

DOI: 10.12401/j.nwg.2023054

# 城乡融合与地上地下空间协同探测评价的理论与方法 ——以关中平原城市地质调查评价为例

张茂省<sup>1,2,3</sup>, 董英<sup>2,3,4</sup>, 孙萍萍<sup>1,2,3</sup>, 刘江<sup>2,3,4</sup>, 王化齐<sup>2,3,4</sup>, 冯立<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119; 3. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710119; 4. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 城乡融合、地上与地下空间协同探测、评价、规划是节约集约利用空间与自然资源, 增强城市韧性, 促进人与自然和谐共生现代化建设的重要途径。针对中国新型城镇化与乡村振兴协同发展面临着“多规合一”的国土空间规划、地上与地下空间协调集约利用等新的重大科技问题, 以关中平原城市群为研究对象, 基于地球系统科学和地球关键带理论, 汲取系统论、协同论、信息论等理论, 提出了城乡融合、地上与地下空间协同探测、综合评价、统筹规划的新时期城市地质理论, 以及城市强干扰环境下地下空间精细化探测和建模关键技术、基于地下水位控制的地上与地下空间风险防控技术、“取热不取水”的地下空间地热能绿色开发新技术, 并在多个城市得到成功应用。

**关键词:** 城乡融合; 地上地下空间; 协同探测; 新型城镇化; 关中平原

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0153-16

## Theory and Method for Urban–Rural Integration, Evaluation and Cooperative Detection of Ground and Underground Space: Example from the Urban Geological Survey of Guanzhong Plain

ZHANG Maosheng<sup>1,2,3</sup>, DONG Ying<sup>2,3,4</sup>, SUN Pingping<sup>1,2,3</sup>, LIU Jiang<sup>2,3,4</sup>, WANG Huaqi<sup>2,3,4</sup>, FENG Li<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Province Engineering Research Center of Water Resources and Environment, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

**Abstract:** The collaborative detection and evaluation planning of ground and underground space is an important way to enhance the comprehensive carrying capacity of the city and promote the high-quality development of the city. In view of the new major scientific and technological problems such as "multi-plan integration" territorial spatial planning, coordinated and intensive utilization of ground and underground space aimed at the coordinated development of new urbanization and rural revitalization in China, taking Guanzhong plain urban agglomeration as the research area, based on the theories of the earth system science, the earth key belt, system,

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-03-24; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41641011), 中国地质调查局项目“西安城市地质安全调查评价与风险管理示范”(DD20211317)联合资助。

作者简介: 张茂省(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事地质调查、灾害防治与生态修复研究工作。E-mail: xjtzms@xjtu.edu.cn。

synergy and information, this paper puts forward the urban geological theory in the new period of urban-rural integration, coordinated detection, comprehensive evaluation and overall planning of ground and underground space; breaks through the key technologies of fine detection and modeling of underground space under the strong urban interference environment; proposes the risk prevention and control technology of ground and underground space based on groundwater; reveal the heat conduction law of geothermal fluid-exchanger in underground space, and raise the new green development technology of geothermal energy in underground space of "taking heat but not taking water". Which will provide the technique support for the urban planning, construction and operation management, land space planning, natural resource management, etc. And the theories and the technologies have been successfully applied in many cities.

**Keywords:** urban geology; underground space; new urbanization; rural revitalization; Guanzhong plain

2016年,全国科技创新大会指出“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”。2017年,政府工作报告中强调“统筹城市地上地下建设,加强城市地质调查……,有效治理交通拥堵等“城市病”,使城市既有“面子”、更有“里子”。原国土资源部要求:按照地上地下2个西安的总体目标,开展了城市地质调查,使西安成为中国向深部要空间、综合利用国土空间的典范。

2013年12月,中央召开了城镇化会议,发布了《国家新型城镇化规划(2014~2020年)》,中国新型城镇化是以城乡统筹、城乡一体、产业互动、节约集约、生态宜居、和谐发展等基本特征的城镇化,是大中小城市、小城镇、新型农村社区协调发展、互促共进的城镇化。党的十九大报告中提出了乡村振兴战略,明确了产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕的五大战略目标。中国的城镇化水平超过了60%,这一关键节点标志着城乡融合进入新的发展阶段(马琰,2021)。党的十九大报告、二十大报告中都提出建立“城乡融合发展体制机制和政策体系”“着力推进城乡融合和区域协调发展”的决策部署。

目前,中国已经进入了前所未有的新型城镇化与乡村振兴协同发展阶段,新时期国家重大战略对地质工作带来了前所未有的发展机遇,同时也给地质工作提出了崭新的更高的要求。新时期新型城镇化与乡村振兴协同发展中“多规合一”的国土空间规划、地上与地下空间协调集约利用、绿色低碳的清洁能源利用、城市安全保障提升等重大现实问题,已远超出传统认识。亟待发展城市地质核心理论,破解地上与地下空间开发利用中卡脖子的关键技术。

关中平原是华夏文明重要发祥地,古丝绸之路的起点,造就了强大的周、秦、汉、唐等盛世,成为中国

当时的政治、经济和文化中心。新时期关中平原发挥着引领带动丝绸之路经济带建设的作用,担负着打造国家级中心城市群、再造国际化大都市的重要使命。

笔者以关中平原城市群为研究对象,以支撑服务构建人与自然和谐共生的现代化关中平原城市群为目标,依托中国地质调查局“丝绸之路境内段综合地质调查工程”以及关中平原城市群综合地质调查等10余项国家地质调查项目,围绕中国新时期生态文明建设、新型城镇化、乡村振兴、黄河流域生态保护和高质量发展等战略的重大要求,聚焦城乡融合、地上与地下空间协同探测、综合评价、统筹规划等面临的关键重大科技问题,开展了新时期城市地质核心理论和地下空间探测评价关键技术攻关研究(图1),旨在发展地上地下空间协同探测规划的城市地质核心理论与方法、突破城市强干扰环境地下空间精细化探测和建模技术、构建基于地下水位控制的地上地下空间风险防控技术、揭示地下空间地热流体-交换器热传导规律,建立“取热不取水”的地热资源绿色开发技术。

## 1 协同探测与综合评价的城市地质理论

全球性的人口流动具有2个不同的发展趋势:  
①更多的人和良好的资源向大城市聚集,即城镇化。  
②城市居民向城市周边进行扩展,带来人口的迁移和产业的疏散,即逆城镇化。新时期中国提出了乡村振兴战略和国家新型城镇化战略,倡导城乡融合发展。传统的城市地质工作必须创新,以适应城乡统筹、城乡一体,以及大中小城市、小城镇、新型农村社区协调发展、互促共进的要求,促进人地和谐共生,规避过

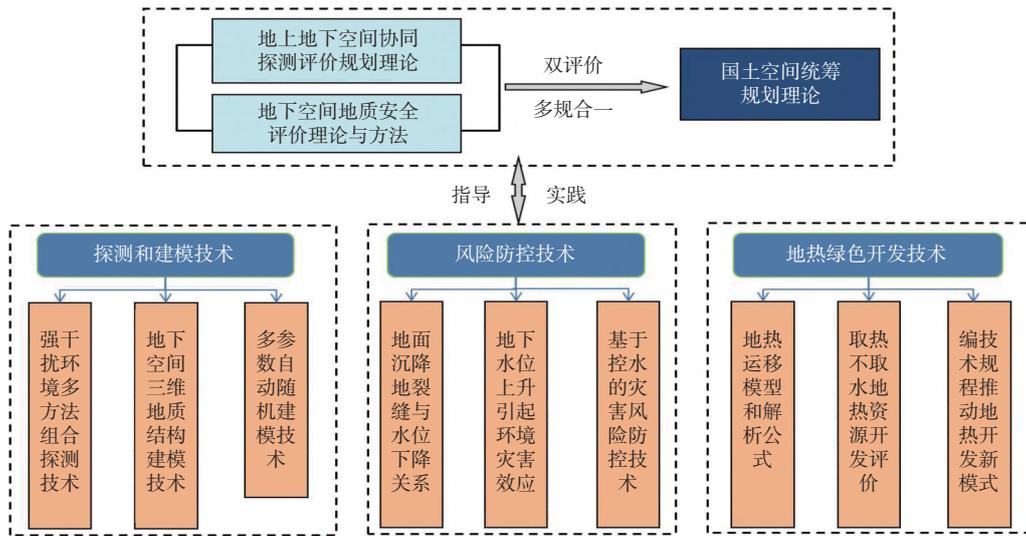


图1 技术路线图

Fig. 1 The route map of technology

度城市化和“城市病”。

针对传统城市地质的理论瓶颈,基于地球系统科学和地球关键带理论,汲取系统论、协同论、信息论等理论的营养,重新厘定了新时期城市地质工作的科学内涵(张茂省等,2014),笔者提出多专业融合、多方法组合,服务规划、建设、管理全过程,面向城市群、大城市、中城市、小城镇空间维度的不同比例尺、深度和精度的地上与地下空间协同探测、国土空间开发利用的适宜性与地质安全综合评价的城市地质理论。

### 1.1 地上与地下空间协同探测

#### 1.1.1 不同精度的协同探测

围绕城市规划和发展面临的关键地质问题,根据对地上与地下空间探测需求的紧迫程度,开展城市群、重点城市、城乡规划区等不同层面地上地下空间协同探测工作(图2)。

城市群层面将整个关中城市群作为一个完整的地质单元,以查明区域地质环境条件、评估区域稳定性、评价资源环境承载力等关键地质问题为目标,运用遥感解译、野外核查和补充调查的技术手段,开展1:25万综合地质补充调查,解决基础地质、土工环地质等方面存疑、精度低、认识不清等问题。

关中盆地层面开展1:10万水文地质工程地质调查,查明关中盆地水文地质工程地质条件,构建可视化关中盆地水文地质结构模型、工程地质结构模型及地下水流模拟模型,为关中盆地城市群城市规划、建设与地质环境管理提供地质基础资料。

在西安市、咸阳市、宝鸡市、渭南市和铜川市等

城市的建成区和规划区,围绕城市地质环境条件、区域工程地质稳定性评价、区域地质灾害和环境地质问题、资源环境承载力评价、城市地上地下空间地质结构建模等关键问题,通过1:5万图幅逐步实施,重点调查以往工作中存在疑义、控制程度低、认识不统一、发生明显变化和新出现的地质灾害和环境地质问题等。

在地质灾害和地质环境问题发生的区域或城市的重点地段,开展1:10000~1:5000,甚至更大比例尺地质灾害和地质环境问题专项调查。采用以野外专项调查为主,室内外实验、数值模拟相结合等手段。调查内容包括地质灾害和地质环境问题形成条件、发育特征、成因机理、现状与发展趋势预测及防控措施等。调查的重点是发生明显变化和新出现的地质灾害和环境地质问题等。

