

# 辽宁省沈抚新区区域地壳稳定性评价

张春山<sup>1,2,5</sup>, 张树轩<sup>3</sup>, 杨为民<sup>1,2,5</sup>, 孟华君<sup>1,2,5</sup>, 吕佳进<sup>1,4</sup>, 张田田<sup>1,2</sup>, 吴季寰<sup>1,4</sup>,  
郭 涵<sup>1,4</sup>

ZHANG Chunshan<sup>1,2,5</sup>, ZHANG Shuxuan<sup>3</sup>, YANG Weimin<sup>1,2,5</sup>, MENG Huajun<sup>1,2,5</sup>, LYU Jiajin<sup>1,4</sup>, ZHANG Tiantian<sup>1,2</sup>,  
WU Jihuan<sup>1,4</sup>, GUO Han<sup>1,4</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;
3. 中国核电工程有限公司, 北京 100036;
4. 中国地质大学(北京), 北京 100083
5. 自然资源部陕西宝鸡地质灾害野外科学观测研究站, 北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Institute of Geomechanics, Beijing 100081, China;*
3. *China Nuclear Power Engineering Co. Ltd, Beijing 100036, China;*
4. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*
5. *Observation and Research Station of Geological Disaster in Baoji, Shaanxi Province, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*

ZHANG C S, ZHANG S X, YANG W M, et al., 2021. Assessment of regional crustal stability in Shenfu New Area of Liaoning Province, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (3): 453–462. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.03.041

**Abstract:** In this paper, the main factors controlling and influencing regional crustal stability as well as the coupling action of internal and external dynamic geology in Shenfu New Area were analyzed, using both previous findings and field survey results. Based on the GIS platform, the regional crustal stability assessment was carried out through the multi-factor weighted superposition analysis method. Twelve influencing factors were selected, including fault activity, seismicity, deep geophysical status, engineering rock group, topography and surface geological hazards. The regional crustal stability assessment model was established in terms of relevance and importance of the influencing factors, through which to quantitatively assess the regional crustal stability of Shenfu New Area. And the results show that Shenfu New Area is dominated by the stable and sub-stable areas covering 728.9 km<sup>2</sup>, accounting for 81.07% of the total area, which is conducive to the planning and construction in this area. Necessary engineering measures are recommended to ensure the stability of foundation and slope when underground engineering, such as the construction of the planned Metro Line 9 at a depth of 15~25 meters, passes through the unstable and sub-unstable areas. The strata in the construction section of Metro Line 9 are generally weathering zones and junction areas of oval-gravel accumulation, mud-clastic accumulation and metamorphic gneiss, situated in groundwater immersed zones or changing zones, which is hard to be provided with protection and support. It is suggested that reasonable construction scheme should be determined as soon as possible to ensure a

**基金项目:** 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190318)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of China Geological Survey (Grant No. DD20190318)

**第一作者简介:** 张春山 (1964—), 男, 研究员, 主要从事地质灾害、工程地质、地应力等方面研究工作。E-mail: zhangcs401@sina.com

**收稿日期:** 2020-10-28; **修回日期:** 2021-04-21; **责任编辑:** 范二平

**引用格式:** 张春山, 张树轩, 杨为民, 等. 2021. 辽宁省沈抚新区区域地壳稳定性评价 [J]. 地质力学学报, 27 (3): 453-462. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.03.041

smooth and safe construction, and precipitation and anticorrosion measures are needed.

**Key words:** Shenfu New Area of Liaoning Province; the planned Metro Line 9; multi-factor weighted superposition method; assessment of regional crustal stability; engineering geological conditions and geological hazards

**摘要:** 在广泛收集资料和野外调查工作的基础上, 经综合分析控制和影响区域地壳稳定性的主要因素和内外动力地质的耦合作用, 基于 ArcGIS 平台采用多因素加权叠加分析方法开展了沈抚新区区域地壳稳定性评价研究。评价因素主要选取活动断裂、地震活动性和深部地球物理以及工程岩组、地形地貌与地表地质灾害等共 12 个影响因子, 并依据评价因素的关联性和重要性进行分类赋值, 进而建立了区域地壳稳定性评价模型。对沈抚新区的区域地壳稳定性进行了量化评价。结果表明, 沈抚新区以稳定区和次稳定区为主, 面积为 728.9 km<sup>2</sup>, 占总面积的 81.07%, 有利于规划和建设。建议在地下工程穿越不稳定区和次不稳定区时, 要采取必要的工程措施, 确保基础和边坡的稳定性。规划的地铁 9 号线主要穿越次不稳定区和次稳定区。施工带在埋深 15~25 m 之间, 该段地层主要为卵砾石堆积层、泥包砾堆积层与变质片麻岩强风化带及其交接部位, 施工带处于地下水浸没带或变动带, 其支护比较困难, 建议尽早确定合理的施工方案, 保障施工顺利和安全, 此外还需要采取一定降水防腐措施。

**关键词:** 沈抚新区; 规划地铁 9 号线; 多因子加权叠加法; 区域地壳稳定性评价; 工程地质条件与地质灾害

**中图分类号:** P694      **文献标识码:** A

## 0 引言

沈抚新区是按照国家“十三五”规划中“加快东北老工业基地建设”的文件精神和要求设立的。目的是建设东北老工业基地改革创新的前导区和示范区, 打造国家级同城化试验区, 创建辽宁新一轮振兴发展的增长极。沈抚新区规划区域受到活动断裂、地面塌陷和地裂缝等因素困扰。因此, 规划区的区域地壳稳定性怎样, 国土安全适宜程度如何, 是否会对建设场地产生不利影响等等, 一些工程地质风险问题显然是沈抚新区规划建设需要关注的。因此, 查明沈抚新区的活动构造与工程地质条件, 基于 ArcGIS 平台采用多因子加权叠加分析评价法及时开展区域地壳稳定性评价研究, 可有效服务于其规划和减灾防灾。依据区域地壳稳定性的定义(胡海涛, 2001), 开展地壳稳定性评价时应主要考虑三方面的因素: 断裂活动性、岩土体条件稳定程度和表生外动力作用强度。区域地壳稳定性评价现今常用的评价方法主要包括: 主观经验定性评价法、主因素判断法、模糊评判法、半定量算法、多因子叠加分析评价方法和基于 ArcGIS 平台的栅格运算评价方法等(谷德振, 1979; 胡海涛, 1983; 殷跃平, 1985; 陈庆宣等, 1990; 刘传正和胡海涛, 1993; 杜东菊, 1994; 殷跃平等, 1996; 杨建军等, 2004;

