

GUANGAI PAISHUI GONGCHENGXUE JIAOXUE FUZHU JIAOCAI

《灌溉排水工程学》

教学辅助教材

(自学指导、习题集、课程设计、实验指导)

主编 史海滨 吕志远 霍 星



黄河水利出版社

《灌溉排水工程学》教学辅助教材

(自学指导、习题集、课程设计、实验指导)

主编 史海滨 吕志远 霍 星

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是《灌溉排水工程学》的配套教材。为了提高教学质量,加深对课堂讲授内容的领会、巩固与掌握,做到理论与实践相结合。同时兼顾灌溉排水工程学教材内容体系,加入了大量具有地区特色的实用性设计示例和实际改(扩)建设资料。本书共分为四个部分。第一部分为自学指导,第二部分为习题集与示例(主要包括灌溉制度、膜下滴灌工程设计示例等),第三部分为课程设计(灌区渠系规划设计、喷灌系统设计),第四部分为试验指导及附录。

本书可作为高等学校农业水利工程、水利水电工程和水文水资源工程的专业辅助教材,也可作为其他相关专业的教学用书及从事灌溉排水技术推广人员的培训教材或同类专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

《灌溉排水工程学》教学辅助教材/史海滨,吕志远,霍星
主编. —郑州:黄河水利出版社,2013. 12
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0684 - 6

I. ①灌… II. ①史… ②吕… ③霍… III. ①灌溉
系统 - 高等学校 - 教学参考资料 ②排灌工程 - 高等学校 -
教学参考资料 IV. ①S274.2 ②S277

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309461 号

策划编辑:李洪良 电话:0371 - 66026352 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16.5

插页:4

字数:381 千字

印数:1—3 100

版次:2014 年 5 月第 1 版

印次:2014 年 5 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

本书是《灌溉排水工程学》(史海滨等主编)的配套教材。为了提高教学质量,加深对课堂讲授内容的领会、巩固与掌握,做到理论与实践相结合,并根据学生的实际情况,在我校农业水利工程几十年教学经验的基础上,参考兄弟院校的部分基本材料,结合我们以往多次修订再版的自编《灌溉排水工程学自学指导书》、《灌溉排水工程学习题集及课程设计书》和《灌溉排水工程学实验指导书》内容。同时兼顾灌溉排水工程学教材内容体系,加入了大量具有地区特色的实用性设计示例和实际改(扩)建资料,编写完成了本书,可作为高等院校水利学科和农业学科学生的专业辅助教材,也可作为其他相关专业的教学用书及从事灌溉排水技术推广人员的培训教材。

本书共分为四个部分。第一部分为自学指导,第二部分为习题集与示例(主要包括灌溉制度、膜下滴灌工程设计示例等),第三部分为课程设计(主要包括灌区渠系规划设计、微灌系统设计等),第四部分为实验指导。

本书由内蒙古农业大学史海滨、吕志远、霍星主编,李瑞平、李为萍和李仙岳等参加了编写工作。全书由史海滨主审,史海滨、霍星统稿完成。

本书引用了大量国内外研究成果,参考了许多出版和公开交流的相关著作和教材,在此表示衷心的感谢。

因作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正,提出改进意见,便于在教学实践中加以纠正。

编 者
2013年12月

目 录

前 言

第一部分 自学指导

第一章 绪 论	(1)
第一节 中国灌溉与防洪史	(1)
第二节 60 年来的成就和当前面临的问题	(5)
第二章 农田水分状况和土壤水分运动	(7)
第一节 土壤水分运动	(7)
第二节 土壤 - 植物 - 大气连续体的水分传输	(11)
第三节 植物根系吸水的宏观模型	(20)
第四节 植物根系吸水的动态模拟	(22)
第三章 作物需水量和灌溉制度	(25)
第一节 作物需水量	(25)
第二节 节水灌溉条件下的最优灌溉制度	(25)
第三节 多种作物间灌溉水量最优分配	(38)
第四节 节水灌溉的内涵及其范畴	(42)
第五节 SWAP 模型简介	(51)
第四章 灌水方法	(55)
第一节 地面灌溉	(55)
第二节 田间灌溉系统评价	(55)
第三节 畦沟的灌水技术	(59)
第四节 畦灌系统设计	(66)
第五节 沟灌系统设计	(69)
第六节 管道输水灌溉	(70)
第七节 塑料薄膜覆盖灌水技术	(83)
第八节 保护地节水灌溉技术	(90)
第九节 波涌流灌溉	(101)
第十节 节水灌溉综合评价理论与方法	(104)
第五章 灌溉渠道横断面设计	(111)
第一节 优化设计原理	(111)
第二节 优化计算实例	(113)
第六章 灌溉水源和取水方式	(116)
第一节 灌溉水质评价	(116)

第二节 地下水资源评价及开发利用	(120)
第七章 土壤盐碱化防治与改良的水利措施	(126)
第一节 水盐运动规律及平衡方程	(126)
第二节 洗盐用水量的计算	(126)

