

城市地质调查中的地质安全风险评价研究

陈小涛

中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157021

[摘要]城市地质安全是城市可持续发展的基础性保障。本文以长春市为研究对象,系统梳理了区域地质环境的基本特征,从地面沉降、地裂缝与地基变形、地下空间开发以及冻融循环作用四个维度识别城市地质安全风险类型,并结合多源数据获取手段分析了各类风险的成因机制与演化规律。在此基础上,从监测预警体系优化、地下水资源管控、地下空间开发防控以及地质调查成果服务城市规划四个方面提出针对性防控措施。研究表明,城市地质安全风险评价需要建立“识别-评价-防控”的全链条技术体系,将地质风险管控深度嵌入城市规划建设全流程。

[关键词]城市地质调查;地质安全风险;风险识别;冻融循环;监测预警

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20194

中图分类号: X935

文献标识码: A

Research on Geological Safety Risk Assessment in Urban Geological Survey

CHEN Xiaotao

Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Mudanjiang, Heilongjiang, 157021, China

Abstract: Urban geological safety is the fundamental guarantee for sustainable urban development. This article takes Changchun City as the research object, systematically sorts out the basic characteristics of the regional geological environment, identifies the types of urban geological safety risks from four dimensions: ground subsidence, ground fissures and foundation deformation, underground space development, and freeze-thaw cycles, and analyzes the causes and evolution laws of various risks by combining multi-source data acquisition methods. On this basis, targeted prevention and control measures are proposed from four aspects: optimizing the monitoring and early warning system, controlling groundwater resources, preventing and controlling underground space development, and using geological survey results to serve urban planning. Research has shown that urban geological safety risk assessment requires the establishment of a full chain technical system of "identification evaluation prevention and control", deeply embedding geological risk control into the entire process of urban planning and construction.

Keywords: urban geological survey; geological safety risks; risk identification; freeze-thaw cycle; monitoring and early warning

城市地质安全属于国土空间规划科学性以及韧性城市建设的根基性支撑。城市地质调查是支撑城市规划、建设、运营的基础性、先行性工作,对城市可持续发展、地质安全风险防控起着重要的作用。但是目前城市地质安全风险评价还存在深覆盖区地质隐患精准识别难、基础设施地质风险动态评估不到位等重大科学问题。

1 城市地质环境特征分析

长春市位于松辽沉积平原东部边缘,地貌形态以波状台地、一级阶地为主,台地面积占总面积的 70%左右,地表微波起伏,海拔 200~230m,最高 245m,比区内主要河流一级阶地高 10~20m。台地主要由第四系上、中更新统黄土状土组成,下伏为白垩系泥岩或砂岩,属泉头组、青山口组和姚家组地层。区域地层结构比较复杂,上部第

四系松散堆积物覆盖面积大,总厚度为 15~28m;下部白垩系岩层厚度超过 500m,岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩,岩层走向 NE-SW,倾向 NW,倾角较小(5°~10°),属不透水或弱含水层。区域构造上位于吉黑褶皱系(I级)、松辽中断陷(II级)之东南隆起(III级)带东部边缘,为九台凸起(IV级)东南部。长春市东南部为北东向依兰-伊通岩石圈断裂带,西北部为北东向四平-长春-德惠岩石圈断裂带,区内有断裂构造发育,新构造活动性较强,但都被第四系覆盖。伊通河断裂是长春市区内一条重要的南北向断裂,呈近南北向分布,总体向西倾斜,倾角大,切断白垩系地层,是一条早第四纪活动断层。伊通-舒兰断裂带为现代活动断裂,20 世纪以来周边有三次 5 级以上的地震活动。气候为温带大陆性季风气候,冬季寒

冷干燥, 年均气温 $4.1\sim 4.9^{\circ}\text{C}$, 1 月均温约 -17°C 。长春市属于季节性冻土区, 冻土期在 10 月至次年 5 月间, 平均初日和终日分别为 10 月 25 日和 5 月 2 日, 多年平均冻结深度 131cm。水文地质上地下水类型以第四系孔隙潜水和白垩系孔隙裂隙水为主, 台地冲洪积黄土状亚黏土孔隙水的补给水源主要是大气降水, 排泄方式主要是人工开采。以上地质构造、气候状况以及水文特点一起形成长春市地质安全风险的孕育环境。

