

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019034

引用格式: 周丹坤, 李晓昭, 马岩, 葛伟亚. 2020. 城市地下多种地质资源开发的相互影响模式研究[J]. 高校地质学报, 26(2): 231-240

城市地下多种地质资源开发的相互影响模式研究

周丹坤¹, 李晓昭^{1,2*}, 马岩², 葛伟亚³

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;
2. 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037;
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016

摘要: 城市地下普遍蕴藏着地下空间、地下水、浅层地热能 and 地质材料 4 种地质资源。它们共生共存于同一地质环境系统中, 彼此之间相互联系, 一种资源的开发可能会对其它资源的开发潜力产生显著影响。为充分发挥地下各种资源对城市可持续发展的支撑作用, 减少资源开发之间的冲突, 城市地下开发的观念需要从片面的满足“一时一己”之需的单一资源开发转变为全局的多资源兼顾的协同开发。本文通过国内外文献调研, 识别和概化出了 9 种城市地下开发过程中地质资源相互影响的典型模式, 总结出其相互影响具有互馈性、连锁性和动态变化性的特征, 并列举了一些多种地质资源协同开发的典型案例, 以期在城市地下开发效益的最大化提供支撑。

关键词: 多种地质资源; 相互影响; 地下空间; 可持续开发

中图分类号: P66; X14

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2020) 02-231-10

Study on the Impact Patterns of Multiple Geological Resources during Urban Underground Development

ZHOU Dankun¹, LI Xiaozhao^{1,2*}, MA Yan², GE Weiya³

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. Sino Probe Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
3. Nanjing Center of China Geology Survey, Nanjing 210016, China

Abstract: Urban underground generally contains 4 geological resources: underground space, groundwater, shallow geothermal energy and geological materials. They coexist in a geological environment system and are interconnected with each other. The development of one resource may have a significant impact on the development potential of other resources. In order to make full use of various underground resources for urban sustainable development and reduce the conflict between resource utilization, the development mode of urban underground resources needs to change from one-sided development that only for a certain resource to collaborative development that considers all resources comprehensively. Based on the literature review, this paper identifies 9 typical impact patterns between the 4 geological resources mentioned above, concluded that the influence between multiple resources has the characteristics of mutual feedback, chain reaction and dynamic change, and lists some typical cases of collaborative development of multiple geological resources, expected to provide support for maximizing the benefits of urban underground development.

Key words: multiple geological resources; mutual influence; underground space; sustainable development

Corresponding author: LI Xiaozhao, Professor; E-mail: lixz@nju.edu.cn

收稿日期: 2019-04-21; 修回日期: 2019-07-08

基金项目: 国家国际科技合作专项 (2009DFA22680); 中国地质调查局项目 (DD20160245) 联合资助

作者简介: 周丹坤, 男, 1990年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业; E-mail: zhoudankun@smail.nju.edu.cn

*通讯作者: 李晓昭, 男, 1968年生, 博士, 教授, 主要从事地下空间与地质环境、岩石裂隙系统与特性等方面的研究; E-mail: lixz@nju.edu.cn

1 引言

通过开发利用城市下部空间来应对当今城市可持续发展面临的诸多挑战（土地资源供应紧张、环境污染严重和城市综合防灾能力薄弱等）已经成为国内外众多学者的共识（钱七虎，1998；Broere，2016；Bobylyev et al., 2016；王成善等，2019）。从地质资源的视角来看，城市地下普遍存在以下4种资源（Parriaux et al., 2004，2006；Li et al., 2016）：地下水（Groundwater）、地下空间（Geospace）、地热能（Geothermal energy）和地质材料（Geomaterials）（图1）。地下空间可以用来容纳市政管线、停车场、交通隧道等城市基础设施设备；地下水为人们的生产、生活提供必要的水源；地热能作为一种清洁能源可以用作建筑物的供热制冷；由地下开挖产生的地质材料可以作为建筑材料使用。

由于城市地下的多种地质资源共存于同一地质环境系统，彼此之间相互联系，一种资源的开发可能会对其它资源的开发潜力产生显著影响。只着眼于某一资源的开发模式忽视了一体共生的其它资源或只将其视为影响某一资源开发的限制因素，从而导致资源的浪费、资源开发风险和资源开发诱发不良环境效应的问题日益严重。Blunier等（2007，2009）最早以多种资源的视角研究了城市地下地质资源开发之间的相互影响，成果体现在：（1）以矩阵表的形式归纳了城市地下4种地

质资源开发之间的相互影响机制；（2）构建了一个地下空间和地下水开发相互作用的理论模型，将系统动力学的方法引入到地下多种地质资源相互影响的模拟预测中。张忠兴（2012）在随后的研究中构建了一个地下空间和地质材料相互作用的系统动力学模型。总的来看，相关方面的研究尚处于起步探索阶段。本文通过国内外文献的调研，以“模式图+影响机制+典型案例”的形式总结概括了城市地下多种地质资源相互影响的典型模式，并列举了一些多种地质资源协同开发的典型案例，以期为城市地下开发效益的最大化提供支撑。

