我国地源热泵系统应用适宜性评价

目　　录

第一章 绪论.....1
§1.1 研究背景及意义.....1
1.1.1 研究背景.....1
1.1.2 研究意义.....2
§1.2 研究现状.....3
1.2.1 国外应用及研究现状.....3
1.2.2 国内应用及研究现状.....4
§1.3 研究的主要内容.....6
§1.4 地源热泵的基本原理.....6
1.4.1 地下水源热泵系统的基本原理.....6
1.4.2 土壤源热泵系统的基本原理.....7
第二章 研究区概况.....9
§2.1 自然地理条件.....9
2.1.1 地理位置.....9
2.1.2 地形、地貌.....9
2.1.3 气象条件.....12
2.1.4 社会经济状况.....12
§2.2 区域水文地质条件.....13
2.2.1 地下水资源分布.....13
2.2.2 地下水水温.....16
§2.3 环境地质问题.....16
2.3.1 地面沉降.....16
2.3.2 地裂缝.....16
2.3.3 地面塌陷.....16
第三章 地源热泵系统应用适宜性评价方法.....18
§3.1 常用评价方法.....18
3.1.1 专家评价法.....18
3.1.2 综合指数法.....19
3.1.3 模糊综合评判法.....19
3.1.4 因子分析法.....20
3.1.5 熵值法.....20
§3.2 层次分析法.....21
3.2.1 层次分析法的基本原理.....21
3.2.2 层次分析法的特点.....21
3.2.3 层次分析法的一般步骤.....22

第四章 地源热泵系统应用适宜性评价指标体系.....28
§4.1 指标体系设计原则.....28
§4.2 评价指标体系建立中存在的问题及指标体系建立的方法.....29
§4.3 我国地下水源热泵系统适宜性评价指标体系的建立.....29
4.3.1 我国地下水源热泵系统应用适宜性评价指标的选择及描述.....29
4.3.2 我国地下水源热泵系统应用适宜性评价指标体系.....33
§4.4 典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性评价指标体系的建立.....34
4.4.1 典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性评价指标的选择及描述.....34
4.4.2 我国土壤源热泵系统应用适宜性评价指标体系.....36
第五章 地源热泵系统应用适宜性评价步骤.....37
§5.1 资料的收集.....38
§5.2 资料的整理及预处理.....38
§5.3 确定评价因素.....38
§5.4 评价因素分值及权重的确定.....39
5.4.1 评价因素分值的确定.....39
5.4.2 评价因素权重的确定.....40
§5.5 评价总分的确定.....40
§5.6 适宜性分区标准并划分适宜性级别的确定.....40
第六章 我国地源热泵系统应用适宜性评价.....41
§6.1 我国地下水源热泵系统应用适宜性评价.....41
6.1.1 确定评价因素的分值.....41
6.1.2 根据所建的指标体系进行权重计算.....44
6.1.3 我国地下水源热泵系统评价总分值的确定及适宜性分区.....47
§6.2 我国典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性评价.....49
6.2.1 典型剖面的特点及分段.....49
6.2.2 剖面上每一部分的热导率、热扩散率、水位、水位梯度的确定.....49
6.2.3 确定评价因素的分值.....52
6.2.4 根据所建的指标体系进行权重计算.....52
6.2.5 典型剖面土壤源热泵系统评价总分值的计算及适宜性分区.....53
第七章 结论及建议.....55
§7.1 结论.....55
§7.2 建议.....56
致 谢.....57
参考文献.....58
附 图.....61

第一章 绪论

§1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近几十年来，随着社会的发展，人口、资源与环境的矛盾日益突出，尤其是人与能源的矛盾日益加剧。世界能源形势日趋紧张，能源危机成为国际社会普遍关注的问题。人类已经意识到石油资源可开采及利用的储量已经不多，剩余储量的开发难度越来越大，如果不及时寻找可替代能源，石油将会在一代人的时间内枯竭。煤炭资源虽比石油多，但也不是取之不尽用之不竭的，并且煤炭资源在利用过程中不可避免的会引起环境污染。可以代替石油的其他能源资源，除了煤炭之外，能够大规模利用的还很少。因此，尽早探索、研究开发利用新的可再生、无污染能源资源，已经成为世界各国克服能源危机的努力方向。

我国能源也面临一系列的问题，形势不容乐观。我国正处于工业化、城镇化进程加快的时期，能源消费强度较高。随着经济规模进一步扩大，能源需求还会持续较快地增加，对能源供给形成很大的压力，供求矛盾将长期存在。我国的能源结构以煤为主，并且煤炭清洁利用的水平低，燃烧产生的污染多，不利于环境保护。这种状况持续下去，将会给生态环境带来更大压力。我国能源技术虽然已经取得较大进步，但与可持续发展的要求相比还有较大差距。可再生能源、清洁能源、替代能源等技术还没有大力推广，节能降耗、污染治理等技术的应用也不广泛 。

基于目前的能源现状，我国提出了节能减排的措施。所谓的节能减排指的是减少能源浪费和降低废气排放。 我国“十一五”规划纲要提出，“十一五”期间单位国内生产总值能耗降低20％左右、主要污染物排放总量减少10％。这是贯彻落实科学发展观、构建社会主义和谐社会的重大举措；是建设资源节约型、环境友好型社会的必然选择；是推进经济结构调整，转变增长方式的必由之路；是维护中华民族长远利益的必然要求。

在我国，建筑能耗在能源总消费中所占的比例已经达到了27.6%，而且还在以每年1个百分点的速度增加。建设部统计数字显示，我国每年城乡建设新建房屋建筑面积近20亿平方米，其中80%以上为高能耗建筑；既有建筑近400亿平方米，95％以上是高能耗建筑。在建筑能耗中，暖通空调系统与热水系统所占的比例接近60％，而且随着人民生活水平的提高还有上升的趋势。建设部提出，我国新建建筑全面执行节能标准，建筑能耗减少50%。近年来，空调负荷增长迅速，炎夏季节多数电网高峰负荷约有1／3用于空调制冷，使许多地区用电高度紧张，拉闸限电频繁。目前，中国房间空调器和单元式空调

机的产量已达世界第一，中国建筑业发展迅速，每年城市新增8-9亿平方米的住宅建筑和公共建筑，随着经济发展和人民生活水平的提高，建筑耗能逐年大幅度上升。

浅层地热能属于低品位能源，按照分级用能原则，最适合满足生活用能的需要。它是在地球表层一定深度内参与热量循环，在一定技术经济条件下可以被利用的热能资源，是一种新型的优质清洁能源，浅层地热能是客观存在的，它是由太阳能对地球表面辐射所保留的能量与深部地心热核反应向地表扩散的综合反映，具有可再生、分布广、储量大、清洁环保、经济实惠、安全性强和可用性强等特点。在能源短缺和环境污染的双重压力下，这一清洁可再生的新能源，日益受到国家和地方政府的重视，近年来相继出台了一系列支持鼓励政策和管理法规，各地政府还财政补贴浅层地热能的开发利用。中国地质调查局2007年在北京成立了浅层地热能研究与推广中心，挂靠北京市地勘局，大力开展技术研究与应用推广；北京市政府通过发改委等九个局委联合发文出台了鼓励政策，以支持这一技术在北京的推广应用工作。在北京、沈阳等城市的带动下，全国范围内的浅层地热能开发利用工作正在蓬勃开展。据不完全统计，目前全国浅层地热能服务面积超过6000万平方米。

浅层地热能的开发利用主要应用地源热泵技术，随着热泵技术的进一步推广，我国很多地区投入了一定的人力物力进行地源热泵系统的建设，国家也大力提倡这项技术的应用，但是由于缺乏适宜性分区和区域规划，在一些不适宜地区出现了盲目建立地源热泵系统的现象，引发了很多问题，尤其是环境问题，比如：由于回灌条件的限制，造成的回灌不及时引发了地面沉降、地裂缝、地面塌陷；由于水源选择不当，造成了水量不足、水温不适、供水不稳定，给开发者带来了很大的经济损失；由于水质较差引起设备的腐蚀问题也屡见不鲜；由于热平衡问题造成的生态环境破坏将长期存在，这些由于建设场地选择不当造成的问题，很大程度上制约了地源热泵系统的推广和因地制宜的应用，已经引起了有关部门的重视。在此背景下，科学技术部启动了社会公益研究—“可再生能源与建筑集成技术研究与示范”之子课题“水源地源热泵高效应用关键技术研究与示范”对浅层地热资源的利用进行区划，从而确定地源热泵系统适宜性评价的内容、指标和方法，建立地源热泵系统应用适宜性评价指标体系，为地源热泵系统的建设提供依据。

1.1.2 研究意义

浅层地热能是地球浅表层数百米内的土壤岩石和地下水中所蕴藏的一种低温热能，主要采用地源热泵系统包括水源热泵和土壤源热泵系统两种进行开发利用。地源热泵技术，被称为二十一世纪的“绿色空调技术”。可以解决建筑制冷采暖、热水供应等问题，对替代常规商品能源，改善能源结构，保障能源安全，建设资源节约型、环境友好型社会以及实现可持续发展具有重要的战略意义。

在能源短缺的今天，利用浅层地热能、改善环境污染状况已经成为我国解决能源问题的主要研究方向之一，开展“我国地源热泵系统应用适宜性评价”，符合国家和社会发展的需求，具有重要的实际应用价值。本文通过研究各种评价方法，最终采用了层次分析法作为适宜性评价的方法，而目前层次分析法在我国土地适宜性评价方面应用较多，而在热泵应用方面则较少，这为今后热泵应用方面的评价提供了一定的参考；通过研究各种影响因素，建立

了我国地源热泵系统应用适宜性评价指标体系，为今后热泵建设所需考虑的条件及进行某个地区或区域的评价提供了依据；通过划分地源热泵系统的适宜等级、适宜程度，确定了适合应用热泵的区域，为合理利用浅层地热资源，充分挖掘地热潜力，发挥区域资源优势提供了有力的科学依据。进行我国地源热泵系统应用适宜性评价，为地源热泵系统因地制宜、合理有序的建设提供了参考，使地源热泵系统设计人员有据可循，同时减少了因为热泵建设不当造成的环境问题及资源的浪费，降低了我国地源热泵系统建设的盲目性，具有重要的研究意义。

§1.2 研究现状

1.2.1 国外应用及研究现状

1912 年，瑞士的 H.Zoelly 首次提出利用浅层地热能(地源能)作为热泵系统低温热源的概念，但是由于当时一次能源充足，用热泵供暖的社会需求不足，导致了热泵技术没有得到重视和发展[1]。

1945 年在美国印第安纳州诞生了第一台地源热泵装置。1948 年在美国俄勒冈州波兰特市中心区的联邦大厦，第一个完整的地下水源热泵系统正式投入运行[2]。但是这种能源的利用方式没有引起当时社会各界的广泛注意，无论是技术上还是理论上都没有太大的发展。这一时期，国外对土壤源热泵的研究主要集中在地下换热器方面。1946 年，美国进行了 12 个地下换热器的研究项目，这些研究项目测试了埋地盘管的几何尺寸、管间距、埋深等，并将热电偶埋入地下，测试了土壤温度随时间变化和受传热过程影响的情况。1953 年，美国电力协会的研究表明，以上这些试验还没有提供可用于地下换热器的设计方程。

20 世纪 50 年代，欧洲开始了研究地源热泵的第一次高潮，在此期间，Ingersoll 和 Plass 根据 Kelvin 线源概念提出了地下埋管换热器的线热源理论，但是由于当时的能源价格较低，这种系统并不经济，因而未能得到推广[3]。直到 20 世纪 70 年代初世界上出现了第一次能源危机，它才开始受到重视，许多公司开始了地源热泵的研究、生产及安装。1974 年以来，由于石油危机的出现和环境的恶化，引发了人们对新能源的开发和利用，地下水源热泵系统作为一种节能和环保的供热、空调方式重新引起了暖通人员和业主的注意。而且，由于板式换热器的引入[4]，水源热泵机组的性价比提高，地下水源热泵系统尤其是闭式地下水源热泵系统开始大量安装使用。相对于壳管式换热器来说，板式换热器的换热温差更小，更适宜于低温地热的应用[5]。1971 年到 1978 年，美国进行了多种形式地下换热器的测试，并引入太阳能集热器，组成了混合土壤源热泵系统。这一时期开始采用塑料盘管代替金属盘管。美国和欧洲国家设计安装的土壤源热泵系统大多参照类似的已建工程设计安装，另一些工程的设计则采用估算方法。虽然欧洲是世界上发展地源热泵最成熟的地区，但是它也曾因为热泵专家不懂安装技术，安装工人又不懂热泵原理等因素，致使地源热泵的发展走了一段弯路。从 1974 年起，瑞典、瑞士、荷兰等国政府资助的示范工程逐步建立起来，地源热泵技术也日趋完善。从热泵技术来说，此时的地源热泵系统大多直接利用地下水作为冷热源，因此对地

下水的温度有一定要求，而且当时的技术相对粗糙，甚至不设置回灌井[3]。

随着科技的进步，关于能源消耗和环境污染的法律制订的越来越严格，地源热泵的发展迎来了它的另一次高潮。欧洲国家以瑞士、瑞典和奥地利等国家为代表，大力推广地源热泵供暖和制冷技术。政府采取了相应的补贴政策和保护政策，使地源热泵生产和使用范围迅速扩大。上世纪80年代后期，地源热泵技术已经趋于成熟，更多的科学家致力于地下系统的研究，努力提高热吸收和热传导效率，同时越来越重视环境的影响问题。地源热泵生产呈现逐年上升趋势，瑞士和瑞典的年递增率超过了10％。20世纪70年代末到90年代初，美国开展了冷热联供地源热泵的研究工作。这一时期，地源热泵技术飞速发展并趋于成熟。美国的地源热泵机组生产厂家也十分活跃，成立了全国地源热泵生产商联合会，并逐步完善了工程安装网络，成为世界上地源热泵机组生产、使用的大国[6-7]。从地源热泵应用情况来看，北欧国家主要偏重于冬季采暖，而美国则注重全年冷热联供[8]。

20 世纪 90 年代，美国地源热泵的年增长率达到了 12%，截至 2000 年地源热泵的数量达到了 60 万套，并且每年新增大约 5 万套。在美国以及加拿大等北美国家，大型建筑使用地源热泵技术主要选择地表水源热泵或开放式循环地下水源热泵系统，不过出于对地下水资源的严格保护制度，地下水源热泵的推广受到了很大的限制，迫使住宅和小型商用建筑主要采用埋管式土壤源热泵。这一时期，中北欧的荷兰、瑞典、瑞士、奥地利、德国等国家主要利用含水层贮能系统，其中荷兰的地下水源热泵回灌技术和监控系统已经相当成熟，为了大力发展地源热泵使它能被消费者接受，荷兰的多个公共组织与相关工厂、实验室以及大学等合作并建立项目，并且政府和公共单位的赞助从 1994 年到 2000 就已投入了 100 万美元[9]。

2000 年以后，美国等国家地源热泵技术发展更加迅速，有关研究报告认为，美国的地源热泵安装数量将以每年 35%的速度递增, 到 2000 年底，美国已有超过 40 万台地源热泵系统在家庭、学校和商业建筑中使用[10]。目前为止，瑞典全国已经安装了 23 万套地源热泵系统，其中约 5 万套为土壤源热泵系统。现阶段，国外对土壤源热泵的研究仍集中在地下换热器换热效率[11]、地下热传导[12]及热运移模拟上[13]。地下换热器的设计、计算模型约 30 多种。对所有模型的建立，关键是求解岩土温度场的动态变化，其基本模型有 2 种：线热源模型，圆柱热源模型[14~15] 。近年来，欧洲、日本等国家和地区的地热地质学家对岩土体上下界面热交换的定量计算及其在数值模拟中的实现进行了很多研究，并发表了一些成果[16]。

利用地源热泵开发浅层地温能的技术至今已经有很多年的历史，各国对理论方面的研究已经有了很大的提高，但是通过查找大量国外文献发现，关于浅层地热能区划方面的研究很少，目前还是空白。

1.2.2 国内应用及研究现状

中国早在 50 年代，就曾在上海、天津等地尝试采用夏取冬灌的方式抽取地下水制冷。1965 年，天津大学热能研究所吕灿仁教授研制成功了国内第一台水冷式热泵空调机，并论证了热泵系统是提高低温地热利用率和城市供暖的有效方式，同时介绍了地源热泵模拟试验。我国对土壤源热泵的研究始于 20 世纪 80 年代，国内的科研工作者相继展开土壤源热泵的研究和试验工作，各种试验研究工作主要在各大学进行。虽然我国对地源热泵的研究及应

用较晚，但发展势头很好，地源热泵发展已列入国家新能源和可再生能源产业发展十五规划。1988 年中国科学院广州能源研究所举办了“热泵在我国应用与发展问题专家研讨会”，并且中国建筑学会暖通空调委员会、中国制冷学会第五专业委员会举办的各届“全国暖通制冷学术年会”上专门增设了热泵专题[6]。

我国地源热泵的开发利用起步较晚，20 世纪 90 年代开始推广和研究地源热泵系统，主要用于建筑物冬季供暖和夏季制冷。90 年代末，受国际大环境的影响以及地源热泵系统本身所具有的节能和环保优势，我国大多数高校进行了地源热泵系统的研究，主要是关于系统性能方面的试验研究。同济大学、重庆建工学院、湖南大学，山东建筑工程大学等相继建立了水平埋管和竖直埋管换热器的地源热泵实验装置，热泵技术的研究进入了一个新的发展阶段。这一阶段的研究主要是有关地源热泵系统理论方面的研究，地热换热器的传热模型研究、地热换热器换热计算模拟研究、水平埋管换热器夏季瞬态工况数值模拟研究、地热换热器合理间距的理论分析、土壤冻结对地热换热器传热的影响研究、地热换热器间歇运行工况分析等，并完成了地源热泵系统供冷及供热方面的试验[17]。基于 1979 年 1 月 31 日中美政府科技合作协议，及其 1995 年 2 月 30 日在节能和新能源利用的框架协议，中国国家科委（现科技部）和美国能源部于 1997 年 11 月 18 日在北京签署了关于地热直接利用的合作协议，旨在通过国际合作来推动地热供暖和地源热泵技术在中国的应用。随后多次会谈并确定在北京、大庆、上海和广州分别建立示范工程。

1998 年，中美两国确定在我国北京（代表北部寒冷地带）、宁波（代表中部夏热冬冷地带）、广州（代表南部亚热带），合作建立三个地源热泵系统的示范工程。北部示范工程是北京食品发酵研究所综合办公楼和专家楼，中部示范工程是宁波雅戈尔工业城，南部示范工程是广州松田职业技术学院。这三个示范工程项目中，两个为地下水源热泵系统，一个为复合式地下水源热泵系统。

2000 年 2 月 10 日，北京示范工程签约，由国际地源热泵协会中国委员会主席徐云生博士进行技术设计。之后地源热泵系统的开发利用在全国得到普遍推广，每年以 10－15％的速度增长。京津地区发展速度最快。据中国地质调查局的资料显示，至 2005 年末，浅层地温能应用面积约 2000 万平方米。2004 年以来，中国水源热泵系统的应用明显加快，由于这项技术比较成熟，在中国将进入大规模推广应用阶段。如今国内的多家大学和研究机构对水源热泵系统都进行了相关研究，如：清华大学、天津大学、重庆大学、天津商学院、山东建工学院、中国科学院广州能源研究所等，其中清华大学经过多年在多工况水源热泵系统的研究已经形成产业化的成果[18~20]。

目前，我国对地源热泵系统已经有了一定的研究基础，但研究方向主要集中在地下水源热泵的设计施工、回灌技术、运行管理、经济性分析、系统运行能耗分析等方面，如李凡[21]讨论了关于热泵技术应用的几个问题，于卫平[22]对回灌技术进行了有关的研究，胡江溢等[23]对北京、辽宁地区的几个案例进行了经济性方面的分析，文远高等[24]对地下水源热泵系统的运行能耗进行了分析。也有关于对地下水源热泵的热运移模拟方面的研究，如张远东[25]等对地下水源热泵进行了采能的水-热耦合数值模拟，但是对我国地源热泵系统适宜性分区及区划方面的文献则较少，相关研究如：刘立才等[26]对北京城市规划区水源热泵系统应用适宜性进行了分区，王亚斌[27]等对天津市水源热泵系统水文地质条件适宜性进行了评价。因此，进

行我国地源热泵系统应用适宜性评价就显得非常必要，只有建立科学的评价指标体系，合理的划分适宜区，才能为今后地源热泵系统的建设提供参考和依据，才能为热泵应用适宜性研究填补空白。

§1.3 研究的主要内容

本文通过分析水文地质因素、场地施工因素、社会经济因素、气象因素、环境保护因素以及热物理性质等影响我国地下水源热泵系统及土壤源热泵系统建设的因素，选择了合适的评价方法-层次分析法，结合上述因素建立了我国地下水源及土壤源热泵系统适宜性评价的指标体系，并对应用地源热泵系统的适宜性进行了分区，进而为区域规划、合理利用浅层地热资源提供了有力的科学依据，为地源热泵系统因地制宜、合理有序的应用提供了参考。本文探讨和研究的主要内容如下：

1. 确定我国地源热泵系统应用适宜性评价的方法。通过研究目前国内外主要的评价方法，选取了进行我国地下水源热泵系统及土壤源热泵系统适宜性评价的最佳方法-层次分析法，并对层次分析法的原理、特点、及评价步骤进行了细致的研究；

2. 建立我国地源热泵系统应用适宜性评价指标体系。通过采取专家意见，合理、正确的选择影响我国地下水源热泵系统及土壤源热泵系统应用适宜性评价的因子，以适宜性评价的理论及方法为基础，在评价指标选取原则的指导下，建立科学的评价指标体系；

3. 进行我国地源热泵系统应用适宜性评价。通过专家打分，确定影响我国地下水源热泵系统及土壤源热泵系统应用因素的分值及各层次各因子的权重；运用 ARCGIS 软件进行空间数据叠加并对适宜性等级进行划分，得出适宜性分区图；对适宜性评价分区图进行分析与判断，对研究区浅层地热资源做出适宜性评价。

§1.4 地源热泵的基本原理

地源热泵是一种利用地下浅层地热资源，既可供热又可制冷的高效新型节能技术。通过输入少量的高品位能源(如电能)，地源热泵可以实现低温位热能向高温位转移。浅层地热资源在中间所起的作用是：冬季作为热泵供暖的热源，而在夏季作为空调的冷源。地源热泵供暖空调系统主要分为三部分：室外地能换热系统、热泵机组和室内采暖空调末端系统。地源热泵根据取热来源不同可分为：1)地表水源热泵系统；2)地下水源热泵系统；3)土壤源热泵系统[27]。本文所进行的适宜性评价主要是针对地下水源热泵和土壤源热泵系统进行的。

