

doi: 10.12029/gc20160329

张磊, 张晓亮, 白凌燕, 等. 北京平原沙河凹陷第四纪磁性地层学研究及其新构造运动的沉积响应[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 1076-1084.

Zhang Lei, Zhang Xiaoliang, Bai Lingyan, et al. Research of quaternary magnetic stratigraphy and its sedimentary response of new tectonic movement in Shahe depression Beijing plain area[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 1076-1084(in Chinese with English abstract).

北京平原沙河凹陷第四纪磁性地层学研究及其 新构造运动的沉积响应

张磊¹ 张晓亮¹ 白凌燕¹ 蔡向民¹ 王继明¹ 杨天水²

(1.北京市地质调查研究院,北京 100195;2.中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,北京 100083)

摘要: 北京地区在古近—新近纪时呈“两隆一凹”的构造格局。由于南口—孙河断裂北段第四纪以来的强烈活动,在上述格局上分化出新的第四纪凹陷盆地——沙河凹陷。本次工作在沙河凹陷内开展了钻孔 ZK3 的第四纪磁性地层研究,结合 ¹⁴C 同位素测年结果获得钻孔剖面早更新世、中更新世、晚更新世和全新世地层底板埋深分别为 493.8 m、157.4 m、87.7 m 和 7.2 m,建立了钻孔剖面的第四纪地层序列。通过计算 ZK3 钻孔剖面第四系沉积速率分别为 0.19 mm/a、0.11 mm/a、0.70 mm/a 和 0.63 mm/a。对比分析控盆断裂南口—孙河断裂的活动规律及北京西山的隆升特点,第四纪以来,受到北京西山隆升的影响,控制沙河凹陷的同生断裂南口—孙河断裂强烈活动,并控制了沙河凹陷的演化形成。钻孔地层平均沉积速率所体现的变化规律与山体隆升速率及断裂活动速率具有较好的响应关系。

关键词: 沙河凹陷;磁性地层;南口—孙河断裂;活动性;第四纪

中图分类号:P534.63;P539.3 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)03-1076-09

Quaternary magnetic stratigraphy and its sedimentary response to new tectonic movement in Shahe depression, plain area of Beijing

ZHANG Lei¹, ZHANG Xiao-liang¹, BAI Ling-yan¹,
CAI Xiang-min¹, WANG Ji-ming¹, YANG Tian-shui²

(1. Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 100195, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The tectonic pattern of Beijing area in Tertiary was “two uplifts and one depression”. Due to the strong activity of the north part of Sunhe fault since the Quaternary period, new Quaternary depression basin, i.e., Shahe depression, was separated from the above pattern. The authors conducted research on Quaternary magnetic stratigraphy of drill hole ZK3 in Shahe depression. In combination with the ¹⁴C isotopic dating results, the authors obtained the depth of the bottom of the strata in early Pleistocene, Middle Pleistocene, late Pleistocene and Holocene, being 439.8 m, 157.4 m, 87.7 m and 7.2 m respectively. On such a basis, the

收稿日期:2015-12-09;改回日期:2016-01-26

基金项目:中国地质调查局项目(12120113012000, 1212011301290)资助。

作者简介:张磊,男,1982年生,硕士生,高级工程师,主要从事城市活动断裂研究工作;E-mail:ikkibaby@126.com。

authors established the Quaternary stratigraphic sequence of drill hole profile. The Quaternary deposition rates were 0.19 mm/a, 0.11 mm/a, 0.70 mm/a and 0.63 mm/a. A comparative analysis of the activity regularity of the basin-controlling fault, i.e., Nankou-Sunhe fault, and characteristics of Beijing Xishan (Western Hills) uplift shows that since the Quaternary period, influenced by Beijing Xishan uplift, the contemporaneous faults that controlled Shahe depression, i.e., Nankou Sunhe faults, activated strongly, and controlled the evolution of Shahe depression. The variation rule of average deposition rate of the strata in the drill hole, the mountain uplift rate and the fault activity rate have a good response relationship.

Key words: Shahe depression; magnetic stratigraphy; Nankou-Sunhe fault; activity; Quaternary

About the first author: ZHANG Lei, male, born in 1982, master, senior engineer, mainly engages in the study of active faults in the city; E-mail: ikkibaby@126.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 12120113012000, 1212011301290).

地质历史上燕山运动对北京地区的地质构造格架产生了重要影响。北京地区的构造地质背景主要是继承了燕山运动形成的构造格架,主体构造线方向北东。古近—新近纪时,北京地区在横向上构成“两隆一凹”的构造格局,即:京西隆起,北京凹陷和大兴隆起^[1]。第四纪以来,本区新构造活动不但具有继承性,而且具有新生性。新华夏系应力场引发了北西向张性兼扭性断裂活动,形成以NW向为主,NNE向仍继续活动的两组沉降中心。此时北西向的南口—孙河断裂活动明显。切割了平原区的“两隆一凹”的构造格局,沉积中心也随之发生转移。由于南口—孙河断裂北段第四纪以来的强烈活动,古近—新近纪时形成的京西隆起局部强烈下沉,接受了大量巨厚的第四纪沉积物,在断层上盘南西一侧形成了与其平行展布的北西向凹陷带—沙河凹陷(图1)。

本次工作施工的ZK3钻孔位于沙河凹陷的腹地地区,第四纪地层沉积连续且厚度较大,是研究该凹陷盆地演化及新构造运动的理想场所。通过开展钻孔磁性地层学研究,建立了该凹陷盆地内第四纪标准地层序列,探讨其第四纪沉积速率对于新构造运动的响应关系。通过构造和沉积两方面的研究,最终明确了北京西山隆升作用和沙河凹陷沉积作用的对应关系及演化规律。