杨勤业等, 2006; 张树轩等, 2018)。其中后两种方法是近年来随着计算机应用的深入而逐步推广采用的(相建华, 2006; 张树轩等, 2018)。目前区域地壳稳定性评价仍缺乏统一标准, 所选取的评价因子常常因地而异。一些学者强调根据具体工程条件进行区域地壳稳定性评价(谷德振, 1979), 也有一些学者认为在选择以内动力地质作用为主的同时还需要兼顾外动力地质作用(胡海涛, 1983; 殷跃平, 1985); 另外有的学者比较注重地球深部动力地质因素(彭建兵, 2001), 或者更注重工程场地的地质因素(谭成轩等, 2009; 张树轩等, 2018)。各种评价方法间差异比较大且各有其优缺点(杜建军等, 2008; 郭芳芳等, 2008; 唐辉明等, 2009; 周福彩, 2014; 谭成轩等, 2014; 姚鑫等, 2015)。

文章采用的多因子加权叠加分析评价法是当前国内常用的方法之一, 基于 ArcGIS 平台对沈抚新区进行了区域地壳稳定性评价, 并为沈抚新国土规划和建设提出相关建议, 希望研究成果可为该地区的规划建设、减灾防灾和地质安全风险评价等提供参考。

## 1 区域地质背景

沈抚新区位于沈阳市和抚顺市交界地带。西部为辽河平原, 东南部山区属于千山, 东北部山区

属于吉林哈达岭。区内山顶标高一般在 100~150 m 以上, 总的地势为南北高中部低, 呈两山夹一盆地貌特征。其中部为浑河河谷盆地及冲积平原, 盆地及河谷两侧为低缓丘陵或台地。该区的地层岩性相对比较简单, 主要包括第四系松散堆积, 以砂、砂砾石和砾石为主; 古近系的陆相碎屑岩建造和火山岩建造, 以页岩、泥岩、安山岩、玄武岩为主夹煤系地层; 白垩系的陆相碎屑岩建造, 以砂岩、砂砾岩为主; 侏罗系的陆相碎屑岩建造和火山岩建造, 为砂岩、泥岩、火山岩等地层;

震旦系的海相沉积岩建造, 主要为白云质灰岩、泥灰岩; 太古界的变质岩建造等。

研究区位于郯庐断裂带北段的 Y 字型交汇部位 (图 1a), 区内发育多条活动断裂, 以中更新世以来活动为主, 主要包括北东向和北东东向断裂构造, 同时也有北西向断裂构造等, 已有研究显示 (邓起东等, 2002; 左建等, 2003; 吴明大等, 2004; 侯治华等, 2006; 王声喜等, 2008; 万波等, 2010), 研究区内断裂构造大多具有继承性 (图 1b)。