第二部分 习题集与示例

习题一 入渗、蒸发计算	(130)
习题二 春小麦作物需水量计算	(131)
习题三 设计春小麦灌溉制度	(139)
习题四 制订灌水率图	(139)
习题五 田间渠系规划布置	(141)
习题六 地下灌溉渠系水位推算	(141)
习题七 喷灌设计	(143)
习题八 膜下滴灌工程设计示例	(144)
习题九 取水方案选择	(153)
习题十 干、支渠系规划布置	(153)
习题十一 渠系水利用系数的计算	(154)
习题十二 灌溉渠道设计流量推算	(154)
习题十三 干渠纵横断面设计	(156)
习题十四 灌溉输水首部管径的计算	(157)
习题十五 灌区灌溉水源井的确定	(158)
习题十六 承压地下水资源开采利用计算	(158)
习题十七 浅层地下水资源多年调节计算	(159)
习题十八 田间排水计算	(161)
习题十九 骨干排水沟设计流量计算	(161)
习题二十 重盐碱地冲洗改良设计	(163)
习题二十一 引配水计划的编制	(164)

第三部分 课程设计

课程设计一 庆丰灌区灌溉渠系规划设计	(167)
课程设计二 准格尔旗红花沟果树微灌工程设计	(169)
课程设计三 ××县喷灌工程设计	(175)

第四部分 实验指导

实验一 土壤渗吸速度实验	(186)
实验二 土壤水扩散率 D 的测定	(192)
实验三 沟灌条件下土壤水分运动规律实验	(197)
实验四 明沟排水功能实验	(203)

实验五 喷头技术参数测试	(212)
实验六 微灌演示及灌水器技术参数测试	(214)
附 录	(216)
参考文献	(256)

第一部分 自学指导

第一章 绪 论

第一节 中国灌溉与防洪史

中国水利的历史与文明的历史同样悠久,这是由特有的自然环境所决定的,地域辽阔的中国,不同区域的地形地貌和季风气候等自然条件千差万别,由此产生了不同的水利问题,区域水利工程数量和规模也有很大差异,且工程形式多种多样。在各种自然条件中,气候和地形对灌溉与防洪工程类型和工程运行有着直接的影响。中国古代数量最多的无坝引水工程分布在江河沿岸,通常具有输水、行洪和水运等多方面的功能。水利发展也是受社会制度的推动成制的。

一、防洪与灌溉的起源和主要水利区的形成(夏商至汉代,公元前 21 世纪 ~ 公元 3 世纪)

每个民族都有自己文明起源的神话时代。中国文明的第一页是由洪水的神话掀开的。大约公元前 21 世纪,黄河流域发生了特大洪水。聚居于黄河中游的部落,开始登高躲避后或堵或疏与之抗争,最后在大禹的率领下战胜了洪水,中华民族由此强盛,第一个王朝——夏由此而诞生。夏代之后,中国进入了商周时期,社会进入了以农耕文明为特征的奴隶制时期。这一时期是灌溉与防洪的起源期。周代的分封制导致了王权衰落,诸侯割据的战国时期到来了。

黄河治河及防洪工程建设起源于战国时期(公元前 475 ~ 前 221 年)。大禹治水主要采用疏导的方法,那是适应当时人口不多、居民点稀少的社会实际。到了春秋战国时期,黄河沿岸已经人口密集,不能再让黄河在广袤的平原上往返大幅度摆动了,由此筑堤防洪应运而生。

到了西汉,在战国堤防的基础上,进行了黄河两岸堤防的系统建设或整顿。但是,堤防工程的负面作用也随之产生:河槽淤积,“地上悬河”逐渐形成。决口开始频繁,防洪任务艰巨。

西汉末年黄河大堤进一步修葺完善,一些重要的险工段改为石工,并出现了挑流、扩岸等河口工程。

西汉末年至[新]王莽始建国三年(公元 11 年),黄河大改道。王景治河便是新河道

上开展的大规模治理工程,主要内容有:修筑黄河汴河堤防,建分水、减少水量、整治河道等。

桔槔是利用杠杆原理的人力提水机械,战国时期已经有了文学记载。汉墓的石像中有很多的桔槔取水灌溉的题材,反映出桔槔已经是当时田野灌溉的常用机具。

灌溉渠系出现在4 000多年前的殷商时期。考古发明,约4 000年前商代的甲骨文中,出现了井和田的符号“田𠄎”,意指田边的水沟。

西周(公元前11世纪~前476年)的经济区——黄河下游(今山东、河南一带)有发达的农业。西周一种被奉为“神圣的王制”的制度——“井田沟洫”,就是将一块土地分为呈“井”字状的9块,中央是蓄水的井,其余8块是被渠道环绕的耕地。

