

京张地区区域地壳稳定性评价

张树轩^{1,2}, 杨为民¹, 孟华君¹, 张向营¹, 李焕斌²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 在野外调查和广泛收集资料的基础上, 分析了控制和影响京张地区区域地壳稳定性的主要因素及内外动力地质的耦合作用。选取活动断裂、地震活动性和深部地球物理等因素, 同时选取工程岩组、地形地貌与地表地质灾害等 11 个因素作为评价因子, 并对评价因子进行了分类赋值。采用多因素加权叠加分析方法, 建立了区域地壳稳定性评价模型, 基于 GIS 平台对京张地区的区域地壳稳定性进行了量化评价, 将研究区划分为稳定区、次稳定区、次不稳定区和不稳定区 4 个等级。依据区域地壳稳定性评价结果, 为京张高速铁路、云顶滑雪场、石京龙滑雪场的建设和运营提出相关建议, 为京张地区国土规划提供了基础依据。

关键词: 京张地区; 京张高速铁路; 云顶滑雪场; 石京龙滑雪场; 多因子加权叠加法; 区域地壳稳定性评价

中图分类号: P694

文献标识码: A

REGIONAL CRUSTAL STABILITY EVALUATION IN BEIJING-ZHANGJIAKOU AREA

ZHANG Shuxuan^{1,2}, YANG Weimin¹, MENG Huajun¹, ZHANG Xiangying¹, LI Huanbin²

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

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: On the basis of field investigation and extensive collection of information, the main factors of controlling and influencing regional crustal stability and the coupling action of internal and external dynamic geology are analyzed. Active fracture, seismicity and deep geophysics are selected as the main influencing factors of regional stability. At the same time, 11 factors, including engineering rock group, topography and surface geological hazards, are selected as evaluation factors and assigned according to category. The regional crustal stability evaluation model is established by multi-factors weighted superposition analysis method. Based on the GIS platform, the regional crust stability in Beijing-Zhangjiakou area is quantitatively evaluated, in which the research region are divided into 4 grades, including stable region, substable region, subunstable region and unstable region. According to the evaluation results of regional crustal stability, relevant suggestions are put forward for the construction and operation of the Beijing-Zhangjiakou high-railway, Yun Ding Shan Ski Slope and Shi Jing Long Ski Slope, which provides the basis for territorial planning of Beijing-Zhangjiakou area.

Key words: Beijing-Zhangjiakou area; Beijing-Zhangjiakou high-railway; Yun Ding Shan Ski Slope; Shi Jing Long Ski Slope; multi-factors weighted superposition method; regional crustal stability

0 引言

区域地壳稳定性是指工程建设地区在内、外动力(以内动力为主)作用下, 现今地壳及其表层的相对稳定程度以及这种稳定程度与工程建设之间的相互作用和影响^[1], 总体上主要考虑活动构造、岩土体条件及表生外动力作用等三方面的因素。自 20 世纪 60 年代区域地壳稳定性评价理论初步形成, 80 年代至 20 世纪末区域地壳稳定性评价理论逐渐完善和系统化, 而且呈现多学科发展的趋势, 评价方法也由定性化转为定量化。目前区域地壳稳定性评价仍未形成全国统一标准, 总体来看主要评价方法包括经验定性评价法、模糊评判法、主因素判断法、半定量评价法等^[2-9]。近年来计算机应用深入推广, 部分学者开始采用多因子叠加分析评价方法^[10]以及基于 GIS 平台的栅格运算评价方法^[11]。

随着北京和张家口联合申办 2022 年冬季奥运会成功, 京张高铁和冬奥会场地已于 2016 年开工建设, 但京张地区活动断裂和地质灾害发育, 可能对即将竣工的奥运工程设施带来负面影响。以往除少数学者曾对北京地区的区域地壳稳定性进行过研究之外^[12-13], 对京张地区的地壳稳定性研究开展较少。京张地区区域地壳稳定性问题成为重大工程亟待解决的问题之一。因此, 文章基于多因子加权叠加分析评价法, 利用 GIS 平台对京张地区范围进行了区域地壳稳定性评价, 快速获得了量化的评价结果。同时依据评价结果对京张高速铁路、冬奥会场址建设和运营, 以及京张地区国土规划提出了建议。

