

文章编号: 1000-0550(1999)02-0226-07

黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比^①

——红粘土风成成因的新证据

鹿化煜 安芷生

(中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室 西安 710054)

摘要 对黄土高原具有代表意义四个剖面的晚第三纪红粘土样品进行了粒度分析, 并将结果与典型风成黄土古土壤样品的粒度特征进行详细对比, 得到红粘土是风成成因的沉积学证据。结果表明, 黄土高原红粘土与其上覆第四纪古土壤形成环境相似, 红粘土是在相对于黄土堆积搬运风动力变幅小的条件下沉积的, 在沉积之后受到较强的风化成壤改造作用。

关键词 红粘土 粒度特征 成因 黄土高原

第一作者简介 鹿化煜 男 1968年出生 博士 助理研究员 第四纪地质与颗粒分析

中图分类号 P642.131 **文献标识码** A

1 引言

最近的研究表明, 中国黄土高原的红粘土堆积良好地记录的晚第三纪北方古气候变化^[1~4]。红粘土成因问题是古气候变化研究的基础, 早在本世纪三十年代就开始了这方面的工作^[5], 近来一些研究者通过野外观察和实验室初步分析得出红粘土风成成因的认识^[1~4, 6~8], 但还存在分歧^[9]。在这里, 我们报导从黄土高原洛川、西峰、平凉和西安四个地区采得的红粘土样品的粒度分析结果, 并通过与典型的风成黄土、古土壤和河流相沉积物样品粒度特征的详细对比, 探讨红粘土的成因。

2 采样和测量

采样点的位置见图1^[4]。其中在洛川取得红粘土样品12块(编号为1rc-2, 1rc-2……)、黄土和古土壤样品12块(编号23909, 23910……); 在西峰取得红粘土样品12块(编号为RC-1509, RC-1519……)、黄土和古土壤样品12块(编号XF-710, XF-1320……), 河流相堆积样品12块(编号为4522F, 4532F……); 在西安取得红粘土样品12块(编号为XA-1, XA-2……); 在平凉取得红粘土样品12块(编号为PL-1521, PL1522……)。样品分别在中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验

