

7268

56.581

# 地下水动态及其预测

陈葆仁 洪再吉 汪福炘 著



科学出版社

# 地下水动态及其预测

陈葆仁 洪再吉 汪福所 著

科学出版社

1988

## 内 容 简 介

全书共分七章。前三章叙述了有关地下水动态方面的基础理论和基本概念,对地下水水文过程线作了比较深入的分析,阐述了水、盐、热的动态,并包含了本学科发展的生长点,反映了国内外的概况;后四章以大量篇幅阐述了地下水动态预测方法,在解析法方面对衰减系数提出了自己的认识,而在数值法有限单元方面的叙述更趋于实用。另外,书中还系统地介绍了在这一领域中的各种预测方法,在回归分析方法中又详细地介绍了自相关函数、谱密度函数,讨论了时间域分析与频率域分析的关系,并着重讨论了序列平稳性检验问题。最后总结了利用动态观测资料求参方法,描述了动态模型与管理模型,介绍了管理模型的国内外情况及其应用前景。

本书是一部基础理论与实际应用相结合的著作,内容新颖。可供从事水资源研究工作的地质、环境保护、水利、煤炭、冶金、建筑等方面的专业工作人员及有关大专院校师生参考。

## 地下水动态及其预测

陈葆仁 洪再吉 汪福忻 著

责任编辑 邵正华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1988年2月第一版 开本:787×1092 1/16

1988年2月第一次印刷 印张:24 3/4

印数: 0001—950 插页: 3 平 1

字 0001—1,950 字数: 566,000

ISBN 7-03-000098-6/P·14

定价: 布脊精装 7.90 元

平 装 5.40 元

# 前 言

随着我国国民经济的飞速发展以及当代科学技术的进步,水文地质学已经发展成为一门学科,许多新的领域已经或正在崛起。近些年来,在现有的水文地质书籍中,涉及地下水动态方面的书不很多,专著则更少;呈现于读者面前的《地下水动态及其预测》一书,拟作为现有出版书籍中的一个重要补充。这是一本关于地下水动态形成与预报方法的理论性著作。愿本书的出版发行,在促使水文地质学科更全面的发展中起到添砖加瓦的作用。

在四个现代化建设中,国家发展科学技术的方针——“经济建设要依靠科学技术,科学技术要面向经济建设”是明确的,新近又进一步指出,要求大力加强应用科学的研究。同时,我们也注意到以往的水文地质研究,大多比较侧重于空间分布规律的论证,对水文地质过程从时间角度去把握其形成机制,则研究得较肤浅。《地下水动态及其预测》考虑了社会和学科自身发展的需要,牢牢地把地下水动态研究置于与国民经济密切相关的地下水资源及其随时间变化这一重大课题的基础上,力图从理论上阐明其重要性,系统地介绍地下水动态的形成及其预测方法,使之对地下水资源更加合理地利用,并逐步引向全面管理的实践中去。鉴于本书涉及地质学、地球物理学及数学等学科领域,因此,全书论述过程中在遵循不损害理论严密性的基础上,努力做到简明、实用,并力图在水文地质学与数学之间相互沟通中起一定的桥梁作用。这只是我们的主观愿望。尽管书中的多数素材均来源于作者参与工作的第一手资料,且曾几易其稿,但是由于作者水平所限,对于这一广阔的新研究领域在论证中难免会有不当(甚至错误)之处,敬希读者指正。

本书作者撰写分工如下:绪论、第二、三、六诸章由陈葆仁撰写;第四、五章由陈葆仁、洪再吉撰写;第一、七章由陈葆仁与汪福炘撰写;附录由洪再吉撰写。本书在撰写过程中中国地质学会水文地质专业委员会委员武汉地质学院沈照理教授与南京大学肖楠森教授、武汉地质学院张人权教授、南京大学薛禹群教授、中国科学院兰州渗流力学研究室刘慈群研究员以及中国能源研究会地热专业委员会委员姚足金高级工程师等都曾提出过很多宝贵的意见。全书由南京大学数学系教授谢春红及地质矿产部水文地质工程地质研究所地下水资源研究室室主任秦毅苏负责审阅。本书图件由高秀英同志清绘。在书稿的定稿清理过程中,陈圻、刘飞同志做了大量的工作,李永乐、陈新洪同志也协助做了不少工作。在此一并致谢。

# 绪 论

随着社会生产的迅速发展与人口的不断增长,当前人类正面临着能源匮乏和环境污染两大问题。与此同时,人们对水量的要求将越来越大,对水质的要求将愈来愈高。对于地下水资源来说,它的开发与利用也跟其它自然资源一样,受其自身更新能力的制约,存在着一个最大限度的问题。当人们开发利用超过这一限度时,就会受到自然界的“无情惩罚”。今天在一些工业发达的国家或干旱地带,水资源已日显紧张,加之全球污水排放总量呈几何级数增长,其规模已大大超过了环境的自净能力,这给本来已经十分短缺的水资源又增加了新的威胁。一些有见识的学者认为,在未来的年代里,水源(主要是指淡水水源)匮乏将成为比能源匮乏更为棘手的问题;也有人预言,到本世纪末人类的福利达到的水准将依妥善处理水问题的能力而决定。

由于不合理或无计划的开采,所以当前在地下水资源利用方面存在着一系列问题,有些问题甚至很严重,从某种程度上看已经造成了地下水公害。在这些问题中最为常见的是,因大量汲取地下水所带来的地面沉降使整片地面建筑物开裂,城市下水管道全面报废等。其次就是由于长期过量抽水,使地下水得不到与其相适应的充分补给,从而导致水井相互干扰,自流井停止自喷,地下水位(水压)异常下降,水质污染,咸水(包括海水)入侵,甚至地下水储量趋于枯竭等等。由此给国家带来的经济损失不计其数。如我国水利部门每年投入水泵更新(适应逐年加大的汲程而免于吊泵)的资金,就占国家农田水利投资相当大的比重。以上这些都是人们容易看到的,还有一些是属于涉及子孙后代利益的潜在危险,就人类社会目前的技术状况来看,一旦出现尚无法挽回。如我国北方某些大平原中深层的地下淡水,由于过量开采,现正面临着强大盐水锋面的威胁,目前急需水文地质工作者去研究解决。

