

地下空间资源 开发利用地质评价

徐军祥 秦品瑞 徐秋晓 吴立进 等著

地质出版社

矿产勘查开发局 资助
地质工程研究中心

地下空间资源开发利用地质评价

徐军祥 秦品瑞 徐秋晓 吴立进
乔令海 邹祖光 袁西龙 杨启俭 著
杨亚宾 焦玉国 刘传娥 张慧

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统研究了地下空间资源开发利用地质环境要素及其相互关系,建立了地下工程类地下空间开发地质环境评价体系和方法,提出了地质储存类、地质旅游类地下空间评价思路方法并给出了实用实例,选取山东省5个典型城市进行了地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价等,具有较高的学术意义和实际应用价值。

本书可供从事水文地质、工程地质、环境地质勘查、岩土工程勘察施工、城乡规划和国土资源、城市建设管理等工作的专业人员参考借鉴,也可供相关领域教学、科研及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下空间资源开发利用地质评价 / 徐军祥等著. —
北京:地质出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-116-09189-4

I. ①地… II. ①徐… III. ①城市空间-地下建筑物
-空间规划-研究 IV. ①TU984.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第054323号

Dixia Kongjian Ziyuan Kaifa Liyong Dizhi Pingjia

责任编辑:孙亚芸

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010)66554528(邮购部);(010)66554633(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm $\frac{1}{16}$

印 张:17.25

字 数:390千字

版 次:2015年3月北京第1版

印 次:2015年3月北京第1次印刷

定 价:88.00元

书 号:ISBN 978-7-116-09189-4

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

进入 21 世纪以来，全球工业化和城市化进程加快，许多国家城市规模和空间需求快速增长，地面和地上空间开发利用逐渐饱和，土地资源越来越紧张。同时，城市人口膨胀、空间拥挤、交通阻塞、绿地减少、基础设施落后、生化环境恶化、工农业及生活废物的乱排乱放等“城市综合症”在很多国家和地区表现出来。新形势、新情况使得城市在向地面和地上空间发展的同时，也在努力需求向地下空间发展。地下空间的开发利用，可以有效地提高土地利用率、节约土地资源、扩充城市容量、缓解交通压力、完善基础设施、强化城市功能、增加城市绿地、保护人文景观、节约能源、减少环境污染等，已成为人类在有限的地球上扩大生存空间、改善生态环境唯一现实的途径，对人类社会未来发展有着难以估量和不可替代的重要意义，综合利用地下空间是国土资源开发的必由之路。

地下空间的开发利用，以地铁、各种交通隧道、城市给排水、煤气管道、地下商业中心、地下车库等最为常见；利用深层地下地质空间存储危险性或难处理的工业废料、核废料、大型点源排放的 CO_2 气体等也越来越广泛。地下空间是地质环境的一个重要组成部分，地下空间开发与地质环境关系密切。近年来，无论是通常的城市地下空间开发，还是利用深层地下空间进行排污处置，我国的地下空间开发都呈现出加速发展的趋势，但由于地下空间开发中的地质环境管理与保护未能同步跟进，尚存在诸多问题：一方面，地下空间开发中地质环境保护和地质安全方面的专门性法规规章以及配套的技术标准基本处于空白，不能有效规范和引导地下空间开发行为；另一方面，由于城市化发展过快，对地下空间开发的地质环境效应和地质安全认知不足，存在不合理开发现象，引发一系列地质环境问题。因此，研究地下空间资源的地质评价工作是非常重要的。

相比地上空间，地下空间在恒温性、恒湿性、隔热性、遮光性、气密性、隐蔽性、空间性、安全性等诸多方面具有优势。但地下空间的开发利用说起来简单，要做到合理利用则需要经过大量的、长期的工作。作者从地下空间的开发利用方式与地质条件的相互影响关系出发，创造性地将地下空间利用途径分为地下工程

类地下空间、地质存储类地下空间和地质旅游类地下空间三类，并在环境地质学理论指导下，探索相应的评价与评估方法，还给出了评价与评估的实例。这对其他地区开展相似工作提供了很好的范本。

地下空间的地质环境评价研究是一个比较新的领域，国内外研究成果尚不多见。因此，本书在评价体系、评价方法与研究成果上具有一定的创新性与独到性，也具有较强的实用性和可操作性。希望本书的出版能够引起更多方面重视地下空间与地质环境关系的研究，不断丰富地下空间的研究内容，从而推动建立一个全新的学科——地下空间地质学。