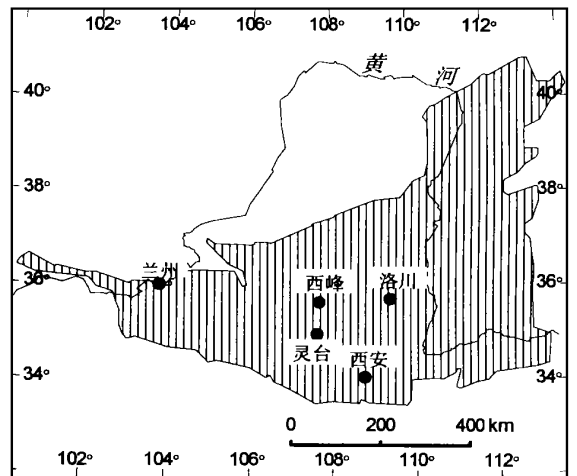


图1 采样点的位置

Fig. 1 The location of sampling sites in North China

室和荷兰自由大学沉积实验室进行了粒度测量, 前处理方法与文献^[10]所述相同, 测量结果的部分粒度参数见表1。

3 红粘土的粒度特征及其与黄土、古土壤和河流相沉积物的对比

3.1 粒度分布曲线和概率累积曲线

风成黄土沉积物的粒度分布曲线多为单峰态,

① 国家重点基础研究发展规划项目青藏高原项目和中科院“九五”重大项目资助

表1 样品测量结果

Table 1 Statistical index of grain size distribution of the measured samples

样品号	平均粒径	标准	偏度	峰态	样品号	平均粒径	标准差	偏度	峰态
lrc-1	7.63	1.54	0.1	2.53	PL1528	7.36	1.64	0.13	2.52
lrc-10	7.48	1.4	0.34	2.69	PL1527	7.27	1.65	0.25	2.5
lrc-11	7.42	1.65	0.19	2.37	PL1526	7.38	1.59	0.18	2.58
lrc-12	7.53	1.48	0.23	2.6	PL1525	7.35	1.53	0.08	2.56
lrc-2	7.71	1.46	0.15	2.62	PL1522	7.2	1.72	0.08	2.7
lrc-3	7.52	1.45	0.15	2.7	PL1521	7.31	1.65	0.16	2.54
lrc-4	7.58	1.44	0.17	2.66	23912S	6.58	1.83	0.59	2.66
lrc-5	7.44	1.49	0.21	2.66	23909S	6.64	1.79	0.62	2.69
lrc-6	7.68	1.42	0.14	2.67	23908S	6.68	1.77	0.61	2.7
lrc-7	7.65	1.43	0.18	2.72	23907S	6.7	1.76	0.62	2.7
lrc-8	7.52	1.5	0.17	2.59	23906S	6.71	1.76	0.61	2.7
lrc-9	7.16	1.48	0.35	2.75	23905S	6.72	1.75	0.62	2.71
XA-1	7.52	1.42	0.35	2.71	23763L	5.94	1.76	0.94	3.4
XA-10	7.14	1.58	0.32	2.49	23761L	5.92	1.74	1	3.52
XA-12	7.02	1.62	0.28	2.53	23759L	5.92	1.78	0.95	3.38
XA-15	7.44	1.37	0.32	2.8	23757L	5.81	1.74	1.03	3.61
XA-16	7.25	1.61	0.11	2.53	23755L	5.75	1.75	1.05	3.69
XA-17	7.68	1.5	0.16	2.64	23753L	5.76	1.74	1.06	3.69
XA-2	7.78	1.45	0.12	2.65	XE-1370	6.87	1.8	0.5	2.48
XA-3	7.7	1.41	0.26	2.71	XF-1360	6.92	1.76	0.46	2.48
XA-5	7.82	1.46	0.19	2.61	XF-1350	6.95	1.76	0.42	2.42
XA-6	7.53	1.46	0.24	2.65	XF-1340	7.06	1.69	0.45	2.45
XA-8	7.65	1.53	0.18	2.6	XF-1330	6.86	1.78	0.42	2.43
XA-9	7.45	1.53	0.15	2.63	XF-1320	6.94	1.77	0.43	2.38
rc-1594	6.93	1.8	0.32	2.39	xF-770	6.52	1.78	0.7	2.75
rc-1589	6.74	1.73	0.47	2.67	xF-760	6.35	1.82	0.74	2.85
rc-1584	6.4	1.63	0.7	3.2	xF-750	6.58	1.86	0.62	2.58
rc-1574	6.75	1.73	0.55	2.72	xF-730	6.42	1.8	0.73	2.81
rc-1564	7.11	1.6	0.47	2.66	xF-720	6.49	1.75	0.73	2.82
rc-1559	7.19	1.65	0.42	2.54	xF-710	6.38	1.78	0.81	3
rc-1554	7.33	1.62	0.43	2.53	4522F	2.45	2.44	1.68	4.81
rc-1544	6.98	1.63	0.44	2.68	4532F	1.79	2.08	2.37	8.2
rc-1534	7.17	1.69	0.35	2.47	4525F	5.07	2.74	0.33	1.86
rc-1524	7.07	1.69	0.34	2.5	4540F	4	2.83	0.72	2.22
rc-1519	7.18	1.68	0.3	2.44	4545F	4.06	2.84	0.71	2.2
rc-1509	6.95	1.61	0.52	2.77	4550F	3.51	2.71	1.15	3.06
PL1537	7.38	1.65	0.2	2.5	4555F	2.66	2.28	1.94	5.82
PL1536	7.34	1.63	0.1	2.5	4560F	3.63	2.83	0.96	2.55
PL1535	7.2	1.67	0.16	2.57	4565F	3.35	2.6	1.32	3.5
PL1533	7.23	1.66	0.19	2.56	4575F	4	2.69	0.99	2.61
PL1532	7.19	1.67	0.21	2.54	4580F	4.64	2.95	0.43	1.83
PL1531	7.22	1.67	0.18	2.56	4585F	2.57	2.14	2.15	6.97

以粉砂级颗粒(5~50 μm)为主,缺少粗尾,>63 μm 的砂级含量很少。由于风动力变化和沉积后成壤改造作用,在分布曲线上有细尾延伸。由图2可以看出,红粘土的粒度分布曲线为单峰态,以粉砂级物质为主,与典型的风成黄土古土壤的^[11]较为相似,不同于河流相沉积物的双峰态。另外,红粘土各个粒

