

山东小清河流域黄土的发现及勘探意义

杨剑萍¹, 王海峰², 贾军涛¹, 徐万兴³, 徐 钰⁴, 张 欣¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100028; 3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057; 4. 中石化石油工程地球物理有限公司胜利分公司, 山东东营 257068)

摘要:通过钻孔取样、野外考察、粒度分析等方法对山东小清河流域浅层的沉积物特征进行研究。结果表明:小清河流域南部浅层沉积物以泥质粉砂和粉砂质泥为主,富含钙质结核和蜗牛化石等黄土标志物,发育明显的黄土-古土壤沉积旋回;南部粒度特征与青州黄土、北京降尘、西峰黄土等典型的风成沉积物相似,具有中国黄土的典型双峰特征,粒度分布明显粗于北京降尘和西峰黄土,而与邻近的青州黄土相似或较其稍粗,体现近物源的特性;末次冰期时裸露的渤海陆架是研究区黄土的主要物源区,中国东部季风和流域以南的山脉为黄土的形成提供搬运动力和地形条件;流域最北端发育古河道沉积,黄土与古河道间存在一个过渡带,沉积特征的差异和流域内南高北低的地势致使南部潜水面深度远大于北部,最终导致油气地震勘探中北部的地震激发效果明显优于南部。

关键词:小清河流域;黄土;粒度特征;成因探讨;勘探意义

中图分类号:TE 121.3 **文献标志码:**A

引用格式:杨剑萍,王海峰,贾军涛,等. 山东小清河流域黄土的发现及勘探意义[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(2):1-8.

YANG Jianping, WANG Haifeng, JIA Juntao, et al. Discovery and exploration significance of loess in Xiaoqinghe River drainage, Shandong Province [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 1-8.

Discovery and exploration significance of loess in Xiaoqinghe River drainage, Shandong Province

YANG Jianping¹, WANG Haifeng², JIA Juntao¹, XU Wanxing³, XU Yu⁴, ZHANG Xin¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China;

3. CNOOC (China) LTD Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China;

4. SINOPEC Geophysical Corporation, Shengli Branch, Dongying 257068, China)

Abstract: The characteristics of shallow sediments in the south of Xiaoqinghe River drainage, Shandong Province were studied by using samples from drilling holes, field study and grain size analysis. The results show that the shallow sediments in the south of Xiaoqinghe River drainage are mainly argillaceous silt and silty mud. The sediments consist of loess markers including calcareous concretions and snail fossils and develop obvious sedimentary cycle of loess-paleosol. By analyzing grain size of the samples systematically and contrasting those samples with some aeolian sediments such as Qingzhou loess, Xifeng loess and dust fallouts in Beijing, it is proved that, loess from the study area carries the typical characteristics of aeolian loess in China which possesses the typical double-peak feature in grain size frequency curves. Furthermore, it is evident that the average grain size is larger than that of dust fallouts in Beijing and Xifeng loess, but is coarser than that of Qingzhou loess or resembles, which reflects a nearer provenance. The main provenance of loess in the study area is the exposed Bohai continental shelf during the last glacial period. The monsoon in the eastern China and mountains in the south area of Xiaoqinghe River drainage provide transporting force and topographic condition for the formation of loess in the study area. Paleochannels develop in the northern-

收稿日期:2014-09-19

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05006-002);国家自然科学基金项目(41202126);山东省自然科学基金项目(ZR2012DQ014);中央高校基本科研业务费专项基金项目(12CX04013A,13CX02039A)

作者简介:杨剑萍(1965-),女,教授,博士,主要从事沉积学研究。E-mail:yangjp3028@sina.com。

most of the drainage, and there is a transitional zone between the loess and paleochannel. The depth of water table in the south of the drainage is greater than that in the north because of the difference of sedimentary characteristics and topography. The difference finally results in that the excitation effect in the north is much better than that in the south.

Keywords: Xiaoqinghe River drainage; loess; grain size; genesis; exploration significance

