

引用格式: 任雅哲, 丰成君, 戚帮申, 等, 2023. 北京顺义断裂活动对首都机场地裂缝影响定量研究 [J]. 地质力学学报, 29 (5): 685-703. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023063

Citation: REN Y Z, FENG C J, QI B S, et al., 2023. Quantitative research of the impact of Shunyi fault activity on the ground fissures in the Beijing Capital International Airport, China [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 685-703. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023063

北京顺义断裂活动对首都机场地裂缝影响定量研究

任雅哲^{1,2,3}, 丰成君^{1,2,4}, 戚帮申^{1,2,4}, 葛伟亚⁵, 谭成轩^{1,2,4}, 孟静^{1,2,4}

REN Yazhe^{1,2,3}, FENG Chengjun^{1,2,4}, QI Bangshen^{1,2,4}, GE Weiya⁵, TAN Chengxuan^{1,2,4}, MENG Jing^{1,2,4}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
4. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
5. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
4. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
5. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*

Quantitative research of the impact of Shunyi fault activity on the ground fissures in the Beijing Capital International Airport, China

Abstract: The Shunyi fault in the Beijing Plain region is a significant late Pleistocene active fault. The Beijing Capital International Airport (BCIA) is situated within the central segment of the Shunyi Fault. Since 2010, ground fissures on the airport's runway have progressively worsened, with a maximum vertical displacement difference of up to 20 cm, severely affecting airport safety. Presently, the impact of Shunyi fault activity on the ground fissures at the BCIA is primarily described qualitatively. This paper, based on research regarding the geometric structure of the Shunyi Fault, Quaternary activity, and investigations of the ground fissures at the Capital Airport, employs the fault dislocation model to quantitatively analyze the influence of the Shunyi Fault's creep-sliding activity as well as the 1996 Shunyi M_L 4.5 earthquake on the formation of airport ground fissures. The study also discusses the increasing risk of ground fissure hazards in the event of a potential strong earthquake along the Shunyi fault in the future. The preliminary results suggest that with a vertical activity rate of 0.6 mm/year, 46 years of Shunyi Fault's creep-sliding activity results in differential subsidence of no more than 2.5 cm on both sides of the airport ground fissures, contributing to approximately 20% of the formation and development of these fissures. The impact of the Shunyi M_L 4.5 earthquake on the formation of airport ground fissures is minimal. However, if a future M 7.0 earthquake occurs on the Shunyi fault, the estimated maximum land differential subsidence between two sides of the fault could reach 104 cm, increasing the risk of airport ground fissure disasters by a factor of five. Ground differential settlement due to groundwater extraction from the upper and deeper layers of the Shunyi fault's hanging wall contributes about 70% to the formation and development of airport ground fissures,

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230540)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20230540).

第一作者: 任雅哲 (1996—), 女, 在读硕士, 主要从事城市活动断裂、地质安全风险调查评价等工作。E-mail: renyz77@163.com

通讯作者: 丰成君 (1985—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事原位地应力测量、构造应力场研究、地质安全风险评价、深部流体注采诱发断层活化等研究工作。E-mail: fengchengjun@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-06-21; 责任编辑: 范二平

remaining the primary factor. The study's results provide essential scientific references for precise prevention and control of ground fissure disasters at BCIA. Furthermore, to further reveal the causes and mechanisms of delayed geological disasters along the Shunyi fault, such as ground fissures and land differential subsidence, it is recommended to implement dynamic monitoring of cross-fault crustal displacement or deformation at crucial segments.

Keywords: Shunyi fault; ground fissures; ground deformation; Beijing Capital International Airport; fault dislocation model; geological disaster

摘要: 顺义断裂是北京平原区重要的晚更新世活动断层。首都国际机场位于顺义断裂中段, 2010年以来, 机场跑道地裂缝逐渐加剧, 地裂缝两侧最大垂直位移差高达 20 cm, 已经严重影响机场安全运行。当前, 顺义断裂活动对首都机场地裂缝的影响仍以定性描述为主。文章以顺义断裂几何结构、第四纪活动性以及首都机场地裂缝调查研究为基础, 依据断层位错理论, 定量分析了顺义断裂蠕滑活动对机场地裂缝形成的贡献, 研究了 1996 年 12 月 16 日顺义 $M_L4.5$ 级地震对机场地裂缝可能产生的影响, 并讨论了顺义断裂未来发生潜在强震时机场地裂缝灾害风险增加的趋势。分析认为, 在 0.6 mm/a 的垂直活动速率下, 顺义断裂蠕滑活动 46 年, 在机场地裂缝两侧产生的差异沉降量不超过 2.5 cm, 对机场地裂缝形成和发展的贡献量约占 20%; 顺义 $M_L4.5$ 级地震对机场地裂缝的形成影响甚微, 顺义断裂若未来发生 7.0 级地震, 估算在断裂两盘产生的差异沉降量最大达 104 cm, 机场地裂缝灾害风险将增加 5 倍; 顺义断裂上盘中、深层地下水抽采引起的地面差异沉降在机场地裂缝形成和扩展中的贡献量为 70%, 仍是导致机场地裂缝加剧的主要因素。研究结果可为首都国际机场地裂缝灾害精准防控提供重要科学参考。此外, 为深入揭示顺义断裂沿线地裂缝、地面差异沉降等缓变型地质灾害成因机理和灾害效应, 建议在其关键部位实施跨断层位移或形变动态监测工作。

关键词: 顺义断裂; 地裂缝; 地面变形; 首都国际机场; 断层位错模型; 地质灾害

中图分类号: P553; P554; P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 05-0685-19

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023063

0 引言

地裂缝是在内外力作用下岩石和土层发生的破裂现象, 地面表现为潜蚀缝、塌陷坑、张裂纹、错断、拉断和陡坎等表生灾害 (彭建兵等, 2007; 乔建伟等, 2020), 具有成带性和延展性特征, 主要发育在第四系中, 往往对沿线的基础设施和建(构)筑物产生不同程度的破坏, 严重影响城市规划和人居安全 (万佳威等, 2019; 彭建兵等, 2020)。中国地裂缝发育广泛, 至 2015 年, 已在全国 25 个省和 3 个直辖市的 4000 余处累计发现地裂缝 5000 余条, 主要分布在汾渭盆地内的陕西和山西、京津冀平原区和长江三角洲的苏锡常地区, 上述区域内地裂缝灾害最为严重, 造成的经济损失累计超过 80 亿元 (王景明, 2000; 彭建兵等, 2007; 马学军等, 2015; 乔建伟等, 2020)。

在 20 世纪 60 年代之前, 北京地区地裂缝地质灾害并不显著; 1976 年唐山发生 7.8 级地震后, 通州西集乡、顺义俸伯镇、昌平南新村等开始出

现地裂缝 (赵忠海, 2006); 特别是近 40 年来, 随着城区抽取地下水日益增加, 地裂缝灾害愈发突出, 已成为影响北京城市安全发展的新的地质安全问题 (贾三满等, 2011; 刘方翠等, 2016)。已有研究成果表明, 北京平原城区当前仍发育高丽营-北七家、顺义城区-北小营、通州宋庄 3 条突出的地裂缝群发带 (卢全中等, 2014; 刘方翠等, 2016; 赵龙等, 2019; 关金环等, 2021)。高丽营-北七家地裂缝带走向北东向, 长度约 10 km, 宽度为 30~70 m, 主裂缝东南低、西北高, 呈高角度正断开启型剖面形态, 主要受黄庄-高丽营全新世断裂强蠕滑活动控制 (刘明坤等, 2014; 张磊等, 2017), 地下水下降引起的地面差异沉降加剧了地裂缝的扩展 (王海刚等, 2013)。通州宋庄地裂缝带整体走向北东东向, 长度达 8.7 km, 地裂缝影响带最宽达 450 m, 第四系沉积物厚度差异是宋庄地裂缝带形成的基础地质背景, 长期地下水过量开采引起的差异沉降是其形成的主要原因 (赵龙等, 2017; 赵龙等, 2018)。

顺义城区-北小营地裂缝带走向为 NE30°—

50°, 主要分布在顺义断裂两侧, 东南侧相对西北侧下降, 表现为拉张型裂缝, 宽度为 5~12 m, 主裂缝宽度一般为 4~5 cm, 1976—2006 年平均垂向扩展速率为 0.6 mm/a (任俊杰等, 2007; 杨涛等, 2010; 刘方翠等, 2016)。关于顺义地裂缝的成因机制仍存在几种不同的认识: 顺义-良乡断裂北段蠕滑活动导致了顺义地裂缝的发生和发展 (胡平等, 2000); 超量开采地下水导致的地面不均匀沉降是造成顺义地裂缝现今活动的主要原因 (张世民等, 2005); 内外动力耦合作用共同控制了顺义地裂缝的发生和扩展, 其中, 区域地质构造、基岩埋深及基岩起伏形态差异、第四纪沉积层厚度及空间分布差异是地裂缝产生的先决条件, 长期过量开采地下水引发严重的地面沉降是诱发地裂缝灾害的必要条件, 城市建筑群载荷一定程度上促进了地裂缝的发育 (杨涛等, 2010)。

首都国际机场位于顺义断裂中段 (天竺-南法信镇), 2010 年以来, 机场 T2 和 T3 航站楼跑道地裂缝逐渐加剧, 地裂缝两侧最大垂直位移差高达 20 cm, 已经严重影响机场安全运行 (Gao et al., 2016; 戚帮申等, 2020; Wan et al., 2021)。对首都国际机场地裂缝成因机理的研究表明, 顺义断裂现今构造活动控制了地裂缝的形成和空间分布形态, 而地下水抽采引起的地面差异沉降进一步加剧了地裂缝的扩展态势 (Gao et al., 2016), 飞机移动荷载对地裂缝的发展也起到一定的促进作用 (Wan et al., 2021)。然而, 相关认识仍多以定性、半定量的描述为主, 特别是顺义断裂对机场地裂缝的影响机制、顺义断裂活动在机场地裂缝形成诸多影响因素中的贡献等关键科学问题缺少定量的结论, 客观上限制了对首都国际机场地裂缝成因机理的科学认知水平和灾害风险的研判能力。

鉴于此, 通过系统收集、整理和分析首都国际机场及邻区地质构造、地层岩性、深部地球物理、顺义断裂活动性等已有成果, 依据断层弹性位错理论, 首先, 模拟计算顺义断裂蠕滑活动 46 年 (1976 年唐山发生 7.8 级地震以来) 在首都国际机场及邻区产生的地表垂向位移, 获得顺义断裂上、下盘及两侧地表垂向位移差, 通过与机场地裂缝两侧观测得到的垂向位移结果进行对比, 揭示顺义断裂蠕滑活动在机场地裂缝形成和扩展中的贡献量。然后参考 1996 年 12 月 16 日沿顺义

断裂发生的 $M_L 4.5$ 级地震震源参数, 估算此次地震在机场区域产生的地表垂向位移, 探讨其对机场地裂缝的影响。最后, 依据顺义断裂及邻区潜在震源区划定结果, 确定顺义断裂未来可能发生的最大震级地震, 采用震级-地震破裂参数统计模型, 估算顺义断裂未来发生强震活动时的断层破裂长度、宽度和平均位错, 在此基础上, 模拟其在首都机场区域引起的地表变形带特征, 研判顺义断裂未来发生强震活动对机场地裂缝的影响趋势, 提出机场基础设施和跑道抗错断防治建议, 研究成果以期为首都国际机场安全运营提供地质科技支撑。