级的含量较均一,不同于河流相沉积物各个粒级含量差别较大。红粘土各个粒级的含量差别相对于黄土古土壤小,细颗粒含量相对增多,反映沉积后成壤风化改造作用较强。

在概率累积曲线上,红粘土和黄土古土壤均为单段型(极细和极粗部分含量很少,未做统计),不同

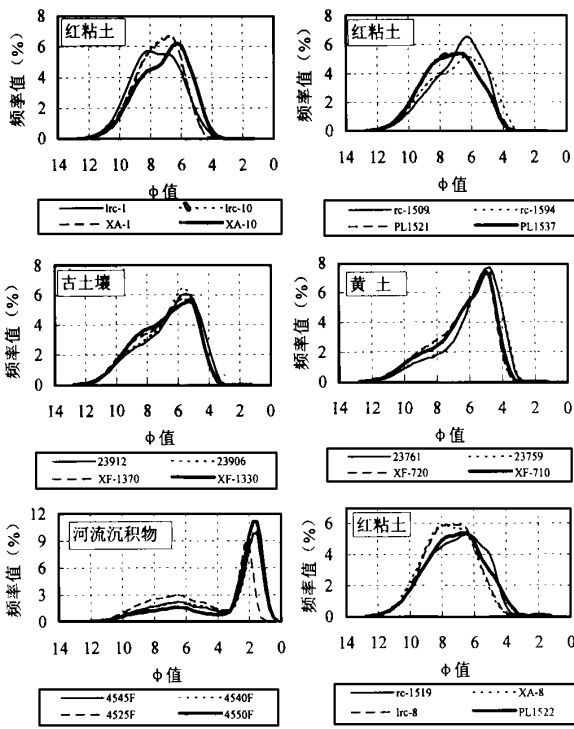


图2 红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物的粒度分布特征

Fig. 2 Grain size distribution of red clay, paleosol loess and fluvial sediments from Chinese Loess plateau

于河流相沉积物的两段型或多段型^[12](图3)。河流相沉积物概率累积曲线的拐点出现在3Φ左右,可能反映了悬浮搬运和跃移搬运颗粒的分界线。风成物质搬运形式相对简单,以悬浮为主,反映在累积曲线上为单段型。

3.2 粒度参数

样品的粒度参数与沉积物的形成环境有很好相关性。然而,由于各人的认识不同和条件的限制,计算粒度参数的方法有较大的差别^[13]。我们利用了下列的公式^①:

$$\varphi = \log_2 D \text{ (mm)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{X}_\varphi = \sum_{i=1}^n f_i M_{i\varphi} \dots\dots\dots (2)$$

$$S_\varphi = \left[\sum_{i=1}^n f_i (M_{i\varphi} - \bar{X}_\varphi)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

$$SK_\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (M_{i\varphi} - \bar{X}_\varphi)^3}{S_\varphi^3} \dots\dots\dots (4)$$

$$K_\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (M_{i\varphi} - \bar{X}_\varphi)^4}{S_\varphi^4} \dots\dots\dots (5)$$

上式中(1)、(2)、(3)、(4)和(5)分别是Φ—mm值转换公式、平均粒径、标准差、偏度和峰态的计算公式,其中 f_i 是每个粒级的体积百分含量, M_i 是每个粒级的粒径。由表1可以知道,红粘土的平均粒径在6.4~7.8Φ之间,是典型的风尘物质堆积粒级范围。与洛川、西峰古土壤的粒度平均值比较接近,而与马兰黄土相比偏细,可能的原因是:1)在红粘土堆积搬运时粉尘的风动力相对较弱;2)沉积后风化成壤作用较强;或二者兼而有之。红粘土样品的标准差与黄土、古土壤比较接近,与河流相沉积物差别较大,也反映了其风成成因。同样,红粘土的分选程度较黄土、古土壤好,表明搬运其动力的稳定性和沉积后的改造作用。红粘土,黄土、古土壤和河流相沉积物的偏度均为正偏,表明都含有细粒成分。但是,红粘土接近于黄土、古土壤,反映成因上的相似性。相比而言,红粘土更接近正态分布,偏度系数接近于零。低峰态值可能反映了沉积物有几个部分混合而成^[12],高峰态值可能反映了快速的堆积过程。红粘土的峰态值与古土壤接近甚至于相同,表明二者成因上的相似性。河流相沉积物的峰态值变化较大,与红粘土相差较远,表明二者成因的不同。