1 区域地质环境

研究区总体地势呈西北高东南低, 中部为河谷盆地, 燕山山前华北冲积平原, 西侧属太行山山区, 盆地及河谷两侧为高阶地形成的丘陵或台地。研究区一般山顶标高在 500~1000 m 以上。基岩地层岩性主要发育新近系、古近系、白垩系、侏罗系的砂岩、泥岩、火山岩等地层, 震旦系白云质灰岩、泥灰岩、太古界的变质岩等。

根据区域构造单元划分, 全区均处于中朝准地台一级构造单元内, 跨华北断拗、燕山沉降带及内蒙地轴三个二级构造单元。北京北部平原位

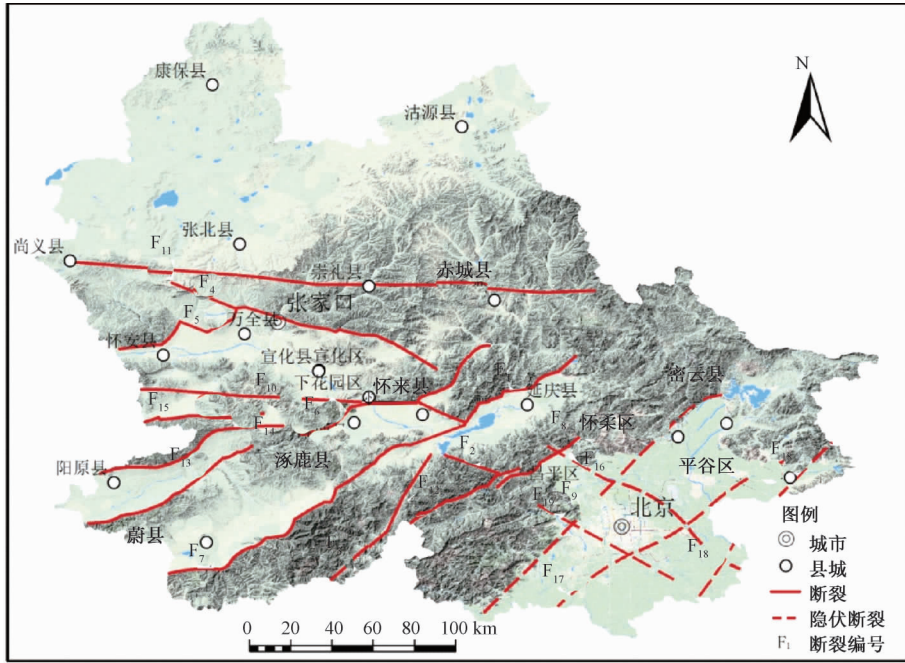
于华北断拗之西北隅, 张家口附近属内蒙地轴之南缘, 因此全区大部分地段均处于燕山沉降带内。研究区内发育多条活动断层, 大多具有继承性, 主要包括北东东向和北西西向断裂构造, 也包括近东西向断裂构造等(见图 1)。北京冬奥会场址主要位于北京市延庆区北部与张家口市崇礼县东部, 属燕山褶皱造山带。

2 区域地壳稳定性分析

控制和影响区域地壳稳定性的影响因素众多, 主要包括内动力因素、外动力因素和介质条件。内动力因素主要通过活动断裂、区域构造变形、区域构造应力场、地震活动性等参数综合反映。影响区域地壳稳定性的外动力因素通过河流侵蚀、人类活动等综合反映, 主要表现为地质灾害。无论内动力还是外动力条件, 对稳定性构成影响必须通过一定的介质条件, 地层岩性无疑是最主要的介质因素。因此, 在区域地壳稳定性综合评价过程中, 选择的指标既要能够较好地反映上述因素, 又要尽可能定量化, 还要尽可能的避免因素或指标之间的重叠, 这也是地壳稳定性评价问题量化的难点之一。故上述评价因素相互关联, 特别是断裂活动性和地震活动的关系尤为密切, 对区域地壳稳定性的影响也更为显著和直接。

2.1 主要活动断裂与地震活动性分析

京张地区不同时期构造作用相互叠加, 构造行迹错综复杂, 岩体破碎。断裂构造纵横分布, 大多数断裂现今活动仍比较强烈, 地震活动频繁。京张地区活动断裂以北西—北西西向和北东—北东东向活动断裂为主, 并控制了一系列晚新生代沉积盆地。北西—北西西向活动断裂具有明显的正断兼左旋走滑特征, 北东—北东东向活动断裂主要以正断活动为主^[14-15]。北西—北西西向断裂在盆地中多呈隐伏状分布, 其活动时间较北东—北东东向断裂较新, 活动性较强。张家口断裂、延矾盆地北缘断裂、怀涿盆地北缘断裂、昌平南口山前断裂等均为强活动断裂。沿张家口断裂 1998 年 1 月 10 日曾发生张北县西 $M_s 6.3$ 级地震。研究区地震动峰值加速度均在 $0.05g$ 以上, 中部和东南部地区可达 $0.2g$ 。研究区内有史记载以来共发生大于 4 级以上的地震共 49 次。其中 6 级以上地震 10 次, 5—6 级地震 17 次, 4—5 级地震 22 次(见图 2)。