黄土是第四纪在干旱或半干旱的气候条件下形成的黄色土状堆积物,颗粒介于泥与细砂之间,含有动物化石和钙质结核,具有多孔性、垂直节理发育、层理不明显和透水性强等特性。与深海沉积、陆相冰川并列,黄土是气候演化的绝佳载体,具有非常重要的研究意义^[1]。中国是世界上黄土分布最广、厚度最大的国家,黄土主要分布在北纬 $30^{\circ} \sim 48^{\circ}$ 的条形地带,其中黄土高原是中国黄土分布的中心,国内外学者在此做了大量的工作^[2-5]。山东地区黄土属于中国黄土分布的东部边缘,主要分布在滨渤海区和鲁中山前区两个区带,其记载可追溯到明代万历四十八年关于济南、泰安等地的“雨土”记录^[6],国外学者对山东黄土的研究始于 1892 年 Skertchly 的“关于华北的黄土及其他地表沉积”一文^[7]。近年来,众多学者对山东地区的黄土进行了深入研究,涉及青州、张夏、平阴、庙岛群岛、莱州湾南岸等地,研究内容包括黄土粒度、物源、搬运动力、测年、矿物成分、磁化率以及环境意义等,取得了丰硕的成果^[6,8-11]。对于山东小清河流域的黄土迄今未见相关报道,笔者从岩性特征、沉积旋回、粒度特征等方面阐明研究区南部浅层沉积物为风成黄土,并结合前人的研究成果,从物源、搬运动力、地形等方面对其成因进行探讨。近年来的地震勘探实践表明,在基底岩性、构造条件等相同的情况下,地震激发效果明显受浅部激发层的沉积特征影响。在济阳拗陷东营凹陷南斜坡的油气勘探中,小清河流域北部的地震激发效果明显优于南部地区,需要从沉积学的角度解释这种差异。

1 概 况

小清河流域为西起济南,东至渤海湾,南缘鲁中山地,北界黄河间的区域,流域面积约 $11\,000\text{ km}^2$ 。在行政区划上属于山东省济南、淄博、滨州、东营、潍坊等地,流域内地势南高北低,南部是鲁中山地北侧山前的倾斜平原,北部与鲁北平原相接。干流以南流域面积较大,支流众多,包括绣江河、杏花河、孝妇河、淄河等,呈典型的单侧梳齿状水系分布。小清河流域的构造位置主要位于济阳拗陷东营凹陷南斜坡,油气储量丰富,是胜利油田的主要产油区之一。

在小清河流域的高青县、邹平县等地布置浅层钻孔 15 个,深度为 $36 \sim 50\text{ m}$,另外在广饶县观察野

外剖面两个(图 1),并从钻孔和剖面中采集大量沉积物样品用于粒度分析。

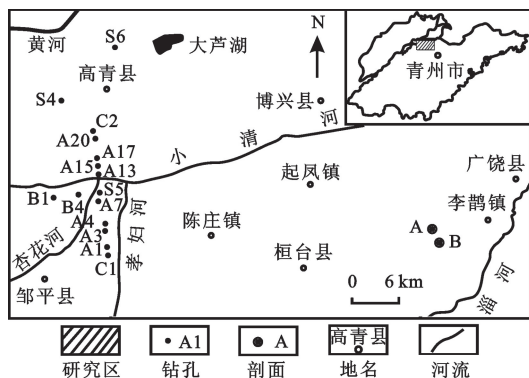


图 1 小清河流域黄土研究位置

Fig. 1 Research location of loess in Xiaoqinghe River drainage

2 沉积物岩石学特征

小清河流域浅层沉积物岩性复杂,泥、粉砂质泥、泥质粉砂、粉砂和细砂等均有发育。小清河以南和以北地区沉积物岩性差异明显,自南向北粒度依次变粗,呈递变性。此外沉积物中多含有钙质结核、腹足类化石等。

2.1 小清河以南地区沉积物岩石学特征

小清河以南布置钻孔 8 个,包括孔深 50 m 的 C1 以及孔深均为 36 m 的 A1、A3、A4、A7、B1、B4、S5。钻孔所得沉积物主要为黄色、褐色的泥质粉砂、粉砂质泥和泥,其中又以泥质粉砂和粉砂质泥占优,均未固结,未见层理构造。

野外剖面位于小清河以南,其中剖面 A 垂深约 12 m ,剖面 B 垂深约 7 m 。剖面中可见明显的沉积旋回,表现为深褐色的粉砂质泥和黄色的泥质粉砂交替出现(图 2),褐色泥质层可见明显的古土壤结构,含丰富的钙质结核,而黄色泥质粉砂层质地均一,无成层性,渗水性极强。该旋回是黄土特有的黄土-古土壤沉积旋回,在黄土高原的洛川和山东青州等地的黄土剖面中都有发育。研究表明,黄土-古土壤的沉积旋回记录了黄土沉积时冰期-间冰期的气候交替,同时该序列的粒度变化与冬季风强度变化正相关,即冰期气候寒冷干燥,植被稀疏,冬季风强盛,中国东部陆架裸露后形成的荒漠和北方沙漠向南扩

