引用格式：陈阳阳，杨柯，于俊博，等，2024. 松嫩平原东部 WKZK01 钻孔第四纪地层岩性特征及环境地质意义 [J]. 地质力学学报，30（6）：952−964. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023149

Citation: CHEN Y Y，YANG K，YU J B，et al.，2024. Quaternary strata lithological characteristics and environmental geological significance of borehole WKZK01 in the eastern Songnen Plain[J]. Journal of Geomechanics，30（6）：952−964. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023149

松嫩平原东部 WKZK01 钻孔第四纪地层岩性特征及环境地质意义

陈阳阳[1,2,3]，杨　柯[1,3,4]，于俊博[1,3]，张起鹏[1,3]，杨志伟[1,3]，乔绍忠[1,3]，刘佳城[1,3]，刘　学[1,3]，王晨晨[1,3]

CHEN Yangyang[1,2,3]，YANG Ke[1,3,4]，YU Junbo[1,3]，ZHANG Qipeng[1,3]，YANG Zhiwei[1,3]，QIAO Shaozhong[1,3]，LIU Jiacheng[1,3]，LIU Xue[1,3]，WANG Chenchen[1,3]

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心，黑龙江 哈尔滨 150086；
2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心，辽宁 沈阳 110000；
3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站，黑龙江 哈尔滨 150086；
4. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所，河北 廊坊 065000

1. *Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey*, *China Geological Survey*, *Harbin* 150086, *Heilongjiang*, *China*;
2. *Northeast Geologica S & T Innovation Center of China Geological Survey*, *Shenyang* 110000, *Liaoning*, *China*;
3. *Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil*, *Harbin*, *Ministry of Natural Resources*, *Harbin* 150086, *Heilongjiang*, *China*;
4. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Langfang* 065000, *Hebei*, *China*

Quaternary strata lithological characteristics and environmental geological significance of borehole WKZK01 in the eastern Songnen Plain

Abstract: [**Objective**] Study of the Quaternary stratigraphical characteristics of the eastern Songnen Plain is of particular importance for gaining an understanding of regional climate change and the evolution of sedimentary environments. To data, however, there has been comparatively little research focusing on the Quaternary strata in this area, which has accordingly limited our comprehension of the mechanisms underlying changes in the regional climate and environment. [**Methods**] In this study we focused on the borehole WKZK01 in the eastern Songnen Plain. On the basis of lithological characteristic analysis, we obtained dating, sedimentary environment evolution, and climatic evolution information using optically stimulated luminescence, palynology, and laser grain size analytical methods, and based on comparisons with the results obtained from a typical Huangshan section, Harbin, we discuss the Quaternary stratigraphy of the borehole and the sedimentary environments it reflects. [**Results**] The Quaternary strata in Wangkui county are divided from old to new as follows: the middle Pleistocene Huangshan Formation, the middle Pleistocene Harbin Formation, and the upper Pleistocene Guxiangtun Formation, with an absence of a Holocene Tantu Formation. The Huangshan Formation is 13.05 m thick, with a median grain size (Md) ranging from 7.77 μm to 11.84 μm, and an average value of 9.62 μm. Pollen zone I-1 is dominated by xerophytic herbaceous pollen, with small amounts of mixed coniferous and broadleaf woody plant pollen, although lacks pollen derived from hydrophilic herbaceous plant. The Harbin Formation is 24.05 m thick, with a median

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20242396，DD20211589，DD20240008）；中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目（QCJJ2023-31）

This research is financially supported by the Geological Survey Project of China Geological Survey (Grants No. DD20242396, DD20211589 and DD20240008) and Funding Project of Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey (Grant No. QCJJ2023-31).

第一作者：陈阳阳（1990—），男，硕士，工程师，主要从事第四纪地质与环境演变研究。Email：chenyangyang@mail.cgs.gov.cn

通讯作者：杨柯（1980—），男，博士，正高级工程师，主要从事环境地球化学研究。Email：yke@mail.cgs.gov.cn

收稿日期：2023−09−09；**修回日期**：2024−10−18；**录用日期**：2024−10−24；**网络出版日期**：2024−11−06；**责任编辑**：吴芳

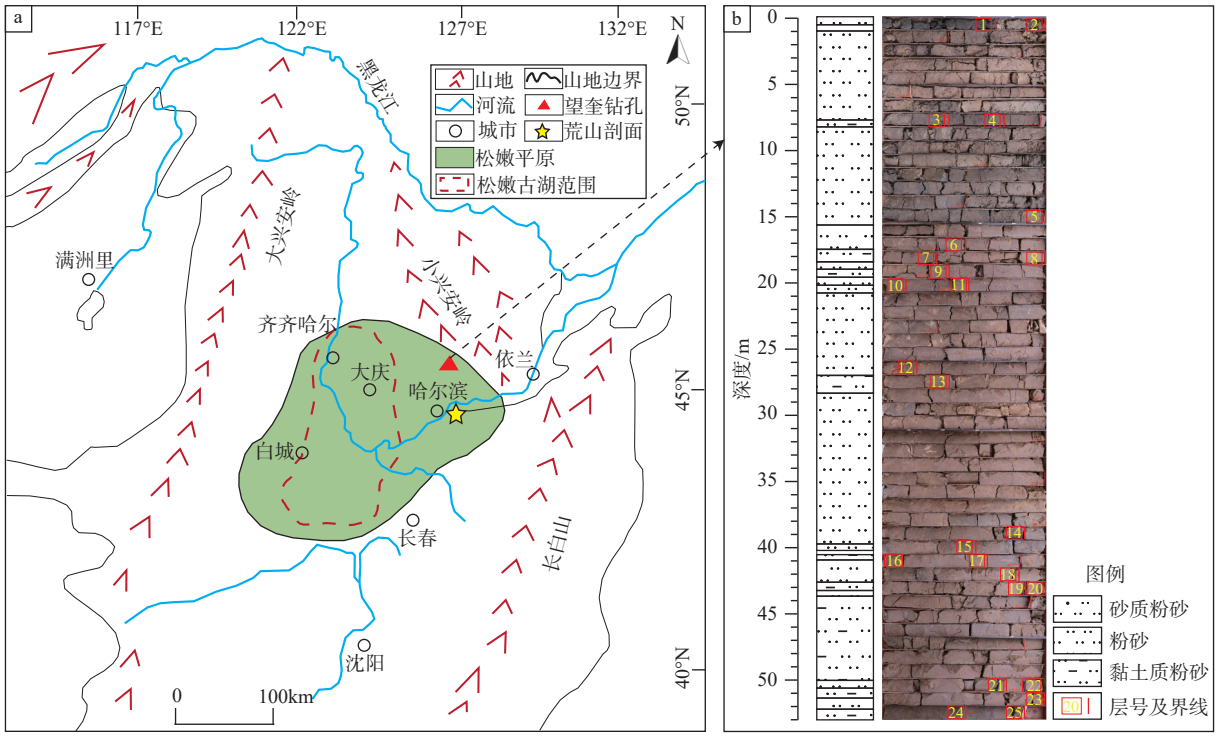
grain size (Md) ranging from 9.67 μm to 14.98 μm, and an average value of 11.74 μm. Pollen zone I-2 is still dominated by xerophytic herbaceous pollen, with that derived from mixed coniferous and broadleaf woody plants as the secondary component, and the appearance of hydrophilic herbaceous plant pollen. The Guxiangtun Formation is 15.6 m thick, with a median grain size (Md) ranging from 11.61 μm to 19.91 μm, and an average value of 14.12 μm. Compared with the earlier stages, pollen zone II has a less abundant pollen content, although is characterized by an increase in hydrophilic herbaceous pollen, and a marked decline in the content of pollen derived from xerophytic woody and herbaceous plants. [**Conclusion**] The Huangshan Formation represents lacustrine deposits, with pollen zone I-1 providing evidence of a cool and dry climate during the early Middle Pleistocene. The Harbin Formation also comprises lacustrine deposits, with the pollen record in zone I-2 indicating a cool and humid climate during the late Middle Pleistocene. The Guxiangtun Formation comprises fluvial deposits, with pollen zone II recording a cold and wet climate during the Late Pleistocene. [**Significance**] The borehole WKZK01 provides a record of the environmental evolution of a small lake adjacent to the large Songnen paleolake, revealing a transition from the lake center to the margin and eventually disappearing with the formation of rivers.
Keywords: paleoenvironment; paleoclimate; optically stimulated luminescence; grain size; pollen; Songnen Plain