2 城市地质安全风险识别

2.1 地面沉降风险识别

地面沉降属于城市中主要的环境地质问题, 具有不可逆性、灾害发育周期长、防治难度大的特点, 并且还会引发一系列地裂缝等其他灾害。长春市为缺水的中型城市, 早在上世纪八十年代就曾出现过因地下水的无限制开采而在市中心形成明显地面沉降的迹象。地面沉降的主要成因机制有地下水超采造成的地层压密、大规模建筑荷载作用下土层的压缩、城市地下工程施工扰动等。选择 2022 年 3 月至 2023 年 11 月期间的 52 景 Sentinel-1A 影像, 用时序 InSAR 方法获取长春市中心城区的路面沉降结果, 研究区内最大形变速率为 $-30.58\text{mm}/\text{年}$, 最大累计沉降为 -73.3mm 。时序 InSAR 属于一种新的主动式微波遥感技术, 它有着全天时、全天候、大面积获取毫米级形变信息的优点, 是城区地表形变监测的关键技术手段^[1]。地面沉降的识别要综合利用水准测量、分层标监测、InSAR 遥感解译等多种手段, 主要从沉降速率、累计沉降量、地下水位动态变化等几个方面入手。

2.2 地裂缝与地基变形风险识别

地裂缝和地基变形属于地面沉降的伴生灾害, 也是城市建设过程中不能忽视的地质安全问题。地面沉降的区域性差异会导致地裂缝的发生, 地裂缝一旦形成, 沿线建筑就会出现严重的开裂现象, 给城市基础设施和人民生命财产安全造成直接的危害。长春市东南侧为北东向的依兰-伊通岩石圈断裂带, 西北侧为北东向的四平-长春-德惠岩石圈断裂带, 区内断裂构造发育, 新构造活动性强, 但都被第四系所覆盖。伊通河断裂近南北向延伸, 总体向西倾斜, 倾角大, 伊通-舒兰断裂带为现代活动断裂, 20 世纪以来周边有三次 5 级以上的地震活动。研究区地裂缝及地基变形风险主要由三个部分引起, 即区域地面不均匀沉降所造成的差异沉降、地下工程施工扰动导致的地层应力重新分布、特殊土体在环境变化时的体积变形。长春市黄土状土分布范围广, 基本遍布全市, 分布厚度比较均匀, 作为地基土的工程地质性质较好; 总体上孔隙较多, 强度比

典型的老黏性土低, 比一般的黏性土高, 为中压缩性土体。二级阶地黄土状亚黏土厚 $15\sim 25\text{m}$, 抗压强度 $20\sim 25\text{t}/\text{m}^2$, 为较好的天然地基; 一级阶地亚黏土层地基抗压强度 $8\sim 11\text{t}/\text{平方米}$ 。地裂缝识别要依靠钻探、物探等方式找到隐伏裂缝的发育情况和力学扩展方式, 地基变形监测需要设置倾斜仪、沉降观测点等设备对建筑基础的差异沉降进行连续观测。

2.3 地下空间开发地质风险识别

随着城市地下空间的规模化开发, 地下工程所造成的地质风险也越来越明显。长春市近些年来轨道交通建设不断推进, 长春轨道交通 7 号线一期工程全长 23.164km , 设 19 座车站, 是城市东北至西南向的交通加密骨干线。地下空间开发规模迅速扩大。盾构施工是地下工程的主要工法之一, 地质风险识别也十分重要。长春轨道交通盾构区间需穿越多条铁路线路、文保地块及密集建成区, 区间穿越地层主要为全断面中风化泥岩, 该类岩层裂隙水丰富, 遇水易软化崩解, 黏附盾构刀盘, 失水硬化干裂, 其膨胀性和崩解性对基坑边坡及隧道的稳定性构成威胁, 是高寒地区地下轨道交通工程中较为突出的技术难题。施工过程中土质遇水容易软化崩解、黏附刀盘形成泥饼, 失水后又会硬化干裂, 很容易造成管片错台、地表沉降甚至坍塌。盾构机操作时, 在最小平面曲线半径为 320m 、最大坡度为 27‰ 的条件下进行掘进。钻探以及传统的物探等勘察手段可以给出准确的局部数据, 但是对于复杂的地质情况来说, 仍然需要依靠自动化盾构监控系统来对推力、扭矩、出土量这些关键参数展开实时的数据分析并加以动态地改善。地下空间开发地质风险的识别要贯穿施工全过程, 即勘察阶段的地质条件预判、施工阶段的地层响应监测和运营阶段的结构安全评价。

