

张磊, 何静, 白凌燕, 等. 北京凹陷北缘第四纪凹陷盆地沉积速率变化特征与顺义断裂活动性的响应关系[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 511–519.
Zhang Lei, He Jing, Bai Lingyan, et al. The response relationship between the variation characteristics of deposition rate of Quaternary depression basin on the northern margin of Beijing depression and the activity of Shunyi fault[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 511–519(in Chinese with English abstract).

北京凹陷北缘第四纪凹陷盆地沉积速率变化特征与 顺义断裂活动性的响应关系

张 磊¹ 何 静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:北京凹陷受黄庄—高丽营断裂与南苑—通县断裂共同控制, 形成于古近—新近纪。凹陷北缘在第四纪由于顺义断裂的强烈活动解体, 形成 2 个新的凹陷, 后沙峪凹陷和俸伯凹陷。文章在后沙峪凹陷内开展了钻孔 ZK19 的第四纪磁性地层研究, 结合光释光测年结果获得钻孔 ZK19 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 434 m、128 m、29.9 m 和 1.35 m。通过与俸伯凹陷内钻孔 ZK12-2 进行沉积地层厚度与沉积速率的对比分析, 探讨了顺义断裂第四纪以来的活动特点, 从而对北京凹陷北缘盆地演化进行了探讨。研究表明, 顺义断裂在第四纪早更新世的强烈活动最终造成了北京凹陷北缘盆地的解体; 中更新世, 顺义断裂相对于黄庄—高丽营断裂活动性不甚明; 晚更新世, 顺义断裂相对于黄庄—高丽营断裂再次强烈活动, 加速了北京凹陷北缘盆地的分化; 全新世, 顺义断裂强烈活动并造成了地表地裂缝的发育和建筑物的破坏。

关键词:北京凹陷; 磁性地层; 顺义断裂; 活动性; 第四纪

中图分类号: P539.3; P542²

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2016)02-0511-09

The response relationship between the variation characteristics of deposition rate of Quaternary depression basin on the northern margin of Beijing depression and the activity of Shunyi fault

ZHANG Lei¹, HE Jing¹, BAI Ling-yan¹, CAI Xiang-min¹, WANG Ji-min¹, 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: Controlled by both Huangzhuang–Gaoliying fault and Nanyuan–Tongxian fault, Beijing depression was formed in the Tertiary period. The northern margin of Beijing depression in Quaternary disintegrated due to the strong activity of the Shunyi fault, and formed two new depressions, i.e., Houshayu depression and Fengbo depression. In this study, the authors conducted the research on Quaternary magnetic strata in drill hole ZK19. In combination with the OSL results, the bottom depths of early

收稿日期: 2015-02-12; 改回日期: 2015-05-15

基金项目: 北京市国土资源局“北京平原区活动断裂监测专项地质调查项目”(京国土环[2009]308号文)资助。

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

Pleistocene, Middle Pleistocene, late Pleistocene and Holocene strata in drill hole ZK19 were determined, which are 434 m, 128 m, 29.9 m and 1.35 m respectively. By comparative analysis of the sedimentary thickness and deposition rate of drill hole ZK12-2 in Fengbo depression, the authors investigated the Shunyi fault activity characteristics since the Quaternary, and discussed the evolution of the basin on the northern margin of Beijing depression. The results show that the intense activity of Shunyi fault in the early Pleistocene resulted in the disintegration of the basin on the northern margin of Beijing depression. In the Middle Pleistocene, the activity of Shunyi fault was indistinct relative to Huangzhuang-Gaoliying fault. In the late Pleistocene, Shunyi fault had a strong activity again relative to Huangzhuang-Gaoliying fault, which accelerated the disintegration of the basin on the northern margin of Beijing depression. In the Holocene, the strong activity of Shunyi fault caused the growth of ground fissures and the destruction of buildings.

Key words: Beijing depression; magnetic stratigraphy; Shunyi fault; activity; Quaternary

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

Fund support: Supported by Land and Resources Program of Beijing Municipal Bureau of Land and Resources.

