

基于激光粒度测试法的闽粤沿海花斑粘土成因研究

王晶¹, 陈震², 高全洲^{1*}

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275

2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275

摘要 近年来主流的激光粒度分析是一种集激光、光电以及计算机技术对颗粒的粒度进行测试的方法。其原理是:不同粒径的颗粒对入射激光会产生不同角度的散射光,通过测量不同角度散射光的强度,可计算样品的粒度分布。由于操作简便、测试快速、精度高,在沉积学中有着重重要的应用。闽粤沿海第四纪盆地的上更新统与全新统之间,普遍发育一层“花斑粘土”,其多被认为是晚更新世末期的河、海相沉积,在末次盛冰期,顶部暴露地表风化而成。而初步研究显示,花斑粘土与下伏沉积在颜色、结构、成分等方面存在显著差异,两者相交截然,不具备典型的风化成因关系;花斑粘土具粉砂感,干燥后易随风飞扬,沉积特征与风成黄土具有较好的可比性。粒度分布是判断沉积物的沉积环境及成因的重要指标,为了探明花斑粘土的沉积属性及形成机制,选取珠江三角洲三个代表性第四纪钻孔,采用激光粒度方法,对花斑粘土的粒度特征进行研究。结果显示,花斑粘土以10~50 μm的粗粉砂为众数粒组,<5 μm的粘粒为次众粒组,分别对应黄土的“基本粒组”和“挟持粒组”,是风成沉积的典型粒组构成;各项粒度参数均符合风成沉积的范围;粒度参数散点集中,粒度指数展布范围统一,均与典型黄土一致,而与下伏沉积差异截然;判别结果显示,花斑粘土属风成沉积;粒度相分析表明,花斑粘土与典型黄土投点范围重合,而与其下伏沉积显著不同。最终提出,广布闽粤沿海第四纪地层中的花斑粘土与其下伏沉积层在沉积特征及成因上并无关联,花斑粘土并非原地风化的产物,而属末次盛冰期外来的风成堆积。该结论对今后闽粤沿海地区晚第四纪古气候环境的重建有着重要的科学意义。可见,基于光学散射原理的激光粒度方法为判断沉积物的沉积环境及成因提供了有效的科学证据。

关键词 激光粒度;花斑粘土;闽粤沿海;风成沉积

中图分类号: P512.2+1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3026-06

引言

我国闽粤沿海第四纪盆地(如珠江三角洲、练江平原、韩江三角洲以及福建沿海盆地等)的上更新统与全新统之间,广泛发育一套黄色粉土层,有时表现为以黄色为基色,混杂红、灰的斑纹状结构,因此也被称作“花斑粘土”^[1-2]。现有研究认为,花斑粘土是晚更新世末期海进时的河、海相沉积,在末次盛冰期全球低海面时暴露地表,顶部一定厚度的沉积风化而成^[1-2]。而初步的研究发现:花斑粘土与其下伏河、海相沉积在成分及结构等方面均存在显著差异,无明显过渡,不具备典型的风化成因关系;花斑粘土具粉砂感,风干后易

随风飞扬,沉积特征具有风成特性。

近年来,随着粒度测试技术的不断发展,依据光学散射原理测试颗粒粒径的激光粒度分析方法在国内外有着广泛的运用^[3-4]。除了在医药、化工、建材、电子、食品、环境等领域的应用,激光粒度在地质沉积学中也发挥着越来越重要的作用^[3-4]。粒度特征是反映沉积物搬运介质、沉积条件的重要指标,是研究沉积物沉积环境及成因的有效方法。当激光光束遇到大小不等的颗粒时,会产生不同角度的散射,通过探测散射光的强度可计算样品的粒度分布。相对于传统机械分析方法而言,激光粒度分析法所需样品量少、测试速度快、精度高。鉴于此优势,使用该方法,对该套花斑粘土的粒度特征进行深入分析,从而探讨其成因。

收稿日期:2020-09-15,修订日期:2020-12-21

基金项目:中国博士后科学基金项目(2019M663210),高校青年教师培育项目(19lgpy55),广东省地质灾害防治专项(2017201-1)资助

作者简介:王晶,1986年生,中山大学地理科学与规划学院博士后 e-mail: wangjing8@mail.sysu.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: eesgqz@mail.sysu.edu.cn

