

管后春, 李运怀, 刘道彬, 等. 合肥盆地蜀黄土年龄及物源探讨[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 664–675.

Guan Houchun, Li Yunhuai, Liu Daobin, et al. A tentative discussion on the age and provenance of the Xiashu Loess in the Hefei Basin, Anhui Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 664–675(in Chinese with English abstract).

合肥盆地蜀黄土年龄及物源探讨

管后春^{1,2} 李运怀² 刘道彬² 朱 诚¹ 汪雅菲²

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

摘要: OSL 测龄结果表明合肥盆地蜀黄土(下蜀组)在中更新世晚期已开始沉积; 将主量化学元素和粒度分析与西北黄土、镇江下蜀黄土、巫山黄土和宣城黄土进行对比, 研究了合肥盆地蜀黄土物源。研究表明, 地球化学、粒度及沉积速率等均显示合肥下蜀黄土物源有别于镇江黄土及西北黄土; 并从岩相古地理及古气候特征探讨了淮河沿岸及淮北地区河流相、湖相及湖沼相细粒沉积物或许是其潜在的物源。

关键词: 下蜀黄土; 地球化学特征; 粒度; 物源; 合肥盆地

中图分类号: P597; P642.13⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2015)02-0664-12

A tentative discussion on the age and provenance of the Xiashu Loess in the Hefei Basin, Anhui Province

GUAN Hou-chun^{1,2}, LI Yun-huai², LIU Dao-bin², ZHU Cheng¹, WANG Ya-fei²

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

2. Anhui Institute of Geological Survey, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: The OSL dating results show that the deposition of the Xiashu Loess (Xiashu Formation) in the Hefei Basin began in the late period of the Middle Pleistocene. In this study, the major geochemical elements and grain sizes of the Xiashu Loess in Hefei were compared with those of Northwest (NW) loess, Xiashu Loess of Zhenjiang, Wushan Loess and Xuancheng Loess. The provenance of the Xiashu Loess in Hefei was discussed. Studies of geochemical characteristics, grain size content and deposition rate show that the provenance of the Hefei Xiashu Loess differs from that of the nearby Zhenjiang loess and the Northwest China Loess which were derived from the northern deserts. The lithofacies palaeogeography and the paleoclimate indicate that the abundant fine-grained sediments of the alluvial-lacustrine deposits in the Huaihe floodplain seem to be the major source materials of the Hefei Xiashu Loess.

Key words: Xiashu Loess; OSL; geochemical characteristics; grain size; provenance; Hefei Basin

About the first author: GUAN Hou-chun, male, born in 1979, doctor candidate, senior engineer, mainly engages in investigation and study of the Quaternary geoenvironment; E-mail: guanhouchun@163.com.

About the corresponding author: ZHU Cheng, male, born in 1954, professor, doctoral supervisor, focus on the Quaternary environmental evolution and environmental archaeology; E-mail: zhuchengnj@126.com.

收稿日期: 2014-03-13; 改回日期: 2014-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(41371204, 41171163)、国家基础科学人才培养基金(J1103408)、安徽省公益性地质项目(2005-56)及中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010610608)联合资助。

作者简介: 管后春, 男, 1979年生, 博士生, 高级工程师, 主要从事第四纪地质调查与研究工作; E-mail: guanhouchun@163.com。

通讯作者: 朱诚, 男, 1954年生, 教授, 博士生导师, 主要从事第四纪环境演变和环境考古; E-mail: zhuchengnj@126.com。

诸多学者对黄土沉积,尤其是黄土起源、物源及古气候条件进行了大量研究,一系列的研究对象主要是关于中国西北干旱或半湿润大陆性季风区域^[1-16]。为了获得第四纪环境变化更加详实的信息,更全面地理解东亚季风活动及南侵,有必要进一步研究中国东部及南部湿润区风成沉积。长江中下游黄土-古土壤沉积是第四纪环境变化良好载体,记录了华东地区亚热带湿润气候变化的信息。近年来,调查研究长江中下游中晚更新世风成沉积成为全球变化研究热点之一。虽然中国南方黄土风成成因已经被广泛接受,但物源一直处在争议中^[1, 17-21]。传统的、占主导的观点认为南方黄土物源主要来自于北方沙漠^[1, 13-15];而有些学者认为冰期暴露的区域性河谷、湖床里细粒漫滩沉积物是重要的物源区,而且以往关于长江中下游物源研究集中于江南地区,缺乏江北区域的研究^[22-25]。

地处长江中下游地区江北的合肥盆地,风成下蜀黄土广泛分布,揭露的最大厚度超过40 m(图1)。地层岩性特征与江苏省宁镇地区的下蜀黄土相似,因而传统上命名为“下蜀组”^[26-27]。可见,上述命名仅依据岩性特征的相似,而缺乏其他科学研究依据;加之,该地区下蜀组年龄一直以来鲜见报道,仅有的邻区的3篇报道,还一直处于争议中。安徽地质志第四纪分册(1988)认为时代应归属为晚更新世,而另2篇报道将其归属为中更新世中晚期^[27-28]。前者是引用南京下蜀黄土年龄;然而后者样品取样位置,如安庆,位于大别山东南麓,而高达1500 m的大别山形成了一道障碍,阻碍了来自西北物源的粉尘(图1-a),不利于风成沉积。而且到目前下蜀组底界年龄未见报道。因而,以往下蜀组年龄不能代表合肥盆地地下蜀黄土沉积最早期时间。本文试图通过系统取光释光(OSL)样,及从沉积物地球化学特征、粒度与沉积速率,结合古气候特征探讨合肥下蜀黄土的年龄和物源。以期为研究长江中下游江北地区风成沉积,乃至中国南方风成沉积增加科学依据。

1 采样和分析

合肥盆地ZK0711钻孔下蜀黄土是长江中下游典型的黄土沉积剖面,地层主要有黄色、棕色粘土和粉质粘土组成,含大量铁锰结核(图2)。该剖面下蜀黄土厚35.2 m,下伏羲城组砂土、上覆1.00 m厚度的耕植土(图2-a)。下蜀黄土分层描述如下:

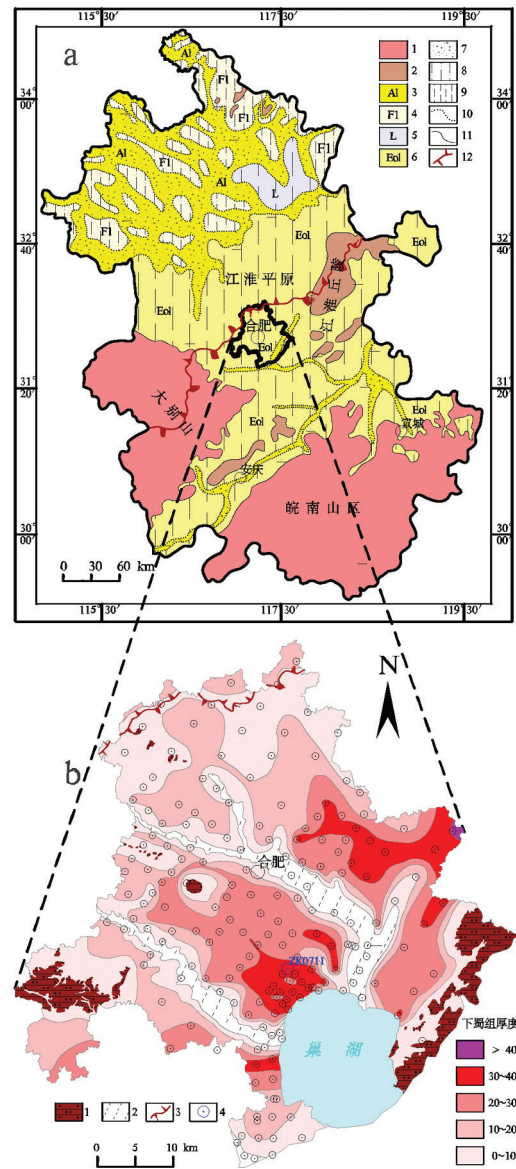


图1 研究区位置及合肥下蜀黄土厚度等值线图
a—安徽省中更新世中晚期—晚更新世岩相古地理图: 1—山地, 2—丘陵, 3—河流沉积物, 4—河湖漫滩沉积物, 5—湖泊沉积物, 6—风尘沉积, 7—砂, 8—粉质粘土, 9—粘土, 10—岩相界线, 11—地貌界线, 12—江淮分水岭; b—合肥盆地地下蜀黄土分布厚度等值线图: 1—基岩区, 2—剥蚀区(下蜀黄土已完全被河流侵蚀), 3—江淮分水岭, 4—下蜀黄土钻孔分布

Fig.1 Location of the study area and thickness of Xiashu Loess in Hefei basin

a—Mid-late Middle-Late Pleistocene lithofacies palaeogeography in Anhui Province (modified after Lithofacies Palaeogeographical Atlas of Anhui Province, 1990): 1—Mountain; 2—Hill; 3—River; 4—Alluvial flat; 5—Lake; 6—Aeolian dust deposits; 7—Sand; 8—Silty clay; 9—Clay; 10—Lithologic boundary; 11—Geomorphologic boundary; 12—Jianghuai Watershed; b—Thickness of Xiashu Loess in Hefei basin. 1—Bedrock area; 2—Erosion area (Xiashu Loess has been completely eroded by rivers); 3—Jianghuai Watershed; 4—Drill hole disclosing thickness of Xiashu Loess

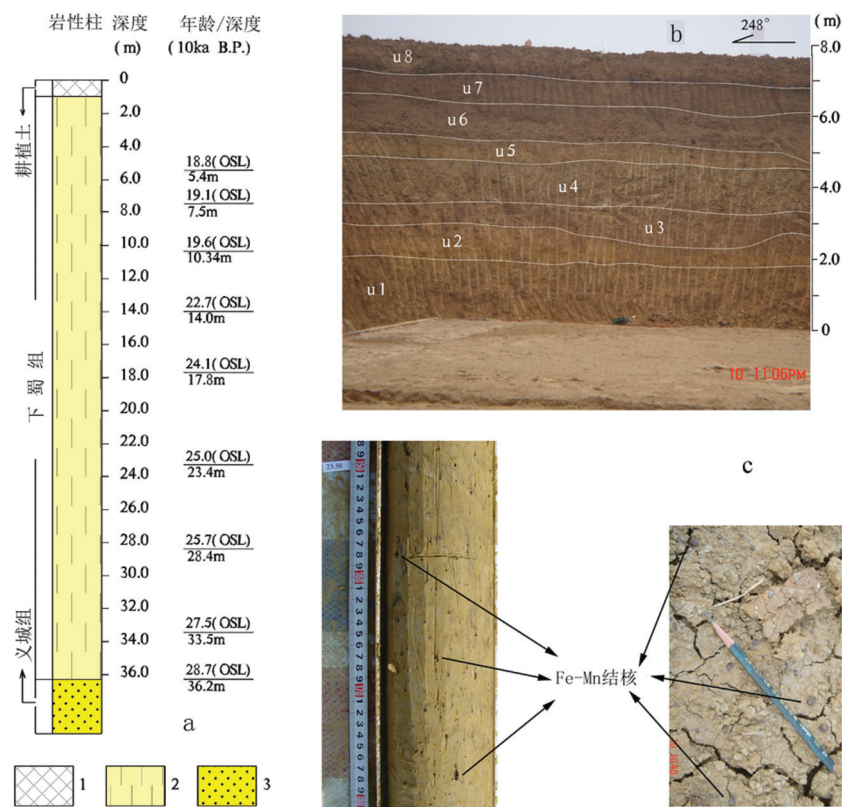


图2 ZK0711 钻孔岩性柱状图及野外调查典型剖面

a—ZK0711 钻孔岩性柱及 OSL 取样位置: 1—耕植土; 2—下蜀黄土(下蜀组); 3—义城组(砂); b—野外调查一人工剖面: u1—棕黄色粘土(未见底); u2—黄色粘土; u3—棕色粘土, u4—淡黄色粉质粘土, u5—黄色粘土, u6—暗棕色粘土, u7—棕色粘土, u8—棕黄色耕植土; c—钻孔岩性与野外调查发现的铁锰结核

Fig. 2 Lithologic columnar section of ZK0711 and a typical man-made profile during field investigation

a—Lithological columnar section and OSL samples site of ZK0711, 1—Cultivated soil; 2—Xiashu Loess; 3— Sands of Yicheng Formation; b— Man-made profile during field investigation, u1: Brownish yellow clay (bottom unseen); u2—Yellow clay; u3—Brown clay; u4—Light yellow silty clay; u5—Yellow clay; u6—Dark brown clay; u7—Brown clay; u8—Brown-yellow cultivated soil. c—Drill core, field investigated Fe-Mn nodule

耕植土	钻孔 ZK0711 厚 1.0 m	7.浅棕色粘土	厚 0.70 m
		6.姜黄色粘土	厚 3.30 m
	中晚更新世	5.浅棕色含少量铁锰结核粘土	厚 1.80 m
下蜀组(Qp ₂₋₃ ^{col})	厚 35.2 m	4.黄色含铁锰结核粘土, 铁锰结核含量 5%	厚 3.90 m
17.暗褐色粘土	厚 1.70 m	3.暗黄色粘土	厚 3.55 m
16.灰黄色-浅褐色粘土	厚 2.20 m	2.黄色含铁锰结核粘土, 铁锰结核含量 3%~5%	
15.棕褐色粘土	厚 2.40 m	1.黄色含钙质结核、铁锰结核粘土	厚 1.95 m
14.黄色粘土	厚 2.35 m		厚 2.80 m
13.姜黄色含少量铁锰结核粘土	厚 1.75 m	————— 假整合 —————	
12.黄色粘土厚	0.60 m	早—中更新世	
11.姜黄色粘土	厚 1.00 m	义城组上段(Qp ₁₋₂ ^{yc})	
10.黄色粘土, 铁锰结核含量 6%	2.65 m	棕红色粘土, 含钙质结核	厚大于 1.90 m
9.姜黄色粘土	厚 2.20 m	图2-b中 u8—耕植土; u6—u7 对应 17层—暗褐色	
8.黄色铁锰结核粘土, 铁锰结核含量 5%	厚 0.35 m	粘土; u4—u5 对应 16层灰黄色—浅褐色	