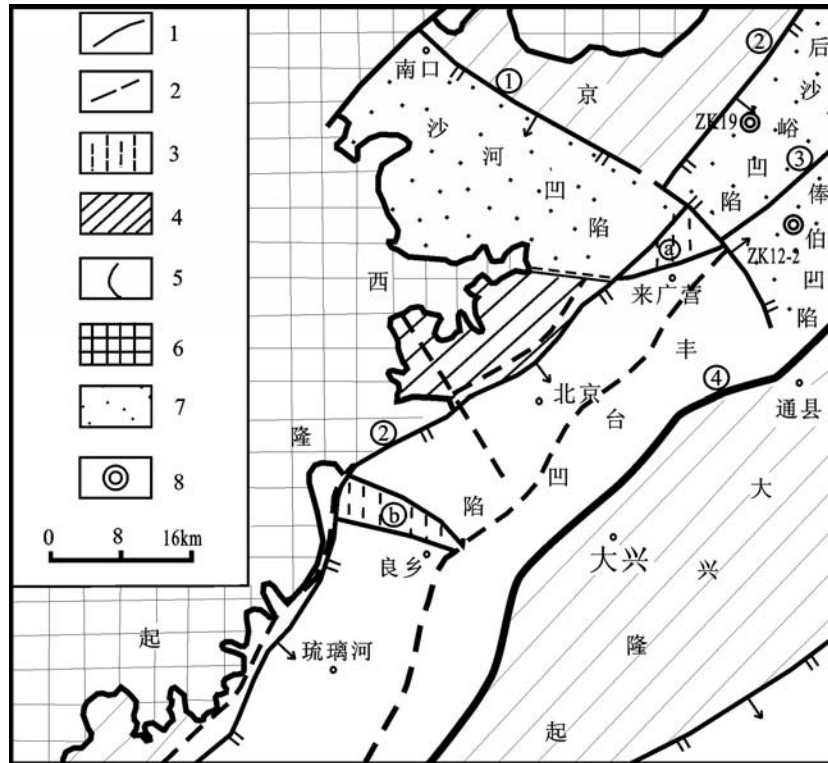
随着陆相沉积盆地分析研究的不断深入,构造和建造两者间的联系和统一性逐步受到地质学者的关注,成为沉积盆地研究的基本内容^[1]。一般来讲,构造运动的过程同时也是沉积建造的历史,所以在阐述构造运动的同时,必然涉及到剥蚀作用、搬运作用和沉积作用相互交错等综合作用的问题。作为控盆断裂,在沉积盆地形成发育的过程中,盆地不断沉降,沉积不断进行,盆地外侧不断隆起,沉积速率的变化特征能够很好地反映控盆断裂的活动状况。绝大多数沉积盆地中沉积物的快速堆积期与高原快速隆升增长阶段相对应^[2]。如:华北平原地区的新构造运动导致了不同地质构造单元第四纪以来沉积物厚度差异显著。青藏高原外缘诸盆地沉积速率对高原隆升具有很好的响应^[4,5]。本文在总结前人对于北京凹陷北缘构造演化与成盆历史的基础上,开展凹陷内钻孔磁性地层研究,利用沉积速率变化与构造运动的关系,来探讨北京凹陷北缘盆地演化与顺义断裂第四纪以来的活动特征的响应关系。

1 北京凹陷新构造演化概述

北京凹陷为一中-新生代断陷盆地。由于沉积特征、构造发育及盆地演化都明显不同于冀中拗陷,因此北京拗陷可作为华北平原区一个相对独立的构造单元。北京凹陷南以北西向东垒子-涑水断裂为界同冀中拗陷分开,西以八宝山断裂和黄庄-高丽营断层为界同京西隆起相邻,东边通过南苑

一通县断层和大兴隆起相接,在横向上构成“两隆一凹”的构造格局^[6]。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-孙河断裂与北东向的顺义断裂活动明显。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。如:南口-孙河断裂开始强烈活动,因此使沉积中心的长轴方向发生改变,从新近纪时的NNE向转为第四纪时的NW向。受南口-孙河断裂活动的控制,形成马池口凹陷。北东向顺义断裂强烈活动造成了北京凹陷北缘的分化解体,形成2个新的第四纪凹陷盆地:后沙峪凹陷和俸伯凹陷(图1)。

后沙峪凹陷位于本区北部古城-后沙峪一带,盆地面积9 km²。后沙峪盆地是由北东向的黄庄-高丽营断裂及北西向的孙河断裂控制;基底为侏罗系及古生界,西深东浅,靠近黄庄-高丽营断裂,沉积厚度大;凹陷内堆积第四纪沉积物,沉积厚度为600~1300 m。俸伯凹陷位于本区北部俸伯-南彩一带,主要受顺义断裂控制,呈带状分布,走向北东,宽约5 km,长约15 km。基底为古生界及中新元古界,基底面向西北倾斜,西北深,东南翘,凹陷盆地内第四纪沉积物厚度为500~700 m。由此可见,北京凹陷北缘的第四系出现的厚度差异,表明北京拗陷北缘的活动断裂在第四纪时期具有明显活化增强的趋势^[7]。