1 实验部分

1.1 钻孔及采样

花斑粘土广泛分布于闽粤沿海的第四纪盆地中,尤以珠江三角洲为盛(图 1)。该层粉土的厚度不大,一般为几十~

几百 cm,通常形成于晚第四纪以来两次高海面之间的海退期,由于受海水扰动作用的影响,年代较老的多被破坏,现多保留年龄为 25~10 ka 的末次盛冰期的层位^[1-2]。为了揭示花斑粘土的成因,本文选择珠江三角洲的三个第四纪钻孔(图 1),对各钻孔中的花斑粘土层及其下伏沉积按照平均 8 cm 的间距连续采样,样品共计 94 个。

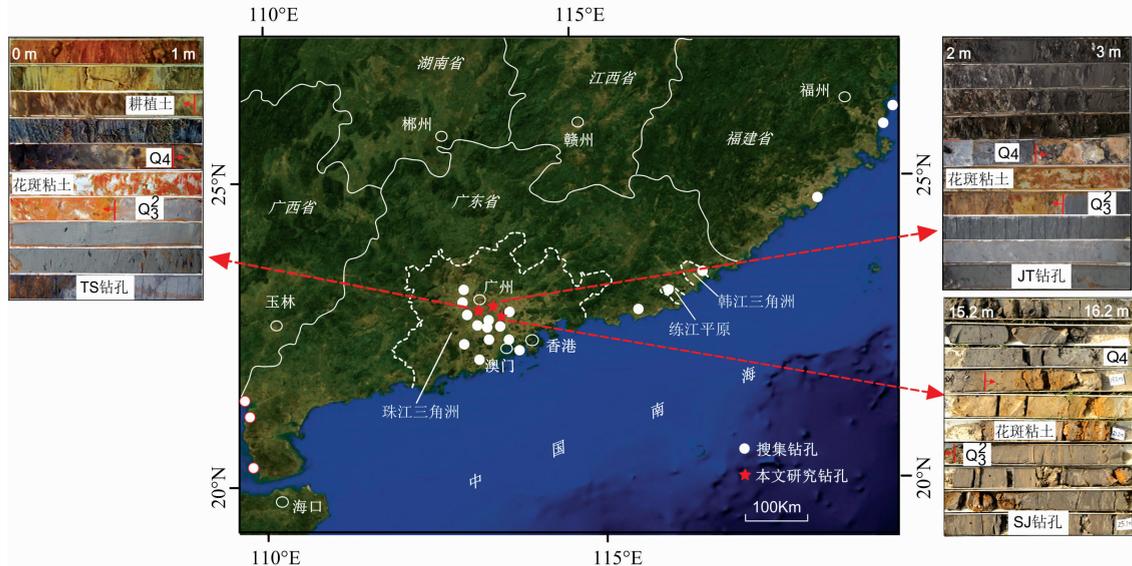


图 1 本研究搜集和研究钻孔分布

Fig. 1 The distribution map of collected and studied drill cores

1.2 测试方法

将所采集的样品取适量分别放入 50 mL 小烧杯中,先加入 10% 的双氧水以除去有机质,后加入 10% 的浓盐酸以除去碳酸钙。每加试剂后,放置于电热板使样品充分反应。最后,将烧杯注满蒸馏水反复清洗,直到溶液呈中性为止。上机测试前,加入 10 mL 0.05 mol·L⁻¹ 的六偏磷酸钠进行分散,并在超声波振荡器中震荡 10 min。测试仪器为英国 Mastersizer 2000 型激光粒度仪(测量范围 0.02~2 000 μm)。

2 结果与讨论

2.1 粒度组成

本文采用 5, 10 和 50 μm 作为粘粒、细粉砂、粗粉砂、砂砾石的分界点。从表 1 可看出,各钻孔的花斑粘土均以粗粉砂(10~50 μm)为第一众数组,平均含量介于 37.52%~50.21%;粘粒(<5 μm)的平均含量介于 25.59%~32.92%,是粒度组成中的次众粒组;细粉砂(5~10 μm)的平均含量介于 20.90%~26.01%;砂砾石(>50 μm)的含量最少,平均值介于 3.30%~4.14%,几乎不含>100 μm 的颗粒(表 1)。总体上,花斑粘土以粉砂(5~50 μm)为主,岩性属粘土质粉砂,而非传统所认为的“粘土”(为了避免与以往惯用名称相混淆,本文依旧将其称为“花斑粘土”)。

