

文章编号: 1000-0550(2019)01-0115-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.100

# 长江三角洲第一硬质黏土层粒度多元统计分析及其沉积环境判别

吴超<sup>1</sup>, 郑祥民<sup>1</sup>, 王辉<sup>1</sup>, 周立旻<sup>1</sup>, 钱鹏<sup>1,2</sup>

1. 华东师范大学地理科学学院 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241

2. 南通大学地理科学学院, 江苏南通 226000

**摘要** 长江三角洲第一硬质黏土层成因是长期争论的问题。对上海市青浦区第一硬质黏土层全样粒度多元统计分析, 并与南京周家山下蜀黄土、长江悬浮颗粒物对比, 探索长江三角洲第一硬质黏土层成因。第一硬质黏土层机械颗粒组成均一, 频率曲线呈正偏态、中等或尖锐峰形的双峰分布, 频率累积曲线呈“S”型分布, 具有风成沉积特性。粒度特征分析为沉积环境判别提供沉积学证据时, 综合运用多元统计分析可以使分析结果更准确。聚类分析将硬黏土与典型风成沉积物下蜀黄土粒度分布归为一类, 长江悬浮颗粒物单独为一类, 表明硬黏土与下蜀黄土成因一致。下蜀黄土与长江悬浮颗粒物粒度参数判别函数, 将绝大部分硬黏土样品判定为风成沉积。粒径—标准偏差曲线结合现代风场, 显示硬黏土粒度特征存在高空西风 and 低空西北季风两个主控因子。表明长江三角洲第一硬质黏土层是由西风和西北季风控制的风成成因堆积物。

**关键词** 粒度特征; 成因; 硬黏土; 聚类分析; 判别分析

**第一作者简介** 吴超, 男, 1992 年出生, 硕士, 第四纪环境演变, E-mail: 619676293@qq.com

**通信作者** 郑祥民, 男, 教授, E-mail: xmzheng@re.ecnu.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标志码** A

## 0 引言

长江三角洲东部平原区, 全新世沉积物之下的基底为一层暗绿色、黄绿色或黄褐色的硬质黏土, 在地质层划分上归属于晚更新统的上段, 其厚度一般在几米至 10 余米<sup>[1]</sup>。由于该地层在平原地区工程地质实际应用中常被利用作为中、高层建筑的桩基持力层, 为第四纪地层划分的重要标志层, 因而在理论研究和经济应用中均具有重要意义和价值。20 世纪 80 年代以来, 国内许多学者从地层分布<sup>[1-3]</sup>、形成年代<sup>[4]</sup>、成因<sup>[5-6]</sup>、古土壤特征<sup>[7]</sup>、古气候与古环境<sup>[8]</sup>等角度对硬黏土展开系统而深入的研究。然而, 第一硬质黏土层成因问题一直存在风成与水成的争议。水成说包括河流成因<sup>[7]</sup>、河湖成因<sup>[9]</sup>、湖沼成因<sup>[10]</sup>; 风成说主要包括郑祥民等<sup>[2]</sup>提出的第一硬质黏土层为下蜀黄土向东延伸的埋藏风尘堆积以及于洪军等<sup>[11-12]</sup>提出的硬黏土是陆架沙漠化的产物。

沉积物粒度是分析沉积环境、沉积及搬运过程和搬运机制的重要参量。未知与已知沉积环境沉积物对比分析, 是沉积相分析的常用方法<sup>[13-16]</sup>。聚类分

析和判别分析都是研究样品分类问题的一种多元统计分析方法。粒度聚类分析主要集中在水域表层沉积物及沉积环境划分上<sup>[17-20]</sup>, 风尘沉积研究中较为少见。沉积环境判别分析是通过建立多种已知沉积环境沉积物之间粒度参数综合判别公式<sup>[16, 21]</sup>, 计算参数值推断待判沉积物的沉积环境。张平等<sup>[21]</sup>通过建立稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数, 成功应用在兰州黄土、岱海湖相沉积物、罗布泊沉积物沉积环境判别上。杨立辉等<sup>[16]</sup>通过建立河漫滩相沉积与风成沉积粒度判别函数, 在第四纪红土成因判别上效果显著。综合利用沉积学和统计学方法, 可以使沉积环境分析结果更准确。

中国黄土的研究已取得了系列的研究成果, 但也有许多重要的基础理论问题尚未得到解决。例如中国第四纪黄土地层分布范围的东界到底在哪里? 下蜀黄土的同期风尘黄土在长江三角洲东部平原地区是否仍有分布? 而长江三角洲东部平原晚更新世晚期硬质黏土层又是怎样的一次事件形成的? 硬质黏土层成因探讨可以加深对这些问题的认识。因此, 本文在第一硬质黏土层粒度特征分析的基础上, 与典型

收稿日期: 2017-10-31; 收修改稿日期: 2018-01-18

基金项目: 国家基础科学人才培养基金(J1310028); 国家自然科学基金项目(41371032, 41671003) [Foundation: National Fund for Talent Training in Basic Science, No. J1310028; National Natural Science Foundation of China, No. 41371032, 41671003]

风成黄土和长江悬浮颗粒物对比分析、多元统计分析,探讨硬质黏土层沉积环境。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

大量钻孔资料<sup>[1]</sup>揭示了第一硬黏土层在长江三角洲东部平原区地层分布与埋深情况。本研究钻孔位于长江三角洲南翼,上海市青浦区(31°11'13"N, 121°16'2"E),具体位置见图1。野外钻孔取样,取得25~27 m深处硬质黏土岩芯总长约2 m,根据颜色、质地、结核分布等特征将岩芯分三层详细描述,具体见表1。室内分样间距为2 cm,共获得样品100个。2012—2014年,在南通滨江公园滨江观景台收集长

