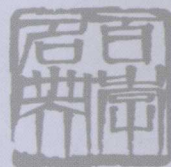




武汉大学
百年名典

地下水非稳定流计算和 地下水资源评价

张蔚榛 主编



根深葉茂 實亦聲滋
山高水長 流風長美



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

014005779

P641.2
06

武汉大学
百年名典

地下水非稳定流计算和 地下水资源评价

张蔚榛 主编



P641.2
06



武汉大学出版社
WUHAN UNIVERSITY PRESS



北航

C1692647



图书在版编目(CIP)数据

地下水非稳定流计算和地下水资源评价/张蔚榛主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2013. 10

武汉大学百年名典

ISBN 978-7-307-11327-5

I. 地… II. 张… III. ①地下水均衡—计算 ②地下水资源—资源评价 IV. ①P641.2 ②P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 154733 号

责任编辑:李汉保

责任校对:刘欣

版式设计:马佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北恒泰印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 57 字数: 817 千字 插页: 4

版次: 2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-11327-5 定价: 126.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学百年名典

自然科学类编审委员会

主任委员 李晓红

副主任委员 卓仁禧 周创兵 蒋昌忠

委员 (以姓氏笔画为序)

文习山 宁津生 石 兢 刘经南
何克清 吴庆鸣 李文鑫 李平湘
李晓红 李德仁 陈 化 陈庆辉
卓仁禧 周云峰 周创兵 庞代文
易 帆 谈广鸣 舒红兵 蒋昌忠
樊明文

秘书长 李平湘

社会科学类编审委员会

主任委员 韩 进

副主任委员 冯天瑜 骆郁廷 谢红星

委员 (以姓氏笔画为序)

马费成 方 卿 邓大松 冯天瑜
石义彬 余双好 汪信砚 沈壮海
肖永平 陈 伟 陈庆辉 周茂荣
於可训 罗国祥 胡德坤 骆郁廷
涂显峰 郭齐勇 黄 进 谢红星
韩 进 谭力文

秘书长 沈壮海

张蔚榛

男，（1923—2012年），出生于河北省唐山市丰南区，是我国著名的水利学家、教育家，国际知名的地下水及农田灌溉、排水专家，武汉大学教授，中国工程院院士。

张蔚榛先生1941年就读于北京大学工学院土木工程系，毕业后留校任教。1947年，在担任《初等流体力学》课程辅导工作中对水利工程产生兴趣。1951年，因业务能力出众，被首批选派往前苏联深造，师从号称“水利土壤改良之父”的通讯院士考斯加可夫教授。1955年以优异的成绩取得副博士学位，其学位论文得到前苏联地下水渗流计算学术界的高度评价，该学位论文的主要内容被收录入前苏联科学院出版的《灌溉对地下水动态的影响》论文集中。1955年回国后由国家教育部分配至原武汉水利学院从事教学科研工作，1956年加入中国共产党，1981年被评为我国首批博士研究生导师，1989年荣获国务院嘉奖，1997年当选中国工程院院士。

张蔚榛先生长期从事地下水渗流、地下水资源及农田灌溉、排水等方面的学术研究，硕果累累。其成就主要包括：

推导了不同的农田灌排田间工程边界条件下地下水运动计算公式，处于当时的国际领先地位，该套理论公式使得农田灌溉、排水工程的规划设计更具科学性和实用性，该成果获国家教育委员会科技进步二等奖。

科学地概括和统一了地下水资源的概念；在参加华北平原地下水开发利用的研究实践中发展了地下水资源评估理论；推导了复杂地层条件下水井水力学计算方法；提出了“我国北方平原地区地下水的开发应把重点放在开采浅层地下水资源”的论断，对我国华北平原及类似地区的地下水资源合理开发利用起到了重要的指导作用，该研究成果荣获1978年全国科学大会奖。

在我国率先应用势能理论研究饱和—非饱和土壤水分运动，并应用于生产实践，解决了大量灌溉、排水及盐碱地改良中的科学难题，引领了当时农田水利学科的前沿，拓展了农田水利学科的理论体系。

