



# 沉积物中硬质粘土层的研究进展

孔凡彪<sup>1,2</sup>, 徐树建<sup>1</sup>, 贾广菊<sup>1,2</sup>

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014; 2. 山东省水土保持与环境保育重点实验室 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276005)

**摘要:**大量的钻孔资料表明, 平原地区及其海域沉积物中普遍有硬质粘土层的存在。硬质粘土层在工程地质、地理学研究等方面具有重要的价值, 它不仅是高层建筑的持力层, 而且是研究全球环境变化事件、古气候演变的良好载体。该文阐述了硬质粘土层的一般特征、成因以及在粒度、地球化学元素、年代学、沉积环境等方面的研究进展, 并展望了硬质粘土层在年代、物质来源和沉积环境等方面的研究方向, 认为黄河三角洲硬质粘土层研究较少, 需要开展大范围的、系统深入的、多学科的宏观和微观综合分析, 挖掘硬质粘土层蕴含的古环境意义和应用价值。

**关键词:**硬质粘土层; 成因机制; 沉积环境; 研究方法

**中图分类号:** P731.2      **文献标识码:** A

**引文格式:**孔凡彪, 徐树建, 贾广菊. 沉积物中硬质粘土层的研究进展[J]. 山东国土资源, 2018, 34(3): 1-7. KONG Fanbiao, XU Shujian, JIA Guangju. Research Progress of Hard Clay Layers in Sediments[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(3): 1-7.

## 0 引言

冰期—间冰期旋回, 海平面周期性波动是第四纪气候环境的突出特征, 中国黄土作为第四纪特定气候环境条件下的土状沉积物, 由于其堆积的连续性、保存的完整性, 成为研究第四纪地理环境变迁、气候环境演变, 甚至是特殊气候事件的物质基础和重要依据。在我国第四纪黄土沉积物中, 广泛存在一期或多期硬质粘土。硬质粘土层是沿海地区(包括长江三角洲、黄河三角洲)及东海、北黄海等海域陆架广大地区地层划分中重要的一层, 探讨其蕴藏的气候环境信息具有重要的现实价值和理论意义。

硬质粘土层具有显著的资源潜力<sup>[1]</sup>, 它不仅是建(构)筑良好的桩基工程地质条件<sup>[2]</sup>, 而且也是第四纪气候环境研究中的重要地层。硬质粘土层长期以来一直被作为划分全新统与更新统界面的标志层, 对研究中国东部沿海地质地貌的变迁、海平面的波动、气候环境的演变等具有独特的意义<sup>[3]</sup>。

前人对沉积物中硬质粘土层的特征、成因机制、

年代等做了大量的研究分析, 但是关于硬质粘土层的成因、物源等问题众说纷纭, 尚未有明确的定论。该文在前人研究的基础上, 阐述了硬质粘土层的研究现状、研究方向及存在的问题。

## 1 硬质粘土层的一般特征

### 1.1 宏观形态

从颜色上看, 硬质粘土层在层序地层中辨识度较高, 与上、下覆地层色差明显, 界线清晰。根据硬质粘土层在剖面地层中层数的差异, 大致可分为2类: 一类是单层存在的硬质粘土层, 颜色为黄褐色, 未受到海侵影响, 金属离子未发生还原; 另一类是2层及2层以上存在的硬质粘土层, 如长江三角洲东部平原地区及东海陆架广大地区, 硬质粘土层在剖面地层中多层存在。一般情况下, 分上、下2层, 上层为暗绿色硬质粘土层, 下层为黄褐色硬质粘土层, 产生这种色差的原因是海侵带来了可溶性有机质引起粘土矿物中金属离子发生还原, 土壤颜色产生变化。从厚度上看, 不同地区硬质粘土层厚度不等。

收稿日期: 2017-09-13; 修订日期: 2017-10-13; 编辑: 陶卫卫

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472159, 41172160)

作者简介: 孔凡彪(1992—), 男, 山东济南人, 从事风尘堆积与区域环境演变; E-mail: kongfanbiao92@163.com

长江三角洲硬质粘土层厚度约2~10 m,北黄海中部硬质粘土层达11 m,其他地区也存在薄层硬质粘土。由于区域地质地貌、气候环境等差异,导致硬质粘土层形成环境的不同,因此不同地区形成不同厚度的硬质粘土层。

## 1.2 微观结构

硬质粘土层结构组成以粉砂为主,粘土次之,且呈现由下而上越来越细的特征,矿物成分以石英、长石、云母等轻矿物为主,重矿物含量不足5%,化学成分以 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为主,三者之和占总量的85%以上,而且硬质粘土层中,孢粉、藻类等生物化石丰富,尤其是淡水藻类含量较高。

