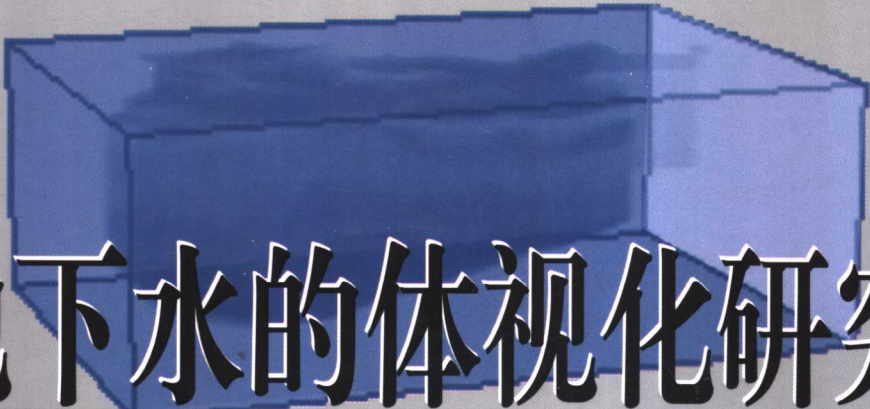


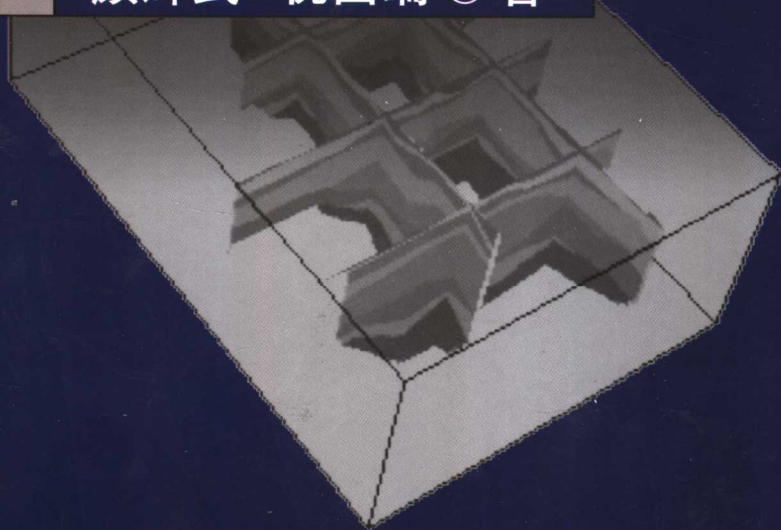


地下水的体视化研究



武 汉 大 学 学 术 丛 书
WUHAN UNIVERSITY ACADEMIC LIBRARY

颜辉武 祝国瑞 ● 著



全国优秀出版社
武汉大学出版社



武汉大学学术丛书

地下水的体视化研究

颜辉武 祝国瑞 著



普 支 : 书 号 发 行

宜 小 册 : 18 号 书 号

推 荐 号 : 18 号 书 号

(山 东 省 昌 乐 县 75001) 林 斌 出 学 大 双 五

(电 子 邮 件 : wqb1@whu.edu.cn 网 址 : www.wqb.whu.edu.cn)

3 页 封 3 字 千 8 武 汉 大 学 出 版 社



50.00.00 元 付 50.00.00

87.0.9.105019

凡 欲 知 悉 本 书 内 容 者 请 向 本 社 索 取 样 本 或 向 各 地 书 店 定 购 本 书 均 可 索 取 样 本 或 向 各 地 书 店 定 购 本 书 均 可 索 取 样 本

24011/1

972014

图书在版编目(CIP)数据

地下水的体视化研究/颜辉武,祝国瑞著. —武汉:武汉大学出版社,
2004. 8
ISBN 7-307-04206-1

I. 地… II. ①颜… ②祝… III. 计算机图形学—应用—地下水—研究 IV. P641—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 038932 号

责任编辑:解云琳 责任校对:程小宜 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)
(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:湖北省通山县印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:12.125 字数:295 千字 插页:3

版次:2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-04206-1/P·73 定价:25.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售门联系调换。



颜辉武 1970年12月出生，湖南省株洲市茶陵县人，武汉大学资源与环境科学学院副教授，1998年在武汉测绘科技大学获地图学硕士学位，2002在武汉大学获地图制图学与地理信息工程博士学位，2003年进入清华大学环境科学与工程系做博士后研究，主要研究领域为环境信息管理、地图学与地理信息系统。负责和参加过多项科研项目，发表学术论文30余篇。1996年曾获国家测绘总局科技进步三等奖。



