

文章编号: 1008-2786-(2019)5-681-12
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000459

成都粘土与其下伏粘土粒度特征对比及古环境意义

葛璐月^{a,b}, 文星跃^{a,b*}

(西华师范大学 a. 国土资源学院; b. 区域环境演变与保护研究中心, 四川南充, 637009)

摘 要: 成都粘土下伏地层为褐色粘土和网纹红土, 揭示其沉积环境特征差异性对深入理解区域环境演变具有重要意义。通过对比分析三层粘土的粒度组成、粒径频率曲线、粒度参数和分形维数特征, 探讨了三层粘土沉积环境的差异性。结果表明: (1) 成都粘土及其下伏粘土均以粉砂(5 ~ 50 μm) 为主, 相较北方黄土粘粒(< 5 μm) 含量偏高而 K_d 值偏低, 且含较多 > 100 μm 的粗颗粒。(2) 三层粘土的粒度参数特征与典型风成黄土相似而明显区别于河湖相沉积物。(3) 褐色粘土具有较高的粗粉砂(10 ~ 50 μm) 含量和较大的粒径分布偏度、峰度值, 而平均粒径(ϕ 值) 和分形维数最小; 成都粘土标准偏差为最大, 峰度最小, 而网纹红土的平均粒径和分形维数最大。(4) 三层粘土的粒度分形维数均与粒度组成、平均粒径和峰度呈显著相关性, 而仅有褐色粘土分形维数与标准偏差和偏度具有显著相关性。(5) 风化成土作用会影响沉积物粒度组成、粒度参数和分形维数, 成都粘土和网纹红土较褐色粘土经历了较强的风化成土作用, 三层粘土按沉积时间先后古气候特征表现为暖湿-冷干-暖湿的变化趋势。

关键词: 成都粘土; 粒度参数; 分形维数; 沉积环境

中图分类号: P534.63; P642.13

文献标志码: A

成都粘土(Chengdu Clays)是指分布于成都平原及周边地区二级阶地以上近地表的粘土, 以质地较细、颜色偏黄、富含钙结核、无水平层理和柱状结构为显著形态特征^[1-2]; 下伏地层仍为质地较均一的粘土层, 依次为褐色粘土和网纹红土, 常被一并视作为成都粘土而出现“异物同名”现象^[3]。探究成都粘土及其下伏地层的成因、物源、年代和沉积环境对认识区域古环境演变具有重要意义^[3]。对于成都粘土的成因历来有流水冲积^[4-7]、冰水堆积^[8-10]、风化残积^[11] 和风尘沉积^[2,12-14] 等多种认识, 近年来学者们越来越倾向于风尘沉积说^[2,15-17], 并认为成

都粘土物源区别于北方黄土和青藏高原东部黄土, 具有近源性特征^[2,15,18]。然而前人运用粒度特征论证风积成因时并未区分成都粘土与其下伏粘土^[16-17]; 元素地球化学和石英砂颗粒物源示踪等研究虽然明确了成都粘土、褐色粘土和网纹红土地层, 但仅针对上层的成都粘土进行了物源成因机制探讨^[2,18], 或讨论了三层粘土风积成因的一致性, 整体上区别于下伏的河流相砂砾层^[15]。因此, 关于成都粘土与其下伏两层粘土沉积特征的差异性目前仍缺乏认识。

此外, 测年研究表明成都粘土沉积时期为晚更

收稿日期(Received date): 2018-12-14; 改回日期(Accepted date): 2019-05-14

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金面上项目(41671220); 西华师范大学英才项目(17YC126) [National Natural Science Foundation of China (41671220); Talent Project of China West Normal University (17YC126)]

作者简介(Biography): 葛璐月(1994-), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事土壤地理研究。[GE Luyue (1994-), female, born in Xingtai, Hebei province, M. Sc. candidate, research on soil geography] E-mail: 1059230589@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 文星跃(1970-), 男, 重庆市巴南区人, 博士, 教授, 主要研究方向: 土壤地理和区域环境演变。[WEN Xingyue (1970-), male, born in Banan, Chongqing, Ph. D., professor, research on soil geography and regional environmental evolution] E-mail: wenxy@cnwu.edu.cn

新世末期^[15, 19],褐色粘土沉积时期集中在末次冰期期间^[15, 19],而网纹红土沉积时期为中更新世,且与上覆褐色粘土存在约 50 万年的地层缺失^[19-20]。三层粘土均沉积于第四纪气候相对冷干的环境条件下,然而元素地球化学特征整体上反映出成都粘土与其下伏粘土均具有较强的风化强度^[15, 21],很可能是受沉积后风化作用的影响^[1-2]。由于沉积物粒度特征分析有助于理解沉积时期的搬运动力机制以及环境特征^[22-24],基于粒度参数计算的分形维数也可用于判别沉积环境^[25]。因此,结合前人已发表的测年数据和相关认识,探讨三层粘土的颗粒组成、粒度参数和分形维数特征的异同性,有助于进一步理解研究区古环境演变历史。

1 研究材料与方法

1.1 样品采集

通过野外考察,成都粘土及其下伏的褐色粘土、网纹红土同时存在的完整剖面极难发现,多以单层或两层存在。剖面形态普遍表现为成都粘土-红色砂岩或泥岩层、成都粘土-褐色粘土层、褐色粘土-网纹红土层、褐色粘土-砾石层、网纹红土-砾石层等结构(图 1)。采样时选取未受耕作活动影响的自然剖面,刨去受现代气候风化的表层土,根据不同类型粘土分布情况,在不同深度分别采集样品,样品厚

度约 10 cm,本文研究样品分布和基本情况如图 2 和表 1 所示。

1.2 成都粘土及下伏粘土年代

关于成都粘土及下伏粘土的沉积时间,许多学者采用了不同的方法进行了测定。光释光年代测定表明成都粘土的沉积底界年龄为 18.60 ± 0.33 ka B. P.^[19],属晚更新世晚期;褐色粘土堆积时间为 $69.70 \sim 32.90$ ka B. P.^[15]或 $74.67 \pm 9.59 \sim 18.60 \pm 0.33$ ka B. P.^[19],为晚更新世时期。古地磁法测定的网纹红土的顶界和底界年龄分别约为 $560 \sim 640$ ka B. P. 和 $1090 \sim 1130$ ka B. P.^[20],属中更新世时期。网纹红土与上覆褐色粘土之间存在地层缺失,缺失年份至少 $400 \sim 500$ ka B. P.^[19-20]。目前对成都粘土与褐色粘土是否有沉积间断并无明确认识,我们将成都粘土与其下伏粘土的沉积序列整理为图 3 所示。

1.3 实验和数据处理方法

野外采集样品自然风干后过 10 目筛,作为待测样品。粒度测试仪器为美国贝克曼库尔特(Beckman Coulter)LS13320 型激光粒度仪,测试范围为 $0 \sim 2000 \mu\text{m}$ 。上机测试前分别用浓度均为 10% 的 H_2O_2 和 HCL 加热去除有机质和碳酸盐,洗至中性后再用 1 mol/L 的六偏磷酸钠溶液分散,并用超声波震荡 10 min。每个样品均测试三次,取其均值进行数据分析。粒度参数采用矩法公式^[26],具