#### 1.1.2 不同深度的协同探测

从经济区所需解决的地质问题出发,针对性采取不同的探测深度。为评价盆地内地壳稳定性及地热资源,关中盆地基底构造探测深度达7000m,主要利用各类深大物探剖面、地震的活动断裂、石油勘探井等资料;为构建盆地第四系地质结构模型,第四系探测深度达1300m,主要采用物探、钻探的技术手段;为建立盆地地下水系统模型及地下水富集循环规律,评价地下水资源,探测深度达400m,主要包括地面调查、物探、钻探、原位试验和实验测试等综合手段;为查明城市地下空间开发利用所涉及的岩土体类型、工程地质性质及空间分布、以及近地表的包气带、土壤

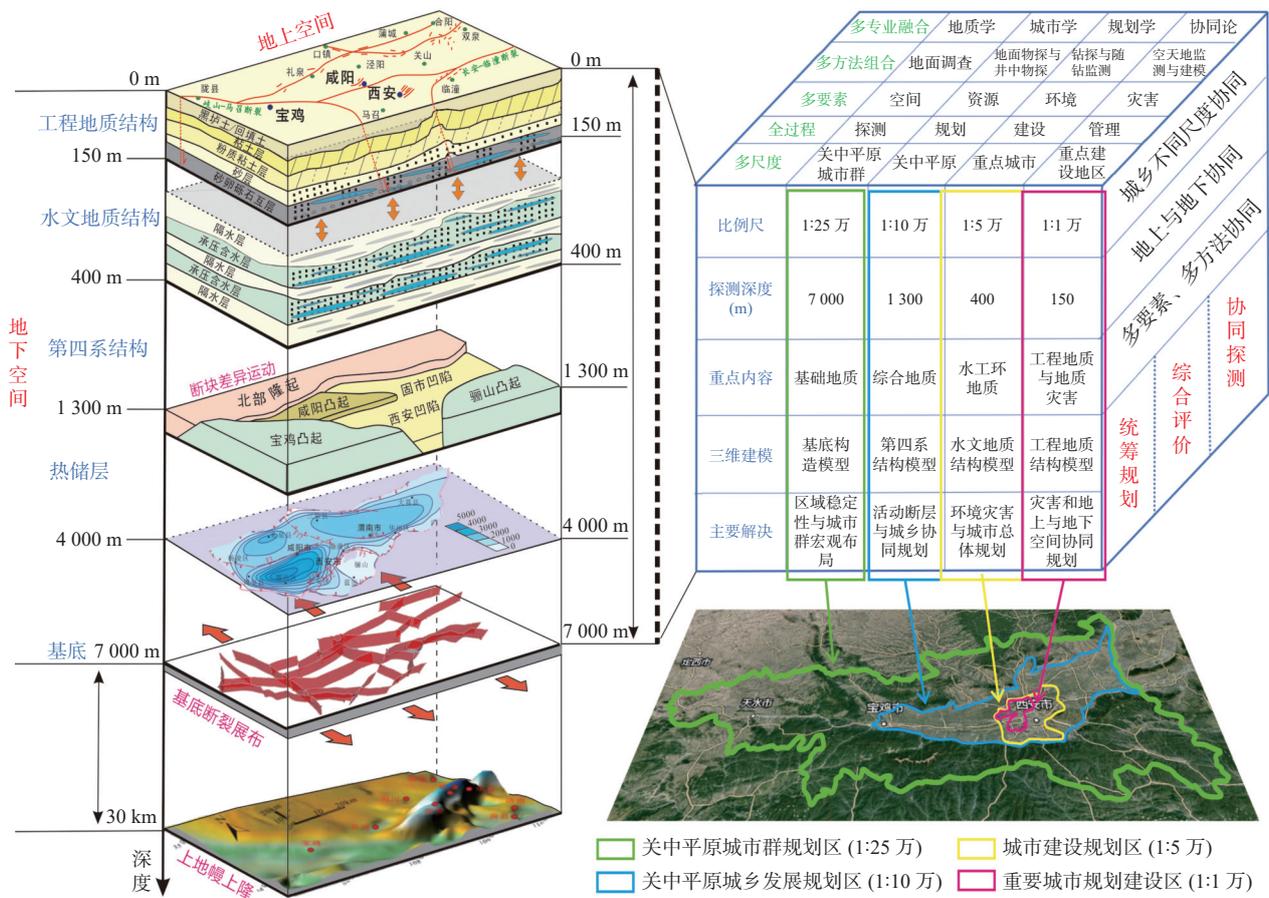


图2 地上与地下空间协同探测评价与规划理论架构图

Fig. 2 The frame map for cooperative detection, evaluation and planning theory of ground and underground space

与生态状况,工程地质层探测深度 150 m,主要以地面调查、工程地质钻探、原位试验和室内测试等探测手段为主。

1.1.1.3 不同内容的协同探测

地上与地下空间协同探测的内容包括地上和地下空间、自然资源、生态环境、地质灾害之间的协同探测(张茂省等, 2018)。针对城市总体规划、详细规划、建设和管理的不同阶段,对协同探测的内容也提出了不同的需求(董英等, 2022)。

地上与地下空间:在总体规划阶段,运用 1 : 25 万综合地质调查成果,初步掌握行政区内自然资源、地质环境条件和环境问题,开展“双评价”工作,提出国土空间规划优化及用途管制建议,并在城市规划区开展 1 : 5 万综合地质调查,基本查明土地利用类型和三维地质结构条件;在详规阶段,开展 1 : 1 万综合地质调查,查明各建筑区块土地利用条件、地质条件和地下空间利用条件;在建设阶段,提出拟出让地块的地上地下空间利用现状、地质背景,组织开展土

地测量和工程勘察,提交工程勘察资料和设计建设相关资料;在管理阶段,通过监测手段,实时掌握城市“三区四线”的控制情况,有效控制地下空间开发秩序。

自然资源:在总体规划阶段,在开展水资源、地热资源、地下空间资源、矿产资源评价,圈定地下水、地热、矿产资源潜力区;在详细规划阶段,提交建筑区块的浅层地热能、地下空间、矿产资源等资源利用方案;在建设阶段,应提拟出让地块的地下水、浅层地热能、地下空间、矿产资源的开发利用要求,根据相关技术规范,开展地下水源、地热、地下空间、矿产资源勘查评价,提交开发利用方案等相关资料;在管理阶段,通过监测,掌握地下水资源均衡状况、地热水开采情况和回灌效果、矿产资源开采情况,并根据极端干旱气候发生概率,制定地下水应急供水方案。

生态环境:在总体规划阶段,开展城市规划建设区 1 : 5 万生态地质与水土环境质量调查,分区评价生态地质与土壤质量等级、地下水质量等级、湿地功

能等级和地质遗迹等级;在详细规划阶段,主要开展建筑区块1:1万生态地质与水土质量调查评价,确定生态保护对象与污染场地风险;在建设阶段,提供拟出让地块的土壤、地下水、地质遗迹开发利用与保护要求,并按照有关技术规范,建设单位开展建设工程项目的生态地质环境影响评价,竣工验收时,提交工程设施对土壤、地下水、地质遗迹的保护措施和监测承诺书;在管理阶段,动态监测生态地质、土壤质量、地下水质量及地质遗迹状况的变化,开展生态地质、土壤和地下水突发污染事件风险点评估,制定应急调查和处置方案。

**地质灾害:**在总体规划阶段,开展城市规划建设区1:5万地质灾害易发程度区划,划定基于地质灾害的城镇与重大工程禁建区。在详细规划阶段,主要开展规划建设区块1:1万地质灾害调查,评价地质灾害风险。在建设阶段,提供拟出让地块的地质灾害分布情况和地质灾害防治要求,并按照有关技术规范,建设单位开展建设项目的地质灾害危险性评估,提交地质灾害勘查、设计、施工和监理等资料,及地质灾害监测承诺书。在管理阶段,通过群专结合、空天地一体化的监测预警网络建设,掌握地质灾害的实时变化,并提供编制城市规划区及相邻影响区地质灾害应急预案,建立地质灾害应急响应平台。

1.1.4 关中平原大陆科学钻探协同探测

渭河盆地是研究气候环境演化与人类活动关系、

大陆动力学过程的有利地段:渭河盆地地处鄂尔多斯地块和秦岭交接带上,即跨伏在活动造山带和稳定地块两构造单元之上,是探讨研究地表系统与盆山深部结构状态和陆内深浅构造动力学互馈的典型地区。始新世以来,渭河盆地沉积完整,记录了季风气候的演化和中国南北方气候分异。早在212万a前,渭河盆地已有人类活动,6000a前已经诞生了以半坡遗址为代表、具有丰富内涵的人类社会,也是周朝的发祥地,是秦一统全国,汉唐兴盛的关键,人文资源丰富。

在渭南固市凹陷实施国际大陆科学钻探,建立渭河盆地构造演化模型与沉积响应过程、高原生长与环境演化耦合关系,探测重要资源成藏条件与资源潜力,获取资源开发关键参数,形成渭河盆地动力演化与气候变化、氦气和地热资源开发、地下空间开发利用的“金柱子”。科学钻探还将为关中地区的地下空间开发、水资源评价、环境地质问题评价和地震机理研究等方面创造条件。

1.2 地上与地下空间综合评价与规划

1.2.1 面向总体规划基于负面清单的地上与地下空间开发适宜性综合评价

梳理地下与地下空间开发的限制性、约束性和影响性因素,将关中平原城市群地上与地下空间资源开发与安全利用评价的负面清单划分为限制因素、约束因素和影响因素3类(图3)。

