

doi: 10.11720/wtyht.2023.1005

周永刚,戴黎明,田振环,等.鲁北平原南部 QK4 钻孔岩心特征及第四纪地层划分[J].物探与化探,2023,47(1):55-64. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1005

Zhou Y G, Dai L M, Tian Z H, et al. Core characteristics and Quaternary stratigraphic division of borehole QK4 in southern Lubei Plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1): 55-64. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1005

鲁北平原南部 QK4 钻孔岩心特征及第四纪地层划分

周永刚^{1,2},戴黎明^{3,4},田振环^{1,2},于春楠^{1,2},张振飞^{1,2,5},刘伟^{1,2},裴伦培^{1,2}

(1. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250109; 2. 山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 山东 济南 250109; 3. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266237; 5. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 第四纪地层格架的建立对区域地层对比及古地理环境演化研究具有重要意义, 区域上晚更新世以来的地层已被广泛研究, 但对完整的第四纪地层格架研究不足。为此, 对鲁北平原 QK4 钻孔(深度 285.98 m)进行了古地磁、AMS ¹⁴C、OSL、测井、岩石地层等研究。在系统的古地磁采集(398 件)、处理和测试的基础上, 认为岩心记录了布容正极性时(Brunhes)、松山负极性时(Matuyama)、高斯正极性时(Gauss)及其中的部分极性亚时。在磁性年代框架的基础上, 结合 AMS ¹⁴C、OSL、测井及岩石地层特征, 对钻孔揭露的第四纪地层进行了划分, 确定了全新统、上更新统、中更新统、下更新统的底界分别位于 4.11、23.49、118.70、147.35 m, 钻孔揭露的地层从上向下依次为新生界黑土湖组、大站组、平原组和明化镇组。研究结果建立了鲁北平原南部第四纪地层格架, 为该区第四纪地层划分对比、古地理环境演化等提供了可靠的岩石学、年代学、古地磁学证据。

关键词: 鲁北平原; 古地磁; AMS ¹⁴C 测年; OSL 测年; 第四纪

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)01-0055-10

0 引言

前人对鲁北平原第四纪地层的研究主要集中在中东部, 主要涉及黄河河道迁移演变^[1]、三角洲形成演化^[2-4]、海岸线变迁、海进海退^[5]、小清河流域湖泊演化^[6]等内容, 其主要目的是为研究晚更新世以来的地层结构、海侵事件、气候变化及河道变迁等内容, 获得的钻孔较浅, 一般未穿透第四系。而第四纪以来的几次海侵事件, 最大海侵面未到达该区^[7-11], 故研究区内的第四系未受到广泛关注。少数学者^[12-13]对区域上平原区和山丘区的第四纪地层划分、沉积相、沉积环境等进行了研究, 但研究方法以岩石地层分析、测年为主, 方法较单一, 尤其对山地—丘陵区与平原区之间的过渡地带研究较少。

本文以“山东省 1:5 万长山、桓台县、淄博市幅区域地质调查”项目标准孔 QK4 孔岩心资料为基础, 通过岩性地层分析、古地磁、测井、测年(¹⁴C、OSL)等方法, 结合区域研究资料, 开展岩石地层学、磁性地层学及年代地层学研究, 建立该区山地—丘陵区和平原区过渡地带的第四纪地层剖面, 以期为区域上第四纪地层划分、演化提供基础资料。

1 地质背景

鲁北平原位于山东省北部(图 1), 鲁中山区以北, 东邻渤海, 西靠河南、北接河北, 总体上呈 NE 方向, 行政区划隶属山东省济南市、淄博市、东营市、滨州市、德州市、聊城市等地。区内有黄河和小清河 2 条大型河流穿过, 向北东汇流入海。

收稿日期: 2022-01-22; 修回日期: 2022-02-23

基金项目: 山东省地质勘查基金项目“山东省 1:5 万长山、桓台县、淄博市幅区域地质调查”(鲁勘字(2013)64 号)

第一作者: 周永刚(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域地质调查与矿产勘查、遥感地质等工作。Email: 187346471@qq.com

研究区位于齐河—广饶断裂以南,大地构造位于华北板块(Ⅰ)东部,鲁西隆起(Ⅱ)区之鲁中隆起(Ⅱ_a)的鲁山—邹平断隆(Ⅱ_{a2})北侧的邹平—周村凹陷(Ⅱ_{a2}¹),地层区划属华北—柴达木地层大区,华北地层区的鲁西地层分区^[14]。区域上出露的主要有古生代的寒武—奥陶纪、石炭—二叠纪,中生代的三叠—白垩纪以及新生代的古近纪、第四纪等地层。岩浆岩主要为中生代沂南序列的侵入岩。构造活动主要表现为断裂构造、岩浆活动等,盖层及侵入岩变

形以浅层次或表层次的脆性断裂为特征,主要发育近 EW 向、NE 向、近 SN 向和 NW 向 4 组断裂构造。

QK4 钻孔位于鲁北平原南部,山地—丘陵区与冲积平原的交接地带,地势南高北低,位于小清河南侧,钻孔地理坐标:117°52′44.87″E,36°59′24.82″N,周边未见基岩出露,为第四纪松散沉积物覆盖,主要为黑土湖组、临沂组。通过可控源音频大地电磁测深推断北侧为齐河—广饶断裂,西侧为金山—姚家峪断裂。

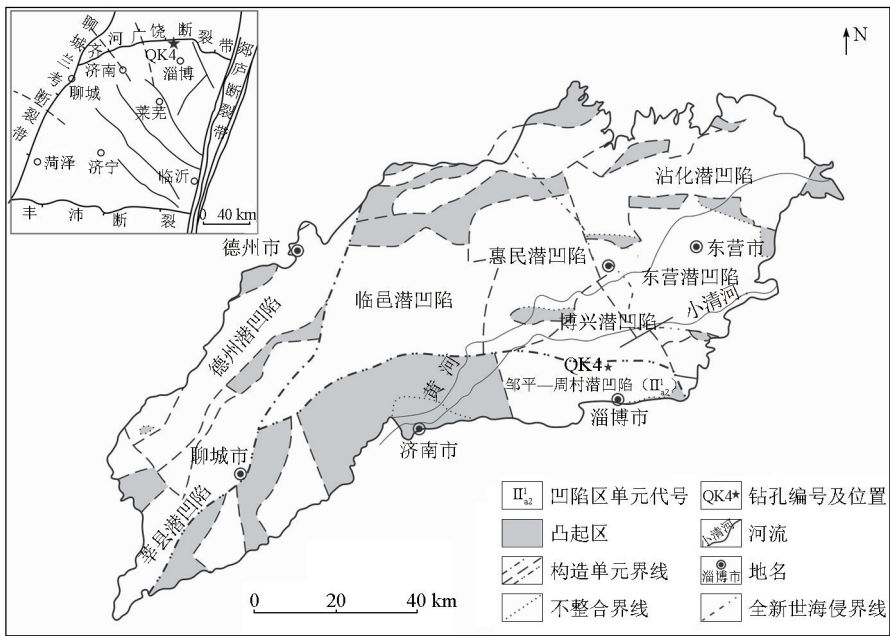


图1 鲁北平原构造简图(底图据[14-17]修改)

