

doi: 10.12029/gc20230421001

袁有靖, 刘长礼, 彭红明, 王秀艳, 孙伟超, 阿慧娟, 李楠, 徐得臻. 2025. 寒旱区河谷型城市地下空间利用的生态地质安全风险评价——以青海海东乐都区为例[J]. 中国地质, 52(3): 1116–1127.

Yuan Youjing, Liu Changli, Peng Hongming, Wang Xiuyan, Sun Weichao, A Huijuan, Li Nan, Xu Dezhen. 2025. Ecological security risk assessment of underground space utilization in valley cities in cold and arid regions: A case study of Ledu District, Haidong City, Qinghai Province[J]. Geology in China, 52(3): 1116–1127(in Chinese with English abstract).

寒旱区河谷型城市地下空间利用的生态地质安全风险评价——以青海海东乐都区为例

袁有靖^{1,2,3}, 刘长礼^{4,5}, 彭红明^{1,2,3}, 王秀艳^{4,5}, 孙伟超^{4,5}, 阿慧娟^{1,2,3},
李楠^{1,2,3}, 徐得臻^{1,2,3}

(1. 青海省环境地质重点实验室, 青海 西宁 810007; 2. 青海省地质环境调查院, 青海 西宁 810007; 3. 青海九零六工程勘察设计院有限责任公司, 青海 西宁 810007; 4. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 5. 福建省水循环与生态地质过程重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:【研究目的】针对寒旱区河谷型城市因地下空间利用引发的地下水位上升造成的农田生态区土地盐碱化、城镇生态区建筑破坏等生态地质安全问题, 为解决此类问题探索生态地质安全风险评价理论方法。【研究方法】在收集已有相关资料基础上, 开展了研究区地质钻探、岩土工程测试、抽水试验、生态地质观测等研究。运用水文地质等理论方法, 分析了生态地质安全风险的成因机理。【研究结果】提出了人居、农田和林草等 3 类生态系统地质安全风险评价方法, 建立了评价指标体系和标准, 评价了海东乐都区生态系统地质安全风险。地下空间利用现状情景下, 高风险区主要分布于引胜沟口、岗子沟口、峰堆沟口及其地下水影响范围内的高层建筑城镇区, 中风险区主要分布于 I、II 级阶地低洼地带; 如再沿湟水河岸建地下铁路情景下, 高风险、中风险区比地下空间现状情景下有所扩大。【结论】此 3 类生态地质安全风险评价方法很有效。两种情景下都会诱发 3 类生态系统的地质安全风险, 后一情景下造成的风险更高, 影响的范围更大。需对重点地带适时监测, 并运用地下水疏排技术等措施防范风险。

关键词: 河谷型城市; 地下空间利用; 地下水位埋深; 生态系统功能; 生态地质安全风险评价; 城市地质调查工程
创 新 点: (1) 提出了地下空间利用影响下人居、农田和林草生态系统的生态地质安全风险评价方法; (2) 构建了地质安全风险评价指标体系; (3) 进行了地质安全风险评价与区划, 提出了风险防控措施。

中图分类号: X141; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-1116-12

Ecological security risk assessment of underground space utilization in valley cities in cold and arid regions: A case study of Ledu District, Haidong City, Qinghai Province

YUAN Youjing^{1,2,3}, LIU Changli^{4,5}, PENG Hongming^{1,2,3}, WANG Xiuyan^{4,5}, SUN Weichao^{4,5},

收稿日期: 2023-04-21; 改回日期: 2023-10-09

基金项目: 青海省海东市城市地质调查评价(2022012023sh003)资助。

作者简介: 袁有靖, 男, 1988 年生, 高级工程师, 主要从事水工环地质及地热地质调查研究; E-mail: 841077603@qq.com。

通信作者: 刘长礼, 男, 1963 年生, 研究员, 主要从事城市地质与环境地质研究; E-mail: 315850110@qq.com。

A Huijuan^{1,2,3}, LI Nan^{1,2,3}, XU Dezhen^{1,2,3}

(1. Key Lab of Geo-Environment Qinghai Province, Xining 810007, Qinghai, China; 2. Qinghai Institute of Geology and Environment Survey, Xining 810007, Qinghai, China; 3. Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Xining 810007, Qinghai, China; 4. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 5. Fujian Provincial Key Laboratory of Water Cycling and Eco-Geological Processes, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: This paper is the result of urban geological survey engineering.

[Objectives] This paper aimed at investigating solutions of eco-geological security issues caused by rising groundwater level due to the utilization of underground space in valley cities in cold and arid regions, such as soil salinization in farmland ecological zone and building damage in urban ecological zone. **[Methods]** On the basis of relevant data collection, geological drilling, geotechnical engineering test, pumping test and eco-geological observation were carried out. The genetic mechanism of eco-geological security risk was analyzed by using hydrogeological and other theoretical methods. **[Results]** The geological security risk assessment approaches for 3 types of ecosystems, including human habitation, farmland, forest-grass, were proposed, and the evaluation index system and standards were established. The eco-geological security risk in Ledu District of Haidong city were evaluated. The results showed that, under the current situation of underground space utilization, the high-risk areas were mainly distributed in mouth areas of Yinsheng Gully, Gangzi Gully, Fengdui Gully and other high-rise building urban areas influenced by groundwater; the medium-risk areas were mainly distributed in the low-lying areas of grade I and II terraces. Under the scenario of building an underground railway along the bank of Huangshui River, the high-risk and medium-risk areas would be expanded compared with the current situation of underground space. **[Conclusions]** The proposed three evaluation approaches for eco-geological security risk were proven to be effective. Both scenarios would induce the geological security risk for all three ecosystems, with the latter scenario posing higher risks and wider impacts. The key areas should be monitored periodically, and techniques such as groundwater drainage be used to prevent risks.

Key words: valley-city; underground space utilization; groundwater depth; ecosystem function; eco-geological security risk assessment; urban geological survey engineering

Highlights: (1) The eco-geological security risk assessment approaches of human habitation ecosystem, farmland ecosystem and forest-grass ecosystem under the influence of underground space utilization were proposed. (2) The geological security risk assessment index system was constructed. (3) The geological security risk assessment and zoning were conducted, and the risk prevention and control measures were suggested.

About the first author: YUAN Youjing, male, born in 1988, senior engineer, mainly engaged in the investigation and research of hydrogeology, environmental geology, and geothermal geology; E-mail: 841077603@qq.com.

About the corresponding author: LIU Changli, male, born in 1963, researcher, mainly engaged in research on urban geology and environmental geology; E-mail: 315850110@qq.com.

Fund support: Supported by the project of Urban Geological Survey and Evaluation on Qinghai Haidong City (No.2022012023sh003).