摘　要：松嫩平原东部第四纪地层特征研究对于了解区域气候变化和沉积环境演化具有重要意义。然而，目前关于该区的第四纪地层研究较少，从而限制了对该区气候环境变化机理的理解。文章选择松嫩平原东部望奎 WKZK01 钻孔岩芯为研究对象，在岩性特征分析的基础上，利用光释光、孢粉和粒度等测试方法，对比分析哈尔滨荒山剖面的相关成果，对钻孔第四纪地层划分及所反映的沉积环境进行了探讨。将望奎县第四纪地层由老至新划分为：中更新统荒山组、中更新统哈尔滨组、上更新统顾乡屯组，无全新统坦途组。钻孔揭露荒山组厚 13.05 m，为湖泊相，孢粉带 I–1 记录了中更新世早期凉干气候；哈尔滨组厚 24.05 m，为湖泊相，孢粉带 I–2 记录了中更新世晚期凉湿气候；顾乡屯组厚 15.6 m，为河流相，孢粉带 II 记录了晚更新世冷湿气候。望奎 WKZK01 钻孔岩芯记录了松嫩古大湖周边面积较小的湖泊由湖心到湖滨最后消亡形成河流的环境演化过程。
关键词：古环境；古气候；光释光；粒度；孢粉；松嫩平原
中图分类号：P534.63　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2024)06−0952−13
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023149

沉积地层记录了丰富的地质过程信息，是重建地质历史时期古气候和古环境的重要基础，深入分析地层特征及区域规律具有重要的科学意义（Xie et al., 2018; 孙杨等, 2022）。松嫩平原是中国第四纪地层非常发育的地区之一，具独特的沉积特征及地层组合。众多学者在该区开展了大量研究工作，主要集中在地层划分、古气候重建和沉积环境演化等方面（孙建中等, 1982; 吴锡浩等, 1984; 高文等, 2013; Xie et al., 2018; 詹涛等, 2018; 吴鹏等, 2020a; 王永等, 2020; 孙建华等, 2022; 冷宇坤等, 2023; 高宏宇等, 2023; 曾吉莉等, 2024）。其中，第四纪地层沉积特征和地层划分是研究该区环境地质意义的基本前提。孙建中等（1982）在松辽平原基于 ^{14}C、热释光和古地磁等年代学方法，对区内第四纪地层进行了初步划分。吴锡浩等（1984）基于磁性地层将哈尔滨荒山剖面划分为荒山组、东风组、哈尔滨组和坦途组。高文等（2013）在黑龙江方正县第四纪地层剖面的研究中，指出不同地区地层特征和分界存在一定差异；而方正剖面可与荒山剖面互补，为松嫩平原东缘中、晚更新世地层界限提供佐证。王永等（2020）基于哈尔滨荒山剖面开展了详细的地层和年代分析，将荒山剖面第四纪地层划分为：荒山组、哈尔滨组、顾乡屯组和坦途组。上述工作为松嫩平原第四纪地层提供了标准与参考，但是已有成果主要集中在南部的哈尔滨荒山剖面（詹涛等, 2018; 吴鹏等, 2020a; 王永等, 2020），缺乏对北部靠近松嫩平原隆起区的第四纪地层划分、古气候变化以及沉积环境演化研究，这制约了对松嫩平原东部古气候重建、沉积环境演化的认识，也使得研究松嫩平原东部完整古气候变化、沉积环境演化缺乏记录证据。文章以松嫩平原东部望奎地区新近获得的 WKZK01 钻孔岩芯为研究对象，基于钻孔岩芯岩性特征分析，利用光释光、孢粉和粒度等测试方法对松嫩平原东部望奎地区第四纪地层进行了划分，并详细研究了中更新统、晚更新统沉积地层特征，探讨了钻孔岩芯所揭示地层的沉积相变化以及古气候环境演化过程，为研究松嫩平原东部完整古气候变化、沉积环境演化提供参考资料。

1 钻孔地层沉积特征

松嫩平原西与大兴安岭相接，北与小兴安岭山脉相连，东部为长白山地区，地势北高南低，整体略呈菱形（侯心茹等，2023），望奎 WKZK01 钻孔位于松嫩平原东部（图 1a），钻孔高程 202.11 m，大地坐标为 46°44′18″N，126°42′56″E；全孔岩芯采取率达到 92%。该钻孔钻遇第四纪地层厚度大，沉积较为连续（图 1b），岩性主要为粉砂、黏土质粉砂，少部分为砂质粉砂（图 2），钻孔详细分层见表 1。



a—区域概况图；b—WKZK01 钻孔岩性柱状图

图 1 松嫩平原东部钻孔 WKZK01 区域概况图与岩性柱状图

Fig. 1 General map and lithological histogram of borehole WKZK01 in the eastern Songnen Plain

(a) General map; (b) Lithological histogram of borehole WKZK01

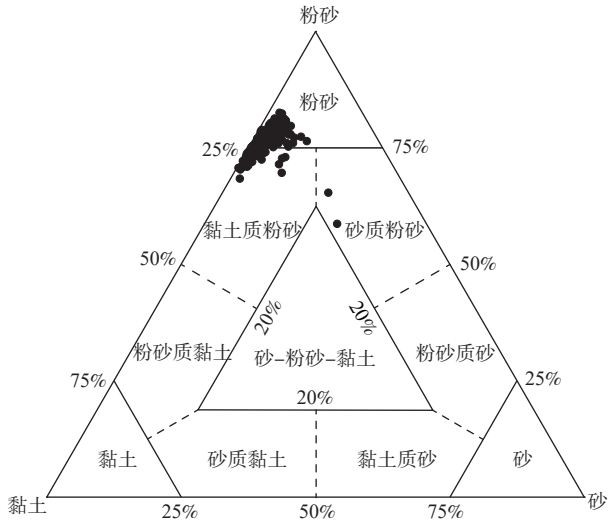


图 2 松嫩平原东部 WKZK01 钻孔岩性三角图

Fig. 2 Lithological triangle map of borehole WKZK01 in the eastern Songnen Plain

2 材料与方法

2.1 光释光测年

此次研究分别在望奎 WKZK01 钻孔埋深 2.33 m、5.08 m、8.84 m、12.19 m 处采集 4 件光释光测年样品，在避免阳光照射的前提下，使用橡皮锤将直径 5 cm、长 20 cm 钢管，一端塞入黑塑料袋，垂直楔入岩芯中取样，样品采集 500 g 左右。样品处理在暗室弱红光下进行。通过前处理过程中的一系列化学反应去除了样品中的有机质、碳酸盐类及长石等物质，最终获得纯净细颗粒石英（粒径为 4～11 μm），制备测片进行检测。主要检测仪器型号为 CANBERRA–BE3830 型高纯锗 γ 能谱仪和 LEXSYG–research 型释光测量仪。光释光测年在自然资源部海洋地质实