秦昭襄王五十一年(公元前256年)蜀都守李冰主持修建了都江堰(见图1-1-1)。都江堰位于岷山上游的西北。都江堰首枢纽主要由鱼嘴、飞河堰、宝瓶口组成,它们的选址巧妙地利用了河道地形河流的水力学特点。岷山通过鱼嘴分为内江、外江,经过飞沙堰(侧向溢流堰)进入宝瓶口,岷江由此进入成都平原。都江堰是兼具灌溉、防洪、航运以及城市水环境多种功能的水利工程。从创建至今,都江堰多次毁于洪水,但是每一次修复都又继承了原来的工程枢纽布置形式,反映出2 000多年前都江堰完美的工程规划。

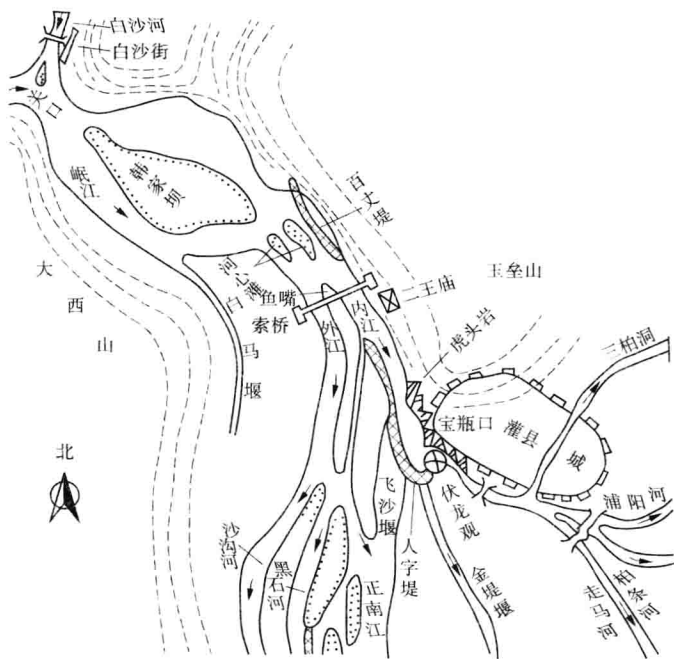


图 1-1-1 都江堰渠首枢纽布置及都江堰鱼嘴结构

二、水利科学与技术的辉煌时期(三国至唐宋,约公元3~13世纪)

东汉末年,大一统的帝国开始崩离析,历史进入了魏蜀吴三国鼎立的时期。在短暂统一的西晋之后,北方游牧民族乘着战乱进入中原。黄河以北是战争的中心区域,经历了

魏晋南北朝大约 400 年的战乱,大量的人口南迁,中原科学技术随之传至黄河以南。这一时期是南方水利工程开创时期。在盘踞于黄淮之间广大平原的各个时期的割据政权中,三国时实力最强的曹魏,南北朝时期实力最强的北魏和西魏,无不出于战争需要而大举军事屯田,由此带动了区域水利工程建设、小型陂塘灌溉工程和区间运河开凿,满足了粮食生产和水运的需求。

汉代以后,强大的中央集权统治逐渐势微,取而代之的是地方割据政权。拥有大量土地的门阀由此获得了独霸一方的条件,北方的庄园农业由此而繁荣。人口的锐减和庄园经济的繁荣导致了人们对机械的需求。在这个特殊的时期,用于粮食加工的水磨、水碾等水力机械,用于灌溉和排水的筒车及小型机具等开始进入皇亲势族的庄园。一些贵族或朝廷官员以拥有这些机械作为炫耀其地位和财富的资本。200 多年后,即唐宋时期,这些机械或机具进入寻常百姓家,地处边缘的西北边疆也有很多水磨和水碾的使用记载。然而,明清时期,它们的应用和制造突然沉寂下来。原因在于,人口的急剧增加导致劳动力的低廉,从而阻碍了社会对这些机械的应用。

在隋代中国重新归于统一的基础上建立起来的唐代,是中国古代文明辉煌的朝代,这种辉煌一直延伸到两宋时期(约公元 7~13 世纪)。这期间,长江中下游流域及太湖流域的农业经济地位日渐突出,全国经济中心的地位基本形成。太湖流域塘浦围田系统、滨海拒咸蓄淡工程成为这一时期农田水利建设的主要特征。隋唐时期建立起从中央到地方完善的水政管理体系,以唐《水部式》、宋《农田水利约束》为代表的国家水法的颁行,标志着中国古代水利行政管理进入了成熟期。

唐宋时期灌排工程进入持续发展阶段,始建于秦汉的很多工程在唐宋时期得以重建,许多灌区则获得了空前的发展,如西北河套平原的引黄灌区、岷江流域的都江堰、太湖塘浦灌排工程体系等都演进为重要的水利区,支撑着区域农业与经济的持续繁荣。唐代制定的国家水利法规《水部式》成为后来各朝各代制定国家水利法规的范本。此外,唐宋都城水利成就卓著,不仅为长安、洛阳、扬州、杭州、成都等城市提供了完善的供排水工程系统,而且这些城市中的湖泊和城河还被创造成了优美的园林景观。