F₁—延矾盆地北缘断裂；F₂—施庄断裂；F₃—孙庄子-乌龙沟断裂；F₄—张家口断裂；F₅—怀安-万全盆地北缘断裂；F₆—怀涿盆地北缘断裂；F₇—蔚县盆地南缘断裂；F₈—南口山前断裂；F₉—黄庄-高丽营断裂；F₁₀—宣化盆地南缘断裂；F₁₁—崇礼-尚义断裂；F₁₂—沿河城-紫荆关断裂；F₁₃—六棱山南麓断裂；F₁₄—阳原盆地北缘断裂；F₁₅—六棱山北麓断裂；F₁₆—南口-孙河断裂；F₁₇—通县-南苑断裂；F₁₈—夏垫-马坊断裂；F₁₉—门头沟-大兴断裂

图 1 京张地区区域构造略图

Fig. 1 Regional tectonic sketch in Beijing-Zhangjiakou area

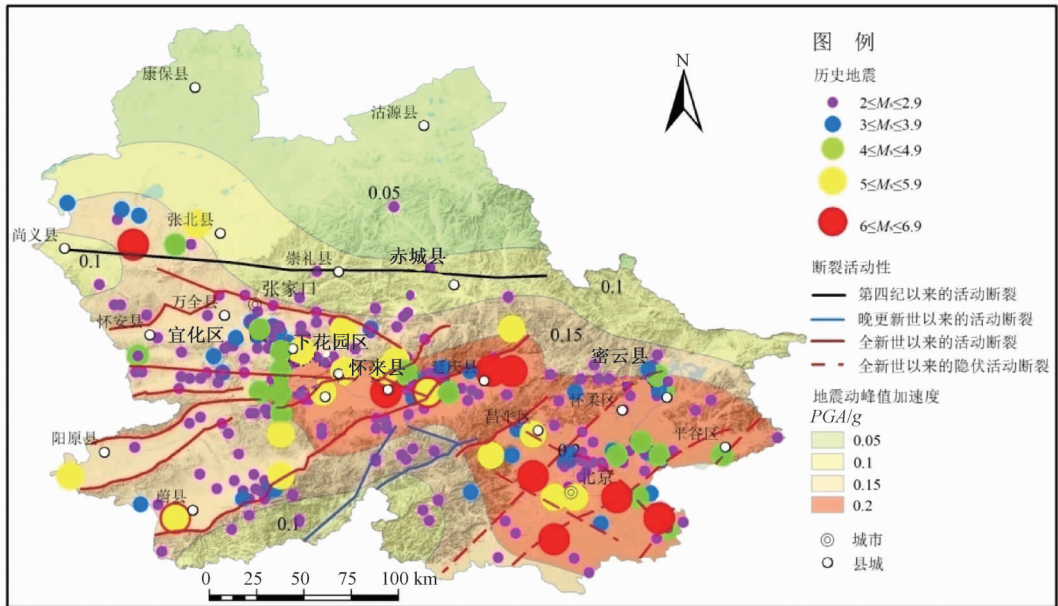


图 2 京张地区断裂活动性与地震分布图

Fig. 2 Fault activity and seismic distribution in Beijing-Zhangjiakou area

2.2 区域构造变形和区域构造应力场分析

研究区地表形变速率在不同地区差异较大，在活动构造和人类抽取地下水等作用下，本区主要表现为

基岩山区地表抬升，而平原区和盆地地区地表下降，近年的平均变形速率为 -25 ~ 12 m/a。研究区现今构造应力场主压应力方向北东东—东西向，以北东东—东

西向挤压和北北西—南北向拉伸为主要特征^[14], 这也控制了前述活动断裂的运动方式。但是北东—北东东向断裂由晚中生代强烈的挤压逆冲转变为上新世以来正断活动, 表明该区历史上主压应力方向曾发生过变化。华北地区中—新生代区域性挤压、伸展以及区域构造演化过程, 揭示了京张地区由晚中生代东亚大陆多向汇聚体系转变为新近纪以来印度和欧亚板块碰撞引发的软流圈向东扩张效应和太平洋俯冲带的跃迁