国际地质科学联合会环境地学委员会副主席
东亚东南亚地球科学计划协调委员会执行局原局长
中国地质学会环境地质专业委员会副主任委员



2014年6月20日

前 言

当今,我国工业化和城镇化推进中的刚性用地需求不减,未来城市建设用地几乎呈几何式增长。解决建设用地与耕地保护之间的矛盾,一条重要的渠道就是开发利用地下空间资源。实际上,世界上许多发达国家在城镇化和工业化过程中就是以开发利用地下空间来提升城市容量,如此不仅减少了城市用地,而且还缓解了城市地面的交通拥挤与混乱,从而实现一举多得。纽约、巴黎、莫斯科等城市发达的地铁交通,东京、大阪等城市密集的地下街道及完善的配套交通系统,南非利用闭坑矿山地下巷道开发的旅游资源,遍布美国全境的工业废液地下灌注工程等,都成为全球地下空间资源开发利用的典范。我国开发利用地下空间资源起步较早,早在汉代四川自贡地区就有利用地下空间注水开采盐卤的先例。改革开放以来,特别是进入21世纪后,随着工业化、城镇化的快速发展,我国大规模利用地下空间进入一个前所未有的时期,城市高层建筑如雨后春笋般拔地而起,地下商业网点逐渐增多,众多大中城市相继建设地下轨道交通等。在储存类地下空间资源利用方面,重庆、江苏等地利用盐岩溶腔储存工业废液和天然气,大庆油田开展了含氟污水深井回注技术研究,中国地质环境监测院与山东省地矿工程集团公司联合开展了东营杜邦二氧化钛生产厂废液地下灌注地质环境影响评价等。与此同时,地下空间资源开发利用引发的问题接踵而来,特别是不合理施工和运营造成的地面塌陷、地面沉降等,人员伤亡和财产损失屡见报端。此外,一些城市地下空间利用不够科学合理,破坏了城市湿地、水源地和泉水景观等自然生态环境。城市地下空间资源开发利用带来的地质安全 and 环境问题已开始为社会所关注。分析地下空间资源开发引发的地质环境问题形成的原因,涉及规划、施工和管理等多个方面,但其中一个最基础的问题是缺少地下空间资源开发的地质评价这一重要环节。由于地下空间资源规划与开发涉及的地质、水文地质、工程地质、环境地质条件不清,缺少对引发地质灾害地质环境问题的预测评价,没有相应的防治对策和预案,因而带来地下空间资源开发布局不合理、工程施工方案地质依据不充分、工程运营地质安全监测不到位等。对此,一些城市管理者已开始认识到此问题的重要性,城市规划建设部门及专业人士也开始重视城市地下工程的地质安全工作,相关高校和科研院所亦增加了此方面的教学和科研内容。近年来,国土资源部、中国地质调查局和地方国土资源主管部门在部署基础性公益性地质调查工作中,将城市地质结构、稳定性、地下空间资源开发的地质环境适宜性评价等作为城市地质调查的重点。与此同时,地质勘查部门和地质工作者为适应经济社会发展对地质工作的需求,逐步加强了城市地质工作和地下空间资源开发利用地质评价工作,并初步积累了调查评价技术方面的经验。

目前,我国地下空间资源开发利用地质调查评价工作还处在萌芽或起步阶段,缺少相应的法律法规、管理职能不到位及没有相应的技术规范等,是影响此项工作广泛开展的重

要原因。其中,在技术规范方面,还没有成熟和统一的工作程序以及调查工作量投入、精度、手段方法、技术要求等。

近年来,山东省地质矿产勘查开发局及所属地质勘查单位在岩土工程勘察、地质灾害调查与治理、城市地质调查及其他相关地质勘查工作中,初步积累了一些地下空间资源勘查评价方面的经验体会,并在一些城市做了地下空间资源开发利用区域地质环境适宜性评价方面的尝试。本书就是在此基础上,结合当前地下空间资源开发利用地质调查评价的需求而编写完成的。书中论述了地下空间资源的基本概念、分类、国内外开发利用与研究现状和进行地质评价的重要意义;论证了地质环境条件与地下空间资源开发利用的相互关系,提出了工程类地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价体系、方法,选择山东省5个典型城市进行实际应用评价;将工业废液地下灌注列为地质储存地下空间类型,并以山东省东营杜邦二氧化钛建设项目废液地下灌注项目为例,在国内首次进行了地下灌注地质环境影响评价。将地下水库也列为地下空间开发利用的范畴,分析研究了地下水库系统构成、建设条件及运行原理等。此外,还将溶洞划归为旅游类地下空间资源,对其开发条件作出了评价。

本书第1~4章由徐军祥、秦品瑞、徐秋晓、吴立进和乔令海编写,第5章由徐军祥、吴立进等编写,第6章由秦品瑞、徐秋晓、袁西龙、邹祖光、杨亚宾、杨启俭、焦玉国等编写,最后由徐军祥统稿。

本课题研究得到了山东省地质矿产勘查开发局巡视员伊丕厚研究员、副局长侯新文博士,地质勘查处处长姜春永研究员、调研员康凤新博士,山东省地矿工程勘察院院长赵长河、副院长兼总工程师彭玉明等领导与同事的大力支持,山东省鲁北地质工程勘察院、青岛地质工程勘察院、山东省地矿工程集团公司、山东省第七地质矿产勘查院、山东省第五地质矿产勘查院等有关单位提供了许多帮助。对此,一并表示衷心的感谢!

特别需要说明的是,国际地质科学联合会环境地质学委员会副主席、东亚东南亚地球科学计划协调委员会执行局原局长、中国地质学会环境地质专业委员会副主任委员何庆成博士牵头在我国率先开启了工业废液地下灌注地质环境影响评价工作,开辟了国内地下储存类地下空间资源开发利用的新领域,本书直接引用了以何庆成博士为项目组长提交的《山东省东营市杜邦东营二氧化钛生产厂建设项目地质环境影响评价报告》的相关内容,对此,向何庆成博士及其团队表示诚挚的谢意!

