

doi: 10.12029/gc20210218

陈宏强, 专少鹏, 陈超, 赵华平, 杨瑞, 何娇月, 胥勤勉. 2021. 河北省唐山地区丰台—野鸡坨断裂第四纪活动性——来自¹⁴C和磁性地层年代学的证据[J]. 中国地质, 48(2): 605–617.

Chen Hongqiang, Zhuan Shaopeng, Chen Chao, Zhao Huaping, Yang Rui, He Jiaoyue, Xu Qinmian. 2021. Quaternary activity of the Fengtai–Yejituo fault in Tangshan, Hebei Province: Evidence from ¹⁴C and magnetic stratigraphy[J]. Geology in China, 48(2):605–617(in Chinese with English abstract).

河北省唐山地区丰台—野鸡坨断裂第四纪活动性 ——来自¹⁴C和磁性地层年代学的证据

陈宏强¹, 专少鹏¹, 陈超¹, 赵华平¹, 杨瑞¹, 何娇月¹, 胥勤勉²

(1. 河北省区域地质调查院, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 丰台—野鸡坨断裂为唐山地区主要断裂之一, 西侧为鸦鸿桥凹陷, 东侧为唐山凸起, 断裂两侧第四系厚度之差巨大。本文依据该断层两侧钻孔对其第四纪以来活动性进行初步的探讨。通过对丰台—野鸡坨断裂上下两盘 PZK14 和 PZK20 孔磁性地层学研究, 并结合钻孔岩石地层, 及浅部光释光和¹⁴C 测年结果, 建立第四纪地层格架。结果表明: 两孔底部“泥包砾”为新近纪沉积; PZK14 孔下更新统底界埋深为 387 m, 中更新统底界埋深为 114 m, 上更新统底界埋深为 71 m, 全新统底界埋深为 6 m; PZK20 孔下更新统底界埋深为 155 m, 中更新统底界埋深为 73 m, 上更新统底界为 36 m, 无全新世地层。丰台—野鸡坨断裂活动在早更新世时表现为逐渐增强的特点, 活动速率由早期的 5.4 cm/ka 增加到 13.9 cm/ka。中更新世断裂活动基本处于停滞状态, 活动速率为 1.0 cm/ka。晚更新世以后, 断裂重新活动, 且更加剧烈, 活动速率达到了 54.5 cm/ka。

关键词: 第四纪; 丰台—野鸡坨断裂; 古地磁; 沉积速率; 断裂活动性; 地质调查工程

中图分类号: P318.4⁺4

文章标志码: A

文章编号: 1000–3657(2021)02–605–13

Quaternary activity of the Fengtai–Yejituo fault in Tangshan, Hebei Province: Evidence from ¹⁴C and magnetic stratigraphy

CHEN Hongqiang¹, ZHUAN Shaopeng¹, CHEN Chao¹, ZHAO Huaping¹,
YANG RUI¹, HE Jiaoyue¹, XU Qinmian²

(1. Regional Geological Survey Institute of Hebei Province, Langfang 065000, China; 2. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Fengtai–Yejituo fault is one of the major faults in the Tangshan area. Its west side is Yahongqiao sag, while its east side is Tangshan rise. There is an obvious difference in the thickness of the Quaternary strata between both sides of the fault. Based on the boreholes on both sides of the fault, this paper makes a preliminary study on its activity since the Quaternary period. Combined with drilling information, the composition of rocks, and the results of the optically stimulated luminescence(OSL) and ¹⁴C

收稿日期: 2019–05–12; 改回日期: 2020–01–08

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160042、DD20160060 及 121201102000150012–21)资助。

作者简介: 陈宏强, 男, 1991 年生, 工程师, 主要从事第四纪地质与区域地质研究工作; E-mail: 1207815740@qq.com。

通讯作者: 胥勤勉, 男, 1979 年生, 高级工程师, 主要从事华北第四纪地层研究工作; E-mail: xuqinmian@163.com。

dating, the Quaternary stratigraphic framework was established according to the magnetic stratigraphy of the boreholes PZK14 and PZK20 which are hanging on the upper and lower plates of the Fengtai–Yejituo fault. The results show that the "boulder–clay layer" at the bottom of the two holes was Neogene sediments. The borehole PZK14 revealed that the buried bottom boundary depth of the Lower Pleistocene, the Middle Pleistocene, the Upper Pleistocene and the Holocene was 387 m, 114 m, 71 m and 6 m, respectively. The borehole PZK20 showed that the buried bottom depth of the Lower Pleistocene, the Middle Pleistocene and the Upper Pleistocene sediments was 155 m, 73 m and 36m respectively, without the Holocene sediments. The activity of Fengtai–Yejituo fault gradually enhanced in the early Pleistocene and its activity rate increased from the early 5.4 cm/ka to 13.9 cm/ka. In the Middle Pleistocene, its activity is basically in a state of stagnation, with an activity rate of 1.0 cm/ka. After the Late Pleistocene, it was reactivated and became more intense active, with activity rate of 54.5 cm/ka.

Key words: Quaternary; Fengtai–Yejituo fault; Paleomagnetism; deposition rate; fault activity; geological survey engineering

About the first author: CHEN Hongqiang, male, born in 1991, engineer, engaged in the research of Quaternary geology and regional geology; E-mail: 1207815740@qq.com.

About the corresponding author: XU Qinmian, male, born in 1979, senior engineer, engaged in the research of Quaternary strata in North China; E-mail: xuqinmian@163.com.

Fund support: Funded by the project of China Geological Survey (No.DD20160042, No. DD20160060, No.121201102000150012–21).

1 引 言

冀东地区分布多条活动断裂,如唐山断裂带、丰台—野鸡坨断裂和滦县—乐亭断裂等(李绍柄, 1986;江娃利, 2006;王春镛等, 2016, 2017),且唐山断裂带曾在1976年发生Ms7.8级地震。1976年唐山大地震之后,区域地质工作揭示了丰台—野鸡坨断裂西侧为鸭鸿桥凹陷,唐山断裂带东侧为凹陷,两条断裂之间为唐山凸起(刘国栋等, 1982, 1983)。针对唐山断裂带开展了大量的浅层地震勘察和钻探等工作(陈运泰等, 1979;朱露培等, 1990;万永革等, 1996),但是对区域上其他断裂缺少调查研究,尤其是缺少对断裂控制第四纪地层发育特征的研究。

近几年,冀东沿海区域开展了细致的区域地质调查工作和较为详细的磁性地层年代学研究,揭示了不同构造单元第四纪地层发育特征以及新构造活动规律(Xu et al., 2017)。内陆区域,也有少量钻孔进行了地层和饱和粉的研究(李玉嵩等, 2011;胡云壮等, 2014)。唐山地区新构造运动复杂,需要调查研究更多次级构造单元第四纪地层的特征,才能更准确地解析唐山地区新构造特征。

本次工作主要调查研究唐山地区丰台—野鸡坨断裂的第四纪活动性,通过断层两侧标准孔(PZK14和PZK20)岩石组合、年代地层和沉积速率对比,揭示其活动规律,为今后的地震预防、工程勘