将溶质运移理论应用于盐碱地改良以及控制农田化肥流失等问题的研究，开辟了农田水利学科在环境学方面新的研究方向。对黄、淮、海平原次生盐碱化的治理、生态环境保护等起到了重要作用。为表彰张蔚榛先生在黄、淮、海平原治理中的杰出贡献，于1989年张蔚榛先生被授予国务院二级嘉奖。

张蔚榛先生一生致力于农田水利学科发展和专业人才的培养，他治学严谨，理论联系实际，勇于探索和创新；他待人诚恳，诲人不倦，为我国水利教育事业的发展奠定了基础。他主持筹建了我国第一个农田水利实验室，长期担任农田水利教研室主任，率领教研室同仁创建了具有中国特色的农田水利学教学体系。在他的带领和影响下，原武汉水利电力学院农田水利学科成为该领域全国第一个博士点和第一批重点学科；他创立了一套完整的地下水动力学、土壤水动力学和溶质运移理论的研究生课程体系，编著了相关教材，并在全国举办的多期研讨班主讲该系列课程，为水利、地质、农业等不同领域培养了大批急需人才。他长期活跃在教学第一线，亲自带领学生参加生产实习、课程设计和毕业设计。他对学生的培养既注重理论知识的传授，又注重实际动手能力的训练，指导了50余名博士和硕士研究生，有的已成为国内外知名专家、学者。张蔚榛先生的著作有：专著《地下水非稳定流计算和地下水资源评价》，主编研究生教材《地下水与土壤水动力学》、《地下水文与地下水调控》，参编教材《农田水利学》，并发表论文数十篇，其中大部分已收录入《张蔚榛论文集》（武汉大学出版社2002年12月出版）。

在长达半个多世纪的学术生涯中，张蔚榛先生活跃在国内外农田水利界、水文地质界及工程勘测界，他积极参与国内和国际间的学术交流，享有很高的声誉。曾担任第一、二届国务院学位委员会学科评审组成员，国家教委科学技术委员会土建及水利学科组成员，国家自然科学基金委员会第二、三、四届水利学科组评委，国家水利部技术委员会委员，国家水利部地下水管理专家组成员，中国科学院土壤物理研究所兼职研究员，清华大学兼职教授，中国水利学会农田水利专业委员会顾问，水文地质专业委员会顾问，工程勘察学术委员会委员，国际灌排委员会委员，联合国粮农组织咨询专家等，同时任《水利学报》等多个杂志的编委或顾问。世界银行曾聘请张蔚榛先生为中方有关水利工程贷款项目评审专家，为我国争取外援，开展国际合作和水利事业的进步作出了重要贡献。

《武汉大学百年名典》出版前言

百年武汉大学,走过的是学术传承、学术发展和学术创新的辉煌历程;世纪珞珈山水,承沐的是学者大师们学术风范、学术精神和学术风格的润泽。在武汉大学发展的不同年代,一批批著名学者和学术大师在这里辛勤耕耘,教书育人,著书立说。他们在学术上精品、上品纷呈,有的在继承传统中开创新论,有的集众家之说而独成一派,也有的学贯中西而独领风骚,还有的因顺应时代发展潮流而开学术学科先河。所有这些,构成了武汉大学百年学府最深厚、最深刻的学术底蕴。

武汉大学历年累积的学术精品、上品,不仅凸现了武汉大学“自强、弘毅、求是、拓新”的学术风格和学术风范,而且也丰富了武汉大学“自强、弘毅、求是、拓新”的学术气派和学术精神;不仅深刻反映了武汉大学有过的人文社会科学和自然科学的辉煌的学术成就,而且也从多方面映现了20世纪中国人文社会科学和自然科学发展的最具代表性的学术成就。高等学府,自当以学者为敬,以学术为尊,以学风为重;自当在尊重不同学术成就中增进学术繁荣,在包容不同学术观点中提升学术品质。为此,我们纵览武汉大学百年学术源流,取其上品,掬其精华,结集出版,是为《武汉大学百年名典》。