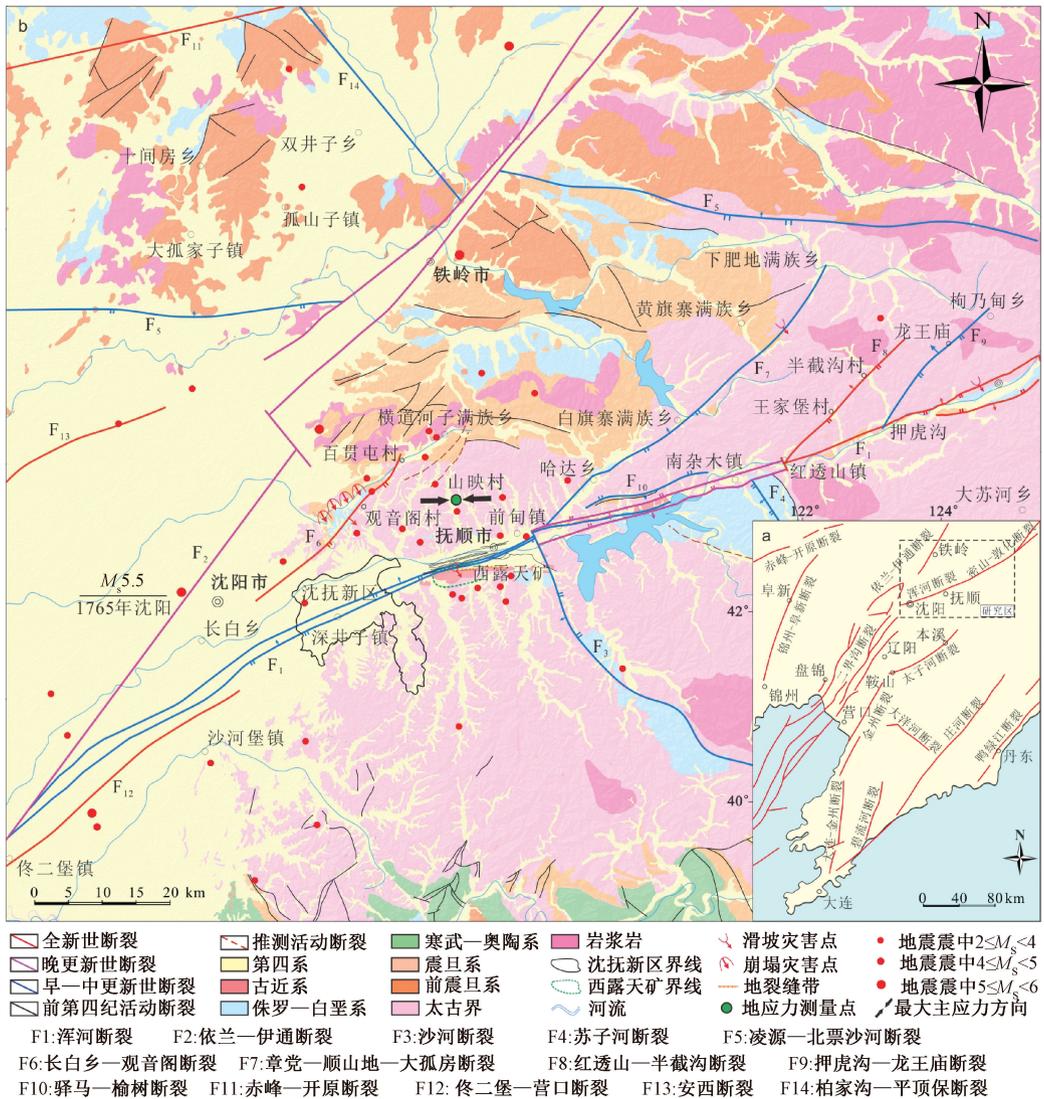


图 1 沈抚新区区域构造略图 (据中国地震局官网, <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/zqsd-lsdz/index.html>; 邓起东等, 2002; 左建等, 2003; 吴明大等, 2004; 侯治华等, 2006; 王声喜等, 2008; 万波等, 2010 资料, 并结合野外调查修编)

Fig. 1 Regional tectonic sketch of Shenfu New Area (Map is made based on the following data and modified according to field survey: <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/zqsd-lsdz/index.html>, China earthquake administration; Deng et al., 2002; Zuo et al., 2003; Wu et al., 2004; Hou et al., 2006; Wang et al., 2008; Wan et al., 2010.

## 2 区域地壳稳定性的主要影响因素分析

区域地壳稳定性的控制和影响因素有很多,主要有内动力因素、外动力因素和介质条件。其中内动力因素是控制和影响地壳稳定性的主要因素,由断裂活动性特征、地震活动性强度、构造变形特征、区域构造应力场等参数反映,其中断裂活动性和地震活动强度是最显著影响因素;外动力因素是控制和影响地壳稳定性的重要因素,由河流侵蚀强度、地貌形态特征、人类活动强度等反映,具体主要表现为在地表发生各类地质灾害的规模、频次和密度。内动力和外动力条件都是通过一定的介质条件才能对稳定性构成影响的,这些介质条件主包括地层条件和地下水条件,其中地层岩性无疑是最主要的介质条件。因此,在区域地壳稳定性评价过程中,如何选择评价因素和确定评价指标是非常关键的,也是最困难的。因为有些评价因素是相互关联的,既要求确定相关因素对区域地壳稳定性的重要程度,还需要根据相关地质资料的详细程度进行取舍。区域地壳稳定性评价要求选择的因素和指标既要能够较好地反映上述主要影响因素,又要求资料详细丰富,同时要求资料数据通过一定方法处理后能量化,还要尽可能地避免因素或指标之间的相互重叠,这也是地壳稳定性评价问题量化的难点之一。因此,对区域稳定性的主要影响因素进行定性分析是选择评价指标的关键。

### 2.1 主要活动断裂与地震活动

研究区内发育不同时期构造作用,构造行迹纵横错综,断裂构造以北东—北东东向和北西向为主,同时还有近东西向和近南北向断裂,这些断裂构造活动导致岩石相对破碎。已有资料显示(邓起东等, 2002; 张培震等, 2003; 万波等, 2010; 翁剑桥, 2020),大多数断裂现今仍在活动,断裂活动速率 $<1\text{ mm/a}$ ,地震活动比较弱,依据中国地震动峰值加速度区划图(1:4000000)(GB 18306-2015)(中国地震局, 2015),研究区地震烈度均为VI~VII度。在断裂构造方面,区内以北东东向和北东向断裂为主,其次为北北西和北西向断裂,同时也发育近东西向断裂,这些断裂共同控制了辽河盆地、抚顺盆地及小型山间盆地的形成。其

中北东东向和北东向活动断裂具有明显的逆断兼右旋走滑特征,北北西和北西向断裂主要为正断张扭性特征,前者断裂活动性相对更强,并以中更新世和晚更新世活动为主(左建等, 2003; 吴明大等, 2004; 侯治华等, 2006; 王声喜等, 2008; 中国地震局, 2012)。研究区内有历史记载和仪器监测以来共发生2次大于4级以上的地震(图1)。最大震级为1765年沈阳旧城区发生的5.5级地震,震中位于郟庐断裂带两条主干分支断裂(浑河断裂与依兰—伊通断裂)之间(赵振, 2001; 邓起东等, 2002; 张培震等, 2003; 李铁等, 2005; 万波等, 2010; 陈为涛等, 2012),其次为2003年满堂镇发生的4.1级地震,震中位置为 $41^{\circ}51'N$ ;  $123^{\circ}33'E$ 。研究区内无6级以上地震。

### 2.2 区域构造变形和区域构造应力场分析

项目组2019年现场实测的抚顺地区的现今最大水平地应力方向为北东东向,相关学者的研究亦表明研究区现今构造应力场主压应力方向为北东东向,以北东东向挤压和北北西拉伸为主要特征(万波等, 2010)。这与相关学者的认识基本一致(马杏垣等, 1989; 张培震等, 2003; 孙东生等, 2020)。但是,依据地表的构造变形分析发现,研究区北东—北东向断裂由古近纪强烈的挤压逆冲并导致白垩系和古近系煤系地层倒转向斜已经转变为第四纪期间的正断活动,表明该区历史上主压应力方向曾发生过变化。现今构造应力场特征可能与新近纪以来印度和欧亚板块碰撞引发的东亚块体向东和太平洋俯冲带的跃迁式东撤的联合效应相关。

研究区地表形变速率观测表明(吴明大等, 2004),在不同地区的地表变形差异较大,是由构造活动、采矿活动、矿井疏干和人类大量抽取地下水等作用造成的。在西露天矿和抚顺井田开采区,受采矿活动和矿井疏干等的影响,在地表形成地面沉陷区,地形变的累计最大沉降量达到1600 mm,平均沉降速率为 $-44\text{ mm/a}$ 。而单纯受构造活动影响区沉降速率小于 $1.0\text{ mm/a}$ 。综合分析研究区的地形变特征,主要表现为沈抚新区南北两侧基岩山区地表相对抬升,平原区或盆地区地表则相对下降,近年的平均变形速率为 $-44\sim 1.0\text{ mm/a}$ 。局部地段具有走滑现象,最大速率为 $1.2\text{ mm/a}$ 。