1 顺义断裂第四纪活动性与首都国际机场地裂缝发育特征

顺义断裂是北京平原顺义凹陷的边界断裂, 以南口-孙河断裂为南界, 自顺义区孙河乡附近起, 向北东方向经天竺镇、首都国际机场、顺义城区、北小营镇, 延伸至木林镇一带, 全长 35~40 km, 走向 NE30°—60°, 倾向南东向, 为高角度正断裂 (图 1; 张世民等, 2005; 张磊等, 2015)。关于顺义断裂第四纪活动性尚存在不同的认识, 张世民等 (2005) 通过钻孔地层对比方法研究了顺义断裂第四纪活动性, 其结果表明, 顺义断裂在第四纪期间呈现强弱交替的分期活动特征, 距今 315 万年以来有 3 个较强活动期 (3150~2660 ka、2280~1710 ka、1470~730 ka) 和 3 个较弱活动期 (2660~2280 ka、1710~1470 ka、730~0 ka), 最大垂直活动速率为 0.16 mm/a, 中更新世晚期以来活动不明显。林传勇等 (2006) 对顺义油库探槽松散沉积物进行微观分析, 显示顺义断裂在微观上表现为滑移错动面、微破碎带、变形条带、泥质充填条带以及黏土矿物、铁质物、碎屑颗粒集中定向带等, 指示沿顺义断裂存在古地震事件。白凌燕等 (2014) 对顺义断裂上、下盘共 2 个钻孔第四纪地层落差及年代地层格架分析计算, 得到顺义断裂早更新世、中更新世、晚更新世和全新世以来的平均垂直活动速率分别为 0.023 mm/a、0.0017 mm/a、0.033 mm/a 和 0.051 mm/a, 总体上, 顺义断裂早更新世活动较强烈, 中更新世活动性逐渐减弱, 晚更新世活动性又逐渐增强, 全新世断裂再次活化, 活动性增强。

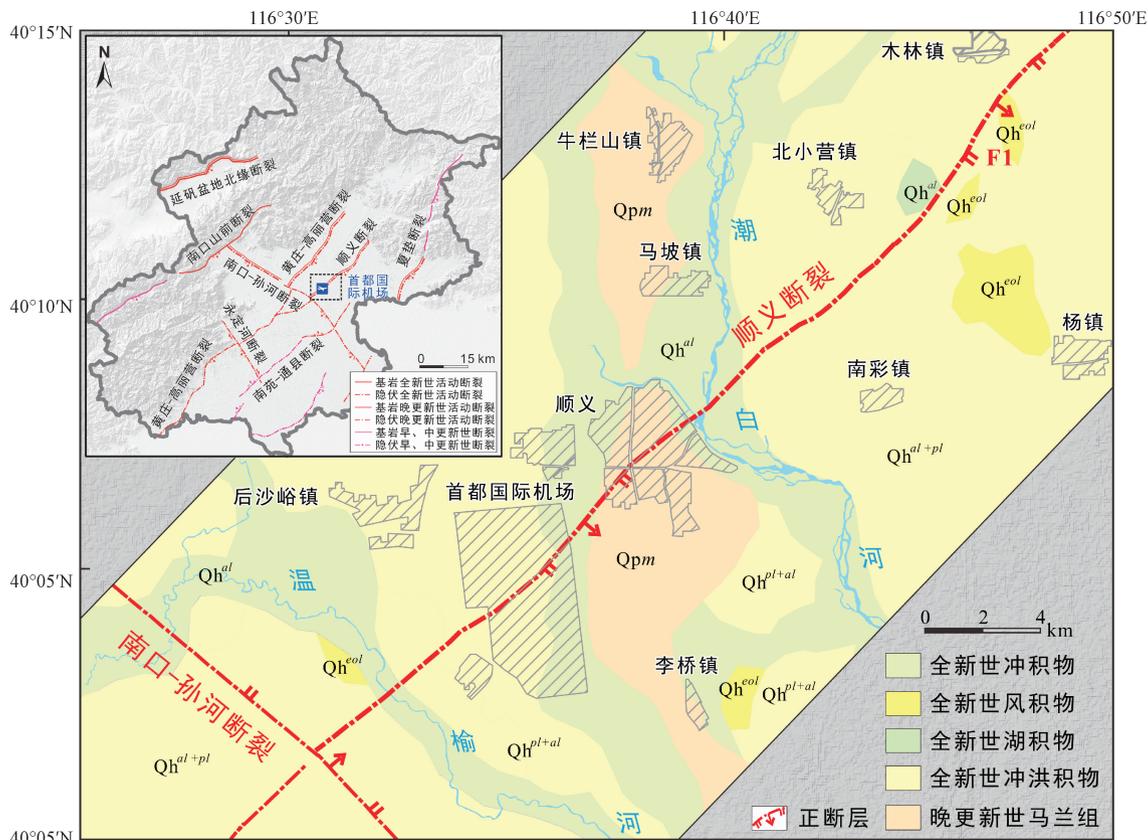


图 1 北京顺义地区地质构造简图

Fig. 1 Sketch map of the geological structure in the Shunyi region, Beijing

为进一步揭示顺义断裂晚第四纪活动性及其与顺义地裂缝群发带的关系, 2018年, 中国地质科学院地质力学研究所在顺义断裂西南段(孙河乡温榆河西岸)、中段(首都国际机场东侧小中河西岸)和东北段(北小营至南彩镇)开展可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、高密度电阻率法、浅层地震及跨断层钻孔联合剖面探测等工作, 物探和钻孔联合剖面综合结果表明, 顺义断裂走向北东向, 倾向南东向, 倾角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 为全新世活动正断层, 在空间上, 第四纪以来南段的活动性较北段强, 在时间上, 早更新世活动性较强, 中更新世活动弱, 晚更新世活动性增强, 全新世以来活动性最强, 以北小营段为例, 顺义断裂早更新世、中更新世、晚更新世和全新世以来的垂直活动速率分别为 0.23 mm/a 、 0.03 mm/a 、 0.29 mm/a 和 0.51 mm/a , 现今蠕滑活动对浅表层地裂缝发育具有明显控制作用(戚帮申等, 2020)。

2010年以来, 首都国际机场飞行区、滑行道、T2与T3航站楼等出现地裂缝, 2018年现场调查发现, 地裂缝总体走向为 $NE40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ (图2a), 机场内地裂缝长约1920 m、影响带宽度为30~100 m、

地裂缝两侧垂直位移差为11~20 cm, 地裂缝导致飞机跑道、滑行道等基础设施不同程度损坏, 严重影响T2、T3航站楼飞行安全, 具体表现为: ① T3航站楼的西北侧滑行区草坪受地裂缝影响, 形成两侧垂直位移差约20 cm的陡坎(图2b); ② T2航站楼东南侧排水道盖板发生垂向变形, 地裂缝两侧垂直位移差为11 cm, 宽度为2~5 cm(图2c); ③ T2航站楼南侧滑行道厚约20 cm的盖板发生垂向错断, 地裂缝长度约430 m, 且西北侧较东南侧相对抬升, 地裂缝两侧垂直位移差达12 cm(图2d)。首都国际机场地裂缝展布特征直观上显示地裂缝的形成与顺义断裂活动有一定的关联性。

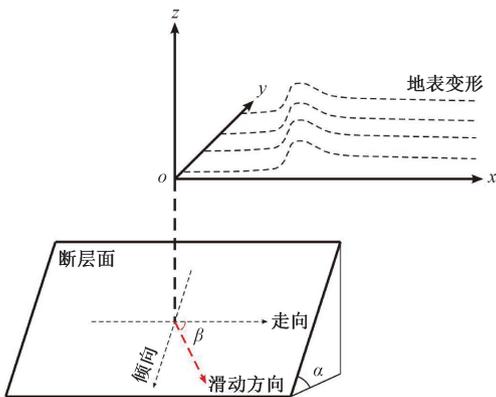
2 研究理论与方法

断层错动(蠕滑或强震活动)能导致地表产生永久性变形(图3), 在确定平面位置、几何产状、上断点埋深以及位错量等条件下, 地表位移可通过数值计算方法得到。Steketee(1958)最早把位错理论引入地震学, 导出了均匀地球介质内



图 2 2018 年首都国际机场地裂缝展布特征

Fig. 2 Ground fissure distribution in the Beijing Capital International Airport (in 2018)



α —倾角; β —滑动角

图 3 半无限空间断层位错模型示意图 (据 Okada, 1992 修改)

Fig. 3 Diagrammatic sketch of the fault dislocation model in semi-infinite space (modified after Okada, 1992)

α —dip angle; β —slope angle

走滑断层的位移格林函数。Chinnery (1961) 利用该格林函数给出了垂直断层走滑错动产生的位移和应力场的表达式。Berry and Sales (1962) 推导出了水平张裂断层的地表位移计算公式。Maruyama (1964) 对垂直和水平引张断层产生的地表位移场给出了完整的解析表达式。Press (1965) 计算了半无限空间介质内走滑和倾滑断层产生的位移、应变场。Davis (1983) 给出了倾斜张裂断层的垂直位移表达式。Okada (1985) 总结已有研究成果, 建立了一套完整简洁实用的同震

变形计算公式, 且适用于模拟计算任何剪切和张裂断层引起的位移、应变和倾斜变形。Okada (1992) 进一步给出了半无限空间介质内部的同震变形计算方法。为了考虑地球曲率和层状构造的影响, 更高精度地解释大地震引起的同震重力变化, Sun and Okubo (1998) 基于成层球对称地球模型, 建立了新的位错理论, 用于研究地震产生的同震位场变化和重力变化。参考 Okada (1992) 理论模型, Wang et al. (2006) 利用正交归一法计算格林函数, 提出了层状黏弹性介质模型的同震与震后变形一般计算方法, 并开发了 PSGRN/PSCMP 计算程序, 该程序已逐渐应用于模拟地震活动产生的同震位移场和库仑应力变化, 以及研究强震活动对余震空间分布影响的应力触发效应等 (孙玉军等, 2013; 徐昊等, 2016; 万永革等, 2017; Feng et al., 2020)。

采用 PSGRN/PSCMP 程序计算顺义断裂活动引起的地表形变时, 需要构建首都国际机场及邻区垂向深度地层结构和物理力学参数模型。顺义断裂邻区朝阳区孙河乡浅部 (800 m 深度范围) 钻孔联合剖面结果表明, 研究区内地层主要有晚侏罗统髫髻山组 (J_3t)、上新统 (N_2)、下更新统 (Qp^1)、中更新统 (Qp^2)、上更新统 (Qp^3) 以及全新统 (Qh) (张世民等, 2005; 白凌燕等, 2014; 张磊等, 2017; 戚帮申等, 2020), 其中,

髻髻山组以安山岩、砂岩为主；上新统为棕红色胶结一半胶结砂岩、砂砾岩；下更新统下部为黏质砂土，中部为砂质黏土和黏质砂土，上部为淤泥质砂质黏土，夹砂砾石层；中更新统为砂质黏土、黏质砂土，夹有中粗砂和砂砾石层；上更新统下部为中粗砂、细砂、黏质砂土，中部为黏质砂土，上部为黏质砂土、砂质黏土；全新统为黏质砂土、粉砂及细砂。

参考顺义断裂首都国际机场附近地层钻孔资料（张世民等，2005；戚帮申等，2020），结合北京平原区 2.5D 断裂构造重力异常剖面反演结果（雷晓东等，2021），建立机场及邻区垂向深度地层结构简化模型（表 1），自上而下共划分 9 层，分别为全新统（Qh）、上更新统（Qp³）、中更新统（Qp²）、下更新统（Qp¹）、上新统（N₂）、侏罗系（J）、蓟县系（Jx）、长城系（Ch）和太古界（Ar）。侏罗系以火山碎屑岩为主，蓟县系主要为白云岩、夹少量页岩，长城系主要为石英岩、石英砂岩，太古界为角闪斜长片麻岩、含黑云母角闪斜长片麻岩等（吕金波等，2016）。此外，参考首都圈地区井下摆天然地震数据测量得到的近地表波速结构资料（沈伟森等，2010；刘渊源等，2011）、石油地震叠加速度和人工地震测深剖面所揭示的首都圈上地壳高精度 P 波速度成果（杨峰和黄金莉，2013），按照沉积层和基岩深度 P 波速度（ v_p ）和 S 波速度（ v_s ）分布规律，进一步确定不同地层物理力学参数，其中 200 m 以浅的更新统和全新统地层密度重点参考了顺义断裂温榆河附近 900 m 钻孔土层样品的土力学试验结果（谭成轩等，2020）。文中计算拟采用弹性模型模拟活动断裂蠕滑和黏滑引起的静态地表位移，暂不考虑地壳结构黏弹性松弛效应的影响。

3 顺义断裂蠕滑活动引起的地面变形特征及其对首都国际机场地裂缝的影响

将顺义断裂简化为长方形断层面，研究区内顺义断裂西南端为孙河乡，东北端至南彩镇，沿走向长度为 22 km，在首都国际机场及邻区，断裂走向为 45°、倾角为 75°，沿倾向断层面宽度计算为 12.43 km，断层上断点至地表。为充分考虑顺义断裂蠕滑活动的最大影响，顺义断裂蠕滑垂直

