

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.2-3.005

永定河冲积平原南部第四纪年代地层划分及沉积速率特征

代鹏^{1,2}, 邓晓红^{1,2}, 王盛栋^{1,2}, 张全³

DAI Peng^{1,2}, DENG Xiaohong^{1,2}, WANG Shengdong^{1,2}, ZHANG Quan³

1. 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;

2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北 廊坊 065000;

3. 天津市地质调查研究院, 天津 300191

1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China;

2. National Research Center of Geoexploration Technology, Langfang 065000, Hebei, China;

3. Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin 300191, China

摘要:依据磁性地层和¹⁴C 年代结果, 结合岩性分层特征, 对永定河冲积平原南部 QYJ01 年代地层进行划分, 并综合 QGJ01 和 QHJ01 钻孔年代地层划分成果讨论沉积速率特征。将 QYJ01 钻孔的年代地层划分为上新统、下更新统、中更新统、上更新统和全新统, 其对应孔深分别为 198.1~450.9 m、111.5~198.1 m、88.65~111.5 m、23.7~88.65 m 和 0~23.7 m。综合分析永定河冲积平原南部第四纪代表钻孔 QYJ01、QGJ01 和 QHJ01 的沉积速率特征, 发现永定河冲积平原南部晚新生代地层沉积中心经历了 2 次偏移, 第 1 次是始于早更新世、在中更新世完成的沉积中心由中东部向南部偏移, 第 2 次是在全新世完成的沉积中心由南部向中东部回迁。研究结果为永定河冲积平原区新构造运动的活动强度和时限研究及深覆盖区第四纪地层对比提供参考。

关键词:永定河冲积平原; 晚新生代; 年代地层; 沉积速率; 地质调查工程

中图分类号: P534.63; P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)02/03-0253-09

Dai P, Deng X H, Wang S D, Zhang Q. Quaternary chronostratigraphic division and sedimentary rate characteristics in the south alluvial plain of Yongding River. Geological Bulletin of China, 2022, 41(2/3): 253-261

Abstract: Based on magnetostratigraphy and ¹⁴C dating, combined with stratification characteristics of strata, the stratigraphy of Quaternary in the southern alluvial plain of Yongding River was classified, and its sedimentary rate was discussed based on the stratigraphic classification results from boreholes QGJ01 and QHJ01. The chronostratigraphy of borehole QYJ01 is divided into Upper Pliocene, Lower Pleistocene, Middle Pleistocene, Upper Pleistocene and Holocene, the corresponding depth is 198.1~450.9 m, 111.5~198.1 m, 88.65~111.5 m, 23.7~88.65 m and 0~23.7 m, respectively. The sedimentary rate of Quaternary strata revealed by boreholes QYJ01, QGJ01 and QHJ01 were analyzed comprehensively. It is indicated that the sedimentary center of the late Cenozoic in the south alluvial plain of Yongding River experienced two migrations: the first was the migration of the sedimentary center from the east to the south in the Early Pleistocene and the second was the migration from the south to the east in the Holocene. This study provides some reference for the study of neotectonic activity intensity and time limit in Yongding River alluvial plain and the division and correlation of

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2020-11-16

资助项目: 中国地质调查局项目《冀中拗陷深部碳酸盐岩热储调查评价》(编号: DD20190556)、《永定河冲积平原区域地质调查》(编号: DD20160046)、中国地质科学院基本科研业务费项目《冀中拗陷北部典型地热田构造发育特征研究》(编号: AS2020Y03)、《永定河冲积平原岩石地层与年代地层综合研究》(编号: AS2017J03) 和《厚覆盖区地质调查技术试验研究》(编号: AS2017Y02)

作者简介: 代鹏(1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事第四纪地质、能源地质、资源与环境、地质与地球物理结合及相关研究。

E-mail: geosdp@126.com

西务断裂^[27]。研究区第四系厚度较大,成因类型复杂,学者们^[4, 9, 11, 16-19]通过多种方法将第四纪地层划分为更新统和全新统,一般将更新统分为 3 组,全新统分为 3 组或不做详细区分。区内主要河流为北京的母亲河——永定河,其上游来自官厅水库,主河道流经北京大兴、河北固安、天津北辰等地入渤海,另有北线支流凉水河在天津回归永定河,南线支流白沟河汇入拒马河(图 1)。

QYJ01 钻孔位于研究区南侧固安县大吴村村北(图 1),钻孔位置北纬 39°19′02.62″、东经 116°17′59.44″,实际孔深 450.3 m。

2 研究方法

2.1 样品采集

在钻孔 35 m 以浅的有机质粘土、泥炭、古土壤中采取了 2 件¹⁴C 测年样品,单件样品采样约 200 g,用塑料袋封装和送样。¹⁴C 测年实验在北京大学考古文博学院第四纪年代测定实验室完成,实验结果见表 1。

