

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.08.002

京津冀协同发展区活动构造与地壳稳定性

王惠卿^{1,2}, 谭成轩^{2,3*}, 丰成君^{2,3}, 戚帮申^{2,3}, 王继明⁴, 杨为民^{2,3}, 张春山^{2,3}, 张鹏^{2,3},
孟静^{2,3}, 杨肖肖^{2,3}, 王士强⁵, 易冰⁶, 孙明乾^{2,3}, 孟华君^{2,3}

WANG Huiqing^{1,2}, TAN Chengxuan^{2,3*}, FENG Chengjun^{2,3}, QI Bangshen^{2,3}, WANG Jiming⁴,
YANG Weimin^{2,3}, ZHANG Chunshan^{2,3}, ZHANG Peng^{2,3}, MENG Jing^{2,3}, YANG Xiaoxiao^{2,3},
WANG Shiqiang⁵, YI Bing⁶, SUN Mingqian^{2,3}, MENG Huajun^{2,3}

1. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

2. 自然资源部新构造与地壳稳定性科技创新团队, 北京 100081;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

4. 中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310051;

5. 河北省地质工程勘察院, 河北 保定 071000;

6. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. China Institute of Geo-environment Monitoring, China Geological Survey, Beijing 100081, China;

2. Scientific and Technical Innovation Team of Neotectonics and Crustal Stability Assessment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

4. China United Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310051, Zhejiang, China;

5. Hebei Geological Engineering Exploration Institute, Baoding 071000, Hebei, China;

6. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

摘要:京津冀协同发展区是中国东部规划的战略开发区之一,也是华北地区主要的活动构造区,新构造活动强烈,活动断裂发育,地震频发,具有潜在的地质安全隐患问题。基于张家口地区、雄安新区及邻区、北京及关键构造部位调查研究结果,结合已有研究成果,系统分析了京津冀协同发展区主要活动断裂几何学、运动学和动力学特征及其工程地质、地质灾害特征,采用 ArcGIS 平台的空分析功能,初步完成了京津冀协同发展区地壳稳定性评价。研究表明,京津冀协同发展区发育邢台—河间—唐山、石家庄—通州 NNE 向构造带和张家口—渤海 NWW 向区域性活动构造带,其中全新世活动断裂 11 条,晚更新世活动断裂 16 条,第四纪断裂 23 条;冀北及冀东南地区现今构造应力场最大水平主应力方向为近 EW 向,而太行山东缘南段为 NNE 向,北段为 NW 向;NNE 向活动断裂带总体表现为顺时针扭动正断活动,倾向 SE, NWW 向活动断裂带晚更新世以来具有明显的活动性,整体表现为反时针扭动正断活动,倾向 SW。京津冀协同发展区地壳稳定性总体较好,不稳定区及次不稳定区主要分布在邢台、唐山、延怀盆地和全新世活动断裂带内,利于重要城镇和重大工程规划建设。研究成果将为京津冀协同发展区宏观发展战略提供地质支撑。

关键词:京津冀协同发展区;活动断裂;地应力;实时监测;工程地质岩组;地质灾害;区域地壳稳定性;地质调查工程

中图分类号:P315.2;P642 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)08-1322-20

收稿日期:2021-04-22;**修订日期:**2021-09-04

资助项目:中国地质调查局项目《京津冀协同发展区活动构造与区域地壳稳定性调查》(编号:DD20160267)、《通州—石家庄活动构造带区域地质调查》(编号:DD20190317)、《国家级地质环境监测与预报》(编号:121201014000150003)

作者简介:王惠卿(1992-),女,博士,工程师,从事地质灾害、构造应力场和区域地壳稳定性评价研究。E-mail: huiqing_wang@foxmail.com

*** 通信作者:**谭成轩(1964-),男,博士,研究员,从事活动构造、构造应力场、区域地壳稳定性评价等研究。E-mail: tanchengxuan@tom.com

Wang H Q, Tan C X, Feng C J, Qi B S, Wang J M, Yang W M, Zhang C S, Zhang P, Meng J, Yang X X, Wang S Q, Yi B, Sun M Q, Meng H J. Activity structure and crustal stability in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(8): 1322-1341

Abstract: Beijing-Tianjin-Hebei Collaborative Development Zone(BTHCDZ) is one of the strategic development zones in eastern China, and is also the active tectonic region in North China. Based on its strong neotectonic activity, many active faults and frequent earthquakes, it is sure that there are potential geological safety hazards. Based on the results of the investigation and research on Zhangjiakou area, Xiong'an New Area and neighboring area, Beijing area and its key tectonic sites, and combined with the comprehensive analysis of the existing research results, the features of the geometry, kinematics and dynamics of the main active fracture and as well as the engineering geology and geohazards are systematically analyzed in the BTHCDZ. And then the assessment of crustal stability based on the spatial analysis function of ArcGIS platform in the BTHCDZ has been completed. The results show that: There are Xingtai-Hejian-Tangshan and Shijiazhuang-Tongzhou two NNE-trending, and Zhangjiakou-Bohai one NWW-trending activity tectonic belts existed in the BTHCDZ, and within the three belts, there are 11 Holocene fractures, 16 Late Pleistocene fractures and 23 major Quaternary fractures; The direction of the maximum horizontal principal stress of present tectonic stress field in the north and southeast regions of Hebei Province is near EW, while the southern section of the east edge of Taihangshan is NNE direction and the northern section is NW direction; The overall performance of NNE active fault belt is clockwise normal activity with SE tendency, while NWW active fault belt has obvious activity from Late Pleistocene, and the overall performance is anti-clockwise normal activity with SW tendency; The general crustal stability of the BTHCDZ is general good for the planning and construction of important towns and major projects, and the unstable zones and sub-unstable areas are mainly distributed in Xingtai, Tangshan, Yanhuai Basin and the Holocene active fault zone. The research results will provide geological support for the macro-development strategy of the BTHCDZ.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone; activity fracture; crustal stress; real-time monitoring; engineering geology rock group; geohazards; regional crustal stability; geological survey engineering

京津冀协同发展区是中国东部规划的战略发展区之一,也是华北地区活动构造区之一,新构造活动强烈、地震频发、活动断裂发育^[1-10],其地质安全具有潜在的风险。同时,京津冀协同发展区存在砂土液化、地裂缝、地面差异沉降等工程地质问题^[11-12]。此外,京津冀平原区是目前中国地面沉降发展速度最快、发生范围最广、危害最严重的地区,地裂缝发育整体呈增长趋势^[13-14]。

多年来,众多学者针对华北地区活动构造及地壳稳定性开展研究,取得一系列进展。冉永康^[1-2]基于首都圈山区晚更新世以来活动断裂划分地震危险区,利用活动构造定量资料与强震危险性评价的确定性方法,分析危险区未来强震可能发生的危险程度。徐杰等^[3]根据地震构造、新构造和火山活动等资料分析了中国大陆东部北西向断裂带,认为北西向断裂具有成带性,为先存构造基础上在新构造应力场作用下正在发育的一套地壳共轭剪切破裂系统。李长波等^[4]构建了郯庐断裂带泗洪地区包含基岩面起伏特征、断裂展布、密度分布等要素的地质模型,反映并且细化了区域的基岩面构造及区域构造特征。Peng等^[11]根据槽探、钻探和浅层地震

剖面资料,探讨了华北平原隆尧地裂缝的地质背景、发育特征和成因模式特征及形成机制。

已有研究成果主要集中在特定研究地区或特定研究目标条件下活动断裂、工程地质或地质灾害研究,尚需从内、外动力地质作用相结合的角度,针对京津冀发展区活动构造开展进一步研究。本文通过重要地区及其关键构造部位活动断裂和工程地质野外调查、综合物探、工程地质钻探联孔剖面分析、断层活动年龄年代学测试和地应力测量与实时监测等工作,确定其主要活动断裂几何学、运动学和动力学特征。分析工程地质和地质灾害特征,对京津冀协同发展区新构造活动背景、活动断裂特征、现今构造应力场特征、区域工程地质特征、地质灾害发育特征等进行系统的分析总结,并基于目前研究成果,完成京津冀协同发展区地壳稳定性评价。研究成果将为京津冀协同发展区重要城镇和重大工程规划建设和地质安全保障提供支撑。

1 新构造活动背景与活动构造特征

1.1 新构造活动背景

受控于华北地区新构造活动背景,京津冀协同

发展区新构造活动特征具有新生性和继承性,时间上具有阶段性,空间上具有差异性、掀斜性(图1)。不同新构造背景,其运动幅度、运动方式、断裂运动速度等存在很大的差别,而这些因素又在很大程度上决定现代构造运动和地震活动的分布。故新构造运动特征是区域地壳稳定性评价中构造稳定性评价的重要研究内容之一。

京津冀地区的新构造活动不同程度地继承了先存的构造格局和活动方式。新构造时期,隆起区进一步隆起,沉降区进一步沉降,以第四纪最显著。同时,新构造活动还显示出新生性,在时间、空间上改变了原有运动方式和强度,如北京断陷的丰台凹陷,在古近纪和中新世以断陷沉积为主,在上新世—第四纪则构造反转为相对隆起区。NW向张家口—渤海活动构造带中的海河断裂、蓟运河断裂、南口—孙河断裂等新生断裂构造的形成都是基于老断裂复活而成的新生断裂构造。

自新生代以来,京津冀地区经历了多次间歇性的升降运动。基岩山区存在大面积间歇性抬升,发育四级夷平面和层状地貌。华北盆地在渐新世—中新世、上新世—第四纪之间存在强烈的断裂沉降

和沉积间断,断陷盆地沉积具有多沉积旋回、多期成藏的特征。

空间上,京津冀地区新构造活动具有差异性和掀斜性特征。新生代以来,燕山隆起向南掀斜,而盆地中断裂的正倾滑控制了块体的掀斜运动,在断裂上升盘一侧形成翘起的断隆,下降盘一侧形成掀斜的断陷。

1.2 活动构造特征

华北地区地质构造复杂,具有长期、复杂的演化过程。继中生代 NE—NNE 向断裂体系形成之后,华北地区于新生代以来 NE—NNE 向断裂发生构造反转,由晚中生代逆断活动转变为正断活动,并在晚新生代发育大量 NW—NWW 向断裂,构成 NW—NWW 向断裂构造体系^[16]。京津冀地区主要发育燕山构造带、张家口—渤海构造带、山西断陷构造带及华北平原构造带(图2)。

基于张家口地区、雄安新区及邻区、北京及关键构造部位的野外调查、综合地球物理探测、工程地质钻探钻孔联合剖面、断层活动年龄年代学测试等调查研究结果^[12-13, 17-24],综合分析已有研究成果。各构造带的活动构造基本特征简述