这一时期,黄河安流已经 800 年。至北宋时,黄河又开始频繁决口,直接危及北宋都城汴梁和运河——汴渠的安全。治河防洪再次提上议事日程,埽工、河道裁弯取直、水准测量等水利施工技术也随之提高。位于长江干流中游的宜昌、沙市及汉口成为商业和交通重镇,并开始筑堤。这些区间的堤防开了后来明清时期荆江大堤建设高潮之端绪。

三、灌溉与防洪工程普遍发展时期

13 世纪 70 年代,忽必烈统帅的蒙古军队从北方草原长驱南下,结束了南宋与辽金南北对峙 150 年的局面,建立起统一的政权——元朝。自此,中国进入了长达 640 年的元明清时期,在此期间,中国灌溉工程普遍发展。东南的福建、海南、台湾,西南的云南、贵州,西北的新疆、内蒙古、宁夏等地灌溉工程的增加势头超过以往任何一个历史时期。因地制宜地灌溉工程形式赋予了这一时期鲜明的时代和地域特点。如 1821~1908 年新疆吐鲁番盆地坎儿井急剧增加,仅 80 多年间所开凿的坎儿井就超过 400 条。17 世纪时,来自福建的移民将水利工程技术带到台湾,持续百年的台湾山区河流大型引水灌溉工程建设由

此拉开序幕。

清康熙年间(1662~1722年),中国人口达到1亿人,粮食产区快速扩展,即使是干旱的西北和寒冷的东北等地也已经普遍垦殖。这一时期长江中游江汉平原和洞庭湖的圩垸、珠江三角洲的基围,成为继太湖围田之后持续时间最长、规模最大的水利区,并创造出以“湖广熟,天下足”而著称的区域农业经济,对中国社会的稳定起着举足轻重的作用。随着中国主要江河中下游开发速度的普遍加快,土地肥沃的江河滩地和湖泊洼淀成为人口密度最大的地区。与此相应,海河、黄河、淮河、长江中下游和珠江三角洲的干流及支流的重要河段上都建起了规模可观的堤防工程。被誉为“海上长城”的东南沿海鱼鳞大石塘也是这一时期完成的。

南宋建炎二年(1128年),为阻止金兵南下,北宋留守杜充在开封决开黄河,黄河南行夺淮,经淮河下游河道在今江苏云梯关入海。黄河夺淮后,南行河道(即今废黄河)将原本统一的淮河下游水系分割成淮河水系和沂沭泗水系两大系统。黄河夺淮改变了江淮间的自然环境。在黄河夺淮的700余年间,黄淮与江淮之间水系紊乱,洪水灾害严重。间或黄河北泛,则冲断京杭运河山东段;折向东南,则黄淮合流危及淮扬运河。

在元明清建都北京的600余年间,京杭大运河成为联系北方政治中心和南方经济中心的交通动脉。为了保障这条大动脉的畅通,国家将越来越多的赋税收入用于河工经费,清道光时(1821~1850年)的常年河工经费预算占国家财政收入的10%。其中,道光二十四年(1844年)的黄河中牟堵口工程用银1190万两,约占当年赋税的29%。这一时期最艰苦的防洪工程建设当属黄河、淮河和京杭运河相交的清口工程枢纽,它的建成使洪泽湖高家堰枢纽工程日趋完善,并促使黄淮分流,淮河主流越过洪泽湖高家堰,部分经高邮、宝应诸湖归入长江,部分穿过淮南运河大堤经里下河地区入海。尽管里下河地区由此洪涝灾害频发,但确定了后代淮河下游治理和防洪工程的基础。束水攻沙、以堤治水的黄河大堤和蓄清刷黄的高家堰,以及持续400多年的引清刷黄、导淮归海、导淮入江工程体系和防洪调度,代表了古代防洪治河工程技术的最高成就。

四、水利科学与技术的承前启后期(清末至民国,1850~1949年)

以清咸丰五年(1855年)黄河改道由大清河入渤海为标志,中国水利进入了转折时期。黄河改道后纵贯南北的京杭运河在山东张秋被拦腰截断,运河漕运改为海运。1901年废除漕粮征制度,经营了500年的京杭运河漕运始告终结。黄河防洪重点随之也发生了变化,由确保运河不被冲断改为干流沿岸险工段重点防汛。淮河全河改道后,洪泽湖和里下河排水问题更加严峻,导淮成为20世纪初水利建设的重点。发生在20世纪上半叶的流域性大洪水,如1915年珠江大水、1931年长江大水、1939年海河大水,以及西北大旱等水旱灾害给社会以极大的冲击,也唤起了人们对水利问题的关注,推动了中国现代水利的创始。重要的进步主要体现在水利规划的前期工作,如水文和河道地形测量、引进新型机械和材料、兴办水利教育和水利学研究等方面。20世纪20年代以来各流域治本计划和水利法的制定,以及水电站、新型灌区和灌排站的建设,标志着中国水利新时期的来临。