1 钻孔剖面岩性特征

钻孔ZK3位于北京昌平百善镇东沙屯村西农田,位置坐标为116°17'06"N,40°10'06"E,孔口标高44.49 m,孔深616.20 m。钻探工程采用油压式钻机,全孔取心率达90%以上,实际岩心直径可达90 mm。该孔岩心自上而下共分为462个自然层,按照沉积物的颜色、沉积环境、沉积旋回和沉积构造特

点,将岩心归纳为4套组合层,描述如下。

(1)剖面下部总体上为河流湖泊相沉积物,岩性为黏土、粉砂质黏土、黏质粉砂、粗砂及砾石层。沉积物颗粒总体上较粗,以砂层和砾石层为主。该套岩石组合上部(157.4~203.7 m)主要为灰绿色、黄绿色、黄褐色黏土,粉砂质黏土,中粗砂以及灰白色砾石层,灰绿色黏土中普遍见有腹足、双壳类化石残片。粉砂质黏土中多见铁质、锰质结核,属湖相

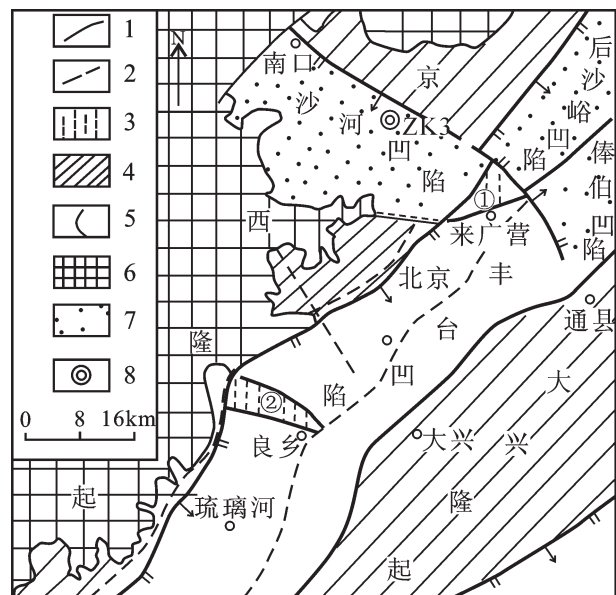


图1 北京凹陷构造略图^[1]

1—凹陷边界断裂;2—一般断裂;3—凸起(①—来广营凸起
②—良乡凸起);4—隆起区;5—山区与平原区界线;6—隆起山区;
7—第四纪凹陷;8—钻孔位置

Fig.1 Tectonic sketch map of Beijing depression^[1]

1—Sag border fault; 2—Average fault; 3—Convex (a. Laiguangying convex; b. Liangxiang convex); 4—Uplifted area; 5—Boundary between mountain area and plain area; 6—Uplifted mountain area; 7—Quaternary sag; 8—Drill hole location

或湖沼边缘相沉积;中部(203.7~306.9 m)主要为棕黄色、青灰色、灰黑色、黑色黏土,粉砂质黏土,中间夹有多层细砂层,细砂层水平层理发育,黏土坚硬致密,具河流相和湖泊相交替沉积的特点;上部(306.9~493.8 m)主要为棕黄色、棕红色砂质黏土,灰绿色、灰褐色黏质粉砂和少量杂色砾石层,砾石成分复杂,多为中性火山岩和酸性岩脉,分选较差,磨圆较差,呈棱角-次棱角状,偶见薄层钙板层(1~2 cm),属山前冲洪积相沉积,后期又在扇体上形成局部洼地和河流。

(2)剖面中下部总体上为河流相、河漫滩相和湖相沉积,岩性为黏土、粉砂质黏土、粉砂、细砂、粗砂以及砾石层。该套岩石组合上部(36.6~73.0 m)为棕黄色粉砂,灰绿色黏土和灰黑色黏土的岩性组合,粉砂层发育弱的水平层理,为浅湖相沉积,灰绿色、灰黑色黏土中含有大量的腹足、双壳类化石残片,为湖沼相沉积;中部(73.0~112.4 m)为棕黄色、褐黄色黏土,粉砂质黏土和少量的薄层粉砂组成。黏土和粉砂质黏土中可见大量的黄色锈斑及根系孔发育,反映了水动力条件变化的特征,判断其为泛滥平原的堆积物,粉砂质黏土中局部含有大量的钙质结核,大小为3~5 cm,具有后期淋滤的特点;下部(112.4~157.4 m)为褐黄色、灰褐色黏质粉砂、粉砂、细砂、粗砂以及杂色砾石层组成的多个沉积旋回,反映了河流-河漫滩相沉积的二元结构特征。

(3)剖面中上部为河流相、湖泊相沉积,岩性为黏土,粉砂质黏土、黏质粉砂和砂砾石层。该套岩石组合上部(7.2~21.4 m)为褐黄色黏土、粉砂和细砂组成的沉积韵律,反映了较强氧化环境下形成的浅湖和天然堤;中部(21.4~36.6 m)为灰褐色粉砂质黏土,砂质黏土和中粗砂,属于湖沼边缘相和河流相交替沉积的环境;下部(36.6~87.7 m)为棕黄色砂质黏土,灰黑色、灰绿色黏土,含大量的腹足、双壳类化石残片,局部层位见有薄层细砂,反映了河漫湖向湖沼相过渡的沉积环境。

(4)剖面上部为湖沼相、河流相沉积,岩性为灰绿色、灰黑色粉砂质黏土和黏土,局部夹有薄层的粉砂。该套岩石组合底部(5.5~7.2 m)为一套灰绿色的砂砾石层,砂为中粗砂,含量约为60%,砾石含量约为40%,成分复杂,多为中酸性火山岩,大小1~3 cm,磨圆较好。本层位的出现表明研究区全新世