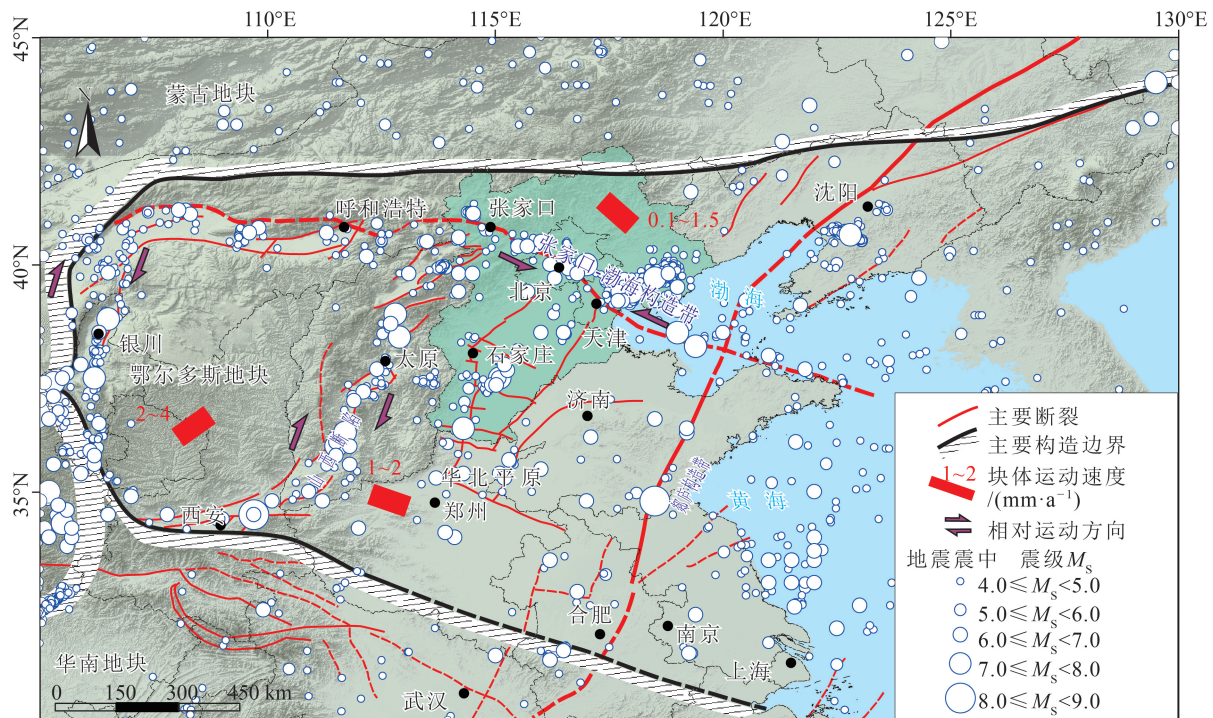


图1 华北地区活动构造简图(据参考文献[9,15]修改)

Fig. 1 Generalized map of active structure of Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

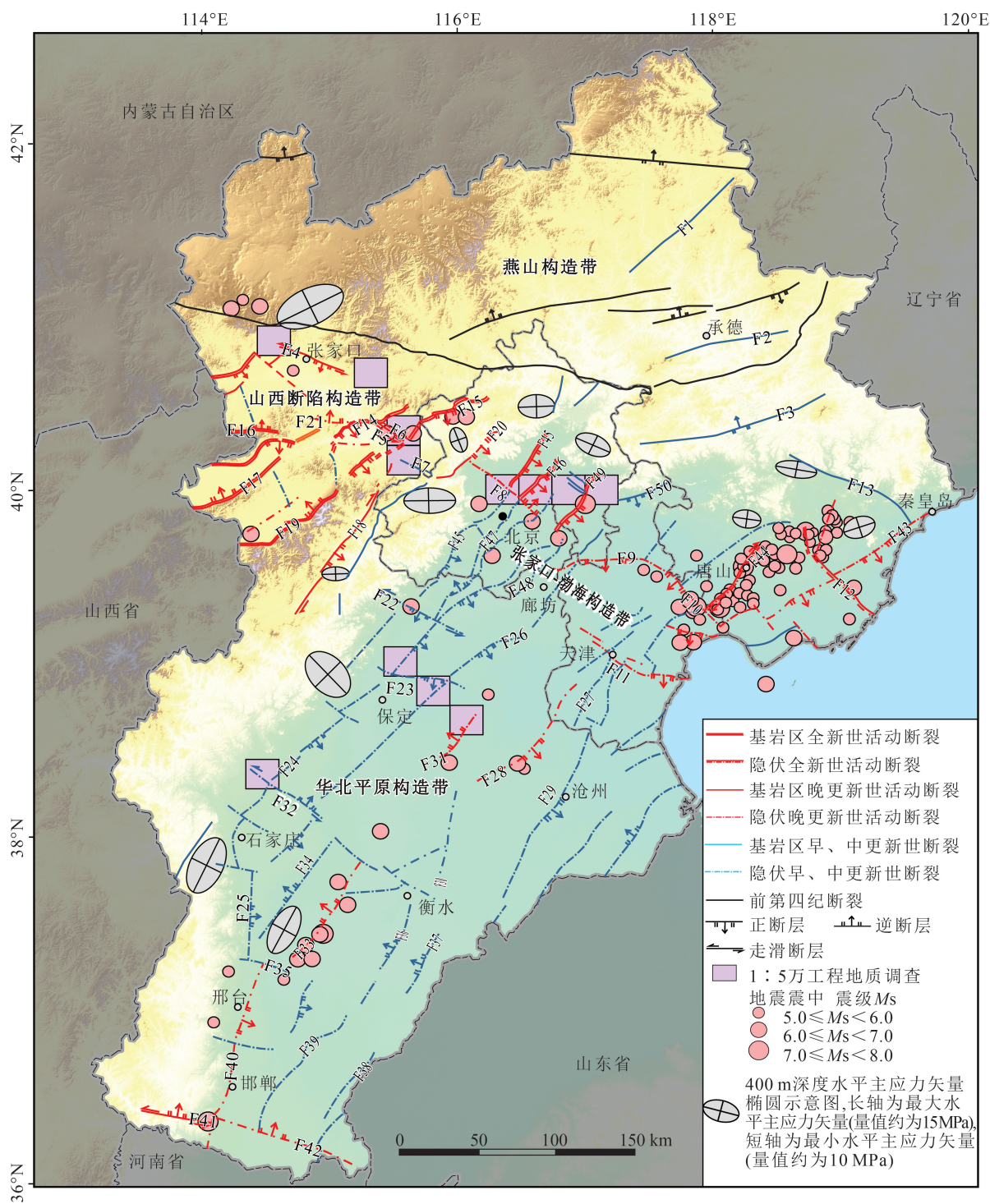


图 2 京津冀协同发展区主要断裂分布图

Fig. 2 Distribution map of main faults in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

如下。

1.2.1 燕山构造带

燕山构造带位于华北地块的北缘,晚古生代—中生代经历了多次构造变形,其中,早期的挤压构

造变形主要与华北地块北侧古亚洲洋的闭合相关,发生在晚二叠世—早三叠世;第二期强烈挤压变形即著名的“燕山运动”,发生在中侏罗世晚期,并发育广泛的岩浆活动,形成许多火山—沉积盆地^[25]。

早期构造线以近 EW 向为主,晚期以 NE—NEE 向为主,局部发育 NW 向构造(图 2),历史上无大震发生,现今中小地震亦很少发生。燕山构造带具有复杂的断裂格局,主要为近 EW 向、NE—NEE 向断裂,并发育少量 NW 向断裂^[26-27]。其中,第四纪断裂有大地—新地断裂、东河套—平泉断裂、兴隆—建平断裂等,且均为早、中更新世活动,晚更新世活动断裂不发育(表 1)。

1.2.2 张家口—渤海构造带

张家口—渤海构造带是中国著名的强震集中带,也是华北乃至中国东部地区一条重要的断裂构造带,以张家口张北县西为起点,经怀来、顺义、唐山等地,穿过渤海向南东延伸至烟台和蓬莱以北至黄海,全长约 700 km,整体呈 NW 向展布,构造带宽度较大,最大可达 190 km 左右(图 2)。构造带以 NW—NWW 向构造为主体,并与 NNE 向构造相交, NW 向构造常切割 NE 向构造。构造带分段性明显,由北西至南东可分为张北—怀来、南口—孙河、天津—塘沽、渤海中部和蓬莱烟台 5 个构造段。张家口—渤海构造带形成于中生代,在 NE—SW 向挤压构造应力场作用下, NW 向的张家口—渤海构造带表现为压扭性质,断裂活动性弱,但对其两侧的沉积与岩浆活动和构造发育具有一定的控制作用。新近纪以来,尤其是第四纪,区域构造应力场转变为 NEE 向挤压,该断裂表现为逆时针走滑剪切活动,切割 NE 向构造,且构造线贯通,形成一条规模宏大的控制华北断陷盆地北缘的区域性断裂构造带,也是中国著名的强震集中带^[30, 51-53]。张家口—渤海构造带内断裂主要以 NW—NWW 向正断—正断走滑活动为主、活动性强(表 1)^[29, 31-35]。

1.2.3 山西断陷构造带

山西断陷构造带位于华北地块中部,北邻内蒙古地块,南侧为秦岭褶皱构造带,西侧与稳定的鄂尔多斯地块相邻,东侧为华北平原构造带,是盆岭构造地貌典型发育地区^[10, 54](图 2)。山西断陷构造带包括渭河盆地、临汾盆地、太原盆地、忻定盆地和延怀盆地,走向 NE—NNE,以隆起相隔,断裂带总体具有顺时针剪切特征^[10]。山西断陷构造带形成于上新世初期,至上新世晚期奠定了现今构造格局,第四纪山西断陷构造带基本上继承了该构造格局,并持续断陷。晚更新世以来,盆地及其边缘地带地形差异持续发展,内部以河流相沉积为主,山

前广泛发育洪积扇^[10]。山西断陷构造带活动断裂发育、地震活动频繁,区内主要断裂以走向 NE—NNE 向为主,少数断裂走向近 EW 向,断裂以正断—正断走滑为主、活动性强(表 1)。

1.2.4 华北平原构造带

华北平原构造带分布在太行山东侧平原区,东侧为郯庐断裂营口—潍坊段,西侧为太行山山前断裂,北邻燕山构造带,南至新乡—兰聊断裂,主要由切割冀渤断块的一系列 NNE 向顺时针扭动张性断裂及少量 NE 向及近 EW 向断裂组成(图 2;表 1),断裂大多形成于始新世早期,切割至结晶基底^[3-4, 6-7, 55-57]。断裂相互切割、断陷,形成了不同规模的 NE—NNE 向拗陷和隆起,控制冀渤断块拗陷内各级构造单元,如黄骅拗陷主要受控于沧东断裂,冀中拗陷受保定—石家庄断裂控制,并形成 NNE 向邢台—河间—唐山和石家庄—通州活动断裂带。华北平原构造带是中国东部重要的地震活跃区,历史上发生过 M 6 级以上地震 18 次,地震主要集中在 NNE 向邢台—河间—唐山和石家庄—通州活动断裂带及其与 NWW 向张家口—渤海活动断裂带的交汇地段^[2, 13, 58],如邢台 M 7.2 级地震(1966 年 3 月 22 日)—河间 M 6.3 级地震(1967 年 3 月 27 日)—唐山 M 7.8 级地震(1976 年 7 月 28 日)、三河马坊 M 8.0 级地震(1979 年 9 月 2 日)等。

综上所述,京津冀协同发展区 NNE 向活动断裂带主要沿华北平原构造带的邢台—河间—唐山和石家庄—通州活动构造带展布,分布广、规模大、活动幅度大,总体表现为顺时针扭动正断活动,倾向 SE,对京津冀协同发展区新生代主要构造单元和地震分布具有明显的制约作用;NWW 向活动断裂带主要沿张家口—渤海活动构造带展布,构成华北活动地块的北边界,晚更新世以来具有明显的活动性,总体表现为反时针扭动正断活动,倾向 SW,对近代的地震活动具有明显的控制作用,特别是 20 世纪 90 年代以来发生的地震主要分布在该活动构造带与其他活动构造带交汇处或附近。综合研究表明,京津冀协同发展区发育第四纪断裂 23 条,晚更新世活动断裂 16 条,全新世活动断裂 11 条;京津冀协同发展区主要活动断裂带对区域性地裂缝、地面差异沉降等地质灾害具有控制作用^[13, 19]。

2 现今构造应力场特征

通过京津冀协同发展区关键构造部位主要活动

表 1 京津冀协同发展区主要第四纪活动断裂特征

Table 1 Summary of Quaternary fault features in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