Fig. 1 Structural map of Lubei Plain (modified from reference [14-17])

2 样品的采集与分析测试方法

QK4 钻孔采集 AMS ¹⁴C 样品 1 件,分析测试在自然资源部地下水科学与工程重点实验室完成。主要测试仪器为超低本底液体闪烁谱仪,型号 PE 1220 QUANTULUS,测试温度 22 °C,湿度 30%,置信概率约为 95%。¹⁴C 测年校正年龄以 CALIB7.0.4 软件计算所得,采用 INTCAL13 校正曲线,该曲线可对 0~46 400 cal B. P. 范围内的年龄进行校正,其中 0~12 500 cal B. P. 基于树轮校正,超过 12 500 cal B. P. 者以海洋珊瑚与纹泥数据进行校正。校正年龄的半衰期为 5 730 a。

QK4 钻孔采集 OSL 样品 3 件,分析测试在自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成。样品在 Daybreak 2200(美国)光释光仪上测定,该系统兰光源波长为 470 nm,半宽 5 nm,最大功率为 60 mW/

cm²;红外光源波长为 880 nm,半宽 10 nm,最大功率为 80 mW/cm²,选择最大功率进行测量。预热温度为 260 °C 10 s,试验剂量预热温度 220 °C 10s。需要辐照的测片在 801E 辐照仪中进行的,其 90Sr-Yβ 放射源的照射剂量率约为 0.085 918 Gy/s。

地球物理测井由山东省煤田地质局第三勘探队完成,使用仪器为重庆地质仪器厂生产的 JGS-2 型智能数字测井系统,探管型号 DIEJIA,测井速度 6 m/s,主要测试参数和技术指标:自然伽马,范围 0~320 00 cps、误差 ≤5%;密度范围 1~4 g/cm³,精度 0.01 g/cm³;自然电位,范围-2~2 V,误差 ±2.5 mV;侧向电阻率 0~2 kΩ·m,误差 ≤2%;井径 50~300 mm;顶角 0°~70°,精度 ≤0.1°;方位角 0°~360°,精度 ≤5°。资料解释使用重庆地质仪器厂提供的配套资料处理系统软件,将采集的数据进行倒序、深度对齐、数据纠错及滤波,并按照不同仪器的刻度系数进行数字计算,转换成岩石物性响应值和密度。

QK4 钻孔采集样品 400 件进行古地磁测试,其中有 2 件样品因松动不满足测试条件。取样间距 0.3~0.8 m,平均 0.5 m,尽量错过粗砂砾层,采取其中的粘土—细砂层位进行测试。岩心均在现场用无磁刀具剖开,用无磁性塑料盒(规格为 2 cm×2 cm×2 cm)取样,盒上标注顶底面及方向,以保证方向正确。古地磁测试在国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成。首先,选取了约百分之十的样品进行系统退磁,经试验 20 mT 是大部分样品的最佳退磁场。因此,大部分样品选择 20 mT 退磁场,占样品总数的 59.30%;部分样品选择 25 mT 退磁场,占样品总数的 34.17%;个别层位样品采用热退磁(700℃)手段进行退磁,占样品总数的 6.53%。在磁屏蔽空间,所用的交变退磁仪器为国产 JB1 型交变退磁仪,热退磁仪器为捷克 TD48 热退磁炉,剩磁测量仪器采用了捷克产双速旋转磁力仪 JR6A。测量完成后,利用 Enkin 古地磁处理软件进行主向量分析,以“最小二乘法拟合”方法计算每个样品的特征剩磁方向,根据特征剩磁的倾角变化判断古地磁极是否发生倒转。

3 岩石地层、年代地层及地球物理地层划分与分析

3.1 岩石地层

QK4 钻孔位于山东省淄博市桓台县南薛村西,孔口高程 12.09 m,终孔深度 285.98 m,岩心采取率为 94%。揭露岩性主要有粘土、粉砂、砂、砂砾以及过渡岩性等,野外划分为 391 层,根据沉积物的颜色、结构、构造及其沉积组合特征划分为 11 层。自上而下分别为:

1) 0~0.18 m, 回填土。

2) 0.18~4.11 m, 黑土湖组,岩性主要为浅棕灰色—深棕色—极深棕色—极深灰色粘土、含粉砂粘土夹粘土质粉砂。中下部见有黄棕色潜育化斑块,底部见有绿灰色潜育化斑块,局部见有钙质结核,0.58 m 处见厚约 1~2 mm 的水平黑色粘土纹层,偶见有黑色有机质、炭质或铁锰质细点,为湖沼相。张祖陆等^[6]在研究山东小清河流域湖泊的环境变迁时发现,早—中全新世气候温暖湿润,海平面上升,在湿润气候的丰富降水影响下,形成了大规模的暗色湖沼沉积。王世进等^[13]研究认为,该层沉积是黑土湖组。

3) 4.11~14.47 m, 大站组一段,岩性主要为黄棕色、棕色粘土、含粉砂粘土。总体颜色较纯、质地

均匀,上部偶见有强棕色潜育化斑点/块,见有黑色炭质细点/结核,大小约 1~4 mm,为风积相。张祖陆等^[6]、杨剑萍等^[11]、王海峰等^[15]研究发现,全新世湖沼相沉积之下为大站组风成黄土。

4) 14.47~17.76 m, 大站组二段,岩性主要为深黄棕色、黄棕色含粘土粉细砂、细砂、含粉细砂粘土。表现为几个下粗上细的沉积韵律组合,上部夹一层厚约 2 cm 的水平细砂层,含水;中下部见一直径约 5~8 mm 的钙质结核,底部见一层厚约 10 cm 的粘土层,其中见有小螺化石,局部夹有薄层水平粘土层,二元结构重复出现,为河流相。