图1 北京凹陷构造略图^[7]

1—凹陷边界断裂;2—一般断裂;3—凸起(a—来广营凸起,b—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;
①—南口—孙河断裂;②—黄庄—高丽营断裂;③—顺义断裂;④—南苑—通县断裂

Fig. 1 Tectonic sketch map of Beijing depression^[7]

1—Sag border fault; 2—Average fault; 3—Convex (a—Laiguangying convex; b—Liangxiang convex); 4—Uplift area;
5—Boundary between mountain area and plain area; 6—Uplift mountain area; 7—Quaternary sag; 8—Drill hole location;
①—Nankou—Sunhe fault; ②—Huangzhuang—Gaoliying fault; ③—Shunyi fault; ④—Nanyuan—Tongxian fault

2 凹陷盆地钻孔剖面磁性地层研究 (ZK19)

开展磁性地层学是新生代地层测年的有效手段之一,磁性地层年代学方法已经成为研究地层学及地质学问题的有效工具^[18-23]。笔者之前对于北京凹陷北缘俸伯凹陷内的钻孔ZK12-2已开展了磁性地层学研究,并结合浅层年龄数据建立了凹陷内第四纪地层框架,为开展本次研究奠定了坚实的基础^[19]。本文将对后沙峪凹陷内的第四纪钻孔ZK19的磁性地层研究工作进行详细阐述。

2.1 样品采集与测试

钻孔ZK19位于北京昌平北七家镇燕丹村,位置坐标为116°26′51″N,40°05′32″E,海拔高35.385 m,孔深500.93 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。取心率和岩心状况满足磁性岩性变化情况确定采样密度进行采样,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。钻孔所采集古地磁样品198件,选择其中的样品131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2G755-4K超导磁力仪上进行的。

2.2 磁性地层年代学框架建立

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地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^[24]。数据分析采用 Enkin^[25]和 Cogné^[26]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。

ZK19孔代表性样品 ZK19-56.9 m, ZK19-317.5 m 和 ZK19-438.5 m 的 NRM 强度随退磁温度升高逐步降低,在 580°C 已经衰减至零(图2)。Z 矢量图显示, 200°C 已经将粘滞剩磁消除,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。代表性样品 ZK19-136.65 m、ZK19-281.05 m 和 ZK19-284.95 m 的 NRM 强度在 200°C 之前发生了增强,其后随着退磁温度的增高强度逐渐衰减,样品可能经历了方向相反的2次磁化过程。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 $200\sim 580^{\circ}\text{C}$ 可分离出一个负的稳定剩磁分量(图2)。

根据磁倾角的变化特征建立 ZK19 孔的磁极倒转序列,将 $0\sim 128\text{ m}$ 的正极性带解释为布容正极性带, $128\sim 434\text{ m}$ 的负极性带解释为松山负极性带,将 $162\sim 178\text{ m}$ 和 $282\sim 325\text{ m}$ 的正极性带分别解释为 Jaramillo 和 Olduvai 正极性亚带, 434 m 以下的正极性带解释为高斯正极性带(图3)。

本次工作通过磁性地层研究结合光释光测年数据^①,最终建立了本区第四纪地层年代格架。磁性地层研究表明其中 ZK19 孔 M/G 界线为 434 m ; B/M 界线为 128 m ; 钻孔剖面上光释光测年数据表明, ZK19 孔深度 29.9 m 处获得年龄 $(127.4\pm 6.3)\text{ ka}$, 钻孔剖面在上述年龄附近,地层岩性组合以砂质黏土、黏质砂土、粉砂组成几个向上变细的韵律层,表明当时水动力环境是有规律的变化,反映了本区晚更新世时期河湖相沉积交替的环境特征^②。综合分析

确定 ZK19 孔晚更新统底界深度为 29.9 m ; ZK19 孔深度 1.6 m 处获得光释光年龄 $(16.9\pm 0.7)\text{ ka}$; 本区全新世沉积物特征以淤泥质粉砂、黏土、黏质砂土为主,并夹有黑色淤泥层及泥炭层。局部见有褐黄色粉砂质黏土,黏质粉砂,含大量锈斑,属洪泛平原沉积。综合分析确定 ZK19 孔的全新统底界深度为 1.35 m 。