江水,实验室抽滤、低温烘干,获得长江悬浮颗粒物样品25个。

### 1.2 实验方法

硬黏土与悬浮颗粒物样品粒度测试在华东师范大学地理科学学院完成。称取样品约0.1 g于50 mL烧杯中,加入10 mL浓度为10%的过氧化氢,加热蒸发至少量溶液,冷却后加入10 mL浓度为10%的稀盐酸充分反应;烧杯中注满蒸馏水,并静置一夜。粒度测试前,去除上层液,加入10 mL浓度为0.05 mol/L的六偏磷酸钠,超声振荡10 min。样品在英国生产的Mastersizer 2000激光粒度仪上测量,粒度测量范围为0.02~2 000  $\mu\text{m}$ ,重复测量误差<2%。周家山下蜀黄土样品粒度前处理及实验仪器均与本研究相同。

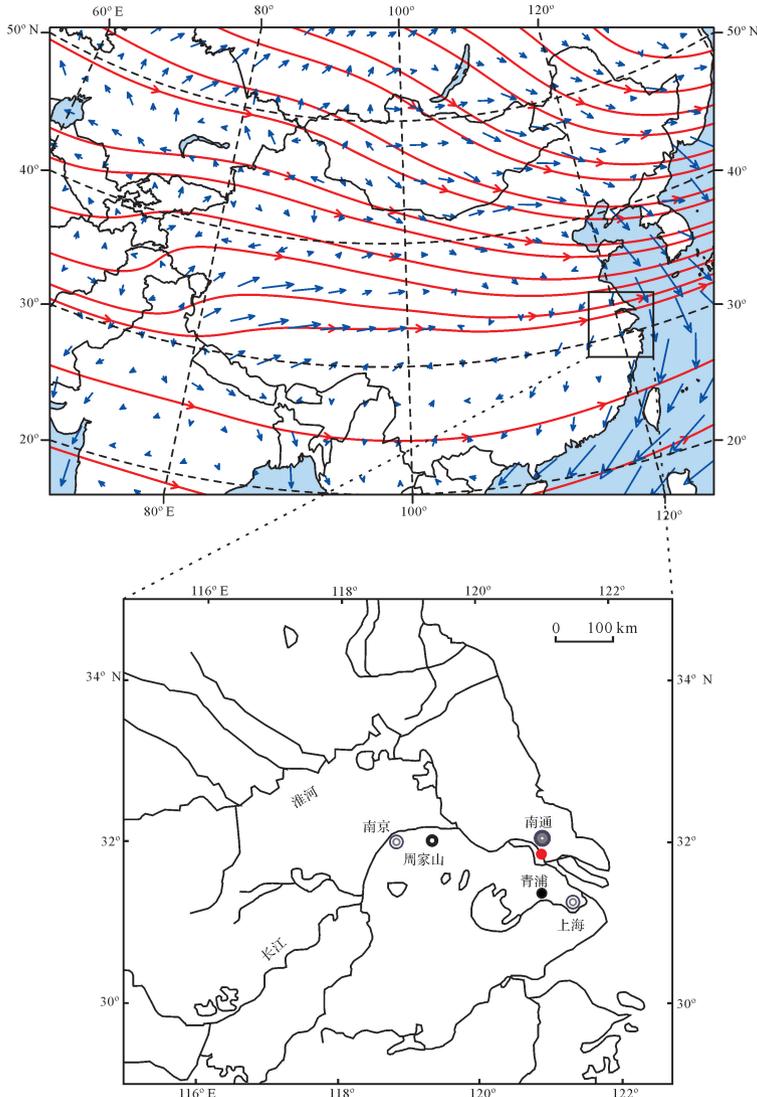


图1 中国冬季(12月、1月、2月)500 hPa和1 000 hPa风场图及采样点分布图

风场基于2006—2016NCEP/RCAR再分析数据;蓝色间断箭头线为1 000 hPa风场指示冬季风;红色连续箭头线为500 hPa风场指示西风;黑色实心圆为青浦位置;红色实心圆为长江悬浮颗粒物采样位置;黑色空心圆为周家山位置

Fig.1 China winter (December-February) mean 500 hPa and 1 000 hPa wind fields and locations of sampling sites

表1 岩芯记录  
Table 1 Description of core

层号	深度/cm	野外描述
①	2 500~2 540	深褐色黏土。顶部见贝壳碎屑,含少量白斑,见铁锰结核、小结核,质地均一,无层理。
②	2 540~2 650	2 540~2 562 cm 为灰黑色粉质黏土,黄褐色铁锰浸染斑体增多,见钙质结核。2 562~2 650 cm 为灰色,夹大量铁锈浸染斑痕。本层颜色变化明显,见黄色锈斑和少量黑色植物根瘤。
③	2 650~2 700	灰黄相间的粉质黏土,黄色浸染斑大量增加,黑色腐殖质增多,且沿垂直方向呈条带状分布。

### 1.3 数据分析方法

硬黏土、下蜀黄土和长江悬浮颗粒物样品粒度参数均运用 Gradistat 软件中矩值法计算得到。

#### 1.3.1 对数比分析

粒度分布是自然创作的结果,在数学上定义为所有粒级占恒定总体(1 或 100)的权重<sup>[22-23]</sup>。粒级含量数据集分布在一个不开放的数据空间(大于等于 0 且小于等于 100),而多元和大多数双变量统计分析(例如皮尔森相关系数<sup>[24]</sup>),需要在实数空间里面进行分析。中心—对数—比率转换(c<sub>lr</sub>)由 Aitchison<sup>[22]</sup>建立且能将粒度分布转换后使其接近实数空间。具体方法如下:

(1) 每一个粒度值( $X_i$ ,  $X_{\max}$  为  $X_i$  最大值)除以各自粒度分布几何平均数( $g$ (GSD)),使单个粒度值相对依赖其他粒级(恒定总数问题)最小化。

(2) 对数比率计算,去除相除后的不对称性(如果  $X_i < g$ (GSD),比率在 0~1 范围里面,如果  $X_i > g$ (GSD)比率在 1~ $X_{\max}/g$ (GSD)之间):

$$\log\left(\frac{X_i}{g(\text{GSD})}\right) = -\log\left(\frac{g(\text{GSD})}{X_i}\right) \quad (1)$$