表 1　钻孔 WKZK01 钻孔分层及岩性特征

Table 1　Lithological and stratigraphical characteristics of borehole WKZK01

层号	层顶深度/m	层底深度/m	层厚/m	岩性特征
1	0	0.6	0.6	粉砂，棕黑色，团粒状结构，略为紧实，略为湿润，少量孔隙，少量根系
2	0.6	1.0	0.4	砂质粉砂，灰黑色，团粒状结构，略为紧实，略为湿润，少量孔隙，少量根系
3	1.0	7.8	6.8	粉砂，暗棕色，少量孔隙，少量根系，含铁染锈斑；2.7～6.5 m处为灰黄色，未见铁锰结核，颜色较为单一；6.5～7.4 m处为黄褐色；其中，6.5～6.8 m处为暗棕色，6.8～7.0处为黄褐色，含铁锰结核与锈斑，往下铁锰结核减少，颜色略带青灰色，反映氧化−还原环境
4	7.8	8.2	0.4	黏土质粉砂，棕黑色，块状结构，略为湿润，略为紧实
5	8.2	15.6	9.4	粉砂，黄褐色，少见铁锰结核与锈斑；该层从上往下颜色由深变浅。11.7～13.1 m处为棕黑色，见较多铁锰结核；该地层与上覆地层颜色界限较为清楚，可能为古土壤层；13.1～15.6 m处为暗棕色，块状结构，略为紧实，略为湿润；该地层较上覆地层颜色偏浅，但变化不明显
6	15.6	17.6	2.0	粉砂，暗棕色与棕黑色条带相间分布，块状结构，略为紧实，略为湿润
7	17.6	18.4	0.8	黏土质粉砂，黄褐色，块状结构，略为紧实，略为湿润，见少量红褐色铁结核
8	18.4	19.0	0.6	粉砂，黄褐色，见少量红褐色铁结核
9	19.0	19.6	0.6	黏土质粉砂，黄褐色，块状结构，略为紧实，略为湿润，见少量红褐色铁结核
10	19.6	20.2	0.6	粉砂，黄褐色，含黑色锰结核；该层与上覆地层区别为含较多黑色锰结核，见少量红褐色铁结核
11	20.2	20.8	0.6	黏土质粉砂，该层与上覆地层区别为含较多黑色锰结核，见少量红褐色铁结核
12	20.8	27.0	6.2	粉砂，黄褐色，含黑色锰结核；23.1～23.4 m处为棕黑色，可能为古土壤，往下颜色逐渐过渡变化
13	27.0	28.2	1.2	黏土质粉砂，黄褐色，含黑色锰结核；该层含较多黑色斑点状锰结核，见少量红褐色铁结核
14	28.2	39.6	11.4	粉砂，黄褐色，块状结构，紧实，略为湿润，含较多黑色斑点状锰结核；38.1～38.7 m处颜色偏暗，为棕黑色，发育灰白色斑点状、角砾状钙盐粉末，基质为灰黑色网纹状填充
15	39.6	40.2	0.6	黏土质粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育
16	40.2	40.6	0.4	粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，40.2～40.4 m颜色偏暗，微细层理较为发育
17	40.6	41.0	0.4	黏土质粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育
18	41.0	42.8	1.8	粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育
19	42.8	43.2	0.4	黏土质粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育
20	43.2	43.6	0.4	粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育
21	43.6	50.0	6.4	黏土质粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育；47.2～47.4 m处颜色偏暗，为棕黑色，发育灰白色斑点状、角砾状钙盐粉末，基质为灰黑色网纹状填充
22	50.0	50.6	0.6	粉砂，暗棕色，块状结构。含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育；底部50.3～50.6 m处颜色偏暗，为棕黑色
23	50.6	51.4	0.8	黏土质粉砂，暗棕色，块状结构，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育；底部颜色偏暗，为棕黑色，发育灰白色斑点状、角砾状钙盐粉末，基质为灰黑色网纹状填充
24	51.4	52.2	0.8	粉砂，暗棕色，块状结构，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育
25	52.2	52.7	0.5	黏土质粉砂，暗棕色，含黑色斑点状锰结核和红褐色铁结核，微细层理较为发育；底部颜色偏暗，为棕黑色，发育灰白色斑点状、角砾状钙盐粉末，基质为灰黑色网纹状填充

验检测中心完成。

2.2　孢粉化石分析

根据岩性特征共采集 13 件孢粉样品，每件样品采集 100 g 左右。碎样后，先用碳酸氢钠分散，经酸碱处理，去除碳酸盐和有机质，再用 KI 重液（比重为 2∶1）离心悬浮，脱水后的孢粉浓缩物制备活动玻片在 ZeissAxio Imager M12 显微镜下观察，并记录观察结果。孢粉化石实验及鉴定在中国科学院南京地质古生物研究所完成。

2.3　粒度分析

共采集 264 件粒度样品，按照 0.2 m 等间距采样。选择激光粒度法作为粒度分析方法，样品采集 50 g 左右，样品前处理依据《粒度分布 激光衍射法》（GB/T 19077—2016）。每个样品测试 1 次，并抽选各不同批次总体中的 5% 进行重复性测量，重复性良好，准确度满足要求。主要检测仪器型号为 Mastersizer 2000。粒度分析测试在沈阳博实植物与土壤生态检验检测中心有限公司完成，粒度分析以

黏土(<4 μm)、粉砂(4～63 μm)、砂(63～2000 μm)进行分类(Shepard, 1954; Link, 1966)。

3 结果

3.1 光释光测年结果

样品光释光年龄检测结果分别为65.2±2.8 ka(深度2.33 m)、79.5±2.4 ka(深度5.08 m)、86.0±3.7 ka(深度8.84 m)、90.7±4.9 ka(深度12.19 m),具体见表2。各样品生长曲线拟合良好,等效剂量分布较为集中,大部分样品没有明显饱和,认为该批样品测试数据基本可信。由此可见,深度2.33～12.19 m的沉积物全部形成于晚更新世,记录了该区晚更新世(65.2±2.8 ka～90.7±4.9 ka)阶段的沉积环境变化及气候信息。

表2 WKZK01钻孔光释光测年样品信息及测年数据

Table 2 Sample information and dating data of optical stimulated luminescence (OSL) of borehole WKZK01

样品编号	埋深/m	U/(μg/g)	Th/(μg/g)	K/%	等效剂量/Gy	误差/Gy	年剂量/(Gy/ka)	含水量/%	年龄/ka
WKZK01−1	2.33	1.68	8.32	1.85	183.81	7.90	2.82	24.91	65.2±2.8
WKZK01−2	5.08	1.22	7.25	1.90	199.13	6.13	2.51	28.66	79.5±2.4
WKZK01−3	8.84	1.31	7.17	1.61	215.21	9.27	2.50	17.80	86.0±3.7
WKZK01−4	12.19	1.43	6.01	1.96	236.06	12.77	2.60	22.52	90.7±4.9

3.2 孢粉化石分析结果

孢粉样品分别采自望奎WKZK01钻孔8.0～52.2 m第四纪沉积物层,采集13件样品,共鉴定孢粉类型30种。具体鉴定类型及数量详见孢粉百分含量图谱(图3)。根据钻孔不同层位出现的孢粉类型及百分比含量的变化,将望奎WKZK01钻孔自下而上划分为2个孢粉组合带,分带描述如下。

孢粉带I:深度15.6～52.2 m,该带以陆生草本植物花粉占据主导地位。其中,主导类型为藜科/苋科和蒿属,另外有禾本科、蒲公英属型和毛茛科花粉。木本植物花粉主要成分有桦木属、榆属,其余有榛属、麻黄属、枫杨属和松属等。湿生草本植物花粉主导成分为莎草科,另外泽泻科和香蒲属花粉也较为常见。蕨类孢子中,水龙骨科出现频繁,另外含有石松属、膜蕨科和卷柏科。藻类类型中,环纹藻属少量出现。孢粉带I可分成2个亚带:①孢粉带I−1(深度39.65～52.2 m)以陆生草本喜干植物花粉禾本科、蒿属为主,自然环境中,大量出现禾本科、蒿属花粉,指示气候相对干旱(Zhang et al., 2020)。少量的阔叶类木本植物花粉,无喜湿的草本植物花粉,无淡水藻类花粉。整体指示了凉干的古气候;②孢粉带I−2(深度15.6～39.65 m)仍以陆生草本喜干植物花粉为主,其中,禾本科、蒿属花粉含量较上个阶段减少,喜湿的毛茛科、蒲公英属型花粉出现(中国植被编辑委员会, 1980),针阔叶混交林木本植物花粉种类和含量较上个阶段略有增加,出现喜湿的草本植物香蒲属、泻泽科花粉,此带发现指示水生环境的淡水藻类花粉。整体指示了凉湿的古气候。

孢粉带II:深度8.0～15.6 m,该带以蕨类水龙骨科花粉含量显著突出为特点,植物花粉种类含量在该带中稀少,木本植物花粉喜温桦木属较上个阶段减少,存在零星榆属、桤木属、松属花粉,松树花粉在30%以上,可能有松林存在(李文漪和姚祖驹, 1990)。耐旱的蒿属、藜科花粉含量降低,喜湿的莎草科在此带出现。整体指示了冷湿的古气候。

基于以上,孢粉带I−1(深度39.65～52.2 m)记录了凉干气候;孢粉带I−2(深度15.6～39.65 m)记录了凉湿气候;孢粉带II(深度8.0～15.6 m)记录了冷湿气候。

3.3 粒度分析结果

沉积物的粒度特征记载了丰富的环境变化信息(李鑫鑫等, 2024)。粒度参数可以定量的表示沉积物的粒度分布特征,也可以作为判别沉积环境的参考依据。根据常用的粒度参数及其计算公式(冯增昭, 1993),计算结果如图4所示,望奎WKZK01钻孔粒度参数特征为:标准偏差σ处于2.75～5.67之间,平均值为3.07;平均粒径M_z处于7.57～23.40 μm之间,平均值为11.14 μm;中值粒径M_d处于7.88～