2 城市地下普遍蕴藏的四种地质资源

2.1 地下空间

地下空间（Geospace，图2）是指蕴藏在地表之下地质体中的天然的或人工开发形成的具有一定体量的空间领域。其价值体现在（童林旭，2004）：（1）在不增加城市地表用地的情况下，增加城市容量，缓解地表土地、空间压力。为城市（基础设施市政、交通、仓储等）提供安置空间；（2）在战争和某些灾害情况下，增加城市韧性。提供应急避难场所，发挥防灾减灾的功效；（3）缓解不良气候环境对城市活动的影响。

2.2 地下水

地下水（Groudwater，见图3）是地表以下储

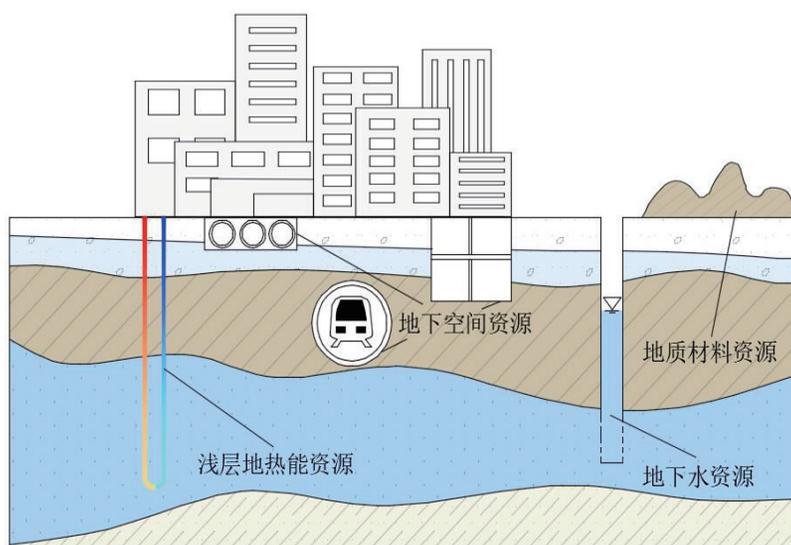


图1 城市地下四种主要的地质资源

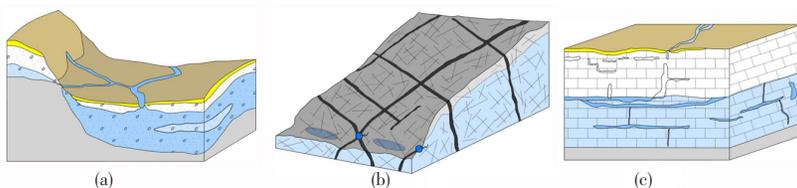
Fig. 1 Four major geological resources in urban underground



(a) 早期人类的洞穴文明; (b) 敦煌莫高窟; (c) 采用盾构技术开拓地下空间; (d) 设想中的新加坡地下科学城^①

图2 地下空间

Fig. 2 Geospace



(a) 松散含水层孔隙水; (b) 基岩裂隙水; (c) 岩溶水

图3 地下水 (据王大纯, 1986)

Fig. 3 Groundwater

存在土体孔隙、岩体裂隙溶穴中的水资源。水是人们赖以生活和从事生产不可缺少的资源。地下水是水资源的重要组成部分。在干旱、半干旱的地区，地下水是主要的、有时甚至是唯一的可用水源（王玉平等，2000）。

2.3 浅层地热能

浅层地热能（Shallow geothermal energy，图4）是指蕴藏在地表以下一定深度范围内（一般为恒温带至200 m埋深）岩土体、地下水和地表水中，在当前技术经济条件下具有开发利用价值的热能，温度一般低于25℃（韩再生等，2007）。通过地源热泵技术可实现建筑物的供暖和制冷，地热能清洁环保可持续，开发利用前景广阔。

2.4 地质材料

地质材料（Geomaterials，图5）是指由于开挖地下而产生的岩土体材料。可直接被利用或经加

工处理后成为工程建设或工业生产所需的材料。常见地质材料的类型及其用途见表1。

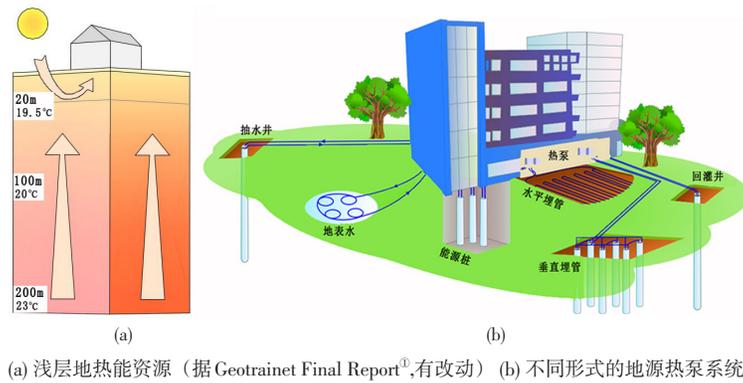
3 多种地质资源相互影响的典型模式

城市地下（200 m以浅）的多种地质资源共生共存于复杂的地质环境系统中，相互联系。某一资源开发往往会对其它资源的开发潜力产生影响。例如，地下空间资源的开发造成地下水流场、水质和水位的改变；地下水资源的开发对浅层地热能利用效率的影响；浅层地热能的利用（埋管式地源热泵）可能对地下空间资源的开发形成阻碍等。按照图6所示的分析思路，通过国内外文献调研，将城市地下多种地质资源相互影响的典型模式概化如下。

