

doi: 10.12097/gbc.2021.08.002

长江三角洲北翼第一硬土层理化特征及其地质成因

朱锦旗, 龚绪龙, 苟富刚*, 张平, 张岩, 杨磊, 刘源

ZHU Jinqi, GONG Xulong, GOU Fugang*, ZHANG Ping, ZHANG Yan, YANG Lei, LIU Yuan

江苏省地质调查研究院, 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210049

Geological Survey of Jiangsu Province, Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Natural Resources,
Nanjing 210049, Jiangsu, China

摘要: 在长江河口两翼广泛分布第一硬土层 (FHSL), 研究其形成机制及工程地质特性对工程建设具有很好的指导意义。根据调查资料 (钻孔 935 个, 累计进尺 42128 m) 和试验资料, 首次精确确认了长江河口北翼第一硬土层分布界线, 研究了第一硬土层的形成年代、粒度特征、地球化学特征、工程地质特性等。研究表明: 第一硬土层形成年龄为 20 ~ 11 ka B.P. (多个光释光和¹⁴C 测年资料); 硬土层含水率随深度的增加有增大的趋势, 表明气候自下向上逐渐变凉和变干; 第一硬土层的颗粒级配、粒度分布频率曲线、C-M 沉积图等特征显示, 第一硬土层主要由粉砂、极细砂和粘土粒级组成, 样品的粒度频率曲线主要呈单峰分布, 反映出物质沉积前所受搬运力性质单一, 土体颗粒沉积以均匀悬浮占绝对优势, 沉积环境是一种相对稳定的低能环境。第一硬土层的发育受气候控制, 大致可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段 (20 ~ 15 ka B.P.) 为沉积与成土交替作用时期, 且以沉积作用为主, 硬土层剖面厚度主要受该阶段控制, 至末次盛冰期结束; 第 2 阶段 (15 ~ 11 ka B.P.) 为暴露成土期, 这时洪水不能形成越岸沉积, 加积作用基本停止, 硬土层厚度不再明显增加, 已形成的第一硬土区域受到频繁变迁的分合河网的侵蚀切割, 形成多条不规则古河道和台地, 硬土层逐渐脱水成陆, 经历了风化成壤的过程; 第 3 阶段 (11 ka B.P. 至今) 为淹埋期, 随着全新世的到来, 气候变暖, 海平面不断上升, 硬土层被其上覆的海相沉积层掩埋, 成岩作用开始直到现今。土体易溶盐含量较高, 为典型氯盐渍土类型, 自下而上具有从低变高的趋势, 为海相层覆盖硬土层以后成岩过程造成的。

关键词: 古土壤; 硬土层; 硬质粘土层; 粒度; 沉积环境; 成因机制

中图分类号: P642.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)01-0001-12

Zhu J Q, Gong X L, Gou F G, Zhang P, Zhang Y, Yang L, Liu Y. Physicochemical characteristics and geological formation of the first hard soil layer of the north wing of the Yangtze River delta. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 1-12

Abstract: The first hard soil layer (FHSL) is widely distributed in the two wings of the Yangtze River estuary, and the study of its formation mechanism and engineering geological characteristics is of good guidance for engineering construction. Based on the survey data (935 boreholes with a total depth of 42128 m) and experimental data, the distribution boundary of the FHSL in the northern flank of the Yangtze River estuary was accurately confirmed for the first time, and the formation age, grain size characteristics, geochemical characteristics and engineering geological properties of the FHSL were studied. The study shows that the formation age of the FHSL was about 20 ~ 11 ka B.P. (OSL and ¹⁴C dating data). The water content of the FHSL tends to increase with depth, indicating that the climate was gradually cooler and drier from bottom to top. The particle size gradation, frequency curve of particle size distribution and C-M sedimentation diagram of the FHSL show that the FHSL mainly consists of fine sand, very fine sand and clay. The grain size

收稿日期: 2021-08-19; 修订日期: 2022-05-09

资助项目: 中国地质调查局项目《江苏沿海经济区地质环境调查评价》(编号: 1212011220005)、江苏省人民政府项目《江苏沿海地区综合地质调查项目》(编号: 20120223)和国家自然科学基金项目《隐伏山脊型地裂缝的采水诱发机理与演化过程研究》(批准号: 41772327)

作者简介: 朱锦旗 (1965-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事水文地质环境地质研究。E-mail: zhujinqi@126.com

* 通信作者: 苟富刚 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程地质和环境地质研究工作。E-mail: goufugang@foxmail.com

frequency curves of the FHSL mainly show a single peak distribution, reflecting that the transport camp force was single before the material deposition. The deposition of soil particles were absolutely dominated by uniform suspension, and the deposition environment was a relatively stable low-energy environment. The development of the FHSL was controlled by climate and can be roughly divided into three stages: the first stage (about 20 ~ 15 ka B.P.) was the period of alternate deposition and soil formation, and the deposition was the main effect, and the thickness of FHSL was mainly controlled by this stage until the end of the last bloom ice period. The second stage (about 15 ~ 11 ka B.P.) was the period of exposed soil formation, at which time floods cannot form transgressive deposits, accretion basically stops, the thickness of FHSL no longer obviously increased. The formed area of the FHSL was erosion cutting by frequently shifting divergent river networks, forming many irregular ancient river channels and terraces. The FHSL gradually dehydrated into land and underwent the process of weathering and pedogenesis. The third stage (about 11 ka B.P. to present) was the inundation period. With the arrival of the Holocene, the climate warmed, and the sea level kept rising. The FHSL was buried by its overlying marine sedimentary layer, and the rock formation began until the present day. The soils have a high content of soluble salts and are typical chlorosaline soils. The soluble salt content has a trend of increasing from low to high, which was caused by the diagenesis process after the marine layer was covered with the FHSL.

Key words: ancient soil; hard soil layer; hard clay layer; granularity; sedimentary environment; genetic mechanism

在长江河口两翼,更新统顶部广泛分布一层暗绿色、褐黄色粘质土层,仅在长江古河道区域和分合河网区缺失,岩性主要为粉质粘土,这一地层被统称为第一硬土层(First hard soil layer,简称为 FHSL;陈中原等,1996;覃军干等,2004;上海市城乡建设和交通委员会,2012)。学者们把这一硬土层作为全新统的底界面,是一个重要的标志层(覃军干等,2004;金秉福等,2007)。以长江古河道为界,长江三角洲被划分为北翼和南翼。关于硬土层的成因,存在风成说和水成说。支持风成说的相关学者把第一硬土层与下蜀土的观点等同起来,认为在末次冰期干冷气候条件下,风尘物质被强劲的西北风携带到研究区产生堆积,形成了第一硬土层(郑祥民等,1991;吴超等,2019)。于洪军等(1995)认为,硬土层的形成环境为十分干冷的沙漠草原环境,第一硬土层由陆架沙漠化衍生而来。水成说是目前的主流观点,相关学者认为第一硬土层成因为:河漫滩或湖沼沉积长期出露地表,遭受多种地质作用,而后全新世地层覆盖其上,压实固结而成。由于众多学者对研究区末次冰期极盛期沉积环境有着迥然不同的理解,造成了第一硬土层多种成因说(陈报章等,1991)。第一硬土层过去被称为“哑地层”,陈庆强等(1998)选取硬土层中植物硅酸体(丰度大于 50 枚/50 g 干土)进行了显微镜下的鉴定及统计分析。孢粉、藻类化石组合中高含量淡水藻类组合是地层对比的重要标志,环纹藻是淡水河流的产物(Christopher, 1976)。王开发等(1983)根据环纹藻的沉积类型及其共生藻类,认为大多数环纹藻成长环境为淡水湖沼或河漫滩积水