祝国瑞 武汉大学资源与环境科学学院教授、博士生导师，从事计算机制图、地理信息系统、土地信息技术等方面的教学和研究工作。

内 容 提 要

本书阐述了地下水的基本知识及其对人类发展的意义,对地质领域三维可视化技术的发展及国内外研究现状作了简要回顾,比较系统地介绍了体视化的基本概念、原理和算法,深入研究了三维地质构模的理论和方法,包含水文地质层及其内部物理、化学性质的体数据的生成,基于光线投射算法的地下水三维体数据的显示及对于光线投射算法的改进,创造了基于体素的地质层的体积计算方法及基于体数据的剖切和自动生成水文地质图,利用向量场技术对于地下水流场进行了实例研究,建立了研究区第Ⅱ承压含水层地下水流的数学模型,形象、直观地显示了地下水降落漏斗的形成过程和发展变化规律,利用 VC++ 和 VTK 工具开发了可实际应用的“地下水三维可视化系统”。

体视化技术在水文学、地质学、物理学、化学、医学、显微摄影学和工业检测中都有大量潜在的用途。本书以地下水的可视化为例研究体视化技术及其应用,可供高等学校相关专业的教师、研究生、本科生及相关学者和科技人员参考。

前 言

地下水是赋存于地面以下岩土空隙中的水，是水资源的重要组成部分。在经济发达、人口众多的地区，人类活动对于地下水的赋存状态和运动规律产生了重大影响。在复杂的生态环境系统中，地下水的变化正在成为一个敏感的因子。由于地下水不能被人的视力直接察觉，过去只能通过分散在地下水动态监测点上的离散数据去认识它。

体视化 (Volume Visualization) 技术是在计算机图形学、图像处理、计算机视觉等学科相关知识的基础上发展起来的，旨在对包含物体内部信息的体数据 (Volume Data) 进行处理、分析和显示。它具有传统的计算机图形学无可比拟的优越性，是科学计算可视化、计算机图形学和计算机成像技术的一场革命。

利用体视化技术研究地下水，可以将人们通过地质勘探和监测获得的离散的、静态的地下水信息用直观的图形、图像形式，反映其赋存条件、存在状态及运动规律，并且可通过地下岩层的构造、透水性、孔隙度等数据计算其储量、流向、流速，分析对于地下水的开发或补充所产生的生态影响，指导人们科学地开发利用地下水资源，使人类和环境处于良性的互动状态，为人类的可持续发展创造条件。

本书在博士学位论文《体视化技术及其在地下水资源研究中的应用》的基础上改编而成。书中论述了三维可视化技术在地学领域研究的意义和科学价值，回顾了国内外的研究现状，介绍了体视化的基本概念、原理和算法，研究了包含水文地质及其内部物理、化学性质的体数据的生成、量测、处理和显示，特别是利用向量场可视化技术对由于过量开采在地下水流场中形成的降落漏斗的发展过程、流向、流速及其变化规律进行了有效的三维动态显示，并利用 VC++ 与 Kitware 公司的可视化工具软件包 VTK 开发了一个“地下水三维可视化系统”。

本研究得到了阚国年教授领导的南京师范大学“江苏省地理信息重点实验室”以及该室的倪绍祥教授、陈锁忠副教授，中国地质大学的陈建国研究员，桂林地质学院的彭军还副教授，中国地质科学院的肖炎银研究员、陈振辉工程师，中国科学院自然资源与地理研究所的廖克教授，北京大学的吴健生博士，泉州华侨大学的涂超博士，武汉大学的周洞汝教授以及资源与环境科学学院的领导、老师和学友们的无私帮助。在此，对于所有为该书的出版作出过贡献的老师和朋友们致以崇高的敬意和真诚的感谢！

由于作者才力、学识所限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2003 年 12 月 29 日

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 地下水基础知识	(3)
1.2.1 地下水概述	(3)
1.2.2 地下水的物理与化学性质	(7)
1.2.3 地下水的运动	(8)
1.2.4 地下水的分类	(10)
1.3 地学信息三维可视化的国内外研究现状	(12)
1.4 本书的主要研究内容	(16)
第二章 体视化的基本理论与方法	(18)
2.1 体视化的基本概念	(18)
2.1.1 可视化、科学计算可视化与体视化	(18)
2.1.2 体数据的来源与分类	(19)
2.1.3 体视化的基本流程	(23)
2.1.4 体视化的软件及硬件	(24)
2.1.5 体视化的应用	(26)
2.2 面绘制原理与算法	(27)
2.2.1 面绘制基本原理	(27)
2.2.2 面绘制典型算法	(27)
2.3 体绘制原理与算法	(30)
2.3.1 概 述	(30)
2.3.2 规则体数据的体绘制算法	(32)
2.3.3 不规则体数据的体绘制算法	(35)
2.4 混合绘制原理与算法	(37)
2.5 体视化研究的发展前沿	(38)
2.6 本章小结	(39)
第三章 水文地质层及其内部物理化学属性体数据的生成	(40)
3.1 三维地质构模的理论与方法	(40)
3.2 呈均质变化特征现象的三维体数据生成	(47)