此外,本书还引用了许多相关文献资料,恕不能一一列出,在此向这些作者表示衷心的感谢。

本书主要以山东省为例,尝试对区域工程类地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价进行分析研究,以期推动我国地下空间地质勘查工作的发展。由于受所掌握数据资料和研究水平等所限,书中还存在许多不足之处,敬请读者批评指正。

作者
2014年3月

目 录

序	
前 言	
第1章 绪 论	(1)
1.1 地下空间的定义与分类	(1)
1.1.1 地下空间的含义	(1)
1.1.2 地下空间的分类	(1)
1.2 地下空间资源开发利用的战略意义	(2)
1.3 地下空间资源开发利用与研究现状	(4)
1.3.1 地下空间资源开发利用现状	(4)
1.3.2 地下空间资源地质研究现状	(8)
1.3.3 典型城市地下空间开发利用与研究现状	(12)
1.4 研究的必要性	(14)
第2章 地下工程类地下空间资源开发利用地质影响要素	(16)
2.1 地表水体保护与地下空间资源开发利用	(16)
2.1.1 地表水体对地下空间开发的影响	(16)
2.1.2 地下空间开发对地表水体的影响	(17)
2.2 地下水与地下空间资源开发利用	(17)
2.2.1 地下水对地下空间开发的影响	(18)
2.2.2 地下空间开发对地下水的影响	(19)
2.3 工程地质条件与地下空间资源开发利用	(20)
2.3.1 工程地质条件对地下空间开发的影响	(20)
2.3.2 地下空间开发对工程地质条件的影响	(27)
2.4 地质环境条件与地下空间资源开发利用	(28)
2.4.1 地质环境条件对地下空间开发的影响	(28)
2.4.2 地下空间开发对地质环境条件的影响	(30)
2.5 地面及地下空间条件与地下空间资源开发利用	(31)
2.5.1 地面及地下空间条件对地下空间开发的影响	(32)
2.5.2 地下空间开发对已有构筑物的影响	(34)
第3章 地下工程类地下空间地质评价体系与方法	(35)
3.1 地质环境适宜性评价指标体系	(35)
3.1.1 评价指标体系构建的原则和方法	(35)

3.1.2	评价要素集成及指标体系建立	(37)
3.2	地质环境适宜性评价的理论方法	(39)
3.2.1	评价方法与分析模型的选择	(39)
3.2.2	模糊综合评价	(39)
3.2.3	基于 AHP 的地质环境适宜性要素指标权重	(44)
3.2.4	GIS - 模糊综合评价方法	(47)
3.2.5	评估竖向层次及评价流程	(48)
第4章	地质储存类地下空间资源开发地质环境评价	(51)
4.1	工业废液地下储存地质条件研究	(51)
4.1.1	工业废液地下储存地质条件要求	(51)
4.1.2	工业废液地下储存对地质环境影响分析	(52)
4.1.3	工业废液地下储存区层划分与储存量估算	(54)
4.1.4	工业废液地下灌注地质环境评价应用实例	(69)
4.1.5	结论	(80)
4.2	二氧化碳地质储存地质条件研究	(85)
4.2.1	储存机理	(85)
4.2.2	二氧化碳的物化性质	(86)
4.2.3	二氧化碳地质储存对地质条件的要求	(88)
4.2.4	二氧化碳地质储存地下空间类型	(90)
4.2.5	山东省可应用于二氧化碳地质储存的地下空间条件分析	(91)
4.3	地下水库地质条件研究	(93)
4.3.1	地下水库概述	(94)
4.3.2	地下水库建设的基本条件	(95)
4.3.3	地下水库系统构成	(95)
4.3.4	地下水库工程及其运行原理	(96)
4.3.5	地下水库建设现状	(98)
4.3.6	山东省地下水库建设分析	(99)
4.3.7	地下水库勘查评价	(101)
4.4	油气能源地下储存地质条件研究	(119)
4.4.1	地下油库建设基本地质条件分析	(119)
4.4.2	黄岛地下油库建设条件	(120)
第5章	地质旅游类地下空间资源开发利用评价	(121)
5.1	溶洞地下空间资源利用评价	(121)
5.1.1	溶洞形成条件	(122)
5.1.2	我国溶洞发育特征	(124)
5.1.3	山东省溶洞发育特征	(125)
5.1.4	仰天山溶洞	(128)

