

北京顺义断裂带北段 第四纪活动的天文旋回地层学研究*

张磊¹, 何付兵^{1,2}, 白凌燕¹, 吴怀春³, 徐锡伟²,
蔡向民¹, 王继明¹, 孙永华¹, 刘予¹, 方同明¹
(1. 北京市地质调查研究院, 北京 100095;
2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100085)

摘要: 采用多种物探、钻探技术对北京市顺义断裂带进行了试验探测研究, 并通过天文旋回地层学、古地磁磁化率及年代测定等方法研究了断裂带第四纪以来间歇性活动特征, 得出~2.5、~2.3、~2.0、1.6~1.8、1.2~1.3、~0.5和~0.3 Ma等7个相对活动强烈期和~0.9 Ma次活动强烈期, 其余时段为相对平静期。整个第四纪较长时间内, 早更新世早、中期(早于~1.1 Ma)活动强烈, 活动方式以粘滑活动为主。而早更新世晚期以来(~1.1 Ma以来), 活动速率明显减缓, 活动方式转变为以蠕滑活动方式为主。

关键词: 顺义断裂带; 钻孔探测; 天文旋回地层学; 第四纪活动

中图分类号: P548 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)05-0147-08

Astronomical Cyclostratigraphy Study of Quaternary Activities in Northern Segment of the Shunyi Fault, Beijing

ZHANG Lei¹, HE Fubing^{1,2}, BAI Lingyan¹, WU Huaichun³, XU Xiwei², CAI Xiangmin¹,
WANG Jimin¹, SUN Yonghua¹, LIU Yu¹, FANG Tongming¹

- (1. Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 100195, China;
2. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100085, China)

Abstract: Gravity exploration, shallow seismic investigation and high density resistivity measurement were applied to study Shunyi fault in Beijing, and the data in astronomical cyclostratigraphy, magnetic susceptibility and paleomagnetic chronology from a series of drilling cores were used to infer sporadically activities of the fault's northern segment since Quaternary. The astronomical time scales of the footwall and hanging wall of the Shunyi fault were established respectively to constrain the stratigraphic age of two walls. Its activity characteristics since the Quaternary were revealed through comparison with the thickness of strata and differences of deposition rate. The Shunyi fault showed hallmark of intermittency. Seven intensive phases (~2.5 Ma, ~2.3 Ma, ~2.0 Ma, 1.6~1.8 Ma, 1.2~1.3 Ma, ~0.5 Ma and ~0.3 Ma) and one sub-intensive phase (~0.9 Ma) can be distinguished, and the rest time is considered to be relatively quiet period. Furthermore, Shunyi fault acted intensively in the early and middle Early Pleistocene (earlier than ~1.1 Ma) being featured by sink-slip-dominated activity, and became weak

* 收稿日期: 2014-12-20

基金项目: 北京市公益性基金资助项目(政府办文第30939号)

作者简介: 张磊(1982年生), 男; 研究方向: 活动构造; 通讯作者: 何付兵; E-mail: hefubing14@126.com

profoundly since the late Early Pleistocene (after $\sim 1.1\text{Ma}$) with a feature of creep-dominated activity.

Key words: Shunyi fault zone; drill core; astronomical cyclostratigraphy; Quaternary fault activity

顺义断裂最早于 1967 年提出, 之后借助地震监测、野外考察、遥感、物探、化探及钻探等系列手段, 辅助传统的第四纪年代测量方法, 如 ^{14}C 同位素测年、光释光测年等, 证实了该断裂的存在^[2], 获得了更多研究如该断裂与顺义地区小地震的关系^[3]和第四纪中-晚期活动特征^[4-10]。由于传统的第四纪年代测量方法受技术条件的限制, 研究工作无法实现对整个第四纪的年龄精确测定, 因此也限制了对活动断裂第四纪较长时间内活动规律的有效研究。本文在磁性地层年代和光释光测年辅助下, 开展对顺义断裂带北段上、下两盘钻孔沉积物磁化率数据天文旋回地层分析, 建立钻孔上下盘岩芯精度为 0.1 Ma 的连续天文年代标尺, 对比断层两盘不同地质时期的地层垂直落差, 对顺义断裂北段第四纪以来较长时间的活动特征进行探讨。

1 基本原理

地球轨道参数的地轴斜率、偏心率和岁差发生周期性变化必然引起地球表面接收到的太阳日照量的周期性变化, 进而导致全球气候的周期性变化, 并记录在对气候变化响应敏感的沉积物中, 表现在沉积物结构、构造、岩性、岩相和地球物理、地球化学参数等能够反映古气候变化的代用指标的旋回性变化^[11]。天文旋回地层学即研究受天文轨道周期力控制形成的地层序列的地层学分支学科, 其对地层记录的(准)周期性旋回变化进行识别、描述、对比和成因解释, 并将其应用于地质年代学以提高年代地层框架的精度和分辨率, 实现地层高精度划分。其中, 由周期在 10 ka ~ 2 Ma 之间的轨道力周期性旋回, 即米兰科维奇旋回形成的旋回地层序列是旋回地层学研究的重点^[12-13]。理论上, 如果从地层中识别出米兰科维奇旋回, 就有可能建立分辨率达 0.02 Ma 的天文年代标尺^[11, 14-15]。目前, 显生宙沉积物可将地球轨道参数的周期简化成岁差 20 ka, 短偏心率和长偏心率分别为 100 ka 和 400 ka, 这些周期的比例为 1:5:20^[11]。米兰科维奇旋回正不断地从不同地质历史时期的海、陆相地层中揭示出来^[16-18], 取得极好的地质方面应用。