察和城市的土地利用与规划提供基础性资料(张磊等, 2016)。

2 地质背景

受宁河—昌黎断裂、丰台—野鸡坨断裂、滦县—乐亭断裂和蓟运河断裂的切割,唐山地区形成了一个NE向的菱形地块(魏顺民等, 1977)。丰台—野鸡坨断裂为控制其西边界的一条断裂,断裂西北侧基底主要为巨厚的元古宙蓟县纪地层,东南侧主要为古生代和中生代地层。断裂两侧新生代地层差异也较大,断裂西侧鸭鸿桥凹陷内新生界最厚约1000 m;东侧唐山凸起厚100~200 m(江娃利, 2006),沿断裂出现新生代沉积物厚度等值线密集带。地貌和微地震监测显示丰台—野鸡坨断裂现今仍一直在活动,其水平位移速率为1.5 cm/a(李勇, 1987;曾融生等, 1988;赖晓玲等, 2013)。该条断裂也造成两侧地貌和沉积上的差异,断裂西侧地势低洼,主要为湖沼相沉积地层;东侧地势较高,主要为冲积扇—辫状河相沉积地层(图1)。

唐山凸起上新世主要为一套“泥包砾”沉积,底界面埋深一般为100~200 m。该套地层在冀东山前钻孔内普遍发育,其特征不同于第四纪时期洪积成因“泥包砾”,上新世沉积的“泥包砾”中泥质成分颜色为棕红色,与其沉积时上新世炎热湿润的气候有着直接的关系;早更新世地层为一套辫状河相沉积,底界面一般埋深为80~150 m;中更新世地层为

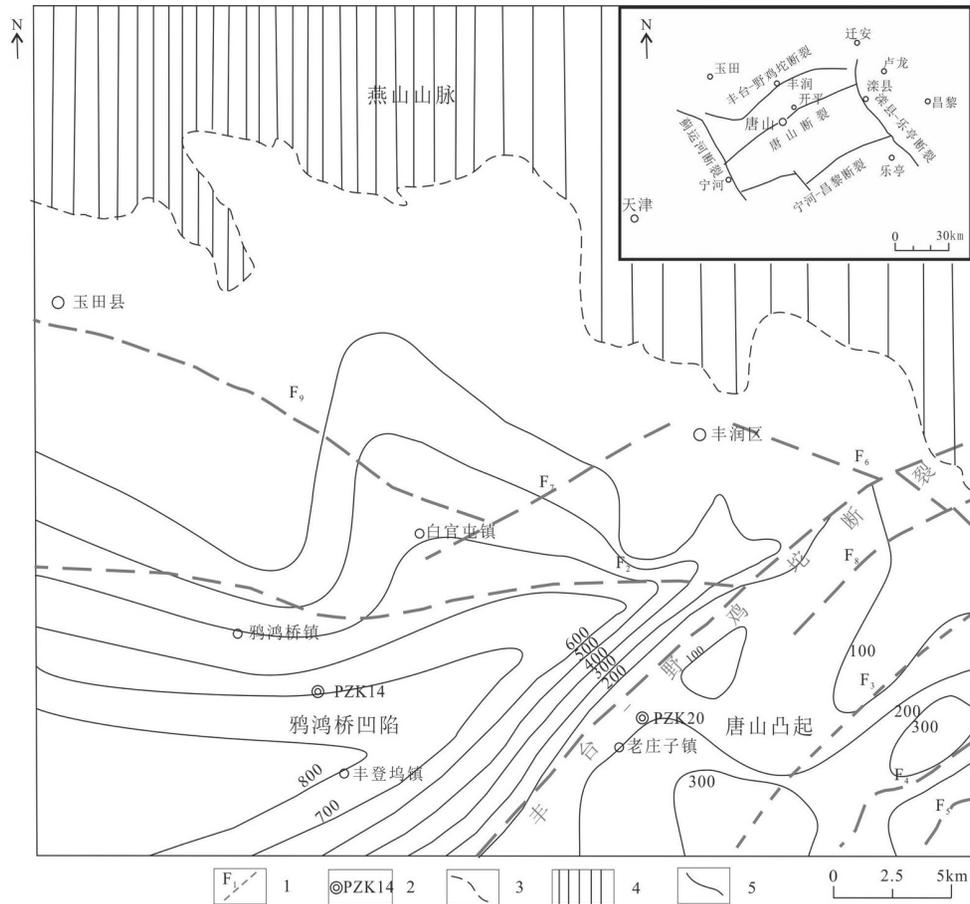


图1 研究区构造地貌图

1—断裂位置及编号;2—钻孔位置及编号;3—山区与平原分界线;4—山区;5—新生界等深线

Fig.1 Tectonic landform map of the study area

1—Fault location and its number;2—Drill hole position and its number;3—Boundary between mountainous and plain;4—Mountainous area;5—Cenozoic isobaths

一套冲积扇-辫状河相沉积,底界埋深一般为30~100 m;晚更新世地层为一套冲积扇-曲流河相沉积,底界埋深一般在10~40 m;凸起上无全新世沉积物(李勇,1987)。

鸭鸿桥凹陷上新世亦一套为“泥包砾”沉积地层,底界面埋深一般为300~1000 m。早更新世地层为一套曲流河-三角洲-湖泊相沉积,底界面一般埋深为100~300 m;中更新世地层为一套曲流河-湖泊相沉积,底界埋深一般为50~150 m;晚更新世地层为一套曲流河相沉积,底界埋深一般在30~80 m;全新世为一套河湖相沉积,底界埋深为5~10 m。

3 钻孔沉积相分析

3.1 PZK14钻孔沉积相分析

钻孔PZK14位于河北省唐山市玉田县丰登坞

镇庄儿口村,钻孔坐标39°43'54"N,117°53'36"E,孔口标高4.4 m,孔深540 m。采用旋转机械钻,岩心管直径108 mm,全孔平均取心率大于85%,野外共分为273层,根据沉积物颜色、沉积构造、沉积环境、沉积旋回,可将钻孔岩心由下而上分为4个沉积旋回(图2):

(1)第1旋回:孔深387~540 m,沉积物为杂色泥质砾石层,局部加少量棕红色黏土层,砾石间填隙物主要以泥质成分为主,颜色呈棕红色,显示出此时气候以湿热为主。该组取心率较差,视电阻率呈现出高幅度指形、钟形等变化特征,表明沉积过程中能量变化大,沉积物粒径较粗。视电阻率测井曲线显示该层发育5个完整的冲积扇旋回。

(2)第2旋回:孔深114~387 m:该旋回可以分为上下两部分:下部(281~387 m)沉积组合以河流相



图2唐山地区PZK14钻孔岩心照片

Fig.2 Photograph of borehole PZK14 in the Tangshan area

为主,上部(114~281 m)以湖泊—河流相为主。下部:岩性为暗灰色(2.5Y4/1)、暗灰棕色(2.5Y4/2)、淡黄棕色(2.5Y6/4)、暗黄棕色(10YR4/4)黏土、黏土质粉砂、粉细砂、中粗砂、砂砾层,300.5~303 m、317.7~323.5 m等多处发育明显的下粗上细的“二元结构”,细砂中发育斜层理、水平层理,黏土中可见铁锰质结核和灰白色钙质结核,大小0.1~1 cm;上部:发育3个湖泊—河流相沉积旋回,湖泊相主要以深暗绿灰色(10Y3/1)、绿灰色(5G5/1)、暗灰色(N4/)黏土、粉细砂、含黏土细砂等细碎屑沉积为主,局部可见砂质砾石层的滨湖相粗碎屑沉积,黏土内偶见灰白色螺化石碎片和灰白色钙质结核,大小0.1~1 cm。河流相岩性主要为淡黄棕色(2.5Y6/4)、暗黄棕色(10YR4/4)黏土、黏土质粉砂、粉细砂、中粗砂、砂砾层,细砂中发育斜层理、水平层理,黏土中亦可见铁锰质结核和灰白色钙质结核,多处发育潜育化、潜育化作用。

