第24卷第4期
2018年8月

地质力学学报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 24 No. 4
Aug. 2018

DOI: 10.12090/j.issn.1006－6616.2018.24.04.054

文章编号： 1006-6616（2018）04-0515-07

东北平原东部天恒山钻孔的粒度特征及其对地层划分的指示

詹　涛[1,2]，曾方明[3]，谢远云[4]，杨　业[1]，马永法[1]，葛俊逸[5]，易　亮[6]，迟云平[4]，康春国[7]，姜　侠[8]，张　俊[1]，娄本军[1]，周　鑫[9]，邓成龙[2]

（1. 黑龙江省第二水文地质工程地质勘察院，黑龙江 哈尔滨 150030；
2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室，北京 100029；
3. 中国科学院青海盐湖研究所，青海 西宁 810008；
4. 哈尔滨师范大学地理科学学院，黑龙江 哈尔滨 150025；
5. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所，北京 100044；
6. 同济大学海洋地质重点实验室，上海 200092；
7. 哈尔滨学院地理与旅游学院，黑龙江 哈尔滨 150086；
8. 黑龙江省地质矿产局，黑龙江 哈尔滨 150036；
9. 中国科学技术大学地球和空间科学学院，安徽 合肥 230026）

摘　要： 东北平原东部荒山剖面是我国东北地区的第四纪典型剖面，但针对该剖面的地层划分和成因的研究尚存在不同看法，对其开展详细的粒度特征研究有望对该剖面的地层划分和地层成因提供进一步的认识。通过天恒山（THS）钻孔对该区地层进行高分辨率的粒度特征研究，并与黄土高原典型黄土进行对比。研究结果显示哈尔滨组地层平均粒径、中值粒径以及粒级百分含量等大幅度波动，呈现黄土—古土壤地层旋回变化特征，黄土层粒度粗，古土壤层粒度细，与黄土高原典型第四纪黄土的粒度特征一致。荒山组地层则呈现小幅度波动，沉积动力较稳定。哈尔滨组和荒山组的粒度频率分布、C-M 图及粒度参数（平均粒径、标准偏差、偏度、峰度）等特征均存在显著差别，指示二者的沉积动力过程明显不同。基于以上粒度特征，结合沉积相特征和已有划分方法，THS 钻孔中—晚更新世地层自上而下可划分为哈尔滨组和荒山组，并将哈尔滨组地层判定为风成堆积，将荒山组地层判定为河湖相沉积。

关键词： 东北平原；荒山剖面；哈尔滨组；荒山组；粒度

中图分类号： P534.63　　**文献标识码：** A

GRAIN SIZE CHARACTERISTICS OF TIANHENGSHAN CORE AND THEIR INDICATIONS FOR STRATIGRAPHIC DIVISION IN THE EASTERN PART OF THE NORTHEAST PLAIN OF CHINA

ZHAN Tao[1,2], ZENG Fangming[3], XIE Yuanyun[4], YANG Ye[1], MA Yongfa[1], GE Junyi[5], YI Liang[6], CHI Yunping[4], KANG Chunguo[7], JIANG Xia[8], ZHANG Jun[1], LOU Benjun[1], ZHOU Xin[9], DENG Chenglong[2]

(1. *The Second Hydrogeology and Engineering Geology Prospecting Institute of Heilongjiang Province*, *Harbin* 150030, *Heilongjiang*, *China*;

基金项目： 国家自然科学基金项目（41301040，41601200）；黑龙江省国土资源科研类项目（201407）；国土部公益性科研专项（201311137）

作者简介： 詹涛（1981-），男，博士，高级工程师，主要从事第四纪地质环境方面的研究工作。E-mail：hljzhantao@163.com

收稿日期： 2017-06-26；**修回日期：** 2018-02-23　　**范二平编辑**

2. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution*, *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*;
3. *Qinghai Institute of Salt Lakes*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xining* 810008, *Qinghai*, *China*;
4. *College of Geographic Science*, *Harbin Normal University*, *Harbin* 150025, *Heilongjiang*, *China*;
5. *Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100044, *China*;
6. *State Key Laboratory of Marine Geology*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*;
7. *Geography Department*, *Harbin institute*, *Harbin* 150086, *Heilongjiang*, *China*;
8. *Heilongjiang Bureau of Geology & Mineral Resources*, *Harbin* 150036, *Heilongjiang*, *China*;
9. *School of Earth and Space Sciences*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026, *Anhui*, *China*)