3 顺义断裂第四纪活动性分析

3.1 顺义断裂概况

顺义断裂西南起自健翔桥附近,经天竺、首都机场附近,经顺义北、北小营到焦庄户一带,走向 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 倾向南东,倾角 60° 左右,延长约 40 km , 为高角度正断裂。沿断裂在顺义一带发育地裂缝,该断裂控制了北京凹陷北缘盆地的演化(图1)。该断裂最早在 1967 年《北京地区主要断裂及其与地震活动的关系》总结报告一文中提出,对该断裂的特征及与地震关系进行了简单论述^③。19 世纪 70 年代末期北京地震地质会战期间开展了遥感解译、地球物理勘测和钻探工程,证实该断裂带在第四纪时期存在强烈活动^④。李文浩等^[27]认为该断裂虽第四纪以来有明显活动,但晚更新世以后,其垂直差异活动不甚明显。黄庆华根据北京地区的地震、地质构造、晚近地壳活动等特征,建立了数学模拟模型,分析了北京地区区域地壳的相对稳定程度和北京市地壳的相对稳定程度^[28]。杨承先通过研究发现顺义断裂为生长断裂,活动性较大^[29]。关华平等根据多年地震资料分析了顺义地区小地震与顺义断裂的关系^[30]。胡平等根据野外考察、化探和槽探研究结果推测顺义断裂是一条现今仍在活动的断裂,该断裂在第四纪期间呈现强弱交替的分期活动特征,并提出中更新世晚期以来断裂活动不明显^[31]。林传勇等通过对顺义油库探槽分析,分析了该断裂第四纪古地震事件^[32]。罗明辉等根据地貌、钻孔、物探、探槽等方面资料的分析,研究了北京断陷新生代沉积地层和构造演化的关系,指出顺义断裂在早更新世—晚更新世均在活动^[33]。张世民等对顺义地裂缝成

①北京市地质调查研究院. 北京平原区活动断裂专项地质调查成果报告. 2012.

②北京市地质调查研究院. 沙河镇幅、长沟幅 1:50000 区域地质调查报告. 2003.

③石油工业部六四六厂二大队. 北京地区主要断裂及其与地震活动的关系年度技术总结报告. 1967.

④北京地震地质办公室. 北京地震地质会战第四专题成果,北京平原区全新世构造活动调查研究. 1982.