早期为河流相沉积环境,推测可能为新仙女木事件之后,全球新气温回暖导致的沉积环境变化。

2 钻孔剖面第四纪磁性地层研究

传统的测年手段由于无法满足整个第四系长序列测年的技术要求,因此引入磁性地层学研究,该方法不仅可以推算出地层的形成时代和地层所经历的某些地质事件的年代,而且在解决地层的划分和地层的远距离对比方面也卓有成效。目前,磁性地层年代学方法已经成为研究地层年代学问题的一个强有力工具^[2-15]。上述成果为开展本次研究奠定了坚实的基础。

2.1 样品采集与测试

古地磁野外取样是本研究建立高质量古地磁极性柱的首要保障。根据岩性变化情况确定采样密度进行采样取心率和岩心状况满足磁性地层岩性变化情况确定采样密度进行采样,本次采样间距0.5 m。在野外编录时仔细确定岩心上下方向,取出岩心后立即采样。标出取样位置后,标明样品所在岩心段的顶底方向,其次将做好标记的整段岩心取出,在保证标志线所在的面不受破坏的情况下,尽量获取岩心中部的样品。将获取的粗样品进行精细加工,磨出基准面,标记顶底方向,用无磁性不锈钢刀加工出边长为2 cm×2 cm×2 cm的立方体样品。由于钻孔岩心中砂砾石层无法取样,因此最终采集古地磁样品共计411件,选择其中的样品130件进行系统热退磁。热退磁是用中国地质大学(北京)古地磁学与环境磁学实验室的ASC-TD48热退磁炉进行系统热退磁的。剩磁测量是在中国地质大学(北京)古地磁学与环境磁学实验室的2G 755-4K超导磁力仪上进行的。

2.2 磁性地层年代学框架建立

第四系地层相对松软,在取心过程中易造成岩心变形,此外由于构造运动或沉积滑塌,也有可能破坏了原来的沉积构造和剩磁记录。因此在进行系统热退磁之前,先测量每个样品的磁化率各向异性(AMS),用来检查沉积物的原生沉积结构是否已被扰动。该实验是在中国地质大学(北京)古地磁学与环境磁学实验室的KLY-4S卡帕桥磁化率仪上进行的。通过对所采样品进行磁化率各向异性(AMS)测量发现沉积物样品的磁化率各向异性最

小轴K3与层面近垂直,最大轴K1近平行于层面,且磁化率椭球体是压扁形的,磁化率各向异性度小(图2),表明沉积物仍保持正常的沉积结构,为良好的磁性地层学研究对象。

针对磁化率各向异性符合正常沉积结构的样品进行系统热退磁,热退磁是用中国地质大学(北京)古地磁学与环境磁学实验室的ASC-TD48热退磁炉进行系统热退磁的。剩磁测量是在中国地质大学(北京)古地磁学与环境磁学实验室的2G 755-4K超导磁力仪上进行的。中国地质大学(北京)古地磁学与

环境磁学实验室的2G 755-4K超导磁力仪和热退磁炉均放置在磁场强度小于300 nT的屏蔽室内。所有样品的加热均为12步: NRM, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 540°C和580°C。经过详细的逐步热退磁, ZK3孔有130块样品能分离出稳定的高温特征剩磁。

经过系统热退磁,所有样品都获得了磁化强度、剩磁方向随退磁步骤的变化特征。绝大部分样品都能有效的分离出高温稳定剩磁成分。剩磁分析和磁成分分离采用主成分分析法^[17]。数据分析采用Enkin^[18]和Cogné^[19]的地磁数据分析软件包,计算得到样品的特征剩磁方向(注:磁偏角是任意的)。退磁结果显示,所有样品原生剩磁的携磁矿物为磁铁矿,因此高温分量采用温度 $\geq 150\sim 250^\circ\text{C}$ 的退磁步骤,保证每个样品至少有4个连续的退磁步骤点。

ZK3孔代表性样品ZK3-397.5 m和ZK3-82.5 m Z矢量图显示, 200°C已经将黏滞剩磁消除,水平分量和垂直分量均稳定地趋向于原点,特征剩磁表现为正极性(图3-a, b)。代表性样品ZK3-310.9 m Z矢量图显示出在低温阶段(NRM-200°C)存在一个正的、较高倾角的剩磁分量,在200~580°C可分离出一个负的稳定剩磁分量(图3-c), ZK3-445.4 m Z矢量图显示为岩心顶底颠倒样品(图3-d)。稳定剩磁分量的磁倾角和磁化率椭球体最大轴(K1)和最小轴(K3)随深度变化特征表明研究的沉积物没有受到后期扰动(图4)。根据磁倾角的变化特征建立ZK3孔的磁极倒转序列,将0~157.4 m的正极性带解释为布容正极性带,157.4~495 m的负极性带解释为松山负极性带,将203.6~213.5 m和347.5~401.3 m的正极性带分别解释为Jaramillo和Olduvai正极性亚带,493.8 m以下的正极性带解释为高斯正极性带,493.8~552.9 m为C2An.1n正极性亚带(图4)。

磁性地层研究表明ZK3孔M/G界线为493.8 m; B/M界线为157.4 m; 钻孔剖面¹⁴C同位素数据表明, ZK3孔深度3.3 m处获得年龄(3900±30) a B.P., 深度5.2 m处获得年龄(4640±30) a B.P., 综合磁性地层研究, 岩石地层分析并结合¹⁴C测年数据^①, 最终建立了本区第四纪地层年代格架。ZK3孔早更新统、中更新统、晚更新统和全新统的底界埋深分别为