3.3	呈水平变化特征现象的三维体数据生成	(55)
3.3.1	距离倒数加权法的基本原理	(56)
3.3.2	距离倒数加权法的改进研究	(58)
3.3.3	水文地质层孔隙度体数据生成	(63)
3.4	呈三维变化特征现象的体数据生成	(64)
3.4.1	引言	(64)
3.4.2	Kriging 方法的基本原理	(65)
3.4.3	采用 Kriging 方法生成地下水温体数据	(70)
3.5	本章小结	(75)
第四章	地下水三维体数据的体视化	(76)
4.1	基于光线投射算法的地下水三维体数据的可视化	(76)
4.1.1	光线投射算法	(77)
4.1.2	利用光线投射算法实现地下水三维体数据的体绘制	(87)
4.2	体视化中 LOD 技术思想的应用与实现	(87)
4.2.1	层次细节简化(LOD)技术原理	(88)
4.2.2	利用层次细节简化技术思想改进体视化中的交互显示速度	(89)
4.3	利用八叉树改进光线投射体绘制算法	(91)
4.3.1	光线投射体绘制改进算法的回顾研究	(92)
4.3.2	八叉树模型	(94)
4.3.3	线性八叉树的建立	(98)
4.3.4	基于线性八叉树结构的光线投射体绘制算法	(99)
4.4	基于体素的水文地质层体积计算	(101)
4.4.1	基于规则体素的体积计算方法	(102)
4.4.2	三维填充算法	(104)
4.4.3	结果检验	(106)
4.5	本章小结	(107)
第五章	基于规则体数据的剖切与三维交互技术	(108)
5.1	基于规则体数据的剖面显示技术	(108)
5.1.1	概述	(108)
5.1.2	插值式剖面(Slice)显示方法	(109)
5.1.3	剖切(Clip)显示	(111)
5.2	三维交互技术	(112)
5.2.1	图形的空间定位	(112)
5.2.2	三维交互中空间数据的属性值量测	(116)
5.3	水文地质专题地图的自动生成	(119)
5.3.1	以属性值为依据进行跟踪	(119)
5.3.2	以链段为依据的多边形跟踪	(120)

5.4 本章小结	(123)
第六章 地下水流场的三维可视化	(125)
6.1 引言	(125)
6.2 研究区第Ⅱ承压含水层地下水流场的三维数值模拟	(126)
6.2.1 研究区水文地质条件概述	(126)
6.2.2 第Ⅱ承压含水层地下水流场三维数学模型的建立	(126)
6.2.3 地下水流场三维数学模型的常见解法分析	(127)
6.2.4 第Ⅱ承压含水层地下水流场模型的三维有限差分数值求解	(128)
6.3 地下水流场的三维可视化	(133)
6.3.1 向量场可视化方法简述	(133)
6.3.2 混合体绘制技术	(136)
6.3.3 利用混合体绘制技术实现地下水流场的三维可视化	(137)
6.3.4 结果分析	(137)
6.4 本章小结	(138)
第七章 地下水三维可视化系统的设计	(139)
7.1 引言	(139)
7.2 可视化开发工具 VTK	(140)
7.2.1 VTK 简介	(140)
7.2.2 VTK 文件格式	(140)
7.2.3 VTK 图形模型与可视化模型	(146)
7.2.4 利用 VTK 进行体绘制	(148)
7.2.5 VC++ 环境下使用 VTK 进行应用程序开发	(152)
7.3 系统总体设计	(157)
7.3.1 系统设计的原则	(157)
7.3.2 系统总体设计	(157)
7.4 数据库设计	(159)
7.4.1 数据库设计原则	(159)
7.4.2 水文地质基础数据库	(159)
7.4.3 基础图形数据库	(163)
7.5 系统功能模块设计	(163)
第八章 总结与展望	(164)
参考文献	(165)
附录	(174)

第一章 绪 论

1. 1 引 言

全面研究环境以及人类活动对环境的影响,是近代科学的一大中心课题。在人类赖以生存的自然环境中,水无疑是一种不可缺少的宝贵的自然资源。作为水资源重要组成部分的地下水,即赋存于地面以下岩土空隙中的水,其水质良好、分布广泛、变化稳定、便于利用,是理想的供水水源。除此以外,地下水还是具有重要价值的工业矿水、医疗矿水及地下热能资源。地下水不仅是一种宝贵的资源,同时也是复杂的生态环境系统中一个敏感的系统,是极重要的生态环境因子,地下水的变化往往会影响生态环境系统的天然平衡状态。近代以来,工农业的迅速发展和城市人口的不断增长使得对水的需求量越来越大,由此产生的各种污染却使得地球上可利用的淡水资源越来越少,因而地下水的需求空前增加,其在环境中的地位也更加突出。

人类活动对地下水的干扰可产生有利于人类的一面,也可产生不利于人类的一面。目前,人类对地下水产生的不利影响主要是由于过量开采或排除地下水,过量补充地下水以及污染物进入地下水所造成。

过量开采或排除地下水,造成地下水位深降,会引起一系列严重的环境地质问题。受地质条件及水文地质条件的制约可归结为四大方面:区域性地下水降落漏斗、地面沉降、海水入侵和水质恶化。