5) 17.76~23.49 m, 大站组三段,岩性主要为黄棕色、深黄棕色、棕色含粘土粉砂、含粉砂粘土。上部 18.20~18.39 m 为钙质结核富集层,钙质结核直径 3~25 mm 不等,以 7~8 mm 为主,其他部分偶见钙质结核;中部见少量炭质细点,大小约 1~2 mm,为黄土沉积层。

6) 23.49~45.30 m, 平原组一段,岩性主要为黄棕色、棕色粘土、含粉砂粘土。顶部见有发育潜育化斑块的极深灰棕色、深灰棕色粘土、含粉砂粘土,厚约 2.11 m。中部可见反映氧化环境的潜育化和反映还原环境的潜育化混杂发育,呈斑块、条带、不规则状。38.06~39.20 m 为红棕色粘土、含粉砂粘土,质地均匀致密,反映强氧化环境。岩心中钙质结核较发育,分布不均,局部富集,结核大小约 0.2~5 cm,偶见有水平粘土条带,为河漫滩相沉积。

7) 45.30~57.53 m, 平原组二段,岩性主要为黄棕色、棕黄色、深黄棕色、棕色粘土、含粉砂粘土、含粘土粉砂与黄棕色含粘土中细粉杂砂。下部见有红棕色、强棕色、黄红色粘土、含粉砂粘土,反映强氧化环境;底部见一白色砂岩砾石,中粒结构,块状构造,石英含量约 60%,长石含量约 35%,其他约 5%。岩心中局部见黑色炭质细点富集呈团块状、条带状,沿水平纹层或穿层发育。局部发育含粘土中细砂—细砂—粉砂—粘土正粒序沉积,自下而上分别为边滩相、河漫滩相。

8) 57.53~135.17 m, 平原组三段,岩性主要为黄棕色、深黄棕色、棕色、绿灰色粘土、含粉砂粘土、含粘土粉砂,局部偶见有潜育化现象,岩心中断续发育钙质结核,大小 1~10 mm,最大可达 5 cm,局部富集成层,层厚约 1~4 cm,最宽可达 15 cm,岩心中见有黑色炭质结核,大小约 1~2.5 mm,局部稍富集,为洪泛平原相。

9) 135.17~147.39 m, 平原组四段,岩性主要为棕色、深黄棕色粉砂质粘土、含粉砂粘土、粘土,顶部

发育 19 个棕色薄层含粉砂粘土与深棕色粘土互层沉积,粘土条带宽约 0.6~1.7 cm 之间,间隔约 2.5 cm,岩心中偶见潜育化呈细脉状、侵染状,钙质结核零星发育,大小约 1~3 cm,为天然堤相。王世进等^[13]、迟培星等^[18] 研究认为,明化镇组上覆地层为第四纪平原组。

10) 147.39~259.10 m,明化镇组上段,以黄棕色、棕色、强棕色、深黄棕色含粉砂粘土、粘土、粘土质粉砂为主,局部夹有黄棕色、强棕色中细砂层,该段中常见粉砂与粘土薄互层发育,半固结,主要为一套弱氧化—氧化环境的产物。

11) 259.10~285.98 m,明化镇组下段,以绿灰色、深绿灰色粘土质粉砂、粉砂质粘土、粘土与含砾中细砂层交互出现为主,局部夹有深黄棕色、棕色含

粉砂粘土、粘土质粉砂层,半固结,主要为一套弱还原环境的产物。

3.2 年代地层

钻孔内采取¹⁴C 测年样品 1 件(表 1),样品编号 QK4-Z1,埋深 0.7~1.0 m,测得表观年龄为 6.77±0.46 ka。

钻孔内采取 OSL 测年样品 3 件(表 2),其中 QK4-GS11 生长曲线趋于饱和,不予讨论。QK4-GS1 采集于黑土湖组中的粘土质粉砂层,测试年龄为 4.8±0.3 ka,与 QK4-Z1 的¹⁴C 年龄(6.77±0.46 ka)均表明孔内黑土湖组形成于全新世。QK4-GS2 采集于大站组中的粘土层,测试年龄为 75.2±3.4 ka,表明其形成于晚更新世。

表 1 QK4 钻孔 AMS ¹⁴C 测年结果
Table 1 AMS ¹⁴C dating result of Borehole QK4

序号	样品号	埋深/m	岩性	分析结果		备注
				现代碳百分数/%	表观年龄/ka	
1	QK4-Z1	0.7~1.0	极深灰色含有机质粘土	44.11±2.45	6.77±0.46	

注:¹⁴C 半衰期为 5 730 a。

表 2 QK4 钻孔光释光测年结果
Table 2 OSL dating results of Borehole QK4

序号	样品号	埋深/m	U/ppm	Th/ppm	K/%	等效剂量 E. D(Gy)	含水量 /%	年龄/ka	备注
1	QK4-GS1	1.5~1.8	2.83±0.10	12.0±0.31	1.73±0.06	18.34±0.79	15.1	4.8±0.3	
2	QK4-GS2	14.05~14.25	2.06±0.08	9.41±0.27	1.75±0.06	239.80±3.50	16.8	75.2±3.4	
3	QK4-GS11	203~203.2	2.08±0.09	10.2±0.29	1.86±0.06	560.02±12.41	16.6	>169.0	生长曲线 趋于饱和

3.3 测井

对施工的第四系科研钻孔 QK4 孔进行综合物探测井(自然伽马、密度、井径、三侧向电阻率、自然电位),钻孔深度 285.98 m,测井深度 273.82 m(图 2)。

测井曲线中,侧向电阻率曲线与密度曲线变化趋势大致相同,与岩性变化具有一定的相关性,表现为粘土—砂质粘土层呈低值,粉砂—粗砂层表现为较高值,砾石层表现为高—特高值,从而表现出岩性的粘土—砂质粘土、粉砂—粗砂、砾石层,对应电阻率、密度曲线由低值波谷向高值波峰的变化趋势,且从测井曲线来看,电阻率曲线较密度曲线在细节上表现更好。自然伽马与侧向电阻率和密度曲线表现为负相关,在曲线细节上反映更好。自然电位与岩性变化对应不明显,可能是由于第四系含水层等因素的影响。