5.1.5 溶洞地下空间资源开发评价	(132)
5.2 废弃矿井地下空间资源利用评价	(139)
5.2.1 废弃矿井地下空间开发利用模式	(139)
5.2.2 山东省重点废弃矿井及其开发利用现状	(140)
5.2.3 废弃矿井开发利用评价	(141)
第6章 典型城市地下空间资源开发地质环境评价	(143)
6.1 济南市地下空间资源开发地质环境评价	(143)
6.1.1 评价指标体系	(144)
6.1.2 地质环境条件评价	(146)
6.1.3 地下空间资源开发与泉水保护	(163)
6.1.4 地下空间资源评价	(166)
6.2 青岛市地下空间资源开发地质环境评价	(172)
6.2.1 评价指标体系	(174)
6.2.2 地质环境条件评价	(174)
6.2.3 地下空间资源评价	(191)
6.3 德州市地下空间资源开发地质环境评价	(195)
6.3.1 评价指标体系	(196)
6.3.2 地质环境条件评价	(197)
6.3.3 地下空间资源评价	(213)
6.4 临沂市地下空间资源开发地质环境评价	(216)
6.4.1 评价指标体系	(217)
6.4.2 地质环境条件评价	(218)
6.4.3 地下空间资源评价	(239)
6.5 泰安市地下空间资源开发地质环境评价	(245)
6.5.1 评价指标体系	(245)
6.5.2 地质环境条件评价	(246)
6.5.3 地下空间资源评价	(255)
第7章 结 语	(260)
主要参考文献及资料	(263)

第1章 绪 论

1.1 地下空间的定义与分类

1.1.1 地下空间的含义

地下空间概念有两个基本含义：从开发和利用的角度看，地下空间是指地球表面以下的土层或岩层中天然形成或人工开发形成的空间场所；从广义的角度看，地表以下一定范围的岩土体，包括岩土体的密实部分和无岩土体的空间部分，不论其中是否形成可容纳人或物的空间场所，都占据了一定的空间体积，因此地表下一定平面和深度范围内，岩土体占用和包围的空间体量范围是广义的地下空间（童林旭，2009）。

天然形成的地下空间，例如，在碳酸盐岩体中由溶蚀作用而形成的空间，称为天然溶洞；土层或岩层中的空隙，可以储有重力水的空间可称为储水空间。人工开发形成的地下空间包括利用开采后废弃的矿坑、巷道和使用各种技术挖掘形成的空间。

1.1.2 地下空间的分类

地下空间有多种分类方法，根据分类的目的要求和依据，国内外常见的分类方法有以下几种：

1) 按地下空间开发所处的地面位置可以分为城市地下空间和城市以外的其他国土范围内地下空间。

2) 按地下空间的用途可以分为地下交通运输、地下工业用途、地下储存库房、地下生活用房、地下军事工程等。

3) 按地下空间开发深度可以分为浅层地下空间、中层地下空间和深层地下空间等。

4) 按地下空间利用是否容纳人类活动可以分为有人空间和无人空间。

本书主要研究地下空间资源开发利用与地质环境条件之间的关系，考虑到地球岩石圈及其上部土层的存在，为地下空间的形成提供了物质基础，因而地质环境条件决定了地下空间形成的难易程度及开发利用方式。因此，本次研究从地下空间开发利用方式及与地质条件的相互影响关系出发，将地下空间分为地下工程类地下空间、地质储存类地下空间和地质旅游类地下空间，其中前两类为本次研究的主要内容。

地下工程类地下空间：主要是指通过地下建筑物和构筑物等地下工程形成的地下空间，该类地下空间开发需综合考虑地下工程开挖与地质环境条件之间的相互影响关系，包

括工业地下工程、交通地下工程、民用地下工程、仓储地下工程、市政地下工程、军事地下工程等形成的地下空间。该类地下空间一般多在城市规划区范围内,因此城市地下空间是该类地下空间的主体。该类地下空间开发深度一般控制在地下 100m 范围内。以日本为例,目前该类地下空间基本在地下 50m 以内,在软弱土层中地下空间开发深度一般不超过地下 30m 区域,近年来正在研究进一步开发到 100m 的各种问题。所以,当前该类地下空间的评估深度一般选择从地表至地下 100m 以内,其中 0~30m 的浅层范围是重点开发对象。

地质储存类地下空间:主要是利用地下岩土层自身的地质条件进行储存,即利用岩石圈或土层天然的地下空间,该类地下空间开发主要考虑地下岩土层地质条件地下储存的适宜性,包括工业废液地下灌注、二氧化碳地质储存、地下水库、油气能源地下储存等。该类地下空间的开发深度根据不同的储存用途而有所不同,从几米到几千米,如工业废液地下灌注一般开发深度是 800~3200m,而地下水库则由于地下储水层的不同,深度可以是几米,也可以是几十米,甚至可以超过几百米。

地质旅游类地下空间:主要是指以天然形成的或因矿产采掘形成的地下空间为基础,辅以少量的工程施工,形成的具有旅游性质的集地质科普教育、科考探险、休闲观光等多功能于一体的地下空间,如地下岩溶形成的溶洞、采矿形成的地下巷道、地下河、地下廊道、洞穴堆积等。该类地下空间的开发深度根据不同的形成条件而有所不同,一般是从几米到 1000 多米。

1.2 地下空间资源开发利用的战略意义

当代人类社会所面临的最主要问题就是在和平的环境中求得生存和发展。但是世界人口无节制地增加和生活需求无止境地增长与自然条件日益恶化和自然资源枯竭之间的矛盾越来越尖锐。这一矛盾反映在生存空间问题上,表现为日益增多的人口与地球陆地表面空间容纳能力不足的矛盾。在城市发展问题上,则表现为扩大城市空间容量需求与城市土地资源紧缺的矛盾,这种现象可称为生存空间危机(童林旭等,2004)。