开展天文旋回地层学分析研究, 一般选择在地层连续、露头较好, 且具有良好年代控制的地层剖面上进行^[11]。在其研究过程中, 首先选定地层沉积物或古气候代用指标, 并从中识别出岁差、短偏

心率和长偏心率的米兰科维奇旋回, 即比较沉积旋回(或古气候代用指标)的旋回叠置方式及比值与这三类地球轨道参数周期的比值是否相近。在此基础上, 根据识别的旋回结果建立初始年代格架, 即建立地层深度(厚度)与时间上的耦合, 深度(厚度)域上的变化转换为时间域上的变化。而后对初始年代格架下的旋回序列开展 100 ka、40 ka 或 20 ka 的信号滤波处理, 以初步的年代学框架(磁性地层年代、放射性同位素年代等)为锚点, 参考滤波曲线, 将钻孔岩芯旋回序列对比到理论旋回曲线上, 最终建立研究地层的天文年代标尺。

2 顺义断裂带概况

顺义断裂带西南起自健翔桥附近, 经顺义天竺、首都机场、北小营至焦庄户一带, 走向 NE40° 转 NE60°, 倾角 60° 左右, 延长约 40 km, 是一条高角度正断裂带(图 1)。其被 NW 向南口-孙河

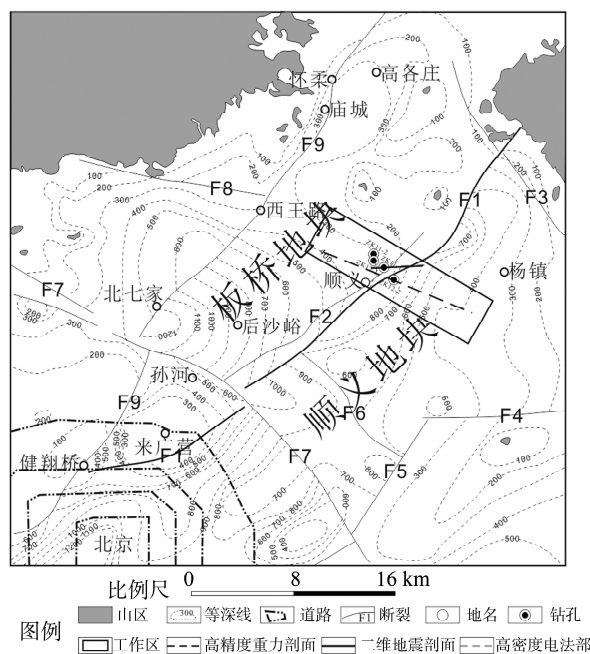


图 1 顺义断裂带构造位置与基岩等深线分布及研究区位置分布图

Fig. 1 The location of Shunyi fault and its buried bedrock isobath

F1 - 顺义断裂带; F2 - 望泉寺断裂; F3 - 马昌营断裂; F4 - 皮各庄断裂; F5 - 南苑-通县断裂; F6 - 李桥断裂; F7 - 南口-孙河断裂; F8 - 兴寿断裂; F9 - 黄庄-高丽营断裂

断裂带切割，并依此为界，可分为南、北两段。南段由于发育于北京城区内，研究程度较低，活动特征不详。北段主断裂倾向南东，局部发育多条次级断裂，整个断裂带控制了新生代顺义凹陷的形成和演化。由顺义凹陷内第四系最大厚度大于 600 m (图 1) 揭示，其北段第四纪总体活动强度较大。

顺义断裂带在构造地貌上表现明显，沿着断裂带呈线状凹陷或微型缓坡陡坎，由来广营一直延升至北小营一带，且于顺义区内段发育众多地裂缝，揭示全新世其仍在活动。同时，探槽^[19]揭露近地表无明显的断面及错断位移，推测其活动方式以蠕滑为主。

3 钻孔布设及数据、样品的采集与处理

3.1 钻孔布设

本次钻孔布设基于对断裂由深到浅、逐次限定后精确定位开展。首先在前人圈定的顺义断裂分布图上大致垂直于断层的走向布设了一条长约 4.11 kmNW 向高精度重力勘探测线。根据高精度重力勘探结果 (图 2a) 限定了断裂带深部基岩中大致位置，进一步通过对重力剖面测量数据的反演、水平一阶导数处理等，获得断裂带基岩断点位置、基岩断裂带宽度等特征。其次，在重力勘探工作基础上，大致垂直于断层走向分别布设了长约 3.48 km 和 3.22 km 的可控源电磁大地测深和二维浅层地震剖面 (图 2b 和 c)，获得断裂带中、浅部几何形态等结构特征。并通过不同物探方法对同一地区从深部到近地表多方法断裂勘探“接力拼接”，可获得断裂带垂向结构^[20] (图 2d)。综合物探综合解译揭示顺义断裂带控制宽度达到 1.8 km 左右。据此，跨断裂带布设了 4 口钻孔 ZK11-2、ZK12-1、ZK11-1 和 ZK12-2 (图 1, 2)。其中 ZK11-2 和 ZK12-1 位于顺义断裂带下盘，终孔深度分别为 310.74 m 和 298.94 m，为穿透第四系地层的基岩钻孔。ZK11-1 和 ZK12-2 位于断裂带上盘顺义凹陷内，终孔深度分别为 413.74 和 719 m，同样穿透第四系地层，但未穿透新生代地层。