过量开采地下水使浅层地下水位大幅度下降后,会疏干原有的沼泽湿地,水生植物与水禽等随之消失,使原有的景观遭到破坏。在干旱地区,浅层地下水位大幅度下降会使原有的绿洲变成沙漠。例如我国河西走廊的民勤县,本是沙漠间的一片绿洲,经过大量打井采水,地下水位下降了3~7 m,表土干燥,粘结力降低,固沙的灌木枯萎,草丛退化,已有2/3的土地开始沙化。此类现象目前在我国总体上呈发展扩大趋势。

过量开采松散沉积物中的深层地下水,地下水位将会大幅度下降,造成区域性地下水降落漏斗和地面沉降。例如东京、莫斯科、伦敦、巴黎等世界著名的大城市,因超量开采地下水,使地下水位下降了50多米,形成了区域性地下水降落漏斗。在我国,据水利部最新统计,由于超采地下水而出现地面下沉的有西安、天津、太原、呼和浩特、大连、青岛、烟台、秦皇岛、济南、郑州、兰州、上海、常州等30多个城市,它们都不同程度地出现了地面沉降、塌陷与裂缝。其中,据2001年8月13日中央电视台新闻联播节目报道,西安市超采地下水引起长达12 km的地面裂缝,致使137座大型建筑物遭到破坏,著名的名胜古迹大雁塔面临倒塌危险。据《长江日报》2001年8月29日国内新闻专刊报道,哈尔滨市地下水严重超量开采导致地下漏斗区超过500 km²,地面下沉严重的地段已

出现建筑物开裂,并且江河水倒灌造成地下水严重污染;长春市区已形成了4个漏斗区,部分地面下沉。此外,在华北地区,自20世纪70年代以来,因深层淡水的大规模开采,已导致大面积的地面沉降。据1995年统计,沉降量大于200 mm的面积为42 120 km²,沉降量大于500 mm的面积为6 340 km²,沉降量大于1 000 mm的面积为755 km²,形成了十余个沉降中心。长江三角洲的苏州、无锡、常州、嘉兴、杭州、上海发生的地面沉降有连成一片之势,沉降面积达上万平方千米,并有日趋严重的趋势(秦毅苏等,1998;李从先等,1998;刘后昌,2000)。

近年来,我国每年地下水超采量达80多亿立方米,形成地下漏斗区56个,面积达8.7万多平方千米,相当于近3个海南岛的面积,漏斗最深处达100多米。地下漏斗极易导致地面沉降,并引发各种地质灾害。

在滨海地带或有地下咸水的地区超量开采地下水,海水或咸水将入侵地下水,造成水质损坏,减少可利用的地下水资源,严重影响工农业生产和居民生活。例如美国纽约的长岛和加利福尼亚州,日本的东京、神户和滨名湖沿岸,我国的上海、苏北沿海地区、环渤海地区和胶东半岛等地都有不同程度的海水入侵地下水。

过量补充地下水同样也会破坏有地下水参加的各种平衡,导致环境退化。过量补充地下水引起地下水位上升,当平原盆地中地下水上升,使其毛细饱和带达到地表时,便引起土壤的次生沼泽化或次生土壤盐渍化。例如20世纪50年代末期,华北平原曾实行所谓“以蓄为主”的方针,拦蓄降水与地表水,只灌不排,使地下水位抬升,蒸发加强,土壤累盐,造成土壤次生盐渍化;而处于湿润地区的江汉平原,同样由于人为原因造成地下水位过浅,结果引起的原生与次生沼泽化田地高达84 000公顷,占全部耕地的1/4,严重影响了农业耕作,造成大幅度减产(孙锡年、张蔚榛等,1992)。地下水与其周围的岩土构成统一的力学平衡系统,地下水位的变动也将会破坏其原有的平衡而产生种种效应。过量补充地下水使地下水位上升,会使孔隙水压力升高,有效应力降低,岩体强度也将随之降低,从而导致滑坡,水库诱发地震等。裂隙岩体中地下水位抬高,会推动岩体向临空面移动,发生岩崩。

地下水通常较地表水难以污染,但是一旦被污染,其不良后果很难消除。地下水污染的问题在全世界都严重存在。例如美国全国饮用水的40%已被污染,我国地下水污染问题则更为严重。据对我国50个城市地下水的调查取样分析,有45个城市地下水不同程度遭受硝酸盐、酚、氰等有害物质的污染。

综上所述,地下水开采所引起的一系列环境问题已普遍存在,并日趋严重。资源与环境是人类生存与可持续发展最基础的物质条件,保护资源与环境是保证经济的持续发展、促进社会繁荣进步的一项战略任务。资源与环境从整体上说,是相互依赖、彼此促进的,它们的现状与发展是衡量一个国家和地区的社会物质文明和精神文明的重要标志。21世纪可持续发展战略强调的是经济与环境的协调,追求的是人与自然的和谐。人类生存与发展对环境的作用主要是通过对自然资源的开发利用这一中介环节来传递的,而利用方式的合理性、利用效率的高低都具有关键意义。因此,改变传统水资源利用的粗放形式,加强水文地质研究,对地下水资源展开全面详细调查,对地下水资源进行科学合理的评价和利用将对我国社会经济发展的各个方面产生极其深远的影响。