### 2.3 工程地质条件

沈抚新区范围内第四系厚度介于13~43 m之间,具有多元结构,其下伏地层主要为太古界鞍

山群变质岩, 地下水埋深在 4~20 m 之间。工程地质条件总体较好, 未发现有重大工程地质问题, 总体较适宜开展地下工程规划建设 (图 2)。沿规划的地铁 9 号线自东向西第四系覆盖层厚度增大, 其厚度介于 13.5~29.1 m 之间, 地下水位埋深介

于 6.0~9.1 m, 其施工带埋深约在 15~25 m 之间, 该段地层主要为卵砾石层、泥包砾层与片麻岩强风化带等层位。根据文中野外取井水样和地表水样测定的结果表明, 地下水对钢筋水泥具有弱腐蚀性。

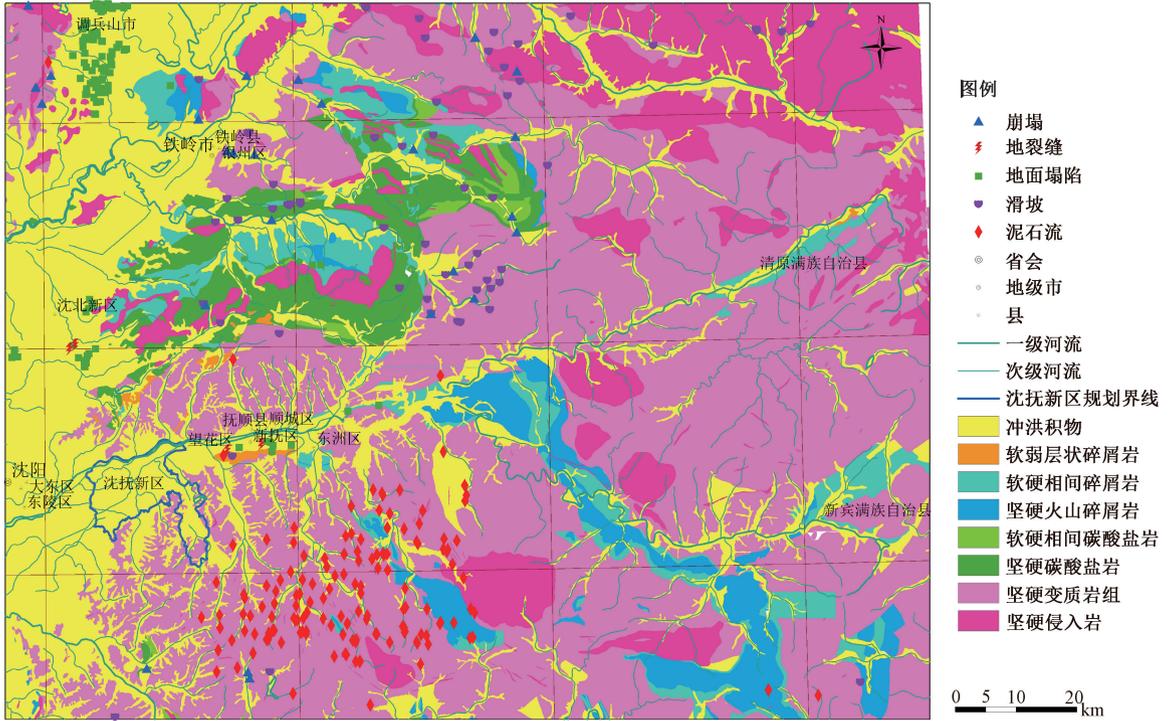


图 2 沈抚新区及邻区工程地质与地质灾害分布图 (据沈阳市地质灾害隐患点排查与复核成果报告 (辽宁省环境监测总站, 2014); 抚顺市地质灾害隐患点排查与复核成果报告 (辽宁省第十地质大队, 2014); 以及 2019 年野外实际调查资料编制)  
 Fig. 2 Engineering geology and distribution map of geo-hazards in Shenfu New Area and adjacent areas (Map is made based on the following data and actual survey results in 2019; Liaoning Station for Geo-environment Monitoring, 2014; The 10<sup>th</sup> geological team of Liaoning Province, 2014.)

### 2.4 主要地质灾害特征

调查发现, 研究区的地质灾害以采空塌陷及地面沉陷、滑坡、地裂缝为主 (图 2)。采空塌陷及地面沉陷是抚顺市最为严重的地质灾害, 主要分布区位于西露天矿北部地区, 地面沉陷带面积约 1.5 km<sup>2</sup>, 北部边界为浑河断裂分支断裂控制。滑坡灾害在西露天矿南帮和北帮比较严重, 南帮 2012 年千台山滑坡单体规模就超过 3×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 北帮中部 2016 年滑坡滑动体积达 315×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。西露天矿及邻区的地裂缝灾害严重, 规模较大的有 12 条, 基本上沿着浑河断裂的主干断裂和分支断裂分段分布, 也是对老城区影响较大的地质灾害。

从区域分布特征来看, 采空塌陷主要分布在井田开采煤矿和露天采矿地区, 滑坡主要分布在沟谷岸坡及人类工程切坡强烈的基岩山区, 特别

是在西露天矿边坡发育多处滑坡与崩塌。泥石流主要分布在基岩山区的沟谷中 (图 2)。

### 3 区域地壳稳定性评价因素的选取与数据处理

在综合分析研究区及周边地区控制和影响区域地壳稳定性主要因素的基础上, 依据研究区地质构造、地震活动、地表形变、地球物理、地形地貌、水系分布、岩土体特征和地表地质灾害的孕灾条件等, 共选取 12 种因素作为区域地壳稳定性评价因素 (表 1)。所选取的因素即有表征内动力影响的评价因素, 也有表征外动力影响的评价因素和表征岩体介质影响的评价因素, 同时还有表征内动力和人类活动共同控制的评价因素。选