通过钻孔岩芯古地磁、沉积相分析等综合手段研究^[19]，第四纪以来，顺义断裂带北段上、下盘四孔钻孔岩性、岩相特征相似 (具体岩性、岩相特征见赵勇等^[21]“北京平原顺义 ZK12-2 钻孔剖面第四纪磁性地层学研究”一文)，同处北京平原地区潮白河流域，隶属于同一沉积体系，且沉积连续。是故，顺义断裂带上、下两盘钻孔具有可对比

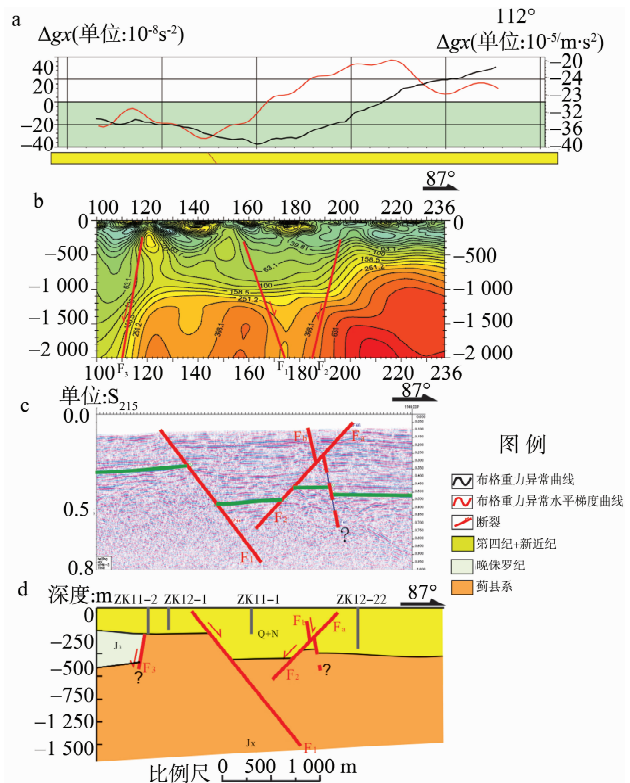


图 2 顺义断裂带综合物探解译断裂带结构图

Fig. 2 Shunyi fault in geophysical and geological profiles

性，满足本次开展天文旋回地层分析、对比的连续沉积之必要条件。

3.2 数据、样品的采集与处理

与气候变化相关联的参数均可作为旋回地层学分析的气候代用指标^[11]。磁化率作为一种重要的环境代用指标，当前已经广泛应用于各类沉积环境研究中^[22]。张永栋等^[23]在北京冲洪积平原地区还探讨过磁化率同粒度的相关性，指出其对北京地区古气候研究的可行性。是故，本次古气候代用指标选取为岩芯磁化率。综合考虑顺义断裂带于这一地区宽度，为控制整个断裂带第四纪活动量，选取位于断裂上下两盘的 ZK12-1 和 ZK12-2 两钻孔开展旋回地层分析。

为获取原位高分辨率磁化率数据，测试前首先刮去钻探岩芯表面泥浆。然后根据区域地质资料，结合本次钻孔沉积物种类和沉积地层厚度大致估算断裂上下盘沉积速率约为 21.58 和 7.16 cm/ka，进而确定本次磁化率测试密度计每 10 cm 岩芯测试一次，远远满足每个旋回至少包含 4 个等间距分布数据点。本次测试所用仪器为捷克 AGICO 公司生产的野外便携式 SM30 手持磁化率仪，共计获得磁化率数据 12 950 组。

对取得的数据按照频谱分析方法进行旋回地层

学分析^[11]。分析前先对数据进行等间距的时间序列插值、去线性趋势、去均值、去极值和归一化预处理,再利用 MTM 频谱分析软件包进行频谱分析,采用 Anlyseries 2.0.4 软件进行滤波处理和天文调谐以最终获得钻孔的连续天文年代标尺。

为建立钻孔岩芯地层天文年代标尺,对该两钻孔进行磁性地层年代测试和光释光、¹⁴C 年龄标定,作为旋回分析的时间锚点,以将钻孔岩芯旋回序列对比到理论旋回曲线上。古地磁样品的采集主要选择在岩芯比较完整、连续,粒度较细的层位进行,对于主要为粗碎屑的沉积层,只能尽最大可能采集样品。首先用油性记号笔标出取样位置,并标明样品所取岩芯段的顶底方向,其次将做好记号的整段岩芯取出,在保证标志线所在的面不受破坏外,尽量获取岩芯中部的样品。本次对 ZK12-1 和 ZK12-2 两钻孔分别取定向古地磁样品 120 件和 648 件。