洼地。覃军干等(2004)从孢粉、藻类化石组合分析了第一硬土层的成因,土体中含有丰富的淡水藻类,也为水成说提供了确凿的生物化石证据。第一硬土层中提取出的孢粉、藻类化石以环纹藻占优势的组合为主,且分布厚度最大,说明硬土层形成时气候湿润,硬土层的沉积环境主要为水生环境,证明了水成说的正确性(邓兵等,1999, 2003;张玉兰,2005)。

金秉福等(2007)对第一硬土层中的微结核矿物化学特征及其成因进行了研究,同生菱铁矿之类的结核表明了第一硬土层为湖沼相或河漫滩相。陆相沉积物的 Sr/Ba 值小于 0.6,淡水沉积物 Sr 值介于 $100 \times 10^{-9} \sim 300 \times 10^{-9}$ 之间(赵永胜等,1998;韦桃源等,2006),南翼 CY 孔第一硬土层 Sr 值介于 $104 \times 10^{-9} \sim 144 \times 10^{-9}$ 之间,平均值为 122×10^{-9} (邓兵等,2004);北翼 07SR11 孔第一硬土层 Sr 值介于 $118.72 \times 10^{-9} \sim 167.61 \times 10^{-9}$ 之间, Ba 值介于 $489.28 \times 10^{-9} \sim 586.67 \times 10^{-9}$ 之间, Sr/Ba 值介于 0.23 ~ 0.32 之间,显示第一硬土层为陆相沉积(李延军,2012)。

目前已有学者对长江三角洲地区硬土层进行了粒度分析,显示粒度组成为细粉砂、极细粉砂粒级,并含有少量的细砂和粗粘土粒级。基于粒度分析得出硬土层的沉积环境是一种相对稳定的低能环境(邓兵等,2004;赵梅,2008;李延军,2012;李清等,2013)。第一硬土层粘土矿物以伊利石为主,其次为高岭石、伊利石和蒙皂石,根据伊利石/蒙皂石的比值得出硬土层沉积物源来自长江,硬粘土层粘土矿物以伊利石为主(范德江等,2001;Vogt, 2002; Schoonheydt, 2015)。邓兵等(2004)分析了长江三角

洲第一硬土层有机元素组成和变化。邓兵等(2002)分析了南翼第一硬土层形成的古环境和古气候特征、硬土层与海平面变化的耦合关系。

目前,有关长江古河谷南翼的第一硬土层研究程度很高,而对长江三角洲北翼第一硬土层研究较少(冯铭璋等, 1996; 赵梅, 2008; 李清等, 2013; Zhang et al, 2016)。无论是北翼第一硬土层的空间分布特征,还是其物理力学特性等,都不能满足现今工程建设的步伐。Solberg et al(2016)的研究表明,硬土层具有极高的资源潜力,第一硬土层为良好的工程地质层,可以作为桩基础持力层(苟富刚等, 2018a, 2022)。第一硬土层也是工程地质分区重要的参考要素(张文龙等, 2013)。长江三角洲两翼的第一硬土层在沉积环境、时间、物源等方面高度相似,具有很好的可比性。本文依托江苏沿海综合地质调查项目,在长江三角洲北翼布设 50 ~ 100 m 工程地质钻孔 179 个,工程累计进尺 10648 m; 搜集钻孔 756 个,累计进尺 31480 m。通过综合对比分析,精确确认了长江三角洲北翼第一硬土层的北界线,并对长江三角洲地区第一硬土层进行了系统研究。研究长江河口地区第一硬土层的空间分布、形成机制及工程地质特性,对工程建设具有显著的指导意义。

1 研究区地质概况

研究区位于长江河口两翼,面积达 16838 km²,地貌以堆积地貌为主(图 1)。北翼除狼山、军山、剑山、马鞍山和黄泥山 5 处残丘外,均为堆积地貌,地面高程一般为 3 ~ 4 m,第四系厚度大,最厚达 370 m; 南翼除金山、松江区内有 10 余处海拔百米的火山岩性低山丘陵外,地势平坦,地面高程一般为 2.2 ~ 4.8 m,第四系最厚可达 500 m。第一硬土层在常州—金坛以东、溧宜地区、苏锡地区、太湖地区、上海地区及杭嘉湖地区、苏北东部平原广泛分布,呈一块不连续的波伏面埋藏在全新世地层之下,顶面的埋深呈现出由西向东倾斜的趋势(李从先等, 1996; Li et al, 2002)。第一硬土层未在长江古河谷区分布。硬土层顶部一般呈暗绿色(图 2),下部褐黄色。

2 材料与方法

本次研究的试验材料主要来自长江三角洲北翼的第一硬土层。长江三角洲南翼第一硬土层数据主要来自规范 DGJ08 -37—2012(上海市城乡建设和交

通委员会, 2012)。①粒度测试: 样品来自 ZK1、ZK2, 具体位置见图 2, 其中 BF10 孔、NK 孔、LA 孔、GY 孔和 GJG 孔为文献搜集孔(邓兵等, 1999, 2002, 2003; 赵梅, 2008; 李延军, 2012; 李清等, 2013)。采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行分析测试。②采集第一硬土层易溶盐样品 13 件, 上覆地层土体样品 2 件, 下伏地层土体样品 3 件, 共计 18 件。土样易溶盐离子主要包括: Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺ 8 种。按照 GB/T 50123—2019(中华人民共和国水利部, 2019)要求进行测试。③进行土工试验 52 组: 包括粒度试验, 液限、塑限试验, 含水率试验, 天然密度、比重试验, 压缩、抗剪(包括快剪试验、固快试验、三轴 UU 试验)、无侧限抗压强度试验。按照土工试验方法标准 GB/T50123—2019(中华人民共和国水利部, 2019)要求进行测试。

基于测试数据和搜集数据,对第一硬土层的颗粒组成、地球化学特征、土工测试数据、OSL 与¹⁴C 测年结果进行统计分析,绘制硬土层的颗粒级配、粒度分布频率曲线、C-M 沉积图等,剖析其沉积环境、形成机制和工程地质特性。

3 测试结果

3.1 粒度分析

采集 43 个硬土层样品(北翼 ZK1 和 ZK2 孔), 采样间隔约为 5 cm。对测试数据进行统计分析,第一硬土层的平均粒径范围值为 4.21 ~ 8.57 Φ , 平均值为 6.10 Φ ; 硬土层颗粒组成最主要的粒级为粉砂(2 ~ 31 μm , 相当于 9 ~ 5 Φ), 含量为 41.9% ~ 70.1%, 平均值为 69.5%; 其次为极细砂(31 ~ 63 μm , 相当于 5 ~ 4 Φ), 含量范围介于 5.2% ~ 30.6% 之间, 平均值为 15.9%; 粘粒(小于 2 μm , 相当于大于 9 Φ)含量在 7.5% ~ 23.3% 之间, 平均值为 10.8%; 细砂(63 ~ 125 μm , 相当于 4 ~ 3 Φ)含量为 1.0% ~ 13.8%, 平均值为 3.8%; 中砂(大于 125 μm , 相当于小于 3 Φ)以上组分含量极少, 范围值为 0 ~ 28.4%。分选系数介于 1.475 ~ 3.106 之间, 平均值为 2.126, 分选性较差—差; 偏态介于 0.280 ~ 0.490 之间, 平均值为 0.142, 整体近于对称; 峰态变化介于 0.664 ~ 1.128 之间, 平均值为 0.880, 属宽—中等峰态类型。