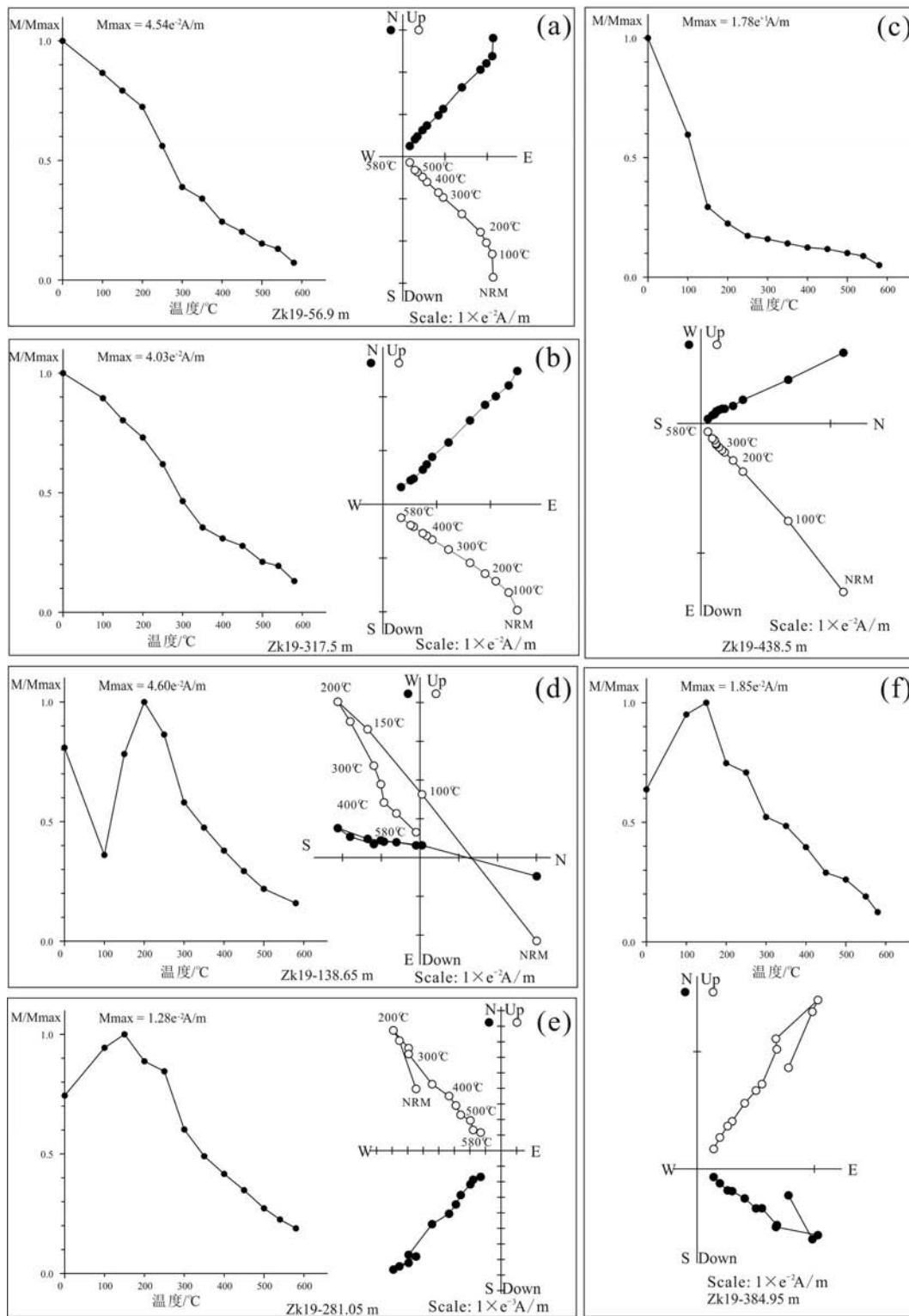


图2 钻孔代表样品的热退磁强度衰减曲线及Z矢量图
 Z矢量图中空心及实心圆分别代表剩磁方向在铅垂面和水平面上的投影;注意磁偏角方向是任意的
 Fig. 2 Orthogonal projections of representative thermal demagnetization and decay curves
 of the natural remanent magnetization (NRM)