为了拓展人类的生存空间,有 3 种可供选择的途径。第一种是宇宙空间。虽然人类对宇宙空间已进行了初步的探索,但由于人类生存所必需的阳光、空气和水在宇宙其他星球上尚未发现,故大量移民是不可能的。第二种是水下空间。海洋面积占地球面积的大部分,海底均为岩石,地下空间的天然蕴藏量很大,但阳光、空气、淡水等供应同样十分困难,在可预见的未来,大量开发海底地下空间也是不可能的。第三种是地下空间。因此,当前和今后相当长时期内,开发陆地地下空间就成为拓展生存空间唯一现实的途径。尽管如此,陆地地下空间作为一种空间资源,蕴藏量仍十分巨大,能为人类开拓大量新的生存空间,被人类视为迄今为止尚未被充分开发利用的宝贵自然资源之一。联合国自然资源委员会于 1981 年 5 月正式把地下空间确定为重要的自然资源,对世界各国的开发利用给予支持;1991 年城市地下空间国际学术会议通过《东京宣言》提出,“地下空间资源是城市建设新型国土资源,21 世纪是人类开发利用地下空间的世纪”。

地下工程类地下空间资源开发利用,其主体就是城市地下空间的开发利用。中国工程

院钱七虎院士指出,在城市化进程加快的今天,城市地下空间开发利用已经成为提高城市容量、缓解城市交通、改善城市环境的重要手段,正在成为建设资源节约型、环境友好型城市的重要保证,是有效的防护空间和潜力巨大的城市后备空间资源,是实现城市建筑空间环境可持续发展的有效途径之一,具有十分重大的意义。

目前,随着经济的发展,我国不少城市用地紧张,城区面积急剧扩张,地价急剧攀升,城市的生存空间环境日趋恶劣,交通拥挤、能源缺乏、水资源污染等矛盾层出不穷,要解决以上诸多问题,走城市可持续发展的道路,必然要求进行大规模城市地下空间开发与利用。城市地下空间蕴藏着丰富的发展能量和广阔的发展前景,它将使城市空间开发实现从二维到三维的转变。自20世纪50年代以来,工业发达国家城市建设的实践表明,有序高效、综合合理地开发利用城市地下空间资源,是城市现代化改造与建设中解决中心城区高密度疏解、缓解城市用地矛盾、扩充基础设施容量、达到人车立体分流、提高城市综合防灾减灾能力、寻求人文景观与自然环境的均衡与统一、减少环境污染、节约土地资源等诸多问题中最为有效的内涵式发展途径之一,也为进一步建设现代化城市开辟了三维形态的广阔空间。

从国家战略来看,随着新型城镇化进程的加快,土地资源尤其是建设用地趋紧已成为制约城市发展的根本因素,目前,国内城市人均地下空间占有面积不足 1m^2 ,而发达国家已达 10m^2 (赵翔等,2013),因此,为解决土地资源稀缺带来的系列问题,合理开发利用地下空间已成为我国的基本国策。

我国工业化进程正处在接近中期阶段,大规模经济建设正如火如荼,工业废液、二氧化碳和重要资源地下储存有着广阔的发展空间。

地下灌注是一种将液体废弃物排放到隔离的地层中,使之储存在地壳的特定地方,而不受通常地下水力循环影响的废水处理技术。此技术始于1930年,最初用于油田作业,当时人们利用“衰竭的油层”处理的是由开采作业产生的油田盐水和其他液体废料,但随着发展此技术的应用范围越来越广,不再局限于油田,并开始涉及化工、农药、造纸、医药、汽车废水处理等其他方面。应用此技术不仅能有效缓解地表环境介质的压力,而且能使污染物远离生物圈的物质循环,从而减少废水外排对环境造成的影响,且通过经济效益分析,该处理方法比任何其他处理方式都节省费用。过去几十年的实践证明:地下灌注具有安全性和可持续性。只要地质条件符合,用它处置特定废物具有环境优势。因此,工业废液地下灌注是未来地下空间开发利用的一个重要方面,对开启第四环境容量,缓解地面环境压力有着重要作用。我国正处于经济的高速发展期,经济发展与生态环境保护的矛盾已经成为人们日益关注的热点问题,地面及大气中容纳污染物的容量在许多地方已经达到极限,地下灌注技术的应用将为工业污染物的处理开辟容量巨大的地下新空间,能够为国家节能减排和可持续发展提供战略性方案选择和储备(李强等,2007)。

二氧化碳地质储存是指将二氧化碳从工业或相关能源的集中排放源中分离捕获,注入地下深部适宜地层中,通过物理、化学等作用储存于地下,长期与大气隔绝的过程。这一减少二氧化碳排放的技术已成为当今国际社会公认的关键技术之一,受到各国政府的高度重视。我国能源结构以煤炭为主,随着经济的发展,我国已超越美国成为全球最大的温室气体排放国(此结论源自国际能源机构《2009世界能源主要统计》)。在全球变暖的情况下,我国在国际气候谈判中的压力越来越大,因此,针对我国长期以来对以煤炭为主的化