1 引言

1991 年在日本东京举办的第四届国际地下空间大会发表的《东京宣言》认为, 21 世纪是地下空间开发利用的世纪(李晓红等, 2005; Zhao et al., 2015)。地下空间利用是国际公认的城市发展的不二选择(谢和平等, 2017; 董英等, 2020)。不少学者

预测 21 世纪末将有三分之一人工作生活在地下空间, 地下空间开发利用被公认为是支撑国家核心战略重要部分(Wang et al., 2013; Vahaaho, 2014, 2015; 葛伟亚等, 2021)。中国城市地下空间开发利用趋势已从东部沿海向中部向西部、从平原向丘陵山地或河谷、从特超大城市向中小城市不断推进。近几年来, 随着国家层面推进地下综合管廊等建设, 许

多如贵州六盘水、青海西宁、海东等丘陵山区或河谷型四、五线城市已开始大力开展地下工程建设(Qian, 2016; 苏栋等, 2024)。

河谷型城市指主体分布于丘陵、山地等河谷地带的城市,在中国分布非常广泛,有地级市 129 座(38.73%), 112 个县级市(30.27%)(刘长礼等, 2017), 地形地貌比较复杂,但对国民经济发展与生态文明建设特别重要。但近些年来,地下空间利用引起地下水位变化造成的生态地质问题时有发生,如建筑物地下基础、地下商场、地下管廊等地下工程导致地下水位上升引起的浮力超过抗浮力而造成建筑物破坏等事件在东京、大阪、伦敦、香港、沈阳等国内外城市并不鲜见(王军辉等, 2011; 李浩等, 2024)。从 2015 年开始,青海海东市建设地下综合管廊,其与铁路地下路基、建筑物基础共同作用下,海东市湟水河两侧地下水径流路径受阻、补给侧的地下水位上升,在乐都区湾子村、羊圈村、大地湾村等地出现了不同程度的地下水位上升,致使 37 户村民房屋、院墙受到破坏及地窖淹没毁坏,造成 80 户农民搬迁, 47 hm² 土地盐渍化或沼泽化。生态地质安全风险指由于人类活动和地质因子耦合作用下引发的生态系统功能受到损害的危险性。Trofimov(2004)提出了基于崩塌、滑坡、泥石流、雪崩等地质灾害、地质环境放射性或地球物理场环境等对人居生态系统地质风险性评价指标与标准; Kuz'min and Kuznetsova(2018)研究了采矿作业对地层景观的破坏、废物堆放、滑坡、泥石流、石油泄漏、土壤退化、地表水污染等造成矿山生态地质风险评价方法; Lin et al.(2021)和 Shi et al.(2023)分别研究了福建厦漳泉城市群及西北某地地质灾害及其组合模式对生态地质风险的评价方法。但地下空间利用引起的城镇建筑破坏、农田盐渍化或沼泽化等重大生态地质安全问题还是一个非常值得研究的课题。

在查明海东市地质条件基础上,针对生态地质安全问题,开展了在地下空间利用影响下,海东市人居生态系统、农田生态系统和林草生态系统等生态地质安全风险研究,分析了生态地质安全风险成因机制,提出了 3 类生态系统地质安全风险评价指标体系、评价理论方法,进行了地质安全风险区划,提出了风险防控措施,为河谷型城市地下空间利用

生态地质安全风险评价与防控探索一套新理论新方法。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

2.1.1 自然地理与社会经济

研究区为海东市乐都区,海东市地处兰西城市群咽喉要道,位于黄土高原向青藏高原过渡地带,为青海省副中心城市,兰西经济区重要支点和新型产业基地,规划建设为具有河湟文化特色的高原生态旅游宜居城市。2021 年 GDP 为 554.71 亿元,常住人口 135.85 万人;其中城镇常住人口 56.96 万人,人均 GDP 为 40850 元。年平均气温 3.2~8.6℃,年平均降雨量 319.2~531.9 mm,蒸发量为 1275.6~1861 mm,人均水资源量 570 m³/a(马兴武, 2012),逼近联合国极度缺水标准。

研究区范围包括乐都区湟水河谷及其两侧 2~4 km 范围,西至大峡,东至柳湾村,总面积 205.1 km²,其中谷底区面积 68.33 km²,两侧丘陵区面积 136.77 km²(图 1),海拔 1933~2500 m,属半干旱大陆性气候,为典型的高寒、干旱地区。境内山峦起伏,沟整纵横。整体地势西北高、东南低。地形多变,有丘陵和河谷盆地,古老基底局部隆起抬升形成峡谷。乐都城区人口规模规划为 33.4 万,建设用地面积 37.76 km²,其余 30.57 km²为绿地或农业用地。

2.1.2 地质条件

研究区为典型河谷地貌,河谷两侧为丘陵或山地,海拔 1650~2835 m,高差 1185 m;谷底主要由阶地、台地或冲洪积扇等组成,沿湟水干流及其支流呈带状分布,分布于湟水、哈拉直沟、红崖子沟、水磨沟、祁家川、白沈家沟及其较大支流两岸。受构造和流水侵蚀多形成河流阶地,由全新统冲洪积黄土状土、砂砾卵石组成,具二元结构(图 1)。谷底地形开阔平坦,宽度 100~2000 m,总体向河床和下游方向微倾,主要由 I、II、III 级阶地组成,地面坡度 0~5°。谷底除城市建成区外,其余多以农田为主。出露地层由老到新有下元古界、中元古界、新生界白垩系、古近系—新近系以及第四系,其中以古近系—新近系、第四系为主,前者主要分布于河谷两侧丘陵山体,占出露面积 80% 以上;后者主要分布



图 1 研究区工程地质图
Fig.1 Engineering geological map of the study area

于河谷底部阶地、台地, 覆盖面积占 90% 以上。区内活动断裂不发育, 较少发生 5 级及以上地震, 地震峰值加速度为 0.1~0.15 g, 地震基本烈度为 VII 度。雨季丘陵山区有小型崩塌、滑坡与泥石流等地质灾害发生。河谷地下水含水介质多为砂卵砾石, 分布于狭长河谷阶地之下、泥岩等基岩之上, 顶板埋深浅(多为 1~18 m), 厚度薄(多为 1.5~8 m)。大气降水从湟源区、河谷两侧丘陵山区汇入湟水河, 补给河谷区地下水或沿河道东流出境; 地下水从黄土包气带较薄地带蒸发或向河道排泄, 地下水径流程短、排泄快, 水循环迅速(图 2)。

2.2 研究方法

在收集已有区域地质、水文地质、工程地质与环境地质等资料基础上, 开展了研究区 1:10000 城市地质调查, 包括遥感地质调查、水文地质与工程地质钻探等, 获得了地形地貌、地层岩性以及水

文循环、地下水补给-径流-排泄关系、岩土工程性质、地质构造或场地稳定性等水文地质、工程地质等资料后, 进一步针对城镇、林草和农田等生态系统地质安全风险评价所需要的数据开展了下列研究:

(1) 调查建筑物基础、地下商场、地下管廊、地下仓库等在地下空间分布等, 获得地下空间利用状况数据, 以研究其地下水渗流、补给-径流-排泄等的关系。

(2) 对地下水位动态变化进行进一步观测, 获取区域或重点地带地下水流场、地下水位埋深等数据。

(3) 补充地下水抽水试验, 获取地下水渗流、水量等水文地质参数。

(4) 基于“地下水位埋深(H_b)大于土层毛细水上升高度(H_m)与植物或农作物根系深度(H_g)之和,

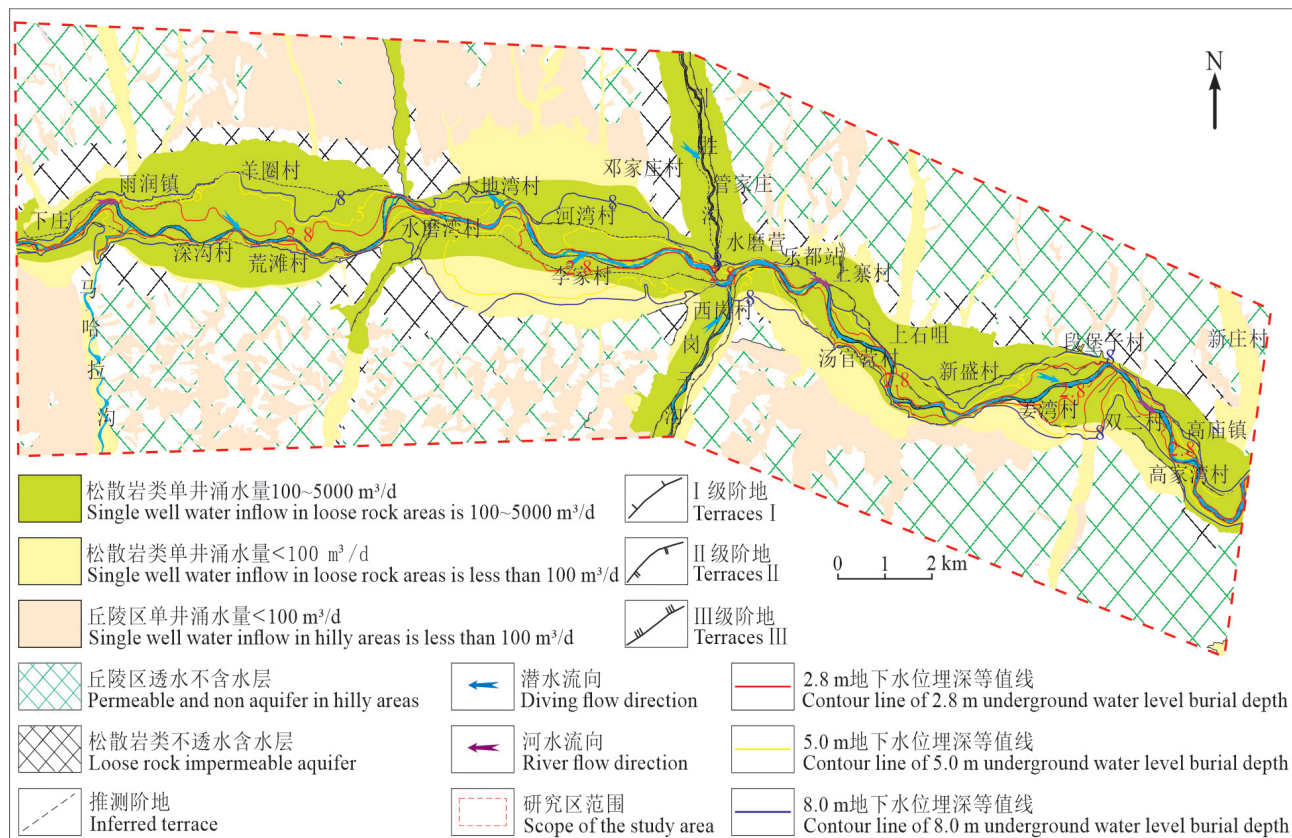


图 2 研究区水文地质图
Fig.2 Hydrogeological map of the study area

即 $H_D \geq H_m + H_g$ 时, 植物或农作物不能正常生长, 且地下水位埋深越大, 大于 $H_m + H_g$ 越多, 农田或林草生态系统盐碱化风险越大”原理, 开展了研究区主要植物、农作物等根系深度分布、不同土层毛细水上升高度等调查, 结合文献资料, 以评判研究区地下水位埋深与农地、林草地等盐碱化关系。

(5) 开展 1:10000 遥感地质调查, 获取研究区城镇、林草或农田等生态系统的分布等数据。

(6) 利用水文地质、工程地质、生态地质等原理方法, 综合研究上述工作获取的数据资料, 确定城镇、农田和林草等生态系统地质安全风险评价方法、指标体系和标准, 开展生态地质安全风险评价。

3 河谷型城市地下空间利用引发生态系统地质安全风险评价

3.1 生态系统地质安全风险驱动因素分析

河谷型城市区域内生态系统包括人居生态系

统、林草生态系统、农田生态系统等, 地下空间利用可能诱发生态系统地质安全风险指地下工程在城市施工和运行过程中, 因地质条件应用不当而导致生态系统功能丧失的可能性, 如前述土地盐碱化、建筑物破坏等发生的可能性。

城市地下空间利用诱发生态系统地质安全风险主要来源于地质条件与地下空间利用不当, 是地质条件与地下工程耦合作用的结果。河谷型城市地质条件主要为水文地质条件, 水循环犹如城市运行之大动脉, 是城市生态之源、安全之本。城市地下空间利用对地下水文过程的影响及其作用机理机制及互馈效应是生态系统地质安全风险内在驱动力。

河流两侧由相对平缓的阶地或冲洪积扇组成, 呈狭窄的条带状展布, 决定了城市规划、建设要沿河谷条带状空间展布的空间格局, 地下综合管廊、地下交通等线性地下工程大部分须顺沿河道两侧建设。而湟水河谷地下水含水层介质多为砂卵砾

石,分布于狭长河谷阶地之下、泥岩等基岩之上,顶板埋深浅(多为 1~20 m),厚度小(多为 1.5~10 m)。大气降水从湟源区、河谷两侧丘陵山区汇入湟水河,补给河谷区地下水或从沿河道东流出境;地下水从包气带较薄地带蒸发或向河道排泄(图 2)。