①限制因素主要包括已有的地下管网、地铁、地下室、桩基、人防工程、地热

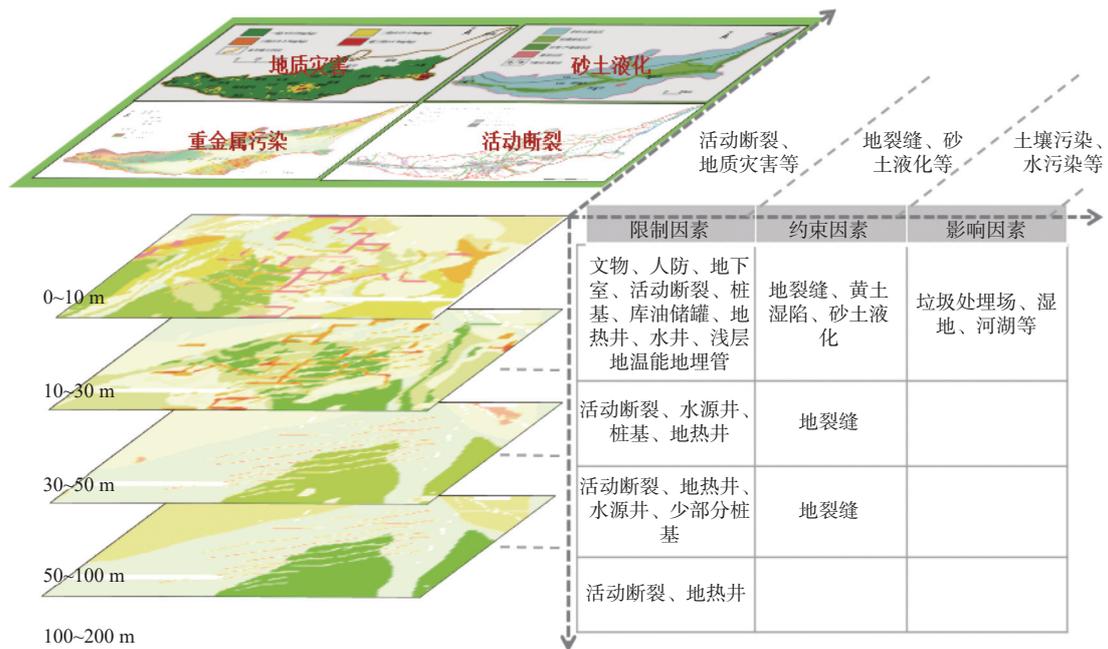


图3 基于负面因素清单的地上与地下空间综合评价图

Fig. 3 Integrated evaluation map of ground and underground space based on negative factors

井、水源井、浅层地温能埋管、油库储罐、垃圾处理场等等因素。②将活动断裂和地裂缝因素作为约束性因素。③影响因素主要包括地面沉降、湿陷性黄土、膨胀土、砂土液化、隔水层、卵砾石等因素。负面清单管理模式不是对空间开发与利用的限制,而是致力于规避或消除开发利用中的不利因素及潜在的灾害风险。通过负面清单评价得到不同空间部位应规避或设防的负面清单,揭示负面清单的变化趋势和危险性,提出地上与地下空间资源开发与安全利用的综合对策建议,构建“负面清单+管理措施”的管理模式。

### 1.2.2 面向控制性详细规划与修建性规划的地下空间地质安全性评价

由于地下空间本身特点各异,影响稳定性的因素多,信息不明确,难以建立一套科学的评价方法,故将服务于控制性详细规划和修建性详细规划阶段的地下空间开发利用地质安全评价分解为地下空间自身稳定性评价、地下空间开发利用对邻近工程稳定性的影响评价、后建地面工程对地下工程稳定性的影响评价等3个方面的评价(董英等, 2020)。

①地下空间自身稳定性评价,分浅埋、深埋硐室对围岩稳定性计算方法进行了评价,在修正的芬纳公式的基础上提出以硐室围岩表面刚好达到剪切塑性极限为临界条件的围岩稳定性计算方法;同时通过构建地质模型,模拟不同工况下硐室稳定性,获取大量样本数据,利用神经网络方法分析建立求解器,从而建立

地下空间自身稳定性的快速评价系统。②城市地下空间开发引起的邻近工程稳定性影响评价,从地下空间开发对地面工程的影响以及地下工程之间相互影响两方面梳理了城市地下空间开发利用引起的其他稳定性评价的内容与方法。③针对后建地面工程对地下工程稳定性的影响评价,提出了通过原位监测、数值分析及工程类比等方法对后建地面工程对地下工程稳定性的影响进行评价。

### 1.2.3 基于木桶-边际-风险的双评价技术方法

在资源开发、工程建设、城镇化等驱动下,城市地质环境压力不断加大,在越来越多的城市接近或达到了地质环境承载力的上限,城市地质资源环境安全已成为中国当前和今后相当长时期内需要认真面对的重大资源环境问题。城市的高质量发展对地质资源环境承载力提出了更高的要求。笔者从抓住关键因素、科学定量评价、阈值标准有据、结果可信适用的思路出发,提出基于木桶理论、风险理论和边际理论的资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”)理论框架与技术方法,并应用于关中盆地的双评价实践工作中。基于木桶理论,识别关中盆地活动断裂、地质灾害、富硒土地、引汉济渭等4项关键因素;基于边际理论,开展资源承载力评价;基于风险理论,开展地质环境承载力、国土空间适宜性和地质安全性评价;在单因素评价的基础上开展综合评价;将综合评价结果与区域国土空间开发现状或规划结果做叠加分析,调整和优化区域发展“三区

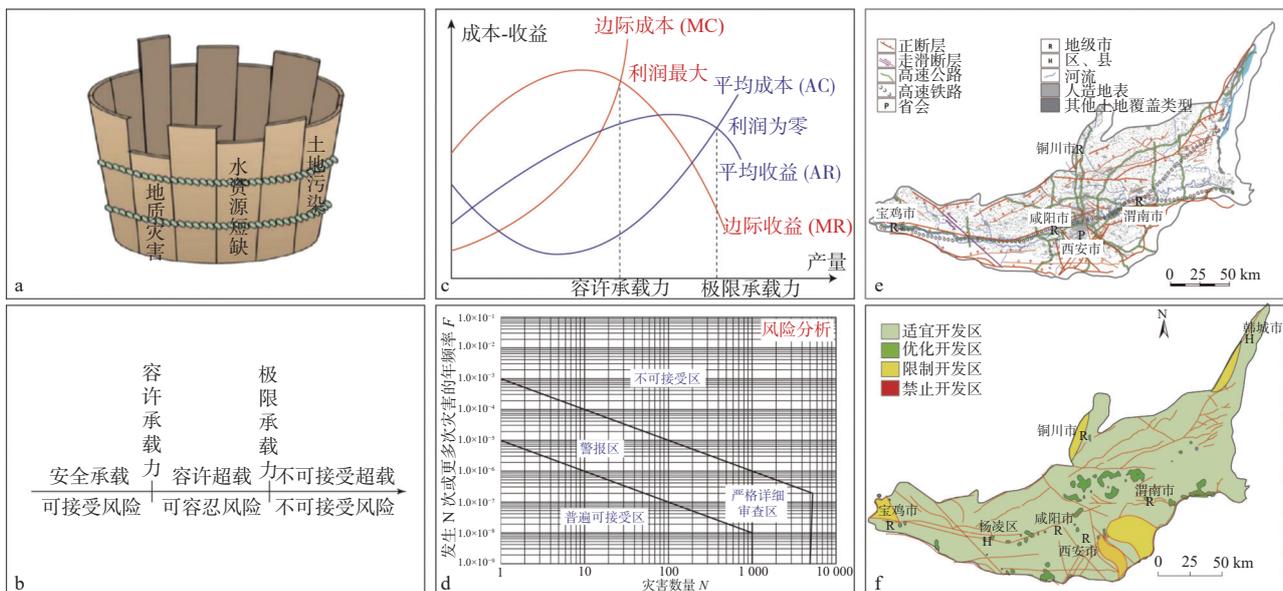


图4 基于木桶-边际-风险分析的国土空间统筹规划理论(a~d)及规划结果图(e~f)

Fig. 4 (a~d) The overall planning theory and (e~f) results map for territory space based on barrel theory, margin and risk analysis

三线”(图4)。

关中平原城市群农业生产适宜区主要集中分布在汾渭盆地内, 其次零星分布在陇东、渭北黄土塬区, 渭河及其支流泾河、千河以及丹江、南洛河等河谷区; 一般适宜区主要分布在汾渭盆地边缘山前斜坡地带, 天水、陇东、渭北地区和洛南盆地、商丹盆地等秦岭山间盆地; 不适宜区主要分布在秦岭、中条山、太岳山等中高山区、渭南大荔沙苑地区和天水、陇东、渭北的其余地区。关中平原城市群城镇建设适宜区主要集中分布在汾渭盆地内, 其次零星分布在渭河天水段河谷区、商丹盆地等地; 一般适宜区主要分布在渭北白水、韩城一带, 以及山西的河津、新绛、翼城一带, 其次分布在关中盆地的宝鸡、岐山-扶风、渭南高塘、潼关等地质灾害高易发区, 此外在陇东、渭北黄土塬区, 武山、甘谷等地呈条带状分布; 不适宜区主要分布在区内的中高山区、低山丘陵区 and 渭北黄土沟壑区。

## 2 城市强干扰环境地下空间精细化探测和建模关键技术

### 2.1 城市强干扰环境多方法组合的地下空间探测技术

地下空间开发利用是解决“城市病”的有效途径, 城市强干扰环境下地下空间精准探测已成为多学科交叉研究的热点, 也是当前研究的难点(王亚辉等, 2019)。为攻克城市区抗干扰、高精度、高分辨率地球物理探测技术, 形成一套抗干扰的多方法组合的地下

空间探测技术方法体系, 为城市地下空间开发探测提供技术支撑。本次在基岩随钻系统的基础上, 针对松散层工程地质性质和钻进特点, 研发第四系松散岩类的随钻监测系统, 实现钻头位移、钻杆转速、油液压力和冲洗水压等多参数监测采集(图5、图6), 提出钻探与随钻监测结合、地面物探与井中物探结合、原位试验与室内测试结合的地下空间多组合探测技术, 突破随钻监测在松散堆积层探测中应用的技术瓶颈, 并与13种物探测井参数融合(图7), 获取地下空间精细化信息。在关中平原、秦岭山地和黄土高原多个城市试点中获取宝贵数据和良好的探测效果。

### 2.2 基于块体的地下空间三维地质结构建模技术

结合智慧城市建设, 推进基于物联网、云平台、大数据平台的城市地下空间综合管理信息系统建设,

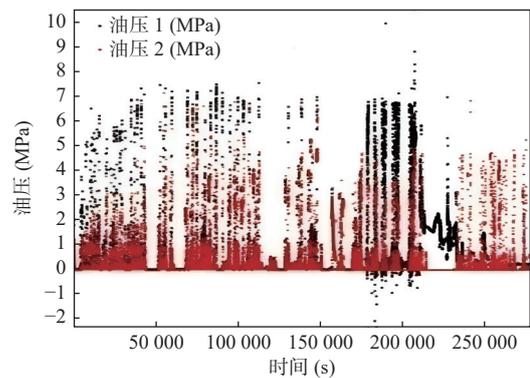


图5 随钻监测数据及随深度变化图

Fig. 5 The figure for the changof the monitoring data with the depth while drilling