构造带名称	编号	断裂名称	长度/km	走向	倾向	倾角/°	断层性质	活动时代	参考文献
燕山构造带	F1	大地-新地断裂	80	NE	SE	45~80	正断	Qp ₁	[28]
	F2	东河套-平泉断裂	80	NE—近 EW	S	50~70	正/逆断	Qp ₁	[28]
	F3	兴隆-建平断裂	240	NE—NEE	NW	65	逆断	Qp ₁₋₂	[28]
张家口-渤海构造带	F4	张家口断裂	70	NW—NWW	S/N	45~70	正断走滑	Qp ₃	[13,29]
	F5	新保安-沙城断裂	86	NWW	SW/NE	50~75	正断走滑	Qh	[13,30]
	F6	黄土窑-土木断裂	21	NW	SW	60~90	正断	Qp ₃	[13,31-32]
	F7	施庄断裂	20	NW	NE	60~80	正断走滑	Qp ₃	[32]
	F8	南口-孙河断裂	85	NW	SW/NE	70~80	正断	Qh	[30-32]
	F9	宝坻断裂	60	近 EW	S	35~60	正断	Qp ₃	[33]
	F10	蓟运河断裂	60	NW	SW	70	正断	Qp ₃	[28]
	F11	海河断裂	110	NW—NWW	SW	60~70	正断	Qp ₃	[34]
	F12	滦县-乐亭断裂	90	NNW	NE/SW	35~50	正/逆断	Qh	[35]
	F13	建昌营断裂	110	NW	S/N	50~65	正断	Qp ₁₋₂	[28]
山西断陷构造带	F14	怀涿盆地北缘断裂	58	NE	SE	50~75	正断走滑	Qh	[32]
	F15	延矾盆地北缘断裂	102	NE	SE	50~80	正断走滑	Qh	[13,17,29,32]
	F16	怀安盆地南缘断裂	41	近 EW	N	70~75	正断	Qp ₃	[13,29]
	F17	阳原盆地北缘断裂	76	NE—NEE	SE	60~70	正断	Qp ₃	[13,29]
	F18	孙庄子-乌龙沟断裂	115	NE—NNE	SE	60~80	正断走滑	Qp ₃	[13,29]
	F19	蔚广盆地南缘断裂	112	NE	NW	50~70	正断走滑	Qh	[13,29]
	F20	南口山前断裂	61	NE	SE	50~80	正断	Qp ₃	[30,32]
	F21	宣化盆地南缘断裂	15	近 EW	N	50~60	正断	Qp ₃	[13,30]
华北平原构造带	F22	涞水断裂	55	NW	SW	70	逆断	Qp ₁	[13,21]
	F23	徐水-大城断裂	30	近 EW	S	60	正断	Qp ₁₋₂	[13,21]
	F24	保定-石家庄断裂	160	NE	SE	20~40	正断	Qp ₂	[13,21]
	F25	元氏断裂	56	近 SN	E	45	正断	Qp ₁₋₂	[28]
	F26	牛驼镇凸起东缘断裂	70	NEE—NE	SE	50	正断	Qp ₁₋₂	[28]
	F27	天津断裂	85	NE	NW/SE	30~40	正断	Qp ₂	[36]
	F28	大城东断裂	75	NNE	SE	50	正断	Qp ₃	[37]
	F29	沧东断裂	350	NE	SE	20~70	正断	Qp ₁₋₂	[38]
	F30	沧西断裂	80	NNE	NW	50~60	正断	Qp ₁	[28]
	F31	河间断裂	23	NNE	W	30~60	正断	Qp ₃	[28]
	F32	无极-衡水断裂	160	NW	NE		正断走滑	Qp ₁₋₂	[28]
	F33	新河断裂	77	NNE	NW	25~55	正断	Qp ₃	[28]
	F34	晋县断裂	80	NE	NW	30~40	正断	Qp ₁₋₂	[28]
	F35	隆尧断裂	35	近 EW	S	60	正断	Qp ₁₋₂	[28]
	F36	明化镇断裂	60	NE	NWW	30~60	正断	Qp ₁₋₂	[28]
	F37	武城断裂	45	NE	NW	30~40	正断	Qp ₂	[28]
	F38	馆陶断裂	70	NE	NW	40	正断	Qp ₂	[28]

续表 1

构造带名称	编号	断裂名称	长度/km	走向	倾向	倾角/°	断层性质	活动时代	参考文献
华北平原构造带	F39	广宗断裂	35	NE	SE	40	正断	Qp ₁₋₂	[28]
	F40	邯郸断裂	150	NNE	E	40~60	正断	Qp ₁₋₂	[39]
	F41	磁县断裂	50	NWW	N	70~80	正断走滑	Qh	[40]
	F42	临漳-大名断裂	90	NWW	N	50~60	正断	Qp ₃	[41]
	F43	宁河-昌黎断裂	170	NE	SE	35~50	正断	Qp ₃	[42]
	F44	唐山断裂带	63	NE	NW	50~80	正断走滑	Qh	[28,43]
	F45	黄庄-高丽营断裂	132	NNE	SE	50~75	正断走滑	Qh	[6,32,44]
	F46	顺义-良乡断裂	135	NNE	NW	60~80	正断	Qh	[19,45-48]
	F47	南苑-通县断裂	105	NE	NW	50~75	正断	Qp ₁₋₂	[6,32]
	F48	大兴凸起东缘断裂	92	NE	SE	50~80	正断	Qp ₁₋₂	[49]
	F49	新夏垫断裂	20	NE	SE	70~80	正断走滑	Qh	[32,50-51]
	F50	蓟县山前断裂	50	NEE	SSE	70	正断	Qp ₁₋₂	[28]

注:Qp₁—早更新世;Qp₂—中更新世;Qp₃—晚更新世;Qh—全新世

断裂深孔地应力测量与实时监测,揭示地壳浅层现今的构造应力场环境,分析主要活动断裂运动学和动力学特征,探索区域性地裂缝、地面差异沉降等重大工程地质问题发生的内动力背景。

2.1 区域现今构造应力场动力背景

太平洋板块、菲律宾海板块和印度洋板块对中国大陆与邻近地区挤压作用方向分别为 NWW 向、NW 向和 NNE 向^[59]。在以上板块相互作用下,现今 GPS 观测资料揭示了中国大陆及邻区大尺度的地壳水平运动状态,主要表现为:在全球参考框架中,太平洋板块向 NWW 移动,速度为 70 mm/a;菲律宾板块向 NW 移动,速度为 50 mm/a;而欧亚大陆东部向 SE 移动,速度为 30 mm/a^[60]。

由于印度板块由南向北的推挤作用,华北地块西边界主要受 NEE 向构造挤压的影响,而太平洋板块西向俯冲作用可能对华北地块东移具有制约性,导致燕山构造带挤压构造活动强烈,华北平原构造区差异性运动明显,山西断陷构造带主要表现为张性顺时针扭动运动特征。

京津冀协同发展区地处华北地块中东部位置,现代构造应力场主要受控于太平洋板块向欧亚大陆的俯冲挤压作用,挤压方向总体表现为 NEE 向,与相邻板块的俯冲方向基本一致^[5,61-63]。

2.2 关键构造部位深孔地应力测量与监测和现今构造应力场特征

2008 年汶川 8.0 级地震发生后,为了揭示首都圈地区关键构造部位现今地应力状态、评价主要活动断裂现今运动学和动力学特征及其构造稳定状态,基于构造应力场的研究思路,综合考虑活动断裂、历史地震、构造地貌、岩体力学性质、刚性特征等因素^[64],在京津冀 12 个关键构造部位完成了深孔(600~1000 m)地应力测量与实时监测台站建设(图 2)。

依据地应力测量与应力应变实时监测结果,初步揭示了其现今地应力大小和方向及主要活动断层的运动学和动力学特征(图 2)。冀北和冀东南地区现今地应力测点最大水平主应力方向多为近 EW 向,个别测点受局部断裂构造等影响出现 NW 向(如十三陵),而太行山东缘现今地应力测点最大水平主应力作用方向为 NNE 向和 NW 向,与其所在部位的现今断裂构造活动背景有关。华北地区区域现今构造应力场总体上受控于太平洋板块对欧亚板块的俯冲作用,其最大水平主应力作用优势方向应为 NEE 向或近 EW 向,但由于华北地区构造格架复杂、块体众多(图 1、图 2),不同构造部位的地应力测量结果受局部构造影响显著。京津冀协同

发展区邢台-河间-唐山和石家庄-通州 NNE 向活动构造带主要活动断裂总体表现为顺时针扭动正断活动,张家口-渤海 NW 向活动构造带主要活动断裂总体表现为逆时针扭动正断活动的运动学和动力学机制。

京津冀协同发展区主要活动构造带和关键构造部位深孔地应力测量与实时监测研究表明,主要活动断裂现今活动强度不存在粘滑失稳风险,现今构造活动背景总体处于稳定安全状态,但不同构造部位存在明显差异,需重点关注张北、石家庄、迁安和雄安新区 4 个关键构造部位。张北地区最大、最小水平主应力随深度增加梯度分别为 7.06 MPa/100 m 和 3.84 MPa/100 m,均大于华北地区 (2.33 MPa/100 m 和 1.62 MPa/100 m) 及中国大陆 (2.27 MPa/100 m 和 1.64 MPa/100 m) 平均值,虽然张北地区 1998 年 1 月 10 日发生了 6.2 级强震,但其区域断层活动强度的应力积累系数 $\mu_m((S_{max}-S_{min})/(S_{max}+S_{min}))$ 平均值为 0.42,区域断层活动强度仍处于较高应力积累水平,2022 年崇礼冬奥会场区即在其附近,冬奥会场区地质安全评判需要地应力监测数据支撑;石家庄地区深孔地应力测量表明,其最大、最小水平主应力值梯度分别为 4.10 MPa/100 m 和 2.35 MPa/100 m,均大于华北地区及中国大陆平均值,且 μ_m 平均值为 0.42,区域断层活动强度处于较高应力积累水平,需依据地应力实时监测结果动态评价该地区的活动断层滑动失稳风险;迁安地区最大、最小水平主应力值随深度增加梯度分别为 3.37 MPa/100 m 和 1.15 MPa/100 m,其中最大水平主应力梯度大于华北地区及中国大陆平均值,其 μ_m 平均值为 0.41,区域断层活动强度处于较高应力积累水平,并且该地区最大水平剪应力即最大、最小水平主应力差值较大,容易导致断层发生剪切滑动,需依据地应力实时监测结果动态评价该地区的活动断层滑动失稳风险;雄安新区最大、最小水平主应力值随深度增加梯度分别为 2.52 MPa/100 m 和 1.64 MPa/100 m,均大于华北地区及中国大陆平均值,其 μ_m 平均值为 0.40,区域断层活动强度处于较高应力积累水平。虽然现今地应力测量结果计算分析表明,雄安新区徐水-大城、石家庄-保定及牛驼镇凸起东缘 3 条主要隐伏基岩断裂均不存在滑动失稳风险,但需关注地应力实时监测变化趋势,评价 3 条主要隐伏基岩断裂在大规模地热开发过程

中的滑动失稳风险。

3 区域工程地质特征

影响区域工程地质特征的因素包括区域工程地质岩组、水文地质条件、地形地貌、人类工程活动等,本文主要进行近地表区域工程地质岩组分析。京津冀协同发展区地层岩性复杂,地表出露火山岩、沉积岩、变质岩、侵入岩等^[65],依据岩石强度、抗风化能力、岩体结构、岩层厚度、岩体完整性等因素,京津冀地区岩组可分为 4 个工程地质岩组(图 3)。

(1) 坚硬岩组。主要为花岗岩、闪长岩、玄武岩、火山角砾岩、煌斑岩、变粒岩等。岩体坚硬耐风化,表面呈未风化—微风化状,完整性好,呈整体状或块状,岩石强度高,岩体条件好。

(2) 次坚硬岩组。主要为中薄层状火山熔岩、火山碎屑岩、大理岩、石英岩、白云岩、白云质灰岩、长石石英砂岩、砂岩等。岩体次坚硬、较耐风化,节理裂隙较发育,表层呈微风化—中等风化,呈中薄层状结构,总体较完整,岩体条件较好。

