

基于震害统计的城市地下空间地震安全性评价

王强茂^{1,2)}, 李海龙¹⁾, 李廷栋¹⁾, 尹启航¹⁾, 王逸文³⁾, 范艳霞¹⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871;

3) 吉林建筑大学测绘与勘察工程学院, 长春, 130118

内容提要: 建筑物的地震安全性是城市规划和建设过程首先要回答的问题。我国城市地震安全性评价的方法理论多针对地上建筑物,而对地下空间的地震安全性研究较为薄弱,严重滞后于城市发展对地下空间的需求。活断层是诱发地震、导致建筑物破坏的直接因素。考虑到空间关系上,地下空间与断层之间的交互关系为相交或相离。因此,本文将地下空间分为两类:与断层相交的地下空间称为跨断层地下空间,远离断层的地下空间称为远离断层地下空间。本文尝试将断裂带同震地表破裂、地震峰值加速度、地震烈度等地表地震安全性评价考量的要素与地下空间埋藏深度建立联系,并在此基础上总结基于震害统计的地下空间地震安全性评价方法。最后,本文选取地下空间利用需求较高的深圳和北京地区为实例进行介绍。

关键词: 城市地下空间; 活动断层; 地震安全性; 深圳; 北京

我国地处环太平洋和青藏高原地震带上,地震活动频发(马宗晋, 1992)。严重威胁着人民群众的生命财产安全。经历了多年的地震安全性评价工作,国内外均已形成了一套针对地表场地的地震安全性评价方法(胡聿贤, 1999, 2006)。考虑到活断层是诱发地震、导致建筑物破坏的直接因素。地震多发的发达国家或地区还相继出台了相关法律法规确保避让措施的落实,如日本的《活断层法》、新西兰的《活动断层导则》、美国犹他州的《断层地表破裂危害性评价指南》等。近年来,国内学者也开展了相关研究和法规制定工作(张永双等, 2010; 徐锡伟等, 2016)。

然而这些研究成果多针对地表建筑物,而地下空间的地震安全性研究相对较少,这主要是因为学者们早期多认为地下空间具有较强的抗震能力。1995年的阪神地震对地下结构产生了非常严重的破坏后,学者才开始关注地下空间抗震研究(Li Tianbin, 2012; 杨林德, 2013)。近年来,为了应对城市发展土地不足、交通拥堵、环境恶化等重大资源环境问题(滕彦国等, 2005; 程光华等, 2018),我国城市地下空间的开发利用需求迅猛增长(程光华等,

2013, 2018; 黄敬军等, 2018)。地下建筑物的抗震问题也就成为城市建设过程中所迫切需要解决的问题。而目前国内外地下空间的地震安全性研究工作开展的相对较少,且多从场地振动响应数值模拟和模型法进行研究(周林聪等, 2005; 宋金可等, 2015)。本文则基于历史震害统计资料,尝试进行地下空间地震安全性研究工作。

活断层是诱发地震、导致建筑物破坏的要害因素,需要予以足够重视。考虑到空间关系上,地下空间与断层空间关系,只能是相交或是远离。本文将与断层相交的那部分地下空间称为跨断层地下空间,将远离断层的那部分地下空间称为远离断层地下空间。并基于历史震害统计资料,分别提出了跨断层地下空间和远离断层地下空间的地震安全性评价方法。最后,本文选择地下空间需求旺盛的深圳和北京地区作为实例分析。

1 基于活断层空间分布的城市地下空间震害分类

城市地下空间,是指城市规划区内自然形成或人工开发的空間总和(上海市政工程设计研究总院

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41872223)和中国地质调查局二级地调项目“惠州多要素城市地质调查”(编号:DD20190287)的成果。

收稿日期:2019-04-26; 改回日期:2019-08-26; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.007

作者简介:王强茂,男,1992年生,博士研究生,构造地质学专业,Email:wqmdizhi@163.com。通讯作者:李海龙,男,1982年生,博士,副研究员,主要从事新构造与活动构造研究,Email:s050123@126.com。

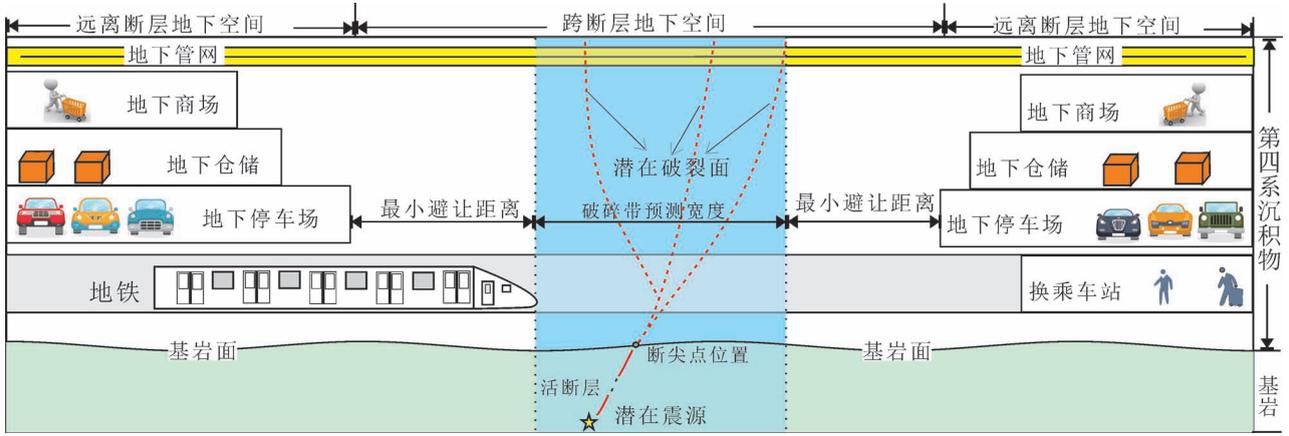


图 1 基于地下空间与活断层空间展布关系的地下空间分类模式图

Fig. 1 Classification pattern of underground space based on the spatial distribution of underground space and active faults

有限公司,2015)。我国城市地下空间利用,早期主要以人防设施为主,即便是北京地铁一号线的建设,也只是基于战备防空需要;第二阶段,以平战结合为主,部分人防设施转为商业和民用;第三阶段:随着城市化进程,开始转变为有规划的城市地下空间利用(束昱等,2006;朱合华等,2017)。目前,城市地下空间的利用形式多样,包括了:地下轨道交通、地下商业、地下通道、地下停车场、城市综合管廊、地下物流、地下实验室等(钱七虎,2017)。

一般的工程建设中,将活断层定义为距今 11 ka 以来有过活动,目前仍在活动,并在未来一定时期内仍然有可能活动的断层。在重大工程选址中,为了保证工程的安全性,将时间跨度提高到晚更新世或 0.12 Ma 以来(徐锡伟等,2016)。活动断层是地震的根源,也是导致地震灾害的主要原因。控制地震发育的活断层称为发震断层。能够产生地表破裂的地震震级一般大于 6 级(黄静宜,2016;徐锡伟等,2016)。在地震时受强震影响形成的断层,称之为地震断层(徐锡伟,2006)。地震断层震害研究显示,断层活动主要发生在与发震断层有交汇的断层上。地震中灾害往往围绕发震断层呈现狭窄分布特征(徐锡伟等,2016)。

地下空间的震害主要受到两种因素影响:一种是断层的直接错动产生的地表破碎带;另一种是强震动环境下的地基失稳和结构破坏(雷启云等,2015)。沿着同震地表破裂带,建筑物破坏较为严重,需避开该带(徐锡伟,2002)。1930 年伊豆地震中,连系海三岛丹那隧道受断层影响错移 2.7 m(廖振鹏,1989);1906 年美国旧金山地震中,圣安德烈

斯断裂断层活动,造成了南太平洋铁路线上的两个隧道产生了 1.5 m 的水平位移;1999 年的集集地震,导致了引水隧道错动 4 m,断层诱发的滑坡直接导致了清水隧道的整体滑坡;2008 年汶川地震地震中,隧道公路在次级断裂带上发生了 60 cm 的位移(Li Tianbin,2012)。虽然,我国住房与城乡建设部于 2010 年修订颁布了《建筑抗震设计规范》,明确规定了建筑应避让活断层,但是对于地下管线和轨道交通等大跨度地下设施,无可避免的需要穿越活动断层,所以需要针对活断层场地进行必要的设防措施(图 1)。