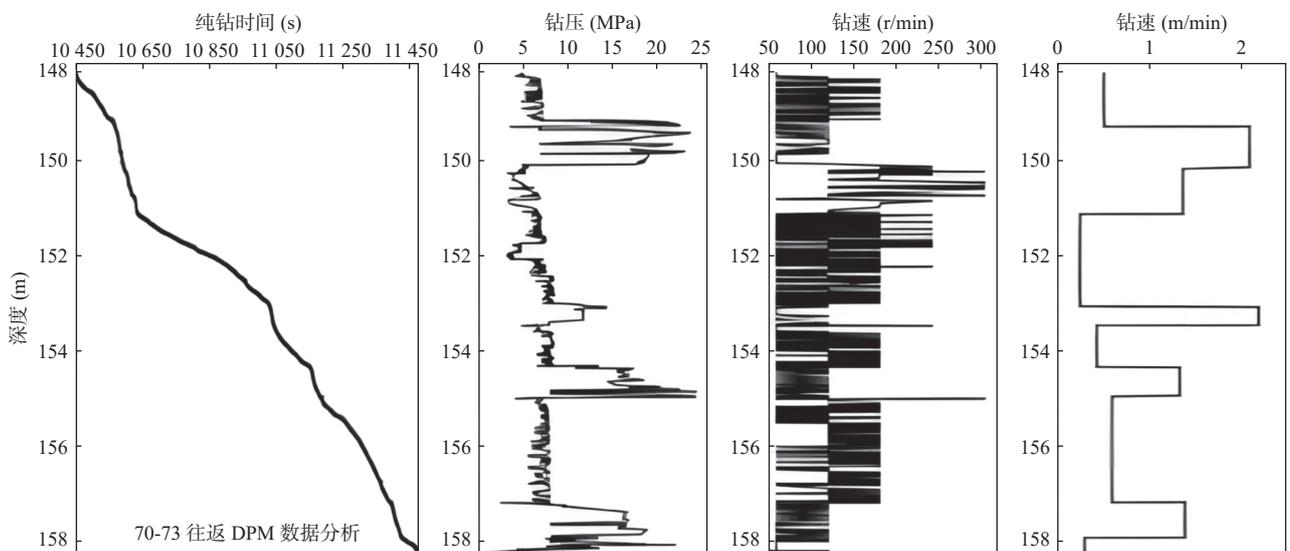


图6 随钻监测原始油压-时间关系图

Fig. 6 The relationship figure of the original oil pressure and time

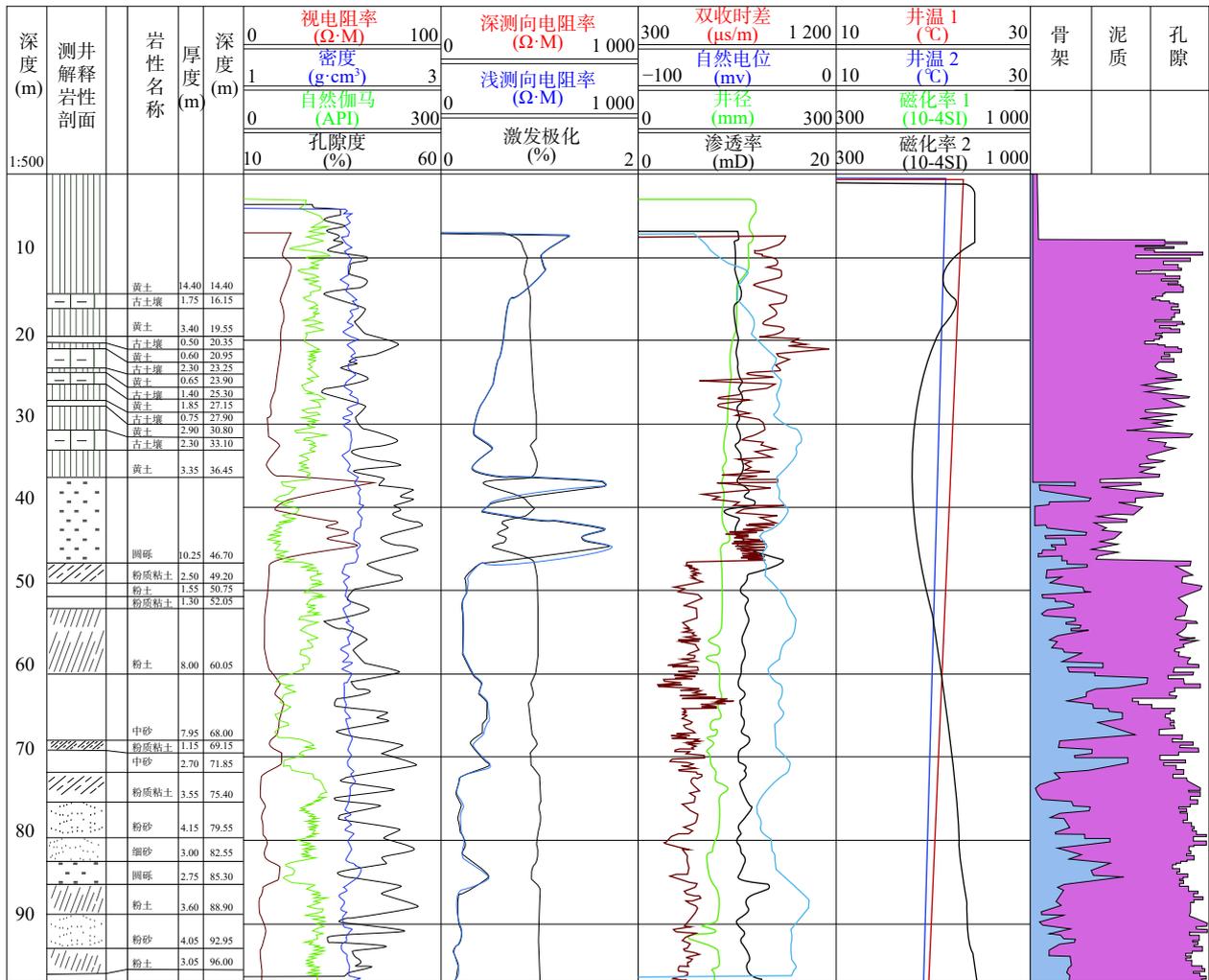


图 7 综合物探测井参数及解译图

Fig. 7 The figure of the comprehensive detection well parameters and interpretation

实现地上地下一体化、地下空间“透明化”，服务精细化管理决策。面向关中断陷盆地复杂地质结构建模难题，在关中平原城市地质数据库的基础上(图 8)，以复杂断裂构造框架为基础进行构造单元划分，以钻孔和剖面数据为控制要素构建由面到体的三维地质实体模型，创建了基于块体的“构造镶嵌”模式的三维地质结构建模技术，建立了关中盆地基底构造模型、第四系结构模型、水文地质结构模型和工程地质结构模型(图 9)。

### 2.3 城市地下空间多参数自动随机建模技术

面向地下空间探测获取海量的随钻监测和 13 种测井参数数据，提出以地质属性插值为核心的地下空间三维自动建模算法，按照水平 250 m、垂直 1.5 m 的三维网格，首创西咸新区强度指数、密度、孔隙度、渗透率、视电阻率、放射性钍、总自然伽马等参数的等

效工程地质特性随机模型(图 10~图 12)。

## 3 基于地下水位控制的地上与地下空间风险协同防控技术

在前人研究地面沉降地裂缝的基础上(张家明, 1990; 彭建兵, 1992, 2007; 黄强兵等, 2007)，笔者主要围绕区域地下水位持续下降和持续上升引起的不同灾害效应，开展了地上与地下空间风险协同防控技术研究。