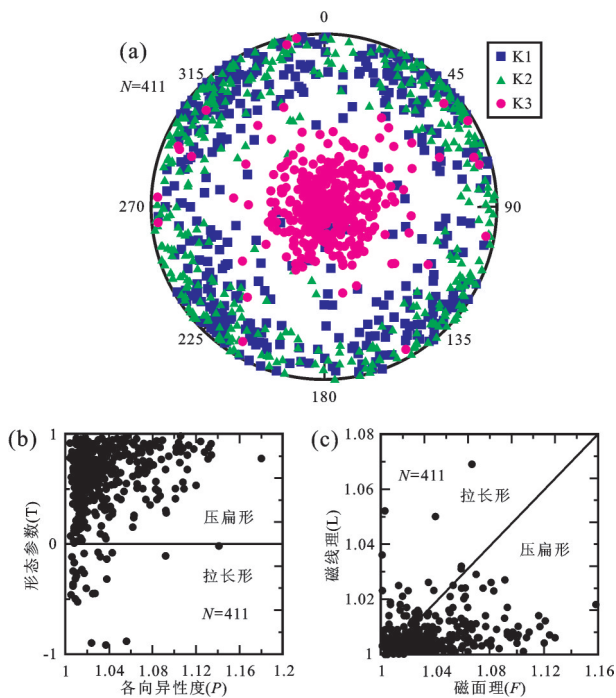


图2 ZK3钻孔样品磁化率各向异性(AMS)结果
a—ZK3钻孔AMS最大轴(蓝色方块)和最小轴(红色圆点)等面积投影图; b—ZK3钻孔磁化率各向异性度与形态参数关系图;
c—ZK3钻孔磁线理与磁面理关系图(磁线理=磁化率各向异性最大轴/磁化率各向异性中间轴,而磁面理=磁化率各向异性中间轴/磁化率各向异性最小轴^[16])

Fig.2 Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) results of the cores ZK3

a—Equal-area projection of the AMS maximum (blue squares) and minimum (red circles) axes inclinations of drill hole ZK3;
b—Plot of shape parameters versus anisotropy degree of drill hole ZK3; c—Plot of magnetic lineation versus magnetic foliation of drill hole ZK3; Magnetic lineation=AMS maximum axes/AMS intermediate axes; magnetic foliation=AMS intermediate axes/AMS minimum axes^[16]

①北京市地质调查研究院.北京地区主要活动断裂精细调查及灾害效应研究年度成果报告,2013.

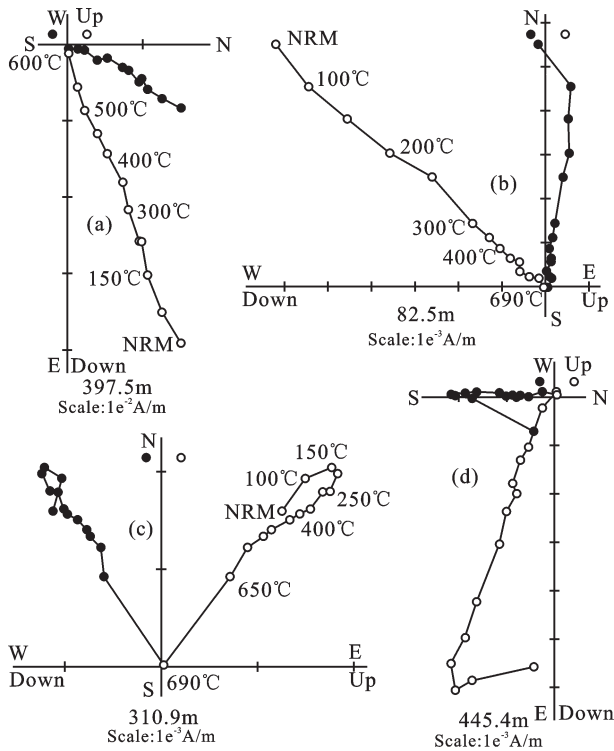


图3 钻孔代表样品的热退磁强度衰减曲线及Z矢量图
Z矢量图中空心及实心圆分别代表剩磁方向在铅垂面和水平面上的投影;注意磁偏角方向是任意的

Fig.3 Orthogonal projections of representative thermal demagnetization and decay curves of the natural remanent magnetization (NRM)

The open and solid circles represent vertical and horizontal planes, respectively. Note that the magnetic declinations are arbitrary

493.8 m、157.4 m、87.7 m和7.2 m。

3 沙河凹陷演化的新构造指示意义

3.1 沙河凹陷地质概况

沙河凹陷是由一系列的断块垂直叠落所形成,主体位于昌平南口、马池口地段,向东南延入区内小寨村、百善、沙河一线,为一北西向长约20 km,北东向宽6~10 km的断陷槽地。凹陷中心位于马池口、沙河一带。凹陷的形成受南口山前断裂和南口—孙河断裂正断活动控制,是2条断裂上盘地块向南东掀斜陷落的产物,南口—孙河断裂是直接控制凹陷形成的同生断裂构造。该断裂是首都圈平原区一条重要的北西向活动断裂,该断裂北西端起自昌平县南口镇,向南东方向经七间房、百泉庄、东三旗、孙河至通州,总体走向315°,长约80 km。北西

