

doi: 10.12029/gc20190302

周圆心, 郑桂森, 何静, 李超, 刘予, 何晗晗, 肖景泽. 2019. 北京平原区地下空间建设地质安全监测问题探讨[J]. 中国地质, 46(3): 455-467.  
Zhou Yuanxin, Zheng Guisen, He Jing, Li Chao, Liu Yu, He Hanhan, Xiao Jingze. 2019. Research on geological safety monitoring of urban underground space resource utilization in Beijing[J]. Geology in China, 46(3): 455-467(in Chinese with English abstract).

## 北京平原区地下空间建设地质安全监测问题探讨

周圆心<sup>1</sup>, 郑桂森<sup>2</sup>, 何静<sup>1</sup>, 李超<sup>1</sup>, 刘予<sup>1</sup>, 何晗晗<sup>1</sup>, 肖景泽<sup>1</sup>

(1. 北京市地质调查研究院, 北京 100195; 2. 北京市地质矿产勘查开发局, 北京 100195)

**摘要:**北京平原区地质条件复杂, 冲洪积扇及冲洪积平原相互交织、软弱土体(人工填土、软土)大面积分布, 且浅表层地下水水流场多变、各类地质灾害发育(活动断裂、地面沉降等), 加大了地下空间建设难度, 建设完成后易发生各类事故。如软弱土体地层稳定性较差, 易发生较大地层形变甚至地面塌陷, 破坏地下建(构)筑物结构; 地下水水流场的变化, 影响地下空间的抗浮稳定性及防渗性, 在施工中可能遭遇突涌、施工中断甚至人员伤亡等严重后果; 活动断裂产生的三维空间形变, 兼具张拉、剪切和扭动的性质, 使跨断裂的地下隧道变形, 甚至能造成衬砌的断裂; 地面沉降发生面积和沉降速率都呈上升的趋势, 跨不均匀沉降区建设的地下轨道受沉降影响, 出现异常位移或基础破坏等现象。同时, 地下空间的建设, 对其周边地质环境也会产生作用, 产生一系列环境地质问题。如地下空间施工建设措施不当, 改变岩土体原有的应力平衡, 导致土体位移, 产生地表沉降或变形, 导致建筑物失稳、甚至破坏; 砂质粘土黏粒含量少, 饱和状态下受地铁振动易发生液化、流砂; 地下管线的渗漏导致地下水受到污染; 地下大型线性工程的建设阻断地下水水流场, 改变地下水环境等。本文拟阐述地质条件对地下空间建设的影响以及地下空间建设可能产生的地质环境问题, 从这两个方面出发, 提出地下空间建设监测的对象、监测体系及监测方法手段, 研究地下空间建成后的地质安全保障。

**关键词:**城市地质; 地下空间; 地质安全监测; 对象; 方法; 体系

中图分类号: P64; P66 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)03-0455-13

### Research on geological safety monitoring of urban underground space resource utilization in Beijing

ZHOU Yuanxin<sup>1</sup>, ZHENG Guisen<sup>2</sup>, HE Jing<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, HE Hanhan<sup>1</sup>, XIAO Jingze<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 100195, China; 2. Beijing Geological Prospecting and Developing Bureau, Beijing 100195, China)

**Abstract:** Geological conditions in Beijing plain area are extremely complicated, involving interlaced alluvial-pluvial fan and plain as well as widespread weak soil layers (e.g., made ground, soft soils), which leads to changeable shallow groundwater flow field and various geological hazards such as active faults and land subsidence, thus increasing the difficulty of underground space construction and accident probability. The weak soil layers normally have poor stability, which may cause large degrees of stratigraphic

收稿日期: 2017-12-15; 改回日期: 2019-02-28

基金项目: 北京市地质矿产勘查开发局项目(PXM2017\_158203\_000006)资助。

作者简介: 周圆心, 男, 1985年生, 硕士, 工程师, 主要从事地下空间调查评价、三维地质建模与评价等工作; E-mail: 86805428@qq.com。

通讯作者: 郑桂森, 男, 1959年生, 教授级高级工程师, 长期从事城市地质研究; E-mail: zhenggs@bjdkg.gov.cn。

deformation or even collapse and hence destroy the underground structures; in addition, the change of groundwater flow field can affect the anti-floating stability and impermeability of underground space, and may result in serious damages such as gushes during constructions; the active faults, which can cause three-dimensional spatial deformation with properties of tension, shear and torsion, are likely to deform underground tunnels or even lining fractures; meanwhile, the increasing ground subsidence area and subsidence rate would affect the underground tunnels constructed across the non-uniform subsidence area, and cause abnormal displacement or foundation failure. In addition, a series of geologically related environmental issues may occur during underground development, e. g., groundwater contamination, changes of groundwater flow field, or the liquefaction of sandy powder soils. In this paper, the authors investigated the influence of geological conditions on underground utilization and relevant environmental issues that arise with constructions, and elucidated the monitoring objects, index and methods for underground space development, with the purpose of contributing to geological security insurance for underground space utilization.

**Key words:** urban geology; underground space; geological security monitoring; monitoring objects; monitoring methods; monitoring index

**About the first author:** ZHOU Yuanxin, male, born in 1985, engineer, majors in geological engineering, engages in research on urban geology and underground space; E-mail: 86805428@qq.com.

**Fund support:** Supported by Beijing Geology Prospecting & Development Bureau Program (No. PXM2017\_158203\_000006).

## 1 引 言

北京作为国际性的大都市,在地下空间开发利用方面已经进入了一个飞速发展的阶段,全市地下空间总建筑面积由2001年的1856万 $\text{km}^2$ 到2013年4435万 $\text{km}^2$ ,以每年300万 $\text{km}^2$ 速度在增加。预计到2020年达到9000万 $\text{m}^2$ ,北京CBD将建设52万 $\text{km}^2$ 地下空间,成最大地下工程。北京地下空间开发利用深度规划最深将达到地下120 m深度,11个规划新城的中心区全部考虑地下空间开发利用。随着地下空间开发速度和深度的增加,凸显了地下空间相关基础研究特别是限制性因素和开发后对环境的影响远落后于地质安全保证的需求。

目前北京市地下空间建设主要位于平原区冲洪积扇及冲洪积平原相互交织区域,该区域地质条件复杂,软弱土体(人工填土、软土)大面积分布且浅表层地下水流场多变、各类地质灾害发育(活动断裂、地面沉降以及砂土液化等),地表重要建筑以及文物古迹密集,浅层地层分布大量的市政管线,地下空间建设难度较大,易发生各类事故。如2007年3月28日,北京地铁10号线苏州街站出现冒顶塌方事故,主要是由于地下空间的开发过程中出现的地质作用打破了地质环境的原有平衡,地质突变造成的,而塌方位置正好位于两个勘探点之间(解东升等,2012),这也说明了单靠工程勘察钻孔无法解决类似地质条件突变的问题。在其他城市也有类

似事件发生,2008年11月15日,杭州风情大道地铁施工工地发生大面积地面塌陷事故,造成较大的损失。调查表明,对地质条件认识不清是事故发生的主要原因,因此十分有必要开展地下空间相关研究及监测工作。

## 2 北京平原区200 m以浅地下空间建设地质环境分析

北京市平原区位于华北大平原的西北缘,西、北及东北面三面环山,东、南及东南面为广阔的平原区。平原地区由大清河水系、永定河水系、北运河水系、潮白河水系、蓟运河水系五大水系联合作用形成的洪冲积扇群构成(何静等,2019)。