#### 1.3.2 判别函数建立

以长江悬浮颗粒物代表水成环境,南京周家山下蜀黄土代表风成环境,运用统计软件 SPSS22.0 对两组粒度参数进行 Fisher 判别函数的建立<sup>[25]</sup>。建立过程如下:

组均值相等的检验中四个粒度参数变量的组均值均等性显著性概率均小于 0.05,说明纳入判别函数的四个变量对正确判断分类都有作用,可以进行判别分析。协方差相等的 Box's M 检验中,Box's M 统计量值为 225.648,远远大于 0.05,各类协方差矩阵相等。同时,F 检验的显著性概率小于 0.05,表明判错率极小。判别函数的显著性检验结果表明, $\lambda$  值为 0.082,卡方为 200.054,自由度为 4,显著性概率为 0,判别函数有意义。结构矩阵表示判别变量和标准化判别函数之间的汇聚组间相关性,各变量和判别函数之间的相关性由大到小依次是  $Mz$ (0.676)、 $Kg$ (-0.597)、

$Sk$ (-0.162)、 $Sd$ (-0.072)。由给出的分类函数 1、2 的系数及常数项,可以得到两组函数  $y_1$  和  $y_2$ :

$$y_1 = 621.676Mz + 968.589Sd + 136.180Sk + 555.220Kg - 3\ 640.527 \quad (2)$$

$$y_2 = 657.783Mz + 984.500Sd + 82.063Sk + 592.892Kg - 3\ 995.857 \quad (3)$$

为了简化计算结果,(3)-(2)得:

$$Y = 36.107Mz + 15.911Sd - 54.117Sk + 37.672Kg - 355.33 \quad (4)$$

$Y$  为判别参数,若  $Y < 0$ ,则归为 1 类,即风成沉积; $Y > 0$ ,则归为 2 类,即水成沉积。为验证判别函数可靠性,将已知沉积环境的镇江下蜀黄土四个粒度参数代入判别函数,结果 107 个镇江下蜀黄土<sup>[26]</sup>全部被判定为风成沉积,正确率 100%,表明建立的判别函数可靠。

## 2 结果

### 2.1 粒度特征分析

粒度各组分百分含量是风尘沉积研究中的常用指标。搬运力大小、物源、沉积环境的变化均会引起沉积物粗、细组分含量的变化。测试中含有粒径 > 250  $\mu\text{m}$  颗粒的样品仅有 2 个;>100  $\mu\text{m}$  组分含量变化于 0~2.43%之间,平均含量为 0.33%,含量非常低。>50  $\mu\text{m}$  组分含量变化于 1.02%~16.21%之间,平均含量为 5.37%,低于洛川黄土<sup>[27]</sup>和下蜀黄土<sup>[15]</sup>;其中以极细砂(50~100  $\mu\text{m}$ )为主,含量变化于 1.02%~13.78%之间,平均含量为 5.04%。所有样品中粗粉砂(10~50  $\mu\text{m}$ )组分的含量最高,为众数粒组,变化于 40.81%~72.58%之间,平均含量为 52.80%;细粉砂(5~10  $\mu\text{m}$ )组分含量变化于 11.35%~32.90%之间,平均含量为 19.90%。黏粒(<5  $\mu\text{m}$ )组分含量变化于 9.49%~31.14%之间,平均含量为 21.93%,为次众数粒组。

沉积物的粒度参数与形成环境及搬运力条件具有密切的关系<sup>[21]</sup>,主要包括平均粒径( $Mz$ )、分选系数( $Sd$ )、偏度( $Sk$ )和峰度( $Kg$ )。硬黏土平均粒

径变化范围在  $11.47 \sim 26.96 \mu\text{m}$  之间,平均值为  $17.82 \mu\text{m}$ ;分选系数变化在  $1.22 \sim 1.78$  之间,平均分选系数为  $1.53$ ,分选差;偏度变化于  $0.17 \sim 1.27$  之间,平均偏度值为  $0.57$ ,呈正偏态,总体细偏;峰度变化范围为  $2.47 \sim 5.02$ ,平均峰度值为  $2.99$ ,峰形为中等或窄峰态。

沉积物粒度频率分布能直观反映其所包含的粒度组分(单组分或多组分)信息<sup>[28]</sup>。图3显示第一硬土层粒度频率分布呈单众数正态分布,变化范围集中

在  $0.3 \sim 100 \mu\text{m}$  之间,众数值在  $10 \sim 30 \mu\text{m}$  附近,细尾较长。粒度累积曲线可以反映沉积物的搬运方式及不同搬运方式下分选好坏<sup>[29]</sup>。图3显示第一硬黏土层频率累积分布呈现“S”型, $<63 \mu\text{m}$  组分占绝对优势,主要以悬浮搬运为主。悬浮段内曲线呈标准的二段式,两段截点在  $2 \sim 5 \mu\text{m}$  之间。截点之前,曲线较平缓,分选较差;截点之后,曲线较陡,分选较好。硬黏土整体粒度分布的一致性,表明其在单一的沉积动力条件下形成。