“根深叶茂,实大声洪。山高水长,流风甚美。”这是董必武同志1963年11月为武汉大学校庆题写的诗句,长期以来为武汉大学师生传颂。我们以此诗句为《武汉大学百年名典》的封面题词,实是希望武汉大学留存的那些泽被当时、惠及后人的学术精品、上品,能在现时代得到更为广泛的发扬和传承;实是希望《武汉大学百年名典》这一恢宏的出版工程,能为中华优秀传统文化的积累和当代中国学术的繁荣有所建树。

《武汉大学百年名典》编审委员会

再版前言

1979年9月至1986年4月,我有幸在张蔚榛教授、李文渊教授和沈荣开教授的指导下攻读硕士和博士学位,这期间,正值张蔚榛教授组织课题组成员编写《地下水非稳定流计算和地下水资源评价》专著,当时研究生《地下水动力学和地下水资源评价》课程的授课内容主要取之于该专著。听课的学生除我之外,还有几位数学专业的研究生。地下水非稳定流计算,应用的数学工具较多,问题复杂,学习难度较大。讲授过程中,张老师将复杂的数学问题利用简单的物理概念生动叙述,各种公式的严密推导与物理概念相融合,既高深又风趣,深入浅出,浑然一体。当时张老师年近六十,讲到兴趣处两节课并做一次讲,完全融入到学问中。现在回想起来,听大师授课,完全是一种享受。

张蔚榛教授1945年毕业于北京大学工学院土木工程系。1951—1955年留学前苏联科学院,获技术科学副博士学位。回国后在武汉水利学院任教,1981年被评为博士生导师,1997年被评选为中国工程院院士,一直从事地下水—土壤水运动和灌溉—排水的教学和科研,长期担任农田水利教研室主任。

20世纪50年代,灌溉土地次生盐碱化是困扰灌溉农业健康发展的世界性难题,张蔚榛教授在导师前苏联通讯院士考斯加科夫教授的指导下,选择了灌溉地区地下水动态对农业生产的影响为其研究方向。他曾多次深入中亚地区几个前苏联加盟共和国调研,在著名的“饥饿草原农业试验站”参加试验并进行实地观测,取得了大量第一手资料:在理论研究中,他主攻非稳定渗流理论,探寻农田地下水动态受周边水力条件(田间灌排系统结构)影响情况下 Boussinesq 方程的理论解,他先

后推导了单一河渠、平行河渠、三边河渠以及河网水系影响地下水非稳定运动计算公式;大面积或局部面积灌溉时地下水二维动态的计算方法。所得到的研究成果都归结成物理概念清晰的表达式,对每类计算都制备了简单实用的计算图表,这些成果得到前苏联渗流力学界学术权威——著名数学家波鲁巴林诺娃·柯琴娜教授的高度评价,学位论文的主要部分被收录于1959年前苏联科学院出版的《灌溉对地下水动态的影响》论文集中。回国后,他研究了表土蒸发随地下水埋深变化情况下的地下排水计算方法;河渠水位变动对两岸含水层补给或排泄的计算等,几乎概括了灌溉土地上可能遇到的各种地下水计算问题,求得的理论解既源自于严谨的数学推导,又具有一定的通用性,便于在当时科学计算条件下的实际应用。

20世纪70—80年代,随着华北平原地下水的大面积开发,地下水位大面积持续下降,引起国务院的高度重视,按照当时流行于学界以“储量概念”为基础的评估地下水可采资源的方法,已不能解释当时所出现的问题。严峻的生产形势迫切需要人们对地下水资源以及如何正确加以开发利用有一个正确的认识。张蔚榛教授和国内其他有识之士提出了应以动态的观点(即地下水非稳定流运动)来分析地下水运动和地下水资源。他以其丰富的前期积累和学术成果,面对当时科学研究的前沿和生产实际,深入华北平原冀、枣、衡地区及天津市深入调研,在当地蹲点长达10个月之久,开展试验并进行科学探索;组织研讨和讲学,推广地下水非稳定流计算和地下水资源评估的新理论与新方法。张先生在调查研究和理论分析的基础上,与水利及水文地质界同行一起明确指出:华北平原深层承压水补给微弱,其可采资源十分有限,大量开采后将出现地下水枯竭,产生严重的环境地质问题,华北平原地下水开发应以浅层地下水资源为主。这一战略性建议对我国华北及其类似地区的地下水资源合理开发利用起到了重要作用。张蔚榛教授利用地下水非稳定流理论研究了华北平原地下水资源评价及预测、预报问题;发展了用多年调节进行浅层地下水资源的评价估算方法;对利用地下水动态观测资料反求水文及水文地质参数进行了较深入的研究;对

