



淮北平原区水文实验研究

王振龙 章启兵 李 瑞 ● 著

中国科学技术大学出版社



淮北平原区水文实验研究

王振龙 章启兵 李 瑞 ● 著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书全面系统地揭示了淮北平原变化环境(气候变化、土地利用、水利工程、经济社会发展)下降雨、蒸散发、土壤水、地下水、径流等水文气象要素的时空变化规律,研究变化环境下水循环要素的变化规律和动力耦合关系,并提出相应的计算方法、公式和水文地质参数。在此基础上,先后研究完成了多项应用成果,并将实验研究成果应用于水文模拟预报、水资源评价及相关领域,拓展了水文实验成果在水资源及相关领域的应用与推广空间。

本书是针对淮北平原区全面系统的水文水资源科学基础和应用研究的专著,适合全国广大水文水资源科技工作者参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

淮北平原区水文实验研究/王振龙,章启兵,李瑞著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-312-02942-4

I. 淮… II. ①王… ②章… ③李… III. 黄淮平原—水文实验—研究 IV. P334

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 246492 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址: <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥现代印务有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm × 1000 mm 1/16
印张 17
字数 372 千
版次 2011 年 12 月第 1 版
印次 2011 年 12 月第 1 次印刷
定价 32.00 元

序

水文学是地球科学的组成部分,是主要研究地球上各种水的产生、循环和分布及演变规律,水的化学与物理性质以及水对环境的作用,水与生命体的关系等的一门科学。应用水文学主要为国土整治与开发、水利水电工程建设、水资源的开发利用与节约保护、水旱灾害防治与研究、水环境与水生态保护与恢复以及其他国民经济建设提供科学决策与设计依据。水文实验研究工作是水文科学技术发展的基础,需要科技工作者长期不懈地坚持科学理论和方法,具有不怕艰苦,坚持真理,勇于探索的精神。历史经验也表明,水文科学的理论发展与技术进步是依靠水文实验研究不断深化和创新取得的。

五道沟水文水资源实验站为平原区综合性实验站,50多年不间断的水文实验资料在国内不多见。其前身是1953年设立的青沟径流实验站的分站,原隶属水利部治淮委员会,后归属安徽省水文总站,1963年改设五道沟径流实验站,主要开展小流域径流实验,1969年至今隶属安徽省·水利部淮委水利科学研究院。

五道沟水文水资源实验站经过50多年的发展,目前拥有了较先进的实验设备,具备了较强的科研实力。到目前为止,实验站系统刊布了50多年安徽省淮北坡水区观测实验资料年鉴,开发完成了实验资料数据库。近20年来,先后有20余项成果获奖,发表300余篇学术论文及出版多部专著。这些成果在淮北及在类似地区的农业、水利、能源、交通、教学、科研等国民经济部门得到了广泛应用,社会效益显著,为我国水利事业及工农业生产发展做出了积极的贡献。

本书内容凝聚着安徽省·水利部淮委水利科学研究院水文水资源研究所三代水文水资源科技工作人员50多年不懈努力的成果。作者以淮北平原五道沟水文水资源实验站自1953年建站以来不间断长系列实验资料为基

础,结合淮北平原杨楼实验流域、汉王实验站及其他 86 个水文站资料,全面研究变化环境(气候变化、土地利用、水利工程、经济社会发展)下降雨、蒸散发、土壤水、地下水、径流等水文气象要素的时空变化规律,研究变化环境下水循环要素的变化规律和动力耦合关系,系统揭示了水面蒸发、潜水蒸发、作物蒸散发、降雨入渗、地表径流、土壤水运动以及地下水补给等水循环要素转化过程机理并提出相应的计算方法、公式和水文地质参数。在此基础上,先后研究完成了“农田排灌与水资源综合利用技术”、“土壤墒情监测预报与适时适量灌水技术”、“农灌区‘四水’转化应用模型”、“地下水演变情势与安全开采潜力”等应用成果,将实验研究成果应用于水文模拟预报、水资源评价及相关领域,拓展了水文实验成果在水资源及相关领域的应用与推广空间。