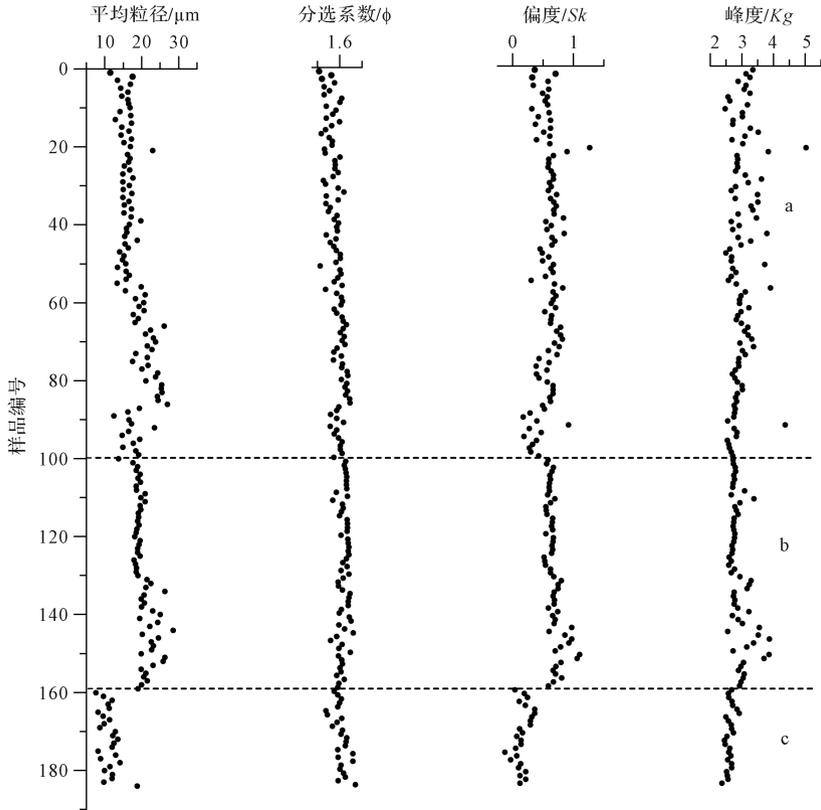


图2 上海青浦第一硬土层(a)、南京周家山下蜀黄土<sup>[26]</sup>(b)、长江悬浮颗粒物(c)粒度参数变化

Fig.2 Variation of grain size parameters of the first hard clay in Qingpu, Shanghai, Xiashu loess in Nanjing and suspended particle in Yangtze River

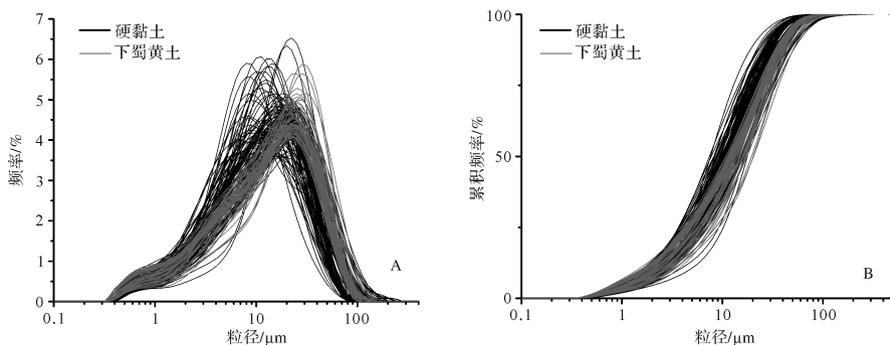


图3 上海青浦第一硬土层、南京周家山下蜀黄土<sup>[26]</sup>频率分布曲线(A)和频率累积曲线(B)

Fig.3 (A) grain size distribution; (B) grain size cumulative curves of the hard clay and Xiashu loess

## 2.2 多元统计分析

### 2.2.1 聚类分析

运用对数比分析公式(公式(1))对硬黏土、下蜀土、长江悬浮颗粒物粒度频率分布数据再计算,结果以热图形式呈现。热图(图4左)显示clr转换后典型风成沉积下蜀黄土与长江悬浮颗粒物粒度分布存在较大差异,表明clr转换满足多元统计分析条件的且不改变原始粒度分布特征。同时,clr转换放大了这一差异,表现为长江悬浮颗粒物粒度峰值明显偏离下蜀黄土,且细粒组分含量更多。

为排除人为分类的主观性,以皮尔森距离代表相似测度,平均距离法对不同沉积物粒度聚类分析。聚类分析龙骨图(图4右)直观地显示聚类的过程,从图上可以清楚看出各样品的归属。聚类分析将下蜀黄土和长江悬浮颗粒物归为不同的类别,表明粒度分布聚类分析结果可信。最终,聚类分析将硬黏土与下蜀黄土归为一类,而长江悬浮颗粒物单独为一类。

### 2.2.2 Fisher判别分析

判别分析不同于聚类分析,它是在已知观测样本的特征变量和分类结果的情况下,建立判别函数,并

利用判别函数对新观测对象进行分类。一般不同沉积环境沉积物的粒度参数不完全一致,综合利用四个粒度参数来判别沉积物沉积环境更可靠,前人<sup>[16,21]</sup>在粒度判别分析中也选择这四个变量。将硬黏土粒度参数代入公式(4),计算结果(图5)显示第一硬土层绝大部分样品判别值Y为负,极小部分样品的判别值Y为正。

### 2.2.3 粒级—标准偏差曲线

整个沉积序列所包含的粒度组分并不都在单个样品中表现为明显的组分峰值(众数),所以从单个样品的粒度频率曲线上很难确定沉积物总体所包含的粒度组分个数<sup>[28]</sup>。利用柱样中所有粒度数据进行粒级—标准偏差计算可以获得每个粒级组分的标准偏差随粒级组分的变化,若为“多峰分布”,则表明沉积物粒度受多因素控制<sup>[30]</sup>。如图6所示,硬黏土和下蜀黄土均具有两个明显的标准偏差峰。硬黏土的两个标准偏差峰值分别出现在7.9621 μm和35.5656 μm,所对应的粒度组分范围分别为0.3557~15.8866 μm,15.8866~251.7851 μm。下蜀黄土的两个标准偏差峰值分别出现在7.9621 μm和

