. Tracing the provenance of aeolian loess in the Yangtze River Delta through zircon U-Pb age and geochemical investigations [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(4): 708-721.
- [18] 张硕, 杨立辉, 董有进, 等. 皖南第四纪红土锆石形态特征及物源指示意义[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1): 1-8. [Zhang Shuo, Yang Lihui, Dong Youjin, et al. Morphological characteristics and provenance indication of zircon from Quaternary red clay in southern Anhui[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(1): 1-8.]
- [19] 邓凯, 杨守业, 王中波, 等. 台湾山溪性小河流碎屑重矿物组成及其示踪意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 531-542. [Deng Kai, Yang Shouye, Wang Zhongbo, et al. Detrital heavy mineral assemblages in the river sediments from Taiwan and its implications for sediment provenance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 531-542.]

- [20] 陈心怡,黄奇瑜,邵磊. 福建闽江和九龙江现代沉积物重矿物特征及其物源意义[J]. 古地理学报, 2018, 20(4): 637-650. [Chen Xinyi, Huang Qiyu, Shao Lei. Characteristics of heavy minerals in modern sediments of Minjiang and Jiulongjiang Rivers, Fujian province and their provenance implication[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(4): 637-650.]
- [21] Yang S Y, Wang Z B, Guo Y, et al. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(1): 56-65.
- [22] He M Y, Zheng H B, Clift P D. Zircon U - Pb geochronology and Hf isotope data from the Yangtze River sands: Implications for major magmatic events and crustal evolution in Central China [J]. Chemical Geology, 2013, 360-361: 186-203.
- [23] 王昆山,石学法,刘升发,等. 泰国湾西部表层沉积物重矿物分布特征:对物质来源和沉积环境的指示[J]. 第四纪研究, 2014, 34(3): 623-634. [Wang Kunshan, Shi Xuefa, Liu Shengfa, et al. Spatial distribution of heavy minerals in the surface sediments from the western gulf of Thailand: Implications for sediment provenance and sedimentary environment[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(3): 623-634.]
- [24] 张青松,范育新,杨光亮,等. 岩芯沉积物化学元素及重矿物含量变化对腾格里地区碎屑物源的指示[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 69-78. [Zhang Qingsong, Fan Yuxin, Yang Guangliang, et al. Provenance shift during Quaternary period evidenced by changes in geochemical elements and heavy mineral contents in core sediments in Tengger area[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(1): 69-78.]
- [25] Che X D, Li G J. Binary sources of loess on the Chinese Loess Plateau revealed by U-Pb ages of zircon [J]. Quaternary Research, 2013, 80(3): 545-551.
- [26] 杨利荣,邹宁,岳乐平,等. 库布齐沙漠碎屑锆石 U-Pb 年龄组成及其物源分析[J]. 第四纪研究, 2017, 37(3): 560-569. [Yang Lirong, Zou Ning, Yue Leping, et al. Distribution of U-Pb ages of detrital zircon from the HOBQ Desert and its implications for provenance[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(3): 560-569.]
- [27] Fan Y X, Li Z J, Wang F, et al. Provenance variations of the Tengger Desert since 2.35 Ma and its linkage with the northern Tibetan Plateau: Evidence from U-Pb age spectra of detrital zircons[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 223: 105916.
- [28] 黄颖,朱丽东,张晓,等. 庐山北麓 JL 红土剖面粉砂粒级元素地球化学特征及其物源意义[J]. 第四纪研究, 2019, 39(5): 1092-1102. [Huang Ying, Zhu Lidong, Zhang Xiao, et al. Geochemical characteristics and their provenance implications of the silt fraction from JL red earth section in Lushan region, Jiujiang, South China[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(5): 1092-1102.]
- [29] 乔彦松,郭正堂,郝青振,等. 皖南风尘堆积—土壤序列的磁性地层学研究及其古环境意义[J]. 科学通报, 2003, 48(13): 1465-1469. [Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Loess-soil sequences in southern Anhui province: Magnetostratigraphy and paleoclimatic significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(13): 1465-1469.]
- [30] 乔彦松,郭正堂,郝青振,等. 安徽宣城黄土堆积的磁性地层学与古环境意义[J]. 地质力学学报, 2002, 8(4): 369-375. [Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic significance of an eolian sequence from the Xuancheng area, Anhui province[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(4): 369-375.]
- [31] Hong H L, Gu Y S, Yin K, et al. Clay record of climate change since the mid-Pleistocene in Jiujiang, South China[J]. Boreas, 2013, 42(1): 173-183.
- [32] 黄姜依,方家骅,邵家骥,等. 南京下蜀黄土沉积时代的研究[J]. 地质论评, 1988, 34(3): 240-247. [Huang Jiangnong, Fang Jiahua, Shao Jiayi, et al. Study on the depositional age of the Xiashu loess in Nanjing[J]. Geological Review, 1988, 34(3): 240-247.]
- [33] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [34] 林晓彤,李巍然,时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 17-21. [Lin Xiaotong, Li Weiran, Shi Zhenbo. Characteristics of mineralogy in the clastic sediments from the Yellow River provenance, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(3): 17-21.]
- [35] 胡亚萍,贾玉连,张智,等. 粒度揭示的末次间冰期以来长江中游风沙—风尘体系[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1324-1332. [Hu Yaping, Jia Yulian, Zhang Zhi, et al. Sand-loess system in the middle reaches of Yangtze River since Late interglacial indicated by grain size[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1324-1332.]
- [36] 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 Huazhong Normal University (Natural Sciences), 2010, 44(1): 158-162.]
- [37] 中国地质科学院地矿所. 砂矿物鉴定手册[M]. 北京:地质出版社, 1977: 1-4. [Chinese Academy of Geological Sciences. Identification manual of sand mineral[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1977: 1-4.]
- [38] 何苗,姜勇,张恒,等. 准噶尔盆地西北缘三叠系重矿物特征及其物源指示意义[J]. 地质论评, 2019, 65(2): 464-476. [He Miao, Jiang Yong, Zhang Heng, et al. Heavy mineral characteristics and its implication for provenance of the Triassic, NW Junggar[J]. Geological Review, 2019, 65(2): 464-476.]
- [39] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985. [Liu