表 1 首都国际机场及邻区垂向深度地层结构和物理力学参数模型

Table 1 Model of vertical stratigraphic texture and physical-mechanical parameters of the Beijing Capital International Airport and its vicinities

地层	深度范围/ m	密度/ (g/cm ³)	v_p / (km/s)	v_s / (km/s)
全新统	0~10	1.90	1.83	0.42
上更新统	10~30	1.91	1.83	0.42
中更新统	30~115	2.08	1.83	0.42
下更新统	115~410	2.14	1.83	0.42
上新统	410~520	2.37	1.83	0.42
侏罗系	520~1000	2.65	4.20	2.30
蓟县系	1000~2250	2.70	4.20	2.30
长城系	2250~3650	2.70	4.20	2.30
太古界	3650~12000	2.72	6.10	3.50

活动速率取 0.6 mm/a（杨涛等，2010），在时间跨度上，考虑从 1976 年唐山 7.8 级地震后至今约 46 年的影响，对应的总静态位错量为 27.6 mm，将其作为位移边界条件，利用 PSGRN/PSCMP 程序模拟计算顺义断裂蠕滑活动在首都国际机场及邻区产生的地表变形带特征。

在 0.6 mm/a 的垂直活动速率条件下，顺义断裂正断蠕滑活动 46 年在地表产生的垂直位移模拟结果见图 4。顺义断裂蠕滑活动在上盘（东南盘）产生显著的下降位移，而在下盘（西北盘）则产生明显的上升位移（图 4a）。以首都国际机场及邻区为例，顺义断裂上盘产生的下降位移为 10.0~14.5 mm，下盘产生的上升位移为 7.0~9.8 mm，断层蠕滑活动产生的垂直位移在断层地表迹线位置最大，垂直于断裂走向两侧向外延伸逐渐减小。首都国际机场范围内 2 条垂直于断层走向的位移剖面显示（图 4b、4c），断裂蠕滑活动在机场停机坪和跑道附近产生的上、下盘垂直位移差最大值约为 24 mm。通过与机场实测地裂缝两侧垂直位移差（图 2）对比发现，顺义断裂正断层蠕滑 46 年在机场区域内上、下盘产生的地表垂直位移差占当前机场地裂缝两侧垂直位移差的 12.0%~21.8%。由此推测，在首都国际机场地裂缝形成的诸多影响因素中，顺义断裂蠕滑活动的最大贡献量约占 1/5。

在 0.6 mm/a 的垂直活动速率条件下，顺义断裂正断蠕滑活动 46 年在全新统底界面（深度约 10 m）产生的垂直位移模拟结果见图 5。顺义断裂蠕滑活动在上盘同样产生显著的下降位移（10.50~

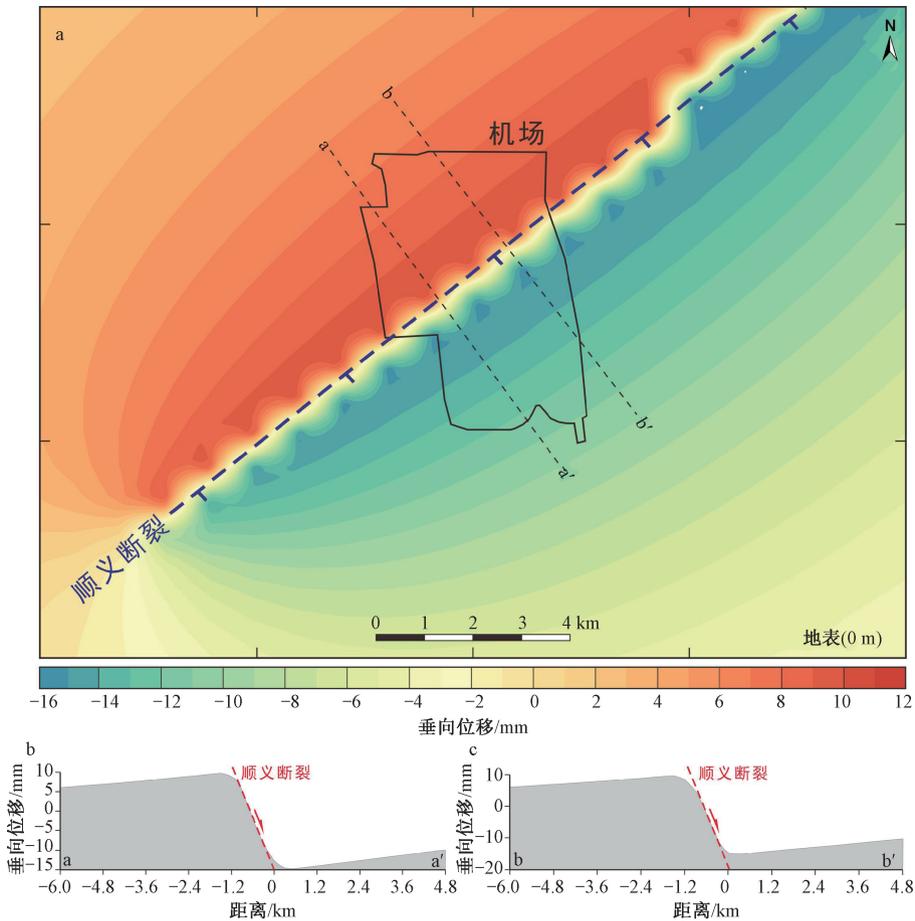


图 4 顺义断裂正断蠕滑活动 46 年在地表产生的垂直位移 (正表示上升, 负表示下降)

Fig. 4 Surface vertical displacement induced by normal fault creep-sliding of the Shunyi fault for 46 years (Positive means vertical upward displacement, while negative represents vertical downward displacement.)

14.30 mm), 而在下盘则产生明显的上升位移 (7.05~9.80 mm; 图 5a)。垂直位移平面分布规律与地表计算结果相似 (图 4), 机场范围内相同位置的 2 条垂向位移剖面显示 (图 5b、5c), 顺义断裂蠕滑活动在机场停机坪和跑道附近产生的上、下盘垂直位移差最大值约为 24.5 mm, 在机场地裂缝两侧垂直位移差中的占比为 12.3%~22.3%, 同样揭示顺义断裂蠕滑活动对首都国际机场地裂缝形成的最大贡献量约为 1/5。

4 顺义 $M_L4.5$ 级地震产生的地表变形特征及其对首都国际机场地裂缝的影响

1996 年 12 月 16 日 5 时 36 分在北京市顺义区高丽营镇 (40.1°N, 116.6°E) 发生了 $M_L4.5$ 级地震, 此次地震是自 1990 年 9 月 22 日昌平 $M_L4.5$ 级地震之后北京地区又一次较大的地震活动, 也是

顺义地区有现代地震记录以来发生的最大地震, 顺义断裂为其发震断层 (王慧敏等, 1998; 吕培苓等, 1998)。考虑到首都国际机场 T2 航站楼于 1999 年 11 月正式投入使用, 其建设期距离 1996 年 12 月高丽营镇 $M_L4.5$ 级地震发生时间不超过 3 年, 因此, 文章模拟计算了 1996 年 12 月 16 日顺义 $M_L4.5$ 级地震产生的地表变形带特征, 并重点探讨此次地震活动是否会对首都国际机场地裂缝的形成产生不良影响。

顺义 $M_L4.5$ 级地震的震源深度为 10 km, 震源参数研究结果表明, 发震断层主节面走向为 22°, 倾角为 60°, 表现为正断活动为主兼少量走滑性质, 在三维空间上, 发震断裂长度 (沿走向) 为 1.6 km, 宽度 (沿倾斜面) 为 0.8125 km, 发震断裂面积为 1.3 km², 平均位错量为 5 cm (关华平等, 1997)。由于反演得到的发震断裂主节面走向 (22°) 与文中用于模拟计算的顺义断裂走向 (45°) 略有差异, 为充分讨论顺义断裂地震活动

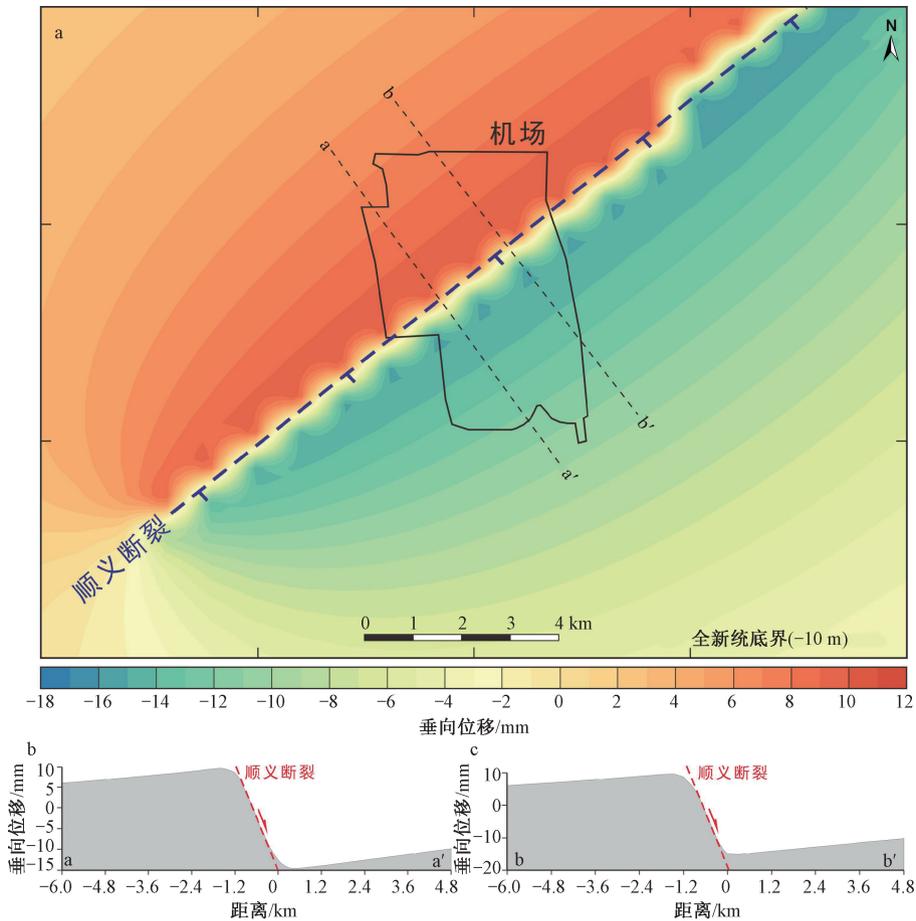


图5 顺义断裂正断蠕滑活动46年在全新统底界产生的垂直位移(正表示上升,负表示下降)

Fig.5 Vertical displacement at the bottom of the Holocene induced by normal fault creep-sliding of the Shunyi fault for 46 years (Positive means vertical upward displacement, while negative represents vertical downward displacement.)