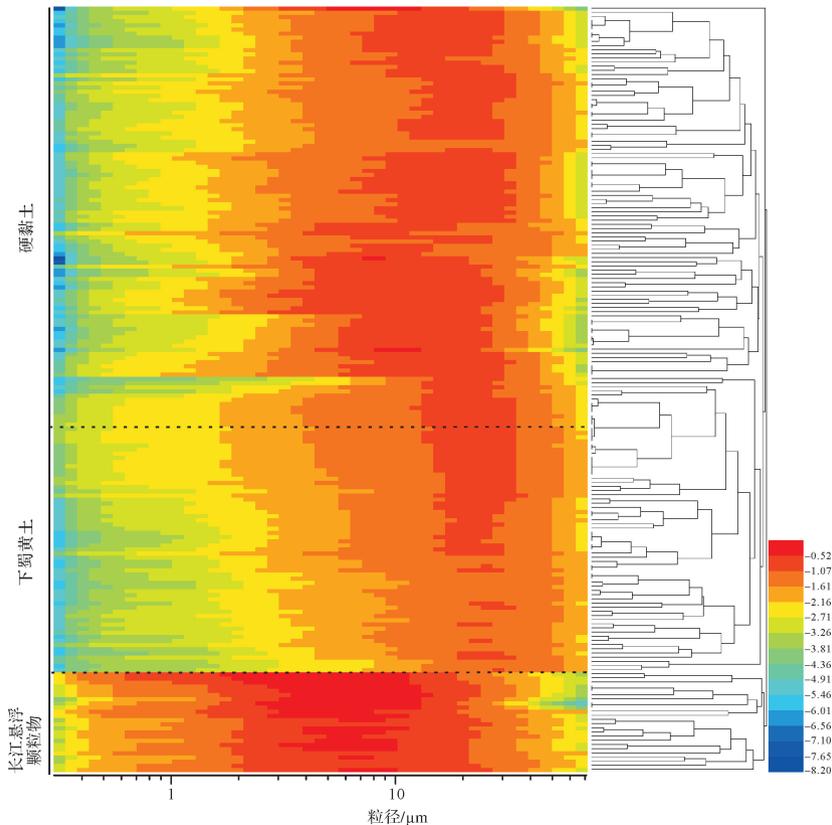


图4 青浦硬黏土、南京周家山下蜀黄土<sup>[26]</sup>、长江悬浮颗粒物粒度分布(clr变换后)热图与聚类分析龙骨图

Fig.4 Heat map of grain size distribution (after center-log-ratio transformation) of the first hard clay, Xiashu loess, suspended particle in Yangtze River and Kiel cluster analysis diagram

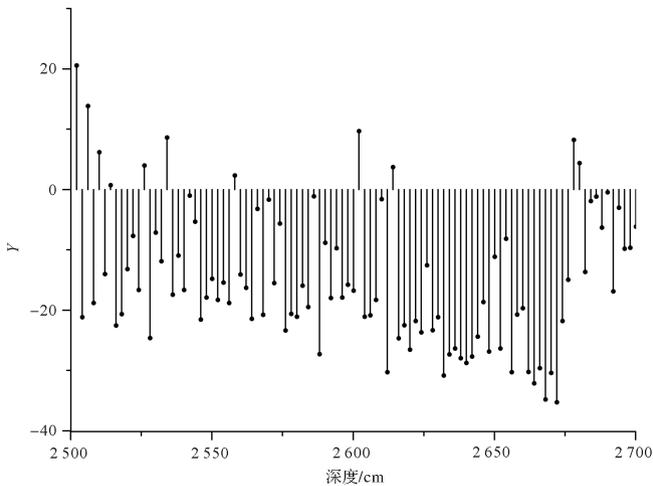


图5 上海青浦第一硬土层样品的判别参数

Fig.5 Y-value to distinguish sedimentary environment of the first hard clay, Qingpu, Shanghai

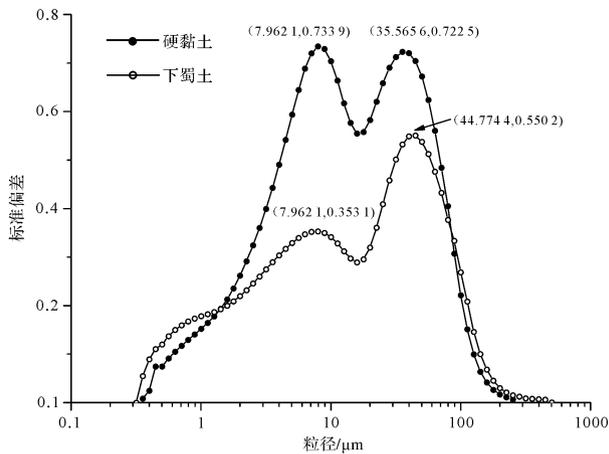


图6 上海青浦第一硬土层和下蜀黄土<sup>[25]</sup>粒级—标准偏差曲线

Fig.6 Standard deviation curves of grain size of the first hard clay in Qingpu, Shanghai

44.774 4  $\mu\text{m}$ , 所对应的粒度组分范围分别为 0.317 0 ~ 15.886 6  $\mu\text{m}$ , 15.886 6 ~ 502.377 3  $\mu\text{m}$ 。

### 3 讨论

根据长江三角洲东部平原区一些钻孔资料的 OSL、<sup>14</sup>C 测年结果<sup>[2,4,9,31]</sup>表明,第一硬质黏土层是形成于 25 ~ 12 ka B.P. 的陆相沉积物。郑祥民在野外地层延伸追踪调查中已经发现并证实,分布在长江三角洲西部丘陵区下蜀黄土与分布在长江三角洲东部平原区硬质黏土地层为同一连续延伸分布地层。这一工作为硬质黏土层粒度特征对比,提供了依据。一

般来说,单一物源的风尘堆积物随搬运距离的增加,分选性变好。周家山下蜀黄土<sup>[26]</sup>平均分选系数为 1.67,上海地区大气降尘<sup>[32]</sup>为 1.59,硬黏土为 1.53,表明硬黏土经历了较长的搬运距离。钱鹏等<sup>[33]</sup>通过研究上海地区沙尘暴天气大气颗粒物的地球化学元素发现,沙尘暴样品的物质来源有西北内陆地区的贡献,佐证了粉尘长距离搬运。粗粉砂是中国北方黄土的基本粒组,最易活动和被风搬运,硬黏土粒度在该组分中含量最高与马兰黄土一致。图 3 显示硬黏土粒度分布特征与风尘沉积物下蜀黄土非常相似。以上表明硬黏土具有风成沉积特性。