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

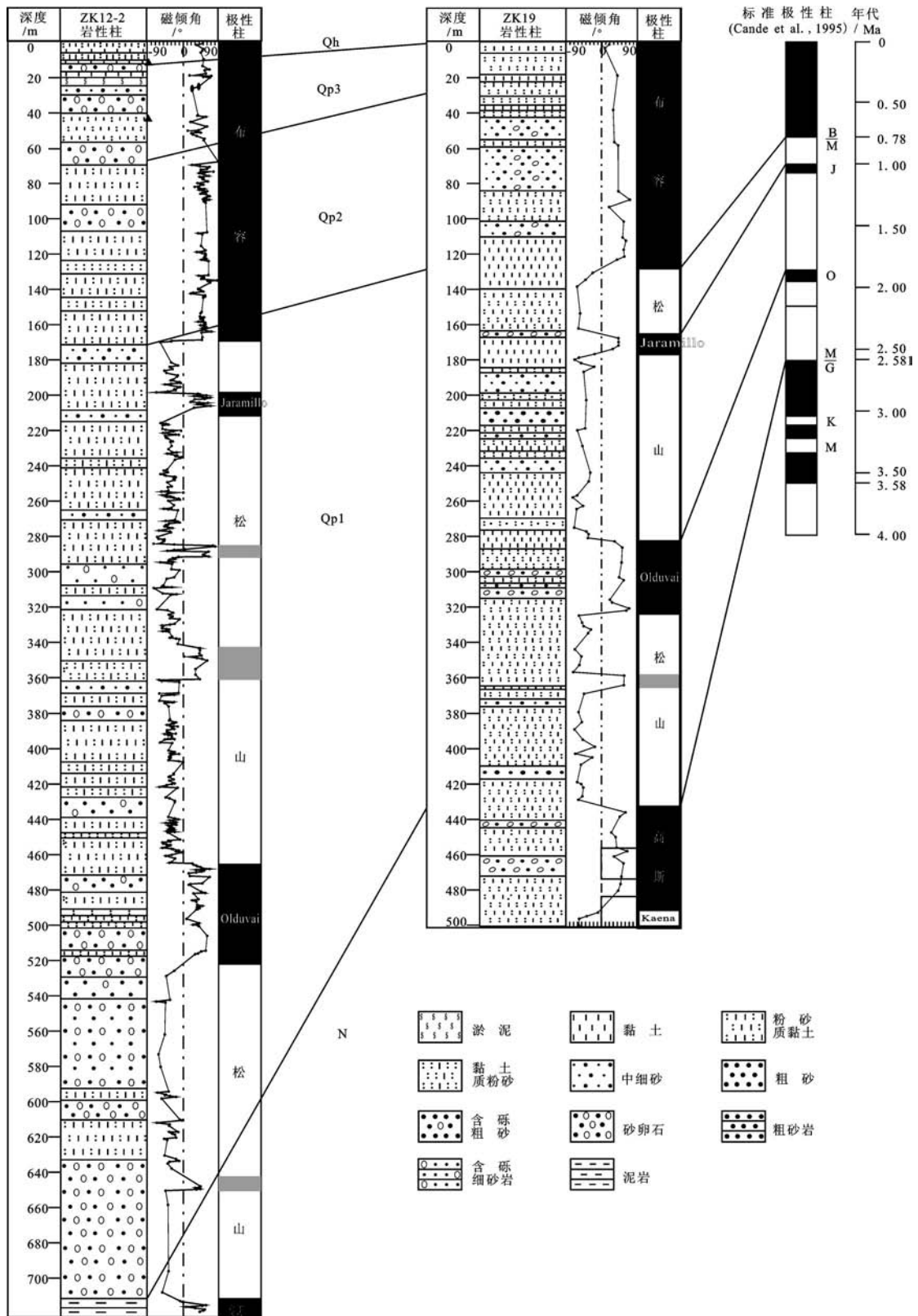


图3 钻孔ZK19和钻孔ZK12-2^[19]磁性地层与标准极性柱对比图^[24]

Fig. 3 The contrast diagram of magnetostratigraphy of the cores ZK19 and ZK12-2 with polarity zones

因及顺义—良乡断裂北段第四纪活动性进行了探讨,认为该断裂在早更新世与中更新世早期有明显活动,中更新世晚期以来不再活动^[34]。

3.2 凹陷盆地第四纪沉积速率对顺义断裂活动性的判别

控制一个区域构造格架的主要因素是该地区的主要断裂,而构造运动的发展也必然依托于主要断裂的活动而表现出来。那么阐述一个地区的构造运动史就成为对主要断裂产生、发展及其活动历史的研究。北京平原后沙峪凹陷和俸伯凹陷盆地内磁性地层年代学框架研究表明受活动断裂的影响,2个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 ZK19 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 434 m、128 m、29.9 m 和 1.35 m;钻孔 ZK12-2 的早更新世、中更新世、晚更新世和全新世地层底板埋深分别为 706 m、170 m、66.5 m 和 10 m^[19]。参考 2009 年国际地层年表第四纪地层界线^[35]划分依据可知,钻孔 ZK19 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 0.17 mm/a、0.15 mm/a、0.25 mm/a 和 0.12 mm/a;钻孔 ZK12-2 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 0.30 mm/a、0.16 mm/a、0.48 mm/a 和 0.87 mm/a。

早更新世,钻孔 ZK12-2 沉积物厚度为 536 m,钻孔 ZK19 沉积物厚度为 306 m,厚度落差达到 230 m,沉积速率差约为 0.13 mm/a,这种差异体现了两个凹陷盆地存在相对运动,即:俸伯凹陷相对于后沙峪凹陷强烈下沉。由于后沙峪凹陷主要受黄庄—高丽营断裂控制,俸伯凹陷主要受顺义断裂控制,由此可知,早更新世时,顺义断裂开始活化,且活动性强于黄庄—高丽营断裂,使得古近—新近形成的北京凹陷北缘盆地解体;中更新世,钻孔 ZK12-2 沉积物厚度为 103.5 m,钻孔 ZK19 沉积物厚度为 98.1 m,厚度落差为 5.4 m,沉积速率差约为 0.01 mm/a,两个凹陷盆地相对运动不明显,表明北京凹陷北缘在这一时期内处于整体沉降状态,顺义断裂相对于黄庄—高丽营断裂活动性不甚明显;晚更新世,钻孔 ZK12-2 沉积物厚度为 56.5 m,钻孔 ZK19 沉积物厚度为 28.55 m,厚度落差达到 27.95 m,沉积速率差约为 0.23 mm/a,上述 2 个凹陷盆地再

次出现明显的差异性沉降,俸伯凹陷的沉积速率大于后沙峪凹陷的沉积速率,此时,顺义断裂相对于黄庄—高丽营断裂再次强烈活动,加速了北京凹陷北缘盆地的分化;全新世时,钻孔 ZK12-2 沉积物厚度为 10 m,钻孔 ZK19 沉积物厚度为 1.35 m,厚度落差达到 8.65 m,沉积速率差达到了整个第四纪时期的最大值 0.75 mm/a,尽管全新世历时较短,但俸伯凹陷沉积速率却远大于后沙峪凹陷沉积速率,顺义断裂此时强烈活动并造成俸伯盆地强烈下陷,同时在地表形成了一定宽度的影响带。调查发现^①,在顺义断裂北段北小营镇道仙庄与桥头村均发现了与断裂走向一致的规模性的地裂缝群以及房屋墙体开裂现象,从而印证了顺义断裂全新世强烈活动的事实。