本书是针对淮北平原区系统全面的水文水资源科学基础和应用研究的专著,适合全国广大水文水资源科技工作者在实际工作中参考和借鉴。

金光炎

2011 年 9 月

前 言

水文实验研究主要是探求和研究在自然和人类活动影响条件下,水文循环过程中的各种水文要素变化和转化规律以及水对环境的作用和水与生命体的关系,并对有关新理论、新方法、新仪器和新设备进行检验。水文实验是水科学研究的重要组成部分,也是水文事业发展和水文现代化建设的重要基础性工作。我国水文实验研究最早开始于1924年,新中国成立后,水文实验研究得到了较快发展,至1958年全国水文系统共有各类水文实验站255个。经过多年实验研究积累,在水文预报模型、水文分析计算、泥沙观测与研究、水资源评价、水文仪器设备研发等方面取得了一大批有应用价值的成果,为经济社会发展和水文科学进步提供了科学基础。

为贯彻落实中央新时期治水方针,适应经济社会发展和水资源格局的变化,有效解决淮北平原水资源短缺、水环境污染、旱涝灾害及保障饮水、粮食和生态安全等方面的问题,实施对水资源的全面节约、有效保护、合理配置、高效利用和科学管理,以水资源的可持续利用支持社会经济的可持续发展。作者以淮北平原五道沟水文水资源实验站自1953年建站以来不间断长系列实验资料为基础,结合淮北平原杨楼实验流域、汉王实验站及其他86个水文站资料,研究变化环境(气候变化、土地利用、水利工程、经济社会发展)下降雨、蒸散发、土壤水、地下水、径流等水文气象要素的时空变化规律,研究变化环境下水循环要素的变化规律和动力耦合关系,揭示水面蒸发、潜水蒸发、作物蒸散发、降雨入渗、地表径流、土壤水运动以及地下水补给等水循环要素的转化过程机理,并提出相应的计算方法、公式和水文地质参数。在此基础上,先后研究完成了“农田排灌与水资源综合利用技术”、“土壤墒情监测预报与适时适量灌水技术”、“农灌区‘四水’转化应用模型”、“地下水演变情势与开采潜力研究”、“淮北平原地下水安全开采量与可持续利用方案”、“淮北平原变化条件下水文循环实验研究”、“安徽省淮河流域水资源演变与供水安全研究”等应用成果,将实验研究成果应用于水文模拟预报、水资源评价及相关领域,拓展了水文实验成果在水资源及相关领域的应用与推广空间。在理论层面揭示水循环要素时空变化和响应机理,创新水循环基础理论;在方法层面提出水循环要素转化计算方法,创新流域水文模拟技术与水资源影响评价方

法;在应用基础层面,把实验研究成果应用于淮北平原水循环模拟和水资源评价等方面,满足区域水资源安全保障和可持续发展重大需求。

本书由王振龙、章启兵、李瑞等编写,王振龙负责统稿。需要说明的是,书中研究内容和成果主要源于上述多项科学实验和科研成果,所以涉及的野外实验和研究人员主要还有:赵家良、梅连银、顾慰祖、蒋杏春、金光炎、郑三元、王发信、高建峰、宋家常、马倩、王加虎、陈益群、何正阳、张朝新、尚新红、刘猛、钱筱萱等,因而,本书同样也凝聚着这些同志的辛勤劳动,此外,还有很多参加实验和提供研究数据的同志这里未能一一列出,在此一并表示感谢。