远离活断层地区,强震条件下会导致地下结构周围地基土的变形很大,地基失陷。另一方面在强震条件下,地下结构将沿着薄弱面产生严重破坏,进而影响整个地下结构体系的稳定性。1995 年,日本南部里氏 7.2 级的“阪神地震”,地下结构破坏严重。地铁站破坏尤为严重,其中中柱大量折断,进而造成上部道路大规模塌陷(Nakamura et al.,1996)。

综上,本文基于地下空间与断层的空间展布关系(图 1),将其分为跨断层地下空间和远离断层地下空间。跨断层地下空间指的是断层带潜在破碎带,以及最小避让距离范围内的地下空间;远离断层地下空间指的是避让带宽度范围之外的地下空间范围,不同断层类型的断层避让宽度参见(徐锡伟等,2016)。

2 跨断层地下空间的地震安全性问题

跨断层地下空间的地震安全性问题,主要涉及强震条件下产生的同震地表破裂,及其诱发的次生

灾害问题。目前通常用于描述地震同震地表破裂的参数包括地表破裂长度、破裂带宽度、断裂带位移等。我国地下空间多处于浅层开发水平(30 m以浅),且多数处于十几米以浅。近似采用地表破裂参数表征浅层地下空间破碎特征。目前对于活动断层地表破裂带的宽度的研究,主要集中于数值模拟法(郭恩栋等,2002;韩竹军等,2002)、离心机实验法(骆冠勇等,2010),但主要还是依靠古历史地震研究(徐锡伟,2002;徐锡伟等,2016)。基于某一断裂带的历史震害研究,可识别出地下空间的设计和施工过程中需要重点关注的部分,并采取适宜的防治措施。

2.1 断裂带同震地表破碎带最大宽度

同震地表破裂宽度是指密集形变带宽度,即地震过程中岩体形变带的宽度(徐锡伟,2002)。多次震后灾害现场考察发现,沿着断层地表破裂带建筑物普遍严重破坏(张永双等,2010)。地表破裂宽度主要影响因素有震级、断层性质和覆盖层厚度。其中,以震级对破裂宽度影响最大。

我国有文献记载的历史地震数据中,有地表破裂宽度数据的有33次(黄静宜,2016);Wells统计了全球153次地震中地表破裂的长度(Wells et al., 1994)。注意不同的研究者采用的震级表达方式是不同的,目前主要有面波震级(M_s)和矩震级(M)两种,当震级大于5.5级的时候, M_s 与 M 近似相等(Wells et al., 1994)。

走滑断层的同震地表破裂及其引起的建(构)筑物毁坏带主要沿其地表迹线对称分布(图2)。而对于倾滑断层而言:倾向断层破碎带宽度的分布具有明显的上盘效应(图2)。即断层上盘的破碎带宽度为下盘破碎带宽度的2~3倍,破坏主要源自上盘断层陡坎或褶皱陡坎物质的崩塌(张永双等,2010;徐锡伟等,2016)。

由于部分活断层过去数十万年至数百万年期间无数次错动,所以活动断层最新的错动只局限在很窄的地段。地下构筑物的建设重点应该防范最新错动面而不是整个断层的破碎带。

2.2 断裂带同震地表破裂最大位移

在汶川震害统计中,沿着断裂带走向,断层产生的位移量并不是均匀分布,且最大水平位移与最大垂直位移发生在不同地方。汶川地震中宏观震中发生在北川县曲山镇。从北川地区地表破裂数据来看,断层上盘最大的垂直位移达到12 m,最大的水平位移15 m出现在相距500 m处(李海兵等,

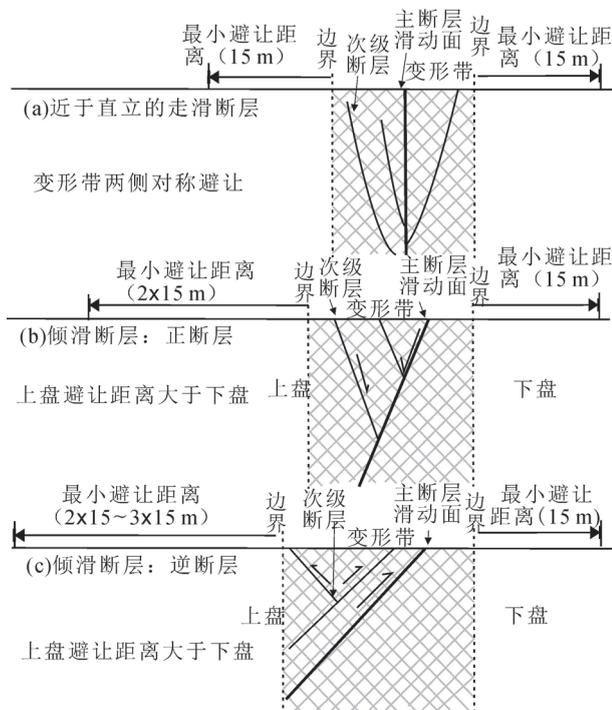


图2 不同类型断层的最小避让距离(徐锡伟等,2016)

Fig. 2 Diagram showing fault avoidances for active faults (from Xu Xiwei et al., 2016&)

2009)。

中国历史46次有断面水平位移记录的历史地震数据,其中41次为西部震害数据,5次为东部震害数据;39次有垂直位移记录的历史震害资料,34次为西部震害数据,5次为东部震害数据(黄静宜,2016)。在全球421次历史地震(震源深度40 km以浅)中,遴选出80个有同震位移记录的数据进行线性回归分析,发现断层性质对最大位移的影响相对较小(Wells et al., 1994)。

2.3 同震地表破碎带最大长度

地表破裂的长度受震级大小的影响,总体来讲,震级越大,地表破裂长度越大(Ohnaka, 2010)。我国大于或等于6.0级的688次地震。其中有64次地震产生了地表破裂,产生地表破裂的最大震级为1950年西藏察隅8.6级地震,破碎长度达250 km。

2.4 地表破裂危险性分析

对于活动断层,除了需要结合场地条件给出合理的震级及避让范围之外,还需要在实际的规划和设计过程中综合考虑工程建设的风险和经济成本问题。鉴于断层震害预测存在不确定性,且地震设防烈度是与城市经济水平直接挂钩,我国东部多数城市没有必要完全按照川滇强震区地震烈度设防。

表 1 地表破裂影响因子及其分类标准(黄静宜,2016)

Table 1 Factors affecting surface rupture and their classification criteria
(from Huang Jingyi, 2016&)

影响因子	分级数量	分类标准
震级 (M_s)	6	1:6.0~6.4;2:6.4~6.9;3:7.0~7.4;4:7.5~7.9;5:8.0~8.5;6:>8.5
震源深度 (km)	6	1:2~10;2:10~30;3:30~60;4:60~100;5:100~300;6:>300
断层性质	3	1:正;2:逆;3:走滑
覆盖层厚度	8	1:0~10;2:10~20;3:20~30;4:30~50;5:50~80;6:80~100;7:100~150;8:>150

基于影响地表破裂的因素包括震级、发震深度、断层性质和覆盖层厚度(见表1),可以获得地表破裂概率的计算公式(黄静宜,2016)。以汶川 $M_s 8.0$ 地震为例,其震源深度为 14 km,发震的北川断裂具有逆冲兼有走滑的变形特征(徐锡伟等,2008)。我们将汶川地震作为一次历史地震,并假设断层裸露地表。则可以获得其震级的分类标准(x_1)为 5,震源深度分类(x_2)为 2,断层性质分类(x_3)为 3(倾滑兼具走向滑动的,以走滑断层计算),覆盖层厚度分类(x_4)为 1。将其带入(公式1)中,可获得北川断裂,再次发震时,产生地表破裂的概率。

$$P\{Y = 1 | X\} = \frac{e^{-4.109 + 1.726x_1 - 0.738x_2 + 0.379x_3 - 1.061x_4}}{1 + e^{-4.109 + 1.726x_1 - 0.738x_2 + 0.379x_3 - 1.061x_4}} \quad (1)$$

其中 P 为发生同震位移的概率, x_1 为震级对应的分类指标; x_2 为震源深度分类指标; x_3 为断层性质对应的分类指标, x_4 为覆盖层厚度对应的分类指标。

当地表破裂的发生概率为 0~5%时,其危险性极低,可不予考虑其工程影响;地表破裂的发生概率为 5%~30%时,危险性水平较低,避免甲类建筑施工,其他工程施工过程中需要对断层活动进行风险评估;当地表破裂的发生概率为 30%~50%时,有可能发生地表破裂,严禁建造国家的重点工程、大型公共建筑等;当地表破裂的发生概率为 50%~80%时,很可能发生地表破裂,一般的建筑工程都要做详细的评估工作,确定避让距离;当地表破裂的发生概率为 80%~100%时,极可能产生地表破裂,所有建筑都必须细致评估,科学避让(黄静宜,2016)。