平原区西部的各大河流冲洪积扇顶部部位,以单层砂卵、砾石地层为主;中部城区大部分范围内,地层过渡为黏性土、粉土与砂土、卵砾石互层;东部东郊地区则是以厚层黏性土、砂土为主(白凌燕等,2011;马震等,2017)。在北京平原区内,第四系沉积厚度由西向东逐渐增大,市区中心区范围内厚度一般为40~120 m,是最重要的地下空间建设岩层。中心城地下空间建设深度内地层主要以土层结构为主,基岩层埋深基本是在地下30~50 m以下,浅层含水层组底板埋深一般在20~40 m,中层含水层组底板埋深一般在80~120 m,深层含水层组底板埋深一般在180~250 m,部分地区可达300 m(郭高轩,2012)(图1、图2)。

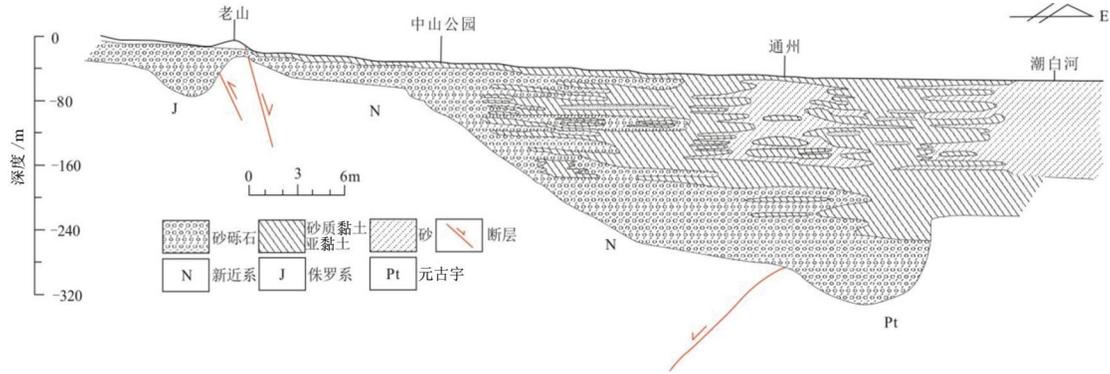


图1 北京平原区地质剖面图(北京城市地质)  
Fig.1 Geological sections of Beijing plain area (Urban geology of Beijing)

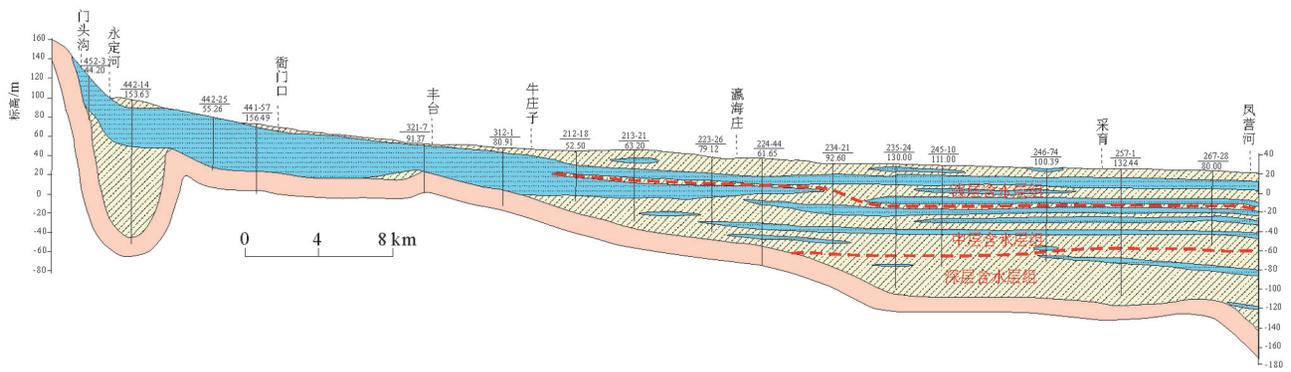


图2 永定河冲积扇水文地质剖面图(北京市多参数立体地质调查)  
Fig.2 Hydrogeological profile of Yongding river alluvial fan  
( after Report on Multi-parameter Three-dimensional Geological Survey in Beijing City)

北京平原区对地下空间资源开发利用有影响的主要地质环境问题包括:

(1)地面沉降。地面沉降是北京平原主要的地质灾害之一。近些年它的发生面积和沉降速率都呈上升的趋势,对城市建设和发展造成的威胁和损失越来越严重,构成地铁运行和地下管网等基础设施的安全隐患。北京平原地面沉降的原因主要是地质因素,受第四系三维结构和断裂系统控制,在冲洪积扇扇缘、沉积凹陷中心由于沉积物颗粒较细,存在可压缩地层,容易产生地面沉降(蔡向民等,2010)。不均匀地面沉降对于大型地下线型工程(如地铁、地下管廊以及输油管线等)有较大影响,特别对修建在可压缩地层内的工程影响更大。由于线型工程纵向长度大,在通过沉降梯度大的地区,抗纵向变形能力容易受到破坏,从而影响运营安全。地面不均匀沉降会导致轨道异常位移或基础破坏等现象,严重影响轨道运行的安全运行,对

轨道交通的长远发展极其不利(崔奕,2008)。从地面沉降的成因和影响机理分析,要减轻地面沉降对地下空间带来的危害,除了在规划阶段规避沉降梯度较大地区外,在开发地下空间时应尽量规避在可压缩层内进行。因此在开展监测工作的时候,地层的沉降或压缩量( $\Delta H$ )是监测的重要指标。

(2)活动断裂及地裂缝。北京平原隐伏断裂发育。大多数情况下地下空间建设,尤其是大型地下线型工程的建设(如地铁隧道、地下管廊等)不可避免遇到活动断裂。按照岩石间滑动的形式分为不稳定滑动(黏滑)和稳定滑动(蠕滑)。无论是断层的黏滑还是蠕滑,都会使断层产生变形,并且这种变形都是三维的空间变形,兼具张拉、剪切和扭动的性质。活动断裂对隧道影响主要表现为剪切破坏和地震破坏,活动断层的剪切破坏能使隧道变形,甚至能造成衬砌的断裂(郑升宝等,2013)。尽管断层蠕滑一般年位错量相对较小,但考虑到累积

效应,必须考虑其对隧道结构的剪切破坏效应(李鹏,2009)。因此在研究活动断裂对地下空间影响时,需要重点研究断裂位置、结构特征以及活动速率。在开展监测工作时,要对断层活动引发地层的变形量( $\Delta S$ )以及引发行变的地应力变化数值( $\Delta N$ )变化进行监测,并研究断层的活动速率。

(3)地面塌陷:地面塌陷地质灾害的发生与其发育的地质条件和作用因素密切相关,根据北京市的地理位置特点,结合其地质环境背景,考虑了如下几点致灾原因:①地面沉降,地面塌陷通常在靠近地面沉降中心且沉降梯度较大的地区发生;②地层条件,地面塌陷区域普遍分布着厚度不均匀的人工填土层,地下空间的开发施工过程中该层工程性能易受到施工扰动而降低,可能引起较大的地层位移,对地下空间建设施工及周边建筑物会造成影响;③降雨积水,当雨水不能直接进土层在滞留地形成积水,最终“挤”入排水管,水压可能胀破管道,水就会直接冲向管道周边疏松土层,从而引发路面塌陷(李皓,2009);④人为因素,由于地下水超采以及不合理的或强度过大的人类工程活动,使地下水位快速降低,其上部的地表岩、土体平衡性失调,在有地下空洞存在时产生塌陷(刘江龙,2006)。典型地区地面塌陷分布见图3,发生原因见表1。