表 1 显示,花斑粘土的粒度组成模式在不同钻孔之间较为一致,在单个钻孔中的不同深度也相似,主要表现为各钻孔垂向上各粒组含量的最大值与最小值相差不大(表 1),粒

度总体上均一而稳定,表明样品在堆积前经历了充分的混合和分选,这是风成沉积的典型特征。

将各粒组含量绘制成柱状图可更为直观的显示样品的粒组分布特征(图 2)。刘东升先生研究黄土时,将 10~50 μm 的粗粉砂和<5 μm 的粘粒分别定名为风成沉积的“基本粒组”和“挟持粒组”,两者是风成沉积的典型粒组构成^[5]。通过对比,花斑粘土同样以风成黄土的“基本粒组”(黑色方柱)和“挟持粒组”(灰色方柱)为主要粒组构成,其余依次为 5~10 及>50 μm 的方柱[图 2(a-c)]。该粒组配分特征与典型黄土一致[图 2(d, e)],表明花斑粘土具有风成特性。

而 TS 和 JT 钻孔花斑粘土下伏沉积均以粘粒(<5 μm)为第一众数组,细粉砂(5~10 μm)为第二众数组(表 1),且随着粒级增大,各粒组方柱呈递减趋势[图 2(f, g)],为典型的海相淤泥;SJ 钻孔花斑粘土下伏沉积以>50 μm 的粗砂砾石为主要构成,粒组方柱最高,其次为 10~50 μm 的方柱[图 2(h)],且各粒组含量变化范围广,不同深度相差很大(表 1),表明搬运动力不稳定,符合河流相沉积的粒度特征。由此可见,花斑粘土层与其下伏海、河相沉积在粒度组成模式上截然不同,表明它们在搬运方式及所体现的成因上并无关联。

2.2 粒度参数

粒度参数是判断搬运介质及沉积环境的重要依据。其中,平均粒径(M_{ϕ})反映样品分布的集中趋势,不同钻孔花斑粘土的平均值介于 6.73~7.03 ϕ ;分选系数(σ)反映颗粒的分选程度,介于 1.56~1.61;偏度(SK_{ϕ})表示样品粒度分布的

表 1 花斑粘土的粒度特征以及与下伏沉积、典型黄土的对比
Table 1 Grain size characteristics of mottled clay and comparison with those of underlying layers and typical loess

钻孔	岩性	粒度组成				粒度参数				
		<5	5~10	10~50	>50	M_{ϕ}	σ	SK_{ϕ}	K_g	
TS	花斑粘土	范围	27.29~37.17	23.22~27.11	32.86~43.02	2.33~8.01	6.91~7.19	1.55~1.75	0.11~0.33	2.55~2.88
		平均	32.92	25.42	37.52	4.14	7.03	1.61	0.25	2.76
JT	花斑粘土	范围	22.46~37.35	22.62~28.16	33.57~49.02	1.90~4.87	6.80~7.22	1.48~1.65	0.15~0.53	2.68~3.26
		平均	31.21	26.01	39.24	3.54	7.00	1.56	0.31	2.93
SJ	花斑粘土	范围	19.82~35.34	15.23~27.93	41.66~57.64	0.49~9.04	6.29~7.19	1.36~1.77	0.38~0.81	2.58~3.49
		平均	25.59	20.90	50.21	3.30	6.73	1.57	0.64	2.99
TS 下伏	海相	范围	41.19~56.69	26.52~29.68	16.59~29.42	0.18~1.25	7.42~7.96	1.37~1.57	0.09~0.33	2.28~2.87
		平均	51.79	27.55	20.20	0.45	7.80	1.43	0.18	2.70
JT 下伏	海相	范围	36.16~45.76	23.71~31.65	22.51~33.31	0.08~4.29	7.14~7.59	1.24~1.72	0.01~0.34	2.62~2.99
		平均	42.71	28.52	26.77	1.87	7.43	1.44	0.15	2.87
SJ 下伏	河流相	范围	10.33~35.59	5.79~18.37	11.78~42.31	11.13~71.67	2.78~6.63	1.87~3.01	0.03~0.88	1.84~2.76
		平均	21.69	11.88	26.55	39.88	5.03	2.59	0.46	2.17
洛川 ^[5]	黄土	平均	27.40	12.50	53.30	6.80	6.63	2.09	/	/
镇江 ^[6]	下蜀土	平均	18.44	18.02	49.36	4.18	6.65	1.75	0.52	/