在西风东渐的19世纪末至20世纪初,来自西方发达的水利科学、工程技术、水管理

与法规制度,冲击着古老的传统水利。这一时期水利还有一个鲜明的特点,那就是在传统的水利工程建筑形式、河工构件和施工方法渐行渐远的同时,中国部分传统水利的精华开始进入西方科学家的视野,东西方截然不同的工程技术在江河规划和灌溉方面出现了嫁接与融合。以李仪祉为代表的一批接受过西方水利教育和东方文化熏陶的知识分子是这一时期水利变革的推动者和继承者。

第二节 60 年来的成就和当前面临的问题

一、获得的成就

新中国成立 60 多年来,党和政府领导广大人民进行了规模空前的水利建设。《2012 年全国水利发展统计公报》统计表明,至 2012 年底,全国已建成江河堤防 27.73 万 km,累计达标堤防 17.75 万 km,其中一、二级堤防累计达标长度 2.79 万 km;已建成各类水库 97 543 座,总库容 8 255 亿 m^3 ,其中,大型水库 683 座,总库容 6 493 亿 m^3 ;水利工程实际供水能力达到 6 591 亿 m^3 ;有效灌溉面积达到 5 707.8 万 hm^2 ,其中 30 万亩^①以上大型灌区 285 处,有效灌溉面积 1 461.3 万 hm^2 ;工程节水灌溉面积达到 2 242.6 万 hm^2 ,农业灌溉水有效利用系数达到 0.46;水利系统水电装机容量累计达到 5 293 万 kW,占全国水电装机容量的 41.2%,其中农村水电装机 4 720 万 kW;水土流失综合治理面积达到 102.95 万 km^2 ,其中,小流域治理面积 37.9 万 km^2 。

该公报初步统计了 2012 年全国水资源总量 29 526.9 亿 m^3 ,总供水量 6 131.2 亿 m^3 ,人均用水量为 454 m^3 。万元 GDP(2010 年可比价)用水量 130 m^3 ,万元工业增加值(2010 年可比价)用水量 27 m^3 。根据全国大于 20.1 万 km 河长水质评价结果,水质符合和优于 III 类水的河长占 67.0%。

二、面临的问题

这些巨大成就为保障我国经济迅速发展和社会长期稳定创造了条件。但是,由于种种原因,水利发展的模式基本属于粗放型。不少工程的安全标准不高、建设质量较差、配套设施不全、管理工作薄弱、用水浪费很大、水质污染严重,至今未能建立起良性运行的机制。在全国经济的高速发展中,也出现了一些新的矛盾。概括起来,当前面临如下主要问题。

(一) 防洪安全仍缺乏保障

我国江河的防洪工程系统还没有达到已经审批的规划标准。长江的荆江河段和黄河的主要堤防,在三峡和小浪底水利枢纽及相应的配套工程完成后,可以达到防御 100 年一遇以上洪水的标准;淮河、海河、辽河、松花江、珠江等江河,除少数重点城市外,大部分堤防都还只能防御 20 年一遇左右的常遇洪水。即使上述江河的防洪能力达到规划标准,根据我国的气象水文规律,仍有发生工程所不能解决的超标准洪水的可能。而由于缺乏统

^① 1 亩 = 1/15 hm^2 ,下同。

一规划和管理,各地不分主次,竞相修建防洪工程和提高防洪能力,全国的堤防长度由 20 世纪 70 年代的 11 万 km,80 年代的 16 万 km,发展到目前的 28.08 万 km。堤线越来越长,堤防越来越高,洪水蓄泄的空间越来越小,致使许多江河在同样流量情况下,洪水位不断抬高,造成加高加修堤防与抬高洪水位的恶性循环。由于堤防不断加高,防汛负担和防汛风险也不断加重,如万一溃堤决口,将造成更大的毁灭性灾害。

(二) 水资源紧缺与用水浪费并存

据分析估计,全国按目前的正常需要和不超采地下水,缺水总量为 400 亿 m^3 。在一般年份,农田受旱面积 1 亿~3 亿亩。从总体上说,因缺水造成的经济损失超过洪涝灾害。许多地区由于缺水,造成工农业争水、城乡争水、地区之间争水、超采地下水和挤占生态用水。

但与此同时,用水效率不高、用水严重浪费的现象也普遍存在。我国的用水总量和美国相当,但 GNP 仅为美国的 1/8。全国农业灌溉水的利用系数平均约为 0.45,而先进国家为 0.7,甚至达到 0.8。1997 年全国工业万元产值用水量 103 m^3 ,是发达国家的 5~10 倍。工业用水的重复利用率据统计为 30%~40%,实际可能更低,而发达国家为 75%~85%。全国多数城市用水器具和自来水管网的浪费损失率估计在 20% 以上。