的影响,文章将顺义 $M_L4.5$ 级地震断裂走向取为 45° ,而其他参数保持不变。

顺义 $M_L4.5$ 级地震在地表产生的垂直位移模拟结果如图6所示。在顺义断裂上盘(东南盘)产生显著的下降位移,地表最大同震下降位移约为 0.45 mm ,位于首都机场东南侧顺义区的李桥镇附近,而在下盘(西北盘)则产生明显的上升位移,最大同震上升位移为 0.19 mm ,位于首都机场西北侧朝阳区金盏乡的东马各庄村附近,整体表现为正断活动(图6a)。此外,在首都国际机场范围内,地震在上盘产生的下降位移为 $0\sim 0.42\text{ mm}$,在下盘产生的上升位移为 $0\sim 0.19\text{ mm}$ 。2条垂直于断裂走向的位移剖面显示(图6b、6c),顺义 $M_L4.5$ 级地震在机场停机坪和跑道附近产生的上、下盘垂直位移差最大值约为 0.6 mm ,占当前机场地裂缝两侧垂直位移差的 $0.3\%\sim 0.5\%$,由此表明顺义 $M_L4.5$ 级地震对首都机场地裂缝的形成几乎没有影响。

5 顺义断裂未来潜在强震活动引起的地表变形特征及其对首都国际机场地裂缝扩展的影响

人工地震探测地壳速度结构剖面和天然地震层析成像结果综合显示,顺义凹陷在 $8\sim 30\text{ km}$ 地壳深度内存在3处规模不等的低速体,且在横向上速度结构分布不均匀,顺义凹陷及邻区的中小地震活动明显沿低速体边缘或速度结构差异带定向排列,指示顺义地区地壳内可能存在发生中等强度地震的深断裂构造(高战武等,2010)。北京地区地壳浅层原位地应力测量结果表明,千米深度范围内最大、最小水平主应力随深度线性增加梯度分别为 $0.0328\sim 0.0341\text{ MPa/m}$ 和 0.0221 MPa/m (秦向辉等,2014;谭成轩等,2014),区域构造应力场中最大主压应力方向为北东东向—近东西向(张红艳等,2007;武敏捷等,2012;黄骥超

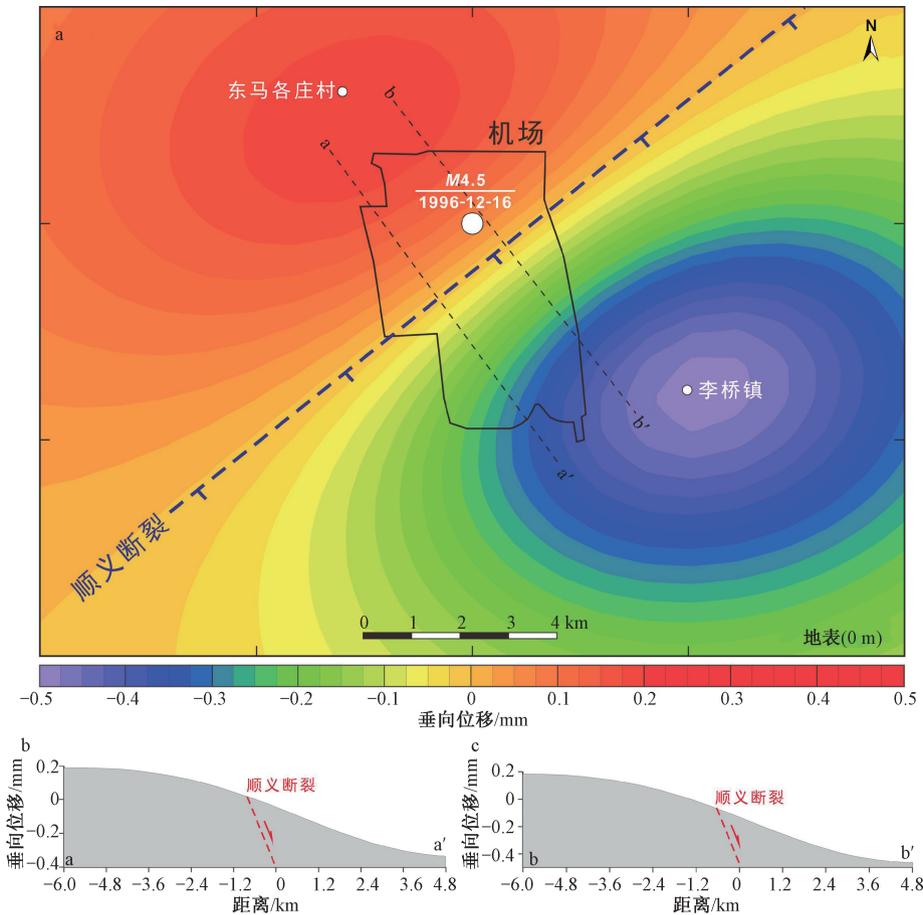


图 6 1996 年 12 月 16 日顺义 $M_L 4.5$ 级地震在地表产生的垂直位移 (正表示上升, 负表示下降)

Fig. 6 Surface vertical displacement induced by the $M_L 4.5$ earthquake occurred on December 16th, 1996 near the Shunyi fault (Positive means vertical upward displacement, while negative represents vertical downward displacement.)

和万永革, 2015), 在当前构造应力背景下, 顺义断裂中南段 (孙河乡—北小营镇) 具有相对高的滑动失稳风险, 地震活动水平呈增强趋势 (崔博闻等, 2021; Fan et al., 2022)。基于 2001—004 年 GPS 观测资料反演得到的北京地区连续应变场显示, 顺义地区处于最大剪应变率较高地区, 一定程度上反映了较强的构造活动 (郭良迁等, 2006)。北京地区地震活动危险性研究表明, 在不考虑地震发生时间和发生概率的条件下, 顺义断裂、黄庄—高丽营断裂、南口—孙河断裂等活动构造带所在的朝阳区、顺义区、昌平区未来发生破坏性地震的最大震级上限为 6.5~7.0 级 (王绳祖, 1990; 玄月, 2011; 吴清和高孟潭, 2018)。鉴于此, 文章重点探讨顺义断裂在未来可能发生 6.5 级和 7.0 级地震极端情景下引起的地表变形特征及对首都国际机场地裂缝加剧扩展的影响。

地震震级与发震断裂的破裂长度、宽度、面积、同震位错量之间存在定量的经验关系 (Wells

and Coppersmith, 1994)。龙锋等 (2006) 建立了适用于华北地区地震活动断层的地震震级 (M)—震源破裂尺度 (破裂长度 L 、破裂面积 A) 的经验关系公式:

$$\lg L = 0.498 \times M - 1.832 \quad (1)$$

$$\lg A = 0.999 \times M - 4.063 \quad (2)$$

公式 (1) (2) 能更好地适用于华北和首都圈地区活动断裂的地震危险性评价、地震安全性评价以及中—长期地震预测。文中亦采用上述经验模型估算顺义断裂未来发生 6.5 级和 7.0 级地震时沿断层走向产生的破裂长度 (L)、面积 (A) 和宽度 (W)。

Wells and Coppersmith (1994) 基于全球范围内 421 个震级大于 4.5 的地震资料 (包括确定的地震矩、破裂长度、破裂宽度、同震位错量等), 构建了地震震级 (M) 和发震断裂平均位错量 (AD) 之间的经验关系:

$$M = 0.82 \times \lg AD + 6.93 \quad (3)$$

当前, 在缺少首都圈地区关于强震震级和断

裂平均位错量相互关系研究成果的条件下,为获得顺义断裂未来发生6.5级和7.0级地震时发震断裂可能产生的同震平均位错量,文中暂且选用经验公式(3)来估算顺义断裂发生强震时的平均同震位错量。由公式(1) — (3)计算得到的顺义断裂地震破裂参数详见表2。

表2 顺义断裂未来发生6.5级和7.0级强震时产生的地震破裂参数

Table 2 Seismic rupture parameters of potential strong earthquakes with the magnitude of 6.5 and 7.0 along the Shunyi fault

M	L/km	W/km	A/km^2	AD/m
6.5	25.4	10.6	269.5	0.30
7.0	45.1	18.9	851.1	1.22

模拟顺义断裂发生6.5级正断型地震时产生的地表变形带分布特征如图7所示,在其上、下盘分别产生了显著的下陷和上升位移(图7a)。以首都国际机场及邻区为例,顺义断裂上盘产生的下降位移为10~17 cm,下盘产生的上升位移为4~9 cm,强震活动产生的垂直位移在断裂地表迹线位置最大,垂直于断裂走向两侧向外延伸逐渐减小。机场范围内2条垂直于断裂走向的位移剖面显示(图7b、7c),顺义断裂发生6.5级强震活动在机场停机坪和跑道附近产生的上、下盘垂直位移差最大值将达26 cm,为当前机场地裂缝两侧最大垂直位移差的1.3倍,无疑将对首都国际机场安全运行产生严重影响。

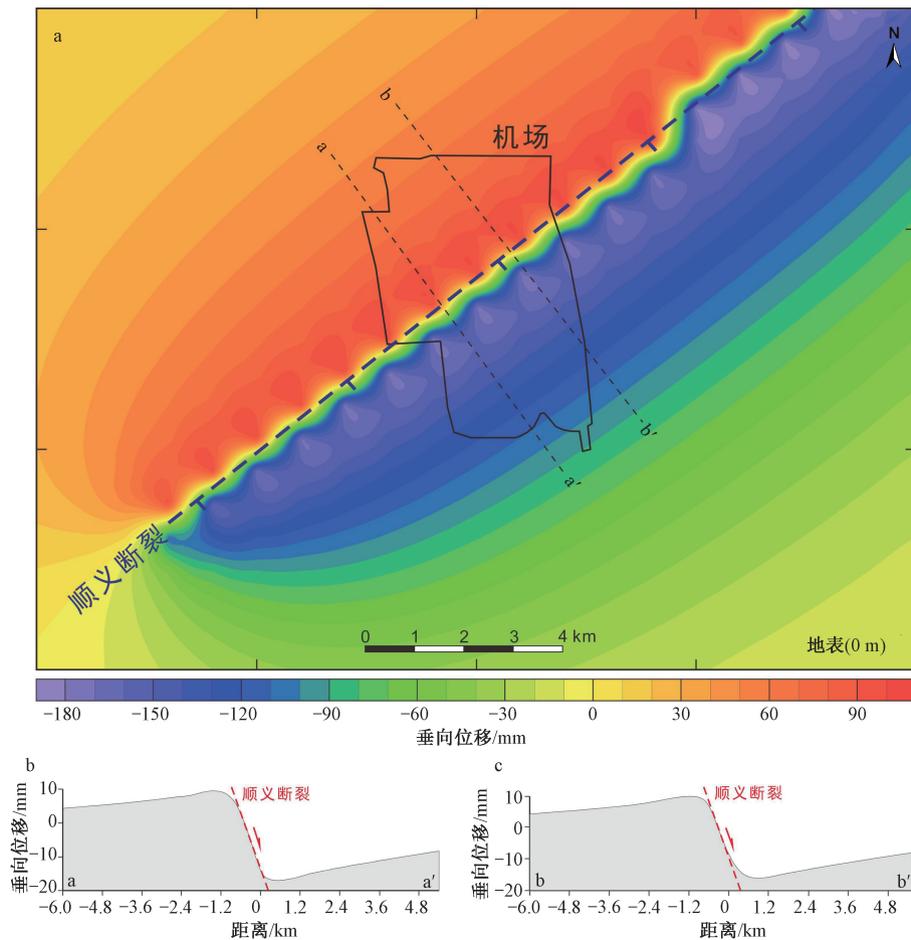


图7 顺义断裂发生6.5级地震时在地表产生的垂直位移(正表示上升,负表示下降)

Fig.7 Surface vertical displacement induced by the the potential strong earthquake with a magnitude of 6.5 along the Shunyi fault (Positive means vertical upward displacement, while negative represents vertical downward displacement.)

顺义断裂发生7.0级正断型地震时产生的地表变形带分布特征如图8所示,在首都国际机场范围内,顺义断裂发生7.0级地震时在上盘产生的下降

位移为34.9~67.5 cm,下盘产生的上升位移为17.5~36.8 cm,同样,强震活动产生的垂直位移在断裂地表迹线位置最大,垂直于断裂走向两侧

向外延伸逐渐减小 (图 8a)。机场范围内 2 条垂直于断层走向的位移剖面显示 (图 8b、8c), 顺义断裂发生 7.0 级强震活动在机场停机坪和跑道附近产生的上、下盘垂直位移差最大值将达 104 cm, 为当前机场地裂缝两侧最大垂直位移差的 5.2 倍。如此大的地震错断将对机场跑道跨顺义断裂段的韧性安全风险防控提出了更高的要求。

由此看来, 对于特大城市和城市群规划设计

阶段的活动断裂地质安全风险防控而言, 仍需持续推进城市活断层精细探测工作, 确定其平面分布位置、空间结构特征, 厘定其晚第四纪活动速率, 开展地震活动危险性评价, 做好活断层安全避让规划 (吴中海, 2019; 徐锡伟等, 2021; 杨肖肖等, 2023), 而城市建成区活动断裂地质安全风险防控需重视其蠕滑引起地表变形诱发的地裂缝、地面差异沉降等缓变地质灾害的影响。