式东撤的联合效应这一过程。

2.3 主要地质灾害分析

研究区地质灾害以泥石流为主, 主要分布在基岩山区及山区与盆地交接部位。滑坡崩塌主要分布在基岩山区、沟谷岸坡及人类工程活动造成切坡强烈的地区。采空塌陷主要分布于井下开采煤矿和铁矿地区。地裂缝主要分布在活动构造强烈且抽取地下水强烈的地区 (见图 3)。

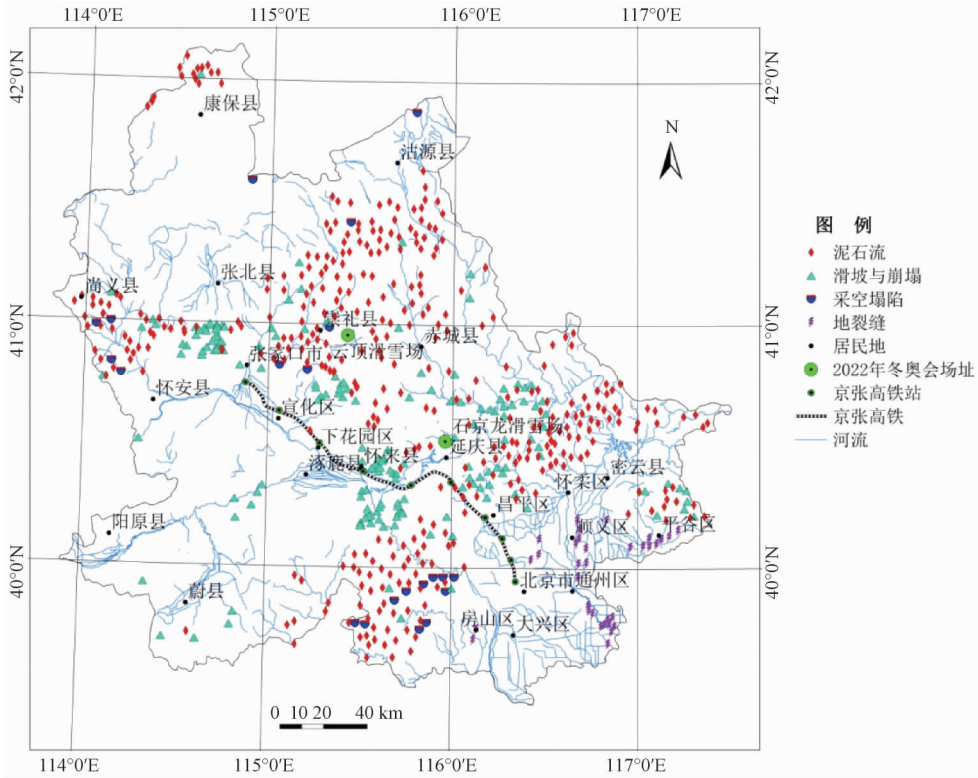


图 3 京张地区地质灾害分布图

Fig. 3 Geological hazard distribution in Beijing-Zhangjiakou area

京张高铁沿线在怀来县城东部地区发育崩塌和泥石流灾害, 在昌平西北部山区也发育泥石流和崩塌灾害, 高铁穿越多条河流, 存在河岸崩塌和滑坡现象, 于该地段内存在地质灾害的威胁。

北京市延庆区石京龙滑雪场坐标为 $40^{\circ}31'20''N$ 、 $115^{\circ}57'44''E$, 位于一个老冲积扇上。沟谷主流方向为 200° , 沟口处转为 160° , 山坡坡度为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 岩性以震旦系 (Z_1w) 白云质灰岩为主, 产状为 $60^{\circ} \angle 20^{\circ}$, 冲积扇长 450 m, 宽 400 m, 厚度约 15 ~ 20 m。目前仅在冲积扇上局部植有树木, 在上游和山坡上植被较少, 野外勘察时该区正在进行滑雪场建设, 没有见明显新的泥石流形成的冲积扇 (见图 4a、4b)。