含水层给水度提出了全新的概念。结合地下水资源评价中的实际需要,张先生推导出了二元、三元结构含水层单井非稳定流实用计算公式,非均质含水层集中开采区地下水非稳定流计算公式,考虑延迟给水的大口井计算公式,使水井水力学的计算方法更加系统和完善。这一期间,地下水非稳定流的数值计算方法得到快速发展,张蔚榛教授将明确的物理概念与精确的计算技术相结合,发展了地下水非稳定流的数值计算技术,并用于解决实际问题。张蔚榛教授发表论文 50 余篇,每一篇论文创新、实用、准确、严格,落地有声。

《地下水非稳定流计算和地下水资源评价》一书汇总了张蔚榛教授 20 世纪 80 年代之前的主要研究成果,除张蔚榛先生外,参加本书编写或统稿、审阅工作的还有李文渊、沈荣开、叶自桐、张瑜芳、徐玉佩、萧树铁和彭旭麟等学者。在此对他们表示敬意!是他们每个人的心血造就了本书。本书的重要特点之一是对繁琐的公式推导给出严格详细的说明,使初学者不感畏惧;对复杂的数学结果给出概念清晰的图表,使应用者深感便捷。本书于 1983 年 12 月在科学出版社首次出版,因其系统性、全面性和独创性,于 1987 年获原国家教委科技进步二等奖。

今年恰逢武汉大学迎来建校 120 周年庆典,武汉大学出版社将张蔚榛先生等编著的《地下水非稳定流计算和地下水资源评价》一书收录入《武汉大学百年名典》重新出版,是对张先生一生奉献给农田水利和教育事业的缅怀和颂扬。同时,从首版至今,该书在社会上存本已很稀少,再版此书有助于后人更好地了解地下水资源评价和地下水非稳定流计算方法的发展以及相关数学手段的应用技巧,为进一步学习和探索渗流计算理论,为地下水和农田水利学科的发展做出更大贡献!

杨金忠

2013 年 6 月 15 日于武汉大学

前 言

我国北方属干旱半干旱地区,地面水源不足,地下水的开发在工农业生产中具有重要意义。我国南方,就整个地区而言,地面水资源比较丰富,但由于河流分布不均,流量在一年内变化较大,局部地区同样存在着严重缺水情况。随着农业生产的不断增长和现代化工业的迅速发展,用水量势必急剧增加,作为水资源的一个重要组成部分的地下水必将日益发挥巨大作用。近年来,由于大量开发地下水,一些地区出现了水位大幅度下降、水井出水量减少的现象,个别地区甚至发生地面下沉、水质恶化和海水入侵等情况。为了充分发挥地下水资源的效益,满足用水需要,作好地下水资源的分析评价是当前地下水文工作者的一项重要任务。

地下水虽然是一种重要水源,但如果控制不当,也会造成严重危害。我国北方平原地区,若缺乏完善的灌溉排水系统,不修建适当的平原水库或河道蓄水工程,地下水位就会抬高,导致土壤次生盐碱化和雨季渍涝,造成作物减产。南方地区若经常保持较高的地下水位,不仅会影响旱作物的正常生长,也是水稻高产的重要障碍。为此,在地下水埋深过小的地区,采取有效控制措施,是保证农业生产持续发展的重要环节。总之,无论从地下水开发利用的角度出发,还是从地下水动态的调节控制考虑,都需要分析评价地下水资源和研究地下水运动规律。本书就是为此目的而编写的。

近年来,我们在地质部门和水利部门为有关科技工作人员多次举办了“地下水计算”进修班。本书就是在为这些进修班所编定的讲义“地下水非稳定流计算和地下水资源评价”的基础上,经充实补充了一些国内外近期的资料和我们自己的一些研究成果后编写而成的。本书