石燃料经济情况，需要采用适合我国国情的二氧化碳减排技术，碳捕获和储存技术（CCS）的应用有望对我国二氧化碳减排做出巨大贡献，其中二氧化碳的储存，又是非常重要的环节（李晓飞等，2010）。国土资源部副部长汪民在国土资源系统应对全球气候变化和节能减排工作高层论坛上表示，我国具有储存二氧化碳的良好地质条件和巨大的储存潜力，积极探索二氧化碳地质储存技术，对于二氧化碳减排具有重要的意义。

地下水库是指修建于地下并以含水层为调蓄空间的蓄水实体。它在取水、用水和调节水资源方面与地表水库具有相似的功能，目前还没有严格和通用的定义。地下水库可以在丰水期将多余的地表水储存在其中，供干旱缺水时期大量取用，同时可腾出地下库容，为下一个丰水期储水提供空间条件，以周期性补给—开采的运行方式调节水资源供需的时空矛盾（杜新强等，2005）。

与地表水库相比，地下水库具有如下特点：蒸发损失小，提高了蓄水的有效利用率；不占土地资源、不动迁、不筑高坝、建库投资少，运行安全；无淹没、淤积及次生盐渍化等问题，相应的环境负效应小；与地表水体、河流、水库等联合运用，可以有效进行水资源的统一规划；由于含水层的过滤作用，水质良好，不易污染，但污染后难于治理。

地下水库将水蓄存在地下岩土的空隙中，可以避免因修建地表水库引起的负效应，还可以多方面改善生态环境。例如，通过人工补给含水层抬升地下水位，可以消减因地下水超采形成的降落漏斗，缓解地面沉降，减少由于抽水引起不均匀沉降而导致的地裂缝，阻止海水入侵，恢复湿地面积，缓解土地荒漠化、沙漠化等。总之，合理利用地下水库，对含水层有计划的补给与回采，实现含水层的可持续利用，有效改善生态环境等具有重要作用及意义。

能源战略储备对于国民经济安全具有至关重要的意义，充足的石油储备是保证国家政治稳定和经济正常运行的重要保证。能源（石油、天然气）的储存方式有陆上储罐、海上储罐和地下储存等几种方式。相对于地上储存，地下能源库不易被发现和破坏，易于保卫，是一种平时和战时都安全、稳妥的储存方式，被称为“高度战略安全的储库”。地下储存有岩体（一般为花岗岩）中水封储存和岩盐中溶腔储存的方式，储存方式由地质条件决定，前者被北欧诸国采用，后者广泛应用于美国、德国、法国、俄罗斯、墨西哥、加拿大等（钱七虎，2003）。

1.3 地下空间资源开发利用与研究现状

1.3.1 地下空间资源开发利用现状

人类对地下空间的利用，经历了一个从自发到自觉的漫长过程，推动这一过程的，一是人类自身的发展，如人口的繁衍和智能的提高；二是社会生产力的发展和科学技术的进步。

在史前时期，我们的祖先就利用天然的洞穴作为栖身之所。如在北京周口店村龙骨山发现的北京猿人头骨和使用火的遗迹，说明距今 50 余万年前的原始人类曾居住在自然条

件比较好的天然岩洞中。黄土地区的窑洞很早就是祖先的栖息之地，一直延续到现在。几千年前西安的半坡遗址，就是开凿洞穴作为居住场所的例证。在日本也发现有2万~3万年前的古人类居住洞穴，如帝释峡洞窟群、圣岳钟乳洞等。在欧洲、美洲、西亚、中东、北非等地，也相继发现了一些人类穴居的遗迹。

人类到地面上居住以后，除个别地区仍沿袭了穴居的传统外，开始把地下空间用于满足居住以外的多种需求，如采矿、储存物资、水的输送及人故去后的埋葬等（王一鸣，2005）。公元前208年建成的我国秦始皇陵，虽然目前还没全部发掘出来，但其可能是我国历史上最大的地下陵墓工程。隋代在洛阳东北建造的面积600m×700m的近200个地下粮仓，北魏时期的石窟开凿技术与相应的艺术文化，都反映了我国地下工程在当时已有很大的规模和较高的水平。

在欧洲，从5世纪到15世纪，是封建社会的最黑暗时期，即所谓的中世纪，这个时期地下空间的开发利用基本上处于停滞状态。一直到14世纪、15世纪的文艺复兴时期，欧洲不但在文化艺术上出现了空前的繁荣，自然科学也有了很大的发展。从此，欧洲的科学技术开始走到世界的前列，地下空间的开发利用也进入了新的发展时期。17世纪火药的使用和18世纪蒸汽机的应用，使在坚硬岩层中挖掘隧道成为可能。例如，1613年建成伦敦水道，1681年修建了地中海比斯开湾的连接隧道（长170m）。19世纪以后建设的隧道就更多，1843年伦敦建造了越河隧道，1845年英国建成第一条铁路隧道；1871年，穿过阿尔卑斯山，连接法国和意大利的长12.8km的公路隧道开通。

现代地下空间的开发利用，在20世纪60年代和70年代达到了空前的规模，在一些发达国家，地下空间的开发总量都在数千万到数亿立方米，主要用于建造各种交通隧道、水工隧道、大型公用设施隧道和地下能源库，城市地下空间的开发利用也占有一定比重（周凌，2008；王欣，2009）。