15层棕褐色粘土;u1-u2对应14层黄色粘土。从ZK0711钻孔下蜀黄土底至上采集了92个主量元素地球化学样品;9个OSL样品;889个粒度样品。地球化学样品风干后研磨并经200目筛选,本文分析的主量元素包括K₂O、Na₂O、CaO、MgO、SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃和FeO,分析是在国土资源部合肥矿产资源监督检测中心、采用XRF完成。所有样品分析采用标准控制,误差小于±2%。粒度样品经预处理后,由英国Malvern生产的Mastersizer 2000激光粒度分析仪测试完成,测试粒径范围0.01~2000 μm,测试误差小于2%。

2 结果与讨论

下蜀黄土样品主量元素含量如表1所示。考虑到粒度对化学组成的影响,为了进行对比分析,文中所有搜集数据的样品也是经过风干后200目筛选的。

图3显示了ZK0711钻孔剖面OSL年龄和深度之间的线性相关度很好。根据OSL年龄,下蜀组底界年龄约为287 ka B.P.,即合肥盆地地下蜀黄土起始年龄至少为中更新世晚期。

2.1 地球化学

合肥下蜀黄土与其他风成沉积化学风化趋势对比图(图4)显示:镇江黄土、巫山黄土及西北黄土在A-CN-K中沿着UCC→陆源页岩化学风化趋势线分布,而且巫山黄土与西北黄土的风化趋势线平

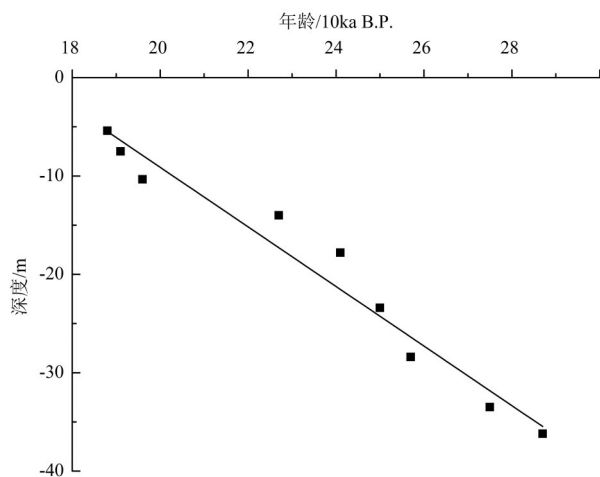


图3 ZK0711孔下蜀黄土深度与OSL拟合曲线
Fig.3 Fitting plots of OSL dating ages Nine samples, R (the coefficient of correlation) = 0.9775, P<0.001

行于三角模型中CN-A边,表明他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;而合肥黄土数据不在UCC→陆源页岩化学风化趋势线上分布,且分布较杂乱,用传统观点——南方黄土与西北黄土有着相同的物源,即来源于北方沙漠,难以解释这种现象。

Pye 研究发现,5~10 μm的细粉砂,在风力作用下,以长期悬浮的形势被搬运,是远源北方沙漠风尘沉积物的主要组成部分^[35]。理论上讲,合肥和镇江都位于长江中下游,气候环境条件相当、距离北方沙漠距离相似,那么风尘沉积并经后期风化,相关地球化学指标的变异系数也应相似。然而,合肥黄土的CIA、Na/K和SiO₂/Al₂O₃等变化系数都远远大于与西北黄土变异系数相似的镇江黄土(图5),至少暗示了作为镇江黄土和西北黄土物源的北方沙漠^[1,21]不是合肥黄土的主要物源。

西北黄土沉积中Si和Al在风化过程中是稳定的^[9],研究表明SiO₂/Al₂O₃比值可以作为研究风尘起源物质的粒度代用指标^[18]。沉积物经分选,作为黄土中主要成分石英矿物,因抗风化、淋滤以致在粗颗粒物中富集;而Al在细粒物中富集。可见,沉积

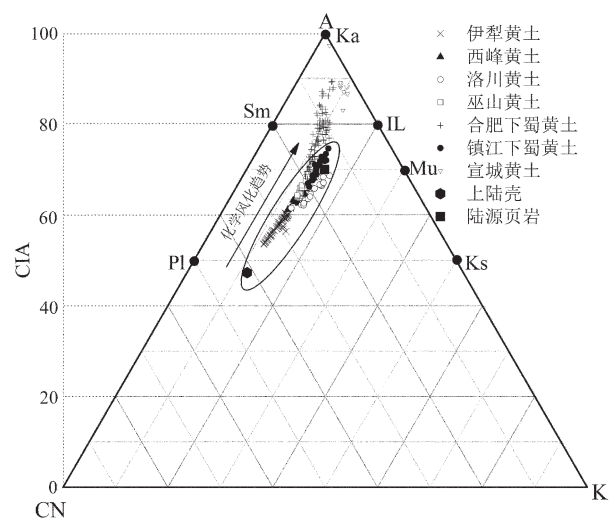


图4 合肥下蜀黄土与其他风成沉积化学风化趋势对比
A-CN-K三角图
Ka—高岭石;Sm—蒙脱石;IL—伊利石;Mu—白云母;Pl—斜长石;
Ks—长石

Fig.4 A-CN-K diagram showing the trends of chemical weathering of Hefei Loess and loess of other aeolian dust deposits
A=Al₂O₃; CN=CaO*+Na₂O; K=K₂O; Ka—Kaolinite; Sm—Smectite; IL—Illite; Mu—Muscovite; Pl—Plagioclase; Ks—K—feldspar

表1 合肥盆地ZK0711钻孔下蜀黄土主量元素含量(%)及元素比值

Table 1 Contents (%) and ratios of major elements in the Loess from ZK0711 bore section of Hefei Basin