主要介绍地下水非稳定流理论及其应用,和目前国内外一些用非稳定流理论进行地下水资源评价方面的科研成果。为了使读者了解各种理论公式的物理意义,学习和掌握地下水非稳定流计算中常用的数学手段,还深入浅出地介绍了有关公式的推导过程。为了便于实际应用,书中附有有关计算图表。

本书依次介绍了:地下水资源的概念和地下水运动以及溶质运移的基本微分方程;不同水文地质条件下单井和群井在抽水或注水时地下水非稳定流的计算方法;河渠水位变动影响下附近地区地下水运动规律的计算方法;在降雨、灌水入渗和潜水蒸发影响下地下水非稳定流计算方法(以上主要介绍解析解)。由于数值计算是求解复杂水文地质条件和复杂初值边值问题的有效工具,故第6章针对地下水计算中常用的数值计算方法——有限差分法和有限单元法进行了论述。第7章着重讨论地下水资源评价的一些方法和实例。

参加本书编写工作的有张蔚榛、李文渊、沈荣开、叶自桐、张瑜芳、徐玉佩等同志,沈荣开同志参加了统编工作。

北京大学数学力学系萧树铁同志审阅了全稿,并提出了不少宝贵意见。在本书编写过程中得到了武汉水利电力学院数学教研室彭旭麟同志的帮助,并参考了有关兄弟院校和科研生产单位所提供的宝贵资料。特此表示深切谢意。

由于编写时间比较仓促,书中可能还存在不少缺点和欠妥之处,希望读者给予批评指正。

作者

1983年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 地下水资源的概念	1
1.2 地下水运动基本方程	22
1.3 地下水含水层中溶质运移基本微分方程	33
第2章 单井抽水时地下水非稳定流计算	40
2.1 承压含水层单井定流量抽水时地下水非稳定流计算	40
2.2 承压含水层单井定降深抽水时的地下水非稳定流计算	55
2.3 潜水含水层单井定流量抽水时地下水非稳定流计算	67
2.4 含水层底板倾斜情况下水井附近地下水非稳定流计算	94
2.5 非完整井附近地下水非稳定流计算	101
2.6 水井自双层结构潜水—承压水含水层抽水时附近地下水非稳定流计算	110
2.7 水井自三层结构潜水—承压水或承压水含水层抽水时附近地下水非稳定流计算	130
2.8 在含水层有边界限制情况下水井附近地下水非稳定流计算	165
第3章 群井抽水时地下水非稳定流计算	178
3.1 均匀分布的排井附近地下水非稳定流计算	180
3.2 群井在大面积内均匀分布(呈对称网格布置)时地下水非稳定流计算	193
3.3 圆形开采区地下水非稳定流计算	242

3.4	长方形开采区地下水非稳定流计算	273
第4章	河渠影响下地下水非稳定流计算	306
4.1	一侧有河渠边界限制(即半无限)的均质含水层中河渠附近地下水非稳定流计算	306
4.2	两侧有平行边界限制的含水层中河渠附近地下水非稳定流计算	345
4.3	河渠发生自由渗流时河渠附近地下水非稳定流计算	390
4.4	河网地区地下水非稳定流计算	421
4.5	河渠影响下双层结构含水层地下水非稳定流计算	467
第5章	降雨、灌水入渗和潜水蒸发条件下地下水非稳定流计算	516
5.1	无边界限制的含水层中有灌水入渗补给时的地下水非稳定流计算	516
5.2	含水层一侧有边界限制时灌水入渗补给条件下地下水非稳定流计算	530
5.3	两侧有边界限制的含水层中降雨和灌水入渗条件下地下水非稳定流计算	543
5.4	四侧有边界限制时降雨、灌水入渗和蒸发条件下地下水非稳定流计算	624
5.5	在地下水非稳定流计算中初始条件的处理问题	636
第6章	地下水非稳定流的数值算法	644
6.1	利用有限差分法进行地下水非稳定流计算	645
6.2	利用有限单元法进行地下水非稳定流计算	705
第7章	地下水资源的分析计算	794
7.1	地下水资源评价的任务和内容	794
7.2	局部开采区地下水资源分析计算	798
7.3	区域性地下水资源评价(多年均衡法)	814
7.4	区域性地下水资源评价(非稳定流数值算法)	833
7.5	利用非稳定流数值算法进行区域性地下水资源评价的实例	863