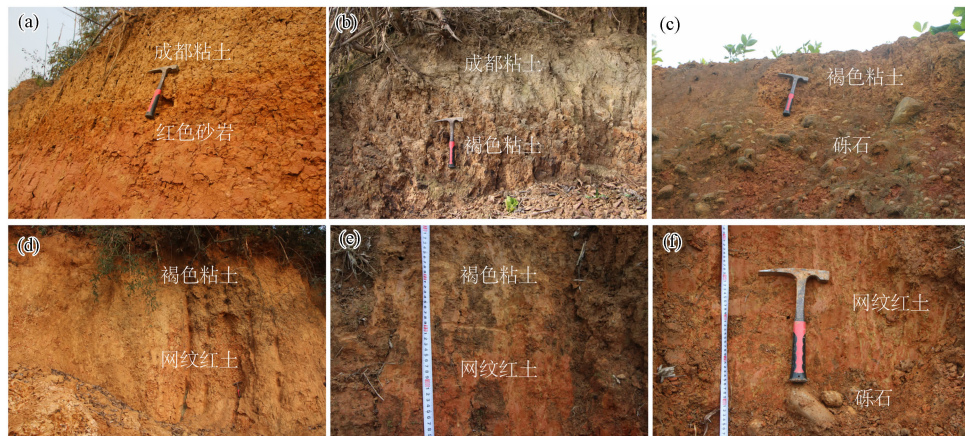


图 1 成都粘土及其下伏粘土的野外形态

(a) 成都粘土-红色砂岩(绵阳三台);(b) 成都粘土-褐色粘土(双流胜利);(c) 褐色粘土-砾石(双流胜利);
(d) 褐色粘土-网纹红土(眉山三苏);(e) 褐色粘土-网纹红土(绵阳黄土);(f) 网纹红土-砾石(绵阳黄土)

Fig. 1 Photos of the Chengdu clays and its underlying clays

(a) Chengdu clay and red sandstone in Santai town, Mianyang; (b) Chengdu clay and brown clay in Shengli town, Shuangliu;
(c) Chengdu clay and gravel in Shengli town, Shuangliu; (d) brown clay and reticulated red clay in Sansu town, Meishan;
(e) brown clay and reticulated red clay in Huangtu town, Mianyang; (f) reticulated red clay and gravel in Huangtu town, Mianyang

表 1 成都粘土与其下伏粘土基本情况

Tab.1 Basic conditions of Chengdu clay and its underlying clay

类型	编号	采样位置	海拔/m	采样深度/cm	pH	形态描述
成都粘土	CDSL01 - 2	成都双流应天寺	490	150	7.75	黄色 (7.5YR6/6), 团粒或团块状, 稍硬, 含大量直径 3 cm 左右的钙结核
	CDSL02 - 3	成都双流应天寺	490	150	8.41	
	CDSL03 - 3	成都双流应天寺	520	40	6.70	
	CDSL05 - 3	成都双流胜利镇	520	80	6.72	
	CDQBJ01 - 1	成都青白江区福洪镇	480	160	6.83	
	CDQBJ02 - 2	成都青白江区福洪镇	480	35	7.30	
	CDQBJ03 - 4	成都青白江城厢镇	460	90	8.19	
	CDJT01 - 2	成都金堂福兴	460	80	6.95	
	GHLS01 - 3	广汉连山镇	480	100	7.29	
	DYHX01	德阳黄许镇	550	50	7.41	
	MYHT12 - 1	绵阳黄土镇	570	80	8.45	
	MYHT12 - 2	绵阳黄土镇	570	130	8.42	
	MYHT12 - 3	绵阳黄土镇	570	220	7.80	
	MYST01 - 1	绵阳三台芦溪镇	440	150	7.01	
	SNSH01 - 3	遂宁射洪大于镇	360	100	7.73	
	MYZT01 - 2	绵阳梓潼县东石乡	500	50	7.21	
	MYXX01 - 3	绵阳永兴镇	520	100	7.78	
褐色粘土	CDSL04 - 1	成都双流胜利镇	530	50	7.16	黄褐色 (5YR6/6), 颜色较成都粘土深, 团块状结构, 硬, 含少量薄膜状铁锰锈斑
	CDSL05 - 4	成都双流胜利镇	520	130	7.06	
	MYHT11 - 1	绵阳黄土镇	570	40	7.58	
	MYHT11 - 2	绵阳黄土镇	570	70	6.79	
	MYHT11 - 3	绵阳黄土镇	570	80	7.36	
	MYHT11 - 4	绵阳黄土镇	570	100	6.75	
	MYHT11 - 5	绵阳黄土镇	570	140	7.30	
	MYZT02 - 2	绵阳梓潼县文昌镇	500	80	7.04	
网纹红土	CDSL02 - 6	成都双流应天寺	490	280	7.40	红褐色 (2.5YR4/8), 团块状结构, 硬, 网状灰白色条带, 含薄膜状铁锰锈斑, 底部为砾石
	CDSL02 - 7	成都双流应天寺	490	350	6.61	
	CDXJ01 - 1	成都新津县大草湾	550	120	7.57	
	MSLF01 - 3	眉山市三苏乡	440	80	7.00	
	MSLF01 - 4	眉山市三苏乡	440	120	6.86	
	MSLF01 - 5	眉山市三苏乡	440	200	7.67	
	MYHT11 - 6	绵阳黄土镇	570	180	8.44	

体如下:

平均粒径 $\bar{X} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n f_i X_i$

标准偏差 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 f_i}$

偏度 $SK = \sigma^{-2} \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 f_i$

峰度 $Kg = \sigma^{-4} \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^4 f_i$

粒度分形维数 D 值采用以下公式^[27]:

$$D = \frac{V(r > R)}{V_T} = 1 - \left(\frac{R}{\lambda_v}\right)^{2-D}$$
$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_v}\right)^{2-D}$$

式中, R 为土壤颗粒粒径 (mm); $V(r < R)$ 指粒径小于 R 的颗粒累积体积百分数 (%); V_T 为土壤颗粒的总体积; λ_v 为对所有粒级而言的上限值, 数值上等