(3)第3旋回:孔深39~114 m,该旋回可以分为上中下3部分。下部(99~114 m)主要为一套湖泊相沉积地层,岩性为深暗灰色(N3/)黏土、粉砂,黏土质密,黏塑性强,有机质含量高,可见黑色锰质条带、锰质薄层。中部(77~99 m)沉积地层为一套发育下粗上细“二元结构”的曲流河相沉积,下段为河床沉积,岩性为浅棕黄色(2.5Y6/4)、浅棕色(2.5Y7/4)中细砂、粗砂、含砾粗砂、砂砾石;上段为河漫沉

积,岩性为浅棕色(7.5YR6/3),向下颜色渐深为红棕色(5YR4/4)黏土,零星可见灰白色钙质斑点、黑色锰质斑点和锈黄色铁质斑点。上部(39~77 m)沉积组合为湖泊相,岩性为深暗绿色(10GY3/1)、深暗灰色(N3/)、深暗灰绿色(5G3/2)黏土、粉砂、中砂、含砾粗砂,黏土质密,黏塑性强,有机质含量高,可见黑色锰质条带、锰质薄层;细砂分选性好、磨圆度好;含砾粗砂中砾石磨圆度好,呈次圆状。

(4)第4旋回:孔深0~39 m,下部为边滩微相,岩性为深灰棕色(2.5Y4/2)、深灰色(5Y3/1)细砂、中砂、粗砂,砂分选性好、磨圆度好,发育斜层理;上部为河漫滩、河间洼地微相,河漫滩微相岩性为棕黄色(10YR4/5)、深淡棕色(10YR8/2)含黏土粉砂、粉细砂,见大量锈黄色铁质浸染斑、黑色锰质结核和灰白色钙质结核,钙质结核直径2~10 mm;河间洼地微相岩性为深橄榄灰色(5Y3/2)含黏土粉砂,可见锈黄色铁质浸染斑和直径2 mm左右铁质结核。

3.2 PZK20 沉积相分析

PZK20 钻孔位于河北省唐山市玉田县老庄子镇七王庄村,钻孔坐标:39°43'14"N,118°04'29"E,孔口标高27.3 m,孔深180 m。采用旋转机械钻,岩心管直径108 mm,全孔平均取心率大于85%,野外共分为135层,根据沉积物颜色、沉积构造、沉积环境、沉积旋回,可将钻孔岩心由下而上分为4个沉积旋回(图3):



图3 唐山地区PZK20钻孔岩心照片

Fig.3 Photograph of borehole PZK20 in the Tangshan area

(1)第1个旋回:孔深155~180 m,该旋回沉积物主要为杂色泥质砾石层夹少量棕红色黏土,与PZK14孔底部泥砾层特征基本一致。

(2)第2个旋回:孔深49~155 m主要以河流相沉积为主,主要岩性为浅灰色(10YR7/2)、棕黄色(10YR6/6)、黄棕色(2.5Y6/4)黏土、粉砂质黏土、细砂、粗中砂,含砾粗砂等,76.3~85.9 m发育典型的下粗上细“二元结构”河流相地层。黏土中发育铁锰质结核和灰白色钙质结核,大小0.1~2 cm,砂层中发育斜层理、平行层理。砾石磨圆度好,呈次圆状、次棱角状,直径1~7 cm,岩性为石英砂岩、花岗岩、粗安岩等。

(3)第3个旋回:孔深36~49 m,为冲积扇—辫状河沉积,下部岩性为浅黄褐色(2.5Y5/6)砾石层,自然伽马测井曲线数值均较大,表明该套砾石层填隙物主要为黏土,为洪积成因。砾石直径以1~10 cm

为主,岩性主要为粗安岩、花岗岩、石英砂岩,上部岩性为棕红色(7.5Y5/6)黏土,系冲积扇扇缘沉积,可见黑色锰质结核,直径1~2 mm。

(4)第4个旋回:孔深0~36 m,河流相沉积地层,主要岩性为浅灰色(10YR7/2)、棕黄色(10YR6/6)、黄棕色(2.5Y6/4)黏土、黏土质粉砂、中细砂、砾质粗砂。黏土中可见黑色锰质结核和锈黄色铁质结核;砂分选性好、磨圆度好,发育平行层理;砾石磨圆度好,呈次圆状、次棱角状,直径0.2~4 cm,岩性为粗面岩、粗安岩、熔结凝灰岩、花岗岩等。

4 测试方法和结果

4.1 ^{14}C 和光释光年代

本次工作分别在PZK14孔埋深1.40 m、3.87 m、6.28 m处3个腐殖质富集层位采集 ^{14}C 样品,在北京大学重离子物理研究所进行测试,其AMS ^{14}C 测年

表1 PZK14钻孔¹⁴C样品信息及测年数据统计Table1 statistics of information and dating data of the ¹⁴C specimens in Borehole PZK14

样品编号	深度/m	样品岩性	$\delta^{13}\text{C}$ 及误差		pMC及误差		¹⁴ C年龄及误差	
			$\delta^{13}\text{C}/\%$	误差(1 σ)	pMC/%	误差(1 σ)	¹⁴ C年龄/(a B.P.)	误差(1 σ)
PZK14- ¹⁴ C1	1.40	有机质黏土	-23.15	0.55	67.304	0.198	3181	24
PZK14- ¹⁴ C2	3.87	黏土	-23.88	0.52	36.610	0.144	8072	32
PZK14- ¹⁴ C3	6.28	黏土	-24.86	0.44	8.839	0.063	19488	57

结果分别为(3181±24)a B.P.、(8072±32)a B.P.、(19488±57)a B.P.(表1)。埋深28.50 m、52.45 m、65.30 m、82.50 m处光释光样品,岩性为粉砂、黏土质粉砂,在北京光释光实验室有限公司利用Daybreak 2200(美国)光释光仪上测试,年龄分别为(37.3±1.8)ka、(127.6±7.3)ka、(118.7±5.9)ka、(126.2±7.8)ka;PZK20孔15.9 m、31.4 m和55.10 m处的光释光样品,岩性分别为黏土质粉砂、粉砂,年龄分别为(134.2±8.7)ka、(152.0±8.7)ka、(120.9±7.9)ka(表2)。

4.2 磁性地层年代

岩心被劈成两半,一般按间距0.5 m采集手标本,标记顶底方向,室内加工出边长2 cm×2 cm×2 cm的立方体样品。由于砂砾石层无法取样,PZK14钻孔共采集样品315件,PZK20钻孔共采集样品147件。

样品测试在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室完成。PZK14孔和PZK20孔样品分别采用混合退磁和热退磁方法,在TD-48热退磁炉中从室温退至120℃,转为交变退磁,步长为5~10 mT,最大交变退磁场为70 mT,再转为热退磁,从200℃退至690℃,温度间隔为10~50℃。剩磁在美制2G-760R低温超导磁力仪上进行。热退磁样品剩磁强度衰减曲线显示多数在250℃以下退掉黏滞剩磁,300~690℃分离出稳定的特征剩磁;这显示了磁铁矿和赤铁矿为主要的携磁矿物(图4)。