在解决上述一系列问题中,我们认为“地下水资源的预测与管理”是一个中心课题,这在很大程度上有赖于人们对地下水动态的认识和掌握程度,说到底是一个追溯历史(地下水的天然状况及开发过程等)和预测未来的问题。恩格斯作过一个极其深刻的阐述:“我们不要过于得意我们对自然界的胜利。对于我们的每一个胜利,自然界都报复我们。每一次的这种胜利,第一步我们确实达到了预期的结果,但第二步和第三步却有了完全不同的意想不到的结果,常常正好把那第一个结果的意义又取消了。”这就告诫人们,对一个自然物作历史的持续研究的重要性。在地球上淡水资源利用日显危机的今天,对这个不断更新、流动着的地下水资源随时间变化的规律进行研究,其理论与实践意义已越来越显得重要了。

自本世纪六十年代以来,水文地质计算随着电子计算机的应用有了很大的发展,我国已成功地解决了一定数量的矿山疏干和供水水源地开采资源随时间变化的稳定性论证与水位预测任务,而贯穿在预测中的主要问题是地下水资源数量问题。当前,在大规模水文地质实践工作中以及学术界对地下水系统等理论性问题的讨论中使我们看到,对地下水

资源的认识不能停留在数量多少的研究上,还必须把数量计算与对资源特性整体的认识结合起来,使定量计算得到的成果反馈到定性认识上,检验原先对地下水资源特性的认识。地下水资源客体存在是丰富的,今天已经查明的各种各样的含水单元或蓄水构造中的地下水资源,有些是经得起长期开采实践检验的,而有些是属于开采后短期内无法恢复的,地下水是在较长的地质年代中积累起来的,有些开采后水文地质条件急速变化,地下水资源会出现被全面破坏的情景。对丰富的客体作不确切的概括,使那些表面上看来似乎“精确”的计算无济于事,从而使整个计算误入歧途。我们认为,上述对地下水资源特性认识的反馈,集中表现在人们对动态预测模型的确定过程中。由于地下水动态预测模型必须经受长时间的实践检验,所以它是人们对地下水资源客体在更高认识层次上的反映。

对于地下水资源性质的认识,主要是对其影响因素和形成条件的认识。影响因素的分析实质上是对区域地下水资源形成外部环境的分析,包括从时间跨度上逐个分析区域地下水水量的均衡要素,揭示地下水资源更新能力的大小。形成条件的分析则着眼于含水介质(多孔介质、裂隙网络介质或喀斯特岩石介质)及其空间组合(水文地质单元或蓄水构造)内部特征的研究,从而查明水资源动力学及化学性质。

认识具体的某一地区地下水资源性质的直接手段,莫过于对地下水水文过程线形成机理的分析了。从人的认识规律来说,人们在接触某个新事物时,总是先从分析该事物的历史过程入手。对地下水资源性质的认识也是这样。地下水几乎无一例外地参与了地壳中所有的地质作用,有人形象地比喻,地下水水文过程线是大地的“脉搏”。当前对缺失补给的干旱季节地下水衰减动态的水文过程线分析,已在喀斯特地区地下水资源评价中发挥了作用。但是,这只是应用方面的一个成功的例子,在这个领域中,水文地质研究的空白点还很多。举例说,深部含水系统的水压弹性动态水文过程线的分析即是一个很有前途的研究课题。至于在更高层次去对地下水水文过程线的谱结构进行分析,估计能揭示出地下水资源性质方面更本质的内容。

至于地下水动态预测方法,特别是中、长期预测方法,将是地下水动态研究并为之服务于生产的核心内容之一。地下水动态预测必须首先建立数学模型,当前有关地下水动态预测的数学模型已远远超过了今天在地下水动力学教科书中讨论的数学模型范围。诸如确定性模型与随机模型、集中参数模型与分布参数模型、线性模型与非线性模型、单一模型与偶合模型等都正在或即将在地下水动态预测方面得到广泛的应用。目前常用的地下水资源计算方法及动态预测模型绝大多数属于确定性模型,在模型中的变量都是确定性变量。对于受多种因素影响下形成的地下水这样一种预测对象,人们在分析它的过去,掌握一定变化规律以后,只能以带某种实现概率的数量来进行预言。这种预言不能以某一确定性数字来表达,预测模型必然要带人某些随机变量,在数学上属于随机模型的研究范畴。在地下水动态预测中的集中参数模型占有它自身性质决定的特殊位置。这也是由于地下水与环境因素之间存在广泛的联系决定的。正是由于这一原因,有时对赋存地下水的水文地质单元以一确定的参量来表达它的总体性质,模型着重表达地下水与周围某一环境因素之间的特有的联系,更有利于突出问题的主要方面。实践已经证明,这是一种行之有效的模型。