(3) 软弱岩组。主要包括浅变质的板岩、片岩、千枚岩等。岩体次软弱,节理裂隙发育,中等风化,层状—碎裂状结构,完整性差,岩体条件较差。

(4) 松散岩组。包括风成堆积层、湖积层、海积层和洪积层。风成堆积层主要为砂层,结构松散,孔隙率大,透水性强,压缩性较低,砂土体强度较差;湖积层与海积层主要为粘性土,稍湿、可塑、压缩性较高,土体强度差;冲洪积层主要为冲洪积相卵砾石、砂砾石、砂、砂质粘土等,粘性土土体呈稍湿、可塑、压缩性较高、强度差,而砂性土结构松散、孔隙率大、透水性强、压缩性较低,砂土体强度较差。

4 地质灾害发育特征

经野外地质调查分析^[66-69]及中国地质环境监测院地质灾害数据库已有资料的收集整理,共查明京津冀协同发展区突发性地质灾害及隐患点 3963 处,其中崩塌 978 处、滑坡 868 处、不稳定斜坡 133 处、泥石流 1974 处(图 4)。京津冀协同发展区内地质灾害以泥石流为主,规模以小型和中型为主。崩塌、泥石流、滑坡突发性地质灾害的高易发区主要分布在北京西部山区、河北西部和北部;地面塌陷的高易发区主要分布在河北邯郸邢台西部及北京

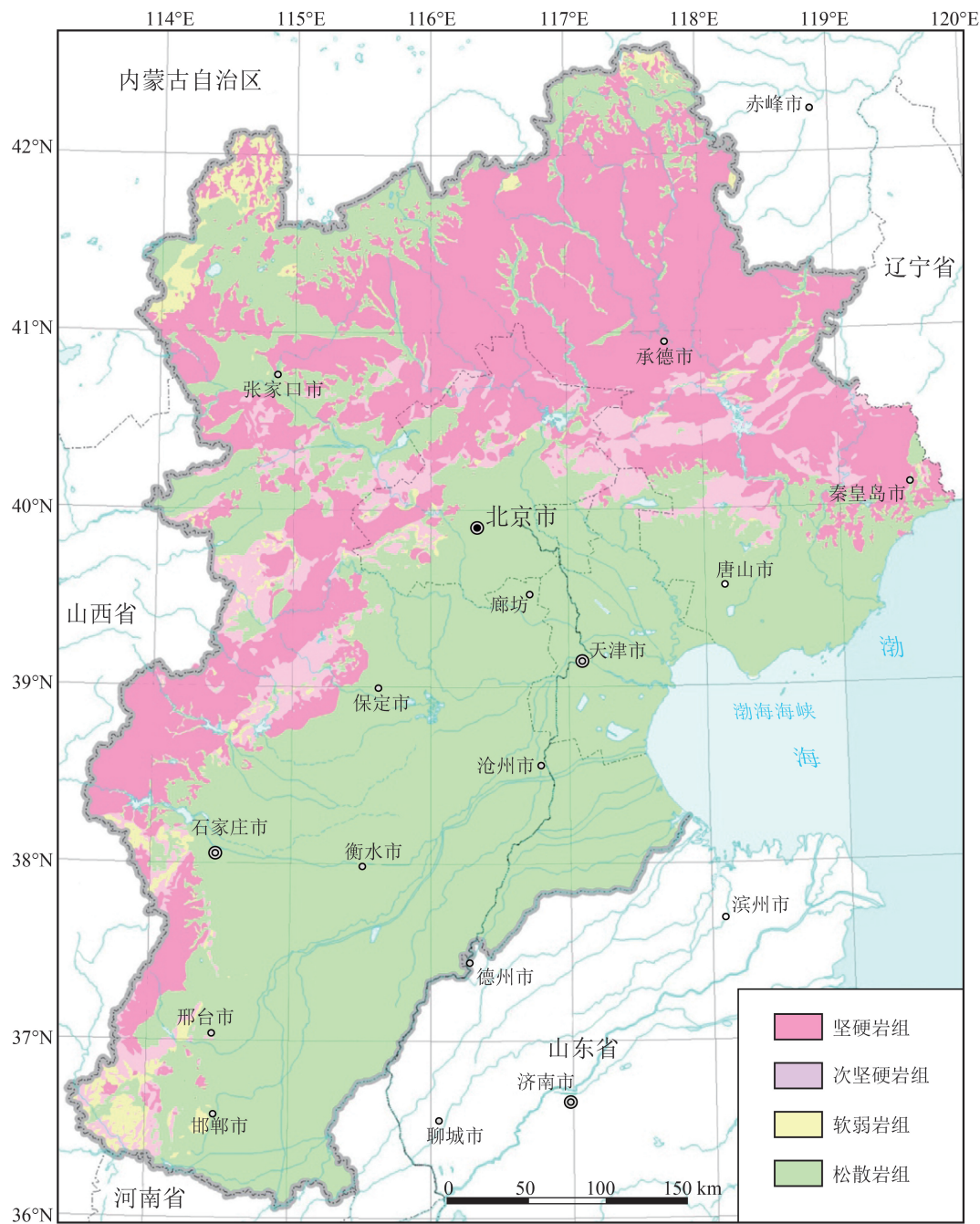


图3 京津冀协同发展区工程地质岩组划分

Fig. 3 Division of engineering geology rock group in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

门头沟地区。

京津冀平原是中国地面沉降范围最广、发展速度最快、危害最严重的地区。京津冀平原地面沉降最早发生在20世纪20年代的天津市区;自20世纪80年代以来,地面沉降从点到面,从城市到农村,在地下水严重过量开采的地区逐渐发展。目前,在 8.84×10^4 km²的平原地区,年沉降速率大于50 mm/a的严重沉

降区面积逐年增加,2014年达到 1.03×10^4 km²,累计沉降200 mm以上地区面积为 6.3×10^4 km²(图4)。

京津冀协同发展区发育72条长度大于1 km的地裂缝,其中北京10条,河北62条(图4)。北京平原的顺义、昌平、怀柔、平谷、通州等,河北平原区的石家庄、保定、沧州、廊坊、衡水、邢台、邯郸等地区是京津冀协同发展区地裂缝分布的主要区域,总体

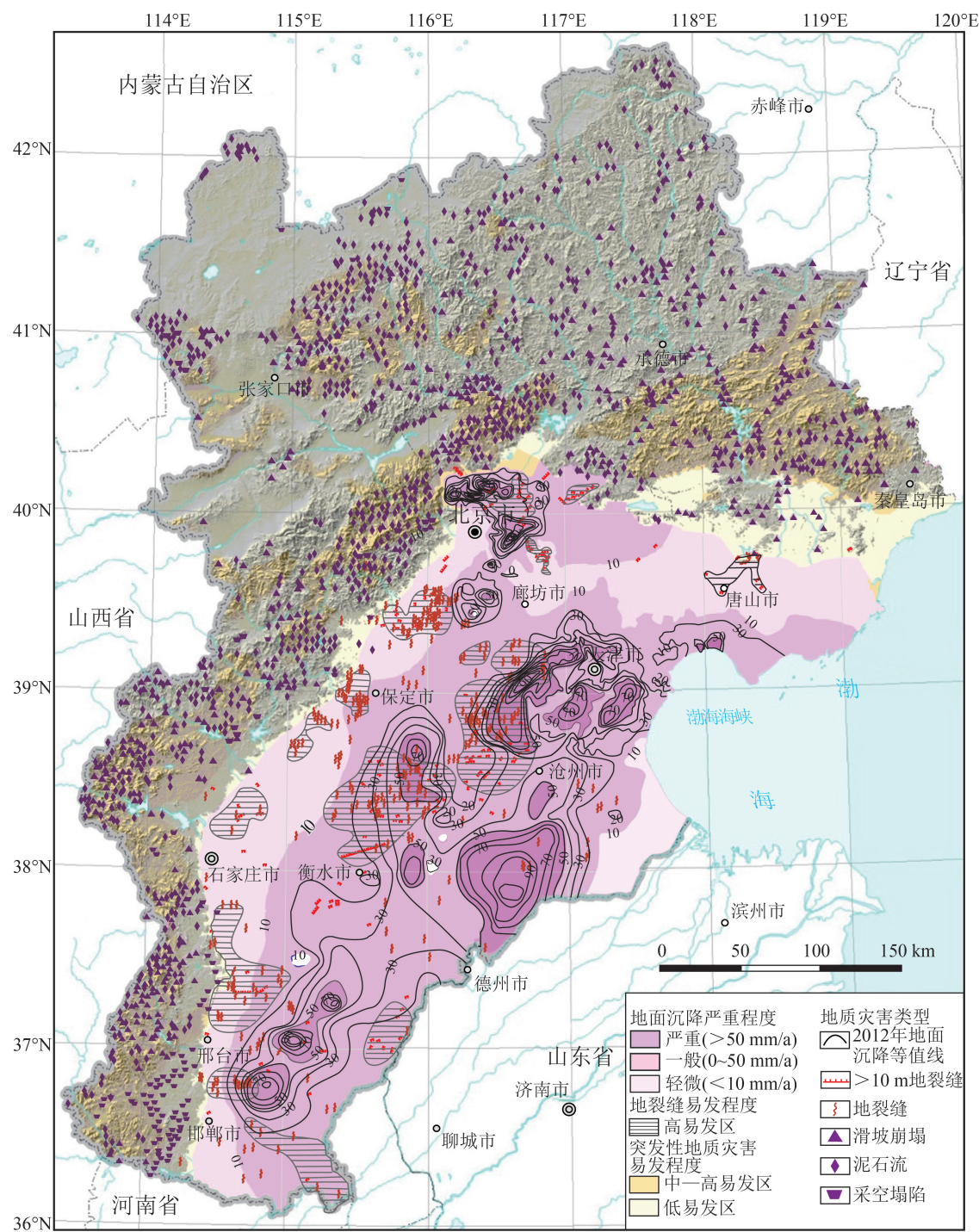


图 4 京津冀协同发展区地质灾害分布与易发程度分区

Fig. 4 Geohazards distribution and its susceptibility zonation in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

上地裂缝发育呈增长趋势。

5 区域地壳稳定性评价

区域地壳稳定性指地壳及其表面在内外动力(主要是内部动力)作用下现今地壳及其表层的相

对稳定程度,以及其与工程建设之间的相互作用和影响;主要对构造、岩土体和地面稳定性进行研究和评价。区域地壳稳定性评价以构造稳定性为重点,岩土体稳定性为介质条件,同时包括地面稳定性评价,地面稳定性即外动力地质灾害影响^[70]。

区域地壳稳定性评价是中国在工程地质实践过程中发展而成的独特区域工程地质研究理论和方法,在重大工程选址、国土资源规划、减灾防灾等方面发挥了积极的作用。根据相关规范^[71]和现有研究成果^[70, 72-85],本文采用构造、岩土体和地面地质灾害综合评价方法,同时考虑单因素“一票否决制”确定地壳稳定性评价等级,属于小比例尺(1:100 万~1:50 万)区域地壳稳定性评价,技术路线如图 5 所示。该研究结果可用于重要城镇和重大项目的宏观规划。

在京津冀协同发展区构造地质背景与新构造活动特征、活动构造特征、现今构造应力场特征、工程地质特征、地质灾害发育特征等调查、分析和综合研究的基础上,分析京津冀协同发展区地壳稳定性影响因素,厘定评价方法与评价指标和权重,初步完成京津冀协同发展区地壳稳定性评价。

5.1 京津冀协同发展区地壳稳定性影响因素分析

5.1.1 构造稳定性分析

(1) 深部地球物理特征

京津冀协同发展区的布格重力异常呈东高西

低的特征,其中,渤海地区的布格重力异常最高,向西部逐渐减小。重力场总体走向 NE。北京及太行山东缘位于 NNE 向大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带内。东侧平原区在负异常背景基础上出现高、低异常相间排列现象,高异常对应内部隐伏断陷盆地,低异常对应隐伏隆起^[13](图 6-a)。重力梯度带反映,次级块体间或不同新构造单元之间在一定规模的边界断裂。总的来说,重力异常的这种趋势变化反映华北地壳厚度由东向西逐渐增厚,具有明显的分区特点。