张,沙尘事件频发,粉尘沉积后形成黄土层;间冰期气候相对温暖湿润,植被发育,偏东南方向的夏季风转强,利于形成泥质古土壤层^[12-13]。此外剖面中该旋回

之上发育一套灰黑色泥层,厚度约为 2~3 m,分布较稳定,富含腹足类化石,为湖沼相沉积,是由全新世小清河流域湖泊的区域性进退形成^[14]。

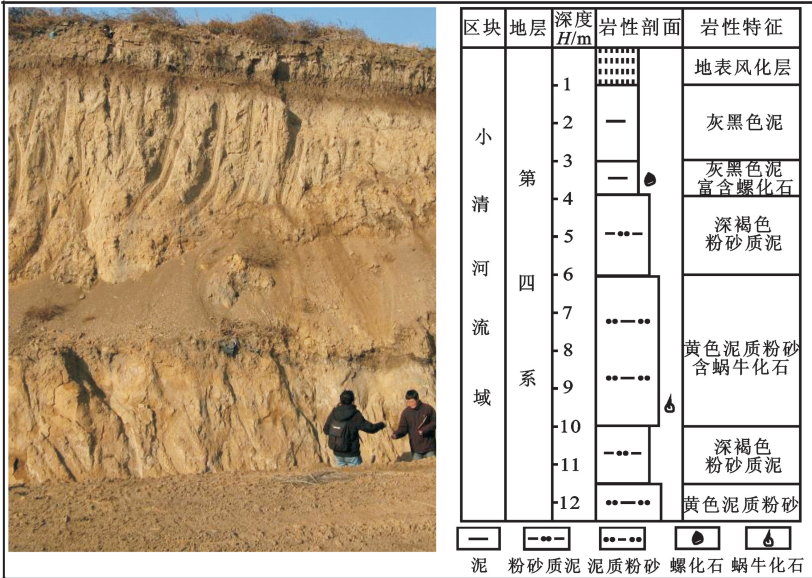


图 2 小清河流域广饶县 A 剖面及岩性示意图

Fig. 2 Profile A and its lithology schematic in Guangrao County, Xiaoqinghe River drainage