地下水动态中、长期预测与水资源统一管理是紧密关联的。地下水资源的统一管理是今后地下水开发中的必由之路,地下水动态中、长期预测又是为水资源管理机构发布行

政指令或技术性措施的科学依据。

自1963年苏联水文地质学家A.A.康诺普梁采夫等撰写的《地下水天然动态及其规律》一书发表以来,不少国家相继认识到,对地下水动态进行研究是认识地下水资源形成及其性质最有效的方法之一。地下水动态预测是正确认识当地水文地质条件(包括对地下水资源性质的认识及数量评价)与地下水合理开发利用之间的一个重要的中间环节。掌握了这一环节就能科学地论证地下水资源的合理调配,提出与灾害作斗争的积极措施。因此,结合为工农业供水、土壤改良、矿产开发、环境监测、地震预报和地热能利用等专门目的而进行的地下水动态研究也迅速开展起来。为了积累地下水动态的信息,许多国家已建立或正在完善全国性的观测站网,并逐步实现观测工作自动化,设置国家一级的统一数据库,从而对地下水长期观测资料实行全国性的系统管理。苏联七十年代已由全苏联水文地质工程地质研究所建立起搜集、贮存和处理全国动态信息的地下水动态自动化系统(АИЛС),并能整理出地下水动态系统图件。美国地质调查所从五十年代末开始设置水数据的贮存、检索系统(WATSTORE),现已贮存了遍布全国的七十万个井、泉的水文地质观测数据。英国、法国、德意志民主共和国、德意志联邦共和国、荷兰、新西兰、匈牙利、波兰、南斯拉夫等国家对地下水动态的研究与观测也作了大量的工作。我国对地下水动态的研究起步较晚,在基础理论研究方面相对比较薄弱,对长观资料也缺少统一管理。1958年我国先后建立的数十个水文地质站,后来又由于种种原因,多数没有坚持观测。1978年唐山地震以后,在我国东部京津唐地区及江淮平原一带首次统一布置了深度大于千米的数十眼深层地下水长观井,并装置了自记水位计。自1978年以来,随着四个现代化建设的蓬勃展开,有关部门正在广泛地组织地下水动态研究与观测工作,以五十年代建立的水文地质站(如北京水文地质站、石家庄地下水长观站、包头水文地质站等)为核心的地下水动态长期观测工作也已全面开展。在联合国教育科学及文化组织协助下以研究包气带水分动态为主的石家庄等地下水动态观测站正在积极建设。北京水文地质工程地质公司、陕西地矿局第一水文地质工程地质队、河南地矿局水文地质观测站等单位在地下水动态研究领域中都已取得了一定成绩。可以预料,在不久的将来,地下水动态研究工作在整个水文地质工作中所占的比重将会进一步增加,地下水动态研究在国民经济建设中的重要作用即将充分地显现出来。

以上是有关地下水动态研究的重要意义和它的研究历史的简述。鉴于当前对地下水动态一词,学者们之间的认识尚有一些差异,因此这里有必要对此作些说明,以免引起专门术语使用上的混乱。

“地下水动态”一般是指地下水水量、水质以及物理性质随时间的变化而言。人们对地下水动态的认识是随着水文地质学科的发展和地下水动态资料的积累而不断变化着的。早期,一些学者把地下水动态仅仅看成是潜水水位及泉流出量随时间的变化;随后,又有人把地下水动态看成是地下水在不同的天然及人为的因素影响下产生的数量及质量变化的总和。比较完整的地下水动态的概念是由M.E.阿利托夫斯基提出的,我国水文地质工作者大多数也采用了这一观点。他们首次把地下水动态作为一个自然历史过程来研究。这一过程反映了地下水的形成,显示了地下水资源及各种成分(包括水位、流量、水温、气体、化学及细菌成分等等)随时间的变化<sup>[12]</sup>。

地下水动态的研究内容,这里大致可以概括如下:

1) 查明地下水形成条件。以地下水长期观测资料评价地下水的补给与排泄条件,进行水均衡分析,确立各种动态影响因素的作用以及地下水动态形成中的物理、化学过程。为编制地下水动态预报与实现各种水文地质计算服务。

2) 研究年内或多年的地下水天然补给量及其变化规律。季节与多年地下水补给的变动,使地下水水位与地下水资源发生相应的波动。考虑这一情况,不仅对区域地下水天然资源与开采资源的评价,而且对规划与设计不同集水建筑物都具有很大意义。地下水补给的查明是合理利用地下水资源以及对地下水资源提出保护措施的基础。

3) 对区域地下水相动态的研究。我国青藏高原与北方地区很大一部分地下水以固相形态出现,北方广大地区每年开春融冻是液相地下水的重要补给因素。青藏高原及其山前地带与内陆盆地的地下水补给几乎大部分由多年及年内气温动态控制。因此对地下水相动态以及地温传导过程的研究在当地液相地下水资源形成的研究中占有重要地位。

4) 地下水的水、盐、热平衡形成规律的研究。水、盐、热动态是相互关联的,利用盐、热动态资料经常能提供水动态及平衡形成的关键信息;地下水盐、热动态必须与水动态研究同步进行。该项研究成果是土地改良设计、地下卤水开采及热水利用各项工作的基础。

5) 地下水动态区域分布规律的研究。指在干旱区、海岸带(或海岛)、多年冻结区、火山活动区或新地质构造运动活跃地区等,即在不同自然地理与地质单元内,对影响地下水动态的各种因素及其对地下水作用的实现条件;不同地质、水文地质单元的水文地质边界类型与性质;含水层、水文地质构造的各种水文地质参数的地区分布等等。正是这些参数从数量上反映了地下水圈、地表水圈、大气圈之间的水量交换以及地下水圈的固有特征。

6) 水文地质模型与地下水动态预报方法的研究。当前已有的水文地质模型和以解析法、数值法为基础的数学模型的求解方法,尚满足不了在实际工作中所遇到的各种复杂的水文地质计算与地下水动态预报的需要。人们要求更多的能适应不同地质、水文地质条件并能进行解析或数值求解的数学模型,如水质弥散模型、热水运移模型、双重介质模型、弹性介质或在弹塑性介质中压力传播模型、水与汽两相流动模型等。

7) 地下水动态要素与水文过程线统计学特征及参数的地区性规律研究。如地下水动态观测序列的平稳性、各态历经性;水文过程线的频谱结构及其地方性参数;地下水动态系列统计学分布规律等项的研究。所有这些均是采用随机数学模型预报地下水动态的基础。

8) 全国或地区地下水动态观测资料整理自动化及传输技术的研究。建立国家级、地方级或某一生产系统(如地震系统)地下水动态监测网,包括网点选择、确立地下水动态观测内容、进行资料自动测报系统与传输技术的研究;建立全国性统一的地下水动态数据库与地下水资源管理调度中心,定期提出地下水动态情报,在必要时向国家权力机构发布危急咨询警报等。