Abstract: Huangshan Profile in the eastern part of the Northeast Plain is a typical Quaternary profile in Northeast China; however, there are different views on the stratigraphic division and stratigraphic origin of this section. A detailed study on its grain size characteristics is expected to provide further insight into the stratigraphic division and stratigraphic origin of the profile. In this paper, high resolution grain size characteristics of the sediments in Tianhengshan (THS) Core were studied and compared with those in typical loess profiles on the Chinese Loess Plateau. The results show that the mean grain size, median grain size and percentage fraction of grain size of Harbin Formation fluctuated widely, with coarser grains in the loess layer and finer ones in the paleosol layer, similar to those in the loess-paleosol sequence on the Chinese Loess Plateau. However, grain size characteristics in Huangshan Formation show small fluctuations, thus indicating relatively stable sedimentary dynamics. The characteristics of grain size, including frequency distribution, C-M diagram and other grain size parameters (mean grain size, standard deviation, skewness and kurtosis) in sediments between Harbin Formation and Huangshan Formation are obviously different, indicating that the sedimentary dynamics of the two groups are different. Based on the above characteristics of grain size, combining sedimentary facies and previous methods of classification, the middle- to late-Pleistocene strata of the THS Core from top to bottom is divided into Harbin Formation and Huangshan Formation, which are determined as aeolian accumulation and fluvial/lacustrine sediment, respectively.

Key words: the Northeast Plain; Huangshan section; Harbin Formation; Huangshan Formation; grain size

0 引言

东北平原东部荒山剖面是东北地区第四纪典型剖面之一。已有研究对该剖面地层的划分与成因存在不同观点。吴锡浩等[1]将剖面中—晚更新世地层划分为三套，由下至上依次为荒山组、东风组和哈尔滨组，并认为东风组和哈尔滨组均为风成堆积物。其他一些学者则将该区地层划分为荒山组和哈尔滨组，并认为东风组应属荒山组[2~3]。基于沉积物的粒度、石英颗粒表面形态等特征，早期叶启晓[3]认为哈尔滨组为风成堆积物，而荒山组为河流沉积物；初本君等[2]则认为哈尔滨组与荒山组一样，均为湖泊沉积物；后期魏传义等[4]针对哈尔滨组进行了粒度特征研究，同时与哈尔滨现代降尘、黄土高原典型的黄土—古土壤、现代河流沉积物等的粒度特征进行对比，认为哈尔滨组应为风成堆积物。关于哈尔滨组地层的形成年代早期主要是基于热释光测试和古地磁的控制。吴锡浩等[1]根据热释光测年结果，认为哈尔滨组顶部年龄为130.6±6.8 ka，哈尔滨组底部的年龄为192±0.96 ka，历时约62 ka。叶启晓[3]研究哈尔滨组顶部的热释光测年结果约为70 ka，底部约为250 ka，历时约180 ka。以上年龄结果存在一定差异。

沉积物的粒度与沉积环境密切联系，常被应用于研究沉积物的成因和沉积环境的探讨[5~7]，尤其被广泛应用于风成堆积的成因研究中[7~9]。风成堆积的粒度[10~14]也可以指示古大气环流的变化。此外，粒度指标也常被应用于湖泊沉积物的古环

境重建研究中[15~17]。例如，基于西安、洛川和西峰等地红粘土剖面的粒度特征研究，并与第四纪黄土、典型湖泊沉积物、河流沉积物进行对比，将红粘土定为风成堆积[7]。Guo 等[8]通过粒度和地球化学等指标将西部黄土高原 22 Ma 以来的红色沉积物（也称“甘肃群”）定为风成堆积，并深入探讨了亚洲内陆干旱化[8]和季风起源问题[12]。尽管黄土高原第四纪黄土的粒度大小与物源区远近有很大关系[9,18]，但更多地还是被用来反映冬季风的强弱[13,19~21]。有些学者通过粒度分解方法提取湖泊沉积物的风成组分，来推断中新世以来干旱区的古环境变化[15~17]，Xiao 等[16]通过粒度分解，反演了内蒙达里湖区全新世湖平面的变化。