样品通过主成分分析法并过原点线性拟合得到特征剩磁方向(Kirschvink, 1980),选择的退磁温

度步骤至少为4步,对于最大角偏差(MAD)大于15°的样品予以剔除。其中PZK14孔有203件样品(64.4%)分离出特征剩磁,PZK20孔有59件样品(40.1%)分离出特征剩磁,并建立磁性地层序列。

PZK14孔磁性地层共有6个极性带,其中3个正极性带,分别为N1(0~113.58 m)、N2(132.32~145.56 m)和N3(289.26~317.95 m);3个负极性带,分别为R1(113.58~132.32 m)、R2(145.56~289.26 m)和R3(317.95~386.11 m)。PZK20孔磁性地层共有4个极性带,其中2个正极性带,分别为N1(0~71.5 m)、N2(103.24~120.82 m);2个负极性带,分别为R1(71.5~103.24 m)、R2(120.82~153.67 m)(图5)。

5 讨论

5.1 钻孔年代地层

5.1.1 PZK14孔年代地层

PZK14孔埋深2.7~3.87 m为湖沼相沉积的灰黄色淤泥质黏土质粉砂,¹⁴C年龄为(8072±32)a B.P.。渤海湾沿岸在8.0~9.0 ka B.P.受到海侵,形成海相层,并于7.1~7.4 ka B.P.达到最大海侵(彭贵等,1980;王一曼,1982;杨怀仁等,1985;施林峰等,2009;胥勤勉等,2011;徐建国等,2018)。区域资料显示^①,此次海侵北可达武清小石河、青甸洼,西可达武清西,东至玉田石臼窝、丰润新军屯南、丰南胥各庄、大新庄南。受到海侵影响,PZK14孔处泄水

表2 PZK14和PZK20钻孔光释光样品信息及测年数据统计

Table2 statistics of information and dating data of the O.S.L specimens in boreholes PZK14 and PZK20

样品编号	埋深/m	等效剂量/E.D.(Gy)	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	含水量/%	年剂量Dy/(Gy/ka)	年龄/ka
PZK14-1	28.50	85.01±1.49	0.56	2.53	1.89	8	2.28±0.10	37.3±1.8
PZK14-2	52.45	370.49±13.34	0.76	3.71	2.36	9	2.90±0.13	127.6±7.3
PZK14-3	65.30	392.46±10.51	1.78	8.60	2.08	16	3.31±0.14	118.7±5.9
PZK14-4	82.50	373.54±16.69	0.93	4.58	2.44	18	2.96±0.13	126.2±7.8
PZK20-1	15.90	397.53±19.81	1.14	5.26	2.18	13	2.96±0.12	134.2±8.7
PZK20-2	31.40	444.54±18.20	1.10	6.05	2.19	18	2.93±0.12	152.0±8.7
PZK20-3	55.10	271.03±12.85	0.55	2.44	2.00	18	2.24±0.10	120.9±7.9

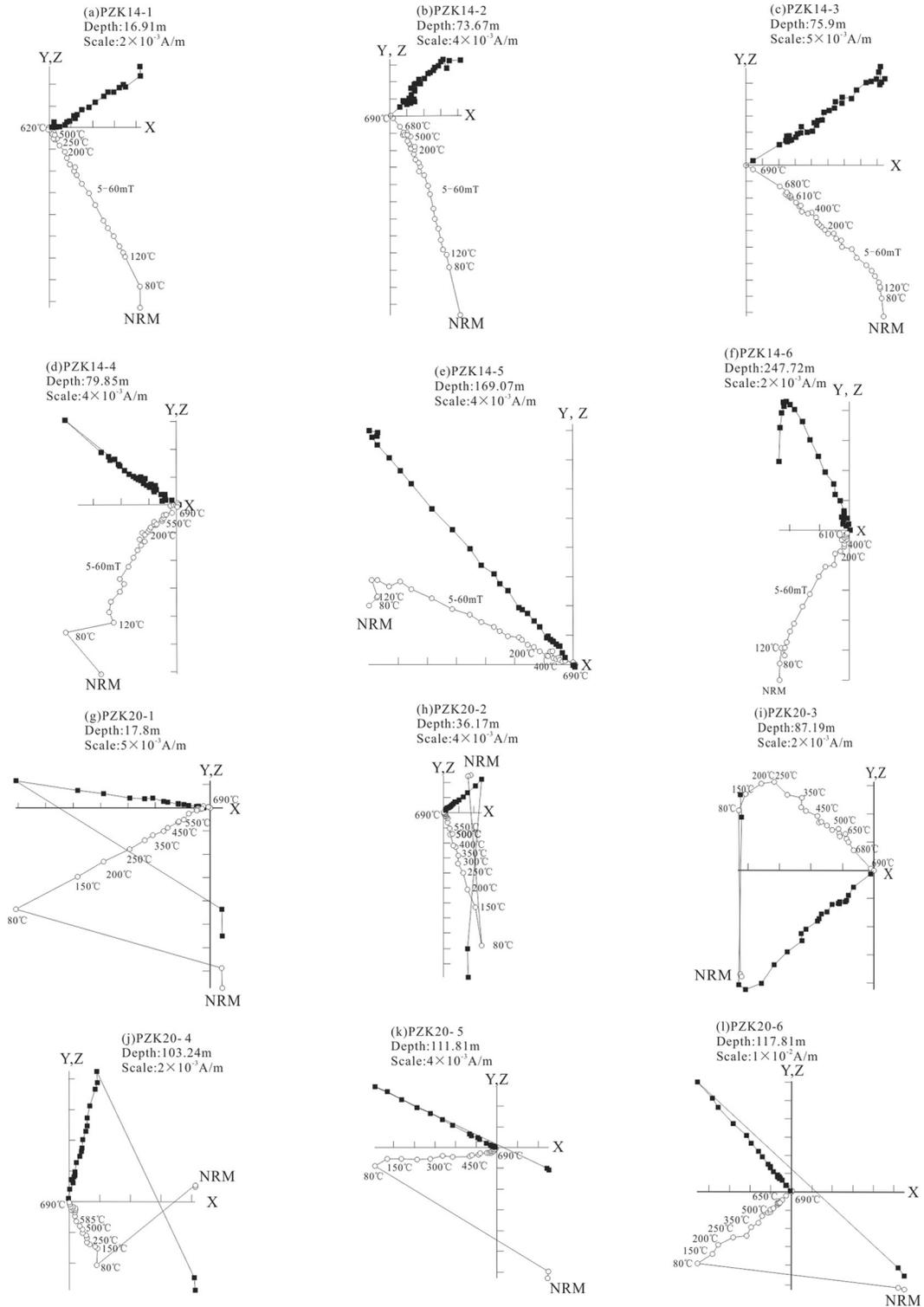


图4 唐山地区 PZK14 和 PZK20 钻孔代表样品混合退磁和热退磁正交矢量投影图

圆形和正方形分别代表垂直和水平投影;图中数字表示退磁温度(°C)和交变磁场强度(mT);NRM为天然剩磁

Fig.4 Orthogonal vector plots showing the results of mixed thermal demagnetization of representative specimens from boreholes PZK14 and PZK20, Tangshan area.