取的评价因素主要包括活动断裂、地震动峰值加速度、工程岩组、重力异常、地震活动强度、地形变、水系、地形坡度、地形高差和地质灾害点

密度等 (表 1)。这些选取的评价因素能够比较准确地反映区域地壳稳定性程度, 同时又能实现经过数据处理后的指标量化和快速完成量化评价。

表 1 稳定性评价因素数据处理的分类赋值规则及权重表

Table 1 Rule of value assignment and weighted table for stability assessment factors in processing data

稳定性分级	1 极高	2 较高	3 中等	4 较低	5 极低	权值	代码
活动断裂 (垂距/m)	>3200	1600~3200	800~1600	400~800	<400	0.15	duanlie
地震动峰值加速度/ $g$	<0.05	0.05	0.10	0.15	>0.20	0.13	dizhen
工程岩组	坚硬块状深变质岩岩组和侵入岩岩组	坚硬厚层状火山碎屑岩岩组和碳酸盐岩岩组	软硬相间层状碎屑岩、碳酸盐岩、浅变质岩组	软弱层状泥岩页岩和碎屑岩岩组	松散冲洪积物堆积层岩组	0.11	yanzu
布格重力/ $\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$	10~-10	-10~-30; 10~30	-30~-50; 30~50	-50~-70	-70~-90	0.09	zhongli
地震活动强度 (震级)	<5	5~6	6~7	7~8	>8	0.12	dizhenq
地形变/ (mm/a)	-2~2	-2~-4; 2~4	-4~-7; 4~7	-7~-10; 7~10	-10~-25; 10~12	0.07	xingbian
水系 (垂距/m)	>3200	1600~3200	800~1600	400~800	<400	0.06	shuixi
斜坡坡度/ ( $^{\circ}$ )	0~5	5~10	10~15	15~25	25~61.43	0.07	podu
斜坡高差/m	0~50	50~100	100~200	200~400	400~417	0.05	gaocha
崩滑流灾点密度/ (处/ $\text{km}^2$ )	<0.02	0.02~0.08	0.08~0.17	0.17~0.27	0.27~0.46	0.08	bhl
采空塌陷点密度/ (处/ $\text{km}^2$ )	<0.01	0.01~0.05	0.05~0.11	0.11~0.19	0.19~0.29	0.03	caikong
地裂缝点密度/ (处/ $\text{km}^2$ )	<0.02	0.02~0.1	0.1~0.18	0.18~0.33	0.33~0.54	0.04	dlf
赋值	1	2	4	7	10		

评价采用多因素加权叠加分析方法, 在 ArcGIS 平台进行计算获得评价结果。首先需要分析各评价因素对区域地壳稳定性的影响大小, 再结合专家评判法确定各因素的权值并对各评价因素进行赋值, 为了方便在 ArcGIS 平台上进行计算需要对各因素数据进行处理。具体数据来源、处理过程和数据处理方法如下。

首先确定计算单元的大小, 由于研究区总面积为  $899.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 范围相当于两个 1:50000 标准图幅面积稍多, 因此计算单元依据经验按  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  选取, 计算结果基本达到 1:50000 精度。其次是对评价因素的数据资料进行处理: 活动断裂数据来源于 1:200000 地质图和现场调查成果, 在 ArcGIS 平台对其进行欧式距离缓冲处理, 得到距断裂的垂直距离大小分级赋值; 地震动峰值加速度值数据来源于《1:4000000 中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306-2015) (中国地震局, 2015), 在 ArcGIS 平台进行量化后得到并进行分类赋值; 工程岩组数据来源于 1:50000 工程地质调查成果, 按照岩土体的组合特征和物理力学性质对其进行分类后赋值; 斜坡高差和斜坡坡度数据都来源于 1:50000 DEM 图, 在 ArcGIS 平台进行空间分析得到, 然后按斜坡高差值和坡度值大小分

组赋值; 河流水系来源于 1:50000 DEM 图, 对其进行欧式距离缓冲处理, 按距水系的垂直距离大小分级赋值; 地表地质灾害点密度主要来源于收集的资料和 1:50000 调查结果, 在 ArcGIS 平台进行点密度计算后进行分类赋值; 布格重力数据来源于 2011 年中国地震局编制的全国 1:4000000 布格重力异常图, 结合收集西露天矿及邻区资料在 ArcGIS 平台进行插值分析并进行量化, 然后进行分类赋值; 地形变数据来源于 2011 年中国地震局编制的全国地形变速率图 (1:4000000) 和辽宁省地形变监测结果 (吴明大等, 2004), 在 ArcGIS 平台进行插值分析并进行量化, 然后进行分类赋值。各种评价因素的赋值方法是, 首先将各评价因素划分为 5 级, 并分别进行分类赋值 1、2、4、7、10, 赋值规则遵循稳定性越好赋值越低, 反之稳定性越差赋值越高 (表 1)。需要说明的是, 此分类赋值主要依据评价因素的关联度分析和重要性进行分类赋值, 如果按照数据归一化处理的赋值方法, 各因子的数据均应介于 0~1 之间, 但因在 ArcGIS 中进行分类赋值时只能输入整数, 因此各类评价因素参考层次分析法按五类分别进行分类赋值 1、2、4、7、10。

### 4 区域地壳稳定性评价

首先采用专家经验打分法获得各评价因子的权值(表1), 建立如下稳定性评价计算模型。

$$WD = "duanlie" \times 0.15 + "dizhen" \times 0.13 + "dizhenq" \times 0.12 + "yanzu" \times 0.11 + "zhongli" \times 0.09 + "xingbian" \times 0.07 + "shuixi" \times 0.06 + "podu" \times 0.07 + "gaocha" \times 0.05 + "bhl" \times 0.08 + "caikong" \times 0.03 + "dlf" \times 0.04 \quad (1)$$

公式中: WD 为区域地壳稳定性指数; 其他代码含义见表1。

其次, 根据数据处理后并进行重分类赋值的数据, 在 ArcGIS 平台转化为栅格数据, 按照上式的稳定性评价计算模型得到研究区的定量评价指数结果。定量化计算数值结果处于 1.08~6.33, 按照自然断点法将评价结果分成四个稳定性级别, 即稳定区、次稳定区、次不稳定区、不稳定区, 最后得到区域地壳稳定性定量化评价结果(图3), 利用 ArcGIS 平台统计得到各稳定性级别的分区面积(表2)。