目前,地下水开采所引起的严重环境问题已引起世界各国政府的高度重视,许多国家

不仅设有专门的水管理机构,还制定了各种详细的管理条例与法规。同时,各国的水文地质专家 and 环境保护专家也在通过各种途径来揭示其产生的机制并研究相应的防治对策,归纳起来,通常有四类基本的研究方法:(1)地下水开采动态预测及资源评价方法(水量平衡法、数值解析法、趋势分析法);(2)建立地下水模型(地下水水流模型、溶质运移模型、热力模型和应力变形模型)的方法;(3)环境同位素方法;(4)完善地下水监测站网。这四类方法从不同的角度研究地下水的变化规律,各有所长,但是存在着一个共同的问题,即对水文地质现象的数据表现本质上是基于二维数据模型的,并且其计算结果的显示与解释主要是通过数据形式与二维平面和剖面来实现。而在水文地质研究和各种现代地质应用中,无论地下水岩层、地下水流场,还是地下水岩层中物质的运移,都是充满整个三维空间的,其在垂直方向上的信息(深度维)与在平面上的信息(平面维)具有同等重要的意义。显然这种用二维方法表现三维地质现象的解决方案有很大的缺陷,因为人们得不到三维地质实体详细与准确的描述。

另外,在水文地质的各项研究中,最重要、最基础的工作莫过于对区域水文地质条件的调查与正确认识。因此,对区域水文地质条件(地下水的赋存环境、地下水流系统)的准确描述,加快水文地质工作人员对地下环境的了解也就是基础中的基础。由于地下水是埋藏于地面以下,赋存于含水介质中连续运动的物质,人的视力无法直接觉察,因此,人们只能通过水文地质勘察以及地下水动态监测,才能揭示其赋存条件及运动规律。但是水文地质勘察孔的布置密度终归有一定的限度,对于勘察孔之间地质体的信息将不能直接获取,水文地质工作者只能根据经验采集。这样对区域水文地质条件的认识就会存在较大的误差,而且还会存在水文地质条件信息的盲区,最终将影响水文地质研究结果的准确度,如对地下水资源的评价结果失真。所以,我们必须使水文地质工作者对区域水文地质条件有较全面的认识,尽可能采集到反映区域水文地质条件的信息。利用三维可视化技术,一方面能将地下水赋存环境、运动规律和动态特征值直接展现在人们的眼前,被人的视觉直接感知;另一方面可利用三维可视化软件的空间分析功能,结合水文地质工作者的分析结果,对水文地质条件勘察盲区进行空间分析,获取地下水赋存和运动规律信息,从而弥补这类地区信息缺乏的不足,使评价区域的水文地质条件得到较全面的揭示,为其他水文地质研究提供科学依据。

因此,将三维 GIS 技术、三维可视化技术与一系列关于地下水特征描述、地下水模型及统计评价分析方法结合起来将大大提高水文地质学的研究水平(Turner, 1993)。鉴于传统水文地质学研究方法与技术手段的一些不足,使用新的地理信息系统技术与三维可视化技术进行水文地质学问题的研究已成为该学科的一个重要发展方向(王大纯、张人权等, 1995)。

1.2 地下水基础知识

1.2.1 地下水概述

地下水是埋藏在地面以下,存蓄于岩土空隙中的水,通常有三种状态:气体状态、固体状态和液体状态。

气态水常存在于未饱和水的空隙中,可以随着空气流动而流动。即使空气不流动,它也能从水汽压力(绝对湿度)大的地方向小的地方迁移。气态水在一定温度、压力条件下,与液态水相互转化,两者之间保持动态平衡。

当岩石的温度低于 0°C 时,空隙中的液态水转化为固态水。在我国东北及青藏高原,有一部分岩土中赋存的地下水多年保持固态,即所谓多年冻土。

液体状态的地下水主要有重力水和毛细水。岩石、土壤空隙中的重力水能够自由流动。井泉取用的地下水都属于重力水,是水文地质研究的主要对象。而在地下水面以上的包气带、松散岩石中细小的孔隙构成的毛细管中,则广泛存在着毛细水。

地下水对国民经济建设的意义很大,是工农业生产与人民日常生活的重要供水水源,也是一项重要的资源。

1. 岩石的水理性质

松散岩石中存在着孔隙,坚硬岩石中有裂隙,易溶岩石中有孔洞,水以不同的形式存在于这些空隙中。岩石与水作用时,表现出各种性质,这就是岩石的水理性质,即岩石与水的贮容、运移等有关的性质。它主要包括容水性、给水性、持水性和透水性等。