Circles and aquares correspond to projections on the vertical and horizontal, respectively; the numbers refer to the temperatures in °C and alternating field in mT; NRM is the natural remanent magnetization

不畅,形成湖沼相;埋深7.72~9.33 m为深绿灰色含钙质结核粉砂质黏土,对应区域上末次盛冰期形成的硬黏土沉积(王强等,2007,2008,2009)埋深3.87~7.72 m岩性为橄榄灰色黏土、粉砂质砂,在6.28 m处获得(19488±57)a B.P.的¹⁴C年龄。据此判断,3.87~7.72 m为末次冰消期—冰后期早期的沉积物。综上,根据岩石组合特征结合测年结果,将全新世底界定为6 m。

PZK14孔埋深52.45 m、65.3 m处OSL年龄分别为(127.6±7.3)ka、(118.7±5.9)ka。钻孔埋深51.4~68.0 m为暗灰色细砂层,下伏地层埋深68.0~71.0 m为暗灰色黏土层,均为湖相沉积,湖相沉积时样品不能充分吸收阳光,会导致测试年龄失准。埋深82.5 m处OSL年龄为(126.2±7.8)ka,岩性为河流相沉积的棕黄色细砂,根据样品的沉积环境与岩性判断,该样品年龄较可靠。

区域资料显示,渤海湾沿岸晚更新世第一次海侵发生于晚更新世早期,时间为110~70 ka B.P.,海水沿河流上溯淹没陆地,西至杨柳青,北达黑狼口、八门城,东至黄花店,东到玉田南部、唐山胥各庄至柏各庄南附近。此次海侵作用甚强,军粮城以东甚至形成近岸浅海环境,沉积了渤海湾沿岸第Ⅲ海侵层。其埋深可达40~70 m,甚至80 m左右,一般55 m左右,厚度可达9~19 m。据此,并结合光释光年龄判断,PZK14孔埋深39.5~71.0 m沉积的湖相地层,为晚更新世早期沉积,对应MIS5阶段沉积物。故PZK14孔将上更新统底界置于湖相地层底部,孔深为71.0 m处。

PZK14孔埋深387~540 m为泥质砾石层,俗称“泥包砾”。“泥包砾”在唐山西部地区普遍存在,曾归入下更新统(高善明,1985)。1989年出版的《河北省、北京市、天津市区域地质志》将其归入新近系,并以此为第四系和新近系界线。唐山TD1孔底部埋深210~220 m为“泥包砾”,其底部时代约为3.6 Ma(胡云壮等,2014)。所以PZK14孔的R1~R3对应Matuyama负极性时,N1对应Brunhes正极性时,N2和N3分别对应Jaramillo和Olduvai正极性亚时(图5)。“泥包砾”和Matuyama负极性时底界可能存在沉积间断,故利用Olduvai时期的沉积速率推算PZK14孔R3底部的年代为2.52 Ma。

5.1.2 PZK20孔年代地层

PZK20孔位于唐山凸起上,该凸起自上新世以

来长期处于剥蚀状态,浅表岩性为黄色、黄棕色黏土质粉砂、中细砂、砾质粗砂等,不发育区域上普遍沉积的灰黑色湖沼相黏土、淤泥质黏土,故无法进行¹⁴C测年工作。通过查阅区域地质资料^①及对松散沉积物岩性、固结程度等特征分析可知,唐山凸起上的PZK20孔无全新世地层。

PZK20孔埋深15.9 m、31.4 m和55.1 m处光释光年龄分别为(134.2±8.7)ka、(152.0±8.7)ka和(120.9±7.9)ka。样品岩性为粉砂质黏土、粉砂质砂,均为快速堆积,成熟度较低,样品未得到充分的曝光,残留较老的信号,导致年龄失准。

PZK20孔位于以丰润为顶点的古滦河冲积扇上。根据古滦河的袭夺,可以判断古滦河最早经迁西县城、照燕州向南至丰润县进入平原,形成以丰润为顶点的冲积扇。后在迁西县城以北发生袭夺,滦河东流,在西峡口进入迁安盆地,南流出山区进入平原,形成以西峡口为顶点的冲积扇。爪村标准剖面位于滦河迁安二级阶地上,其动物群说明时代属晚更新世,因此,迁西县的袭夺发生在晚更新世以前,以丰润为顶点的冲积扇时代应在晚更新世以前(大港油田地质研究所等,1985)。PZK20孔埋深36~49 m为古滦河冲积扇扇根—扇缘沉积的砾石层、棕黄色黏土层。因此根据钻孔内岩石组合特征判断,PZK20孔上更新统底界埋深为36 m。

PZK20孔埋深155~180 m亦沉积了一套与PZK14孔底部特征相同的“泥包砾”层,作为第四系与新近系的界线。PZK20孔的R1、R2均对应Matuyama负极性时,N1对应Brunhes正极性时。PZK20孔N2与N1之间沉积物厚度为30 m,N2期内沉积物厚度为19 m,如此厚的地层并非Jaramillo(0.99~1.07 Ma)极性亚时所能沉积,所以PZK20孔N2对应Olduvai(1.77~1.95 Ma)正极性亚时(图5)。利用Olduvai时期的沉积速率推算PZK20钻孔R2底部的年代为2.38 Ma。

5.2 断裂对地层控制作用

丰台—野鸡坨断裂为活动断裂,控制着西侧的鸦鸿桥凹陷和东侧的唐山凸起。自第四纪以来凹陷内主要以发育湖泊—三角洲相为主,其次为河流相沉积;凸起上主要以河流相沉积为主,其次为冲积扇相。

PZK14孔处基岩埋深约700 m,PZK20孔处基

岩埋深约 200 m (江娃利, 2006), PZK14 孔内“泥包砾”出现的深度约 385 m, “泥包砾”的厚度约为 315 m; PZK20 孔内“泥包砾”出现的深度为 155 m, “泥包砾”的厚度为 46 m。通过 2 个钻孔内的上新世“泥包砾”厚度对比显示, 上新世时丰台—野鸡坨断裂就