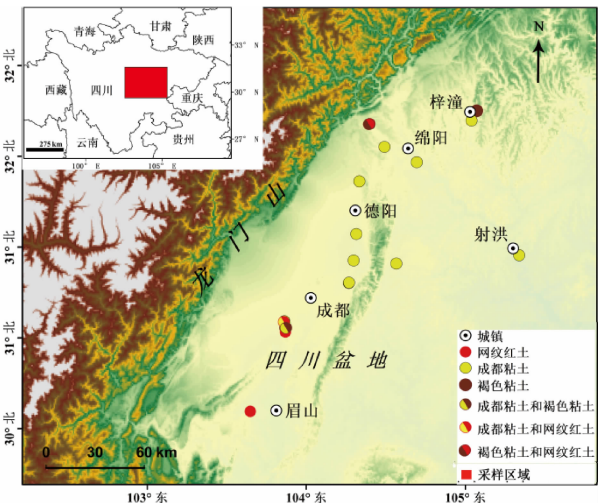


图 2 样地分布

Fig. 2 Distribution of the sampling sites

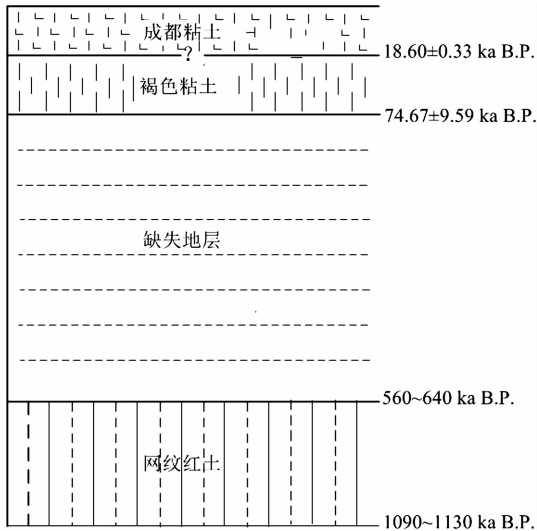


图 3 成都粘土与其下伏粘土年代地层图

Fig. 3 Chronostratigraphy of the Chengdu clay and its underlying clay

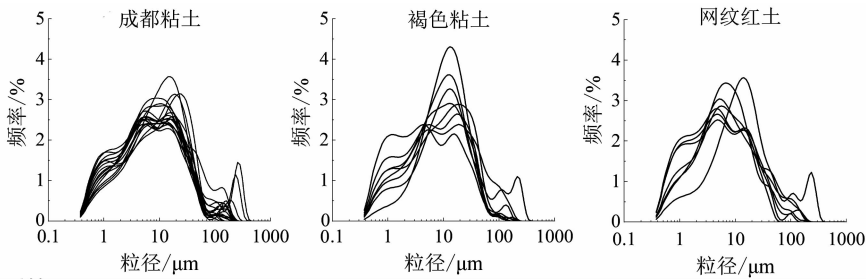


图 4 粒径分布曲线

Fig. 4 Curves of grain size distribution

于最大粒径(mm); D 为土壤颗粒体积的分形维数; $\frac{V(r < R)}{V_T}$ 为粒径小于 R 的土壤颗粒的累积体积百分比含量。

2 结果分析

2.1 粒度组成

成都粘土及其下伏粘土粒度组成均以粉砂(5~50 μm)为主(表 2),整体上看,三层粘土相对北方黄土表现为粗粉砂含量较低,细粉砂和粘粒含量较高。三层粘土中,网纹红土的粘粒含量最高,而褐色粘土的粘粒含量最低;粗粉砂含量表现为褐色粘土最高,而网纹红土最低。

2.2 粒径分布频率及累积频率曲线

成都粘土及其下伏粘土的颗粒粒径分布表现为三峰分布的形态(图 4),在 5~50 μm 之间呈现最高峰值,颗粒集中程度高;其次为 1~5 μm 之间,成都粘土及其下伏粘土样品中几乎都存在 >100 μm 的颗粒。粒径多峰分布的特征可能受到搬运动力或搬运方式改变的影响,在相对稳定的搬运条件下则多出现单峰形态^[29]。成都粘土及其下伏粘土的粒径累积频率曲线主要有两个截点(图 5),第一个为 3ϕ 左右,含量为 10%, < 2ϕ 的含量几乎为零;另一个截点位于 11ϕ 左右,含量约为 95% 以上,表明成都粘土及其下伏粘土主要由悬浮搬运物质组成^[28, 30]。

2.3 粒度 K_d 值

作为沉积物的一个重要粒度参数, K_d 值表示粗粉砂粒组(10~50 μm)含量与粘粒组(<5 μm)含量的比值^[28]。相较于北方黄土^[28],成都粘土及下伏粘土 K_d 值较低,其中褐色粘土 K_d 值最大,波动范围

为 0.54%~2.46%,均值为 1.27%,而网纹红土和成都粘土的波动范围分别为 0.48~2.04、0.67~1.54;均值分别为 0.83%、0.97%,小于褐色粘土。

2.4 粒度参数

三层粘土平均颗粒大小按由老到新顺序呈现细-粗-细的变化。整体上看,成都粘土及其下伏粘土的颗粒大小均小于北方黄土^[31],大于河湖相沉积物^[31](表 3、图 6)。三层粘土的标准偏差与北方黄土较为接近^[31],均小于河湖相沉积物^[24, 31]。三层粘土的偏度和峰度值均明显小于北方黄土和河湖相沉积物^[24, 31](表 3、图 6)。粒度参数散点图(图

6)表明成都粘土及其下伏粘土与北方典型风成黄土分布范围较一致,而与河湖相沉积物相差较大。

2.5 粒度分形维数

成都粘土粒度分形维数 D 值范围为 2.29~2.46,均值为 2.39,褐色粘土 D 值范围为 2.13~2.49,均值为 2.36,网纹红土 D 值范围为 2.25~2.49,均值为 2.40,表现为褐色粘土分形维数相对稍小。样品分形维数 D 值与粘粒呈正相关,而与粉粒和砂粒呈负相关(图 7)。样品分形维数 D 值与 φ 值和峰度具有较强的相关性,而与标准偏差和偏度不具相关性(图 8)。

表 2 成都粘土及其下伏粘土粒度分布

Tab. 2 Particle size distribution of the Chengdu clay and its underlying clay

粒度组成		样品			
		成都粘土	褐色粘土	网纹红土	北方黄土
粘粒 <5 μm	范围	29.53~45.42	20.47~51.65	21.19~54.15	19.63~33.68
	均值	38.38	34.44	42.65	25.76
	CV	0.12	0.26	0.24	0.23
细粉砂 5~10 μm	范围	17.48~23.87	16.47~26.60	18.58~26.90	6.61~10.22
	均值	20.13	20.65	21.48	8.77
	CV	0.09	0.16	0.12	0.16
粗粉砂 10~50 μm	范围	30.39~45.84	27.74~50.34	25.86~43.28	44.06~54.45
	均值	36.20	39.45	30.45	50.36
	CV	0.12	0.15	0.18	0.08
砂粒 >50 μm	范围	1.66~12.97	2.20~14.41	0.14~14.58	11.04~19.06
	均值	5.29	5.47	5.43	15.04
	CV	0.67	0.82	0.83	0.22
Kd 值	范围	0.67~1.54	0.54~2.46	0.48~2.04	1.31~2.77
	均值	0.97	1.28	0.83	2.09
	CV	0.23	0.42	0.61	0.29