## 2 成因说

硬质粘土层以其经济应用中的重要价值和理论研究中的独特意义一直备受关注,在长期的研究中,关于硬质粘土层的成因有“水成”和“风成”2种观点。两种观点的支持者争论的焦点无疑是关乎硬质粘土层堆积营力的问题。水成观点的支持者认为硬质粘土层是河漫滩不断加积和成土作用持续进行的共同产物<sup>[4]</sup>,主要包括河流相成因、河湖相成因和湖沼相成因<sup>[5]</sup>。覃军干等<sup>[6]</sup>利用孢粉和藻类化石为依据,认为长江三角洲第一硬质粘土层是流水作用的产物。陈庆强等<sup>[7]</sup>通过硬质粘土层的特征形态认为长江三角洲第一硬质粘土层是河漫滩沉积,是长江的附属产物;邓兵等<sup>[8]</sup>认为末次冰期存在长江古河谷,硬粘土层是河漫滩不断加积和成土作用持续进行的共同产物,实质为古土壤。

风成观点的支持者认为硬质粘土层是风成黄土母质被埋藏后经长期成土作用和次生变化演变而成<sup>[9]</sup>。郑祥民<sup>[10]</sup>利用东海海底硬质粘土层与下蜀黄土层沉积特征进行比照,认为是干冷气候条件下风尘沉积物次生演变而成。赵松龄<sup>[11]</sup>通过研究海底浅地层剖面,提出中国陆架海区在冰期时曾被沙丘覆盖而成为沙漠,认为长江三角洲的晚更新世硬粘土是风成堆积的产物。陈庆强等<sup>[12]</sup>认为长江三角洲晚更新世硬粘土为古土壤,形成于25~12 ka BP。有关硬质粘土层成因机制还没有明确的结论,尚待足够的依据和深入的研究分析,需要从宏观和微观2个方面解释说明硬质粘土层是何种营力作

用下的沉积物才能对硬质粘土层的成因机制做出明确的结论。伴随着现代科学技术的进步和研究方法的日渐成熟,采用高分辨率分析方法来解释沉积物特征和沉积成因已成为现实,粒度分析、扫描电镜、地球化学元素等研究方法成为研究硬质粘土层沉积特征及其成因机制的重要手段。

## 3 研究现状

### 3.1 颗粒组成特征

粒度分析是通过研究沉积物中各种粗粒颗粒的机械组成,即各粒级大小所占百分比<sup>[13]</sup>探究沉积物的沉积动力和环境条件,揭示其物源、气候变化及成因等问题<sup>[14]</sup>。通过粒度组成特征分析硬质粘土层的沉积特征来探究其成因机制是有效的研究方法之一。大量有关硬质粘土层的粒度组成分析实验表明,硬质粘土层颗粒组成主要以粉砂粒级(4~63  $\mu\text{m}$ )为主,一般平均含量占65%~70%,其次为粘土粒级(<4  $\mu\text{m}$ ),约占30%,砂粒粒级(>63  $\mu\text{m}$ )含量最少,仅不足3%(图1)。由此可见,硬质粘土的粒度组构以粉砂为主,粘粒次之,砂粒最少。Ye等<sup>[15]</sup>对上海硬质粘土层的粒度测试表明,<5  $\mu\text{m}$ 和5~75  $\mu\text{m}$ 的颗粒为主要成分,占50%以上;郑祥民等<sup>[16]</sup>通过粒度分析方法研究了苏北平原硬质粘土层的粒度组分,与下蜀黄土粒度组分进行对比,初步认为硬质粘土层在颗粒组成上与风尘黄土相一致,系风尘堆积物的次生产物;陈晓辉等<sup>[17]</sup>利用硬质粘土层的粒度分布特征,分析了北黄海中部硬质粘土的粒度组构,通过分析粒度特征指标的波动程度划分了5个不同的气候环境时期来探究其沉积环境,认为硬质粘土层自下而上,水动力条件为弱—强—弱的变化趋势,水深则是深—浅—深的变化特征;刘锐等<sup>[18]</sup>对杭州湾河姆渡第一硬质粘土层进行了系统的粒度分析,并与典型黄土、古土壤、下蜀黄土及河湖相、河流相沉积物粒度进行了比照,认为其为河湖相沉积,并非风尘沉积物。在前人的大量研究中还发现,硬质粘土层的粒度分析数据存在自西向东有规律变细的趋势<sup>[3]</sup>,这与风成黄土的粒度变化趋势相吻合,为研究硬质粘土层的成因机制和堆积营力提供了重要依据。