### 3.1 地面沉降地裂缝形成机理及预测模型

西安市地面沉降地裂缝发育，世界罕见，一直是该领域研究的热点地区(张茂省等, 2013)。

(1)地面沉降地裂缝形成机理。通过黏性土压密测试仪器(图 13)、工业 CT 技术获取了不同地层压力

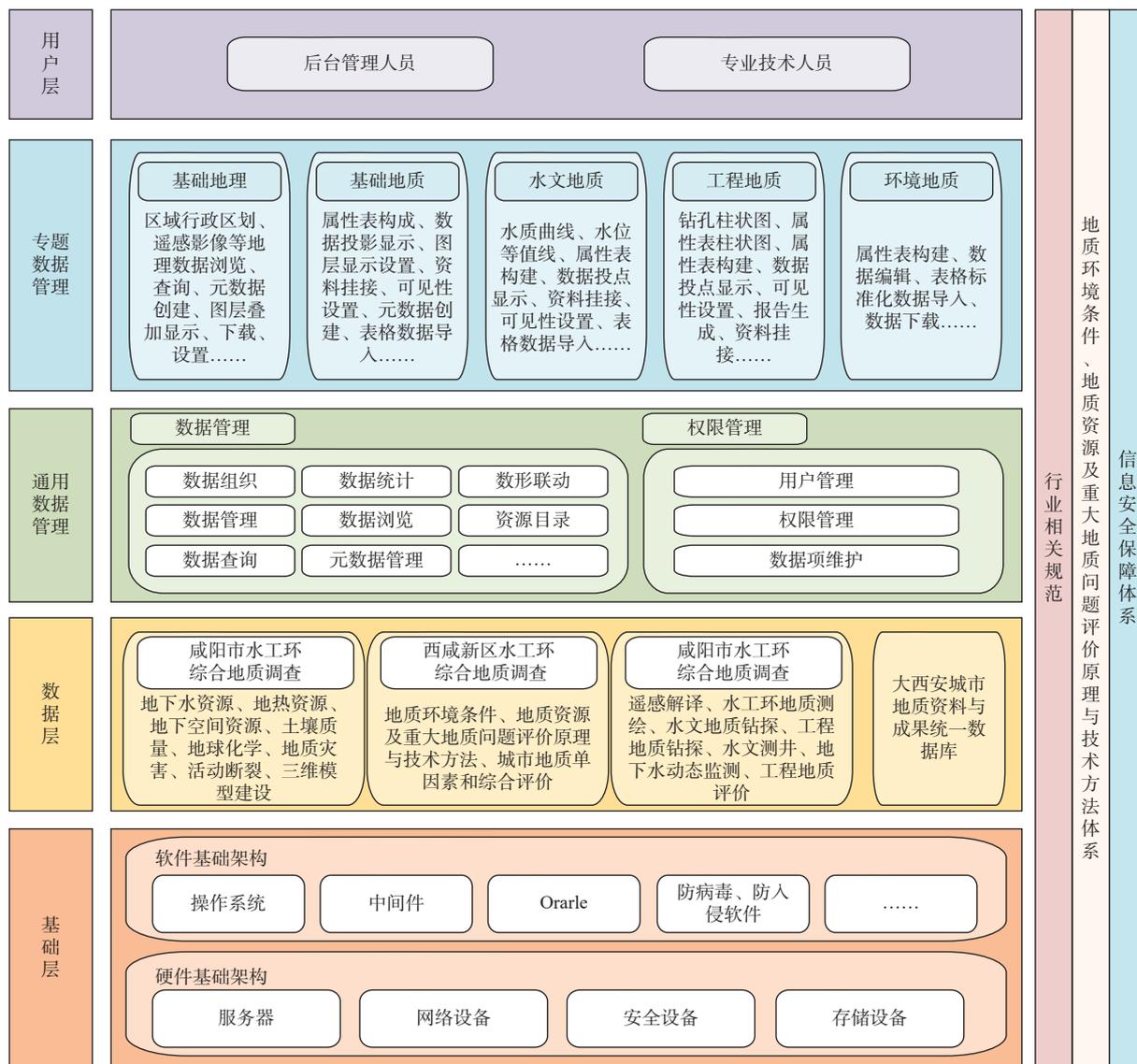


图 8 关中平原城市地质数据库结构图

Fig. 8 The Structure of urban geological database of Guanzhong plain

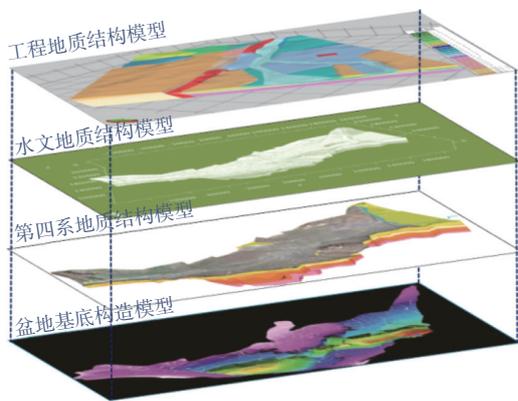


图 9 基于块体的关中平原地质结构建模图

Fig. 9 Geological structure modeling map based on block of Guanzhong plain

下不同深度黏性土孔隙图像(图 14),从微观、细观、中观、宏观等尺度分别揭示了黏性土释水压密变形机理。地下水位下降引起的含水层属于弹性变形,变形量微小;隔水层和弱透水层黏性土释水压密变形属于塑性变形,变形量大,是地下水位下降引起地面沉降的主要因素(图 15)。在西安鱼化寨地区建立了地下水位与地面沉降分布式光纤监测系统,精准揭示了地面沉降层位、沉降量与地下水位下降的定量关系及其对地下空间的作用机理(图 16)。结果显示,地面沉降主要发生的深度约为 80~200 m,作为地下水的主要开采层,贡献了总地面沉降量的 90% 以上。据此计算了西安地区 13 条地裂缝上、下盘差异沉降量。

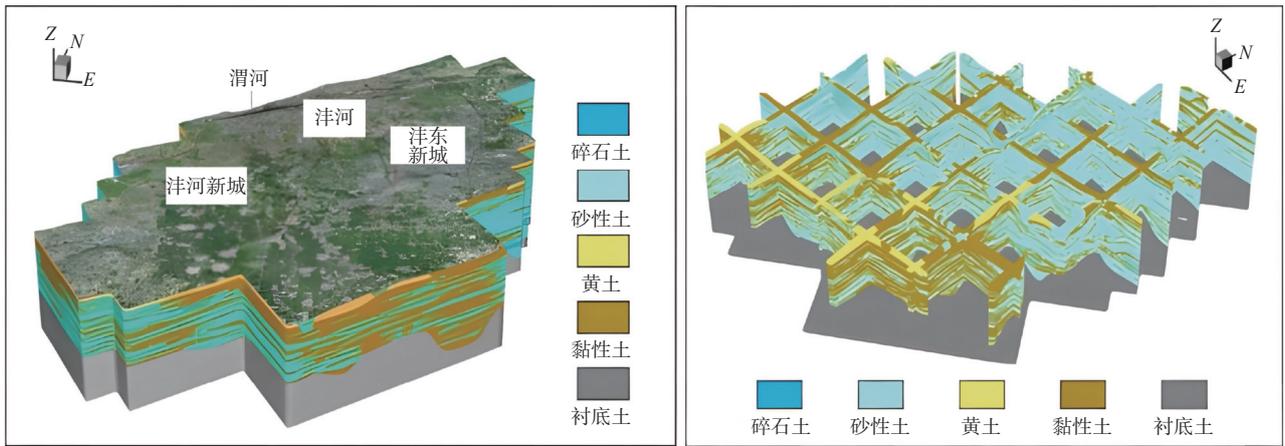


图 10 西咸新区岩性随机模型及剖面栅栏图

Fig. 10 Lithology random model and profile fence map in Xixian New Area

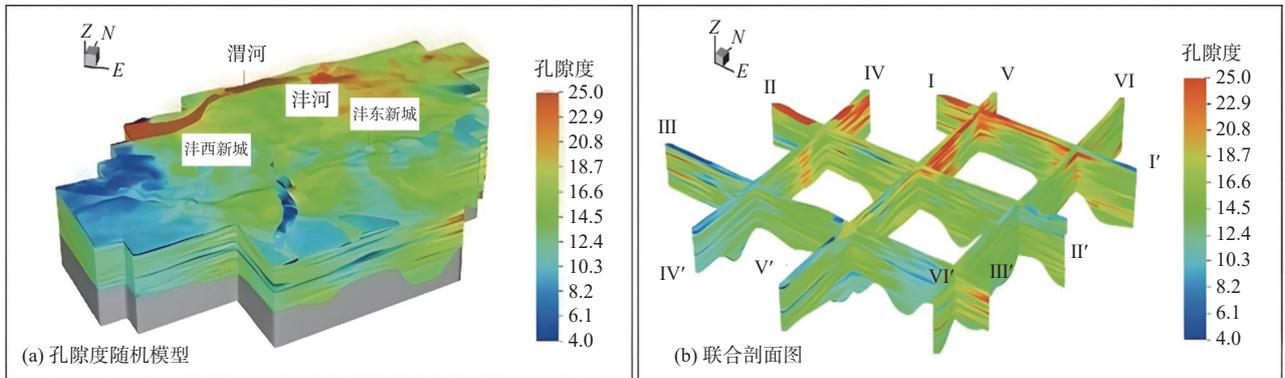


图 11 西咸新区孔隙度随机模型及剖面栅栏图

Fig. 11 The porosity random model and profile fence map in Xixian New Area

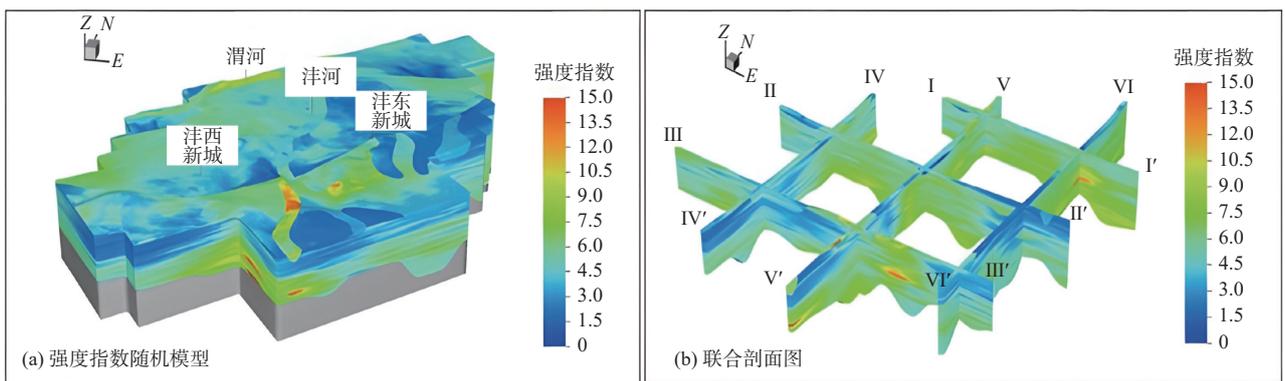


图 12 西咸新区强度指数随机模型及剖面栅栏图

Fig. 12 The strength index random model and profile fence map in Xixian New Area

(2)地面沉降预测模型。西安地区引起地面沉降的5个主要因素包括构造沉降、荷载压密、黄土湿陷、渗透变形和过量开采地下水。根据不同的驱动因素，分别预测其引发的地面沉降量。构造引起的沉降量：关中盆地作为一个断陷盆地，据渭南赤水河的桥上桥

可以推算160余a沉降了近3m，构造沉降量约为3~5mm/a。荷载压密引起的地面沉降：建筑荷载引起的地面沉降亦不可忽略，30层建筑会对地层附加近1MPa的压力，引起的沉降量可达200mm。黄土湿陷引起的沉降量：区域潜水水位上升引起的黄土湿陷

以往关注不够, 笔者从黄土吸应力的角度出发, 计算不同含水率非饱和-饱和状态下 10 m 厚度的黄土湿

陷量可以达到 300 mm。渗透变形引起的沉降量是指地下水开采井三维流区渗透力引起渗透变形造成的地面沉降, 同时渗透力会引起水井出砂, 逐步掏空水井周围地层, 每 10 m 水头下降造成地面沉降量超过 30 mm。过量开采地下水引起的沉降: 过量开采地下水造成区域地下水下降漏斗是诱发地面沉降最大原因, 第二承压水层水位下降幅度达 100 m, 引起的整体有效应力变化可达 1 MPa, 造成 50 m 厚的粘土层沉降量接近 3 m。

(3)地裂缝风险评价。对西安 14 条地裂缝及地铁沿线分别逐条分段开展了风险评价。其中, 风险大的仅有 6 段, 长度为 18.6 km; 风险中等的有 15 段, 长度为 100.9 km; 风险小的有 12 段, 长度为 108.1 km (图 17)。