(4)地下水位变化。地下水位上升,影响地下空间的抗浮稳定性及防渗性,降低周边岩土体的工程力学性能,对地下空间安全构成威胁。如位于北

京西客站北广场前的莲花东路深挖路堑,因为地下水位上升,水渗入后发生过严重破坏(李晓松等,2007)。随着北京近年来地铁大规模的建设,地下空间的开发深度越来越深,在建设时则可能遭遇承压水的影响。北京地铁隧道主要在土层中进行建设,围岩稳定性不如岩体。在承压水埋深浅、水头压力大的地区,如果没有彻底查清承压水位和水压而盲目设计施工,可能遭遇突涌、施工中断甚至人员伤亡等严重后果,可能导致整个地铁线路的重新规划和设计。开展监测工作时,要对地下水水位H开展监测,同时对地下水腐蚀性也要开展监测工作。

(5)放射性气体。地下工程由于其空间的有限性,通风条件较地面差,地下工程的环境质量问题也日益突出,其中氡的危害尤为严重。人体吸入氡气容易诱发肺癌。目前我国居室氡的浓度,特别是地下工程许多场所中的氡浓度已接近或达到了铀矿氡的水平( $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )相当严重(戴鸿贵等,1999)。北京地区尚未开展过区域性的放射性气体调查,还没有全面掌握地下放射性气体的分布规律。对地下空间开发的放射性气体的预防缺乏依据。根据研究显示,北京第四系隐伏断裂带地区氡地球化学异常明显。

### 3 地下空间资源开发利用过程中出现的环境地质问题

(1)周边土体变形导致建筑物结构破损。地下空间开发与利用措施不当,将改变岩土体原有的应力平衡,导致土体位移,产生地表沉降或变形,致使建筑物失稳、甚至破坏。目前北京地区地下空间开发对周边建筑结构已经产生了一些负面影响。2007年2月地铁4号线20标段施工导致海淀区大有庄南上坡地区多户房屋发生大面积断裂和塌陷,部分房屋不能居住;2007年3月28日地铁10号线苏州街站坍塌事故,造成6人死亡。部分地铁出现结构洞体开裂,如朝阳区四惠车辆段,多种直埋管道被切断,轻轨光熙门站,结构洞体发生沉降、开裂(李晓松等,2007)(图4)。开展监测工作时,在三维地质结构摸清的基础上,确定易发生地面塌陷的区域和深度,具体针对地层形变量 $\Delta S$ 开展监测。

(2)地下空间运营期间地质安全隐患突显。根据北京地铁建设及运行安全的地质问题研究报告

表1 北京典型地区地面塌陷灾害原因统计

Table 1 Typical reasons for surface collapse in Beijing City

事故点编号	塌陷原因			
	地面沉降	地层条件	降雨积水	人为因素
1	▲	▲		▲
2				▲
3	▲	▲		
4			▲	▲
5		▲		
6		▲		
7	▲	▲		
8		▲		▲
9	▲	▲	▲	
10		▲		
11		▲		
12		▲		

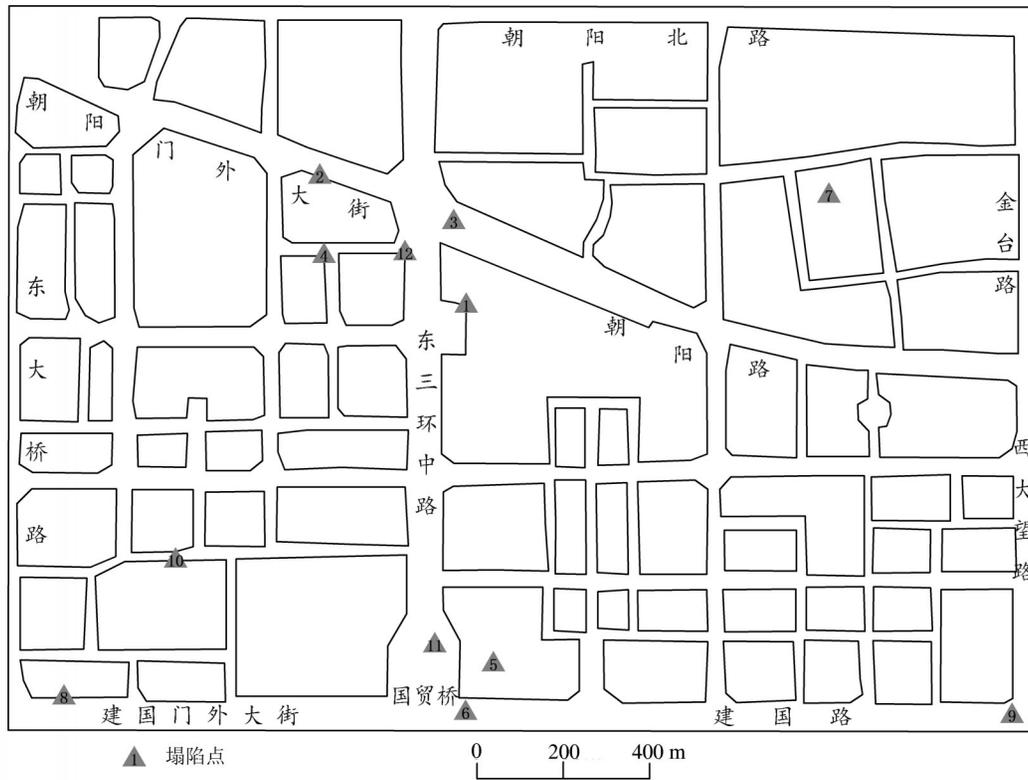


图3 北京市地面塌陷典型区分布示意图(北京地铁建设及运行安全的地质问题研究)

Fig.3 Typical areas of surface collapses(Research on geological issues of construction and operation security of Beijing metro)

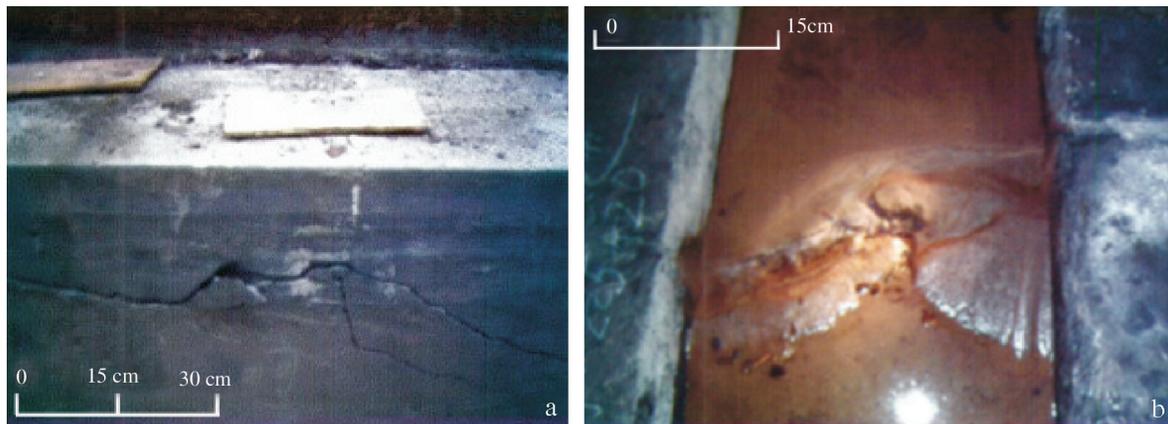


图4 某地铁站道床开裂(a)及轨道地基层冒砂(b)