张家口市崇礼县云顶滑雪场坐标 $40^{\circ}57'18''N$ 、

$115^{\circ}25'34''E$ 。地貌属基岩山区, 岩性以花岗岩为主, 冲沟发育, 山坡坡度为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 场址北侧 3 km 处为崇礼近东西向断裂带, 发育 4 ~ 5 条断裂, 断裂附近岩体节理发育, 植被覆盖率可达 85%, 调查时场址正在进行滑雪场建设, 未见明显新的崩塌、滑坡和泥石流灾害 (见图 4c、4d)。

3 区域地壳稳定性评价

3.1 区域地壳稳定性评价指标选取与量化

依据研究区与周边的地质环境进行综合分析, 针对研究区地质环境条件特点, 主要选取与地震效应和地质灾害密切相关的活动断裂、地震动峰值加速度、布格重力异常、工程岩组、边坡高差、



a—石京龙滑雪场滑道地貌与泥石流冲积扇；
b—石京龙滑雪场泥石流沟沟口；c—云顶山滑雪场滑道地貌；
d—云顶山滑雪场运动员公寓人工切坡

图4 奥运会滑雪场地貌及地质灾害

Fig. 4 Topography and geological hazards of Olympic ski slope

边坡坡度、河流水系发育程度、地形变速率、地质灾害密度（包括崩滑流密度、采空塌陷密度和地裂缝密度）等11种因素参与区域地壳稳定性评价（见表1）。其中内动力因素主要选取活动断裂、地震动峰值加速度、布格重力异常等因素来表征，外动力因素主要选取斜坡高差、斜坡坡度、河流水系发育程度来表征，内动力和人类活动共同控制的因素主要选取地形变速率、采空塌陷密度和地裂缝密度来表征，岩体介质用工程岩组特征来表征。

此次评价以 ArcGIS 软件作为平台，根据各因素对地壳稳定性的实际影响情况与专家经验打分法^[16]相结合的原则确定各因素的权值并对各评价因素赋值，最终进行叠加分析。因此，首先需要

表1 稳定性评价因素分类赋值标准及权重表

Table 1 Classification valuation criteria and weight of stability evaluation factors

稳定性分级	极高	高	中	低	极低	权值	代码
活动断裂（垂距/m）	>4000	2000~4000	1000~2000	500~1000	<500	0.15	fault
地震动峰值加速度/（g/m·s ⁻² ）	<0.05	0.05~0.10	0.10~0.15	0.15~0.20	0.20~0.30	0.13	dizhen
工程岩组	坚硬块状侵入岩、深变质岩岩组	坚硬火山碎屑岩、坚硬碳酸盐岩岩组	软硬相间碎屑岩、软硬相间碳酸盐岩、软硬相间变质岩组	软弱层状碎屑岩岩组	松散冲洪积物岩组	0.11	yanzu
布格重力/10 ⁻⁵ m·s ⁻²	10~10	-10~-30	-30~-60	-60~-100	-100~-175	0.10	zhongli
地形变/（mm/a）	-2~2	-2~-4, 2~4	-4~-7, 4~7	-7~-10, 7~10	-10~-25, 10~12	0.08	xingbian
水系（垂距/m）	>4000	2000~4000	1000~2000	500~1000	<500	0.06	shuixi
斜坡坡度/°	0~5	5~10	10~15	15~20	20~32.43	0.07	eleve-s
斜坡高差/m	0~200	200~400	400~800	800~1600	1600~3000	0.05	eleve-h
崩滑流灾点密度/（处/km ² ）	<0.03	0.03~0.09	0.09~0.18	0.18~0.31	0.31~0.7	0.08	bhlt
采空塌陷点密度/（处/km ² ）	<0.02	0.02~0.07	0.07~0.16	0.16~0.26	0.26~0.38	0.04	caikong
地裂缝点密度/（处/km ² ）	<0.04	0.04~0.19	0.19~0.42	0.42~0.76	0.76~1.23	0.05	dlf
赋值	1	2	4	7	10		

对相应的各因素数据进行处理以便于计算，具体数据来源和数据处理方法如下：

研究区总面积为 $5.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，范围较大，故计算单元按 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 选取，可基本达到 1:5 万精度；依据 1:20 万地质图和活动断裂调查成果，将活动断裂进行欧式距离缓冲处理，按距断裂的垂直距离分级赋值；依据 1:5 万地形图，在 ArcGIS 平台进行空间分析得到斜坡高差与斜坡坡度；按照岩石抗压性及承载能力的岩石力学性质对工程岩组进行分类；依据 1:5 万地形图对河流水系进行欧式距离缓冲处理；地表地质灾害依据收集资料和调查结果按点密度进行计算处理；依据 2011 年中国地震局地震动峰值加速度标准图（1:400 万）^[17] 获得地震动峰值加速度值；布格重力依据 2011 年中国地震局编制的全国 1:400 万布格重力