深度/cm	原样号	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	CIA*	Na/K*	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ *
124.40	0711-DH1	2.22	0.92	0.96	1.34	66.06	5.69	15.22	0.22	73.34	0.65	7.38
164.60	0711-DH2	2.28	1.05	0.90	1.34	66.63	6.02	14.98	0.13	71.74	0.73	7.56
203.95	0711-DH3	2.17	1.06	0.92	1.32	66.99	5.95	14.53	0.17	71.34	0.77	7.84
240.70	0711-DH4	1.80	0.92	0.84	1.04	68.98	6.03	13.53	0.10	72.83	0.80	8.66
281.75	0711-DH5	1.63	0.69	0.79	0.99	66.43	6.43	15.42	0.14	78.92	0.66	7.32
320.65	0711-DH6	1.96	0.71	0.91	1.28	64.96	5.89	16.49	0.15	78.40	0.57	6.70
337.95	0711-DH7	2.11	0.82	0.93	1.40	65.27	5.86	16.01	0.18	75.93	0.61	6.93
376.90	0711-DH8	2.20	0.94	0.99	1.49	65.92	5.71	15.41	0.17	73.41	0.67	7.27
419.55	0711-DH9	2.35	1.07	1.09	1.60	65.84	5.83	15.06	0.06	70.84	0.72	7.43
456.95	0711-DH10	2.39	1.11	1.11	1.65	65.96	5.72	14.90	0.15	70.04	0.73	7.52
495.25	0711-DH11	2.44	1.18	1.12	1.72	66.66	5.50	14.62	0.17	68.70	0.76	7.75
540.15	0711-DH12	2.28	1.17	1.09	1.56	68.03	5.29	14.29	0.19	68.88	0.81	8.09
577.55	0711-DH13	2.23	1.09	1.03	1.45	67.50	5.45	14.44	0.13	70.18	0.77	7.95
617.70	0711-DH14	2.26	1.11	1.02	1.48	67.55	5.53	14.56	0.14	70.14	0.77	7.89
659.25	0711-DH15	2.26	1.10	0.99	1.48	67.77	5.36	14.49	0.15	70.27	0.77	7.95
700.80	0711-DH16	2.08	1.08	0.87	1.25	69.45	5.20	13.82	0.13	70.85	0.82	8.55
742.35	0711-DH17	1.88	0.93	0.74	1.01	70.64	5.29	13.21	0.14	72.67	0.77	9.09
763.10	0711-DH18	1.96	0.69	0.82	1.13	65.81	6.23	15.75	0.13	77.88	0.55	7.10
823.85	0711-DH20	1.82	0.88	0.80	1.08	68.90	5.32	14.39	0.13	74.48	0.76	8.14
853.25	0711-DH21	2.10	0.84	0.90	1.34	66.89	6.14	14.94	0.09	74.43	0.63	7.61
882.55	0711-DH22	1.74	0.86	0.74	1.00	71.31	5.57	12.61	0.17	72.85	0.77	9.61
911.95	0711-DH23	1.72	0.77	0.69	0.96	71.01	5.66	13.17	0.14	74.80	0.70	9.17
941.30	0711-DH24	1.76	0.67	0.70	1.01	68.42	5.75	14.66	0.12	77.77	0.60	7.93
970.65	0711-DH25	1.73	0.58	0.70	1.03	66.69	6.62	15.18	0.12	79.76	0.52	7.47
995.15	0711-DH26	1.81	0.44	0.68	1.09	65.60	6.95	15.99	0.10	82.15	0.38	6.97
1035.20	0711-DH27	1.80	0.32	0.78	1.16	61.51	7.39	18.47	0.08	85.92	0.27	5.66
1077.40	0711-DH28	1.86	0.58	0.60	1.09	67.80	6.62	14.56	0.54	78.49	0.49	7.91
1119.55	0711-DH29	1.51	0.38	0.78	0.92	70.81	7.34	12.88	0.08	81.37	0.40	9.34
1161.75	0711-DH30	1.65	0.26	0.76	1.06	61.22	7.08	18.65	0.12	87.50	0.24	5.58
1203.95	0711-DH31	1.81	0.33	0.72	1.14	62.41	7.40	17.72	0.10	85.23	0.28	5.99
1242.70	0711-DH32	1.91	0.58	0.55	1.02	69.50	6.09	14.52	0.12	78.21	0.48	8.13
1278.05	0711-DH33	1.85	0.35	0.66	1.07	64.99	7.09	16.71	0.09	83.86	0.30	6.61
1313.35	0711-DH34	1.72	0.29	0.73	1.08	63.08	6.58	18.17	0.08	86.48	0.26	5.90
1348.70	0711-DH35	2.15	0.48	0.65	1.23	65.42	6.04	16.62	0.13	80.71	0.35	6.69
1380.10	0711-DH36	2.29	0.63	0.59	1.18	67.89	5.91	15.40	0.10	76.91	0.43	7.50
1435.20	0711-DH38	2.29	0.64	0.73	1.26	68.22	6.01	14.88	0.13	76.16	0.44	7.79
1462.00	0711-DH39	2.01	0.62	0.67	1.12	70.41	5.34	14.16	0.08	76.75	0.48	8.46
1475.30	0711-DH40	1.56	0.43	0.54	0.77	72.90	5.54	13.04	0.05	80.44	0.43	9.50
1532.00	0711-DH41	1.67	0.39	0.64	0.89	70.01	5.45	14.98	0.08	82.60	0.37	7.94
1565.30	0711-DH42	1.73	0.40	0.70	0.96	69.01	5.54	15.57	0.59	82.72	0.37	7.53
1599.50	0711-DH43	1.66	0.30	0.74	1.03	63.28	7.04	17.14	0.17	85.91	0.28	6.28