- Tungsheng. Loess and environment [M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [40] Morton A C, Hallsworth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 241-256.
- [41] 杨守业,李从先,张家强. 苏北滨海平原冰后期古地理演化与沉积物物源研究[J]. *古地理学报*, 2000, 2(2): 65-72. [Yang Shouye, Li Congxian, Zhang Jiaqiang. Palaeogeographic evolution of coastal plain and provenance study of postglacial sediments in north Jiangsu province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(2): 65-72.]
- [42] 王孟瑶,金秉福,岳伟. 长江口表层沉积物重矿物在不同粒级中的分布与研究意义[J]. *海洋学报*, 2019, 41(11): 89-100. [Wang Mengyao, Jin Bingfu, Yue Wei. Patterns of heavy mineral combination in different grain-size categories and their sedimentary significance: A case study for surficial sediments in the Changjiang River estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(11): 89-100.]
- [43] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2011:84-153. [Xu Jianhuan. *Mathematical methods in modern geography* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 84-153.]
- [44] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589-1604. [Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589-1604.]
- [45] Mezger K, Krogstad E J. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15(1): 127-140.
- [46] 程峰. 中国南方更新世红土沉积物的特征及其物源研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2018:1-148. [Cheng Feng. Study on characteristics and source provenance of the Pleistocene red earth sediments in southern China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018: 1-148.]
- [47] 颜茂都,陈毅. 晚始新世古红河流域变化:来自思茅盆地早新生代地层碎屑锆石U-Pb年代学证据[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(1): 130-144. [Yan Maodu, Chen Yi. Detrital zircon U-Pb age analyses of the Early Cenozoic sediments from the Simao Basin and evolution of the paleo-Red River drainage system[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(1): 130-144.]
- [48] 何梦颖,郑洪波,贾军涛. 长江现代沉积物碎屑锆石U-Pb年龄及Hf同位素组成与物源示踪研究[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(4): 656-670. [He Mengying, Zheng Hongbo, Jia Juntao. Detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope of modern sediments in the Yangtze River: Implications for the sediment provenance [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(4): 656-670.]
- [49] Jian P, Liu D Y, Sun X M. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(5/6): 371-384.
- [50] 孙博亚. 洛川黄土碎屑锆石沉积学特征及其U-Pb年龄的物源区意义[D]. 西安:西北大学, 2011:1-55. [Sun Boya. The sediment and U-Pb geochronology features of detrital zircon in Luochuan sequence and its provenance study[D]. Xi'an: Northwest University, 2011: 1-55.]
- [51] 王扬扬,范代读. 长江流域岩体锆石U-Pb年龄与Hf同位素特征及沉积物源示踪意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5): 97-118. [Wang Yangyang, Fan Daidu. U-Pb ages and Hf isotopic composition of crystalline zircons from igneous rocks of the Changjiang drainage basin and their implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(5): 97-118.]
- [52] Zhang C L, Li M, Wang T, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of granitoids in the Douling Group in the eastern Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 78(1): 83-95.
- [53] Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163-166.
- [54] Yang S Y, Li C X, Yokoyama K. Elemental compositions and monazite age patterns of core sediments in the Changjiang Delta: Implications for sediment provenance and development history of the Changjiang River[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245(3/4): 762-776.
- [55] 杨达源. 中国东部的第四纪风尘堆积与季风变迁[J]. *第四纪研究*, 1991(4): 354-360. [Yang Dayuan. The Quaternary dust-fall accumulation and the monsoon variability in eastern China [J]. *Quaternary Sciences*, 1991(4): 354-360.]
- [56] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 1-12. [Li Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian Monsoon[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 1-12.]
- [57] Wang Y J, Jia J, Liu H, et al. Iron mineralogy characteristics of the desert sediments of the Tarim Basin and its provenance implications [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2018, 55(12): 1384-1388.
- [58] 李洋,李徐生,韩志勇,等. 黄土不同粒级稀土元素分布特征及其制约因素[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 972-984. [Li Yang, Li Xusheng, Han Zhiyong, et al. The distribution of REE in different particle size fractions of loess and restraining factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 972-984.]
- [59] 李金婵,陈秀玲,贾丽敏,等. 新疆伊犁河谷沙漠沉积不同粒径组分的地球化学元素分布特征[J]. *地球环境学报*, 2014, 5(2): 102-110. [Li Jinchan, Chen Xiuling, Jia Limin, et al. The distribution of geochemical elements in different grain-size fractions of desert sediments in Ili Valley of Xinjiang, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(2): 102-110.]
- [60] 熊尚发,朱园健,周茹,等. 白水黄土—红粘土化学风化强度