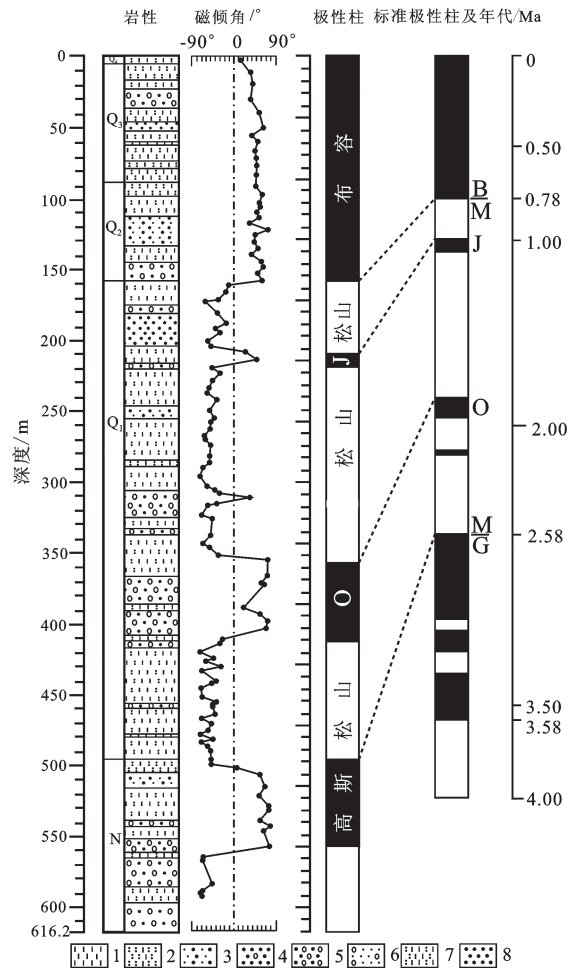


图4 钻孔ZK3与标准极性柱[20]对比图

1—粘土;2—黏土质粉砂;3—中细砂;4—含砾粗砂;5—砂卵石;
6—含砾细砂;7—粉砂质黏土;8—粗砂

Fig.4 The contrast diagram of magnetostratigraphy of cores from drill hole ZK3 and polarity zones[20]

1—Clay; 2—Clayey silt; 3—Medium-fine sand; 4—Coarse sand with gravel; 5—Sandy gravel; 6—Fine sand with gravel; 7—Silty clay; 8—Coarse sand

段自南口至北七家,断面倾向南西,南东段自北七家至孙河段,断面倾向北东。大量的调查研究表明,该断裂第四纪以来强烈活动^[21-30]。北京市地震地质会战期间,该凹陷内曾开展钻孔震平-2施工,第四纪系底界埋深601.44 m,主要沉积物为砂质黏土、中细砂、砂砾石互层,见10余层泥砾岩。颜色以黄色、杂色为主,砾石大小不一,见磨圆较好的砾石。砾石多被泥沙包裹。砾石成分简单,下部以花岗岩为主,上部主要为花岗岩和火山岩。凹陷基底

为紫色中生代火山角砾岩^①。但由于缺少必要的测年数据,仅通过岩石地层组合特征对钻孔剖面进行了粗略的地层划分。

3.2 新构造运动与沉积速率的响应关系

构造运动的过程同时也是沉积建造的历史,在沉积盆地形成发育的过程中,盆地不断沉降,沉积不断进行,盆地外侧不断隆起,绝大多数沉积盆地中沉积物的快速堆积期与高原快速隆升增长阶段相对应^[31]。构造格局控制了盆地的性质、形状、大小及沉积作用,是沉积盆地形成的主控因素,也是沉积层序发育的关键因素,发展与形成在断陷陆相湖盆中^[32]。同时,层序特征又是构造活动的响应和记录,所以盆地充填的沉积记录是构造运动轨迹的间接反映^[33]。如:华北平原地区的新构造运动导致了不同地质构造单元第四纪以来沉积物厚度差异显著^[34];青藏高原外缘诸盆地沉积速率对高原隆升具有很好的响应^[35-36];张明安等发现泌阳凹陷沉积、沉降中心迁移的变化特征能够确定边界断裂的活动时间及盆地的演化史^[37]。由于隆起区和凹陷区沉积物厚度的差别体现了新构造运动对不同构造单元沉积物分布的控制,因此沙河凹陷的沉积作用必然与北京西山的隆升作用存在密切的关系。

北京平原沙河凹陷磁性地层年代学框架研究表明:受活动断裂的影响,凹陷内第四纪不同时期沉积物厚度和沉积速率具有显著的变化。钻孔 ZK3 早更新世、中更新世、晚更新世和全新世地层底板埋深分别为 493.8 m、157.4 m、87.7 m 和 7.2 m;参考 2013 年国际地层年表第四纪地层界线早更新世底界年龄(2.588 Ma)、中更新世底界年龄(0.781 Ma)、晚更新世底界年龄(0.126 Ma)、全新世底界年龄(0.0115 Ma),可计算出钻孔 ZK3 早更新世、中更新世、晚更新世和全新世平均沉积速率分别为 0.19 mm/a、0.11 mm/a、0.70 mm/a 和 0.63 mm/a。

第四纪时期北京西山新构造运动除了继承古近一新近纪的上升运动外,还伴随有多次断裂活动、不均衡的掀斜运动和垂直运动。北京西山是沙河凹陷沉积物的主要物源地,作为沙河凹陷的控盆断裂南口—孙河断裂,其活动性亦能够客观地反映西山隆升的新构造特点。因此,我们在山体隆升、盆地沉积速率和断裂活动三者之间能够建立特定