续表1

深度/cm	原样号	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	CIA [*]	Na/K ⁺	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ ⁺
1652.55	0711-DH44	1.78	0.29	0.77	1.11	61.89	6.91	18.49	0.06	86.42	0.25	5.69
1686.70	0711-DH45	1.70	0.39	0.70	1.03	67.69	6.09	15.73	0.06	83.15	0.36	7.32
1720.80	0711-DH46	1.59	0.36	0.71	1.04	66.69	6.33	15.58	0.10	84.00	0.36	7.28
1788.10	0711-DH47	1.95	0.46	0.70	1.21	67.62	5.89	15.62	0.06	80.89	0.37	7.36
1821.60	0711-DH49	2.13	0.37	0.78	1.24	64.19	7.06	16.56	0.10	82.22	0.28	6.59
1855.10	0711-DH50	2.11	0.41	0.73	1.09	66.99	5.70	16.40	0.10	81.61	0.31	6.94
1888.60	0711-DH51	2.26	0.30	0.86	1.30	61.00	7.35	18.81	0.32	84.48	0.21	5.51
1922.10	0711-DH52	2.22	0.32	0.87	1.33	60.42	6.92	18.27	0.08	84.01	0.22	5.62
1955.60	0711-DH53	2.14	0.54	0.80	1.31	66.02	5.75	16.37	0.18	79.75	0.40	6.86
1991.00	0711-DH54	1.75	0.58	0.64	0.91	73.43	4.42	13.80	0.12	78.08	0.52	9.05
2027.00	0711-DH55	1.58	0.46	0.64	0.79	73.62	4.35	13.85	0.10	80.79	0.46	9.03
2063.00	0711-DH56	1.33	0.32	0.62	0.79	71.95	5.17	13.88	0.10	84.68	0.37	8.81
2099.00	0711-DH57	1.37	0.30	0.67	0.91	71.15	5.14	14.87	0.12	85.67	0.34	8.13
2135.00	0711-DH58	1.40	0.28	0.70	0.94	69.37	5.37	15.81	0.15	86.57	0.31	7.46
2163.00	0711-DH59	1.35	0.26	0.68	0.92	69.22	5.41	15.80	0.12	87.14	0.30	7.45
2199.45	0711-DH60	1.22	0.26	0.67	0.89	69.73	5.26	15.43	0.14	87.56	0.33	7.68
2235.95	0711-DH61	1.18	0.26	0.68	0.88	69.97	4.88	15.77	0.10	88.00	0.34	7.54
2272.45	0711-DH62	1.25	0.25	0.72	0.90	68.98	4.80	16.67	0.08	88.38	0.31	7.03
2308.95	0711-DH63	1.63	0.45	0.72	0.96	71.70	4.95	14.42	0.10	81.31	0.43	8.45
2383.25	0711-DH64	1.75	0.33	0.83	1.13	67.01	5.98	15.86	0.08	84.07	0.29	7.18
2420.55	0711-DH66	1.76	0.35	0.79	1.12	68.85	5.64	15.22	0.09	83.00	0.32	7.69
2457.75	0711-DH67	1.59	0.33	0.70	1.01	70.77	5.21	14.51	0.08	83.50	0.33	8.29
2495.00	0711-DH68	1.61	0.36	0.75	1.11	70.16	5.49	14.45	0.10	82.85	0.35	8.26
2532.25	0711-DH69	1.26	0.24	0.70	0.95	70.35	5.32	15.09	0.08	87.43	0.29	7.93
2569.45	0711-DH70	1.26	0.23	0.75	0.96	67.96	5.64	15.76	0.13	88.07	0.28	7.33
2580.60	0711-DH71	1.09	0.22	0.66	0.87	71.13	5.09	14.41	0.08	88.25	0.31	8.39
2634.00	0711-DH72	1.07	0.21	0.68	0.88	69.69	5.51	15.24	0.09	89.10	0.30	7.77
2700.60	0711-DH73	1.17	0.21	0.77	0.99	66.88	5.99	16.58	0.08	89.38	0.28	6.86
2734.00	0711-DH75	1.77	0.39	0.68	1.19	67.28	5.72	15.82	0.08	82.90	0.35	7.23
2767.30	0711-DH76	1.69	0.40	0.79	1.17	68.42	5.86	14.98	0.14	82.35	0.37	7.76
2800.65	0711-DH77	1.64	0.33	0.85	1.13	66.91	5.86	15.94	0.28	84.51	0.32	7.14
2838.45	0711-DH78	1.69	0.42	0.80	1.14	68.70	5.48	14.99	0.05	82.06	0.39	7.79
2877.85	0711-DH79	2.10	0.63	0.91	1.56	67.29	5.79	15.13	0.06	77.39	0.47	7.56
2917.25	0711-DH80	1.55	0.35	0.82	1.21	65.20	5.70	15.46	0.08	84.24	0.36	7.17
2956.65	0711-DH81	1.49	0.41	0.77	1.15	69.55	5.19	14.49	0.09	82.76	0.44	8.16
2996.05	0711-DH82	1.46	0.42	0.75	1.17	70.61	5.34	14.36	0.06	82.62	0.46	8.36
3035.45	0711-DH83	1.18	0.36	0.69	1.01	70.90	5.14	13.99	0.06	84.75	0.48	8.62
3090.75	0711-DH84	1.21	0.32	0.75	1.04	69.86	5.44	14.88	0.06	86.20	0.41	7.98
3117.35	0711-DH86	1.09	0.27	0.82	1.02	66.97	6.00	15.65	0.08	88.24	0.38	7.27
3143.85	0711-DH87	1.57	0.43	0.77	1.18	66.44	5.99	16.06	0.08	83.46	0.43	7.03
3170.45	0711-DH88	1.80	0.49	0.94	1.51	66.47	6.07	15.74	0.08	81.26	0.43	7.18

续表1

深度/cm	原样号	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	CIA [*]	Na/K [*]	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ [*]
3197.05	0711-DH89	1.84	0.45	0.97	1.54	65.17	6.14	16.04	0.44	81.92	0.39	6.91
3223.55	0711-DH90	1.94	0.62	0.96	1.57	66.60	6.02	15.14	0.06	78.22	0.50	7.48
3246.65	0711-DH91	2.01	0.69	0.94	1.59	67.72	5.82	14.99	0.06	76.81	0.54	7.68
3280.50	0711-DH92	2.05	0.80	0.94	1.59	68.76	5.63	14.43	0.17	74.48	0.61	8.10
3384.15	0711-DH93	1.86	0.85	0.97	1.50	70.30	5.14	13.99	0.06	74.02	0.72	8.54
3417.85	0711-DH95	1.07	0.39	1.12	1.09	68.74	5.41	14.96	0.06	85.68	0.58	7.81
3451.55	0711-DH96	1.03	0.37	1.98	1.15	65.85	6.60	15.33	0.05	86.51	0.57	7.30
3501.75	0711-DH97	0.91	0.36	3.45	1.17	65.13	4.98	15.21	0.23	87.23	0.63	7.28
3536.55	0711-DH98	1.18	0.58	0.77	1.21	68.15	4.55	15.39	0.05	82.56	0.77	7.53
3583.75	0711-DH99	1.75	0.83	0.84	1.47	67.78	4.71	14.97	0.08	76.02	0.74	7.70

表2 合肥盆地ZK0711钻孔下蜀黄土与其他风成沉积
主量元素比值Table 2 Ratios of major elements in the loess from
ZK0711 drill section of Hefei Basin
and other aeolian dust deposits

位置	样品	统计类别	CIA [*]	Na/K [*]	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ [*]
本文下蜀黄土	n=92	最小值	68.7	0.21	5.51
		最大值	89.38	0.82	9.61
		平均值	80.53	0.47	7.59
		变异系数	0.07	0.37	0.11
新疆伊犁黄土 ^[9]	n=56	平均值	57.59	1.23	7.4
		变异系数	0.04	0.12	0.02
西峰黄土 ^[30]	n=15	最小值	61.21	0.81	7.31
		最大值	65.95	1.16	8.58
		平均值	63.25	1.01	8.05
		变异系数	0.02	0.09	0.04
西峰古土壤 ^[30]	n=15	最小值	63.79	0.75	7.3
		最大值	68.95	1.07	8.5
		平均值	66.26	0.91	7.78
		变异系数	0.02	0.1	0.04
洛川黄土 ^[6]	n=21	最小值	62.21	0.6	7
		最大值	68.77	1.21	8.99
		平均值	64.91	0.83	7.86
		变异系数	0.03	0.18	0.06
巫山黄土 ^[31]	n=29	平均值	66.85	0.82	8.42
		变异系数	0.04	0.09	0.06
镇江黄土 ^[32]	n=20	平均值	70.19	0.61	8.66
		变异系数	0.03	0.13	0.04
宣城黄土 ^[33]	n=9	平均值	88.45	0.18	9.02
		变异系数	0.04	0.31	0.15
上陆壳(UCC) ^[34]			47.92	1.8	7.38
陆源页岩 ^[34]			70.36	0.51	5.6

注: CIA^{*}, Na/K^{*} 和 SiO₂/Al₂O₃^{*} 为摩尔比。

物分选会导致 SiO₂/Al₂O₃ 比值随着离物源区距离的增加而减小。任何风化都会致使 Si 的流失多于富集。合肥下蜀黄土 CIA 值归属于中等—强烈化学风化强度区间, 却有约 8% 样品的 SiO₂/Al₂O₃ 比值大于洛川黄土和西峰黄土的最大值 8.99 (表 1~2)。经过长距离的运输和分选, SiO₂/Al₂O₃ 比值应该更集中; 但是图 6 显示合肥下蜀黄土的 SiO₂/Al₂O₃ 比值较西北黄土更分散, 宣城黄土也是如此。上述现象也暗示北方黄土不是合肥黄土的主要物源。