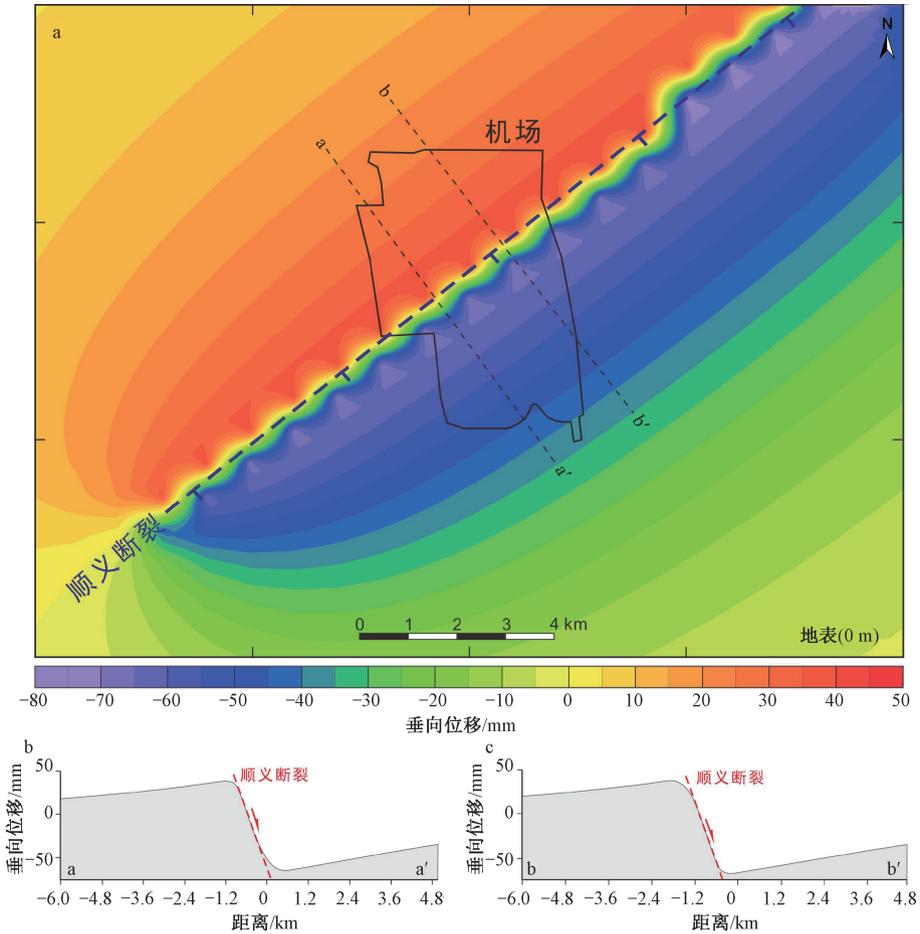


图 8 顺义断裂发生 7.0 级地震时在地表产生的垂直位移 (正表示上升, 负表示下降)

Fig. 8 Surface vertical displacement induced by the the potential strong earthquake with a magnitude of 7.0 along the Shunyi fault (Positive means vertical upward displacement, while negative represents vertical downward displacement.)

6 讨论

6.1 倾角对断裂蠕滑引起地表垂直位移分布的影响

顺义断裂倾角在空间展布上具有差异性, 一般位于 50°~75°之间 (张世民等, 2005; 戚帮申等, 2020), 为充分考虑断裂倾角对蠕滑活动引起的地表垂直位移的影响, 以首都机场内 a-a'和 b-b'

剖面为例, 分别考虑断裂倾角为 50°、55°、60°、65°、70°和 75°的工况条件, 模拟顺义断裂在 0.6 mm/a 垂直活动速率下持续蠕滑 46 年在上下盘产生的地表垂直位移变化特征 (图 9)。

在 a-a'剖面位置 (图 9a), 对于顺义断裂下盘而言, 随着倾角不断增加, 下盘地表产生的“上升位移”显著增大, 当倾角由 50°增大至 75°时, 下盘距离断裂地表迹线 1.2 km、2.4 km、3.6 km 和 4.8 km 位置处地表产生的“上升位移”分别增

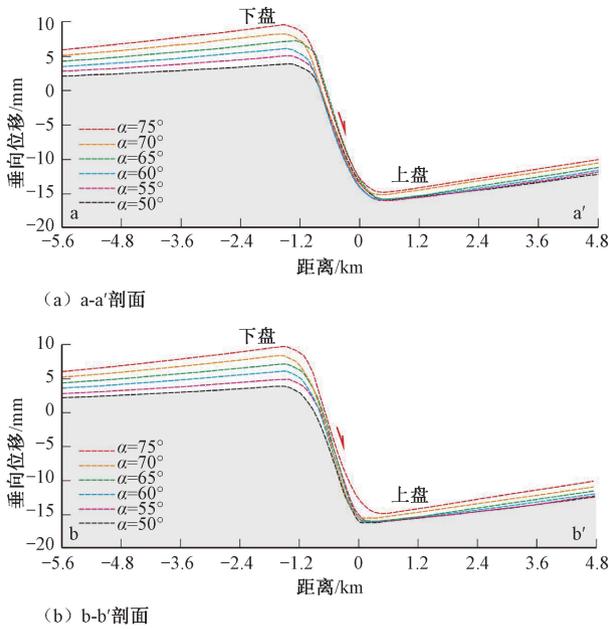


图9 顺义断裂倾角对地表垂直位移的影响 (正表示上升, 负表示下降)

Fig. 9 The effect of the shunyi fault's dip angle on the surface vertical displacement (Positive means vertical upward displacement, while negative represents vertical downward displacement.)

加了 5.4 mm、5.3 mm、4.9 mm 和 4.4 mm。随着倾角不断增加, 上盘近地表产生的“下降位移”则缓慢减小, 当倾角由 50° 增大至 75° 时, 上盘距离断裂地表迹线 1.2 km、2.4 km、3.6 km 和 4.8 km 位置处地表产生的“下降位移”分别减小了 1.5 mm、1.8 mm、2.1 mm 和 2.4 mm。进一步对比发现, 当顺义断裂倾角增加 25° 时, 在距离断裂地表迹线相同位置, 下盘产生的地表垂直位移变化 (4.4~5.4 mm) 是上盘垂直位移变化 (1.5~2.4 mm) 的 1.8~3.6 倍。由此看来, 在固定的垂直活动速率条件下, 顺义断裂倾角变化对下盘产生的地表垂直位移影响更加突出, 表现出明显的“下盘效应”。

在 b-b' 剖面位置 (图 9b), 随着倾角不断增加, 下盘地表产生的“上升位移”显著增大, 而上盘地表产生的“下降位移”则缓慢减小, 当倾角由 50° 增大至 75° 时, 下盘距离断裂地表迹线 1.2 km、2.4 km、3.6 km 和 4.8 km 位置处地表产生的“上升位移”分别增加了 5.8 mm、5.3 mm、5.0 mm 和 4.4 mm, 上盘在对应位置产生的“下降位移”分别减小了 1.5 mm、1.9 mm、2.1 mm 和 2.4 mm。由此可见, 当顺义断裂倾角增加 25° 时,

在距离断裂地表迹线相同位置, 断层下盘产生的地表垂直位移变化 (4.4~5.8 mm) 是上盘垂直位移变化 (1.5~2.4 mm) 的 1.8~3.9 倍。与 a-a' 剖面类似, 在固定垂直活动速率条件下, 顺义断裂倾角变化对下盘地表垂直位移影响更加显著, 在 b-b' 剖面位置也表现出明显的“下盘效应”。

因此, 对于顺义断裂高倾角分段而言, 应当重视其蠕滑活动在下盘 (西北侧) 引起的地面差异沉降对地上、地下建 (构) 筑物可能产生的不良影响。

6.2 活动速率对断裂蠕滑引起地表垂直位移分布的影响

顺义断裂两侧温榆河、军营和橡胶二厂钻孔联合剖面显示顺义断裂中更新世以来的垂直活动速率最小为 0.07 mm/a (张世民等, 2005; 谭成轩等, 2020)。为充分考虑顺义断裂活动速率对地表垂直位移的影响, 仍以首都机场内 a-a' 和 b-b' 剖面为例, 分别考虑垂直活动速率为 0.07 mm/a、0.20 mm/a、0.33 mm/a、0.46 mm/a 和 0.60 mm/a 的工况条件, 模拟顺义断裂持续蠕滑 46 年在上、下盘产生的地表垂直位移变化特征 (图 10), 此次计算过程中顺义断裂倾角为 75° 。

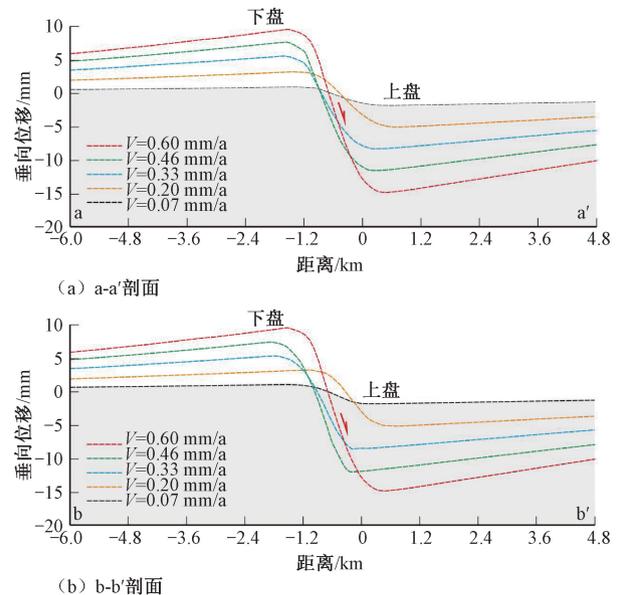


图10 顺义断裂垂直活动速率对地表垂直位移的影响 (正表示上升, 负表示下降)

Fig. 10 The effect of the Shunyi fault's vertical displacement rate on the surface vertical displacement (Positive means vertical upward displacement, while negative represents vertical downward displacement.)

在 a-a' 剖面位置 (图 10a), 对于顺义断裂下盘而言, 随着垂直活动速率的不断增加, 下盘产生的地表“上升位移”逐渐增大, 当垂直活动速率由 0.07 mm/a 增大至 0.60 mm/a 时, 下盘距离断裂地表迹线 1.2 km、2.4 km、3.6 km 和 4.8 km 位置处地表“上升位移”分别增加了 8.1 mm、7.9 mm、6.9 mm 和 6.2 mm。随着垂直活动速率的不断增加, 上盘产生的地表“下降位移”则显著增大, 当垂直活动速率由 0.07 mm/a 增大至 0.60 mm/a 时, 上盘距离断裂地表迹线相同位置处地表“下降位移”分别增加了 12.5 mm、11.5 mm、10.0 mm 和 8.8 mm。对比发现, 当顺义断裂垂直活动速率增加了 0.53 mm/a 时, 上盘的地表垂直位移变化 (8.8~12.5 mm) 是下盘垂直位移变化 (6.2~8.1 mm) 的 1.4~1.5 倍。由此看来, 在顺义断裂倾角不变的条件下, 断裂垂直活动速率变化对上盘产生的地表垂直位移影响更加突出, 表现出明显的“上盘效应”。

在 b-b' 剖面位置 (图 10b), 随着垂直活动速率的不断增加, 上盘产生的地表“上升位移”显著增大, 而下盘地表“下降位移”则缓慢增大, 当垂直活动速率由 0.07 mm/a 增大至 0.60 mm/a 时, 上盘距离断裂地表迹线 1.2 km、2.4 km、3.6 km 和 4.8 km 位置处产生的“下降位移”分别增加了 12.6 mm、11.3 mm、10.3 mm 和 8.8 mm, 而下盘相应位置产生的“上升位移”分别增加了 7.8 mm、7.6 mm、6.8 mm 和 5.9 mm。比较可见, 当顺义断裂垂直活动速率增加 0.53 mm/a 时, 断裂上盘地表垂直位移变化 (8.8~12.6 mm) 是下盘垂直位移变化 (5.9~7.8 mm) 的 1.4~1.6 倍。在 b-b' 剖面位置, 顺义断裂垂直活动速率变化对上盘地表垂直位移的影响更加显著, 同样表现出明显的“上盘效应”。

与断裂倾角的影响不同, 对于顺义断裂较大垂直活动速率分段而言, 应当重视其蠕滑活动在上盘 (东南侧) 引起的地面差异沉降对地上、地下建 (构) 筑物可能产生的不良影响。

6.3 2011年3月11日日本 M_w 9.0 级地震远场地震位移及可能影响

2011年3月11日, 日本本州岛北部以东海域发生 M_w 9.0 级地震。覆盖日本全境的 GEONET 网络 GPS 观测数据显示, 本州岛北部地区存在显著的东向水平位移, 靠近震中区的东海岸达到极大,