2.2 古地磁测年

古地磁样品的野外现场采集是建立高质量古地磁极性柱的重要前提^[28-29]。在采样之前先对研究区及周边区域地质资料进行分析,对钻孔所在位置第四纪地层厚度进行初步确定,然后根据钻孔钻取岩心的实际岩性变化确定采样密度,采样密度一般为 2 件/m,对粘土、粘土质粉砂、粉砂质粘土、粉砂、细砂以 0.5 m 间隔取样,中砂、粗砂以 1 m 间隔取样,对于较难获取古地磁标准样品的砾石层不予取样。取出岩心后,按照一致的顶底方向摆放岩心,并对方向进行标定,刮去表面泥浆,立即进行古地磁采样,规格为 2 cm×2 cm×2 cm,采样时对顶底方向严格把关,不可弄反。QYJ01 孔古地磁样品取样深度 450.3 m,共采集 752 块样品。

所有的古地磁实验操作在中国科学院地质与

地球物理研究所古地磁与年代学实验室的磁屏蔽室(小于 300 nT)完成,实验在无磁环境中进行,最大限度地保障了古地磁实验结果的精确性和可靠性。实验的剩磁和退磁过程在集成于一体的 2G-760U channel 岩石超导磁力仪中进行,剩磁量的测量误差控制在 $2 \times 10^{-8} \text{Am}^2$ 以内。对所有样品经过逐步退磁处理,以了解岩石中剩磁的稳定性^[30]。采用交变退磁场对样品进行退磁,退磁间隔依次为 5 mT、10 mT、15 mT、20 mT、25 mT、30 mT、35 mT、40 mT、45 mT、50 mT、55 mT、60 mT、70 mT。

3 岩心特征和测年结果

3.1 岩心特征

钻孔 QYJ01 岩性主要包括粘土、粉砂质粘土、粘土质粉砂、粉砂、细砂、粗砂及砂砾,野外编录分成 419 个自然层位,通过对沉积物岩性、颜色、沉积组合和沉积相分析,将其分为十二大岩性段(图 2)。

(1) 孔深 0~23.7 m,主要为 2 个正粒序的沉积旋回,0~14 m 为灰黄色-褐黄色粉砂质粘土-粘土质粉砂-粉砂-细砂-中砂,14~23.7 m 为灰黄色-褐黄色粘土-粉砂-细砂-中砂-粗砂。中砂中偶见钙质结核,粒径 4~8 mm;粗砂中偶见暗色矿物条带,18.15~19.10 m 为深灰色粘土层;粘土层局部见锈染,偶见小型螺类化石。

(2) 孔深 23.7~62.85 m,上部为黄灰色-绿灰色细砂-中砂-粗砂的沉积旋回,偶见螺类化石碎片和钙质结核,少见泥砾;下部为多个棕黄色-黄棕色粘土-粉砂质粘土-粉砂-中砂/细砂/砂砾组成的沉积旋回,粘土层见锰染和锈染,中砂层见 10~40 mm 钙质结核和泥砾,砂砾层的砾石以中砾为主。

(3) 孔深 62.85~88.65 m,包含 5 个灰黄色-棕灰色粘土-粉砂质粘土-粘土质细砂及灰绿色细砂-中砂/砾石组成的沉积旋回。粘土和粘土质粉砂中见锈染,偶见钙质结核;细砂-中砂呈粒序层理,砾石以中砾为主。

(4) 孔深 88.65~105.1 m,上部为 2 个灰黄色-绿灰色粘土质粉砂/粉砂质粘土-灰黄色粉砂组成的沉积旋回,粉砂中偶见 2~20 mm 的钙质结核,最大粒径 50 mm;下部为灰黑色/红棕色粘土-浅灰色粘土质粉砂-灰绿色细砂-灰黄色中砂组成的沉积旋回,粘土中多见锈染,可见大量贝壳碎屑,偶见 3~15 mm 的钙质结核、最大粒径 40 mm,底部中砂分

表 1 QYJ01 钻孔¹⁴C 测年结果

Table 1 ¹⁴C dating of borehole QYJ01

样品 编号	实验室 编号	岩性	深度 /m	¹⁴ C 年代 /a B.P.	树轮校正后年龄 /cal.a B.P.	
					1σ	2σ
01	BA172277	粉砂质 粘土	5.8	3480±35	3789	3681
02	BA172280	粘土质 粉砂	32.8	30680±150	23555	23323