异常图获得；地形变依据 2011 年中国地质调查局编制的华北地面沉降速率图（1:250 万）和中国地震局编制的全国地形变速率图（1:400 万）综合分析获得。将各类评价要素按照本文制定的分级标准分为五类，并分别进行赋值 1、2、4、7、10，稳定性越差赋值越高（见表 1）。

3.2 区域地壳稳定性评价结果

采用专家经验打分法^[16] 获得各评价因子的权值（见表 1），依据多因子加权叠加法建立如下稳定性评价计算模型。

$$WD = \text{"fault"} \times 0.15 + \text{"dizhen"} \times 0.13 + \text{"yanzu"} \times 0.11 + \text{"zhongli"} \times 0.10 + \text{"xingbian"} \times 0.08 + \text{"shuixi"} \times 0.06 + \text{"eleve-s"} \times 0.07 + \text{"eleve-h"} \times 0.05 + \text{"bhlt"} \times 0.08 + \text{"caikong"} \times 0.04 + \text{"dlf"} \times 0.05$$

根据数据处理的结果, 按照稳定性评价计算模型得到研究区的定量评价结果。量化计算数值结果处于 2.09 ~ 7.9 之间, 按照自然断点法将评

价结果分成四个稳定性级别, 得到区域地壳稳定性量化评价结果 (见图 5) 和各稳定性分区面积 (见表 2)。

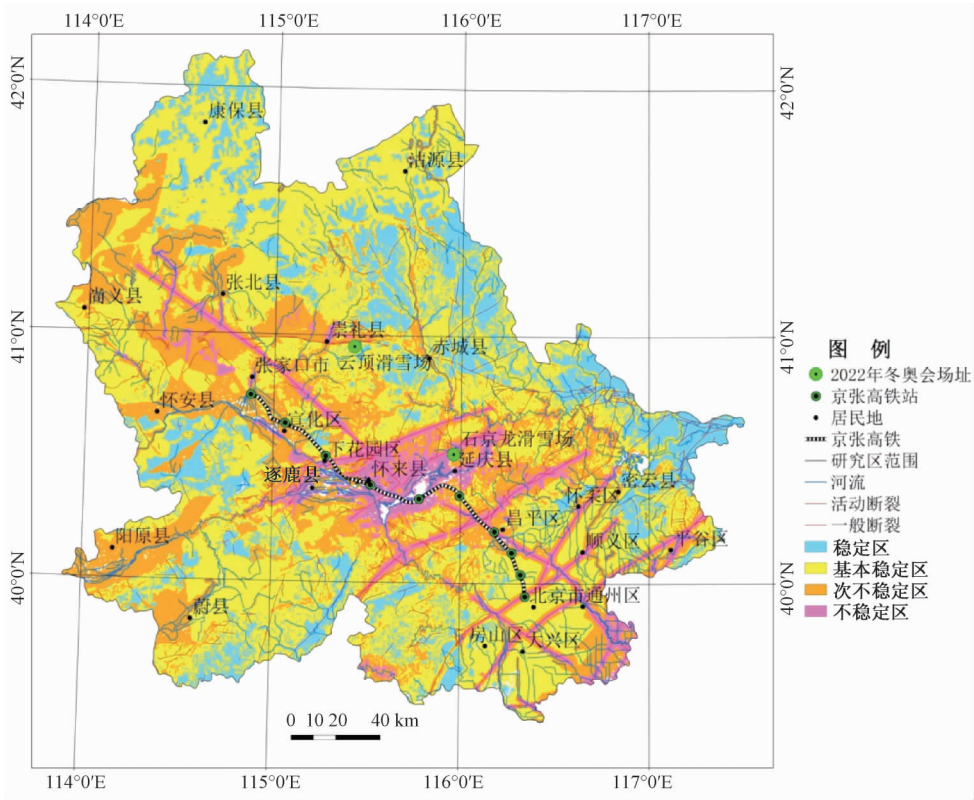


图 5 京张地区区域地壳稳定性定量评价结果图

Fig. 5 Quantitative evaluation of regional crustal stability in Beijing-Zhangjiakou area