对获取的定向古地磁初始样品进行就地精加工成边长为 2 cm 的立方体样品后送古地磁实验室。古地磁测试在中国地质大学(北京)古地磁与环境磁学实验室进行,磁化率各向异性测试仪器为捷克 AGICO 公司生产的 MFK1 卡帕桥磁化率仪,磁性矿物类型测试仪器为捷克 AGICO 公司生产的 KLY4S 卡帕桥磁化率仪,完成对 ZK12-1 和 ZK12-2 两钻孔分别 120 件和 640 件样品的系统热退磁分析,建立两钻孔的古地磁极性柱(图 3 和 4)。

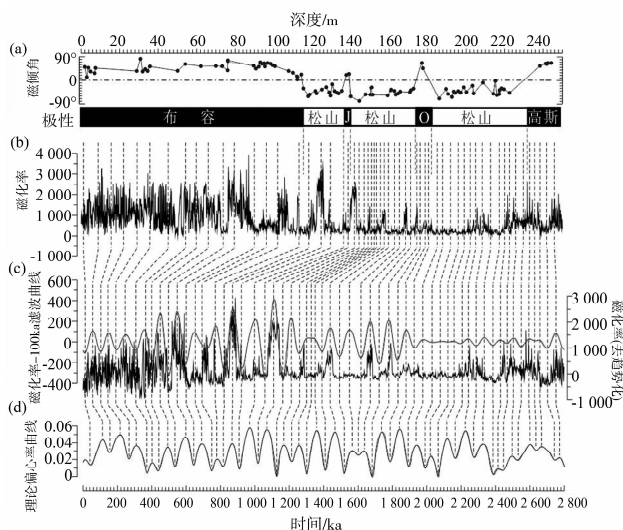


图 3 ZK12-1 孔天文年代标尺

Fig. 3 The astronomical age reference of core ZK12-1

(a) 磁倾角与地磁极性柱; (b) 磁化率在深度域上的变化特征; (c) 根据古地磁极性柱提供的初始年代格架将磁化率在深度域上的变化转化为时间域,并获得 100ka 的滤波曲线; (d) 偏心率理论曲线及其与磁化率曲线的对比

4 测试结果

4.1 古地磁分析结果

最终建立 ZK12-1 钻孔磁倾角及地磁极性柱见图 3a,同标准磁极性柱进行对比分析并解释:0~115 m 深度显示为正极性带,解释为布容正极性带;115~232 m 深度显示为以负极性带为主,解释为松山负极性带,带内在 136~139.5 m 和 173.5~182 m 深度出现两次正极性带,分别解释为松山负极性带内的 Jaramillo 和 Olduvai 正极性亚带;232 m 至终孔深度显示为正极性带,解释为高斯正极性带。

最终建立 ZK12-2 钻孔磁倾角及地磁极性柱见图 4a,同样同标准磁极性柱进行对比分析并解释:0~170 m 深度显示为正极性带,解释为布容正极性带;170~710 m 深度显示为以负极性带为主,解释为松山负极性带,其带内出现五次正极性带,解释 200~210 m 和 464~520 m 深度出现的松山负极性带内的 Jaramillo 和 Olduvai 正极性亚带,另外 3 个正极性带可能为短时漂移事件;710 m 至终孔深度显示为正极性带,解释为高斯正极性带。

结合钻孔岩性、岩相分析和本次工作于钻孔中所取的为数不多光释光、¹⁴C 测年资料^[19],分别建立 ZK12-1 和 ZK12-2 钻孔初步第四纪年代格架。钻孔 ZK12-1 和 ZK12-2 的早、中、晚更新世和全新世

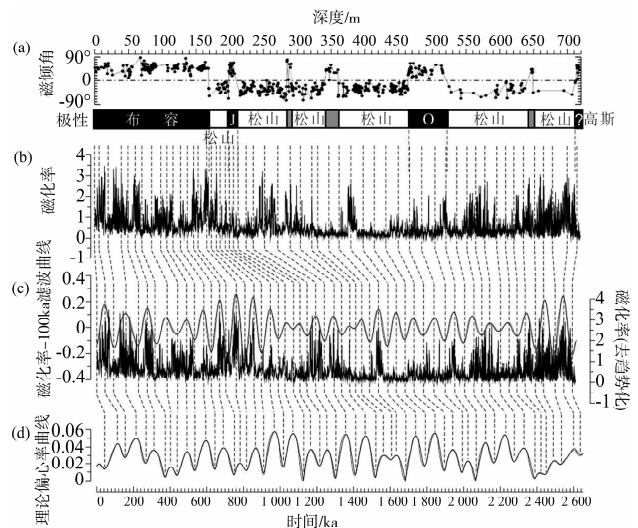


图 4 ZK12-2 孔天文年代标尺

Fig. 4 The astronomical age reference of core ZK12-2

(a) 磁倾角与地磁极性柱; (b) 磁化率在深度域上的变化特征; (c) 根据古地磁极性柱提供的初始年代格架将磁化率在深度域上的变化转化为时间域,并获得 100ka 的滤波曲线; (d) 偏心率理论曲线及其与磁化率曲线的对比