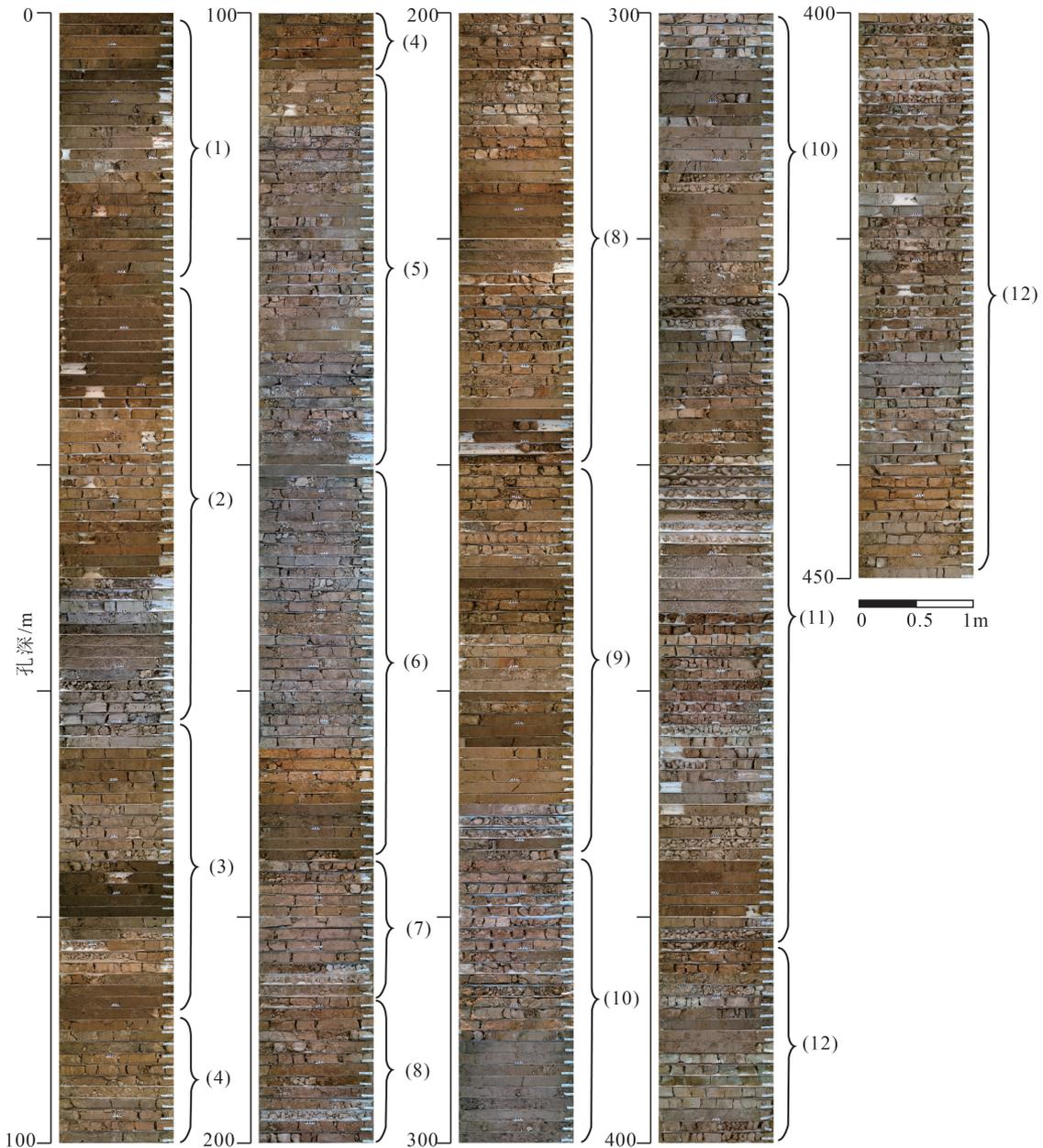


图2 钻孔 QYJ01 岩心照片

Fig. 2 Core photos of borehole QYJ01

选性好。

(5) 孔深 105.1~141.25 m, 上部以灰色粘土-黄绿色粉砂质粘土组成的小型沉积旋回为主, 粘土中见 5~10 mm 钙质结核, 偶见贝壳化石碎屑; 下部为以红棕色粘土/黄绿色-绿灰色粘土质粉砂-黄灰色-灰绿色细砂-中砂组成的沉积旋回, 粘土质粉砂中多见锈染, 中砂中见贝壳化石碎屑。

(6) 孔深 141.25~174.85 m, 上部以黄棕色-棕

红色粘土-粉砂质粘土为主, 多见 5~20 mm 钙质结核, 149.85~149.95 m 处和 150.5~150.6 m 处夹钙质团块、中砾状, 少见锈染或锈斑, 可见细粒贝壳化石碎屑; 下部以灰色细砂-中砂-粗砂-砾石为主, 偶见钙质结核, 分选性中等, 底部夹黄褐色粗砂薄层, 厚 5 mm, 与下伏地层呈突变接触。

(7) 孔深 174.85~187.15 m, 包含 2 个灰棕色粘土-花棕色粉砂质粘土的小型沉积旋回和 1 个红棕

色粘土-黄棕色粉砂质粘土-灰白色胶结细砂-灰黄色中砂组成的沉积旋回,中砂中可见泥砾,底部(187.00~187.15 m 处)夹钙锰质结核堆积薄层,厚 0.15 m,粒径一般 10~20 mm,最大 30 mm,与下伏地层呈突变接触关系。