(2) 活动断裂特征

京津冀协同发展区在古近纪发育众多的断陷盆地,形成了典型的盆岭构造;新近纪以来,在古近纪盆岭构造上叠加发育了一个统一的大型拗陷盆地。并在水平挤压为主的 NEE 向构造应力场作用下发育邢台-河间-唐山和通州-石家庄 NNE 向活动断裂带、张家口-渤海 NW 向活动断裂带,相应地形成了 NNE 向磁县-邢台-河间-唐山地震构造带、NE 向三河-涿水-灵寿地震构造带及 NW 向

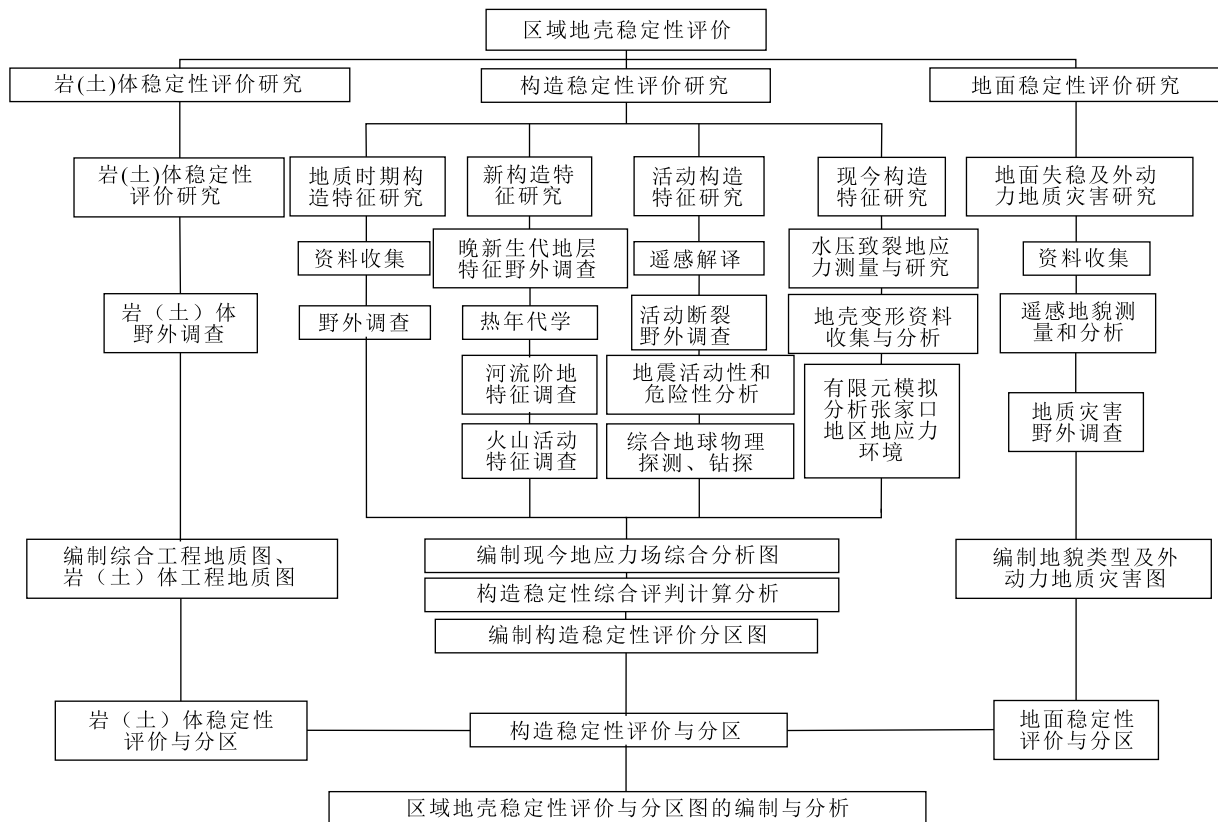


图 5 京津冀协同发展区地壳稳定性评价技术路线

Fig. 5 Technology routine for crustal stability assessment in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

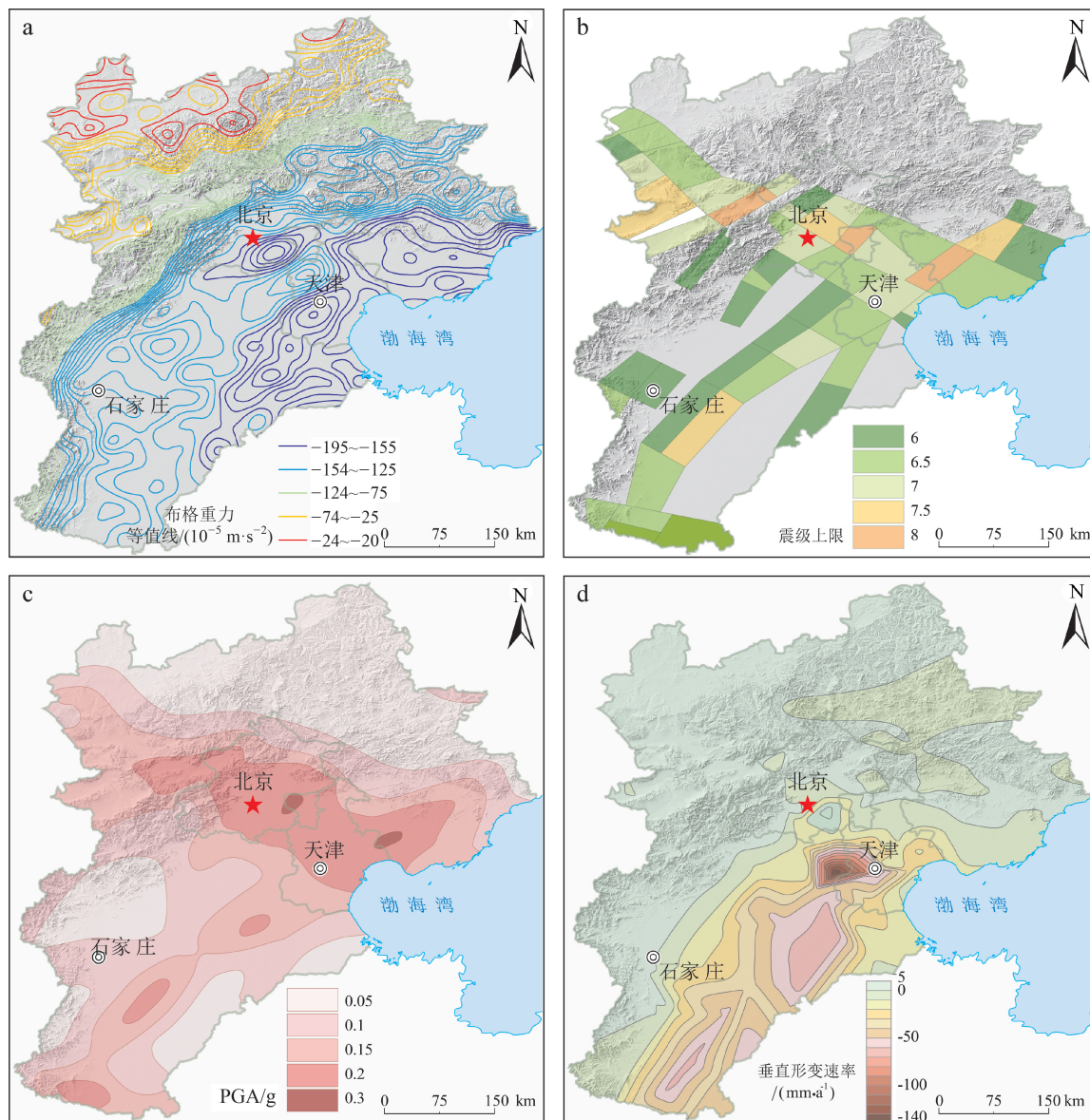
张家口-渤海地震构造带(图 2)。NNE 向断裂规模较大,延伸长度长,NWW 向断裂分布不连续,多呈雁行排列。地貌上,NWW 向活动断裂与 NNE 向活动断裂共同构成分割该区山脉、盆地的地貌边界(图 2)。

(3) 地震活动特征

区内地震活动频繁、震级较大,现今小震活跃,据历史记载和仪器记录:自公元前 231 年以来,京津冀协同发展区发生了 709 次 $M_s \geq 3.0$ 地震,其中 1970—2013 年发生 $7 \leq M_s < 8.0$ 级地震 10 次, $6 \leq M_s < 7.0$ 级地震 18 次。地震分布与 NNE 向和 NW 向断裂关系密切。唐山-河间-邢台断裂带发生 6.0 级以上地震 17 次,其中 $7.0 \leq M_s < 8.0$ 级地震 4 次,以

1976 年唐山 7.8 级地震最大。张家口-渤海断裂带共发生 $M \geq 6.0$ 级地震 22 次,其中 8 级地震 1 次, $7.0 \leq M_s < 8.0$ 级地震 6 次, $6.0 \leq M_s < 7.0$ 级地震 15 次。1990—2013 年发生的 3.0 级以上地震主要分布在张家口-渤海活动构造带和唐山-河间-邢台活动构造带上^[13]。

根据中国最新的全国地震区划图^[86-87],依据京津冀协同发展区地震发育状态,共划分出 52 个潜在震源区(图 6-b)。其中,震级上限 $M_s 7.5$ 级以上的高危险潜在震源区 10 个,震级上限 $M_s 7.0$ 级以上的中等风险潜在震源区 11 个,震级上限 $M_s 6.5$ 级以上的低风险潜在震源区 19 个,其他区域地震灾害发生概率小。



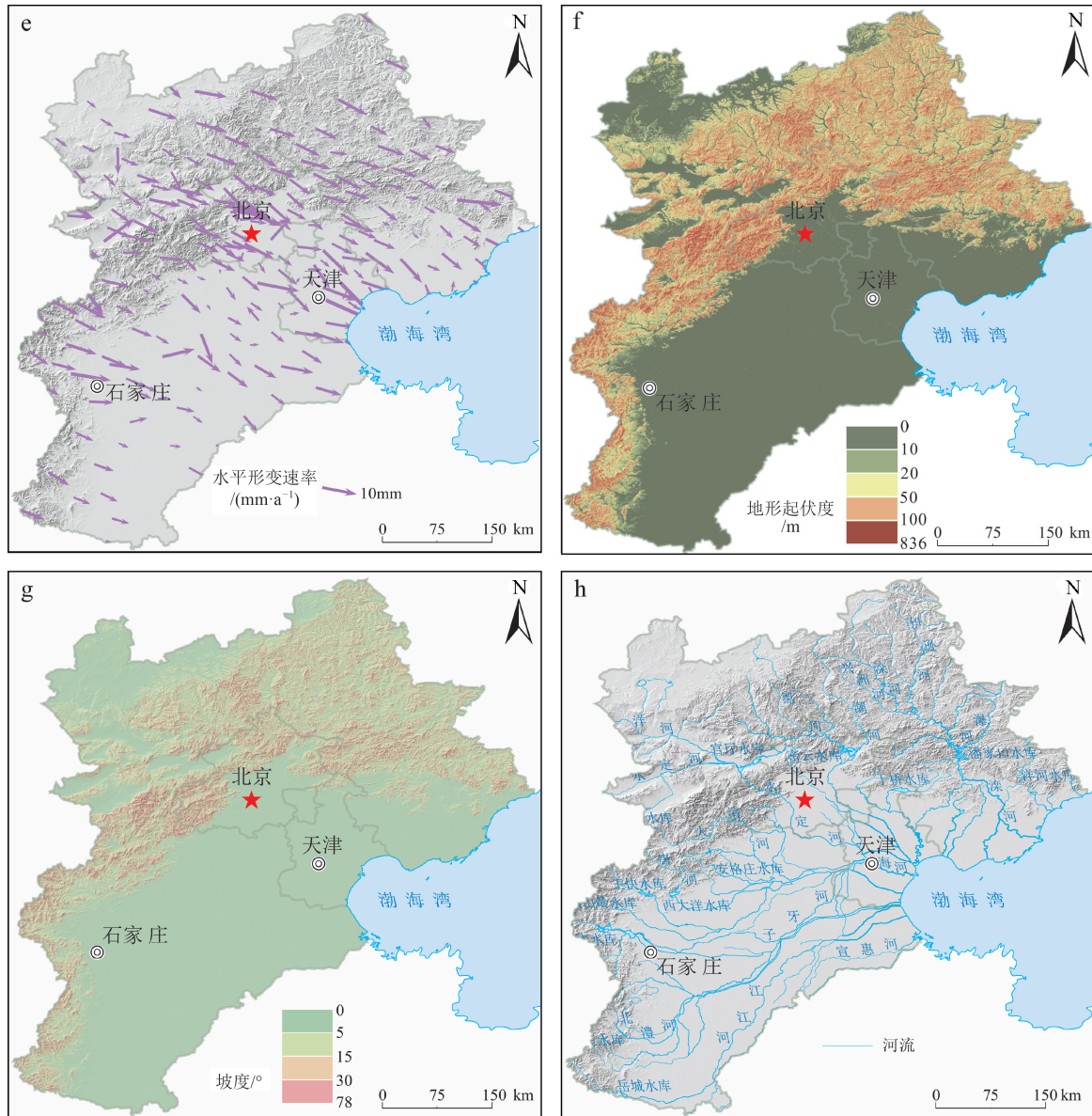


图6 京津冀协同发展区地壳稳定性评价要素

Fig. 6 Factors for crustal stability assessment in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

