

董梅 胡辉◇著

城市环境下
多尺度三维地质建模方法
及应用实例分析



JIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社



ISBN 978-7-308-18612-4



9 787308 186124 >

定价：50.00元

城市环境下多尺度三维地质 建模方法及应用实例分析

董 梅 胡 辉 著

 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市环境下多尺度三维地质建模方法及应用实例分析 /
董梅, 胡辉著. —杭州: 浙江大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-308-18612-4

I. ①城… II. ①董… ②胡… III. ①三维—地质模
型—建立模型 IV. ①P628

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 208063 号

城市环境下多尺度三维地质建模方法及应用实例分析

董梅 胡辉 著

责任编辑 金佩雯 候鉴峰

责任校对 汪淑芳

封面设计 雷建军

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州星云光电图文制作有限公司

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 9.25

字 数 166 千

版 印 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-18612-4

定 价 50.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

前 言

20 世纪以来,随着世界各地城市化的快速发展,城市地质环境问题日趋严重,各国都启动了城市地质调查工作。随着计算机技术的发展和地质调查电子数据的增多,三维地质信息库也得到了长足的发展。

三维地质模型是地质条件分布及其几何结构的空问表示方法。城市地下浅层地质环境一般指对工程建设产生直接影响的地质体,它承载着众多城市基础设施和市政设施,从地基土的物理性质、地下水的深度、地基土液化敏感性等方面影响着工程建设项目的成本和可行性,在城市可持续发展中起着至关重要的作用。城市地下浅层的地质结构与地球深层结构不同,因为它不仅受气候变化的影响,还受人为工程影响而频繁地发生变化。当今城市快速发展,高大密集型建(构)筑物非常多,二维地质图和剖面图不足以为工程建设提供足量的地质信息。近年来,三维可视化地质模型被越来越多地应用于城市发展建设过程。在城市环境中,三维地质模型的类型有多种,如地形三维模型、基础地质模型、工程地质模型、水文地质模型等。地形三维模型可用于坡度、坡向分析,挖填方计算等;基础地质模型可重构复杂地质体,用于基底稳定性评价等;工程地质模型运用多源数据耦合技术,可用来表征工程地质结构特征及参数,评价主要工程地质问题等;水文地质模型可用于表征各含水层结构特征及水文地质参数,评价浅层地下水对地下空间开发的影响。近年来,人为的地质灾害,如地面沉降、地基差异沉降、边坡失稳等,在城市地区时有发生,对人们的生命和财产安全造成威胁,这些灾害很多是由工程建设者缺乏对地质信息的充足认知引发的。运用特定场地的三维岩土参数模型,可以对地质条件较脆弱地区的相关岩土工程详勘进行指导,以降低人为建设危害发生的可能性。对地质特征的了解是建立可靠三维岩土参数模型的关键。在过去,三维地质模型一般用于解决区域水文地质问题和自然资源保护问题。目前,三维地质模型的应用范围已扩展到地质工程、岩土工程、市政规划、垃圾处置、地下水流动模拟等更多领域。

本书论述了城市环境下多尺度三维地质建模的研究背景、理论方法、关键技术和应用实例,是作者在城市地质领域十余年的研究基础上撰写而成的。本

书受国家自然科学基金项目(41702297)、浙江省教育厅科研项目(Y201533556)、中央高校基本科研业务费(2016QN4019)、国土资源部的北京市多参数立体地质调查项目(任务书编号:基[2003]018-01)、德国亚琛市环境部的城区环境地质评价项目和岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放研究基金课题等项目的资助,书中内容反映了这一系列项目的研究成果。

全书共分6章,内容主要包括以下两个方面。

(1)多尺度三维地质建模基础理论和技术方法。第1章主要介绍了城市环境下三维地质建模的意义及多尺度三维地质建模的意义;第2章主要介绍了三维地质建模的相关概念,包括三维地质建模过程中应用的数据类型及预处理方法,模型的基本组成要素,模型表示方法及建模软件;第3章主要介绍了三维地质建模及应用的主要研究进展;第4章系统介绍了城市尺度和工程尺度三维地质建模的基本理论和方法。