(三) 水土资源过度开发,造成对生态环境的破坏

由于缺乏统筹规划,水资源和土地资源都有过度开发的现象。我国的水资源开发利用率达到 20%,不算很高,但地区间很不平衡,北方的海河、黄河和淮河的水资源开发程度已分别高达 101%、76% 和 53%。开发利用率超过了国际公认的合理限度 40%。在土地利用方面,山区毁林开荒,草原过牧滥垦,湖泊湿地被围垦,江河行洪滩地被侵占,这些都破坏了生态环境,加重了水旱灾害。由于地下水的持续超采,使不少地区地面沉陷,海水入侵。在黄淮海流域,由于水资源的过度开发,造成海河流域的河湖干涸,黄河下游经常断流,甚至淮河中游在 1999 年也出现了历史上罕见的断流现象。

(四) 水质污染迅速发展,已到极为严重的程度

据 2011 年《中国水资源公报》,2011 年全国废污水排放总量 807 亿 m^3 。2011 年,根据水利系统全国水资源质量监测站网的监测资料,采用《中国地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),对全国 18.9 万 km 的河流水质状况进行了评价。全国全年 I 类水河长占评价河长的 4.6%,II 类水河长占 35.6%,III 类水河长占 24.0%,IV 类水河长占 12.9%,V 类水河长占 5.7%,劣 V 类水河长占 17.2%。从以上问题可以看出,由水资源紧张、水污染严重和洪涝灾害为特征的水危机已成为我国可持续发展的重要制约因素。当我国经济发展到目前水平的时候,必须进一步从人口、资源、环境的宏观视野,对水资源问题总结经验,调整思路,制定新的战略。

第二章 农田水分状况和土壤水分运动

第一节 土壤水分运动

一、概述

解析法虽然物理概念清楚,变量(各因子)关系明确,在符合定解条件下可得到精确的解,但目前只能对一些简单初、边值问题求得解析解,使其使用受到很大的限制。大多数实际问题只能采用数值法求解。

如对于地下水均匀下降的垂向一维排水时的土壤水分运动,采用总水头 h 为变量的基本方程,见式(1-2-1)。

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial [K(h) \frac{\partial h}{\partial Z}]}{\partial Z} - \frac{\partial K(h)}{\partial Z} \quad (1-2-1)$$

定解条件如下:

初始条件: $h(Z, 0) = h_0(Z)$ (1-2-2)

上边界条件: $Z = 0$ (1-2-3)

有蒸发时 $-\varepsilon = -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial Z} - 1 \right) = \varepsilon_0 [a\theta(h) + b]$ (1-2-4)

无蒸发时 $\frac{\partial h}{\partial Z} = 1$ (1-2-5)

下边界条件: $Z = L$ (Z 自地表算起, L 为控制的地下水埋深)时,

$$h(L, t) = 0 \quad (1-2-6)$$

式中 $C(h)$ ——土壤的容水度, $[L^{-1}]$;

$K(h)$ ——土壤导水率,也称作水力传导度,是单位水势梯度的土壤水分通量, m/s 或 m/h ;

h ——压力水头, m 。

由式(1-2-1)~式(1-2-6)构成的数学模型中, $C(h)$ 、 $K(h)$ 是 h (或 θ) 的函数,并随 h (或 θ) 呈非线性变化;在地下水位下降条件下 $C(h)$ 、 $K(h)$ 更不能用常量代替。在这种边界条件未确定情况下求解二阶非线性偏微分方程时,很难用线性法求得解析解,而常采用将微分方程变成差分方程,用差商代替微商,直接求解代数方程组。虽不能得出各变量间的函数关系,但仍可求得数量关系并具有工程允许的精度而为人们实用上接受,成为解决复杂数学模型最有用的有效方法之一。

数值法与解析法的不同在于,它仅研究区域内的有限个点(离散点或称节点)的未知量的计算问题。这种离散包括时间与空间离散,经过人工分割(离散)后,整个区域的计

算问题转化为组成代数方程组求解,从每一节点未知函数的近似解到最后得到全部问题的数值解。数值法求解在物理概念上是将每一个差分网格区,均作为一个独立的土壤水或地下水的水量均衡区,建立节点的基本方程,分别求解。这些单元的集合则代表了原土壤水(或地下水)的流动区域,从已知边界出发一个时段一个时段地递推计算,可得未知量在空间的分布和随时间的变化过程。由于研究域被分割为有限个点,所以称有限差分或有限元法。这种划分、计算虽然麻烦,但在计算机广泛应用的今天已不成为问题。

二、一维土壤水分运动差分方程式

设 $h(Z, t)$ 是随空间、时间连续变化的函数,离散化时存在三种差分方法,即未知函数的差商如何取值,针对时段初、时段中或时段末的节点处列方程,由于取值方法不同,会使差分方程的格式及求解法有较大差异。

节点角标符号意义为上角标 j 代表时间位置, $j=1, 2, \dots, M$; 下角标 i 代表空间位置,如从表层土壤算起,节点序号 $i=1, 2, \dots, N$ (见图 1-2-1)。