钻孔和野外剖面中发育大量钙质结核(图 3(a)、(b)、(c)),尤以小清河以南的泥质粉砂和粉

砂质泥中最为发育。钙质结核呈浅黄色,平均直径 1~2 cm,最大超过 6 cm,部分结核在显微镜下可见

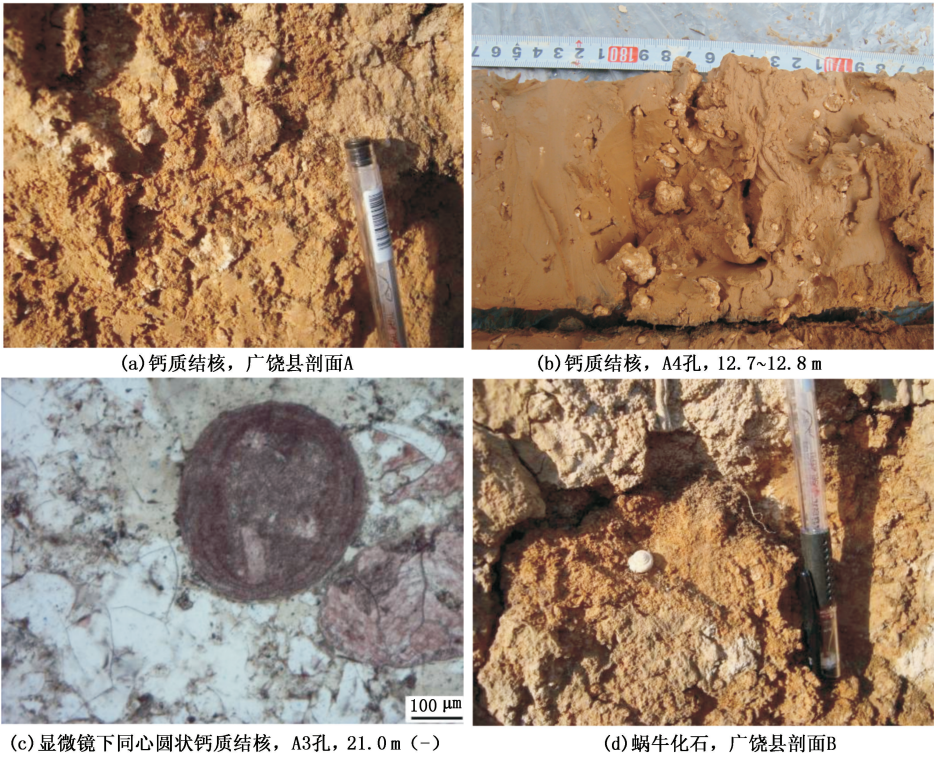


图 3 小清河流域浅层沉积物中的钙质结核和蜗牛化石

Fig. 3 Calcareous concretions and snail fossil in Xiaoqinghe River drainage

明显的同心圆结构(图 3(c))。钙质结核是黄土中典型的沉积物之一,在干旱或半干旱的环境下由黄

土中的钙质经地下水或地表水淋滤、富集而成^[15]。此外钻孔和剖面中还常见蜗牛化石(图 3(d)),蜗

牛化石是黄土中最常见的化石,也是黄土沉积时古气候记录的重要载体^[16]。

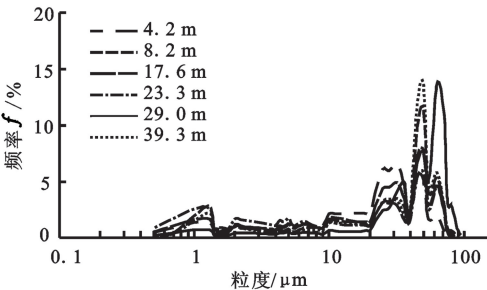
2.2 小清河以北地区沉积物岩石学特征

小清河以北布置 7 个钻孔,包括孔深 50 m 的 C2 孔和孔深 36 m 的 A13、A15、A17、A20、S4 和 S6 孔。钻孔所得沉积物较复杂,其中 A13、A15、A17、A20 和 C2 孔沉积物与小清河以南沉积物相似,总体粒度稍粗,部分钻孔有粉砂出现,含有钙质结核,数量较南部少;而最北部的 S4 和 S6 孔沉积物粒度最粗,发育大量粉砂和细砂,不含钙质结核,旋回性明显,自下而上发育 3 个下粗上细的二元结构,具有典型的河流相特征,即遍布于整个鲁北平原乃至华北平原的古河道沉积^[17]。

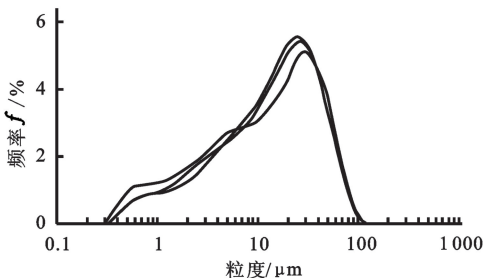
根据钻孔以及剖面中沉积物的岩石学特征,初步判断小清河以南地区浅层沉积物为黄土,流域的最北部为古河道沉积,在小清河以北存在一个黄土与古河道的过渡区。

3 沉积物粒度特征

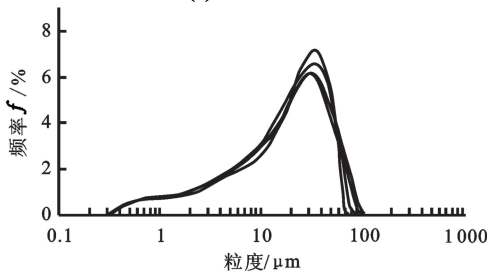
不同沉积环境形成的沉积物具有不同的粒度特征,粒度分析是判断沉积类型、恢复沉积环境的最重要方法之一,在浅层沉积物研究中应用尤为广泛^[18]。



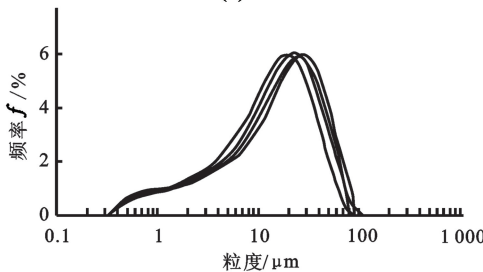
(a)小清河流域C1孔



(b)青州黄土



(c)北京降尘



(d)西峰黄土

图 4 粒度频率分布曲线

Fig.4 Grain size frequency curves

3.2 粒度频率累积曲线特征

同样以 C1 孔的样品为例,将研究区南部沉积物的粒度频率累积曲线与青州黄土、北京降尘和西峰黄土的曲线进行对比(图 5,青州黄土、北京降尘、

为了进一步验证小清河流域南部浅层沉积物为黄土,进而探讨其形成的沉积环境、搬运机制及物质来源,对研究区大量钻孔和剖面中的样品进行系统的粒度分析,并将其与青州黄土、北京降尘和西峰黄土等公认的风成沉积物的粒度特征进行对比讨论^[11]。

3.1 粒度频率分布

以 C1 孔的样品为例,研究区南部沉积物粒度频率曲线呈双峰形态(图 4(a)),粒度分布在 0 ~ 100 μm,主峰分布在 30 ~ 50 μm,并以此为众数中心向粗粒和细粒方向减小,呈典型的负偏态非对称分布,次峰约为 1 μm,大于 100 μm 的颗粒极少。研究区南部样品的粒度频率曲线形态与青州黄土、北京降尘、西峰黄土的曲线形态相似(图 4,青州黄土、北京降尘、西峰黄土的数据据文献[11]),具有中国黄土粒度的典型双峰特征^[19],表明其沉积时的搬运介质和动力条件与风成黄土相同。青州黄土主峰粒度区间分布在 16 ~ 35 μm,次峰小于 1 μm,大于 100 μm 的也极少,对比分析可知,研究区南部样品主峰的粒度区间和频率分布略大于青州黄土,结合研究区位于青州以北、距离青州仅数十公里的事实,表明研究区黄土与青州黄土有相似的物源,且研究区距离物源区更近。