(8)孔深 187.15~239.7 m,上部包含多个黄棕色-红棕色粘土-粉砂质粘土-粘土质粉砂组成的小型沉积旋回,局部见锈染,粘土质粉砂中偶见 5~15 mm 钙质结核,可见半固结黄白色粘土斑块;下部包含 2 个黄棕色粉砂质粘土-粘土质粉砂与灰绿色-灰黄色细砂-中砂组成的沉积旋回,细砂中见 20 mm 砾石,中砂中见泥砾,底层细砂胶结明显,偶见锈染;底部为砾石层,分选性差。

(9)孔深 239.7~274.6 m,由 4 个灰棕色-黄棕色粘土-粉砂质粘土-绿灰色-灰黄色细砂-中砂组成的沉积旋回组成,上部粘土、粉砂质粘土较厚,偶见潜育化斑块;下部细砂中砂厚度较大,偶见钙质结核,粒径 5~20 mm,偶见铁锰质结核,一般为 5~15 mm。

(10)孔深 274.6~324.65 m,上部为红棕色-黄棕色粘土-粉砂质粘土-绿灰色细砂-中砂-粗砂的沉积旋回,粘土层中多见钙质结核,粒径一般 5~20 mm,最大 40 mm;下部为黄棕色-灰黄色粘土-粉砂质粘土-粘土质粉砂-黄灰色粉砂-中砂-细砂-粗砂或砾砂的沉积旋回,偶见泥砾和火山岩屑,偶见锈染,砾石以次棱角状-圆形中砾为主。

(11)孔深 324.65~382.65 m,由 3 个灰黄色-紫红色粘土-黄棕色粉砂质粘土-黑灰色-绿灰色粉砂-细砂-中砂-粗砂的沉积旋回组成,粘土层刀切面光滑,见钙质结核,砂层较厚,砂呈胶结砂状、胶结程度中等以上,偶见泥砾、火山碎屑和小型砾石。

(12)382.65~450.9 m,包含 5 个红棕色-杂色-棕褐色粘土-粘土质粉砂-灰棕色-灰绿色粉砂-细砂/中砂的沉积旋回,偶见小型钙质结核和轻微锈染,砂呈胶结状,偶见潜育化斑块,底部局部锈染强烈。

3.2 古地磁

采用 PaleoMag 古地磁专用数据处理软件对古地磁实验结果数据进行分析,绘制了退磁衰减曲线和正交投影图(图 3),采用主成分分析法并通过原点线性拟合得到特征剩磁方向,剔除最大角偏差

(MAD)大于 15°的样品,共获得可靠特征剩磁 504 个。从正交投影图可以看出,在 20 mT 以上的磁场作用下基本可以分离出特征剩磁。根据 QYJ01 孔磁倾角的变化特征建立 QYJ01 孔极性倒转序列(图 4),可以看出 QYJ01 孔的极性倒转序列较规则,通过与国际标准古地磁极性柱进行对比,钻孔自上而下可分为 3 个明显的极性时。

布容正极性时(Brunhes):对应孔深 0~111.5 m,表现为正极性时,其地质时代为 0~0.78 Ma,属全新统和中-上更新统。

松山反极性时(Matuyama):对应孔深 111.5~198.1 m,以反极性时为主,夹 2 个长短不同的正极性时,其地质时代为 0.78~2.58 Ma,属早更新世。通过与国际标准古地磁极性柱相比,其中 133.5~140.1 m 处正极性时厚度较大,与松山反极性时的贾拉米洛正极性亚时(Jaramillo)对应,地层年代相当于 0.98~1.07 Ma;157.5~172.2 m 处正极性时厚度较大,与松山反极性时的奥尔都维正极性亚时(Olduvai)对应,地层年代相当于 1.77~1.95 Ma。

高斯正极性时(Gauss):对应孔深 198.1 m 以下,表现为正极性时,其代表的是 2.58~3.59 Ma 的地层。其中孔深 198.1~237.8 m 对应 C2An.1n 正极性亚时^[31],相当于地层年代 2.58~3.03 Ma。

4 讨论

4.1 年代地层划分

以古地磁极性倒转序列和¹⁴C 测年结果为主要依据,结合岩石地层分层特征,对 QYJ01 钻孔进行年代地层划分。

全新统(Qh):孔深 0~23.7 m。QYJ01 钻孔中 18.15~19.10 m 处为北方普遍存在的末次冰期开始出现的泥炭层,有机质含量丰富,向上 14.00~18.15 m 处粘土颜色变为褐黄色-黄灰色,一般认为泥炭层是冰期后气候转暖、降水增多的标志^[32]。由表 1 可知,在孔深 5.8 m 处的¹⁴C 测年样品距今 3681a,结合河北平原区及周边全新世沉积物厚度分布及岩性岩相变化特征^[18,33],仿照北京、天津地区的相似钻孔经验^[32,34-36],以末次冰期开始出现的泥炭层所在沉积旋回底界作为全新统底界,将 QYJ01 钻孔全新统底界确定为 23.7 m,与钻孔第 1 岩性段对应。