从以上分析看来,对地下水资源及其动态的研究完全具有自身特定的研究对象和独立的研究方法与手段,它的使命即为水资源合理开发利用服务,但又不仅仅限于这一层意思;随着观测系列的逐渐加长,地下水动态研究越来越显示出在发展水文地质学科自身方面的“职能”。由于对地下水动态规律的揭示必须从时-空运动的高度上,从地下水与环境因素间多方面的联系及其转换上,从质与量统一的角度上去深入地按层次地进行,所以我

们认为,地下水动态是一个复杂的自然过程在某一特定环境中、在多种因素作用下的外观表现。水文过程线每一微小的变化都是其中某一个环节变动的必然反映;加之地下水动态研究的成果往往能在学科领域及生产建设中得到验证,因此不时地能将当前的现实问题与学科的理论研究结合起来。

本书的特点在于,在当前学术界一般认识的基础上,着重探索地下水水文过程线的形成机制,系统地介绍地下水动态预测方法和重点阐明动态预报方法中随机模型的开拓性地位等等;企图把学科有关基础理论与实际应用有机地结合起来,特别是从当前客观的需要出发,把在动态观测研究中大量累积的资料系统地纳入生产急需的地下水资源评价和管理程序中去,使地下水动态长期观测系列充分发挥其潜在的作用。

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 绪论                            | vii |
| 第一章 地下水动态及其影响因素               | 1   |
| 第一节 影响地下水动态的基本因素              | 1   |
| 第二节 单一因素作用下形成的地下水水文过程线        | 2   |
| 一、大气降水                        | 2   |
| 二、河流                          | 7   |
| 三、蒸发与蒸腾                       | 10  |
| 四、大气压力                        | 11  |
| 五、气温                          | 13  |
| 六、潮汐与外部荷载                     | 15  |
| 七、地震                          | 17  |
| 第二章 地下水水文过程线与含水系统的水文地质模型      | 21  |
| 第一节 地下水水位过程线形成中的能量传播与质量迁移过程   | 23  |
| 第二节 地壳含水系统不同水文地质环境及水文过程线的基本类型 | 30  |
| 一、地下水开放系统与封闭系统的划分标志           | 30  |
| 二、两种水文地质环境中地下水水文过程线的特征        | 33  |
| 三、封闭系统的压力“放大效应”               | 36  |
| 四、两种含水系统中形成的水文过程线的统计学特征       | 39  |
| 第三节 几种常见水文地质环境的典型水文过程线的分析     | 39  |
| 一、受气象、水文因素影响的浅层、开放的含水系统       | 39  |
| 二、在温度与压力影响下的深部封闭含水系统          | 46  |
| 三、双重介质含水系统的地下水水文过程线           | 50  |
| 四、受融冻影响多年冻结区的地下水水文过程线         | 55  |
| 第四节 地下水水文过程线的地区特征             | 58  |
| 第五节 地下水水文过程线的多年特征             | 60  |
| 第三章 地下水均衡与盐、热动态               | 64  |
| 第一节 地下水均衡                     | 64  |
| 一、水均衡方程式                      | 68  |
| 二、水均衡计算的实例                    | 71  |
| 第二节 地下水的热动态                   | 76  |
| 第三节 地下水的盐动态                   | 84  |
| 一、潜水盐动态的地带性特点及其影响因素           | 84  |
| 二、地下水盐动态与水质弥散数学模型             | 87  |
| 第四章 用确定性数学模型预报地下水动态           | 93  |
| 第一节 解析解方法预报地下水动态              | 96  |

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 一、描述地下水非稳定流动的单井模型与区域模型·····                                 | 97  |
| 二、泰斯模型及其叠加与映射原理预报地下水动态·····                                 | 100 |
| 三、用布西涅斯克方程的解析解——流量(或水位)衰减方程预报地下水动态及其实例·····                 | 108 |
| 四、有越流补给条件下纽曼—威瑟斯庞模型的解析解预报地下水动态·····                         | 121 |
| 第二节 用数值解方法预报地下水动态·····                                      | 123 |
| 一、卡门斯基有限差分方程用于地下水水位预测·····                                  | 124 |
| 二、有限差分方法预报地下水动态中差分格式的选择,有限差分方法对渗透域的离散过程以及三对角线性方程组的求解特点····· | 126 |
| 三、有限单元方法的一般原理·····                                          | 137 |
| 四、求解线性代数方程组的改进平方根法·····                                     | 151 |
| 五、采用有限单元方法预报地下水水位时几个具体问题的处理·····                            | 159 |
| 六、应用有限单元法解题的具体步骤及实例·····                                    | 169 |
| 七、有限单元法预测地下水水位的计算机程序·····                                   | 177 |
| 第三节 电模拟解法预报地下水动态·····                                       | 185 |
| 一、电网络模拟的一般原理·····                                           | 186 |
| 二、电网络模拟的基本方法·····                                           | 195 |
| 三、电网络模拟与基本技术装置·····                                         | 202 |
| 第五章 用随机模型预报地下水动态·····                                       | 207 |
| 第一节 回归分析方法及其计算实例·····                                       | 209 |
| 一、统计推断简述·····                                               | 210 |
| 二、回归分析基本原理、一元线性回归分析·····                                    | 221 |
| 三、多元线性回归和非线性回归分析及其预报实例·····                                 | 227 |
| 四、逐步回归分析及回归方程的优化·····                                       | 243 |
| 第二节 频谱分析方法及其在水位预报中的应用·····                                  | 249 |
| 一、地下水水文过程线与周期简谐振动·····                                      | 249 |
| 二、水位过程线的自相关函数与谱密度函数·····                                    | 255 |
| 三、水文过程线的周期成分与随机项·····                                       | 265 |
| 四、平稳线性系统理论与地下水水位的中、长期预报·····                                | 267 |
| 五、求等距离离散系列谱密度函数的快速富里哀变换(FFT)方法·····                         | 270 |
| 第三节 地下水动态预报中的时间序列分析方法·····                                  | 282 |
| 一、时间序列的概念·····                                              | 282 |
| 二、一维平稳时间序列的预报模型——自回归模型·····                                 | 284 |
| 三、时间序列平稳性检验·····                                            | 292 |
| 四、非平稳时间序列分析·····                                            | 294 |
| 第四节 随机微分方程与地下水动态预报·····                                     | 296 |
| 一、具有随机初始条件和随机力函数的线性化布西涅斯克方程的解·····                          | 297 |
| 二、具有随机参数方程的解·····                                           | 303 |
| 第六章 利用地下水动态观测资料推求水文地质参数·····                                | 308 |
| 第一节 利用地下水动态观测资料推求水文地质参数·····                                | 308 |
| 一、根据均衡观测孔组资料求地下水的降水入渗补给量或蒸发量·····                           | 308 |
| 二、根据均衡观测孔组资料确定潜水含水层的给水度及导水系数·····                           | 311 |
| 三、根据河、渠附近地下水动态观测资料确定含水层的压力传导系数·····                         | 313 |