3.1 地下水和地下空间的相互影响

地下水和地下空间开发的相互影响主要体现

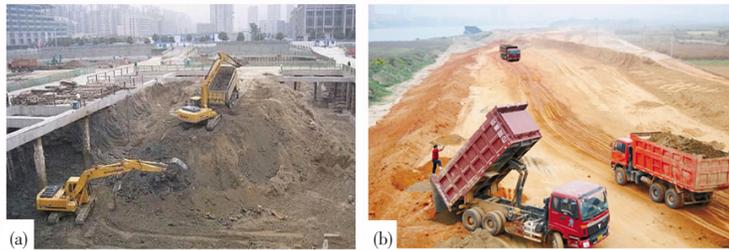
^①图片分别源自以下网络：www.sohu.com/a/121726447_556183；www.ynxiuemeng.com/nj/97957.html；www.sohu.com/a/150432373_825098；theolympians.co/tag/underground-science-city。



(a) 浅层地热能资源 (据 Geotrained Final Report^①,有改动) (b) 不同形式的地源热泵系统^②

图4 浅层地热能

Fig. 4 Shallow geothermal energy



(a) 开挖基坑产生的土体材料; (b) 开挖的土体被用来路基建设^③

图5 地质材料

Fig. 5 Geomaterials

表1 常见地质材料的主要用途 (据 Prikryl et al., 2016)

Table 1 Main uses of common geomaterials (modified after Prikryl et al., 2016)

种类	主要来源	主要用途	
岩体	一般碎石	爆破岩体	路基、铁路道碴、混凝土粗粒填料
	坚硬且完整的岩体	采石场和地下开挖	铺路、建筑装饰、建筑材料、雕塑、纪念碑
	石灰岩、白云岩	采石场	建筑材料、砂浆和混凝土基料、墙面粉饰涂料
土体	一般碎屑沉积物	开挖土体	场地填埋、路基、砂浆和混凝土的填料
	粘土矿物含量高的土	开挖土体	制作模型、加工为砖瓦等传统建材、工艺品、低性能的粘合剂

在：(1) 地下空间的开发可能改变地下水的水位、水量、渗流路径和水质；(2) 地下水向地下空间渗漏甚至涌突；(3) 地下水对地下结构的浮托作用；(4) 具有特殊离子（如Cl⁻和SO₄²⁻）的地下水对地下结构的腐蚀作用。二者之间典型的影响模式

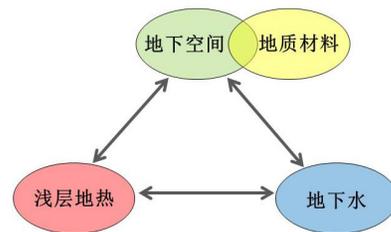


图6 多种资源两两影响的分析思路^④

Fig. 6 Analysis of the influence of multiple resources

见表2。

3.2 地下空间和浅层地热能的相互影响

地下空间和浅层地热能开发的相互影响主要体现在：(1) 利用埋管式地源热泵系统开发浅层地热能 and 空间资源的开发在空间位置上的冲突；(2) 布设在地下结构中的换热器所产生的热应力是否会影响地下结构的稳定性；(3) 地下空间的开发可能对地下水造成影响，浅层地热能的利用

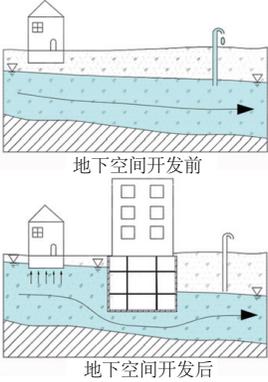
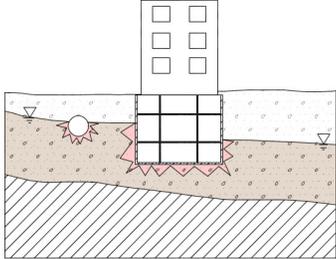
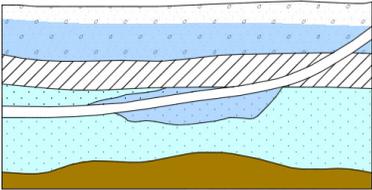
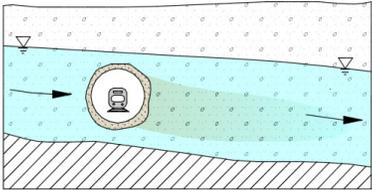
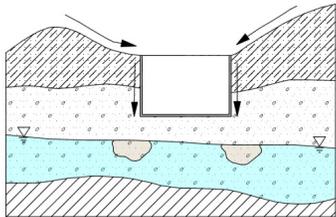
① Geotrained Final Report-SETIS, <https://setis.ec.europa.eu/energy-research/sites/default/files/project/docs/GEOTRAINNET%20PUBLICATION%20MODIF3.pdf>

② 图片源自网络：www.green-buildings.com/articles/geothermal-heat-pump-market-to-grow-15-29-by-2019.