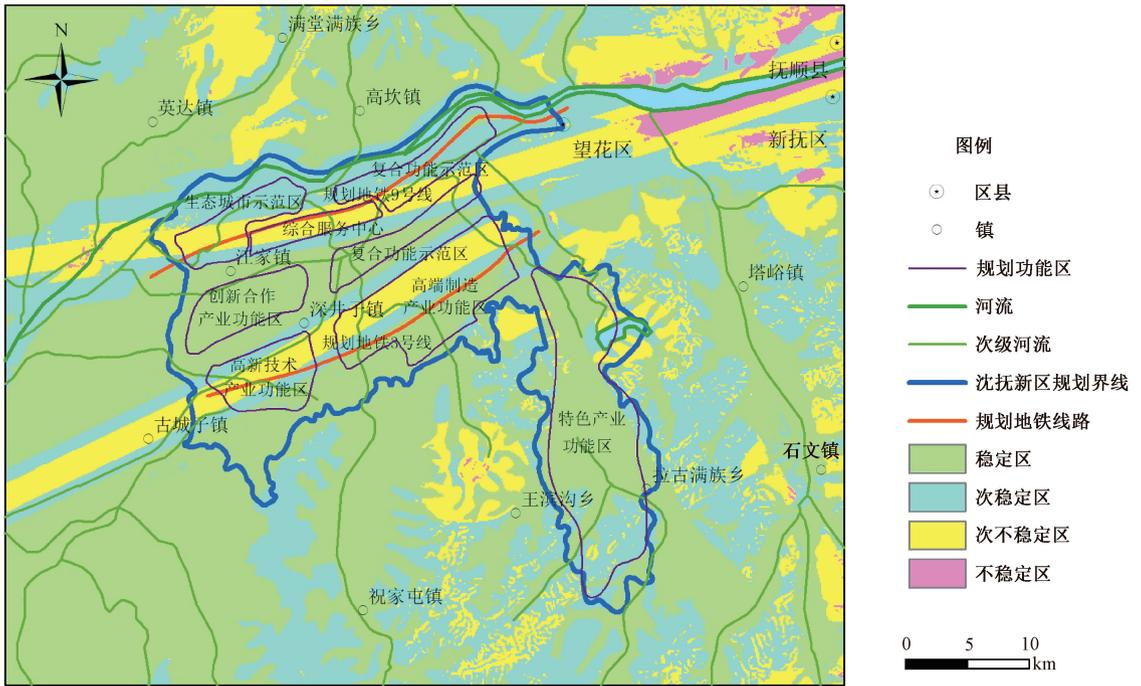


图3 沈抚新区区域地壳稳定性定量评价结果图

Fig. 3 Results of quantitative assessment for regional crustal stability in Shenfu New area

表2 沈抚新区区域地壳稳定性定量评价分区结果统计表

Table 2 Zoning results of the quantitative assessment of the regional crustal stability in Shenfu New area

稳定程度	面积/km <sup>2</sup>	占全区面积比/%
稳定区	454.74	50.58
次稳定区	274.16	30.49
次不稳定区	154.82	17.22
不稳定区	15.36	1.71
合计	899.08	100.00

定量化评价结果表明, 沈抚新区以稳定区和次稳定区为主, 总体稳定性较好。研究区总面积为 899.08 km<sup>2</sup>。其中稳定地区面积为 454.74 km<sup>2</sup>, 约占总面积的 50.58%; 次不稳定地区面积为 274.16 km<sup>2</sup>, 约占总面积的 30.49%; 次稳定地区面积为 154.82 km<sup>2</sup>, 约占总面积的 17.22%; 不稳

定地区面积为 15.36 km<sup>2</sup>, 约占总面积的 1.71%。

稳定区和次稳定区主要分布在平原区、东北部和东南部坚硬基岩山区与平原区活动断裂带所围限的地块等区域, 其总面积为 728.9 km<sup>2</sup>, 占总面积的 81.07%, 涵盖了生态城市示范区大部、复合功能示范区大部、创新合作产业功能区、复合功能示范区、高新技术产业功能区大部、高端制造产业功能区大部、特色产业功能区等主要区域。该区的主要工程地质问题以河岸崩塌、地下水弱腐蚀和局部发育地裂缝为主, 属低风险灾害特征, 在采取适当工程措施后适宜进行工程建设, 属工程建筑条件较好的地区。不稳定区和次不稳定区主要分布在活动断裂带内及其周边、西露天矿四周和其他地形陡变带, 合计面积为 170.18 km<sup>2</sup>,

占总面积的 18.93%，涵盖了生态城市示范区局部、复合功能示范区局部、综合服务中心大部、高新技术产业功能区局部、高端制造产业功能区局部和特色产业功能区零星区域。该区的工程地质问题以相对发育的河岸崩塌、滑坡、地面沉陷和地裂缝等为主，不适宜建设重大工程建筑，属工程地质条件相对较差区域。但并不是所有工程都不可以建设，其中次不稳定区在采取工程防治措施和设计高强度抗震设防措施后可进行一般工程施工，而不稳定区则不宜开展工程建筑，建议考虑作为旅游休闲区或绿化园林等功能区进行开发。

## 5 结论与建议

(1) 选取包括活动断裂、地震动峰值加速度、工程岩组、重力异常、地震活动强度、地形变、水系、地形坡度、地形高差和三类地质灾害点密度等 12 个因素作为沈抚新区区域地壳稳定性评价因子，将区域地壳稳定性划分为四级，评价结果表明研究区以稳定和次稳定区为主，面积为 728.9 km<sup>2</sup>，占总面积的 81.07%。

(2) 沈抚新区不同规划区的区域地壳稳定性不同，主要受到距离断裂活动带的垂直距离的影响，在断裂活动带内及其影响区稳定性较差，在离断裂活动带较远的区域稳定性较好。建议在不稳定区和次不稳定区进行工程建设时，要采取必要的工程措施和设计较强的抗震强度，确保基础和边坡的稳定性，特别是规划的地铁等地下工程开挖隧道时，要采用高强度的支护措施，保施工安全和工程运营安全。