3 远离断层带地下空间的地震安全性问题

从地表震害资料分析来看,地震波在传播过程中整体存在能量递减趋势,为了表征远场区的地震破坏性,通常以地震动峰值加速度来表示地震波的

传播特征。

远离断层的一般性地下空间的震害主要包括地下洞室的变形,岩壁的坠落,顶板坍塌,侧墙倒塌,支护梁破坏等。经过几代地震工程学家的努力,基于地表建筑

的地震安全性评价已较为成熟,并用地表烈度和峰值加速度表征地震动的强弱程度。地下空间的地震安全性评价可通过二者与深度之间的经验公式建立联系。

3.1 强震峰值加速度与地下空间埋深关系

在统计了全球 85 次地震中 192 份关于地下空间的震害统计资料,Sharma 等(1991)建立了地下空间埋深、破坏程度与地表地震动峰值加速度(50 年超越概率为 10%的峰值加速度)之间的经验关系。如图 3 所示,将震害分四类:无影响,轻度影响,中等影响以及重度影响。总体而言,随着埋深增加,地下空间的抗震稳定性越强(Sharma et al.,1991)。

3.2 地震烈度与深度关系

唐山地震之后,李军雄(1990)在地下工程的震害调查报告的基础上,对地下空间地震烈度预测公式进行了更为详细的刻画——其考虑了地下空间的形状和规模(S)、地下空间的埋深(H)、围岩性质。

其中对于长(A)宽(B)高(h)尺度差不多的地下空间,规模 $S = \sqrt[3]{A \times B \times h}$ 。对于象人防地道走廊这样长(A) \gg 宽(B)的地下空间,规模 $S = \sqrt{B \times h}$ 。

I 类围岩:

$$I_r = 0.5 + \frac{0.93}{\lg(d + 100)} - \frac{0.30}{S} \quad (2)$$

II 类围岩:

$$I_r = 0.62 + \frac{0.50}{\lg(d + 100)} - \frac{0.26}{S} \quad (3)$$

III 类围岩:

$$I_r = 0.46 + \frac{0.62}{\lg(d + 100)} - \frac{0.34}{S} \quad (4)$$

其中, I 类围岩为松散沉积物, II 类围岩为半固结的沉积物或风化较强的硬岩, III 类围岩为硬岩。 I_r 为某点处的地震烈度。埋深 d 为地下空间中上部至地表的高度 H 与地下空间埋深的高 h 之比,即 $d =$

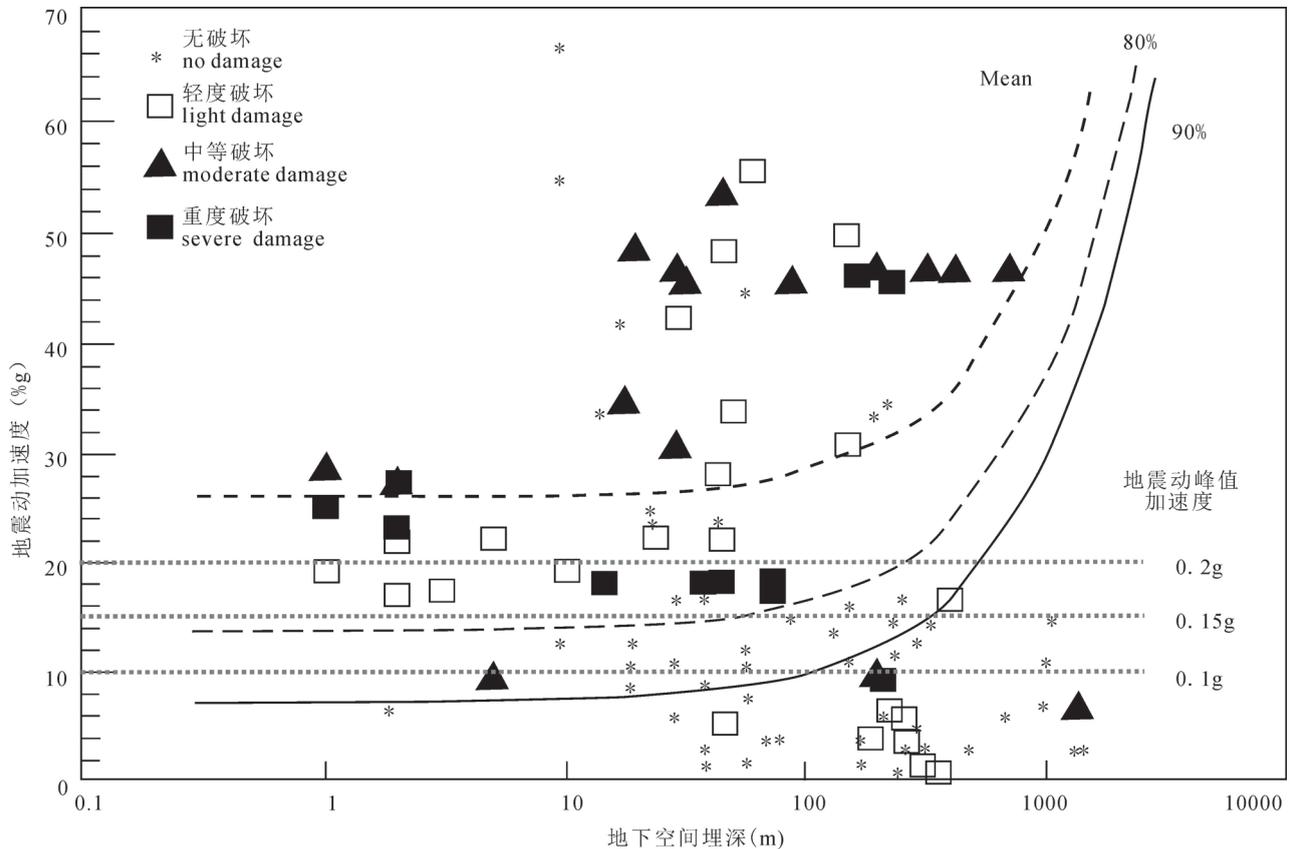


图3 地震动峰值加速度—深度—震害程度统计分布图解 (Sharma et al., 1991)

Fig. 3 Statistical distribution diagram of seismic peak acceleration—depth—earthquake damage (from Sharma et al., 1991)

H/h 。

由于地表烈度设置为唐山地区,只适用于唐山或具有相同发震条件的地区。

4 地下空间安全性评价实例分析

前文论述了地下空间的两种端元模型,一为跨断层的地下空间,一为远离断层的地下空间。为了更好地阐述这两种端元的地下空间地震安全性评价,本文选取经济发达、土地资源紧张、地下空间利用需求旺盛的深圳市和北京市,为具体案例展开分析。首先需要强调的是计算结果具有统计意义,这些成果可以为城市地下空间规划和利用提供一定参考。但在具体的工程环境下有一定偏差也是难免的。所以在有条件的地区,应该在此基础上进行更为细致的地震安全性研究工作,如考虑工程场地的地貌(李长安等,2019)、场地工程条件(阎长虹等,2015;甘建军等,2019)、地应力背景(马秀敏等,2015)等。

4.1 深圳地区

深圳地区断裂带大致可分为北东、北西和东西

向三组(图4)。北东向的深圳—五华断裂带是区内最大的断裂带,具有较为频繁的地震活动性(马浩明等,2010)。上世纪五十年代以来,地质和地震部门围绕深圳断裂构造开展了系列研究工作。本文主要参考深圳市活断层探测与地震安全性评价项目调查成果(2007~2008年)(马浩明等,2010;余成华,2010),尝试讨论深圳地区的城市地下空间的地震安全性评价。

4.1.1 深圳地区跨断层地下空间安全性评价

(1) 五华—深圳断裂。五华—深圳断裂带是影响深圳市地震安全性的一条重要断裂带(谭成轩等,2000;马浩明等,2010)。横岗—罗湖断裂与莲塘断裂是深圳—五华断裂的两条重要分支,其总体走向为北东 $35^{\circ}\sim 70^{\circ}$,倾向北西,具有压扭性质。据地震台网记录测定,深圳及其附近地区的震源深度,多在5~25 km左右(孙杰等,2007),断裂带的震级上限厘定为6.5级(余成华,2010)。