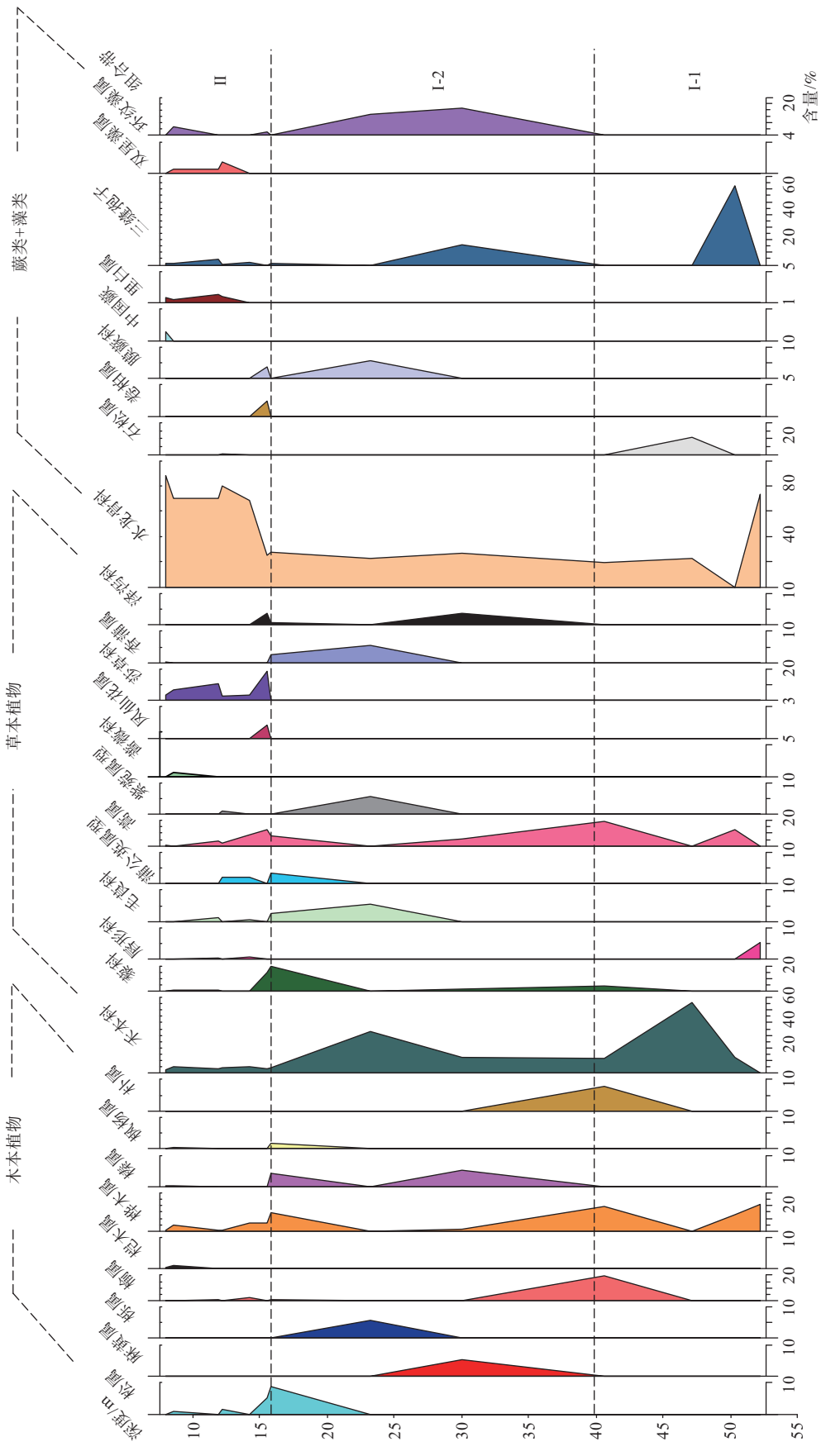


图 3　WKZK01 钻孔岩芯孢粉百分比含量图谱

Fig. 3　Spore-pollen percentage map of borehole WKZK01

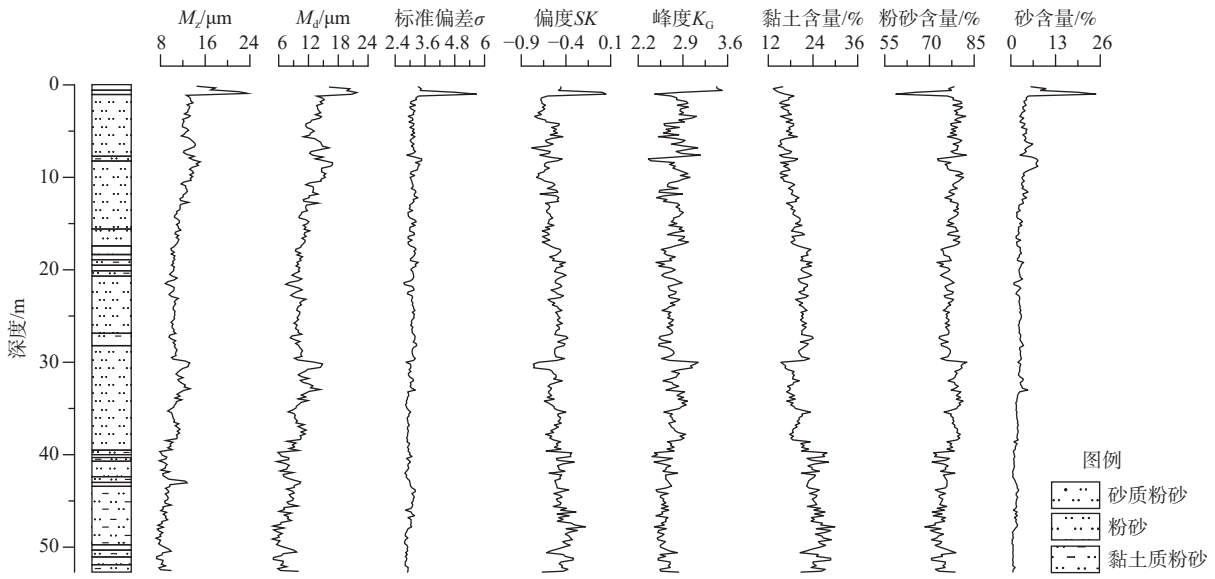


图 4 WKZK01 钻孔粒度参数及不同粒级含量变化曲线

Fig. 4 Variation curves of grain size parameters and contents of different grades in borehole WKZK01

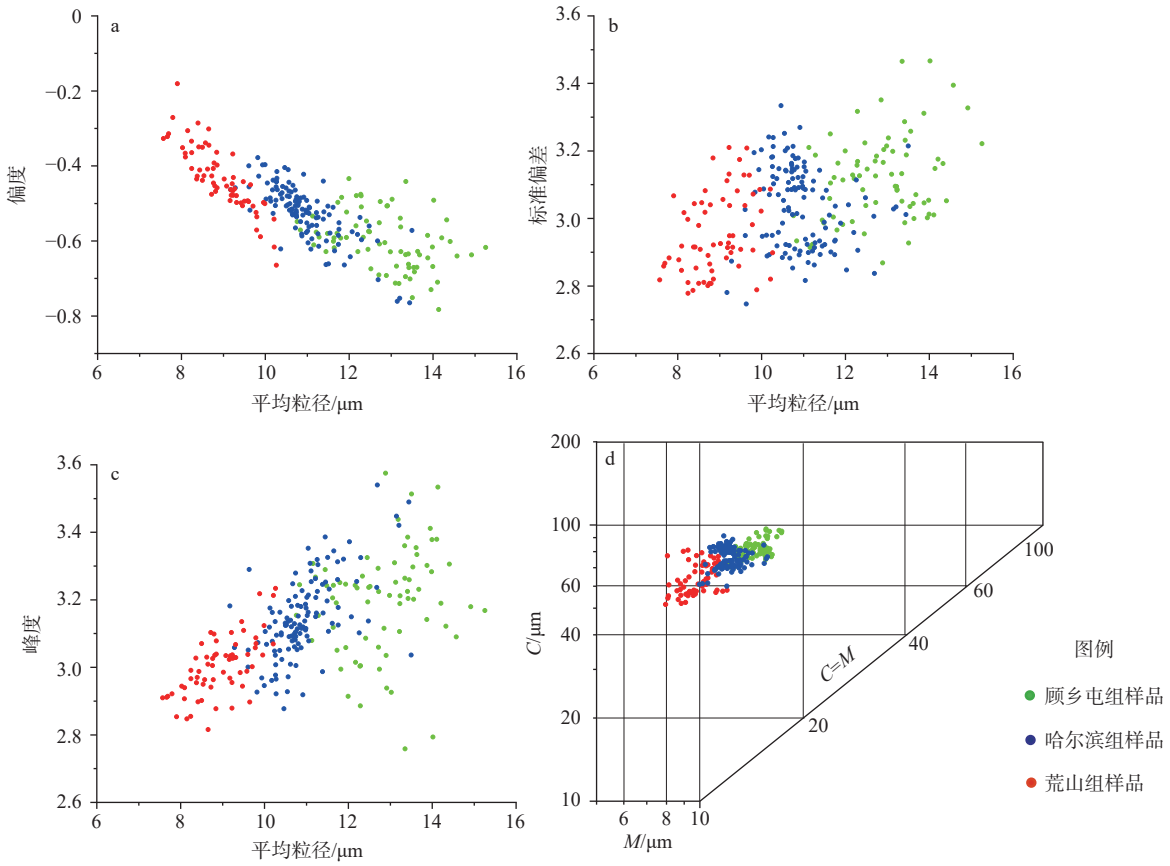
20.18 μm 之间，平均值为 12.08 μm；偏度 *SK* 处于 −0.78～0.67 之间，平均值为 −0.51；峰度 K_G 处于 2.36～4.05 之间，平均值为 2.74。钻孔内砂、粉砂、黏土含量随深度变化为：整体上砂（>63 μm）含量范围为 0.34%～24.72%，平均含量为 2.75%；粉砂（4～63 μm）含量范围为 58.70%～82.57%，平均含量为 76.58%；黏土（<4 μm）含量范围为 13.36%～29.86%，平均含量为 20.67%。钻孔岩芯沉积物从下到上粒度表现为逐渐增大，并在深度 39.65 m 处发生明显变化，分选性为很差—极差，偏度为极负偏—极正偏，峰度为很尖窄—极尖窄，以粉砂（4～63 μm）为主，黏土（<4 μm）次之，砂（>63 μm）含量最低。