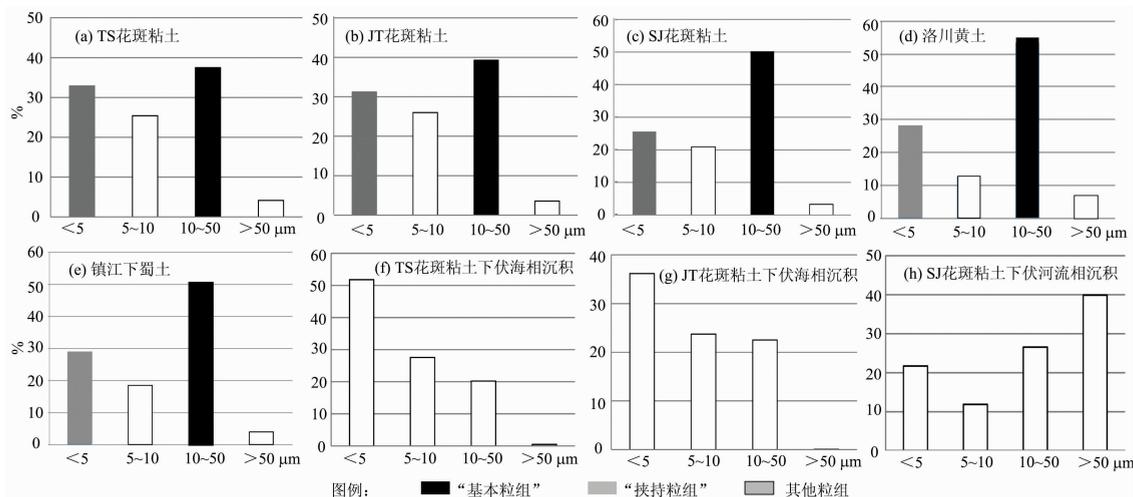


图 2 花斑粘土的粒度组成柱状图以及与下伏沉积、典型黄土的对比(取表 1 中的平均值)

Fig. 2 Grain size histograms of mottled clay and comparison with those of underlying layers and typical loess(Plotted with average values in Table 1)

不对称程度, 平均值介于 0.25~0.64, 属于正偏-极正偏; 峰态(K_g)介于 2.76~2.99, 表明样品的频率分布曲线形态较尖锐。总体上, 花斑粘土的各项粒度参数在不同钻孔之间变化不大, 单个钻孔中的最大值与最小值也相差不大(表 1), 表明样品粒度均一, 搬运动力稳定, 符合风成特征。通过对比, 花斑粘土的粒度参数与典型黄土具有较好的可比性(表 1), 表明它们在沉积环境及成因上的相似性。

而相比于花斑粘土, 其下伏海相沉积的平均粒径(M_{ϕ})分别为 7.80 ϕ (TS)和 7.43 ϕ (JT), 粒度更细; 下伏河流相沉积为 5.03 ϕ (SJ), 粒度更粗(表 1)。分选系数(σ)上, 下伏海相沉积平均值分别为 1.43(TS)和 1.44(JT), 均小于花斑粘土; 下伏河流相沉积为 2.59(SJ), 大于花斑粘土(表 1)。偏

度(SK_{ϕ})上, 下伏海相沉积的平均值分别为 0.19(TS)和 0.15(JT), 小于花斑粘土, 近正态分布(表 1)。下伏河流相沉积的偏度(SK_{ϕ})和峰态(K_g)的最大值与最小值相差较大(表 1), 表明搬运动力极不稳定。上述差异表明, 花斑粘土与下伏沉积层在粒度参数所反映的沉积环境上存在较大差异。