准确的地层划分及成因厘定是第四纪地质学要解决的基本问题，同时也是后期利用地层记录进行古气候环境研究的基础。因此，通过对天恒山（THS）钻孔进行高分辨率粒度特征研究，依据粒度特征对地层进行详细划分，并对地层的成因进行初步探讨，以期为未来高分辨率古气候环境信息的提取奠定基础。

1　样品采集与实验

天恒山钻孔（126°47′27.77″E，45°47′26.29″N）位于荒山（HS）剖面北约 50 m，黑龙江省哈尔滨市道外区团结镇知青公园内。东倚长白山脉支脉张广才岭西麓滨东丘陵，西接东北平原腹地[3]（见图 1）。构造上处于松花江断裂和阿什河断裂的交接位置，正因此，该区由于构造运动地层抬升，出露较好的地层剖面。

鉴于该区地层剖面陡立，采样难度较大，且剖面采样地层拼接过程中较易遗漏地层，因此采用双管单动内衬塑料套管取芯技术进行钻探取芯。钻探深度 104 m，文章主要对上部约 50 m 地层进行研究，岩芯特征如下：

（1）0 ~ 0.7 m，黑色表土层，含大量植物根系。

（2）0.7 ~ 28.3 m，棕黄色粘土质粉砂与棕黑色粉砂质粘土互层，标记 S0（0.7 ~ 3.7 m）、L1（3.7 ~ 5.7 m）、S1（5.7 ~ 8.2 m）、L2（8.2 ~ 11.7 m）、S2（11.7 ~ 13.3 m）、L3（13.3 ~ 16.6 m）、S3（16.6 ~ 18.4 m）、L4（18.4 ~ 22.4 m）、S4（22.4 ~ 24.2 m）、L5（24.2 ~ 28.3 m），棕黑色层具有土壤形态特征，大部分层位呈中等发育，粒状，干时松软，有些层位具有钙质菌丝体、黑色铁锰胶膜、根孔等。

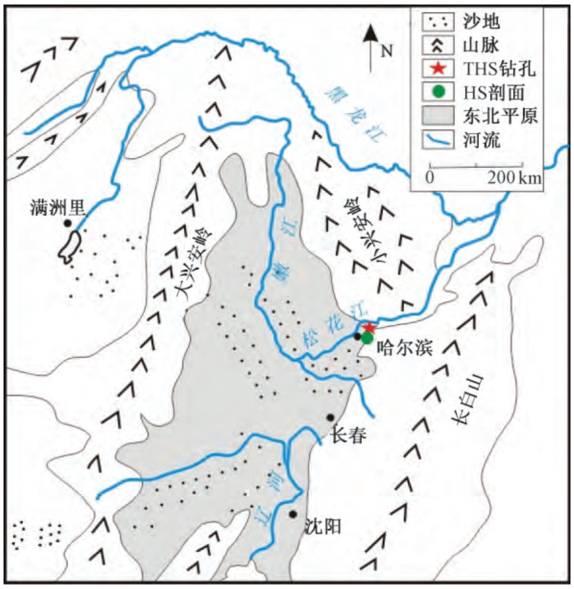


图 1　THS 钻孔和 HS 剖面的地理位置

Fig. 1　Location of the THS core and HS section

（3）28.3 ~ 49.2 m，总体呈现棕黄色粉砂质粘土，其间夹青灰色、灰绿色和棕黑色粘土层。①28.3 ~ 29.05 m：棕色粘土层，颜色偏黑，有机质含量较高，铁质斑状浸染。②29.805 ~ 31.335 m：黄棕色粉砂质粘土层，局部铁、锰斑状浸染。31.335 ~ 33.075 m：棕色粉砂质粘土，颜色偏暗，局部呈块状铁锈浸染。③33.075 ~ 38.925 m：灰绿色粉砂质粘土，局部黑色物质填充裂隙，棕褐色铁锈条带状浸染。④38.925 ~ 40.2 m：棕黄色粉砂质粘土，粉砂含量增加。⑤40.2 ~ 40.9 m：棕色粉砂质粘土，局部有棕黑色层层位，有机质含量增加。⑥40.9 ~ 42.9 m：棕色粉砂质粘土层，较上层粘粒含量增加。⑦42.9 ~ 44.725 m：棕色粉砂质粘土层，青灰色较明显。⑧44.725 ~ 47.45 m：棕黄色粉砂质粘土。⑨47.45 ~ 48.725 m：棕色粉砂质粘土，颜色偏暗。⑩48.725 ~ 50.125 m：棕黄色粉砂质粘土，铁、锰斑状浸染（见图 2）。