这些断层上断点埋深5~29 m。一般浅层地下空间利用多集中在30 m以浅的范围内,在计算地表

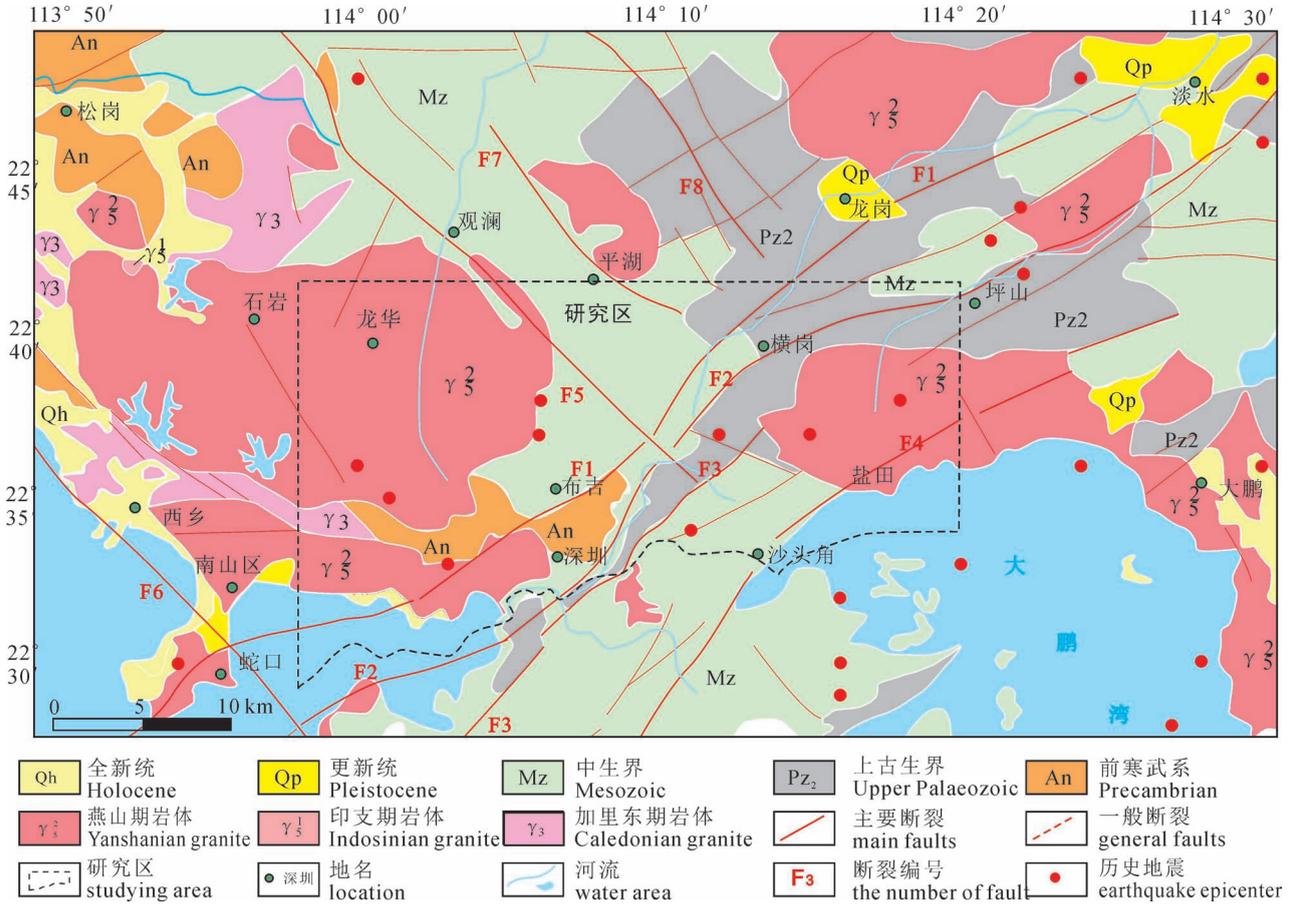


图4 深圳地区地震构造图(据徐俊等,2012)

Fig. 4 Seismotectonics map of Shenzhen area (from Xu Jun et al., 2012&)

F₁—九尾岭断裂;F₂—横岗—罗湖断裂;F₃—莲塘断裂;F₄—盐田断裂;F₅—温塘—观澜断裂;F₆—虎门—东博寮海峡断裂;F₇—天堂围断裂;F₈—樟木头—清溪断裂

F₁—Jiuweiling fault; F₂—Henggang—Luohu fault; F₃—Liantang fault; F₄—Yantian fault; F₅—Wentang—Guanlan fault; F₆—Humen—Doboliaohaixia fault; F₇—Tiantangwei fault; F₈—Zhangmutou—Qingxi fault

破裂的过程中近似认为断层上断点距离地下空间底板埋深0~10 m。根据公式(1),计算得到的地表破裂概率为11.3%。需考虑地表破裂的可能性。地表破裂参数的计算过程中,采用中国大陆的历史统计数据进行分析(表2)(黄静宜,2016),计算结果参见表3。从而确定了地下室建设需要考虑的合理避让距离:上盘至少应避让30 m,下盘避让15 m(徐锡伟等,2016,2018),加上破碎带宽度6.7 m,总设防宽度应为51.7 m。

(2) 温塘—观澜断裂。温塘—观澜断裂带,倾向SW,局部倾向NE,倾角50°~75°,具有张扭性质。浅层地震勘探确定的断尖点埋深为7~26 m,同样认为地下工程底界面距离断尖点所处的埋深为0~10 m。综合评价定级为6.0

表2 震级与主要同震地表破裂带参数的关系

Table 2 Relationship between magnitude and the width of the earthquake surface rupture zone

经验关系式	地区	a	b	R	σ	n
lgW=a+b·Ms	中国大陆	-2.9522	0.5809	0.3333	0.7749	33
lgW=a+b·M	全球	-1.01	0.32	0.84	0.15	153
lgD _h =a+b·Ms	中国大陆	-3.1310	0.4869	0.5613	0.1291	46
lgD _v =a+b·Ms	中国大陆	-2.8919	0.4207	0.4747	0.1611	39
lgMD=a+b·M	全球	-5.46	0.82	0.78	0.42	80
lgL=a+b·Ms	中国大陆	-4.1807	0.7753	0.6383	0.2455	64
lgL=a+b·M	全球	-5.08	1.16	0.28	0.82	77

注:(W为破碎带宽度;a,b为回归系数;Ms为面波震级;M为矩震级;D_h为最大水平位移,单位m;D_v为最大垂直位移,单位m;MD为最大位移,单位m;L为同震破裂带长度,单位km;其中R为相关性系数;σ为剩余方差;n地震数量)参考文献:(中国大陆数据:黄静宜,2016;全球数据:Wells,1994)。

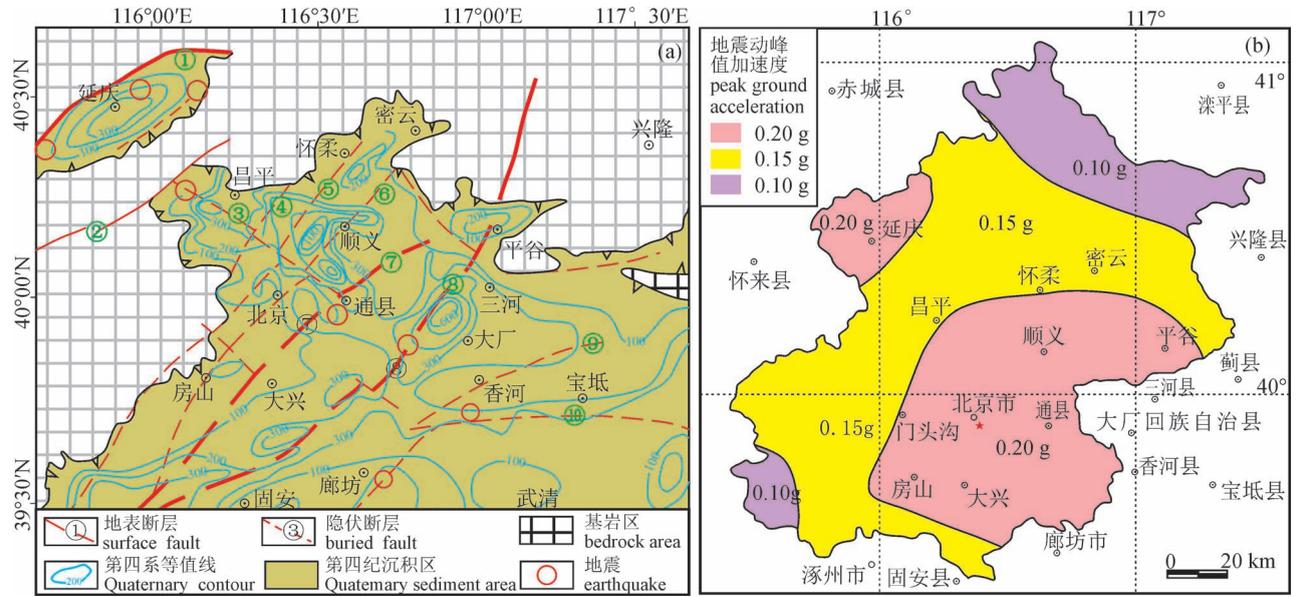


图 5 (a) 北京地区地质构造简图(据刘保金等,2011);(b) 北京市 50 年超越概率 10% 地震动峰值加速度分区图(据玄月,2011)