南翼三角洲前缘 NK、GY、LY 孔平均粒径分别为 21.2 μm (5.06 Φ)、23.4 μm (5.42 Φ)、21.0 μm

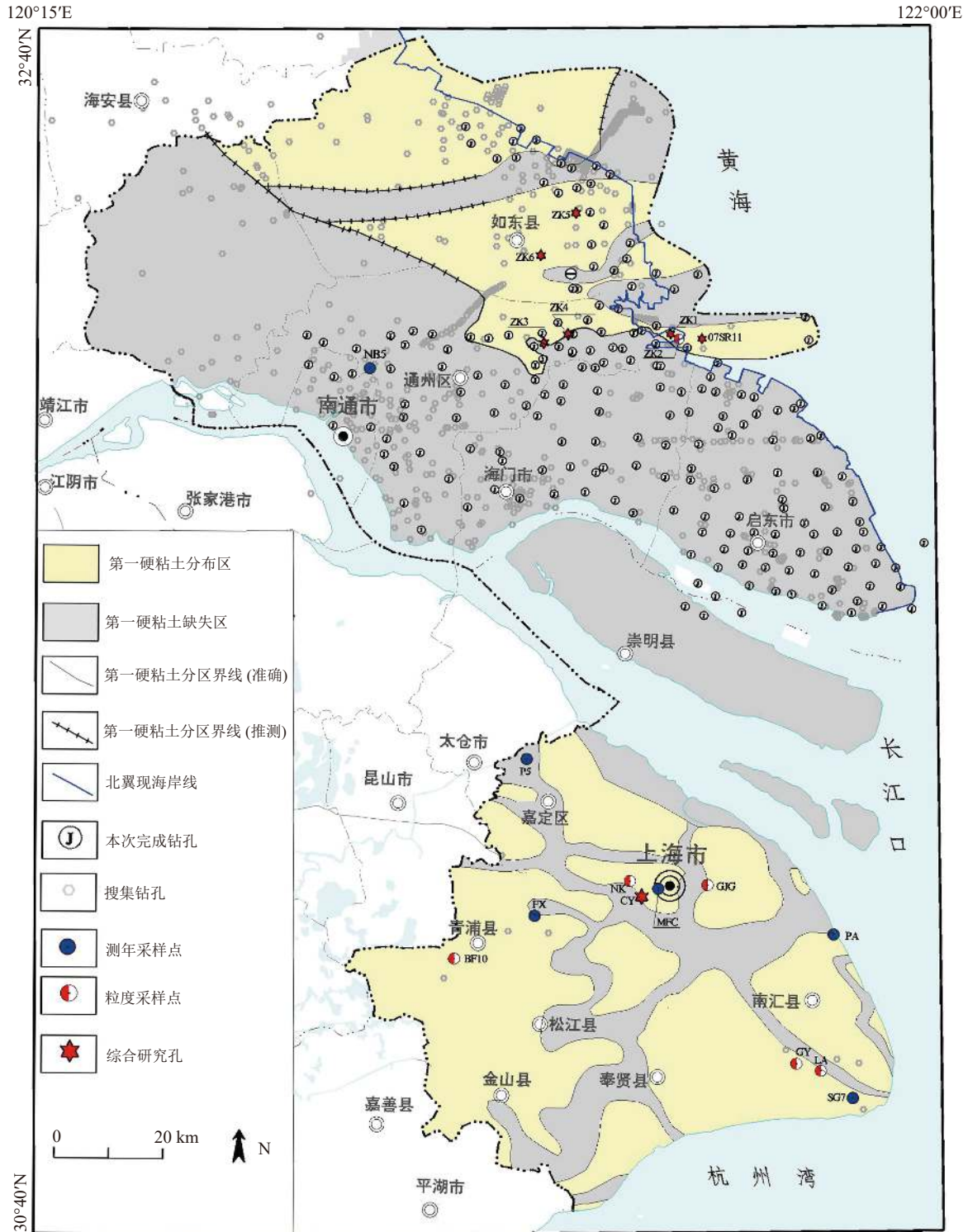


图1 第一硬土层分布特征及样品点分布位置(南翼硬土层空间分布据 DGJ08-37—2012 绘制)

Fig. 1 Distribution characteristics of the FHSL and location of sampling points

(5.57 Φ) (邓兵等, 2004)。其中 NK 孔平均粒径范围为 15 ~ 36 μm (6.1 ~ 4.8 Φ), 颗粒组成以粉砂 (2 ~ 31 μm , 相当于 9 ~ 5 Φ) 为主, 含量为 42.0% ~ 78.0%, 绝大部分样品含量大于 70.0%; 其次为极细砂 (31 ~

63 μm , 相当于 5 ~ 4 Φ), 含量介于 2.0% ~ 44.0% 之间; 粘粒 (小于 2 μm , 相当于大于 9 Φ) 含量介于 1.8% ~ 13.5% 之间; 细砂 (63 ~ 125 μm , 相当于 4 ~ 3 Φ) 含量为 0.5% ~ 10.0%; 中砂 (大于 125 μm , 相当于小于

3 Φ) 以上组分含量极少。各粒径频率曲线为单峰, 偏态值变化介于 0.5 ~ 3.5 之间, 平均值 1.5, 属正偏分布。硬土层剖面粒度由底部向上变细, 平均粒径由 34.87 μm 递变为 19.90 μm , 在粒度组分上表现为, 由底部向上粗粉砂粒级减少, 细粉砂及粘土粒级含量有所增加。

基于上面的数据分析知: 第一硬土层主要由粉砂、极细砂和粘土颗粒组成, 并含有少量的细砂和极少量的中砂粒级。样品的粒度频率曲线绝大多数呈单峰分布(图 3), 众数为 5 ~ 8 Φ , 仅个别双峰(主峰众数值在 3 ~ 4 Φ , 次峰众数值在 7 ~ 8 Φ), 反映出物质沉积前所受搬运营力, 性质单一(张亮等, 2021)。

概率累积曲线呈三段式(图 4), 缺失滚动组分, 悬浮总体占绝对优势, 悬浮组分约占 60%。说明第一硬土层的沉积环境是一种相对稳定的低能环境, 反映硬土层形成时水动力较弱, 以静水沉积为主(李燕等, 2021)。

典型 M-C 沉积图可分为 8 个区, 随着编号的增大, 颗粒沉积时动能减小。其中 I、II 和 III 沉积区土体颗粒沉积以滚动为主, IV 区为强紊流区, V 区为中等紊流递变区, VI 区为均匀悬浮沉积区, VII 区为递变悬浮沉积区, VIII 区为静水悬浮沉积区。第一硬土层沉积物 C 值均小于 1000 μm ; M 值几乎都小于 15 μm , 43 个样品中, 仅 2 个样品大于 15 μm , 但也在 15 μm

附近; 第一硬土层沉积物基本位于 VIII 区(图 5), 显示均匀悬浮的物质主要为粉砂和粘粒级颗粒, 土体组成颗粒位于静水悬浮沉积区和均匀悬浮沉积区之间。均匀悬浮一般直接与底床接触, 显示当时的水动力条件较弱, 主要为静水低能环境, 说明沉积物源较单一, 土体沉积时受到影响的因素较少。

通过对比发现, 南北两翼第一硬土层平均粒径值、粒度分布频率曲线、C-M 沉积图等特征基本一致, 反映两区沉积环境基本一致。

3.2 地球化学特征

研究区土体易溶盐类型主要为氯盐土, 全新世地层含盐量普遍较高, 含盐量为 0.44% ~ 1.44%, 以弱盐渍土为主, 局部为强盐渍土(苟富刚等, 2018b)。受全新世海侵影响, 硬土层含盐量偏高, 含盐量为 0.24% ~ 0.69%, 平均值为 0.43%, 含盐量达到或接近弱盐渍土(表 1)。 Cl^- 与 2 倍 SO_4^{2-} (单位为摩尔浓度) 的比值为 8 ~ 68, 平均值为 26, 远大于 2, 为氯盐渍土类型(苟富刚等, 2022)。硬土层的 Na^+ 和 Cl^- 含量偏高, 介于 865 ~ 2450 mg/kg 和 1280 ~ 3735 mg/kg 之间, 平均含量分别为 1493 mg/kg 和 22394 mg/kg; 其他各离子平均含量由高到低依次为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 CO_3^{2-} , 平均含量分别为 230 mg/kg、206 mg/kg、48 mg/kg、30 mg/kg、24 mg/kg 和小于 5 mg/kg。