地层底面埋深分别为 232.8, 115.2, 48.8 和 3 m, 以及 706, 170, 66.5 和 4.4 m。

4.2 旋回地层学分析结果

ZK12-1 孔磁化率数据频谱分析结果揭示出明显的旋回性, 具有约 51.2, 20.5 m, 15.2, 8.9, 6.4, 5.8, 5.4, 4.3, 4, 3.3 和 2.7 m 的主周期, 其中 (20.5 ~ 15.2 m) : (8.9 m) : (4.3 ~ 3 m) 的比值接近 5:2:1, 与 (短偏心率 100 ka) : (斜率 40 ka) : (岁差 20 ka) 的比值接近, 这些旋回可能分别代表了短偏心率、斜率和岁差沉积旋回 (图 5a)。根据磁性地层学结果建立初始年代格架, 将磁化率数据在深度域上的变化转换为时间域上的变化后, 频谱分析结果显示出明显的短偏心率、斜率和岁差周期 (图 5b)。进一步对初始年代格架下的磁化率序列进行 100 ka 的短偏心率信号滤波处理 (图 5c), 以磁性倒转年龄为锚点, 参考滤波曲线, 将磁化率序列对比到理论偏心率曲线上, 依据是将磁化率高值对比到偏心率高值上, 磁化率低值对比到偏心率低值上, 据此建立了 ZK12-1 孔天文年代标尺 (图 3、表 1)。

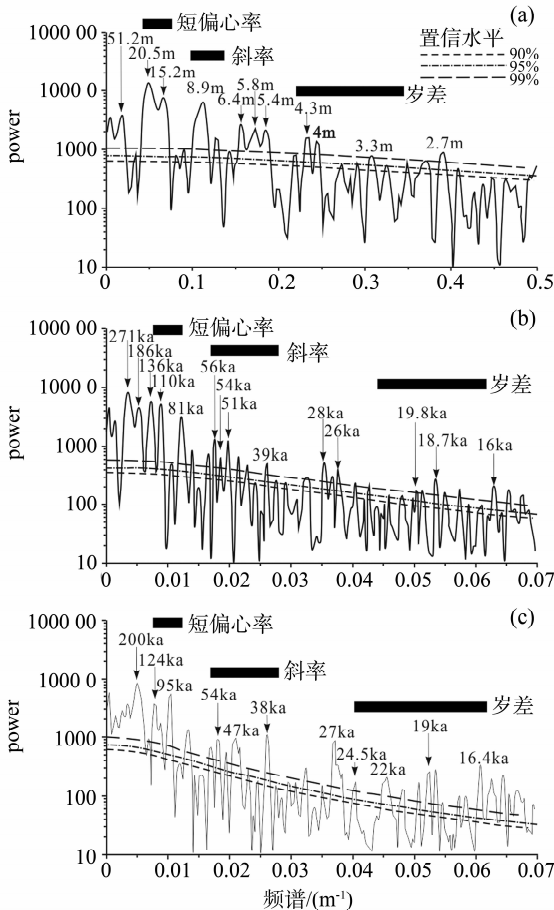


图 5 ZK12-1 孔磁化率在深度域 (a), 初始年代格架 (b) 和调谐后 (c) 频谱分析结果
Fig. 5 Depth, tuning and the preliminary age framework of magnetic susceptibility data in core ZK12-1

ZK12-2 孔磁化率数据频谱分析结果同样揭示出明显的旋回性, 具有约 117, 19.5, 17.1, 9.0, 7.35, 4.85, 4.54 和 3.59 m 的主周期, 其中 (20 ~ 16 m) : (9 ~ 7.35 m) : (4.85 ~ 3 m) 的比值接近 5:2:1, 与 (短偏心率 100 ka) : (斜率 40 ka) : (岁差 20 ka) 的比值接近, 这些旋回可能分别代表了短偏心率、斜率和岁差沉积旋回 (图 6a)。根据磁性地层学结果建立的初始年代格架, 将磁化率数据在深度域上的变化转换为时间域上的变化后, 频谱分析结果显示出明显的短偏心率、斜率和岁差周期 (图 6b)。进一步对初始年代格架下的磁化率序列进行 100 ka 的短偏心率信号滤波处理 (图 6c), 以磁性倒转年龄为锚点, 参考滤波曲线, 将磁化率序列对比到理论偏心率曲线上, 依据是将磁化率高值对比到偏心率高值上, 磁化率低值对比到偏心率低值上, 据此建立了 ZK12-2 孔的天文年代标尺 (图 4、表 1)。