搬运介质的动力大小和搬运方式是决定沉积物粒度组成的两个基本因子,同一搬运方式及一定动力分布的流体下,搬运的沉积物的粒度总体是单因子随机事件的集合,其数字特征服从自然界的某种分布<sup>[34]</sup>。不同沉积物研究结果<sup>[34]</sup>表明,河流沉积物、封闭湖泊碎屑沉积物、风成砂、黄土,这些不同沉积环境的沉积物具有不同的粒度分布,因此可以通过不同沉积物粒度分布之间的比较,辨别沉积物的沉积环境。若单独研究粒度分布上某一组分的含量、含量变化及其指示搬运介质动力大小变化,粒度组分数学上的分离是有效的<sup>[35]</sup>。而沉积物成因判别时,需分析所有组分,所以聚类分析时以单个沉积物粒度频率分布为子样本。粒度分布的聚类分析将硬黏土和周家山下蜀黄土归为一类,长江悬浮颗粒物单独为一类,表明硬黏土与典型风成沉积下蜀黄土成因相同。

Sahu<sup>[36]</sup>首先将判别分析用于粗碎屑沉积物上,采样只限于砾石、沙、粉沙等碎屑物质,而硬质黏土层粒度组成均一,所有样品质地均为黏土质粉砂,平均粒径较细,因此本文不采用萨胡判别公式。粒度判别分析是基于假定碎屑沉积物的粒度能反映介质的流动性(黏度)和沉积位置(环境)的能量大小<sup>[37]</sup>。长江三角洲东部平原西部紧邻下蜀黄土沉积区,以南京、镇江发育最为典型,杨立辉等<sup>[16]</sup>在建立粒度判别函数时也将下蜀黄土作为典型风成沉积端元。从硬质黏土层分布位置北部长江河段直接收集水成悬浮颗粒物,确保水成成因且不受沉积后期其他因素干扰,采集时间跨度长可反映多种水动力条件。已有粒度判别公式(表 2)对长江悬浮颗粒物的验证结果表明样品粒度能够反映水成特性。下蜀黄土和长江悬浮颗粒物粒度参数判别函数对硬黏土的判别结果显示,硬黏土主体为风成沉积,部分样品被判定为水成成因。判别分类是一种概率分类,仅把错误的可能性

表2 水成悬浮颗粒物的验证结果

Table 2 Verification of discriminant function

公式名称	样品名称	样品总数	实际类别	判别结果		正确率 /%
				风成	水成	
稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数	长江悬浮颗粒物	25	水成	0	25	100
河漫滩相沉积与风成沉积物粒度判别函数	长江悬浮颗粒物	25	水成	9	16	64

抑制到最低限度,实际判错的原因可能受其他因素的干扰。结合长江三角洲沉积环境演化<sup>[38-40]</sup>,硬黏土上部可能受全新世海侵作用的影响,下部可能受地下水作用的影响,从而部分样品被判定为水成成因。

粒度—标准偏差曲线(图6)可以看出硬黏土和下蜀黄土都是明显的“双峰分布”,且细峰值一致,粗峰值接近,粗细组分的粒度分布相似,表明二者存在两种主控因子。现代冬季风场数据(图1)和上海地区降尘、大气颗粒物的研究表明,现代气候条件下上海地区受高空西风和低空西北季风的影响。综合上述的分析,认为长江三角洲第一硬质黏土层与下蜀黄土一样由西风和西北季风控制的风成成因堆积物。

## 4 结论

(1) 第一硬质黏土层粒度组成以粉砂为主,黏粒次之,砂粒含量最少,整个硬黏土层粒度组成均一。平均粒径变化范围在11.47~26.96 μm之间,平均值为17.82 μm;平均分选系数为1.53,分选差。粒度频率分布呈正偏态,中等或尖锐峰形的单众数双峰分布;频率累积分布呈“S”型分布的特征。硬黏土粒度特征与下蜀黄土相似,具有风尘沉积特性。

(2) 本文建立的风成沉积与水成颗粒物粒度判别公式有效,为沉积物成因研究提供了定量化的途径。粒度分布聚类分析的成因探讨,不同于以往的海洋表层沉积物沉积区域划分,为聚类分析在沉积学研究中提供新的思路。沉积物成因研究中粒度特征分析提供沉积学证据时,合理综合运用多种多元统计分析方法可以避免人为判断的主观性,使分析结果更准确。

(3) 聚类分析将硬黏土与典型风成沉积物下蜀黄土粒度分布归为一类,长江悬浮颗粒物单独为一类,表明硬黏土与下蜀黄土成因相同。粒度参数判别分析,将绝大部分硬黏土样品判定为风成成因,部分样品受到海侵作用、地下水作用的干扰。结合现代冬季风场与粒度—标准偏差曲线,我们认为长江三角洲第一硬质黏土层与下蜀黄土一样由西风和西北季风控制的风成成因堆积物。

致谢 感谢两位审稿专家给予宝贵的审稿意见;

感谢编辑部老师的辛勤工作;感谢郑祥民导师给予的科研支持;感谢王辉老师、玄晓娜师姐采样过程中给予的帮助;感谢周立旻、吕红华、钱鹏老师在论文修改过程中的帮助;感谢徐洪阳师兄在实验过程中给予的指导。