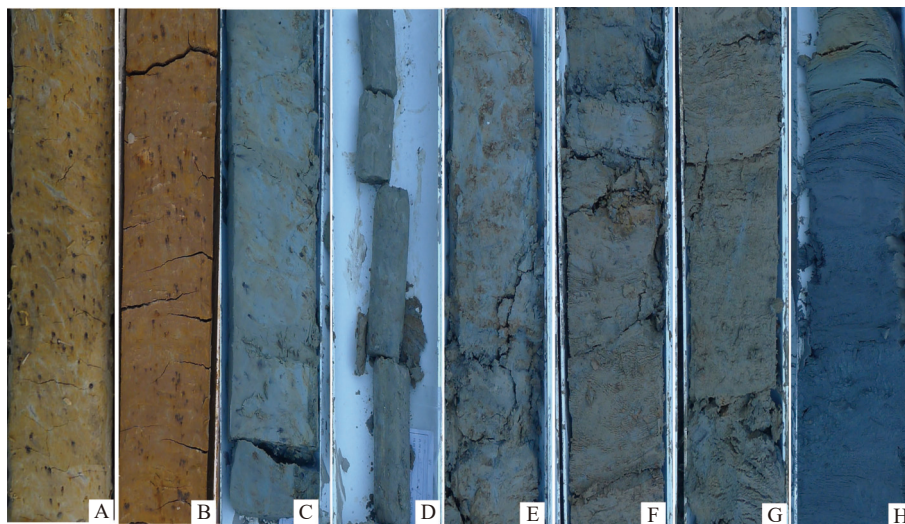


图 2 第一硬土层岩心照片

Fig. 2 Core photos of the FHSL

A—ZK5 孔 26.2 ~ 27.6 m 段硬土层岩心; B—ZK6 孔 25.6 ~ 26.0 m 段硬土层岩心; C—ZK4 孔 28.0 ~ 28.4 m 段硬土层岩心; D—ZK4 孔 28.8 ~ 29.2 m 段标准贯入试验岩心; E—ZK4 孔 29.2 ~ 29.6 m 硬土层岩心; F—ZK4 孔 29.6 ~ 30.0 m 硬土层岩心; G—ZK4 孔 30.0 ~ 30.4 m 硬土层岩心; H—ZK4 孔 31.4 ~ 31.8 m 硬土层与下伏海相地层沉积接触关系

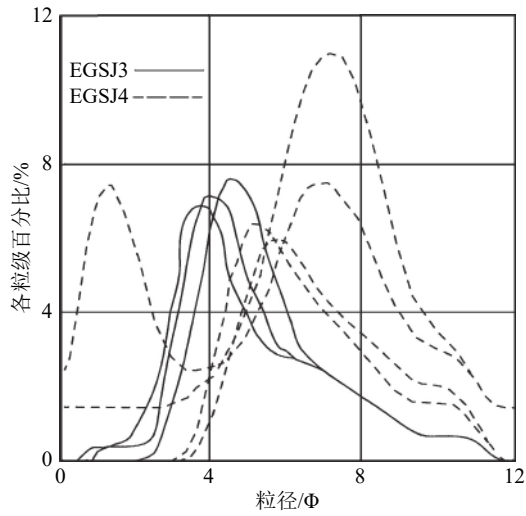


图3 典型土样粒径频率曲线

Fig. 3 Typical soil sample particle size frequency curve

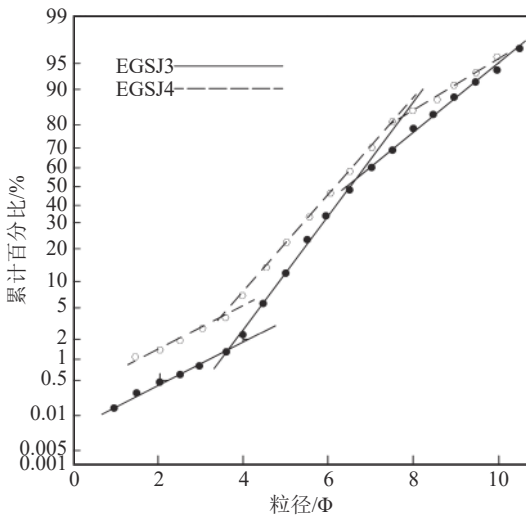


图4 概率累积曲线

Fig. 4 Probabilistic cumulative curve

硬土层浸出液 pH 值为 7.5 ~ 8.4, 平均值为 8.0, 显示碱性。以 ZK3 孔为例, 土体易溶盐含量自下而上具有从低变高的趋势(图 6), 土体中各离子含量也相应增加, 说明该土层上部发生过盐渍化。这可能来自成土过程, 更可能是海相层覆盖以后成岩过程中的变化所致。

通过对土体易溶盐成分的统计分析和相关性分析, 可以更好地揭示土体的含盐特征(苟富刚等, 2018b)。对土体易溶盐各成分进行相关性分析, 结果见表 2。土体含盐量与 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 在 0.01 水平上显著正相关, 相关系数分别为 0.990、0.984、0.864; 土体含盐量与 SO_4^{2-} 在 0.05 水平上显著正相

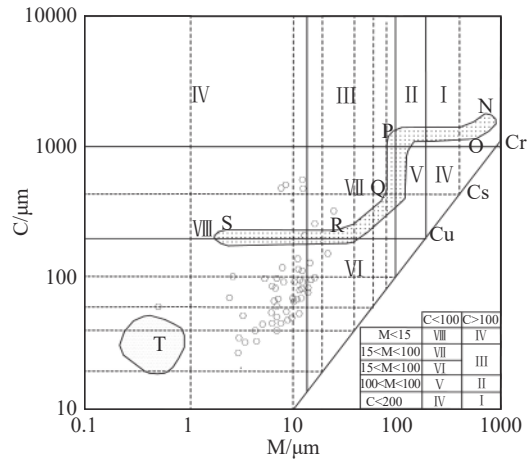


图5 第一硬土层粒度特征 M-C 图

Fig. 5 M-C diagram of particle size characteristics of FHSL

T—海面悬浮; S-R—均匀悬浮; R-Q—渐变悬浮; Q-P—悬浮+滚动; P-O—滚动; Cr—最易作滚动悬浮搬运的颗粒粒径; Cs—渐变悬浮中最粗颗粒的粒径; Cu—均匀悬浮中最粗颗粒的粒径;

I ~ VIII—C-M 图沉积分区

关, 相关系数为 0.629, 表明 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 对土体含盐量贡献最大。把土体易溶盐成分与其上覆地层及研究区海水样品盐分进行对比研究, 发现三者之间保持了很好的一致性, 说明硬土层中的盐分主要来自海水浸渍。