(2)多尺度三维地质模型在城市建设中的应用实例。第5章主要介绍了城市环境下三维地质模型构建的方法和应用实例,包括城市基础模型构建方法及模型后续应用、城市范围内高精度三维地质属性建模、基于三维地质模型的新城规划建设适宜性评价方法和应用、基于激光雷达(LiDAR)技术和三维地质模型的尾矿库边坡稳定性数值模拟等。

由于作者水平有限,书中纰漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 三维地质建模	(1)
1.2 城市环境下的浅层三维地质建模	(2)
1.3 多尺度三维地质建模	(4)
第 2 章 三维地质模型相关概念介绍	(7)
2.1 三维地质模型数据收集和管理方法	(7)
2.1.1 数据收集	(7)
2.1.2 数据清理与质量控制	(11)
2.2 三维地质模型的基本对象	(14)
2.2.1 点	(14)
2.2.2 线	(15)
2.2.3 面	(16)
2.2.4 拓 扑	(16)
2.2.5 块 体	(17)
2.3 三维数据模型表示方法	(17)
2.3.1 基于面表示的数据模型	(17)
2.3.2 基于体表示的数据模型	(18)
2.4 三维地质建模软件简介	(20)
第 3 章 三维地质建模及应用研究现状和进展	(24)
3.1 三维地质建模方法和关键技术研究进展	(25)
3.2 世界三维地质建模应用介绍	(28)
3.2.1 加拿大地质调查局	(29)
3.2.2 美国地质调查局	(29)
3.2.3 澳大利亚地球科学局和维多利亚地球科学局	(30)

3.2.4	中国地质调查局	(30)
3.2.5	英国地质调查局	(32)
3.2.6	法国地质调查局	(32)
3.2.7	荷兰地质调查局	(32)
3.2.8	意大利地质调查局	(33)
3.2.9	德国地质调查局	(33)
第4章	城市环境下多尺度三维地质建模方法和技术	(37)
4.1	城市环境下区域尺度三维地质建模	(38)
4.1.1	原理与思路	(38)
4.1.2	直接三角剖分法构建地质界面	(38)
4.1.3	间接的地质界面构造过程	(40)
4.1.4	地质统计学	(40)
4.1.5	地质界面优化	(48)
4.2	城市环境下工程尺度三维地质建模	(52)
4.2.1	原理与思路	(52)
4.2.2	三维地质统计分析	(53)
4.2.3	随机建模方法	(54)
4.2.4	三维属性网格模型构建	(55)
4.3	城市环境下三维地质模型定量评价方法	(58)
4.3.1	不确定性因素来源识别和分析	(58)
4.3.2	基于信息熵的模型不确定性定量表征方法	(58)
4.3.3	信息熵的应用	(60)
第5章	城市环境下三维地质建模典型案例及分析	(61)
5.1	德国亚琛市中心区域三维地质建模及分析	(61)
5.1.1	研究区地质条件概述	(61)
5.1.2	研究区地表模型	(61)
5.1.3	研究区断层结构	(63)
5.1.4	研究区基岩上岩土体三维地层结构模型构建	(64)
5.1.5	研究区三维地质实体模型及应用分析	(72)
5.1.6	模型定量评估	(79)
5.2	德国亚琛市中心区域三维地质属性建模及分析	(85)
5.2.1	数据准备	(86)

5.2.2	属性参数分布预测	(88)
5.2.3	三维土壤粒级分数模型与解释	(91)
5.2.4	模型定量评估	(92)
5.3	基于三维地质模型的北京顺义新城工程建设适宜性评估	(92)
5.3.1	研究区自然地理和地质概况	(92)
5.3.2	研究区三维地质建模流程	(98)
5.3.3	研究区工程建设层三维地层结构模型构建	(98)
5.3.4	研究区工程建设层空间力学参数模型构建	(101)
5.3.5	地基土承载力和压缩性模型及评价	(103)
5.3.6	研究区工程建设适宜性评价	(107)
5.4	基于 LiDAR 技术和三维地质模型的尾矿库边坡稳定性数值模拟	(117)
5.4.1	LiDAR 技术及其在地质灾害领域的应用	(117)
5.4.2	研究区数据获取方案	(118)
5.4.3	LiDAR 数据处理和三维实体模型地质建模	(120)
5.4.4	数值模型构建过程	(121)
5.4.5	边坡稳定性数值模拟过程	(125)
第 6 章	总结与展望	(130)
参 考 文 献	(132)