Fig. 5 (a) Geological features and location of seismic reflection profiles in research region (from Liu Baojin et al., 2011&);

(b) Peak acceleration of ground motion exceeding 10% probability in 50 years in Beijing area(from Xuan Yue,2011&)

断裂带名称:① 延庆—怀来盆地北缘断裂;② 南口山前断裂;③ 南口—孙河断裂;④ 小汤山—东北旺断裂;⑤ 黄庄—高丽营断裂;
⑥ 顺义—良乡断裂;⑦ 通县—南苑断裂;⑧ 夏垫断裂;⑨ 香河断裂;⑩ 宝坻断裂

① North marginal fault of Yanqing—Huailai basin; ② frontal fault of Nankou mountain; ③ Nankou—Sunhe fault; ④ Xiaotangshan—Dongbeiwang fault; ⑤ Huangzhuang—Gaoliying fault; ⑥ Shunyi—Liangxiang fault; ⑦ Tongxian—Nanyuan fault; ⑧ Xiadian fault; ⑨ Xianghe fault; ⑩ Baodi fault

级(余成华,2010)。计算其发生地表破裂的概率为 2.2%,可近似忽略其发生地表破裂的可能。

表 3 深圳地区三条主要断裂带的设防震级下 预测的地表破裂参数

Table 3 Surface rupture parameters of three major fault zones in Shenzhen area

	设防震级	破碎带宽度 (m)	最大位移 (m)		破碎带长度 (km)	地表破裂概率
			水平	垂直		
横岗—罗湖断裂 莲塘断裂	6.5	6.7	1.08	0.696	7.2	11.3%
温塘—观澜断裂	6	3.4	0.62	0.43	2.96	2.2%

4.1.2 深圳地区远离深圳断层带地下空间的地震安全性

根据震动峰值加速度及震害之间的对应关系, Sharma 等(1992)拟合出了区间为 80%和 90%的置信曲线。目前地表一般建筑物抗震设防多采用 50 年超越概率 10%的地震动峰值加速度。根据《中国地震动参数区划图》,深圳地区 II 类场地地表基本

地震动峰值加速度 0.1 g,设防烈度七度。将深圳地区地表的地震动加速度值,投到关系图 3 中。破坏曲线落在了破裂概率为 80%~90%的范围内,该区域范围仅发生过一例中等震害,整体地震危险性较小。

4.2 北京地区

北京市是地震灾害多发地区,是地震重点防御区,近年来相继开展了大规模的地震地质调查和地球物理探测等研究工作(徐锡伟等,2002)。北京市也是土地资源紧张,城市地下空间需求旺盛的典型地区。考虑到震级高于 6 级以上,才会产生地表破裂(黄静宜,2016;徐锡伟等,2016),本文基于前人研究成果,梳理出北京地区需要着重关注的夏垫断裂、延庆—矾山盆地北缘断裂、南苑—通县断裂等三条潜在地震风险性较大的断裂。本文研究了这些断裂影响范围内地下空间的地震安全性。

4.2.1 跨断层地下空间地震安全性评价

(1)夏垫断裂带。夏垫断裂是北京平原区一条重要活动断裂(冉勇康,1997;何宏林等,2008),历史上断裂带的活动导致了北京地区最大的 8.0 级三

河—平谷地震(冉勇康,1997),是该地区未来潜在风险最大的活动断层。夏垫断裂带为正断层并具有一定的右行走滑分量,倾向南东,视倾角 72° ,震源深度多集中在 $5\sim 25\text{ km}$ (田优平等,2014)。地表破裂长度不低于 30 km (毛昌伟等,2010)。考虑到北京市地下空间需要较高,以 40 m 限定地下空间利用深度。根据公式(1),计算得到的地表破裂概率为 95.8% 。地表破裂参数的计算过程中,采用中国大陆的历史统计数据进行分析(表2)(黄静宜,2016),计算结果参见表4。从而确定了地下硐室建设需要考虑的合理避让距离:上盘至少应避让 30 m ,下盘避让 15 m (徐锡伟等,2016,2018),加上破碎带宽度 96.7 m ,总设防宽度应为 141.7 m 。

(2)延庆—矾山盆地北缘断裂。延庆—矾山盆地北缘断裂,总体走向北东东,倾向南东,是延庆—怀来盆地最重要的盆地控边断裂。该断裂带上新世以来发生了强烈的正断活动(冉勇康,1997),全新世以来可以识别出三次古地震事件,历史最大震级为1484年 $6\frac{3}{4}$ 级地震(玄月,2011)。中强震级以上地震震源深度为 $6\sim 30\text{ km}$ (徐锡伟,2002)。

根据公式(1),计算得到的地表破裂概率为 41.8% 。地表破裂参数的计算过程中,采用中国大陆的历史统计数据进行分析(表2)(黄静宜,2016),计算结果参见表4。从而确定了地下硐室建设需要考虑的合理避让距离:上盘至少应避让 30 m ,下盘避让 15 m (徐锡伟等,2018),加上破碎带宽度 18.2 m ,总设防宽度应为 63.2 m 。

(3)南苑—通县断裂。南苑—通县断裂为隐伏正断裂,总体走向北东,南起河北涿县经房山,沿南苑,高碑店至顺义的北务一线展布,全长 110 km 。断裂带倾向北西,最新活动事件发生在晚更新世中期(黄晓等,2012)。历史最大震级为1536年和1665年的 6.5 级地震(玄月,2011)。根据历史最大震级加 0.5 确定出震级上限为 7.0 级。上断点埋深距离地表约 $75\sim 95\text{ m}$ (黄晓等,2012)。北京市地下空间需要较高,以 40 m 限定地下空间利用深度。确定上断点距其上的地下空间底板埋深 $35\sim 55\text{ m}$ 。

根据公式(1),计算得到的地表破裂概率为 8% 。地表破裂参数的计算过程中,采用中国大陆的历史统计数据进行分析(表2)(黄静宜,2016),计算结果参见表4。从而确定了地下硐室建设需要考虑的合理避让距离:上盘至少应避让 30 m ,下盘避让 15 m (徐锡伟等,2016,2018),加上破碎带宽度 13

m ,总设防宽度应为 58 m 。

4.2.2 北京地区远离断层地下空间地震安全性

根据震动峰值加速度及震害之间的对应关系,Sharma等(1992)拟合出了区间为 80% 和 90% 的置信曲线。目前地表一般建筑物抗震设防多采用 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度,北京地区 50 年超越概率 10% 地震动峰值加速度包括 0.1 g , 0.15 g , 0.2 g 等三个分区(玄月,2011)。将其投到关系图3中。峰值加速度为 $0.10\sim 0.15\text{ g}$ 的破坏曲线总体落在了破裂概率为 $80\%\sim 90\%$ 的区间范围附近,而 0.2 g 对应的地震危险性显著增高,在 $10\sim 100\text{ m}$ 范围内发生过数次强地震破坏事件,需要加强地下空间的抗震设防措施。

表4 北京地区三条主要断裂带防震级下预测的地表破裂参数

Table 4 Surface rupture parameters of three major fault zones in Beijing

	震级 上限	破碎带 宽度(m)	最大位移(m)		破碎带 长度(km)	地表破 裂概率
			水平	垂直		
夏垫断裂	8.5	96.7	10.1	4.8	256.7	95.8%
延庆—矾山盆地 北缘断裂	7.25	18.2	2.5	1.44	27.56	41.8%
南苑—通县断裂	7.0	13	1.89	1.13	17.64	8.0%