3.3 物理力学特性

样品测试按照规范 GB/T 50123—2019 进行。北翼对硬土层进行粒度试验 6 组。测试结果显示粘粒(粒径小于 0.005 mm)含量范围值介于 16.1% ~ 32.4% 之间, 平均值为 23.97%; 粉粒(0.075 ~ 0.005 mm)含量介于 48.6% ~ 82.4% 之间, 平均值为 64.98%; 砂粒(大于 0.075 mm)含量介于 1.0% ~ 35.3% 之间, 平均值为 11.05%。进行含水率 w_n 试验 46 组, 范围值介于 21.9% ~ 37.1% 之间, 平均值为 28.43%。含水率 w_n 随着深度的增加有增大的趋势(图 7), 表明气候自下向上逐渐变凉和变干, 这与邓兵等(1999)通过孢粉研究得出的成果一致。塑性指数 I_p 介于 10.6 ~ 16.8 之间, 平均值为 13.69; 液性指数 I_L 介于 0.09 ~ 0.80 之间, 平均值为 0.54; 天然孔隙比 e_0 介于 0.610 ~ 1.020 之间, 平均值为 0.791。快剪指标内聚力 C_q 介于 19.00 ~ 54.69 kPa 之间, 平均值为 31.94 kPa, 内摩擦角 ϕ_q 介于 8° ~ 17.5° 之间, 平均值为 13.99° ; 固快指标内聚力 C_{cq} 介于 22.0 ~ 55.0 kPa 之间, 平均值为 36.59 kPa, 内摩擦角 ϕ_{cq} 介于 10.20° ~ 24.10° 之间, 平均值为 16.64° 。ZK4-6 样品物理力学指标见表 3, 无侧限抗压强度为 123 kPa, 塑样无侧限抗压强度为

表 1 第一硬土层及其上覆地层易溶盐参数统计
Table 1 Statistics of soluble salt parameters of the FHSL and its overlying strata

样品原号	土层序号	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	Cl ⁻ / (2SO ₄ ²⁻)	含盐量/%
		mg/kg										
最大值		2450	59	73	51	353	12	3735	442	8.4	68	0.69
最小值		865	5	19	15	130	1	1280	25	7.5	8	0.25
平均值		1493	24	48	30	230	4	2239	206	8.0	26	0.43
个数		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
变异系数	硬土层	0.29	0.69	0.38	0.36	0.33	0.92	0.30	0.66	0.03	0.84	0.29
偏度		0.48	0.47	-0.61	0.44	0.42	1.16	0.60	0.27	-0.49	1.35	0.41
峰度		0.64	-0.26	-1.17	-0.27	-0.80	0.54	0.73	-1.04	0.30	0.28	0.28
最大值		3640	107	189	221	341	18	5655	1760	8.7	36	1.04
最小值		1590	40	22	21	191	5	2395	97	7.7	4	0.44
平均值		1791	54	49	59	183	5	2709	376	5.8	20	0.52
个数		7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	7
变异系数	上覆地层	0.48	0.52	1.40	1.37	0.34	1.05	0.50	1.88	0.07	0.78	0.53
偏度		0.43	-0.38	1.92	1.82	0.54	2.24	0.57	2.01	0.77	-0.68	0.28
峰度		-1.79	-2.26	3.82	3.51	-1.69	5.00	-1.48	4.12	-1.11	-2.79	-2.89

87 kPa, 灵敏度为 1.42, 属低灵敏性。

压缩模量 E_s 介于 3.33 ~ 12.69 MPa 之间, 平均值为 6.42 MPa; 压缩系数 a_{1-2} 介于 0.13 ~ 0.60 MPa⁻¹ 之间, 平均值为 0.30 MPa⁻¹; 压缩指数 C_c 介于 0.10 ~ 0.18 之间, 平均值为 0.13, 压缩系数、压缩模量和压缩指数都表明硬土层主要为中压缩土。对于北翼 3 个土样, 采用 Casagrande 法, 获取的硬土层先期固结压力分别为 340 kPa、498 kPa、296 kPa, 超固结比为 1.3、1.8、1.1, 均为超固结土。南翼暗绿色硬土层超固结比为 2.1 ~ 2.2。

北翼硬土层物理力学指标和南翼滨海平原区硬土层物理力学指标基本一致, 北翼硬土层力学指标稍差于南翼湖沼平原区硬土层。南翼各工程地质分区的硬土层指标可以查看上海市岩土工程勘察规范 DGJ08-37—2012。

4 讨 论

4.1 硬土层的空间分布特征

目前, 有关长江古河谷以北第一硬土层研究程度较低。本次工作精准确定了长江古河谷北界线。硬土层分布面积达 6082 km², 占研究区总面积的 36.12%。长江古河道出露面积约 8826 km², 占研究区总面积的 52.42%。其中南翼硬土层出露面积约

3680 km², 由于古河道切割, 局部缺失, 硬土层分布面积占南翼总面积(包括崇明岛地区)的 75.48%; 北翼硬土层出露面积约 2402 km², 硬土层分布面积占北翼总面积的 76.62%。根据搜集和布置的工程地质钻孔, 查明长江古河谷北翼第一硬土层埋深、层厚等空间分布特征。北翼第一硬土层埋深一般为 22 ~ 28 m, 厚度一般为 3 ~ 5 m。三角洲南翼湖沼平原和滨海平原区受到古河道的切割, 第一硬土层呈块状分布(图 1)。硬土层顶板埋深自西向东倾斜, 西部湖沼平原埋深浅, 且厚度大, 埋深范围为 3 ~ 16 m, 厚度一般为 5 ~ 7 m; 东部滨海平原埋深较大, 厚度较西部薄, 埋深一般为 22 ~ 28 m, 厚度一般为 3 ~ 5 m, 其分布特征与北翼地区分布的硬土层的特征一致。东海海底的地质调查资料 and 大量钻孔资料反映, 硬土层在东海海底许多地方均有出现, 厚度几十厘米至 1 ~ 2 m 不等, 总的表现出零散分布, 厚度差异较大。单一的黄褐色硬土层主要分布在长江三角洲南翼东部平原区, 由于全新世基底地形突起区, 全新世期间未遭海侵影响, 硬土层埋深通常不超过 5 m, 上覆的全新世沉积物厚度比较薄, 一般不足 5 m。

4.2 沉积环境与成因机制分析

(1) 形成年代

硬土层测年材料大多直接采用硬土层。由于研

表 2 第一硬土层易溶盐组分相关性分析

Table 2 Correlation analysis of soluble salt components in the FHSL

项目	含盐量	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	pH
含盐量	1	0.990**	0.617*	0.076	0.864**	0.280	0.422	0.984**	0.629*	0.412
Na ⁺	0.990**	1	0.646*	-0.047	0.800**	0.235	0.484	0.985**	0.545	0.491
K ⁺	0.617*	0.646*	1	-0.240	0.470	0.596	0.286	0.576	0.125	0.632*
Ca ²⁺	0.076	-0.047	-0.240	1	0.520	0.144	-0.419	0.038	0.398	-0.643*
Mg ²⁺	0.864**	0.800**	0.470	0.520	1	0.388	0.037	0.809**	0.756**	0.085
HCO ₃ ⁻	0.280	0.235	0.596	0.144	0.388	1	-0.384	0.144	0.290	0.327
CO ₃ ²⁻	0.422	0.484	0.286	-0.419	0.037	-0.384	1	0.541	-0.153	0.282
Cl ⁻	0.984**	0.985**	0.576	0.038	0.809**	0.144	0.541	1	0.522	0.370
SO ₄ ²⁻	0.629*	0.545	0.125	0.398	0.756**	0.290	-0.153	0.522	1	0.089
pH	0.412	0.491	0.632*	-0.643*	0.085	0.327	0.282	0.370	0.089	1