3.4 磁性地层

测试结果显示,磁性强度从(0.4~357.9)×10⁻³ A/m,平均值为 190.7×10⁻³ A/m。磁倾角从-85.3°~89.2°,平均为 33.5°,其中 89 个样品磁倾角为负值,

309 个样品为正值。

根据 398 个样品的磁倾角变化,可将岩心划分为 23 个磁极性带(表 3),其中包括 12 个正极性带(N)和 11 个负极性带(R)。根据实测极性柱与标准古地磁极性柱对比,可将钻孔自上而下划分为 3 个极性时段,大致对应布容(Brunhes)—松山(Matuyama)—高斯(Gauss)极性时。

本次古地磁测量成果整体反映较好,仅部分由于不同沉积环境、压实脱水效应、采样密度、样品内部结构的变动等不确定因素的影响,实测极性柱中部分极性亚时没有体现或者与标准极性柱对应较差。通过与地磁极性年表对比发现(图 3),QK4 实测极性柱上部的 R1、R2、R3、R4、R5 负极性事件与标准极性柱中 Brunhes 正极性时的 Blake、Cr0、Cr1、Cr2、Cr3 负极性亚时对应较好。中部的 N8 正极性事件持续时间较长与标准极性柱中 Matuyama 负极性时的 Olduvai 正极性亚时对应较好。下部断续出现了数层负极性亚时,其中 R10、R11 负极性亚时持续时间稍长,可能与标准极性柱中 Gauss 正极性时的

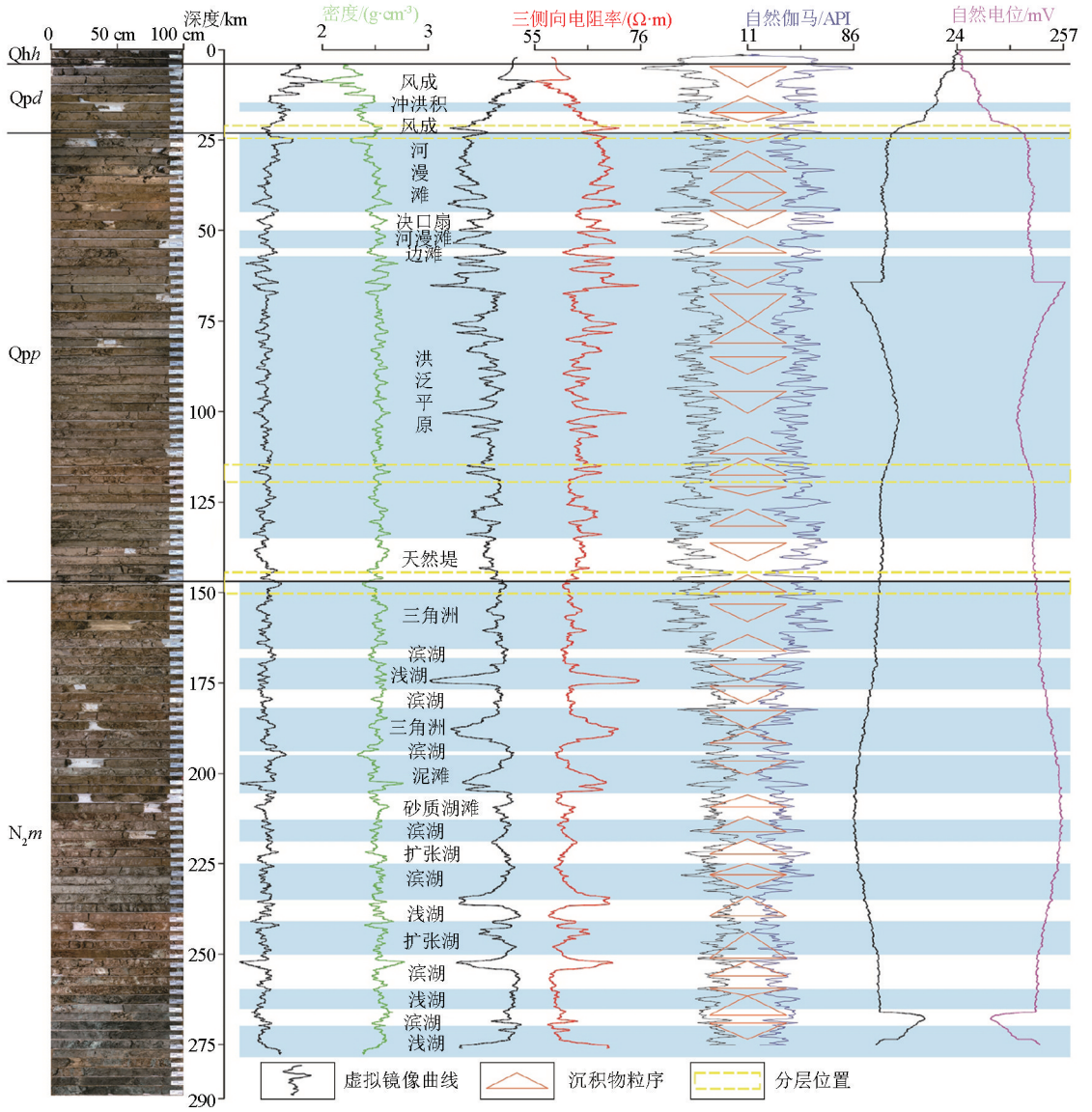


图 2 QK4 孔岩性柱、自然伽马、电阻率、密度、自然电位及沉积环境分析

Fig. 2 Lithological column, natural gamma, resistivity, density, natural potential and sedimentary environment analysis of borehole QK4

表 3 QK4 钻孔古磁性分析结果对比

Table 3 Comparison of paleomagnetism analysis results of Borehole QK4

序号	深度/m	实测极性层	标准极性带	极性亚时	年代/Ma
1	0~23.49	N1			
2	23.49~26.44	R1		Blake	0.12
3	26.44~28.40	N2			
4	28.40~29.58	R2		Cr0	0.260
5	29.58~32.10	N3			
6	32.10~33.75	R3	Brunhes	Cr1	0.319
7	33.75~65.18	N4			
8	65.18~66.88	R4		Cr2	0.543
9	66.88~72.96	N5			
10	72.96~75.08	R5		Cr3	0.593
11	75.08~116.59	N6			0.781