### 3.2 区域地下水位持续上升引起环境效应

除地面沉降地裂缝灾害外, 笔者发现了西安地区



图 13 研发的黏性土压密测试仪器展示图  
Fig. 13 The cohesive soil compaction test instrument

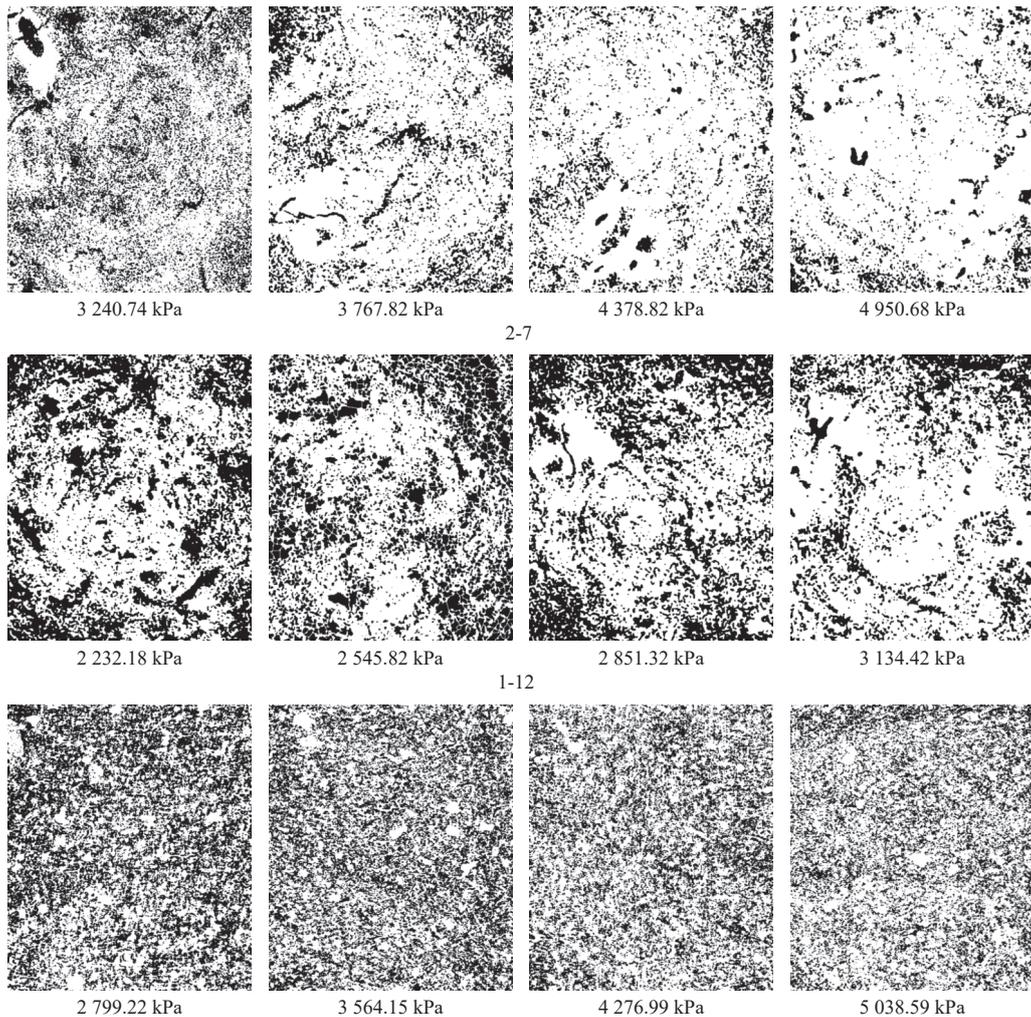


图 14 工业 CT 获取的不同地层压力下不同深度黏性土孔隙图

Fig. 14 The pore images of cohesive soil at different depths under different formation pressures obtained by industrial CT

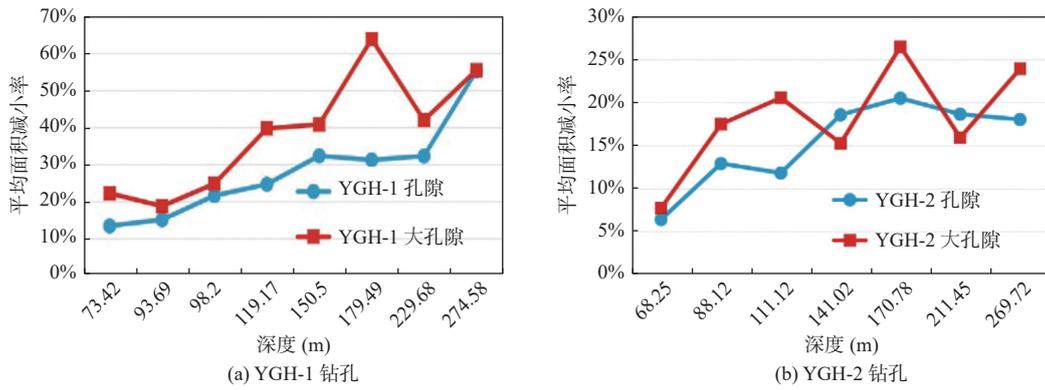


图 15 黏性土大孔隙与空隙面积压缩变形减小率对比图

Fig. 15 The comparison of the reduction rate compression deformation between large pore and void area of cohesive soil

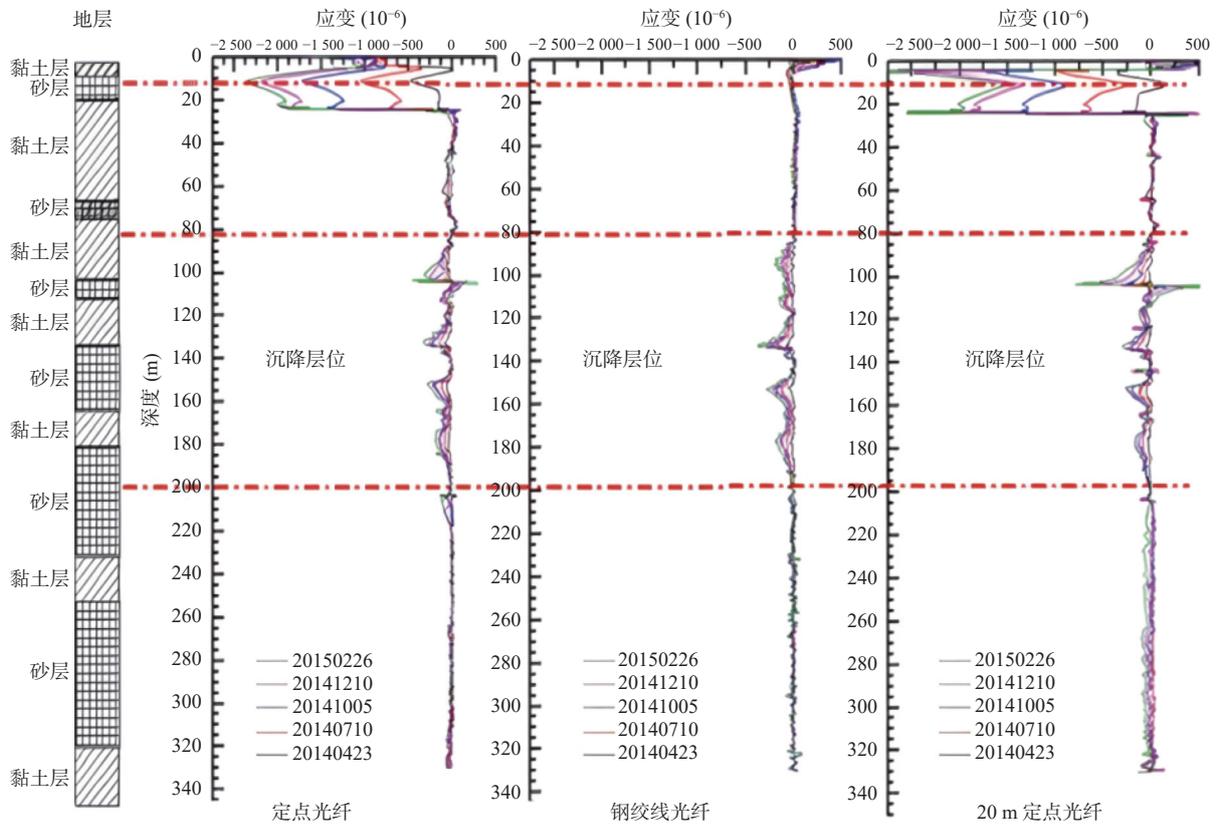


图 16 地面沉降分布式光纤监测曲线图

Fig. 16 The distributed fiber monitoring curve of the ground subsidence

地下水位上升引起的地下空间浮力与浸水、黄土湿陷和砂土液化等环境灾害效应。针对西安市禁采地下水及大量水景工程建设引起的区域地下水位持续上升问题,系统查明了禁采(1997年)以来地下水动力场演化规律,圈定了地下水位上升区域及速率,揭示了区域地下水位上升引起的地下空间浮力增大与浸水、黄土湿陷、砂土液化等灾害效应及其对地下空间的作用机理,评价了地下水位上升引起的黄土湿陷范围由

22.84 km<sup>2</sup> 增大到 95.58 km<sup>2</sup>,砂土液化范围由 410.7 km<sup>2</sup> 增大到 532.44 km<sup>2</sup>(图 18)。

### 3.3 突然停采地下水引起的地面反弹机制与发展趋势

通过 InSAR 遥感监测、GPS 地面监测和地下分布式光纤监测,获取了西安地铁 3 号线鱼化寨段 2018 年 9 月 20 日到 11 月 19 日之间,地下水位动态与地面形变数据(图 19),揭示了由于突然大面积关闭开采井,