(1) 容水性

容水性是指在常压下岩石空隙能够容纳一定水量的性能,常用容水度衡量。容水度是指在自然条件下(常温、常压)单位体积的岩石中的空隙所能容纳水分的最大含量。容水度数值的大小取决于岩石空隙的多少和连通程度。在充满水的条件下,容水度在数值上与孔隙度、裂隙率或岩溶率相等。但对于具有膨胀性的黏土来说,充水后体积扩大,容水度可以大于孔隙度。

(2) 给水性

给水性是指在重力作用下,饱水岩石能够自由流出一定水量的性能。岩石给水性能的大小可用给水度来表示。给水度是指从饱水岩石中流出的水的体积与岩石体积之比。通常颗粒较粗的岩石给水度比较大,颗粒较细的岩石给水度则很小。

(3) 持水性

持水性是指岩石在重力作用下,岩石依靠分子力和毛细力在其空隙中保持一定水量的性质,常以持水度表示。持水度是指在重力影响下岩石空隙中所能保持的水量与岩石总体积之比。持水度的大小与岩石颗粒的大小成反比,与裂隙面接近的程度成正比。

(4) 透水性

透水性是指在一定条件下岩石本身能使水透过的性能。岩石空隙的大小、多少和空隙是否彼此连通对透水性有着明显的影响。例如:黏土孔隙度有时虽然可达50%以上,但是透水性很差;砂的孔隙度一般只有30%,但孔隙大,故透水性良好。同一岩石在不同方向上的透水性能也不一样。

2. 地下水的形成条件

地质条件和自然地理条件是影响地下水形成的两个最重要的条件。

(1) 地质条件

地质条件对地下水形成的影响主要表现在岩石性质和构造等方面。

岩石的空隙是地下水储存和运动的先决条件,因此,一般松散的砂、砾岩层和裂隙发育的坚硬岩层在一定条件下将形成良好的含水层。而结构致密又完整少缝的岩层(黏土

层、页岩、砂质页岩等)常构成隔水层。地下水储存的较好条件是上部为良好的含水层,下部为相对的隔水层。

含水层的富水程度除受岩石性质影响以外,也受地质构造的控制。例如构造作用会使岩石因受挤压而破碎,裂隙加剧,于是在断裂带附近常形成良好的脉状含水层。又如在阻水的地质构造(火成岩侵入体、阻水断层等)上游,地下水壅高,水量丰富;下游则水位下降,水量减少。

(2) 自然地理条件

自然地理条件中气候、水文和地貌等因素对地下水形成的影响最为显著。一般离地表较近的地下水,其数量和成分的变化特点常常与地区气候相对应。在干旱地区,大气降水的渗入量很少,表层地下水蒸发量较大,因而使地下水的盐分浓度增加,成为高矿化的地下水。在湿润地区,大气降水和地表水的渗入量较大,不仅降低了表层地下水的矿化度,而且地下水的水量也大。在高纬地带和寒冷的高原地区,地下水都处于多年冻结状态,不易得到新的水源补给,又不容易融化流失,基本上处于很少变动的状态。

在沿海低平原地区,地下水因容易受到海水和潮汐的影响而含有大量的盐分。在内陆地区,地下水不易受到海洋潮湿气流的影响,大气降水较少,地下水的补给条件很差,只有高山周围和山前平原地带能够得到高山冰川融雪水的补给,水量较大。例如我国新疆天山南北和昆仑山北坡就有这种情况。同一河谷的不同部位由于所处的地理位置和地形部位的不同,对地下水的形成也有很大影响。如在河流的上游和中下游河漫滩阶地的地下水,大多依靠大气降水补给,而河流下游自然堤的两侧和三角洲的地下水常由河水大量补给,水量因而较丰。

在自然界的水分循环过程中,地表水可渗入地下,地下水又可出露于地表,两者互相联系,相互影响。例如,有的河流在高水位时,河水补给地下水,而在低水位时,又受到地下水的补给。这种相互补给的关系直接或间接地使地下水的运动、数量与成分发生变化。

3. 地下水流系统

与地表的河流、湖泊一样,地下水同样存在着集水区域。同一集水区域内的地下水流构成了相对独立的地下水流系统。

(1) 地下水流系统的基本特征

在一定的水文地质条件下,汇集于某一排泄区的全部水流构成一个相对独立的地下水流系统。处于同一水流系统的地下水往往具有相同的补给来源,相互之间存在密切的水力联系,形成相对统一的整体;而属于不同地下水流系统的地下水则指向不同的排泄区,相互之间没有或只有极微弱的水力联系。地下水流系统与地表水系相比,具有如下特征:

1) 空间上的立体性。地表的江河水系基本上呈水平状态展布;而地下水流系统往往自地表面起可直达地下几百上千米深处,形成空间立体分布,并自上向下呈现多层次的结构。这是地下水流系统与地表水系的明显区别之一。

2) 流线组合的复杂性和不稳定性。地表的江河水系一般由一条主流和若干等级的支流组合成有规律的河网系统;而地下水流系统则是由众多的流线组合而成复杂的动态系统,在系统内部不仅难以区别主流和支流,而且流线具有多变性和不稳定性。这种不稳定性可以表现为受气候和补给条件的影响而呈现出周期性的变化;也可因为开采和人为排