③ 图片分别源自网络：www.sohu.com/a/259957794_642221；kknews.cc/news/263eba9.html.

④ 由于地质材料和地下空间的伴生性，地质材料资源同其它资源开发的相互影响可参考地下空间资源同其它资源开发的相互影响。

表2 地下水和地下空间的典型影响模式
Table 2 Typical impact patterns between groundwater and geospace

模式1			
影响机制	典型案例		
 <p>地下空间开发前</p> <p>地下空间开发后</p>	<p>地下空间形成的“阻塞效应”导致地下水水位改变和渗流路径变化</p>	<p>西班牙巴塞罗那,某地铁线路两侧水位监测并观测到地铁建设前后的地下水位变化情况:迎水面地下水位抬升,背水面地下水位下降(Pujades et al., 2012)</p>	
	<p>地下水位的抬升威胁地下空间结构(尤其是先前未考虑抗浮和防渗措施的地下结构)的稳定和安全</p>	<p>1995~1997年,北京官厅水库放水导致西客站附近地下水位普遍回升5~6 m,造成京门大厦地下室局部开裂(王军辉等, 2011)</p>	
	<p>地下水位的下降影响地下水源的供水。地下水位的持续下降可能诱发地层的沉降变形,继而威胁地下空间结构的稳定和安全</p>	<p>北京地铁1号线自1969年开始运营后相当长的时间内,区域地下水持续下降,造成局部站点地面开裂破坏(李晓松等, 2007)</p>	
模式2			
	<p>影响机制:具有特殊离子(如Cl⁻和SO₄²⁻)的地下水对地下结构的腐蚀</p>	<p>典型案例:阿拉伯海湾地区的许多地下混凝土结构遭到严重侵蚀,其主要原因是土壤和地下水含有高浓度的氯离子和硫酸盐,导致钢筋锈蚀和混凝土膨胀开裂(Dakhil and Al-Gahtani, 1985)</p>	
	<p>典型案例:通过观察河北省衡水市某场地止水不良孔及其周边观测井内水质变化情况发现:原本水力联系微弱的相邻含水层通过止水不良孔发生了越流,上层咸水在水头差作用下沿井管下移,经滤水管进入淡水层,导致下层淡水迅速咸化(李敏敏等, 2016)</p>		
模式3			
	<p>影响机制:地下空间的开发破坏了隔水层,导致不同含水层之间产生“串层效应”</p>	<p>典型案例:通过观察河北省衡水市某场地止水不良孔及其周边观测井内水质变化情况发现:原本水力联系微弱的相邻含水层通过止水不良孔发生了越流,上层咸水在水头差作用下沿井管下移,经滤水管进入淡水层,导致下层淡水迅速咸化(李敏敏等, 2016)</p>	
	<p>典型案例:通过对韩国首尔地铁入渗地下水的化学分析表明,隧道施工中的含锰材料经氧化还原反应,导致地下水中溶解锰的浓度显著增加;富含有机质的污水也会导致含铁材料的铁元素溶解,增加地下水中溶解铁的浓度(Chae et al., 2008)</p>		
模式4			
	<p>影响机制:地下结构在建设和运营过程中产生的污染物进入含水层,污染地下水</p>	<p>典型案例:通过对韩国首尔地铁入渗地下水的化学分析表明,隧道施工中的含锰材料经氧化还原反应,导致地下水中溶解锰的浓度显著增加;富含有机质的污水也会导致含铁材料的铁元素溶解,增加地下水中溶解铁的浓度(Chae et al., 2008)</p>	
	<p>影响机制:地下空间穿透表层土体,形成优势渗流路径。未经表层土体过滤作用的地表水进入下部含水层,污染地下水源</p>		
模式5			
	<p>影响机制:地下空间穿透表层土体,形成优势渗流路径。未经表层土体过滤作用的地表水进入下部含水层,污染地下水源</p>		

效果又和地下水的动态息息相关（开式的地源热泵系统以地下水为换热介质），因此地下空间和浅层地热能还存在以地下水为中间媒介的间接影响。二者之间典型的影响模式见表3。

3.3 浅层地热能 and 地下水的相互影响

浅层地热能 and 地下水开发的相互影响主要体现在：（1）地下水的动态变化影响浅层地热能的利用效率；（2）浅层地热能的利用可能引起地下水水位、水质、渗流路径的改变，并造成地下水的污染。二者之间典型的影响模式见表4。