### 3.2 地球化学成分特征

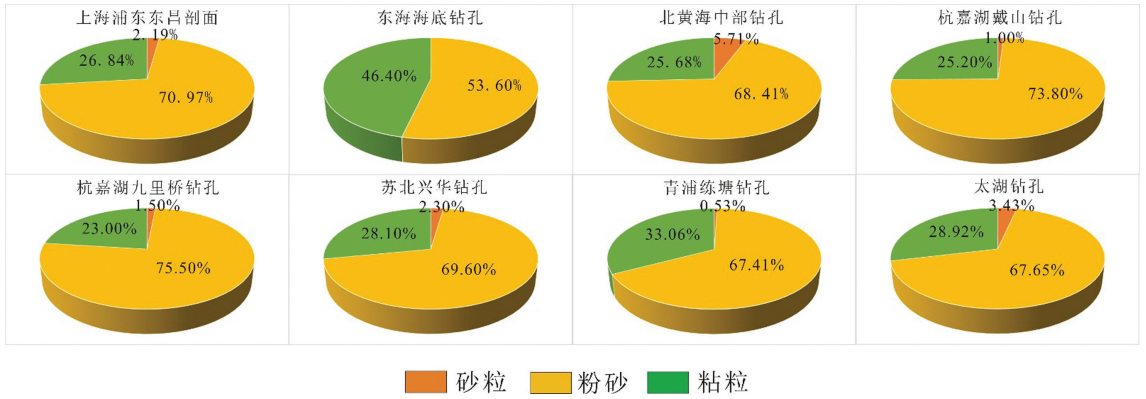


图 1 不同地区硬质粘土层剖面颗粒组成特征

3.2.1 常量元素

沉积物的地球化学成分特征不但反映了沉积物的物质组成和特点,也反映了其堆积期间的环境特征和沉积后次生变化过程特征<sup>[19-21]</sup>。例如黄土沉积过程中,强烈的风化作用使 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O 相对聚集;反映了沉积环境风动力强劲;湿润气候条件下, CaO 容易发生淋溶, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 集聚增强。大量有关硬质粘土层地球化学成分的试验测试数据表明,硬质粘土层常量元素主要为 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;三者之和占总量的 85% 左右<sup>[3]</sup>。郑祥民等<sup>[10]</sup>通过实验表明苏北平原硬质粘土层的常量元素 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三者含量之和占总量的 80%、东海海底硬质粘土层超过 80%;刘长龄等<sup>[22]</sup>测得陕西白水江硬质粘土层三者含量之和占总量的 84% 以上(表 1)。通过以上实验数据我们不难发现,不同地区的硬质粘土层的化学成分含量相近<sup>[3]</sup>,

是硬质粘土层典型的特征之一。除此之外,还可以发现同一地区不同深度的硬质粘土每种常量元素的变化范围也在一个很小的区间内,郑祥民等<sup>[23]</sup>对青浦练塘和上海浦东东昌硬质粘土层的地球化学元素测试数据得出,青浦练塘硬质粘土层不同深度的常量元素 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量范围分别为 62.45%~67.84%, 13.79%~19.96%, 3.78%~6.40%;上海浦东东昌 3 种常量元素的变化范围为 66.58%~71.20%, 12.94%~14.76%, 3.83%~5.59%。刘长龄等<sup>[24]</sup>对陕西白水江硬质粘土层常量元素的实验数据表明,这 3 种常量元素的含量范围分别为 43.78%~45.05%, 38.88%~39.06%, 0.35%~0.67%。通过以上前人研究可以看出,不同地区硬质粘土层的化学成分存在一致性,也存在差异性,解释这种一致性和差异性的存在,对认识硬质粘土层的形成演变过程、气候环境条件具有重要的意义。

表 1 不同地区硬质粘土层剖面常量元素含量

地区	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NaOH	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
青浦练塘	65.25	15.01	5.01	0.67	1.38	0.83	1.40	2.20	7.19	0.90	0.19	0.10
浦东东昌	67.89	14.08	4.71	0.63	1.24	0.85	1.45	2.03	6.03	0.88	0.19	0.08
东海海底		86.31						13.69				
白水江	40.79	35.76	7.52					15.93				

3.2.2 微量元素

沉积物中的地球化学微量元素,其迁移和转化往往受到沉积物搬运和沉积环境变迁的影响,故能较为灵敏地反映古环境演变特征<sup>[25-26]</sup>。郑祥民等<sup>[10,16,23]</sup>对青浦练塘、上海东昌、东海海底硬质粘土层的微量元素测试认为,长江三角洲不同地区硬质