1.4.1 地下水源热泵系统的基本原理

由于地层的隔热和蓄热作用，使得储存于其中的地下水温度受地表气温变化的影响较小，特别是较深地层中的水，其温度常年不变，地下水源热泵系统就是利用浅层地下水温度较为稳定的特性，以浅层地下水作为能量的载体，通过热泵实现热量的转移，从而达到对建

筑物进行供热和制冷的目的。

夏季，地下水温度较地表低，可以高效地带走交换产生的热量，热泵系统所起的作用就是将建筑物中的热量转移到地下水源中；而冬季，水源温度较地表高，热泵系统从水源中提取热量，达到给建筑物供暖的目的。由此可见，地下水源热泵系统就是通过消耗少量高品位能量，将地下水中不可直接利用的低品位能量提取出来，变成可以直接利用的高品位能源的装置[28-29]。其制冷及制热模式图如图 1.1 和图 1.2

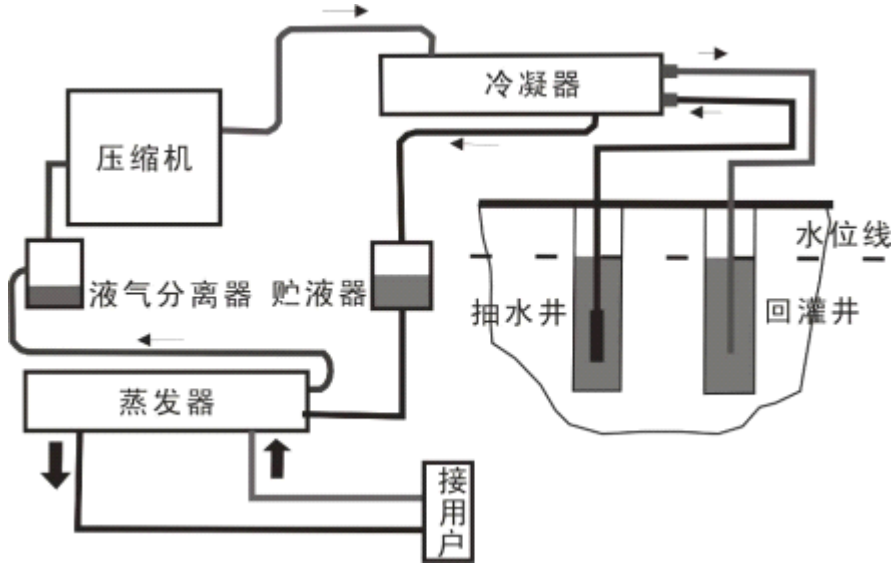


图 1.1 地下水源热泵系统制冷模式图

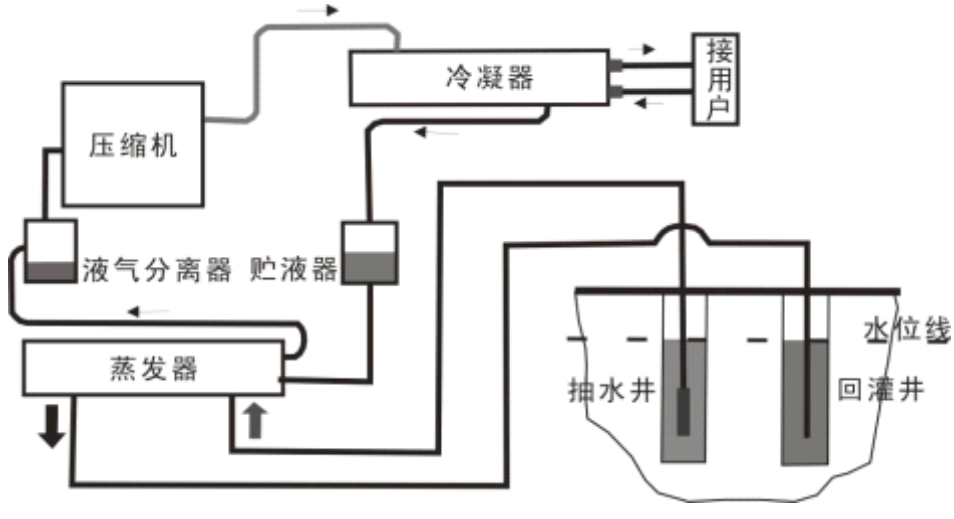


图 1.2 地下水源热泵系统制热模式图

1.4.2 土壤源热泵系统的基本原理

土壤源热泵系统是利用地下岩土中热量的闭路循环系统，通过循环液体在封闭地下埋管中的流动，实现系统与大地之间的传热。土壤源热泵系统保持了地下水源热泵系统利用大地

作为冷热源的优点，同时又不需要抽取地下水作为传热的介质，是一种真正可持续发展的建筑节能的新技术[30]。土壤源热泵系统的热源不是指地热田，而是指一般的常温土壤，对地下热源没有特殊要求，可在我国绝大部分地区应用[31]。土壤源热泵的原理图如图 1.3、1.4。

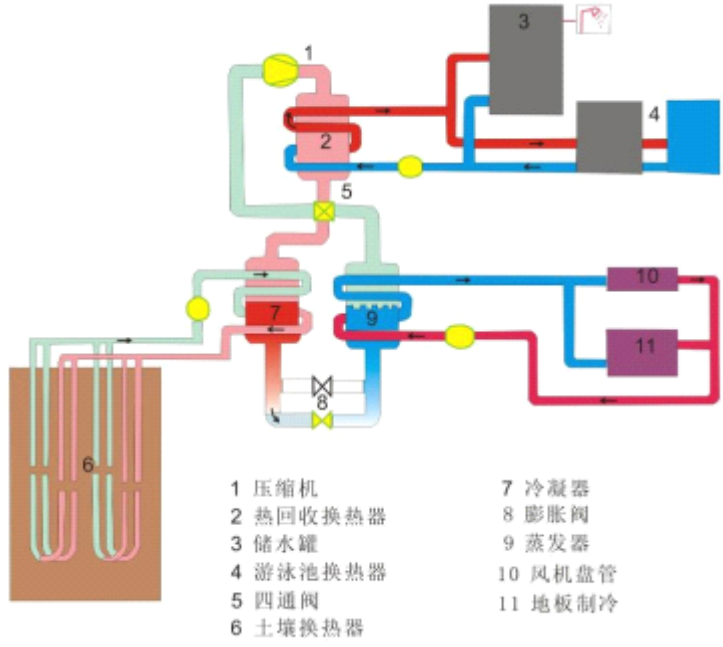


图 1.3 土壤源热泵系统制冷模式图

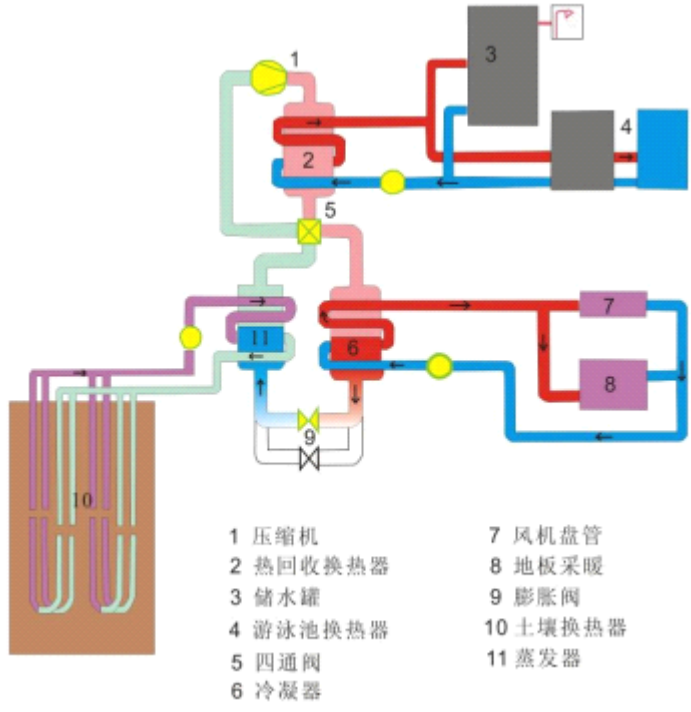


图 1.4 土壤源热泵系统制热模式图

第二章 研究区概况

§2.1 自然地理条件

2.1.1 地理位置

中国位于亚洲东部，太平洋西岸。陆地面积 960 万平方公里。中国领土北起漠河以北的黑龙江江心（北纬 53°30′），南到南沙群岛南端的曾母暗沙（北纬 4°），跨纬度 49 度多；东起黑龙江与乌苏里江汇合处（东经 135°05′），西到帕米尔高原（东经 73°40′），跨经度 60 多度。我国从南到北，从东到西，距离都在 5000 公里以上。

中国陆地边界长达 2.28 万公里，东邻朝鲜，北邻蒙古，东北邻俄罗斯，西北邻哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦，西和西南与阿富汗、巴基斯坦、印度、尼泊尔、不丹等国家接壤，南与缅甸、老挝、越南相连。东部和东南部同韩国、日本、菲律宾、文莱、马来西亚、印度尼西亚隔海相望。

中国大陆海岸线长约 1.8 万公里。海岸地势平坦，多优良港湾，且大部分为终年不冻港。中国大陆的东部与南部濒临渤海、黄海、东海和南海。海域面积为 473 万平方公里。渤海为中国的内海，黄海、东海和南海是太平洋的边缘海。

在中国海域上，分布着 5400 个岛屿。其中最大是台湾岛，面积 3.6 万平方公里；其次为海南岛，面积 3.4 万平方公里。位于台湾岛东北海面上的钓鱼岛、赤尾屿，是中国最东的岛屿。散布在南海上的岛屿、礁、滩总称南海诸岛，为中国最南的岛屿群，依照位置不同称为东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛和南沙群岛，中国的地理位置图见图 2.1。

2.1.2 地形、地貌

我国的地势西高东低，如果通过北纬 32°线自西向东作一幅中国地形剖面图，从西部的大高原，到中部的盆地，再到东部平原，西高东低，呈阶梯状逐级下降的地势特点十分明显。我国地形、地貌各异，几乎各种地形、地貌都有，包括平原、高山、湖泊、丘陵、高原、沙漠等。我国山地、高原和丘陵约占陆地面积的 67%，盆地和平原约占陆地面积的 33%。山脉多呈东西和东北—西南走向，主要有阿尔泰山、天山、昆仑山、喀喇昆仑山、喜马拉雅山、阴山、秦岭、南岭、大兴安岭、长白山、太行山、武夷山、台湾山脉和横断山脉等山脉。较大的平原如东北平原、华北平原、长江中下游平原；主要的高原有内蒙古高原、云贵高原、黄土高原，主要的丘陵有：辽东丘陵、山东丘陵、东南丘陵；主要的盆地如：四川盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地等；主要的湖泊如：青海湖、鄱阳湖、洞庭湖、

太湖、天池、巢湖、洪湖、呼伦湖、洪泽湖、纳木错湖等。我国的地貌图见图 2.2。

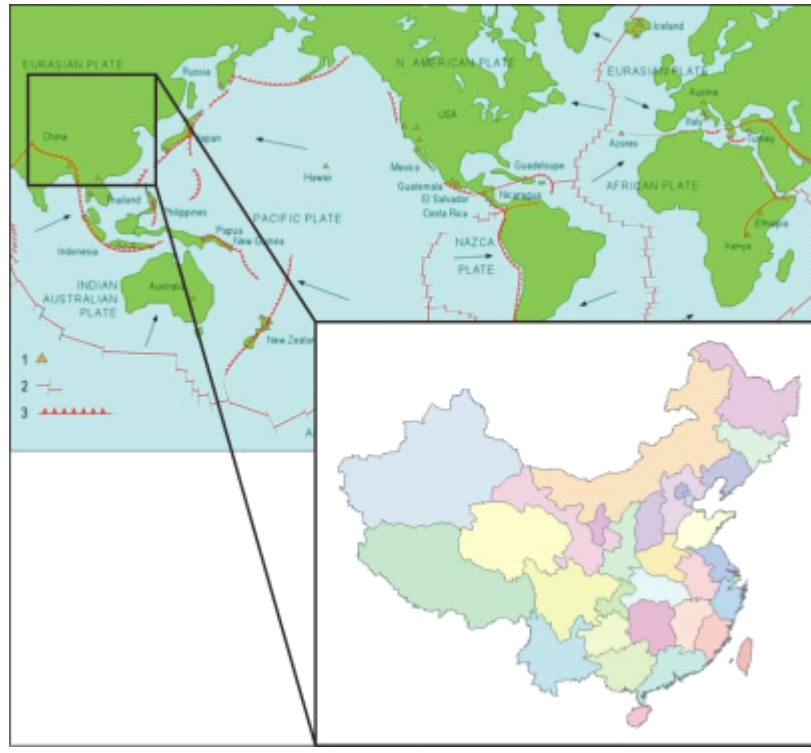


图 2.1 中国的地理位置图

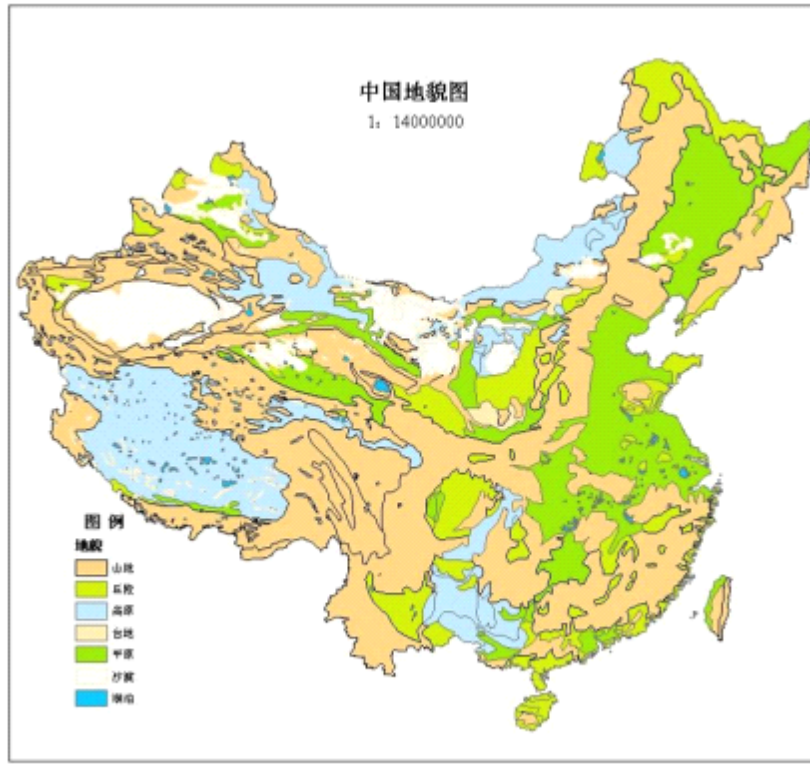


图 2.2 中国地貌图

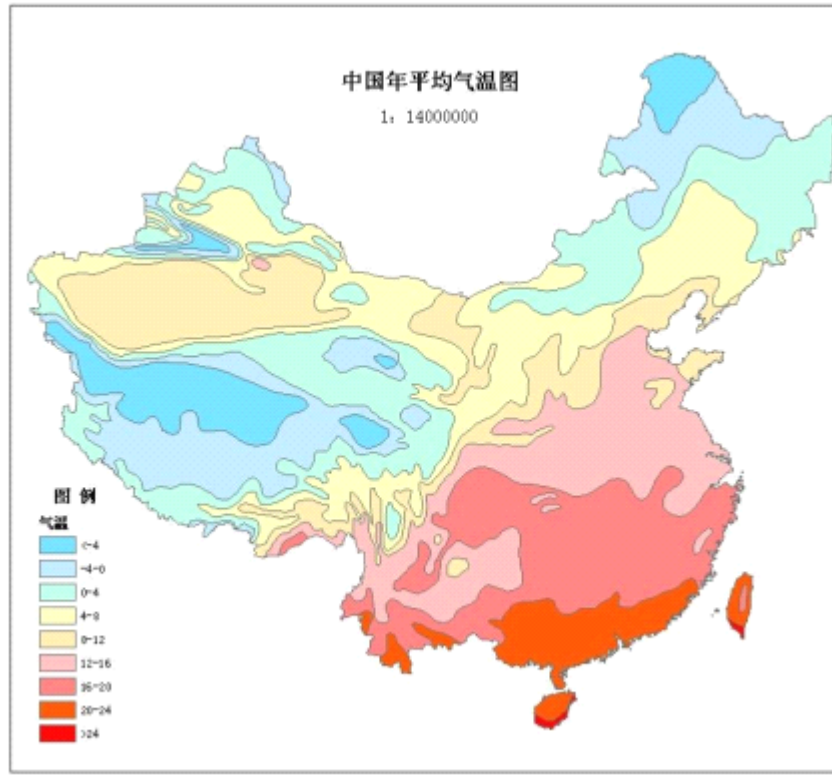


图 2.3 中国年平均气温分布图

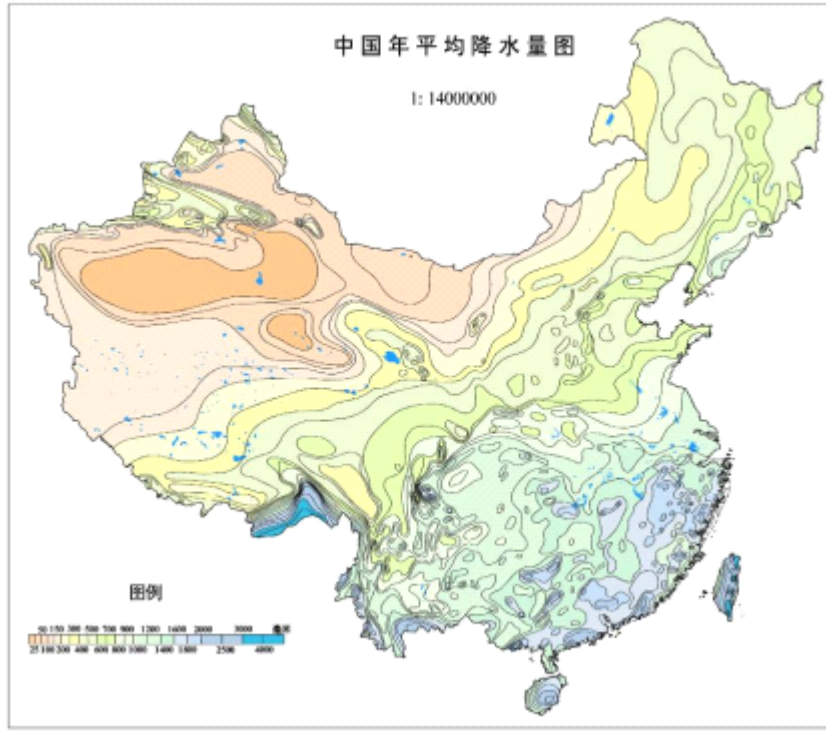


图 2.4 中国年平均降水量分布图

2.1.3 气象条件

中国的大部分地区位于北温带，气候温和，四季分明，适宜人类居住与生存。大陆性季风气候是中国气候的主要特点。每年 9 月至次年 4 月，干寒的冬季风从西伯利亚和蒙古高原吹来，寒冷干燥，南北温差较大。每年的 4 月至 9 月，暖湿的夏季风从东部和南部海洋吹来，普遍高温多雨，南北温差较小。中国从南至北呈现出赤道带、热带、亚热带、暖温带、温带、寒温带六个温度带。由于我国地域辽阔，不同地区年平均气温也有很大的差异，东北、西北温度偏低，而东南西南温度偏高，我国的内蒙、黑龙江、西藏、青海、新疆等部分地区年平均气温低于零下 4℃，而我国的海南南部及台湾南部等地区，年平均气温高于 24℃。我国的年均气温分布图见图 2.3。

受季风气候的影响，我国降雨分布也极不均匀，我国降水量地域分布总的趋势是：从东南沿海向西北内陆逐渐减少。台湾、福建、海南、广东、浙江等省年降水量一般在 1500～2500 毫米(台湾省部分地方可超过 4000 毫米)，长江中下游地区在 1200～1400 毫米之间，淮河流域和秦岭山地在 750～1000 毫米之间，黄河下游、渭河流域在 500～750 毫米之间，其他一些地方一般在 200～500 毫米之间，局部地方达 750～1000 毫米。在塔里木盆地等沙漠干旱地区，年降水量仅有几十毫米，其中新疆的托克逊年最少降水量只有几毫米。我国的年均降水量分布图见图 2.4。

2.1.4 社会经济状况

我国是一个发展中国家，改革开放以来，中国以世界最大的人口规模，在近 30 年的时间内实现了经济以年均 9.6%的高速增长，使中国经济从解决温饱到基本实现小康，再向全面小康迈进。特别是进入新世纪以后，在经济总量大幅增加的前提下，仍然继续保持了年均近 10%（9.76%）的速度。国家统计局数字显示，2008 年我国全年国内生产总值达到 300670 亿元，比上年增长 9.0%。全年居民消费价格上涨 5.9%，涨幅提高 1.1 个百分点，农业增长 5.4%，全年贸易顺差 2955 亿美元，外汇储备余额达到 1.95 万亿美元，全年城镇居民人均可支配收入 15781 元，比上年增长 14.5%。我国社会主义市场经济体制已经初步建立，市场在资源配置中的基础作用显著增强，宏观调控体系日趋完善；以公有制经济为主体、个体和私营等非公有制经济共同发展的格局基本形成，经济增长方式逐步由粗放型向集约型转变。按预定计划，到 2010 年，中国将建立起比较完善的社会主义市场经济体制；到 2020 年，建立起比较成熟的社会主义市场经济体制。随着我国对外开放不断扩大，国际化进程的加快，改革不断深化，中国经济将在较长的一段时期内保持持续快速的发展。

中国是世界上人口最多的国家，但由于各地经济、历史发展的不平衡性和地理环境的特殊限制，我国人口分布很不平衡，总的来说，我国人口分布大体可以以黑河—腾冲为界限线，东部人口密度大，尤其是沿海、平原地区最大可大于 1000 人/km^2，西部内陆人口密度小，平原、高原盆地等地势相对平坦、水力资源丰富的地区人口密度大，而山地等地形起伏较大的地区人口密度小。我国的人口密度分布图见图 2.5。