I、II、III 级阶地上高层或超高层建筑基础多数以卵砾石层为持力层,一定程度上改变了地下水补、径、排途径或阻截了地下水与湟水交换路径;部分顺河流两侧 I、II 级阶地已建成的地下综合管廊底板直接在含水层底部隔水层上,阻断了地下水向河道的排泄。这种由独特气候、地形地貌、水文地质、水循环等条件与沿河谷条带状展布的城市构成了脆弱的人-地生态系统,城市建设对这种系统中水循环过程的扰动,为城市运行安全、生态安全或供水安全埋下了长期隐患:地下工程改变了地下水文过程及机理,建筑地基基础、地下综合管廊(今后的地下轻轨)等工程将造成某些地段地下水位雍高后,因河谷地下潜水矿化度较高,多数地带在 1~5 g/L,蒸发量是降雨量的 4 倍,易使农业发展区、生态绿化带等土地盐碱化;或地下水位上升大于建筑抗浮设计值后,人居小区建筑物受损、地下空间淹没等。地下工程与谷底地下水耦合作用成为农业生态系统、林草生态系统和人居生态系统的地质安全风险驱动因素。

3.2 生态系统地质安全风险评价标准

3.2.1 林草生态系统地质安全风险评价标准

林草生态系统包括公园绿地、防护绿地及其他林草地等,为草本与木本组成的生态系统。海东市河谷地区生态安全的控制性因素主要为水,而地下空间利用主要对地下水文过程有重大影响,不论地下空间利用如何改变地下水文过程作用机制,对绿地生态系统安全性的影响最后都集中表现在对其所依靠的生态地下水位埋深上。地下工程引起地下水位埋深过小将引发土壤盐碱化、沼泽化,会造成林草生态系统功能下降,威胁林草生态系统安全,涉及到包气带土层的毛细水上升高度与林草根系深度分布范围。地下水位上升引起土地盐碱化,由林草地土层毛细水上升高度(H_m)和当地植物根系在土层中分布深度(H_{zg})决定,即林草生态系统地下水位埋深临界值(H_D)由式(1)决定:

$$H_D = H_m + H_{zg} \quad (1)$$

即当地下水位埋深(H_D)小于土层毛细水上升高度(H_m)与植物根系深度(H_{zg})之和时,植物才能正常生长,林草生态功能才能正常发挥;否则植物不能正常生长,生态功能不能正常发挥。地下水位埋深越大,林草生态系统盐碱化风险越大。

海东市湟水河谷主要发育分布冲洪积黄土(粉土)、风积黄土(粉土)、冲洪积砂卵砾土、冲积砂卵砾石、洪积碎石土、冰水沉积卵砾土,综合分析同类地区相关文献(但新惠, 2007; 栗现文等, 2011; 周奇等, 2015; 李先瑞等, 2015; 吕秋丽和杨海华, 2019; 陈淑敏等, 2019)和野外观测结果,确定各类土的地下水毛细水上升高度见表 1。

通过对水文气候、地质等类似地区文献分析(齐凯等, 2019; 刘向峰等, 2023)和野外调查发现,湟水河谷地生长的木本、草本等植物群落根系在地下的深度分布情况为: 75% 分布于 0~80 cm 深度, 17% 分布于 80~170 cm 深度, 8% 分布于大于 170 cm 深度。由此植物根系分布数据与表 1 数据结合,利用式(1)计算,综合确定林草生态系统地质安全风险级别评判标准见表 2。

3.2.2 农田生态系统地质安全风险评价标准

农田生态系统功能主要是提供农产品的功能,土壤盐碱化即可引起此功能下降。农田生态系统土壤盐碱化为地下水位上升到一定值后,地下水中盐分随土壤毛细水上升进入耕作层积累到一定含量(0.3%)而影响农作物正常生长,土壤丧失生产粮食等农产品的功能。由于湟水河谷地下水矿化度较高,且当地干旱少雨,蒸发量是降雨量 3 倍多,地下水位上升诱发土壤盐碱化的危险性很大。土壤盐碱化风险性评判指标由地下水位埋深(H_D)、农作物根系深度(H_{ng})、土壤毛细水上升高度(H_m)决定,即农田地下水位埋深由式(2)决定:

$$H_D = H_m + H_{ng} \quad (2)$$

即当地下水位埋深(H_D)小于土层毛细水上升高度(H_m)与农作物根系深度(H_{ng})之和时,农作物才能正常生长,农田生态功能才能正常发挥;否则作物不能正常生长,农田生态功能不能正常发挥,地下水位埋深越大,农田生态系统盐碱化风险越大。

在对气候、地质等条件比较类似地区的相关文

表 1 各类土层地下水毛细水上升高度

Table 1 Rising height of capillary water of groundwater in various soil

土类	冲洪积黄土(粉土)	风积黄土(粉土)	冲洪积砂砾卵石土	冲积砂砾卵石	洪积碎石土	冰水沉积卵砾土
上升高度/ H_m	1.182	0.952	0.282	0.018	0.036	0.366

表 2 地下水位上升林草生态系统地质安全风险评判标准

Table 2 Assessment criteria on risk of eco-geological safety of forest and grass ecosystems based on groundwater level rising

土层类型	用于风险级别的地下水位埋深值/m		
	高风险	中风险	低风险
冲洪积黄土(粉土)	<1.98	1.98~2.88	>2.88
风积黄土(粉土)	<1.75	1.75~2.65	>2.65
冲洪积砂砾卵石土	<1.08	1.08~1.98	>1.98
冲积砂砾卵石	<0.82	0.82~1.72	>1.72
洪积碎石土	<0.83	0.83~1.74	>1.74
冰水沉积卵砾土	<1.17	1.17~2.07	>2.07

献(周晓晨等, 2017; 邢怡等, 2019)分析基础上, 对研究区进行野外观测, 统计分析发现, 研究区绝大多数农作物根系在土层中深度分布情况: 80% 根系分布于 0~0.60 m, 16% 根系分布于 0.60~1.30 m, 4% 根系分布于大于 1.30 m 深度。将此农作物根系分布数据与表 1 所示的地下水毛细水上升高度(H_m)结合, 利用式(2)计算, 综合确定农业生态系统地质安全风险评判标准值见表 3。

3.2.3 人居生态系统地质安全风险评价标准

人居生态系统主要分布在城市建成区或郊区村镇, 由密集的人口与密集的建筑群及其地基基础、地下空间工程、硬化的道路等组成的生态系统, 是人类活动最强烈、改造最彻底、人-地矛盾最尖锐的极其特殊的生态系统。对于如华北平原、长三角、珠三角等一般平原城市来讲, 这样的生态系统的地质安全问题很多, 如地面沉降、地裂缝、地面塌陷、地下水降落漏斗、水土污染, 等等, 其生态系统地质安全风险评价内容也会很多。但对海东这样很少开发利用地下水的河谷城市, 此类生态地质安

表 3 地下水位上升农田生态系统地质安全风险评判标准

Table 3 Assessment criteria on risk of eco-geological safety of farmland ecosystems based on groundwater level rising