西峰黄土的数据据文献[11]),结果表明四者曲线形态极其相似,曲线平滑,呈两段式,拐点均在 10 μm 附近,其中研究区南部样品的拐点稍大于另外三者。粒度大于拐点的悬浮颗粒组分约为 70%,占

绝对优势;粒度小于拐点的是次要组分,约为 30%。从粒度频率累积曲线可以看出,研究区南部样品的最小粒度值约为 6 μm (图 5(a)),其余三者均约为

4 μm (图 5(b)、(c)、(d)),研究区样品值稍大,也体现了其近物源的特性。

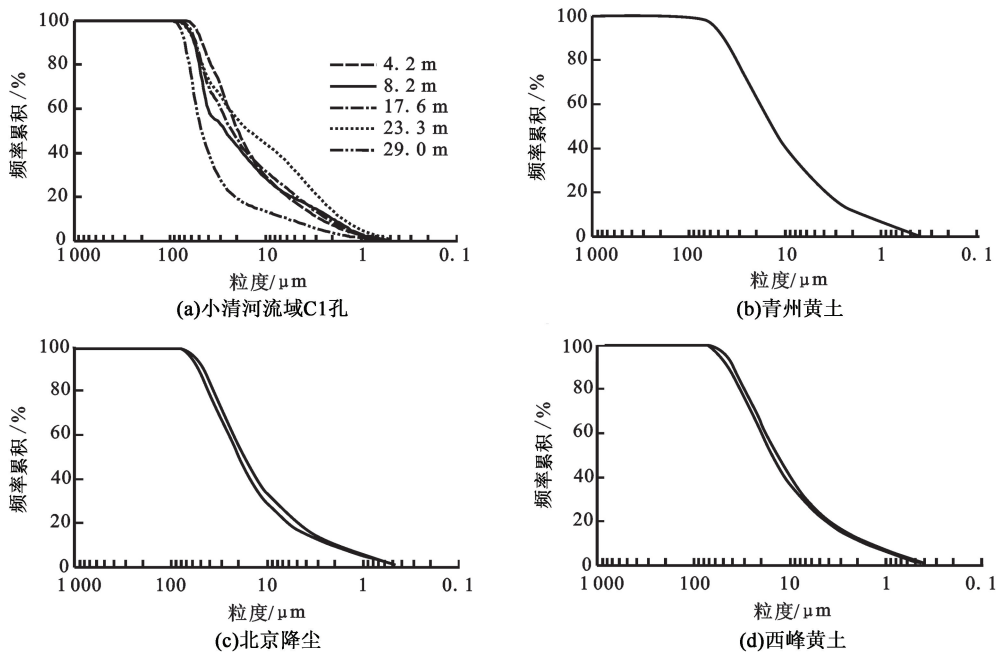


图 5 粒度频率累积曲线

Fig. 5 Grain size frequency cumulative curves

3.3 粒度参数

粒度参数主要指平均粒径、标准偏差、偏度等。研究区南部 C1 孔样品、青州黄土、北京降尘、西峰黄土的粒度参数如表 1 所示(青州黄土、北京降尘、西峰黄土的数据据文献[11])。研究区南部样品平均粒径 M_z 为 16 ~ 23 μm ,标准偏差为 1.6 ~ 1.9,偏度为 0.3 ~ 0.7,青州黄土平均粒径 M_z 为 15 ~ 21 μm ,标准偏差为 1.6 ~ 1.8,偏度为 0.7 ~ 0.9,两者粒度参数非常相似,研究区样品平均粒径稍大,而偏度较小。对比结果表明,研究区样品粒度更粗,离物源区更近,细粒沉积物的含量较青州黄土低。北京降尘和西峰黄土的平均粒径 M_z 为 10 ~ 16 μm ,标准偏差为 1.6 ~ 1.8,偏度为 0.8 ~ 1.1,平均粒径明显小于研究区样品,偏度较大,表明北京降尘和西峰黄土沉降前经过了较长的搬运距离。

以上的粒度分析对比进一步表明,研究区南部 C1 孔内沉积物为黄土,搬运介质为风。小清河以南的 A1、A3、A4、A7、B1、B4、S5 孔以及剖面 A、B 沉积物样品的粒度特征与 C1 孔相同,也是黄土;小清河以北的 A13、A15、A17、A20、C2 孔中部分样品的粒度特征与 C1 孔相似,有黄土的特征,同时也发育粉砂等河流相的粗粒沉积物,即这五个孔的位置大约为黄土沉积与古河道沉积的过渡带,南北宽约 12 km;而小清河