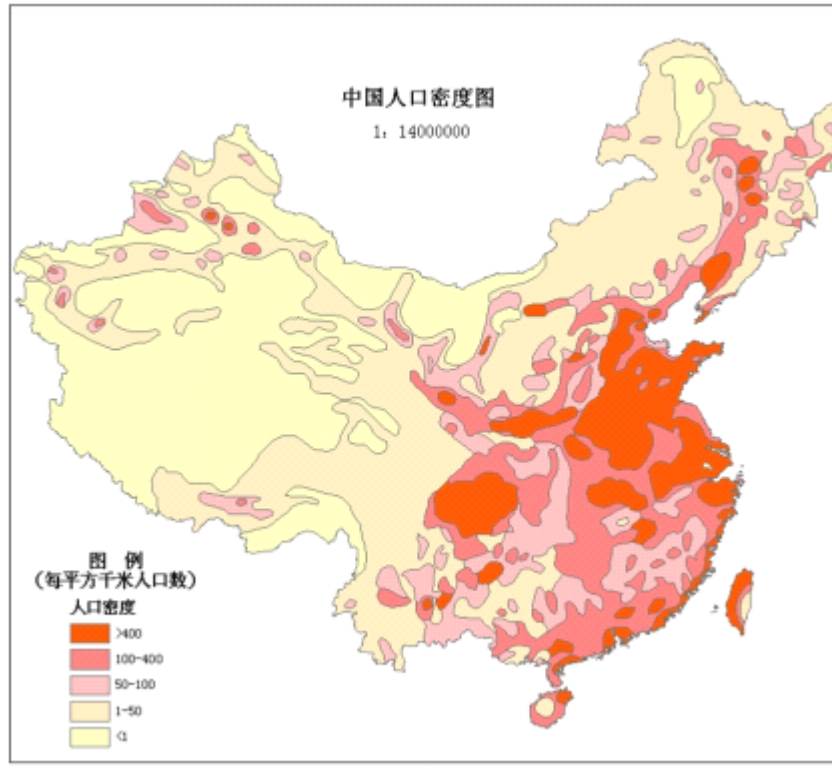


图 2.5 中国人口密度分布图

§2.2 区域水文地质条件

2.2.1 地下水资源分布

我国地下水资源分布的主要特点是：南方多，北方少。南方地下水平均年资源量占全国地下水资源总量的 69.2%，而北方仅占 30.8%；平原区地下水资源模数一般大于其周围山丘区的地下资源模数；平原区地下水资源量主要分布在北方，山区地下水资源量主要分布在南方。北方平原区地下水资源量占全国平原区地下水资源量的 78%；南方山丘区地下水资源量占全国山丘区地下水资源量的 79%。南方山丘区地下水平均资源模数是北方山丘区地下水平均年资源模数的 4 倍；南方平原区地下水平均年资源模数是北方平原区地下水平均年资源模数的 2.5 倍。

就富水程度来说，我国的三江、松嫩、辽河、黄淮海、河套、银川平原等平原地区、河西走廊、新疆的吐鲁番－哈密、伊犁、渭河谷地、汉中盆地，山西的太原、大同等山间盆地地区地下水富水性都较好，云南、广西、四川等基岩山区山间盆地及岩溶地区地下水富水性也较好。阿尔泰山和准噶尔盆地山前丘陵地区地下水富水程度也相对较强。我国地下水富水性分布图见图 2.6。

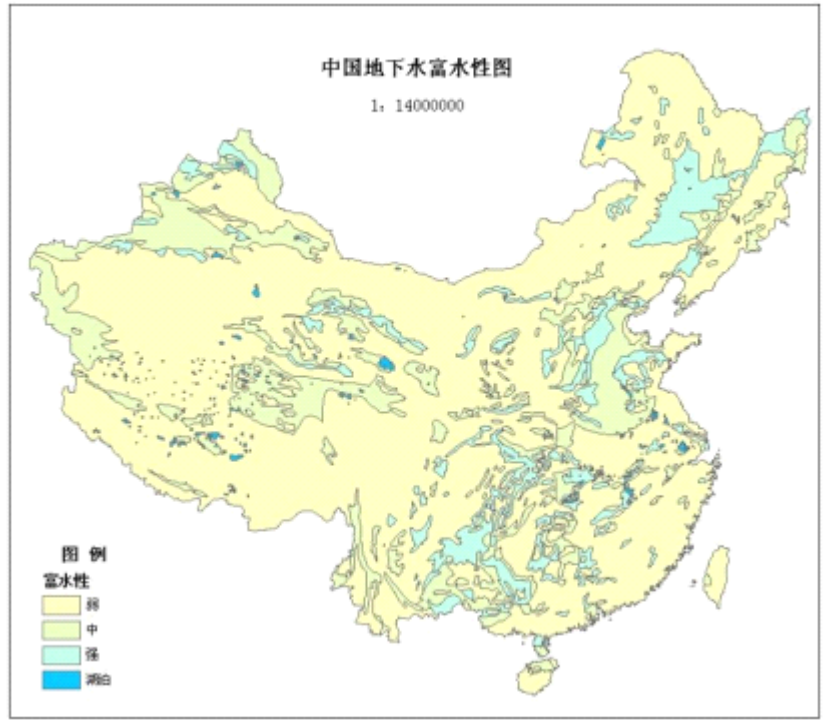


图 2.6 中国地下水富水性分区图

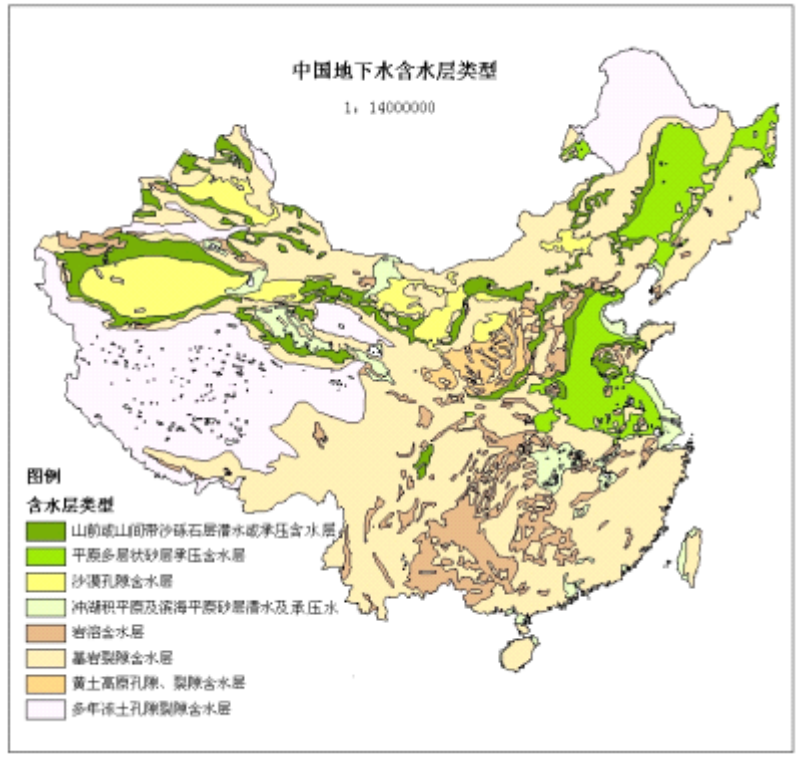


图 2.7 中国地下水含水层类型分布图

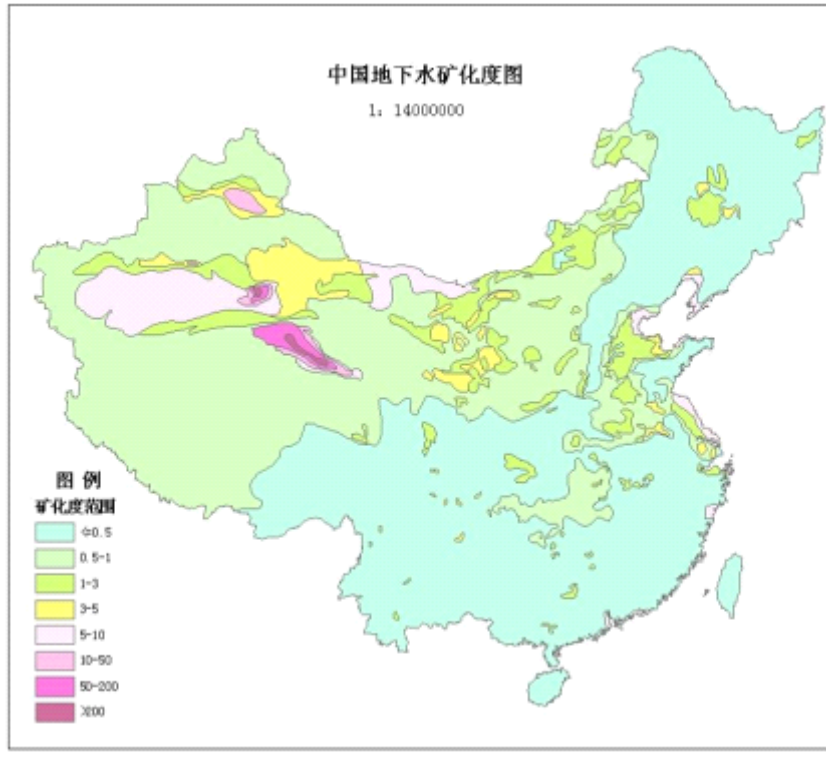


图 2.8 中国地下水矿化度分区图

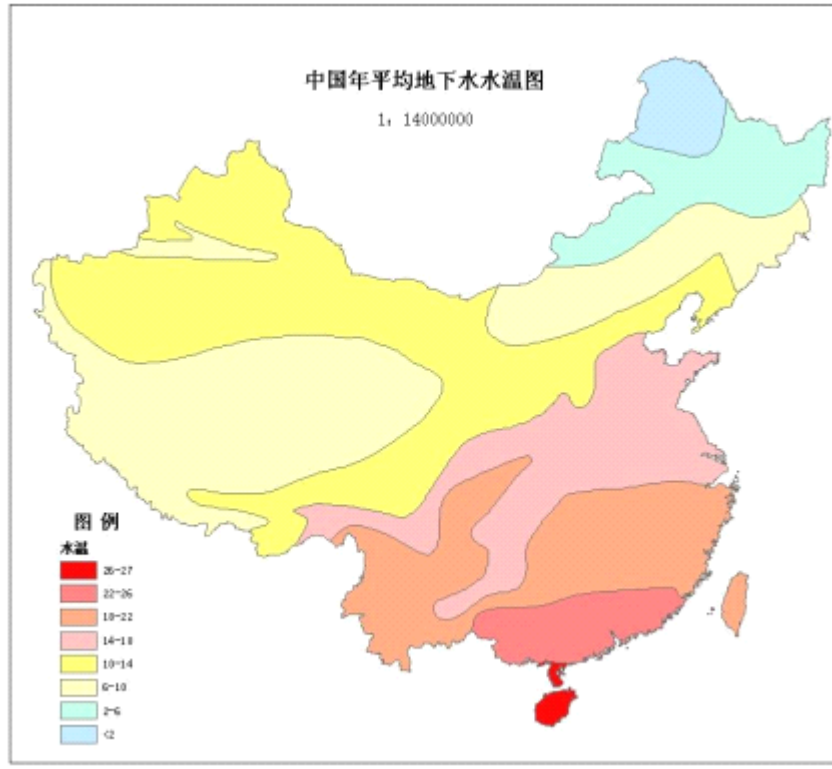


图 2.9 我国年平均地下水水温分区图

2.2.2 地下水水温

由于我国幅员辽阔，气候类型也呈现多样性，加上地球内部热量的传递，从而使得我国地下水水温也有一定的差异：我国地下水水温最高的地区位于海南，年平均地下水水温可达到27℃。我国地下水温最低的地区位于东北，最低可低于2℃。我国年平均地下水水温所呈现的特点是自南向北逐渐降低，东北地区低于西北地区。我国年均地下水水温分布图见图2.9。

§2.3 环境地质问题

由于地下水、矿产资源的开采及地下工程的建立，我国产生了一系列的环境地质问题。主要有地面沉降、地面塌陷、地裂缝等

2.3.1 地面沉降

地面沉降又称为地面下沉或地陷。它是在人类工程经济活动影响下，由于地下松散地层固结压缩，导致地壳表面标高降低的一种局部的下降运动。地面沉降是大多数平原城市已经面临或具有潜在隐患威胁的一种城市地质灾害[32]。早在1999年，北京累计沉降量大于100毫米的面积达到1826平方公里，最大沉降量约722毫米。其产生原因主要是由于城市化进程加快，经济建设和人们生活需要开采大量的地下水和高大建筑群的成片开发建设，直接导致支撑地面力量平衡的地层承载力下降而引起的。我国地面沉降主要分布在上海、河北等地。

2.3.2 地裂缝

由于过量开采地下水，河北平原、陕西西安、山西大同等地区已经发生地裂缝，对城市基础设施建设构成严重威胁。在西安，城市地下水位的持续下降，诱发和加剧了地面沉降和地裂缝的发展，全市形成了7处比较大的水位漏斗区，出现了11条较大的地裂缝。河北省的平原区由于过量开采地下水，疏干含水层造成了地面沉降和地裂缝等地质灾害隐患，目前已影响到7个市、近70个县（市），重点分布在沧州、衡水、廊坊等地的古、现代河道和农灌区[33]。

2.3.3 地面塌陷

地面塌陷是指地表岩、土体在自然或人为因素作用下向下陷落，并在地面形成塌陷坑（洞）的一种动力地质现象。我国岩溶塌陷分布广泛，从南到北，从东到西都有发育，但主要分布于河北、江西、湖北、湖南、四川、云南、广东、广西等省区。另外，华南岩溶塌陷

多而强，华北相对少且弱一些。山西、安徽、江苏等省是采空塌陷的严重发育区。但几乎在全国的采煤、采矿区均有出现，尤其是个体采矿业比较发达、而法律制度不健全且执行不力的地区更容易发生[34]。据不完全统计，黄土湿陷主要见于河北、甘肃、宁夏、河南等黄土分布省区[35]。我国的环境地质图见图 2.10。



图 2.10 中国环境地质图

第三章 地源热泵系统应用适宜性评价方法

评价，就是指从被评价主体中提出本质属性并转换成评价尺度，以实现对评价对象的度量。一般而言，评价就是按照确定的目标，在对被评对象进行系统分析的基础上，测定被评对象的有关属性并将其转变为主观效用的过程。一个完整的评价系统是由评价对象、评价指标、评价原则、评价群体(专家组)、评价方法和评价程序所构成。

评价工作包括两个基本点：①在评价目标的指导下，对被评对象进行系统的分析，进而确定出评价指标体系及相应的权重体系；②对被评对象的相关属性进行测定，并将其转化为评价者的主观效用。评价指标及评价方法是影响评价质量的关键性因素。评价过程中，各个评价指标相对于评价对象的权重合适与否，是影响评价结果可靠性的重要因素。因此，评价是主观与客观相结合的过程，是决策者进行决策的基础。其遵循的基本原则是：①保证评价的客观性；②保证各评价方案具有可比性；③保证评价指标体系具有全面性；④评价目标必须与国家的方针、政策及法令要求一致。

目前国内外的评价方法多种多样，但是大多数仍处于理论研究阶段，并且较多地用在某一单方面的专项评价中。最主要和常用的方法包括：专家评价法、综合指数法、模糊综合评判法、因子分析法、熵值法、层次分析法等。其中，层次分析法（The Analytical Hierarchy Process，简称 AHP）是一种理论发展比较完善的方法。层次分析法是著名的运筹学家萨蒂于 20 世纪 70 年代提出的,是强有力的系统分析—运筹学方法[36]。它把人的思维过程层次化、数量化，并用数学方法为分析、决策、预报和控制提供定量的依据，是一种定性与定量相结合的方法。层次分析法是将要研究的复杂问题作为一个大系统，通过对系统的多个因素的分析，划分出各因素相互联系的有序层次；然后再请专家对每一层次的各因素进行客观的判断，并相应给出相对重要性的定量表示，建立数学模型，计算出每一层次全部因素的相对重要性的权重，加以排序；最后根据排序的结果进行规划决策和选择解决问题的措施。因此 AHP 是进行适宜性评价较理想的方法[37]。下面简单介绍一下专家评价法、综合指数法、模糊综合评判法、因子分析法、熵值法，并着重介绍层次分析法。

§3.1 常用评价方法

3.1.1 专家评价法

专家评价法是出现较早且应用较广的一种评价方法，是一种采用规定的程序对具有相关专业知识的专家们进行调查，依靠专家的知识和经验，由专家通过综合分析研究对问题做出判断、评估的一种方法[38]。它是在定量和定性分析的基础上，以打分等

方式做出定量评价，其结果具有数理统计特性。其最大的优点在于，能够在缺乏足够统计数据和原始资料的情况下，做出定量估计。专家评价法的主要步骤是：首先根据评价对象的具体情况选定评价指标，对每个指标均定出评价等级，每个等级的标准用分值表示；然后以此为基准，由专家对评价对象进行分析和评价，确定各个指标的分值，采用加法评分法、乘法评分法或加乘评分法求出每个评价对象的总分值，从而得到评价结果。

专家评价的准确程度主要取决于专家的阅历经验以及知识丰富的广度和深度。要求参加评价的专家对评价的系统具有较高的学术水平和丰富的实践经验。总的来说，专家评分法具有使用简单、直观性强的特点，但其理论性和系统性尚有欠缺，有时难以保证评价结果的客观性和准确性。

3.1.2 综合指数法

综合指数法是将多个不同性质、不同类别、不同水平、不同计量单位的指标综合成一个无计量单位的指标，并将不同侧面的质量问题进行综合分析、比较的一种质量评价方法，反映多种不同事物的平均变动方向和程度[39]，也就是说它是在确定一套合理的指标体系的基础上，对各项指标个体指数加权平均，计算出综合值，然后对评价对象进行综合评价的。它的主要步骤就是：首先根据评价对象的具体情况选定评价指标；然后将一组相同或不同指标数值通过统计学处理，使不同计量单位、性质的指标值标准化；最后转化成一个综合指数，进行综合评价。综合指数值越大，工作质量越好，指标多少不限。

3.1.3 模糊综合评判法

模糊综合评判法是运用模糊数学的思想和方法，对现实世界中不易明确界定的事物进行综合评判的一种数学方法。模糊数学诞生于 1965 年，它的创始人是美国自动控制专家查德（L.A.Zadeh）教授。30 多年来，模糊数学理论发展迅速，应用广泛。 模糊综合评判法就是应用模糊数学中的模糊集理论对系统进行综合评价的一种方法，通过模糊评价能获得各种替代方案优先顺序的有关信息，以供决策者参考。

20 世纪 80 年代初，汪培庄提出了综合评判模型，此模型以它简单实用的特点迅速波及到国民经济和工农业生产的方方面面，广大实际工作者运用此模型取得了一个又一个的成果。与此同时，还吸引了一些理论工作者对此模型进行深化和扩展研究，出现了一批诱人的成果，诸如：多级模型、算子调整、范畴统观等等。而且，针对实际应用中模糊综合评判模型常遇到的一些问题，对其进行了改进。

具体来说，模糊综合评价法的应用步骤如下：

（1）确定评判的因素集 U＝{u1，u2，u3，…，un}

（2）确定评判的评价（评语）集 V＝{v1，v2，v3，…，vn}

（3）建立从 U 到 V 的单因素评判矩阵 R

（4）确定指标权重
（5）作出评判结果
（6）得出评判结论[40]

3.1.4 因子分析法

因子分析的基本目的就是用少数几个因子去描述许多指标或因素之间的联系，即将相关比较密切的几个变量归在同一类中，每一类变量就成为一个因子（之所以称其为因子，是因为它是不可观测的，即不是具体的变量），以较少的几个因子反映原资料的大部分信息。因子分析的概念最初起源于 20 世纪初由 KarlPearson 和 Charles Spearmen 等人设计的关于智力测验的统计分析。

因子分析法的基本思想是：在对样本发展水平进行结构分析或综合评价时，往往会面对 5 个以上的变量或维度的情况，由于收集到的指标通常都会存在或多或少的相关性，变量间信息的高度重叠和高度相关会给统计方法的应用带来很多障碍，这时就可以根据变量间的相关程度高低对原始变量进行重新组合，将其减缩或合并成少数几类变量。一类变量作为一个公共因子，一个公共因子代表一组相关程度较高的原始变量。这样对原始变量的研究就转化成对公共因子关系的研究，由于公共因子的个数较原始变量少了许多，使得计算工作量大大的减少。所以，因子分析既可以大大减少参与数据建模的变量个数，同时又不会造成信息的大量丢失，是一种降低变量维数的有效方法。由于原变量重组出来的因子之间线性关系较弱，因子参与建模能够有效解决变量多重复共线性给分析应用带来的诸多问题。比如，运用这种研究技术，我们可以方便地找出影响消费者购买、消费以及满意度的主要因素是哪些，以及它们的影响力（权重）；通过应用此技术，我们还可以为市场细分做前期分析[41]。

3.1.5 熵值法

设有m个待评方案，有n项评价指标，形成原始指标数据矩阵$X = (X_{ij})_{m\times n}$ ，对于某项指标x_j，指标值xij的差距越大，则该指标在综合评价中所起的作用越大；若某项指标的指标值全部相等，则该指标在综合评价中不起作用。信息论中，信息熵 $H(X) = -\sum p(x_i)\ln p$ （x_i）是系统无序程度的度量，信息是系统有序程度量，两者绝对值相等，符号相反。某项指标的指标值变异程度越大，信息熵越小，该指标提供的信息量越大，该指标的权重也就越大；反之，某项指标的指标值变异程度越小，信息熵越大，该指标提供的信息量就越小，该指标的权重也就越小。所以，可以根据各项指标值的变异程度，利用信息熵这个工具，计算出各指标的权重，从而为多指标综合评价提供依据[42]。

§3.2 层次分析法

3.2.1 层次分析法的基本原理

- 分解：将一个复杂问题分解成若干要素，并将其构造成不同类组放置到相应的层次上
- 成对对比：产生成对对比矩阵（判断矩阵），用于对所有评价因子和元素得出权重或分值，这个过程需要专家参与
- 层次合成：把各个对比综合起来，得出最后的评价结果。

将 AHP 原理归结为三个定理：

- 倒数定理：如果两个元素 A 和 B 相对目标 C 的成对比较结果是 R，而 B 和 A 相对 C 的比值一定是 1/R。
- 同质性定理：同一层次上的因素或因子必须具有同质性，即他们必须是在同一个量级上进行比较。
- 各层次判断的独立性：当决策时，应该慎重考虑此定理。因为人们在评价过程中倾向于参考下一层的因子。

3.2.2 层次分析法的特点

层次分析法是一种定性与定量分析相结合的多因素决策分析方法，是分析多目标多准则复杂系统的有力工具。运用这种方法，决策者通过将复杂问题分解为若干个层次和若干因素，并按上一层的准则对其下一层次的各要素进行分别比较，就可以得出各要素的重要性程度权重，给定定量指标，然后求解各层次各要素相对重要性权值，最后做出综合分析和评判。它的特点是：