第 1 章 绪 论

1.1 三维地质建模

20 世纪以来,随着世界各地城市化的快速发展,越来越多的人开始关注城市地质环境。城市地质工作在世界各国开展得如火如荼,我国的城市地质工作近年来也得到了大力发展,第一批试点城市上海、北京、杭州、天津、南京、广州的地质调查工作业已完成,由地方政府参与开展的苏州、镇江、嘉兴、厦门、福州等城市的地质调查工作业已完成。中国地质调查局还启动了重要经济区和城市群地质环境调查评价与分区的 9 个计划项目,共 60 多个工作项目,建立了重要经济区和城市群地质环境调查数据库。城市地质调查为构建城市三维地质模型提供了充足的数据。

在城市范围内,地球表面以下的地下条件,从地基土的物理性质、地下水的深度、地基土液化敏感性等方面影响着工程建设项目的成本和可行性。城市地下浅层的地质结构与地球深层结构不同,因为它不仅受气候变化的影响,还受人为工程影响而频繁发生变化。当今城市快速发展,高大密集型建(构)筑物非常多,二维地质图和剖面图不足以为工程建设提供足量的地质信息。传统二维地质图的主要缺陷是,不论其形式是纸质还是数字图,都要求用图者了解基本的地学原理和知识。许多国家已经认识到三维地质模型对城市可持续发展的重要性,为此开展了一系列三维地质建模项目。例如,英国地质调查局已经建立了以 1:1 000 000,1:250 000,1:50 000 和 1:10 000 为比例的三维地质模型体系,并在国家、区域、特定场地等各种尺度进行了模型应用。法国地质调查局建立了巴黎市超过 105km² 区域内的多层三维地质模型,以便于从膏岩的溶解性预测地面沉降的敏感性因素。中国地质调查局启动了一项全国范围内的

多参数立体地质调查项目,北京等城市被选为该项目的试点场地。三维地质模型是地质条件分布及其几何结构的空问表示方法。近年来,三维可视化地质模型被越来越多地应用于城市发展,主要有如下几个原因:①三维地质模型可以提供地质条件的合理预测和几何表达;②三维地质模型是对地质结构假设的验证;③三维地质模型存储了大量的地质和地球物理等信息;④在获取新的数据后可以快速更新整个模型。

在城市环境中,三维地质模型的类型有多种,如地形三维模型、基础地质三维模型、工程地质三维模型、水文地质三维模型等。地形三维模型可用于坡度、坡向分析,挖填方计算等(屈红刚等,2015);基础地质三维模型可重构复杂地质体,用于基底稳定性评价等;工程地质三维建模运用多源数据耦合技术,模型可用于表征工程地质结构特征及参数,评价主要工程地质问题等;水文地质三维模型可用于表征各含水层结构特征及水文地质参数,评价浅层地下水对地下空间开发的影响。

在过去,三维地质模型一般用于解决区域水文地质问题和自然资源保护问题。目前,三维地质模型的应用已扩展到地质工程、岩土工程、市政规划、垃圾处置、地下水流动模拟等更多领域。例如,基于三维地质模型,在隧道建设中可模拟任意线路的剖面切割、模拟隧道开挖与漫游;还可结合历年地面沉降监测数据,进行地面沉降过程的模拟;融合时间序列信息,可进行时空一体化的四维动态分析,对地质曲面进行动态预演;可基于复杂场景的多视点实时动态剖切分析技术,更直观地表达地下空间信息。三维地质模型还可结合其他三维模型数据格式,如地铁站三维模型、地下管线三维模型、地下停车场三维模型、建筑信息模型(building information modeling, BIM)等,实现全空间地上、地下一体化三维模型展示。

1.2 城市环境下的浅层三维地质建模

城市地下浅层地质环境一般指对工程建设产生直接影响的地质体,它承载着众多城市基础设施和市政设施,在城市可持续发展中起着至关重要的作用。一个复杂的地质模型,能够显示地质体的空间几何结构和地质属性信息,可以支撑一个工程建设项目的可行性研究,如隧道、市政污水管道路线的确定,以及重要基础设施的选址研究(Rosenbaum, 2003)。利用一个精度较高的地质模型,可以有效地降低施工过程中由地质因素引起灾害的风险。近年来,人为的