2.4 冻融循环作用下工程地质风险识别

冻融循环作用属于寒区城市特有的工程地质风险因子, 给城市基础设施的安全带来持续的威胁。长春市为季节性冻土区, 冻土期在 10 月至次年 5 月间, 平均初日和终日分别为 10 月 25 日和 5 月 2 日, 多年平均冻结深度 131cm。温度梯度使路基土中的水分发生迁移和聚集, 造成路基冻胀; 春季路基解冻时, 集聚的冰晶体融化, 路基土处于饱和或者过饱和的状态, 承载力很低, 在交通车辆的作用下出现路面鼓包、弹簧、断裂、翻浆冒泡等现象。长春市冻土最大深度呈明显下降趋势, 下降率为 $12.4\text{cm}/\text{十年}$ 。冻融循环对岩土体力学性质的影响主要是从物理力学参数的劣化来体现的^[2]。随着冻融循环次数的增多, 岩石的孔隙率变大, 纵波速度、单轴抗压强度、弹性模量、

黏聚力下降。抗压强度、弹性模量和冻融循环次数成反比。为了系统地表现冻融循环对岩土体力学特性的影响，表 1 给出了不同冻融循环次数下主要力学参数变化的规律。

3 地质安全风险防控措施

3.1 地质灾害监测预警体系优化

地质灾害监测预警属于风险防控的第一道防线，主要作用是提前发现地质安全风险隐患并加以研判、处置。目前城市地质安全监测体系正在向智能监测、精准研判、快速预警、协同响应的方向发展，技术手段的进步给监测预警能力的全面提高创造了条件。监测预警体系的优化要从三个方面着手，即在监测网络上构建全域的“天地空”一体化监测网，把卫星遥感 InSAR 监测、地面水准测量、地下水位监测、深部位移监测等手段综合起来，形成地表到深部、区域到局部的立体化监测体系，从而达到多尺度、多维度的地质安全数据采集目的。从数据平台角度来说，创建多源数据融合的城市地质安全大数据中心，冲破各个部门间的数据壁垒，达成城市管理数据的互通共享。以多源数据融合互馈的监测方法为研究对象，建立多参数综合研判的预警指标体系，改变以前依靠经验判断的模式，使监测预警更加科学、更加精准、更加可靠。确定科学合理的参数预警阈值，在地面沉降速率、地裂缝宽度变化、地下水位异常波动等主要指标上进行实时判断，一旦出现预警阈值就采取分级响应，保证预警信息及时传递给相关责任主体，从而落实行动。

3.2 地下水资源开发利用管控

地下水资源不合理开采是造成地面沉降、地裂缝的重要原因，科学控制地下水资源对城市地质安全风险防控十分重要。确定目前城区地下水水位现状，查明是否存在地面沉降现象，研究地下水开采对地面沉降的影响，对今后地下水合理开采和地面沉降灾害防治有重大意义。根据长春市地下水观测井的动态监测资料可知，长春城区浅层水水位略有上升趋势，深层水漏斗中心水位呈下降趋势，个别超采漏斗出现预警水位。在现状开采条件下，未来十年地下水水位呈缓慢上升状态，不会诱发地面沉降，说明目前地下水的开采量和开采布局较为合理。浅层地下水水位和气温存在相关性，但是滞后于气温 1~1.5 个月，说明

气候变化对地下水系统影响具有时间上的滞后性，需要在制定管控策略的时候加以考虑^[3]。地下水资源管控的主要策略有：严格划分地下水禁采区和限采区，在地面沉降比较严重的地方先采取压采措施，建立地下水动态监测网，对水位、水量、水质实施持续观测，把握地下水资源的变动走向，推行地表水同地下水联合调配，改善供水格局，削减对深层地下水的依存度，设定地下水开采总量控制指标，把地下水位的合理恢复作为城市地质安全治理的关键目的，从源头上阻止由于地下水超采造成的地质安全风险。