2.3 粒度参数散点图

粒度参数散点图是将不同的粒度参数分别作为横纵坐标进行投点。大量研究表明, 不同成因类型的沉积物在粒度参数散点图中的投点均有各自的区间范围, 因此可以更有效的区分不同沉积物的属性及成因^[7]。

各散点图中, 花斑粘土的投点与典型黄土具有一致的范围(图 3), 表明两者在沉积类型上的相似性。而相对于花斑

粘土和典型黄土，下伏海相沉积的投点在图 3(a—c)中偏右，图 3(d,e)中偏左，表明海相沉积的平均粒径($M\phi$)较大，分选值(σ)较小。各图中，花斑粘土下伏河流相沉积的投点散落不

集中，表明沉积环境动荡，这与花斑粘土及典型风成沉积均存在较大差异(图 3)。

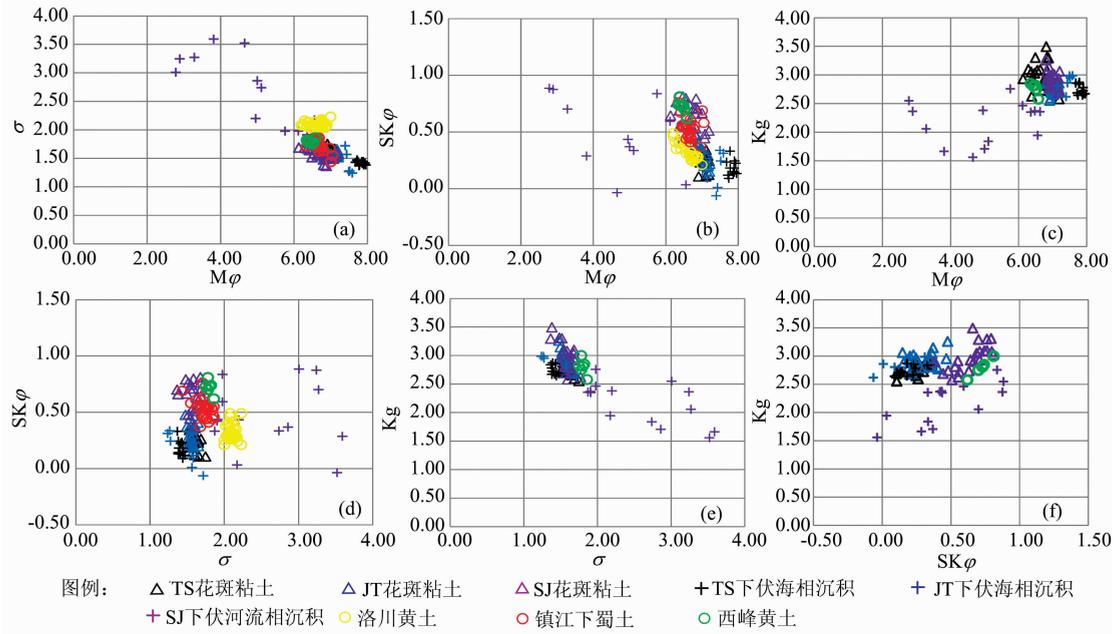


图 3 花斑粘土的粒度参数散点图以及与下伏沉积、典型黄土的对比

洛川黄土和镇江下蜀土缺少 Kg 数据，图(c, e, f)中无投点，其余引自[5-6]；西峰黄土数据引自[8]

Fig. 3 Scatter diagrams of grain size parameters of mottled clay and comparison with those of underlying layers and typical loess

As lack of Kg data, no points of Luochuan loess and Zhenjiang Xiashu loess present in Fig. (c, e, f), others from [5-6]; Data of Xifeng loess from [8]

2.4 粒度判别分析

前人对不同沉积相的粒度参数进行统计分析，总结出 $Y = -3.5688M\phi + 3.7016\sigma^2 - 2.0766SK\phi + 3.1135Kg$ (Y = 判别参数, $M\phi$ = 平均粒径, σ = 分选系数, $SK\phi$ = 偏度, Kg = 峰态)用于判别风成沉积[9]。研究发现，风成沉积的 Y 值皆为负值且一般 > -10 [9-10]。通过计算，三个钻孔中花斑粘土的判别参数值均符合风成沉积的范围，并与典型黄土具有