表 3 第一硬土层土工测试结果统计分析

Table 3 Statistical analysis of geotechnical test results of the FHSL

孔号	深度/ m	w _n / %	G _s	ρ/ (g·cm ⁻³)	ρ _d / (g·cm ⁻³)	e ₀	w _l / %	w _p / %	I _p	I _L	a ₁₋₂ / MPa	Es/MPa	C _q / kPa	φ _q / °	C _{cq} / kPa	φ _{cq} / °
最大值	36.0	37.1	2.74	2.07	1.70	1.020	39.9	24.5	16.8	0.97	0.60	12.69	55	17.5	55	24.1
最小值	24.0	21.9	2.72	1.85	1.35	0.610	30.0	17.5	10.6	0.09	0.13	3.33	19	8.0	22	10.2
平均值	29.96	28.34	2.72	1.96	1.53	0.791	34.67	20.98	13.69	0.56	0.30	6.42	31.94	13.99	36.59	16.64
个数	50	46	49	46	46	46	50	50	50	46	44	44	29	29	14	14
变异系数	0.10	0.14	0.00	0.03	0.06	0.14	0.07	0.10	0.13	0.46	0.33	0.29	0.33	0.18	0.30	0.25
偏度	-0.07	0.19	1.95	0.07	0.04	0.13	-0.23	0.31	0.03	-0.08	0.98	1.19	0.82	-0.62	0.26	0.19
峰度	-0.62	-0.85	2.37	-1.19	-1.12	-1.03	-0.68	-1.40	-1.18	-1.29	1.98	2.03	-0.50	-0.23	-0.90	-0.62

注：数据为北翼第一硬土层土工测试结果；据土工试验方法标准GB/T50123—2019(中华人民共和国水利部, 2019), 岩性都为粉质粘土

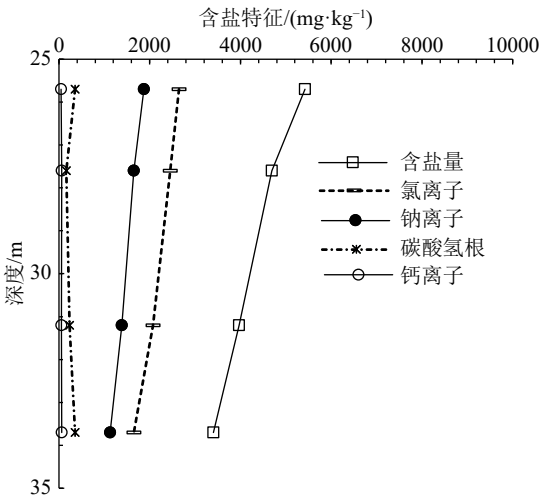


图 6 ZK3 孔易溶盐空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of soluble salt in ZK3 borehole

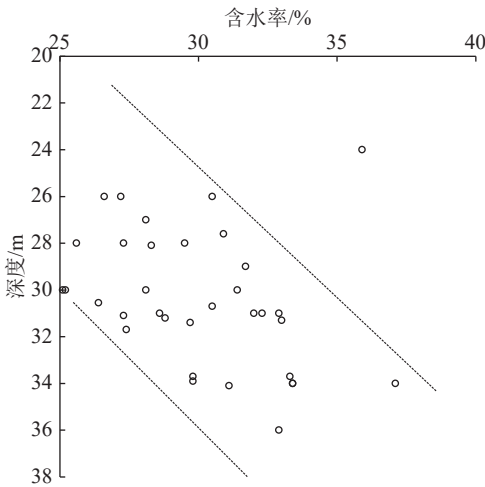


图 7 硬土层天然含水率空间分布特征

Fig. 7 Spatial distribution characteristics of natural water content in FHSL

究土层有机质含量较低,再加上成土作用的改造,使有机质组分发生分解、转化(邓兵等, 2004; 李冬雪等, 2021; 张姚等 2021),影响测年结果,使硬土层测年可能偏向年轻化。硬土层中有机物含量为 0.17%~1.87%,并有向下减少的趋势(李从先等, 1996)。本次采用多种测年手段,包括光释光(OSL)和¹⁴C 测年,测试硬粘土及其下伏地层、同期沉积土层,进行综合对比,进而逼近硬粘土的形成年代。王富葆等(2002)对暗绿色第一硬土层进行了多个¹⁴C 测年,结合前人研究成果,把硬土层形成时间定为 18.5~17 ka B.P.与 20(21)ka B.P.之间。通过对南翼娄塘地区 P5 孔(位于古河道内,埋深 44.0~46.5 m,与第一硬土层同期,韦桃源等, 2006)的泥炭层及北翼地区 NB5 孔(位于长江古河道区,埋深 47.5 m,与第一硬土层同期,缪卫东等, 2016)的淤泥质粘土进行¹⁴C 测年,结果显示,其形成于 12.6~11.5 ka B.P.,表明硬土层与 20 世纪 80 年代在欧洲苏格兰、挪威西海岸等地发现的“新仙女木突冷事件(12.9~11.5 ka B.P.)”为同期的产物。第一硬土层下伏褐黄色粉砂,据光释光(OSL)测年结果(表 4),推测其形成时间距今 25~20 ka B.P.。结合多个 OSL 和¹⁴C 定年综合分析(表 4),第一硬土层形成年龄为 20~11 ka B.P.,上部的暗绿色硬土层形成年龄为 17~11 ka B.P.,下部的褐黄色粉质粘土为 20~17 ka B.P.。

(2)形成机制分析

硬土层是河漫滩上多次沉积与成土交替作用的产物,经受了沉积、成土及早期成岩作用的叠加影响,因而包含了复杂的环境信息。第一硬土层发育过程总体上受到海侵、海退控制,具有明显的阶段性,主要包含下面 3 个阶段(图 8)。

第一阶段以沉积作用为主,成土作用为辅,这一阶段是硬土层增厚的主要时期。在末次冰期期间,东黄海海平面大概在 20 ka B.P. 达到最低值,之后海平面逐渐上升(图 8)。受季风影响,当时研究区的气候相当温湿,降雨较频繁,各种陆生草本、木本植物及淡水藻类(以环纹藻为主)广泛发育。高水位时期,河水漫过河岸,形成泥砂沉积物,出现了沉积物分异现象,数百米内沉积物可由河道边缘细砂向外缘粉砂粘土过渡(Zhao et al., 1999);低水位时期,泥砂沉积物经受成土作用。根据图 7 可以看出,该阶段气候自下向上逐渐变凉变干。这一过程大约持续了 5000 a(20~15 ka B.P.),伴随着这一过程的交替进行,第一硬土层沉积厚度不断增加。

第二阶段为暴露成土期。在 15~11 ka B.P.时间内,海平面继续上升,但距离淹没第一硬土层还有较大的高程差异。该阶段已形成的第一硬土区域受到频繁变迁、分合河网的侵蚀切割,形成多条不规则古河道和台地。该阶段洪水大多时候已不能形成越岸沉积,加积作用基本停止,硬土层厚度不再明显增

表 4 测年结果汇总

Table 4 Summary of measurement year results

钻孔	深度/m	岩性	测年方法	年龄/(a B.P.)	文献
FX	15.9~16	暗绿色粘土	OSL	17410±880	王张华等, 2004
FX	22.0	褐黄色粉砂 (下伏土层)	OSL	22720±2430	王张华等, 2004
MFC	26.5~26.6	暗绿色粘土	OSL	10100±1130	王张华等, 2004
	30.2~30.3	褐黄色粉质粘土	OSL	16230±1560	王张华等, 2004
SG7	25.2	灰黄色粘土	OSL	18200±1600	王张华等, 2004; 上海市城乡建设和交通委员会, 2012
CY	28.3~28.5	暗绿色粘土	¹⁴ C	14196±220	李从先等, 1998
	30.17~30.35	褐黄色	¹⁴ C	18520±520	王张华等, 2004
		粉质粘土			
P5	44.0	泥炭(同期土层)	¹⁴ C	12155±115	上海市城乡建设和交通委员会, 2012
P5	46.5	泥炭(同期土层)	¹⁴ C	12565±115	上海市城乡建设和交通委员会, 2012
NB5	47.5	淤泥质粘土 (同期土层)	¹⁴ C	11541±48	缪卫东等, 2016