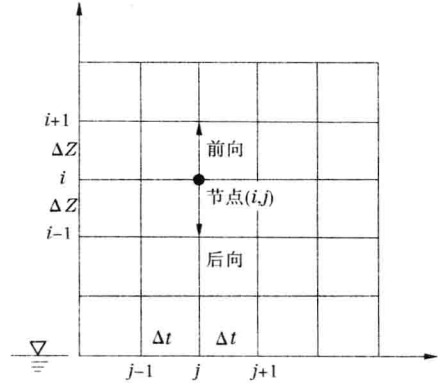


图 1-2-1 有限差分网格(节点)划分示意图

(一) 显式差分格式

对时段初的节点 (i, j) 处,列土壤水运动方程,即对 $C(h) \frac{\partial h}{\partial t}$ 取前向差分 $(j \rightarrow j+1)$ 。对任一内节点 (i, j) 处将原 h 方程式(1-2-1),写成差分方程,为

$$C(h) \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} = K_{i+\frac{1}{2}}^j \frac{h_{i+1}^j - h_i^j}{(\Delta Z)^2} - K_{i-\frac{1}{2}}^j \frac{h_i^j - h_{i-1}^j}{(\Delta Z)^2} - \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^j - K_{i-\frac{1}{2}}^j}{\Delta Z}$$

一阶展开
二阶展开
一阶展开

其中: $K_{i+\frac{1}{2}}^j = \frac{K_{i+1}^j + K_i^j}{2}$, $K_{i-\frac{1}{2}}^j = \frac{K_i^j + K_{i-1}^j}{2}$

由于 K 为非线性函数,取时段初之数值均用显式线性化,取时段初的时间中心差分代替,使之变为常量。

若令 $\gamma = \Delta t / \Delta Z^2$, 经过整理:

$$h_i^{j+1} = \gamma \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^j}{C_i^j} (h_{i+1}^j - h_i^j) - \gamma \frac{K_{i-\frac{1}{2}}^j}{C_i^j} (h_i^j - h_{i-1}^j) - \frac{\Delta t}{\Delta Z} \frac{(K_{i+\frac{1}{2}}^j - K_{i-\frac{1}{2}}^j)}{C_i^j} + h_i^j \quad (1-2-7)$$

($i = 1, 2, \dots, n-1$)

从式(1-2-7)可知:左边为未知值 $(i, j+1)$, 右边全为已知值 (i, j) 或 $(i \pm 1, j)$ 。

故称从已知求未知为显式差分格式,则可用于计算各时段、各节点的 h 值,依次从边界 $i=1$ 节点开始求 $j+1$ 时段末各节点 h 值,逐个递推,无须解代数方程组。相应的 $C(h)$ 、 $D(h)$ 也均取时段初之值 C_i^j, D_i^j 或中心差分 $C_i^{j+\frac{1}{2}}, D_i^{j+\frac{1}{2}}$ 。

由于显式差分格式的稳定性 and 收敛性在很大程度上取决于时间步长和空间步长的大小。Van Keulen 和 Van Bek(1971)认为显式差分法所取的时间步长必须相当小,才能避免不收敛。 ΔZ 稍大则结果不稳定,太小又降低计算效率,故一般采用隐式差分格式。

(二) 隐式差分格式

对任一内节点(i, j)取前向差分,则式(1-2-1)中:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} \approx C_i^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} \quad (1-2-8)$$

$$\frac{\partial K(h)}{\partial Z} \approx \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}}{\Delta Z} \quad (1-2-9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial [K(h) \frac{\partial h}{\partial Z}]}{\partial Z} &\approx \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{\Delta Z} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_i^{j+1} - h_{i-1}^{j+1}}{\Delta Z}}{\Delta Z} \\ &= K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{\Delta Z^2} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_i^{j+1} - h_{i-1}^{j+1}}{\Delta Z^2} \end{aligned} \quad (1-2-10)$$

将式(1-2-8) ~ 式(1-2-10)代入式(1-2-1)得任一时段 $j(\Delta t) \sim (j+1)\Delta t$ 内剖面上围绕任一点 i 的隐式土壤水差分方程式(1-2-11):

$$C_i^{j+\frac{1}{2}} = \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} = K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{\Delta Z^2} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_i^{j+1} - h_{i-1}^{j+1}}{\Delta Z^2} - \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}}{\Delta Z} \quad (1-2-11)$$

式(1-2-11)中系数 C, K 均经过线性化处理,即

$$\begin{aligned} C_i^{j+\frac{1}{2}} &= \frac{[C(h_i^{j+1}) + C(h_i^j)]}{2} \\ K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} &= \frac{[K(h_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}) + K(h_i^{j+\frac{1}{2}})]}{2} \\ K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} &= \frac{[K(h_i^{j+\frac{1}{2}}) + K(h_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}})]}{2} \\ h_i^{j+\frac{1}{2}} &= \frac{h_i^{j+1} + h_i^j}{2} \end{aligned}$$