表 2 京张地区区域地壳稳定性定量评价分区表

Table 2 Regional crustal stability quantitative evaluation zoning description in Beijing-Zhangjiakou area

稳定程度	面积/km ²	占全区面积比/%
稳定区	9482	18.02
基本稳定区	24369	46.32
次不稳定区	14596.5	27.75
不稳定区	4161	7.91
合计	52608.5	100.00

根据量化评价结果, 研究区总面积为 52608.5 km²。其中稳定地区面积为 9482 km², 约占总面积的 18.02%; 基本稳定地区面积为 24369 km², 约占总面积的 46.32%; 次不稳定地区面积为 14596.5 km², 约占总面积的 27.75%; 不稳定地区面积为 4161 km², 约占总面积的 7.91%。

依据区域地壳稳定性评价结果分析, 研究区以稳定和基本稳定区为主, 总面积为 33851 km², 约占总面积的 64.34%。稳定区和基本稳定区主要位于距离断裂带较远的地区, 地貌主要为平原或

高原、盆地和基岩山区, 工程地质条件比较好, 地质灾害以崩塌、滑坡、泥石流相对发育, 局部发育地裂缝, 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附近和地形陡变带, 地貌主要为基岩山区, 其次为平原区或盆地, 地质灾害以崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝等比较发育为特征, 工程地质条件相对较差, 不适宜建设重大建筑。但在次不稳定区采取较强抗震设防强度并采取其他工程加固措施后方可进行一般工程施工, 而在不稳定区则不宜开展工程建设。

京张高铁穿越的不稳定区和次不稳定区主要位于南口山前断裂、延矾盆地北缘断裂、怀涿盆地北缘断裂等附近的地段, 高铁施工时需要采取必要的边坡加固和护坡等工程措施, 保证路基与边坡稳定性, 特别是在断裂带附近修建隧道时, 要采高强度的支护措施, 保障隧道不会产生变形破坏和岩爆现象。在怀来县城东部地区可能会受

到崩塌和泥石流灾害的影响,在昌平西北部山区也可能受到泥石流和崩塌灾害的影响,因此在该地区应注意加强地质灾害的防治工作。崇礼冬奥会云顶滑雪场、延庆冬奥会石京龙滑雪场均位于基本稳定的区域内,工程条件相对较好,但石京龙滑雪场本身就是一个老的泥石流冲积扇,在采取一定的工程措施后,可保障冬奥会的场址安全和顺利成功召开。

4 结论与建议

(1) 京张地区区域地壳稳定性影响因素包括活动断裂、地震动峰值加速度、重力异常、地形变、地形高差、地形坡度、工程岩组、地形变、地质灾害点密度等。选取 11 个因素作为评价因子,采用多因素加权叠加法进行地壳稳定性评价,将研究区划分为稳定区、基本稳定区、次不稳定区及不稳定区 4 个等级。评价结果表明研究区以稳定和基本稳定区为主,面积为 33851 km²,占总面积的 64.34%。

(2) 京张高铁不同地段区域地壳稳定性不同,在靠近活动构造的部位稳定性较差,在远离活动构造的部位稳定性较好。京张高铁线路走向基本合理,建议在高铁穿越昌平南口山前断裂、延矾盆地北缘断裂、怀涿盆地北缘断裂等不稳定区和次不稳定区地段采取必要的工程措施,保证路基与边坡稳定性,特别是在断裂带附近修建隧道时,要采高强度的支护措施,保障隧道不会产生变形破坏和岩爆现象。崇礼冬奥会场址、延庆冬奥会场址均位于基本稳定的区域内,在采取一定的工程措施后,可保障冬奥会的场址安全和顺利成功召开。

(3) 京张高铁在怀来县城东部地区可能遭受到崩塌和泥石流灾害的影响,在昌平西北部山区也可能遭受到泥石流和崩塌灾害的影响,因此在这些地区应注意加强地质灾害的防治工作。石京龙滑雪场滑道原为老泥石流形成的冲积扇,建议在上游地区采取拦挡坝和植树造林进行治理。云顶滑雪场由于基岩以花岗岩为主,风化较弱,且植被覆盖度比较大,形成泥石流的可能性小,但在工程建筑时应做好边坡支护,防止发生崩塌或滑坡造成生命财产损失。