本书编写过程中,曾得到安徽省水利厅、河海大学、江苏省水文水资源勘测局、安徽省水文局等单位领导及同仁们的大力支持,这里也表示衷心的感谢。

限于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

本书由水利部公益性科研项目“淮河流域旱灾综合治理关键技术”(200901026)和水利部科技推广项目“土壤墒情监测预报技术推广”(TG1133)联合资助。

编 者

2011年9月

目 录

序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 水文实验概述	(1)
1.1 我国水文实验的历史回顾	(1)
1.2 淮北平原水文实验概况	(2)
1.3 国外水文实验研究现状与进展	(4)
1.4 我国水文实验规划	(6)
1.4.1 现有实验站概况	(6)
1.4.2 存在的主要问题	(12)
1.4.3 规划目标	(12)
第 2 章 研究区概况与重点水文实验站简介	(14)
2.1 淮北平原概况	(14)
2.1.1 自然地理	(14)
2.1.2 气候特点	(16)
2.1.3 土壤与植被	(16)
2.1.4 河流水系	(18)
2.2 五道沟水文水资源实验站	(18)
2.2.1 实验区简介	(18)
2.2.2 实验区观测项目	(19)
2.2.3 常规观测实验项目	(20)
2.3 杨楼水文实验流域	(20)
2.3.1 实验流域概况	(20)
2.3.2 实验流域观测项目	(21)
2.3.3 实验流域农业种植情况	(21)
第 3 章 区域降雨量分析	(23)
3.1 五道沟站降雨规律分析	(23)
3.1.1 年际分析	(24)
3.1.2 趋势性和突变分析	(26)
3.1.3 多时间尺度周期检测	(30)
3.2 杨楼实验流域	(35)

3.2.1 年内分配与年际变化	(35)
3.2.2 趋势性及突变分析	(37)
3.2.3 多尺度周期性检验	(39)
3.3 淮北平原雨量时空分布	(42)
3.3.1 资料选取	(42)
3.3.2 面雨量计算	(43)
3.3.3 年际变化	(46)
3.3.4 降雨重心的迁移规律	(48)
第 4 章 水面蒸发和潜水蒸发	(50)
4.1 水面蒸发	(50)
4.1.1 基本资料	(50)
4.1.2 五道沟实验站	(51)
4.1.3 杨楼实验流域	(54)
4.1.4 淮北平原	(56)
4.1.5 影响水面蒸发的原因及其与气候变化的关系	(64)
4.2 潜水蒸发	(67)
4.2.1 有/无作物生长情况下潜水蒸发对比	(67)
4.2.2 无作物潜水蒸发实验分析	(71)
4.2.3 有作物潜水蒸发实验分析	(75)
4.2.4 无作物潜水蒸发公式的选择	(81)
4.2.5 有作物潜水蒸发量的计算	(86)
4.3 区域蒸发规律总结	(93)
第 5 章 径流变化规律分析	(94)
5.1 径流资料的选择	(94)
5.1.1 径流资料的插补延长	(94)
5.1.2 径流资料的还原	(95)
5.2 典型流域径流分析	(97)
5.3 淮北平原径流规律分析	(99)
5.3.1 淮北地区径流的年际变化	(99)
5.3.2 淮北地区径流的年内分配	(104)
5.4 区域径流分析总结	(104)
第 6 章 降雨入渗补给地下水过程研究	(106)
6.1 土壤水实验研究	(107)
6.1.1 五道沟实验站	(109)
6.1.2 杨楼实验流域	(112)
6.1.3 包气带土壤水分的分布特征及变化规律	(116)
6.1.4 土壤蒸发	(117)

6.2 降雨入渗实验	(119)
6.2.1 试验设备与数据来源	(119)
6.2.2 蒸渗仪实验资料分析	(119)
6.2.3 野外同心环灌水实验	(121)
6.2.4 蒸渗仪灌水实验	(122)
6.3 降雨入渗土壤分析	(123)
6.3.1 国内外研究进展	(123)
6.3.2 常用下渗公式参数回归分析	(124)
6.3.3 稳定下渗率分析	(125)
6.4 降雨补给地下水分析	(127)
6.4.1 影响降雨入渗补给系数的因素	(127)
6.4.2 次降雨入渗补给系数	(128)
6.4.3 时段降雨入渗补给系数	(131)
6.4.4 年降雨入渗补给系数	(133)
6.5 降雨入渗补给规律分析	(136)
6.5.1 变化条件下降雨入渗补给规律	(136)
6.5.2 年降雨入渗补给系数变化规律	(139)
6.5.3 实验区降雨入渗补给变化规律	(141)
6.6 实验总结	(147)
6.6.1 土壤水实验	(147)
6.6.2 降雨入渗补给实验	(147)
第7章 淮北平原“四水”转化水文模型	(149)
7.1 模型结构与原理概述	(149)
7.2 均质土壤垂向水分运动的数学描述与检验	(150)
7.2.1 关于大孔流	(151)
7.2.2 Richards 方程及求解	(152)
7.2.3 边界条件处理	(154)
7.2.4 数学描述的检验	(156)
7.3 模型构建与参数确定	(157)
7.3.1 模型下渗-蒸发的调试与检验	(157)
7.3.2 冠层截留与填洼计算	(162)
7.3.3 潜水排出量的计算	(166)
7.4 模型运行程序流程图	(169)
7.5 “四水”转化模型的检验与应用	(170)
7.5.1 模型参数的率定	(170)
7.5.2 天然条件下的“四水”转化模拟	(172)