的制约影响关系。从钻孔 ZK3 沉积速率来看,早、中更新世沙河凹陷的沉积速率相对较小,分别为 0.19 mm/a、0.15 mm/a,中更新世晚期至晚更新世逐渐增大,晚更新世时期的平均速率达到 0.70 mm/a,全新世沉积速率略有减小,平均速率为 0.63 mm/a。笔者在研究中发现(另文),第四纪以来南口—孙河断裂垂直活动速率自中更新世以来亦具有同样的规律性。中更新世、晚更新世和全新世以来的垂直活动速率分别为 0.12 mm/a、0.58 mm/a、0.31 mm/a。总体表现为弱—强—弱的规律^[38]。第四纪以来北京西山的强烈隆升,在 2.50~1.00 Ma B.P.的早更新世期间,山体上升幅度为 280 m,山体上升速度为 0.10~0.26 mm/a;在中更新世早期及晚期,山体上升幅度均为 30 m,但晚期上升速度比早期几乎要大一倍,达 0.1 mm/a。在 0.10~0.012 Ma B.P.的晚更新世期间,山脉上升幅度和速度达到第四纪各阶段的最大值,其中山脉上升幅度达 72 m,上升速度达 0.82 mm/a。在 0.012~0 Ma B.P.的全新世阶段,山体仍较强烈上升,其上升幅度一般为 3~8 m,最大达 8 m;最大上升速度为 0.66 mm/a^[39](表 1)。

综上所述,受到北京西山隆升的影响,控制沙河凹陷的同生断裂南口—孙河断裂第四纪以来强烈活动,控制了沙河凹陷的演化形成,表现在钻孔地层沉积速率上的变化特征。其中早、中更新世平均沉积速率较小,晚更新世逐渐增大,为整个第四纪沉积速率的最大值,全新世以来沉积速率略有减小。钻孔沉积速率的变化,与西山隆升速率及控盆断裂南口—孙河断裂的平均活动速率变化特征具有较好的吻合关系。由此可知,北京地区盆山耦合作用体现了新构造运动与沉积建造存在紧密的联系。

4 结 论

通过对北京平原沙河凹陷内钻孔 ZK3 开展第四纪磁性地层学研究,建立了钻孔剖面的第四纪地层格架,并对比分析第四纪不同时期地层平均沉积速率、控盆断裂南口—孙河断裂活动速率和西山隆升速率的相互关系,对本区第四纪以来新构造运动特征进行了探讨,得到了以下 2 点认识:

(1) 利用磁性地层研究结果与 ¹⁴C 测年数据,建立了钻孔 ZK3 第四纪地层格架。钻孔 ZK3 早更新

①北京地震地质办公室.北京地震地质会战研究成果汇编(5),北京地区地震地质的估价及新构造运动. 1983.

表1 ZK3钻孔沉积速率,南口—孙河断裂活动速率与西山隆升速率对比

Table 1 The comparison between deposition rate of drill hole ZK3, action rate of Nankou—Sunhe fracture and uplift rate of Xishan

地质时代	ZK3 钻孔	南口—孙河断	西山隆升速率 (mm/a)
	沉积速率 (mm/a)	裂活动速率 (mm/a)	
早更新世	0.19		0.10-0.26
中更新世	0.11	0.12	0.10
晚更新世	0.70	0.58	0.82
全新世	0.63	0.31	0.66

世、中更新世、晚更新世和全新世地层底板埋深分别为493.8 m、157.4 m、87.7 m和7.2 m。通过计算得出,钻孔ZK3早更新世、中更新世、晚更新世和全新世平均沉积速率分别为0.19 mm/a、0.11 mm/a、0.70 mm/a和0.63 mm/a。

(2)通过对钻孔ZK3剖面第四纪不同时期沉积速率、控盆断裂南口—孙河断裂活动速率和西山隆升速率进行对比可知,第四纪以来,受到北京西山隆升的影响,控制沙河凹陷的同生断裂南口—孙河断裂第四纪以来强烈活动。凹陷内钻孔沉积速率总体表现为早、中更新世较小,晚更新世逐渐增大,达到整个第四纪沉积速率的最大值,全新世略有减小。由此可知,北京地区盆山耦合作用体现了新构造运动与沉积建造存在紧密的联系。

致谢:衷心感谢中国地质大学(北京)吴怀春教授在本次工作中的指导和帮助,感谢审稿专家及编辑部李亚萍老师为成文定稿提出的宝贵意见。

参考文献(References):

- [1] 汪良谋,徐杰,黄秀铭,等.北京凹陷构造活动性分析[J].中国地震,1990,6(2):25-36.
Wang Liangmou, Xu Jie, Huang Xiuming, et al. An analysis of the tectonic activities in Beijing down-wapped basin[J]. Earthquake Research in China, 1990, 6(2): 25-36 (in Chinese with English abstract).
- [2] 安芷生,魏兰英,卢演涛,等.顺5孔的磁性地层学和早松山世的北京海侵[J].地球化学,1979,(4):343-346.
An Zhisheng, Wei Lanying, Lu Yanchou, et al. Magnetostratigraphy of the core S-5 and the transgression in the Beijing area during the early Matuyama Epoch[J]. Geochimica, 1979, (4): 343-346 (in Chinese with English abstract).