按照 10 cm 间距挑选样品，共获得 492 个用于粒度测试的样品。粒度测试方法：每个取自然风干样品约 0.2 g，用 10 ml 浓度为 30% 的 H_2O_2 去除有机质，再用 10 ml 浓度为 10% 的 HCl 去除碳酸盐，最后用 10 ml 浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠 $(NaPO_3)_6$ 溶液分散震荡，最后在贝克曼 LS 13 320 激光粒度仪上测试，测试误差为 ±5%。样品前处理与测试在中国科学院地质与地球物理研究所新

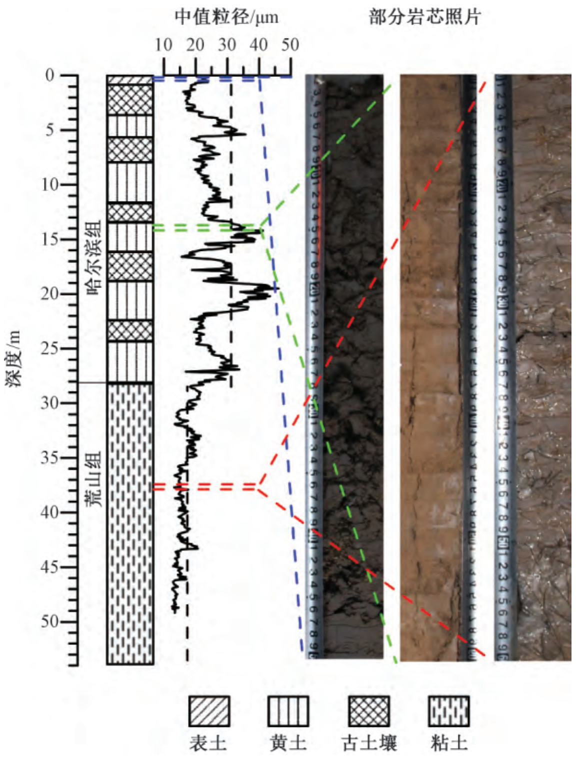


图 2 THS 钻孔的岩性柱状图、中值粒径及部分岩芯照片

Fig. 2 The lithology, median diameter and photos of THS core

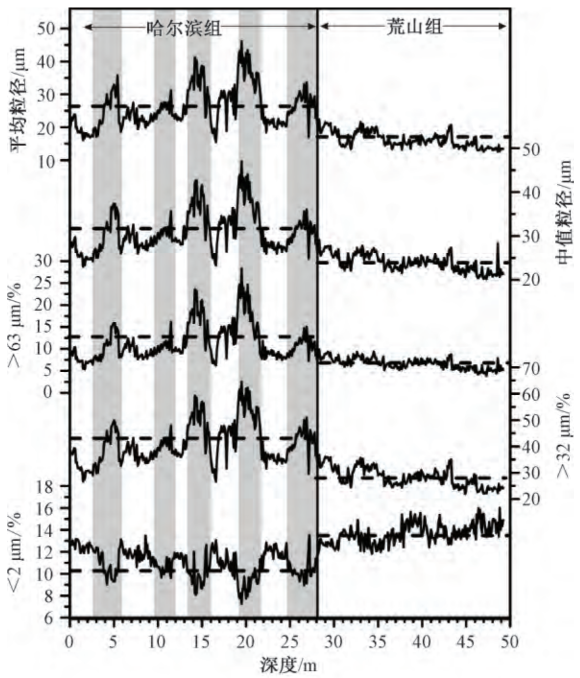


图 3 THS 钻孔沉积物平均粒径、中值粒径以及各粒级组分百分含量随地层深度的变化

(灰色阴影代表黄土层)

Fig. 3 Variations of average grain size, median diameter, and percentage content of each particle fraction in the THS core with the depth of the stratum (grey shadow represents loess layer)

生代地质与环境实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 粒度参数及粒级百分含量随地层深度的变化特征