地质灾害,如地面沉降、地基差异沉降、边坡失稳等,在城市地区时有发生,对人们的生命和财产安全造成威胁,这些灾害很多是由工程建设者缺乏对地质信息的充分认知引发的。运用特定场地的三维岩土参数模型,可以对地质条件较脆弱地区的相关岩土工程详勘进行指导,以减小人为建设危害发生的可能性。对地质特征的了解是建立可靠三维岩土参数模型的关键。浅层地质条件的调查与为开采石油或矿产资源而进行的调查有所不同,浅层地质体由于受人类活动和自然条件的双重影响,不均质性较明显。浅层地质是城市建设和重要基础设施赋存的介质,采用科学的方法发掘浅层地质的空间演化特征并进行模拟,发展精细化三维地质建模技术,不仅有助于缓解浅层地质条件变异性和脆弱性与城镇化建设之间的矛盾,拓展城市尺度和工程尺度上的高精度三维地质建模方法,还可服务于城市地铁隧道、地下管线、人防工程等的规划和地质灾害防治,具有重要的学术和应用价值。

浅层岩土工程勘察一般要求更高水平的特征分析和更精确的性能特征匹配。传统二维地质图在岩土工程领域的应用场景仅限于确定的地下深度范围和对地下岩土性质的变化进行评估。而三维地质模型可以描述任意深度(只要有数据),并且具有指示各种地质几何结构、岩土及水文地质性质的能力,已经被证明是一个可以描述和分析地下情况的强大工具。

迄今为止,世界范围内的地质调查工作大多致力于提高地质模型的准确性和可靠性,高精度三维岩土工程模型没有得到更多关注。一般的三维地质模型中,同个地质单元的某个岩土参数只通过单一数值来描述,然而这个单一数值并不能用来描述岩土参数在整个三维空间的变异性和分布特征。随着基于有限元和有限差模拟的三维岩土工程分析技术的发展,用不同的数值来量化模型的每一个体元成为必要。例如,土壤中的水流有时会通过地基上的附加荷载对地下人造设施的稳定性产生不良影响,避免这种影响的有效工具是建立计算机模型来模拟土壤中的水流,然后进行计算进而寻找解决方案。然而,由于缺乏准确的土壤的水力特性、含水率和水力传导系数模型,数值模拟结果的运用受到限制。

数学理论在三维建模技术中的应用发展,使地下结构的预测和几何表达变得更加可靠。高精度的浅层三维地质建模的难点在于,施工过程中人为因素的变化和气候变化会对表层土风化侵蚀过程产生影响。为了克服浅层地质模型高扰动的问题,工程地质学家致力于综合利用数学理论、统计分析、先进的建模软件、档案数据库,结合实地考察等方法,来创建一套可靠的浅层地质条件下的三维可视化模型和描述资料。在过去的几十年中,一系列建模方法和技术被用于优化复杂的几何结构,并成功用于实践。离散光滑插值(discrete smooth

interpolation, DSI) (Mallet, 1992, 1997, 2002) 和克里金插值 (kriging interpolation) (Krige, 1953) 是其中两个具有代表性的技术。插值的主要原理可以描述为, 在未知值周围定义一个邻域, 通过该邻域中的已知值, 来估计这个未知值。离散光滑插值法的特点是通过建立各种限制条件以减少地质表面的粗糙度的加权总值。克里金插值是在全面理解待预测变量的空间结构的条件下, 基于变差函数估计未知值。克里金插值的过程虽然复杂, 但相比其他插值法, 它的结果往往更加可信。结合这两种技术可以大大提高地质参数预测的质量和浅层三维地质建模的可信度。利用二维、三维变差函数分析和插值技术可以分析三维空间中的某些属性的空间变异性, 并最终预测该属性在整个模型每个体元中的值。