粘土层微量元素含量相似(表 2),反映了长江三角洲硬质粘土层形成时期相似的沉积环境;韦桃源等<sup>[27]</sup>通过测量上海浦东硬质粘土层的微量元素 B 和 Sr 及其比值,认为该区硬质粘土层的形成与中更新世以来的 4 次海侵事件密切相关;陈中原等<sup>[28]</sup>对长江三角洲硬质粘土层微量元素的测试结果显示,

微量元素 B 和 Sr 及其比值反映了硬质粘土层形成时期陆相沉积环境显著。除长江三角洲之外的其他地区,微量元素含量及其比值同样反映着气候环境的演变历史。如 Ye 等<sup>[29]</sup>对柴达木盆地红柳沟湖泊

断裂带粘土层进行了地球化学元素、矿物学研究,微量元素 B、B/Ga 指示较高盐度的沉积环境发生在约 40~39.2 Ma,表明该时期为一个干旱的环境,推测可能与全球降温有关。

表 2 不同地区硬质粘土层微量元素含量

地区	Sr	Ba	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ni	V	Be	Zr
青浦练塘	113.29	527.56	27.69	26.10	99.16	96.92	16.80	22.72	113.44	6.42	24.80
浦东东昌	111.96	508.75	23.94	24.11	76.35	98.20	15.28	37.33	102.38	6.56	290.63
东海海底	120.80	419.00	26.60	26.10	52.60	86.70	14.90	34.30	93.10	6.30	317.00

沉积物中地球化学成分对沉积环境变化响应灵敏,通过对常量元素、微量元素的定性与定量分析,可以探究硬质粘土层形成时期的环境信息,是研究硬质粘土层沉积环境、沉积事件及其成因的重要手段。

### 3.3 矿物组成特征

气候环境条件是粘土矿物产生差异的易感因子,粘土矿物组合、含量的不同代表不同的气候条件<sup>[30]</sup>,因此研究沉积物中粘土矿物的成分、含量、组合特征以及空间分布规律,对研究其物质来源、成因、堆积区气候环境条件具有重要的意义<sup>[31]</sup>。郑祥民等<sup>[3]</sup>研究了长江三角洲及海域不同地区硬质粘土层的粘土矿物组合,发现其矿物组合均为伊利石—高岭土—绿泥石,以伊利石为主要组成矿物,反映了其物质来源的相似性和相同的次生变化过程,通过对比青浦练塘和上海浦东东昌硬质粘土层的矿物组合,发现同一地区硬质粘土层的不同层位粘土矿物组合类似,其成分含量变化不大;刘长龄等<sup>[24]</sup>通过研究发现陕西白水江硬质粘土层矿物组成以高岭石为主,其次为少量的水云母与水变高岭土;Ye 等<sup>[15]</sup>研究了上海 2~6 层硬质粘土的矿物组合发现,粘土矿物主要以伊利石为主,含量超过 50%,与亚洲其他地区粘土的常见矿物不同,是一种低可塑性粘土。

### 3.4 生物化石组合特征

生物化石如孢粉、藻类、有孔虫等是气候环境演变过程中保存的直接生物学证据,它对建立区域湿度的时空变化特征,认识季风变迁的过程、规律以及未来发展趋势等具有重要的意义<sup>[32]</sup>。覃军干等<sup>[33]</sup>通过孢粉组合、藻类种属分析了长江三角洲第一硬质粘土层,结果表明:孢粉组合主要为禾本科—莎草—落叶栎—松,反映了该区为平原区且属温凉偏

湿的温带气候,藻类以淡水藻类为主,含少量海生藻类,说明硬质粘土层的形成既受到流水作用的影响,也存在海水侵蚀的影响;陈晓辉等<sup>[34]</sup>分析了北黄海中部分硬质粘土层孢粉和藻类化石的组合特征,孢粉以草本植物为主,藻类以淡水海藻为主,两者呈此消彼长之势,表明了硬质粘土层形成时冷湿的沉积环境。