农田土壤类型	用于风险级别的地下水位埋深值/m		
	高风险	中风险	低风险
冲洪积黄土(粉土)	<1.78	1.78~2.48	>2.48
风积黄土(粉土)	<1.55	1.55~2.25	>2.25
冲洪积砂砾卵石土	<0.88	0.88~1.58	>1.58
冲积砂砾卵石	<0.62	0.62~1.32	>1.32
洪积碎石土	<0.63	0.63~1.34	>1.34
冰水沉积卵砾土	<0.96	0.96~1.67	>1.67

全问题较少。致险因素主要为特殊的水文地质条件、水循环条件、建筑基础、地下管廊等, 地下工程改变了地下水文过程及机理, 可能造成某些地段地下水位雍高, 引发地下水对建筑基础实际浮力大于抗浮设计值, 地基基础上浮以致上部建筑物发生倾斜、倒塌等事故, 威胁建筑安全。人居生态系统地质安全风险主要由地下空间工程-建筑基础-地下水位抬升耦合作用造成的。

海东市核心区很少有地下水位长期观测资料, 大多数建筑或地下室抗浮设计时采用的地下水位值为一年中丰水期最高水位。研究发现, 有不少建筑小区抗浮设计地下水位值仅比地质勘察时钻探观测水位高 20~50 cm, 这个设计值并不大, 遇到降雨大年地下水位超过该值是大概率事件。如果由于地下管廊、建筑基础等截阻了地基含水层向河流的排泄途径, 时间长了地下水雍堵水位抬升超过设计值更是大概率事件。

总之, 地下空间利用可能会对建筑物安全带来风险。经过对海东市地质资料实地地质调查, 参考国内外相关文献资料, 确定人居生态系统地质安全风险评判标准如表 4。

4 讨论与防控建议

4.1 讨论

以收集或调查所取得水文地质、工程地质、生态地质、生态、水文、气候、城市建设与地下空间利用规划、地下空间利用状况等数据为依据, 综合考虑各种相关因素, 用表 2、表 3 和表 4 所列标准, 评价得出海东乐都区生态系统地质安全风险结果见图 3、图 4。

4.1.1 林草生态系统地质安全风险

(1) 地下空间现有利用状况下的林草生态地质安全风险

评价表明, 乐都河谷底部不存在林草生态系统地质安全高风险区, 仅在一些地形低洼的 I 级或少数 II 级阶地有中风险地区, 其他绝大多数地方均为低风险区(图 3)。究其原因, 主要林草生态系统

表 4 人居生态系统地质安全风险评判标准

Table 4 Risk assessment criteria for eco-geological safety of urban ecosystems

地质安全风险因素情况	同时满足下列前3个条件或第4个条件： 1.位于较大的湟水河谷支沟口及其影响地区； 2.线性地下工程（包括条形地下墙等）长轴方向与支沟地下水流向大角度相交，或地下工程及其组合明显地改变了地下水流向或径流途径； 3.地下工程或其组合的大部分在垂向剖面上截住了地下含水层截面面积； 4.评价区域地面与地下工程处地面高程差小于1 m。	同时满足下列前2个条件或第3个条件： 1.在河谷支沟地下水影响范围外； 2.地面多层及以上建筑物较多或地下管廊等线性地下工程分布区； 3.评价区域地面与地下工程处地面高程差在1~5 m。	满足下列条件之一： 1.地面多层及以上建筑物较少或地下管廊很少分布区； 2.包气带低渗透性土体（黄土、红黏土或粉质黏土等）厚度大于5 m的建筑物居住区； 3.评价区域地面高程比地下工程处地面高5 m以上。
	高风险	中风险	低风险

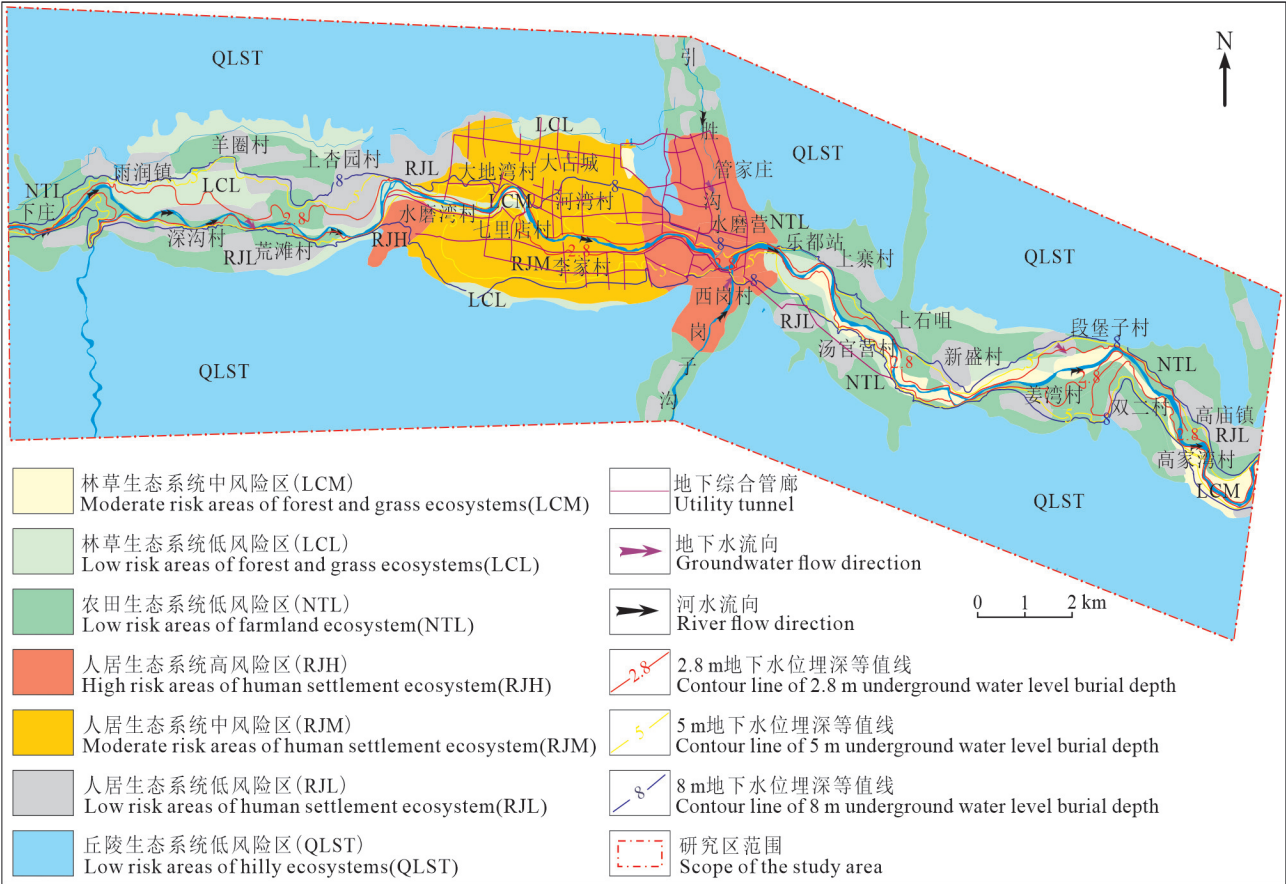


图 3 地下空间利用现状情况下生态地质安全风险分区图

Fig.3 Zoning map of eco-geological safety risk under current situation of underground space utilization