4 讨论

4.1 钻孔第四纪地层划分

鉴于哈尔滨荒山剖面是东北地区为数不多的、研究较为系统的第四纪标准性地层剖面，在区域上具有典型代表性（王永等，2020；马永法等，2021）。因此，此次研究基于望奎 WKZK01 钻孔的光释光测年、粒度参数特征、粒度参数散点图（图 5a—5c）、*C*−*M* 图（*C* 代表累积曲线上 1% 处对应的粒径，*M* 代表累计曲线上 50% 处对应的粒径）（图 5d）、孢粉分析数据等资料，结合钻孔地层岩性特征，与哈尔滨荒山剖面地层孢粉组合、地层岩性特征、粒度参数特征以及荒山剖面黄土−古土壤沉积序列等相关研究成果进行对比分析，初步建立了松嫩平原东部望奎地区第四纪地层沉积序列，具体如下。

中更新统荒山组：望奎 WKZK01 钻孔岩芯中的 15～25 小层，揭示的钻孔深度为 39.65～52.7 m，共 5 个粉砂−黏土质粉砂正粒序沉积旋回，岩性为黏土质粉砂、粉砂，以黄褐色、棕黄色、暗棕色、暗黄棕色为主，黏塑性强，具铁质浸染条带和斑点，普遍含铁锰质结核，微显层理。哈尔滨荒山剖面记录的荒山组描述为：岩性为黏土质粉砂、粉砂，以浅黄色、黄褐色、棕黄色、棕褐色为主（王恩宝，2012；詹涛等，2018；吴鹏等，2020a）。孢粉带 I−1（深度 39.65～52.2 m）记录了凉干的古气候。哈尔滨荒山剖面记录该组孢粉指示了凉干的古气候特征（王恩宝，2012）。WKZK01 钻孔内荒山组沉积物岩性特征、孢粉组合指示的古气候特征与区域地层具有一致性。粒度可以作为良好的气候替代指标用于反演黄土−古土壤地层的古气候变化（刘冬雁等，2010），平均粒径相对变粗，或者是粗粒径的成分增加，气候变得干冷；反之，气候变得温暖（詹涛等，2018；田明中和程捷，2020；吴鹏等，2020a），此次研究中粒度参数曲线显示了平均粒径由粗变细再变粗的变化特征，与哈尔滨荒山剖面记录的荒山组平均粒度变化特征基本吻合（吴鹏等，2020a；图 6），与中更新世早期“两冷夹一暖”气候演化特征一致（田明中和程捷，2020）。*C*−*M* 图及粒度参数散点图显示：荒山组样品与其他地层样品落在了明显不同的区域，可能指示几套地层属于不同的成因类型，其样品落在了静水悬浮沉积的区域内，可能指示荒山组样品为湖



a—偏度–平均粒径散点图；b—标准偏差–平均粒径散点图；c—峰度–平均粒径散点图；d—*C*–*M* 图

图 5　WKZK01 钻孔顾乡屯组、哈尔滨组和荒山组地层样品的粒度参数散点图、*C*–*M* 图

Fig. 5　Grain size parameters of formation samples from the Guxiangtun, Harbin and Huangshan Formations in borehole WKZK01

(a) Skewness-mean scatter plot; (b) Standard deviation-mean scatter plot; (c) Kurtosis-mean scatter plot; (d) *C*(First percentile)-*M*(Median) plot

泊相(半深湖–深湖亚相)沉积物。与荒山组形成时期以及其湖相沉积成因相符(黑龙江省地质矿产局, 1993; 詹涛等, 2018)。基于孢粉组合特征、岩性特征、粒度参数散点图以及 *C*–*M* 图较好地控制了中更新统荒山组的层位。

中更新统哈尔滨组：望奎 WKZK01 钻孔岩芯中的 6～14 小层，揭示的钻孔深度为 15.6～39.65 m，共 4 个粉砂–黏土质粉砂正粒序沉积旋回，岩性为粉砂、黏土质粉砂，呈淡黄色、黄褐色，含铁锰结核以及钙盐粉末，局部具铁染条带和锈斑，并具有一层古土壤。中国第四纪地层东北亚区记录的哈尔滨组描述为：岩性为淡黄色黄土、黄土状粉砂(孙建中等, 1982; 田明中和程捷, 2020)，以土黄色、黄褐色、淡黄色、褐黄色为主，含铁锰及钙质结核，局部具铁染条带(黑龙江省地质矿产局, 1993; 王恩宝, 2012)。望奎 WKZK01 钻孔哈尔滨组沉积物岩性特征与区域地层具有一致性。中更新统荒山组和哈尔滨组沉积物呈现不同的粒度特征，荒山组沉积物平均粒径明显偏细，而哈尔滨组沉积物平均粒径偏粗，且色度发生明显变化(詹涛等, 2018; 马永法等, 2021)。以望奎 WKZK01 钻孔 39.65 m 深度为界，上下 2 套沉积物的平均粒径和中值粒径具有明显变化(图 6)，说明沉积环境发生显著改变。孢粉带 I–2(深度 15.6～39.65 m)记录了凉湿的古气候。区域地层哈尔滨组孢粉组合记录了古气候较干冷到转暖，但仍以较干冷湿润气候为主的气候特征(王恩宝; 2012)，望奎 WKZK01 钻孔深度 31～32.2 m 范围内的粒度曲线变化趋势与荒山剖面黄土–古土壤沉积序列 S_3 阶段大致对应，上下 2 段均有明显的相对变粗，此阶段应处于较为温暖的气候环境下。说明可能处于中更新世晚期冰期次一级气候旋回，与哈尔滨组的形成沉积环境为气候干冷–弱氧化的较强冰缘环境相符(黑龙江省地质矿产局, 1993)，指示深度 39.65 m 应为荒山组和哈尔滨组的分界线。*C*–*M* 图及粒度参数散点图显示：哈尔滨组样品落在了靠近静水悬浮的区域内，可能指示其为湖泊相(滨浅湖亚相)沉