|                                           |       |
|-------------------------------------------|-------|
| 四 利用河、渠附近地下水动态观测资料求降水入渗或蒸发值·····          | 317   |
| 五、用钻孔水位观测资料求弱透水层的垂向压力传导系数·····            | 320   |
| 第二节 采用地下水水位观测资料反求水文地质参数方法的分类及其评述·····     | 321   |
| 一、逆问题的间接解法·····                           | 321   |
| 二、逆问题的直接解法·····                           | 323   |
| 第三节 应用地下水动态观测系列频谱分析方法推求含水层的水文地质参数···      | 330   |
| 一、基本公式的推导·····                            | 330   |
| 二、集中参数系统输入与输出间的谱关系·····                   | 334   |
| 三、求参数 $S, T$ 的具体步骤·····                   | 337   |
| 四、实例计算与讨论·····                            | 340   |
| <b>第七章 地下水动态研究和水资源开发与管理</b> ·····         | 344   |
| 第一节 地下水动态预报与水文地质模型·····                   | 344   |
| 第二节 我国对地下水资源的开发及其所引起的公害·····              | 346   |
| 第三节 地下水资源所具有的自然属性与社会属性、含水层的管理程序·····      | 350   |
| 第四节 线性规划方法在水资源管理中的应用及实例·····              | 353   |
| <b>参考文献</b> ·····                         | 360   |
| <b>附表</b> ·····                           | 364   |
| 1. 正态分布 $\alpha$ 值与 $K_\alpha$ 值对应表·····  | 364   |
| 2. $t$ 分布表·····                           | 366   |
| 3. 相关系数 $R$ 检验表·····                      | 367   |
| 4. $F$ 分布表·····                           | 368   |
| 5. 经验概率 $P_m$ 及其相应的正态变量分布值 $u_m$ 一览表····· | 370 后 |
| <b>附录</b> ·····                           | 372   |
| A 随机过程简述·····                             | 372   |
| B 均方导数与均方积分·····                          | 376   |
| C 平稳过程的谱分析·····                           | 377   |

# 第一章 地下水动态及其影响因素

## 第一节 影响地下水动态的基本因素

从多年观测中表明,地下水动态是在各种影响因素以及使地下水动态产生变化的实现条件两者共同作用下形成的<sup>[128]</sup>。影响地下水动态的基本因素包括气象、水文、地质、生物、宇宙及人为活动等等,这些自身也在不断变化着的因素,作用于地下水使其产生不同的动态特征。各种因素对地下水作用的条件包括地区的地质结构、地形切割程度、地区地貌特征、土壤、多年冻结岩石等等,这些条件在地下水动态观测期限内一般是相对稳定、变化不大的。正如很多水文地质学家已经表明的那样,从辩证的观点来研究地下水动态形成的条件是甚为重要的,显然以地质年代来计算时间,那么这些条件也是变化着的。如雨水淋溶、潜蚀、淤积、胶结、变质、成岩作用等可以改变岩石的结构及透水能力;构造活动、侵蚀、岩溶及风的作用可以改变地形切割程度、地区地下水排泄能力、排泄特征;地轴移动及大陆漂移可以改变广大区域气候的根本特点等。从这一观点出发,使地下水动态产生变化的实现条件也可称之为因素,但是它们的变化过程是非常缓慢的。在分析地下水动态时,即使它们对于地下水动态形成的制约关系是确实存在的,它们的影响也几乎可以忽略不计。

实际上,影响地下水动态的因素可以分为不同成因的四个组:宇宙的,内生的,生物的以及人为的。但是考虑到由太阳、月亮或其它太阳系外星活动有关的宇宙因素以及地球绕太阳和自身的旋转等方面对地下水动态的作用大部分是间接的,是通过大气圈与地表水圈转换过来的。因此,我们除了研究宇宙或行星因素变动特点外,还得研究气象及水文因素的变化。

另外,还可按照诸影响因素作用于地下水的形式上的差异将它们划分为:

(1) 改变地下水的数量与质量(包括自然或人为的补给、排泄和人工回水等)的因素。

(2) 仅仅改变含水层的弹性状态,包括大气压力的改变,疾风作用,太阳及月亮的引力变化,地面负载的增减,列车通过,岩石开挖等等,有人称之为“弹性动态”因素。由水量增减所引起的地下水动态的变化主要表现于浅层地下水,因为它们处于地下水圈的积极交替带中,与地表水圈、大气圈水分交换十分频繁,而深层地下水一般来说其水量增减变化缓慢,大多只在地质年代中起变化(当然人工开采深层地下水除外),但对地壳应力状态的变化,感应能力却十分灵敏。深层地下水动态记录大部分属于地壳应力状态随时间的波动变化。

上述两大类影响因素作用于地下水,使地下水动态变化的实现条件各有差异。第一类则与地下水均衡要素一致,它们与地区下垫面性质、包气带厚度及岩性、含水层的水文地质条件等有关;第二类则决定于含水层的封闭条件,岩石弹塑性或岩石压力传导性质,

水的物理性质等,如表 1-1 所示.