上更新统(Qp³):孔深 23.7~88.65 m。孔深

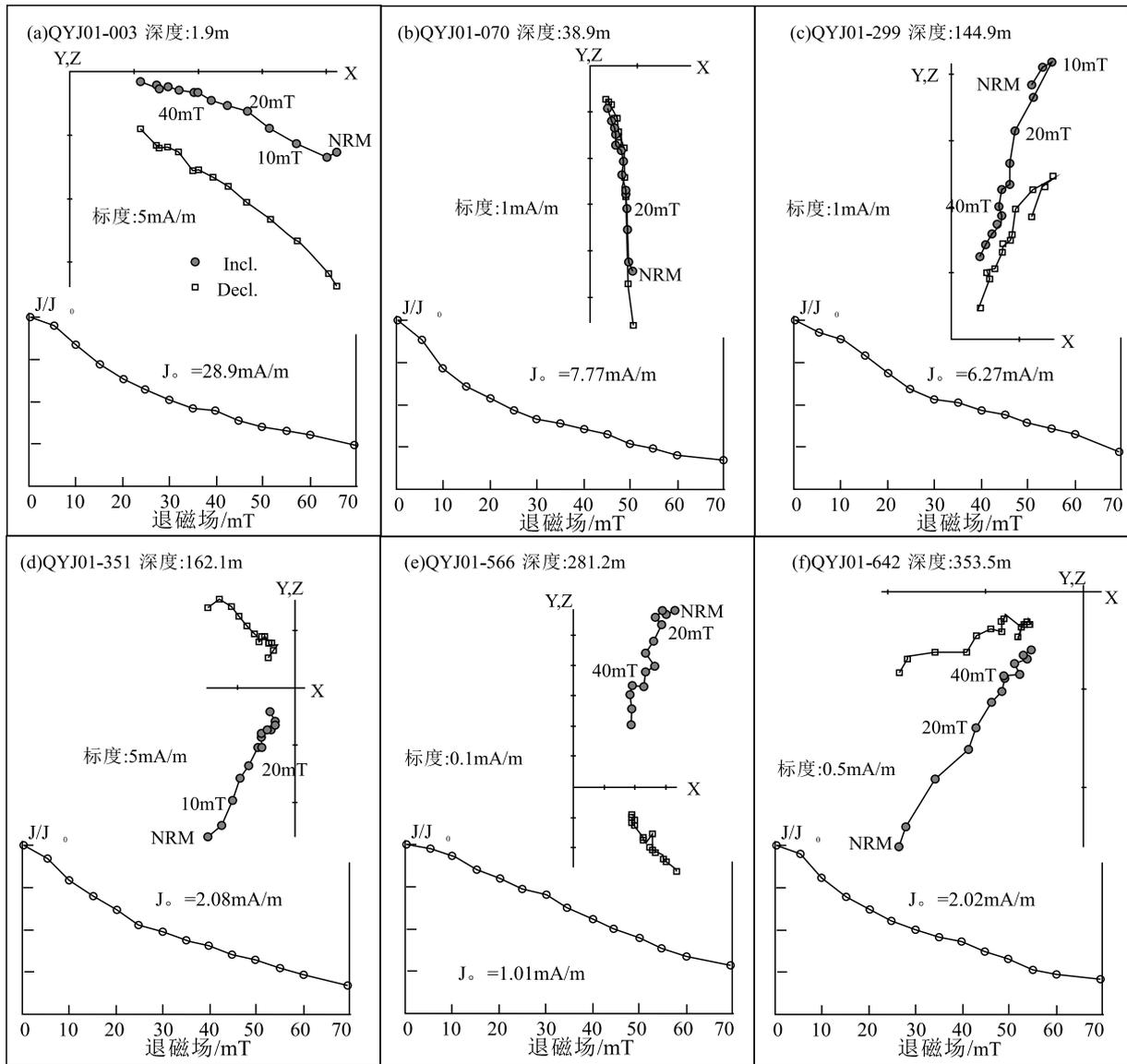


图3 QYJ01 退磁衰减曲线和正交投影图

Fig. 3 The intensity of demagnetization and orthogonal projection of representative specimens from borehole QYJ01

32.8 m处的 ^{14}C 测年样品距今 23323 a, 将 QYJ01 钻孔上更新统底界确定为 88.65 m, 对应钻孔第 3 岩性段。

中更新统(Qp^2): 孔深 88.65~111.5 m。根据古地磁极性倒转序列布容正极性时和松山反极性时(B/M)的时间, 其对应孔深为 111.5 m, 作为中更新统底界。

下更新统(Qp^1): 孔深 111.5~198.1 m。据古地磁极性倒转序列中的松山反极性时和高斯正极性时(M/G)的时间, 将 QYJ01 孔的下更新统底界(即第四系底界)确定为 198.1 m。

上新统(N_2): 孔深 198.1~450.9 m, 未见底。其中深度 198.1~237.8 m 对应 C2An.1n 正极性亚时, 属上新统。

4.2 晚新生代沉积速率特征

根据 QYJ01 钻孔年代地层划分结果, 结合研究区北部 QGJ01 钻孔和研究区中东部 QHJ01 钻孔年代地层划分的成果(图 4)^[25, 33], 综合分析永定河冲积平原南部第四纪沉积速率特征(图 5)^[37]。