Fig.4 Ballast bed cracking (a) and sand boil at lower level of the track foundation(b)

统计,2005—2010年地铁周边的地面塌陷累计次数达到135次,北京地铁部分站点已出现结构洞体开裂、渗水、沉降等安全隐患。如建国门站区间结构沉降、下层冒砂;回龙观车辆段地基沉降、松散及空洞,造成地铁轨道变形严重,地面开裂。根据北京市地面沉降对城市安全影响战略研究,2000—2006

年市自来水供水管线破损事故共6048处,其中地质原因造成的事故占34.28%(卫万顺,2010)。以上问题已对地下空间的安全运营造成极大的威胁。以地面塌陷为例,人工填土、砂质粉土层位往往是塌陷发生所在的层位,人工填土结构松散,均匀性差,遇水具有湿陷性,不均匀沉降;砂质粉土黏粒含量

少,饱和状态下,受外部振动易发生液化、流砂(图5)。在开展监测工作的时候,地层的沉降或压缩量( $\Delta H$ )是监测的重要指标,同时还应当对地下水位 $H$ 开展监测。

(3)土壤和地下水的污染。市政管网泄漏,废弃物回填,施工方法的选择、建成设施的使用等环节,均可能造成周围土壤和地下水的污染(焦玉国,2014)。

(4)破坏隔水层并对地下水流场的影响。地下空间开发破坏了隔水层,因为施工产生的废弃物污染,很容易产生地下水串层污染,同时地铁等地下线性工程可能阻断地下水流场,产生的侧向水压会影响地下水渗流通道。

通过对上述产生地质安全问题的分析,可见地下空间资源利用自身受岩土体变形、地层位移、水压以及应力影响突出,对周边环境影响以土体位移、失稳、水压失衡以及污染环境为主,可以设置监测内容如表2。

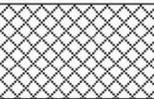
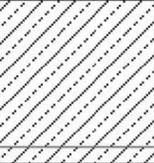
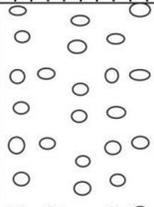
地层编号	层底标高/m	层底深度/m	分层厚度/m	柱状图	岩土名称及其特征
①	42.07	2.80	2.80		人工填土
②	37.37	3.50	4.70		砂质粉土 塌陷坑深度/m
③	31.07	13.80	6.30		粉细砂
④	24.87	20.00	6.20		卵石

图5 地面塌陷易发层位示意图

Fig. 5 Sketch map of layer that prone to ground collapse

## 4 地下空间监测现状及设想

### 4.1 地下空间监测技术现状

地下空间资源开发利用与地质环境二者之间是复杂的相互作用模式:一方面,地质环境影响地下空间资源开发利用,在地质灾害发育区或是工程地质条件不良地区进行开发利用必须考虑地质安全问题;另一方面,地下空间资源开发利用尤其是大规模的开发利用,势必对周围地质环境产生影响(Galloway, 1999; Don, 2008),随着地下空间的深层开发利用,地质条件更加多变复杂,也可能产生一系列地质环境问题。

现有地下空间的安全监测主要表现为对地下现有工程施工期的监测以及相关地面沉降和地下水监测。按照监测对象分类,地下空间监测相关的监测技术分为5类:(1)针对地表形变监测的监测技术,包括全站仪、经纬仪以及GPS等;(2)针对地层变形的监测技术,主要包括测斜仪、沉降杆、静力水准仪以及倾角仪等;(3)针对土体压力、水压力的监测技术,主要是土压力盒以及孔隙水压力计;(4)针对地层应变的监测,主要包含液压力式、振弦式应变计,以及近几年出现的光纤传感器;(5)针对环境的监测技术,主要包含水位计以及加速度计等。上述技术已经在地下隧道、洞室、基坑等地下工程取得了较为广泛应用,主要为建构物在地层中受到的应力和应变情况提供了丰富数据。

就地下空间监测而言,监测技术已经取得了大量丰富的成果,但是在地下空间监测体系研究方面

表2 监测对象及监测方法

Table 2 Monitoring objects and methods	
监测对象	监测方法
区域地质因素监测	地应力监测
	岩土体变形监测
	地下水位监测
地下空间本体 (地下工程结构体)	支护结构位移监测
	支护结构倾斜
	支护应力监测
	锚杆锚固力监测
	隧道收敛形变
地下空间场地周边地质体	地质体应力监测
	地层形变监测
	地下水水位变化监测
	孔隙水压力变化

还没有明确定论,就北京市而言,监测对象仅限于施工期间的地下空间本体监测,与地下空间资源开发利用相关的地质环境监测还仅仅限于地面沉降、地下水等监测,没有针对地下空间的前期规划、建设以及后期运行整个全周期的完整地下空间监测体系,缺乏地下空间监测预警研究。

#### 4.2 地下空间监测体系构成

地下空间资源监测指标确立是首要工作。所谓地下空间监测,是指运用各种方法和技术,对影响地下空间资源开发利用地质条件或者开发利用地下空间资源可能引发的地质安全隐患的各类因素的动态变化开展监视、测量工作。地下空间监测工作内容就是通过一定的监测仪器或监测手段对已知或可能存在影响地下空间的地质条件或者地下空间开发利用可能引发的地质安全隐患进行动态测量,了解各类地质因素变化规律及发展趋势,寻找关键临界点及数值,为预警提供依据。完整的地下空间监测体系的构成,由监测对象、监测方法、监测手段以及监测数据应用共同构成。

##### 4.2.1 监测对象

地下空间监测从监测对象划分为包括两大类,一类是宏观监测,针对区域地质因素进行监测,对线型地下空间本体两侧一定区域和穿越区域地质因素实施监测;对点状地下空间周边所在区域地质因素监测;另一类是场地监测,针对地下空间本体和地下空间场地周边地质体进行监测,本体主要针对支护结构体系内力监测、锚杆的锚固力监测等,这些是施工监测必不可少的内容;本体周边主要针对已知或可能存在影响地下空间的地质条件或者地下空间开发利用可能引发的地质安全隐患进行监测。由于各类地质条件或地质安全隐患成因复杂,类型多样,具体监测对象包括地下水动态、孔隙水压力、岩土体形变位移、地质体内应力场、地温、有害气体等。监测可以采用已有成果和加密已有监测点的方法取得,特别是对区域上地质灾害隐患点的已有监测数据应用,是保障地下空间资源安全开发的基础。

##### 4.2.2 监测方法

涉及地下空间资源地质安全开发利用的地质因子复杂,类型多样,这直接导致其监测技术和方法也是非常丰富多变的。按不同监测对象确定不同的监测方法,选用合适的监测仪器进行监测。

针对地下空间周围地质环境监测,目前没有相关规范或者指南具体指导,国内文献也未见相关报道,本文在近几年的工作实践中针对不同监测对象,总结了几类监测方法:

(1)地应力。在地层内地应力一般都在不断活动,它是物理地质作用的动力,使地层形成褶皱、断裂。随着人类活动的加剧,地下空间的开发深度和建设规模的增加,地应力直接影响工程稳定性。因此对地应力开展监测有重要的意义,监测它的变化可以对地下空间稳定性和安全性做出科学的判断。对地应力开展监测,主要监测水平和垂向应力的方向、大小、方向以及应力的变化。监测仪器可以采用土压力盒监测地层周边受到的切向压力,采用三向应力计测量土体的压力方向和主应力方向,监测数据为地层的变化受力情况分析提供依据。