参考文献/References

- [1] 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.
HU Haitao. The theory and method of evaluation of regional crustal stability based on concept of “Safe Island” [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7 (2): 97 ~ 103. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡海涛. “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, 1983, (4): 25 ~ 29.
HU Haitao. Preliminary application of a relatively stable (rock) block in site selection of Guangdong nuclear power station [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1983, (4): 25 ~ 29. (in Chinese)
- [3] 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.
DU Dongju. Establishment and development of regional stability engineering geology in Chinese [J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2 (3): 21 ~ 26. (in Chinese with English abstract)
- [4] 谷德振. 岩体工程地质力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
GU Dezhen. Fundamentals of geology and mechanics in rock engineering [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [5] 陈庆宣, 戴广秀, 杨超群, 等. 深圳市地壳稳定性评价研究 [J]. 中国地质科学院院报, 1990, 11 (1): 134.
CHEN Qingxuan, DAI Guangxiu, YANG Chaoqun, et al. Assessment of the crustal stability of the Shenzhen city, Guangdong province, China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Science, 1990, 11 (1): 134. (in Chinese)
- [6] 殷跃平. 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, 1985, (5): 31 ~ 34.
YIN Yueping. Fuzzy comprehensive evaluation of regional crustal stability—taking the site of Guangdong nuclear power station as an example [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1985, (5): 31 ~ 34. (in Chinese)
- [7] 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.
YIN Yueping, HU Haitao, KANG Hongda. An expert system of regional crustal stability evaluation of the siting of key engineering works [J]. Geological Review, 1996, 42 (2): 174 ~ 186. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘传正, 胡海涛. 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, 1993, 4 (1): 28 ~ 37, 62.
LIU Chuansheng, HU Haitao. The “Safety Island” theory by multi-scale approaching and optimum seeking in engineering site selection [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4 (1): 28 ~ 37, 62. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [9] 杨建军, 谢振乾, 郑宁平. 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, 2004, 10 (1): 57 ~ 64.
YANG Jianjun, XIE Zhenqian, ZHENG Ningping. Application of the fuzzy clustering analysis in the evaluation of regional crustal stability in Xi' an city [J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10 (1): 57 ~ 64. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨勤业, 马欣, 李志忠, 等. 黄河下游地区地壳稳定性评价 [J]. 科学通报, 2006, 51 (S1): 140 ~ 147.
YANG Qinye, MA Xin, LI Zhizhong, et al. Evaluation of crustal stability in the lower Yellow River region [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (B11): 168 ~ 177.
- [11] 相建华. GIS 在中国区域地壳稳定性评价中的应用 [J]. 山西建筑, 2006, 32 (4): 116 ~ 117.
XIANG Jianhua. The application of GIS in regional crustal stability assessment in China [J]. Shanxi Architecture, 2006, 32 (4): 116 ~ 117. (in Chinese with English abstract)
- [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.
TAN Chengxuan, FENG Chengjun, ZHANG Peng, et al. Major active fracture research and regional crustal stability assessment in Beijing municipality [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014. (in Chinese)
- [13] 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.
DU Jianjun, MA Yinsheng, Tan Chengxuan, et al. The evaluation of regional crustal stability in Beijing and Tianjin area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29 (4): 502 ~ 509. (in Chinese with English abstract)
- [14] 谢富仁, 张红艳, 崔效锋, 等. 延怀盆地活动断裂运动与现代构造应力场 [J]. 地震地质, 2007, 29 (4): 693 ~ 705.
XIE Furen, ZHANG Hongyan, CUI Xiaofeng, et al. Active fault movement and recent tectonic stress field in Yanhuai basin [J]. Seismology and Geology, 2007, 29 (4): 693 ~ 705. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐锡伟, 邓起东. 晋北张性区盆岭构造及其形成的力学机制 [J]. 中国地震, 1988, 4 (2): 19 ~ 27.
XU Xiwei, DENG Qidong. The basin-range structure in the tensile area at the Northern part of Shanxi province and its mechanism of formation [J]. Earthquake Research in China, 1988, 4 (2): 19 ~ 27. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王磊, 张春山, 杨为民, 等. 基于 GIS 的甘肃省甘谷县地质灾害危险性评价 [J]. 地质力学学报, 2011, 17 (4): 388 ~ 401.
WANG Lei, ZHANG Chunshan, YANG Weimin, et al. Risk assessment of geohazards by using GIS in Gangu county, Gangu province [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17 (4): 388 ~ 401. (in Chinese with English abstract)
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 18306 ~ 2015 中国地震动参数区划图 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 18306 ~ 2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)