注:北方黄土数据引自文献[28];范围和均值是指各粒度组成及粘度 Kd 值的百分比;CV 表示变异系数。

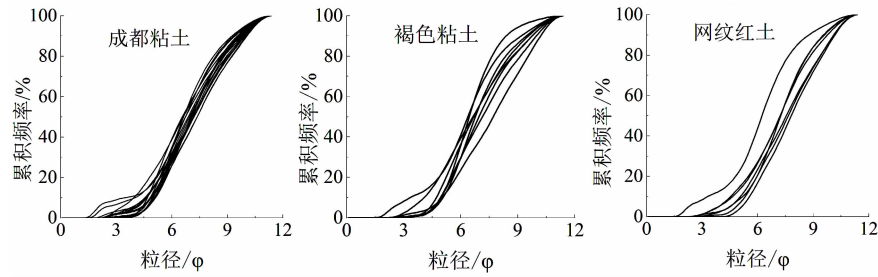


图 5 粒径累积频率曲线

Fig. 5 Cumulative frequency curves of grain size

表 3 成都粘土及其下伏粘土粒度参数

Tab.3 Particle size parameters of the Chengdu clay and its underlying clay

粒度参数		样品					
		成都粘土	褐色粘土	网纹红土	北方黄土	河流相沉积物	湖泊相沉积物
平均粒径 (φ)	范围	6.74 ~ 7.56	6.50 ~ 7.75	6.33 ~ 7.97	5.75 ~ 7.06	1.79 ~ 5.07	3.37 ~ 4.11
	均值	7.21	7.08	7.39	6.48	3.48	3.68
	CV	0.03	0.05	0.07	0.06	0.27	0.08
标准 偏差	范围	1.63 ~ 2.17	1.39 ~ 2.06	1.66 ~ 1.98	1.69 ~ 1.86	2.08 ~ 2.95	1.91 ~ 2.14
	均值	1.89	1.82	1.82	1.77	2.59	2.05
	CV	0.02	0.12	0.06	0.02	0.11	0.04
偏度	范围	-0.34 ~ 0.41	-0.24 ~ 0.47	-0.17 ~ 0.01	0.42 ~ 1.06	0.33 ~ 2.37	0.83 ~ 0.98
	均值	0.06	0.19	-0.08	0.70	1.23	0.94
	CV	3.77	1.25	-0.77	0.30	0.52	0.06
峰度	范围	2.05 ~ 3.05	2.09 ~ 3.53	2.06 ~ 3.03	2.38 ~ 3.69	1.83 ~ 8.20	3.22 ~ 3.83
	均值	2.46	2.54	2.49	2.87	3.80	3.53
	CV	0.10	0.17	0.13	0.15	0.54	0.06

注:北方黄土和河流相沉积物数据引自文献[31];湖泊相沉积物数据引自文献[24], CV 表示变异系数。

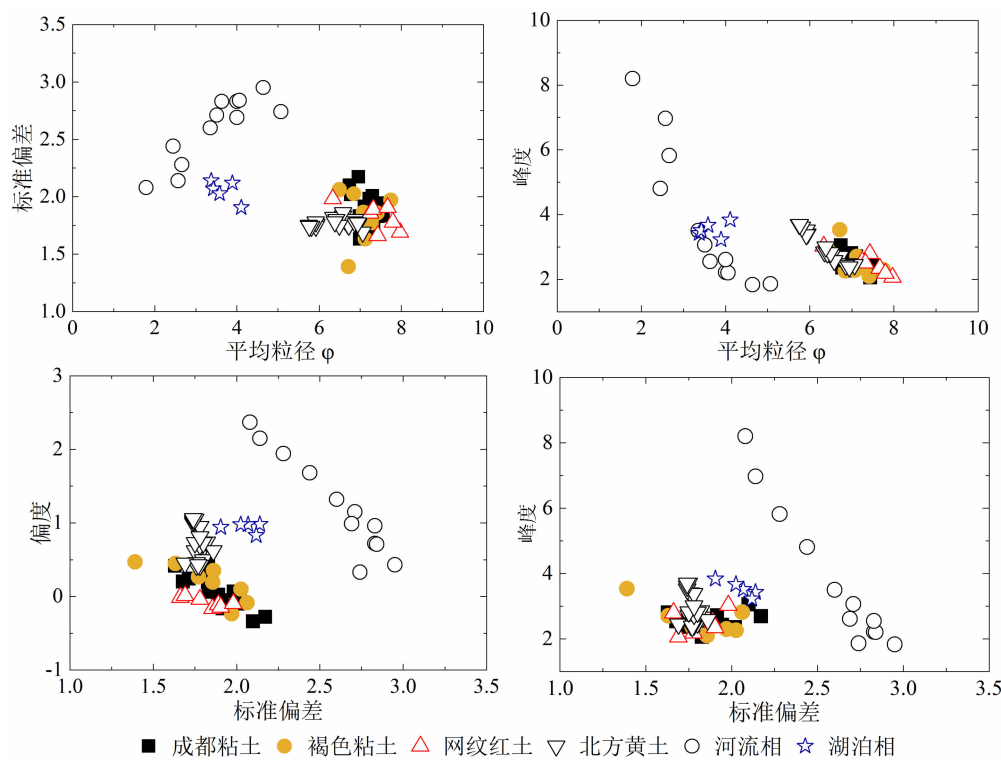


图 6 不同类型沉积物粒度参数散点图

(资料来源:北方黄土和河流相沉积物数据引自文献[31];湖泊相沉积物数据引自文献[24])

Fig.6 Scatter plot of particle size parameters from different types of sediment

(data sources: the northern loess and fluvial facies sediments data from literature [31]; lacustrine sediments data from literature [24])