以北的 S4、S6 孔则完全发育河流相沉积,即古河道。小清河流域浅层自南向北由黄土向古河道的演变与流域内南高北低的地势有密切关系。

表 1 粒度参数

Table 1 Grain size parameters			
样品号	平均粒径 $M_z/\mu\text{m}$	标准偏 差 σ_1	偏度 SK_1
小清河流域 C1-1	16.21	1.62	0.35
小清河流域 C1-2	18.04	1.83	0.56
小清河流域 C1-3	17.25	1.81	0.45
小清河流域 C1-4	22.65	1.99	0.24
小清河流域 C1-5	18.31	1.32	0.63
小清河流域 C1-6	22.51	1.68	0.70
青州黄土-1	15.81	1.74	0.92
青州黄土-2	16.74	1.68	0.82
青州黄土-3	18.67	1.72	0.76
青州黄土-4	20.27	1.75	0.91
北京降尘-1	12.29	1.73	0.89
北京降尘-2	13.13	1.75	0.89
北京降尘-3	13.31	1.75	0.91
北京降尘-4	10.47	1.64	0.83
北京降尘-5	12.22	1.64	0.90
西峰黄土-1	16.00	1.75	1.07
西峰黄土-2	14.63	1.77	0.96
西峰黄土-3	13.93	1.71	1.05
西峰黄土-4	14.56	1.74	1.05
西峰黄土-5	13.93	1.75	0.96

4 小清河流域黄土成因探讨

4.1 物源分析

风成沉积物的形成须具备较充足的物源、持续稳定的风动力、适宜的地形等条件。小清河流域黄土与青州黄土地理位置相近、粒度特征相似,表明两者有相似的物源。

山东地区黄土粒度特征复杂,其中淄博、青州、张夏地区的黄土粒度较细,而莱州湾南岸、平阴的粒度较粗,胶济铁路沿线黄土居中,反映了黄土成因的多样性^[10]。根据刘东生等^[2]关于西北沙漠地区的风尘物质可以通过高空气流携带至中国东部乃至太平洋地区的论述,以及冰期时裸露的渤海陆架能够为山东地区黄土提供物质来源的事实,张祖陆^[6]总结了山东地区黄土的物源:滨渤海黄土带物源主要为末次冰期出露的渤海陆架物质,西北气流携带的内陆远源物质占次要地位;潍坊、青州等地黄土受末次冰期时冬季风影响,物源主要来自北部出露的渤海湾,向西过渡至淄博、济南等地的黄土其主要物源为西北内陆的风尘物质。

晚更新世以来,渤海沿岸地区经历了数次大规模的海侵,沉积大量的海相细粒沉积物,冰期时海退后陆架的风化为山东地区风成黄土的沉积提供了充足的物源。小清河流域位于黄河以南、青州以北,地理位置介于青州黄土和其物源区之间(图 6),以中国北方常年盛行的西北风和东北风为搬运动力,物源区为青州等地提供沉积物的同时,也为距离物源区更近的小清河流域提供物源。这一认识与小清河流域黄土的粒度略粗于青州黄土、具有近物源性的事实相符合。

4.2 气候和地形条件

小清河流域位于中国东部季风区,盛行西北风和东北风,以秋冬季节最为强盛。末次冰期时,气候寒冷干燥,海平面下降,渤海陆架裸露并发生风化遭受剥蚀,在秋冬季节强劲季风的搬运下,大量的沉积物沉积在小清河流域南部、鲁中山地北麓等地,形成风成黄土。

风成沉积物在搬运过程中,遇到山脉等的阻挡时,风速减弱,搬运能力降低,大量的沉积物就会在山前堆积。小清河流域以南的邹平县等地矗立着一系列山脉(图 6),如玉皇山、龙山、孤山、印台山、会仙山、猫头山、原山、盘顶山、方山、黑山等,海拔均大于 500 m,季风携带的渤海陆架松散沉积物以及高空气流携带的少量西北内陆细粒物质能够在山前沉

积下来,形成小清河流域南部的黄土。

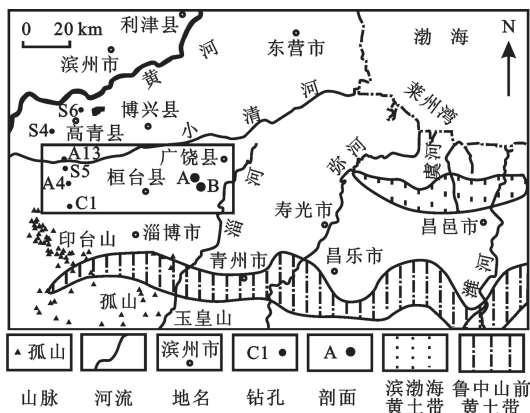


图 6 小清河流域黄土与滨渤海黄土带、鲁中山前黄土带的位置关系

Fig. 6 Positional relationship between loess in Xiaoqinghe River drainage, loess in shore of Bohai sea and loess in central district of Shandong