- 的剖面特征与粒度效应[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 812-821. [Xiong Shangfa, Zhu Yuanjian, Zhou Ru, et al. Chemical weathering intensity and its grain-size dependence for the loess-red clay deposit of the Baishui section, Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 812-821.]
- [61] Tsoar H, Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation[J]. Sedimentology, 1987, 34(1): 139-153.
- [62] 孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. 第四纪研究, 2004, 24(2): 175-183. [Sun Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(2): 175-183.]
- [63] 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 (23/24): 3317-3326.
- [64] 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. [Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(11): 1174-1184.]
- [65] 陈骏, 刘连文, 季峻峰, 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): 地球科学, 2001, 31(2): 136-145. [Chen Jun, Liu Lianwen, Ji Junfeng, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(2): 136-145.]
- [66] Tan S C, Li J W, Che H Z, et al. Transport of East Asian dust storms to the marginal seas of China and the southern North Pacific in spring 2010 [J]. Atmospheric Environment, 2017, 148: 316-328.
- [67] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring [J]. Global and Planetary Change, 2006, 52(1/2/3/4): 1-22.
- [68] 李徐生, 韩志勇, 陈英勇, 等. 2006年3月11日南京“泥雨”降水特征及其粉尘来源[J]. 第四纪研究, 2009, 29(1): 43-54. [Li Xusheng, Han Zhiyong, Chen Yingyong, et al. Characteristics and source of rain dust in Nanjing on March 11, 2006 [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(1): 43-54.]
- [69] Yin Q Z, Guo Z T. Strong summer monsoon during the cool MIS-13 [J]. Climate of the Past, 2008, 4(1): 29-34.
- [70] Jansen J H F, Kuijpers A, Troelstra S R. A mid-Brunhes climatic event: Long-term changes in global atmosphere and ocean circulation [J]. Science, 1986, 232(4750): 619-622.
- [71] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. Paleoceanography, 2005, 20(1): PA1003.
- [72] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica [J]. Nature, 1999, 399(6735): 429-436.
- [73] Spahni R, Chappellaz J, Stocker T F, et al. Atmospheric methane and nitrous oxide of the Late Pleistocene from Antarctic ice cores [J]. Science, 2005, 310(5752): 1317-1321.
- [74] Guo Z T, Biscaye P, Wei L Y, et al. Summer monsoon variations over the last 1.2 Ma from the weathering of loess-soil sequences in China [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(12): 1751-1754.
- [75] Kukla G. Loess stratigraphy in Central China [J]. Quaternary Science Reviews, 1987, 6(3/4): 191-207, 209-219.
- [76] Vandenberghe J, An Z S, Nugteren G, et al. New absolute time scale for the Quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis [J]. Geology, 1997, 25(1): 35-38.
- [77] 黄冰玥. 南海南部 ODP1143 岩芯环境磁学特征及古环境古气候意义 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 1-54. [Huang Bingyue. Magnetic properties and their paleoenvironmental and paleoclimatic implications of ODP Site 1143 sediments in the southern South China Sea [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016: 1-54.]
- [78] 牛旭亚. 中更新世以来苏北盆地 XH-2 孔的古植被与古气候研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2013: 1-32. [Niu Xuya. Paleovegetation and paleoclimate of XH-2 core in Subei Basin since Middle Pleistocene [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013: 1-32.]
- [79] Zhao L L, Hong H L, Fang Q, et al. Monsoonal climate evolution in southern China since 1.2 Ma: New constraints from Fe-oxide records in red earth sediments from the Shengli section, Chengdu Basin [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 473: 1-15.
- [80] 张兰生, 方修琦. 中国古地理: 中国自然环境的形成 [M]. 北京: 中国科学出版社, 2012: 229-247. [Zhang Lansheng, Fang Xiuqi. Chinese paleogeography: Formation of the Chinese natural environment [M]. Beijing: Science Press, 2012: 229-247.]