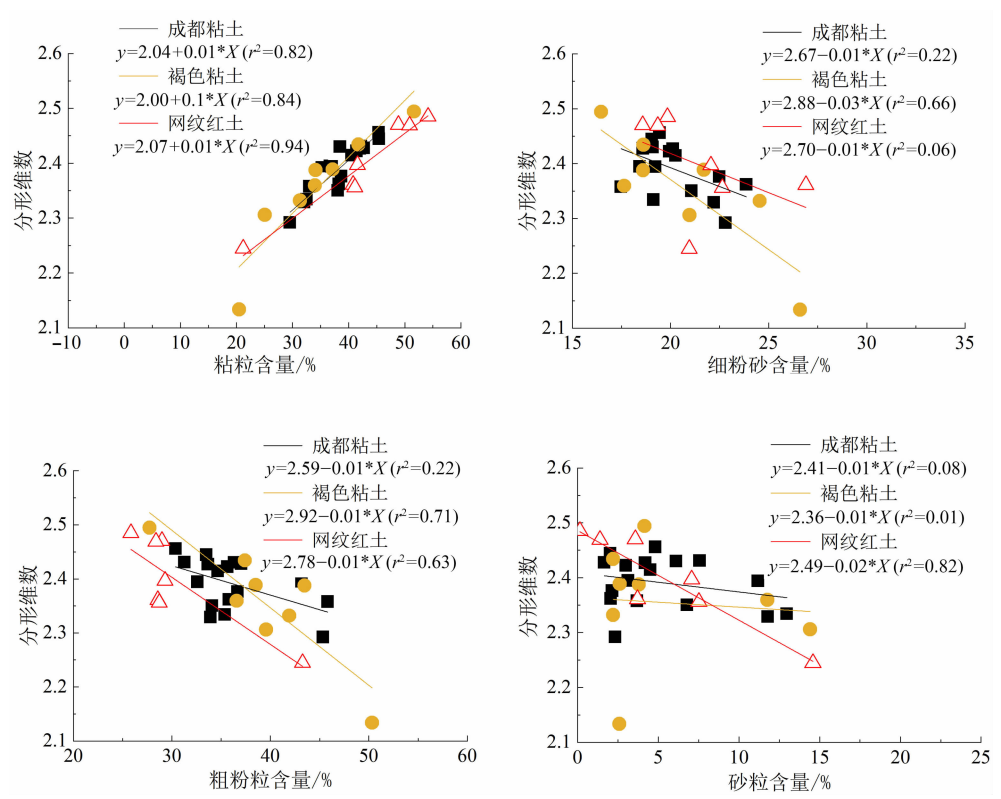


图 7 粒度分形维数与粒度含量相关性图

Fig. 7 Relationship between fractal dimension and content of particle size distribution

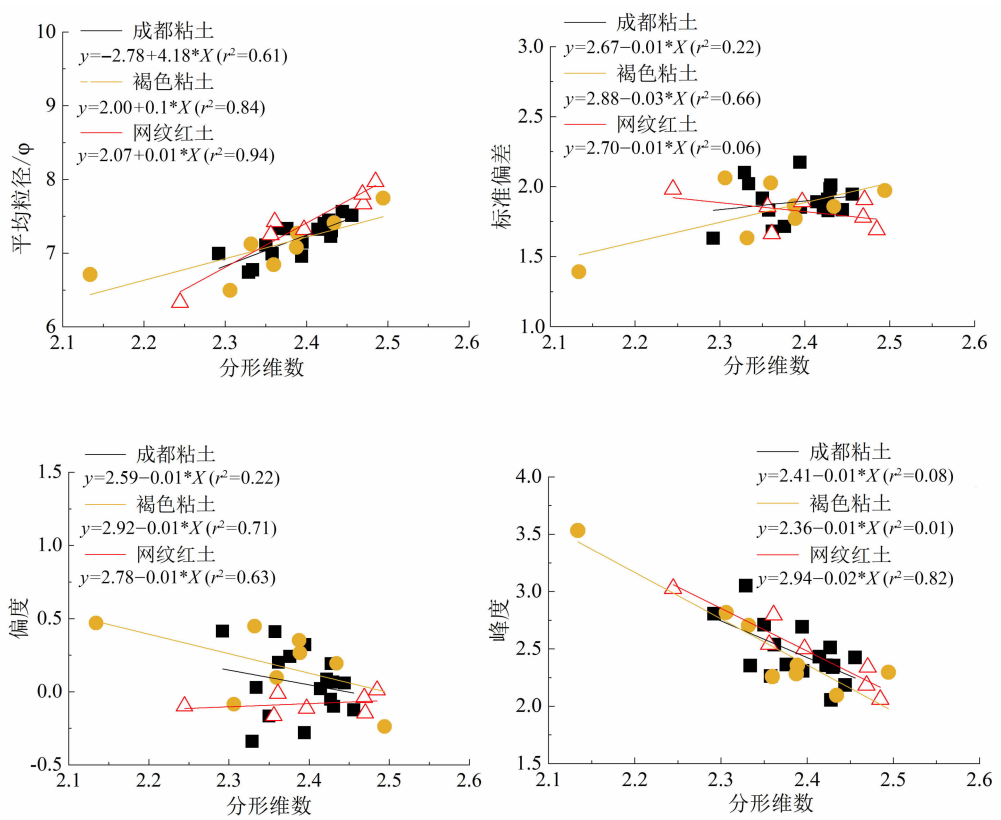


图 8 粒度分形维数与粒度参数相关性图

Fig. 8 Relationship between fractal dimension and parameters of particle size distribution

3 讨论

3.1 成都粘土及其下伏粘土的成因

通过前述对比分析,发现成都粘土与其下伏粘土的粒度特征与北方黄土相似,而与河湖相沉积物相差较大。在粒度参数散点图中可以看出成都粘土及下伏粘土与黄土的粒度参数投影区域更为接近,与河流相沉积物和湖泊相沉积物投影区域较分离(图6)。冰水堆积物与河流相沉积物的粒度组成和粒度参数类似^[32-33],而残积风化壳剖面颗粒表现为由下往上粒径变细,且基岩残积风化形成的物质与风成沉积物粒度组成和分布形态上也存在极大差异^[34],因此本文研究样品应属风成沉积物。最近的研究^[2,15]表明成都粘土物源与北方黄土具有显著差异,其成因可能是晚更新世时期古重力风将邻近山原地区的冲积物搬运所致。本文样品颗粒频率曲线出现粗尾现象,很可能是受近源物质的影响。

3.2 粒度特征的古环境意义

从成都粘土及其下伏粘土的粒度组成来看,虽然都是以粉砂为主,但是细粉砂和粗粉砂含量不同(表2)。褐色粘土的粗粉砂为其众数粒组,含量高于成都粘土与网纹红土,且褐色粘土 Kd 值高于成都粘土和网纹红土,表明褐色粘土沉积时粗粉砂含量相对较多。由于粗粉砂含量不仅为典型黄土的众数粒组,也为风尘的基本粒组^[28],因此褐色粘土在沉积环境上与典型黄土可能更为相似,受风力搬运影响更大。成都粘土和网纹红土的粘粒含量高于粗粉砂含量,粘粒级为其众数粒组,平均粒径也明显低于褐色粘土。其成因可能为风力作用相对较弱,或者沉积时期气候相对暖湿,沉积物受到风化成土作用的影响而使颗粒偏细。成都粘土元素地球化学特征表明其经历了中等强度的化学风化,相较北方黄土风化更强烈^[21],而网纹红土沉积之后可能遭受了极端暖湿气候的风化改造^[20,35]。因此,成都粘土及其下伏粘土按照沉积时间的先后顺序,古气候演变表现为暖湿-冷干-暖湿的趋势。

沉积物粒度的标准偏差与外力作用的分选作用有关,可以在一定程度上反映堆积时期气候特征的变化和稳定性,标准偏差越大,沉积物的分选性就越差^[36]。成都粘土的标准偏差相对下伏粘土偏大,表明其沉积时期风力搬运作用相对较弱,或颗粒分选