2.2 粒度

粒度是最基本的沉积物理特征, 粒度组成是沉积物分类、命名的基础。粒度特征包括粒径、分布, 均受控于母源特征、传输介质、运移模式、沉积环境等。因此, 粒度分析是研究沉积环境、传输过程及机制的一个重要手段^[1], 近年来已被用于风尘起源的沉积环境研究^[20-21]。

理论上讲, 大于 50 μm 粗粒很难悬浮在风中被长距离传输, 而是常作为风尘物的夹持组分, 以跃移模式从物源区被搬运, 形成堆积区^[36]。Pye (1987)^[35] 认为在中等风暴条件下, 大于 50 μm 粗粒被搬运的模式主要有蠕动、跃移和变性跃移。黄土高原的研究表明, 这些粗粒物质主要分布于和沙漠进退关系密切的北方、西北沙漠边缘黄土中, 而古土壤中较少。在 ZK0711 钻孔剖面中, 下蜀黄土中大于 50 μm 粗粒组分平均值为 14.07%, 远远大于西北黄土等其他风尘沉积, 也大于宣城向阳剖面黄土—古土壤平均值和镇江大港剖面平均值 (表 3~4), 推断其物源有别于其他

表3 合肥下蜀黄土粒度含量
Table 3 Content of grain sizes in the Xiaoshu Loess from ZK0711 bore section of Hefei Basin

层号	深度/cm	样品编号	统计类别	>50 μm	10~50 μm	5~10 μm	<5 μm	层号	深度/cm	样品编号	统计类别	>50 μm	10~50 μm	5~10 μm	<5 μm
17	100~270	L1~L75	最小值	3.14	40.80	8.72	11.42	8	1785~1820	L857~L875	最小值	13.88	24.58	8.69	13.12
			最大值	34.45	57.89	18.72	29.64				最大值	53.61	44.50	16.55	31.97
			平均值	17.43	51.18	13.73	17.66				平均值	24.74	39.22	14.21	21.84
16	270~490	L77~L177	最小值	3.27	32.67	7.90	9.67	7	1820~1890	L877~L911	最小值	8.43	29.92	8.69	12.25
			最大值	37.12	58.93	19.22	29.77				最大值	49.13	46.80	18.56	33.38
			平均值	18.28	48.61	13.91	19.20				平均值	24.44	37.14	14.64	23.79
15	490~730	L179~L287	最小值	4.93	31.49	4.32	5.58	6	1890~2220	L913~L1079	最小值	1.54	24.81	10.49	14.94
			最大值	58.61	57.14	17.64	30.36				最大值	47.72	51.29	24.11	40.93
			平均值	23.35	49.06	11.68	15.91				平均值	12.34	41.52	17.80	28.33
14	730~965	L289~L423	最小值	3.19	42.05	7.37	9.16	5	2220~2400	L1081~L1167	最小值	2.49	38.67	13.41	16.48
			最大值	41.42	58.13	18.53	27.06				最大值	24.72	50.58	20.72	37.19
			平均值	17.41	50.88	13.55	18.16				平均值	11.40	45.28	17.22	26.10
13	965~1140	L425~L505	最小值	8.74	34.46	5.92	8.13	4	2400~2790	L1169~L1367	最小值	0.29	31.67	12.53	16.13
			最大值	39.28	55.39	18.10	26.87				最大值	30.49	50.27	24.20	43.83
			平均值	20.64	46.99	13.60	18.77				平均值	9.08	42.78	18.57	29.56
12	1140~1200	L507~L531	最小值	8.33	41.07	11.88	14.60	3	2790~3145	L1369~L1553	最小值	0.34	25.89	13.86	19.91
			最大值	31.34	47.58	19.81	28.18				最大值	28.84	50.12	23.61	43.93
			平均值	18.84	44.24	15.77	21.15				平均值	5.84	42.67	19.52	31.97
11	1200~1300	L533~L579	最小值	4.09	39.55	11.98	13.66	2	3145~3340	L1555~L1661	最小值	0.33	32.16	14.01	17.56
			最大值	28.16	52.07	23.66	31.15				最大值	25.45	53.70	25.50	44.03
			平均值	15.56	46.66	16.16	21.63				平均值	8.21	43.22	19.26	29.32
10	1300~1565	L581~L739	最小值	3.09	34.07	6.35	8.64	1	3340~3620	L11663~L1777	最小值	2.92	27.41	10.98	22.57
			最大值	50.93	57.92	22.37	33.07				最大值	36.45	45.04	21.84	45.04
			平均值	18.07	45.75	15.22	20.96				平均值	15.41	35.74	16.11	32.74
9	1565~1785	L741~L855	最小值	5.00	31.50	6.88	8.60				最小值				
			最大值	46.87	54.65	22.57	33.71				最大值				
			平均值	18.81	43.81	15.37	22.01				平均值				

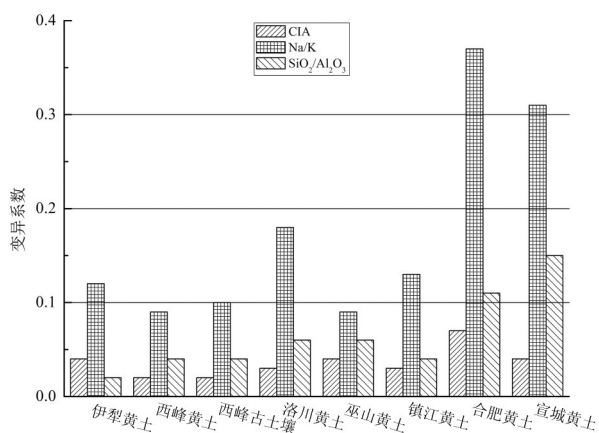


图5 合肥下蜀黄土及其他风成沉积地球化学变异系数对比
Fig. 5 Geochemical coefficients of variation from Hefei Loess and loess of other aeolian dust deposits

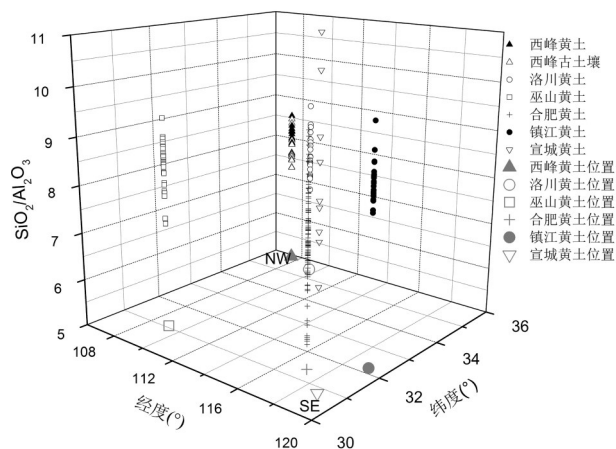


图6 合肥下蜀黄土及其他风成沉积 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 变化图
Fig. 6 Spatial changes in $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios plotted against longitude and latitude for samples from Hefei Basin and other aeolian dust deposits