第 8 章 淮北平原水文实验应用研究	(177)
8.1 农田排灌与水资源综合利用	(177)
8.1.1 农田灌排技术及国内外研究现状	(177)
8.1.2 灌排实验区概况	(178)
8.1.3 农田排水工程的水文效应	(180)
8.1.4 灌溉技术和排水指标实验研究	(184)
8.1.5 农田除涝防渍排水工程技术	(186)
8.1.6 灌区水资源优化配置模型	(188)
8.2 土壤墒情预报与适时适量灌水技术	(201)
8.2.1 墒情监测技术	(201)
8.2.2 墒情预报方法研究	(202)
8.3 浅层地下水演变情势与安全开采潜力	(213)
8.3.1 区域水文地质条件	(214)
8.3.2 水文地质参数实验研究	(216)
8.3.3 浅层地下水安全开采量及评价指标体系	(220)
8.3.4 地下水资源开发利用调查评价	(226)
8.3.5 地下水资源及开采利用演变情势	(230)
8.3.6 地下水开采潜力与剩余量	(237)
8.4 淮北平原水资源安全与管理体制	(242)
8.4.1 水安全现状与问题	(243)
8.4.2 地下水资源保护	(246)
8.4.3 水资源管理	(248)
参考文献	(255)

第 1 章 水文实验概述

水文科学研究始于 1674 年 Seine 河的降雨径流研究,直到 18 世纪流速仪、自记雨量计和皮托管等水文测验仪器的精度提高,伯努利方程、谢才公式等水力学原理的相继提出,才为水文实验研究创造了条件。19 世纪初,水文实验开始兴起,许多学者进行了各种单项水文要素的实验研究,取得了很多著名的研究成果。1802 年,J·道耳顿通过蒸发实验,首次认识到蒸发量与水汽压力之间的关系,建立了道耳顿公式;1855 年,J·B·弗朗西斯通过地表水流实验,得出了堰流公式;1856 年,H·P·G·达西通过地下水渗透实验,建立了达西定律。

世界上基于流域概念进行水文研究始于 19 世纪 90 年代,瑞士的研究人员在埃默河谷的两个面积相近(约 60 公顷)、森林覆盖面积不同的小流域上,进行了森林水文效应的对比研究。到了 20 世纪初,日本、美国的研究人员才相继开展这种初级的流域水文研究。20 世纪 30 年代,R·E·霍顿经过 20 多年对下渗等许多水文因素所作的实验,对水文科学做出了划时代的贡献,得出了著名的霍顿下渗公式。此后,人们已不满足仅对于个别水文要素的单项实验研究,开始了有系统的流域水文实验研究,这在世界水文实验研究中,无疑是一大飞跃。1933 年,前苏联建立瓦尔达依水文科学研究实验站,美国设立科威塔水文实验站。20 世纪 40 年代,室内水文实验研究开始发展。1943 年,美国 C·F·伊泽德等进行了室内模拟降雨条件下的坡面汇流实验;1952 年,J·P·马米绍作了简单的农业流域水文模型;接着匈牙利、前苏联也相继进行了各类室内水文模型实验。从 20 世纪 50 年代起,中国也开始了大规模的水文实验研究。

1.1 我国水文实验的历史回顾

我国水文实验研究最早开始于 1924 年,南京金陵大学美籍教授罗德民会同其助教,在山西沁源县宁武东寨和山东青岛林场设置径流泥沙实验小区,观测不同森林植被和无植被山坡水土流失量的变化。新中国成立后,特别是 1953 年以后,我国水文实验研究得到了较快发展。总体上,我国水文实验站经历了快速发展期、调整期、停顿期等几个阶段。

尽管我国水文实验站的发展经历了一些波折,但仍然为水文科学发展和国民经济建设做出了突出贡献,主要有以下几个方面:

(1) 为水文基础理论研究和防汛减灾做出了重要贡献。1960 年,赵人俊教授以姜

湾等小流域径流资料为依据,把降雨径流关系和流域蓄水曲线联系起来,提出了“蓄满产流”的概念,并进一步研发了新安江水文预报模型,其成果在国内外被广泛应用,为提高湿润与半湿润地区水文预报精度做出了杰出贡献,从整体上提高了我国水文预报技术水平。新安江模型不仅为我国防汛减灾做出了重要贡献,而且多年来一直是各国概念型水文模型发展的基础,是获得世界公认的水文模型之一。

(2) 为制定水文技术标准提供了科学依据。大部分野外观测的水文技术规范制定需要依据水文实验数据或通过大量对比实验数据进行统计分析。例如,在辽宁营盘蒸发实验站开展的畅流期、结冰期蒸发实验,在江西乐安河流域开展的中国梅雨区雨量站网布设密度实验研究,在黄委龙门站开展的流量测验误差控制等,为制定《水文站网规划技术导则》、《湿润区受调节中小河流水文站网调整部署和观测方法》、《流量测验规范》、《降水量观测规范》、《水面蒸发观测规范》、《水工建筑物测流规范》、《畅流期水面蒸发资料分析》、《结冰期冰面蒸发资料分析》等技术标准提供了科学依据。

(3) 为水资源评价分析计算和水资源规划提供了可靠支撑。20世纪70年代末和80年代初,我国开始了第一次全国性的水资源评价和水资源供需分析工作。为研究和确定有关参数及其变化规律,开展了大量的“三水”转化规律研究,如安徽五道沟、江苏汉王、河北冉庄等实验站,为平原地区地下水水资源评价参数的确定提供了可靠实验数据;同时还开展有关蒸发、农业灌溉用水等实验研究,如黑龙江省带岭实验站的“森林对径流的影响”,安徽省三连圩径流实验站的“沿江圩区小麦不同埋深产量研究”,安徽省淠史杭蒸发实验站的“丘陵地区水稻节水灌溉研究”,为水资源供需分析和规划提供了重要的科学数据。

(4) 为江河治理和水电工程科学调度提供了可靠实验数据。长江委水文局长期开展长江中下游地区河道演变实验研究,为河道治理和保障航运提供了可靠实验数据;黄委水文局长期开展三门峡水库库区水沙关系实验研究,为三门峡科学调度提供了可靠的数据支撑。同时,对小浪底水库开展异重流实验研究,为小浪底水库运行和黄河调水调沙实验提供了实验数据。长江委和黄委依据上述实验资料,分别提出了适用于长江和黄河下游河道的输沙能力公式。

(5) 为无资料地区水文分析计算提供了大量实用的经验公式。水文实验站的重要功能就是通过在一个站进行有关水文要素规律变化的研究,可将其成果推广到水文气象条件相似的地区应用。如叶柏寿径流实验站在建站的30多年的实验研究中,做了大量的基础数据分析工作,组织编写的《无资料地区水文计算》一书在社会上具有较高的生产指导价值。巴彦高勒蒸发实验站、宾县蒸发实验站在积累了大量资料以后,建立了我国最北方地区的蒸发经验公式;凯江径流实验站通过实验资料推导出了土壤蒸发计算的凯江公式;鄱阳湖水文气象实验站建立了风浪爬高经验公式等。

1.2 淮北平原水文实验概况

安徽淮北平原地区面积 37 437 km², 历来是中国重要的棉粮产地之一。多年平均

水资源总量仅为 114.4 亿 m^3 , 人均占有量也仅 424.2 m^3 。淮北平原是一个水资源比较贫乏且开发利用程度较高的地区, 地下水和地表水都不充足, 干旱农业的缺水问题尤为严重。目前农业用水仍然存在着极其矛盾的两方面, 一方面是水资源紧缺, 另一方面是水资源的极大浪费。特别是近些年来, 由于人类活动的影响和环境的变化, 流域水循环系统和水资源演变规律日趋复杂, 水资源补径排条件发生了深刻的变化。不论是“开源”还是“节流”, 都需要了解土壤特性以及降雨—地表水—土壤水—地下水转化规律, 从而发挥其最大的生产力。今后的水资源评价与管理, 不仅需要评价地表水和地下水等重力水, 还需要评价植被和作物对土壤水和地下水的有效利用, 需要考虑雨水利用、节水定额和节水潜力。因此迫切需要开展平原区“四水”(大气水、地表水、土壤水、潜水)转化实验研究, 摸清“四水”转化规律, 实现水资源的合理开发和高效利用, 为农业生产科学地制定灌溉计划和较准确地调控田间土壤水分, 达到既节水又增产的目的。为该区乃至黄海淮平原水资源评价规划管理、农田灌溉排水规划、作物水高效利用与增产提供技术支撑。因此, 开展平原区“四水”转化规律的研究, 对于农业节水、地下水评价、土壤水利用、保障农业供水安全和粮食安全等具有十分重要的意义。