性受到后期风化成土作用的改造影响。

沉积物的粒度偏度(SK)用于指示粒度频率曲线的对称性,整体上可概括为 $SK = 0$ 为对称分布; $SK > 0$ 为正偏,即沉积物粗粒含量集中; $SK < 0$ 为负偏,即沉积物细粒含量集中^[37]。成都粘土及其下伏粘土按由老到新的沉积顺序:网纹红土 SK 均值为 -0.08 ,褐色粘土为 0.19 ,成都粘土为 0.06 (表3)。网纹红土为负偏,表明网纹红土的细颗粒组分比成都粘土和褐色粘土集中;褐色粘土正偏性最强,说明褐色粘土的粗颗粒组分比成都粘土和网纹红土集中,进一步证明褐色粘土受到较强的搬运动力影响。成都平原邻近青藏高原东部山原峡谷区域,全球性冷干气候背景下,强盛的冬季风必然会加剧山原地区冷空气下沉而形成重力风。因此,褐色粘土沉积时期冬季风相对强盛,而网纹红土和成都粘土沉积时冬季风相对较弱,气候较为暖湿。

峰度是指示沉积物粒径分布在平均粒径两侧集中程度的参数^[36],用来说明沉积物粒径频率曲线与正态分布曲线比较时的宽窄尖锐变化频度^[38], $Kg = 1$ 为正态曲线; $Kg > 1$ 为窄峰尖锐曲线; $Kg < 1$ 为宽峰平缓曲线。成都粘土及其下伏粘土粒径分布均为窄峰尖锐曲线,相较而言褐色粘土峰度值最大,曲线表现更尖窄,表明褐色粘土粒度分布更为集中,分选性更好,这与上述粒度组成、偏度及标准偏差特征得出的结论一致。

沉积物粒度分形维数可以精确的反映颗粒分布特征,本质上是颗粒均一程度的反映,通常样品颗粒中细组分越多,其分形维数越大^[39-41]。成都粘土及其下伏粘土分形维数与粘粒含量和 φ 值均呈显著正相关(图7和图8),体现了细颗粒组分对分形维数的影响。相关研究表明,成土作用会影响分形维数大小^[40],成都粘土和网纹红土的分形维数较褐色粘土稍大,很可能前者经历的风化作用稍强于后者。分形维数与粉砂含量相关性中褐色粘土表现最强,与砂粒含量相关性中网纹红土表现显著(图7),然而砂粒含量在三层粘土间差异并不明显(表2),结合分形维数与 φ 值的正相关(图8),表明三层粘土的分形维数大小除了受控于粘粒组分含量外,其他粒级影响存在明显差异。样品分形维数均与峰度呈显著相关,然而分形维数与标准偏差和偏度的相关性中仅有褐色粘土具有明显相关性(图8)。沉积物中标准偏差与峰度相关性较好^[42],土壤颗粒因受到

成壤作用改造其分形维数与标准偏差和峰度无相关性^[39]。推测成都粘土和网纹红土很可能受到风化成壤作用影响而使颗粒组成失去了沉积分选特征,而褐色粘土颗粒保留了风成沉积时的分选性。因此,成都粘土和网纹红土相对褐色粘土经历了较为暖湿的气候特征。

3.3 成都粘土及其下伏粘土沉积时期的气候特征

根据前述的测年文献^[15, 19-20],成都粘土属末次盛冰期后的沉积产物,全球性气候由冷干转为相对暖湿^[43-45],成都粘土表现出较高的风化成壤强度很可能受较为暖湿的全新世气候影响。褐色粘土堆积时期属更新世末次冰期,全球气候表现为冷干特征;而网纹红土的沉积初期为中更新世气候转型期^[46],此时全球气候呈现降温的变化^[47-48],之后气候波动较大,如北方黄土出现多层古土壤,特别是约0.4~0.6 Ma B. P. 期间出现的 S_4 、 S_{5-1} 和 S_{5-3} 古土壤指示了强劲夏季风盛行的特征^[49]。本文讨论的网纹红土表现出受成壤作用影响较大,表现为相对暖湿的气候特征,很可能是其沉积的中后期几次气候转暖所致,同时,网纹红土和褐色粘土之间地层缺失较长时间(图3),也为网纹红土的风化侵蚀提供了充足的时间。

4 结论

(1)成都粘土及其下伏粘土粒度组成均以粉砂为主,相较北方黄土粘粒含量较多而砂粒含量较低;成都粘土和网纹红土的众数粒级为粘粒组分,而褐色粘土的众数粒级为粗粉砂组分,且 K_d 值表现为褐色粘土较大而成都粘土和网纹红土较小。成都粘土及其下伏粘土由下至上颗粒大小总体表现为细-粗-细的变化。频率曲线粗尾的出现表明成都粘土及其下伏粘土具有近源性的特征。

(2)成都粘土及其下伏粘土的粒度参数特征分布与北方黄土接近,而与河湖相沉积物相差较大,具有风成沉积物特征。成都粘土具有较高的标准偏差,而褐色粘土 ϕ 值最小、而偏度和峰度最大。成都粘土及其下伏粘土的分形维数与粘粒含量呈正相关,而与粉砂和砂粒含量呈负相关。成都粘土和网纹红土粒度分形维数相近,均大于褐色粘土;而三层粘土中仅有褐色粘土粒度分形维数与标准偏差具有明显相关性,表明成都粘土和网纹红土受到了风化

作用的影响更强烈。

(3)成都粘土和网纹红土的颗粒组成及分布相较褐色粘土受风化成壤作用的改造更大,三层粘土代表的气候特征按沉积时间先后表现为暖湿-冷干-暖湿的变化。

参考文献 (References)

- [1] THORP J, DYE D S. The Chengdu clays — deposits of possible loessial origin in western and northwestern Sichuan basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1936, **15**(2): 225–242.
- [2] FENG Jinliang, HU Zhaoguo, JU Jianting, et al. The dust provenance and transport mechanism for the Chengdu Clay in the Sichuan Basin, China [J]. Catena, 2014, **121**: 68–80.
- [3] 冯金良, 赵振宏, 赵翔, 等. “成都粘土”的成因、物源、时代及其古环境问题 [J]. 山地学报, 2014, **32**(5): 513–525. [FENG Jinliang, ZHAO Zhenhong, ZHAO Xiang, et al. The origin, provenance, age and climatic links of the Chengdu clay: a review [J]. Mountain Research, 2014, **32**(5): 513–525]
- [4] 张惠英. 从微结构特征对成都粘土成因的初步探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1986, **13**(1): 17–19. [ZHANG Huiying. Genesis of the Chengdu clay based on microstructural features research [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1986, **13**(1): 17–19]
- [5] 成都地质学院水文工程地质教研室. 成都粘土的工程地质特征 [J]. 成都地质学院学报, 1960, **1**(1): 75–91. [Hydrological Engineering Geology Division, Chengdu College of Geology. Engineering geological characteristics of Chengdu Clay [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1960, **1**(1): 75–91]
- [6] 费美高, 许国琳, 张品萃. 成都粘土中的构造断裂现象及其研究意义 [J]. 地质灾害与环境保护, 1995, **6**(3): 24–32. [FEI Meigao, XU Guolin, ZHANG Pincui. Phenomena of tectonic fractures and faults in Chengdu Clay [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1995, **6**(3): 24–32]
- [7] 张品萃. 游离 Fe_2O_3 对成都粘土部分工程地质特征的影响 [J]. 矿物岩石, 1999, **19**(1): 83–86. [ZHANG Pincui. Effect of free Fe_2O_3 on the engineering properties of Chengdu Clay [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1999, **19**(1): 83–86]
- [8] 四川省区域地层表编写组. 西南地区区域地层表(四川分册) [M]. 北京: 地质出版社, 1978, 96–97. [Editorial Committee of Sichuan stratigraphy. Regional stratigraphy in Southwest China (Sichuan branch) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 96–97]
- [9] 李承三, 吴燕生, 李永昭, 等. 四川龙门山南段东坡及其山前带第四纪冰川遗迹 [G] // 中国第四纪委员会等, 中国第四纪冰川遗迹研究文集. 北京: 科学出版社, 1964: 14–84. [LI Chengsan, WU Yansheng, LI Yongzhao, et al. Quaternary glacial relics in eastern foot of southern Longmenshan Mountains [G] // Corpus of Quaternary glacial relics in China, Quaternary Commission of China. Beijing: Science Press, 1964: 14–84]