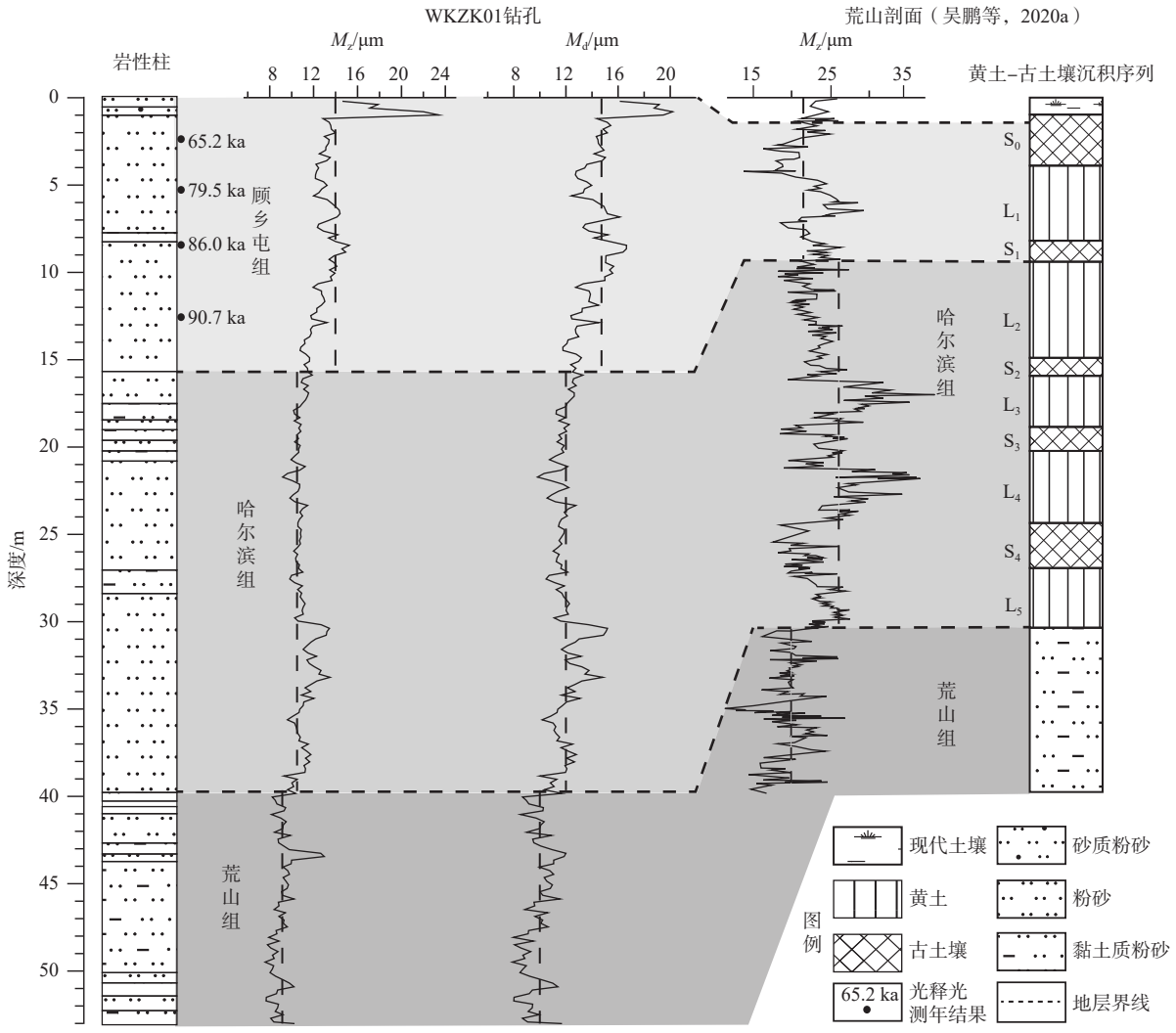


图 6 WKZK01 钻孔岩芯粒度参数特征及其与哈尔滨荒山剖面粒度特征对比

Fig. 6 Grain size parameter characteristics of borehole WKZK01 and comparison with the grain size characteristics of the Huangshan section in Harbin

积物。基于孢粉组合特征、岩性特征、粒度参数散点图以及 *C*–*M* 图较好地控制了中更新统哈尔滨组的层位。

上更新统顾乡屯组：望奎 WKZK01 钻孔岩芯中的 1～5 小层，揭示的钻孔深度为 0～15.6 m，1 个粉砂–黏土质粉砂沉积旋回和 1 个粉砂–砂质粉砂–粉砂沉积旋回，岩性为粉砂、黏土质粉砂、砂质粉砂，以黄褐色、棕黑色、灰黑色为主，少量孔隙，少量根系，含铁染锈斑，并具有一层古土壤。中国第四纪地层东北亚区记录的顾乡屯组描述为：沉积物颜色为棕黑色、灰黑色、灰黄色、棕黄色为主（田明中和程捷，2020；王永等，2020）；黄褐色、灰黄色、灰黑色（黑龙江省地质矿产局，1993），包括上下 2 段，上段为灰黑色亚黏土、淡黄色黄土状土夹古土壤，下段黏土质粉砂、黏土（王永等，2020）。望奎 WKZK01 钻孔顾乡屯组沉积物岩性特征与区域地层具有一致性。光释光测年在该地层内获得 4 个有效年龄（图 6）分别为 65.2±2.8 ka（深度 2.33 m）、79.5±2.4 ka（深度 5.08 m）、86.0±3.7 ka（深度 8.84 m）、90.7±4.9 ka（深度 12.19 m），均处于晚更新世地质时期。孢粉带 II 指示了冷湿古气候。另外，该带出现较多淡水藻类，指示沉积点附近或存在水体环境。此时蕨类苔藓孢子含量突出，或预示当时存在较强的水流搬运过程。与哈尔滨荒山剖面记录的顾乡屯组孢粉组合为干冷湿润古气候特征基本吻合（王恩宝，2012）。以望奎 WKZK01 钻孔深度 15.6 m 为界，上下 2 套沉积物颜色发生明显变化，分界以上沉积物颜色变化与末次间冰期–末次冰期气候旋回特征基本相同，可与哈尔滨组及顾乡屯组的分界线、荒山剖面黄土–古土壤沉积序列 S_1 阶段（73～128 ka）底界大致对应

（王永等，2020；田明中和程捷，2020；图 6），且在 1.1 m 处平均粒径明显变粗，气候变得干冷，说明其可能处于末次冰期中的末次盛冰期阶段（19.0～26.5 ka；田明中和程捷，2020），未达到全新世的底界 11.7 ka。*C*–*M* 图及粒度参数散点图显示：顾乡屯组样品落在了靠近均匀悬浮的区域内，若在 *C*–*M* 图中显示为均匀悬浮沉积，属典型曲流河沉积（刘智荣等，2021），据此判断顾乡屯组可能为河流相沉积，以上均与顾乡屯组的形成时期以及其河流相成因相吻合。基于年代测试结果、孢粉组合特征、岩性特征、粒度参数散点图以及 *C*–*M* 图较好地控制了上更新统顾乡屯组的层位，揭示了晚更新世整个地质时期的沉积地层。

综合年代测试结果、孢粉组合特征、岩性特征、粒度特征以及黄土–古土壤沉积序列研究（图 6），最终建立了望奎 WKZK01 钻孔第四纪地层层序。望奎 WKZK01 钻孔中更新世荒山组为 39.65～52.7 m、中更新世哈尔滨组为 15.6～39.65 m、晚更新世顾乡屯组地层为 0～15.6 m，钻孔未钻遇全新世坦途组。

4.2　钻孔第四纪沉积环境演化

根据孢粉分析结果及粒度特征对松嫩平原第四纪沉积环境、气候变化作简要分析。在距今 940 ka 时，佳依分水岭被切穿，古水系发生反转，形成松嫩古大湖（吴鹏等，2020b；王嘉新等，2020；徐园园等，2022），古大湖的边界沿着林甸与依安之间的三兴–齐齐哈尔东南的烟筒屯–坦途–白城东–洮南–安定–乌兰花–瞻榆–太平川–科左中旗东北–长岭–前郭尔罗斯–扶余–肇源–安达西等一线分布（裘善文等，2012，2014），望奎县不属于松嫩古大湖的涵盖范围（图 1）。研究发现望奎 WKZK01 钻孔岩芯记录的地层由老至新沉积相划分为湖泊相和河流相，平均粒度表现为逐渐增大，一些学者认为湖泊沉积物较粗指示湖泊收缩、湖水较浅的干旱气候环境，湖泊沉积物较细则指示湖泊扩张、湖水较深的湿润气候环境（何华春等，2005；王心源等，2008；李志忠等，2010）。基于以上，钻孔岩芯记录了松嫩古大湖周边面积较小的湖泊由湖心到湖滨最后消亡形成河流的环境演化过程。中更新世荒山组时期，区域上都是湖泊的分布，经依舒断裂导致多次沉降，大约至 450～476 ka 时松嫩古大湖衰亡（詹涛等，2019；马永法等，2021）。望奎 WKZK01 钻孔当时处于相对较为低洼区域，不属于松嫩古大湖涵盖范围，而是松嫩古大湖周边面积较小的湖泊，小湖泊在古大湖消亡后依然残存下来，不断接受沉积，属于湖泊相（半深湖–深湖亚相）沉积。中更新世哈尔滨组时期，孢粉化石组合以及粒度参数特征对古气候具有很好的指示，哈尔滨组形成于凉干的古气候条件，并与荒山剖面黄土–古土壤沉积序列大致对应（张月馨等，2020；张曼等，2021；图 6），但望奎钻孔岩芯内并没有发现明显的哈尔滨组风成沉积物的一些相关支持性证据。据此认为望奎 WKZK01 钻孔哈尔滨组并不是风成成因，而是与荒山剖面哈尔滨组同时异相，属于经水流改造后的 1 套次生黄土成因，此观点与已有报道认为的哈尔滨组为次生黄土状土的结论相吻合（孙建中等，1982；王恩宝，2012；田明中和程捷，2020），且钻孔中并没有明显的较粗的砂及砾石等大颗粒沉积物，根据有关次生黄土的定义（田明中和程捷，2020），推断其形成环境可能是较稳定的湖泊，属于湖泊相（滨浅湖亚相）沉积。晚更新世顾乡屯组时期，经历中更新世晚期冰期后，湖泊彻底消亡，经过河湖转换期，发育大量的河流，区域上以河流相沉积物为主。