3.3 粒度象特征

粒度象反映了沉积物粒度分布总体特征^[14],间接地指示了沉积环境。通过对粒度象的分析可了解未知环境沉积物的成因。我们对传统的粒度象作图方法进行了简单的修改,不是在对数坐标而是在普通坐标上作图(图4)。从C—M、A—M和L—M图上可以清楚地看出红粘土的粒度象图和黄土、古土壤的粒度象图很相似,与河流相沉积物有较大的区别。反映了红粘土的风成成因。

3.4 粒度指数的特征

四分位值(Q1、Q3)和中位数是反映沉积物特征的重要参数,综合利用这些参数可以直观看出四分位标准差、偏度等的变化^[14],从而知道沉积物的形成环境。由图5可以看出,红粘土粒度指数图和黄土、古土壤的粒度指数很相似,与河流相沉积物有较大的区别。反映了红粘土的风成成因。

3.5 结构参数散点图

通过对已知环境的当代沉积物粒度参数做散点图的研究表明,不同沉积环境的沉积物有明确的分

① Konert M. PHI program for particle size A22. Free University, Amsterdam, The Netherlands 1994

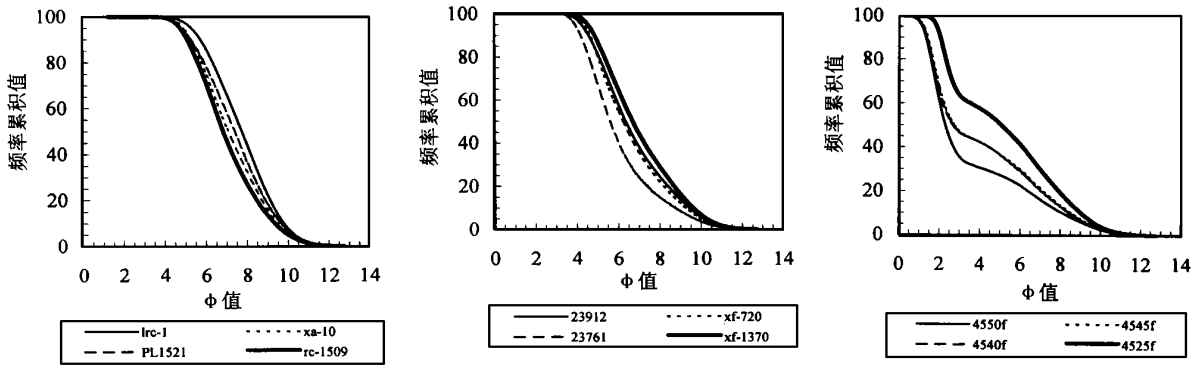


图 3 红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物的粒度概率累积曲线

Fig. 3 Grain size accumulation curves of red clay, paleosol loess and fluvial sediments