钻孔整体粒度特征是由上至下变细的过程，上部波动大，下部波动小，结合岩性描述，可划分三段：

(1) 0～0.7 m：颗粒偏细（见图 3）。平均粒径在 26.1～29.3 μm 之间，中值粒径在 19.8～23.8 μm 之间，大于 63 μm 组分百分含量在 7.7%～10.4% 之间，大于 32 μm 组分百分含量在 33.8%～39.3% 之间，小于 2 μm 组分百分含量在 12.2%～13.1% 之间。

(2) 0.7～28.3 m：总体颗粒偏粗，并呈现大幅度波动，黄棕色粘土质粉砂层颗粒较粗，对应黄土层；棕黑色粉砂质粘土层颗粒较细，对应古土壤层（见图 3）。平均粒径在 23.0～47.0 μm 之间，中值粒径在 15.6～46.1 μm 之间，大于 63 μm 组分百分含量为 5.4%～28.3%，大于 32 μm 组分百分含量在 26.7%～64.6% 之间，小于 2 μm 组分百分含量在 7.3～13.5% 之间。

(3) 28.3～49.2 m：总体颗粒偏细，并呈现小幅波动（见图 3）。平均粒径在 20.2～28.3 μm 之间，中值粒径在 15.5～21.6 μm 之间，大于 63 μm 组分百分含量为 3.9%～9.4%，大于 32 μm 组分百分含量在 11.8%～36.1% 之间，小于 2 μm 组分百分含量在 12.5%～21.5% 之间。

平均粒径、中值粒径以及各个粒级组分百分含量的变化将钻孔分为三段，最为明显的变化在 28.3 m，该深度应为荒山组和哈尔滨组的地层界线。哈尔滨组地层粒度参数和粒级百分含量波动大，而荒山组地层波动小。

通过对荒山（HS）剖面进行野外地层调查发现，出露的地层亦可明显识别出哈尔滨组和荒山组两组地层，并对哈尔滨组地层进行详细划分，识别出 5 组黄土—古土壤旋回（见图 4），黄土层标注为 L，古土壤层标注为 S，这与上文中 THS 钻孔地层岩性描述与粒度结果有很好的对应。HS 剖面黄土呈棕黄色，亚砂土，块状结构；古土壤层呈棕黑色，粉砂质粘土，具成壤的形态特征。

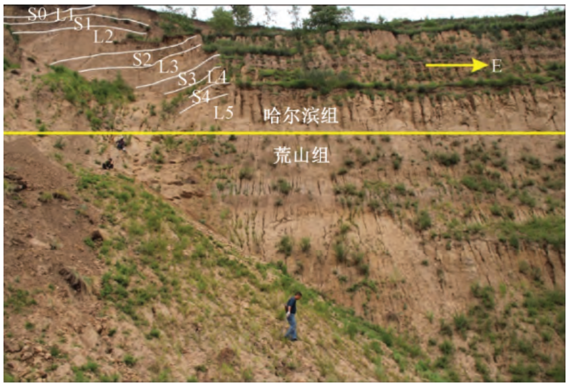


图 4　荒山（HS）剖面野外照片

Fig. 4　The field photo of the HS section

2.2　粒度频率分布特征

黄土高原风成堆积物大部分呈现单峰态特征，以粗粉砂颗粒（5 ~ 50 μm）为主，由于风动力的变化和成壤后的改造作用，常常在 < 2 μm 有个次峰，这个次峰的成因可能是细颗粒附着于大颗粒或者粘结成大颗粒而被冬季风环流从物源区搬运而来，或者是在沉积区成壤作用形成的[22]，孙东怀等[23]则认为 < 2 μm 这个次峰是西风环流搬运而来。

哈尔滨组黄土层与古土壤层样品（深度分别在 5 m、6.5 m、10 m、12.5 m、14.5 m、17 m、26 m）的粒度频率曲线（见图 5a）呈现双峰模式，主峰约为 30 μm，次峰约为 1 μm，这与黄土高原西峰第四纪黄土和第三纪红粘土（见图 5b）相似[24]，可能指示哈尔滨组地层的风成成因。而荒山组样品（深度分别为 32.5 m、36.5 m、39.2 m、44.2 m、49.2 m）的频率曲线（见图 5c）具有多峰模式，与泸定湖湖相沉积物一样，呈现多峰模式[24]（见图 5d），而且邻近段落模式变化较大，呈现河湖相沉积物的特点。