已经开始剧烈活动, 使其两侧“泥包砾”厚度差异巨大(图 5)。

2.58~1.95 Ma, 凹陷内发育一套湖泊—三角洲相沉积地层, 岩性以灰色、暗灰色、灰黄色细砂、黏土质粉砂、黏土为主, 沉积厚度为 70 m, 沉积速率为

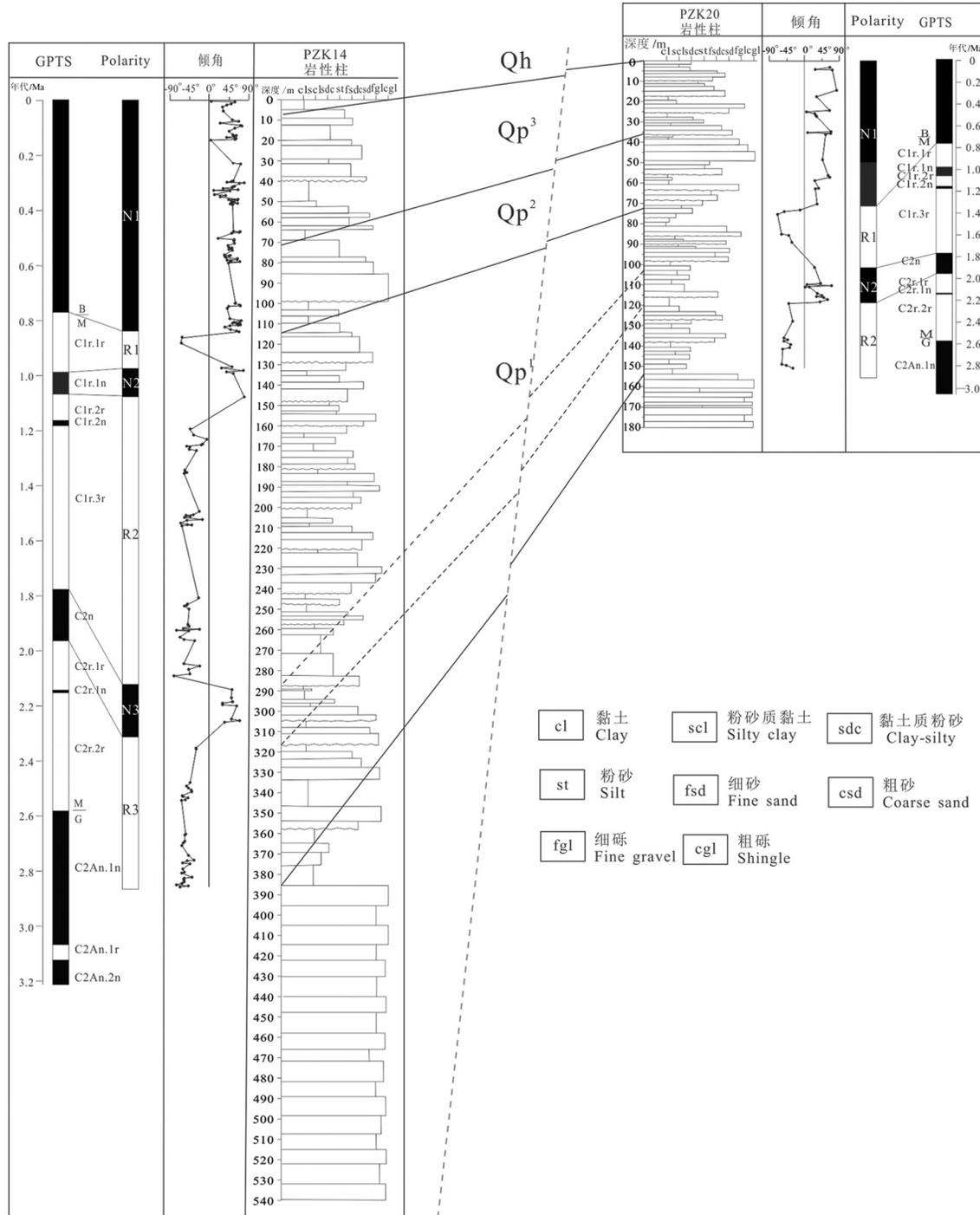


图 5 PZK14 钻孔和 PZK20 钻孔磁性地层与标准极性柱对比图

Fig.5 Comparison of magnetostratigraphy of the boreholes PZK14 and PZK20 with standard polarity zones

111.2 m/Ma; 凸起上发育一套河流相沉积地层, 岩性以灰黄色、黄色中粗砂、细砂、粉砂质黏土为主, 沉积厚度为 36 m, 沉积速率为 57.1 m/Ma。

奥杜威极性亚时(1.77~1.95 Ma), 凹陷内与凸起上同为河流相沉积, 沉积物以灰黄色中粗砂、细砂为主, 发育斜层理, 凹陷内地层沉积厚度为 35 m, 沉积速率 194 m/Ma; 凸起上沉积厚度为 16 m, 沉积速率为 88.9 m/Ma。

早更新世中晚期(0.78~1.77 Ma) 凹陷内发育 3 个湖泊-三角洲相沉积旋回, 岩性以暗灰色、灰黑色黏土和灰黄色中粗砂、细砂、砂砾层为主, 沉积厚度为 168 m, 沉积速率为 169.7 m/Ma; 凸起上仍以河流相沉积地层为主, 岩性为灰黄色、黄色中粗砂、细砂、粉砂质黏土为主, 沉积厚度为 30 m, 沉积速率为 30.3 m/Ma。

中更新世, 凹陷内为一套湖泊-河流相沉积组合, 湖泊相岩性为暗灰色、灰黑色粉砂质黏土、黏土, 河流相岩性为灰黄色、浅黄色中粗砂、细砂, 沉积厚度为 43 m, 沉积速率为 65.7 m/Ma; 凸起上地层以河流相-冲积扇相沉积为主, 岩性为灰黄色中粗、细砂夹洪积成因的“泥砾层”, 沉积厚度为 36 m, 沉积速率为 55.1 m/Ma。

晚更新世, 凹陷内沉积一套湖泊-河流相地层, 湖泊相岩性为灰黑色粉砂质黏土、黏土, 河流相岩性为灰黄色中粗砂、细砂、含钙质结核黏土质粉砂, 该套地层厚 65 m, 沉积速率为 565.2 m/Ma。凸起上沉积一套河流相地层, 岩性为灰黄色砂砾石、中粗砂、细砂、黏土质粉砂, 沉积厚度为 35 m, 沉积速率为 304.3 m/Ma。

全新世, 凹陷内为河流相沉积, 岩性为灰黄色粉砂质黏土, 厚度为 6 m, 沉积速率为 545 m/Ma; 凸起上在无沉积。

晚更新世以来, 如此快的沉积速率并不完全是丰台-野鸡坨断裂剧烈活动造成的。第四纪松散堆积物在沉积过程中, 其沉积厚度受沉积时代影响较大。晚更新世以来, 地层沉积时间较短, 埋深较浅, 受上覆岩层压实作用小, 所以其压缩固结量小, 沉积厚度相对较大, 沉积速率较快。

通过凹陷内和凸起上各个时期内地层沉积速率对比, 我们可以发现断裂对两侧地层的沉积起到了绝对的控制作用。从上新世开始, 两侧地层沉积

厚度就已经产生了巨大的差异。第四纪各个时期内, 断裂对两侧地层沉积速率都起着更加重要的作用。早更新世早期(2.58~1.95 Ma B.P.) 凹陷内地层沉积速率为凸起上地层沉积速率的 1.95 倍, 到了奥杜威极性亚时内(1.77~1.95 Ma) 增加到 2.18 倍, 早更新世中晚期(0.78~1.77 Ma) 达到了 5.6 倍, 中更新世减小为 1.19 倍, 晚更新世再次增加到 1.85 倍。全新世凹陷内沉积了 6 m 地层, 而凸起上未接受沉积。

5.3 断裂第四纪活动性

通过计算凹陷内和凸起上各个时期内地层沉积厚度的差值, 得到了断裂在不同时期的活动速率(表 3)。进入第四纪, 断裂活动在早更新世呈现出逐渐增强的特点, 早更新世中晚期(0.778~1.77 Ma) 断裂活动增加到最强。中更新世时断裂活动表现为最弱, 进入晚更新世其活动又逐渐增强, 并一直持续到现在。

通过对比断裂活动特征与其控制地层发育情况, 不难发现断裂活动在早更新世时表现为持续增强的特点, 凹陷内与凸起上地层的沉积速率比值也逐渐增大。在早更新世中晚期(0.778~1.77 Ma) 断裂活动表现为最强, 为 13.9 cm/ka, 使其两侧沉积速率比达到了 5.6 倍。中更新世断裂活动速率减弱为 1.0 cm/ka, 两侧地层沉积速率比值也减小到最小值 1.19。晚更新世断裂活动速率又开始增强, 为 25.2 cm/ka, 使其两侧沉积速率比值也开始增大为 1.85。全新世以来断裂活动速率达到最剧烈的程度, 为 54.5 cm/ka, 其对全新世时期内凸起上未沉积地层起到了关键作用。