较好的可比性(图 4)。下伏海相沉积的 Y 值较小，介于 $-13 \sim -9$ 的范围；下伏河流相沉积的 Y 值介于 $0 \sim 40$ 的范围，均为正值，且不同层位 Y 值相差较大，与花斑粘土差异十分明显(图 4)。因此，判别分析结果同样表明，花斑粘土具有风成特征，与下伏沉积在成因上并无关联，花斑粘土不应为下伏海、河相沉积风化而成。

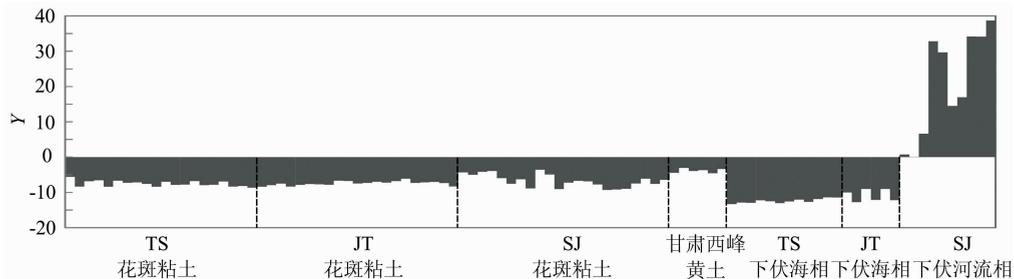


图 4 花斑粘土的粒度判别结果以及与下伏沉积、典型黄土的对比(西峰黄土数据引自[8])

Fig. 4 Discriminant analysis of mottled clay and comparison with those of underlying layers and typical loess (Data of Xifeng loess from [8])

2.5 粒度指数特征

粒度指数图是依据样品的中值粒径(Md)以及四分位值($Q1$ 和 $Q3$)而作的股价图。其中，中值 Md , $Q1$ 和 $Q3$ 是样

品累积百分含量分别在 50%，75%和 25%时所对应的粒径。这些参数是反映沉积类型及沉积环境的重要指标。

图 5 显示，同一钻孔以及不同钻孔之间，花斑粘土的指

数展布范围较为统一,均介于 $5\sim 8\varphi$ 之间,与典型黄土具有较好的可比性,表明花斑粘土具有风成特性。而花斑粘土下伏海相沉积的粒度指数介于 $6\sim 9\varphi$,明显高于花斑粘土和典型黄土(图5);下伏河流相沉积的指数展布跨度大,介于 $0\sim$

9φ ,且不同层位的样品展布范围不一致,表明粒度极不均匀,分选性差(图5)。可见,花斑粘土与下伏海、河相沉积在粒度指数及其所反映的沉积环境上亦差异明显。

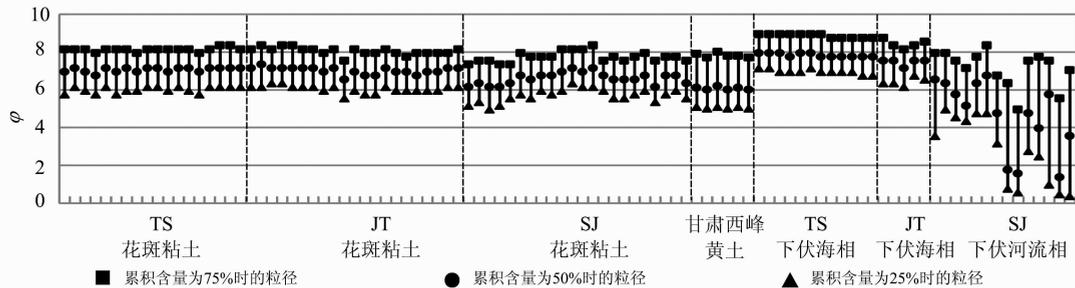


图5 花斑粘土的粒度指数以及与下伏沉积、典型黄土的对比(西峰黄土数据引自[8])

Fig. 5 Grain size indices of mottled clay and comparison with those of underlying layers and typical loess (Data of Xifeng loess from [8])