（1）该方法既包含了主观的逻辑判断和分析，又依靠客观的精确计算和推演，从而使决策过程具有很强的条理性和科学性，能处理许多传统的最优化技术无法着手的实际问题，应用范围比较广泛；

（2）人们在分析解决问题时，习惯把问题看成一个系统，在研究系统各个组成部分相互关系及系统所处环境的基础上进行决策。相当多的系统在结构上具有递进层次的形式。层次分析法就是以系统知识为基础将待决策问题分解成若干层次的，整个过程体现出分解、综合的系统思维方式，也充分体现了辩证的系统思维原则。

（3）该方法所需要的定量化数据较少，但对问题的本质、问题所涉及到的因素及其内在关系分析得较透彻清晰。用层次分析法进行决策，大大提高了决策的科学性、有效性和可行性。

3.2.3 层次分析法的一般步骤

层次分析法应用范围十分广泛，常常被运用于多目标、多准则、多要素、多层次的非结构化的复杂决策问题，特别是战略决策问题的研究，如在能源系统分析、教育管理、科研成果评价、城市规划、经济管理、社会科学等众多领域中都得到了广泛的应用。运用层次分析法进行决策，一般可分为 4 个步骤：

3.2.3.1 递阶层次结构的建立

在研究经济、社会等复杂的实际问题时，应首先把问题条理化、层次化，构造出一个层次分析的结构模型。在模型中，复杂问题被分解为人们称之为元素的组成部分。这些元素按属性再分为若干组，形成不同层次。同一层次的元素作为准则对下一层的某些元素起支配作用，同时它又受上一层次元素的支配。

一般情况下，评价层次分为三层：

(1)综合层：这一层次中只有一个元素，它是问题的预定目标或最终理想结果，因此也称为目标层；

(2)中间层：这一层次包括为实现目标所涉及的中间环节及所需要考虑的准则。该层可由若干层次组成，因而有准则和子准则之分。这一层也称为准则层；

(3)要素指标层：这一层次包括为实现目标可供选择的各种措施、决策方案等，因此也称为措施层或方案层。

上层元素对下层元素的支配关系所形成的层次结构我们称为递阶层次结构。当然上一层的元素可以支配下一层的所有元素，但也可能只支配其中的部分元素。层次结构如图 2.1 所示。

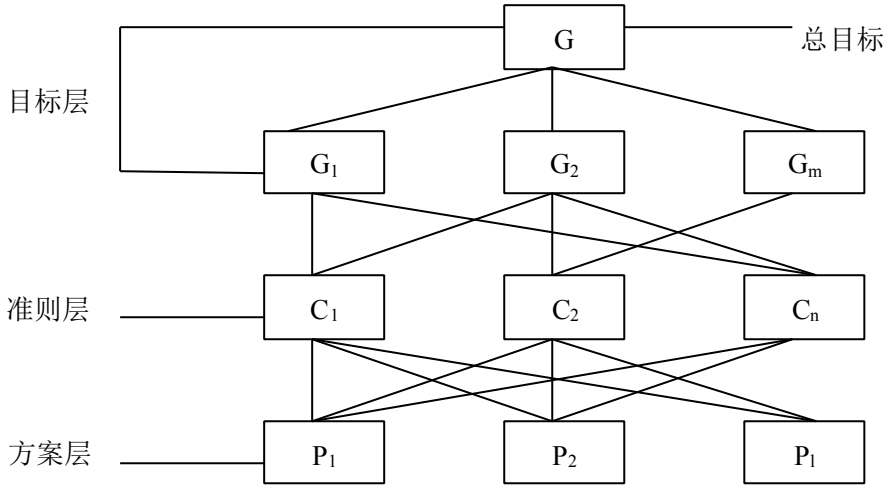


图 3.1　层次分析法的递阶层次结构图

递阶层次结构中的层数与问题的复杂程度及需要分析的详尽程度有关，可不受限制。每一层次中各元素所支配的元素最好不要超过 9 个，因为支配的元素过多会给两两比较判断带

来困难。一个好的层次结构对于解决问题的好坏程度极为重要，因而层次结构建立得好坏与决策者对问题的认识是否全面和深刻有很大关系。

3.2.3.2 构造两两比较判断矩阵

在递阶层次结构中，设上一层元素 C 为准则，所支配的下一层元素为 A1，A2，…An，我们要确定元素 A1，A2，…，An 对于准则 C 相对的重要性即权重。可分两种情况：

(1)如果 A1，A2，…，An 对 C 的重要性可定量(如直接费用、质量等)，其权重可直接确定。

(2)如果问题复杂，A1，A2，…，An 对于 C 的重要性无法直接定量，而是定性的，确定权重用两两比较法。针对准则 C, Ai 与 Aj 哪一个重要，重要的程度怎样，层次分析法提出了对于矩阵元素 ai, aj 之间的比较程度问题。当比较两个可能具有不同性质的因素对于上层因素的影响时，采用怎样的相对尺度 aij 较好?萨蒂等人通过研究，提出了采用 1－9 级标度法，aij 的取值范围为 1，2，…,9 它的其互反数 1，1/2，1/9。在 9 级标度法中 aij 值与被比较元素的相对重要程度之间的对应关系如下:

A_i 与 A_j 相比同等重要　　$a_{ij}=1$　　$a_{ji}=1$

A_i 与 A_j 相比稍微重要　　$a_{ij}=3$　　$a_{ji}=\frac{1}{3}$

A_i 与 A_j 相比明显重要　　$a_{ij}=5$　　$a_{ji}=\frac{1}{5}$

A_i 与 A_j 相比非常重要　　$a_{ij}=7$　　$a_{ji}=\frac{1}{7}$

A_i 与 A_j 相比极端重要　　$a_{ij}=9$　　$a_{ji}=\frac{1}{9}$

如果被比较元素的相对重要程度介于上述判断相邻两种判断之间，aij 可取 2，4，6，8。相应地，aji 取 1/2，1/4，1/6，1/8。但这里要注意的是，A 中的元素不具传递性，即不要求满足等式 ajk=aik。层次分析法对这种判断允许有一定的偏差。当然，如果偏差太大就不能通过一致性检验，需重新构建矩阵。所以在实际判断时应采取个人与多人、专业与专家等相结合的方式，减少随意性。这样，就可以建立以 C 为判断准则的元素 A1，…An 间两两比较判断矩阵。如果判断矩阵记作 A，其矩阵形式如下:

$$A=\begin{bmatrix} & A_1 & A_2 & \cdots & A_j & \cdots & A_{jn} \\ A_1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ A_2 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Ai & a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ An & a_{n1} & an_2 & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}1)$$

矩阵中 A 的元素 a_{ij} 反映针对准则 C 元素 Ai 相对于 Aj 的重要程度。可以看出，矩阵 A

是一个互反矩阵 aij（其中 i=1，2，…，n；j=1，2，…，n)有如下性质：

$$a_{ij} > 0 \qquad a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}} \qquad a_{ii} = 1 \tag{3-2}$$

称判断矩阵 A 为正互反矩阵。由它所具有的性质知，一个 n 个元素的判断矩阵只需给出其上(或下)三角的 n(n-1)/2 个元素就可以了。即只需作 n(n—1)/2 个比较判断即可。

若判断矩阵 A 的所有元素满足

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik} \tag{3-3}$$

则称 A 为一致性矩阵。不是所有的判断矩阵都满足一致性矩阵，也没有必要这样要求，只是在特殊情况下才有可能。

3.2.3.3 **单一准则下元素相对权重的计算**

已知 n 个元素 A1，A2，…An 对于准则 C 的判断矩阵为 A，求：A1，A2，…，An 对于准则 C 的相对权重 $\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_n$，即向量矩阵 $(\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_n)^T$。

计算权重方法有多种，常用的方法主要有：

1、特征根法(简记 EM)。

$$AW = \lambda_{MAX} W \tag{3-4}$$

其中：λ_{max} 是 A 的最大特征根，W 是相对应的特征向量，所得到的 W 经归一化后就可以得到权重向量或等别标准化分值。特征根法在层次分析法中提出较早，应用广泛，它对层次分析法的发展在理论上有特别重要的意义。

2、根法(即几何平均法)。

将 A 的各个行向量采用几何平均，然后归一化，得到的行向量就是权重向量。其公式为

$$\omega_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n} a_{kj}\right)^{\frac{1}{n}}} \qquad i=1，2，…，n \tag{3-5}$$

计算的一般步骤为

1、A 的元素按列相乘得一新向量；

2、将新向量的每个分量开 n 次方；

3、将所得向量归一化后得到权重向量。

3、和法。

取判断矩阵 A 的 n 个行向量归一化后的算术平均值近似作为权重向量，即

$$\omega_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} a_{kj}} \tag{3-6}$$

计算的一般步骤为：

1、A 的元素按行归一化；
2、将归一化后的各行相加；
3、将相加后的向量除以 n 即得权重向量。
同理还可用列和归一化方法计算：

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{kj}} \qquad i=1，2，\ldots，n \tag{3-7}$$

4、对数最小二乘法。

用拟合方法确定权重向量 $W=(\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_n)^T$，使残差平方和

$$\sum_{1\le i<j\le n}\left[\log a_{ij}-\log(\omega_i/\omega_j)\right]^2 \tag{3-8}$$

最小。

5、最小二乘法。

确定权重向量 $W=(\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_n)^T$，使残差平方和

$$\sum_{1\le i<j\le n}\left[a_{ij}-\omega_i/\omega_j\right]^2 \tag{3-9}$$

最小。

3.2.3.4 判断矩阵的一致性检验

在计算单准则下相对权重向量时，还必须进行一致性检验。利用理论进行决策须要借用两两比较判断矩阵进行分析，判断矩阵的合理与否对决策结果将产生直接影响，而衡量判断矩阵是否合理的一个重要依据就是判断矩阵是否一致或是否满意一致。对实际问题进行决策判断时，决策者所构造的判断矩阵往往并非完全一致，这主要有两方面原因：一是由于人在信息、知识、能力等方面的有限性及不确定性因素，其对事物的主观评价同事物本身之间存在一定的偏差。二是由于标度的选取、标度的非连续性等，决策者进行比较判断时不能作出更为详细的区分。

实际上，在判断矩阵的构造中，并不要求判断具有传递性和一致性，即不要求（3-3）式严格成立。这是由客观事物的复杂性和人的认识的多样性所决定的。但判断矩阵必须有大体上的一致性，如果出现“A 比 B 极端重要，B 比 C 极端重要，而 C 又比 A 极端重要”的判断显然是违反常识的。如果出现混乱的经不起推敲的判断矩阵有可能导致决策上的失误。而且上述各种计算排序权重向量（即相对权重向量）的方法当判断矩阵过于偏离一致性时，其可靠程度就值得怀疑了。因此需要对判断矩阵的一致性进行检验。检验步骤如下：

① 一致性指标的计算 C. I.（consistency index）

$$C.I.=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{3-10}$$

② 查找相应的平均随机一致性指标 R. I.（random index）

R. I. 值是查表求得的，见表 3.1 为 1—15 阶正互反矩阵计算 1000 次得到的平均随机一致性指标值。

$$C.R.=\frac{C.I.}{R.I.} \tag{3-11}$$

表 3.1　平均随机一致性指标 R. I.

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
R. I.	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41
矩阵阶数	9	10	11	12	13	14	15	
R. I.	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	

③一致性比例 C. R. 的计算（consistency ratio）

当 C. R. ＜0. 1 时，认为判断矩阵的一致性可以接受。当 C. R. ≥0. 1 时应对判断矩阵做适当修正[43]。

为了讨论一致性需要计算矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$，可用下试计算：

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(AW)_i}{n\omega_i}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\omega_j}{\omega_i} \tag{3-12}$$

3.2.3.5 各层元素对目标层的总排序权重

上面得到的是一组元素对其上一层中某元素的权重向量。最终要得到是各元素，特别是最低层中各方案对于目标的排序权重，即总排序权重，从而进行方案选择。总排序权重要从上而下地将单准则下的权重进行合成，并逐层进行总的一致性检验。

假设 $W^{(k-1)}=\left(\omega_1^{(k-1)},\omega_2^{(k-2)},\cdots,\omega_{n_{k-1}}^{(k-1)}\right)^T$ 表示第 k-1 层上 n_{k-1} 个元素相对于总目标的排序权重向量，$P_j^{(k)}=\left(p_{1j}^{(k)},p_{2j}^{(k)},\cdots,p_{n_{kj}}^{(k)}\right)^T$ 表示第 k 层上 n_n 个元素对第 k-1 层上第 j 个元素为准则的排序权重向量，其中不受 j 元素支配的元素权重取为零。矩阵 $P^{(k)}=\left(P_1^{(k)},P_2^{(k)},\cdots,P_{n_{k-1}}^{(k)}\right)$ 是 $n_n\times n_{k-1}$ 阶矩阵，表示第 k 层上元素对第 k-1 层上各元素的排序。那么第 k 层上元素对目标的总排序 $W^{(k)}$ 为

$$W^{(k)}=\left(\omega_1^{(k)},\omega_2^{(k)},\ldots\omega_{n_k}^{(k)}\right)^T=P^{(K)}W^{(k-1)} \tag{3-13}$$

或
$$\omega_i^{(k)}=\sum_{j=1}^{n_{k-1}}p_{ij}^{(k)}\omega_j^{(k-1)} \qquad i=1，2，…，n \tag{3-14}$$

并且一般公式为
$$W^{(k)}=P^{(k)}P^{(k-1)}\cdots W^{(2)} \tag{3-15}$$

其中 $W^{(2)}$ 是第二层上元素的总排序向量，也是单准则下的排序向量。

从上到下逐层进行一致性检验：若已求得 k-1 层上元素 j 为准则的一致性指标 $C.I._j^{(k)}$，平均随机一致性指标 $R.I._j^{(k)}$，一致性比例 $C.R._j^{(k)}$，j=1，2，…，n_{k-1}, 则 k 层的综合指标为：

$$C.I.^{(k)}=\left(C.I._1^{(k)},\cdots,C.I._{n_{k-1}}^{(k)}\right)W^{(k-1)} \tag{3-16}$$

$$R.I._{\cdot}^{(k)} = \left(R.I._{\cdot 1}^{(k)}, \cdots, R.I._{\cdot n_{k-1}}^{(k)}\right) W^{(k-1)} \tag{3-17}$$

$$C.R._{\cdot}^{(k)} = \frac{C.I._{\cdot}^{(k)}}{R.I._{\cdot}^{(k)}} \tag{3-18}$$

当 $C.R._{\cdot}^{(k)} < 0.1$ 时，认为递阶层次结构在 k 层水平以上的所有判断具有整体满意的一致性。否则就要对各层次的各个判断矩阵进行重新调整，直至层次总排序的一致性检验达到要求为止[44]。

第四章 地源热泵系统应用适宜性评价指标体系

地源热泵系统是一个复杂的系统，它不仅与区域浅层地热资源的时空分布有关，而且受区域的人口、社会经济、地质环境以及区域浅层地热能的开发利用程度等诸多因素的制约。要建立地源热泵系统，首先需要构建一套能够把影响地源热泵系统建设的各要素进行量化的评价指标体系，进行地源热泵系统应用适宜性评价，以指导地源热泵系统的建设。

目前我国地源热泵系统应用评价指标体系的研究尚处于探索阶段，现阶段的研究多着眼于地源热泵系统的设计施工、回灌技术、运行管理、经济性分析、系统运行能耗分析等方面，而对我国地源热泵适宜性评价方面的研究则鲜见于文献，相关研究仅包括：刘立才等对北京城市规划区水源热泵系统应用适宜性进行的分区，王亚斌等对天津市水源热泵系统水文地质条件适宜性进行的评价。本次研究将根据我国区域内具体的气象、水文地质条件及地源热泵建设的具体需要，选取一些能够从整体上反映区域内与地源热泵建设有关的评价指标组成评价指标体系，建立的评价指标体系将充分考虑区域浅层地热的资源属性、场地建设属性以及社会需求和环境之间的协调统一关系，完善我国地源热泵适宜性评价指标体系。

§4.1 指标体系设计原则

影响地源热泵建设的这些因子相互作用、相互制约，建立起能够从各方面综合体现与衡量影响地源热泵系统建设的指标体系是进行地源热泵系统建设的前提和基础。地源热泵系统适宜性评价指标体系既要体现经济、社会、人口、资源和环境协调发展的主导思想，又要使各评价指标成为表征影响地源热泵建设的众多指标中最灵敏、最便于度量和内涵最丰富的主导性指标，使该指标体系可准确反应在各地区建立地源热泵系统的适宜程度。为此，本研究在设计地源热泵系统适宜性评价指标体系时，确定了以下应遵循的主要原则。

1、系统性与针对性相统一的原则

指标体系是一个多属性的复杂系统，它由不同层次、不同要素组成，涉及到水文地质条件、场地施工条件、经济社会发展水平、环境保护条件等多个方面，与之对应的描述指标也众多，从实用、可操作的角度，选择具有代表性的主要指标，针对目前我国地源热泵建设过程中存在的主要问题及需要考虑的多方面因素，确定系统表征的主导因子，避免指标体系庞杂，无法操作，达到系统性与针对性的统一。

2、层次性原则

地源热泵系统应用适宜性评价指标涉及到众多方面，每一方面又存在着诸多影响因素。

对于这些方面及其影响因素均可以分别提出相应的指标进行表征。显然，这些指标存在着层次归属问题，也就是说，指标间有一定的层次和隶属关系，对于不同的评价层次，应选取不同的指标进行描述。

3、可操作性原则

在选取指标时，应基于实际情况，定性与定量相结合，尽量选取关键性的、容易获取的、具有综合性的指标，避免使用单一指标，使建立的指标体系简洁明确且具有可度量性，易于计算与分析[45]。

§4.2 评价指标体系建立中存在的问题及指标体系建立的方法

国际上有关的指标体系可分为：单一指标体系、综合核算体系、菜单式少指标体系、菜单式多指标体系等。但总的来说，这些指标体系研究中主要存在以下问题：

1）指标数据太多，不便于操作；

2）所选的有些指标存在概念模糊和交叉现象；

3）理论与实践脱节，有些指标似乎合理，但由于数据较难获得，实际操作起来较困难；

4）忽略了空间因素；

5）评价指标体系中权重或贡献率难以确定。

目前国内常采用层次分析法、特尔菲法等进行指标体系的建立，其中，层次分析法是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。该方法是美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂，在为美国国防部研究“根据各个工业部门对国家福利的贡献大小而进行电力分配”的课题时，应用网络系统理论和多目标综合评价方法，提出的一种层次权重决策分析方法。这种方法的特点是在对复杂的决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上，利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化，从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法，尤其适合于对决策结果难于直接准确计量的体系。关于层次分析法上面已经作了详细介绍，这里不再赘述。

§4.3 我国地下水源热泵系统适宜性评价指标体系的建立

4.3.1 我国地下水源热泵系统应用适宜性评价指标的选择及描述

4.3.1.1 水文地质因素

场地的水文地质条件是进行地下水源热泵系统设计的主要依据，因此收集足够的水文地质资料显得非常重要，地下水源的水量、水温、水质和供水稳定性是影响地下水源热泵系统运行效果的重要因素。应用水源热泵时，对供水水源的原则要求是：水量充足、水温适度、水质适宜、供水稳定。也就是说，水源的水量，应能满足用户制热负荷或制冷负荷的需要。

如果水量不足，机组的制热量和制冷量也将随之减少，达不到用户要求。水源的水温应适度，必须适合机组运行工况的要求。水源的水质，应适宜于系统机组、管道和阀门的材质，不至于产生严重的腐蚀损坏。水源系统供水保证率要高，供水功能要具有长期可靠性，能保证水源热泵中央空调系统长期和稳定运行。

1、地下水富水性

一般情况下，地下水源热泵系统应布置在富水性较好的地区，这样才能满足机组对水量的要求，只有水量达到了要求，供水的稳定性才能有保障。所需水量多少是由该工程负荷与机组性能来确定的，所选择的水源水量应满足负荷要求。如果其他各种条件均具备，但水量略有不足，其缺口可采取一定辅助弥补措施解决。如果水量缺口较大，则难以满足负荷要求，对热泵的建设就会产生不良影响。这里应该注意的是，就某项具体工程而言，应从实际情况出发，判断是否具备可利用的水源。不同工程的场地环境和水文地质条件千差万别，可利用的水源各不相同，应因地制宜地选择适用水源。当有不同水源可供选择时，应通过技术经济分析比较，择优确定。

2、地下水水温

地表水水温随季节、纬度和高程的不同而变化。但地下水水温随自然地理环境、地质条件及循环深度不同而变化。近地表处为变温带，变温带之下的一定深度为恒温带，地下水温不受太阳辐射影响。不同纬度地区的恒温带深度不同，平均水温范围一般在 10～22℃。恒温带向下，地下水温随深度增加而升高，升高多少取决于不同地域和不同岩性的地热增温率。地壳平均地热增温率为 2.5℃/100m，大于这一数值为地热异常。富含地下水的地热异常区可形成地热田。据 1997 年统计数字，全国已发现地热点 3 200 多处，开发利用 130 处地热田。目前，许多地热用户排放弃水温度较高（约 40%）。应用水源热泵可使弃水中的 30℃温差得到再利用，大大提高地热能利用率。地下水水温是制约地源热泵系统建设的一个重要因素。地下水一般取自于地层的恒温带，水温恒定，其值一般比当地年平均气温约高出 1-4℃左右。

3、地下水矿化度

单位容积水中所含各种离子、分子、化合物的总量称为总矿化度，总矿化度说明了水中所含盐量的多少，表示水的矿化程度，是地下水化学成分的重要标志，为了防止地下水源热泵系统出现腐蚀、结垢等负面影响，相关文献认为用于水源热泵系统的水源水矿化度应＜3g/L[22] 。

4.3.1.2 场地施工因素

场地施工因素是影响地下水源热泵系统建设的又一重要因素，场地适宜性评价是工程设施建设的基础性工作，是工程建设场地对工程建设是否有利及工程对现有场地影响的评价。每一地区，每一区域都有其绝对和相对优势。在农用地中，土壤肥沃程度是至关重要的，作为建筑工程用地除场地的区位外，其地层结构，地势地形特点等都会直接影响工程的适宜性。根据地下水源热泵系统所要求的建设场地的特点以及地下水源热泵系统在不同场地建设的难易程度，本文从地形、地貌和回灌条件两个方面分析了场地施工因素对地下水源热泵系统建设的影响。