上新世(N_2)下部地层在钻孔 QYJ01、QGJ01 和 QHJ01 中均未见底, 但从已经获得的岩心厚度和早

上新世经历的地质时间推算,三者沉积速率均较大,表明在早上新世永定河冲积平原南部经历了一个快速沉降的过程。部分学者^[38-39]通过环渤海地区年代地层研究结果得出,大约 3.7 Ma 以前以河流相和冲洪积相沉积为主,盆地快速沉降,永定河冲积平原南部早上新世的快速沉降过程与此观点有很好的 consistency。晚上新世(N_2^2),钻孔 QYJ01、QGJ01 和 QHJ01 对应的沉积速率分别为 88 m/Ma、124 m/Ma 和 194 m/Ma,此时永定河冲积平原南部的沉积中心靠近中东部,其次为北部,南部沉积速率最低。

早更新世(Qp^1),钻孔 QHJ01 的沉积速率仍然较大,为 85 m/Ma,其所处位置靠近永定河冲积平原南部的沉积中心;QYJ01 和 QGJ01 沉积速率相差不大,分别为 48 m/Ma 和 43 m/Ma,可见在早更新世永定河冲积平原南部的沉积中心向南偏移。

中更新世(Qp^2),钻孔 QYJ01 的沉积速率超过 QGJ01 和 QHJ01,达 76 m/Ma,QGJ01 和 QHJ01 对

应的沉积速率分别为 71 m/Ma 和 45 m/Ma,此时永定河冲积平原南部的沉积中心靠近南部,其次为北部,东部沉积速率最低。

晚更新世(Qp^3),钻孔 QYJ01、QGJ01 和 QHJ01 对应的沉积速率分别为 325 m/Ma、320 m/Ma 和 241 m/Ma,维持了中更新世的沉积速率特征。

钻孔 QYJ01、QGJ01 和 QHJ01 的全新世(Qh)地层沉积厚度分别为 23.7 m、21.45 m 和 24.9 m,对应的沉积速率分别为 2370 m/Ma、2145 m/Ma 和 2490 m/Ma,可见永定河冲积平原南部全新世地层沉积速率很快,且永定河冲积平原南部不同位置全新世地层沉积速率差别不大,沉积中心靠近研究区中东部。

综上所述,永定河冲积平原南部第四纪沉积中心经历了 2 次偏移,第 1 次是始于早更新世、在中更新世完成的沉积中心由中东部向南部偏移,第 2 次是在全新世完成的沉积中心由南部向中东部回迁。