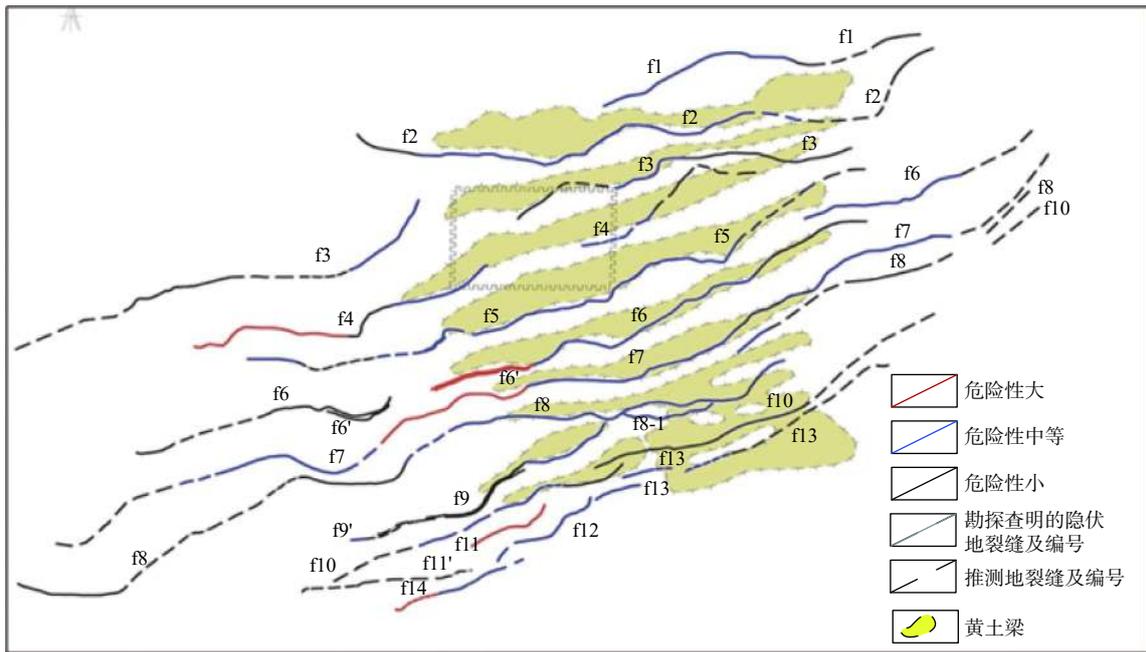


图 17 西安地区地裂缝风险评价图

Fig. 17 The risk assessment map of ground fissures in Xi'an Area

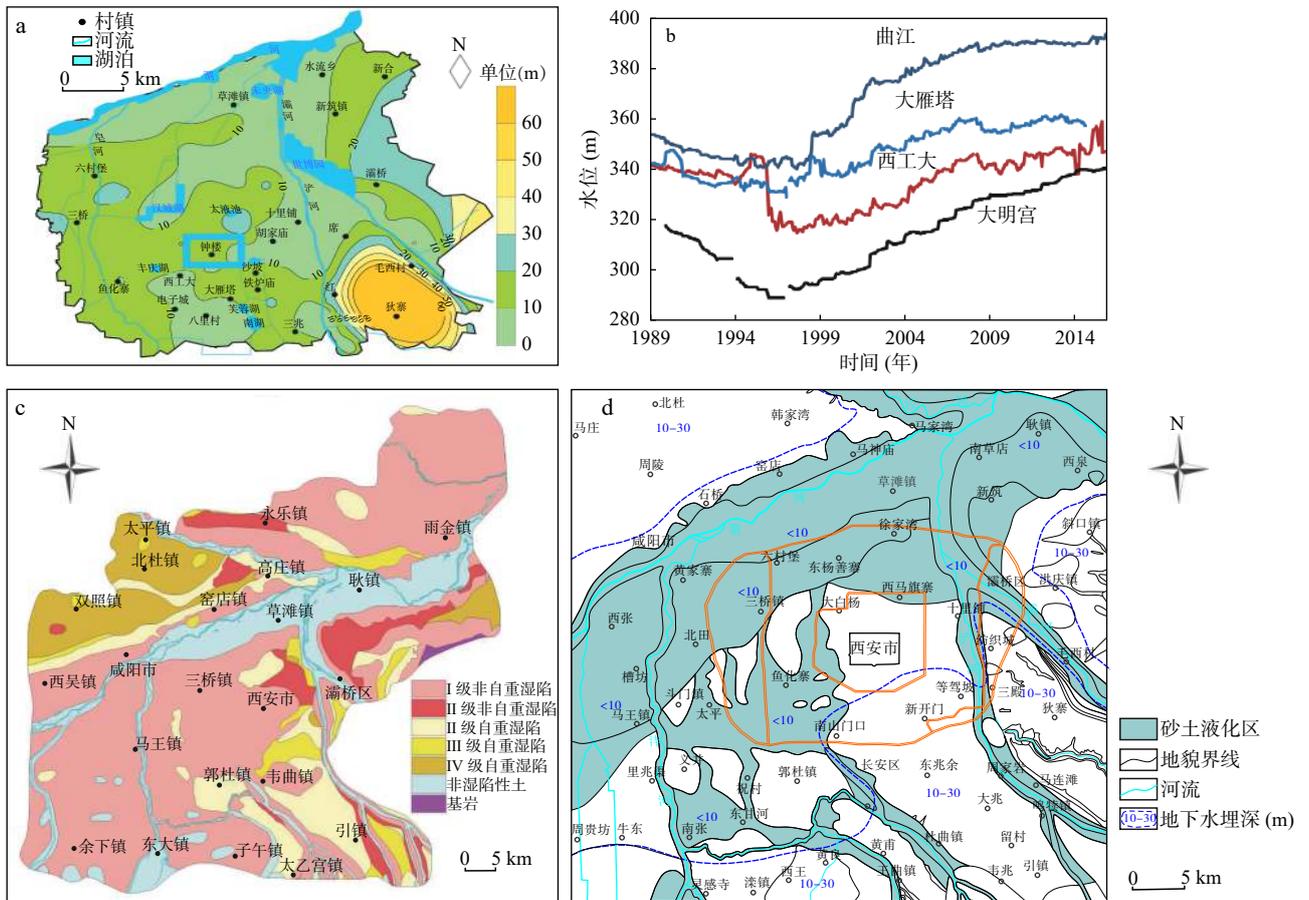


图 18 潜水位埋深(a)与上升(b)引起的黄土湿陷(c)砂土液化(d)评价图

Fig. 18 (a) The depth and (b) change of groundwater table, and the related evaluation maps of (c) loess collapsibility and (d) sand liquefaction

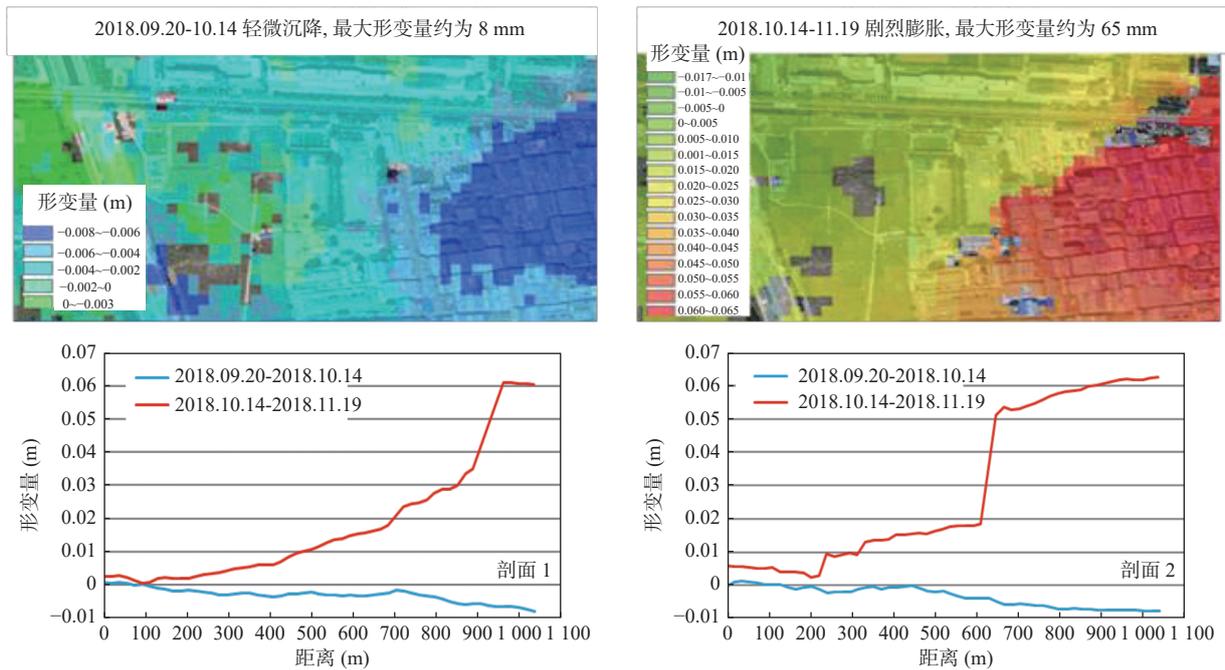


图 19 抽水引起地面沉降与突然关井引起地面反弹抬升对比图

Fig. 19 The comparison figure of ground subsidence caused by pumping and ground rebound uplift caused by sudden shut-in

引起地下水位快速回升、含水层反弹,导致地面抬升的力学机制,经计算,地面抬升最大值约为 65 mm,研判其发展趋势是趋于稳定,风险可以接受,得出地铁 3 号线可安全运营,不必停运的结论。

### 3.4 基于控水的地质灾害风险协同防控技术

统筹考虑地下水位下降引起的地面沉降、地裂缝与地下水位上升引起的地下空间浮力及浸水、黄土湿陷、砂土液化等灾害效应,通过把地下水位控制在合理的范围,形成基于地下水位控制的面向地上与地下空间多种灾害风险协同防控技术。西安市已经全面实施地下水禁采政策,并完成了一批水景工程建设,地下水位开始持续上升,必须引起政府相关部门、规划与勘察设计单位、科研人员的高度重视,要认识到西安市区域地下水位上升的事实及其重要性,并行动起来,防患于未然。

## 4 地下空间“取热不取水”的地热资源绿色开发技术

### 4.1 “取热不取水”开采井模式

“取热不取水”亦称地热能中深层地埋管清洁供热技术,是对地下温度 70~120 °C 的中深层地热能“取热不取水”的无干扰换热技术,目前有“直井、

L 型、U 型” 3 种井型的取热模式(图 20)。具有取热持续稳定、地温恢复快、环境影响低的特点,适宜作为建筑清洁供热的热源。中深层地埋管换热技术比传统浅层地热能热泵技术节能 30% 以上,有很好的经济效益、社会效益与环境效益(张茂省等, 2021)。

### 4.2 地热井合理井距与取热量解析

中深层地埋管换热器的热作用半径是当过余温度衰减至足够小时所对应的距离。可利用岩土热物性、建筑热负荷等参数计算换热器影响作用半径,具体计算公式如下:

最大过余温度:

$$\theta_{\max}(r) \approx -\frac{Q_y}{4\pi kl} \text{Ei}\left(-\frac{r^2}{4ant_y}\right) - \frac{\text{sign}(Q_y)|Q_{0.5y} - Q_y|}{4\pi kl} \text{Ei}\left(-\frac{r^2}{2at_y}\right) \quad (1)$$

式中:  $l$  为换热器的长度;  $t_y$  指一年的时间;  $Q_y$  为负荷的年平均值;  $Q_{0.5y}$  为每年供热负荷最大的连续 6 个月的平均负荷(单孔);  $\text{sign}(Q_y)$  是  $Q_y$  的符号函数;  $a$  为平均热扩散系数;  $k$  为平均导热系数(岩石热导率);  $r$  为计算点至换热器的距离(影响半径)。