从1863年英国伦敦建成世界上第一条地铁以来，地下工程类地下空间开发和利用在发达国家已实施100多年。20世纪70年代，国际地下空间研究日趋活跃，多次召开国际地下空间研讨会，并通过了《地下空间资源为人类造福的建议书》、《东京宣言》等开发利用地下空间的决议和文件。1982年联合国正式将地下空间列为“潜在而丰富的自然资源”。世界发达国家如欧洲、北美等国及日本大量开发利用城市地下空间，其规模之大、范围之广令人瞩目，其开发利用城市地下空间的指导思想是把一切可转入地下的设施转入地下。目前国外地下空间开发已经从大型建筑物向地下的自然延伸发展到复杂的地下综合体（地下街）再到地下城（与地下快速轨道交通系统相结合的地下街系统），地下图书馆、会议中心、展览中心以及体育馆、音乐厅、大型实验室等地下文化、体育、教育等设施。地下市政设施也从地下供、排水管网发展到地下大型供水系统，地下大型能源供应系统，地下大型排水及污水处理系统，地下生活垃圾的清除、处理和回收系统，以及地下综合管线廊道（共同沟）。可以说，在这些国家，人们已经习惯和离不开地下空间设施。

在我国，地下空间已成为城市空间不可分割的重要组成部分。20世纪60年代在战备的要求下，建设了许多掩蔽工事、地下工厂、储备库和军事设施等。70年代以来，中央提出人防工程要平战结合，体现了战备效益、社会效益和经济效益综合考虑的方针，不仅指导着原有人防工程的利用，而且指出了适应城市发展需要开发利用地下空间的方向。80年代至今，在地铁建设的带动下，城市建设更注重地下空间资源的利用，地下步行隧道、

共同沟、地下停车库等地下工程不断涌现，地下空间开发利用与以往相比，进入全面开发的新局面，北京、上海、南京、广州、深圳、西安等较大城市地下空间的开发已初具规模，如北京市建造的地铁工程、西安市建造的钟楼地下商业城、上海市建造的地铁工程 and 人民广场工程等，此外许多大中城市均已进行了详细的地下空间利用规划并开始实施，诸如无锡、杭州、重庆、成都、哈尔滨、郑州等。

早在公元 300 年，中国就有地下灌注井的使用记载，法国则在 9 世纪就采用地下灌注以萃取盐。然而，地下灌注技术大规模商业化应用真正始于 19 世纪 30 年代，最初是美国利用“衰竭的油层”储存石油开采产生的油田盐水等液体废料。随着经济的发展，地下灌注技术的应用范围越来越广，开始涉及化工、农药、造纸、医药等方面。19 世纪 60 年代，在美国科罗拉多州，深井灌注引起了地震，产生了第一份有文件记录的饮用水源可能遭受污染的案例。19 世纪 70 年代，发现一定距离外造纸厂的灌注废液从废弃油井中溢出。随后，美国国会通过了“安全饮用法”（SDWA），使得环保署（EPA）有权控制地下灌注以保护地下饮用水源。19 世纪 80 年代，美国通过了联邦地下灌注规章，定义了 5 类灌注井同时制定了最小标准行。美国国会通过了“资源保护和再利用法”（RCRA）中的“危险性固废修正案”（HSWA），要求附加用于灌注危险废物的深井地下灌注规章，除了对这类井要求更严格外，这些规章还要求每一口井的操作者提供一份“非转移诉讼”，证明在至少 10000 年内危险废物不会从灌注带释放出来或通过自然作用转变成非危险性废物。美国在地下灌注方面不仅有成熟的技术，而且制定了相对完备的法律法规及管理条例。该技术在美国已经有 50 多年的经验，用于处置危险废物和放射性废物的 I 类灌注井已经安全运行 30 多年。至 2001 年，美国采用 I 类井进行废液处理的工厂有 272 个，其中 51 个工厂处置危险性废液。据美国环保署（EPA）地下水和饮用水办公室 2002 年 1 月的统计数据，有 89% 的危险性废物通过 I 类危险性废物灌注井进行处置，每年有超过 $3400 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的危险性废物经深井被灌注到地下。据 EPA 深井灌注办公室统计，至 2007 年 5 月，全美国有 I 类灌注井 571 口，其中危险性废物灌注井 115 口。目前，国外地下灌注项目灌注井的新应用有：通过地质体回收，减少二氧化碳的排放；考虑通过管理来自饮用水处理厂的处理残渣，扩大水资源的使用；通过含水层和再利用井，增加饮用水储集，以减轻水资源缺乏。