6 结 论

(1) 通过 PZK14 和 PZK20 孔的磁性地层, 结合光释光和 ^{14}C 测年结果, 建立了两个钻孔的第四纪地层格架。PZK14 孔早更新世底界为 387 m, 中更新世底界为 114 m, 晚更新世底界为 71 m, 全新世底界为 6 m, 早更新世时期内在 282~317 m 处识别出了奥杜威正极性亚时; PZK20 孔早更新世底界为 155 m, 中更新世底界为 73 m, 晚更新世底界为 36.2 m, 无全新世地层, 早更新世时期内在 103~119 m 处识别出了 Olduvai 正极性亚时。

(2) 通过计算, 得到 2 个钻孔不同时期的沉积速率。PZK14 孔早更新世早期(1.95~2.58 Ma) 沉积速

表3 丰台—野鸡坨断裂活动速率统计
Table 3 Activity rate statistics of the Fengtai-Yejituo fault

时代	底界埋深/m		沉积厚度	断裂垂直活动
	PZK14	PZK20	差值/m	速率/(cm/ka)
全新世	6	0	6	54.5
晚更新世(0.011~0.126 Ma)	71	36	29	25.2
中更新世(0.126~0.778 Ma)	114	73	6	1.0
早更新世中晚期(0.778~1.77 Ma)	282	103	138	13.9
早更新世奥杜威亚时(1.77~1.95 Ma)	317	119	19	10.5
早更新世早期(1.95~2.58 Ma)	387	155	34	5.4

率111.2 m/Ma,奥杜威极性亚时内(1.77~1.95 Ma)沉积速率为195 m/Ma,早更新世中晚期(0.781~1.77 Ma)沉积速率169.7 m/Ma,中更新世沉积速率为65.7 m/Ma,晚更新世沉积速率565.2 m/Ma,全新世沉积速率为545 m/Ma;PZK20孔早更新世早期(1.95~2.58 Ma)沉积速率57.1 m/Ma,奥杜威极性亚时内(1.77~1.95 Ma)沉积速率为88.9 m/Ma,早更新世中晚期(0.781~1.778 Ma)沉积速率30.3 m/Ma,中更新世沉积速率55.1 m/Ma,晚更新世沉积速率304.3 m/Ma,全新世沉积速率未沉积。

(3)丰台—野鸡坨断裂活动性总体概括为:上新世时断裂活动性就异常强烈,早更新世活动性由弱到强,中更新世断裂活动非常弱,晚更新世活动性逐渐增强,全新世活动性最强。

致谢:感谢天津市地质调查研究院王家兵、河北省地质调查院肖文暹和中国地质调查局天津地质调查中心袁桂邦三位教授高级工程师在野外工作给予的帮助;感谢中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室邓成龙研究员在古地磁实验中提供的帮助。

注释:

①天津市地质调查研究院,河北省地质调查院. 2005. 1:25万天津市幅区域地质调查报告[R]. 283-291.

References

Chen Yuntai, Lin Banghui, Wang Xinhua, Huang Liren, Liu Miaolong. 1979. A discussion model of the Tangshan earthquake of 1976 from the inversion of geodetic data[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 22(3): 201-207(in Chinese with English abstract).
Gao Shanming. 1985. Structures and sedimentary environments of the alluvial fan of the Luan River[J]. *Geographical Research*, 4(1): 54-62(in Chinese with English abstract).

Geological Institute of Dagang Oil Field, Bureau of Marine Petroleum Exploration, Institute of Marine Geology, Tongji University. 1985. The Luanhe River Alluvial Fan-delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-164 (in Chinese with English abstract).
Guo Shunmin, Li Zhiyi, Cheng Shaoping, Chen Xiaode, Yang Zhuen, Li Rucheng. 1977. Discussion on the regional structural background and the seismogenic model of the Tangshan earthquake[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 12(4): 305-321 (in Chinese with English abstract).
Hebei Provincial Bureau Geology and Mineral Resources Exploration and Development. 1989. Regional Geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-616 (in Chinese with English abstract).
Hu Yunzhuang, Zhang Jinqi, Bai Yaonan, Xia Yubo, Wang Qiang. 2014. Records of regional tectonic and climatic evolution since 3.45 Ma B.P. at Borehole TDI of Tangshan in the middle part of Luanhe River fluvial fan[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(2): 249-262(in Chinese with English abstract).
Hu Yunzhuang, Xu Qinmian, Yuan Guibang, Pei Junling, Yang Jilong, Zhang Yufa, Wang Qiang. 2014. Magnetostratigraphy of Borehole CK3 and record of the Quaternary volcanic activities in Xiaoshan of Haixing, Hebei Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(3): 411-426(in Chinese with English abstract).
Jiang Wali. 2006. Discussion on seismogenic fault of the 1976 Tangshan earthquake[J]. *Seismology And Geology*, 28(2): 312-318 (in Chinese with English abstract).
Lai Xiaoling, Sun Yi. 2013. Study on 3-D velocity structure by temporary dense seismostations networks of Tangshan earthquake region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33(3): 1-4 (in Chinese with English abstract).
Li Shaobing. 1986. A discussion of the seismo-tectonic and the cause of the Tangshan earthquake[J]. *North China Earthquake Sciences*, 4(2): 62-68(in Chinese with English abstract).
Li Yong. 1987. Mechanism of the appearance of Fengrun-Fengtai concealed active fault on landsat image[J]. *Journal of Seismology*, 21(1): 39-42(in Chinese with English abstract).