1、地形、地貌

影响地下水源热泵系统建设的重要因素之一就是地形、地貌，这是进行地下水源热泵系

统建设所要考虑的场地施工属性。场地条件不同，热泵的适宜性也不同，一般山区地势起伏较大，工程实施比较困难，水文地质资料也较难获得，为地下水源热泵的建设增加了难度，有些地区道路不够畅通，给运输管材等建筑材料带来不便。平原地区地势起伏较小、道路畅通，建筑材料便于运输，并且平原地区的水文地质资料较容易获得，这都有利于地下水源热泵系统的建设。高原、丘陵的适宜性则介于山地与平原之间，而有湖泊、河流的地区适合建设地表水源热泵系统而不适合建设地下水源热泵系统。

2、回灌条件

所谓地下水回灌，就是将被水源热泵机组交换热量后排出的水再注入到地下含水层中去。这样做既可以补充地下水源，调节水位，维持储量平衡，也可以回灌储能，提供冷热源，如冬灌夏用，夏灌冬用，还可以保持含水层水头压力，防止地面沉降。所以，为保护地下水资源，确保水源热泵系统能够长期可靠地运行，水源热泵系统工程中一般应采取回灌措施。

对地下水源热泵系统来说，不同的水文地质条件，其回灌能力也不同，所以在地下水源热泵系统选址时，含水层的性质也应被考虑，它不仅决定着水源热泵系统抽水井的出水量，而且还决定着热交换后水的回灌量问题。比如：银川部分地区由于热交换废弃水回灌能力差，无法回灌的地下水就直接排放到地表，造成了资源的极大浪费。目前我国水资源紧缺，实施人工回灌符合国家建立节约型社会的要求，也是维持地下水平衡，防止产生地下水环境问题的一项措施。

4.3.1.3 社会经济因素

社会经济因素在一定程度上也制约着地下水源热泵系统的建设，地下水源热泵系统拟建场地的社会经济状况主要是指人口居住情况（本文用人口密度来表示）以及这个地区人们的经济收入情况（本文用人均 GDP 来衡量）。随着经济的发展，人们对居住环境的质量、舒适程度要求越来越高，但是这些需求都是与经济承受能力相挂钩的，并且在人口密度小的地区，所需供暖（或供冷）的建筑面积一般也较小，建设地下水源热泵系统并不一定经济，所以经济、人口密度因素便成为约束地下水源热泵系统建设的两个较重要的条件。

1、人口密度

人口密度是制约地下水源热泵建设的一个较重要的社会因素，热泵一般用于住宅、办公场所及商场等，由于热泵初期的投资费用较高，如果人口过于稀疏，或无人居住，那么在这样的地区建立热泵系统是不经济的。

2、人均 GDP

能够反映一个地区经济状况的指标很多，本文选择人均 GDP 作为衡量经济状况的指标是因为人均 GDP 相对于其他指标较易获得，并且具有一定的代表性，可以较准确的反映一个地区的经济状况，现有数据为我国各省的人均 GDP（2007 年）数据，数据范围为 1338-29149（美元）。

4.3.1.4 气象因素

不同地区的降水量、气温等气象因素不同，因而对地下水源热泵系统的适宜性也有一定的影响，比如受降水量的影响我国南方地区水资源较丰富，而北方地区则较匮乏，这对于地下水源热泵系统是否能有充足的水源供应将有很大的影响；受气温的影响，我国南方地区气温高而北方地区气温低，这对地下水源热泵是否能满足不同气候区的用户也有一定的限制，

于是本文选择了年降水量和年平均气温这两个因素作为影响地下水源热泵系统适宜性评价的气象要素指标。

1、年降水量

一方面，降雨入渗可以为地下水补充新的水源，而地下水源热泵系统是以地下水作为水源来供暖和制冷的，从某种意义上说，降雨为地下水源热泵系统提供了一定水源；另一方面，地下水源热泵系统是通过对流和传导两种方式进行热量交换的，降雨入渗可以带走或补充一部分热量，降雨入渗过程中热量的交换属于对流换热，因此，从这个意义上说，降雨入渗的过程实际上也是对流换热的过程。所以一般情况下，年平均降雨量越大，越有利于地源热泵系统的建设。

2、年平均气温

我国地域辽阔，不同地区年平均气温有很大的差异，东北、西北温度偏低，而东南西南温度偏高，我国的内蒙、黑龙江、西藏、青海、新疆等部分地区年平均气温可低于零下 4℃，而我国的海南南部及台湾南部等地区，年平均气温可高于 24℃。由于南北气温的差异较大，人们对地下水源热泵系统取暖和制冷的要求也不同。在温度低的地区，一年大部分时间供暖需求较多，在温度高的地区，对供冷需求较多，如果采用地下水源热泵系统，有可能会引起热平衡问题，对热交换产生不利影响，降低系统运行性能。因此在进行地下水源热泵系统适宜性评价时，年平均气温这个气象因素是不可或缺的。

4.3.1.5 环境保护因素

在进行地下水源热泵系统选址时，应考虑建设场地是否受已有地裂缝、降落漏斗、地面塌陷等的影响，以及水源热泵系统建成后是否会对已有地裂缝、降落漏斗、地面塌陷等产生更为不利的影响。因此在进行场地建设时，应尽量远离这些存在地质环境问题的地区。

1、地面沉降

地面沉降又称为地面下沉或地陷，它是大多数平原城市已经面临或具有潜在隐患威胁的一种城市地质灾害。地下水源热泵系统在运行过程中虽然只取热，不消耗水资源，但是很多地区因为回灌困难，直接将地下水资源排放到地表，造成了水资源的浪费，更重要的是在容易产生地面沉降的地区建立热泵系统有可能会加重地面沉降，并且地面沉降也会影响到系统的建设，对系统产生不利影响，因此在建立地下水源热泵系统时应考虑这方面的因素。

2、地裂缝

地裂缝是地表岩、土体在自然或人为因素作用下，产生开裂，并在地面形成一定长度和宽度的裂缝的一种地质现象，当这种现象发生在有人类活动的地区时，便可成为一种地质灾害。其中过度抽取地下水及矿山地下采空引起地面沉降过程中岩土体开裂也会形成地裂缝。因为地下水源热泵系统的建设有可能会加重地裂缝，并且在产生地裂缝的地区建立地下水源热泵系统也有可能会影响系统的运行及安全，所以这方面的因素也应被考虑。

3、地面塌陷

会诱发地面塌陷的因素很多，主要有：矿山地下水采空；（2）地下工程中的排水疏干与突水作用；（3）过量抽采地下水；（4）人工蓄水；（5）人工加载；（6）人工振动；（7）地表渗水。地面塌陷危害主要表现在突然毁坏城镇设施、工程建筑、农田，干扰破坏交通线路，造成人员伤亡。据统计分析，造成地面塌陷的主要因素是人为因素。在这些容易发生地面塌

陷的地区建设地下水源热泵系统是不安全的，因此在进行建设场地选择时，应尽量远离这样的地区。

4.3.2 我国地下水源热泵系统应用适宜性评价指标体系

本文依据我国区域浅层地热资源的开发利用现状及热泵应用情况，对照我国区域内的水文地质属性、场地施工属性、社会经济属性以及气象、环境影响属性等几方面的内涵，根据专家的意见，利用层次分析模型，建立我国地下水源热泵系统应用适宜性评价的指标体系，见图 4.1。

4.3.2.1 目标层（A）

我国地下水源热泵系统应用适宜性评价的目标在于综合评价我国范围内建设地下水源热泵系统的适宜性，对我国未来浅层地热能的开发进行规划，即选择合适的建立地下水源热泵系统的地区，防止在地下水源热泵系统不适宜地区应用该系统，降低地下水源热泵系统建立的盲目性，为系统设计人员提供依据。

4.3.2.2 准则层（B）

决定影响我国地下水源热泵系统建设的主要因素，主要表现为五个方面：水文地质因素、场地施工因素、社会经济因素、气象因素以及环境保护因素。

4.3.2.3 属性指标层（C）

属性指标层由多个属性指标构成，是准则层各要素的评价基础。我国地下水源热泵系统适宜性评价指标体系见图 4.1 [46]。

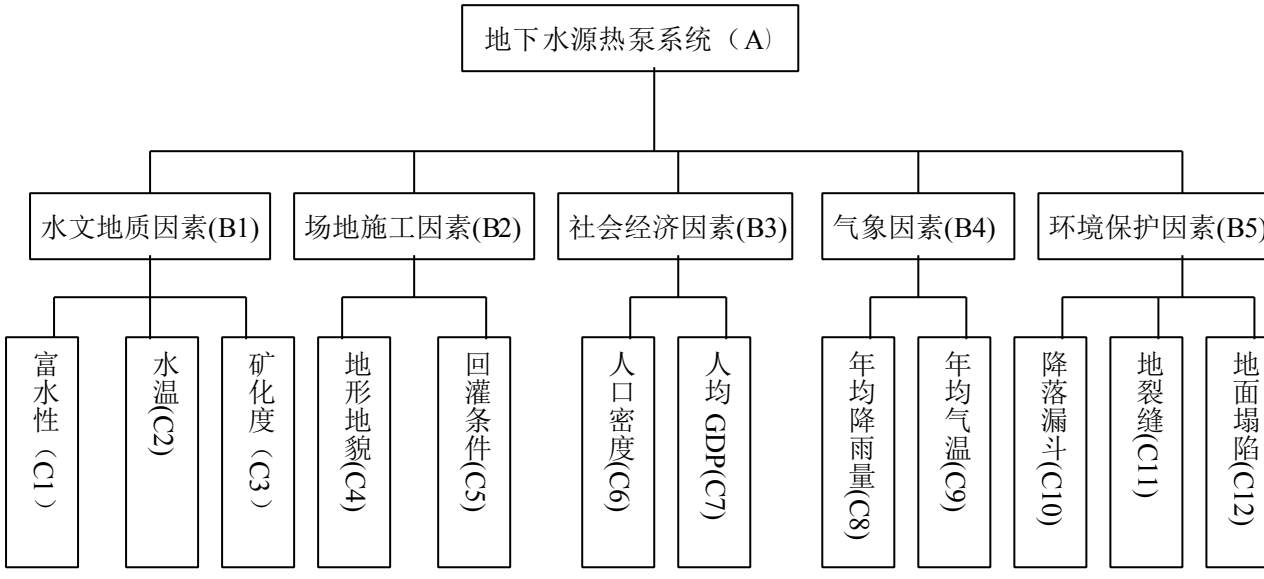


图 4.1 我国地下水源热泵系统应用适宜性评价指标体系

§4.4 典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性评价指标体系的建立

4.4.1 典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性评价指标的选择及描述

4.4.1.1 热物理性质

岩土的热物理性质对土壤源热泵系统的性能影响比较大。它是土壤源热泵系统设计和研究过程诸多环节中最基本、最重要的参数，它直接和土壤源热泵系统埋地换热器的面积和运行参数有关，是计算有关地表层中的能量平衡、土壤中所蓄存的能量和温度分布特征等不可缺少的基本参数。因此，设计土壤源热泵系统前，掌握准确的岩土热物性参数是非常重要的。

1、岩土热导率

岩土热导率（K）表示岩土传热的特性，其物理意义为：沿热传导方向在单位厚度岩土两侧的温度差为1℃时单位时间内所通过的比热流量，其单位为W/m·K（1mcal/cm·s·℃=0.4187W/m·K）。不同岩土的热导率差异是比较大的。一般来说，松散的物质如干沙、干粘土和土壤的热导率最低，湿砂、湿粘土与某些热导率低的坚硬岩石具有相近的热导率值。在沉积岩中，煤炭的热导率最低，页岩、泥岩次之，石英岩、岩盐和石膏的热导率最大；砂岩和砾岩的热导率值变化大。岩浆岩、变质岩热导率一般介于2.1～4.2W/m·K之间。气体的热导率为0.0005～0.5W/m·K，液体的热导率在0.08～0.6W/m·K之间（一般来说，热导率小于0.2W/m·K的为绝热材料）。在同类岩石中，热导率值也有相当大的变化，这是由于许多岩类，特别是沉积岩中的砂岩、页岩和砾岩等的结构、成分有相当大的差异所致。

岩土的热导率是影响土壤源热泵系统建设一个重要的热物理参数，钻孔地点的岩土热导率对单位埋管换热量的影响比较大，一般情况下热导率越大，越有利于土壤源热泵系统换热器进行热交换，系统的效率也就越高，能效比也就越大。

2、岩土热扩散率

热扩散率（α）是另一个影响土壤源热泵系统建设的热物理参数，它是反映岩土热惯性特征的一个综合性参数，表示岩石在加热或冷却时各部分温度趋于一致的能力，其物理本质是物质内部温度传播的速度。热扩散率在数值上等于热导率（K）除以密度（ρ）和比热（c）的乘积。即 $\alpha = \frac{K}{\rho c}$，热扩散率的单位为$m^2/s$。其中岩土的比热是指单位质量的热容，即单位质量的物体温度升高1℃所需的热量，单位为cal/g·℃或kcal/kg·℃；岩土的密度（g/cm^3）是指单位体积的物体的重量。岩土的比热和岩土的密度对于热传导有一定的意义。一般情况下，岩石比热的变化范围较窄，对热扩散率的影响不大，因此岩土热扩散率主要与岩土的热导率和密度有关．一般而言，当岩土的热导率变化10倍时，热扩散率仅变化2至3倍。岩土热扩散率约变化于0.001-0.050 cm^2/s的范围内时，泥岩的α值较低，磁铁矿、盐岩的最

高。而对于土壤源热泵系统的换热条件来说，岩土的热扩散率越大越有利于热泵系统换热器与周围岩土热量的交换[47]。

4.4.1.2 水文条件

地下水水位、地下水水位梯度及降雨入渗系数三个因素是影响土壤源热泵系统建设的三个较重要的水文条件，它们主要影响热泵系统换热器与周围介质的热交换，从而影响整个系统的效率及性能。湿土壤含水对地埋管换热器换热的影响，一方面是湿度本身的静态影响，另一方面是含湿量梯度造成的渗透或流动影响。土壤分干土壤、非饱和土壤、饱和湿土壤以及过饱和湿土壤，地下土壤湿度使传热问题从简单的导热问题变成既有对流又含有热湿扩散的复杂传热问题。并且在这个能量转换过程中，应将土壤作为一种能量介质考虑，它把自己储存和吸收的能量传给地下换热器以及热循环介质，水分参与了能量转换和储存的作用，所以土壤中含水率的大小对换热器换热效果起着很大的作用[48]，这也是为什么水文条件对土壤源热泵系统建设会有这么大的影响。

1、水位

土壤和岩石层，在自然界中并不是孤立存在的，而是处于与大气、水、生物永恒的物质与能量的循环和转化中。土壤的基本成分是矿物质、有机质、水分和空气。在土壤组成成分中，空气的热传导系数最小，矿物质的热传导系数最大，为空气的 100 倍，水的热传导系数介于两者之间。地源热泵系统的性能与土壤性能是紧密相关的，而土壤性能又和土壤的含水量有关。研究表明，干燥土壤的土壤源热泵系统的性能系数 COP 要比潮湿土壤的 COP 低 35％，当土壤含水量低于 15％时，随着含水量的降低，热泵的循环性能系数将迅速下降。若土壤含水量在 25％以上，土壤源热泵的性能就会得到有效的提高，而当含水量超过 50％后，随着含水量的增加，热泵循环性能系数提高的趋势减缓。土壤含水量从 50％增加到 100％，其 COP 仅增加 1.5％[49]。也就是说每一种岩土都存在一个临界含水量。如小于临界含水量，岩土的导热热阻随含水量的减小而迅速增大，相应导热系数迅速减小。

以地下水位为分界线，水位以下的岩土体处于饱水状态，而水位以上的部分，属于包气带，越靠近地下水水位，土壤含水量越大，而一般情况下，如果水位较高，热泵系统换热器周围土壤整体的含水量就越大，而土壤越潮湿就越有利于埋管换热器的热交换。从这个意义上讲，地下水位越高，土壤源热泵系统的换热就越迅速，效率就越高。

2、水位梯度

水位梯度可以反映水位的变化情况及水流运动的趋势。某些情况下，两点间水位梯度越大，水流的交换越迅速。由于地下水可以储存和吸收能量，它可以将部分能量传给地下换热器以及热循环介质，随着地下水的流动，地下水之间进行交换的同时也进行了热量的交换，那么土壤源热泵系统埋管换热器处于地下水位以下的部分就可以通过对流换热，将部分热量或冷量排到周围的地下水中。而土壤源热泵系统处于含水层以上的部分，其周围土壤的含湿量梯度也会受到水位梯度的影响，这个过程中既包括对流传热又包括热湿扩散问题，于是整个传热问题就显得相当复杂。但是有一点可以肯定的是：水位梯度越大就越有利于换热器与周围环境交换热量，就越有利于提高土壤源热泵系统的工作效率，也就较有利于土壤源热泵系统的建设。

3、降水入渗系数

降水入渗系数是指一定时期内降水入渗补给地下水的水量与同期内降水量的比值。降落到地表的水，一部分蒸发返回大气或为植物截留和填洼，一部分产生地表径流，其余部分渗入地下。下渗的水首先补充包气带的水分和产生表层流，多余部分到达潜水面补给地下水。降水入渗的过程是水分转化的过程，也是能量交换的过程。降水在入渗过程中，一方面增加了土壤的含水量，有利于热量的传导，另一方面它在下渗的过程中，可以吸收或放出部分能量，实现了与土壤源热泵系统换热器周围土壤的热量交换，增加了热量交换的速率，进而提高了热泵系统的效率。因此，从这个意义上讲，降水入渗系数高的地区更有利于土壤源热泵系统的建设。

4.4.2 我国土壤源热泵系统应用适宜性评价指标体系

由于全国范围内的土壤热物理性质数据缺乏，所以本文特选定一典型剖面进行分析，这个剖面就是华北平原定兴-黄骅剖面。根据剖面上的水文地质条件、热物理属性及专家的意见，利用层次分析模型，建立定兴-黄骅剖面土壤源热泵系统适宜性评价的指标体系，见图4.2。

4.4.2.1 目标层（A）

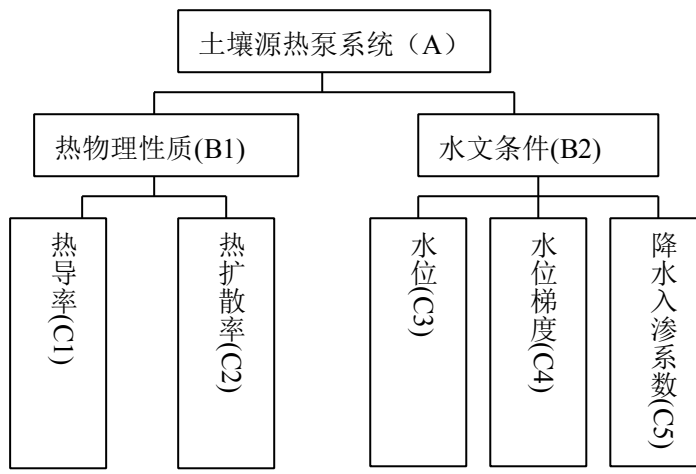
定兴-黄骅剖面土壤源热泵系统适宜性评价的目标就是通过综合评价影响剖面土壤源热泵系统建设的因素，选择合适的建立土壤源热泵系统的断面，对剖面上未来浅层地热能的开发进行规划,降低土壤源热泵系统建立的盲目性，为系统设计人员提供参考。

4.4.2.2 准则层（B）

决定剖面上影响土壤源热泵系统建设的主要因素，包括：水文地质因素、水文气象因素及岩石热物理性质等。

4.4.2.3 属性指标层（C）

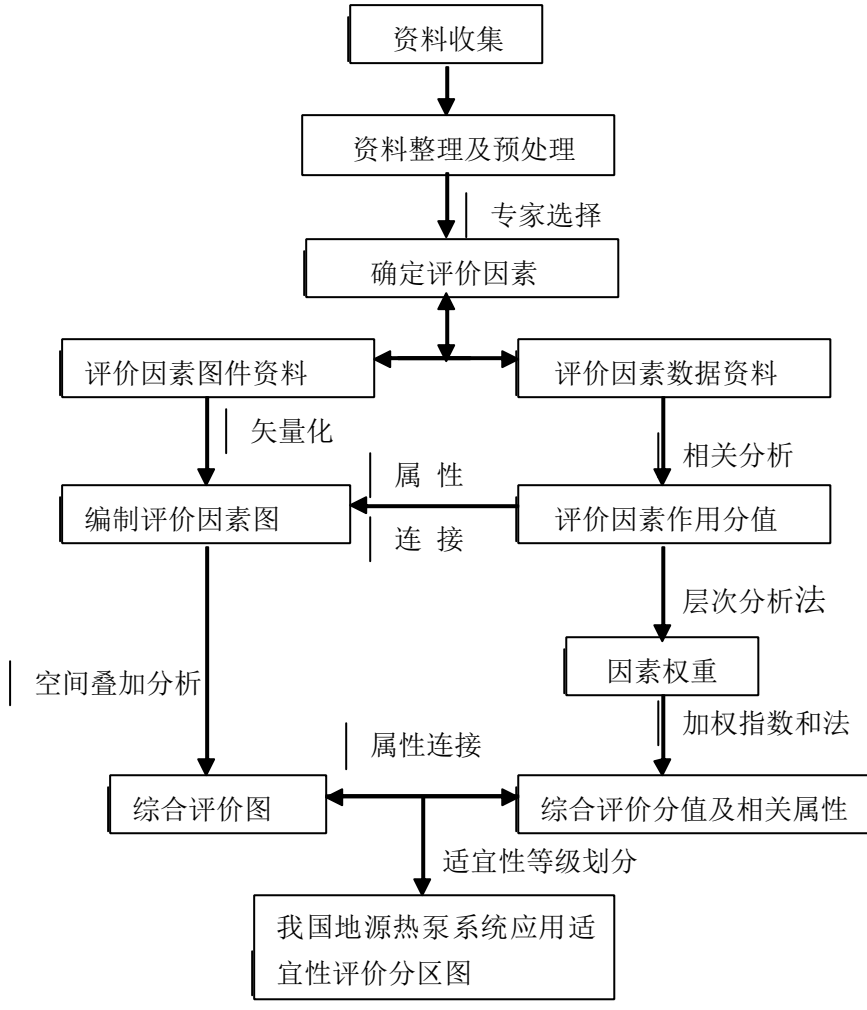
属性指标层由多个属性指标构成，是指标体系最基本的要素层。定兴-黄骅剖面土壤源热泵系统适宜性评价指标体系见图4.2。



4.2 典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性评价的指标体系

第五章 地源热泵系统应用适宜性评价步骤

本研究以划分我国地源热泵系统适宜性评价等级为目的，通过对我国区域的各种相关资料的收集和研究调查，对影响适宜性划分等级的因素、因子进行比较详尽的分析和仔细的选取，确立了适宜性等别划分的体系和模型，研究过程中充分利用地理信息系统、空间数据分析等强大功能，对相关图形进行拓扑叠加，并利用地理信息系统空间数据和属性数据之间的链接关系，实现了我国地源热泵系统适宜性评价相关因子的图形和属性数据的生成和输出。我国地源热泵系统应用适宜性评价的技术路线图如图 5.1 所示：