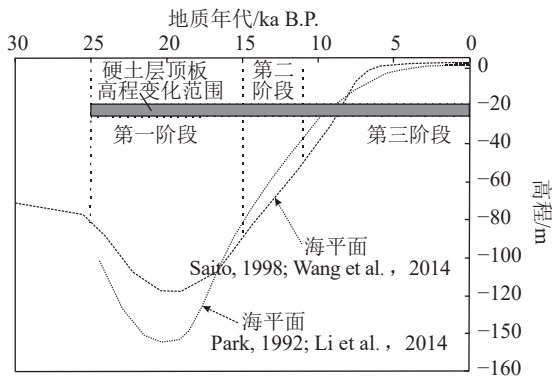


图8 硬土层形成与海平面变化示意图(据 Park, 1992; Saito, 1998; Li et al., 2014; Wang et al., 2014)

Fig. 8 Schematic diagram of the formation of FHSL and sea level change

加,硬土层进入持续成土阶段,硬土层上部出现的石膏就是这一阶段保留下来的少数有力证据之一,且在古河道内局部形成软土层。软土层的 ^{14}C 测年资料(表4)表明,其与“新仙女木突冷事件(12.9~11.5 ka B.P.)”为同期产物。在此期间,气候曾发生明显波动,基于沉积作用形成的沉积物,长期连续的成土作用过程中往往存在多次小规模沉积,沉积作用持续的时间很短,是一个相当长的沉积间断,这一阶段成土作用长期改造着已形成的母质沉积层,土层逐渐脱水并风化成壤。

第三阶段为淹埋期。全新世气候变暖,海平面的快速上升并在5 ka B.P.之后保持稳定,已形成的第一硬土层频繁被海水淹没。海相沉积物覆于硬土层之上,早期成岩作用开始,硬土层经受新的改造。硬土层顶部一般呈暗绿色,下部褐黄色,这种色差现象是由于海侵诱发的,硬土层中的粘土矿物金属离子与海水中的可溶性有机质发生了还原反应,进而引起硬土层颜色产生变化,这也说明硬土层后期受到海水改造。据硬土层易溶盐分析结果知,土体易溶盐含量较高,为典型氯盐渍土。硬土层上部含盐量较下部含盐量高,硬土层中易溶盐可能来自成土过程,更可能是海相层覆盖以后成岩过程的变化。根据硬土层孢粉及藻类分析结果可知,土体中含有少量的海生沟鞭藻,说明沉积土层时而受到回溯海水影响(闫纪元等,2021)。

4.3 第一硬土层的应用

由于暗绿色硬土层分布广、厚度较大、土性好、地基土强度高、下伏土层又多为中密、低压缩的粉土或粉砂土,故暗绿色硬土层是研究区一般构筑物的

理想桩基持力层。研究区南翼湖沼平原和滨海平原第一硬土层埋深差异大,对桩端阻力标准值影响最大,桩侧摩阻力标准值和桩端阻力标准值2个工程地区可以单独列出,供工程建设参考。南翼湖沼平原硬土层埋深4~10 m,以预制桩为例,桩侧摩阻力标准值介于50~70 kPa之间,桩端阻力标准值为1500~2500 kPa。研究区滨海平原埋深22~30 m,桩侧摩阻力标准值介于60~100 kPa之间,桩端阻力标准值为1500~3500 kPa。

在控制地面沉降方面,除本身不易压缩外,在一定程度上还能消散或滞后下部应力对上部土层的影响。适宜于较重、较大、较高的工业与民用建筑,以及对沉降和差异沉降控制较严格的建筑物(吴惠根,1989; Ye et al, 2016)。南翼区第③+④层软土,均为全新世软土,可参考DGJ08-37—2012(上海市城乡建设和交通委员会,2012);北翼硬土层分布区一般软土层缺失。由于软土负有摩阻力的作用,在南翼可以考虑把尺寸为 $45\times 45\text{ cm}^2$ 的桩扩大到 $50\times 50\text{ cm}^2$,提高单桩承载力和降低沉降。上海地区某11层饭店采用截面尺寸 $45\times 45\text{ cm}^2$ 的预制桩,桩长为25~27 m,基底附加应力为 $1.53\times 10^4\text{ kPa}$,以第一硬土层作为桩基持力层,最终观测沉降量为195 mm;某20层住宅楼采用相同的桩尺寸和桩基持力层,仅荷载和桩长不同,桩长为24.5~25.5 m,基底附加应力为 $2.64\times 10^4\text{ kPa}$,最终观测沉降量为95.8 mm。建筑地基基础设计规范GB50007—2011(中华人民共和国住房和城乡建设部等,2011)规定体型简单的高层建筑基础的平均沉降量应小于200 mm,通过计算实例可以看出,以第一硬土层作为桩基持力层,一般满足较重、较大、较高的工业与民用建筑的沉降量要求。

第一硬土层对工程建设影响显著,其是工程地质分区重要的参考要素。长江三角洲南翼地区按照第一硬土层缺失与否及硬土层顶面埋深(建议值为15 m),把南翼地区分为硬土层浅埋区与硬土层正常分布区,该方案可以作为该地区的优化工程地质分区方案。对于长江三角洲北翼,第一硬土层也是该地区工程地质分区的重要参考依据。南通市四安镇—二甲镇—余东镇—包场镇—东灶港镇(自西向东)以南地区为新三角洲冲积平原区,硬土层缺失。北翼滨海平原区,主要根据第一硬土层的缺失与否进行工程地质分区,把滨海平原分为2个工程地质分区。

5 结 论

(1)首次确认了长江河口北翼第一硬土层的分布界线。南北两翼第一硬土层平均粒径值、粒度分布频率曲线特征基本一致,反映两区沉积物源和沉积环境基本一致。第一硬土层主要由粉砂和粘土粒级组成,其沉积环境是一种相对稳定的低能环境,物质沉积前所受搬运力性质单一。

(2)第一硬土层含水率随着深度的增加有增大的趋势,表明气候自下向上逐渐变凉和变干。硬土层形成大致可以分为 3 个阶段,第 1 阶段为堆积期,硬土层剖面厚度主要受该阶段控制,至末次盛冰期结束;第 2 阶段为暴露成土期,硬土层厚度不再明显增加,硬土层逐渐脱水成陆,经历了风化成壤的过程;第 3 阶段为淹埋期,硬土层被其上覆海相沉积层掩埋,成岩作用开始,直到现今。硬土层上部含盐量较下部含盐量高,硬土层中易溶盐可能来自成土过程,更可能是海相层覆盖以后成岩过程形成的。