结合松嫩平原已有成果（林年丰和汤洁，2005；王恩宝，2012；马永法等，2021），根据钻孔孢粉分析结果推断沉积物形成时期望奎地区的气候环境，可将望奎 WKZK01 钻孔地层划分 3 个古气候序列，中更新世荒山组时期以陆生草本喜干植物花粉为主，少量的针阔叶混交林木本植物，无喜湿的草本植物花粉，指示了凉干的古气候。中更新世哈尔滨组时期仍以陆生草本喜干植物花粉为主，针阔叶混交林木本植物次之，出现喜湿的草本植物花粉，指示了凉湿的古气候。晚更新世顾乡屯组时期各植物花粉含量较少，较上阶段相比，喜湿草本植物花粉含量升高，陆生木本、草本含量急剧下降，指示了冷湿的古气候。基于以上，说明古气候变化大致经历了中更新世早期凉干古气候、中更新晚期凉湿古气候、晚更新世冷湿古气候 3 个发展过程。

此外，裘善文等（2012，2014）虽认为松嫩古大湖湖心位置为吉林省乾安县城，且对其范围进行了系统的圈定，但由于当时相似的气候环境条件下，区域上可能都是湖泊的分布，松嫩古大湖的边界可能会向外延伸，因此可推测其东北缘边界覆盖望奎县，下一步研究将会在望奎县到乾安县沿途寻找松嫩古大湖分布范围更为直接的沉积学、年代学证据。

5 结论

(1)松嫩平原东部望奎 WKZK01 钻孔岩芯岩性主要为粉砂、黏土质粉砂,少部分为砂质粉砂。地层由老至新可划分为中更新统荒山组、中更新统哈尔滨组、上更新统顾乡屯组,无全新统坦途组沉积。

(2)沉积相划分:其中荒山组(39.65～52.7 m)为湖泊相沉积、哈尔滨组(15.6～39.65 m)为湖泊相沉积、顾乡屯组(0～15.6 m)为河流相沉积。沉积地层记录了松嫩古大湖周边面积较小的湖泊由湖心到湖滨最后消亡形成河流的环境演化过程。

(3)根据钻孔孢粉分析结果推断沉积物形成时期望奎地区的气候环境,可将 WKZK01 钻孔地层划分为中更新世荒山组时期凉干气候、中更新世哈尔滨组时期凉湿气候、晚更新世顾乡屯组时期冷湿气候 3 个古气候沉积序列。

References

Bureau of Geology and Mineral Resoures of Heilongjiang Province, 1993. Regional geology of Heilongjiang province[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)

Editorial Board of Chinese Vegetation, 1980. Vegetation of China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

FENG Z Z, 1993. Sedimentary petrology[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)

GAO H Y, XIE Y Y, CHI Y P, et al., 2023. Sedimentary composition and detrital zircon U-Pb dating of the sand-gravel profile in Binxian County, Harbin: Indications for sedimentary environment and regional tectonic evolution[J]. Chinese Journal of Geology, 58(4): 1354-1372. (in Chinese with English abstract)

GAO W, JIA D C, LI T L, et al., 2013. Stratigraphic boundary between Middle and Upper Pleistocene Series in Eastern Songliao Plain: age of optical luminescennce and element changes[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 43(6): 1889-1896. (in Chinese with English abstract)

HE H C, DING H Y, ZHANG Z K, et al., 2005. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake Sediments[J]. Scientia Geographica Sinica, 25(5): 590-596. (in Chinese with English abstract)

HOU X R, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2023. Sedimentological characteristics of the Baitushan Formation in the Eastern Foothills of the Great Xing'an Range: implications for stratigraphic divisions[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(3): 720-734. (in Chinese with English abstract)

LIN N F, TANG J, 2005. Study on the environment evolution and the analysis of causes to land salinization and desertification in Songnen Plain[J]. Quaternary Sciences, 25(4): 474-483. (in Chinese with English abstract)

LENG Y K, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2023. Sedimentary characteristics and environmental significance of the Juren Sandy Gravel Profile in Harbin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(2): 472-484. (in Chinese with English abstract)

LI W Y, YAO Z J, 1990. A study on the quantitative relationship between pinus pollen in surface sample and *Pinus* vegetation[J]. Acta Botanica Sinica, 32(12): 943-950. (in Chinese with English abstract)

LI X X, MAO D L, LAI F B, et al., 2024. Grain size characteristics and sand source analysis of three aeolian landforms in the lower reaches of the Qira River floodplain[J]. Arid Zone Research, 41(8): 1413-1422. (in Chinese with English abstract)

LI Z Z, LING Z Y, CHEN X L, et al., 2010. Late holocene climate changes revealed by Grain-size cycles in takemukul desert in Yili of Xinjiang[J]. Scientia Geographica Sinica, 30(4): 613-619. (in Chinese with English abstract)

LINK A G, 1966. Textural classification of sediments[J]. Sedimentology, 7(3): 249-254.

LIU D Y, LI W R, PENG S S, et al., 2010. Current application of grain size analysis in Chinese loess paleoclimatic study[J]. Periodical of Ocean University of China, 40(2): 79-84. (in Chinese with English abstract).

LIU Z R, XUE H Y, WANG C S, 2021. Late Quaternary depositional characteristics and environment significance of the Xibozhang section in Baoding, central Hebei Plain, China[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 1011-1023. (in Chinese with English abstract)

MA Y F, ZHAN T, YANG Y, et al., 2021. The indication of chroma characteristics and its palaeoclimatic significance in the Tianhengshan (THS) core from the eastern part of the Northeast China Plain to the evolution of Songnen paleo-lake[J]. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3519-3531. (in Chinese with English abstract)

QIU S W, WANG X K, ZHANG S Q, et al., 2012. The evolution of the Large Paleolake in Songliao plain and its formation[J]. Quaternary Sciences, 32(5): 1011-1021. (in Chinese with English abstract)

QIU S W, WANG X K, MAKHINOV A N, et al., 2014. Summary of the paleodrainage pattern changes in the Northeast China Plain and its neighboring areas[J]. Acta Geographica Sinica, 69(11): 1604-1614. (in Chinese with English abstract)

SHEPARD F P, 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. Journal of Sedimentary Research, 24(3): 151-158.