约 5.3 m (Ozawa et al., 2011)。中国大陆构造环境监测网络 260 个 GPS 连续观测台站记录了该强震对中国大陆构造形变场的远场影响, 地震在中国东北、华北产生了明显的同震水平位移, 最大位移发生在吉林省东部边境地区, 达 35 mm, 方向南东东向, 华北东部地区监测到毫米至厘米级位移, 方向近正东向, 其中在北京和天津地区分别产生 6~9 mm 和 8~9 mm 的水平位移 (王敏等, 2011)。日本 M_w 9.0 级地震在北京地区引起的同震水平位移场分布较均匀, 最大、最小同震水平位移差值不超过 5 mm, 且同震垂直位移不明显 (蔡华等, 2012; 丰成君等, 2013)。单从地震引起的静态远场同震位移场来看, 2011年3月11日日本 M_w 9.0 级并不能直接导致首都国际机场地裂缝显著加剧, 其贡献量约为 2%。

大震发生后, 受震后余滑和应力松弛等因素影响, 往往还会伴随显著的震后变形 (朱守彪和蔡永恩, 2009)。王丽凤等 (2013) 研究了 2011 年日本 M_w 9.0 级地震震后应力松弛过程对中国大陆的影响, 其结果表明, 地震 1 年后黏弹松弛效应在京津冀平原产生的水平拉张位移约 2 mm; 地震 10 年后, 黏弹松弛效应主要在中国东北地区、山东半岛等地产生 2 mm 的震后位移; 在震后 50~100 年的时间尺度上, 日本 M_w 9.0 级地震对中国东北地区的东端有长时间的影响作用。如果将日本 M_w 9.0 级震后 10 年在中国大陆东部产生的 2 mm 水平位移全部作用到北京顺义断裂活动性上, 该位移量对首都国际机场地裂缝的影响也只有 1% 的贡献。总体看来, 2011年3月11日日本 M_w 9.0 级远场静态同震以及震后松弛效应对首都国际机场地裂缝的影响有限。

6.4 首都国际机场地裂缝形成的关键影响因素

顺义地区的地裂缝自 1976 年唐山 7.8 级地震后开始显现, 其中首都国际机场地裂缝主要形成在 2010 年底 (赵忠海, 2006; Gao et al., 2016)。如上文所述, 首都国际机场地裂缝的形成和扩展受顺义断裂活动、地层固结沉降、地下水超采引起的地面差异沉降、地面建筑荷载以及飞机起降动荷载等多种因素的共同影响。进一步半定量或定量厘定主要影响因素对首都机场地裂缝形成的贡献, 识别出关键影响因素, 将对于机场地裂缝地质安全风险精准防控具有重要的科学指导意义。

近 50 年来, 顺义地区并未发生过超过 $M 5.0$ 级的中等强度地震, 已发生的最大地震为 1996 年 12 月 16 日的 $M_L 4.5$ 级地震, 通过分析认为, 此次地震在首都机场及邻区产生的地表垂直位移不超过 1 mm, 对机场地裂缝的形成贡献微乎其微。此外, 顺义断裂在 0.6 mm/a 垂直活动速率条件下, 正断层蠕滑活动 46 年在上、下盘产生的最大垂直位移差不超过 2.5 cm, 对首都机场地裂缝形成的最大贡献量在 20% 左右。由此看来, 顺义断裂现今蠕滑和黏滑活动并不是导致首都国际机场地裂缝形成的全部“祸因”。

已有研究表明, 过量开采地下水造成北京平原区地下水位下降, 在局部形成多个地下水降落漏斗, 从而引发较大范围的地面沉降, 同时也加剧了地裂缝活动 (杨勇等, 2013; 姜媛等, 2014; 关金环等, 2021)。首都机场地裂缝除了沿顺义断裂走向展布以外, 同时也位于顺义-朝阳区地下水漏斗严重区, 漏斗中心大致分布在地裂缝东南侧的顺义天竺和朝阳金盏地区 (Wan et al., 2021)。机场地裂缝两侧的地下水动态监测结果显示, 2010—2017 年, 东南侧 (上盘) 中、深层地下水位下降了近 10 m (S1123 监测孔), 而西北侧 (下盘) 水位下降不明显 (S1129 监测孔; 田苗壮等, 2019)。杨勇等 (2013) 通过统计拟合分析构建了北京东郊地区望京站深层地下水变化与地面沉降变化的经验关系。由此估算得到首都机场地裂缝东南侧地下水位下降 10 m 可能引起上盘区域产生约 14 cm 的沉降量, 因此, 在西北侧 (下盘) 相对稳定的背景下, 地裂缝上、下盘差异沉降量占到了当前机场地裂缝两侧实际观测值 (20 cm) 的 70%。

王海刚等 (2013) 考虑黄庄-高丽营断裂结构的影响, 模拟分析了地下水作用对高丽营地裂缝发展的影响, 其模拟结果表明, 当承压水位下降 5 m、10 m 和 15 m 时在黄庄-高丽营断裂上、下盘产生的差异沉降量分别达到了 10 cm、20 cm 和 34 cm。高丽营地裂缝带总体走向为 NE 55°, 与黄庄-高丽营断裂走向基本一致, 自 20 世纪 80 年代开始显现, 至 2007 年, 地裂缝两侧最大垂直位移差达到了 30 cm, 位于北京华都鸡肉厂南

墙, 表现为东南侧 (上盘) 下降 (贾三满和郭萌, 2007)。1995—2005 年高丽营地区承压水累计下降 6.1 m, 依据王海刚等 (2013) 模拟趋势初步估算能导致高丽营地裂缝两侧产生近 13.5 cm 的差异沉降量, 同时基于杨勇等 (2013) 经验模型估算得到的沉降量为 13.8 cm, 两者结果相近, 总体占到了高丽营地裂缝带两侧差异沉降量最大观测值的 45%~46%。由此看来, 无论是顺义断裂沿线的首都国际机场地裂缝带, 还是黄庄-高丽营断裂沿线的高丽营地裂缝带, 中、深层地下水位下降, 特别是活动断裂上盘地下水位大幅降低引起两盘显著的差异沉降是导致地裂缝扩展加剧的重要影响因素 (Wan et al., 2021; 关金环等, 2021)。

此外, Wan et al. (2022) 基于三维弹性模型还模拟计算了飞机不同降落速度载荷在机场跑道跨断层位置产生的地表垂直位移, 研究表明, 在弹性模型下, 飞机从顺义断裂上盘 (东南盘) 降落对地面加载一次产生的垂直沉降位移为 0.4~0.7 mm, 该影响量虽然很小, 但考虑到首都国际机场每年近 50 万次的起落架次, 飞机荷载作用对机场地裂缝的扩展影响也应值得关注。

首都国际机场区域内 InSAR 时序地表形变监测结果显示, 2010 年 9 月—2013 年 11 月, 顺义断裂两侧 2 km 范围内上、下盘差异沉降速率为 20~30 mm/a, 平均为 25 mm/a (Gao et al., 2016), 由此估算 2010—2018 年该差异沉降速率导致顺义断裂两侧产生的平均差异沉降量为 20 cm, 该结果与机场地裂缝两侧实际观测值相符。基于 InSAR 遥感解译数据估算得到的地表形变为综合形变结果, 包含了断层蠕滑、地下水位下降、地层压缩固结、地面建筑荷载等作用引起的差异沉降。分析认为, 在首都机场地裂缝两侧现场调查和 InSAR 监测得到的最大差异沉降量中, 由于顺义断裂上盘中、深层地下水位大幅下降产生的差异沉降占到了 70%, 而因顺义断裂正断层蠕滑活动产生的差异沉降约占 20%, 剩余 10% 的贡献量可能是由于下覆地层压缩固结、机场区域内地面构 (建) 筑物荷载以及飞机起降动荷载等因素影响造成 (图 11)。

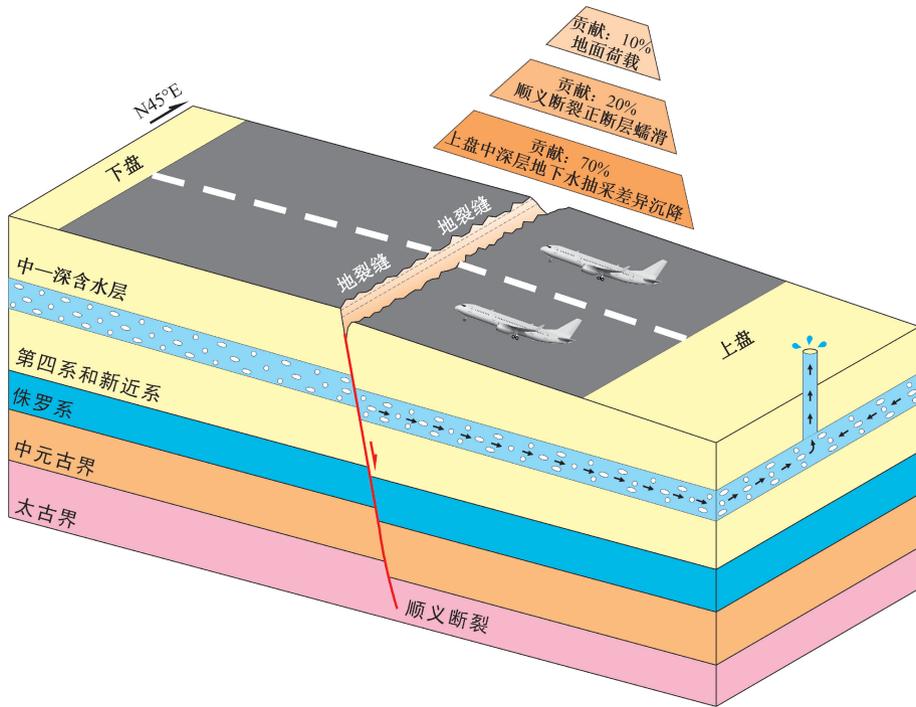


图 11 首都国际机场地裂缝耦合成因模式

Fig. 11 The coupled genetic model of the ground fissures in the Beijing Capital International Airport

7 结论与建议

(1) 自 1976 年唐山 7.8 级地震以来, 顺义断裂在 0.6 mm/a 的垂直活动速率条件下, 正断层蠕滑活动 46 年在首都机场地裂缝两侧产生的差异沉降量不超过 2.5 cm, 对当前机场地裂缝形成和发展的贡献量约占 20%。

(2) 1996 年 12 月 16 日顺义 M_L 4.5 级地震在首都机场范围内顺义断裂两盘产生的差异沉降量不超过 1 mm, 对机场地裂缝的形成影响甚微。

(3) 顺义断裂未来发生 6.5 级和 7.0 级最大震级上限地震时, 估算得到其在首都机场范围内断裂两盘产生的差异沉降量分别高达 26 cm 和 104 cm, 机场地裂缝灾害风险最大将增加 5 倍, 该结果可为机场跑道跨断裂段的韧性安全风险防控提供科学参考。

(4) 对于顺义断裂高倾角段的地质安全风险防控而言, 应当重视其蠕滑活动在断裂下盘 (西北侧) 引起的地面差异沉降对地上、地下建 (构) 筑物带来的不良影响。与此相反, 对于顺义断裂较大垂直活动速率段, 建议加强对断裂上盘 (东南侧) 地面差异沉降诱发次生灾害的风险管控。

(5) 文章关于顺义断裂活动产生地表形变特

征的研究认识主要基于理论解析计算得到, 为深入揭示顺义断裂沿线地裂缝、地面差异沉降等缓变型地质灾害成因机理和灾害效应, 建议在顺义断裂关键部位实施跨断层位移或形变动态监测工作。

致谢: 衷心感谢中国地质科学院地质力学研究所吴中海研究员、国家自然灾害防治研究院朱守彪研究员对本文提出宝贵的建议。

References

BAI L Y, ZHANG L, CAI X M, et al., 2014. Quaternary magnetostratigraphic time framework constraints on activity characteristics of the Shunyi fault, Beijing plain [J]. *Geoscience*, 28 (6): 1234-1242. (in Chinese with English abstract)

BERRY D S, SALES T W, 1962. An elastic treatment of ground movement due to mining-III three dimensional problem, transversely isotropic ground [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 10 (1): 73-83.

CAI H, SUN H R, ZHAO Q L, et al., 2012. Coseismic displacement field of continental area of China associated with the M_w 9.0 Japan earthquake in 2011 by GPS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37 (8): 953-955, 1009. (in Chinese with English abstract)

CHINNERY M A, 1961. The deformation of the ground around surface faults [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 51 (3): 355-372.