冷热不平衡率:

$$\eta = |Q_{0.5a}^+ + Q_{0.5a}^-| / (Q_{0.5a}^+ - Q_{0.5a}^-) \quad (2)$$

$Q_{0.5a}^+$ 、 $Q_{0.5a}^-$  分别表示每年冬季供暖、夏季制冷的

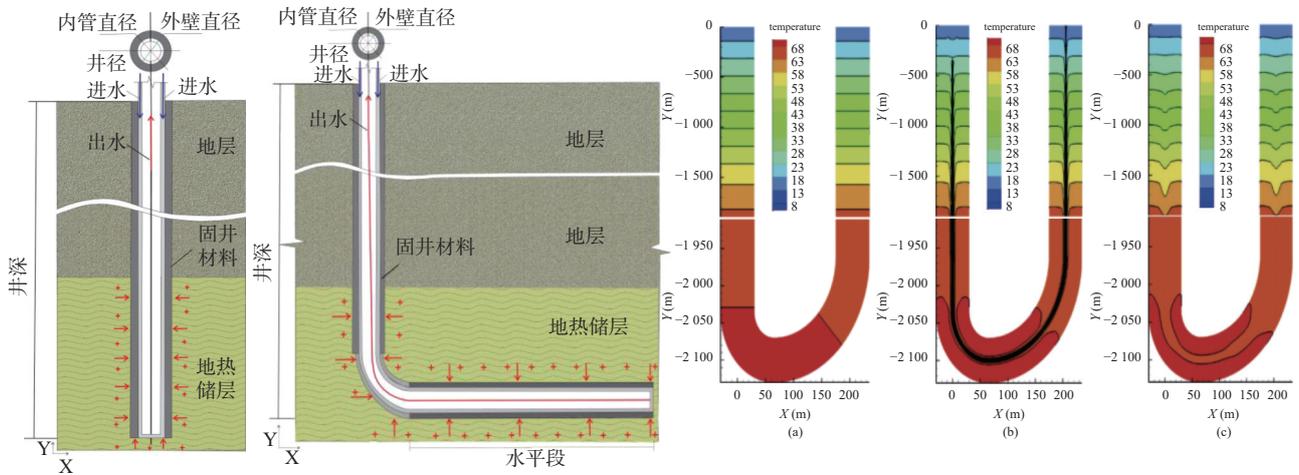


图 20 “取热不取水”的地热井型与热运移数值模拟图

Fig. 20 The geothermal well type and numerical simulation of heat migration of "take heat without water"

连续 6 个月的平均负荷, 当  $\eta=1$  时说明该换热系统只需要在冬季供暖或夏季制冷。

最大过余温度的绝对值为临界过余温度  $\theta_c$ 。

$$\theta_c \approx \frac{\max(Q_{0.5a}^+, Q_{0.5a}^-)}{4\pi k l} f(\eta, r) \quad (3)$$

$$f(\eta, r) = -\frac{\eta}{1+\eta} \text{Ei}\left(-\frac{r^2}{4n}\right) - \frac{1}{1+\eta} \text{Ei}\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (4)$$

其中,  $r = r/\sqrt{at}$ , 为无量纲距离。一般的换热器的工作年限为 50 年, 则  $n=50$ 。

由公式(4)可得: 不同  $\eta$  值时无量纲距离  $r'$  与  $f$  的关系(图 21):

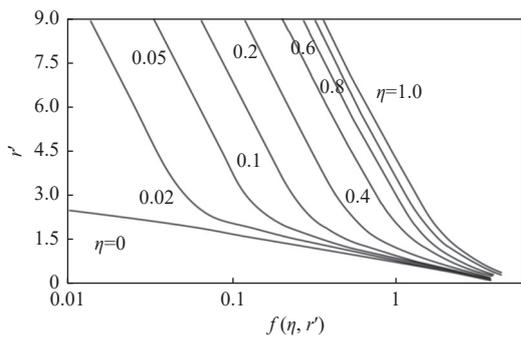


图 21 不同  $\eta$  值时无量纲距离  $r'$  与  $f$  的关系图

Fig. 21 The relationship figure of  $r'$  and  $f$  in the different value of  $\eta$

由公式(3)可得:

$$f(\eta, r) = \frac{4\pi k l \theta_c}{\max(Q_{0.5a}^+ - Q_{0.5a}^-)} \quad (5)$$

计算换热器影响作用半径利用公式(5)和不同  $\eta$  值时无量纲距离  $r'$  与  $f$  的关系图就可以求得。

## 5 结论

(1) 发展了城乡融合和地上地下空间协同探测评价规划的城市地质新理论新方法。针对传统城市地质的理论瓶颈, 提出了多专业融合、多方法组合, 服务规划、建设、管理全过程, 面向城市群规划区、城乡发展规划区、大中城市、小城镇空间维度的不同比例尺、探测深度和精度的地上与地下空间协同探测、综合评价、统筹规划的城市地质新理论。创建基于负面因素清单的城市地上与地下空间资源综合评价和基于木桶-边际-风险的“双评价”与“多规合一”的国土空间统筹规划理论与方法, 有望解决空间维度新型城镇化与乡村振兴协同发展、“多规合一”的国土空间规划、地上与地下空间协同开发利用难题。

(2) 提出城市强干扰环境地下空间精细化探测和建模技术。面向强干扰环境探测技术瓶颈, 提出钻探与随钻监测结合、地面物探与井中物探结合、原位试验与室内测试结合的地下空间多组合探测技术; 面向关中断陷盆地复杂地质结构建模难题, 创建基于块体的三维地质结构建模技术, 建立关中盆地基底构造模型、第四系结构模型、水文地质结构模型和工程地质结构模型; 面向地下空间探测获取的海量测井数据, 提出以地质属性插值为核心的地下空间三维自动建模算法, 首创西咸新区强度指数、密度、孔隙度、渗透率、视电阻率、放射性钍、总自然伽马等参数的等效工程地质特性随机模型, 填补了城市地下空间精细化数据缺失和科学表达的空白。

(3) 构建基于地下水位控制的地上地下空间风险

防控技术。针对西安市禁采地下水及大量水景工程建设引起的区域地下水位持续上升问题,系统查明1997年禁采以来西安地区地下水动力场演化规律,揭示区域地下水位上升引起的地下空间浮力增大与浸水、黄土湿陷、砂土液化等灾害效应及其对地下空间的作用机理。建立了地下水位与地面沉降分布式光纤监测系统,揭示地面沉降层位、沉降量与地下水位下降的定量关系及其对地下空间的作用机理。揭示由于突然大面积关闭开采水井,引起地下水位快速回升、含水层反弹,导致地面抬升的现象和力学机制。建立基于地下水位控制的地面沉降、地裂缝与地下空间浮力与浸水、黄土湿陷、砂土液化等多种灾害一体化风险防控技术,解决了地上与地下空间利用中灾害智能识别和多种灾害协同防控问题。

(4)揭示地下空间地热流体-交换器热传导规律,建立“取热不取水”的地热资源绿色开发技术。针对关中平原地热流体开发引起区域地热水头大幅下降,热水资源衰竭,回灌点少、效率低的现实问题和“取热不取水”新模式中缺乏理论支撑问题,系统查明陕西省地热地质条件和地热储层参数,揭示地下空间地热流体-交换器热传导规律,建立地下空间地热运移数值模型和地热井取热解析公式,首次提出“取热不取水”新型地热资源开发供热容积率概念及地热资源评价方法,建立地热资源绿色开发技术,为中国地热资源绿色清洁利用提供新方向。

致谢:城乡融合、地上与地下空间协同探测、综合评价、统筹规划是一个涉及多学科复杂的巨系统,笔者以关中平原城市群为例做了一些较肤浅的探索,很多问题有待进一步深入研究,旨在抛砖引玉,期待不吝批评指正。在此对2009年以来关心和指导关中平原城市地质调查项目的李烈荣司长、王秉忱大师、王双明院士、彭建兵院士、殷跃平教授、李文渊研究员、程光华教授等领导和专家以及项目组同事表示衷心感谢!

## 参考文献(References):

董英,刘洁,王化齐.西北地区城市地质调查与城市规划建设[J].西北地质,2022,55(03):200-209.

DONG Ying, LIU Jie, WANG Huaqi. Urban Geological Survey and Urban Planning and Construction in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(03): 200-209.

董英,张茂省,李宁,等.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,2020,47(05):161-168.

DONG Ying, ZHANG Maosheng, LI Ning, et al. Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(05): 161-168.

黄强兵,彭建兵,范文,等.西安地铁二号线沿线地裂缝未来位错量估算及工程分级[J].工程地质学报,2007,15(04):469-474.

HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Wen, et al. Estimation of the maximum displacement of ground fissures along Xi'an metro line 2 and its engineering classification[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(04): 469-474.

马琰,连皓,雷振东,等.西咸城乡融合发展试验区融合发展路径与策略[J].规划师,2021,37(09):61-67.

MA Yan, LIAN Hao, LEI Zhendong, et al. Development Path and Strategy of Xi'an-Xianyang Urban-rural Integration Pilot Area[J]. Planners, 2021, 37(09): 61-67.

彭建兵,苏生瑞,张骏.渭河盆地活动断裂与地质灾害[M].西安:西北大学出版社,1992.

彭建兵,范文,李喜安,等.汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J].工程地质学报,2007,(04):433-440.

PENG Jianbing, FAN Wen, LI Xi'an, et al. Some Key Questions in the Formation of Ground Fissures in the Fen-Wei Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, (04): 433-440.

王亚辉,张茂省,师云超,等.基于综合物探的城市地下空间探测与建模[J].西北地质,2019,52(02):83-94.

WANG Yahui, ZHANG Maosheng, SHI Yunchao, et al. Precise Detection and Modeling of Urban Underground Space Based on Integrated Geophysical Exploration[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(02): 83-94.

张家明.西安地裂缝研究[M].西安:西北大学出版社,1990,68-88.

张茂省,董英,刘江,等.关中平原城市地质[M].北京:科学出版社,2021.

张茂省,董英,刘洁.论新型城镇化中的城市地质工作[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(05):581-587.

ZHANG Maosheng, DONG Ying, LIU Jie. Discussion of urban geological work in new urbanization[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(05): 581-587.

张茂省,董英,张新社,等.地面沉降预测及其风险防控对策——以大西安西咸新区为例[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(04):115-118+126.

ZHANG Maosheng, DONG Ying, ZHANG Xinshe, et al. Prediction of land subsidence and its mitigation methods: a case study in the new urban district of Xi'an-Xianyang[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(04): 115-118+126.

张茂省,王化齐,王尧,等.中国城市地质调查进展与展望[J].西北地质,2018,51(04):1-9.

ZHANG Maosheng, WANG Huaqi, DONG Ying, et al. Progress and Prospect of Urban Geological Survey in China[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(04): 1-9.