4 结 论

通过对北京凹陷北缘第四纪后沙峪凹陷内钻孔 ZK19 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。结合俸伯凹陷内已有钻孔 ZK12-2 对比分析第四纪不同时期钻孔地层平均沉积速率差异性变化,对顺义断裂第四纪活动性进行探讨,得到了以下 2 点认识:

(1) 利用磁性地层研究结果与光释光测年数据,建立了钻孔 ZK19 第四纪地层格架。钻孔 ZK19 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 434 m、128 m、29.9 m 和 1.35 m。通过计算得出,钻孔 ZK19 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 0.17 mm/a、0.15 mm/a、0.25 mm/a 和 0.12 mm/a。

(2) 同过对钻孔 ZK19 和 ZK12-2 剖面第四纪不同时期沉积厚度与沉积速率进行对比可知,顺义断裂在第四纪早更新世的强烈活动最终造成了北京凹陷北缘盆地的解体;中更新世,顺义断裂相对于黄庄—高丽营断裂活动性不甚明;晚更新世,顺义断裂相对于黄庄—高丽营断裂再次强烈活动,加速了北京凹陷北缘盆地的分化;全新世,顺义断裂强烈活动并造成了地表地裂缝的发育和建筑物的破坏。

致谢:衷心感谢中国地质大学(北京)张世红教授与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。

①北京市地质调查研究院. 北京平原区活动断裂专项地质调查成果报告. 2012.

参考文献(References):