5.1 我国地源热泵系统应用适宜性评价技术路线图

§5.1 资料的收集

进行我国地源热系统应用适宜性评价收集的基础资料包括：我国区域 1：14000000 中国地下水水温分布图、中国地下水富水性图、中国地下水矿化度分布图、中国地貌图、中国地下水含水层类型图、中国人口密度图、中国年均降水量图、中国年均气温图、中国地质环境图、定兴-黄骅剖面水位、岩土的热导率、热扩散率等有关图件。

我国的社会经济状况、国家有关政策、热泵应用情况等相关资料。

§5.2 资料的整理及预处理

基础资料的整理与输入，是评价数据库建立过程中的一个非常重要的环节。评价用的纸质资料的基础数据处理过程一般为：扫描图件—拼接图件—数字化—拓扑处理—误差校正—投影变换—属性输入。现收集的大部分图件为 MAPGIS 格式，为了便于分析及处理，首先将其转换为 ARCGIS 格式，并将纸质图件扫描后进行矢量化然后进行数据检查校正和误差控制。数据检查可以用目视检查，如通过图件放大检查数据质量。一般情况下，数据编辑处理只能消除或减少局部误差或明显误差，因图纸扫描变形所产生的误差则需要经过几何校正。

数据分为空间数据和属性数据。空间数据又称图形数据、几何数据，描述地图要素点、线、面的位置及其拓扑关系。点在地图上表示只有空间位置信息而没有大小和长度信息的地理要素。线在图上表示具有位置、长度和形状的地理要素。面在图上表示具有位置、面积和形状的地理要素。属性数据又称专题数据，用来描述和识别专题要素。属性数据包括各自然地理要素定性或定量的描述以及社会经济方面的统计数据，并以代码的形式存贮于系统的属性文件中。

对图中某要素的属性进行编辑时，可在图上直接进行该要素属性的修改或编辑，也可以在属性表中对其进行统一编辑，为了在统一编辑时计算数据或更改方便可将其导出转为 excel 格式，然后将编辑好的数据导入到属性库中。包括、面积、周长、坡度、地类码、权属代码、权属名称、权属性质等等。

§5.3 确定评价因素

评价因素的选择是进行我国地源热泵系统应用适宜性评价的基石，因素的选择是否具有代表性会影响评价的后续过程及结果。在主导性、差异性、稳定性、因地制宜、可量化原则的指导下，结合专家经验选取了影响我国地源热泵系统应用适宜性评价的因素。在此次评价活动中，本文采取了专家选择法的方式。评估专家意见的有效性是直接影响评估结论正确与否的主要因素之一。即使评估专家个人采用同一范式评估科技项目，由于其个人信仰、阅历的不同，以及一些社会因素的影响都会使他们各自的评估结果发生偏差。但是，评估专家系

统的“群体效应”却能把客观因素与主观因素、共同准则与个人准则有效地统一起来，形成由某一专家所无法取代的科学功能[50]。为确保专家的评审质量，保证结果的信度与准确度，评估专家应具备下列条件：

1、具有较高的专业知识水平和实践经验、敏锐的洞察力和较强的判断能力；

2、具有良好的资信和科学道德水平；

3、评估专家具有涉及到的不同专业和领域的互补性和代表性[51]；

评价因素的选择在建立指标体系时已经进行了详细的分析，这里不再赘述。

§5.4 评价因素分值及权重的确定

5.4.1 评价因素分值的确定

进行我国地源热泵系统应用适宜性评价的基本思路为多因素综合评判法，即通过选择与评价目标有密切联系的若干指标因素，运用层次分析法将各指标标准化处理后合成为一个综合指标，最终根据该指标值的大小划分适宜性等级。在多因素加权加和综合评判法中，因素分值体系采用 0－1 分的标准封闭区间。从最低一级单因子到各级因素以至最终定级总分值，都应在各个层次将分值极差标准化处理，即该因子(素)分值的最小值为 0，最大值为 1，以加强同一层次各类因素(子)的权重可比性。我国地下水源热泵适宜性评价所用数据的类型和量纲各不相同。为了在统一评价体系内对不同数据进行比较和运算，应在评价之前对数据进行标准化（规格化）处理，将数据转化为[0，1]之间的无量纲数值。

数据标准化的处理方法，视数据类型的不同而不同。主要有以下两种：

1、直接赋值法

对于非数字型的数据，一般可根据划分等级直接赋予一个[0，1]之间的数值。

以富水程度为例，按照收集的资料，根据富水性的好坏可分为强、中、弱 3 个等级，根据其在地下水源热泵系统适宜性评价的重视程度赋予相应的等级。

2、最大-最小值法

对于数字型数据可采用最大-最小值法，找出所有单元同一指标数据的最大值和最小值，然后按下式计算各单元该指标的归一化值：

$$a_i' = \frac{a_i - a_{min}}{a_{max} - a_{min}} \qquad (5\text{-}1)$$

式中：a_i' 为第 i 单元归一化后的值；

a_i 为第 i 单元实际值；

a_{min} 为所有单元某指标的最小值；

a_{max} 为所有单元某指标的最大值。

这一步是在 ARCGIS 中实现的，若采用直接赋值法，则直接将数据标准化值以属性的形式赋到各因素图件中，然后对图件进行栅格化，为以后分值的计算做准备；若采用最大-最

小值法则需要将属性值栅格化，运用 Spatial Analyst 中的 Raster Calculator 进行计算得出标准化数值。

5.4.2 评价因素权重的确定

权重是一个相对的概念，表示在评价过程中对我国地源热泵建设影响因素起作用的大小划分主次位置，并给以不同的比例，以此突出主要的项目，避免均衡评断产生的误差，使之更加与实际情况相吻合[52]。本文选择运用层次分析法计算指标权重，层次分析法在前面已经进行了详细的叙述。

§5.5 评价总分的确定

根据我国地源热泵系统应用适宜性评价因素权重分析所得权重值及各因素单元分值，运用 ARCGIS 中的空间叠加功能计算出我国地源热泵系统应用适宜性评价的总分值。

计算式为：

$$R=\sum_{i=1}^{n} a_i X_i \qquad (5\text{-}2)$$

式中：R—评价的总分值（诸因素对地源热泵系统应用适宜性的综合反映）

ai—评价参数的权值（某因素对地源热泵系统应用适宜性的影响程度）

Xi—评价参数（即单因素单元分值，某因素在单元内表现出的适宜性优劣度）

n—评价参数的个数

§5.6 适宜性分区标准并划分适宜性级别的确定

根据地源热泵开发利用的现状及发展需求，确定综合指数值的划分标准和分区级别，将研究区划分为适宜区、较适宜区、勉强适宜区和不适宜区四个级别，这个过程是通过 ARCGIS 来实现的：将叠加后的综合评价图层，按照综合指数值的划分标准运用 Spatial Analyst 中的 Reclassify 进行研究区适宜程度的划分。

第六章 我国地源热泵系统应用适宜性评价

§6.1 我国地下水源热泵系统应用适宜性评价

影响我国地下水源热泵系统建设的因素有多个，通过征求专家意见，选择合适的评价因素，建立科学的评价指标体系，并分别对相应的数据进行标准化，得到各影响因素分区图（见附图），从而为下一步的评价提供数据基础。

6.1.1 确定评价因素的分值

6.1.1.1 水文地质因素

1、 矿化度

我国地下水矿化度数据呈块状分布，绝大部分地区的地下水矿化度在0.5～200 g/l，由于地下水源热泵系统对水源水矿化度的要求是小于3g/l，所以认为矿化度大于等于3.0 g/l的地区均不适合建立地下水源热泵系统。对数据进行标准化，结果如下表所示：

表 6.1 矿化度分级及数据标准化结果

矿化度分区	≥3.0 g/l	1.0-3.0 g/	l0.5-1.0 g/l	≤0.5g/l
标准化值	0	0.3	0.6	0.9

2、 地下水富水程度

一般情况下，地下水源热泵系统应该布置在富水性好的地区，这样才能满足机组对水量的要求，从这个意义上来考虑，富水性强的地区标准化值就相对高一些，而富水性弱的地区标准化值则相对低些。对我国地下水富水性分区数据进行标准化，标准化结果如下表所示：

表 6.2 富水性分级及数据标准化结果

富水性	弱	中	强
标准化值	0.3	0.6	0.9

3、地下水水温

地下水水温是制约地下水源热泵系统建设的又一个重要因素。如果当地的地下水温常年较高，如海南地区（夏热冬暖地区），冬天利于供暖，然而这个地区冬天气温并不低，不需要对建筑提供过多的热量，相反，夏天则较热，需要对建筑提供较多的冷量，而海南地区地下水温偏高，所以夏季热泵机组的效率难以提高。同样在夏凉冬冷地区，如东北地区，当地的地下水温常年较低，因此冬季热泵机组的效率也一般偏低。所以单纯从水温这个因素考虑，夏热冬暖地区和夏凉冬冷地区与夏热冬冷地区相比，适宜性较差，并且在夏热冬暖和夏凉冬冷地区建立地下水源热泵系统有可能会产生热平衡问题。根据水温对热泵系统是否适宜，将

数据进行标准化，结果如下表：

6.3 地下水水温分级及数据标准化结果

地下水水温（℃）	<6 与>26	6-10 与 22-26	10-14 与 18-22	14-18
标准化值	0.1	0.3	0.6	0.9

6.1.1.2 场地施工因素

1、地形、地貌

影响地下水源热泵系统建设重要的场地施工因素之一就是地形、地貌，不同的场地条件，热泵的适宜性也不同，一般认为平原盆地等地区较适宜建立地下水源热泵系统，因此其标准化值一般较高，而山地由于施工困难，其标准化值一般较低，在有湖泊的地区直接认为不适合建设地下水源热泵系统，所以在数据处理的过程中，认为其标准化值为 0，其他地区的数据标准化结果如下表：

6.4 地形地貌数据分级及标准化结果

地形地貌	山地	丘陵	高原台地	平原盆地
标准化值	0.1	0.4	0.6	0.9

2、回灌条件

对地下水源热泵系统来说，水文地质条件是影响回灌量的主要因素。在基岩裂隙含水层和岩溶含水层中回灌，在一个回灌年度内，回灌水位和单位回灌量变化都不大；在砾卵石含水层中，单位回灌量一般为单位出水量的 80%以上。在粗砂含水层中，回灌量是出水量的 50～70%。细砂含水层中，单位回灌量是单位出水量的 30～50%[22]。这里还应考虑到地层颗粒越细，越容易进入热泵机组，磨损设备和管道，排到地下后，这些细颗粒会堵塞回灌井中的地层孔隙，并最终使回灌井失去回灌能力而报废。本文数据的标准化根据区内不同含水层条件进行分区，结果如下表：

表 6.5 回灌条件数据分级及标准化结果

含水层性质	基岩裂隙含水层及岩溶含水层	山前或山间带沙砾石层潜水或承压水含水层	平原多层状砂层承压含水层	冲湖积平原及滨海平原砂层潜水及承压含水层	黄土高原孔隙、裂隙含水层	多年冻土孔隙裂隙含水层
标准化值	0.9	0.8	0.6	0.5	0.3	0.1

6.1.1.3 社会经济因素

1、人口密度

人口密度也是制约地下水源热泵系统建设的一个社会因素，由于热泵初期的投资费用较高，如果人口过于稀疏，那么在这样的地区建立热泵系统是不经济的。所以在建设地下水源热泵系统时还应考虑到用户的数量，一般用户越集中，数量越多越有利于热泵系统的建设，这样的地区标准化值相对也高一些，对我国人口密度数据进行标准化的结果如下表：

表 6.6 人口密度数据分级及标准化结果

人口密度（每平方千米人口数）	>400	100-400	50-100	1-50	<1
标准化值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1

2、人均 GDP

人均 GDP 可以反映一个地区的经济状况，也可以反映这个地区人口的富裕程度，如一些偏远地区，电力资源还受一定限制，在这样的地区也无法建立地下水源热泵系统。一般情况下，经济状况好的地区，人均收入也相对较高，而地下水源热泵系统的建设需要一定的初投资，如果某个地区经济状况较好，那么这将有利于地下水源热泵的建设。现有数据为我国各省的人均 GDP 数据，呈块状分布，各省数据悬殊，对数据进行标准化。标准化结果见下表：

表 6.7 人均 GDP 数据分级及标准化结果

人均 GDP（美元）	<1338	1338-2100	2100-3001	>3001
标准化值	0.3	0.5	0.7	0.9

6.1.1.4 气象因素

1、年降水量

降雨入渗可以为地下水补充新的水源，对于地下水源热泵系统来说降雨量是影响其建设的重要的气象因素，并且影响着热泵系统的对流热交换，所以一般情况下，年平均降雨量越大，越有利于地下水源热泵系统的建设。从这个意义上考虑，降雨量多的地区，其标准化值也相对高一些，而处于极度干旱的地区显然不适合建立地下水源热泵系统。受季风气候的影响，中国的降雨分布极不均匀，年均降雨量从东南的 4000 毫米递减到西北的不足 25 毫米。研究区年降雨量数据为分区数据，数据的标准化根据区内年均降雨量的大小分区，结果如下表：

表 6.8 年降水量数据分级及标准化结果

年降水量（mm）	<100	100-400	400-800	800-1400	1400-2000	>2000
标准化值	0.1	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9

2、年平均气温

由于我国不同地区年平均气温有很大的差异，东北、西北温度偏低，而东南西南温度偏高，因此人们对地下水源热泵系统取暖和制冷的要求不同。在温度低的地区，一年大部分时间供暖需求较多，在温度高的地区，对供冷需求较多，如果采用地下水源热泵系统，有可能会引起热平衡问题，对热交换产生不利影响，降低系统运行性能。因此一般情况下，夏热冬暖的地区及夏凉冬冷的地区标准化值相对要小些，而夏热冬冷的地区标准化值相对大些，也就是说年平均气温过高或过低的地区，其标准化值都较小，对研究区年平均气温数据进行标准化，结果如下表：

表 6.9 年均气温数据分级及标准化结果

年均气温（℃）	<0 与>24	0-4 与 20-24	4-8 与 16-20	8-16
标准化值	0.1	0.3	0.6	0.9

6.1.1.5 环境保护因素

目前我国很多地区都存在地质环境问题，在进行地下水源热泵系统建设时，应考虑建设场地是否受已有地裂缝、降落漏斗、地面塌陷等的影响，以及水源热泵建成后是否会对其产生更为不利的影响。因此在进行场地建设时，应与这些存在环境地质问题的地区保持一定距

离。

1、降落漏斗

本文通过距离对降落漏斗数据进行标准化，标准化结果见下表：

表 6.10 热泵系统与已有降落漏斗的距离数据分级及标准化结果

与已有降落漏斗的距离	<10km	10-20km	20-30km	30-40km	>40km
标准化值	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9

2、地裂缝

地裂缝形成原因是多方面的，如：地下水超采、水位逐年下降、包气带失水缩干等。采用直接赋值法将距地裂缝 1500 米内的区域赋值为 0，1500 以外的区域赋值为 1.

3、地面塌陷

地面塌陷主要分布于我国东部和南部地区，考虑到建设场地稳定性，采用直接赋值法，将距塌陷区 2000 米以内的区域赋值为 0，2000 米以外的区域赋值为 1。

6.1.2 根据所建的指标体系进行权重计算

根据水文地质条件、场地施工条件、社会经济条件、气象条件以及环境保护条件等在我国地下水源热泵系统适宜性评价中所占的相对比重，经专家咨询、评分认为：水文地质条件、场地施工条件相比于社会经济条件、气象条件以及环境保护条件等更为重要，但后三者也不能忽视，依其重要性排序为：水文地质因素>场地施工因素>社会经济因素>气象因素>环境保护因素，前面所建立的评价指标体系分为 A、B、C 三层，通过对同一层次的各因子关于上一层次某一准则的重要性进行相互比较，然后给出相应的分值从而计算出相对重要性。

6.1.2.1 目标 A 的判断矩阵及一致性检验

1、构造出 A-B(第二层因素相对第一层的比较判断)的判断矩阵（目标 A 的单排序）及 A 对 B 的权重如表 6.11：

表 6.11 目标 A 的单排序

A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	$W^{(5)}$
B_1	1	2	4	5	6	0.441
B_2	1/2	1	3	4	5	0.291
B_3	1/4	1/3	1	2	3	0.131
B_4	1/5	1/4	1/2	1	2	0.083
B_5	1/6	1/5	1/3	1/2	1	0.054

注：（5）代表判断矩阵的阶数

2、理论权重的计算

从表中可看出 $W^{(5)}=[0.441,0.291,0.131,0.083,0.054]^T$，根据所得 $W^{(5)}$ 的值计算判断

矩阵的最大特征值可得：λ max=5.142，

$C.I.=(\lambda_{max}-n)/(n-1)=(5.142-5)/(5-1)=0.0355<0.10$，R.I.=1.12，C.R.=C.I./R.I.=0.0355/1.12=0.032<0.1，经过 C.R.、C.I.一致性检验，表明上述判断矩阵一致性较好，相对权重计算正确。

6.1.2.2 准则层 B 的判断矩阵及一致性检验

1、水文地质因素的子制约因素为 C_1（富水性）、C_2（水温）、C_3（矿化度），其判断矩阵(准则层 B_1 的单排序)及权重见表 6.12：

表 6.12 准则层 B_1 的单排序

B_1	C_1	C_2	C_3	$P_1^{(3)}$
C_1	1	2	3	0.539
C_2	1/2	1	2	0.297
C_3	1/3	1/2	1	0.164

经计算得权重为：$P_1^{(3)}=[0.539,0.297,0.164]^T$。根据所得 $P_1^{(3)}$ 的值计算判断矩阵的最大特征值，可得 λ max=3.011，$C.I._1$=0.0056<0.1，$R.I._1$=0.52，$C.R._1$=0.011<0.1，经过 C.R.、C.I.一致性检验，表明上述判断矩阵一致性较好，相对权重计算正确。

2、场地施工因素的子制约因素为 C_4(地形地貌)、C_5（回灌条件），其判断矩阵及权重见表 6.13：

表 6.13 准则层 B_2 的单排序

B_2	C_4	C_5	$P_2^{(2)}$
C_4	1	2	0.667
C_5	1/2	1	0.333

经计算得权重为：$P_2^{(2)}=[0.667,0.333]^T$，$\lambda$ max=2，$C.I._2$=0，$R.I._2$=0，$C.R._2$=0 <0.1，由于两阶矩阵不需要进行一致性检验就具有满意的一致性，所以一般不需要进行一致性检验[53]。

3、社会经济因素的子制约因素为 C_6（人口密度）、C_7（人均 GDP），其判断矩阵及权重见表 6.14：

表 6.14 准则层 B_3 的单排序

B_3	C_6	C_7	$P_3^{(2)}$
C_6	1	2	0.667
C_7	1/2	1	0.333

经计算得权重为：$P_3^{(2)}=[0.667,0.333]^T$，$\lambda$ max=2，C.I.$_3$=0，R.I.$_3$=0，C.R.$_3$=0 <0.1

4、气象因素的子制约因素为 C_8（年均降雨量）、C_9（年均气温），其判断矩阵及权重见表 6.15：

表 6. 15 准则层 B_4的单排序

B_4	C_8	C_9	$P_4^{(2)}$
C_8	1	3	0.75
C_9	1/3	1	0.25

经计算得权重为：$P_4^{(2)}=[0.75,0.25]^T$，λ max=2，C.I.$_4$=0，R.I.$_4$=0，C.R.$_4$=0 <0.1

5、环境保护因素的子制约因素为 C_{10}（降落漏斗）、C_{11}（地裂缝）、C_{12}（地面塌陷），其判断矩阵及权重为：

表 6. 16 准则层 B_5的单排序

B_5	C_{10}	C_{11}	C_{12}	$P_5^{(3)}$
C_{10}	1	3	3	0.6
C_{11}	1/3	1	1	0.2
C_{12}	1/3	1	1	0.2

经计算得权重为：$P_5^{(3)}=[0.6,0.2,0.2]^T$。根据所得 $P_5^{(3)}$ 的值计算判断矩阵的最大特征值可得 λ max=3，C.I.$_5$=0<0.1，R.I.$_5$=0，C.R.$_5$=0<0.1，经过 C.R.、C.I.一致性检验，表明上述判断矩阵一致性较好，相对权重计算正确。

6.1.2.3 方案层 C 对目标层 A 的总排序及一致性检验

方案层 C 对目标层 A 的一致性检验：

C.I.=（CI_1, CI_2, CI_3, CI_4 , CI_5）$W^{(5)}$

=(0.0056,0,0,0,0)(0.441,0.291,0.131,0.083,0.054)^T=0. 0025

R.I.=(R.I.$_1$, R.I.$_2$, R.I.$_3$, R.I.$_4$, R.I.$_5$) $W^{(5)}$

=(0.52,0,0,0,0) (0.441,0.291,0.131,0.083,0.054)^T=0.2292

C.R.= C.I./R.I.=0.0025/0.2292=0.011<0.10, 故满足整体一致性要求[54]。

方案层 C 对目标层 A 的总排序及权重见表 6.17

表 6.17 方案层 C 对目标层 A 的总排序及权重

C	W_1=0.441	W_2=0.291	W_3=0.131	W_4=0.083	W_5=0.054	ω_i
B	$P_1^{(3)}$	$P_2^{(2)}$	$P_3^{(2)}$	$P_4^{(2)}$	$P_5^{(3)}$	$\omega_i = \sum_{j=1}^{5} p_{ij} C_j$
C_1	0.539					0.238
C_2	0.297					0.131
C_3	0.16					0.071
C_4		0.667				0.194
C_5		0.333				0.097
C_6			0.667			0.087
C_7			0.333			0.044
C_8				0.75		0.062
C_9				0.25		0.021
C_{10}					0.6	0.033
C_{11}					0.2	0.011
C_{12}					0.2	0.011

6.1.3 我国地下水源热泵系统评价总分值的确定及适宜性分区

根据已经计算出的权重，将影响地下水源热泵系统应用适宜性分区的单因素图层(栅格化图件)进行加权空间叠加、运算、合并，最终生成一个临时性的综合图层。在这个过程中需要进行分级评价指数的计算，即评价总分值的计算。