SUN J H, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2022. Stratigraphic properties of the baitushan formation in Ping'an town, the eastern foot of the Great Hinggan Mountains: an indication of provenance and sedimentary environment[J]. Journal of Stratigraphy, 46(2): 196-208. (in Chinese with English abstract)

SUN J Z, WANG Y Z, ZHANG Q Y, 1982. Classification of Quaternary stratigraphy in Songliao Plain-Application of several chronological methods[J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)(2): 79-91, 10. (in Chinese)

SUN Y, XIE Y Y, CHI Y P, et al., 2022. Stratigraphic characteristics of the Baitushan Formation in Longjiang county, eastern foothills of the great

Xing'an Range, China: chemical weathering, sediment cycling, source-sink system and sedimentary environment[J]. Mountain Research, 40(1): 14-28. (in Chinese with English abstract)

TIAN M Z, CHENG J, 2020. Quaternary geology and geomorphology[M]. 2nd ed. Beijing: Geology Press. (in Chinese)

WANG E B, 2012. Quaternary sedimentary sequences and their environmental significance in Harbin Area[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)

WANG J X, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2020. The indication of the heavy mineral characteristics of the core in Harbin Huangshan to the Quaternary drainage evolution of Songhua River[J]. Quaternary Sciences, 40(1): 79-94. (in Chinese with English abstract)

WANG X Y, WU L, ZHANG G S, et al., 2008. Characteristics and environmental significance of magnetic susceptibility and grain size of lake sediments since Holocene in Chaohu Lake, Anhui Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 28(4): 548-553. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, DONG J, YANG J S, 2020. Quaternary Stratigraphy of the Huangshan Section in Harbin[J]. Earth Science, 45(7): 2662-2672. (in Chinese with English abstract)

WU P, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2020a. The genesis of Huangshan loess in Harbin: integrated evidence from grain size, geochemistry, magnetization, sedimentation and landform[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(3): 420-430. (in Chinese with English abstract)

WU P, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2020b. The capture of the Songhua River system in the late Early Pleistocene: geochemical and sedimentological records[J]. Acta Geologica Sinica, 94(10): 3144-3160. (in Chinese with English abstract)

WU X H, PU Q Y, QIAN F, et al., 1984. Preliminary study on the quaternary magnetostratigraphy of the Songliao plain in North-East China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 4(2): 1-13. (in Chinese with English abstract)

XIE Y Y, YUAN F, ZHAN T, et al., 2018. Geochemistry of loess deposits in northeastern China: constraint on provenance and implication for disappearance of the large Songliao palaeolake[J]. Journal of the Geological Society, 175(1): 146-162.

XU Y Y, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2022. Drainage evolution of the Songhua River system in the Early Pleistocene: evidence from TIMA minerals and geochemistry[J]. Chinese Journal of Geology, 57(1): 190-206. (in Chinese with English abstract)

ZENG J L, CHI Y P, XIE Y Y, et al. , 2024. Stratigraphic attribute characteristics of sand and gravel accumulation of Sanjiedi Profile in Harbin, China[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 1-21[2024-11-27]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.026. (in Chinese with English abstract)

ZHAN T, ZENG F M, XIE Y Y, et al., 2018. Grain size characteristics of Tianhengshan core and their indications for stratigraphic division in the eastern part of the northeast plain of China[J]. Journal of Geomechanics, 24(4): 515-521. (in Chinese with English abstract)

ZHAN T, ZENG F M, XIE Y Y, et al., 2019. Magnetostratigraphic dating of a drill core from the Northeast Plain of China: implications for the evolution of Songnen paleo-lake[J]. Chinese Science Bulletin, 64(11): 1179-1190. (in Chinese with English abstract)

ZHANG M, XIE Y Y, KANG C G, et al., 2021. Chemical weathering characteristics of the Loess-Paleosol Sequences in Harbin Huangshan Rock Core: implication for formation environment of the Paleosol[J]. Acta Pedologica Sinica, 58(3): 673-684. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X, ZHENG Z, HUANG K Y, et al., 2020. Sensitivity of altitudinal vegetation in Southwest China to changes in the Indian summer monsoon during the past 68000 years[J]. Quaternary Science Reviews, 239: 106359.

ZHANG Y X, CHI Y P, XIE Y Y, et al., 2020. Organic carbon isotope composition of Harbin loess since the Mid-Pleistocene and its paleoclimatic significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(4): 525-534. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

冯增昭，1993. 沉积岩石学[M]. 2 版. 北京：石油工业出版社.

高宏宇，谢远云，迟云平，等，2023. 哈尔滨宾县砂砾石剖面沉积物组成及碎屑锆石 U-Pb 测年：对沉积环境和区域构造演化的指示[J]. 地质科学，58(4)：1354-1372.

高文，贾大成，李桐林，等，2013. 松嫩平原东部中、晚更新世地层界限：光释光年龄及元素变化[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，43(6)：1889-1896.

何华春，丁海燕，张振克，等，2005. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 地理科学，25(5)：590-596.

黑龙江省地质矿产局，1993. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京：地质出版社.

侯心茹，谢远云，康春国，等，2023. 大兴安岭东麓白土山组地层的沉积学特征：对地层划分的指示[J]. 沉积学报，41(3)：720-734.

林年丰，汤洁，2005. 松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒漠化的成因分析[J]. 第四纪研究，25(4)：474-483.

冷宇坤，谢远云，康春国，等，2023. 哈尔滨居仁砂砾石剖面沉积特征及其环境意义[J]. 沉积学报，41(2)：472-484.

李文漪，姚祖驹，1990. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究[J]. 植物学报，32(12)：943-950.

李鑫鑫，毛东雷，来风兵，等，2024. 策勒河下游风积地貌沉积物粒度特征及沙源分析[J]. 干旱区研究，41(8)：1413-1422.

李志忠，凌智永，陈秀玲，等，2010. 新疆伊犁河谷晚全新世风沙沉积粒度旋回与气候变化[J]. 地理科学，30(4)：613-619.

刘冬雁，李巍然，彭莎莎，等，2010. 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，40(2)：79-84.

刘智荣，薛怀宇，王昌盛，2021. 河北平原中部保定西伯章剖面晚第四纪沉积特征及其环境意义[J]. 地质力学学报，27(6)：1011-1023.

马永法，詹涛，杨业，等，2021. 东北平原东部天恒山钻孔色度变化特征与古气候意义及对松嫩古湖演化的指示[J]. 地质学报，95(11)：3519-3531.

裘善文, 王锡魁, 张淑芹, 等, 2012. 松辽平原古大湖演变及其平原的形成[J]. 第四纪研究, 32(5): 1011-1021.

裘善文, 王锡魁, MAKHINOV A N, 等, 2014. 中国东北平原及毗邻地区古水文网变迁研究综述[J]. 地理学报, 69(11): 1604-1614.

孙建华, 谢远云, 康春国, 等, 2022. 大兴安岭东麓平安镇白土山组的地层属性: 对物源和沉积环境的指示[J]. 地层学杂志, 46(2): 196-208.

孙建中, 王雨灼, 张庆云, 1982. 松辽平原第四纪地层的划分: 几种年代学方法的应用[J]. 长安大学学报(地球科学版)(2): 79-91, 10.

孙杨, 谢远云, 迟云平, 等, 2022. 大兴安岭东麓龙江县白土山组地层特征: 化学风化、沉积循环、源-汇体系和沉积环境[J]. 山地学报, 40(1): 14-28.

田明中, 程捷, 2020. 第四纪地质学与地貌学[M]. 2版. 北京: 地质出版社.

王恩宝, 2012. 哈尔滨地区第四纪沉积序列及其环境意义[D]. 长春: 吉林大学.

王嘉新, 谢远云, 康春国, 等, 2020. 哈尔滨荒山岩芯重矿物特征对松花江第四纪水系演化的指示[J]. 第四纪研究, 40(1): 79-94.

王心源, 吴立, 张广胜, 等, 2008. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义[J]. 地理科学, 28(4): 548-553.

王永, 董进, 杨劲松, 2020. 哈尔滨荒山剖面第四纪地层研究[J]. 地球科学, 45(7): 2662-2672.

吴鹏, 谢远云, 康春国, 等, 2020a. 哈尔滨荒山黄土的成因: 粒度、地球化学、磁化率、沉积和地貌特征的整合记录[J]. 地球学报, 41(3): 420-430.

吴鹏, 谢远云, 康春国, 等, 2020b. 早更新世晚期松花江水系袭夺: 地球化学和沉积学记录[J]. 地质学报, 94(10): 3144-3160.

吴锡浩, 浦庆余, 钱方, 等, 1984. 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, 4(2): 1-13.

徐园园, 谢远云, 康春国, 等, 2022. 松花江早更新世水系演化: 来自TIMA矿物和地球化学的证据[J]. 地质科学, 57(1): 190-206.

曾吉莉, 迟云平, 谢远云, 等, 2024. 哈尔滨三截地砂砾石堆积地层属性特征: 对地层区域划分和构造的指示[J/OL]. 沉积学报, 1-21[2024-11-27]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.026.

詹涛, 曾方明, 谢远云, 等, 2018. 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[J]. 地质力学学报, 24(4): 515-521.

詹涛, 曾方明, 谢远云, 等, 2019. 东北平原钻孔的磁性地层定年及松嫩古湖演化[J]. 科学通报, 64(11): 1179-1190.

张曼, 谢远云, 康春国, 等, 2021. 哈尔滨荒山岩芯黄土-古土壤的化学风化特征: 对古土壤形成环境指示[J]. 土壤学报, 58(3): 673-684.

张月馨, 迟云平, 谢远云, 等, 2020. 中更新世以来哈尔滨黄土有机碳同位素组成及其古气候意义[J]. 地球学报, 41(4): 525-534.

中国植被编辑委员会, 1980. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社.