(2)地层形变。地层形变监测的目的是了解地下空间周边土体由于受力而引起的不同层位垂直、水平位移的变化情况。地层形变对大型的地下线性工程影响很大。按照土体位移的方向可以分为深层土体垂直位移(深层土体分层沉降)和深层土体水平位移(土体测斜)。针对土层垂直位移可以采用分层沉降杆或者分布式光纤进行监测,土体水平位移可以采用测斜仪进行监测。

(3)孔隙水压力。孔隙水压力是影响土体稳定性的一个重要因素,是研究土体应力应变与强度关系的重要因素(赵志刚等,2012),利用孔隙水压力计对不同岩性地层的孔隙水压力进行分层监测。

(4)地下水位。地下水位对地下空间的安全有直接的影响,用水位计监测不同层位的水头高度变化情况。特别是地下水调蓄过程中水位持续提高条件下,更要高度重视对线性工程、大型基坑和大规模的地下空间的影响。

(5)岩土体含水率。岩土体含水率主要监测水分含量,判定含水饱和度,用于研究砂土液化、土体稳定性。利用高频水分探测器可以对含水率进行实时监测。

##### 4.2.3 监测数据应用

通过对地下空间开展相关监测工作,获取的数据既有点状单体建筑物监测数据,也有区域监测数据,点面数据可以结合分析。获取的应力应变等监测数据可综合分析应力、孔隙水压力以及土体含水率与地

层形变之间关系,为建立监测地区土体的本构模型以及地下空间预警预报模型建立积累数据。其分析的结果主要可用于两个方面:一是指导前期地下空间资源的科学规划利用,二是预测已有地下空间的地质变化发展趋势,并做出相应的预警。

#### 4.2.4 地下空间监测体系构成

为了实现整个监测系统的信息化和自动化,地下空间监测体系采用物联网、大数据、云计算技术,监测相关的各个参数。系统完成数据采集后,将数据进行远程传输到云平台。云平台对数据进行分析、记录。系统包括监测点(传感器、采集仪)、基站以及互联网三个层面(图6)。

### 5 监测点建设示例

#### 5.1 监测目的及任务

2017年底,在北京某在建地下空间建筑设施附

近,针对影响地下空间地质安全的动态信息进行监测,主要以下几个内容:对地下120 m内的岩土体的应力应变、地下120 m内土体水平位移及垂直位移开展长期监测(布置的监测设施还包括地下水水位,以及对孔隙水压力、土壤含水率、地表垂直位移监测等,但由于场地施工因素,监测数据尚未形成),目的是为建立该地区地下空间监测模型的建立积累数据,同时为研究多尺度(地下空间建筑本体监测数据、周边地质体监测数据、区域监测数据预测三个尺度)预测地下空间建筑周边地质条件变化发展趋势提供数据支撑。

#### 5.2 布置内容

本次监测共布置9个监测孔,监测孔分布情况见图7,监测孔内的传感器及其监测内容见表3。

#### 5.3 监测数据分析

已经顺利开展的监测主要为光纤垂直位移监

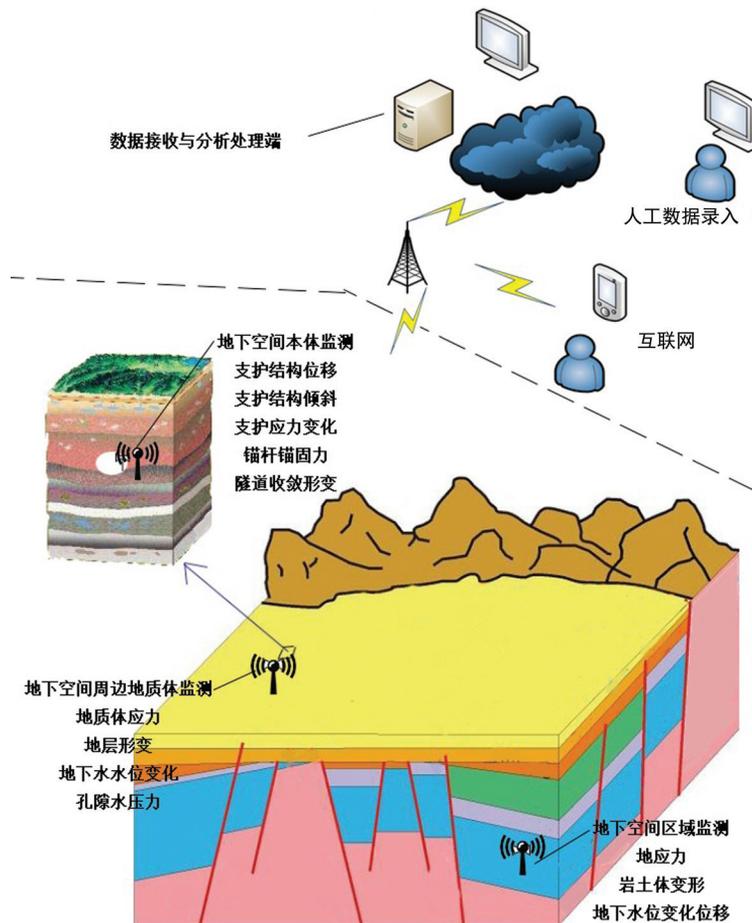


图6 自动监测系统拓扑图

Fig.6 Topological diagram of automatic monitoring system

测以及振弦式土压力监测,详细数据如下:

(1)应变感测光缆。应变感应光缆分为两组,分别为金属基索状应变感测光缆(钢绞线)和定点应变感测光缆(定点光缆)。其中钢绞线共采集数据18期,定点光缆共采集数据17期。以光缆下放后回填前的数据为初始值,则地下80 m以浅的钢绞线、定点光缆主要表现为拉伸状态,80 m以深的钢绞线、定点光缆主要表现为压缩状态,主要与监测孔内回填土的压实、光缆以及光缆配重锤的自重有关系。两种应变感测光缆的微应变在2月以后几乎重合,微应变很小。经现场核实,监测孔内回填土基本压实。通

过监测数据可得,土体压实后垂直位移量较小(图8、图9)。

(2)振弦式土压力计的监测数据。由地下30 m深的振弦式土压力传感器的压力值与时间关系曲线(图10)可知,该组传感器测得的压力值随时间变化有变大的趋势,这与监测钻孔内的回填土的压实作用有关。经现场核实,监测孔处在3月开始施工回填,导致周边土体对监测孔位的土体施加的荷载,使土压力所测得的压力值增大。