5 结论

活断层是威胁地下空间地震安全性的重要因素,根据地下空间与活动断层的展布关系,可以将其分为跨断层地下空间和远离断层的地下空间。在地震活动中,受发震断层活动影响,断裂带附近震害最为严重。发震断层以及与之相连的分支断层均可能产生地表破裂。在地表破裂的各项因素中,更加关注断层的破碎带宽度,断面位移,破碎带长度等。在活动断层的研究中,需要首先确定活动断层的发震概率。对于具有潜在危险性的断层,还需要进一步确定相关的地表破裂参数,以指导具体的工程抗震实践。

北东向的深圳断裂带,应避免地下车站等重要地下工程建设。对于隧道和地下管廊等需要跨断层的地下设施,在施工过程中应采取相应的设防措施,总体设防宽度为 51.7 m 。而北西向的温塘—观澜断裂则相对更为安全,可以忽略同震地表破裂对地下建筑的影响。远离断层地区,城市地下空间的安全性总体较为适宜。

北京地区夏垫断裂、延庆—矾山盆地北缘断裂、

南苑通县断裂具有较高的强震危险性。必须避免重要地下工程的建设,对于隧道和地下管廊等需要跨断层的地下设施,在施工过程中需加强抗震设防措施。夏垫断裂带设防宽度为 141.7 m,延庆—矾山盆地北缘断裂带设防宽度为 63.2 m,南苑—通县断裂带抗震设防宽度 58 m。远离断层的地区,北京地区 50 年超越概率为 10% 的地震动峰值加速度为 0.15~0.10 g 的地区地下空间地震安全性较高;50 年超越概率为 10% 的地震动峰值加速度为 0.2 g 的地区需重视地下空间地震安防措施。

最后需要强调的是,本文提出的地震安全性评价主要基于统计学方法,为城市地下空间的规划和建设提供了参考。但具体的工程场地条件难免会有其自身的特殊性,所以有条件的地区应该在此基础上开展更为精细的研究工作。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 程光华, 翟刚毅, 庄育勋. 2013. 城市地质与城市可持续发展. 北京: 科学出版社.
- 程光华, 杨洋, 赵牧华, 苏晶文, 李云峰. 2018. 新时代城市地质工作战略思考. 地质论评, 64(6): 1438~1446.
- 甘建军, 万胜, 李荐华, 唐春, 杨涛, 罗藏青排. 2019. 基于沉积环境与工程地质特征的湖相软土分类研究——以鄱阳湖流域四种典型软土为例. 地质论评, 65(4): 983~992.
- 郭恩栋, 邵广彪, 薄景山. 2002. 覆盖土层场地地震断裂反应分析方法. 地震工程与工程振动, 22(5): 122~126.
- 韩竹军, 冉勇康, 徐锡伟. 2002. 隐伏活断层未来地表破裂带宽度与位错量初步研究. 地震地质, 24(4): 484~494.
- 何宏林, 闵伟, 原口强. 2008. 1679 年三河—平谷 8 级地震破裂带的大地切片实验研究. 地震地质, 3(1): 289~297.
- 胡聿贤. 1999. 地震安全性评价技术教程. 北京: 地震出版社.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学(第 2 版). 北京: 地震出版社.
- 黄静宜. 2016. 强震地表破裂评估方法研究. 导师: 薄景山. 中国地震局工程力学研究所.
- 黄敬军, 武鑫, 姜素, 崔龙玉, 魏永耀, 张丽, 陆华. 2018. 海绵城市建设的地质影响及适宜性评价——以徐州为例. 地质论评, 64(6): 1472~1480.
- 黄晓, 陈刚, 李哲琳, 孙进忠. 2012. 南苑—通县断裂大兴规划新城段的研究. 城市地质, 7(4): 15~19.
- 雷启云, 柴焯章, 孟广魁. 2015. 基于构造活动历史的活断层工程避让研究. 工程地质学报, 23(1): 161~169.
- 李长安, 张玉芬, 庞设典, 官善友. 2019. 以地貌单元为依据的工程地质分区研究——以武汉市都发展区城市地质研究为例. 地质论评, 65(3): 645~652.
- 李海兵, 司家亮, 付小方, 邱祝礼, 李宁, J. Van der Woerd, 裴军令, 王宗秀, 侯立玮, 吴富岫. 2009. 2008 年汶川地震同震滑移特征、最大滑移量及构造意义. 第四纪研究, 29(3): 387~402.
- 李军雄. 1990. 地下空间地震烈度的研究. 工程勘察, 7~11.
- 梁小华, 蒋溥, 董津城. 2002. 断裂地震地表断错危险性评价. 地震

- 地质, 24(4): 495~502.
- 廖振鹏. 1989. 地震小区划: 理论与实践. 北京: 地震出版社.
- 刘保金, 张先康, 陈颀, 鄧少英, 姬计法, 袁洪克, 左莹. 2011. 三河—平谷 8.0 级地震区地壳结构和活动断裂研究——利用单次覆盖深反射和浅层地震剖面. 地球物理学报, 54(5): 1251~1259.
- 骆冠勇, 吴宏伟, 蔡奇鹏. 2010. 地层错动引起的上覆砂层变形特性的离心试验研究. 岩石力学与工程学报, 29(8): 1649~1656.
- 马浩明, 陈庞龙, 李运贵. 2010. 深圳市断裂新活动与地震研究进展. 华南地震, 30(3): 1~10.
- 马秀敏, 彭华, 李振, 姜景捷, 彭立国. 2015. 某城际铁路八达岭地下车站地应力测量及稳定性初析. 地质论评, 61(z1): 98~99.
- 马宗晋. 1992. 中国地震震中分布图的构造解释. 中国地震, 8(1): 10~17.
- 毛昌伟, 丁锐, 龚正, 张世民. 2010. 1679 年三河—平谷 8 级地震地表断层陡坎的 GPS 测量. 地壳构造与地壳应力文集, 11~18.
- 钱七虎. 2017. 推进城市地下空间规划建设的思考. 城乡建设, (18): 60~65.
- 冉勇康. 1997. 我国几个典型地点的古地震细研究和大地震重复行为探讨. 导师: 邓起东. 中国地震局地质研究所.
- 上海市政工程设计研究总院有限公司. 2015. 城市地下空间利用基本术语标准 JGJ/T335—2014. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 束昱, 彭芳乐, 王璇, 朱合华. 2006. 中国城市地下空间规划的研究与实践. 地下空间与工程学报, 2(b07): 1125~1129.
- 宋金可, 刘中宪, 周晓洁. 2015. 港珠澳大桥海底沉管隧道地震动力损伤过程分析. 地下空间与工程学报, 11(S1): 323~331.
- 孙杰, 贾建业, 詹文欢, 易顺民. 2007. 深圳断裂带构造活动性分析. 地球科学进展, 22(3): 234~240.
- 谭成轩, 王瑞江, 孙叶. 2000. 深圳断裂带现今构造活动性及其对深圳市输水隧洞工程地壳稳定性影响. 地球科学—中国地质大学学报, 25(1): 51~65.
- 滕彦国, 倪师军, 林学钰, 王金生. 2005. 城市环境地球化学研究综述. 地质论评, 51(1): 64~76.
- 田优平, 余达远, 万永革, 支玲, 高尔根. 2014. 三河—平谷地震区地球物理特征研究. 地球物理学进展, 29(4): 1563~1572.
- 徐俊, 余成华, 汤德刚. 2012. 深圳市活断层探测与地震危险性评价. 城市勘测, (1): 161~161.
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛. 2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法. 地震地质, 24(4): 470~483.
- 徐锡伟. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震. 北京: 科学出版社.
- 徐锡伟. 2006. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题. 震灾防御技术, 1(01): 7~14.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马保起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 何玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川 MS8.0 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 30(3): 597~629.
- 徐锡伟, 郭婷婷, 刘少卓. 2016. 活动断层避让相关问题的讨论. 地震地质, 38(3): 477~502.
- 徐锡伟, 陈桂华. 2018. 活动断层避让问题探讨与建议. 城市与减灾, (1): 8~13.
- 玄月. 2011. 北京市断裂活动性研究及地震危险性分析. 导师: 武法东. 中国地质大学(北京).
- 阎长虹, 吴焕然, 许宝田, 许崧, 郑军, 燕晓莹. 2015. 不同成因软土工程地质特性研究——以连云港、南京、吴江、盱眙等地四种典型软土为例. 地质论评, 61(3): 561~569.
- 杨林德. 2013. 隧道与地下空间抗震防灾的若干思考. 隧道建设, 33(9): 707~714.