黄土,同时指示了近源搬运堆积特征。

2.3 沉积速率

我们尝试运用沉积速率检验合肥黄土与西北黄土和镇江黄土物源是否相同。镇江黄土的平均沉积速率为0.079 m/ka,渭南黄土为0.1 m/ka,西峰黄土为0.093 m/ka^[24];合肥下蜀黄土厚度为35.2 m,底界年龄为287 ka B.P.,由此推算其沉积速率至少为0.123 m/ka。西北黄土主要来源于北方沙漠,如果合肥黄土也主要来源于北方沙漠、部分来源于西

北黄土的再次扬尘,那么地处北亚热带、而远离沙漠区的沉积速率大于渭南、西峰等近源堆积区,这种现象难以解释。由此可见,合肥黄土物源与镇江黄土和西北黄土是不同的。

2.4 合肥下蜀黄土物源区探讨

黄土沉积要求风尘物源区裸露和能够夹持风尘颗粒物的风力^[22-24]。淮河沿岸及淮北地区泛滥平原中更新世中晚期的沉积相主要为河流相、湖湘和湖沼相(图1-a);冰期时,这些沉积区的大量细粒沉

表4 合肥下蜀黄土及其他风成沉积粒度含量(%)

Table 4 Content of grain sizes in the Xiashu Loess from ZK0711 bore section of Hefei Basin and other aeolian dust deposits(%)

位置	类别	粒径			
		>50 μm	10~50 μm	5~10 μm	<5 μm
ZK0711 孔	下蜀黄土最大值	58.61	58.93	25.50	45.05
	下蜀黄土最小值	0.29	24.58	4.32	5.58
	下蜀黄土平均值	14.07	44.54	16.15	24.60
宣城向阳剖面 ^[20]	黄土	4.76	37.22	18.49	39.55
	古土壤	3.53	33.56	19.85	43.06
	平均值	4.16	35.00	19.46	41.38
镇江大港剖面 ^[21]	最大值	6.82	58.40	26.50	33.99
	最小值	0.00	40.04	15.20	21.35
	平均值	4.18	49.36	18.02	28.44
洛川剖面 ^[1]	马兰黄土	6.80	53	12.50	27.40
	离石黄土上部	10%	52.70	11.00	26.30
	离石古土壤上部	7.10	45.70	12.70	32.00

积物(粘土、粉质粘土、砂等)成为了合肥下蜀黄土的潜在物源。西北黄土研究早证实了东亚季风在中更新世时期开始加强^[24],冰期,北亚热带气候也变得干冷,北方高纬寒冷加强了西伯利亚高压,诱发冬季风加强,导致气候变得更加干冷^[24];北亚热带区降雨量和海平面降低,引起河湖水位下降及植被退化,从而导致河谷、湖床及湖沼沉积大面积裸露。在中更新世中晚期一晚更新世淮北地层分区潘集组和荊塘组中的孢粉和介形类化石记录了上述的多期次相对干冷气候变化^[26,37-38];相邻地区的南京下蜀黄土^[33]和苏北盆地孢粉也证实了同期为干冷气候^[40-41]。冰期,淮河沿岸及淮北地区泛滥平原,植被稀疏,很容易被风扬起而成为物源区。强大的冬季风和区域性风力把裸露的河谷、湖床及湖沼沉积物细颗粒卷起、混合,沉积在邻近区域,形成了合肥下蜀黄土。

3 结 论

(1)根据 OSL 年龄,合肥盆地蜀组底界年龄约为 287 ka B.P.,即合肥盆地蜀黄土起始年龄为中更新世晚期。

(2)合肥下蜀黄土地球化学特征、粒径及沉积速率均指示其物源有别于镇江下蜀黄土和西北黄土,北方沙漠不是其主要物源区。

(3)结合岩相古地理及古气候特征讨论,淮河沿岸及淮北地区河流相、湖相及湖沼相细粒沉积物或许是其潜在的物源。

参考文献(References):

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:中国海洋出版社, 1985.
Liu Tongsheng. Loess and the Environment[M]. Beijing: China Ocean Press, 1985 (in Chinese with English abstract).
- [2] Ding Z L, Sun J M, Rutter N W, et al. Changes in sand content of loess deposits along a north-south transect of the Chinese loess plateau and the implication for desert variation[J]. Quaternary Research, 1999, 52: 56-62.
- [3] Ding Z L, Sun J M, Yang S Y, et al. Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implication for its origin, source provenance and paleoclimate change[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65: 901-913.
- [4] 陈骏, 王洪涛, 鹿化煜. 陕西洛川黄土沉积物稀土元素及其它微量元素化学淋滤研究[J]. 地质学报, 1996, 70: 61-72.
Chen Jun, Wang Hongtao, Lu Huayu. Behaviors of REE and other trace elements during pedological weathering—evidence from chemical leaching of loess and paleosol from the Luochuan section in central China[J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70: 61-72 (in Chinese with English abstract).
- [5] Chen J, Ji J F, Qiu G, et al. Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan loess paleosol sequence[J]. Science in China (Series D), 1998, 41: 235-241.
- [6] Chen J, An Z S, Liu L W, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland[J]. Science in China (Series D), 2001, 44: 403-413.
- [7] 刘进峰, 郭正堂, 郝青振, 等. 甘肃秦安糜子湾剖面中新世风尘堆积的磁性地层学研究[J]. 第四纪研究, 2005, 25(4): 503-509.
Liu Jinfeng, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Magnetostratigraphy of the Miziwan Miocene eolian deposits in Qin'an country (Gansu Province)[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25 (4): 503-509 (in Chinese with English abstract).
- [8] Liu J F, Guo Z T, Qiao Y S, et al. Eolian origin of the Miocene loess-soil sequence at Qin'an, China: Evidence of quartz morphology and quartz grain-size[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 117-120.
- [9] Stevens T, Armitage S J, Lu H Y, et al. Sedimentation and diagenesis of Chinese loess: Implications for the preservation of continuous, high-resolution climate records[J]. Geology, 2006, 34 (10): 849-852.
- [10] Sun D H, Su R X, Bloemendal J, et al. Grain-size and accumulation rate records from Late Cenozoic aeolian sequences in northern China: Implications for variations in the East Asian winter monsoon and westerly atmospheric circulation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 264 (1/2): 39-53.
- [11] Xiong S F, Ding Z L, Zhu Y J, et al. A~6 Ma chemical weathering history, the grain size dependence of chemical weathering intensity, and its implications for provenance change of the Chinese loess-red clay deposit[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29: 1911-1922.
- [12] 顾兆炎, 韩家懋, 刘东生. 中国第四纪黄土地球化学研究进展[J]. 第四纪研究, 2000, 20, 41-55.
Gu Zhaoyan, Han Jiamao, Liu Tongsheng. Progress in geochemical research on the loess and other Quaternary deposits in China[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20: 41-55 (in Chinese with English abstract).
- [13] 谢远云, 张序强, 何葵, 等. 青藏高原东北缘黄土粒度组成及物