泄，促使地下水流系统发生剧烈变化，甚至在不同水流系统之间出现地下水劫夺现象。

3) 流动方向上的下降与上升的并存性。在重力作用下，地表江河水流总是从高处流向低处；然而地下水流方向在补给区表现为下降，在排泄区则往往表现为上升，有的甚至形成喷泉。

此外，地下水流系统涉及的区域范围一般比较小，不可能像地表江河那样组合成面积广大（达几十万乃至上百万平方千米）的大流域系统。据研究，在一块面积不大的地区，由于受局部复合地形的控制，可形成多级地下水系统，不同等级的水流系统的补给区和排泄区在地面上交替分布。

(2) 地下水垂向层次结构的基本模式

如前所述，地下水流系统在空间上的立体性是地下水与地表水之间存在的主要差异之一。而地下水垂向的层次结构则是地下水空间立体性的具体表征。图 1-1 为典型水文地质条件下地下水垂向层次结构基本模式示意图。从地表面起至地下某一深度出现不透水基岩为止，可区分为包气带和饱和水带两大部分。其中包气带是指地面以下，地下水面以上不饱和的土壤含水带。这里土壤颗粒、水和空气三者并存，由于降雨和蒸发的影响，其含水量经常变化。包气带自上而下又可进一步分为土壤水带、上层滞水及毛细管水带等。饱和水带则可区分为潜水带和承压水带等。从贮水形式来看，与包气带相对应的是结合水（包括吸湿水和薄膜水）和毛细管水；与饱和水带相对应的是重力水（包括潜水和承压水）。

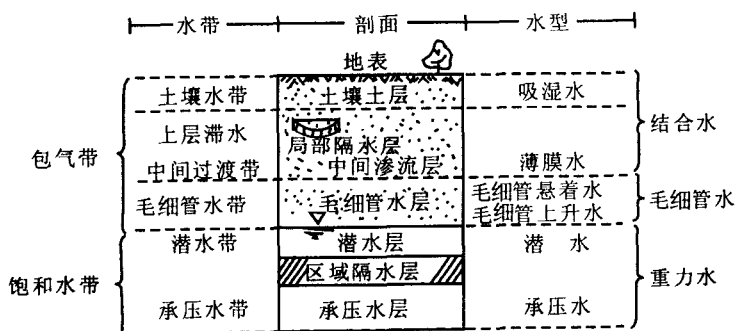


图 1-1 地下水垂向层次结构基本模式示意图

(刘南威等, 2000)

以上是地下水层次结构的基本模式。在具体的水文地质条件下，各地区地下水的实际层次结构不尽一致。有的层次可能充分发育，有的则不发育。如在严重干旱的沙漠地区，包气带很厚，饱和水带深埋在地下，甚至不存在；反之，在多雨的湿润地区，尤其是在地下水排泄不畅的低洼易涝地带，包气带往往很薄，甚至地下水潜水面出露地表，所以地下水层次结构特征也不明显。至于承压水带的存在，要求有特定的贮水构造和承压条件，而这种条件并非处处都具备，所以承压水的分布受到很大的限制。由此可见，地下水层次结构存在地区上的差异性，但不能否定地下水垂向层次结构的总体规律性。这一层次结构对于人们认识和把握地下水性质具有重要意义，并成为按埋藏条件对地下水进行分类的基本依据。

1. 2. 2 地下水的物理与化学性质

1. 地下水的物理性质

地下水的物理性质主要包括温度、颜色、透明度、气味和味道等。

(1) 温度

地下水的温度因自然条件不同而变化,其地区分布差异较大。在极地、高纬度地区以及高山地区,地下水温度很低,有的可低至 -5°C ;地壳深处和火山活动区的地下水温度很高,如新火山地区,地下水温可达 100°C ;在温带和亚热带地区的平原中,浅层地下水的年平均温度常接近所在地区的年平均气温,或稍高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。

地下水温度同样也随着深度的不同而变化。近地表的地下水,其温度受气温的影响,具有周期性的变化:一般在日常温层以上,水温具有明显的昼夜变化;在年常温层以上,水温具有季节性变化;在年常温层中,水温的变化很小,一般不超过 0.1°C ;而在年常温层以下,水温则随着深度的增加而逐渐升高,其变化规律取决于一个地区的地热增温级。地热增温级是指在常温层以下,温度每升高 1°C 所需增加的深度,单位为 $\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。各处地热增温级不同,一般为 $33\text{ m}/^{\circ}\text{C}$ 。

地下水在一定的地质条件下,因受地球内部热能的影响而形成地下热水。它通过一定的通道(如沿断裂破碎带、钻孔等)上涌,致使地热增温级大大升高,这种地区叫做地热异常区。具有良好地质构造及水文地质条件的地热异常区,有可能形成富集大量地下热水或天然蒸汽的地热田。