表 1-1 影响因素对地下水作用条件分类表

| 影响因素分组        | I                               | II                         |
|---------------|---------------------------------|----------------------------|
|               | 降水入渗、蒸发、凝结、河流                   | 气压、固体潮、外部荷载、地震、火山          |
| 使地下水动态变化的实现条件 | 包气带岩性及厚度、地区的下垫面性质、含水层的导水系数和贮水系数 | 水、岩石的弹性、岩层压力传导性质、含水层的封闭程度等 |

综上所述,影响地下水动态变化因素很多,各种因素自身又在不断变化,而且它们的变化速度有快有慢,相差悬殊,因此这就大大增加了研究的复杂性. A. A. 康诺普梁采夫 (A. A. Коноплинцев) 曾对作用于地下水动态的各种因素进行过归纳,做过分类<sup>[129]</sup>,这里我们略加简化和修改介绍给读者,如表 1-2 所示.

表 1-2 地下水动态影响因素分类 (据 A. A. Коноплинцев и др. 1963, 稍作修改)

| 影响因素成因组合 | 影响地下水动态的诸因素                      |                |       |                    |
|----------|----------------------------------|----------------|-------|--------------------|
|          | 多年显示变化                           | 年内(季节)变化       | 昼夜变化  | 偶然变化               |
| 气象的      | 气象要素(降水、蒸发、气温、气压等)               |                |       | 急剧的气温变化引起的解冻、暴风雨等  |
|          | 太阳活动                             |                | 潮汐力   |                    |
| 地质的      | 新构造活动、喀斯特塌陷、喀斯特虹吸泉火山地区的水热活动、间歇喷泉 |                |       | 地震、火山喷发、水热爆炸、滑坡    |
| 水文的      | 河流、湖泊及沼泽地的水文变动                   |                |       | 冰坝堵塞、河流凌汛、逆风顶托水位涨落 |
|          | 冰川补给                             |                | 涨潮、退潮 |                    |
| 生物的      | 水土保持与流失                          | 植物蒸腾           |       | —                  |
| 人为的      | 矿山排水、城市建设、水库浸没及回水、农田水利建设、石油开采、造林 | 灌溉、抽水、农田耕作人工补给 |       | 采矿塌陷、原子爆炸、水库放水     |

第二节 单一因素作用下形成的地下水水文过程线

地下水水文过程线即地下水动态观测曲线. 在井、泉或观测孔中测到的地下水水文过程线绝大部分是在为数众多的影响因素共同作用下形成的,对它们进行分析,特别是定量分析经常会遇到很多困难. 通常在对地下水水文过程线进行定量分析时,总是从形态入手来对比影响因素与水文曲线之间波动的同步性或相关性,或者更深入一步分析它们之间频率结构方面的相似性. 如果形成水文过程线的各种因素相互影响,在分析前,对影响因素又缺少全面的认识,那就很难得出合乎实际的结论. 因此有必要在分析复杂的过程线之前,首先研究单一因素作用下形成的地下水水文过程线.

一、大气降水

除沿岸地区外,大气降水是广大分水岭地区地下水水文过程线形成的最主要因素.大

气降水部分消耗于坡地径流,部分被蒸发,部分进入包气带。在研究潜水水文过程线中尤为重要就是确定到达潜水面那部分入渗水量。

大量的水文地质观测表明,降水所产生的地表径流与当地气候条件和地貌特征有关,它在降水总量中所占的比值,从百分之几到一半或更多(在某些特定的地区)。由于降水蒸发与很多因素(如空气湿度饱和差、地面植被特征、风速、岩石组成、土壤状况及颜色等)有关,因此,它是一个比较难于确定的项目。大气降水扣除地表径流和蒸发以后,进入包气带的下渗水中仍然有一部分水不能到达潜水面——一部分为包气带土层拦截;部分消耗于植物蒸腾或包气带内部蒸发,能到达潜水面的仅仅是大气降水的一小部分。降水入渗系数即指这一部分下渗水量与降水量的比值而言。由地中渗透计观测表明,进入包气带的下渗水能够到达潜水面的量,首先与包气带岩性与潜水面埋藏深度有密切关系。

南京大学水文地质站在 1960—1961 年间曾对下蜀土阶地分水岭地段的降雨入渗过程进行过全面的观测研究。下蜀土属于具较多收缩裂缝与植物根网络的粉土质亚粘土,渗透系数为 0.04 米/天,地下水平均埋深 2 米,水位波动与降雨关系十分密切(见图 1-1)。