- [10] 李春昱. 雅安期与江北期砾石层之生成[J]. 地质论评, 1947, **12**: 117 - 126. [LI Chunyu. Generation of gravel layers in Ya'an and Jiangbei periods [J]. Geological Review, 1947, **12**: 117 - 126]
- [11] 柯懋. 关于“成都粘土”问题的商榷[N]. 地质报, 1981 - 03 - 20. [KE Mao. Discussion on the issue of “Chengdu clay” [N]. Geological newspaper, 1981 - 03 - 20]
- [12] 汪波, 聂前勇, 王运生, 等. 也论成都粘土的成因[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, **13**(1): 54 - 56. [WANG Bo, NIE Qianrong, WANG Yunsheng, et al. Discussion on the genetic mechanism of the Chengdu Clay [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, **13**(1): 54 - 56]
- [13] FENG Jinliang, HU Zhaoguo, JU Jianting, et al. Variations in trace element (including rare earth element) concentrations with grain sizes in loess and their implications for tracing the provenance of eolian deposits [J]. Quaternary International, 2011, **236**(1): 116 - 126.
- [14] 马溶之. 中国黄土之生成[J]. 地质论评, 1944, **9**(2): 207 - 224. [MA Rongzhi. Formation of Chinese loess [J]. Geology Reviews, 1944, **9**(2): 207 - 224]
- [15] FENG Jinliang, JU Jianting, CHEN Feng, et al. Identification of a late Quaternary alluvial-aeolian sedimentary sequence in the Sichuan Basin, China [J]. Quaternary Research, 2016, **85**(2): 279 - 289.
- [16] 应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 成都平原区成都粘土的粒度特征及其成因意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, **32**(1): 72 - 77. [YING Lichao, LIANG Bin, WANG Quanwei, et al. Grain size analysis and origin of the Chengdu clay from the Chengdu Plain, Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, **32**(1): 72 - 77]
- [17] 乔彦松, 赵志中, 李增悦, 等. 成都平原红土堆积的风成成因证据[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 286 - 294. [QIAO Yansong, ZHAO Zhizhong, LI Zengyue, et al. Aeolian origin of the red earth formation in the Chengdu Plain [J]. Quaternary Science, 2007, **27**(2): 286 - 294]
- [18] 胡兆国, 冯金良, 鞠建廷. 成都粘土中石英的粒度分布及其表面微结构特征[J]. 山地学报, 2010, **28**(4): 392 - 406. [HU Zhaoguo, FENG Jinliang, JU Jianting. Grain size distribution and micro-structure of quartz in the Chengdu Clay [J]. Mountain Research, 2010, **28**(4): 392 - 406]
- [19] 梁斌, 王全伟, 朱兵, 等. 川西地区成都粘土的光释光年代学[J]. 第四纪研究, 2013, **33**(4): 823 - 828. [LIANG Bin, WANG Quanwei, ZHU Bing, et al. Optically stimulated luminescence dating of the Chengdu clay in the West Sichuan [J]. Quaternary Science, 2013, **33**(4): 823 - 828]
- [20] ZHAO Zhizhong, QIAO Yansong, WANG Yan, et al. Magnetostratigraphic and paleoclimatic studies on the red earth formation from the Chengdu Plain in Sichuan Province, China [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, **50**(6): 927 - 935.
- [21] 应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 成都粘土地球化学特征及其对物源和风化强度的指示[J]. 中国地质, 2013, **40**(5): 1666 - 1674. [YING Lichao, LIANG Bin, WANG Quanwei, et al. Geochemical characteristics of Chengdu clay and their implications for provenance and weathering intensity [J]. Geology in China, 2013, **40**(5): 1666 - 1674]
- [22] DING Z, YU Z, RUTTER N W, et al. Towards an orbital time-scale for Chinese loess deposits [J]. Quaternary Science Reviews, 1994, **13**(1): 39 - 70.
- [23] LV Lianqing, FANG Xiaomin, LU Huayu, et al. Millennial-scale climate change since the last glaciation recorded by grain sizes of loess deposits on the northeastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(11): 1157 - 1164.
- [24] 乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 中新世黄土—古土壤序列的粒度特征及其对成因的指示意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, **36**(7): 646 - 653. [QIAO Yansong, GUO Zhengtang, HAO Qingzhen, et al. 2006. Grain-size features of a Miocene loess-soil sequence at Qinan: implications on its origin [J]. Science in China (Series D), 2006, **36**(7): 646 - 653]
- [25] 刘涛, 庞奖励, 黄春长, 等. 湖北郧县黄坪村黄土—古土壤序列体积分形维数特征及其环境意义[J]. 东农业科学, 2018, **50**(4): 73 - 78. [LIU Tao, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Volumetric fractal dimension characteristics of Loess-Paleosol sequence and its environmental significance in Huangping village, Yunxian county, Hubei province [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, **50**(4): 73 - 78]
- [26] FRIEDMAN G M, SANDERS J E. Principles of sedimentology [M]. New York: John Wiley & Sons, 1978: 792.
- [27] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, **42**(4): 545 - 550. [WANG Guoliang, ZHOU Shenglue, ZHAO Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(4): 545 - 550]
- [28] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 203. [LIU Dongsheng. Loess and the environment [M]. Beijing: Science Press, 1985: 203]
- [29] PATTERSON E M, GILLETTE D A. Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil-derived component [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, **82**(15): 2074 - 2082
- [30] 盛海洋. 青藏高原东北缘若尔盖盆地黄土的成因[J]. 地球科学, 2010, **35**(1): 62 - 74. [SHENG Haiyang. Zoigü basin loess origin in the Northeast Tibet plateau [J]. Earth Science, 2010, **35**(1): 62 - 74]
- [31] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比: 红粘土风成成因的新证据[J]. 沉积学报, 1999, **2**(2): 226 - 232. [LU Huayu, AN Zhisheng. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese loess plateau [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, **2**(2): 226 -