续表

序号	深度/m	实测极性层	标准极性带	极性亚时	年代/Ma
12	116.59~120.43	R6			
13	120.43~123.42	N7			
14	123.42~129.31	R7			
15	129.31~134.17	N8	Matuyama	Olduvai	1.77~1.95
16	134.17~141.54	R8			
17	141.54~144.69	N9			
18	144.69~147.39	R9			2.588
19	147.39~171.25	N10			
20	171.25~173.77	R10		Kaena	3.032~3.116
21	171.25~217.54	N11	Gauss		
22	217.54~221.57	R11		Mammoth	3.207~3.330
23	221.57~285.98	N12			

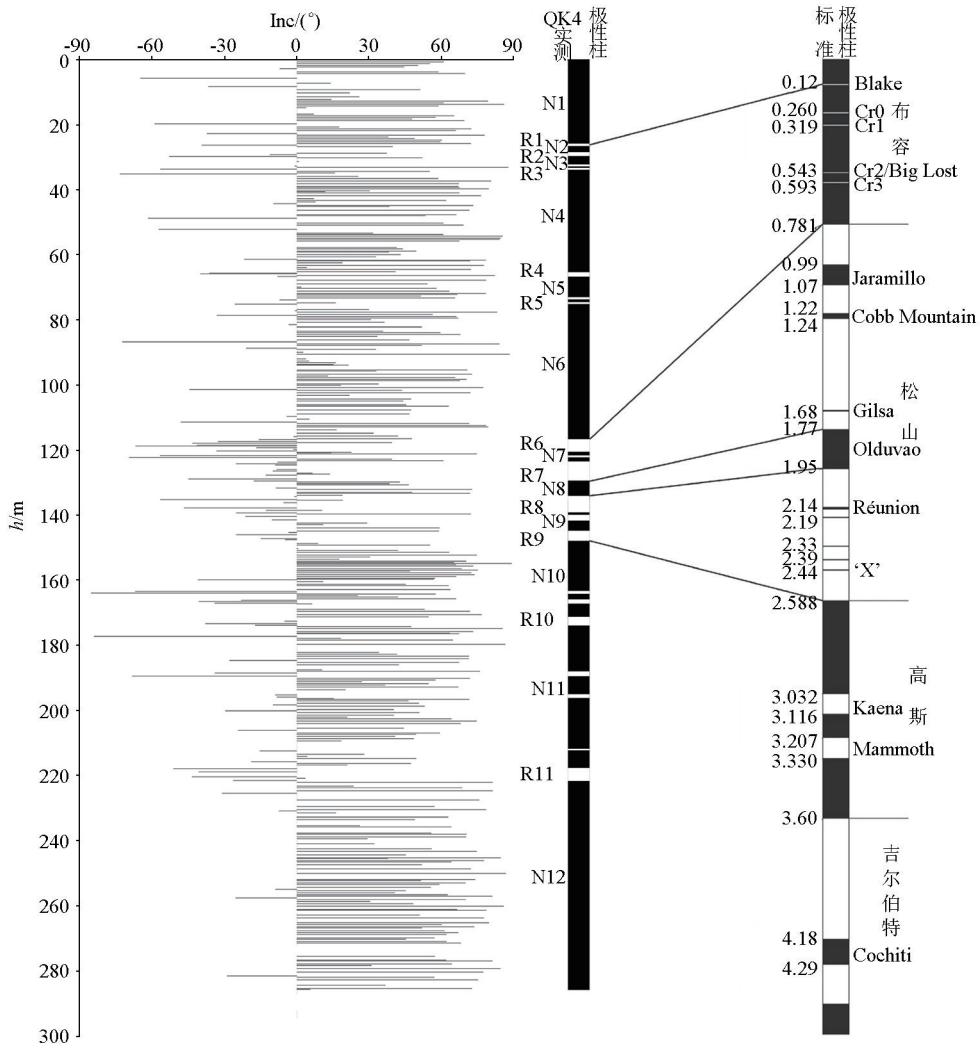


图3 QK4 钻孔磁性地层

Fig. 3 Magnetostratigraphy of borehole QK4

Kaena、Mammoth 负极性亚时对应。

4 讨论

1) 全新统底界的确定

全新统底界取大体相当于深海氧同位素 1 阶段

开始的 0.011 Ma 为界^[19], 相当于中国黄土地层中的 S₀/L₁ 界线, 是冰后期气候转暖的开始^[20]。王强等^[21-22] 研究认为, 末次冰消期以来贫营养湖沉积、含有机质层位的出现为全新世的开始。钻孔 4.11 m 上下分别以湖沼相、风积相为主。0.7~1.0 m 处 ¹⁴C 年龄为 6.77±0.46 ka, 1.5~1.8 m 处 OSL 年龄

为 4.8 ± 0.3 ka。张祖陆等^[6, 23]研究发现,小清河以南广饶、寿光、博兴等地,黄土沉积之上发育 1~2 m 的灰黑色泥质层,¹⁴C 年龄为 4518 ± 110 a B. P., 微体古生物显示为湖沼沉积,可与 QK4 孔内沉积物进行对比。结合前人研究^[6, 13, 23],认为孔内暗色沉积物属黑土湖组,4.11 m 处为全新统底界。

2) 上更新统底界的确定

晚更新世的开始时间相当于深海氧同位素 (MIS) 5 阶段的起始时间^[24-25],即 Blake 亚时之底^[26],相当于中国黄土地层中的 S_1/L_2 界线^[20]。该界线之下以发育“杂色”粘土及见有钙质结核层为主要特征^[27-30]。QK4 实测极性柱中的 R1 负极性带与 Blake 负极性亚时对应较好。在测井曲线上,21~25 m 为明显的突变异常带。在岩石地层划分上,黑土湖组之下是以风成沉积为主夹河流相的沉积特征,23.49 m 之下为潜育化、潜育化混杂发育的杂色粘土,并发育钙质结核层。14.05~14.25 m 处 OSL 年龄为 75.2 ± 3.4 ka,可与深海氧同位素 (MIS) 5 阶段的时代(75~130 ka BP)对比。结合张祖陆等^[6]、杨剑萍等^[11]、王世进等^[13]、王海峰等^[15]的研究,认为该层属大站组,23.49 m 处为上更新统底界。