a—布格重力异常;b—潜在震源区;c—地震动峰值加速度;d—垂直形变;e—水平形变;f—地形起伏度;g—斜坡坡度;h—河流

未来地震基本烈度受控于地震动峰值加速度,依据中国地震动峰值加速度区划图(GB 18306—2015(1:400万))^[88],京津冀协同发展区在50年内超越概率10%的地震动峰值加速度(PGA)(图6-c)。京津冀协同发展区PGA介于0.05~0.30g之间,最大地震动峰值加速度区主要位于唐山和三河附近,宜重点设防(图6-f)。

(4) 区域地壳变形特征

京津冀地区地壳垂直形变具有2个显著特点:

①整个华北坳陷相对于周围山区继续下沉,与新构造活动的趋势一致;②形变等值线与形变趋势图等值线的延伸方向均为NNE向,且沉降幅度自西向东有逐渐增大的趋势^[89](图6-d)。上述2个特点反映了NNE向断裂活动对现今地壳运动仍起主要的控制作用。同时,京、津、唐山地区沿燕山南麓NW向的现代沉降区分布与第四纪凹陷区具有一致性,典型的沙河—通县一带沉降区的长轴方向为NW向,反映NW向构造现今具有继承性活动

特征。

1999—2007 年的地壳水平运动速率表明, 京津冀地区地壳水平变形差异明显, 自北向南水平速度由 4 mm/a 逐渐增大到 9 mm/a, 反映了阴山燕山块体与晋冀鲁块体运动的差异性, 并表现为张家口—渤海构造带的东北部地壳水平变形较小, 而西南地区的地壳水平变形明显, 同时表明 NW 向张家口—渤海活动断裂现今具有明显的逆时针扭动走滑的特征^[90-92] (图 6-e)。京津冀地区现代地壳形变同时受 NNE 向和 NW 向 2 组活动断裂带的影响。

(5) 现今构造应力场特征

运用 ANSYS 有限元数值模拟软件, 依据京津冀协同发展区地壳结构、岩石圈动力学特征、活动构造及岩土体工程地质特征, 建立三维地质模型^[93], 并基于室内岩石力学实验及深孔地应力测量数据, 合理确定地质模型中的介质物理力学参数, 最终获取京津冀地区地壳不同深度 (0 km、-2 km、-10 km、-20 km、-30 km、-40 km) 应力场分布特征 (图 7)。研究成果为京津冀协同发展区地壳稳定性分析中构造稳定性分析提供了重要量化数据。

5.1.2 岩土体稳定性分析

区域工程地质岩组对岩土体稳定性影响最大, 同时工程活动、水文地质条件和地形地貌也有不同程度的影响。以岩土体岩相特征、风化程度及构造破碎程度为依据, 可分为 4 个工程地质岩组 (图 3), 相应指标选取和划分主要依据相关规范^[71], 并分别对应岩土体稳定性的稳定、次稳定、次不稳定和不稳定 4 个级别。

5.1.3 地面稳定性分析

京津冀协同发展区地质灾害特征总体表现为基岩山区以滑坡、崩塌和泥石流为主 (图 4), 主要受控于地形高差、斜坡坡度、河流侵蚀等因素 (图 6-f、g、h), 而平原区以地裂缝、地面沉降和地面塌陷为主 (图 4), 主要受控于隐伏活动断裂 (图 2)、地下水开采等因素。地面稳定性 4 个级别相应指标选取和划分主要依据相关规范^[71], 并分别对应地质灾害易发性评价的不易发区、低易发区、中易发区和高易发区。

5.2 区域地壳稳定性评价方法与评价指标和权重厘定

5.2.1 评价方法

地壳块体现今相对稳定程度, 即区域地壳稳定

性, 可以采取多种方法进行评价。本文基于 ArcGIS 平台的空間分析功能, 采用多因子加权叠加法进行区域地壳稳定性评价。

5.2.2 评价指标和权重厘定

依据京津冀协同发展区构造地质背景, 在地壳稳定性定性影响因素定性分析的基础上, 参考相关规范^[71]和现有研究成果^[70, 72-85], 取深部地球物理场 (f_1)、地震 (f_2)、地震峰值加速度 (f_3)、地壳变形 (f_4)、断裂带稳定性 (f_5)、现代构造应力场 (f_6)、岩土体结构及特征 (f_7)、地质灾害条件 (f_8) 8 个评价指标, 确定其评价标准, 进行定量分析计算 (表 2)。

关于评价指标权重的厘定, 主要考虑 4 个方面: ①依据京津冀协同发展区上述 8 个评价指标对区域地壳稳定性的影响程度; ②考虑评价指标数据获取的方式及其准确性和精度; ③部分评价指标存在空间上的叠加作用, 应适当减小相应指标的权重, 例如潜在震源带和活动断裂影响带往往出现重叠, 故应适度降低二者权重; ④根据评价结果与实际工程场地稳定性现状对比分析, 适当调整权重大小。评价指标对区域地壳稳定性影响程度分为大、中 2 个等级, 而评价指标数据的准确性和精度分为高、中、低 3 个等级。评价指标权重的确定性分析结果如表 3 所示。

5.3 京津冀协同发展区地壳稳定性评价分区

基于 ArcGIS 平台的空間分析功能, 为达到 1:50 万精度, 可取栅格大小为 500 m×500 m 进行计算。区域地壳稳定性评价依据表 2 评价指标及其标准与表 3 评价指标权重进行多因素加权叠加定量计算, 评价结果如图 8 所示。

京津冀协同发展区地壳稳定性量化评价结果表明, 稳定地区、次稳定地区、次不稳定地区和不稳定地区的面积分别为 86937.5 km²、84617.75 km²、33701 km²和 9986.75 km², 在总面积中所占的比例分别为 40.39%、39.31%、15.66% 和 4.64%。稳定区及次稳定区主要分布在区域北部及西部坚硬基岩山区与平原区活动断裂带围限的地块, 距离断裂带较远, 地貌主要为平原或高原、盆地和基岩山区, 工程地质条件较好, 崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝等地质灾害较少, 为工程建设条件较好的地区, 在采取少量工程措施后适宜进行工程建设。不稳定区和次不稳定区主要分布在断裂带和地形陡变带,

表2 京津冀协同发展区地壳稳定性评价指标及其分级标准

Table 2 Factors and its grading standards for crustal stability evaluation in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

因素类型	编号	指标	评价标准	稳定级别			
				稳定	次稳定	次不稳定	不稳定
构造稳定性	f_1	深部地球物理	重力异常梯度 BGA $\wedge/(10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/2\text{km}^2)$	$\text{BGA}\leq 1.5$	$1.5<\text{BGA}\leq 2.5$	$2.5<\text{BGA}\leq 3.5$	$\text{BGA}>3.5$
	f_2	地震	潜在震源区震级上限/ M_s	$M_s<5$	$5\leq M_s<6$	$6\leq M_s<7$	$M_s\geq 7$
	f_3	地震动峰值加速度	地震动峰值加速 PGA/ g	$\text{PGA}\leq 0.05$	0.10~0.15	0.20	$\text{PGA}\geq 0.30$
	f_4	现今地壳变形	垂直变形梯度 V $\wedge/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}/16\text{km}^2)$	$0<V\leq 0.15$	$0.15<V\leq 0.30$	$0.30<V\leq 0.45$	$V>0.45$
			水平变形速率 H $\wedge/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	$2.0<H\leq 2.5$	$2.5<H\leq 3.0$	$3.0<H\leq 3.5$	$H>3.5$
	f_5	断裂带稳定性	活动时代	Pre-Q	Q P_1	Q P_2	Q P_3 -Q h
			断裂切割深度	盖层断裂、基底断裂	基底断裂、地壳断裂	地壳断裂	岩石圈断裂
岩土体稳定性	f_5	断裂带稳定性	活动速率 $\nu/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	$\nu<0.5$	$0.5\leq \nu<2.0$	$2.0\leq \nu<5.0$	$V\geq 5.0$
			岩体破裂危险度 R	$R<0.5$	$0.5\leq R<0.7$	$0.7\leq R<0.9$	$0.9\leq R\leq 1.0$
	f_6	现代构造应力场	岩体破裂危险度 R	$R<0.5$	$0.5\leq R<0.7$	$0.7\leq R<0.9$	$0.9\leq R\leq 1.0$
地面稳定性	f_7	岩土体结构及特征	岩土体工程地质岩组	坚硬块状侵入岩组、坚硬厚层块状变质岩、坚硬块状火山岩岩组、坚硬中厚碳酸盐岩组	次坚硬火山岩组、次坚硬碳酸盐岩组、次坚硬碎屑岩组	次软弱碎屑岩组	软质碎屑岩组
			地质灾害点密度 $d/(\text{处}\cdot\text{km}^{-2})$	<0.03	$0.03\leq d<0.09$	$0.09\leq d<0.18$	$d\geq 0.18$
			斜坡坡度 $\alpha/^\circ$	$\alpha\leq 5$	$5<\alpha\leq 15$	$15<\alpha\leq 25$	$\alpha>25$
			斜坡高差 $h(\text{m}\cdot 10^{-4}\text{m}^2)$	$h\leq 10$	$10<h\leq 22$	$22<h\leq 38$	$h>38$
			年均降水量 $RF/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	$RF\leq 390$	$390<RF\leq 410$	$410<RF\leq 430$	$RF>430$
地面稳定性	f_8	地质灾害条件	河流冲蚀	四级河流	三级河流	二级河流	一级河流

主要分布在邢台、唐山、延怀盆地和全新世活动断裂带内,地貌主要为基岩山区,其次为平原区或盆地,崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝等地质灾害均较发育,工程地质条件较差,不适宜建设重大建筑,一般工程建筑需设计较强抗震设防强度并制定其他工程加固措施后方可进行施工,重大工程规划建设应尽量避免全新世活动断裂或当跨越全新世活动断裂时采取相应的工程防护措施。京津冀协同发展区地壳稳定性总体较好,稳定区和次稳定区利于重要城镇和重大工程规划建设。研究成果与已有工程建设实践工程场地稳定性现状较一致,将为京津冀协同发展区宏观发展战略提供地质支撑。