(3) 规划的地铁 9 号线主要穿越次不稳定区和次稳定区。施工带在埋深 15~25 m 之间，该段地层主要为卵砾石堆积层、泥包砾堆积层与变质片麻岩强风化带及其交接部位。其洞室开挖施工难度比较大，支护比较困难，建议尽早确定合理的施工方案，保障施工顺利和安全。施工带处于地下水浸没带或变动带，还需要进行一定降水防腐措施。

(4) 沈抚新区规划建设过程中应尽量避免开活动断裂，建议将不稳定区和次不稳定区规划为绿化带或公园等用地，有效减少工程预算和经费投入。

## References

- CHEN Q X, DAI G X, YANG C Q, et al. 1990. Assessment of the crustal stability of the Shenzhen city, Guangdong province, China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Science; 134. (in Chinese)
- CHEN W T, GAN W J, XIAO G R, et al. , 2012. The impact of 2011 Tohoku-Oki earthquake in japan on crustal deformation of northeastern region in China [J]. Seismology and Geology, 34 (3): 425-439. (in Chinese with English abstract)
- China Seismological Bureau, 2012. Zoning map of peak acceleration of ground motion in China (1:4000000) (GB 18306-2015) [M]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)
- DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al. , 2002. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46 (4): 356-372.
- DU D J, 1994. Establishment and development of regional stability engineering geology in Chinese [J]. Journal of Engineering Geology, 2 (3): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- DU J J, MA Y S, TAN C X, et al. , 2008. The evaluation of regional crustal stability in Beijing and Tianjin Area [J]. Acta Geoscientia Sinica, 29 (4): 502-509. (in Chinese with English abstract)
- GU D Z, 1979. Fundamentals of geology and mechanics in rock engineering [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- GUO F F, YANG N, MENG H, et al. , 2008. Application of the relief amplitude and slope analysis to regional landslide hazard assessments [J]. Geology in China, 35 (1): 131-143. (in Chinese with English abstract)
- HOU Z H, ZHONG N C, HOU Y K, et al. , 2006. Study on neotectonic stress field and present tectonic stress field in the Hunhe fault belt and its adjacent areas [J]. Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, 8 (4): 6-9, 63. (in Chinese with English abstract)
- HU H T, 1983. Preliminary application of a relatively stable (rock) block in site selection of Guangdong nuclear power station [J]. Geotechnical Investigation & Surveying (4): 25-29. (in Chinese)
- HU H T, 2001. The theory and method of evaluation of regional crustal stability based on concept of "Safe Island" [J]. Journal of Geomechanics, 7 (2): 97-103. (in Chinese with English abstract)
- LI T, CAI M F, ZUO Y, et al. , 2005. Futrues of focal Mechanisms of mining-induced earthquakes: a case study of the Fushun Laohutai coal mine, Liaoning Province [J]. Geological Bulletin of China, 24 (2): 136-144. (in Chinese with English abstract)
- Liaoning Station for Geo-environment Monitoring, 2014. Report on geological hazard survey and reviews in Shenyang city [R]. (in Chinese)
- LIU C Z, HU H T, 1993. The " Safety Island" theory by multi-scale approaching and optimum seeking in engineering site selection [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 4 (1): 28-37, 62. (in Chinese with English abstract)
- MA X Y, 1989. Lithospheric dynamics atlas of China [M]. Beijing:

- China Cartographic Publishing House. (in Chinese)
- PENG J B, 2001. Theory-method system in study of dynamics of the regional stability [J]. *Journal of Engineering Geology*, 9 (1): 3-11. (in Chinese with English abstract)
- SUN D S, CHEN Q C, ZHANG Y Q, 2020. Analysis on the application prospect of ASR in-situ stress measurement method in underground mine [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (1): 33-38. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, SUN Y, WU S R, et al., 2009. A consideration on regional crustal stability assessment after  $M_s 8.0$  WENCHUAN strong earthquake in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 15 (2): 142-150. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, FENG C J, ZHANG P, et al., 2014. Major active fracture research and regional crustal stability assessment in Beijing municipality [M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- TANG H M, LI D W, HU X L, 2009. Faulting characteristics of Wenchuan earthquake and evaluation theory of regional crustal stability for engineering [J]. *Journal of Engineering Geology*, 17 (2): 145-152. (in Chinese with English abstract)
- Team ten of Liaoning province geological breach, 2014. Report on geological hazard survey and reviews in Fushun city [R]. (in Chinese)
- WAN B, ZHAO X H, HOU J J, 2010. Determination of seismogenic structure for the Shenyang  $M 5 \frac{1}{2}$  earthquake in 1765 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46 (4): 620-628. (in Chinese with English abstract)
- WANG S X, ZHANG Q Y, WANG Z, et al., 2008. Relationship between Hunhe fault (Fushun section) short-term activity and geological disaster [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 19 (4): 12-15. (in Chinese with English abstract)
- WENG J Q, ZENG L B, LYU W Y, et al., 2020. Width of stress disturbed zone near fault and its influencing factors [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (1): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- WU M D, ZHONG Y Z, GAO C B, et al., 2004. Activity research on Hunhe fracture (Shenyang-Fushun section) [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 20 (1): 25-32. (in Chinese with English abstract)
- XIANG J H, 2006. The application of GIS in regional crustal stability assessment in China [J]. *Shanxi Architecture*, 32 (4): 116-117. (in Chinese with English abstract)
- YANG J J, XIE Z Q, ZHENG N P, 2004. Application of the fuzzy clustering analysis in the evaluation of regional crustal stability in Xi'an city [J]. *Journal of Geomechanics*, 10 (1): 57-64. (in Chinese with English abstract)
- YANG Q Y, MA X, LI Z Z, et al., 2006. Evaluation of crustal stability in the lower Yellow River region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (S): 168-177. YAO X, LI L J, ZHANG Y S, et al., 2015. Regional crustal stability assessment of the eastern margin of Tibetan Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 34 (1): 32-44. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 1985. Fuzzy comprehensive evaluation of regional crustal stability: Taking the site of Guangdong nuclear power station as an example [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying* (5): 31-34. (in Chinese)
- YIN Y P, HU H T, KANG H D, 1996. An expert system of regional crustal stability evaluation of the siting of key engineering works [J]. *Geological Review*, 42 (2): 174-186. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46 (2): 13-24.
- ZHANG S X, YANG W M, MENG H J, et al., 2018. Regional crustal stability evaluation in Beijing-Zhangjiakou area [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (1): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Z, 2001. Restudy of the Shenyang earthquake of  $M 5 \frac{1}{2}$  of March 15, 1765 [J]. *Seismological Research of Northeast China*, 17 (3): 42-45. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU F C, 2014. Analysis of influence of site geological condition on seismic damage effect [J]. *China Science and Technology Review* (7): 336. (in Chinese) ZUO J, KONG Q R, ZUO S, 2007. Evaluation of engineering geology of regional stability in the fault of Hunhe River [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2003, 22 (4): 103-107. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈庆宣, 戴广秀, 杨超群, 等, 1990. 深圳市地壳稳定性评价研究 [J]. *中国地质科学院院报*: 134.
- 陈为涛, 甘卫军, 肖根如, 等, 2012. 3·11日本大地震对中国东北部地区地壳形变态势的影响 [J]. *地震地质*, 34 (3): 425-439.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2002. 中国活动构造基本特征 [J]. *中国科学 (D辑)*, 32 (12): 1020-1030.
- 杜东菊, 1994. 中国区域稳定工程地质学产生与发展 [J]. *工程地质学报*, 2 (3): 21-26.
- 杜建军, 马寅生, 谭成轩, 等, 2008. 京津地区区域地壳稳定性评价 [J]. *地球学报*, 29 (4): 502-509.
- 谷德振, 1979. 岩体工程地质学力学基础 [M]. 北京: 科学出版社.
- 郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等, 2008. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用 [J]. *中国地质*, 35 (1): 131-143.
- 侯治华, 钟南才, 侯逾昆, 等, 2006. 辽宁浑河断裂带及其邻近地区水系格局构造节理与构造应力场的研究 [J]. *防灾科技学院学报*, 8 (4): 6-9, 63.
- 胡海涛, 1983. “安全岛”-相对稳定地(岩)块在广东核电站选址中的初步应用 [J]. *工程勘察* (4): 25-29.
- 胡海涛, 2001. 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*, 7 (2): 97-103.
- 李铁, 蔡美峰, 左艳, 等, 2005. 采矿诱发地震的震源机制特征: 以辽宁省抚顺市老虎台煤矿为例 [J]. *地质通报*, 24 (2): 136-144.
- 辽宁省地质环境监测总站, 2014. 沈阳市地质灾害隐患点排查与复核成果报告 [R].
- 辽宁省第十地质大队, 2014. 抚顺市地质灾害隐患点排查与复核成果报告 [R].
- 刘传正, 胡海涛, 1993. 工程选址的“安全岛”多级逼近与优选理

- 论 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 4 (1): 28-37, 62.
- 马杏垣, 1989. 中国岩石圈动力学地图集 [M]. 北京: 中国地图出版社.
- 彭建兵, 2001. 区域稳定动力学研究 (一): 理论与方法体系 [J]. 工程地质学报, 9 (1): 3-11.
- 孙东生, 陈群策, 张延庆, 2020. ASR 法在井下矿山地应力测试中的应用前景分析 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 33-38.
- 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等, 2009. “5.12”汶川  $M_s 8.0$  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, 15 (2): 142-150.
- 谭成轩, 丰成君, 张鹏, 等, 2014. 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.
- 唐辉明, 李德威, 胡新丽, 2009. 龙山门断裂带活动特征与工程区域地壳稳定性评价理论 [J]. 工程地质学报, 17 (2): 145-152.
- 万波, 赵晓辉, 侯建军, 2010. 1765 年沈阳  $5\frac{1}{2}$  级地震发震构造判定 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 46 (4): 620-628.
- 王声喜, 张庆义, 王卓, 等, 2008. 浑河断裂带 (抚顺段) 近期活动性与地质灾害的关系 [J]. 地质灾害与环境保护, 19 (4): 12-15.
- 翁剑桥, 曾联波, 吕文雅, 等, 2020. 断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 39-47.
- 吴明大, 钟以章, 高常波, 等, 2004. 浑河断裂 (沈阳-抚顺段) 活动性研究 [J]. 东北地震研究, 20 (1): 25-32.
- 相建华, 2006. GIS 在中国区域地壳稳定性评价中的应用 [J]. 山西建筑, 32 (4): 116-117.
- 杨建军, 谢振乾, 郑宁平, 2004. 模糊聚类分析在西安市区域地壳稳定性评价中的应用 [J]. 地质力学学报, 10 (1): 57-64.
- 杨勤业, 马欣, 李志忠, 等, 2006. 黄河下游地区地壳稳定性评价 [J]. 科学通报, 51 (S): 140-147.
- 姚鑫, 李凌婧, 张永双, 等, 2015. 青藏高原东缘区域地壳稳定性评价 [J]. 地质通报, 34 (1): 32-44.
- 殷跃平, 1985. 区域地壳稳定性的模糊综合评判: 以广东核电站选址为例 [J]. 工程勘察 (5): 31-34.
- 殷跃平, 胡海涛, 康宏达, 1996. 区域地壳稳定性评价专家系统研究 [J]. 地质论评, 42 (2): 174-186.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (S1): 12-20.
- 张树轩, 杨为民, 孟华君, 等, 2018. 京张地区区域地壳稳定性评价 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 70-77.
- 赵振, 2001. 1765 年沈阳  $M5\frac{1}{2}$  地震的再研究 [J]. 东北地震研究, 17 (3): 42-45.
- 中国地震局, 2015. 中国地震动峰值加速度区划图 (1:4000000) (GB 18306-2015) [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 周福彩, 2014. 场地地质条件对地震震害效应的影响分析 [J]. 中国科技博览 (7): 336.
- 左建, 孔庆瑞, 左莎, 2003. 浑河断裂带区域稳定性评价 [J]. 重庆交通学院学报, 22 (4): 103-107.

### 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