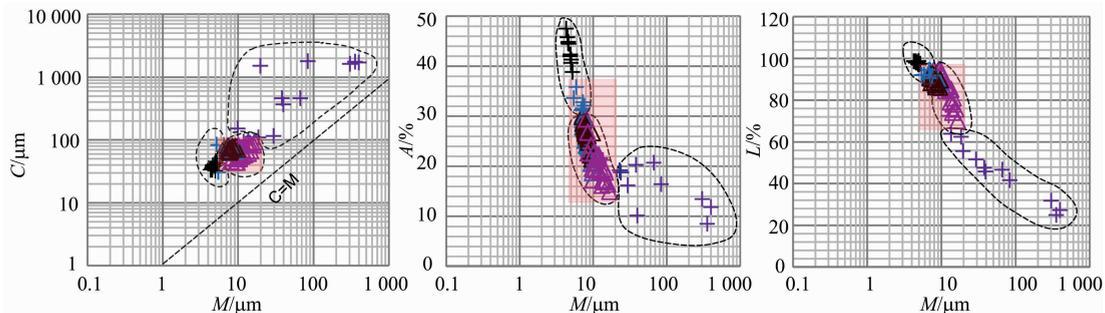
2.6 粒度相分析

粒度相分析是将一些与沉积过程密切相关的粒径及所对应的百分含量绘制成散点图。最常见的粒度相是C-M图,C代表样品累积含量在1%时对应的粒径(μm),表征样品的粗粒级组分;M代表中值粒径,即样品累积含量在50%时对应的粒径(μm),横纵坐标皆用对数表示。CM图可通过将未知成因的样品在图中的投点区域和已知成因的样品的投点区域进行比较,从而确定未知样品的成因和沉积环境,是一种综合性的成因图解^[11]。此外,粒度相还有A-M和L-M图。A代表样品 $<4\mu\text{m}$ 的百分含量,L代表样品 $<31\mu\text{m}$ 的百分含量。这些粒度相全面的反映了沉积物的粒度特征,可以用来综合判断沉积物的沉积类型,反映沉积环境。

图6的C-M图中,花斑粘土投点集中,其下伏海相沉积

的投点偏左,中值粒径偏小。而下伏河流相沉积的投点分布零散,相对花斑粘土层偏右上,中值粒径偏大,粗粒级组含量更多(图6)。在A-M及L-M图中,样品的投点均呈带状分布,花斑粘土与其下伏沉积层均分布在不同的范围(图6),表明花斑粘土在成因及沉积环境上与其下伏沉积没有关联,花斑粘土并非其“原沉积相”风化形成。

鹿化煜等^[8]对黄土高原黄土、古土壤以及红粘土样品进行了粒度相分析。由于没有源数据,本文将文献中典型风成沉积的粒度相投点区域叠加到图6中做对比研究。通过对比,闽粤沿海花斑粘土的投点区域与典型风成沉积所在的粉色区域在各图中均重合(图6),表明花斑粘土与典型风成沉积在沉积类型上的一致性。结合前述粒度分析各项指标,可进一步判定,花斑粘土为风成成因。



图例: Δ TS花斑粘土 \triangle JT花斑粘土 \triangleleft SJ花斑粘土 $+$ TS下伏海相沉积 $+$ JT下伏海相沉积 $+$ SJ下伏河流相沉积 \square 典型黄土投点区域

图6 花斑粘土的粒度相以及与下伏沉积、典型黄土的对比(典型黄土投点区域总结自[8])

Fig. 6 Grain size facies of mottled clay and comparison with those of underlying layers and typical loess (Scope of the typical loess from [8])

3 结论

使用激光粒度分析方法,对珠江三角洲晚第四纪的花斑粘土进行了系统的研究。结果显示,花斑粘土的粒度组成、粒度参数、散点分布、判别分析、粒度指数特征及相分析均

指示风成成因,与典型黄土具有较好的可比性,而与其下伏沉积差异截然。由此,花斑粘土并非原地风化形成,而属末次盛冰期外来的粉尘堆积。由于风成沉积经历了充分的混合和分选,堆积时颜色及结构均匀,因此“花斑”结构不应是沉积时形成,而是冰后期(全新世)湿热气候环境改造的表象。激光粒度方法深入有效的分析了研究区晚第四纪花斑粘土的