黄潮土主要分布在安徽、河南、山东和江苏等地, 总面积大约为 125 107 km^2 , 其中安徽省的黄潮土主要分布在淮北平原的北部, 面积约为 12 607 km^2 , 河南省黄潮土面积为 52 100 km^2 , 山东省黄潮土面积为 31 900 km^2 , 江苏省黄潮土面积为 28 500 km^2 。安徽淮北平原土壤以砂礓黑土(54%)和黄潮土(33%)为主, 潜水位埋深一般为 1~5 m。过去对砂礓黑土区做过很多水文实验研究, 完成了砂礓黑土区“五道沟水文模型”、“农田排灌与水资源利用综合技术”等研究成果, 而对黄潮土区的研究甚少。于是针对黄潮土“四水”转化水文规律, 申请了 2006 年水利部“948”计划技术创新与转化项目。既填补了黄潮土区空白的基础性实验研究项目, 又指导了农业生产实际、保障粮食增产计划和水资源开发配置的实用性和应用性。采用黄潮土和砂礓黑土两种土壤对比实验分析的方式, 以五道沟实验站 62 套黄潮土、砂礓黑土中蒸渗仪测筒和位于黄潮土区的杨楼水文站实测资料为主, 配合大量的野外实验和专项研究, 紧紧围绕大气水入渗、大气水补给潜水、有/无作物潜水蒸发、“四水”转化模型及参数确定展开研究。

五道沟水文与水资源实验站经过多年来的观测和实验研究, 在水文水资源领域取得了大量研究成果, 主要包括以下几个方面:

(1) 通过实验分析, 给出了黄潮土容重、比重、级配、水分常数、三态组成、土水势—含水率关系、潜水蒸发系数和临界埋深等相关参数; 统计分析了黄潮土区降雨、蒸发、径流和地下水位动态变化规律, 比较了黄潮土和砂礓黑土之间的差别, 这些数据可以在今后的研究和相关工作中直接引用。

(2) 总结了影响潜水补给的因素, 通过蒸渗仪数据分析得出: 淮北平原区降雨补给潜水根据降雨量、前期土壤含水量和潜水位情况, 可以分为三个阶段进行计算, 并给出了相关的计算公式; 通过野外同心环和部分蒸渗仪人工灌水实验, 得出了两种土壤薄层积水情况下的透水特性; 利用实验资料通过多元非线性回归方法得到了淮北平原区四种常用下渗公式及参数; 利用实测资料, 根据前期土壤条件和潜水埋深 Z 得出了不同频率下次降雨、时段降雨 P 对潜水的补给系数 α_g 和 α_g - P - Z 关系图, 明确了淮北平原区降

雨转化为土壤水和潜水的定量关系。

(3) 在实测资料的基础上,从零埋深、埋深增加、临界埋深和潜水蒸发系数四个方面,比较了有作物潜水蒸发与裸地潜水蒸发的差异;分析了潜水蒸发与土质、水面蒸发等气象要素的关系;得到了有/无作物情况下月平均潜水蒸发系数以及公式相关参数;统计了冬小麦、大豆作物在不同土壤类型、不同潜水埋深时的潜水蒸发规律和多耗水量规律。定量分析了八个气象要素和潜水蒸发、潜水埋深、土壤类型的关系。