## 参考文献 (References)

- [1] 郑祥民. 长江三角洲及海域风尘沉积与环境[M]. 上海:华东师范大学出版社,1999:1-170. [Zheng Xiangmin. Aeolian deposition and environment in Changjiang Delta and extending sea areas[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1999: 1-170.]
- [2] 郑祥民,严钦尚. 末次冰期苏北平原和东延海区的风尘黄土沉积[J]. 第四纪研究,1995,15(3):258-266. [Zheng Xiangmin, Yan Qinchang. Aeolian loess deposition during the last glacial period in the northern Jiangsu Plain of the Yangtze Delta and western areas of the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Quaternary Sciences, 1995, 15(3): 258-266.]
- [3] 陈报章,李从先,业治铮. 长江三角洲北翼全新统底界和“硬黏土层”的讨论[J]. 海洋地质与第四纪地质,1991,11(2):37-46. [Chen Baozhang, Li Congxian, Ye Zhizheng. Holocene bottom boundary and “Hard Clay Band” in the northern flank of the Changjiang River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(2): 37-46.]
- [4] 梁丽,师育新,戴雪荣,等. 苏州澄湖湖底硬粘土地球化学特征及其成因意义[J]. 地球与环境,2010,38(4):449-455. [Liang Li, Shi Yuxin, Dai Xuerong, et al. Geochemical and genetic significance of hard clay in the central area of Chenghu Lake (Suzhou), Jiangsu province, China[J]. Earth and Environment, 2010, 38(4): 449-455.]
- [5] 郑祥民,俞立中. 上海地区晚更新世晚期暗绿色硬土层风积黄土成因说[J]. 上海地质,1991(2):13-21. [Zheng Xiangmin, Yu Lizhong. Aeolian deposit genesis of dark-green hard clay as Holocene basement strata in Shanghai region[J]. Shanghai Geology, 1991(2): 13-21.]
- [6] 陈庆强,李从先. 长江三角洲地区晚更新世硬粘土层成因研究[J]. 地理科学,1998,18(1):53-57. [Chen Qingqiang, Li Congxian. Studies on origin of the Late Pleistocene stiff clays at the Yangtze Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(1): 53-57.]
- [7] 陈庆强,孙和平,李从先. 长江三角洲南翼晚更新世古土壤及其成土环境[J]. 同济大学学报,1996,24(1):33-37. [Chen Qingqiang, Sun Heping, Li Congxian. Late Pleistocene paleosols and soil-forming environment at the southern flank of the Yangtze Delta[J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(1): 33-37.]

- [8] Qin J G, Wu G X, Zheng H B, et al. The palynology of the First Hard Clay Layer (Late Pleistocene) from the Yangtze delta, China [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2008, 149 (1/2): 63-72.
- [9] 竹淑贞, 陈业裕, 孙永福, 等. 上海地区第四纪地层与古气候 [J]. *科学通报*, 1980, 25 (5): 220-223. [Zhu Shuzhen, Chen Yeyu, Sun Yongfu, et al. Quaternary strata and palaeoclimate in Shanghai region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 25 (5): 220-223.]
- [10] 冯铭章. 关于长江三角洲地区浅部硬土层 [J]. *上海地质*, 1980 (2): 44-45. [Feng Mingzhang. Hard clay in Yangtze Delta [J]. *Shanghai Geology*, 1980 (2): 44-45.]
- [11] 于洪军, 刘敬圃. 中国陆架第四纪地质学研究的最新进展 [J]. *地球科学进展*, 1995, 10 (6): 531-536. [Yu Hongjun, Liu Jingpu. Advances in study of China's shelf Quaternary geology [J]. *Advances in Earth Sciences*, 1995, 10 (6): 531-536.]
- [12] 于洪军. 中国东部陆架黄土成因的新探索 [J]. *第四纪研究*, 1999, 19 (4): 366-372. [Yu Hongjun. A new exploration on the origin of loess in the shelf area of the eastern China seas [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19 (4): 366-372.]
- [13] 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(D辑): 地球科学*, 2006, 36 (7): 646-653. [Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Grain-size features of a Miocene loess-soil sequence at Qinan: Implications on its origin [J]. *Science China (Seri.D): Earth Sciences*, 2006, 36 (7): 646-653.]
- [14] 刘进峰, 郭正堂, 乔彦松, 等. 秦安中新世黄土—古土壤序列石英颗粒形态特征、粒度分布及其对成因的指示意义 [J]. *科学通报*, 2005, 50 (24): 2806-2809. [Liu Jinfeng, Guo Zhengtang, Qiao Yansong, 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*, 2005, 50 (24): 2806-2809.]
- [15] Guan H C, Zhu C, Zhu T X, et al. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu Lake basin; Implications for the origin, palaeoclimatic change and provenance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 117: 170-183.
- [16] 杨立辉, 叶玮, 郑祥民, 等. 河漫滩相沉积与风成沉积粒度判别函数的建立及在红土中应用 [J]. *地理研究*, 2014, 33 (10): 1848-1856. [Yang Lihui, Ye Wei, Zheng Xiangmin, et al. The discriminant function with grain size of floodplain and Aeolian sediments and its application in the Quaternary red clay [J]. *Geographical Research*, 2014, 33 (10): 1848-1856.]
- [17] 田姗姗, 张富元, 阎丽妮, 等. 东海西南陆架表层沉积物粒度分布特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29 (5): 13-20. [Tian Shanshan, Zhang Fuyuan, Yan Lini, et al. Distribution characteristics of granularities of surface sediments in the southwestern shelf of the East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29 (5): 13-20.]
- [18] 李东义, 徐勇航, 王爱军, 等. 福建安海湾表层沉积物粒度特征及其现代沉积过程分析 [J]. *沉积学报*, 2015, 33 (4): 724-734. [Li Dongyi, Xu Yonghang, Wang Aijun, et al. Analysis of surface sediment grain size characteristics and modern sedimentary process in Fujian Anhai Gulf [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33 (4): 724-734.]
- [19] 张盼, 吴建政, 胡日军, 等. 莱州湾西南部表层沉积物粒度分布特征及其现代沉积环境分区 [J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30 (9): 11-17. [Zhang Pan, Wu Jianzheng, Hu Rijun, et al. Distribution of surface sediments and modern sedimentary environment in the southwestern Laizhou Bay [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30 (9): 11-17.]
- [20] 杨阳, 高抒, 周亮, 等. 海南新村港潟湖表层沉积物粒度特征及其沉积环境 [J]. *海洋学报*, 2016, 38 (1): 94-105. [Yang Yang, Gao Shu, Zhou Liang, et al. Grain size distribution of surface sediments and sedimentary environment in the lagoon of Xincun, Hainan Island [J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38 (1): 94-105.]
- [21] 张平, 宋春晖, 杨用彪, 等. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义 [J]. *沉积学报*, 2008, 26 (3): 501-507. [Zhang Ping, Song Chunhui, Yang Yongbiao, et al. The significance and establishment of discriminant function with grain size of stable lacustrine sediment and Eolian loess [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26 (3): 501-507.]
- [22] Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data* [M]. London, UK: Chapman & Hall, Ltd, 1986.
- [23] Roberson S, Weltje G J. Inter-instrument comparison of particle-size analysers [J]. *Sedimentology*, 2014, 61 (4): 1157-1174.
- [24] Pearson K. *Mathematical contributions to the theory of evolution: On a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs* [M]. Harrison and Sons, London, 1896.
- [25] 郝黎仁, 樊元, 郝哲欧, 等. SPSS 实用统计分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 289-315. [Hao Liren, Fan Yuan, Hao Zheou, et al. For SPSS statistical analysis [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002: 289-315.]
- [26] 刘峰. 南京、镇江下蜀黄土古环境信息研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2016. [Liu Feng. Research on the paleo-environment information of Xiashu Loess at Nanjing and Zhenjiang [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.]
- [27] 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-497. [Liu Tung sheng. Loess and environment [M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-497.]
- [28] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析 [J]. *科学通报*, 2003, 48 (1): 83-86. [Sun Youbin, Gao Shu, Li Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (1): 83-86.]
- [29] 安福元, 马海州, 樊启顺, 等. 粒度在沉积物物源判别中的运用 [J]. *盐湖研究*, 2012, 20 (1): 49-56. [An Fuyuan, Ma Haizhou, Fan Qishun, et al. The application of grain size analysis in sediments provenance discriminant [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2012, 20 (1): 49-56.]