根据我国地下水源热泵系统的应用现状及发展趋势，确定其分区级别和综合指数值划分标准。见表 6.18：

表 6.18 我国地下水源热泵系统适宜性分级标准

分区级别	适宜区	较适宜区	勉强适宜区	不适宜区
综合指数值	0.71-1	0.55-0.71	0.40-0.55	0-0.40

根据上表我国地下水源热泵系统适宜性标准，进行数据分类，并将得到的临时性综合图层的同一等级的相邻图元进行合并，从而得到一个新图层即为我国地下水源热泵系统的适宜性分区图。见图 6.1：

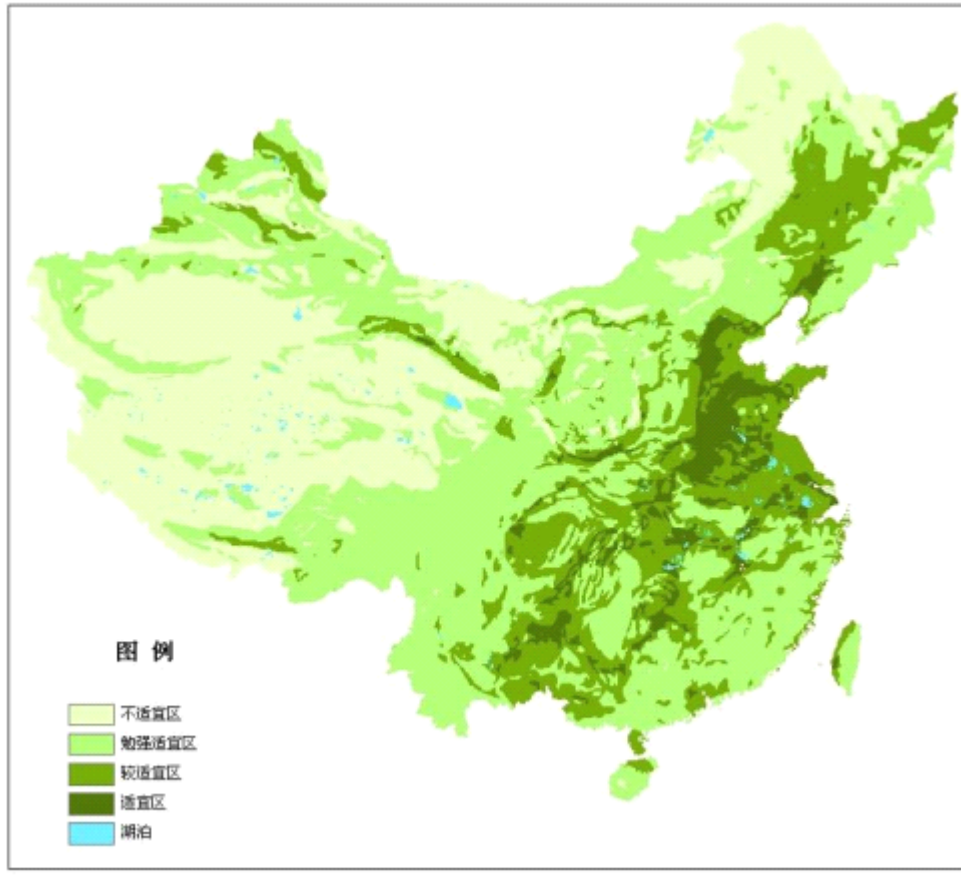


图 6.1 我国地下水源热泵系统应用适宜性分区图

由适宜性分区图可以看出，比较适合应用地下水源热泵系统的地区主要分布在我国的东部，如东北的某些区域、华北平原的部分地区，南方主要有云贵、四川、湖北、湖南的部分地区，并且从分区图中可以发现适宜建立地下水源热泵系统的区域中平原盆地及富水性较好的地区居多。

不适宜建立地下水源热泵系统的地区主要位于我国西部的青海、西藏、新疆的部分区域、内蒙的大部分地区以及黑龙江的北部，尤其是沙漠和极度缺水的区域以及部分极度寒冷的区域。

我国目前已经建立地下水源热泵系统的地区也大多集中在所划适宜区内，如沈阳、北京、天津、武汉等地，说明所建立的评价指标体系是较正确的，评价结果比较可信，可以用来作为建立地下水源热泵系统的依据。但在评价过程中，由于所收集的资料不够详细，有些数据难以获取，尚需要更为准确详细的资料；另外，作为一种综合性评价，适宜性评价并不等于建立地下水源热泵系统的指定地点，它只是一种指导性的意见，所以所得到的评价结果仅能宏观的划分出适宜程度的大致区域，因此，在进行地下水源热泵系统建设时，还应考虑场地的实际情况，在适宜区内开展更为详细的前期勘察工作，更为精确的确定适合建设地下水源热泵系统的场地。

§6.2 我国典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性评价

由于我国还没有进行比较详细的岩土热物理性质的勘察，因此全国范围内的热物理性质参数较难获得，但是进行某个剖面上热泵适宜性的评价也能反应一定的问题，尤其是具有代表性的剖面。所以本文选择了典型剖面—定兴-黄骅剖面进行研究，确定了剖面上建立土壤源热泵系统的适宜性。

6.2.1 典型剖面的特点及分段

定兴-黄骅水文地质剖面是我国华北地区从山前到滨海的一个典型剖面，它的平面位置见图 6.3 。它的剖面图见图 6.2。从图中可以看出，山前倾斜平原地形坡度较大，沉积物颗粒较粗，大部分为含水沙层，只有少部分的粉土和粘土，一般情况下，山前地区地下水补给丰富，水质优良；平原中部地区地形坡度渐缓，沉积物颗粒变细，呈现砂土、粉土、粘土互层的现象，层次增多，地下水矿化度有所升高。平原下部湖滨和滨海区，地势低平，土质粘重，粘土含量高，地下水矿化度也较高。剖面的上述特点也使得整个剖面不同区域呈现出建立土壤源热泵系统不同的适宜性。

根据钻孔资料，将剖面从山前到滨海分为 12 段，见图 6.2。因为土壤源热泵系统地埋管埋深一般都在 200m 以上，所以本文只分析距地面 200m 以上那部分岩土对建立土壤源热泵系统的影响。

6.2.2 剖面上每一部分的热导率、热扩散率、水位、水位梯度的确定

6.2.2.1 热导率及热扩散率的计算

在确定岩土的热导率和热扩散系数时，分别将剖面上每一段不同类型岩土的面积相加，确定不同岩性的岩土所占的比例见表 6.19。不同岩性的岩土有不同的热导率和热扩散率，用每一段不同类型岩土面积的百分比作为权重，求得每一段剖面的热导率和热扩散率。公式为：

$$Ks=\sum_{i=1}^{4}\frac{si}{S}\times Ksi \tag{6-1}$$

$$\alpha=\sum_{i=1}^{4}\frac{si}{S}\times \alpha si \tag{6-2}$$

其中 si—某段剖面某一类岩土面积的百分比

Ksi—某一类岩土的热导率；αsi—某一类岩土的热扩散率

S—某段剖面的总面积

Ks—某段剖面的热导率；α—某段剖面的热扩散率

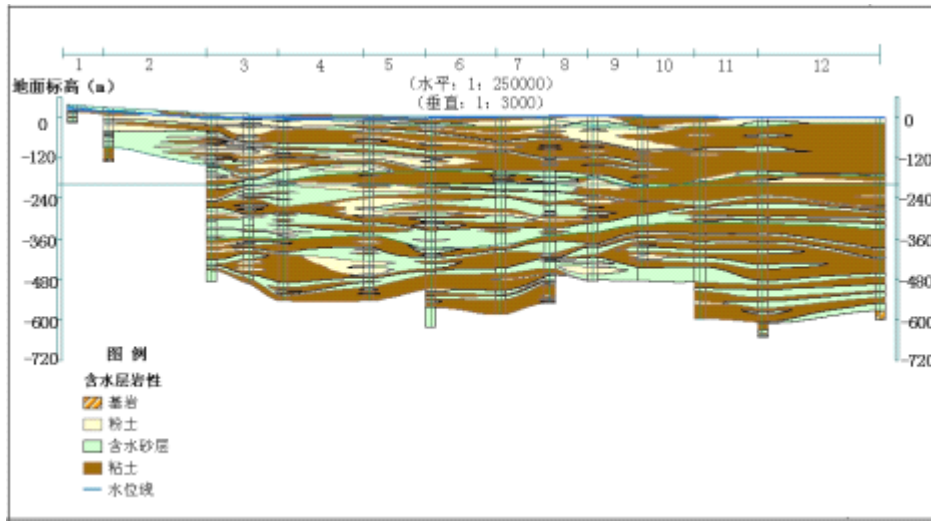


图 6.2　典型剖面（定兴-黄骅剖面）图

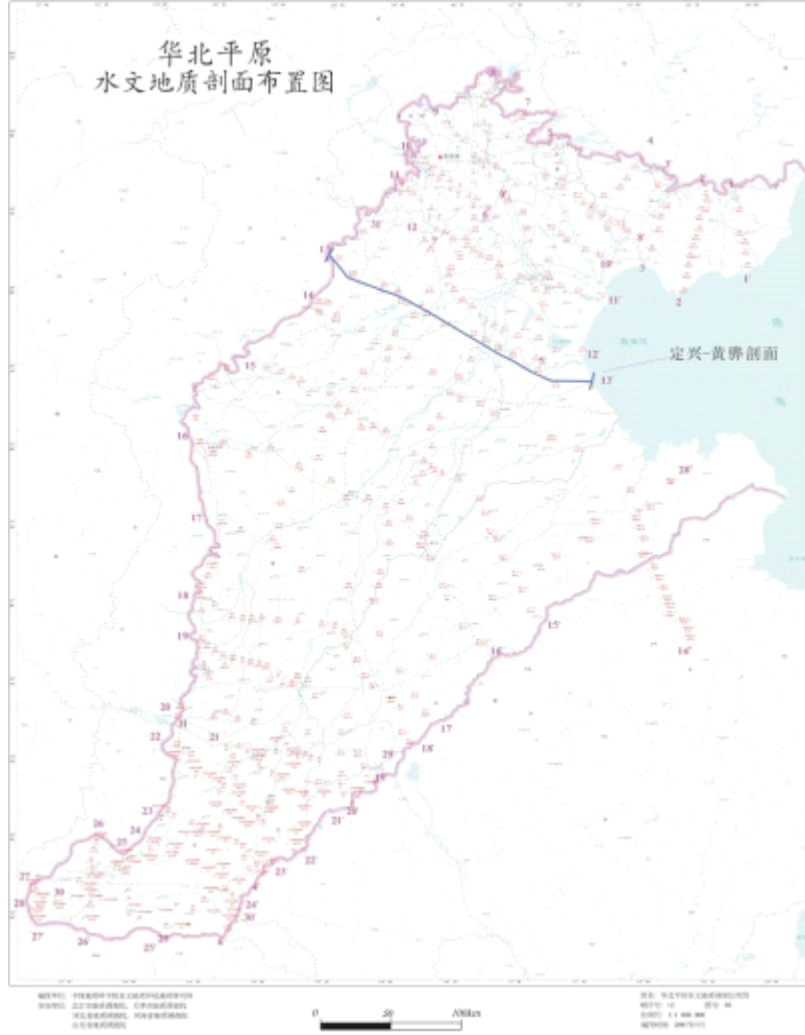


图 6.3 典型剖面平面位置图

表 6.19 剖面上各段（共 12 段）不同岩土百分比

面积比 / 分段 / 岩土类型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
含水砂层	0.593	0.534	0.269	0.30	0.233	0.190	0.187	0.162	0.185	0.066	0.081	0.082
粘土	0.300	0.198	0.322	0.45	0.488	0.624	0.645	0.547	0.520	0.809	0.781	0.781
粉土	0.065	0.268	0.409	0.25	0.279	0.186	0.168	0.291	0.295	0.125	0.138	0.137
基岩	0.042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

不同岩性的土壤其热导率及热扩散率都不同，浅层地热能勘查评价技术规范中列出了空气、水和几种常见岩石的比热、密度、热导率和热扩散率的经验值，见表 6.20。

表 6.20 空气、水和几种常见岩石的比热、密度、热导率和热扩散率[54-56]

岩石名称	比热（J/kg℃）	密度（kg/m^3）	热导率（w/m℃）	热扩散率（m^2/d）
花岗岩	794	2700	2.721	0.110
石灰岩	920	2700	2.010	0.070
砂岩	878	2600	2.596	0.098
湿页岩			1.4～2.4	0.065～0.084
干页岩			0.64～0.86	0.055～0.074
钙质砂(含水率 43%)	2215	1670	0.712	0.017
干石英砂(中-细粒)	794	1650	0.264	0.017
石英砂(含水率 8.3%)	1003	1750	0.586	0.029
砂质粘土(含水率 15%)	1379	1780	0.921	0.032
砂（砂砾石）			0.77	0.039
粉砂			1.67	0.050
亚粘土			0.91	0.042
粘土			1.11	0.046
砂（饱水）			2.50	0.079
空气(常压)	1003	1.29	0.023	1.536
冰	2048	920	2.219	0.102
水(平均)	4180	1000	0.599	0.012

根据不同岩性土壤的热导率及热扩散率以及其在每段所占的百分比，计算得每段剖面的热导率和热扩散率为：

表 6.21 剖面上每段（共 12 段）的热导率及热扩散率

分段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
热导率	1.770	1.734	1.579	1.540	1.498	1.426	1.417	1.446	1.466	1.320	1.320	1.320
热扩散率	.951	1.065	.846	.821	.794	.747	.741	.707	.773	.667	.678	.678

6.2.2.2 确定每一段的水位及水位梯度

计算每段的平均水位，即计算每段剖面两端水位的平均值为其在本段的平均水位并分别计算每段水位的水位梯度值。

6.2.3 确定评价因素的分值

因为评价所用数据的类型和量纲各不相同。为了在统一评价体系内对不同数据进行比较和运算，需要在评价之前对数据进行标准化（规格化）处理，将数据转化为[0，1]之间的无量纲数值。

对于热导率、热扩散率、平均水位及水位梯度用最大最小值法将其转化为[0，1] 之间的无量纲数值，对于降雨入渗系数则采用直接赋值法，确定其分值，见下表：

表 6.22 降雨入渗系数数据标准化结果

分段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
标准化值	.9	.8	.6	.4	.4	.5	.4	.4	.4	.3	.4	.6

6.2.4 根据所建的指标体系进行权重计算

6.2.4.1 目标 A 的判断矩阵及一致性检验

1、构造出 A-B(第二层因素相对第一层的比较判断)，判断矩阵（目标 A 的单排序）及 A 对 B 的权重如下：

表 6.23 目标 A 的单排序及权重

A	B_1	B_2	$w^{(2)}$
B_1	1	2	0.667
B_2	1/2	1	0.333

根据所得的 $w^{(2)}$的值计算判断矩阵的最大特征值可得 λ max=2，C.I.=0，R.I.=0，C.R..=0<0.1

表 6.24 准则层 B_1的单排序及权重

B_1	C_1	C_2	$P_1^{(2)}$
C_1	1	1	0.5
C_2	1	1	0.5

根据所得的$P_1^{(2)}$的值计算判断矩阵的最大特征值可得 λ max=2，C.I.=0，R.I.=0，C.R.=0<0.1，实际上二阶判断矩阵一般不需要进行一致性检验。

表 6.25 准则层 B_2 的单排序及权重

B_2	C_3	C_4	C_5	$P_2^{(3)}$
C_3	1	1	2	0.4
C_4	1	1	2	0.4
C_5	1/2	1/2	1	0.2

根据所得的$P_2^{(3)}$的值计算判断矩阵的最大特征值可得 λ max=3，C.I.=0，R.I.=0，C.R.=0<0.1，表明上述判断矩阵一致性较好，相对权重计算正确。

6.2.4.2 方案层 C 对目标层 A 的总排序及一致性检验

表 6.26 方案层 C 对目标层 A 的总排序

C	W_1=0.667	W_2=0.333	ω_i
B	$P_1^{(3)}$	$P_2^{(2)}$	$\omega_i = \sum_{j=1}^{5} p_{ij} C_j$
C_1	0.5		0.3335
C_2	0.5		0.3335
C_3		0.4	0.1332
C_4		0.4	0.1332
C_5		0.2	0.0666

从总排序表中可以看出各影响因素相对重要的权值。根据权重进行计算得：

C.I.=（CI_1,CI_2）$W^{(2)}$=(0,0)$(0.667,0.333)^T$=0

R.I.=(RI_1, RI_2) $W^{(2)}$=(0,0) $(0.667,0.333)^T$=0

C.R.= C.I./R.I.=0<0.10，故满足整体一致性要求。

6.2.5 典型剖面土壤源热泵系统评价总分值的计算及适宜性分区

本文以剖面上部的色块来代表每个剖面各影响因素的权重，根据已计算出的权重，将影响土壤源热泵系统适宜性分区的单因素色块进行加权空间叠加、运算、合并，最终生成一个临时性的综合色块图层，再根据下表的定兴-黄骅剖面土壤源热泵系统适宜性标准，将剖面进行适宜性分区，得到华北平原定兴-黄骅剖面土壤源热泵系统的适宜性分区图。见图 6.4：

根据我国土壤源热泵系统的应用现状及发展趋势，确定其分区级别和综合指数值划分标准。见表 6.27：

表 6. 27 典型剖面土壤源热泵系统适宜性分级标准

分区级别	适宜区	较适宜区	勉强适宜区	不适宜区
综合指数值	0. 70-1.00	0.45-0.70	0.25-0.45	0-0.25

根据上述适宜性分区标准进行数据分类，从而得到典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性分区图，见图 6.4：

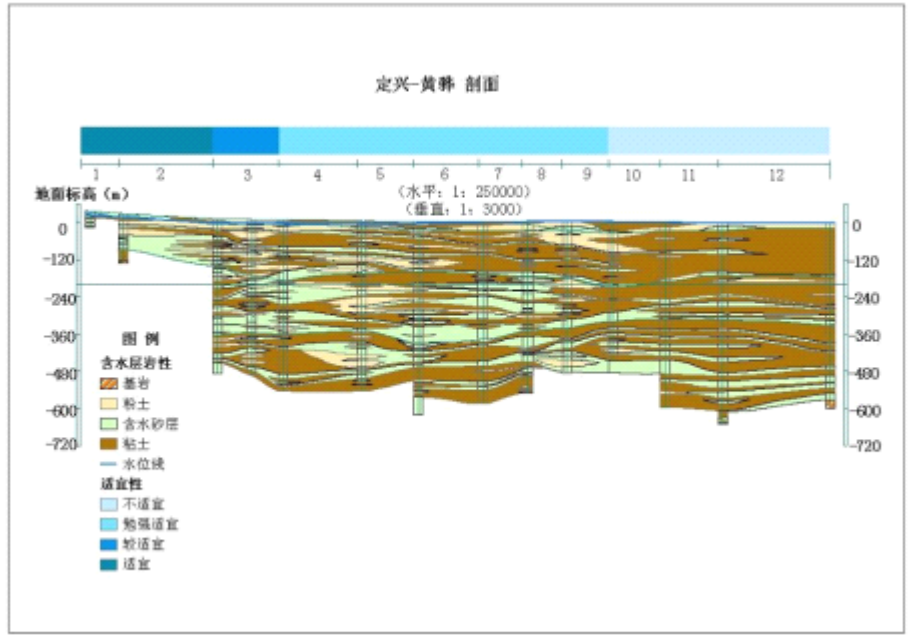


图 6.4 典型剖面土壤源热泵系统应用适宜性分区图

本文是以剖面上部的色块来表示适宜程度的，颜色越深说明适宜性越好，越浅说明适宜性越差。由适宜性分区图可以看出，越靠近山前的地区，其适宜性越好，越接近滨海的地区其适宜性就越差。经过大体计算，这个剖面上，砂：粘：粉=0.6：0.2：0.2 时，适宜建立土壤源热泵系统；砂：粘：粉=0.3：0.3：0.4 时较适宜建立土壤源热泵系统，砂：粘：粉=0.2:0.5：0.3 时勉强适宜建立土壤源热泵系统；砂：粘：粉=0.1：0.8：0.1 时不适宜建立土壤源热泵系统。因此可以看出，剖面上饱水砂层越多，地下水位越高、流动性越强越、降雨入渗系数越大越有利于建立土壤源热泵系统，这主要与热泵换热器与周围环境的对流热交换有关。

这里应该注意的是，作为一种综合性评价，适宜性评价并不等于定性的确定土壤源热泵系统的建设地点，它只是一种指导性的意见。另外，不适宜建立土壤源热泵系统，只是一种相对的概念，只能说滨海地区相对于山前地区来说较不适宜建立土壤源热泵系统，并不是绝对的不适宜，比如，已有研究证明我国四川红层区也可以建立土壤源热泵系统。从上表中可以看出，花岗岩的热导率和热扩散率都是最高的，实际上土壤源热泵系统非常适合建立在这样的地区，但花岗岩多分布于山区，交通不便及钻探困难等问题制约着热泵系统在这样的地区建设。因此，在进行土壤热泵系统建设时，必须考虑场地的实际情况，在适宜区内开展更为详细的前期勘察及调查工作，更为精确的确定适合建设土壤源热泵系统的场地。

第七章 结论及建议

§7.1 结论

地源热泵系统适宜性评价是通过应用热泵技术，确定开发利用浅层地热资源适宜程度的过程，对我国区域浅层地热资源的合理利用及区划有着深远的意义，为地源热泵系统因地制宜的应用提供了参考。目前很少有学者从事地源热泵系统适宜性评价方面的研究，尤其是我国范围内的适宜性评价，本论文正是基于这种前提下进行的一次有意义的尝试，主要有以下内容及结论：

1、通过研究我国地源热泵系统适宜性评价的理论与方法并对层次分析法的原理、特点进行详细的分析研究，确定了层次分析法（AHP）是进行我国地源热泵系统应用适宜性评价的较适合的方法，。

2、通过采取专家意见，初步建立了我国地源热泵系统应用适宜性评价指标体系，首次将地源热泵系统适宜性评价与社会、经济、环境等因素相结合，相比于以往其他的只针对水文地质条件或工程地质条件的地源热泵系统适宜性评价有所改进，研究方法上有所创新。在指标选取过程中，依据我国的实际情况，选取了富水性、地下水水温、矿化度、地形地貌、回灌条件、人口密度、人均 GDP、我国年平均气温，我国年平均降雨量、地面沉降、地面塌陷、地裂缝、典型剖面水位变化、热导率、热扩散率等一系列对我国地源热泵建设有较大影响的因子作为评价指标。