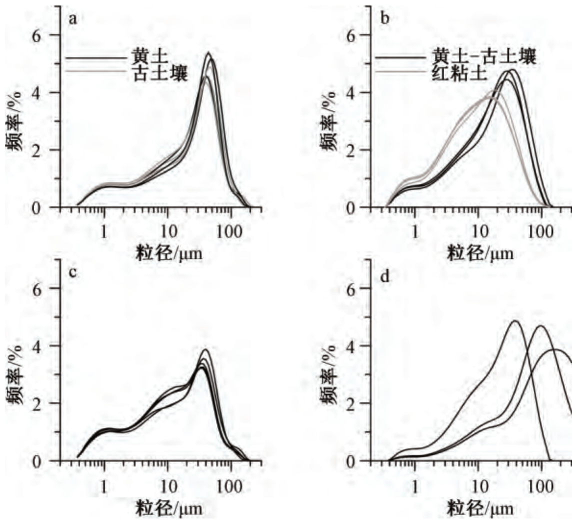
2.3　粒度参数结构散点图

沉积物的粒度参数与沉积环境及搬运动力条件具有密切联系。常用的粒度参数统计分析方法包括矩法[25]和图解法[26]两种，研究采用矩法计算粒度参数的方法，计算公式如下[25]：

平均粒径：$\bar{X} = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{n} f_i X_i$

标准偏差：$\sigma = \sqrt{\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{n}(Xi - \bar{X})^2 f_i}$

偏度：$S = \sigma^{-3}\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^3 f_i$



a—THS 钻孔哈尔滨组；b—西峰第四纪黄土、第三纪红粘土[24]；c—THS 钻孔荒山组；d—泸定湖湖相沉积物[24]

图 5　粒度频率曲线图

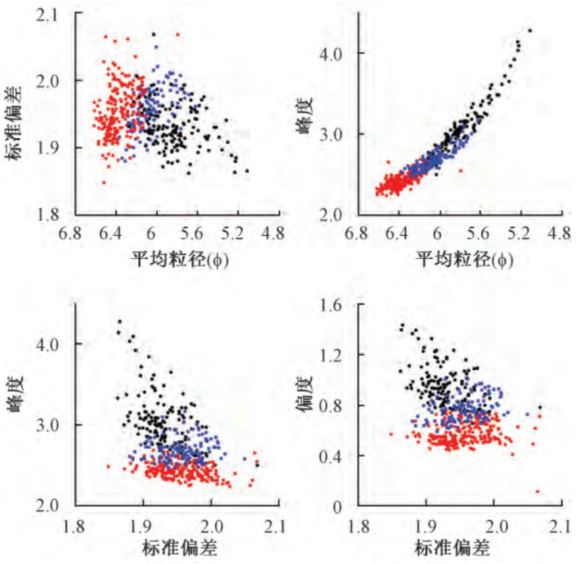
Fig. 5　Grain-size frequency curves

峰度：$K = \sigma^{-4}\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^4 f_i$

上述公式中，X_i 为第 i 个粒级的中点粒径，f_i 为第 i 个粒级的百分含量。对于沉积环境复杂的沉积物，用单一的粒度参数区分不同类型的沉积物往往存在多解性，常常需要对各种粒度参数进行综合分析才能得出较为合理的结论。通过对已知环境的现代沉积物粒度结构参数散点图[27]进行研究表明，不同成因沉积物的某些投点虽然可以互相穿插，但成因环境的界线还是可以区分开的。哈尔滨组样品和荒山组样品几种粒度参数的散点图均落在了不同的区域（见图 6），可能指示两套地层属于不同的成因类型，而且哈尔滨组黄土层和古土壤层的粒度参数也存在差别。哈尔滨组峰度较荒山组大，表现较窄的峰态，这在粒度频率曲线中也有所反映，偏度也较荒山组大，更接近西峰黄土的偏态特征[24]。哈尔滨组黄土层的峰度和偏度较古土壤层大，与黄土高原典型黄土—古土壤序列的粒度参数特征相似，Yang and Ding[9]认为这与物源区的距离有很大联系，而哈尔滨黄土层与古土壤层粒度参数的差别的机理仍需进一步探讨。