主要分布在地下空间利用较少的湟水河岸边、农业发展区,或台地、河谷两侧丘陵等地面高程较高的地方,这些地方地下工程对水循环干扰少,地下空间利用使地下水位上升导致土壤盐碱化可能性较低。

(2)沿湟水河岸浅层地下空间建轨道交通工程的生态地质安全风险

评价表明,如沿湟水河岸边浅层地下空间建轨

道交通线路等线性地下工程,则可能引发的林草生态系统地质安全高风险区主要在Ⅰ级阶地或少部分地形低洼的Ⅱ级阶地,中风险区主要在部分Ⅱ级阶地或较大的支沟口影响范围,其他地形较高地区则为风险低的区域(图4)。

4.1.2 农田生态系统地质安全风险

(1)地下空间现状地质安全风险

评价表明,乐都河谷底部不存在农田生态系统

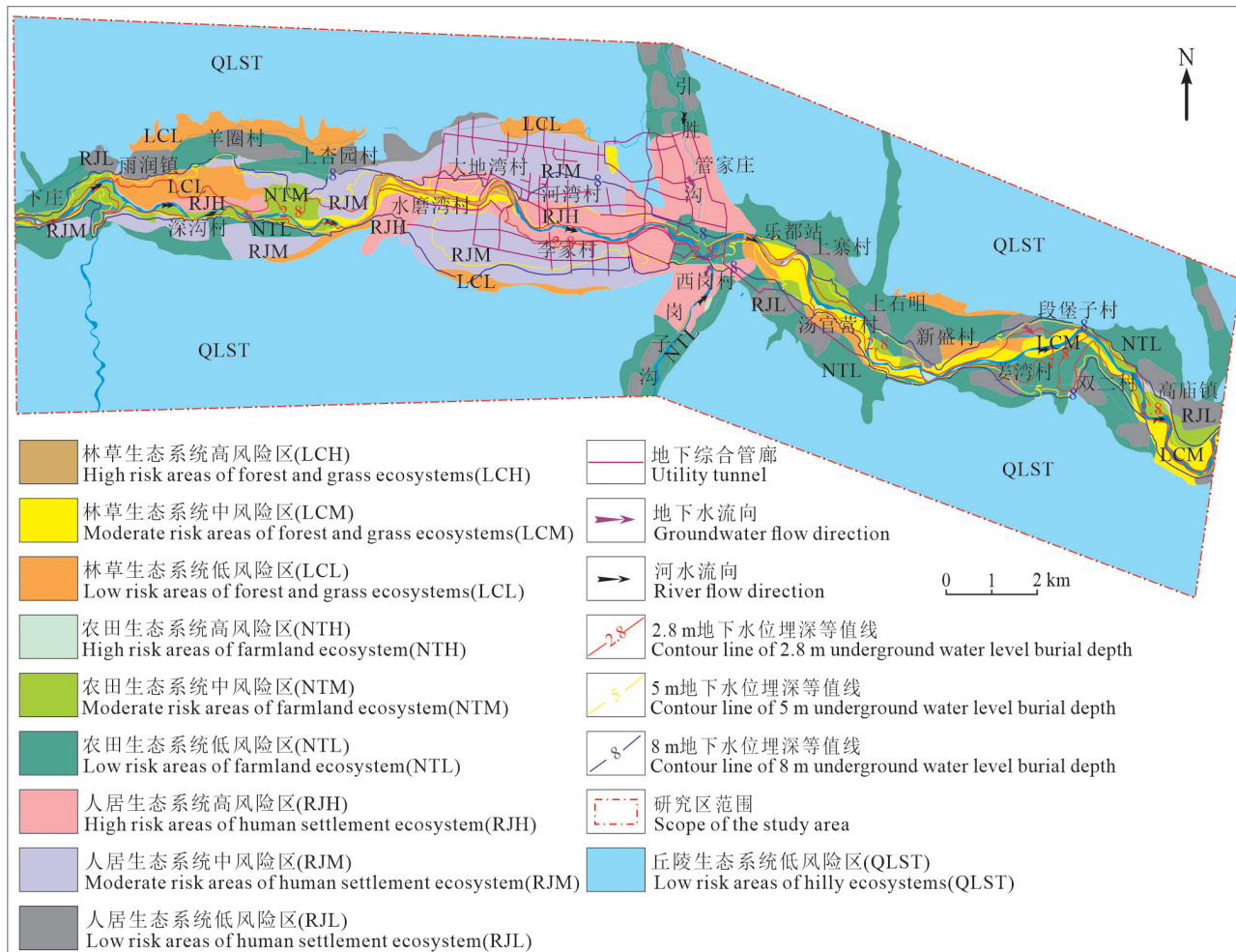


图4 沿湟水河岸边建地铁情况下生态地质安全风险分区图

Fig.4 Zoning map of eco-geological safety risk after subway construction along the Huangshui River bank

地质安全高风险区,仅在一些地形低洼的Ⅰ级阶地或少部分地形低洼的Ⅱ级阶地有中风险地区,其他绝大多数地方为低风险区(图3)。农田生态系统主要分布在地下空间利用较少的农业发展区,或台地、河谷两侧丘陵等高程较高的地方,这些地方地下工程对水循环干扰少,因地下空间利用使地下水位上升导致土壤盐碱化可能性较低。

(2)沿湟水河岸浅层地下空间建交通工程的生态地质安全风险

评价结果显示,如沿湟水河岸边浅层地下空间建轨道交通线路等线性地下工程,则可能引发的农田生态系统地质安全高风险区主要在Ⅰ级阶地或少部分地形低洼的Ⅱ级阶地,中风险区主要在Ⅱ级阶地或较大的支沟口影响范围,其他地形较高地区则为低风险区(图4)。

4.1.3 人居生态系统地质安全风险

(1)地下空间现状地质安全风险

现有规划或建设地下管廊、地基基础、地下停车场等地下空间利用情况下,研究区人居生态系统地质安全风险级别分区及成因分析如下:

高风险区:分布于引胜沟口、岗子沟口、峰堆沟口及地下水影响范围内的高层建筑人居区(图3)。这些地带高层建筑东西方向埋深大的地基基础、规划中地下综合管廊,它们建成后极有可能截阻引胜沟、岗子沟和峰堆沟里浅层地下水往湟水河的排泄路径,造成地下水淤堵上升,上浮力大于人居地基基础抗浮力设计值,威胁建筑安全或地下工程安全。

中风险区:分布于乐都核心区湟水河两侧(图3)。这些地方虽然有很多高层建筑埋深大的地基基础,

在顺湟水方向还有多条已建地下综合管廊,它们也截阻了地下水向湟水河排泄的大部分路径,但由于这些区域主要是城市建成区,绝大多数地面均已硬化,当地蒸发量大,降雨入渗量小,且两侧丘陵山地降水径流几乎被两侧沟渠拦截,补给该区地下的水量也很少,因而地下水位雍高造成的地震安全风险比上述高风险区小。

低风险区:分布在除前述中、高风险区以外的地区。分布区地形地势较高,或多层及以上建筑物较少或地下管廊很少,或包气带低渗透性土体(黄土、红土或粉质黏土)厚度大于 5 m 的建筑地基基础较少区,包气带低渗透性土层厚,降雨入渗补给地下水少,即使地下水位上升,也难以引发人居建筑地质安全事故。

(2)沿湟水河岸浅层地下空间建轨道交通工程情景下的人居生态地质安全风险

评价结果显示,除引胜沟口、岗子沟口、峰堆沟口及地下水影响范围内的高层建筑人居区仍为高风险区外,其他地区的 I、II 级阶地也成为高风险区。中风险区主要分布于 III 级阶地,其他地形较高的台地、丘陵等地人居生态系统为低风险区(图 4)。

4.2 基于地下空间利用的生态系统地质风险防控建议

4.2.1 人居生态系统地质安全风险防控

开展人居生态系统中、高风险区地质安全风险调查,查明水文地质、工程地质条件、有关参数变化规律,同时进行地下水位监测。在此基础上,建立人居生态系统地质安全风险评估地质模型与数值模型,依据调查、监测取得的参数,适时预测、评估人居生态系统地质安全风险性。精准找出风险发生的关键部位,研发采用合适的地下水疏排技术,化解地质安全风险。

4.2.2 林草、农田生态系统地质安全风险防控

现有地下空间利用状况下林草、农田生态系统地质安全风险并不高,高风险或中风险主要出现在沿湟水河岸边浅层地下建轨道交通等线性工程后的靠近湟水河的地形低洼地带、I、II 级阶地等地区。风险防控措施主要有三条:一是如地下轨道交通线路沿湟水河两岸道路、绿地之下浅层含水层之上通过,通过在轨道隧洞底部采用地下水疏排技

术,使地下水排入湟水河的途径畅通;二是线路选择在浅层、且地下水位埋深大于 8 m 的地域通过,但部分地方仍存在地下水排泄不畅的地方,需要采用地下水疏排技术,使地下水排入湟水河的途径畅通;三是,线路选择从城市中间的深层(含水层之下的地下空间)穿过。

5 结 论

(1)地下空间利用引发的地下水位变化可能带来的生态地质安全风险是一个值得探索的新课题。

(2)河谷型城市海东乐都区人居、林草和农田等 3 类生态系统的地质安全风险是由地下工程与地下水耦合作用的结果:地下综合管廊、高层建筑基础或地铁等地下工程会截阻部分地下水向河流的排泄途径,造成部分地段浅层地下水位雍高,而高矿化度地下水在强蒸发作用下,农田、林草等生态系统土地易于盐碱化;或地下水位上升浮力大于建筑抗浮设计值,造成城镇区建筑物受损破坏。

(3)提出的生态地质安全风险评价方法、标准与指标体系很有效。在城市地下空间利用现状、今后沿湟水河两岸建地下轨道交通工程等 2 类情景下都会不同程度地诱发林草、农田和人居等 3 类生态系统的生态地质安全风险,沿湟水河岸建地下轨道交通工程引起的生态地质安全风险更高,影响的范围更大。

(4)有必要进一步开展地下水监测、试验和数值模拟等研究,更精准找出风险发生的关键部位,研发采用合适的地下水疏排技术,防范生态地质安全风险。

References

- Chen Shumin, Jin Zhao, Zhang Jing, Chu Guangchen, Sang Weijun, Lin Hangsheng. 2019. Current situation and influencing factors of salinization of land in different channels in northern Shaanxi[J]. Journal of the Earth Environment, 11(1): 82-91 (in Chinese with English abstract).
- Dan Xinhui. 2007. Research and discussion on capillary water rising height of gravelly soil with different grading[J]. Geotechnical Engineering, 10(5): 42-47 (in Chinese with English abstract).
- Dong Ying, Zhang Maoshen, Li Ning, Yang Min, Cheng Xiujuan, Zhu Caihui. 2020. Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(5): 162-170 (in Chinese).