参考文献

- Christopher R A. 1976. Morphology and Taxonomic Status of Pseudoschizaea Thiergart and Frantz ex R. Potonie emend[J]. *Micropaleontology*, 22: 143–150.
- Li C X, Wang P, Sun H P. 2002. Late Quaternary incised valley fill of the Yangtze delta(China): its stratigraphic framework and evolution[J]. *Sedimentary Geology*, 152: 133–158.
- Li G, Li P, Liu Y, et al. 2014. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum[J]. *Earth-Science Reviews*, 139: 390–405.
- Park Y A. 1992. The changes of sea level and climate during the late Pleistocene and Holocene in the Yellow Sea region[J]. *Korean J. Quat. Res.* 6: 13–20.
- Saito Y. 1998. Sea levels of the last glacial in the East China Sea continental shelf[J]. *Quat. Res.*, 37(3): 235–242.
- Schoonheydt R A. 2015. Reflections on the material science of clay minerals[J]. *Applied Clay Science*, 131: 107–112.
- Solberg I L, Long M, Baranwal V C, et al. 2016. Geophysical and geotechnical studies of geology and sediment properties at a quick - clay landslide site at Esp, Trondheim, Norway[J]. *Engineering Geology*, 208: 214–230.
- Vogt T. 2002. Clays and secondary minerals as permafrost indicators: examples from the circum- Baikal region[J]. *Quaternary International*, 95: 175–187.
- Wang Y H, Li G X, Zhang W G, et al. 2014. Sedimentary environment and formation mechanism of the mud deposit in the central South Yellow Sea during the past 40 kyr[J]. *Marine Geology*, 347: 123–135.
- Ye G L, Ye B. 2016. Investigation of the overconsolidation and structural behavior of Shanghai clays by element testing and constitutive modeling[J]. *Underground Space*, 1(1): 62–77.
- Zhang Z W, Zheng G D, Takahashi Y, et al. 2016. Extreme enrichment of rare earth elements in hard clay rocks and its potential as a resource[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 191–212.
- Zhao Y, Marriott S, Rogers J. 1999. A preliminary study of heavy metal distribution on the flood plain of the River Severn, UK by a single flood event[J]. *The Science of the Total Environment*, 243: 219–231.
- 陈报章, 李从先, 业治铮. 1991. 长江三角洲北翼全新统底界和“硬粘土层”的讨论[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 11(2): 37–46.
- 陈庆强, 李从先. 1998. 长江三角洲地区晚第四纪古土壤发育的阶段性质[J]. *科学通报*, 43(23): 2557–2559.
- 陈中原, 许世远. 1996. 尼罗河与长江三角洲晚更新世末期硬土层特征及其成因对比研究[J]. *第四纪研究*, 16(2): 169–175.
- 邓兵, 李从先, 张经, 等. 长江三角洲古土壤发育与晚更新世海平面变化的耦合关系[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 222–230.
- 邓兵, 李从先. 2002. 长江三角洲古土壤有机元素组成及其古环境意义[J]. *同济大学学报*, 30(7): 833–838.
- 邓兵, 吴国璋, 李从先. 1999. 长江三角洲地区第一古土壤层及其古气候记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 19(3): 29–37.
- 邓兵, 吴国璋, 李从先. 2003. 长江三角洲晚第四纪古土壤的古环境及古气候信息[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 23(2): 1–8.
- 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 2001. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 21(4): 7–12.
- 冯铭璋, 薛金官. 1996. 关于“暗绿色硬土层”研究的讨论[J]. *上海国土资源*, (3): 13–19.
- 苟富刚, 龚绪龙, 梅芹芹. 2018a. 长江三角洲北岸土体工程地质层组划分及其应用[J]. *地质论评*, 64(1): 237–245.
- 苟富刚, 龚绪龙, 杨磊, 等. 2018b. 江苏沿海地区土体含盐特征及指示作用[J]. *长江流域资源与环境*, 27(6): 1380–1387.
- 苟富刚, 龚绪龙, 杨露梅, 等. 2022. 长江河口百米以浅土体含盐特征及其沉积环境演化[J]. *现代地质*, 36(2): 462–473.
- 金秉福, 张云吉, 宋健. 2007. 长江三角洲第一硬土层中微结核的矿物化学特征及其成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 27(3): 9–15.
- 李从先, 陈庆强, 李萍. 1996. 长江三角洲晚第四纪埋藏古土壤及成土母质[J]. *同济大学学报*, 24(4): 439–444.
- 李燕, 金振奎, 高白水, 等. 2021. 汉口滩沉积特征及沉积模式——以鄱阳湖赣江三角洲汉口滩为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 51(6): 1678–1688.
- 李从先, 汪品先, 赵泉鸿. 1998. 长江晚第四纪河口地层学研究[M]. 北京: 科学出版社, 144, 152–155, 163–165.
- 李冬雪, 刘楠楠, 杨胜利, 等. 2021. 石英标准生长曲线在青藏高原东缘黄土光释光测年中的应用[J]. *第四纪研究*, 41(1): 111–122.
- 李清, 殷勇. 2013. 南黄海辐射沙脊群里礁坪 11DT02 孔沉积相分析及环境演化[J]. *地理研究*, 32(10): 1843–1855.
- 李延军. 2012. 南黄海辐射沙脊群小庙洪潮流通道晚更新世以来的沉积环境演变[D]. 南京大学硕士学位论文, 24–44.

- 缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 等. 2016. 长江三角洲 NB5 孔第四纪地层划分及环境变化信息[J]. 中国地质, 43(6): 2022–2035.
- 覃军干, 吴国璋, 郑洪波, 等. 2004. 长江三角洲及邻近海域第一硬质黏土层的生物化石标志[J]. 海洋地质与第四纪地质, 24(3): 11–18.
- 覃军干, 郑洪波. 2004. 从孢粉、藻类化石组合看长江三角洲第一硬土层的成因及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 24(5): 547–554.
- 上海市城乡建设和交通委员会. 2012. DGJ08-37-2012. 上海市岩土工程勘察规范[S].
- 王富葆, 曹琼英, 李弘, 等. 2002. 上海市 15-17 ka B. P. 的古地貌与工程地质条件[J]. 上海国土资源, (3): 19–24.
- 王开发, 韩信斌. 1983. 我国东部新生界环纹藻化石研究[J]. 古生物学报, 22(4): 468–472.
- 王张华, 丘金波, 冉莉华, 等. 2004. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. 海洋地质与第四纪地质, 24(4): 1–8.
- 吴超, 郑祥民, 王辉, 等. 2019. 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[J]. 沉积学报, 37(1): 115–123.
- 吴惠根. 1989. 暗绿色硬质亚粘土层桩基的工程地质条件[J]. 上海国土资源, (2): 7–18.
- 闫纪元, 胡健民, 王东明, 等. 2021. 黄淮海平原晚新生代重大地质事件[J]. 地质通报, 40(5): 623–648.
- 于洪军, 刘敬圃. 1995. 中国陆架第四纪地质学研究的最新进展[J]. 地球科学进展, 10(6): 531–536.
- 张亮, 刘文涛, 贾磊, 等. 2021. 海南三亚海域沉积物分布特征及其沉积环境指示[J]. 地质通报, 40(2/3): 341–349.
- 张文龙, 史玉金. 2013. 上海市工程地质分区问题[J]. 上海国土资源, (1): 5–9.
- 张姚, 崔巧玉, 周爱锋. 2021. 孢粉浓缩物在 AMS ^{14}C 测年研究中的应用及展望[J]. 第四纪研究, 41(1): 136–145.
- 张玉兰. 2005. 长江三角洲地区晚更新世晚期的孢粉特征及古环境[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(9): 121–1205.
- 赵梅. 2008. 黄海中部海岸末次冰盛期第 1 硬质黏土层的粒度分维特征及其环境意义[J]. 海洋地质动态, 24(10): 8–13.
- 赵永胜, 宋振亚, 温景萍, 等. 1998. 保山盆地湖相泥岩微量元素分布与古盐度定量评价[J]. 海洋与湖沼, 29(4): 409–415.
- 郑祥民, 俞立中. 1991. 上海地区晚更新世晚期暗绿色硬土层风积黄土成因说[J]. 上海国土资源, (2): 13–21.
- 中华人民共和国水利部. 2019. GB/T 50123—2019: 土工试验方法标准[S].
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 2011. GB50007—2011: 建筑地基基础设计规范[S].
- 韦桃源, 陈中原, 魏子新, 等. 2006. 长江河口区第四纪沉积物中的地球化学元素分布特征及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 26(3): 397–405.