- [3] 李龙吟,陈华慧.北京怀柔HR88-1钻孔剖面磁性地层学研究[J].地层学杂志,1994,18(1):39-44.
Li Longyin, Chen Huahui. On magnetostratigraphy of the borehole HR88-1 in Huairou area, Beijing[J]. Journal of Stratigraphy, 1994, 18(1): 39-44 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘进峰,郭正堂,郝青振,等.甘肃秦安糜子湾剖面中新世风尘堆积的磁性地层学研究[J].第四纪研究,2005,25(4):503-509.
Liu Jinfeng, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Magnetostratigraphy of the Miziwan Miocene eolian deposits in Qin'an County (Gansu Province) [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25 (4): 503-509 (in Chinese with English abstract).
- [5] 卢海建,王二七,李仕虎,等.青藏高原东南缘构造旋转变形分析:以四川盐源盆地古地磁研究为例[J].中国地质,2015,42(5):1188-1201.
Lu Haijian, Wang Erqi, Li Shihu, et al. Rotational deformation of the southeastern margin of Tibet: A paleomagnetic study of the Yanyuan basin, Sichuan Province[J]. Geology in China, 2015, 42 (5): 1188-1201 (in Chinese with English abstract).
- [6] 邓成龙.黄土高原西部—白草原剖面L₁和S₁记录的古地磁特征[J].第四纪研究,2008,28(5):854-865.
Deng Chenglong. Paleomagnetism of the loess/paleosol couplet L₁/S₁ at the Baicaoyuan section, Western Loess Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 854-865 (in Chinese with English abstract).
- [7] 郑妍,郑洪波,邓成龙,等.还原成岩作用对磁性矿物的影响及古气候意义:以长江口水下三角洲岩心YD0901沉积物为例[J].第四纪研究,2012,32(4):652-662.
Zheng Yan, Zheng Hongbo, Deng Chenglong, et al. Diagenetic alteration on magnetic minerals and the paleoclimate implications, results from core YD0901 of Yangtze subaqueous delta[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(4): 652-662 (in Chinese with English abstract).
- [8] 乔彦松,赵志中,王燕,等.川西甘孜黄土磁性地层学研究及其古气候意义[J].第四纪研究,2006,26(2):250-256.
Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Wang Yan, et al. Magnetostratigraphy and its paleoclimatic significance of a loess-soil sequence from Ganzi Area, West Sichuan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(2): 250-256 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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.
Zhu Rixiang, Deng Chenglong, Pan Yongxin. Magnetochronology of the fluvio-lacustrine sequences in the Nihewan basin and its implications for early human colonization of North East Asia[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6): 922-944 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邹光富,庄忠海,潘忠习,等.西藏珠穆朗玛峰北坡地区三叠纪磁性地层研究[J].中国地质,2006,33(5):988-998.
Zou Guangfu, Zhuang Zhonghai, Pan Zhongxi, et al. Triassic magnetostratigraphy of the north slope of Mount Qomolangma,

- Tibet[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 988–998 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王红强. 泥河湾盆地东谷坨剖面磁性特征及环境意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(6): 1081–1091.
Wang Hongqiang. Magnetic properties of lacustrine sediments at the Donggutuo section in the Nihewan basin and their environmental significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1081–1091 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王张华, 张丹, 李晓, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物磁性特征和磁性矿物及其指示意义[J]. *中国地质*, 2008, 35(4): 670–682.
Wang Zhanghua, Zhang Dan, Li Xiao, et al. Magnetic properties and relevant minerals of late Cenozoic sediments in the Yangtze River delta and their implications[J]. *Geology in China*, 2008, 35(4): 670–682 (in Chinese with English abstract).
- [13] 赵勇, 蔡向民, 王继明, 等. 北京平原顺义ZK12-2钻孔剖面第四纪磁性地层学研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(2): 288–294.
Zhao Yong, Cai Xiangmin, Wang Jiming, et al. Quaternary magnetostratigraphy of the Shunyi area in Beijing plain using ZK12-2 borehole profile[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2): 288–294 (in Chinese with English abstract).
- [14] 缪卫东, 李世杰, 王润华. 长江三角洲北翼J9孔岩心沉积特征及地层初步划分[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(1): 126–134.
Miao Weidong, Li Shijie, Wang Runhua. Preliminary study on sedimentary characteristics and stratum division of J9 Core in the north wing of the Yangtze River Delta[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(1): 126–134 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张磊, 白凌燕, 蔡向民, 等. 北京平原南口—孙河断裂南段第四纪活动性的磁性地层学研究[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(2): 1–10.
Zhang Lei, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, et al. Magnetostratigraphy study on the south segment of Nankou–Sunhe fault at Beijing plain and its implications for the fault activity during Quaternary[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(2): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王力波. 岩石磁化率各向异性测量及数据处理方法[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所刊*, 1988, 9(3): 81–92.
Wang Libo. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and data processing[J]. *Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1988, 9(3): 81–92 (in Chinese with English abstract).
- [17] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data[J]. 1980. *Geophysical Journal international*, 62: 699–718.
- [18] Enkin R J. Formation et deformation de l'Asie depuis la fin de l'ère primaire: les apports de l'étude paléomagnétique des formations secondaires de Chine du Sud[J]. Paris: The Ph.D Thesis of Paris University, 1990.
- [19] Cogné J P. PaleoMac: A Macintosh™ application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(1), 1007, doi: 10.1029/2001GC000227.
- [20] Cande S C, Kent D V. A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(10): 13917–13951.
- [21] 张世民, 王丹丹, 刘旭东, 等. 北京南口—孙河断裂带北段晚第四纪活动的层序地层学研究[J]. *地震地质*, 2007, 29(4): 729–743.
Zhang Shimin, Wang Dandan, Liu Xudong, et al. Sequence stratigraphy study of Late Quaternary activities of Nankou–Sunhe fault in its northern segment, Beijing[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(4): 729–743 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张世民, 王丹丹, 刘旭东, 等. 北京南口—孙河断裂晚第四纪古地震事件的钻孔剖面对比与分析[J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 38(7): 881–895.
Zhang Shimin, Wang Dandan, Liu Xudong, et al. Using borehole core analysis to reveal Late Quaternary paleoearthquakes along the Nankou–Sunhe fault, Beijing[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(7): 881–895 (in Chinese).
- [23] 柯柏林. 北京平原区北部孙河断裂的地热地质特征[J]. *现代地质*, 2009, 23(1): 43–48.
Ke Bailin. Geothermal and geological features of Sunhe fault in the northern part of Beijing plain[J]. *Geoscience*, 2009, 23(1): 43–48 (in Chinese with English abstract).
- [24] 裴军令, 李海兵, 孙知明, 等. 汶川地震断裂带断层滑移作用——来自高磁化率断层岩的信息[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 759–767.
Pei Junling, Li Haibing, Sun Zhiming, et al. Fault slip in the Wenchuan earthquake fault zone——Information from fault rocks with higher magnetic susceptibility[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(4): 759–767 (in Chinese with English abstract).
- [25] 黄秀铭, 汪良谋, 徐杰, 等. 北京地区新构造运动特征[J]. *地震地质*, 1991, 13(1): 43–51.
Huang Xiuming, Wang Liangmou, Xu Jie, et al. Characteristics of neotectonics movement in Beijing area[J]. *Seismology and Geology*, 1991, 13(1): 43–51 (in Chinese with English abstract).
- [26] 车兆宏. 南口—孙河断层活动性研究[J]. *地震地质*, 1994, 16(2): 115–120.
Che Zhaohong. Study of the activity of Nankou–Sunhe Fault[J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16(2): 115–120 (in Chinese with English abstract).
- [27] 郭旭东, 严富华, 黄秀铭. 北京西山新构造运动的分期[J]. *现代地质*, 1995, 39(1): 51–59.
Guo Xudong, Yan Fuhua, Huang Xiuming. Time division of neotectonic movement in Western Mountain area, Beijing[J]. *Geoscience*, 1995, 39(1): 51–59 (in Chinese with English abstract).
- [28] 李勇, 黄润秋, Densmore A L, 等. 龙门山彭县—灌县断裂的活动构造与地表破裂[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(3): 403–415.
Li Yong, Huang Runqiu, Densmore A L, et al. Active tectonics and surface rupture of the Pengxian–Guanxian fault, Longmen