4 多种地质资源相互影响的特征

通过上述分析，不难看出城市地下多种地质资源开发之间的影响具有以下特征：

（1）互馈性。城市地下某一资源与其它资源的影响往往不是单向的，而是互馈的（图7）。

（2）连锁性。城市地下某一资源的开发对其它资源造成的影响往往不只局限于两两资源之间，而是“牵一发而动全身”的连锁反应（图8）。

（3）动态变化性。城市地下多种资源开发的影响不是固定的，而是随着时间的积累、条件的改变（尤其是地下水的动态变化）而不断

变化的。

发生在欧洲许多城市的现象就很典型（图9）：城市化的早期，城市的发展依靠前靠浅层含水层提供地下水资源，取用浅层地下水资源导致了地下水位的下降。一些地下基础设施兴建在介于当时的地下水位之上和初始地下水位之下的位置。伴随着城市化进程的继续，受污染的地表水和地下设施泄露等影响，之前被用作水源的含水层受到污染，不得不从城市中心转移到城市周边。结果城市中心的地下水位由于不再抽水而水位回升，导致一些地下基础设施被地下水淹没（Blunier et al., 2007）。巴塞罗纳的地铁维护每年因此需要抽排掉 $1200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水（Morris, 1997）。

5 多种地质资源的协同开发

由于城市地下的多种资源一体共生，它们之间相互影响（甚至冲突）。也正是由于多种资源一体共生，为它们的协同开发提供了可能。现将国内外一些多种资源协同开发的案例整理如下。

5.1 能源地下结构—地下空间和浅层地热能的协同开发

能源地下结构（Energy Geostructures）是把开发浅层地热能所使用的换热器同地下工程的部分

表3 地下空间和浅层地热能的典型影响模式

Table 3 Typical impact patterns between geospace and shallow geothermal energy

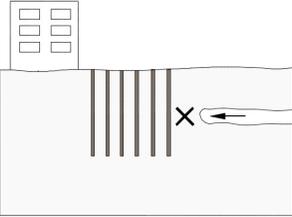
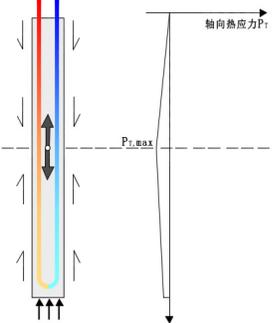
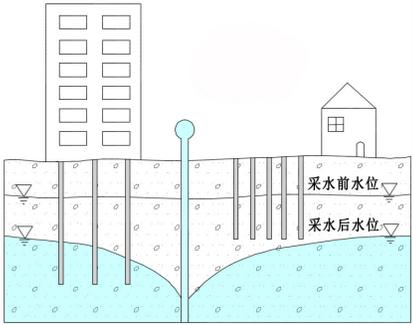
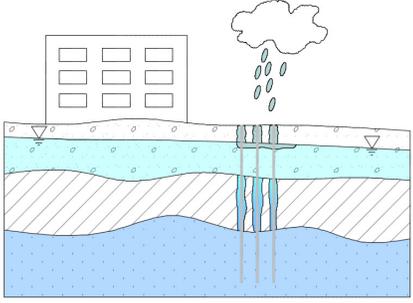
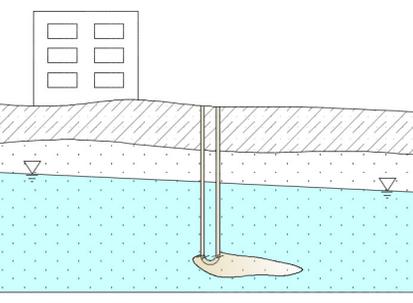
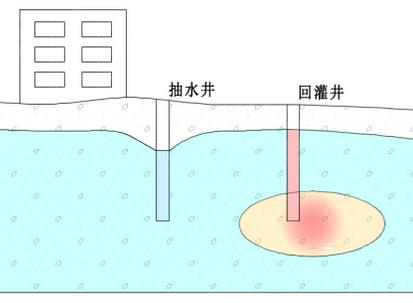
模式1	
	<p>影响机制：埋管式地源热泵系统阻碍了地下空间的开发，已存在的地下空间也会阻碍埋管式地源热泵系统的开发</p>
模式2	
	<p>影响机制：利用桩基提取地温能，桩体由于热胀冷缩作用会产生热应力和热应变，进而影响桩土之间的摩擦力。能源桩可能诱发周围土体温度升高，导致土体蠕变速率增加</p> <p>典型案例：Akrouch等通过模拟某能源桩在极端案例条件下（仅采用制冷工况）运行50年后，发现其产生的位移总量是普通桩的2.35倍（Akrouch et al., 2014）</p>

表4 浅层地热能和地下水的典型影响模式
Table 4 Typical impact patterns between shallow geothermal energy and groundwater