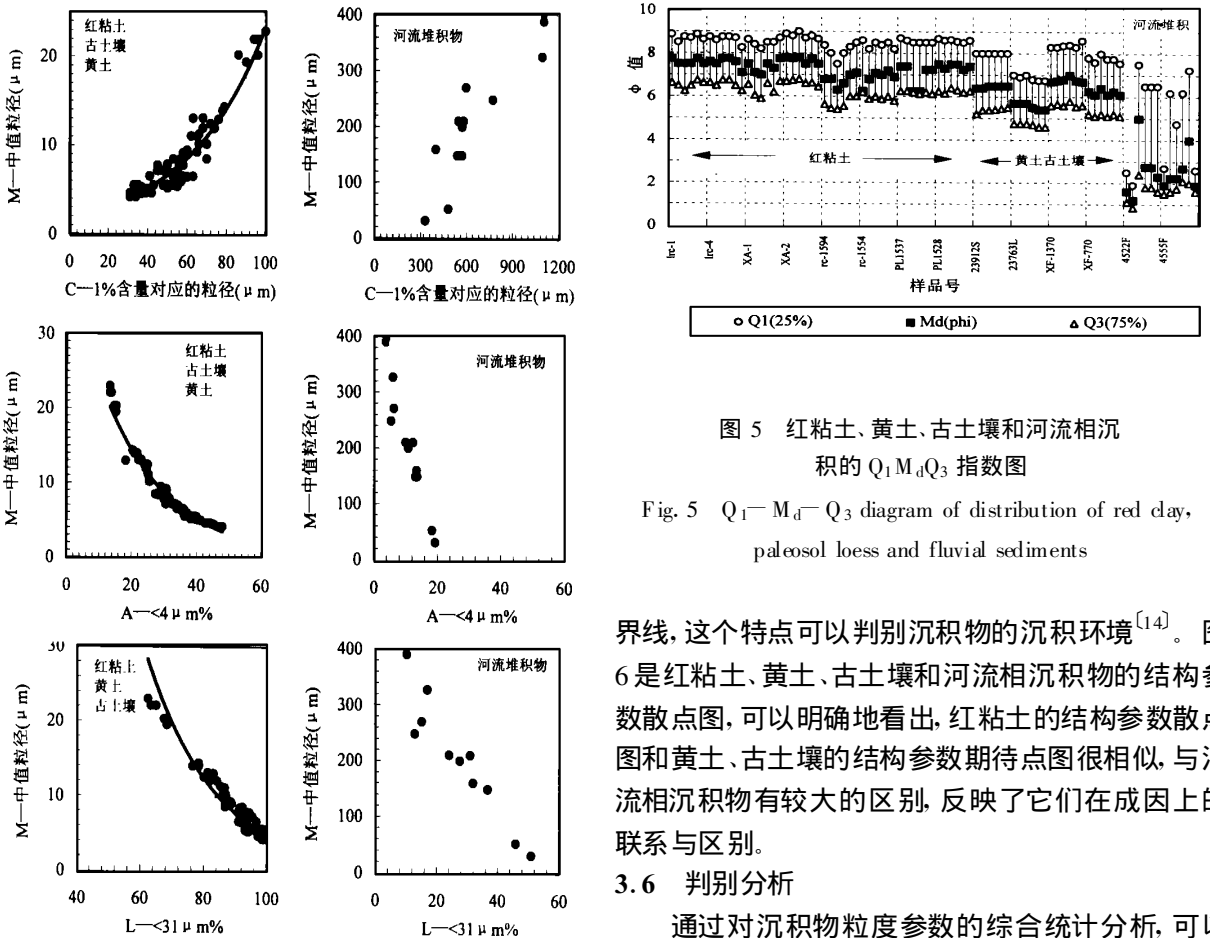


图 4 红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物的 C-M、A-M 和 L-M 图

Fig. 4 C-M, A-M and L-M plots of the grain size distribution of red clay paleosol loess and fluvial sediments. In which the empty circles are red clay empty triangles are loess-paleosol empty square are fluvial sediments

图 5 红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积的 Q₁M_dQ₃ 指数图

Fig. 5 Q₁-M_d-Q₃ diagram of distribution of red clay, paleosol loess and fluvial sediments

界线, 这个特点可以判别沉积物的沉积环境^[14]。图 6 是红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物的结构参数散点图, 可以明确地看出, 红粘土的结构参数散点图和黄土、古土壤的结构参数期待点图很相似, 与河流相沉积物有较大的区别, 反映了它们在成因上的联系与区别。

3.6 判别分析

通过对沉积物粒度参数的综合统计分析, 可以找出判别不同沉积环境和沉积作用的环境指标值。我们利用下面的公式^[12]来计算所测量样品的判别值:

$$Y = -3.5688 Mz + 3.7016 \sigma_1^2 - 2.0766 SKz + 3.1175 KG \dots \dots \dots (6)$$