- Li Yusoong, Chen Jianqiang, Zhao Shuo, Wang Haiying, Li Xin. 2011. Sporopollen assemblages in Tangshan area since Late Pleistocene with a correlation to those in adjacent areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(2): 178–188 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guodong, Liu Changquan. 1982. Crust upper mantle structures in northern region of North China and its relationship to Cenozoic tectonic activities[J]. *Science in China(B)*, 12(12): 1132–1140 (in Chinese).
- Liu Guodong, Gu Qun, Shi Shulin, Shi Zhangsong, Liu Jinhan. 1983. The electrical structure of the crust and upper mantle and its relationship with seismicity in the Beijing–Tianjin–Tangshan region and adjacent area[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 26(2): 149–157 (in Chinese with English abstract).
- Peng Gui, Zhang Jingwen, Jiao Wenqiang, Chen Yijian, Li Daming, Li Guiying. 1980. Chronology of Late Quaternary deposits along the coast of the Bohai bay[J]. *Seismology and Geology*, 2(2): 71–78 (in Chinese with English abstract).
- Shi Linfeng, Zhai Zimei, Wang Qiang, Zhang Xuebin, Yang Zhenyu. 2009. Geochronological study on transgression layers of the CQJ4 borehole at Dagang area in Tianjin, China[J]. *Geological Review*, 55(3): 375–384 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yongge, Li Hongji. 1996. Genetic algorithms of the velocity structure and hypocenters simultaneous inversion in J.J.T.Z[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 17(3): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunyong, Duan Yonghong, Wu Qingju, Wang Zhishuo. 2016. Exploration on the deep tectonic environment of strong earthquakes in North China and relevant research findings[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 38(4): 511–549 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunyong, Wu Qingju, Duan Yonghong, Wang Zhishuo, Lou Hai. 2017. Crustal and upper mantle structure and deep tectonic genesis of large earthquakes in North China[J]. *Science China Earth Sciences*, 47(6): 684–719 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Yuan Guibang, Zhang Shu, Liu Zengshou, Wang Weidong, Liu Zhijie, Zhuang Zhenye. 2007. Shelly ridge accumulation and sea–land interaction on the west coast of the Bohai Bay[J]. *Quaternary Sciences*, 27(5): 775–786 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhang Yufa, Yuan Guibang, Zhang Wenqing. 2008. Since mis3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the North Huanghua area, Hebei[J]. *Quaternary Sciences*, 28(1): 79–95 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Li Congxian. 2009. The type of quaternary sequence in the East China coastal plain[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(4): 39–51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yiman. 1982. A preliminary study on the Holocene transgression on the coastal plain along the north–western Bohai bay[J]. *Geographical Research*, 1(2): 59–69 (in Chinese with English abstract).
- abstract).
- Xu Jianguo, Xu Hua, Zhang Tao, Zhang Zhuo, Qi Xiaofan, Ji Wenlong. 2018. Stratigraphic characteristics, age and indicated Holocene coastal variation of Heituhu formation in Laizhou bay coastal area, Shandong Peninsula[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qimian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, Qin Yafei. 2011. Stratigraphic division of the Late Quaternary strata along the coast of Bohai Bay and its geology significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(8): 1352–1367 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q M, Yuan G B, Yang J L, Xin H T, Yi L, Deng C L. 2017. Plio–Pleistocene magnetostratigraphy of northern Bohai Bay and its implications for tectonic events since ca.2.0 Ma[J]. *Journal of Geodynamics*, 111: 1–14.
- Yang Huairan, Chen Xiqing. 1985. Quaternary transgressions, eustatic changes and shifting of shoreline in East China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 5(4): 59–80 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Rongsheng, Lu Hanxing, Ding Zhifeng. 1988. Seismic refraction and reflection profilings across Tangshan epicentral reion and their implication to seismogenic processes[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 31(4): 383–398 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, He Jing, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, Wang Jiming, Yang Tianshui. 2016. 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*, 43(2): 511–519 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Zhang Xiaoliang, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, Wang Jiming, Yang Tianshui. 2016. Quaternary magnetic stratigraphy and its sedimentary response to new tectonic movement in Shahe depression, plain area of Beijing[J]. *Geology in China*, 43(3): 1076–1084 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lupei, Zeng Rongsheng, Liu Futian. 1990. Three–dimensional p–wave velocity structure under the Beijing network area[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 33(3): 267–277 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈运泰, 林邦慧, 王新华, 黄立仁, 刘妙龙. 1979. 用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式[J]. *地球物理学报*, 22(3): 201–207.
- 高善明. 1985. 滦河冲积扇结构和沉积环境[J]. *地理研究*, 4(1): 54–62.
- 大港油田地质研究所, 海洋石油勘探局研究院, 同济大学海洋地质研究所. 1985. 滦河冲积扇–三角洲沉积体系[M]. 北京: 地质出版社, 1–164.
- 魏顺民, 李志义, 程绍平, 陈献程, 陈孝德, 杨主恩, 李如成. 1977. 唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论[J]. *地质科学*, 12(4):

- 305-321.
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1-616.
- 胡云壮, 张金起, 白耀楠, 夏雨波, 王强. 2014. 3.45 Ma以来滦河冲积扇中部唐山TD1孔记录的区域构造和气候演化[J]. 古地理学报, 16(2): 249-262.
- 胡云壮, 胥勤勉, 袁桂邦, 裴军令, 杨吉龙, 张玉发, 王强. 2014. 河北海兴小山CK3孔磁性地层与第四纪火山活动记录[J]. 古地理学报, 16(3): 411-426.
- 江娃利. 2006. 有关1976年唐山地震发震断层的讨论[J]. 地震地质, 28(2): 312-318.
- 赖晓玲, 孙译. 2013. 利用密集临时地震台网资料研究唐山地震区三维速度结构[J]. 大地测量与地球动力学, 33(3): 1-4.
- 李绍柄. 1986. 唐山地震的发震构造与成因探讨[J]. 华北地震科学, 4(2): 62-68.
- 李勇. 1987. 丰润—丰台隐伏断裂在卫星影像上的表现机制[J]. 地震学刊, 21(1): 39-42.
- 李玉嵩, 陈建强, 赵硕, 王海英, 李欣. 2011. 唐山地区晚更新世以来孢粉组合特征及其与临区的对比[J]. 地球学报, 32(2): 178-188.
- 刘国栋, 刘昌铨. 1982. 华北北部地区地壳上地幔构造及其与新生代构造活动的关系[J]. 中国科学(B辑), 12(12): 1132-1140.
- 刘国栋, 顾群, 史书林, 孙洁, 石障松, 刘金汉. 1983. 京津唐渤和周围地区地壳上地幔电性结构及其与地震活动性的关系[J]. 地球物理学报, 26(2): 149-157.
- 彭贵, 张景文, 焦文强, 陈以健, 李大明, 李桂英. 1980. 渤海湾沿岸晚第四纪地层C¹⁴年代学研究[J]. 地震地质, 2(2): 71-78.
- 施林峰, 翟子梅, 王强, 张学斌, 杨振宇. 2009. 从天津CQJ4孔探讨中国东部海侵层的年代问题[J]. 地质论评, 55(3): 375-384.
- 万永革, 李鸿吉. 1996. 京津唐张地区速度结构和震源位置联合反演的遗传算法[J]. 地震地磁观测与研究, 17(3): 57-66.
- 王春镛, 段永红, 吴庆举, 王志铄. 2016. 华北强烈地震深部构造环境的探测与研究[J]. 地震学报, 38(4): 511-549.
- 王春镛, 吴庆举, 段永红, 王志铄, 楼海. 2017. 华北地壳上地幔结构及其大地震深部构造成因[J]. 中国科学: 地球科学, 47(6): 684-719.
- 王强, 袁桂邦, 张熟, 刘增寿, 王卫东, 刘志杰, 庄振业. 2007. 渤海湾西岸贝壳堤堆积与海陆相互作用[J]. 第四纪研究, 27(5): 775-786.
- 王强, 张玉发, 袁桂邦, 张文卿. 2008. MIS3阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. 第四纪研究, 28(1): 79-95.
- 王强, 李从先. 2009. 中国东部沿海平原第四系层序类型[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(4): 39-51.
- 王一曼. 1982. 渤海湾西北岸全新世海侵问题的初步探讨[J]. 地理研究, 1(2): 59-69.
- 徐建国, 徐华, 张涛, 张卓, 祁晓凡, 纪汶龙. 2018. 山东半岛莱州湾滨海地区黑土湖组地层特征、时代及指示的全新世海岸带变化[J]. 地球学报, 39(1): 1-11.
- 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 秦雅飞. 2011. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]. 地质学报, 85(8): 1352-1367.
- 杨怀仁, 陈西庆. 1985. 中国东部第四纪海面升降、海侵海退与岸线变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 5(4): 59-80.
- 曾融生, 陆涵行, 丁志峰. 1988. 从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因[J]. 地球物理学报, 31(4): 383-398.
- 张磊, 何静, 白凌燕, 蔡向民, 王继明, 杨天水. 2016. 北京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, 43(2): 511-519.
- 张磊, 张晓亮, 白凌燕, 蔡向民, 王继明, 杨天水. 2016. 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, 43(3): 1076-1084.
- 朱露培, 曾融生, 刘福田. 1990. 京津唐张地区地壳上地幔三维P波速度结构[J]. 地球物理学报, 33(3): 267-277.