- CUI B W, YUE X Y, WANG L H, 2021. Correlation between small earthquake activity in Beijing Area and significant earthquake in Beijing and surrounding area [J]. *North China Earthquake Sciences*, 39 (4): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- DAVIS P M, 1983. Surface deformation associated with a dipping hydrofracture [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88 (B7): 5826-5834.
- FAN Y L, FENG C J, ZHANG P, et al., 2022. Impact of Tohoku-Oki 3.11 M_{9.0} earthquake on the fault slip potential of the active Quaternary faults in Beijing City: New insights from in situ stress monitoring data [J]. *Sensors*, 22 (13): 4888.
- FENG C J, ZHANG P, SUN W F, et al., 2013. A discussion on the impact of Japan M_w 9.0 earthquake on the main active fault zone in north- and northeast-China continent and the seismic risk [J]. *Earth Science Frontiers*, 20 (6): 123-140. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, YANG Y H, MA X D, et al., 2020. Local stress perturbations associated with the 2008 Wenchuan M 8.0 earthquake near the Longmenshan fault zone in the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 200: 104429.
- GAO M L, GONG H L, CHEN B B, et al., 2016. InSAR time-series investigation of long-term ground displacement at Beijing Capital International Airport, China [J]. *Tectonophysics*, 691: 271-181.
- GAO Z W, CHEN Q F, HUANG J L, et al., 2010. Velocity structure beneath the active faults in Beijing area and their seismo-tectonic characteristics [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 5 (3): 271-280. (in Chinese with English abstract)
- GUAN H P, MA L, CHEN Q F, et al., 1997. Shunyi 4.0 earthquake swarm and the aftershock tendency analysis in the Capital area [J]. *Earthquake*, 17 (4): 411-416. (in Chinese with English abstract)
- GUAN J H, GAO M L, GONG H L, 2021. Discussion on the causes of regional differential settlement of Beijing-capital international airport [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 46 (9): 67-75. (in Chinese with English abstract)
- GUO L Q, LI Y X, HUANG L R, et al., 2006. Characteristics of strain field variation in Beijing Area [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 26 (3): 46-52. (in Chinese with English abstract)
- HU P, LUO H C, MENG Y Q, et al., 2000. Analyses for activity of north section of the Shunyi-Liangxiang fault from the Shunyi ground rupture zone [J]. *Seismology and Geology*, 22 (2): 123-128. (in Chinese with English abstract)
- HUANG J C, WAN Y G, 2015. Present tectonic stress field in the Capital Region of China determined from small and strong earthquake focal mechanisms [J]. *Earthquake*, 35 (1): 17-27. (in Chinese with English abstract)
- JIA S M, GUO M, 2007. The relation between Huangzhuang-Gaoliying fault and by Gaoliying trench and earth fissure [J]. *Geological Hazards*, 2 (4): 24-28. (in Chinese with English abstract)
- JIA S M, LIU M K, TIAN F, et al., 2011. The Classification of ground fissures and their prevention measures in Beijing area [J]. *Urban Geology*, 6 (2): 4-7, 24. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Y, WANG R, TIAN F, et al., 2014. Study on the relationship between land subsidence and ground fissures in Beijing [J]. *Urban Geology*, 9 (4): 6-10. (in Chinese with English abstract)
- LEI X D, QI B S, GUAN W, et al., 2021. Research on the faults identification based on gravity anomaly in Beijing plain [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64 (4): 1253-1265. (in Chinese with English abstract)
- LIN C Y, CHEN X D, LUO H C, et al., 2006. Microscopic analysis of the trench across the Shunyi-Qianmen-Liangxiang fault at Shunyi, Beijing and its implications [J]. *Seismology and Geology*, 28 (4): 561-578. (in Chinese with English abstract)
- LIU F C, QI S W, PENG J B, et al., 2016. Characters of the ground fissures developing in Beijing [J]. *Journal of Engineering Geology*, 24 (6): 1269-1277. (in Chinese with English abstract)
- LIU M K, JIA S M, CHEN Z Z, et al., 2014. Study of the activity and impact of the Gaoliying ground fissure on the Beijing plain [J]. *Shanghai Land & Resources*, 35 (4): 53-57. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y Y, CHONG J J, NI S D, 2011. Near surface wave velocity structure in Chinese capital region based on borehole seismic records [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 33 (3): 342-350. (in Chinese with English abstract)
- LONG F, WEN X Z, XU X W, 2006. Empirical relationships between magnitude and rupture length, and rupture area, for seismogenic active faults in North China [J]. *Seismology and Geology*, 28 (4): 511-535. (in Chinese with English abstract)
- LU Q Z, PENG J B, DENG Y H, et al., 2014. Failure characteristics and influence width of Beiqijia-Gaoliying ground fissure in Beijing [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 42 (6): 5-11. (in Chinese with English abstract)
- LV J B, ZHENG G S, LI L J, et al., 2016. Primary establishment of stratigraphic section in plain area of Beijing: Archean crystalline basement and Proterozoic strata [J]. *Geology in China*, 43 (3): 879-889. (in Chinese with English abstract)
- LV P L, WANG H M, LV M M, 1998. The background and implication of the 1996 Shunyi earthquake [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 19 (3): 16-21. (in Chinese with English abstract)
- MA X J, YANG X D, JIA G X, 2015. Genesis analysis of fault creep type ground fissures in the Hebei plain [J]. *Geological Survey of China*, 2 (8): 48-54. (in Chinese with English abstract)
- MARUYAMA T, 1964. Static elastic dislocations in an infinite and semi-infinite medium [J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 42 (2): 289-368.
- OKADA Y, 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75 (4): 1135-1154.
- OKADA Y, 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82 (2): 1018-1040.
- OZAWA S, NISHIMURA T, SUIITO H, et al., 2011. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake [J]. *Nature*, 475 (7356): 373-376.

- PENG J B, FAN W, LI X A, et al., 2007. Some key questions in the formation of ground fissures in the Fen-Wei basin [J]. *Journal of Engineering Geology*, 15 (4): 433-440. (in Chinese with English abstract)
- PENG J B, LAN H X, QIAN H, et al., 2020. Scientific research framework of livable Yellow River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 28 (2): 189-201. (in Chinese with English abstract)
- PRESS F, 1965. Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances [J]. *Journal of Geophysical Research*, 70 (10): 2395-2412.
- QI B S, PAN Z F, FENG C J, et al., 2020. Application of comprehensive geophysical-drilling exploration to detect the buried Shunyi active fault belt in Beijing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (4): 1315-1329. (in Chinese with English abstract)
- QIAO J W, PENG J B, ZHENG J G, et al., 2020. Development rules and movement characteristics of earth fissures in China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 28 (5): 1016-1027. (in Chinese with English abstract)
- QIN X H, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57 (7): 2165-2180. (in Chinese with English abstract)
- REN J J, ZHANG S M, TANG R Y, 2007. Activity characteristics of the ground fissure belt in Shunyi County, Beijing and measures for disaster reduction [J]. *Urban Geology*, 2 (1): 33-38. (in Chinese with English abstract)
- SHEN W S, LUO Y, NI S D, et al., 2010. Resolving near surface S velocity structure in natural earthquake frequency band: A case study in Beijing region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 32 (2): 137-146. (in Chinese with English abstract)
- STEKETEE J A, 1958. On Volterra's dislocations in a semi-Infinite elastic medium [J]. *Canadian Journal of Physics*, 36 (2): 192-205.
- SUN W K, OKUBO S, 1998. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical earth-II. Application to a finite fault [J]. *Geophysical Journal International*, 132 (1): 79-88.
- SUN Y J, DONG S W, FAN T Y, et al., 2013. The effect of Tohoku M_w 9.0 earthquake on the near-field seismic activity from the coseismic and postseismic deformation [J]. *Progress in Geophysics*, 28 (3): 1131-1139. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. An approach to deep borehole crustal stress measuring and real-time monitoring and its application in seismogeology research in Capital Beijing region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88 (8): 1436-1452. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, YANG W M, ZHANG C S, et al., 2020. Jingjinji xietong fazhanqu huodong gouzao yu quyue diqiao wendingxing yanjiu [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- TIAN M Z, ZHAO L, LUO Y, et al., 2019. On the development characteristics and genesis of Shunyi ground fissure (Airport segment) [J]. *Urban Geology*, 14 (4): 17-21. (in Chinese with English abstract)
- WAN J W, LI B, TAN C X, et al., 2019. Characteristics and mechanism of earth fissures in China: A case study of Fenhe river-Weihe river basin, Hebei plain and Suzhou-Wuxi-Changzhou plain [J]. *Geological Review*, 65 (6): 1383-1396. (in Chinese with English abstract)
- WAN J W, LI B, TAN C X, et al., 2021. Formation mechanism of pumping-induced earth fissures associated with a pre-existing normal fault, Beijing, China [J]. *Engineering Geology*, 294: 106361.
- WAN J W, LI B, GAO Y, et al., 2022. Dynamic response of the inhomogeneous pavement structure containing a buried fault zone under the moving aircraft loads [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81 (8): 301.
- WAN Y G, JIN Z T, CUI H W, et al., 2017. Study on displacement of the peaks of the Himalaya generated by the 2015 Nepal earthquake sequence [J]. *Seismology and Geology*, 39 (4): 699-711. (in Chinese with English abstract)
- WANG H G, LIU M K, JIA S M, et al., 2013. Simulation of Gaoliying ground fissure based on FLAC^{3D} [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 11 (5): 86-90. (in Chinese with English abstract)
- WANG H M, LV M M, LV P L, 1998. On temporal features of Shunyi earthquake sequence of Dec. 16, 1996 and its relation with the seismicity in neighbouring area [J]. *Earthquake*, 18 (1): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- WANG J M, 2000. Theory of ground fissures hazards and its application [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press. (in Chinese)
- WANG L F, LIU J, ZHAO J G, et al., 2013. Coseismic slip and post-seismic relaxation of the 2011 M 9.0 Tohoku-Oki earthquake and its influence on China mainland [J]. *Earthquake*, 33 (4): 238-247. (in Chinese with English abstract)
- WANG M, LI Q, WANG F, et al., 2011. Far-field coseismic displacements associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake in Japan observed by Global Positioning System [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (23): 2419-2424.
- WANG R J, MARTIN F L, ROTH F, 2006. PSGRN/PSCMP-a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory [J]. *Computers & Geosciences*, 32 (4): 527-541.
- WANG S Z, 1990. Prediction of seisnigebic probabilities of potential hypocenters in Beijing Area by using the multi-criterion tectonophysical method [J]. *Earthquake Research in China*, 6 (3): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4): 974-1002.
- WU M J, WU A X, XU P, et al., 2012. Comprehensive research on focal mechanism solutions in the Capital Area [J]. *Earthquake Research in China*, 28 (4): 393-401. (in Chinese with English abstract)
- WU Q, GAO M T, 2018. A preliminary study on the correlativity of seismic hazard between Beijing Area and Xiong'an New Area [J].