6 讨 论

京津冀协同发展区地壳稳定性主要受构造稳定性、岩土体稳定性和地面稳定性影响,其中构造稳定性主要受活动断裂、地震活动等因素影响,岩土体稳定性主要受岩土体工程地质物理力学特征制约,地面稳定性主要受地面沉降、地裂缝、地面塌陷、崩滑流等地质灾害影响。

目前,京津冀地区主要活动断裂的系统梳理是在已有研究成果的基础上,依据近年张家口、雄安新区及邻区、北京地区等代表性地区野外地质调查、关键构造部位地球物理探测、工程地质钻探揭露、年代学测试等研究成果完成的。考虑断裂活动的分段性、平原覆盖区隐伏活动断裂探测的复杂性

表 3 京津冀协同发展区地壳稳定性评价指标权重
Table 3 Weights of the factors for crustal stability evaluation in Beijing–Tianjin–Hebei collaborative development zone

编号	指标		资料类型	影响程度	准确性和精度	内部权重	综合权重
f1	深部地球物理	重力异常梯度	综合编绘	中	低	1.0	0.10
f2	地震活动	潜在震源区震级上限	综合编绘	大	中	1.0	0.15
f3	地震动峰值加速度	地震动峰值加速度	综合编绘	大	中	1.0	0.10
f4	现今地壳变形	垂直变形梯度	实测数据	中	低	0.8	0.10
		水平变形速率	实测数据	中	低	0.2	
f5	断裂带	活动时代	调查数据	大	中	0.4	0.20
		断裂切割深度	调查数据	大	低	0.3	
		活动速率	调查数据	大	低	0.3	
f6	现代构造应力场	岩体破裂危险度	模拟分析	大	中	1.0	0.15
f7	岩土体结构及特征	岩土体工程地质岩组	调查数据	大	低	1.0	0.10
f8	地质灾害条件	地质灾害点密度	调查数据	大	中	0.3	0.10
		斜坡坡度	实测数据	中	高	0.2	
		斜坡高差	实测数据	中	高	0.2	
		年均降水量	实测数据	中	高	0.2	
		河流冲蚀	实测数据	中	低	0.1	

精密水准等测量数据,通过构造应力场综合研究,分析太行山东缘南段和北段现今构造应力场方向差异的区域构造背景,探索研究地壳浅表层地应力绝对测量和相对监测结果与深部地应力状态之间的关系,揭示地应力监测数据与区域应力场动态变化相互关系,以及不同类型断裂活动地应力大小实时监测相对变化特征,逐步构建基于地应力测量与实时监测数据的活动断裂危险性动态评价方法体系。此外,需进一步运用首都圈地区关键构造部位深孔地应力测量和实时监测数据,分析 2011 年日本 Mw9.0 强震以来华北地区现今构造应力场的演化过程^[94-95],揭示顺义断裂现今活动诱发首都国际机场地裂缝成因机制的动力背景,有效服务重大工程防灾减灾和安全运营。

本文属于小比例尺(1:50 万~1:20 万)区域地壳稳定性评价,可用于京津冀协同发展区宏观发展战略,并为中(1:20 万~1:10 万)、大(1:5 万~1:2.5 万)比例尺代表性地区和重要工程场址地壳稳定性评价提供区域背景资料^[13]。此外,近年来多种新的实验设备、科学理论不断发展,地壳稳定性评价工作由定性评价向半定量-定量发展^[84,96-97]。同时,区域地壳稳定性评价工作仍有待向三维(或

四维动态)和小区划方向发展,尤其是需要加强运用地应力实时监测数据动态评价断裂活动性和地壳稳定性,更好地服务国家重大工程规划、设计和建设^[86]。因此,结合具体重大工程的地壳稳定性研究具有重要的实际意义。

7 结 论

(1)京津冀协同发展区发育邢台-河间-唐山和石家庄-通州 2 条 NNE 向、张家口-渤海 1 条 NWW 向区域性活动构造带,包括 23 条第四纪断裂、16 条晚更新世断裂和 11 条全新世断裂,均直接威胁重要工程设施及城市安全,并对区域性地裂缝、地面差异沉降等地质灾害及地热构造背景具有控制作用。

(2)冀北和冀东南地区现今构造应力场最大水平主应力方向呈近 EW 向,与华北地区区域现今构造应力场最大水平主应力作用方向(NEE 向)基本一致,而太行山东缘南段呈 NNE 向,北段呈 NW 向,可能与其在构造部位的大地构造背景有关;NNE 向活动断裂带总体表现为顺时针扭动正断活动,倾向 SE;NWW 向活动断裂带晚更新世以来具有明显的活动性,总体表现为逆时针扭动正断活

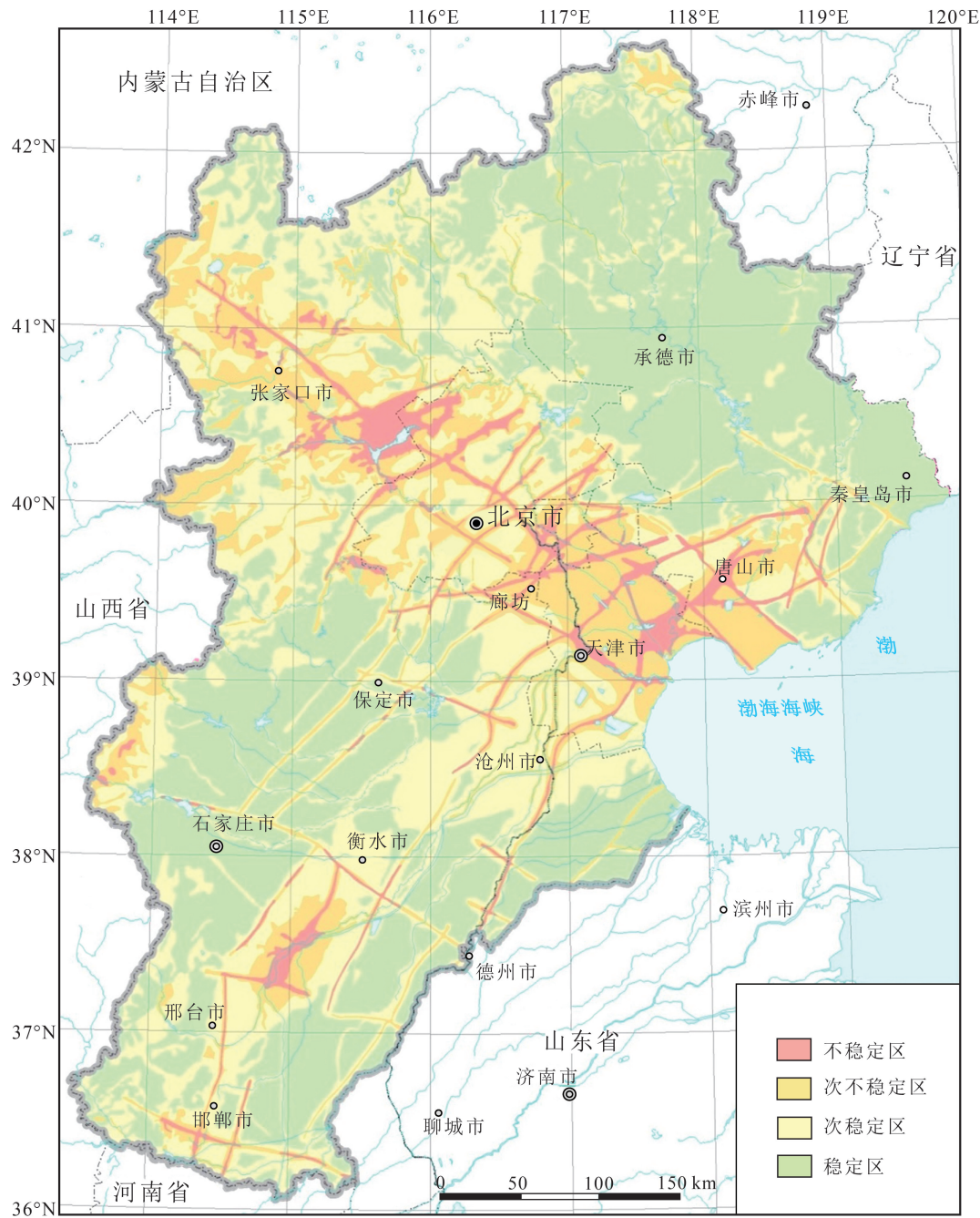


图 8 京津冀协同发展区地壳稳定性评价分区

Fig. 8 Division of crustal stability in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone

动,倾向 SW。

(3)京津冀协同发展区地壳稳定性评价分区表明,其稳定地区、次稳定地区、次不稳定地区和不稳定地区面积分别占比 40.39%、39.31%、15.66% 和 4.64%,稳定区和次稳定区主要分布在西部和北部坚硬基岩山区与平原区活动断裂带围限的地块,不稳定区和次不稳定区主要分布在邢台、唐山、延怀