(4) 总结了无作物潜水蒸发的主要计算方法,通过逐日和逐旬的参数拟合,得到了黄潮土和砂礓黑土幂函数等六个常用公式的相关参数,针对逐日、逐旬以上两种时段长度和土壤情况,给出了相应的最优公式;从逐日和逐月两个方面,采用线性回归分析的方法得到了常用公式在有作物潜水蒸发计算的表现,计算了不同公式的确定性系数。沿着裸土潜水蒸发加作物多耗水量计算作物潜水蒸发的思路,尝试了三套方法计算有作物潜水蒸发:逐日作物多耗水量多项式拟合、作物各生育期和埋深的多耗水量统计、作物各生育期埋深和天气状况下的多耗水量统计。三套方法由简到繁:第一种算法拟合效果最好但实用性较差,第三种算法拟合和验证效果都很好但参数较繁多,比较后推荐第二种算法,即作物各生育期和埋深的多耗水量计算有作物潜水蒸发量。

(5) 建立了一个考虑冠层截留、蒸发、填洼、土壤水再分布的集总式“四水”转化模型,用最简单的两域法考虑大孔流,隐式差分求解 Richards 方程,并以此为核心按照逐步细化的原则构建模型;通过模型下渗-蒸发实验模拟,确定了大孔隙系数和采用经验公式校核模型潜水蒸发计算误差的方法;通过下渗-径流的实验模拟,确定了冠层最大截流量和填洼量参数;通过长系列年均地下水位的模拟,确定了地下水排出的相关参数。模型用黄土下渗、砂性土排水的实验数据验证了土壤水求解过程。

(6) 用杨楼小流域的实测资料,检验了模型结构和率定出的参数;在模型中设置不同的边界条件或运行控制条件,实现地膜覆盖、浇灌或控制水量下的漫灌和覆盖秸秆等灌水方式的近似模拟。模拟结果的比较可以定量把握灌溉方式之间的差异:在蒸发能力 -0.2 mm/h 、潜水埋深 1 m 的条件下,相对于漫灌来说,秸秆覆盖能够节水 17% 左右;地膜覆盖对于黄潮土能够节水 30% 以上、砂礓黑土节水能力更大,达到 52% 。

(7) 用杨楼水文封闭流域的实测资料,通过独立场次的多场降水,模拟了黄潮土和砂礓黑土在不同强度的天然降水条件下的潜水补给量,得出了相应条件下的入渗补给系数;通过杨楼封闭流域 1991~2007 年“四水”转化连续模拟结果的逐年计算统计,得出了多年平均“四水”转化关系: 14.3% 的降水转化为径流、 27.1% 的降水转化为潜水、 18.1% 的潜水补给量排出到河网转化为地表水、 34.2% 的地表径流来自潜水排出、陆面蒸发(含冠层截留蒸发)占水面蒸发的 79.7% 、潜水蒸发量占陆面蒸发总量的 21.5% 。

1.3 国外水文实验研究现状与进展

由于水资源在人类生存和经济社会发展中的重要性和不可替代性,自 20 世纪 80

年代以来,“气候变化与水”成为全球科学研究最为关注的热点和前沿问题之一,国际组织实施了一系列相关科学计划,主要包括:全球能量和水循环实验(GEWEX)、国际地圈生物圈计划(IGPB)、全球水系统研究计划(GWSP)、国际水文计划(IHP)等。

GEWEX 是世界气候研究计划(WCRP)的一部分。自 1988 年启动以来,通过 20 年的行动计划,开展了大气、陆面及海洋上层的水文循环及能量通量观测与模拟研究,其最终结果用于指导全球和区域的气候变化预测,其中亚洲季风区实验(GAME GEWEX Asian Monsoon Experiment)涉及我国淮河流域实验(HUBEX)等,通过气象和水文等多学科交叉,进行综合观测实验,研究该流域能量和水分循环规律,以揭示区域旱涝形成的机制,提高降水的预测水平。尽管水循环实验站点还非常有限,但所得到的陆气水循环相互作用的结果,为建立气候-水文过程模型提供了基础。