3.3 地下空间开发风险防控

地下空间开发风险防控要贯穿工程整个生命周期，即规划选址、建设施工、运营维护到退役封存的全部过程的闭环管理。创建起全生命周期地质风险防控体系，全面落实规划、勘察、设计、施工各个阶段的安全生产责任，达到事前预防、事中控制、事后追查的目的。勘察阶段要加密地质勘探孔位，查明不良地质体的空间分布，对盾构穿越富水砂层、软弱地层等高风险段做专项地质评价，给后续的设计和施工提供详细的地质依据。设计阶段应合理选择工法，优化掘进参数，根据不同的地质条件制定不同的施工方案，将地质风险考虑进去。施工阶段要落实动态监测和信息化施工，创建全周期数据分析体系，对盾构机推力、扭矩、出土量等关键数据实施实时复盘，动态改善掘进参数和渣土改良配比。对高危段落施工应实施高频次自动化实时监测，引入自动化盾构监控系统，设定参数预警阈值，保证盾构机作业姿态全程可控^[4]。运营阶段创建长久结构健康监测体系，定时查看隧道衬砌变形、渗漏水等状况，保证地下工程运转期间的地基平安。

3.4 地质调查成果服务城市规划建设

地质调查成果的有效转化是提高城市地质安全管理水平的主要途径，也是由被动应对向主动防控转变的重要手段。将地质调查成果深度融入城市规划建设，要重点做好以下几个方面的工作：编制长春市地质安全风险区划图，将城市划分为适宜建设区、限制建设区和禁止建设区，为国土空间规划提供刚性约束，从规划源头规避地质安全风险；建立长春市地质安全风险“一张图”，将地质灾害隐患点、地下空间开发利用适宜性、地下水资源保护区等信

表 1 不同冻融循环次数下岩土体主要力学参数变化特征

冻融循环次数	抗压强度变化	弹性模量变化	黏聚力变化	渗透系数变化	冻胀敏感性
0（未冻融）	基准值	基准值	基准值	基准值	低
5~10 次	下降 10%~20%	下降 8%~15%	下降 5%~12%	增大 1.2~1.5 倍	中
10~20 次	下降 20%~35%	下降 15%~25%	下降 12%~20%	增大 1.5~2.0 倍	较高
20 次以上	下降 35%~50%	下降 25%~40%	下降 20%~30%	增大 2.0 倍以上	高

息集成到统一平台上,开展地质安全风险区划,服务国土空间规划;通过强化国土空间规划、用途管制、地质灾害危险性评估等制度安排强化源头管控,把地质安全风险防控要求嵌入建设项目审批流程;建立地质灾害点和风险区管控清单,落实风险管控责任体系,明确各个责任主体的职责边界和工作内容。以九台区为代表的煤炭采空区地面塌陷较为集中,应纳入重点防控范围。经过上述措施之后,就形成了地质调查、风险评价、规划管控这样一个完整的链条,把地质调查成果变成城市安全发展的有力保障。

4 结语

城市地质安全风险评价属于一项牵涉诸多因素、诸多尺度的综合性工程。本文从长春市地质环境特征出发,对地面沉降、地裂缝和地基变形、地下空间开发、冻融循环作用这四种主要的地质安全风险进行了系统的识别,并给出了相应的防控措施。研究表明,城市地质安全风险有效控制要创建起“精准识别-动态监测-科学评价-源头防控”全流程技术体系,把地质安全思想充分融入城市规划和建设的各个环节当中。智慧城市化建设不断深入发展之际,

城市地质安全管理也会朝着更加数字化、智能化方向迈进,借助多源数据融合与智能预警模型等手段,达成对城市地质安全风险实施精确化、动态化控制的目的,从而给韧性城市建设赋予坚固的地质安全保障。

[参考文献]

- [1]袁建国,张万益,杜璨,等.城市地质安全风险评价理念发展与启示[J].化工矿产地质,2024,46(2):160-167.
- [2]孙文明,张达政,蔡伟忠,等.推进城市地质安全风险防控初步建成“四个一”工作体系[J].浙江国土资源,2023(6):20-21.
- [3]张祥意,栾腾飞,刘鹏志,等.资源型工业城市地质环境安全评估与防控策略[J].中国资源综合利用,2026,44(4):204-206.
- [4]葛伟亚.以城市地质工作助推城市更新大有可为[J].资源与人居环境,2025(12):1.

作者简介: 陈小涛(1988—), 本科, 毕业于哈尔滨商业大学行政管理专业, 当前在中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心工作, 助理工程师。