目前，我国尚没有关于地下灌注方面的法律法规，甚至地质环境保护的法律法规尚不健全，对地下灌注工程的监管只停留在项目审批管理程序上，建成后的运行监管和监测不到位。废水地下灌注的标准不健全，除了油田采油废水灌注有水质标准外，其他废水灌注在标准方面基本是空白。尽管目前我国地下灌注尚无成熟的技术和完善的法律法规，但在某些领域或相关部门进行了有益的尝试。如重庆索特盐化股份有限公司应用盐岩溶腔储存食盐废液，已成功处理了 $60 \times 10^4 \text{ t/a}$ 真空制盐装置产生的制盐废水废渣，2004 年此项处理技术装置被国家发改委推荐为“国家鼓励发展资源节约综合利用和环境保护技术”；1996 年 5 月至 1997 年 7 月，大庆油田建设设计研究院同大庆油田勘探开发研究院曾联合开展了含氰污水深井回注技术研究，该研究成果不仅解决了油田聚合物工程 $74 \times 10^4 \text{ t/a}$ 含氰废水的地面纳污问题，而且最终还可解决 $226 \times 10^4 \text{ t/a}$ 含氰污水的排放问题；2007 年 10 月，国家发展与改革委员会发布的《核电中长期发展规划（2005 ~ 2020 年）》，提出在 2020 年前建成高放射性废物最终处置地下实验室，完成高放射性废物最终处置场规划。

将二氧化碳注入油井中以提高原油回采率,在美国已有 30 余年的工程实践历史,通过这种方法把二氧化碳注入油井后,二氧化碳至少可以在地下存放几千年。但真正利用地下空间处置二氧化碳、减少温室气体向大气中排放却是近 10 年来发展起来的新技术,目前主要在美国、加拿大和欧洲等国家进行了相关研究和工程实践,显示出良好的应用前景。挪威早在 1996 年就开始了二氧化碳的地层处置研究。在挪威和苏格兰之间的斯来普那天然气田,天然气中含有大量的二氧化碳,挪威国家石油公司首先将开采出的混合气体进行分离,然后将二氧化碳通过一条 4km 长的管道,直接将 2800t 的二氧化碳泵入海底以下 800m 的砂石岩层中,据估计,该地层可以处置 6000×10^4 t 二氧化碳。英国石油公司在北海米勒油田进行了类似试验,该公司二氧化碳源自一家火电厂。根据这项技术,发电站不再将二氧化碳排放到大气中,而是通过液化技术,经由一条废弃不用的输油管,然后泵入废弃油田,让液化的二氧化碳充满原本用来储存石油的岩石气孔,覆盖在油田之上的不透气泥岩能阻止二氧化碳逸出。据测算,米勒油田每年可吸纳 500×10^4 t 液化二氧化碳,并可将之处置在那里达 1 万年以上。目前我国在二氧化碳地质储存方面才刚刚起步,正在进行二氧化碳地质处置的相关调查研究工作。

地下水库的发展离不开地下水人工补给的不断进步,美国、荷兰、俄罗斯等国家自 20 世纪 30 年代就开始了大规模的人工补给地下水实践。如美国加利福尼亚州沿海岸线一带的注水井,每年回灌处理后的几十亿立方米地下水,阻止了海水的继续入侵。荷兰阿姆斯特丹的滨海砂丘人工补给设施,利用洪水季节淡化莱茵河水,注进天然入渗井和大井,年回灌量达 4000×10^4 m³。俄罗斯编制了地下水回灌系统设计及工程运行指南。可以说国外地下水人工补给的技术是比较成熟和先进的。我国大规模的地下水人工补给始于 20 世纪 60 年代,上海为解决地面沉降问题,进行了深井回补地下水的实践。随着地下水人工补给的发展,地下水库由设想变为现实。日本于 1972 年在长崎县野母崎町桦岛建成了第一座地下水库,尽管仅有 9000m³ 的库容,毕竟是世界上早期的地下水库(袁菊如等, 2012)。1975 年在我国河北省兴建的具有深井回灌系统和开采系统的南宫地下水库,标志着我国地下水库建设的开始。近年来,我国北方地区为解决干旱和海水入侵问题,兴起了建造地下水库的高潮,北京进行了西郊地下水库的试验,山东从 1990 年开始先后兴建了黄水河、王河和大沽河地下水库等,辽宁省修建了龙河、三涧地下水库,贵州省也兴建了普定县马官地下水库等(李明良等, 2009)。

石油地下储存的主要方式包括地下岩洞储备和地下盐穴储备。目前,利用地下岩洞建立石油储备的国家主要有瑞典、芬兰、日本、韩国和新加坡等。利用地下盐穴储备方式的主要有具有盐层建库地质条件的美国、德国、法国等国家,其中比较突出的是美国,其利用得克萨斯州和路易斯安那州墨西哥湾沿岸地区的地下盐穴建立了总储存能力达 13.7×10^8 t 的五大战略石油储备基地,储备的主要对象为原油。每个储油库都有数量不一的洞穴(6~22 个不等),典型洞穴直径为 60m,高 610m,只要往洞穴底部注水,原油即可上升抽出。我国于 1977 年设计建造了第一座原油地下岩洞储备库,由两个洞室组成,其容量分别为 5×10^4 m³ 和 10×10^4 m³。

天然气地下储存的主要方式包括利用枯竭油气田、地下含水层、含盐层、废弃矿井建造地下储气库,这是 20 世纪燃气工业所取得的一项主要成就。据统计,全世界建成的地下储气库超过 602 座,其中 12.5%、9.8%、77.7% 的储气库分别由含水层、盐岩层、枯