1.3 多尺度三维地质建模

一段时期以来, 无论在国内还是在海外, 与多尺度相关的研究热度和成果数量呈逐渐增长的趋势, 这表明多尺度作为一个主要的研究课题已经被应用到了多个研究领域, 研究人员对多尺度问题的关注度逐渐提高, 多尺度在多个领域的研究深度也在不断增加。随着地学信息技术应用领域的不断扩展和需求层次的多样化, 多尺度问题在地学中的应用不断深入。近年来围绕制图多尺度、多尺度空间数据构建、地形多尺度建模、城市空间多尺度建模、地质空间多尺度表达等主题的研究方兴未艾, 其中, 地学空间的多尺度表达问题为当前地球信息科学研究的热点, 地质空间的多尺度建模刚刚起步。

多尺度三维地质建模本质是对地学空间对象进行多尺度的几何表达, 即采用不同比例尺的勘测资料 and 不同的建模方法建立具有多层次细节特征的三维地质模型。随着地质信息在多个领域应用的不断扩展和需求层次的多样化, 多尺度三维地质建模问题已经成为当前地质信息科学研究的热点和难点。在地质信息领域, 尺度不仅可以用来表达研究区域的空间范围, 还可以用于表示研究对象的详细程度, 也可以用来表明时间的长短和频率。人们不可能观察到地质空间的所有细节, 地质模型对地下空间的描述总是“近似”的, 近似的程度反映了人们对地质现象及其过程的理解程度。尺度是所有地质信息的重要特征, 它定义了人们观察地质对象的一种约束, 只有经过合理的尺度抽象的地质信息才具有利用价值。不同的尺度不仅在所表达的信息密度上有很大的差异, 而且还会影响所表达的地质信息是否正确, 因为不少地质现象和规律只在一定的尺

度出现(陈麒玉等,2016)。为城市规划和工民建服务的城市环境下多尺度三维地质模型应能有效地反映目标地质现象的本质特征,帮助人们进行科学综合分析和决策。

用于油田开发的深层地质模型具有分辨率低、精度低、地层起伏小、均质性的特点,而用于城市环境内的浅层地质模型具有分辨率较高、精细化、快速更新、异质性的特点。这两种截然不同的模型均需要用多尺度的方法来构建,如图 1-1 所示。

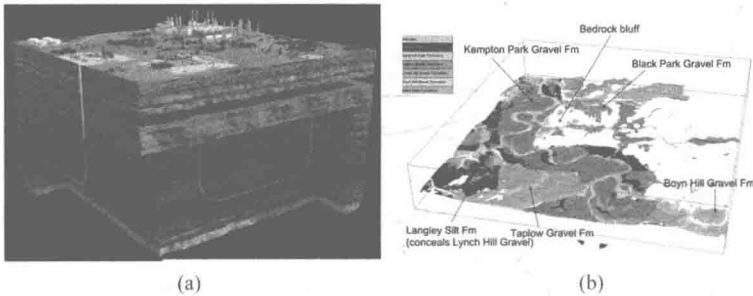


图 1-1 深层地质模型(a)和浅层地质模型(b)

在城市范围内,很多模型是多种尺度混合的。一典型的混合尺度三维地质模型如图 1-2 所示,在该模型中,较深的层基于地震数据建模(如 625k 基岩建模),较浅的层基于地球物理勘探数据,地质剖面、钻孔信息,采用地质统计学方法建模(如 10k~50k 地质模型)。