式中 Y 为判别参数, Mz、σ₁²、SKz 和 KG 分别是平

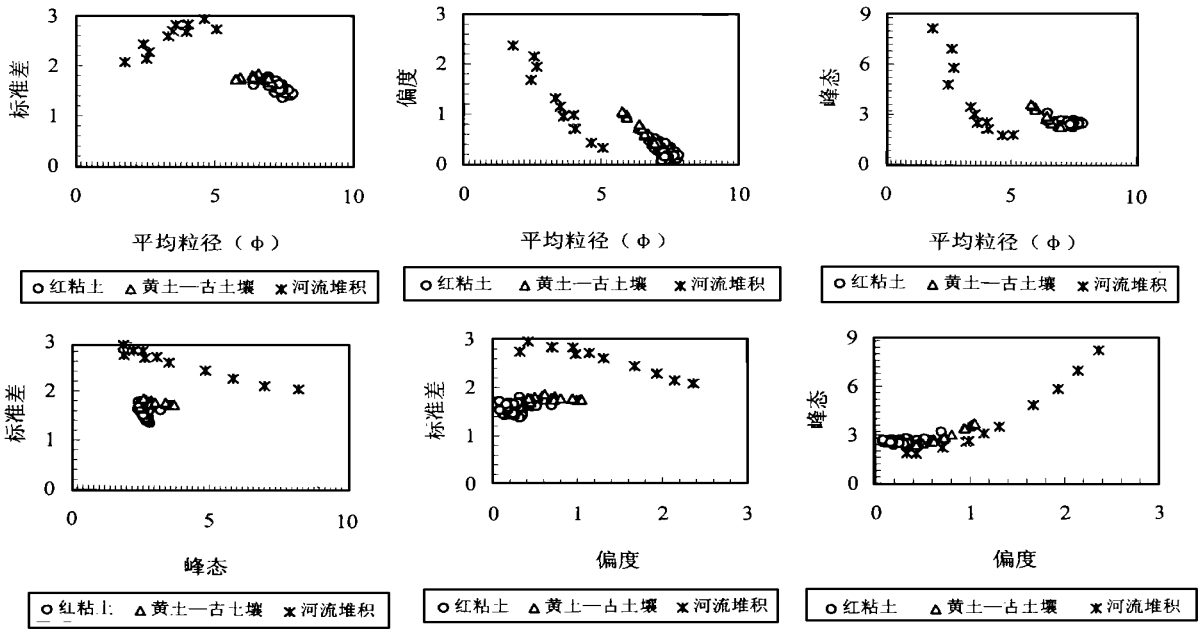


图6 红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物的结构参数散点图

Fig. 6 Statistical indices of grain size distribution of red clay, paleosol loess and fluvial sediments. In which the empty circles are red clay empty triangles are loess—paleosol empty square are fluvial sediments

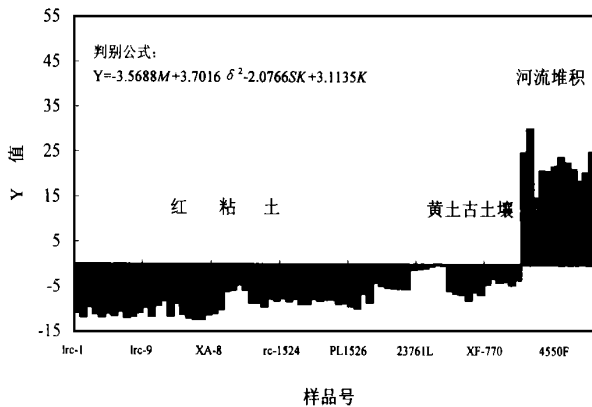


图7 红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物的判别函数值
Fig. 7 Y value of grain size distribution of red clay, paleosol loess and fluvial sediments

量, 每个样品由其粒度分量所组成的矢量和代表, 矢量位置确定之后可以计算各矢量之间的夹角余弦值, 以了解各样品间的相似性。计算公式是:

$$\cos \theta_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ki})(X_{lj})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ki})^2 \sum_{i=1}^n (X_{lj})^2}} \dots\dots\dots (7)$$

若两个样品(k, l)的余弦值是 1.0(夹角是 0), 则两个样品完全相似; 相反, 若余弦值是 0(夹角 90°), 则两个样品完全不同^[12]。利用这个公式对样品之间的相似性进行了计算。结果表明(图 8), 红粘土之间、红粘土与黄土和古土壤之间、黄土与古土壤之间的夹角很少大于 10°, 而河流相样品之间, 尤其是河流相与红粘土、黄土、古土壤之间的矢量夹角常常大于 60°, 反映红粘土的风成成因。

4 结论

通过以上对红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物样品粒度特征的分析, 得到以下两点认识:

- 1) 黄土高原红粘土是风成沉积物, 与其上覆第四纪古土壤沉积环境相似。
- 2) 红粘土是在搬运动力相对于黄土堆积搬运运动

均粒径、标准差、偏度和峰态, 它们分别由公式(2)~(5)计算出。计算结果见图 7。可以看出, 红粘土、黄土和古土壤的判别值是正值, 河流相堆积物是负值。图 7 清楚地表明红粘土、黄土、古土壤和河流相堆积物沉积环境的相同与不同。