(2) 颜色

地下水一般是无色透明的,但有时因含某种离子、富集悬浮物或含胶体物质,也可显出各种各样的颜色。例如:含亚铁离子或硫化氢气体的水为浅蓝绿色;含腐殖质或有机物的水为浅黑色;含黑色矿物质或碳质悬浮物的水为灰色;含黏土颗粒或浅色矿物质悬浮物的水为土黄色等。

(3) 透明度

地下水的透明度取决于水中所含盐类、悬浮物、有机物质和胶体的数量。地下水的透明度分为透明、微混浊、混浊和极混浊四级。分级的标准是:水深 60 cm 时能看见容器底部 3 mm 黑粗线者,为透明;于 $30\sim 60\text{ cm}$ 深度能看见这种黑粗线者,为微混浊;于 30 cm 深度以内能看见这种黑粗线者,为混浊;水很浅时不能清楚看见这种黑粗线者,为极混浊。

(4) 气味

一般情况下,地下水是无味的。但当其中含有某种气体成分和有机物质时,则会产生一定的气味。如地下水含有硫化氢气体时,有臭鸡蛋味;地下水含有有机物质时,有鱼腥昧。

(5) 味道

地下水的味道取决于它的化学成分及溶解的气体。如含有大量的氯化钠时,水有咸味;含有钠镁的硫酸盐时,水有苦味。当溶解有较多的二氧化碳时,水常有爽口的味道;含有适量重碳酸钙和重碳酸镁的水,味道很可口,一般称为甜水。

2. 地下水的化学性质

地下水的化学性质主要指其化学成分、矿化度和硬度等。

(1) 地下水的主要化学成分

地下水中溶有各种不同的离子、化合物分子以及不同的气体。地下水中最主要的离子成分有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 以及 H^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等。除这些离子成分外, 还含有一些未分解的化合物, 如铁、铝氧化物等。地下水中常含有某些气体和放射性元素, 但是含量甚微。地下水中所含的气体成分主要有氧、氮、二氧化碳和硫化氢等。

(2) 矿化度

水中所含的各种离子、分子及化合物的总量, 称为水的总矿化度, 简称矿化度, 以 g/L 表示。一般测定总矿化度是把 1 L 水加热到 $105 \sim 110\text{ }^\circ\text{C}$, 让水全部蒸发干, 剩下残余物的重量即为水的总矿化度。

按照总矿化度的大小, 可以将地下水分为 5 类: 总矿化度小于 1 g/L 为淡水; 总矿化度是 $1 \sim 3\text{ g/L}$ 时为弱矿化水; 总矿化度是 $3 \sim 10\text{ g/L}$ 时为中等矿化水; 总矿化度是 $10 \sim 50\text{ g/L}$ 时为强矿化水; 总矿化度大于 50 g/L 时为盐水。

水的矿化度是表示地下水化学成分的重要标志, 它的高低与水中的离子成分存在着一定关系。在通常条件下, 低矿化度的水(淡水)常常以重碳酸根离子为主要成分, 中等矿化度的水常以硫酸根离子为主要成分, 而高矿化度的水则以氯离子为主要成分。

(3) 硬度

水中钙离子、镁离子的总量, 称为水的总硬度。当水煮沸时, 一部分钙离子、镁离子的重碳酸盐因失去 CO_2 而成为碳酸盐沉淀, 沉淀的部分叫做暂时硬度。总硬度减去暂时硬度即为永久硬度。水的硬度一般采用 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的 mg/L 表示。根据水的总硬度可以把水分为 5 类: 极软水, 它的总硬度小于 1.5 mg/L ; 软水, 它的总硬度在 $1.5 \sim 3.0\text{ mg/L}$; 弱硬水, 它的总硬度在 $3.0 \sim 6.0\text{ mg/L}$; 硬水, 它的总硬度在 $6.0 \sim 9.0\text{ mg/L}$; 极硬水, 它的总硬度大于 9.0 mg/L 。

1. 2. 3 地下水的运动

地下水在岩石空隙中以不同的形式存在, 并以不同的形式运动着。这里着重介绍饱水带重力水的运动形式和规律。

1. 层流与紊流

重力水在岩土空隙中的运动, 称为渗透或渗流。它的运动状态常根据水流速度不同而分为层流运动和紊流运动。层流运动是指水在岩石空隙中流动时, 水流质点有秩序地、互不混杂地向前流动, 其质点运动的轨迹是有条不紊的。紊流运动是指水在岩石空隙中流动时, 水质点无秩序地、互相混杂地流动, 其质点运动的轨迹是紊乱的。一般在相同的过水断面中, 紊流运动的速度大于层流运动的速度, 如图 1-2 所示。

地下水在绝大多数自然条件下, 流速较小, 多属层流运动。一般认为地下水的平均渗透速度小于 1 000 m/d 时, 可视为层流运动。只有在大裂隙、大溶洞中或水位高差极大的情况下, 地下水的渗透才出现紊流运动状态。

2. 地下水运动的基本定律

饱水带中水的运动形式不同, 其运动规律也不同, 可分为直线渗透定律和非直线渗透