盆地和全新世活动断裂带内。京津冀协同发展区总体地壳稳定性较好,利于重要城镇和重大工程规划建设。

参考文献

[1] 冉再康.首都圈山区活动构造定量资料与强震预测对应差异的思考[C]//中国地震学会.中国地震学会第八次学术大会论文摘要

- 集.中国地震学会,2000.
- [2] 冉勇康,陈立春,徐锡伟.北京西北活动构造定量资料与未来强震地点的讨论[J].地震学报,2001,23(5): 502-513.
- [3] 徐杰,马宗晋,陈国光,等.中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨[J].地学前缘,2003,10(S1): 193-198.
- [4] 李长波,蒋仁,曾剑威,等.重力约束反演构建郯庐断裂带泗洪浅覆盖区隐伏基岩地质模型[J].地质通报,2022,41(2/3): 425-435.
- [5] 徐杰,周本刚,计凤桔,等.中国东部海域及其邻区现代构造应力场研究[J].地学前缘,2012,19(4): 3-9.
- [6] 焦青,邱泽华.北京平原地区主要活动断裂带研究进展[J].地壳构造与地壳应力文集,2006,(18): 72-84.
- [7] 江娃利,张英礼.华北平原周边北西向强震地表地震断层及全新世断裂活动特征[J].中国地震,1997,13(3): 263-270.
- [8] Xu X W, Ma X Y, Deng Q D. Neotectonic activity along the Shanxi rift system, China[J]. Tectonophysics, 1993, 219(4): 305-325.
- [9] Guo L L, Li S Z, Suo Y H, et al. Experimental study and active tectonics on the Zhangjiakou-Penglai fault zone across North China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 18-27.
- [10] Shi W, Cen M, Chen L, et al. Evolution of the late Cenozoic tectonic stress regime in the Shanxi rift, Central North China Plate inferred from new fault kinematic analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 54-72.
- [11] Peng J B, Xu J S, Ma R Y, et al. Characteristics and mechanism of the Longyao ground fissure on North China Plain, China[J]. Engineering Geology, 2016, 214: 136-146.
- [12] 谭成轩, 丰成君, 张鹏, 等. 北京地区主要活动断裂研究与地壳稳定性评价[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [13] 谭成轩, 杨为民, 张春山, 等. 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, 2020.
- [14] 刘贺, 崔文君, 罗勇, 等. 基于分层监测的北京天竺地面沉降、地下水位与孔隙水压力变化规律[J]. 地质通报, 2022, 41(4): 692-701.
- [15] 索艳慧, 李三忠, 刘鑫, 等. 中国东部 NWW 向活动断裂带构造特征: 以张家口-渤海断裂带为例[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 953-966.
- [16] 邓超东. 活动断裂研究[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [17] 戚帮申, 丰成君, 谭成轩, 等. 京张地区延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段综合地球物理及钻孔地层剖面研究[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 468-481.
- [18] 戚帮申, 丰成君, 谭成轩, 等. 张家口及邻区地壳稳定性研究[J]. 城市地质, 2018, 13(3): 1-14.
- [19] 戚帮申, 潘智锋, 丰成君, 等. 北京顺义断裂第四纪活动性地球物理及钻孔综合探测证据[J]. 地质学报, 2020, 94(4): 1315-1329.
- [20] 吴玉涛, 杨为民, 谭成轩, 等. 延怀盆地隐伏断裂第四纪活动性研究[J]. 华北地震科学, 2018, 36(4): 1-9.
- [21] 商世杰, 丰成君, 谭成轩, 等. 雄安新区附近主要隐伏断裂第四纪活动性研究[J]. 地球学报, 2019, 40(6): 836-846.
- [22] 丰成君, 戚帮申, 王晓山, 等. 基于原地应力实测数据探讨华北典型强震区断裂活动危险性及其对雄安新区的影响[J]. 地学前缘, 2019, 26(4): 170-190.
- [23] 范玉璐, 谭成轩, 张鹏, 等. 雄安新区现今地应力环境及其对构造稳定性影响研究[J]. 地球学报, 2020, 41(4): 481-491.
- [24] 张树轩, 杨为民, 孟华君, 等. 京张地区区域地壳稳定性评价[J]. 地质力学学报, 2018, 24(1): 71-77.
- [25] 崔盛芹, 李锦蓉, 吴珍汉, 等. 燕山地区中生代陆内造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [26] 马寅生, 崔盛芹, 曾庆利, 等. 燕山地区燕山期的挤压与伸展作用[J]. 地质通报, 2002, 21(4): 218-223.
- [27] 马寅生, 崔盛芹, 赵越, 等. 华北北部中生代构造体制的转换过程[J]. 地质力学学报, 2002, 8(1): 15-25.
- [28] 彭远黔, 孟立朋. 河北地震构造特征[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 2017.
- [29] 陈绍绪, 张跃刚, 乔子云, 等. 晋冀蒙交界地区主要断裂的现今活动[J]. 华北地震科学, 2003, 21(2): 16-22.
- [30] 冉勇康, 王景铎, 彭斯震, 等. 河北宣化盆地南缘断裂的古地震遗迹[J]. 地震地质, 1995, 17(1): 44-46.
- [31] 徐锡伟, 程国良, 马杏垣, 等. 华北及其邻区块体转动模式和动力来源[J]. 地球科学, 1994, 19(2): 129-138.
- [32] 徐锡伟, 于贵华, 冉勇康, 等. 中国城市活动断层概论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [33] 辛永信. 宝坻断裂危险性的初步分析[J]. 地震学刊, 1990, (1): 76-78.
- [34] 刘红艳, 陈宇坤, 闫成国, 等. 天津近海海域隐伏断裂地震危险性评价[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(2): 146-155.
- [35] 郭慧, 江娃利, 谢新生. 1976 年唐山 Ms7.8 地震乐亭—滦南地区 NW 向地裂缝带赵滩点调查[J]. 地震学报, 2016, 38(4): 644-655.
- [36] 邵永新, 李振海, 陈宇坤, 等. 天津断裂第四纪活动性研究[J]. 地震地质, 2010, 32(1): 80-89.
- [37] 温超, 周月玲, 彭远黔, 等. 用浅层地震剖面研究大城东断裂的活动性[J]. 中国地震, 2016, 32(4): 695-701.
- [38] 邵永新, 任峰, 陈宇坤, 等. 沧东断裂第四纪活动性探测结果[J]. 地震工程学报, 2020, 42(4): 927-933.
- [39] 侯治华, 张世民, 任俊杰, 等. 河北省邯郸—邢台断裂晚更新世以来的活动特征[C]//地壳构造与地壳应力文集, 2008, (20): 56-66.
- [40] 李皓, 潘峰, 温超, 等. 磁县断裂带的构造和地震活动特征[J]. 华北地震科学, 2013, 31(2): 29-34.
- [41] 冉志杰, 彭远黔, 孟立朋, 等. 临漳—大名断裂活动特征[J]. 震灾防御技术, 2008, 11(2): 230-238.
- [42] 朱坤静, 彭远黔, 周月玲. 宁河—昌黎断裂基于浅层地震勘探资料研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(5): 1242-1250.
- [43] 李建华, 郝书俭. 1976 年唐山地震震断裂的活动性研究[J]. 地震地质, 1998, 20(1): 27-33.
- [44] 张磊, 张晓亮, 白凌燕, 等. 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, 2017, 23(4): 548-557.
- [45] 张磊, 何付兵, 白凌燕, 等. 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), 2015, 54(5): 147-154.
- [46] 张磊, 何静, 白凌燕, 等. 北京凹陷北缘第四纪凹陷盆地沉积速率变化特征与顺义断裂活动性的响应关系[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 511-519.
- [47] 白凌燕, 张磊, 蔡向民, 等. 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, 2014, 28(6): 1234-1242.
- [48] 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.
- [49] 桂宝玲, 何登发, 闫福旺, 等. 大兴断层的三维几何学与运动学及其对廊固凹陷成因机制的约束[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 86-99.
- [50] 何付兵, 白凌燕, 王继明, 等. 夏垫断裂带深部构造特征与第四纪

- 活动性讨论[J].地震地质,2013,35(3): 490-505.
- [51] 徐杰,宋长青,楚全芝.张家口-渤海断裂带地震构造特征的初步探讨[J].地震地质,1998,20(2): 146-154.
- [52] 冉勇康,方仲景,段瑞涛,等.河北矾山盆地北缘断层八营段的古地震重复模型[J].中国地震,1998,14(1): 47-58.
- [53] 冉勇康,方仲景,李志义,等.河北怀来-琢鹿盆地北缘活断层的古地震事件与断层分段[J].中国地震,1992,8(3): 74-85.
- [54] 彭建兵,范文,李喜安,等.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,2007,15(4): 433-440.
- [55] 徐杰,高战武,宋长青,等.太行山山前断裂带的构造特征[J].地震地质,2000,22(2): 111-122.
- [56] 徐杰,高战武,孙建宝,等.区域伸展体制下盆-山构造耦合关系的探讨-以渤海湾盆地和太行山为例[J].地质学报,2001,75(2): 165-174.
- [57] 徐杰,计凤桔.渤海湾盆地结构及其演化[M].北京:地震出版社,2015.
- [58] 江娃利,聂家笙.太行山山前断裂带活动特征及地震危险性讨论[J].华北地震科学,1984,2(3): 21-27.
- [59] 朱守彪,石耀霖.中国大陆及邻区构造应力场成因的研究[J].中国科学(D辑),2006,36(12): 1077-1083.
- [60] 牛之俊,王敏,孙汉荣,等.中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果[J].科学通报,2005,50(8): 839-840.
- [61] 汪素云,许忠淮.中国东部大陆的地震构造应力场[J].地震学报,1985,7(1): 17-32.
- [62] 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等.由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J].地球物理学报,1989,32(6): 636-647.
- [63] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等.中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J].地球物理学报,2004,47(4): 654-662.
- [64] 谭成轩,张鹏,丰成君,等.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,2014,88(8): 1436-1452.
- [65] 王继兴,王喜富,邓绍颖,等.河北省岩石地层[M].北京:中国地质大学出版社,1996.
- [66] 李焕彬,张春山,申俊峰,等.基于GIS的京藏高速公路京张段沿线地质灾害危险性评价[J].西部探矿工程,2018,30(10): 4-8.
- [67] 张向营,张春山,孟华君,等.基于GIS和信息模型的京张高铁滑坡易发性评价[J].地质力学学报,2018,24(1): 96-105.
- [68] 万佳威,李滨,谭成轩,等.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,2019,65(6): 1383-1396.
- [69] Wan J W, Li B, Tan C X, et al. Characteristics and main causes of earth fissures in northeastern Beijing Plain, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01731-z>.
- [70] 孙叶,谭成轩,李开善,等.区域地壳稳定性量化评价[M].北京:地质出版社,1998.
- [71] 中华人民共和国地质矿产部.中华人民共和国专业标准-工程地质编图规范(ZB D14001-89)(1:100万-1:50万)、工程地质调查规范(ZB D14002-89)(1:20万-1:10万)和工程地质调查规范(ZB D14003-89)(1:5万-1:2.5万)[S].北京:中国计划出版社,1990.
- [72] 谷德振.岩体工程地质学力学基础[M].北京:科学出版社,1979.
- [73] 李兴唐,许兵,黄鼎成,等.区域地壳稳定性研究理论和方法[M].北京:地质出版社,1987.
- [74] 陈庆宣.探索区域地壳稳定性评价途径[J].第四纪研究,1992,(4): 289-292.
- [75] 刘国昌.区域稳定工程地质[M].长春:吉林大学出版社,1993.
- [76] 胡海涛,刘传正.区域稳定性研究的回顾及前瞻[J].工程地质学报,1993,1: 7-13.
- [77] 杜东菊.中国区域稳定工程地质学产生与发展[J].工程地质学报,1994,2(3): 21-26.
- [78] 吴树仁,陈庆宣,孙叶.我国区域地壳稳定性研究的新进展[J].地质力学学报,1995,1(1): 31-37.
- [79] 殷跃平,胡海涛,康宏达.区域地壳稳定性评价专家系统研究[J].地质论评,1996,42(2): 174-186.
- [80] 王思敬,李国和.金沙江流域区域地壳稳定性分区与定量评价[J].工程地质学报,1998,6(4): 289-299.
- [81] 胡海涛.区域地壳稳定性评价的“安全岛”理论及方法[J].地质力学学报,2001,7(2): 97-103.
- [82] 吴树仁,韩金良,石菊松,等.区域地壳稳定性研究现状和发展趋势[J].工程地质学报,2004,12(S): 26-30.
- [83] 杜建军,马寅生,谭成轩,等.京津地区区域地壳稳定性评价[J].地球学报,2008,29(4): 502-509.
- [84] 谭成轩,孙叶,吴树仁,等.“5·12”汶川 Ms8.0 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考[J].地质力学学报,2009,15(2): 142-150.
- [85] Chen Q X, Hu H T, Sun Y, et al. Assessment of regional crustal stability and its application to engineering geology in China [J]. Episodes, 1995, 18(1/2): 69-72.
- [86] 周本刚,陈国星,高战武,等.新地震区划图潜在震源区划分的主要技术特色[J].震灾防御技术,2013,8(2): 113-124.
- [87] 潘华,高孟潭,谢富仁.新版地震区划图地震活动性模型与参数确定[J].震灾防御技术,2013,8(1): 11-23.
- [88] 中国地震局.中国地震动峰值加速度区划图(1:4 000 000)(GB18306—2015)[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [89] 吕健,杨超.华北地区大范围精密水准和GPS垂直运动分析[J].华北地震科学,2015,33(3): 22-25.
- [90] 顾国华,王若柏,孙惠娟,等.华北地区GPS形变测量结果及其地震地质意义[J].地震地质,1999,21(2): 97-104.
- [91] 杨国华,谢觉民,韩月萍.华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制[J].地球物理学报,2001,44(5): 645-653.
- [92] Zhao B, Huang Y, Zhang C H, et al. Crustal deformation on the Chinese mainland during 1998-2004 based on GPS data[J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, 16(1): 7-15.
- [93] 詹自敏,陈连旺,陆远忠.大华北地壳动力学参数及三维有限元模型的建立[J].大地测量与地球动力学,2011,31(S): 28-32.
- [94] 谭成轩,胡秋韵,张鹏,等.日本 Mw9.0 级大地震前后华北和东北地区现今构造应力作用调整过程与研究意义探讨[J].地学前缘,2015,22(1): 345-359.
- [95] Feng C J, Zhang P, Tan C X, et al. Co-seismic and post-seismic effects of the Tohoku-Oki Mw 9.0 earthquake in North and Northeast China[J]. Journal of Seismology, 2016, 20(1): 333-359.
- [96] 彭建兵,毛彦龙,范文,等.区域稳定动力学研究[M].北京:科学出版社,2001.
- [97] 柴建峰,朱时杰,伍法权,等.区域地壳稳定性研究现状与趋势[J].工程地质学报,2004,12(4): 401-407.