- with English abstract).
- Ge Weiya, Wang Rui, Zhang Qing, Xing Huaixue, Zhou Jie. 2021. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources[J]. Geological Bulletin of China, 40(10): 1601–1608 (in Chinese with English abstract).
- Li Hao, Yang Qiang, Luo Xuan, Wang Binghu, Shao Changqing, Wang Siyuan, Le Qilang. 2024. Suitability evaluation of urban underground space utilization in karst area in Gui'an New District[J]. Carsologica Sinica, 43(1): 176–187 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianrui, Li Xiaoyuan, Wang Shengling. 2015. Study on capillary water rising in vertical direction of modified loess[J]. Journal of Science, Technology and Engineering, 15(28): 191–195 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaohong, Wang Hongtu, Yang Chunhe, Jia Jianqing, Hu Guozhong. 2005. Discussion about development and utilization of underground space in mountain city[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, (3): 319–322 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianwen, Zhou Jinlong, Zhao Yuji, Liu Yanfeng. 2011. The effect of high mineralization on the rise of capillary water in sandy soil[J]. Journal of Agricultural Engineering, 27(8): 84–89 (in Chinese with English abstract).
- Lin J H, Lin M S, Chen W H, Zhang A, Qi X H, Hou H R. 2021. Ecological risks of geological disasters and the patterns of the urban agglomeration in the Fujian Delta region[J]. Ecological Indicators, 125(6): 451–465.
- Liu Changli, Lin Liangjun, Zhang Yun, et al. 2017. Environmental Geological Problems and Countermeasures in Major Cities in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 6–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiangfeng, Zhang Qiang, Hao Guoliang, Wang Yiteng, Sun Yingcong, Wang Laigui. 2023. The effect of root type and distribution of herbal plants on the compressive strength of root soil composite[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 40(9): 106–111, 117 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qiuli, Yang Haihua. 2019. Analysis of pore structure characteristics and capillary water rising law of different soils[J]. Journal of Energy and Environmental Protection, 41(5): 101–105 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xingwu. 2012. Present situation and countermeasures of water resources development and utilization in Haidong District, Qinghai Province[J]. Water Conservancy Technology and Economy, 18(1): 81–85 (in Chinese with English abstract).
- Kuz'min M I, Kuznetsova A N. 2018. Ecological–geologic risks related to the development of resource regions[J]. Geography and Natural Resources, 39(2): 95–102.
- Qi Kai, Xin Zhiming, Zhang Jingbo, Zhu Yajuan. 2019. Root distribution characteristics of typical plant communities in Ulanbuhe Desert[J]. Journal of Grassland Science, 36(7): 1706–1715 (in Chinese with English abstract).
- Qian Q H. 2016. Present state problems and development trends of urban underground space in China[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 55: 280–289.
- Shi Z Y, Xiang X, Guo Y M. 2023. Ecological risk of geohazard and its combination patterns: A case study of an ecologically fragile region, NW China[J]. Ecological Informatics, 77(1): 128–139.
- Su Dong, Huang Maolong, Han Wenlong, Chen Xiangsheng. 2024. Evaluation model of geological environment resilience in the urban deep underground space and its application[J]. Geology in China, 51(1): 157–169 (in Chinese with English abstract).
- Trofimov V T. 2004. Approaches, principles and criteria of evaluation of ecological geological conditions[J]. Frontiers of Earth Science, 11(2): 533–542.
- Vahaaho I. 2014. Underground space planning in Helsinki[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6(5): 387–398.
- Vahaaho I. 2015. An introduction to the development for urban underground space in Helsinki[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 55: 324–328.
- Wang Junhui, Han Xuan, Zhou Honglei, Zhang Zaiming. 2011. Interaction between groundwater environment and urban underground space during operation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 33(S2): 50–55 (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Zhen F, Huang X J, Zhang M, Liu Z H. 2013. Factors influencing the development potential of urban underground space: Structural equation model approaches[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 38(3): 235–243.
- Xie Heping, Gao Mingzhong, Zhang Ru, Xu Heng, Wang Yongwei, Deng Jianhui. 2017. The subversive idea and its key technical prospect ecological city and ecosystem underground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(6): 1301–1313 (in Chinese with English abstract).
- Xing Yi, Zhang Surong, Liu Jihong, Wang Chaoyu. 2019. Analysis of the impact of crop root soil on the safety of agricultural products[J]. Geological Survey of China, 42(3): 219–224, 234 (in Chinese with English abstract).
- Zhao W J, Peng L F, Wang T Q, Zhang X Y, Jiang B N. 2015. Advances in master planning of urban underground space (UUS) in China[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 55(5): 290–307.
- Zhou Qi, Chen Taihong, Zhu Zhenlan, Zhang Qi, Wu Aihong, Li Jianbo. 2015. Experimental simulation study on capillary water rising law of loess subgrade[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 28(1): 54–61 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaocheng, Li Yongmei, Wang Zilin, Bai Lushun, Zhou Guifei, Fan Maopan. 2017. Relationship between crop root system and aggregate stability in red soil of sloping farmland[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 37(11): 1706–1715 (in Chinese with English abstract).

818–824 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈淑敏, 金钊, 张晶, 褚光琛, 桑维峻, 林杭生. 2019. 陕北不同沟道土地盐碱化现状及影响因素[J]. 地球环境学报, 11(1): 82–91.
- 但新惠. 2007. 不同级配砾石土毛细水上升高度的研究与探讨[J]. 岩土工程学报, 10(5): 42–47.
- 董英, 张茂省, 李宁, 杨敏, 程秀娟, 朱才辉. 2020. 城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法[J]. 水文地质工程地质, 47(5): 162–170.
- 葛伟亚, 王睿, 张庆, 邢怀学, 周洁. 2021. 城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J]. 地质通报, 40(10): 1601–1608.
- 李浩, 杨强, 罗旋, 王兵虎, 邵长庆, 王思源, 乐琪浪. 2024. 贵安新区生态新城岩溶区地下空间利用适宜性评价[J]. 中国岩溶, 43(1): 176–187.
- 李先瑞, 李晓媛, 王圣麟. 2015. 改性黄土垂直方向毛细水上升作用研究[J]. 科学技术与工程, 15(28): 191–195.
- 李晓红, 王宏图, 杨春和, 贾剑青, 胡国忠. 2005. 城市地下空间开发利用问题的探讨[J]. 地下空间与工程学报, (3): 319–322.
- 栗现文, 周金龙, 赵玉杰, 刘延锋. 2011. 高矿化度对砂性土毛细水上升影响[J]. 农业工程学报, 27(8): 84–89.
- 刘长礼, 林良俊, 张云, 等. 2017. 全国主要城市环境地质问题及其对策[M]. 北京: 地质出版社, 6–11.
- 刘向峰, 张强, 郝国亮, 王逸腾, 孙颖聪, 王来贵. 2023. 草本植物根系类型和分布对根土复合体无侧限抗压强度的影响[J]. 长江科学院院报, 40(9): 106–111, 117.
- 吕秋丽, 杨海华. 2019. 不同土质孔隙结构特点及其毛细水上升规律分析[J]. 能源与环保, 41(5): 101–105.
- 马兴武. 2012. 青海省海东地区水资源开发利用现状与对策[J]. 水利科技与经济, 18(1): 81–85.
- 齐凯, 辛智鸣, 张景波, 朱雅娟. 2019. 乌兰布和沙漠典型植物群落的根系分布特征[J]. 草业科学, 36(7): 1706–1715.
- 苏栋, 黄茂隆, 韩文龙, 陈湘生. 2024. 城市深层地下空间地质环境特性评估模型与应用[J]. 中国地质, 51(1): 157–169.
- 王军辉, 韩焯, 周宏磊, 张在明. 2011. 地下水环境与运营期的城市地下空间相互作用[J]. 土木建筑与环境工程, 33(S2): 50–55.
- 谢和平, 高明忠, 张茹, 徐恒, 王勇威, 邓建辉. 2017. 地下生态城市与深地生态圈战略构想及其关键技术展望[J]. 岩石力学与工程学报, 36(6): 1301–1313.
- 邢怡, 张素荣, 刘继红, 王昌宇. 2019. 农作物根系土对农产品安全的影响分析——以保定东部地区为例[J]. 地质调查与研究, 42(3): 219–224, 234.
- 周奇, 陈太红, 朱振南, 张琦, 吴爱红, 李剑波. 2015. 黄土路基毛细水上升规律试验模拟研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 28(1): 54–61.
- 周晓晨, 李永梅, 王自林, 白录顺, 周贵飞, 范茂攀. 2017. 坡耕地红壤农作物根系与团聚体稳定性的关系[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 37(11): 818–824.