- Seismology and Geology, 40 (4): 935-943. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, 2019. The definition and classification of active faults: history, current status and progress [J]. Acta Geoscientica Sinica, 40 (5): 661-697. (in Chinese with English abstract)
- XU H, SUN Y J, WU Z H, 2016. The effect of 1668 Tancheng M8.5 earthquake on the Seismic activity of the vicinity from coseismic and postseismic deformation [J]. Journal of Geomechanics, 22 (3): 568-576. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, WANG Z G, XU C, et al., 2021. Natural disaster risk analysis and its countermeasures of major urban agglomerations in China [J]. City and Disaster Reduction (6): 1-6. (in Chinese)
- XUAN Y, 2011. Fault activity research and seismic risk analysis of Beijing district [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- YANG F, HUANG J L, 2013. High precision 3D P-wave velocity model of the upper crust under the Chinese capital region based on oil seismic stack velocity and deep seismic sounding [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56 (5): 1487-1496. (in Chinese with English abstract)
- YANG T, GONG H L, ZHAO W J, et al., 2010. Distribution characteristics and cause analysis of ground fissures in Shunyi district of Beijing [J]. Journal of Natural Disasters, 19 (6): 100-106. (in Chinese with English abstract)
- YANG X X, HU D G, JIA L Y, et al., 2023. Quaternary activity characteristics of the Qionghua-Liantang fault belt in Hainan [J]. Journal of Geomechanics, 29 (1): 127-137. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y, ZHENG F D, LIU L C, et al., 2013. Study on the correlation between groundwater level and ground subsidence in Beijing plain areas [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 41 (8): 44-48. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H Y, XIE F R, JIAO Q, et al., 2007. Cross-fault deformation observation and crustal stress field in Capital circle region [J]. Seismology and Geology, 29 (4): 706-715. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L, HE F B, BAI L Y, et al., 2015. Astronomical cyclostratigraphy study of Quaternary activities in northern segment of the Shunyi fault, Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 54 (5): 147-154. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L, ZHANG X L, BAI L Y, et al., 2017. Activity study and disaster effect analysis of the north section of Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing [J]. Journal of Geomechanics, 23 (4): 548-557. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S M, LIU X D, REN J J, et al., 2005. Quaternary activities of northern segment of the Shunyi-Liangxiang fault [J]. Earthquake Research in China, 21 (1): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L, LIU J R, WANG R, et al., 2017. Distribution characteristics and cause analysis of Songzhuang ground fissures in Beijing [J]. Shanghai Land & Resources, 38 (2): 35-38. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L, LI Y M, CUI W J, et al., 2018. Disaster characteristics and influence factors for ground fissures at Songzhuang Village in Beijing [J]. Journal of Engineering Geology, 26 (6): 1600-1610. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L, LUO Y, LI Y M, et al., 2019. Characteristics of disaster-affected bodies and influence factors for earth fissure in Beijing Plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 46 (6): 156-164. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Z H, 2006. Discussion on the distributions characteristic and genetic type of the land crack in Beijing [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 17 (3): 75-78. (in Chinese with English abstract)
- ZHU S B, CAI Y E, 2009. Dynamic mechanisms of the post-seismic deformation following large events: Case study of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan of China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52 (11): 1813-1824.
- ### 附中文参考文献
- 白凌燕, 张磊, 蔡向民, 等, 2014. 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, 28 (6): 1234-1242.
- 蔡华, 孙汉荣, 赵齐乐, 等, 2012. GPS 测定的 2011 年日本 9.0 级地震的中国大陆地区同震位移场 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 37 (8): 953-955, 1009.
- 崔博闻, 岳晓媛, 王丽红, 2021. 北京地区小震活动与北京及周边地区显著地震相关性研究 [J]. 华北地震科学, 39 (4): 87-94.
- 丰成君, 张鹏, 孙炜锋, 等, 2013. 日本 M_w 9.0 级地震对中国华北-东北大陆主要活动断裂带的影响及地震危险性初步探讨 [J]. 地学前缘, 20 (6): 123-140.
- 高战武, 陈棋福, 黄金莉, 等, 2010. 北京地区主要活动断裂深部速度结构特征及强震构造分析 [J]. 震灾防御技术, 5 (3): 271-280.
- 关华平, 马丽, 陈棋福, 等, 1997. 北京顺义 4.0 级地震和震后首都圈地震趋势分析 [J]. 地震, 17 (4): 411-416.
- 关金环, 高明亮, 宫辉力, 2021. 首都国际机场区域差异性沉降原因探讨 [J]. 测绘科学, 46 (9): 67-75.
- 郭良迁, 李延兴, 黄立人, 等, 2006. 北京地区近十年应变场变化特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 26 (3): 46-52.
- 胡平, 罗华春, 孟勇琦, 等, 2000. 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, 22 (2): 123-128.
- 黄骥超, 万永革, 2015. 利用小震与强震震源机制解反演首都圈现今构造应力场 [J]. 地震, 35 (1): 17-27.
- 贾三满, 郭萌, 2007. 从高丽营探槽分析黄庄-高丽营断裂与地裂缝的关系 [J]. 地质灾害, 2 (4): 24-28.
- 贾三满, 刘明坤, 田芳, 等, 2011. 北京地区地裂缝分类及防治措施 [J]. 城市地质, 6 (2): 4-7, 24.
- 姜媛, 王荣, 田芳, 等, 2014. 北京地区地面沉降与地裂缝关系研究 [J]. 城市地质, 9 (4): 6-10.
- 雷晓东, 戚帮申, 关伟, 等, 2021. 北京平原区断裂构造重力异常识别研究 [J]. 地球物理学报, 64 (4): 1253-1265.
- 林传勇, 陈孝德, 罗华春, 等, 2006. 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, 28 (4): 561-578.
- 刘方翠, 祁生文, 彭建兵, 等, 2016. 北京市地裂缝分布与发育规律

- [J]. 工程地质学报, 24 (6): 1269-1277.
- 刘明坤, 贾三满, 陈柘舟, 等, 2014. 北京平原区高丽营地裂缝带活动性及灾害特征研究 [J]. 上海国土资源, 35 (4): 53-57.
- 刘渊源, 崇加军, 倪四道, 2011. 基于井下摆天然地震数据测量首都圈近地表波速结构 [J]. 地震学报, 33 (3): 342-350.
- 龙锋, 闻学泽, 徐锡伟, 2006. 华北地区地震活断层的震级-破裂长度、破裂面积的经验关系 [J]. 地震地质, 28 (4): 511-535.
- 卢全中, 彭建兵, 邓亚虹, 等, 2014. 北京北七家-高丽营地裂缝破坏特征及影响带宽度 [J]. 工程勘察, 42 (6): 5-11.
- 吕金波, 郑桂森, 李良景, 等, 2016. 北京平原区地质剖面的初步建立-太古宙结晶基底和元古宙地层 [J]. 中国地质, 43 (3): 879-889.
- 吕培苓, 王慧敏, 吕梅梅, 1998. 1996年顺义地震的背景及其含义 [J]. 地震地磁观测与研究, 19 (3): 16-21.
- 马学军, 杨旭东, 贾国欣, 2015. 河北平原断层蠕滑地裂缝成因分析 [J]. 中国地质调查, 2 (8): 48-54.
- 彭建兵, 范文, 李喜安, 等, 2007. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题 [J]. 工程地质学报, 15 (4): 433-440.
- 彭建兵, 兰恒星, 钱会, 等, 2020. 宜居黄河科学构想 [J]. 工程地质学报, 28 (2): 189-201.
- 戚帮申, 潘智锋, 丰成君, 等, 2020. 北京顺义断裂第四纪活动性地壳物理及钻孔综合探测证据 [J]. 地质学报, 94 (4): 1315-1329.
- 乔建伟, 彭建兵, 郑建国, 等, 2020. 中国地裂缝发育规律与运动特征研究 [J]. 工程地质学报, 28 (5): 1016-1027.
- 秦向辉, 张鹏, 丰成君, 等, 2014. 北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析 [J]. 地球物理学报, 57 (7): 2165-2180.
- 任俊杰, 张世民, 唐荣余, 2007. 北京顺义地裂缝带的活动特征及减灾措施 [J]. 城市地质, 2 (1): 33-38.
- 沈伟森, 罗艳, 倪四道, 等, 2010. 天然地震频率范围内首都圈地区近地表S波速度结构 [J]. 地震学报, 32 (2): 137-146.
- 孙玉军, 董树文, 范桃园, 等, 2013. 从同震和震后形变分析日本东北 M_w 9.0级大地震对近场地震活动性的影响 [J]. 地球物理学进展, 28 (3): 1131-1139.
- 谭成轩, 张鹏, 丰成君, 等, 2014. 探索首都圈地区深孔地应力测量与实时监测及其在地震地质研究中应用 [J]. 地质学报, 88 (8): 1436-1452.
- 谭成轩, 杨为民, 张春山, 等, 2020. 京津冀协同发展区活动构造与区域地壳稳定性研究 [M]. 北京: 地质出版社.
- 田苗壮, 赵龙, 罗勇, 等, 2019. 顺义地裂缝(机场段)发育特征与成因分析 [J]. 城市地质, 14 (4): 17-21.
- 万佳威, 李滨, 谭成轩, 等, 2019. 中国地裂缝的发育特征及成因机制研究: 以汾渭盆地、河北平原、苏锡常平原为例 [J]. 地质论评, 65 (6): 1383-1396.
- 万永革, 靳志同, 崔华伟, 等, 2017. 2015年尼泊尔强震序列导致的喜马拉雅山峰位移动 [J]. 地震地质, 39 (4): 699-711.
- 王海刚, 刘明坤, 贾三满, 等, 2013. 基于FLAC^{3D}的北京高丽营地裂缝模拟 [J]. 南水北调与水利科技, 11 (5): 86-90.
- 王慧敏, 吕梅梅, 吕培苓, 1998. 1996年12月16日北京顺义地震时序特征及其与邻区地震活动的关系 [J]. 地震, 18 (1): 41-48.
- 王景明, 2000. 地裂缝及其灾害的理论与应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 王丽凤, 刘杰, 赵金贵, 等, 2013. 2011年日本9.0级地震的同震位错以及震后应力松弛过程对中国大陆的影响 [J]. 地震, 33 (4): 238-247.
- 王敏, 李强, 王凡, 等, 2011. 全球定位系统测定的2011年日本宫城 M_w 9.0级地震远场同震位移 [J]. 科学通报, 56 (20): 1593-1596.
- 王绳祖, 1990. 北京地区潜在震源区发震概率的多判据构造物理方法预测 [J]. 中国地震, 6 (3): 11-19.
- 武敏捷, 武安绪, 徐平, 等, 2012. 首都圈地区震源机制解综合研究 [J]. 中国地震, 28 (4): 393-401.
- 吴清, 高孟潭, 2018. 北京地区与雄安新区地震危险性相关性初探 [J]. 地震地质, 40 (4): 935-943.
- 吴中海, 2019. 活断层的定义与分类: 历史、现状和进展 [J]. 地球学报, 40 (5): 661-697.
- 徐昊, 孙玉军, 吴中海, 2016. 从同震和震后形变分析1668年M8.5级郯城地震对周边地震活动性的影响 [J]. 地质力学学报, 22 (3): 568-576.
- 徐锡伟, 王中根, 许冲, 等, 2021. 我国主要城市群自然灾害风险分析与防范对策 [J]. 城市与减灾 (6): 1-6.
- 玄月, 2011. 北京市断裂活动性研究及地震危险性分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 杨峰, 黄金莉, 2013. 首都圈上地壳高精度三维P波速度模型: 基于石油地震叠加速度和人工地震测深剖面 [J]. 地球物理学报, 56 (5): 1487-1496.
- 杨涛, 宫辉力, 赵文吉, 等, 2010. 北京顺义区地裂缝分布特征及成因分析 [J]. 自然灾害学报, 19 (6): 100-106.
- 杨肖肖, 胡道功, 贾丽云, 等, 2023. 海南琼华-莲塘断裂带第四纪活动特征 [J]. 地质力学学报, 29 (1): 127-137.
- 杨勇, 郑凡东, 刘立才, 等, 2013. 北京平原区地下水水位与地面沉降关系研究 [J]. 工程勘察, 41 (8): 44-48.
- 张红艳, 谢富仁, 焦青, 等, 2007. 首都圈地区跨断层形变观测与地壳应力场 [J]. 地震地质, 29 (4): 706-715.
- 张磊, 何付兵, 白凌燕, 等, 2015. 北京顺义断裂带北段第四纪活动的天文旋回地层学研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 54 (5): 147-154.
- 张磊, 张晓亮, 白凌燕, 等, 2017. 北京地区黄庄-高丽营断裂北段活动性研究与灾害效应分析 [J]. 地质力学学报, 23 (4): 548-557.
- 张世民, 刘旭东, 任俊杰, 等, 2005. 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, 21 (1): 84-92.
- 赵龙, 刘久荣, 王荣, 等, 2017. 北京宋庄地裂缝分布特征及成因分析 [J]. 上海国土资源, 38 (2): 35-38.
- 赵龙, 李玉梅, 崔文君, 等, 2018. 北京宋庄地裂缝灾害特征及影响因素分析 [J]. 工程地质学报, 26 (6): 1600-1610.
- 赵龙, 罗勇, 李玉梅, 等, 2019. 北京平原区地裂缝受灾体形态特征及影响因素 [J]. 水文地质工程地质, 46 (6): 156-164.
- 赵忠海, 2006. 北京地区地裂缝灾害的分布特征及其成因探讨 [J]. 地质灾害与环境保护, 17 (3): 75-78.
- 朱守彪, 蔡永恩, 2009. 强震后地表变形的动力学机制研究: 以1999年台湾集集地震为例 [J]. 中国科学D辑: 地球科学, 39 (9): 1209-1219.