5 小清河流域黄土发现的勘探意义

地震勘探是油气勘探的重要手段,而激发层的选择是影响地震勘探效果最重要的因素之一。地震勘探时,在含水少、岩性疏松的激发层中炸药爆炸产生的能量散失快,得到的地震激发效果差;而在含水高的地层中能量散失慢,激发效果好。潜水面对于地震激发深度的选择和炸药量的选取具有重要意义。

风成黄土以风为搬运动力,形成于干旱或半干旱的气候条件下,颗粒含量高且分选好,质地疏松,垂直节理尤其发育,具有孔隙度高、透水性强的特点,地下水不易赋存其中;而河流相沉积物以水为搬运介质,颗粒分选差,孔隙度低,透水性差,地下水能赋存其中。同等条件下风成黄土地层中的潜水面深度远大于河流相地层。

小清河流域自南向北风成黄土的厚度逐渐变薄,南部 C1 孔等处可达 50 m,过渡区黄土厚度不足 30 m,进入最北端黄土地层尖灭,此外小清河流域地势南高北低,因此流域南部的潜水面深度远大于北部。在实际勘探生产中,鉴于成本等因素,地震激发层的深度多小于 40 m,未达到南部潜水面以下,所以在相同的激发条件下,在北部的单炮记录得到多套连续的同相轴(图 7(a)),而南部则无法获得连续的反射信息,信噪比较低(图 7(b)),即北部的激发效果明显优于南部。此外,南部黄土中的钙质结核大量发育,能够吸收地震波能量,造成地震反射波在传播时能量大幅衰减,影响地震激发效果。

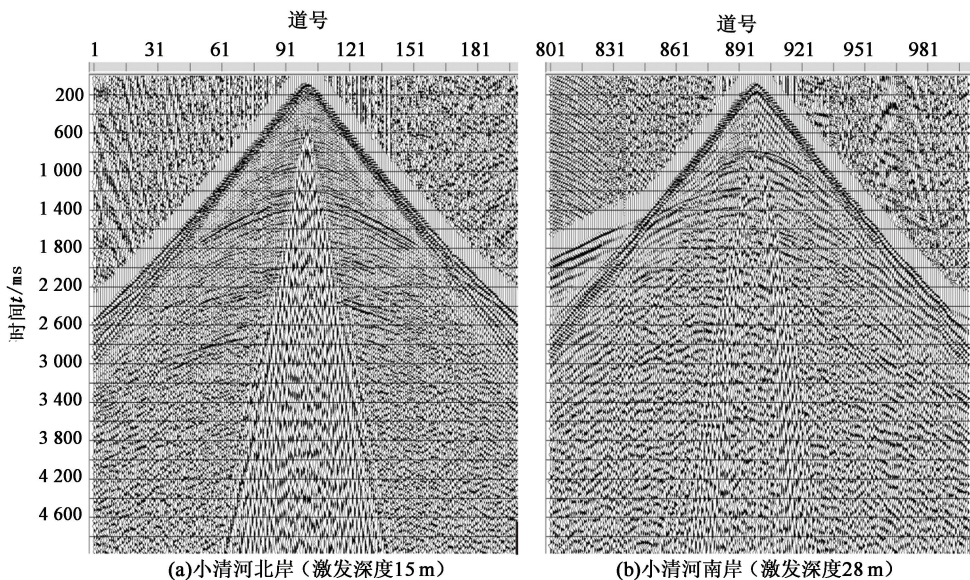


图 7 小清河两岸激发效果差异

Fig. 7 Difference of excitation effect between both sides of Xiaoqinghe River

6 结 论

(1)小清河流域南部的浅层沉积物以泥质粉砂和粉砂质泥为主,发育明显的沉积旋回和钙质结核、蜗牛化石等特殊的沉积物。通过岩性特征、沉积旋回以及粒度的对比分析,证明南部浅层沉积物为风成黄土,且与青州黄土相比具有近物源的特点。

(2)小清河流域黄土与青州黄土有相似的物源,主要来自冰期时出露的渤海湾,中国东部季风和流域南部的山脉分别为黄土的形成提供了搬运动力和地形条件。

(3)小清河流域南部发育风成黄土沉积,向北逐渐过渡为古河道沉积,由于沉积特征以及地势的差异,南部潜水面的深度远大于北部,导致北部的地震激发效果明显优于南部。

参考文献:

[1] LIU Tungsheng, AN Zhisheng, YUAN Baoyin, et al. The loess-paleosol sequence in China and climatic history [J]. *Epidodes*, 1985(18):21-28.