- 余成华. 2010. 深圳市断层活动性和地震危险性研究. 导师: 尚岳全. 浙江大学.
- 张永双, 孙萍, 石菊松, 姚鑫, 熊探宇. 2010. 汶川地震地表破裂影响带调查与建筑场地避让宽度探讨. 工程地质学报, 18(3): 312~319.
- 周林聪, 陈龙珠, 官必宁. 2005. 地下结构地震模拟振动台试验研究. 地下空间与工程学报, 1(2): 182~187.
- 朱合华, 骆晓, 彭芳乐, 李晓军, 刘春彦. 2017. 我国城市地下空间规划发展战略研究. 中国工程科学, 19(6): 12~17.
- Cheng Guanghua, Zhai Gangyi. 2013&. Urban Geology and Sustainable Urban Development. Beijing: Science Press.
- Cheng Guanghua, Yang Yang, Zhao Muhua, Su Jingwen, Li Yunfeng. 2018&. Strategic thinking of urban geological work in the New Era. Geological Review, 64(6): 1438~1446.
- Gan Jianjun, Wan Sheng, Li Jianhua, Tang Chun, Yang Tao, Luozang. Qingpai. 2019&. Classification of lacustrine soft soil based on sedimentary environment and engineering characteristics —— a case study of four typical soft soil in Poyang Lake basin. Geological Review, 65(4): 983~992.
- Guo Endong, Shao Guangbiao, Bo Jingshan. 2002&. A method for earthquake rupture analysis of overlying soil site. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 22(5): 122~126.
- Han Zhujuan, Ran Yongkang, Xu Xiwei. 2002&. Primary study on possible width and displacement of future surface rupture zone produced by buried active fault. Seismology and Geology, 24(4): 484~494.
- He Honglin, Min Wei, Yuan Kouqiang. 2008&. Testing geo-slicer on the rupture of the Ms8.0 Sanhe ~ Pinggu earthquake of 1679. Seismology and Geology, 3(1): 289~297.
- Hu Yuxian. 1999&. Tutorial on Seismic Safety Assessment Techniques. Beijing: Earthquake Press.
- Hu Yuxian. 2006&. Earthquake Engineering (2nd Edition). Beijing: Earthquake Press.
- Huang Jingyi. 2016&. Research on The method for evaluating the earthquake surface rupture. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration.
- Huang Jingjun, Wu Xin, Jiang Su, Cui Longyu, Wei Yongyao, Zhang Li, Lu Hua. 2018&. Geological influence and suitability evaluation of the construction of sponge city——a case of Xuzhou. Geological Review, 64(6): 1472~1480.
- Huang Xiao, Chen Gang, Li Zhelin, Sun Jinzhong. 2012&. The study on Nanyuan - Tongxian fault in Beijing Daxing planning town. City Geology, 7(4): 15~19.
- Lei Qiyun, Chai Chizhang, Meng Guangkui, Du Peng, Wang Yin. 2015&. Tectonic activity history based method for engineering safety distance to active fault. Journal of Engineering Geology, 23(1): 161~169.
- Li Changan, Zhang Yufen, Pang Shedian, Guan Shanyou. 2019&. Study on engineering geological zoning: based on geomorphologic units——a case study of the Wuhan metropolitan development area. Geological Review, 65(3): 645~652.
- Li Haibing, Si Jialiang, Fu Xiaofang, Qiu Zhuli, Li Ning, J. Van der Woerd, Pei Junling, Wang Zongxiu, Hou Liwei, Wu Furao. 2009&. Co-seismic rupture and maximum displacement of the 2008 Wenchuan earthquake and its tectonic implications. Quaternary Sciences, 29(3): 387~402.
- Li Junxiang. 1990&. Study on seismic intensity of underground space. Engineering Investigation, (5): 7~11.
- Li Tianbin. 2012. Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 71(2): 297~308.
- Liang Xiaohua, Jiang Pu, Dong Jincheng. 2002&. Risk evaluation of surface dislocation caused by earthquake. Seismology and Geology, 24(4): 495~502.
- Liao Zhenpeng. 1989&. Seismic Microzonation: Theory and Practice. Beijing: Earthquake Press.
- Liu Baojin, Zhang Xiankang, Chen Yong et al. 2011&. Research on crustal structure and active fault in the Sanhe-Pinggu Earthquake (Ms8.0) Zone based on single-fold deep seismic reflection and shallow seismic reflection profiling. Chinese J. Geophy, 54(5): 1251~1259.
- Luo Guanyong, Wu Hongwei, Cai Qipeng. 2010&. Centrifuge experimental study of deformation characteristics of overlying sand induced by fault rupture. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(8): 1649~1656.
- Ma Haoming, Chen Panglong, Li Yungui. 2010&. Advances on new activity of faults and earthquakes in Shenzhen city. South China Journal of Seismology, 30(3): 1~10.
- Ma Xiumin, Peng Hua, Li Zhen, Jiang Jingjie, Peng Ligu. 2015. Initial analysis of geostress Measurement and Stability in Badaling Underground Station of an Intercity Railway. Geological Review, 61(z1): 98~99.
- Ma Zongjin. 1992#. Tectonic interpretation of epicentre maps in China. Earthquake Research in China, 8(1): 10~17.
- Mao Changwei, Ding Rui, Gong Zheng, Zhang Shimin. 2010&. GPS survey of the surface fault scarp of 1679 Sanhe~Pinggu M8.0 Fault. Tectonic and crustal stress anthology, 11~18.
- Nakamura S, N Yoshida and T Iwatate. 1996. Damage to daikai subway station during the 1995 hyogoken ~ nambu earthquake and its investigation. Japan Society of Civil Engineers, Committee of Earthquake Engineering: 287~295.
- Ohnaka M. 2010. Earthquake-source parameters related to magnitude. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 55(1): 45~66.
- Qian Qihu. 2017#. Thinking on urban underground space planning and construction. Urban and Rural Development, (18): 60~65.
- Ran Kangyong. 1997&. Detailed research of paleo-earthquakes at several typical regions in China and exploration of recurrence behavior of large earthquakes. Supervisor: Deng Qidong. Institute of geology, China earthquake administration.
- Shanghai municipal engineering design and research institute co. LTD. 2015&. Basic Terminology Standards Of Urban Underground Space JGJ/T335~2014. Beijing. China Building Industry Press.
- Sharma S and W R Judd. 1991. Underground opening damage from earthquakes. Engineering Geology, 30(3~4): 263~276.
- Song Jinke, Liu Zongxian, Zhou Xiaojie. 2015&. Analysis of the nonlinear earthquake responses of the Hong Kong - Zhuhai - Macao Immersed Tunnel. Chinese Journal of Underground Space And Engineering, 11(S1): 323~331.
- Su Yu, Pengfangle, Wang Xuan, Zhu Hehua. 2006&. Study and practice of urban underground space planning in China. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2(b07): 1125~1129.
- Sun Jie, Jia Jianye, Zhan Wenhuan, Yi Shunmin. 2007&. A study of the tectonic activity of Shenzhen fracture zone. Advances in Earth

Science, 22(3): 234~240.

Tan Chengxuan, Wang Ruijiang, Sun Ye. 2000. Present-day structural activity of Shenzhen fracture zone and its effect on crustal stability of water diversion tunnel in Shenzhen. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 25(1): 51~65.

Ten Yanguo, Ni Shijun, Lin Xueyu, Wang Jin Sheng. 2005. Review on urban & environmental geochemistry. Geological Review, 51(1): 64~76.

Tian Youping, Yu Dayuan, Wan Yongge, Zhi Ling, Gao Ergen. 2014. Research on crustal structure and active fault in the Sanhe-Pinggu Earthquake (M8.0) Zone based on single-fold deep seismic reflection and shallow seismic reflection profiling. Chinese Journal of Geophysics, (4): 1563~1572.

Wells D L and Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Am., 84(4): 974~1002.

Xu Xiwei, Yu Guihua, Ma Wentao. 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault. Seismology and Geology, 24(4): 470~483.

Xu Xiwei. 2002. The Latest Tectonic Changes and Earthquakes in the Crust of the Capital Region. Beijing: Science Press.

Xu Xiwei. 2006. Active faults, associated earthquake disaster distribution and policy for disaster reduction. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 1(01): 7~14.

Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing, Ma Baoqi, Chen Jie, Zhou Rongjun, He Honglin, Tian Qinjian, He Yulin, Wang Zhicai, Sun Zhaomin, Feng Xijie, Yu Guihua, Chen Lichun, Chen Guihua, Yu Shen'e, Ran Yongkang, Li Xiguang, Li Chenxia, An Yanfen. 2008. The Ms8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. Seismology and Geology, 30(3): 597~629.