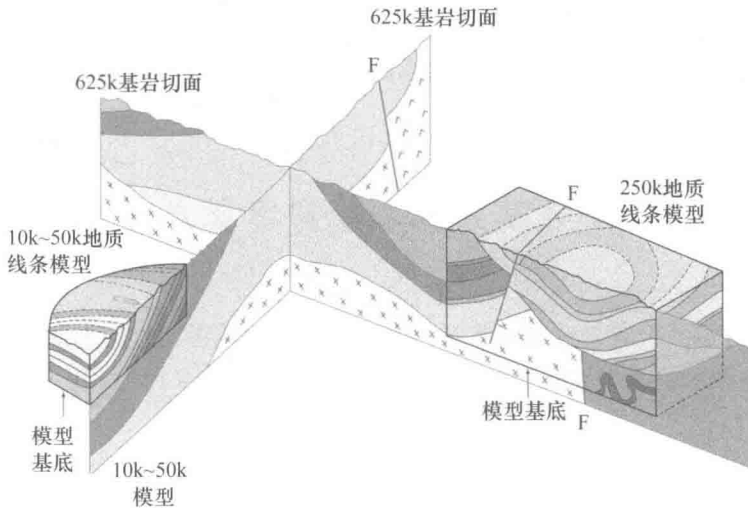


图 1-2 混合尺度三维地质模型示例

依据城市环境地质问题的特点,本书提出的城市环境下多尺度三维地质建模的概念,其外在表现形式是利用城市环境中不同比例尺的勘测数据建立多分辨率集成的三维地质模型,实现多尺度地质数据的表达,满足城市环境下地质分析对地质信息不同精度的需求。从实际应用的角度来看,多尺度表达是进行多尺度地质问题分析的基础。针对不同层次的需求,需要不同分辨率和精确度的数据支持。地质问题分析一般总是针对一定的空间尺度和一定的空间等级进行的,即地质现象和过程通常是依赖于比例尺的。

本书在探讨城市环境下多尺度三维地质建模方法和技术时,将主要从空间多尺度入手。在空间多尺度方面,将度量的力度划分为区域级别和工程级别。其中,区域级别是指一个城市及其周边一定范围的区域范围,该范围的研究对象主要有地形表面,区域性的断层、地层、岩性信息等;工程级别是指某一具体工程建设的范围,也是土木工程领域重点关注的尺度,主要的研究对象有基岩面、岩层界面、构造面、地质曲面、透镜体、地层单元、勘探对象、岩土体物理力学性质、水文地质信息、工程地质信息等。

区域尺度数据和工程尺度数据是地质条件在不同尺度的体现。区域尺度三维地质建模、工程尺度三维地质建模是对不同尺度地质数据的三维表达,是基于多尺度地质数据进行地质认知和地质分析的基础。两个建模尺度的范围由大到小,建模粒度由粗及细,单独某一尺度的三维地质模型都只能满足某一具体的需求。

第 2 章

三维地质模型相关概念介绍

三维地质建模是综合各种调查数据,解读地下情况,并用工具进行表达(integration, interpretation and modeling)的过程,其流程如图 2-1 所示。在使用地质信息的各个阶段,利用三维地质模型去联系和分享数据,为决策制定提供始终如一的、连贯的地质解读。

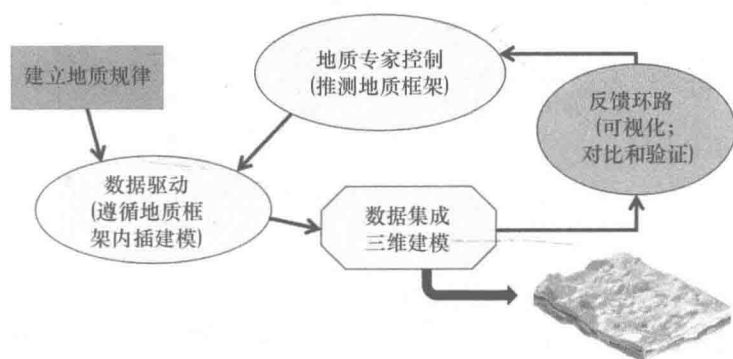


图 2-1 三维地质建模流程

2.1 三维地质模型数据收集和管理方法

三维地质建模方法的本质是通过先进的技术来综合可利用的数据,从而再现地质结构。因此,可采集的数据质量和数量对最终模型的真实性的影响是至关重要的。

2.1.1 数据收集

在城市范围内,一般能收集到下列四种类型的信息:①用于学术研究和基

基础设施建设的原始目标的钻孔记录;②数字高程模型(digital elevation model, DEM);③场地二维地质图和相应的构造图;④地质描述资料。

(1) 钻孔记录

三维地质建模最重要和最直观的数据是钻孔记录。钻孔记录一般包含钻孔位置坐标、高程、井下深度、地层和岩性属性。建筑工程中收集的钻孔分布特点是簇群(房屋)或排列(道路、铁路和隧道)。用于地质或水文地质研究的钻孔大多数均匀分布在研究区内,如图 2-2 所示。



图 2-2 建模区域钻孔分布图