## 4 研究方向

### 4.1 硬质粘土层年代学研究

沉积物定年不仅可以确定地质地貌演变、气候环境演变以及气候事件的时间,也是地层层序划分的重要依据<sup>[35]</sup>。技术和方法愈加成熟,测年手段也愈加丰富。有关测年方法包括热释光、光释光、<sup>14</sup>C 测年等方法。目前,光释光测年技术成为第四纪研究中最普遍也是最被认可的技术之一<sup>[36]</sup>。但是有关沉积物中硬质粘土层的年代学研究,硬质粘土中富含丰富的有机物质,碳含量高,提供了<sup>14</sup>C 测年的物质基础<sup>[37]</sup>,因此在前人的研究中,多以<sup>14</sup>C 测年为主(图 2)。然而由于<sup>14</sup>C 测年范围的有限性,针对于形成年代较早的硬质粘土层,光释光测年是相对可靠的方法。长江三角洲东部平原地区硬质粘土层一直被认为全新统的基底,而被作为划分全新统与更新统的重要标志层<sup>[3]</sup>。郑祥民<sup>[3]</sup>对长江三角洲硬质粘土层上下覆地层进行了<sup>14</sup>C 测年,测试结果表明其沉积年代约 25 000~15 000 aB.P.;大量有关长江三角洲第一硬质粘土层的<sup>14</sup>C 测年资料显示,其形成时间介于 25 000~12 000 aB.P.。梁丽<sup>[38]</sup>对苏州澄湖湖底硬质粘土层进行了<sup>14</sup>C 测年,0~6 m 段硬质粘土层形成年代为 29 000~11 000 aB.P.;宋红瑛等<sup>[39]</sup>通过对青岛近岸泥质区打钻岩心 1.16 m,

3.61 m, 3.84 m 处进行了<sup>14</sup>C 测年, 测试结果分别为 910±30 a.B.P、2460±31 a.B.P 和 2760±32 a.B.P; 陈晓辉<sup>[34]</sup>对北黄海中部晚更新世末硬质粘土层 0~20 m 段上下地层进行了<sup>14</sup>C 测年, 结果显示其形成年代介于 12 602~10 357 a.B.P; 20 m 以下的硬质粘土层进行了光释光测年并划分了地层层序。胥勤勉等<sup>[40]</sup>对渤海湾西南岸古黄河三角洲全新世地层层序、年代、粒度等进行研究, 认为末次盛冰期, 该区域广泛发育硬粘土, 于 14 600 a.B.P 结束。

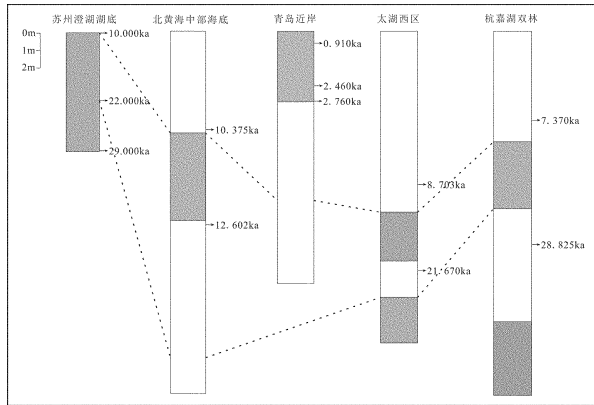


图2 不同地区硬质粘土层<sup>14</sup>C 测年结果

#### 4.2 硬质粘土层物质来源研究

三角洲地区是海陆交互作用最为强烈和敏感的地区之一<sup>[41]</sup>, 是研究从源到汇过程以及物源示踪的热门区域<sup>[42]</sup>。目前, 粒度参数成为判断沉积物来源、搬运动力的重要手段。刘金庆<sup>[43]</sup>等人利用粒度分析探讨了威海南部近岸泥质区不同的水动力条件和沉积环境; 赵梅<sup>[44]</sup>通过分析黄海中部海岸第一硬质粘土层的分维特征发现, 其沉积环境是一种相对稳定的低等环境。近年来, 碎屑锆石 U-Pb 定年技术达到前所未有的精度、空间分辨率和灵活性, 应用范围日益广泛, 极大地推动了沉积物物质来源分析的发展<sup>[45]</sup>。虽然该方法在探究沉积物的来源问题上具有很大的优势, 但是是否适用于硬质粘土层物质来源分析尚不明确, 需要大量的探究实验、对比实验予以验证。物质来源分析是硬质粘土层研究的一个重要问题, 也是一项挑战性的工作, 利用新方法和旧方法相结合, 进行定性与定量的综合分析, 探究沉积物的来源。