由地下100 m深的振弦式土压力传感器的压力值与时间关系曲线(图11)可知,该组传感器测得的压

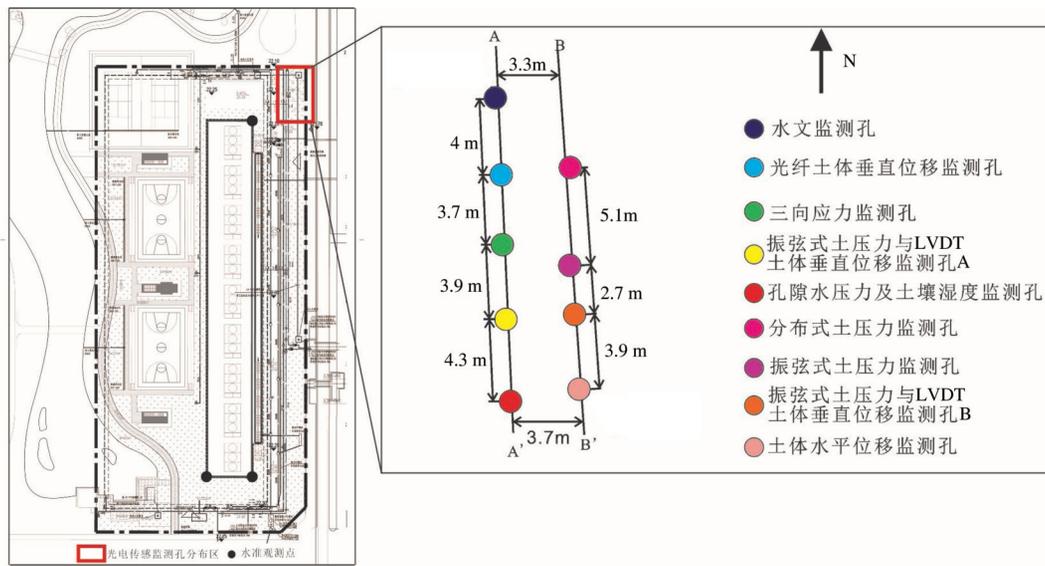


图7 监测孔分布图

Fig.7 Distribution of monitoring boreholes

表3 监测钻孔设备布置情况

Table 3 Boreholes and related monitoring equipment

序号	监测孔名称	监测内容	孔内监测设备
1	水文监测孔	地下水位	一体化水位传感器
2	光纤垂直位移监测孔	土体的垂直位移	金属基索状应变感测光缆 定点式应变感测光缆 光纤光栅位移计
3	分布式土压力监测孔	土体压力	分布式光纤压力传感器
4	三向应力监测孔	土体三向应力	空心包体三向应力传感器
5	振弦式土压力监测孔	土体压力	振弦式土压力计(4个侧向、1个垂向)
6	振弦式土压力及LVDT土体垂直位移监测孔(A)	土体压力 土体的垂直位移	振弦式土压力计(4个侧向) 垂直位移传感器(50 m、35 m)
7	振弦式土压力及LVDT土体垂直位移监测孔(B)	土体压力 土体的垂直位移	振弦式土压力计(1个垂向) 垂直位移传感器(120 m)
8	孔隙水压力及土壤湿度监测孔	孔隙水压力 土壤湿度	渗压传感器 土壤湿度传感器
9	水平位移监测孔	土体的水平位移	水平位移传感器

力值随时间变化虽然有变大的趋势,但是这种趋势小于地下30 m组。这是由于该组传感器埋放深度较深,土体上覆荷载较大,钻孔内回填土的压实作用较强,导致了该层位土压力的变化量较小。

由地下120 m处垂向振弦式土压力计测得压力值与时间关系曲线图(图12)可知,该组传感器测得的压力值经历了先增大,后平稳,再增大的过程。压力值增大反映了土体压实的过程,压力值平稳反映应力土体压实过程基本完成,后期土体压力再次增大与施工回填关系密切。该深度下由于回填导致的土压力增大现象明显,压力曲线变化趋势一定程度上反映了施工回填后应力变化的趋势。

## 6 讨论与展望

### 6.1 讨论

地下空间建设地质安全监测是一个庞大的系统工程,本文从现有的地下空间建筑本体监测技术为出发点,构思出地下空间建设地质安全监测的一

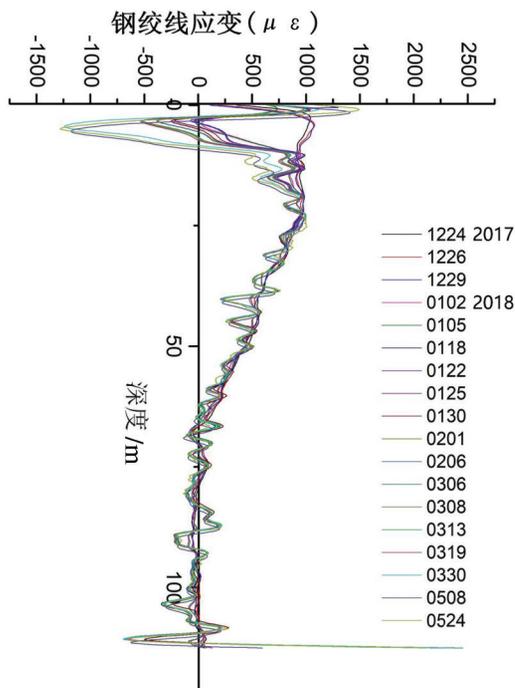


图8 钢绞线微应变与深度关系曲线图  
Fig.8 The relational curve between micro-strain of steel strand and depth (S-D)

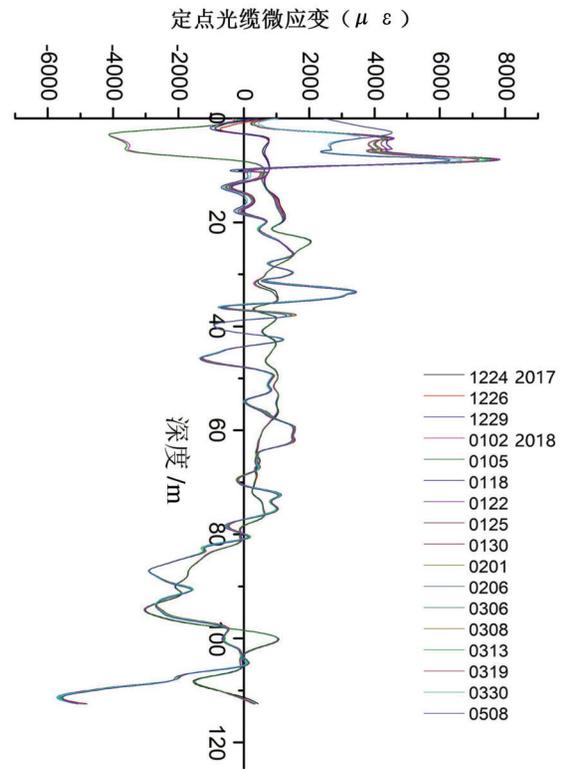


图9 定点光缆微应变与深度关系曲线图  
Fig.9 The relational curve between micro-strain of fixed-point optical cable and depth (S-D)

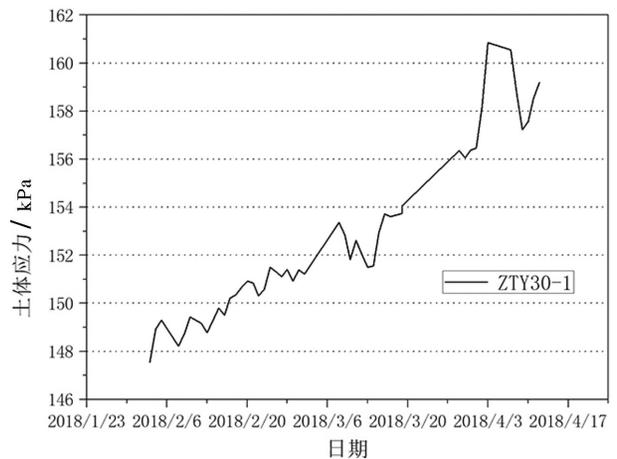


图10 地下30 m处垂向振弦式土压力计测得压力值与时间关系曲线图  
Fig.10 The relational curve between pressure values (measured by vertical vibrating string earth pressure gauge at 30m from the surface) and time (P-T)