Provenance Analysis of Eolian Red Earth Aggradation in Southern China since 0.44 Ma: Heavy minerals and detrital zircon geochronology

ZHANG Xiao, ZHU LiDong, LI FengQuan, MA ZhenZhen, XIONG WenTing, JIA Jia, WANG LinYi

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract: Aggradated red earth is a typical eolian deposit in the mid-subtropical zone, where it is characterized by simultaneous deposition and weathering. The complete stratigraphy includes four soil units (upwards from the base): a reticular gravel unit, a reticular red soil unit, a homogeneous red soil unit and a yellowish-brown soil unit. Previous studies have shown that the degree of reddening and reticulation has clearly been weakened since 0.4 Ma, when the climate tended to be dry and cool. There are still some disputes on provenance, such as proximal source, distal source and mixed source. To determine it, we analyzed 22 heavy mineral samples and two detrital zircon U-Pb age spectra of the yellowish-brown soil deposit in the JL section (29° 42' N, 116° 02' E) at the northern piedmont of Lushan Mountain, which is 1 846 cm thick. Moreover, chronological studies of this section by others indicate that the slightly reticular yellowish-brown soil and yellowish-brown soil was formed in the middle and late Pleistocene since 0.44 Ma. The following conclusions are drawn: (1) There are 19 kinds of heavy minerals in the yellowish-brown soil and reticular yellowish-brown soil, predominantly opaque minerals (more than 50%). Common minerals include zircon, rutile, anatase, tourmaline, epidote, pyroxene, etc. (2) The content of extremely stable and stable minerals, and the values of ZTR (zircon-tourmaline-rutile) reflecting mineral maturity and GZi (garnet:zircon index) of these soils are respectively 52.49% and 52.88%, 32.22% and 41.49%, 47.53 and 72.73, 0.10 and 0.06, which are significantly different from the northern loess values (17.77%, 19.21%, 8.42, 0.47). However, they are more closely similar to the values for eolian sand samples along the Yangtze River (55.93%, 20.15%, 43.65, 0.02). These results show that the PI values of the yellowish-brown and reticular yellowish-brown soils are 0.73 and 0.70 respectively, which are inclined to a Yangtze River source. The similarity index ($\cos\theta$) of these two types of soil and the eolian sand samples along the Yangtze River (0.76 and 0.74) also support the conclusion of a Yangtze River source. (3) The analysis of detrital zircon U-Pb geochronology showed numerous and widely distributed age peaks for typical samples. The age peaks of 70-130, 200-300, 390-570, 680-870 and 870-3 013 Ma are consistent with the age peaks of Yangtze River sediments, while those of <65 Ma and 150-200 Ma in the yellowish-brown soil samples are related to the Qinling orogenic belt, but the contribution is not significant. Proximal sources are predominant in the aggradated red earth in the JL profile since 0.44 Ma, and the dust has mainly come from the exposed floodplain of the Yangtze valley. (4) There is not complete consistency with the geochemical source tracing results of particle size stable elements in the JL profile (supporting the mixed-source conclusion), which may indicate that the provenance of the red earth aggradation was affected by grain size. The grain size of the heavy minerals and detrital zircons is usually more than 20 μm , and the contribution from the north loess is enriched in the 4-20 μm components.

Key words: Late-Middle Pleistocene; aggradated red earth; heavy minerals; zircon U-Pb age; provenance