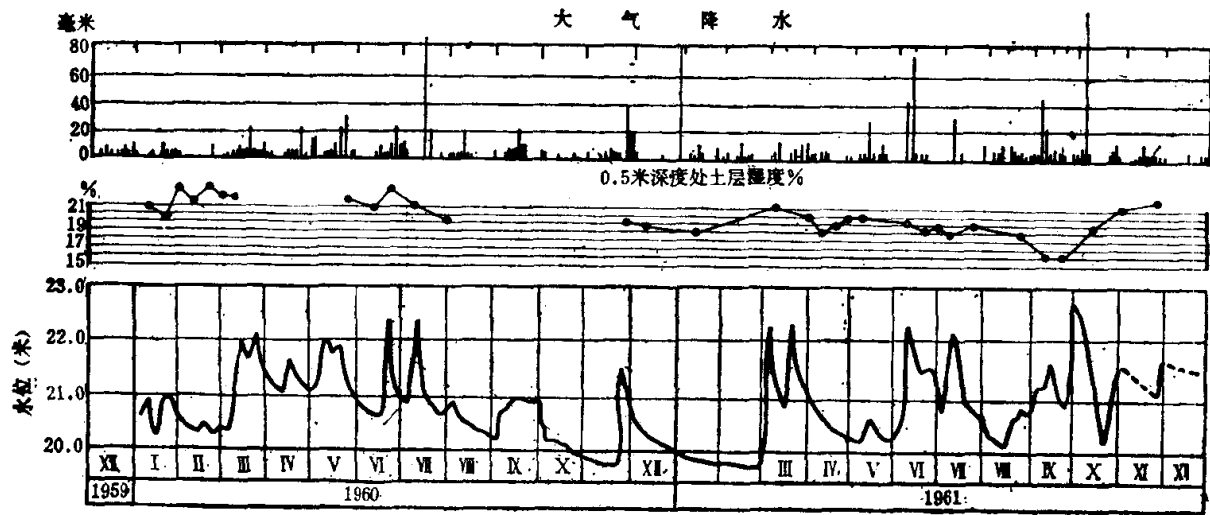


图 1-1 南京大学水文地质站 11 号钻孔潜水水位变化曲线

从图中可见,几乎全年每一次较大的降雨,地下水水位均有相应的上升,随即又产生较快的下落,但下落到一定高度,水位过程线坡度有一明显转折,与均匀介质中常见的退水曲线不同。经过分析,曲线陡升陡降的部分,大致反映下蜀土中导水性能较好的收缩裂缝与根管网络系统中地下水的水力特征,而过程线起伏和缓的部分则反映了储水性能良好的亚粘土微孔隙系统中地下水的特征。下蜀土含水层主要含水空间是由数量众多的微孔隙组成,雨季在收缩裂缝与根管中较高水头的作用下,微孔隙中可储蓄大量入渗的地下水,雨季过后,这部分水排泄十分缓慢,可以持续数月之久(见图 1-2)。水文地质站大部分观测孔的水文过程线均具有这种特征。

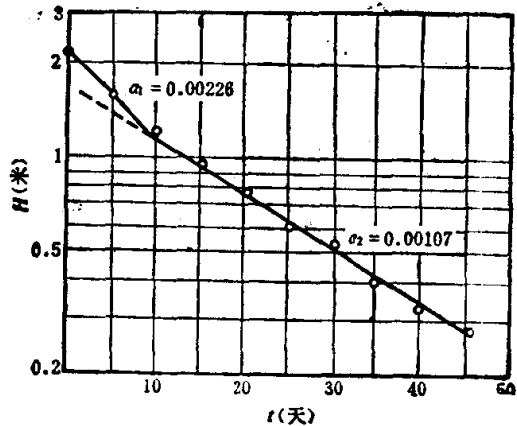


图 1-2 南京大学水文地质站下蜀土潜水退水曲线

(11 号钻孔, 1961 年 3 月 20 日至 5 月 5 日)

站区水位过程线另一个特点是雨季和旱季的水位波动与日降雨量对应关系有很大的

差别。在雨季,水位波动对雨量变化反映十分敏感,而在旱季,这种关系就变得迟钝了,这显然与包气带土层湿度有很大关系。为了解释入渗水的性质,必须对下蜀土包气带水分作详细的研究。图 1-3 即是下蜀土包气带水分性质的剖析图。据实测资料,旱季 0.5 米

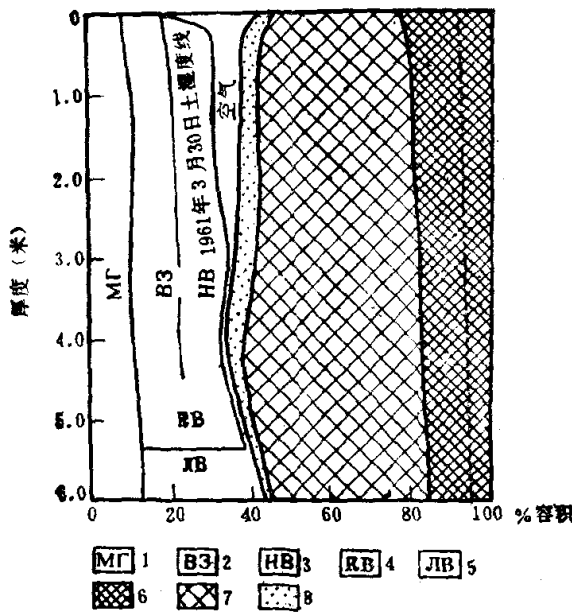


图 1-3 下蜀土包气带水分性质图

1. 结合水; 2. 角隙毛细水; 3. 悬着毛细水;  
4. 层状毛细水; 5. 重力水; 6. 粘土粒;  
7. 粉土粒; 8. 砂粒.

深处的土层湿度(体积湿度)为 16% 左右,从图 1-3 中可以看到 21.3% 以内的湿度均应属于角隙毛细水范围,它与毛细悬着容水度存在着一个明显的湿度差,故包气带土层有较强的拦截降水入渗的能力。但到雨季,土层湿度绝大部分上升到 20% 以上,这个湿度接近或超过了最大角隙容水度界限,进入悬着毛细水范围。所以通过毛细水的静水压力传递,入渗水能比较顺利的对潜水进行补给。实际观测也证实了这一推断。如干湿两季比较明显的 1960 年,旱季 20 毫米的降水对地下水均不产生任何补给作用;而雨季情况就完全不同,不但降水入渗系数较大,而且有时甚至可以出现不降雨也产生一定的补给作用的现象——单纯由于地温增高引起土层毛细力降低,使毛细悬着容水度变小,一部分毛细水转变为重力水,从而向下入渗补给潜水。

由粘性土构成的包气带,对入渗水的调节作用特别明显。单一由降水入渗形成的水位过程线变化也较复杂,但由砂性土、裂隙或喀斯特化岩石构成的包气带,透水性良好,水位过程线波动与雨量变化的对应关系便较清楚。由于砂质包气带相应的角隙毛细水及悬着毛细水容水度比粘性土都要小得多,所以包气带水对入渗水的调节作用就不显著了。因此,过程线急起急落,由以往降水形成的地下水基流在流出量中占的比重就很少。如贵州遵义出露于湘江岸边的三叠系夜郎组九级滩段泥质灰岩中 58 号裂隙下降泉(高出湘江 30 米)的水位过程线即显示了这种特点,见图 1-4。