- 质来源分析[J]. 中国地质, 2002, 30(3): 317–321.
- Xie Yuanyun, Zhang Xuqiang, He Kui, et al. Grain-size distribution and material source analysis of loess on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 2002, 30(3): 317–321 (in Chinese with English abstract).
- [14] 谢远云, 李长安, 周嘉, 等. 陇西民和黄土 CaCO₃ 和有机碳总量的含量变化及其气候指标的局限性[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 99–104.
- Xie Yuanyun, Li Chang'an, Zhou Jia, et al. Variations of the CaCO₃ and total organic carbon contents in the Minhe loess and their limitations as climatic proxies[J]. *Geology in China*, 2003, 30(1): 99–104 (in Chinese with English abstract).
- [15] 谢远云, 李长安, 张序强, 等. 青藏高原东北缘黄土的气候演化与高原隆生的耦合[J]. 中国地质, 2003, 30(4): 436–441.
- Xie Yuanyun, Li Chang'an, Zhang Xuqiang, et al. Climatic evolution of loess on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and its coupling with plateau uplift[J]. *Geology in China*, 2003, 30(4): 436–441 (in Chinese with English abstract).
- [16] 师焕芝, 李福春, 孙旭辉, 等. 洛川黄土/古土壤中有有机碳的分布特征及其与粘土矿物的相关性[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1355–1362.
- Shi Huanzhi, Li Fuchun, Sun Xuhui, et al. Distribution of organic carbon in the Luochuan loess/paleosol and its relationship with clay minerals[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1355–1362 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李福春, 谢昌仁, 金章东, 等. 南京老虎山黄土剖面中铷锶地球化学和磁化率与古气候变化的关系[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 93–98.
- Li Fuchun, Xie Changren, Jin Zhangdong, et al. Rubidium and strontium geochemistry in the Laohushan loess section, Nanjing, and relation between magnetic susceptibility and paleoclimatic change[J]. *Geology in China*, 2003, 30(1): 93–98 (in Chinese with English abstract).
- [18] 柏道远, 李长安, 陈渡平, 等. 化学风化指数和磁化率对洞庭盆地第四纪古气候变化的响应[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 779–785.
- Bai Daoyuan, Li Changan, Chen Duping, et al. Chemical weathering index and magnetic susceptibility of deposits and their responses to the Quaternary climate in Dongting Basin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 779–785 (in Chinese with English abstract).
- [19] Pye K. The nature, origin and accumulation of loess[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14: 653–667.
- [20] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜, 等. 皖南第四纪风尘堆积序列粒度及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 73–81.
- Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu, et al. The grain-size fractures of Quaternary aeolian-dust deposition sequence in South Anhui and their significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(4): 73–81.
- [21] 李徐生. 长江以南第四纪风尘堆积序列与环境记录研究[D]. 南京: 南京大学, 2001.
- Li Xusheng. Quaternary Aeolian-dust Accumulation Sequences to the South of the Yangze River and Their Environmental Records[D]. Njing: Nanjing University, 2001 (in Chinese with English abstract).
- [22] Qiao Y S, Guo Z T, Hao Q Z, et al. Loess-soil sequences in southern Anhui Province: magnetostratigraphy and paleoclimatic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48, 2088–2093.
- [23] 吴胜光. 江苏镇江下蜀土的初步研究[C]// 刘东生, 安芷生主编. 黄土·第四纪地质·全球变化(第三集). 北京: 科学出版社, 1992, 122–127.
- Wu Shengguang. A preliminary study on the “Xiashu” clay in Zhenjiang, Jiangsu[C]// Liu Tongsheng, An Zhisheng (ed.). *Loess, Quaternary Geology and Global Change, III*. Beijing: Science Press, 1992, 122–127 (in Chinese with English abstract).
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 安徽省地质矿产局区域地质调查队. 安徽地层志第四纪分册[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1988, 30–31.
- Regional Geological Survey Team of Anhui Province. *Quaternary Sciences Volume of Stratigraphic Chronicles of Anhui*[M]. Hefei: Anhui science and Technology Press, 1988, 30–31 (in Chinese).
- [27] 于振江, 彭玉怀. 安徽省第四纪岩石地层序列[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 254–260.
- Yu Zhenjiang, Peng Yuhuai. Quaternary lithostratigraphic sequence in Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 254–260 (in Chinese with English abstract).
- [28] 于振江, 黄多成. 安徽省沿江地区网纹红土和下蜀土的形成环境及其年龄[J]. 安徽地质, 1996, 6(3): 48–56.
- Yu Zhenjiang, Huang Duo Cheng. Formation environment of net-veined laterite and Xiashu loess and their ages in the area along the Yangtze River, Anhui Province[J]. *Geology of Anhui*, 1996, 6(3): 48–56 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李传想, 宋友桂. 新疆伊犁黄土化学风化特征及其控制因素[J].

- 高校地质学报, 2011, 17(4): 611–619.
- Li Chuanxiang, Song Yougui. Chemical weathering characteristics and controlling factors of the Ili loess, Xinjiang[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(4): 611–619 (in Chinese with English abstract)
- [30] 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, Q04004, doi: 10.1029/2008GC002331.
- [31] 张玉芬, 李长安, 熊德强, 等. “巫山黄土”氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 352–360.
- Zhang Yufen, Li Chang'an, Xiong Deqiang, et al. Oxide geochemical characteristics and paleoclimate records of “Wushan loess”[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 352–360 (in Chinese with English abstract)
- [32] Chen Y Y, Li X S, Han Z Y, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 341–352.
- [33] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 75–82.
- Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu. Oxide-geochemistry features and paleoclimatic records of the aeolian-dust depositional sequence in southern Anhui Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(4): 75–82 (in Chinese with English abstract).
- [34] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. London: Blackwell, 1985.
- [35] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits[M]. London: Academic Press, 1987, 1–165.
- [36] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. Beijing: Science Press, 1959.
- [37] 于振江. 安徽省淮北平原东部地区第四纪地层[J]. 地层学杂志, 1988, 12(1): 53–60.
- Yu Zhenjiang. The Quaternary strata in the east area of Huaibei plain, Anhui Province[J]. Journal of Stratigraphy, 1988, 12(1): 53–60 (in Chinese with English abstract)
- [38] 于振江, 黄多成. 安徽省淮北平原第四纪孢粉序列[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(1): 21–32.
- Yu Zhenjiang, Huang Duo Cheng. Quaternary palynological sequence in Huaibei plain, Anhui province[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1993, 13(1): 21–32 (in Chinese with English abstract)
- [39] 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: 241–246.
- Huang Jianong, Fang JiaHua, Shao Jiaji, et al. Study on the chronology of Xiashu loess in Nanjing area[J]. Geological Review, 1988, 34: 241–246 (in Chinese with English abstract)
- [40] Xiao J Y, Wang D, Lu H B, et al. A study of pollen and climatic stratigraphy in the northern Jiangsu Basin since late Pleistocene[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2005, 44(4): 591–598.
- [41] 舒强, 萧家仪, 赵志军, 等. 苏北盆地XH-1钻孔0.78Ma以来的气候环境变化记录[J]. 地层学杂志, 2010, 34(1), 27–34.
- Shu Qiang, Xiao Jiayi, Zhao Zhijun et al. Environmental records in XH-1 core in northern Jiangsu Basin since about 780 Ka B. P.[J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(1): 27–34 (in Chinese with English abstract)