2.4　综合 C-M 图

C-M 图是一种综合性的成因图解[26]。在沉积物成因研究中，主要是通过未知样品在 C-M 图中的投影区域与已知成因样品的投影区域进行比较



黑色圆点—哈尔滨组黄土层样品；蓝色圆点—哈尔滨组古土壤层样品；红色圆点—荒山组样品

图 6 THS 钻孔哈尔滨组和荒山组地层样品的粒度参数（phi 值）散点图

Fig. 6 Grain-size parameters (phi value) scatterplot of Harbin and Huangshan Formation in THS core

来确定其成因及沉积环境[7]。THS 钻孔样品，无论是哈尔滨组还是荒山组，C 值都 <200 μm，M 值 <50 μm，属于悬浮沉积。哈尔滨组样品投点与西峰黄土—古土壤样品落在同一条带上，并平行于 C = M 线（见图 7），可能指示哈尔滨组与西峰样品成因[24]一样为风成堆积。哈尔滨组的粒度较西峰黄土—古土壤偏粗，可能指示哈尔滨组形成时期搬运风动力大或者距离物源区较近。荒山组样品的投点与哈尔滨组投点在不同的区域，并且未与西峰黄土—古土壤在同一条带上，指示其可能为河湖相成因。

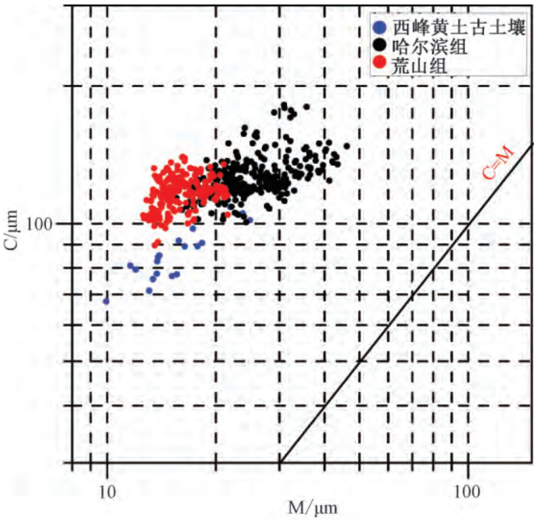


图 7 THS 钻孔哈尔滨组和荒山组以及西峰第四纪黄土样品[24]的 C-M 图

Fig. 7 C-M plots of samples of Harbin and Huangshan Formation in THS core, Xifeng Quaternaty Loess[24]

3 结论

通过对天恒山（THS）钻孔进行高分辨率粒度特征研究，得出如下结论。

（1）哈尔滨组和荒山组在 THS 钻孔的地层界限位于孔深 28.3 m 处。哈尔滨组平均粒径、中值粒径以及粒级百分含量等呈现大幅度波动，而且反映了黄土—古土壤地层旋回特征，黄土层较粗，古土壤层较细。而荒山组平均粒径、中值粒径以及粒级百分含量等则呈现小幅度波动。

（2）荒山组和哈尔滨组呈现不同的粒度特征，哈尔滨组粒度偏粗，而荒山组粒度明显偏细。哈尔滨组的粒度特征与黄土高原典型第四纪黄土的粒度特征具有一致性，从而揭示哈尔滨组为风成堆积，而荒山组则属于河湖相沉积物。

参考文献/References

[1] 吴锡浩，浦庆余，钱方，等. 松辽平原第四纪磁性地层的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质，1984，4（2）：1 ~ 13.

WU Xihao, PU Qingyu, QIAN Fang, et al. Preliminary study on the Quaternary magnetostratigraphy of the Songliao plain in north-east China[J]. Marine Geology & Quaternaty Geology, 1984, 4 (2): 1 ~ 13. (in Chinese with English abstract)

[2] 初本君，高振超，杨世生，等. 黑龙江省第四纪地质与环境[M]. 北京：海洋出版社，1988.

CHU Benjun, GAO Zhencao, YANG Shisheng, et al. Quaternary geology and environment of Heilongjiang province, China[M]. Beijing: Ocean Press, 1988. (in Chinese)

[3] 叶启晓. 哈尔滨地区第四系[J]. 黑龙江地质，1991，2（2）：17 ~ 29.

YE Qixiao. Quaternary system in Harbin area[J]. Heilongjiang Geology, 1991, 2 (2): 17 ~ 29. (in Chinese with English abstract)

[4] 魏传义，李长安，康春国，等. 哈尔滨黄山黄土粒度特征及其对成因的指示[J]. 地球科学——中国地质大学学报，2015，40（12）：1945 ~ 1954.