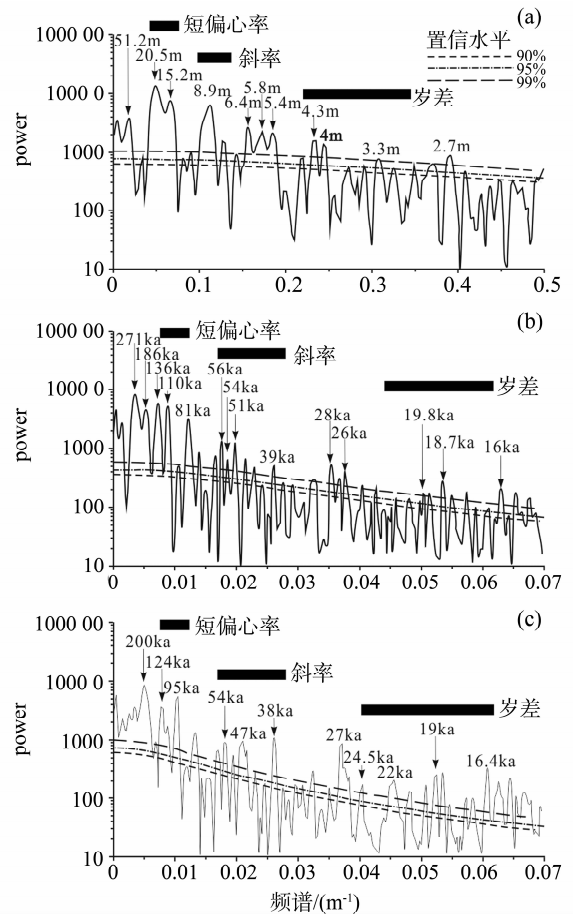


图 6 ZK12-2 孔磁化率在深度域 (a), 初始年代格架 (b) 和调谐后 (c) 频谱分析结果
Fig. 6 Depth, tuning and the preliminary age framework of magnetic susceptibility data in core ZK12-2

5 断层的几何形态与活动特征探讨

5.1 断层的几何形态

根据多种物探综合解译成果绘制不同深度综合绘制不同深度顺义断裂带垂向结构 (图 2d), 顺义断裂带北段南彩地区由三条分支断裂 F1、F2 与 F3 构成。其中, F1 为主断裂, 产状 NE 倾, 倾角约 60° (地震剖面视倾角 49°), 深、浅部物探手段均有显示, 且地表发育地裂缝, 为活动断裂。F2、F3 断裂为顺义断裂带分支断裂, F3 分支断裂 (前人^[24]命名为望泉寺断裂, 并认为该断裂控制了中生代盆地, 为晚侏罗系地层和中上元古界地层的分界断裂) 倾向北西, 被重力、可控源探测深度所揭示, 但在二维地震探测剖面至 500m 深度特征不明显 (图 2c), 产状不明。F2 分支断裂主断面也

倾向北西, 在近地表处向上分为 Fa 与 Fb 两条断层 (图 2d), 深、浅部物探手段同样均有显示, 地表亦发育地裂缝, 同为活动断裂。F3 分支断裂中, Fa 断层产状 NW 倾, 倾角约 55° (地震剖面视倾角 43°), 根据产状向下延伸最终汇交于顺义断裂带主断裂 F2 中, 而 Fb 断层产状 NE 倾, 倾角近直立 (地震剖面视倾角 74°), 在约 350 m 深度汇于 Fa 断层或向深部延伸?

5.2 活动特征

对比 ZK12-1 和 ZK12-2 钻孔分别建立的天文年代标尺上顺义断裂带上、下盘堆积年代相同的层位的沉积物 0.1 Ma 期间沉积厚度或沉积速率, 换算断裂位错量, 揭示顺义断裂带及断裂带两盘地块活动特征。

表 1 顺义断裂每 100ka 活动速率统计表

Table 1 The activity rate per 100 ka of the Shunyi fault zone

时间/ka	Zk12-1 钻孔			Zk12-2 钻孔			累积垂直位移 总量/m	活动速率/ (mm · a ⁻¹)
	底面埋深 m	沉积厚度	平均沉积速率 (mm · a ⁻¹)	底面埋深 m	沉积厚度	平均沉积速率 (mm · a ⁻¹)		
100	7.746 6	7.746 6	0.077 5	8.410 4	8.410 4	0.084 1	2.463 8	0.024 6
200	19.970 4	12.223 8	0.122 2	30.693 3	22.282 9	0.222 8	12.522 9	0.100 6
300	33.863 0	13.892 6	0.138 9	58.538 7	27.845 4	0.278 5	26.475 7	0.139 5
400	53.185 4	19.322 4	0.193 2	83.409 6	24.870 8	0.248 7	32.024 1	0.055 5
500	67.104 3	13.918 8	0.139 2	108.449 1	25.039 5	0.250 4	43.144 8	0.111 2
600	80.198 3	13.094 0	0.130 9	128.387 7	19.938 7	0.199 4	49.989 4	0.068 4
700	97.808 9	17.610 6	0.176 1	148.299 3	19.911 6	0.199 1	52.290 4	0.023 0
800	116.736 7	18.927 8	0.189 3	169.538 1	21.238 8	0.212 4	54.601 4	0.023 1
900	127.927 6	11.190 9	0.111 9	185.019 3	15.481 2	0.154 8	58.891 7	0.042 9
1 000	138.131 0	10.203 4	0.102 0	197.485 2	12.465 9	0.124 7	61.154 2	0.022 6
1 100	142.435 9	4.304 9	0.043 0	221.863 9	24.378 7	0.243 8	81.228 0	0.200 7
1 200	147.721 3	5.285 4	0.052 9	264.487 1	42.623 2	0.426 2	118.565 8	0.373 4
1 300	151.722 3	4.001 0	0.040 0	308.172 2	43.685 1	0.436 9	158.249 9	0.396 8
1 400	154.726 2	3.003 9	0.030 0	326.630 8	18.458 6	0.184 6	173.704 6	0.154 5
1 500	158.889 8	4.163 5	0.041 6	356.610 4	29.979 6	0.299 8	199.520 7	0.258 2
1 600	165.634 7	6.744 9	0.067 4	396.340 9	39.730 5	0.397 3	232.506 2	0.329 9
1 700	172.203 5	6.568 8	0.065 7	435.369 8	39.028 9	0.390 3	264.966 3	0.324 6
1 800	176.625 6	4.422 1	0.044 2	473.641 1	38.271 3	0.382 7	298.811 5	0.338 5
1 900	181.640 5	5.014 9	0.050 1	502.165 0	28.523 9	0.285 2	322.324 5	0.235 1
2 000	191.462 0	9.821 5	0.098 2	544.236 4	42.071 4	0.420 7	354.574 4	0.322 5
2 100	198.065 5	6.603 5	0.066 0	573.511 8	29.275 4	0.292 8	377.246 3	0.226 7
2 200	203.480 2	5.414 7	0.054 1	595.693 6	22.181 8	0.221 8	394.013 4	0.167 7
2 300	210.309 3	6.829 1	0.068 3	636.107 1	40.413 6	0.404 1	427.5979	0.3358
2 400	218.253 1	7.943 8	0.079 4	658.788 9	22.681 7	0.226 8	442.3358	0.1474
2 500	226.469 1	8.216 0	0.082 2	698.556 2	39.767 4	0.397 7	473.8872	0.3155
2 600	232.853 3	6.384 3	0.063 8	-	-	-	-	-
2 700	239.575 3	6.722 0	0.067 2	-	-	-	-	-