#### 4.3 硬质粘土层沉积环境研究

硬质粘土层通常是多次沉积和成土作用叠加的结果<sup>[46]</sup>, 其蕴藏的古气候环境信息更加丰富, 尤其

是海平面波动、气候事件等信息。邓兵等<sup>[8]</sup>对长江三角洲地区第一硬质粘土层的土壤特征进行了系统的分析, 认为其形成时为冷干的温带气候且干湿季节交替明显; 郑祥民<sup>[3]</sup>通过对下蜀黄土与硬质粘土层的沉积特征进行对比, 结合年代数据, 总结了晚更新世晚期以来气候由冷干向暖湿转变, 而且在此期间发生多次海侵事件; 覃军干等<sup>[33]</sup>通过分析长江三角洲第一硬质粘土层中孢粉、藻类的种类和组合特征认为其形成时期为温凉略湿的气候; Zhao 等<sup>[47]</sup>通过研究中国西部红粘土矿床的矿物成分认为, 亚铁磁性和不完全的反铁磁性矿物组合表明中新世时期全球范围内为温湿的气候条件; Zhang 等<sup>[48]</sup>研究了西宁红色粘土矿床的粘土矿物组合, 沉积物粘土矿物组合为伊利石-蒙脱石-白云石, 表明全新世一中新世过渡期西宁盆地的气候条件主要是热和干。沉积物中硬质粘土层的形成和保存指示了一次或一种特殊的气候状况, 研究其蕴藏的气候环境信息对研究第四纪风尘堆积的沉积环境具有重要的指示意义, 丰富了风尘堆积的环境背景。

### 5 硬质粘土层的研究展望

硬质粘土层对地质工程中的应用<sup>[49-50]</sup>和古地理、古环境的理论研究<sup>[51-52]</sup>具有重要的价值。历年来, 有关硬质粘土层的研究多集中在长江流域, 覃军干、郑祥民、陈晓辉等人对长江三角洲及东海海域广大地区硬质粘土层进行了系统、深入的研究, 对长江流域地质地貌的演化、古环境演变等研究具有重要的意义。然而, 对于硬质粘土层的成因机制、形成环境等方面尚未取得一致的认识, 因此, 在高分辨率技术方法的支持下进行更加系统、深入的研究是解决硬质粘土层种种问题的必要途径。

前人对硬质粘土层的成因、物源等问题做了大量的研究工作, 但由于缺乏具象性的指示性沉积特征而一直存在争议。解决硬质粘土层的成因问题是深入认识硬质粘土层的首要问题, 也是探究其物源、沉积动力、沉积环境问题的重要前提, 所以需要更加系统、专门化的研究。

(1) 研究方法上, 在现代先进科学技术的支持下, 进行多学科的综合研究是解决硬质粘土层成因问题的重要方法。在年代学研究的基础上, 进行地层划分, 对硬质粘土层的层位进行严格区分, 然后开

展沉积学、地球化学、生物学等多学科的综合分析,探究硬质粘土层的沉积年代、沉积动力、物质来源等问题。

(2)研究内容上,研究硬质粘土层的成因机制必须进行多个剖面的分析和对比,单个剖面硬质粘土层的研究不具有代表性,不能根本性地解决硬质粘土层的成因问题。在对周围地质地貌进行深入调查的基础上,利用宏观和微观多种方法对大范围的硬质粘土层的沉积特征进行综合分析,并与多个地区的硬质粘土层进行对比,探究其物质来源、气候环境信息等,详解硬质粘土层的成因问题。

通过查阅资料与野外踏勘发现,除长江流域以外,黄河三角洲平原地区及其海域也普遍有硬质粘土层的存在(图 3)。广饶地区黄土沉积之上普遍发育 1~2 m 的灰黑色泥质层,并向西延伸到博兴等地<sup>[53]</sup>。对黄河流域硬质粘土层进行系统、深入的研究,一方面对认识黄河流域地质地貌演化、气候环境演变,甚至黄河古河道的变迁具有重要意义;另一方面,黄河流域硬质粘土层的发现,不仅为研究长江流域硬质粘土层提供了比照对象,也对研究两河流域的古地理、古气候及古河道变迁具有重要的指示意义。