- 232]
- [32] 高顺利. 天山乌鲁木齐河源冰碛物与冰水沉积物的粒度特征[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 1984, **10**(4): 75–83. [Gao Shunli. Particle size characters of till and glaciofluvial deposits at the head of Urumqi, Tian Shan [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 1984, **10**(4): 75–83.]
- [33] 武安斌. 托赖山“七一”冰川流域冰碛石和冰水砾石的沉积组构分析[J]. 兰州大学学报, 1983, **27**(3): 127–139. [WU Anbin. The analysis of sedimentary fabric of morainic stones and fluvioglacial gravels of “7.1” glacial drainage Tuolaishan [J]. Journal of Lanzhou University, 1983, **27**(3): 127–139]
- [34] 冯志刚, 王世杰, 孙承兴, 等. 岩溶地区缺失原岩残余结构红色风化壳的粒度分布特征及成因指示——以贵州平坝为例[J]. 矿物学报, 2002, **22**(3): 243–248. [FENG Zhigang, WANG Shijie, SUN Chengxing, et al. Particle distribution of red weathering crust and its genetic implication—as exemplified by Pingba County of Guizhou, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, **22**(3): 243–248]
- [35] 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]
- [36] 张威, 郭善莉, 李永化, 等. 辽东半岛黄土粒度分维特征及其环境意义[J]. 地理科学进展, 2010, **29**(1): 79–86. [ZHANG Wei, GUO Shanli, LI Yonghua, et al. Grain-size Fractal Dimension of Loess and Its Environmental Significance in the Peninsula of East Liaoning [J]. Progress in Geography, 2010, **29**(1): 79–86]
- [37] 蒙仲举, 王猛, 高永, 等. 基于土壤粒度参数的荒漠草原地表粗粒化过程[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(6): 22–28. [MENG Zhongju, WANG Meng, GAO Yong, et al. Soil coarse graining process based on surface grain size distribution in Xilamuren desert steppe [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(6): 22–28]
- [38] 武安斌. 冰碛物的粒度参数特征及其与沉积环境的关系[J]. 冰川冻土, 1983, **5**(2): 47–53. [WU Anbin. The characteristics of grain-size parameters of till and their relation to sedimentary environments [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, **5**(2): 47–53]
- [39] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(9): 74–78. [DANG Yaai, LI Shiqing, WANG Guodong, et al. Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, **25**(9): 74–78]
- [40] 文星跃, 黄成敏, 黄凤琴, 等. 岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2011, **43**(1): 80–86. [WEN Xingyue, HUANG Chengmin, HUANG Fengqin, et al. Fractal dimensions of soil particles and related affecting factors from the valley of upper Minjiang river [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2011, **43**(1): 80–86]
- [41] 王丽娟, 庞奖励, 黄春长, 等. 关中东部 TSG 全新世剖面粒度分形特征及古气候意义[J]. 土壤通报, 2012, **43**(1): 1–5. [WANG Lijuan, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Grain-size Fractal Characteristics of TSG Holocene Profile and Its Significance in Eastern Guanzhong [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(1): 1–5]
- [42] 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比[J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(6): 577–582. [JIA Jianjun, GAO Shu, XUE Yunchuan. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods; a comparative study [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, **33**(6): 577–582]
- [43] OTTO B L, SCHNEIDER R, BRADY E C, et al. A comparison of PMIP2 model simulations and the MARGO proxy Reconstruction for tropical sea surface temperatures at last glacial maximum [J]. Climate Dynamics, 2009, **32**(6): 799–815.
- [44] MIX A C, BARD E, SCHNEIDER R, et al. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG) [J]. Quaternary Science Reviews, **20**(4): 627–657.
- [45] KURAHASHI-NAKAMURA T, LOSCH M, PAUL A. Can sparse proxy data constrain the strength of the Atlantic meridional overturning circulation? [J]. Geoscientific Model Development, 2014, **7**(1): 419–432.
- [46] MUDELSEE M, SCHULZ M. The Mid-Pleistocene climate transition: onset of 100 ka cycle lags ice volume build-up by 280 ka [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, **151**(1/2): 117–123.
- [47] BERGER W H, YASUDA M K, BICKERT T, et al. Quaternary time scale for the Ontong Java Plateau: Milankovitch template for Ocean Drilling Program Site 806 [J]. Geology, 1994, **22**(5): 463–467.
- [48] JIAN Zhimim, ZHAO Quanhong, CHENG Xinrong, et al. Pliocene – Pleistocene stable isotope and paleoceanographic changes in the northern South China Sea [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2003, **193**(3): 425–442.
- [49] GUO Zhentang, LIU Dongsheng, FEDOROFF N, et al. Climate extremes in Loess of China coupled with the strength of deep-water formation in the North Atlantic [J]. Global and Planetary Change, 1998, **18**(3/4): 113–128.

Comparison of Particle Size Characteristics Between the Chengdu Clay and Its Underlying Clay: Implication for Paleoenvironment Changes

GE Luyue^{a,b}, WEN Xingyue^{a,b*}

(China West Normal University, a. College of Land and Resources;

b. Research Center for Regional Environmental Evolution and Conservation, Nanchong 637009, Sichuan China)

Abstract: To further understand regional environmental evolution in the Chengdu plain, it is necessary to identify the sedimentary environment characteristics of the Chengdu clays and its underlying strata which are brown clays and reticulated red clays. Particle size distribution, particle size frequency curve, particle size parameter and fractal dimension were analyzed. The results showed that: (1) particle sizes of silt ($5 \sim 50 \mu\text{m}$) dominated the Chengdu clays and its underlying clays, while clays ($< 5 \mu\text{m}$) concentrations and Kd values were higher and lower than that of northern loess, respectively; coarse particles of $> 100 \mu\text{m}$ were presented in the curves of particle size frequency for all samples. (2) The three-layer clays were similar to the northern loess and different from the fluvial and lacustrine sediments from the characteristics of particle size parameters. (3) In comparison, the brown clays showed higher values of skewness and kurtosis as well as coarse silt ($10 \sim 50 \mu\text{m}$) concentrations, and lower values of mean particle size (φ) and fractal dimension. While higher values of standard deviation and lower kurtosis values were presented in the Chengdu clays; and the values of mean particle size (φ) and fractal dimension from the reticulated red clays were the largest. (4) The fractal dimension was significantly correlated with particle size composition, average particle size and kurtosis from the three clay layers, while only the brown clays showed a significant correlation between the values of fractal dimension, standard deviation and skewness. (5) The Chengdu clays and reticulated red clays rather than the brown clays once experienced a strong weathering and pedogenesis process, showing a climatic change trend of warmth-humidity to cold-drought and to warmth-humidity.

Key words: Chengdu clay; particle size parameters; fractal dimension; sedimentary environment