- [30] 陈桥,刘东艳,陈颖军,等. 粒级—标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境,2013,41(3):319-325. [Chen Qiao, Liu Dongyan, Chen Yingjun, et al. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis [J]. Earth and Environment, 2013, 41(3): 319-325.]
- [31] 王张华,赵宝成,陈静,等. 长江三角洲地区晚第四纪年代地层框架及两次海侵问题的初步探讨[J]. 古地理学报,2008,10(1):99-110. [Wang Zhanghua, Zhao Baocheng, Chen Jing, et al. Chronostratigraphy and two transgressions during the Late Quaternary in Changjiang Delta area[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(1): 99-110.]
- [32] 师育新,戴雪荣,宋之光,等. 上海春季沙尘与非沙尘天气大气颗粒物粒度组成与矿物成分[J]. 中国沙漠,2006,26(5):780-785. [Shi Yuxin, Dai Xuerong, Song Zhiguang, et al. Particle size distribution and mineral components of atmospheric particles collected in spring of Shanghai [J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 780-785.]
- [33] 钱鹏,郑祥民,周立旻. 沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义[J]. 环境科学,2013,34(5):2010-2017. [Qian Peng, Zheng Xiangmin, Zhou Limin. Geochemical characteristics and sources of atmospheric particulates in Shanghai during dust storm event [J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 2010-2017.]
- [34] 孙东怀,鹿化煜,Rea D,等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报,2000,18(3):327-335. [Sun Donghuai, Lu Huayu, Rea D, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese Loess and its paleoclimate implication[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 327-335.]
- [35] 孙东怀,安芷生,苏瑞侠,等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. 自然科学进展,2001,11(3):269-276. [Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia, et al. Mathematical approach to sedimentary component partitioning of polymodal sediments and its applications[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(3): 269-276.]
- [36] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of elastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34(1): 73-83.
- [37] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京:地质出版社,1976:55-103. [Shanbei Team of Cheng du Institute of Geology. Grain size analysis of the sedimentary rock (sediment) and its application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1976: 55-103.]
- [38] 李从先,陈庆强,范代读,等. 末次盛冰期以来长江三角洲地区的沉积相和古地理[J]. 古地理学报,1999,1(4):12-25. [Li Congxian, Chen Qingqiang, Fan Daidu, et al. Palaeogeography and palaeoenvironment in Changjiang Delta since Last Glaciation [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1(4): 12-25.]
- [39] 李从先,闵庆宝,孙和平. 长江三角洲南翼全新世地层和海侵[J]. 科学通报,1986,31(21):1650-1653. [Li Congxian, Min Qiubao, Sun Heping. Holocene stratigraphy and transgression in the south flank of Changjiang Delta [J]. Chinese Science Bulletin, 1986, 31(21): 1650-1653.]
- [40] 郭蓄民. 长江河口地区晚更新世晚期以来沉积环境的变迁[J]. 地质科学,1983,18(4):402-408. [Guo Xumin. Evolution of sedimentary environment of the Changjiang Estuary area since the Late stage of Late Pleistocene [J]. Chinese Journal of Geology, 1983, 18(4): 402-408.]

## Multivariate Statistical Analysis of Grain Size of the First Hard Clay Layer in the Yangtze River Delta and Sedimentary Environment Discrimination

WU Chao<sup>1</sup>, ZHENG XiangMin<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, ZHOU LiMin<sup>1</sup>, QIAN Peng<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Geo-information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2. School of Geography, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226000, China

**Abstract:** The origin of the first hard clay layer in the Yangtze River Delta is a debated issue. To explore its origin, its grain size was examined by clustering analysis and discriminant analysis, and compared with the Xiashu loess in Nanjing and suspended particles in the Yangtze River. The grain size characteristic is uniform, with positive skewness, medium or sharp peak shape, bimodal distribution, S-shape cumulative frequency curve distribution, and with aeolian deposition characteristics. When the grain size analysis provides sedimentological evidence for a sedimentary environment, multivariate statistical analysis improves its accuracy. The first hard clay and Xiashu loess fall into the same classification; the suspended particles in the Yangtze River are in a separate class. The application of clustering analysis shows that the hard clay and Xiashu loess have the same aeolian genesis, as confirmed by discriminant analysis. Standard deviation curves of the hard clay, together with the present-day wind field, show that the grain size characteristics of the hard clay have two controlling factors: high-altitude westerly winds and the East Asian winter monsoon. All analyses indicate that the first hard clay layer in the Yangtze River Delta is an aeolian deposit transported by westerly winds and the northwestern monsoon.

**Key words:** grain size characteristic; origin; hard clay; clustering analysis; discriminant analysis