3、运用层次分析法并结合专家意见确定了指标体系各层次各因素的权重，利用 ARCGIS 的空间叠加功能，最终得到我国地下水源热泵系统应用适宜性评价分区图，从分区图中可以看出：比较适合应用地下水源热泵系统的地区主要分布在我国的东部，如东北的某些区域、华北平原的部分地区，南方主要有云贵、四川、湖北、湖南的某些地区，并且从分区图中可以发现适宜建立地下水源热泵系统的区域中平原盆地及富水性较好的地区居多。不适宜建立地下水源热泵系统的地区主要位于我国西部的青海、西藏、新疆的部分区域、内蒙的大部分地区以及黑龙江的北部，尤其是沙漠和极度缺水的区域以及部分极度寒冷的地区。我国目前已经建立地下水源热泵系统的地区也大多集中在所划适宜区内，如沈阳、北京、天津、武汉等地，说明所建立的评价指标体系是较正确的，评价结果比较可信，可以用来作为建立地下水源热泵系统的依据。

4、在进行我国土壤源热泵系统应用适宜性分区时，对定兴-黄骅剖面上建立土壤源热泵的适宜性进行了分区，得出的结果为：越靠近山前的地区，其适宜性越好，越接近滨海的地区其适宜性就越差。剖面上饱水砂层越多，越有利于建立土壤源热泵系统。并且地下水位越

高、流动性越强、降雨入渗系数越大的地区越有利于建立土壤源热泵系统，这主要与热泵换热器与周围环境的对流热交换有关。

适宜性评价并不等于建立地源热泵系统的指定地点，它只是一种指导性的意见，所以所得到的评价结果仅能宏观的划分出适宜程度的大致区域，因此，在进行地源热泵系统建设时，必须考虑场地的实际情况，在适宜区内开展更为详细的前期勘察及调查工作，更为精确的确定适合建设地源热泵系统的场地。不适宜建立地源热泵系统，只是一种相对的概念，并不是绝对的不适宜，比如，已有研究证明我国四川红层区也可以建立土壤源热泵系统。

以地理信息系统为平台的我国地源热泵系统适宜性评价，实际上是以多学科为载体的多信息的综合表达。因此，我国地源热泵系统适宜性评价结果，不仅能指导浅层地热资源的合理利用，还能为浅层地热资源管理提供更多的辅助决策信息，对我国浅层地热资源规划管理及开发利用能起到重要的参考作用。

§7.2 建议

1、本文利用了“3S”技术的其中一部分，但是随着地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)和遥感(RS)技术的发展，应尽快将 “3S”先进的技术手段运用到地源热泵系统适宜性评价研究中去，尤其是浅层地热资源信息获取、水文气象条件动态监测、时空分析，使我国地源热泵系统适宜性评价从静态、定性朝动态、定量化、智能化方向发展，保证数据的及时更新。

2、我国地源热泵系统适宜性评价是对影响我国地源热泵系统建设的所有影响因素所进行的综合评价，涉及的因素比较广泛，而且有的因素之间有具有相关性影响。所以今后在进行评价中要收集尽量多的评价因素，并对他们的影响程度进行定量的相关性分析，使选择出的因素更具有代表性，使评价体系更加完善，这样才能更加科学的评价我国地源热泵系统的适宜性特征。

3、作为一种综合性评价，适宜性评价并不等于地源热泵工程建设场地的定点，地源热泵系统的建设应在适宜性评价的基础上，在适宜区开展更为详细的前期勘查工作，确定合适的地源热泵系统建设场地。并且还应同时考虑三个“效益”(经济效益、生态效益和社会效益)的问题，并以区域浅层地热资源可持续利用为根本目标。

参考文献

[1]李元旦,张旭. 土壤源热泵的国内外研究和应用现状及展望.制冷空调与电力机械,2002,23(85):4~7;

[2] M.J.Hatten. Groundwater heat pumping: lessons learned in 43 years at one building.ASHRAE Transactions,1992,Vol.98(1):1031-1037;

[3]魏唐棣,胡鸣明,丁勇等. 地源热泵冬季供暖测试及传热模型.暖通空调,2000,(01):12~14

[4]P.J.Hughes. Survey of water-source heat pump system configurations in current practice.ASHRAE Transactions,1995,Vol.101(2):1095~1100;

[5]E.C.Knipe,K.D.Raffery. Corrosion in low temperature geothermal application.ASHRAE Transactions,1985,Vol.91(2B-1):81~91;

[6]李高建,胡玉叶. 地源热泵技术的研究与应用现状.节能技术,2007,25(142):176~178;

[7]范萍萍,端木琳,王学龙等.土壤源热泵的发展与研究现状.煤气与热力, 2005,25(10):66~69;

[8]胡鸣明, 刘宪英.国外地源热泵的发展历史与设计方法.四川制冷,1999，（2）：21～23;

[9] LPRATSCH, PHUGHES. Technical and market Results of Major U.S. geothermal heat pump programs.7th international energy agency conference on heat pumping technologies. Beijing, China Architecture Design and Research, 2002:351-358;

[10]周建伟,谢先明,周爱国等. 武汉市地下水源热泵应用研究现状及发展前景分析.工程建设与设计,2007,(11):9~13;

[11] Sanner B,Karytsas C,Mendrinos D,Rybach L.Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe.Geothermics,2003,3（2）:579～588;

[12] Chiasson A D,Rees S J,SpiterJD.A Preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems.ASHRAE Transactions，2000，106（1）:380～393;

[13]Norio Tenma,Kasumi Yasukawa,George Zyvoloski. Model study of the thermal storage system by FEHM code.Geohtermics,2003,32:603～607;

[14] Met Z P. Development of a validated model of ground coupling. Proceedings of the Annual Meeting-American Section of the International Solar Energy Society, 1980, 3(1): 344-348;

[15] Gu Yo′ Neal D L. Development of an equivalent diameter expression for vertical U- tubes used in ground-coupled heat pumps. ASHRAE Transactions.1998,104(2): 347-355;

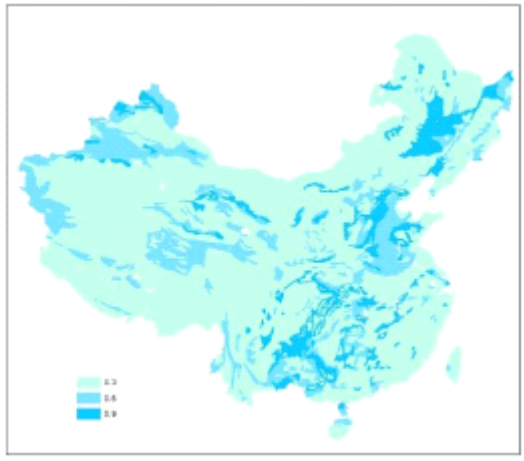
[16] R.Curtis, J Lund, B.Sanner et al. Ground Source heat pump-Geothermal Energy for everyone, everywhere: Current worldwide activity. Proceedings World Geothermal Congress.2005;

[17]倪龙,封家平,马最良等.地下水源热泵的研究现状与进展.建筑热能通风空

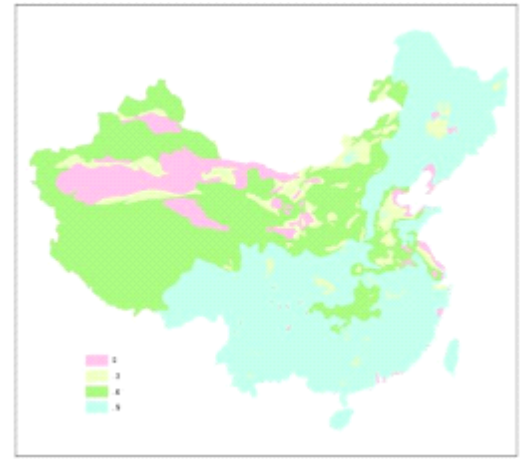
调,2004,23(2):26~30;
[18]徐秋敏. U 型垂直埋管式地源热泵地下传热特性的实验研究:[硕士学位论文] .大连:大连理工大学, 2005;
[19]刁乃仁,方肇洪.地源热泵优化设计地热换热器.建设科技, 2004, (7): 32-33;
[20]李道强.地源热泵空调系统的技术经济评价及地热换热器优化研究:[硕士学位论文].西安:西安建筑科技大学, 2004;
[21]李凡. 关于热泵技术应用的几个问题. 节能,2006,4:19~21;
[22]于卫平.水源热泵相关的水源问题.机电信息,2005,21:23~26;
[23]胡江溢,贾俊国,林弘宇等. 地下水源热泵应用调研与分析.电力需求侧管理,2007,9(3):38~40;
[24]文远高,赵峰. 水源热泵系统运行能耗分析.制冷空调与电力机械,2007:46~48;
[25]张远东,魏家华,李宇等. 地下水源热泵采能的水-热耦合数值模拟.天津大学学报,2006,8:907~912;
[26]刘立才,王金生,张霓等.北京城市规划区水源热泵系统应用适宜性分区.水文地质工程地质,2006,6:15~17;
[27]王亚斌,张海涛.天津市水源热泵系统水文地质条件适宜性评价方法研究. 地温资源与地源热泵技术应用论文集, 2007:72~79;
[28]薄迎. 浅析地源热泵空调系统. 山西建筑,2007,33（33）:252-253;
[29]Sanner B,Karytsas C,Medorinos D,et al. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. Geothermics, 2003, 32: 579-588;
[30]张超,刘寅,周光辉等. 地源热泵的应用对环境的影响分析. 制冷技术,2008,36(4):62-64;
[31]何崇智.土壤源热泵特性分析及其在天津地区的应用煤气与热力, 2007,27(4):62~64;
[32]程孟孟.地面沉降危害及防治对策.决策管理,2008,(12):29~30;
[33]武强.我国城市地裂缝灾害问题与对策.中国地质灾害与防治学报,13(2):70~72;
[34]刘江龙. 广州市地面塌陷分布特征与人为致灾因子分析. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(3):64~68;
[35]罗宇生.湿陷性黄土地基处理.第一版.北京：中国建筑工业出版社,2008 年 5 月.85~89;
[36]陈琳,王宁.层次分析法在软件过程改进管理中的应用. 计算机与信息术,2007,(3):79~82;
[37]周勇,田有国,任意等.定量化土地评价指标体系及评价方法探讨.生态环境,2003,12(2):37~41;
[38]张颖瑶.政府网站评价方法研究.中国集体经济,2008,(19):62~63;
[39]黄宝龙,于力.综合指数法和 TOPSIS 法在医疗质量综合评价中的应用.中国医院统计.2008,15(3):219~221;
[40]邵春燕.基于模糊综合评判法的企业内部财务控制评价.统计与决策,2008,(21):181~182;
[41]尚红云.因子分析法在 SPSS 教学实践中应强调的几个问题.统计与咨询,2008,(5):66~67;
[42]吴江,徐国柱.基于熵值法的中国上市公司并购绩效实证研究[R].1~10;
[43]李新东.基于 GIS 和 FuzzyAHP 的水稻的土地适宜性评价:[硕士学位论文].北京：中国科学院, 2007;

[44]孙立山.模糊多属性决策结合层次分析法在公路可研多方案决策中的应用:[硕士学位论文].天津河北工业大学,2005;
[45]刘雷,李南. 建设项目动态联盟背景下应用因子分析法评价伙伴施工安全.数理统计与管理,2008,27(6):997~1003;
[46]王贵玲,刘昀,蔺文静等.我国地下水源热泵应用适宜性评价.地温资源与地源热泵技术应用论文集,2008:19~26;
[47]邱楠生,胡圣标,何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用.第一版.北京:石油出版社,2004.15~24;
[48]王向岩.超强吸水树脂与源土混合作为地源热泵供热系统回填材料的实验研究.太阳能学报,2007,28(1):23~27;
[49]马最良,吕悦.地源热泵系统设计与应用.第一版.北京:机械工程出版社,2007.29~32;
[50]夏敏.农地适宜性评价专家系统研究:[硕士学位论文].南京：南京农业大学，2000;
[51]张小波.GIS 支持下的土地适宜性评价研究——以库车县为例:[硕士学位论文].乌鲁木齐：新疆大学,2007;
[52]陈健飞,刘卫民.Fuzzy(分类与分级模糊法)综合评判在土地适宜性评价中的应用.资源科学.1999, 7, 21(4);
[53]李峰,程存学.层次分析法应用于后勤机动保障基点选址研究.中国系统工程学会决策科学专业委员会第六届学术年会论文集; 2005:58~63;
[54] Ian Gale. Ground source heat pumps: development of Geo Reports for potential site characterization, issue 1.2. British Geological Survey, Commissioned Report. 2004, CR/05/217N. pp 24-25;
[55] GB 50366-2005,地源热泵系统工程技术规范[S];
[56] GB 11615-89, 地热资源地质勘查规范[S].

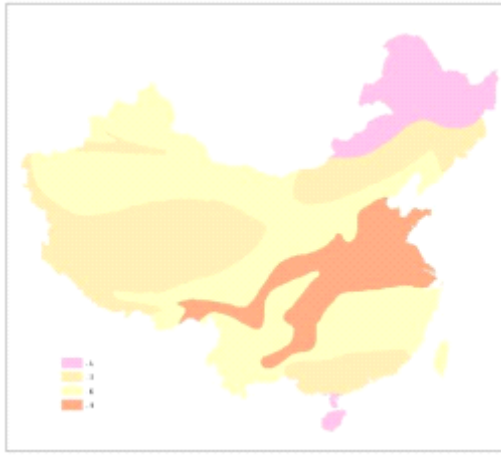
附　　图



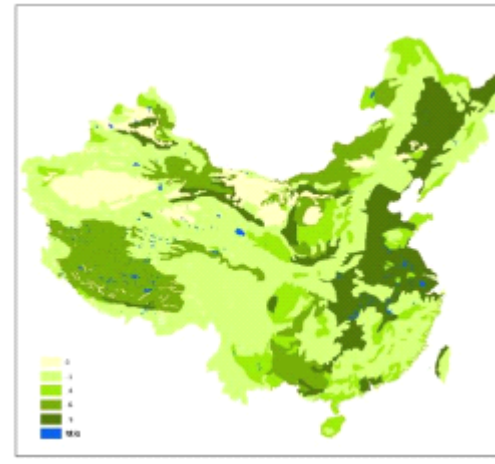
a.富水性分区图



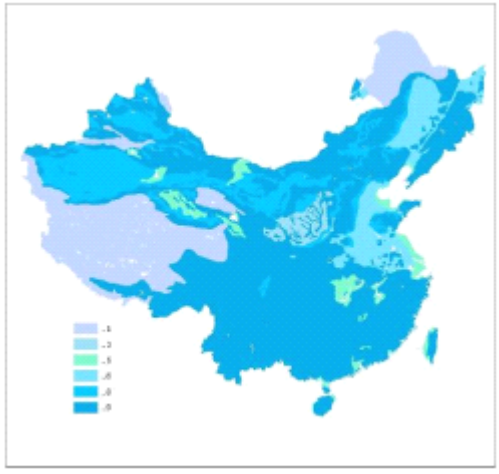
b.矿化度分区图



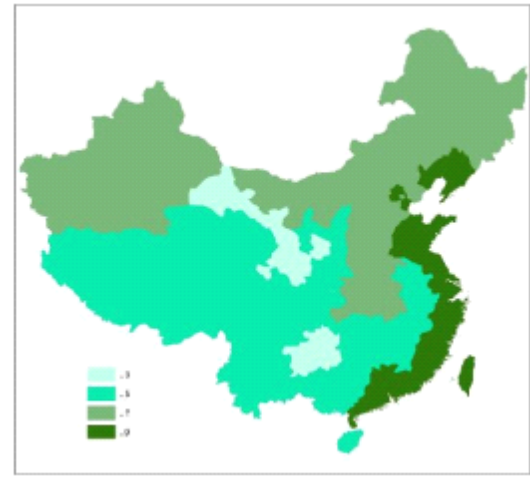
c.地下水温分区图



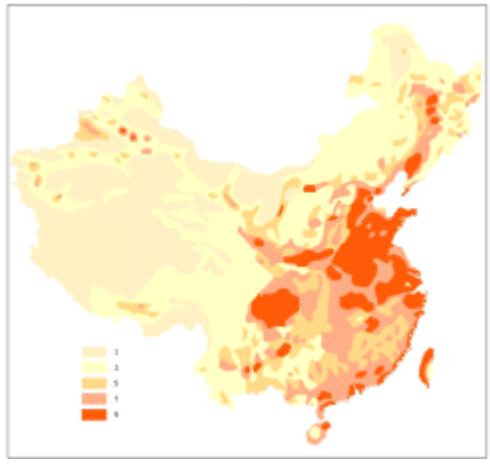
d.地形地貌分区图



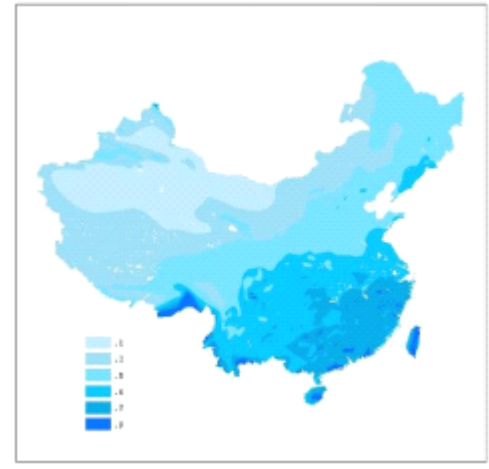
e.地下水类型分布图



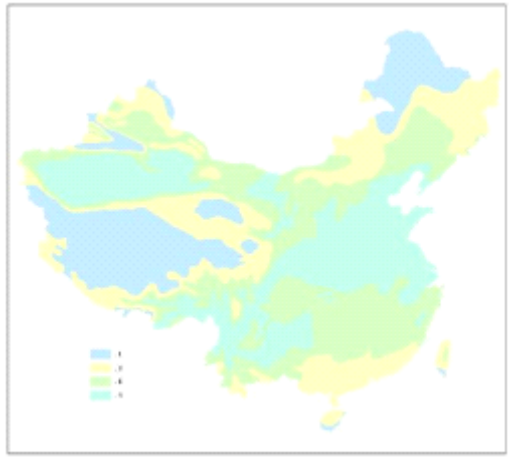
f. GDP 分区图



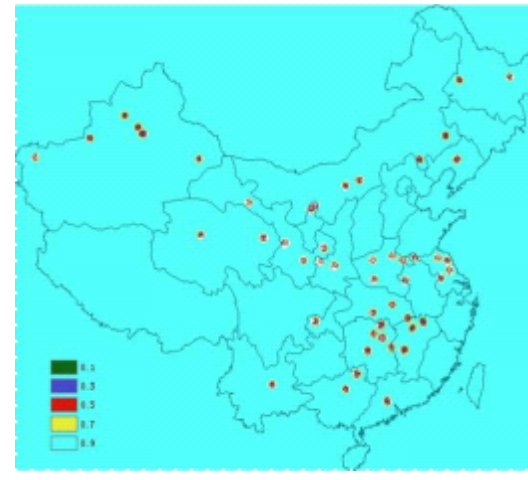
g.人口密度分区图



h.年降水量分区图



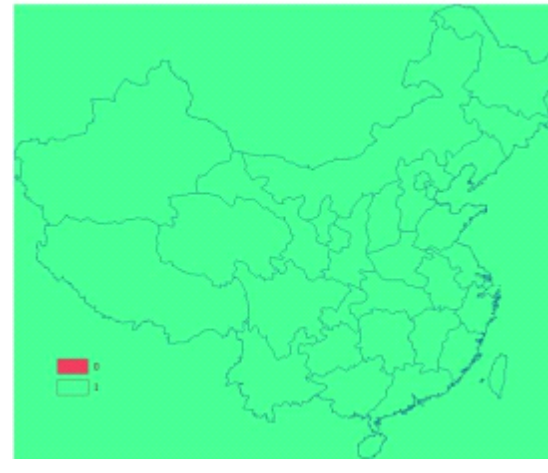
i.年均气温分区图



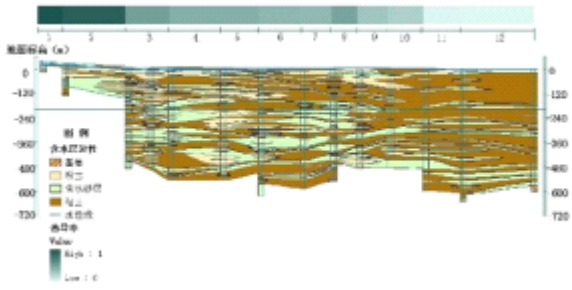
j.降落漏斗分区图



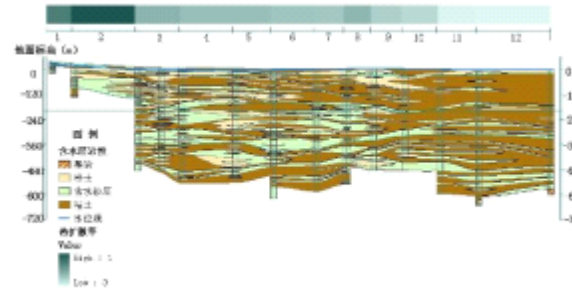
k.地面塌陷分区图



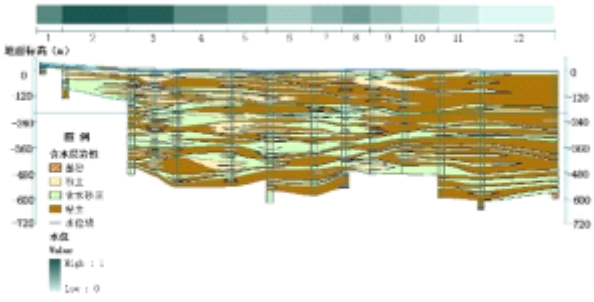
l.地裂缝分区图



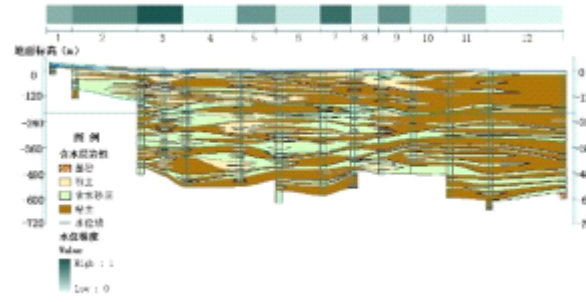
m.热导率分布图



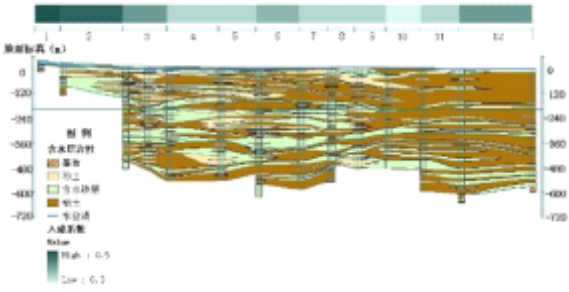
n.热扩散率分布图



o．水位分布图



p．水位梯度分布图



q.入渗系数分布图