Xu Xiwei, Guo Tingting, Liu Shaozhuo, Yu Guihua, Chen Guihua, Wu Xiyun. 2016. Discussion on issues associated with setback distance from active fault. Seismology and Geology, 38(3): 477~502.

Xu Xiwei, Chen Guihua. 2018. Discussion and suggestion on active fault avoidance. City and Disaster Reduction, (1): 8~13.

Xuan Yue. 2011. Fault activity research and seismic risk analysis of Beijing district. Supervisor: Wu Fadong. China University of Geosciences.

Xu Jun, Yu Chenghua, Tang Degang. 2012. Urban geotechnical investigation & surveying. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, (1): 161~161.

Yan Changhong, Wu Huanran, Xu Baotian, Xu Song, Zheng Jun, Yan Xiaoying. 2015. Engineering geological properties of different sedimentary types of soft soils in eastern China—take the 4 typical types of soft soil in Lianyungang, Nanjing, Wujiang and Xuyi Area as Examples. Geological Review, 61(3): 561~569.

Yang Linde. 2013. Recommendations on seismic design of tunnels and underground structures. Tunnel Construction, 33(9): 707~714.

Yu Chenghua. 2010. Research on the faults activity and seismic hazard in Shenzhen. Supervisor: Shang Yuequan. Zhejiang University.

Zhang Yongshuang, Sunping, Shi Jusong, Yao Xin, Xiong Tanyu. 2010. Investigation of rupture influenced zones and their corresponding safe distances for reconstruction after 5.12 Wenchuan earthquake. Journal of engineering geology, 18(3): 312~319.

Zhou Lincong, Chen Longzhu, Gong Bining. 2005. Shaking table tests for the seismic simulation of underground structure. Chinese Journal Of Underground Space And Engineering, 1(2): 182~187.

Zhu Hehua, Luo Xiao, Peng Fangle, Li Xiaojun, Liu Chunyan. 2017. Development strategy on urban underground space planning in China. Engineering Science, 19(6): 12~17.

Seismic hazard assessment of urban underground space based on seismic hazard statistics

WANG Qiangmao^{1,2)}, LI Hailong¹⁾, LI Tingdong¹⁾, YIN Qihang¹⁾, WANG Yiwen³⁾, FAN Yanxia¹⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871;

3) School of Geomatics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin, 130118

Objectives: Earthquake security of buildings should be firstly considered in the urban planning and the process of urban construction. The methods of seismic safety assessment of China mainly focus on surface buildings. However, the study on the earthquake security of underground space is weak, which cannot meet the raising demands for underground space. Active faults are the direct factor of earthquakes and the main cause of buildings damages. As underground spaces whether intersect faults or not, it was divided into cross-fault underground space and far from fault underground space.

Methods: This paper reviewed the analytical methods of the seismic hazard assessment of underground space destruction by active fault and summarized the evaluation methods about how seismogenic faults affect underground space in adjacent areas, based on the relationship among coseismic surface rupture, peak acceleration of earthquake, seismic intensity and the focal depth.

Results: This paper summarized the method of Seismic hazard assessment of urban underground space based on seismic hazard statistics based on literature review and Shenzhen and Beijing were chosen as examples to show

how the method is applied.

Conclusions: This paper offered a method based on seismic hazard statistics for studying the seismic hazard assessment of urban underground. And we must stress that this method is based on statistics data. To get a precise evaluation, much more researches should be done.

Keywords: urban underground space; active fault; seismic hazard; Shenzhen area; Beijing area

Acknowledgements: This paper is funded by the National Science Foundation of China (No. 41872223) and the Geological survey project of China Geological Survey (No. DD20190287)

First author: WANG Qiangmao, born in 1992, doctoral candidate, mainly engaged in active tectonics, Email: wqmdizhi@163.com

Corresponding author: LI Hailong, born in 1982, mainly engaged in active tectonics, Email: s050123@126.com

Manuscript received on: 2019-04-26; Accepted on: 2019-08-26; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.007

书评:钾质火成岩和相关金—铜矿化(第5版)

杨立强

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京,100083

钾质火成岩在时空上与浅成低温热液型金矿床和斑岩型铜—金矿床密切相关,其岩石成因、构造背景及其成矿潜力分析一直是矿床学界的研究热点。Müller and Groves (2019) 出版了 *Potassic Igneous Rocks and Associated Gold—Copper Mineralization* 的第五版,该书是一本关于钾质火成岩及其相关的铜—金矿床的综合性书籍。书中详细介绍了钾质火成岩的定义、形成过程和构造背景(第1~5章);与钾质火成岩有关的矿床研究(第6~8章);卤素和挥发分对成矿的制约(第9章)和相关矿产勘查的指导性策略(第10章);以及全球与钾质火成岩有关的代表性矿床和成矿带的汇总(第11章)。

钾质火成岩发育于陆缘弧、后碰撞、大洋岛弧(新生岛弧和成熟岛弧)和陆内环境等5种大地构造背景(第3章)。不同构造背景下发育的钾质火成岩具有不同的地球化学特征,因此甄别不同构造背景下发育的钾质火成岩的典型地球化学特征至关重要。Müller and Groves(2019)以意大利的罗马省(Roman Province)(陆缘弧)、奥地利的克罗伊茨埃克山(Kreuzeck Mountain)(后碰撞环境)、北马里亚纳弧(northern Mariana Arc)(新生岛弧)、瓦努阿图(Vanuatu)(成熟岛弧)和非洲裂谷(African Rift Valley)(陆内环境)为例对比分析了发育于5种大地构造背景下的钾质火山岩的地球化学特征(第4章),提出借助一些地球化学图解[如 TiO_2 vs. Al_2O_3 ; Y vs. Zr; $(TiO_2/10)$ vs. $(La \times 10 - P_2O_5/10)$],可以有效厘定钾质火成岩形成的构造背景。这为今后地质工作者开展钾质火成岩构造背景的判别提供了地球化学依据。

在上述5种不同构造背景下均发育与钾质火成岩密切相关的铜—金矿床,矿床的形成时代从更新世到奥陶纪(第6章)。大洋岛弧环境和陆缘弧环境下主要发育浅成低温热液型金和斑岩型铜—金矿床,如大洋岛弧背景巴布内亚新几

内亚利希尔岛的Ladolam金矿床、斐济的Emperor金矿床、菲律宾的Dinkidi铜—金矿床;陆缘弧背景下阿根廷的Aqua Rica斑岩型铜—金—钼矿床和Bajo de La Alumbrera斑岩型铜—金矿床。著名的Grasberg铜—金矿床是弧后背景下钾质火成岩成矿的典型代表,它位于印度尼西亚的伊里安查亚省(Irian Jaya),其成矿与高钾钙碱性闪长岩和石英二长岩有关。伊朗西北部的世界级Sungun铜—钼斑岩矿床和青藏高原东缘的玉龙斑岩型铜矿带是陆内环境钾质火成岩相关矿床的典型代表。玉龙成矿带长约300 km,宽达30余千米,由多相镁铁质—长英质的侵入体组成,其内发育的斑岩矿床具有重要的经济价值,受到中国矿床学家的密切关注。克拉通边缘也发育与钾质火成岩有关的铜金矿床,如铁氧化物铜金矿床(IOCG)、与侵入体有关的金矿床(IRGD)和卡林型金矿床(第7章)。其中,IOCG和IRGD型矿床发育在克拉通边缘,被认为与沿克拉通边缘上升的地幔柱有关,而卡林型矿床也被认为与陆内富挥发分的钾质火成岩有关。典型矿床包括南澳大利亚的世界级Olympic Dam IOCG型矿床、美国阿拉斯加州Fort Knox和西澳大利亚Telfer IRGD型金矿床、以及美国内华达的卡林型金矿床。

岩浆的成矿潜力是控制与岩浆有关的贵金属和贱金属矿床形成的关键因素,而金属的预富集是提高岩浆成矿潜力的方式之一。Müller and Groves(2019)搜集了代表性矿床钾质火成岩中的Au和PGE含量,结果显示钾质火成岩内富含Au、Cu等金属元素,有利于矿床形成(第5章)。挥发分、特别是卤素,对钾质火成岩的成岩成矿作用及金属的运移具有一定的制约作用,是钾质火成岩是否矿化的评价指标之一(第9章)。岩浆中Cl和F的存在以及S的氧化还原状态对于热液成矿系统中金属的迁移非常重要。Cl和S易与Cu、Au、Mo等金属元素形成络合物, (下转第1434页)