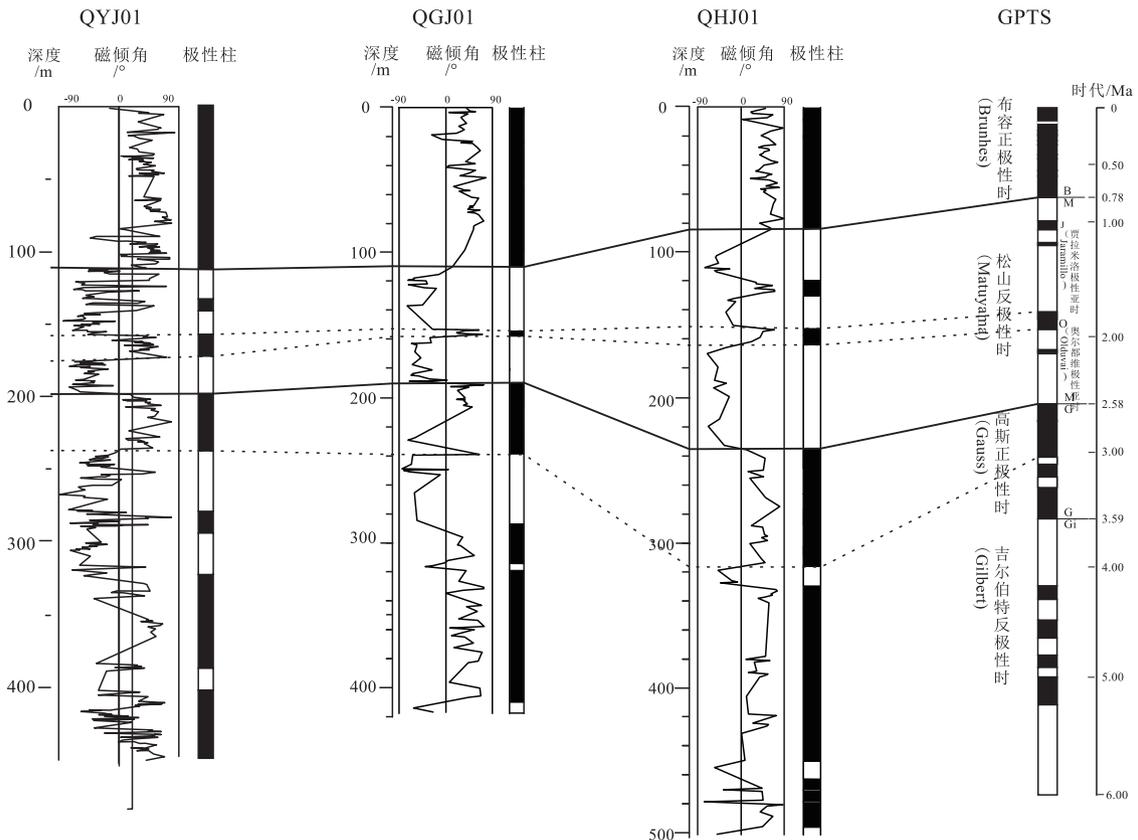


图 4 QYJ01, QGJ01 和 QHJ01 古地磁极性时间对比

Fig. 4 Geomagnetic polarity timescale comparison of boreholes QYJ01, QGJ01 and QHJ01

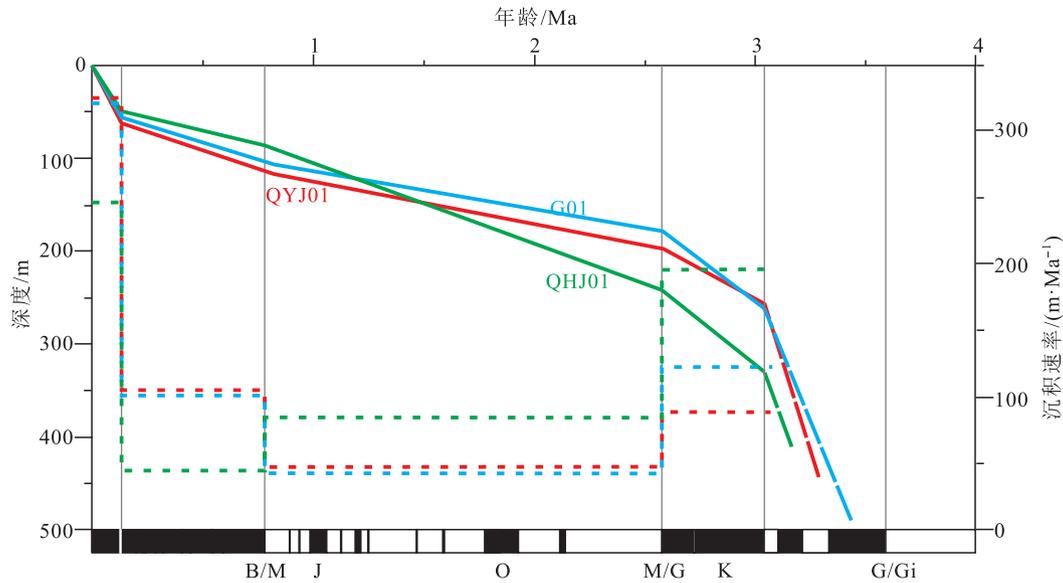


图5 代表性钻孔晚新生代地层沉积速率特征

Fig. 5 Sedimentary rate of Late Cenozoic strata revealed by the representative boreholes

沉积中心的迁移可能是由于新构造运动以来,燕山与太行山区强烈的构造隆起与构造差异运动造成的。早更新世末期与中更新世初期,燕山与太行山区强烈的构造隆升作用^[40-41],造成了永定河冲积平原南部沉积中心的第一次偏移,晚更新世末期与全新世早期新构造运动的构造活动减弱,沉积中心随之回迁至研究区中部。

5 结论

(1)通过对钻孔 QHJ01 古地磁样品的测试分析得出,孔深 0~111.5 m 为古地磁极性带的布容正极性时,111.5~198.1 m 为古地磁极性带的松山反极性时,198.1 m 以下为古地磁极性带的高斯正极性时。

(2)根据古地磁极性倒转序列和¹⁴C 测年结果,结合岩石地层特征,将钻孔 QYJ01 年代地层划分为上新统、下更新统、中更新统、上更新统和全新统,其对应孔深分别为 198.1~450.9 m、111.5~198.1 m、88.65~111.5 m、23.7~88.65 m 和 0~23.7 m。

(3)根据永定河冲积平原南部第四纪代表性钻孔 QYJ01、QGJ01 和 QHJ01 的沉积速率特征分析,发现永定河冲积平原南部第四纪沉积中心经历了 2 次偏移,第 1 次是始于早更新世、在中更新世完成的沉积中心由中东部向南部偏移,第 2 次是在全新世