代入式(1-2-11)整理可得通式:

$$E_i h_{i-1}^{j+1} + F_i h_i^{j+1} + G_i h_{i+1}^{j+1} = H_i \quad (1-2-12)$$

其中:

$$E_i = -K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}, G_i = -K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}, F_i = K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} + K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} + \gamma C_i^{j+\frac{1}{2}}$$

$$H_i = \gamma C_i^{j+\frac{1}{2}} h_i + \Delta Z (K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}), \gamma = \frac{\Delta Z^2}{\Delta t}$$

式(1-2-12)为三对角方程,在考虑边界条件后,可用追赶法求解,也称托马斯算法 Thomas Algorithm,比消去法方便,少占内存。

由于式(1-2-12)左边含有时段末($j+1$)的三个相邻节点 h_i, h_{i-1}, h_{i+1} ,根据时段初(j)的已知水头 h_i^j 求时段末各节点水头 h_i^{j+1} 为隐式,故称隐式差分格式,必须联立求解代数

方程组,而不能同显式格式依次从已知值求未知值。将通式(1-2-12)按节点分别写出:

$$\begin{aligned} \text{对第一个外节点 } i=1 \quad E_1 h_0^{j+1} + F_1 h_1^{j+1} + G_1 h_2^{j+1} &= H_1 \\ i=2 \quad E_2 h_1^{j+1} + F_2 h_2^{j+1} + G_2 h_3^{j+1} &= H_2 \\ i=3 \quad E_3 h_2^{j+1} + F_3 h_3^{j+1} + G_3 h_4^{j+1} &= H_3 \\ &\vdots \end{aligned}$$

最后一个外节点 $i=n$

从已知上边界 h_0^{j+1} 和已知下边界 h_n^{j+1} ,对两边界节点方程移项,得:

$$\begin{aligned} \text{上边界:} \quad F_1 h_1^{j+1} + G_1 h_2^{j+1} &= H_1 - h_0^{j+1} \\ \text{下边界:} \quad E_{n-1} h_{n-2}^{j+1} + F_{n-1} h_{n-1}^{j+1} &= H_{n-1} - G_{n-1} h_n^{j+1} \end{aligned}$$

用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} F_1 & G_1 & & & \\ E_2 & F_2 & G_2 & & 0 \\ & E_3 & F_3 & G_3 & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & & E_{n-2} & F_{n-2} & G_{n-2} \\ & & & E_{n-1} & F_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_{n-2} \\ h_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 - E_1 h_0 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_{n-2} \\ H_{n-1} - G_{n-1} h_n \end{bmatrix} \quad (1-2-13)$$

简写为: $[A][h]^{j+1} = [H]$

式中 $[A]$ —— $(n-1) \times (n-1)$ 的三对角型系数矩阵;

$[H]$ —— $(n-1) \times 1$ 的常数项列阵;

$[h]$ —— $(n-1) \times 1$ 的总水头列阵。

其中, H_1, H_{n-1} 分别为已知的上、下边界常系数项。

求解上述方程,即将土壤水运动方程转化为求解代数方程组。

(三) 中心差分格式(六点差分)

对时段中的节点 $(i, j + \frac{1}{2})$ 处列差分方程,

即对函数的二次导数采用计算时段始、末的平均,为中心差分(Granrk Nicolson)格式(见图 1-2-2)。其差分方程为

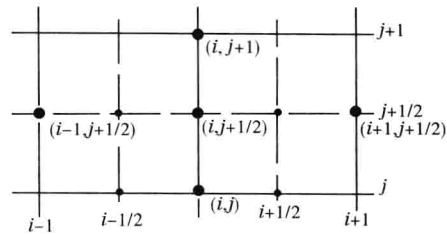


图 1-2-2 中心差分节点图

$$C_i^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t} = K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_{i+1}^{j+1} + h_{i+1}^j - h_i^{j+1} - h_i^j}{2\Delta Z^2} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \frac{h_i^{j+1} + h_i^j - h_{i-1}^{j+1} - h_{i-1}^j}{2\Delta Z^2} - \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^{j-\frac{1}{2}} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j-\frac{1}{2}}}{\Delta Z} \quad (1-2-14)$$

或写成通式,外型与隐式相同,即

$$E_i h_{i-1}^{j+1} + F_i h_i^{j+1} + G_i h_{i+1}^{j+1} = H_i \quad (1-2-15)$$

式中: E_i, G_i, F_i 外型均与隐式(1-2-12)式符号相同,不同之处在于以下两项:

$$H_i = K_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} h_{i-1}^j + (\gamma C_i^{j+\frac{1}{2}} - K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}}) h_i^j + K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} h_{i+1}^j - 2\Delta Z (K_{i+\frac{1}{2}}^{j-\frac{1}{2}} + K_{i-\frac{1}{2}}^{j-\frac{1}{2}})$$