3.7 因数分析

以每个样品各个对应粒级的百分量为一个分

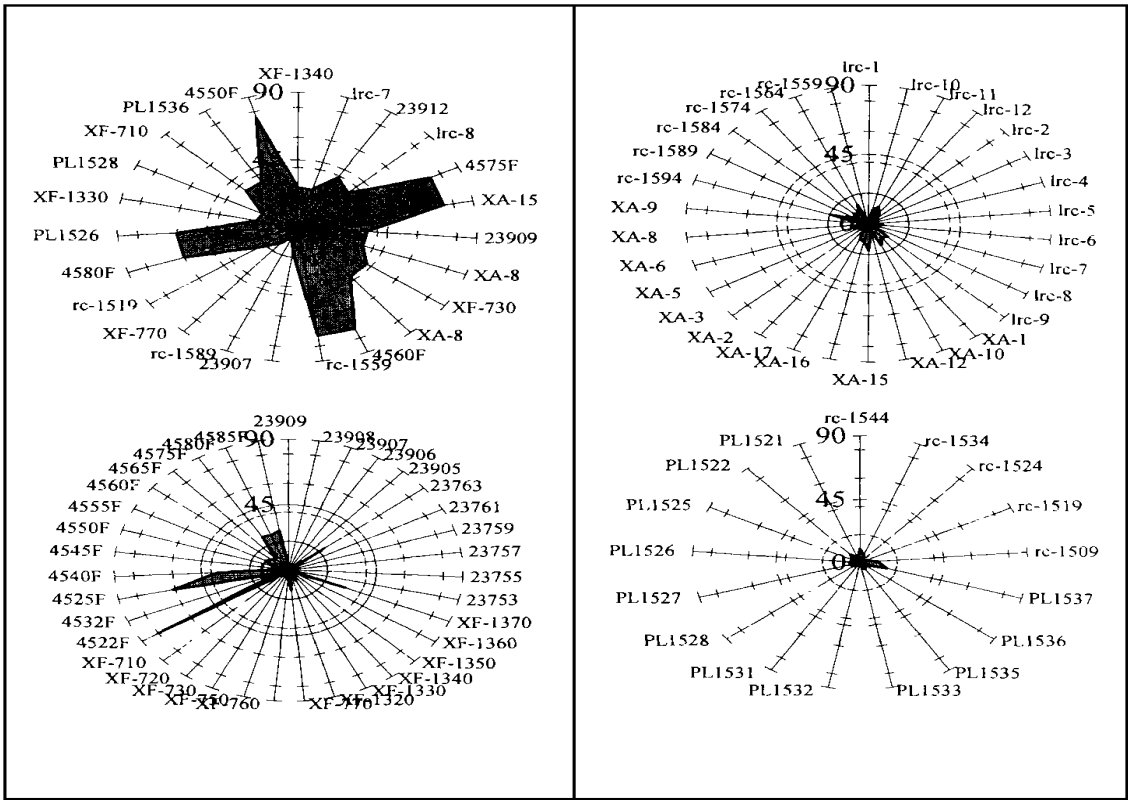


图 8 红粘土、黄土、古土壤和河流相沉积物的两个样品之间矢量交角图

图外的数字是样品号, 坐标刻度是角度

Fig. 8 Angles among the vectors of the grain size distribution of red clay, paleosol loess and fluvial sediments

力变幅小的环境下沉积的, 在沉积之后受到了较强的风化成壤改造作用。

致谢: 感谢孙东怀副研究员提供部分样品及和 J. Vandenberghe 教授、G. Nugteren 先生进行的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 孙东怀, 刘东生, 陈明扬等. 中国黄土高原红粘土序列的磁性地层与气候变化 [J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(3): 265~270
- 2 丁仲礼, 孙继敏, 朱日祥等. 黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化问题 [J]. 第四纪研究, 1997, (2): 147~157
- 3 Sun D H, Shaw J, An Z S, Chen M Y, et al. Magnetostatigraphy and paleoclimatic interpretation of continuous 7.2 Ma late Cenozoic eolian sediments from the Chinese loess plateau [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(1): 85~88
- 4 孙东怀, 陈明扬, John Shaw 等. 晚新生代黄土高原风尘堆积序列的磁性地层年代与气候记录 [J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(1): 79~84
- 5 Teilhard de Chardin P, Young C C. Preliminary observation on the pre-loessic and post-Ponian Formation in western Shanxi and