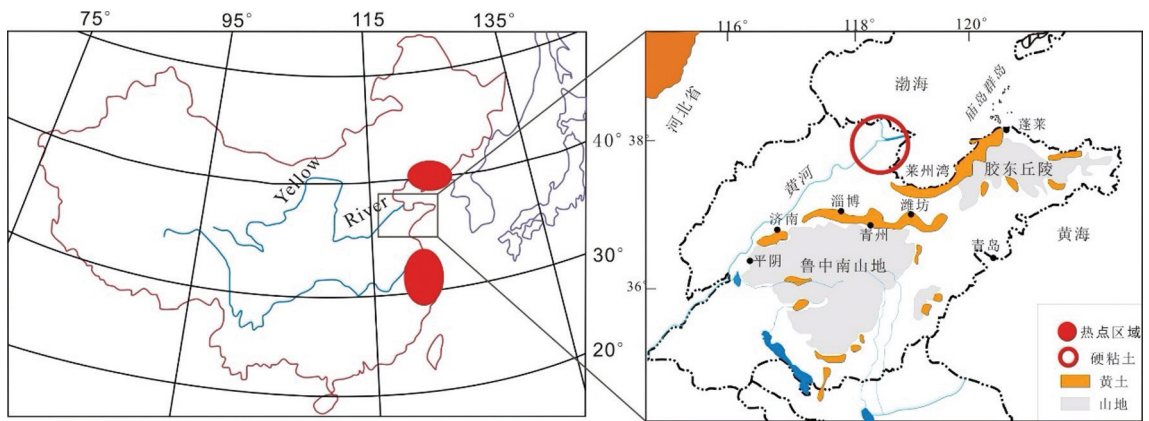


图 3 沉积物中硬质粘土层研究的热点区域及山东地区硬质粘土的分布地区

## 参考文献:

- [1] Zhang Z, Zheng G, Takahashi Y, et al. Extreme enrichment of rare earth elements in hard clay rocks and its potential as a resource[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72:191-212.
- [2] 吴惠根. 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*, 1989, 10(2):7-17.
- [3] 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, 1999:1-174.
- [4] 赵敏, 戴雪荣, 师育新, 等. 长江三角洲地区的硬粘土及其成因[J]. *国土与自然资源研究*, 2008(1):34-35.
- [5] 付苗苗, 戴雪荣, 师育新, 等. 苏州澄湖湖底硬粘土粒度特征及成因初探[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5):828-832.
- [6] 覃军干, 吴国瑄, 郑洪波, 等. 从孢粉、藻类化石组合看长江三角洲第一硬质粘土层的成因及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(5):546-554.
- [7] 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.
- [8] 邓兵, 吴国瑄, 李从先. 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*, 1999, 19(3):29-37.
- [9] 师育新, 戴雪荣, 梁丽, 等. 基于粘土矿物 XRD 分析的暗绿色硬粘土成因探讨[A]//中国地理学会 2012 年学术年会[C]. 2012:111.
- [10] 郑祥民, 彭加亮, 郑玉龙. 东海海底末次冰期埋藏风尘黄土地层初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1993(3):49-56.
- [11] 赵松龄. 晚更新世末期中国陆架沙漠化及其衍生沉积的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(3):285-293.
- [12] 陈庆强, 李从先. 长江三角洲地区晚第四纪古土壤发育的阶段性[J]. *科学通报*, 1998(23):2557-2559.
- [13] 刘冬雁, 李巍然, 彭莎莎, 等. 粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(2):79-84.
- [14] 刘海霞, 李晋昌, 苏志珠, 等. 毛乌素沙地西南缘灌丛沙丘沉积物的粒度和元素特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1):24-31.
- [15] Ye G L, Ye B. Investigation of the overconsolidation and structural behavior of Shanghai clays by element testing and constitutive modeling[J]. *Underground Space*, 2016, 1(1):62-77.
- [16] 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.
- [17] 陈晓辉, 李日辉, 蓝先洪, 等. 晚更新世末北黄海中部硬质粘