模式1	
	<p>影响机制: 饱水的地质体要比非饱水地质体的热传导性高, 地下水位和渗流速度的变化影响浅层地热能的利用效率</p> <p>典型案例: 当含水层厚度是地下换热器长度10%左右时, 地下水的流速对换热器的热通量具有极大影响; 若地下水流速不低于10^{-4} m/s, 地下换热器的热通量要比没有含水层的情况下高出约60% (Funabiki et al., 2014); 陆观立(2009)通过对单个换热孔的数值模拟发现, 当地下水渗流速度分别为0.1 m/d、0.5 m/d、1 m/d、5 m/d、10 m/d时, 传热热阻分别为0.298 k/w、0.211 k/w、0.183 k/w、0.142 k/w、0.133 k/w。地下水的渗流速度越大, 土体换热的热阻越小, 换热孔的换热效率越高</p>
模式2	
	<p>影响机制: 埋管式地源热泵系统可能会沟通地面和地下或地下不同含水层, 产生新的入渗和渗流路径, 造成地下水的污染和串层效应</p>
模式3	
	<p>影响机制: 埋管式地源热泵系统可能因管道损坏导致含有污染物的换热流体外泄, 从而污染地下水</p> <p>典型案例: Klotzbücher等(2007)指出, 随着安装的热泵机组数量的增加, 热交换器中的换热流体泄漏到地下含水层的风险预计将来也会增加。添加了生物和腐蚀抑制剂等成分的防冻液, 其泄露会对地下水中的微生物成分造成影响并抑制防冻液的分解</p>
模式4	
	<p>影响机制: 抽水井水位降低, 回灌井水位升高; 此外地下水温度的变化会影响地下水的水质</p> <p>典型案例: 地源热泵在夏季制冷工况下, 会导致换热器周边地下水的温度升高, 从而加速地下水中细菌的生长, 增加水的硬度、水中某些离子(如SO_4^{2-})的浓度; 在冬季供暖工况下, 会导致换热器周边地下水的温度降低, 增加去除地下水含氮有机污染物的难度 (Zhu et al., 2017)</p>

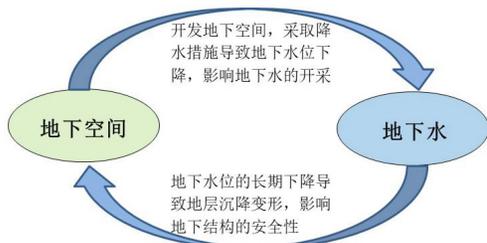


图7 地下空间和地下水开发的互馈影响

Fig. 7 Feedback effects of groundwater and geospace

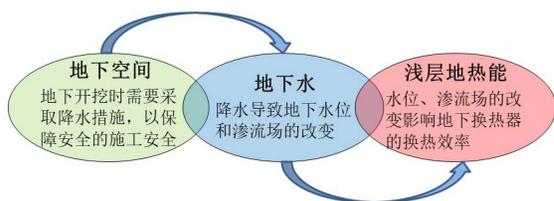


图8 开发地下空间产生的连锁反应

Fig. 8 Chain reaction caused by the development of geospace

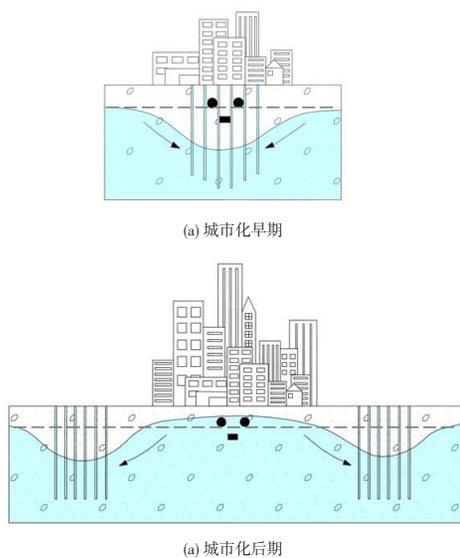


图9 城市化不同阶段地下水的动态变化

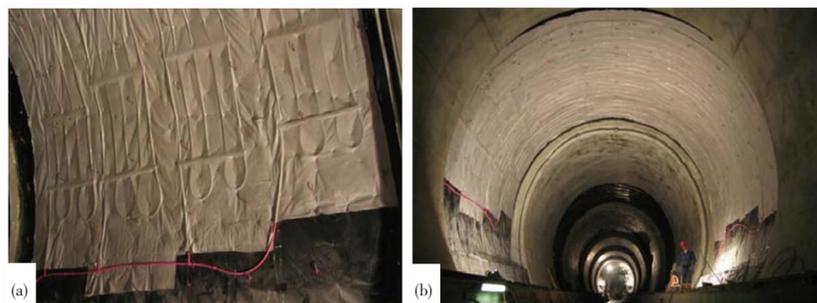
Fig. 9 Dynamic of groundwater in different stages of urbanization

结构（如基坑围护墙、桩基、隧道衬砌等）相结合的一种建筑节能技术（夏才初等，2009）。在地下结构施工的同时安装换热回路系统，不需要再为置放换热器开展额外的开挖工程，减少了地源热泵的初期投资且节约了空间资源。

位于奥地利维也纳的Lainzer隧道，在LT22段的施工过程中，把换热回路附着在土工布上置于隧道的两层衬砌之间（图10）。这种能源土工布可预制且易于安装，随后被应用于维也纳多个重大地下设施建设中，既不影响地下空间的正常使用，又可为邻近建筑物供暖制冷，实现了地下空间和浅层地热能的协同开发。