粒度特征, 并为其成因判断提供了重要依据。本研究对今后 科学意义。
华南沿海晚第四纪古气候环境及风场格局的重建具有重要的

References

- [1] HUANG Zhen-guo, CAI Fu-xiang(黄镇国, 蔡福祥). *Quaternary Science(第四纪研究)*, 2007, 27(5): 828.
- [2] XIE Ye-cai, WANG Qiang, LONG Gui, et al(谢叶彩, 王 强, 龙 桂, 等). *Journal of Palaeogeography(古地理学报)*, 2014, 16(6): 835.
- [3] Wang Jing, Chen Zhen, Gao Quanzhou, et al. *Catena*, 2018, 167: 305.
- [4] Újvári G, Kok J F, Varga G, et al. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 247.
- [5] LIU Dong-sheng(刘东生). *Loess and Environment(黄土与环境)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1985.
- [6] LI Xu-sheng, YANG Da-yuan, LU Hua-yu(李徐生, 杨达源, 鹿化煜). *Marine Geology & Quaternary Geology(海洋地质与第四纪地质)*, 2001, 21(1): 25.
- [7] Li Jianwu, Ye Wei, Zhang Ganlin, et al. *Pedosphere*, 2013, 23(5): 686.
- [8] LU Hua-yu, AN Zhi-sheng(鹿化煜, 安芷生). *Acta Sedimentologica Sinica(沉积学报)*, 1999, 17(2): 226.
- [9] Lu Huayu, Vandenberghe J, An Zhisheng. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16(1): 89.
- [10] LI Chang-an, ZHANG Yu-fen, YUAN Sheng-yuan, et al(李长安, 张玉芬, 袁胜元, 等). *Earth Science-Journal of China University of Geosciences(地球科学)*, 2010, 35(5): 879.
- [11] ZHANG Chi, Wunnemann B, ZENG Lin, et al(张 弛, Wunnemann B, 曾 琳, 等). *Geological Journal of China Universities(高校地质学报)*, 2015, 21(4): 736.

Research on Origin of Mottled Clay in the Coastal Areas of Fujian and Guangdong Provinces Based on Laser Particle Technology

WANG Jing¹, CHEN Zhen², GAO Quan-zhou^{1*}

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract Laser particle size analysis integrated laser, photoelectric and computer technologies has recently become a mainstream method of grain size testing. As particles with different sizes produce scattered light at different angles to the incident laser, the particle size distribution of the sample can be calculated by measuring the intensity of scattered light at different angles. Because of simple operation, rapid test and high precision, it has an important application in sedimentology. A layer of “mottled clay” is widely developed between the Late Pleistocene and Holocene in Quaternary basins in the coastal areas of Guangdong and Fujian provinces. Current research attributes its origin to exposure weathering of Late Pleistocene marine/fluvial deposits during the last glacial maximum. However, our studies find that the mottled clay has no transition in color, structure and composition with its underlying layer and is therefore not formed from weathering. The mottled clay is silty, easily raised by the wind and similar to typical loess. In order to ascertain the character and origin of the mottled clay, three drill cores in the Pearl River delta area were chosen in this study with the method of laser grain size analysis. The results show that grain size composition is characterized by the modal grain size group of coarse silt(10~50 μm), followed by the group of clay grain (<5 μm), both of which are typical particle compositions of an aeolian deposit. All grain size parameters are in accordance with that of an aeolian deposit. Both particle size parameter scatter diagrams and index distribution range of the mottled clay are consistent with typical loess but different from the underlying deposits. The discriminant analysis exhibits an aeolian origin of the mottled clay. The phase analysis also shows that the mottled clay points coincide with the range of typical loess, but has no genetic correlation with its underlying deposits. It is concluded that the mottled clay is not a weathering product of its underlying sediments but an exotic aeolian deposit. This conclusion is of great scientific significance for reconstructing the paleoenvironment of the last glacial period in Fujian and Guangdong coastal areas in the future. The laser particle size method based on optical scattering provides effective scientific evidence for judging the sedimentary environment and origin of the sediments.

Keywords Laser particle size analysis; Mottled clay; Coastal areas of Guangdong and Fujian provinces; Aeolian deposit

* Corresponding author

(Received Sep. 15, 2020; accepted Dec. 21, 2020)