注:100ka 以来的累积位移总量、活动速率统计包括了地表高程差 1.8m。

1) 顺义断裂带下盘沉积速率介于 0.03 ~ 0.193 2 mm/a (表 1)。沉积速率随时间变化曲线上 (图 7) 大约以 1 ~ 1.1 Ma 年代划分为两段: 早于 1.1 Ma 沉积速率较慢, 且波动不大; 1 Ma 以来沉积速率明显增快, 且有所波动, 至约 0.3 Ma 以来, 宏观沉积速率逐渐转缓。一般来说, 正断裂带下盘由于断裂活动抬升作用, 沉积环境稳定性相对下盘要差, 可能存在沉积间断地层缺失或因断裂活动抬升剥蚀而引起的地层缺失。然而, 顺义断裂带为隐伏活动断裂带, 综合研究表明^[19] 其下盘第四纪沉积连续。因此, 该沉积速率是否可以反映更大空间区域上板桥地块乃至北京平原区第四纪整体沉降特征? 即早更新世早、中期北京平原区沉降较慢, 早更新世晚期以来沉降明显增快, 至晚更新晚期略有转缓。

2) 顺义断裂带上盘沉积速率则介于 0.084 0 ~ 0.436 9 mm/a (表 1)。沉积速率随时间变化曲线上 (图 7) 同样大约以 1 ~ 1.1 Ma 年代划分为两段: 早于 1.1 Ma 沉积速率最快, 且波动很大; 1 Ma 以来沉积速率明显减缓, 总体波动也不大, 至约 0.3 Ma 前后沉积速率有所波动, 进一步变慢。隐伏断裂带的上盘沉积环境相对稳定^[25], 其沉积规律可代表上盘地块的沉降特征。是故, 顺义凹陷整个第四纪沉积特征表现为早更新世早、中期沉降较快, 早更新世晚期以来沉降明显减缓, 晚更新晚期至全新世进一步转缓。

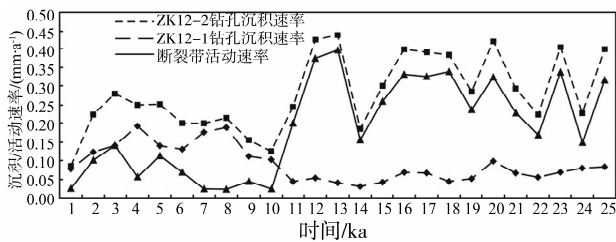


图 7 顺义断裂带上下盘沉积速率、活动速率随时间变化曲线分布图

Fig. 7 Curve of the Deposition rate-Ages and Activity rate-Ages of the Shunyi Fault Zone

3) 对比顺义断裂带上、下两盘沉积速率, 断裂带上盘沉积速率均值远大于断裂带下盘, 且任何时间段均大于断裂带下盘 (图 7, 表 1), 反映出顺义断裂带上、下盘存在着相对的差异升降运动。根据限定的地质时代, 换算其第四纪以来不同阶段的累积垂直位移及 100ka 时间段内平均活动速率

(表 1)。早于 ~1.1 Ma 期间, 顺义断裂带活动速率较大, 平均活动速率达到 0.275 2 mm/a, 是强烈活动时期。而且上、下两盘沉积速率随时间曲线明显“镜状对称” (图 7), 而上盘沉积速率的波状起伏对应下盘的稳定沉积, 进一步揭示其活动还具有间歇性特征。在 ~2.5、~2.3、~2.0、1.6 ~ 1.8 和 1.2 ~ 1.3 Ma 等 5 个时间段是断裂带最强烈活动期, 其它时间段则表现为相对平静活动期 (图 7)。~1.1 Ma 以来, 顺义断裂带活动速率明显减小, 平均活动速率仅为 0.073 8 mm/a。上、下盘沉积速率随时间变化曲线由“镜状对称”转变为“同步变化” (图 7), 推测可能同顺义断裂带活动方式发生了变化有关, 1.1 Ma 后活动方式逐渐转化为今探槽揭露的以蠕滑活动方式为主。同样, 这段时间, 顺义断裂同其它活动断裂一样, 仍具有间歇性特征。在 ~0.5、~0.3 Ma 为期间的强烈活动期, ~0.9 Ma 为次活动期, 其它时间段为相对平静期 (图 7)。趋势显示最近的 100ka 以来, 顺义断裂带活动速率逐渐减小, 也同前人^[6,26] 研究成果基本一致。