- north Shanxi. Memoir Geological Survey China [J], Ser. A, 1930, 8: 1~54
- 6 赵景波. 山西保德第三纪晚期红土研究 [J]. 沉积学报, 1989, 7(3): 113~120
- 7 安芷生, 吴锡浩, 汪品先等. 最近 130 ka 中国的古季风—II 古季风变迁 [J]. 中国科学(B 辑), 1991, 21(11): 1209~1215
- 8 Liu X M, Xu T C, Liu T S. A study of anisotropy of magnetic susceptibility of loess from Xifeng [J]. Geophysical Journal, 1988, 92(2): 349~353
- 9 张云翔, 薛祥熙. 甘肃武都龙家沟三趾马动物化石的埋藏特点及该地“三趾马”的成因 [J]. 科学通报, 1995, 40(19): 1782~1784
- 10 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义 [J]. 科学通报, 1997, 42(1): 66~68
- 11 Pye K. The nature, origin and accumulation of loess [J]. Quaternary Science Reviews, 1995, 14: 653~667
- 12 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒分析及其应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1976. 31~127
- 13 Folk R L. A review of grain-size parameters [J]. Sedimentology, 1966, 6: 73~93
- 14 Psaaga R. Grain size representation by CM pattern as a geologic tool [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34: 830~847

Comparison of Grain—size Distribution of Red Clay and Loess—paleosol Deposits in Chinese Loess Plateau

LU Hua-yu AU Zhi-sheng

(State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710054, China)

Abstract

Red clay, a predominant deposit in Chinese loess plateau during the late Tertiary, is regarded as a good record of paleoclimate changes during the Late Miocene and Pliocene. Some fossils have been found in this deposit and a number of samples have been measured for magnetic susceptibility, grain size etc. In order to obtain climatic information in the past several million years, however, its deposition process and origin are still discrepant. In this paper, a detail grain size distribution of the Late Tertiary red clay deposit in North China is presented, comparisons of grain size distribution of red clay with that of typical Quaternary aeolian loess-paleosol deposit in this region demonstrate both sediments are similar origin. And a specific difference between their grain size distributions also exist. It implies that some different transportation media and depositional environments to form these sediments. Our detailed grain size distribution comparisons demonstrate that the dust to form the red clay deposit was transported by weaker wind system than that in Quaternary. A unification of the grain size distribution of red clay may infer that red clay has strongly been weathered.

Climate was progressively cold and dry in the Late Tertiary in the North China and terrestrial sediments were dominated in this region. The red clay is not lacustrine and weathering materials origin because: (1) it was impossible there existed a lake as big as several hundred thousand kilometers in this region since the climate was quite dry at that time, (2) evidence from chemical element analysis are big different from that underlying bedrock, demonstrating that its heterogeneous origin was from bedrock. In addition, a very good unification of grain size distribution from top to bottom of the red clay sequence has also verified that it was not weathering origin. Noticeable differences of grain size distributions of red clay and fluvial sediments have corroborated that it was not fluvial origin, also this conclusion can be proved by that there are no laminations and multi intercalation of calcium carbonate in the red clay sequence by field observations.

A very good similarity of grain size distribution of red clay and its overlying loess—paleosol sediments should be strong evidences showing their similar origin. Detailed comparisons of granulometry characteristic of C-M, L-M, L-M and A-M plots Q_1 - M_4 - Q_3 fluctuations empirical judging equation and vector analysis supported this conclusion. More specific analysis shows that grain size characteristics of red clay are more close to that of paleosol than that of loess. Finer particle size distribution, strong weathering and pedogenesis and more reddish color of red clay may indicate that the wind system was weaker, climate was much drier and warmer, and stronger oxidation in the Late Tertiary than that in Quaternary. However, some red clay removed by water was involved.

From above evidences we conclude that the red clay deposit in North China are aeolian origin. The dust to form the red clay deposits was transported by the wind system which was weaker than that of loess—paleosol formed during Quaternary. The dust may has been strongly weathered by weathering and pedogenesis process.

Key words red clay grain size analysis origin Chinese Loess Plateau