至于降水入渗补给量与地下水埋藏深度之间的关系,五十年代我国曾在不少地区(如包头、石家庄、北京等)进行过专门观测与研究,其中石家庄水文地质站所得的结果比较有代表性,见表 1-3。由于我国年降雨量变率很大,因此对不同年降雨量和不同埋深的潜水所获得的年入渗值的观测研究是一项很有现实意义的工作。年降雨量大的年份,一般包气带湿度也比较高,这对降水入渗当然十分有利,所以入渗系数较大。年降雨量减少,降水入渗系数随地下水埋藏深度的加大很快地减小。由此可以看出,包气带越厚,它对降水入渗量的调节作用越明显。当其超过一定深度时,年降水入渗作用就十分微弱,对降雨量年际变化的反应几乎消失,致使降雨入渗值成为与地区地质与自然地理条件有关的一个常量。如内蒙古锡盟灰腾西里熔岩台地地区潜水埋深达百余米;经专门研究取得降水入渗量为 10 毫米/年<sup>[41]</sup>。所以深埋藏潜水的水位过程线一般变化都比较平缓了。

对于由降水入渗或包气带蒸发引起的包气带内部水分运移的理论,1931 年首先由 L. A. 理查兹导出了微分方程。(1.1) 式即考虑垂向一维流动的理查兹方程:

表 1-3 不同潜水埋深、不同年降雨量条件下到达潜水面的年渗入量\*

| 年渗入量<br>(毫米)<br>地下<br>水埋深<br>(米) | 年降雨量<br>(毫米) | 300         | 400       | 500       | 600       | 700       | 800       | 900       |
|----------------------------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.5                              |              | 117(39.0)** | 158(39.5) | 205(41.0) | 264(44.0) | 337(48.1) | 417(52.1) | 497(55.2) |
| 1.0                              |              | 36(12.0)    | 80(20.0)  | 130(26.0) | 193(32.1) | 272(38.8) | 357(44.6) | 440(48.9) |
| 2.0                              |              | 0           | 25(6.2)   | 66(13.1)  | 118(19.7) | 182(26.0) | 250(31.3) | 317(35.2) |
| 3.0                              |              | 0           | 15(3.8)   | 52(10.4)  | 97(16.1)  | 150(21.4) | 206(25.8) | 263(29.2) |
| 4.0                              |              | 0           | 5(1.25)   | 38(7.6)   | 78(13.0)  | 126(18.0) | 178(22.3) | 230(25.6) |

\* 河北省地质局水文地质观测总站,1976,通过地中渗透仪研究潜水均衡的初步分析,河北地质情报.

\*\* 括号内数字为降水入渗率(100%).

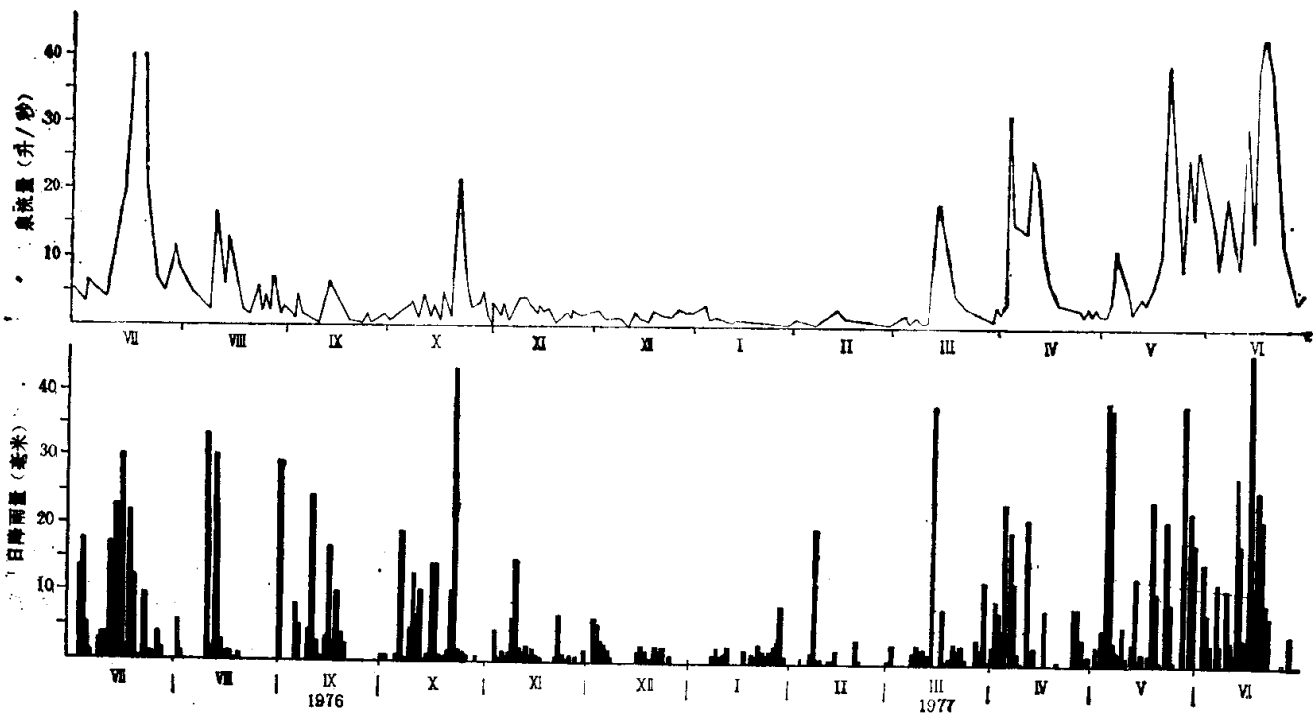


图 1-4 遵义市西南郊三叠系夜郎组泥灰岩中 58 号泉流量过程线<sup>1)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} - 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = C(\theta) \frac{\partial \phi^{[98]}}{\partial t} \tag{1.1}$$

其中  $C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \phi}$ . 如令  $D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)}$ , 则上式又可以写成

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{1.2}$$

式中:  $\phi$ ——包气带的毛细-薄膜水势;

1) 陈廷乐,1977,遵义市城市供水地下水动态长期观测年度报告.