- Mountain, Sichuan, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(3): 403–415 (in Chinese with English abstract).
- [29] 侯治华, 钟南才, 郝彦军, 等. 应用高密度电法探测北京南口—孙河隐伏断裂[J]. *防灾科技学院学报*, 2011, 13(4): 1–6.
Hou Zhihua, Zhong Nancai, Hao Yanjun, et al. Detecting Nankou–Sunhe buried fault by high density resistivity method[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2011, 13(4): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [30] 王焕, 李海兵, 李天福, 等. 汶川地震断裂带结构构造、岩性特征及其与地震活动性的关系[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 768–778.
Wang Huan, Li Haibing, Li Tianfu, et al. The structure, lithologic character of the Wenchuan earthquake fault and the relation to the seismic activity[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(4): 768–778 (in Chinese with English abstract).
- [31] 董文杰, 汤懋苍. 青藏高原隆升和夷平过程的数值模型研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(1): 65–69.
Dong Wenjie, Tang Maocang. Study on numerical model of Qinghai—Tibetan Plateau uplift and planation process[J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(1): 65–69 (in Chinese).
- [32] 程日辉, 林畅松, 崔宝琛. 沉积型式与构造控制研究进展[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(1): 11–15.
Cheng Rihui, Lin Changsong, Cui Baochen. Advances in the study of the styles of sedimentation and the tectonic controls[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(1): 11–15 (in Chinese with English abstract).
- [33] Van Wagoner J C. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies[J]. *AAPG, Methods in Exploration Series 7*, 1990, 55: 1–240.
- [34] 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾西岸BZ1钻孔的磁性地层学研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 909–916.
Xiao Guoqiao, Guo Zhengtang, Chen Yukun, et al. Magneto stratigraphy of BZ1 borehole in west coast of Bohai Bay, northern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 909–916 (in Chinese with English abstract).
- [35] 韦一, 张克信, 季军良, 等. 青藏高原柴达木盆地新生代沉积充填速率演化及其对构造隆升的响应[J]. *地质通报*, 2013, 32(1): 105–110.
Wei Yi, Zhang Kexin, Ji Junliang, et al. Cenozoic sedimentation rate evolution of Qaidam Basin in the Tibetan Plateau and its response to the uplift of the plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1): 105–110 (in Chinese with English abstract).
- [36] 徐增连, 骆满生, 张克信, 等. 青藏高原循化、临夏和贵德盆地新近纪沉积充填速率演化及其对构造隆升的响应[J]. *地质通报*, 2013, 32(1): 93–104.
Xu Zenglian, Luo Mansheng, Zhang Kexin, et al. Cenozoic sedimentation rate of Xunhua, Linxia and Guide basins responding to the uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1): 93–104 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张明安, 鲜本忠. 泌阳凹陷构造活动的沉积响应[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 19(2): 9–17.
Zhang Mingan, Xian Benzong. Response of sedimentation to structural evolution in Biyang Sag[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition)*, 2004, 19(2): 9–17 (in Chinese with English abstract).
- [38] 张磊, 白凌燕, 蔡向民, 等. 北京南口—孙河断裂北西段综合物探剖面定位及其活动性研究[J]. *现代地质*, 2014, 28(1): 1–9.
Zhang Lei, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, et al. Study on the position of north west section of Nankou–Sunhe fault in Beijing and its activity[J]. *Geoscience*, 2014, 28(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- [39] 郭旭东. 北京第四纪地质导论[M]. 重庆: 重庆出版社, 2007: 12.
Guo Xudong. *Beijing Introduction of Quaternary Geology*[M]. Chongqing: Chongqing Press, 2007: 12 (in Chinese with English abstract).