5.2 地下空间和地质材料的协同开发

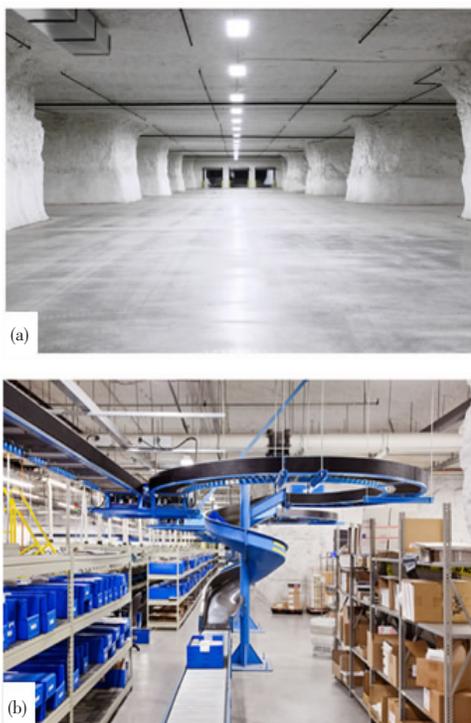
地下空间与地质材料的开发具有天然的协同性。开挖地质材料形成地下空间，开挖地下空间产生地质材料。英格兰正在开展的Crossrail铁路工程，将在城市地下新建长达21 km的双隧道。这些隧道将从Paddington延伸到东部的Stratford和Canary Wharf。它将缓解东西方向上地铁线路（如Central and District线、Jubilee延长线、Piccadilly线中的Heathrow支线）的压力。同时，整个工程预计将开挖出700万吨地质材料，98%的地质材料将被回收利用，为伦敦及其东南部的自然保护区、娱乐设施、农业和工业用地带来新的生机。美国Missouri州的Kansas城，从19世纪后期开始开采这里的地质资源—灰岩，并遗留下废弃的矿井。到了20世纪50年代，矿业公司不再一味地只顾开挖岩体，而是在开采灰岩的同时，兼顾将采空区转变为将来可被利用的地下空间（图11）。开挖出的灰岩用于建筑物、道路的建设，以及玻璃、油漆、牙膏等化工产品的制作；开挖后的空间用于仓储，建



(a) 安装在隧道围护结构上的能源土工布；(b) Lainzer 隧道LT22段的能源地下结构

图10 能源地下结构（引自 Adam et al., 2009）

Fig. 10 Energy geostuctures (after Adam et al., 2009)



(a) 整饰后的灰岩采空区；(b) 发挥仓储功能的灰岩采空区^①

图 11 Kansas 城开发灰岩所形成的地下空间

Fig. 11 Geospace formed by the development of limestone in Kansas city

造商业和工业园区^②。如此一来，不仅不需要为采空区的处置投入额外的花费，而且将其转变为颇具价值的空间资源，实现了地质材料和地下空间开发双赢的局面。

5.3 水煤共采—地质材料和地下水的协同开发

国内某矿集团下组煤的开采普遍受到煤层底部奥陶系灰岩岩溶水的威胁，通过疏降水压保障安全开采是企业面临的重大课题。与此同时，集团下属的某煤化工公司正在快速发展，规划预计日需水量约 $8 \times 10^4 \text{t}$ 。为解决煤化工产业对水资源的巨大需求，该公司在周边 20 km 范围内寻求水源地，但大多为松散层供水水源地。采用松散层供水具有供水水量难保证、对附近煤矿立井井壁稳定性构成潜在威胁、对浅层农业和生活用水及生态环境产生较大影响等隐患。通过一定的调控措施和技术手段后，将矿井降压疏水的水源供给煤化工项目，既治理了矿井水害，又为煤化工项目提供了水

源，实现了地质材料和地下水的协同开发 (Qiao et al., 2020)。

6 结论和展望

6.1 结论

本文在简要介绍城市地下 4 种地质资源属性的基础上，识别并概化了城市多种地质资源相互影响的典型模式和特征，并列举了一些多种地质资源协同开发的案例，形成的主要结论如下：

(1) 城市地下多种地质资源开发的相互影响可以被概化为 9 种典型模式：①地下空间的开发可能改变地下水的水位、水量、渗流路径和水质；②地下水向地下空间渗漏甚至涌突；③地下水对地下结构具有浮托作用；④具有特殊离子的地下水对地下结构的腐蚀作用；⑤利用埋管式地源热泵系统开发浅层地热能和地下空间资源的开发在空间位置上的冲突；⑥布设在地下结构中的换热器所产生的热应力可能会影响地下结构的稳定性；⑦地下空间和浅层地热能（开式的地源热泵系统以地下水为换热介质）存在以地下水为中间媒介的间接影响；⑧地下水的动态变化影响浅层地热能的利用效率；⑨浅层地热能的利用可能引起地下水水位、水质、渗流路径的改变，并造成地下水的污染。