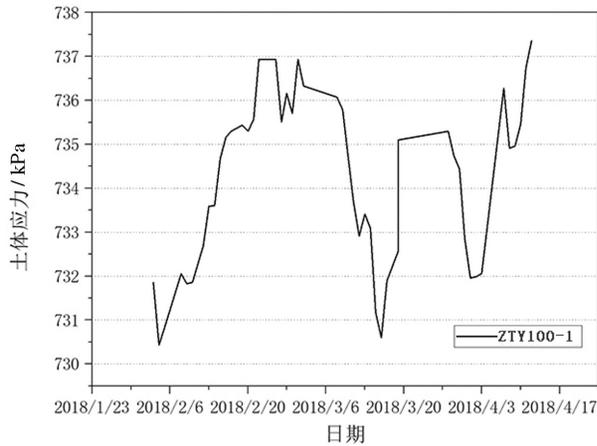


图11 地下100 m处垂向振弦式土压力计测得压力值与时间关系曲线图

Fig.11 The relational curve between pressure values (measured by vertical vibrating string earth pressure gauge at 100m from the surface) and time ( $P-T$ )

种体系,即本体监测——周边监测——区域监测融合体系,与传统建筑本体监测技术相比,本监测体系重点关注的是影响地下空间建成后影响其安全的地质因素监测,目的是通过分析地下空间建筑本体形变、周边地质条件变化、大区域地质环境变化之间的关系,判断已建成地下空间的安全性。

在此设想下,对北京某地区在建地下空间建筑周边布设一系列监测设施,随着工程建设的进展,采集了一段时期内其周边地质条件的变化数据,并分析了导致数据变化的原因,说明目前地下空间建筑周边监测对分析地下空间周边地质因素变化原因是有效果的。鉴于目前该地下空间建筑处于在建阶段,受条件所限只采集了一定时期的土压力和垂直位移数据,该地区区域地质环境监测网尚处于项目申报之中,尚无法开展本体监测数据、周边地质条件监测数据、区域地质环境监测数据的联合分析,因此不具备条件开展该建筑设施周边的地质安全性预测。

从已经获取的监测数据来看,可以明确反应出该建筑设施周边的地质条件变化状态。在将来监测体系布设完成后,区域地质环境的变化、建筑物周边地质条件变化与建筑物本体变化三者之间的变化关系可以分析,对于建筑物周边地质条件的突发性变化数据也可以即时获取,为该区域地下空间建设地质安全研究提供数据支撑。



图12 地下120 m处垂向振弦式土压力计测得压力值与时间关系曲线图

Fig.12 The relational curve between pressure values (measured by vertical vibrating string earth pressure gauge at 120 m from the surface) and time ( $P-T$ )

## 6.2 展望

今后随着该设施的建成运营,其本体监测数据会有一个积累过程,该区域地质环境监测网正式运行后,区域地质环境数据也会逐渐丰富。结合已有的建筑周边地质因素监测数据,便可对区域地质环境变化与地下空间建筑设施周边地质条件变化的关系进行研究和分析,总结出区域地质环境变化影响该建筑位置地质条件变化的数学关系;同时建筑本体形变与其周边地质条件变换的数学关系也可进行推导。据此,依托该地质安全监测体系进行已建成地下空间设施的安全性预测便有了数据和方法支撑,从地质角度保障已建成地下空间设施的安全运营。

## 7 结论

地下空间开发利用地质环境问题研究建立在城市地质调查工作经验及成果基础上,是一项综合性的地质研究工作,需要多学科、多专业人员共同完成,需要针对不同的地质条件,选择不同的研究重点。

北京市已经开展多年的地下空间地质条件综合评价以及地下空间周边地质环境监测研究工作,制定了一套适合北京市地下空间地质条件多层次评价体系以及地下空间多尺度融合监测体系。在评价层面,已经多次与规划部门合作开展北京市地下空间总体规划编制;在监测层面,已经完成了重点区域的工作部署并采集了大量的数据,取得了阶段性工作成果及

经验,为下一步工作的开展奠定了基础。

随着城市的发展及人口增加,原有地面资源已经无法满足需求,地下空间开发利用规模会逐渐增大,可能产生的地质环境问题也可能加剧。国内部分大型城市已经开始进行地下空间开发利用的规划,地下空间开发利用将是今后一段时期的热点。地下空间的地质安全问题综合研究尚处在初步阶段,针对地下空间地质环境监测的研究也较少,尚未形成统一的标准。地下空间地质工作是城市地质工作的一个重要分支,随着研究的不断深入,将会取得长足发展。

## References

- Bao Yigang, Liu Zhenfeng, Wang Shifa, Huang Renghe, Bai Zhiming, Wang Jiming, Wang Zenghu. 2001. A Centennial Study of Geology in Beijing: History and Latest Achievements of Basic Geological Research in Beijing Area [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Bai Lingyan, He Jing, Wang Jiming. 2011. Characteristics of the ground subsidences in Beijing and their causes[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 22(4):41–45, 49 (in Chinese with English abstract).
- Beijing Geology Prospecting & Development Bureau, Beijing Institute of Geological Survey. 2008. Urban Geology of Beijing [M]. Beijing: China Land Press (in Chinese).
- Beijing Geology Prospecting & Development Bureau. 2007. An Report on Multi-parameter Three-dimensional Geological Survey in Beijing City[R] (in Chinese).
- Beijing Institute of Geological Survey. 2010. An Research Report on Geological Issues of Construction and Operation Security of Beijing Metro[R] (in Chinese).
- Cai Xiangmin, He Jing, Bai Lingyan, Liu Hong. 2010. The Geology Problem in Development and Utilization Programming of Underground Space Resources in Beijing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 6(6):1105–1111 (in Chinese with English abstract).
- Clayton C, Xu M, Whiter J, Ham A, Rust M. 2010. Stresses in cast-iron pipes due to seasonal shrink-swell of clay soils[J]. Water Management, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 163 (3): 157–162.
- Cui Yi. 2008. Study of Some Key Problems of Civil Engineering in Tianjin No.1 Subway[D]. Tianjin: Tianjin University (in Chinese with English abstract).
- Dai Honggui, Zheng Zheng, Yu Gang, Dai Zhixuan, Kong Lingren. 1999. Radon pollution in underground building and tackling countermeasures[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 35 (2):222–229 (in Chinese with English abstract).
- Don N C, Araki H, Hang N T M. 2008. Modeling groundwater flow and its associated environmental problem in a lowland coastal plain: A first step towards a sustainable development plan[J]. Environment, Development and Sustainability, 10(2): 219–231.
- Guo Gaoxuan. 2012. Comprehensive assessment of groundwater quality of different aquifers in Beijing Plain[J]. Geology in China, 39(2):518–523 (in Chinese with English abstract).
- He Jing, He Hanhan, Zheng Guisen, Liu Yu, Zhou Yuanxin, Xiao Jingze, Wang Chunjun. 2019. 3D geological modelling of superficial deposits in Beijing City[J]. Geology in China, (2):244–254 (in Chinese with English abstract).
- Hiroshi Naruse, Koji Komatsu, Kazuhiko Fujihashi, Masaru Okutsu. 2005. Telecommunications tunnel monitoring system based on distributed optical fiber strain measurement[C]//Proceedings of SPIE, 5855: 168–171.
- Hu Jianping. 2005. Discussions on the exploitation of underground space and influence of geological environment in Nanjing City [J]. Jiangsu Geology, (1):46–49 (in Chinese with English abstract).
- Hyung-Sik Chung, Byung-Sik Chun, Byung-Hong Kim, Yong-Jae Lee. 2006. Measurement and analysis of long-term behavior of seoul metro tunnels using the automatic tunnel monitoring system[C]//Proceedings of the World Tunnel Congress and 32<sup>nd</sup> ITA Assembly, Seoul, Korea. Journal of Civil Engineering and Management, 29 (1): 61–67.
- Jiao Yvhuo. 2014. Effect analysis on underground space development to geological environment in Tai'an City[J]. Shandong Land and Resources, 30(12):59–62 (in Chinese with English abstract).
- Li Hao. 2009. How to solve issues of urban road waterlogging and surface collapse in Beijing[J]. Science & Culture Science-tech Waves, (9):42–43 (in Chinese with English abstract).
- Li Huazhang. 1995. Quaternary Palaeogeography in Beijing[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–152 (in Chinese).
- Li Husheng. 2008. Current state and prospects of geotechnical engineering safety technology in urban underground space development[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 8(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Li Peng. 2009. Research on Anti-breaking Structural Design of the Highway Tunnel across Active Fault Zones[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaosong, Sun Baowei, Yao Xuchu. 2007. Analysis on the influence of groundwater variation to the safety of underground-transportation facilities in Beijing[J]. Urban Transport of China, 5 (2):81–85 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianglong. 2006. The Study on Mechanism of Ground Collapse and its Dangerous Appraisal in Guangzhou[D]. Guangzhou: Guangzhou University (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xie Hailan, Lin Liangjun, Hu Qiuyun, Qian Yong, Zhang Surong, Wang Guiling, Li Jianguo, Tan Chengxuan, Guo Haipeng, Zhang Fucun, Zhao Changrong, Liu Hongwei. 2017. The environmental geological conditions of Land resources in the

- Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(5):857-873 (in Chinese with English abstract).
- Netzel H, Kaalberg F J. 1999. Numerical risk assessment studies for masonry structures due to TBM tunnelling in Amsterdam[C]// *Proceedings of Underground Construction in Soft ground*, Tokyo, Japan.
- Phienweij N, Giao P H, Nutalaya P. 1998. Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control[J]. *Environmental Geology*, 50(1/2): 187-201.
- Shi Xiaodong. 2006. History and future of underground space development and utilization in Beijing[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2(7): 1088-1092 (in Chinese with English abstract).
- Song Minsheng, Zhu Renjun. 1993. Discussion on several issues in shield construction[J]. *Construction Mechanization*, (3):2-5 (in Chinese with English abstract).
- Wei Wanshun. 2010. Study on the key geological problems during Beijing constructing to a Global City[J]. *Urban Geology*, 5(3):1-7 (in Chinese with English abstract).
- Xie Dongsheng, Qian Qihu, Rong Xiaoli. 2012. Risk management in rail transit construction[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(1):61-67(in Chinese with English abstract).
- Xie Yuping. 1994. *Quaternary Geology and Geomorphology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 42-58 (in Chinese).
- Yan Xuexin, Gong Shiliang, Zeng Zhengqiang, Yu Junying, Shen Guoping, Wang Tiejun. 2002. Relationship between building density and land subsidence in Shanghai urban zone[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 29(6):21-25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng, Huang Runqiu, Xu Qiang, Tao Lianjin. 2009. *Analysis Principles of Engineering Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhao Zhigang, Zhao Lianheng, Li Liang, Deng Dongping. 2012. Upper bound stability analysis for parallel bedding rock slope subjected to water level fluctuations[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 9(3):51-57 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Shengbao, Jiang Shuping, Li Peng. 2013. The damage characteristics and protection methods of tunnel cross active fault zone[J]. *Highway Engineering*, 38(4):25-28,33 (in Chinese).
- 北京市地质调查研究院. 2010. 北京地铁建设及运行安全的地质问题研究报告[R]. 北京.
- 蔡向民,何静,白凌燕,刘鸿. 2010. 北京市地下空间资源开发利用规划的地质问题[J]. *地下空间与工程学报*, 6(6):1105-1111.
- 崔奕. 2008. 天津地铁一号线土建工程关键技术问题研究[D]. 天津: 天津大学.
- 戴鸿贵, 郑正, 余刚, 戴志轩, 孔令仁. 1999. 地下工程中的氡异常及其治理对策[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 35(2):222-229.
- 郭高轩. 2012. 北京市平原区地下水分层质量评价[J]. *中国地质*, 39(2):518-523.
- 何静,何哈哈,郑桂森,刘予,周圆心,肖景泽,王纯君. 2019. 北京五环城区浅部沉积层的三维地质结构建模[J]. *中国地质*, (2):244-254.
- 胡建平. 2005. 南京市地下空间开发与地质环境效应初探[J]. *江苏地质*, (1):46-49.
- 焦玉国. 2014. 泰安市城区地下空间开发与环境地质影响关系分析[J]. *山东国土资源*, 30(12):59-62.
- 李胡生. 2008. 城市地下空间岩土工程安全技术现状与展望[J]. *上海应用技术学院学报*, 8(1): 1-8.
- 李华章. 1995. 北京地区第四纪古地理研究[M]. 北京:地质出版社, 1-152.
- 李鹏. 2009. 活动断层区公路隧道抗错断结构设计的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学.
- 李晓松, 孙保卫, 姚旭初. 2007. 北京市地下水环境变化对地下交通设施安全的影响分析[J]. *城市交通*, 5(2):81-85.
- 李皓. 2009. 北京应如何解决道路积水与路面塌陷的难题[J]. *科技潮*, (9):42-43.
- 刘江龙. 2006. 广州市地面塌陷成灾机制与危险性评价[D]. 广州: 广州大学.
- 马震,谢海澜,林良俊,胡秋韵,钱永,张素荣,王贵玲,李建国,谭成轩,郭海朋,张福存,赵长荣,刘宏伟. 2017. 京津冀地区国土资源环境地质条件分析[J]. *中国地质*, 44(5):857-873.
- 石晓冬. 2006. 北京城市地下空间开发利用的历程与未来[J]. *地下空间与工程学报*, 2(7): 1088-1092.
- 宋敏生, 祝人骏. 1993. 盾构施工中几个问题的探讨[J]. *工程施工*, (3):2-5.
- 卫万顺. 2010. 北京建设世界城市亟需解决的关键地质问题[J]. *城市地质*, 5(3):1-7.
- 解东升, 钱七虎, 戎晓力. 2012. 地铁工程建设安全风险管理研究[J]. *土木工程与管理学报*, 29(1):61-67.
- 谢宇平. 1994. *第四纪地质学及地貌学*[M]. 北京:地质出版社, 42-58.
- 严学新, 龚士良, 曾正强, 俞俊英, 沈国平, 汪铁骏. 2002. 上海城区建筑密度与地面沉降关系分析[J]. *水文地质工程地质*, 29(6):21-25.
- 张俤元, 王士天, 王兰生, 黄润秋, 许强, 陶连金. 2009. *工程地质分析原理*[M]. 北京:地质出版社.
- 赵志刚, 赵炼恒, 李亮, 邓东平. 2012. 水位升降对顺层岩坡稳定性影响的上限分析方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 9(3):51-57.
- 郑升宝, 蒋树屏, 李鹏. 2013. 活动断层区隧道破坏特点及应对方法[J]. *公路工程*, 38(4):25-28+33.

## 附中文参考文献

- 鲍亦冈, 刘振锋, 王世发, 黄初河, 白志民, 王继明, 王增护. 2001. 北京地质百年研究[M]. 北京:地质出版社.
- 白凌燕,何静,王继明. 2011. 北京市地面塌陷特征与致灾因子分析[J]. *地质灾害与环境保护*, 22(4):41-45+49.
- 北京市地质矿产勘查开发局、北京市地质调查研究院. 2008. 北京城市地质[M]. 北京:中国大地出版社.
- 北京市地质矿产勘查开发局. 2007. 北京市多参数立体地质调查报告[R]. 北京.