3) 中更新统底界的确定

中更新统底界处于 B/M 转换面上,相当于深海氧同位素的 19/20 阶,黄土剖面的 L_8 层之中或 S_7

层底界^[20],处于古气候变化主导周期的转型时段^[31]。区域上界面埋深差别较大,大家洼 LZ908 孔 B/M 界线约 80 m^[32],东营 S3 孔 B/M 界线 170 m 以下^[33],禹城禹 2 孔 B/M 界线在 108.10 m^[26]。QK4 实测极性柱中 N6 正极性带和 R6 负极性带的界面与标准极性柱中的 B/M 界线对应较好,对应钻孔深度 116.59 m。在测井曲线上,115~119 m 为明显的突变异常。在岩石地层划分上,118.70 m 上下沉积物组合与沉积环境差异显著,两者为截然接触关系。结合以往研究^[13, 18],认为该层属平原组,推测 118.70 m 处可能为中更新统底界。

4) 下更新统底界的确定

下更新统底界,即第四系与新近系的界限(N/Q 界限),也就是古地磁极性 M/G 转换面(2.58 Ma)^[34-37],大极性时转换界线相对明显,通过古地磁 M/G 界线确定第四系下限易于实现^[26]。QK4 实测极性柱中的 N10 正极性带和 R9 负极性带的界面与标准极性柱中的 M/G 界线对应较好,对应钻孔深度 147.39 m。在测井曲线上,146~148 m 处表现出明显的突变异常。在岩石地层划分上,147.39 m 上下分别为河流相、湖泊相沉积,且下部地层含有上部地层的泥砾,两者之间为截然接触关系(见图 4)。结合以往研究资料^[13, 18],认为该层属平原组,147.39 m 处为下更新统底界。

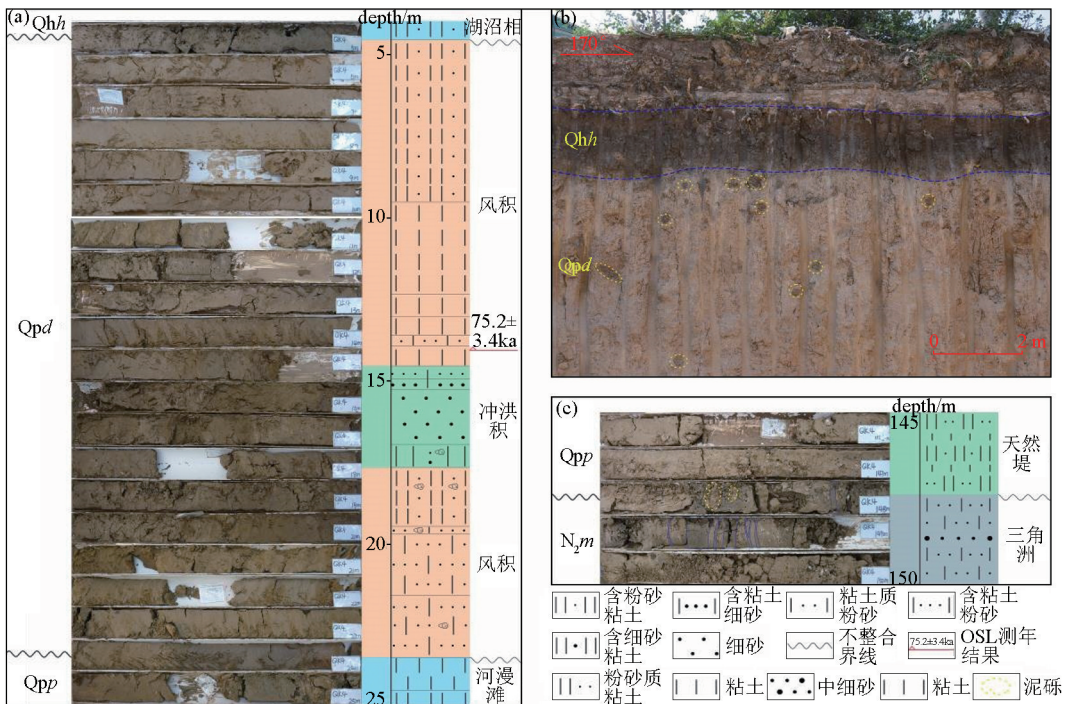


图 4 钻孔岩心及野外剖面特征

Fig. 4 Characteristics of borehole core and field profile

5 结论

1)通过对 QK4 孔古地磁分析、测试认为 0~116.59 m 为古地磁极性带的 Brunhes 正极性时,116.59~147.39 m 为古地磁极性带的 Matuyama 反极性时,147.39~285.98 m 为古地磁极性带的 Gauss 正极性时。

2)通过对 QK4 孔岩石地层、古地磁、测井、¹⁴C、OSL 等分析,并结合区域研究资料,对钻孔内第四纪地层进行了多重地层划分,其中 0.18~4.11 m 为全新统,地层属黑土湖组;4.11~23.49 m 为上更新统,地层属大站组;23.49~118.70 m 为中更新统,地层属平原组;118.70~147.39 m 为下更新统,地层属平原组。

3)钻孔中古地磁、测井分界(带)与岩石地层划分主要界面对应性较好,反映了第四纪古地磁场变化、沉积环境演变与沉积物之间的具有较好的相关性。该成果可以为鲁北平原第四纪地层划分研究提供重要支撑。

参考文献 (References) :

[1] 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 Z L. A preliminary study of the Yellow River's paleochannels in North Shandong Plain[J]. Acta Geographica Sinica,1990,45(4):457-466.

[2] 成国栋,任于灿,李绍全,等. 现代黄河三角洲河道演变及垂向序列[J]. 海洋地质与第四纪地质,1986,6(2):1-15.
Cheng G D, Ren Y C, Li S Q, et al. Channel evolution and sedimentary sequence of modern Huanghe River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,1986,6(2):1-15.

[3] 鲜本忠,姜在兴. 黄河三角洲地区全新世环境演化及海平面变化[J]. 海洋地质与第四纪地质,2005,25(3):1-7.
Xian B Z, Jiang Z X. Environment evolution and eustatic change of Holocene in the Yellow River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2005,25(3):1-7.

[4] 徐家声,孟毅,张效龙,等. 晚更新世末期以来黄河河口古地理环境的演变[J]. 第四纪研究,2006,26(3):327-333.
Xu J S, Meng Y, Zhang X L, et al. Palaeogeographic environmental evolution in the Huanghe River estuary since Late Pleistocene[J]. Quaternary Sciences,2006,26(3):327-333.