WEI Chuanyi, LI Chang'an, KANG Chunguo, et al. Grain-size characteristics and genesis of the Huangshan Loess in songnen plain area[J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2015, 40 (12): 1945 ~ 1954. (in

Chinese with English abstract)

[5] Doeglas D J. Grain-size indices, classification and environment [J]. Sedimentology, 1968, 10 (2): 83～100.

[6] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. Journal of Sedimentary Research, 1969, 39 (3): 1074～1106.

[7] Lu H Y, Vandenberghe J, An Z S. Aeolian origin and palaeoclimatic implications of the 'red clay' (north China) as evidenced by grain-size distribution [J]. Journal of Quaternary Science, 2001, 16 (1): 89～97.

[8] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. Nature, 2002, 416 (6877): 159～163.

[9] Yang S L, Ding Z L. Comparison of particle size characteristics of the Tertiary 'red clay' and Pleistocene loess in the Chinese Loess Plateau: implications for origin and sources of the ′red clay′ [J]. Sedimentology, 2004, 51 (1): 77～93.

[10] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea δ^{18}O record [J]. Paleoceanography, 2002, 17 (3): 1033.

[11] Sun D H. Monsoon and westerly circulation changes recorded in the late Cenozoic aeolian sequences of Northern China [J]. Global and Planetary Change, 2004, 41 (1): 63～80.

[12] Guo Z T, Sun B, Zhang Z S, et al. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene [J]. Climate of the Past, 2008, 4 (3): 153～174.

[13] Hao Q Z, Wang L, Oldfield F, et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400, 000-year minima in insolation variability [J]. Nature, 2012, 490 (7420): 393～396.

[14] Zeng L, Lu H Y, Yi S W, et al. Long-term Pleistocene aridification and possible linkage to high-latitude forcing: New evidence from grain size and magnetic susceptibility proxies from loess-paleosol record in northeastern China [J]. Catena, 2017, 154: 21～32.

[15] Fan M J, Song C H, Dettman D L, et al. Intensification of the Asian winter monsoon after 7.4 Ma: Grain-size evidence from the Linxia Basin, northeastern Tibetan Plateau, 13.1 Ma to 4.3 Ma [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 248 (1/2): 186～197.

[16] Xiao J L, Chang Z G, Si B, et al. Partitioning of the grain-size components of Dali Lake core sediments: evidence for lake-level changes during the Holocene [J]. Journal of Paleolimnology, 2009, 42 (2): 249～260.

[17] Jiang H C, Ding Z L. Eolian grain-size signature of the Sikouzi lacustrine sediments (Chinese Loess Plateau): Implications for Neogene evolution of the East Asian winter monsoon [J]. GSA Bulletin, 2010, 122 (5～6): 843～854.

[18] Yang S L, Ding Z L. Advance-retreat history of the East-Asian summer monsoon rainfall belt over northern China during the last two glacial-interglacial cycles [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 274 (3～4): 499～510.

[19] An Z S, Liu T, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in Central China [J]. Quaternary International, 1990, 7～8: 91～95.

[20] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. Nature, 1995, 375 (6529): 305～308.

[21] Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25 (1～2): 33～48.

[22] **鹿化煜，安芷生. 黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比——红粘土风成成因的新证据 [J]. 沉积学报**，1999，17 (2): 226～232.
LU Huayu, AN Zhisheng. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosoil deposits in Chinese loess plateau [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17 (2): 226～232. (in Chinese with English abstract)

[23] **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. (in Chinese with English abstract)

[24] **李敬卫，乔彦松，王燕，等. 江西九江红土堆积的粒度特征及成因研究 [J]. 地质力学学报**，2009，15 (1): 95～104.
LI Jingwei, QIAO Yansong, WANG Yan, et al. Aeolian origin of the red Earth tormation in Jiujiang city of Jiangxi province, China: evidence from grain-size analysis [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (1): 95～104. (in Chinese with English abstract)

[25] Friedman G M, Sanders J E. Principles of sedimentology [M]. New York: Wiley, 1978.

[26] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar, a study in the significance of grain size parameter [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27 (1): 3～26.

[27] Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool [J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34 (4): 830～847.