完成的沉积中心由南部向中东部回迁。

致谢:感谢中国地质科学院地质力学研究所胡健民研究员对本文的建议,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] Han L, Zhao B, Wu J, et al. An integrated approach for extraction of lithology information using the SPOT 6 imagery in a heavily Quaternary - covered region—North Baoji District of China [J]. Geological Journal, 2017, 53: 352-363.
- [2] Arfai J, Franke D, Lutz R., et al. Rapid Quaternary subsidence in the northwestern German North Sea[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1-12.
- [3] 吴富强,江振寅,周硕.国内外风化壳覆盖区地质调查研究综述[J]. 中国地质调查, 2018, 5(6): 41-47.
- [4] 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.
- [5] 全国地质委员会. 中国地层指南[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1-57.
- [6] 刘东生,施雅风,王汝建,等.以气候变化为标志的中国第四纪地层对比表[J]. 第四纪研究, 2000, 20(2): 108-128.
- [7] 邱占祥. 泥河湾哺乳动物群与中国第四系下限[J]. 第四纪研究, 2000, 20(2): 142-154.
- [8] 劳金秀,杨祝良,于俊杰,等.江苏兴化 ZK10 孔第四纪多重地层研究[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1705-1714.
- [9] 陈望和,倪明云. 河北第四纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-179.
- [10] 丁仲礼,刘东生,刘秀铭,等. 250 万年以来的 37 个气候旋回[J]. 科学通报, 1989, 19: 1494-1496.
- [11] 易亮,姜兴钰,田立柱,等. 渤海盆地演化的年代学研究[J]. 第四纪

- 研究, 2016, 36: 1075-1087
- [12] 刘嘉麒, 刘强. 中国第四纪地层[J]. 第四纪研究, 2000, 20(2): 129-141.
- [13] 王涛, 杨凯越, 李伟荣, 等. 城市浅层地下古河道表征——以广东省潼湖盆地第四纪地下古河道为例[J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1729-1736.
- [14] 钱方. 中国第四纪大陆海侵层磁性地层学的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(3): 89-100.
- [15] 朱日祥, 李春景, 吴汉宁, 等. 中国黄土磁学性质与古气候意义[J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(9): 992-997.
- [16] 刘立军, 徐海振, 崔秋苹, 等. 河北平原第四纪地层划分研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2): 54-57.
- [17] Xu Q, Yang J, Yuan G, et al. Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM[J]. Marine Geology, 2015, 367: 69-82.
- [18] 蔡向民, 张磊, 郭高轩, 等. 北京平原地区第四纪地质研究新进展[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 1055-1066.
- [19] 周毅, 郭高轩, 张磊, 等. 北京后沙峪凹陷的第四纪地层划分与构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 1067-1075.
- [20] Lu Y C, Wang X L, Wintle A G. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130,000 yr for the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Research, 2007, 67(1): 152-160.
- [21] Sümeği P, Gulyás S, Molnár D, et al. New chronology of the best developed loess/paleosol sequence of Hungary capturing the past 1.1 Ma: Implications for correlation and proposed pan - Eurasian stratigraphic schemes[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 191: 144-166.
- [22] Lin Z Y, Han X B, Jin X L, et al. Magnetostratigraphy and paleoenvironmental significance of sediments from ANT29-P7-09 core in Prydz Bay, Antarctica[J]. China Geology, 2019, 2: 493-500.
- [23] 朱首峰, 盛君. 第四系覆盖区地质调查中的物探方法研究[J]. 江苏科技信息, 2016, 3: 70-75.
- [24] 蔡向民, 郭高轩, 栾英波, 等. 北京山前平原区第四系三维结构调查方法研究[J]. 地质学报, 2009, 83(7): 1047-1057.
- [25] 代鹏, 邓晓红, 王盛栋, 等. 河北平原区固安 G01 孔岩芯特征及第四纪地层划分[J]. 第四纪研究, 2019, 39(2): 399-407.
- [26] 桂宝玲. 伸展盆地构造几何学、运动学——以渤海湾盆地廊固凹陷为例[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文, 2011: 1-118.
- [27] 刘国臣, 陆克政, 严俊君. 廊固凹陷构造特征及成因解析[J]. 地质论评, 1996, 42(sup): 83-88.
- [28] Dunlop D J, Özdemir Ö. Rock magnetism: fundamentals and Frontiers[M]. New York: Cambridge University Press, 1997: 1-573.
- [29] 朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 922-944.
- [30] 张惠民, 张文治, Elston D P. 华北蓟县中、上元古界古地磁研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(5): 602-615.
- [31] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B4): 6093-6095.
- [32] 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): 167-178.
- [33] 代鹏, 王盛栋, 邓晓红, 等. 地球物理方法在厚覆盖区第四纪地层划分中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2143-2151.
- [34] 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研究[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 56-62.
- [35] 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1352-1367.
- [36] 白凌燕, 张磊, 蔡向民, 等. 磁性地层年代对北京平原顺义断裂第四纪活动性的约束[J]. 现代地质, 2014, 28(6): 1234-1242.
- [37] 陈永胜, 王福, 田立柱, 等. 渤海湾西岸全新世沉积速率对河流供给的响应[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1582-1590.
- [38] Yi L, Deng C L, Tian L Z, et al. Plio-Pleistocene evolution of Bohai Basin (East Asia): demise of Bohai Paleolake and transition to marine environment[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 1-9.
- [39] 邓成龙, 郝青振, 郭正堂, 等. 中国第四纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 1-23.
- [40] 邵时雄, 安仲元, 韩书华. 河北平原新构造运动主要特征的分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(4): 69-79.
- [41] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999: 1-539.