[5] 薛春江. 7000 年来渤海西岸、南岸海岸线变迁[J]. 地理科学,2009,29(2):217-222.
Xue C T. Historical changes of coastlines on west and south coasts of Bohai Sea since 7000 a B. P. [J]. Scientia Geographica Sinica,2009,29(2):217-222.

[6] 张祖陆,聂晓红,卞学昌. 山东小清河流域湖泊的环境变迁[J]. 古地理学报,2004,6(2):226-233.

Zhang Z L, Nie X H, Bian X C. Environmental change of lakes in Xiaoqinghe River drainage, Shandong province [J]. Journal of Palaeogeography,2004,6(2):226-233.

[7] 王绍鸿. 莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究[J]. 海洋与湖沼,1979,10(1):9-23.
Wang S H. A Preliminary study of Marine bed and its depositional conditions in Late Quaternary of the west coast of Laizhou Bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,1979,10(1):9-23.

[8] 汪品先,闵秋宝,卞云华,等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. 地质学报,1981(1):1-13.
Wang P X, Min Q B, Bian Y H, et al. Strata of Quaternary transgressions in East China: A preliminary study [J]. Acta Geologica Sinica,1981(1):1-13.

[9] 韩有松,孟广兰,王少青. 渤海莱州湾滨海平原晚第四纪地质事件与古环境[J]. 海洋科学集刊,1994,35:87-96.
Han Y S, Meng G L, Wang S Q. The geological events and Paleoenvironment of the coastal plain of Laizhou Bay in Bohai Sea during Late Quaternary [J]. Studia Marina Sinica,1994,35:87-96.

[10] 施雅风,于革. 40~30ka B. P. 中国暖湿气候和海侵的特征及成因探讨[J]. 第四纪研究,2003,23(1):1-11.
Shi Y F, Yu G. Warm-humid climate and transgressions during 40~30 ka B. P. and their potential mechanisms [J]. Quaternary Sciences,2003,23(1):1-11.

[11] 杨剑萍,庞效林,王海峰,等. 山东广饶地区晚更新世以来沉积演化与古气候变迁[J]. 沉积学报,2016,34(1):79-89.
Yang J P, Pang X L, Wang H F, et al. Depositional evolution and Paleoclimate changes since late Pleistocene in Guangrao Area, Shandong Province [J]. Acta Sedimentologica Sinica,2016,34(1):79-89.

[12] 徐明广. 引黄济青工程沿线浅层第四系沉积相和沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质,1988,8(2):113-117.
Xu M G. Quaternary shallow sedimentary facies and environment along the workline of "Diversion from the Huanghe River for watering Qingdao" [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,1988,8(2):113-117.

[13] 王世进,张成基,刘海坤,等. 山东省第四纪地质研究新进展[J]. 山东地质,1999,15(2):1-8.
Wang S J, Zhang C J, Liu H K, et al. Advances on the Quaternary geological study in Shandong Province [J]. Geology of Shandong,1999,15(2):1-8.

[14] 张增奇,张成基,王世进,等. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J]. 山东国土资源,2014,30(3):1-23.
Zhang Z Q, Zhang C J, Wang S J, et al. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources,2014,30(3):1-23.

[15] 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.
Wang H F, Yang J P, Pang X L, et al. Stratigraphic structure and sedimentary evolution during late Quaternary in Lubei Plain [J]. Acta Sedimentologica Sinica,2016,34(1):90-101.

[16] 纪洪磊,杨亚宾,张永伟,等. 鲁北平原第四纪沉积特征及地面沉降模式分析[J]. 地质学报,2019,93(s1):241-250.
Ji H L, Yang Y B, Zhang Y W, et al. Quaternary sedimentary char-