[2] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:190-210.

[3] 孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. *第四纪研究*,2004,24(2):175-183.

SUN Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2004,24(2):175-183.

[4] 张小曳. 有关中国黄土高原黄土物质的源区及其输送方式的再评述[J]. *第四纪研究*,2007,27(2):181-185.

ZHANG Xiaoye. Review on sources and transport of loess materials on the Chinese loess plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2007,27(2):181-185.

[5] RUTTER N W. 中国黄土和全球变化[J]. *第四纪研究*, 1992(1):2-11.

RUTTER N W. Loess in China and global change [J]. *Quaternary Sciences*, 1992(1):2-11.

[6] 张祖陆,辛良杰,聂晓红. 山东地区黄土研究综述[J]. *地理科学*,2004,24(6):746-752.

ZHANG Zulu, XIN Liangjie, NIE Xiaohong. A summary of loess researches in Shandong [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004,24(6):746-752.

[7] SKERTCHLY S B L. Concerning about loess and other deposits of North China[J]. *The Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 1895(51):11-20.

[8] 张祖陆. 渤海莱州湾南岸平原黄土旱地地貌及其古地理意义[J]. *地理学报*,1995,50(9):465-470.

ZHANG Zulu. Loess mounds on the Laizhou bay plain south of Bohai sea and their paleogeographic implication [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995,50(9):465-470.

[9] 刘乐军,李培英,王永吉. 鲁中黄土粒度特征及其成因探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2000,20(2):81-86.

LIU Lejun, LI Peiying, WANG Yongji. The grain-size properties and genesis of the loess in central Shandong Province [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2000,20(2):81-86.

[10] 张祖陆,辛良杰,姜鲁光,等. 山东济南张夏黄土堆积及成因分析[J]. *古地理学报*,2005,7(1):98-106.

ZHANG Zulu, XIN Liangjie, JIANG Luguang, et al. Sedimentary characteristics and genetic analysis of Zhan-

- g Xia loess in Jinan, Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 98-106.
- [11] 彭淑贞,高志东,吴秀平,等. 山东青州地区黄土的粒度组成及成因分析[J]. *地质力学学报*, 2007, 13(4): 315-320.
- PENG Shuzhen, GAO Zhidong, WU Xiuping, et al. Grain-size distribution and genesis of loess in the Qingzhou area, Shandong [J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13(4): 315-320.
- [12] 鹿化煜,安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. *中国科学:D辑*, 1998, 28(3): 278-283.
- LU Huayu, AN Zhisheng. The ancient climate significance of grain size of loess in loess plateau[J]. *Science in China (Ser D)*, 1998, 28(3): 278-283.
- [13] 唐克丽,贺秀斌. 黄土高原全新世黄土-古土壤演替及气候演变的再研讨[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 129-140.
- TANG Keli, HE Xiubin. Re-discussion on loess-paleosol evolution and climatic change on the loess plateau during the Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 129-140.
- [14] 张祖陆,聂晓红,卞学昌. 山东小清河流域湖泊的环境变迁[J]. *古地学报*, 2004, 6(2): 226-233.
- ZHANG Zulu, NIE Xiaohong, BIAN Xuechang. Environmental change of lakes in Xiaoqinghe river drainage, Shandong Province [J]. *Journal of Paleogeography*, 2004, 6(2): 226-233.
- [15] 滕志宏,刘荣谟,陈苓,等. 中国黄土地层中的钙质结核研究[J]. *科学通报*, 1990(13): 1008-1011.
- TENG Zhihong, LIU Rongmo, CHEN Ling, et al. A study on calcareous concretions of loess in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990(13): 1008-1011.
- [16] 吴乃琴,李丰江. 陆生蜗牛化石与中国黄土古环境研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 831-838.
- WU Naiqin, LI Fengjiang. Terrestrial mollusk fossils from Chinese loess sequence and their paleoenvironmental significance [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 831-838.
- [17] 张祖陆. 鲁北平原黄河古河道初步研究[J]. *地理学报*, 1990, 45(4): 457-466.
- ZHANG Zulu. A preliminary study of the Yellow River's paleochannels in north Shandong plain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(4): 457-466.
- [18] 王伟伟,庄丽华,阎军,等. 青岛市汇泉湾海水浴场表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2007, 31(3): 13-17.
- WANG Weiwei, ZHUANG Lihua, YAN Jun, et al. Grain-size characteristics and transport trend of surficial sediment in Huiquan Bay beach in Qingdao [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(3): 13-17.
- [19] 孙东怀,鹿化煜,DAVID R,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, DAVID R, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 327-335.

(编辑 徐会永)