(2) 城市地下多种地质资源开发的影响具有互馈性、连锁性和动态变化性的特征。

(3) 城市地下开发的观念需要从片面的满足“一时一己”之需的单一资源开发转变为全局的多资源兼顾的协同开发，从而实现城市地下多种地质资源的高效利用。

6.2 展望

对城市地下开发的决策者而言，不仅需要认识到地下多种地质资源相互影响的一般模式是怎样的，更为重要的，需要对资源开发相互影响的程度及其动态演化做出合理的预测，以便预先采取必要的调控措施。下一步研究中可选取典型城市，在充分查明区域地质条件的基础上，采用现场实验和数值模拟等手段，探索在特定地质结构下多种地质资源开发相互影响的分析方法，进而

①图片分别源自网络：www.acuus.org/index.php/2-home/60-news-november-2014；16sparrows.typepad.com/letterwritersalliance/2015/03/journey-to-subtrop-olis.html。

②资料源自网络：www.progressiveengineer.com/features/businessunderground.htm。

提出多种地质资源协同开发利用的对策建议。

参考文献 (References) :

- 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等. 2007. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 34(6): 1115-1121.
- 陆观立. 2009. 地下水渗流对土壤源热泵埋管换热特性影响研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- 李敏敏, 成建梅, 李莎, 等. 2016. 止水不良孔导致地下水串层污染的机制研究——以衡水某试验孔为例[J]. 水资源保护, 32(3): 14-18.
- 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.
- 钱七虎. 1998. 城市可持续发展与地下空间开发利用[J]. 地下空间与工程学报, 18(2): 69-74.
- 童林旭. 2004. 地下空间概论(一)[J]. 地下空间与工程学报, 24(1): 133-136.
- 王成善, 周成虎, 彭建兵, 等. 2019. 论新时代我国城市地下空间高质量开发和可持续利用[J]. 地学前缘, 26(3): 1-8.
- 王大纯. 1986. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社.
- 王军辉, 韩焯, 周宏磊, 等. 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): 50-54.
- 王玉平, 金晓媚, 刘金武. 2000. 中国地下水资源合理开发利用研究[J]. 河北地质大学学报, 7(2): 199-210.
- 张忠兴. 2012. 城市地下资源开发的相互影响及其系统动力学研究[D]. 南京: 南京大学.
- 夏才初, 曹诗定, 王伟. 2009. 能源地下工程的概念、应用与前景展望[J]. 地下空间与工程学报, 5(3): 419-424.
- 张忠兴. 2012. 城市地下资源开发的相互影响及其系统动力学研究[D]. 南京: 南京大学.
- Adam D and Markiewicz R. 2009. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers [J]. Géotechnique, 59(3): 229-236.
- Akrouch G A, Sánchez M and Briaud J L. 2014. Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays [J]. Acta Geotechnica, 9(3): 399-412.
- Blunier P, Tacher L and Parriaux A. 2007. Systemic approach of urban underground resources exploitation [C]// 11th ACUUS conference. Athens.
- Blunier P. 2009. Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain [D]. EPFL.
- Bobylev N and Sterling R. 2016. Urban underground space: A growing imperative: Perspectives and current research in planning and design for underground space use [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 1-4.
- Broere W. 2016. Urban underground space: Solving the problems of today's cities [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 245-248.
- Chae G T, Yun S T, Choi B Y, et al. 2008. Hydrochemistry of urban groundwater, Seoul, Korea: The impact of subway tunnels on groundwater quality [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 101(1-4): 42-52.
- Dakhil F H and Al-Gahtani A S. 1985. Corrosion of reinforcement in concrete structures in the Middle East [J]. Concrete International, 7(9): 48-55.
- Funabiki A, Oguma M, Yabuki T, et al. 2014. The effects of groundwater flow on vertical-borehole ground source heat pump systems [C]// ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. American Society of Mechanical Engineers.
- Klotzbücher T, Kappler A, Straub K L, et al. 2007. Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers [J]. Geothermics, 36(4): 348-361.
- Li X, Li C, Parriaux A, et al. 2016. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 59-66.
- Morris B L. 1997. Sustainable groundwater management for fast-growing cities: mission achievable or mission impossible? Problems, processes and management [C]// XXVII Congress of the International Association of Hydrogeologists: 55-66.
- Parriaux A, Tacher L, Kaufmann V, et al. 2006. Underground resources and sustainable development in urban areas [C]// International Association for Engineering Geology and the Environment. The Geological Society of London.
- Parriaux A, Tacher L, Kaufmann V, et al. 2006. Underground resources and sustainable development in urban areas [C]. International Association for Engineering Geology and the Environment, The Geological Society of London.
- Přikryl R, Török Á, Theodoridou M, et al. 2016. Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society [J]. Geological Society, London, Special Publications, 416(1): 1-22.
- Pujades E, López A, Carrera J, et al. 2012. Barrier effect of underground structures on aquifers [J]. Engineering geology, 145: 41-49.
- Qiao W, Howard K, Li W, et al. 2020. Coordinated exploitation of both coal and deep groundwater resources [J]. Environmental Earth Sciences, 79(1): 1-18.
- Vázquez S E. 2003. Urban groundwater. Barcelona City case study [D]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Zhu K, Fang L, Diao N, et al. 2017. Potential underground environmental risk caused by GSHP systems [C]. Procedia Engineering, 205: 1477-1483.