6 结论

1) 顺义断裂带上、下盘所在的顺义凹陷地块和板桥地块活动特征表现为在整个第四纪期间整体下沉, 但受顺义断裂带活动影响, 差异沉降明显。顺义凹陷早更新世早、中期沉降较快, 早更新世晚期以来沉降速度明显减缓。而板桥地块则正好相反。

2) 顺义断裂带活动特征则表现为早更新世早、中期 (早于 ~1.1 Ma) 活动强烈, 活动方式可能以粘滑活动为主。而早更新世晚期以来 (~1.1 Ma 以来), 活动速率明显减缓, 活动方式转变为以蠕滑活动方式为主。同时, 顺义断裂带活动还具有间歇性特征, 整个第四纪以来, 可以划分为 ~2.5、~2.3、~2.0、1.6 ~ 1.8、1.2 ~ 1.3、~0.5、~0.3 Ma 等 7 个相对活动强烈期和 ~0.9 Ma 次活动强烈期。

3) 通过天文旋回地层学分析可建立连续地层的天文年代标尺, 用于解决第四纪较长时间段精确地层年代对比限制, 为隐伏活动断裂较长时间活动规律的研究开辟新的途径。本次钻孔岩芯的天文旋回地层学分析按照短轴偏心率周期 (100 ka) 进行, 仅以磁性柱年龄作为锚点。如果同时辅助有其它更多测年数据, 采用不等间距进行插值, 可开展

以第四纪岁差周期 (20 ka) 调谐, 提高天文旋回地层学分析的精度, 进一步细化隐伏活动断裂规律的探究。

4) 本次钻孔间距与地层划分精度的限制, 以天文旋回地层学框架建立的钻孔天文年代标尺开展的地层厚度对比仅能识别断裂的活跃期与平静期, 对于蠕滑活动方式为主的活动断裂研究可能意义更大。因为, 该方法前提条件之一是地层的连续沉积, 而陆相地层沉积过程中, 受构造因素控制的地区更多可能存在沉积间断或因断裂活动引起的地层缺失。是故, 该类方法很难分辨粘滑活动引起的地震地表位错事件, 更不必说细化分辨单个地震地表位错事件, 毕竟活跃期可能由数次地震地表位错事件组成^[7]。

致谢: 本文在成文过程中得到了中国地质大学 (北京) 张世红、杨天水教授的指导, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 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[R]. 北京市地质调查研究院, 1967.
- [2] 北京地震地质会战办公室. 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[R]. 北京市地质调查研究院, 1982.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, 10: 69 - 77.
- [6] 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): 123 - 128.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 邱泽华, 唐磊, 阚宝祥, 等. 用钻孔应变观测研究北京地区活断层的现今活动[J]. 地震地质, 2007, 29(4):

- 716 - 728.
- [11] 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 等. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望[J]. 地球科学, 2011, 36(3): 409 - 428.
- [12] HOUSE MR, GALE AS. Orbital forcing timescales and cyclostratigraphy [M]. London: Geological Society of London, Special Publication, 1995: 1 - 18.
- [13] SCHWARZACHER W. Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory [M]. Amsterdam: Elsevier, 1993: 1 - 225.
- [14] HINNOV LA, GRADSTEIN FM, OGG JG, et al. A geological time scale—Earth's orbital parameters and cyclostratigraphy [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 55 - 62.
- [15] 徐道一, 韩延本, 李国辉, 等. 天文地层学的兴起[J]. 地层学杂志, 2006, 30(4): 323 - 326.
- [16] HINNOV LA, OGG JG. Cyclostratigraphy and the astronomical time scale [J]. Stratigraphy, 2007(4): 239 - 251.
- [17] 吴怀春, 张世红, 黄清华. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 159 - 169.
- [18] 刘洋, 吴怀春, 张世红, 等. 珠江口盆地珠一坳陷韩江组 - 万山组旋回地层学[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(3): 411 - 423.
- [19] 王继明, 何付兵, 张磊, 等. 北京平原区顺义断裂精确定位与活动性综合调查专题研究成果报告[R]. 北京市地质调查研究院, 2012.
- [20] 何付兵, 白凌燕, 张磊, 等. 夏垫断裂带新生代地层中的空间展布与第四纪活动性[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 490 - 505;
- [21] 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.
- [22] 吉云平, 夏正楷. 不同类型沉积物磁化率的比较研究和初步解释[J]. 湖泊科学, 2007, 28(6): 541 - 549.
- [23] 张永栋, 王均平, 魏明建, 等. 北京市昌平区钻孔岩芯的磁化率与粒度组份变化的相关性研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(3): 572 - 579.
- [24] 北京市地质调查研究院. 北京市城市发展多参数立体地质调查总报告——北京市平原区基岩 (前新生代) 地质构造图 [R]. 北京市地质调查研究院, 2007.
- [25] 徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列: 河北夏垫断裂古地震研究[J]. 地震地质, 2000, 22(1): 9 - 19.
- [26] 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.