- acteristics and land subsidence model in North Shandong Plain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(s1): 241-250.
- [17] 高继雷,周永刚,张振飞,等. 华北克拉通东缘金岭杂岩体岩浆源区及构造背景:来自岩相学、岩石地球化学及年代学的证据[J]. *地质科学*, 2021, 56(1): 253-271.
- Gao J L, Zhou Y G, Zhang Z F, et al. Magma source and tectonic setting of Jinling pluton in eastern North China Craton: Evidences from petrography, petrogeochemistry and chronology [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(1): 253-271.
- [18] 迟培星,栾恒彦,刘明涓,等. 山东省新生代岩石地层清理意见[J]. *山东地质*, 1994, 10: 70-86.
- Chi P X, Luan H Y, Liu M W, et al. On the Division and correlation of the Cenozoic Lithostratigraphic units in Shandong Province [J]. *Geology of Shandong*, 1994, 10: 70-86.
- [19] 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南说明书[M]. 北京:地质出版社, 2001.
- The National Commission of Stratigraphy. Chinese stratigraphic guide and guide manual [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001.
- [20] 宗开红,宗雯,康丛轩,等. 长江三角洲北翼 YBK1 孔第四纪地层年代学研究[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(1): 116-127.
- Zong K H, Zong W, Kang C X, et al. Chronology study of the Quaternary Strata in YBK1 core in the North Wing of the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(1): 116-127.
- [21] 王强,吕金福. 海面变化与海岸线变迁[A]//李汉鼎,吕金福,王强,等. 中国北方沿海泥炭和环境[M]. 北京:海洋出版社, 1995: 109-128.
- Wang Q, Lyu J F. Eustacy and coastline movement [A]//Li H D, Lyu J F, Wang Q, et al. Peat and environment on coastal area of the North China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1995: 109-128.
- [22] 王强. 渤海西岸全新世早期基底泥炭堆积时间域初步研究[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(1): 91-96.
- Wang Q. Preliminary study on the time domain of basal peat accumulation in the early Holocene in the west Bohai Bay [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(1): 91-96.
- [23] 张祖陆. 鲁北平原黄河古河道初步研究[J]. *地理学报*, 1990, 45(4): 458-466.
- Zhang Z L. A preliminary study of the Yellow River's paleochannels in North Shandong Plain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 5(4): 458-466.
- [24] 王强,张玉发,袁桂邦,等. MIS3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵期与气候期的对比[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 79-95.
- Wang Q, Zhang Y F, Yuan G B, et al. Sine MIS 3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the north Huanghua area, Hebei [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1): 79-95.
- [25] 卢海峰,王金艳,王瑞. 河北省衡水地区第四纪中-晚期标准地层剖面的建立及其地质含义[J]. *现代地质*, 2014, 28(5): 962-970.
- Lu H F, Wang J Y, Wang R. Establishment of the stratotype produced in the mid-late Quaternary in Hengshui Area, Hebei Province and its geological implication [J]. *Geoscience*, 2014, 28(5): 962-970.
- [26] 王强,刘立军,徐海振,等. 华北平原第四系下限的再研究[J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(1): 52-60.
- Wang Q, Liu L J, Xu H Z, et al. Re-study on the lower boundary of Quaternary system in the North China Plain [J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26(1): 52-60.
- [27] 高秀林,王强,李玉德,等. 从天津 P8 孔看中更新世末期以来海侵期、气候期对比问题[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 6(1): 53-65.
- Gao X L, Wang Q, Li Y D, et al. On correlations between transgressions and climatic phases since late middle-Pleistocene based on data of drilling hole P8 in Tianjin [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986, 6(1): 53-65.
- [28] 赵勇,王强,李瑞杰,等. 北京平原区南部 PGZ01 孔第四纪地层划分及其环境意义[J]. *古地理学报*, 2018, 20(2): 337-348.
- Zhao Y, Wang Q, Li R J, et al. Quaternary stratigraphic division and its environmental significance of Borehole PG201 in southern Beijing plain area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(2): 337-348.
- [29] 赵勇,李瑞杰,魏波,等. 北京大兴凸起南部 PGZ05 钻孔剖面第四纪磁性地层学[J]. *现代地质*, 2019, 33(1): 56-62.
- Zhao Y, Li R J, Wei B, et al. Magnetostratigraphy of borehole PG205 in southern Daxing uplift, Beijing Plain [J]. *Geoscience*, 2019, 33(1): 56-62.
- [30] Yao Z Q, Shi X F, Liu Q S, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for glacial-interglacial sedimentation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 393: 90-101.
- [31] 王汝建,Abelmann A,李保华,等. 南沙海区放射虫组合在中更新世气候转型时的突然变化[J]. *科学通报*, 2000, 45(3): 314-318.
- Wang R J, Abelmann A, Li B H, et al. Abrupt variations of the radiolarian fauna at mid-Pleistocene climate transition in the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 314-318.
- [32] 李琰,于洪军,易亮,等. 渤海南部 Lz908 孔海陆交互沉积的粒度特征及其对沉积环境的指示[J]. *海洋科学*, 2014, 38(5): 107-113.
- Li Y, Yu H J, Yi L, et al. Grain-size characteristics and its sedimentary significance of coastal sediments of the borehole Lz908 in the south Bohai Sea (the Laizhou Bay), China [J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(5): 107-113.
- [33] 庄振业,许卫东,刘东生,等. 渤海南部 S₃ 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 27-35.
- Zhuang Z Y, Xu W D, Liu D S, et al. Division and environmental evolution of late Quaternary marine beds of S₃ hole in the Bohai Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 27-35.
- [34] Singer B S. A Quaternary geomagnetic instability time scale [J]. *Quaternary Geochronology*, 2014, 21: 29-52.
- [35] 扬州,王书兵,蒋复初,等. 中原邙山黄土地层划分的讨论[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(2): 274-282.
- Yang Z, Wang S B, Jiang F C, et al. Discussion on Mangshan loess stratigraphic division in China central plains [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(2): 274-282.
- [36] 贾婷,王永,浦庆余,等. 中国第四纪下限问题研究综述[J]. *地*

质力学学报, 2016, 22(1): 162-177.

Jia T, Wang Y, Pu Q Y, et al. Review on the lower boundary of quaternary in China[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1): 162-177.

[37] 李瑞杰, 赵勇, 魏波, 等. 永定河中下游廊固凹陷北部 ACX02 钻孔地层年代学研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(2): 249-

256.

Li R J, Zhao Y, Wei B, et al. Stratigraphic geochronology of ACX02 Borehole in the middle and lower region of the Yonging River, the North of the Langgu Depression[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(2): 249-256.

Core characteristics and Quaternary stratigraphic division of borehole QK4 in southern Lubei Plain

ZHOU Yong-Gang^{1, 2}, DAI Li-Ming^{3, 4}, TIAN Zhen-Huan^{1, 2}, YU Chun-Nan^{1, 2},
ZHANG Zhen-Fei^{1, 2, 5}, LIU Wei^{1, 2}, PEI Lun-Pei^{1, 2}

(1. No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan 250109, China; 2. Shandong Engineering Laboratory for High-Grade Iron Ore Exploration and Exploitation, Jinan 250109, China; 3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. Functional Laboratory of Marine Mineral Resources Evaluation and Exploration Technology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 5. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The establishment of the Quaternary stratigraphic framework is of great significance for the study of regional stratigraphic correlation and paleogeographic environment evolution. The sedimentary strata since the Late Pleistocene have been extensively studied, but the research on the complete Quaternary stratigraphic framework is not yet sufficient. Therefore, paleomagnetic, AMS ¹⁴C, OSL, well logging, and lithostratigraphic studies were conducted on borehole QK4 (depth: 285.98 m) in the Lubei Plain. Based on the systematic paleomagnetic sampling (398 samples), processing, and testing, it is considered that the cores from borehole QK4 recorded Brunhes normal polarity chron, Maruyama reversed polarity chron, Gauss normal polarity chron, and some of their polarity subchrons. Based on the magnetic age framework, as well as MS ¹⁴C, OSL, well logging, and lithostratigraphic characteristics, the Quaternary strata revealed by borehole QK4 were divided, and it was determined that the bottom boundaries of the Holocene, Upper Pleistocene, Middle Pleistocene, and Lower Pleistocene strata have depths of 4.11 m, 23.49 m, 118.70 m, and 147.35 m, respectively. Moreover, as the strata revealed, the strata revealed by borehole QK4 include the Cenozoic Heituhu, Dazhan, Pingyuan, and Minghuazhen formations from top to bottom. The results allowed for the establishment of the Quaternary stratigraphic framework in the southern Lubei Plain, thus providing reliable petrological, chronological, and paleomagnetic evidence for the Quaternary stratigraphic division and correlation and palaeogeographic environmental evolution in the southern Lubei Plain.

Key words: Lubei Plain; palaeomagnetism; AMS ¹⁴C dating; OSL dating; Quaternary

(本文编辑:王萌)