附录 I Bessel 函数	880
一、Bessel 方程和 Bessel 函数	880
二、虚变量 Bessel 函数	882
三、Bessel 函数的性质	884
四、Bessel 函数的渐近公式和积分表达式	886
附录 II 积分变换	890
一、Fourier 变换(傅立叶变换)	890
二、Hankel 变换	895
三、Laplace 变换(拉普拉斯变换)	895

第 1 章 绪 论

1.1 地下水资源的概念

地下水贮存于地球表面沉积层孔隙或基岩裂隙中,根据埋藏深度和存在形式,大致可以分为浅层地下水(潜水或潜水—承压水)和深层承压水两类。平原地区的深层承压水,是在亿万年前地质构造作用下形成的,其补给和排泄区常远离埋藏区。在垂直方向,由于含水层的开采,在相邻含水层之间形成的压力水头差的作用下,可以通过弱透水层(或天窗)接受相邻含水层的越层补给,但不论是水平方向还是垂直方向,补给都比较微弱,开采之后不易恢复和补偿。浅层地下水埋藏在近代沉积层中,可以直接由天然降雨或其他地表水体补给,水的垂直交替活动和水平运动都十分频繁,开发利用以后可以部分(或全部)得到补偿和恢复。正确认识地下水资源的特点,摸清地下水在天然状态下和人工开采条件下的运动规律是合理开发利用的关键。

一个时期以来,在地下水资源评价中广泛采用了四大储量的概念;所谓四大储量,是指地下水的静储量、动储量、调节储量和开采储量。

静储量是指天然条件下多年最低水位以下地层中所储存的水量,其值等于地区的面积 A 乘以各土层厚度 m_i 和相应的土层给水度 μ_i 之和,即

$$W = A \sum_{i=1}^n m_i \mu_i$$

式中: n ——基岩以上不同岩性的土层层数;

W ——地下水静储量。

地下水静储量虽然数量很大(例如,我国华北平原冲积层厚度可达 300 ~ 1000m,若采用平均厚度 400m,平均给水度取 0.05,则在每 1 亿亩面积的地区内,地下水静储量 = $667 \times 10^8 \times 400 \times 0.05 = 13340$ 亿 m^3 ,可见其总量是相当巨大的)。但在实际情况下根据技术经济各因素的考虑,允许的地下水位降有一定的限度,可以开发利用的静储量只占全部静储量中很少一部分。况且,如果忽略了补偿情况,这部分资源和矿藏一样,只能供一次利用。因此,作为天然资源的存在而言,地球上(或一个地区内)地下水的储存量确实是相当丰富的,但若脱离了开发利用的条件去分析研究地下水就毫无意义。

动储量是指地下水的天然径流量,是指含水层在某一垂直地下水流向的横断面上的地下总流量(储量的提法不妥),即

$$Q = B \sum_{i=1}^n k_i m_i J_i$$

式中: Q ——通过某一断面地层的地下水总流量;

B ——断面宽度;

m_i, k_i, J_i ——分别为第 i 个含水层的厚度、渗透系数和水力坡度。

天然状态下的地下径流量,是地下水在长期的运动中,在一定的补给和排泄条件下形成的地下水流量。在山前冲积洪积扇地区,某一断面地下径流量的大小主要决定于补给区的来水状况及排泄区的状况,开采条件不同,可以截取的地下径流量也就不相同。对于以河流、湖泊为补给源的浅层水地区,地下径流相对微弱,其大小主要决定于排泄的条件,人工开采以后,地下径流将随集水建筑物的取水状况而变化。对于深层承压水,在开采过程中,如果压力水位降的影响范围未抵达补给边界,区域边界地下径流将不会发生变化,此时开采的水量主要是承压含水层中(地下水下降漏斗范围内)的弹性释水(或包括与开采含水层相邻含水层的越层补给)。在压力水位降落漏斗的范围抵达补给边界后,边界地区地下径流状况将随开采条件而发生变化。所以,无论是浅层地下水或深层承压水,如果脱离了开采的条件而单纯地研究天然状态下