- [1] 陶晓风, 刘登忠, 朱利东. 陆相盆地沉积作用与构造作用的关系[J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 410-414.
Tao Xiaofeng, Liu Dengzhong, Zhu Lidong. Relationship between sedimentary process in Terrestrial basin and tectonic process[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 410-414(in Chinese with English abstract).
- [2] 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).
- [3] 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. Magnetostratigraphy of BZ1 bore hole in west coast of Bohai Bay, northern China[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 909-916(in Chinese with English abstract).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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 on the tectonic activities in Beijing Down-warped basin[J]. Earthquake Research in China, 1990, 6(2): 25-36(in Chinese with English abstract).
- [7] 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 neotectonic movement in Beijing area[J]. Seismology and Geology, 1991, 13(1): 43-51(in Chinese with English abstract).
- [8] 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 Yanshou, 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 李海燕, 张世红, 赵坤玲, 等. 直流场和交变场对泥岩磁化率的影响[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 635-640.
Li Haiyan, Zhang Shihong, Zhao Kunling, et al. Effects of direct field and alternating field on magnetic susceptibility of mudstone[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(4): 635-640(in Chinese with English abstract).
- [12] 邓成龙. 黄土高原西部—白草塬剖面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).
- [13] 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芯YD0901沉积物为例[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 652-662.
Zheng Yan, Zheng Hongbo, Deng Chengkong, 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).
- [14] 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).
- [15] 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 Northeast Asia[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6): 922-944(in Chinese with English abstract).
- [16] 陈杰, Heermance R V, Burbank D W, et al. 中国西南天山西域砾岩的磁性地层年代与地质意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(4): 576-578.
Chen Jie, Heermance R V, Burbank D W, et al. Magnetostratigraphy and its implications of the Xiyu conglomerate in the Southwestern Chinese Tianshan foreland[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(4): 576-578(in Chinese with English abstract).
- [17] 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).
- [18] 王喜生, 杨振宇, Lovlie R, 等. 松山—布容地磁极性倒转在黄土高原东南缘记录的可靠性探讨[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(6): 963–971.
Wang Xisheng, Yang Zhenyu, Lovlie R, et al. Discussion on the recording fidelity of the matuyama/brunhes boundary in the southeastern extremity of the Chinese loess plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 963–971(in Chinese with English abstract).
- [19] 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).
- [20] 缪卫东, 李世杰, 王润华. 长江三角洲北翼J9孔岩芯沉积特征及地层初步划分[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(1): 126–134.
Liao 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).
- [21] 张磊, 白凌燕, 蔡向民, 等. 北京平原南口—孙河断裂带北西段活动性分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 902–911.
Zhang Lei, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, et al. An analysis of the activity of the northwest part of Nankou–Sunhe fault[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 902–911(in Chinese with English abstract).
- [22] 蔡向民, 黄淇, 张磊, 等. 北京温榆河的成因[J]. *中国地质*, 2014, 41(5): 1515–1521.
Cai Xiangmin, Huang Qi, Zhang Lei, et al. The origin of the Wenyu River in Beijing[J]. *Geology in China*, 2014, 41(5): 1515–1521(in Chinese with English abstract).
- [23] 张雪锋, 张世红, 孟宪刚, 等. 太平洋板块中生代俯冲构造事件的响应: 来自黑龙江东部饶河三叠纪层状燧石的古地磁证据[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 2019–2027.
Zhang Xuefeng, Zhang Shihong, Meng Xiangang, et al. The identification of Mesozoic Pacific plate subduction: Evidence from paleomagnetism of the Late Triassic bedded cherts in Raohe area, eastern Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 2019–2027(in Chinese with English abstract).
- [24] 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.
- [25] Enkin R J. Formation et deformation de l'Asie depuis la fin de l'ère primaire: les apports de l'étude paleomagnetique des formations secondaires de Chine du Sud[D]. Paris: The Ph.D Thesis of Paris University, 1990.
- [26] 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
- [27] 李文浩, 向宏发, 方仲景, 等. 密云—前门隐伏断裂活动性的初步研究[J]. *华北地震科学*, 1992, 10(2): 43–49.
Li Wenhao, Xiang Hongfa, Fang Zhongjing, et al. A preliminary study on the activity of Miyun—Qian men hidden fault[J]. *North China Earthquake Sciences*, 1992, 10(2): 43–49(in Chinese with English abstract).
- [28] 黄庆华, 宋新初. 北京地区区域应力场及地壳稳定性研究[J]. *地球学报*, 1992, 25: 15–24.
Huang Qinghua, Song Xinchu. The research on the recent stress field and regional stability in the Beijing area[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1992, 25: 15–24(in Chinese with English abstract).
- [29] 杨承先. 燕山隆起南斜坡带的构造特征与地震带的活动——一个重要的构造地震带的划分[J]. *地壳构造与地壳应力文集*, 1997: 69–77.
Yang Chengxian. Tectonic characteristics of the Southern Slope of the Yanshan Uplift and Its Seismicity Delineation of an Important Tectono–Seismic Zone[J]. *Collection of Structure and Stress of Crust*, 1997: 69–77(in Chinese with English abstract).
- [30] 关华平, 马丽, 陈棋福, 等. 北京顺义4.0级地震和震后首都圈地震趋势分析[J]. *地震*, 1997, 17(4): 411–416.
Guan Huaping, Ma Li, Chen Qifu, et al. Shun Yi 4.0 Earthquake swarm and the aftershock tendency analysis in the capital area[J]. *Earthquake*, 1997, 17(4): 411–416(in Chinese with English abstract).
- [31] 胡平, 罗华春, 孟勇琦, 等. 从顺义地表破裂带分析顺义—良乡断裂北段的活动性[J]. *地震地质*, 2000, 22(2): 23–128.
Hu Ping, Luo Huachun, Meng Yongqi, et al. Analyses for activity of north section of the Shunyi—Liangxiang fault from the Shunyi ground rupture zone[J]. *Smismology and Geology*, 2000, 22(2): 123–128(in Chinese with English abstract).
- [32] 林传勇, 陈孝德, 罗华春, 等. 北京顺义—前门—良乡断裂探槽的微观分析及其启示[J]. *地震地质*, 2006, 28(4): 561–578.
Lin Chuanyong, Chen Xiaode, Luo Huachun, et al. Microscopic analysis of the trench across the Shunyi—Qian men—Liangxiang fault at Shunyi, Beijing and its implications[J]. *Smismology and Geology*, 2006, 28(4): 561–578(in Chinese with English abstract).
- [33] 罗明辉, 张世明, 任俊杰, 等. 北京断陷的新生代沉积与构造演化[J]. *地壳构造与地壳应力文集*, 2007, (20): 62–74.
Luo Minghui, Zhang Shiming, Ren Junjie, et al. Cenozoic sedimentary and tectonic evolution in Beijing Down–Warped Basin[J]. *Collection of Structure and Stress of Crust*, 2007, (20): 62–74(in Chinese with English abstract).
- [34] 张世民, 刘旭东, 任俊杰, 等. 顺义地裂缝成因与顺义—良乡断裂北段第四纪活动性讨论[J]. *中国地震*, 2005, 21(1): 84–92.
Zhang Shimin, Liu Xudong, Ren Junjie, et al. Quaternary activities of northern segment of the Shunyi—Liangxiang Fault[J]. *Earthquake Research In China*, 2005, 21(1): 84–92(in Chinese with English abstract).
- [35] Walker J D, Geissman J W, Compilers. 2009–Geologic Time Scale: Geological Society of America[M]. The Geological Society of America, 2009, doi: 10.1130/2009.CTS004R2C .