- 土层的形成及其古环境意义[J].第四纪研究,2014,34(3):570-578.
- [18] 刘锐,郑洪波.杭州湾地区末次冰盛期第一硬质粘土层粒度特征及其环境意义[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(6):27-34.
- [19] 蓝先洪,王红霞,李日辉,等.南黄海沉积物常量元素组成及物源分析[J].地质学前缘,2007,14(4):197-203.
- [20] 王中波,杨守业,李从先.南黄海中部沉积物岩石常量元素组成与古环境[J].地球化学,2004,33(5):483-490.
- [21] 叶玮, Yabuki Sadaya, Kanayama Shinji. 中国西风区黄土常量元素地球化学行为与古环境[J].干旱区地理,2003,26(1):23-29.
- [22] 刘长龄,郭奕清.白水江硬质粘土——我国已知结晶最好的高岭石[J].科学通报,1980,25(11):50.
- [23] 郑祥民.浦东新区“硬土层”的沉积物特征和成因[J].上海国土资源,1996(3):7-12.
- [24] 刘长龄,郭奕清.陕西白水江硬质粘土的岩石矿物学研究[J].矿物岩石,1980(2):3-10.
- [25] 刘铮.中国土壤微量元素[J].地球科学进展,1998,13(6):589-589.
- [26] 牛东风,李保生,王丰年,等.微量元素记录的毛乌素沙漠全新世气候波动——以萨拉乌苏流域 DGS1 层段为例[J].沉积学报,2015,33(4):735-743.
- [27] 韦桃源,陈中原,魏子新,等.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,2006,26(3):397-405.
- [28] 陈中原,许世远.尼罗河在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,1996,16(2):168-175.
- [29] Ye C, Yang Y, Fang X, et al. Late Eocene clay boron - derived paleosalinity in the Qaidam Basin and its implications for regional tectonics and climate[J].Sedimentary Geology, 2016, 346:49-59.
- [30] Schoonheydt R A. Reflections on the material science of clay minerals[J].Applied Clay Science, 2015,131:107-112.
- [31] 陈涛,王欢,张祖青,等.粘土矿物对古气候指示作用浅析[J].岩石矿物学杂志,2003,22(s1):416-420.
- [32] 王伟铭.中国孢粉学的研究进展与展望[J].古生物学报,2009,48(3):338-346.
- [33] 覃军干.长江三角洲南翼第一硬质粘土层中孢粉、藻类组合及其古环境意义[D].上海:同济大学,2003:1-49.
- [34] 陈晓辉.北黄海陆架晚第四纪地层结构与物源环境演变研究[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2014:1-152.
- [35] 张克旗,吴中海,吕同艳,等.光释光测年法——综述及进展[J].地质通报,2015(1):183-203.
- [36] 赖忠平,欧先交.光释光测年基本流程[J].地理科学进展,2013,32(5):683-693.
- [37] 李汉鼎,冷雪天.泥炭样品<sup>14</sup>C年龄可靠性初步研究[J].海洋地质与第四纪地质,1992(2):89-97.
- [38] 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.
- [39] 宋红瑛,刘金庆,马晓红,等.青岛近岸泥质区敏感粒级组分及对沉积记录的指示[J].海洋地质与第四纪地质,2016(6):51-61.
- [40] 胥勤勉,胡云壮,袁桂邦,等.渤海湾西南岸古黄河三角洲全新世地层层序和演化过程[J].第四纪研究,2015,35(2):326-339.
- [41] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J].Marine Geology,2014,352(3):268-294.
- [42] 何磊,叶思源,王红霞,等.辽河三角洲地区 ZK2 孔晚更新世晚期以来的碎屑矿物及其物源[J].海洋地质与第四纪地质,2016(6):23-32.
- [43] 刘金庆,印萍,陈小英,等.威海南部近岸泥质区晚更新世以来的沉积环境演化[J].海洋地质与第四纪地质,2016(6):199-209.
- [44] 赵梅.黄海中部海岸末次冰盛期第1硬质粘土层的粒度分维特征及其环境意义[J].海洋地质动态,2008(10):8-13.
- [45] 郭佩,刘驰洋,王建强,等.碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题[J].沉积学报,2017,35(1):46-56.
- [46] 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.
- [47] Zhao H, Sun Y, Qiang X. Iron oxide characteristics of mid-Miocene Red Clay deposits on the western Chinese Loess Plateau and their paleoclimatic implications[J].Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology,2017,468:162-172.
- [48] Zhang C, Guo Z. Clay mineral changes across the Eocene - Oligocene transition in the sedimentary sequence at Xining occurred prior to global cooling[J].Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology,2014,411(1):18-29.
- [49] 赵树松.松动爆破在开采硬质粘土矿中的实践[J].中国矿业,1992(3):39-41.
- [50] Solberg I L, Long M, Baranwal V C, et al. Geophysical and geotechnical studies of geology and sediment properties at a quick-clay landslide site at Esp, Trondheim, Norway[J].Engineering Geology, 2016,208:214-230.
- [51] 李晔.苏州地区更新世以来地层对比及古地理环境分析[D].北京:中国地质大学(北京),2015:1-63.
- [52] Vogt T. Clays and secondary minerals as permafrost indicators: examples from the circum-Baikal region[J].Quaternary International,2002,95:175-187.
- [53] 王海峰,杨剑萍,庞效林,等.鲁北平原晚第四纪地层结构及沉积演化[J].沉积学报,2016,34(1):90-101.

## Research Progress of Hard Clay Layers in Sediments

KONG Fanbiao<sup>1,2</sup>, XU Shujian<sup>1</sup>, JIA Guangju<sup>1,2</sup>

(1. Geography and Environment College of Shandong Normal University, Shandong Jinan 250014, China;  
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection of Linyi University, Shandong Linyi 276005, China)

**Abstract:** A large amount of drilling data indicate that there exists hard clay layers in the sediments of plain area and its sea area. The hard clay layers have great values in engineering geology and geography research. The hard clay layers are not only the bearing layers of high buildings, but also a good carrier for studying change events of global environment and the evolution of paleoclimate. In this paper, developing progress on general characteristics, origin, granularity, geochemical elements, geochronology and sedimentary environment of hard clays have been introduced, and the research direction of hard clay layers in the age, material source and sedimentary environment has been prospected. It is considered that the study of hard clay layers in the Yellow River delta is less. A large scale, systematic and comprehensive macroscopic and microcosmic analysis should be carried out, and Paleo—environment information and application value of hard clay layers should be explored.

**Key word:** Hard clay layer; origin mechanism; depositional environment; research method