国际地圈生物圈计划(IGPB)是从全球、区域和流域不同尺度和交叉学科途径,探讨全球变化和人类活动影响下的水循环及其伴随的各种资源与环境问题。水文循环的生物圈(Biosphere Aspects of Hydrological Cycle,简称 BAHC)是IGBP的核心之一。它注重陆面生态-水文过程的变化规律和受人类活动影响的关键问题。2002 年以后,IGBP 针对全球水资源问题及生态系统变化问题开始了第二阶段的研究,将 BAHC 改为“全球水系统研究计划(GWSP)”,核心内容是“水在自然和社会循环的监测、反馈、适应性机理与尺度问题”。2003 年 10 月,在美国召开了 GWSP 科学大会,探讨在全球气候变化下水文系统变化与调控等问题。2005 年 2 月,在德国波恩召开了 GWSP 的“水资源与全球变化的综合评价”大会,重点研究水科学和管理政策相互作用关系、流域水资源综合管理的尺度与集成问题,强调了人类活动对水循环影响研究的重要性和新的挑战。

国际水文计划(IHP)是由联合国教科文组织(UNESCO)主持,由世界各个国家政府组织参加的大型国际水科学研究计划。自从 1965~1974 年 UNESCO 实施第一个国际水文十年(IHP)计划以来,IHP 已执行了五个阶段计划。IHP 第五阶段(1996~2001 年)的研究方向是“脆弱环境中的水文水资源开发”,主要内容:资源过程与管理研究,区域水文水资源研究和知识、信息与技术的转化。IHP 第六阶段(2003~2007 年)研究方向是“水的相互作用——来自风险和社会挑战的体系”。重点研究地表水与地下水、大气与陆地、淡水与咸水、全球变化与流域系统、质与量、水体和生态系统、科学与政治、水与文化等八个方面新的挑战问题。2004 年,IHP 提出了未来第七阶段(2008~2013 年)以后的研究方向:主题 1 是“全球变化、流域与浅层地下水”;主题 2 是“水管理和社会经济”;主题 3 是“生态水文学与环境可持续性”;主题 4 是“水质、人类健康和食物安全”。

当前,国际水科学发展计划主要集中在“水循环基础研究”和与社会经济发展相联系的“水资源研究”两个方面,取得了一些新进展。新的挑战 and 前沿问题是探索以水循环为纽带的“人-地-水”相互作用的关系,变化环境下的水安全与适应对策。其中,水资源脆弱地区,特别是经济社会高速发展的缺水地区,“水循环变化与调控”已成为 21 世纪水文水资源研究的热点和难点问题。

纵观国外科学实验研究的发展历程,归结起来,国外水文实验研究主要有以下几个特点:

(1) 随着经济社会的发展,国外水文实验研究已经广泛涉及环境、生态、水危机和气候变化等全球性问题。在实验研究中,重视新技术和多种技术的耦合应用,注意长期资料系列的积累和设备更新。

(2) 国外实验站主要是由大学、科研单位和企业根据需要设立,其经费主要来源于政府与企业支持。

(3) 国际组织开展的水文循环研究,依托各成员国的基础信息,以全球性共同关注问题为焦点,动态拟定计划内容、分步实施。重视多学科联动、科学与管理相结合。

1.4 我国水文实验规划

1.4.1 现有实验站概况

根据水利部《全国水文实验站规划》内容,我国水文部门现有的 45 个实验站中,绝大多数实验站设备陈旧老化,处于停止实验状态。目前,只有安徽省淮委五道沟、山西太谷水文实验站等个别实验站仍在勉强坚持开展实验研究。这些仅存的水文实验站基本情况见表 1.1。

表 1.1 全国现有水文实验站基本情况表

序号	站名	管理单位	类型	设站年份	基本情况
1	宜昌	长江委	蒸发	1983	主要实验任务是收集水面蒸发数据,开展水面蒸发研究,目前仍在继续开展实验研究。葛洲坝水利枢纽、清江隔河岩水利枢纽、三峡水利枢纽等大型水利工程都在该地区,因此开展宜昌地区水面蒸发量的分析研究对于该地区水资源的合理开发利用具有重要的现实意义
2	荆江	长江委	专题	1957	主要研究宜昌至城陵矶河段河床演变、弯道变化、浅滩、崩岸、汉道、分流分沙及泥沙起动规律、悬移质挟沙能力等
3	南京	长江委	专题	1959	主要研究重点河段河床演变、弯道变化、浅滩、崩岸、汉道、分流分沙、泥沙起动规律、悬移质挟沙能力等方面的观测研究。拟逐步增加测验方法、仪器比测及水环境与水生生态监测等内容
4	长江河口	长江委		1981	为搞好长江口开发整治综合规划,掌握第一手资料,研究长江口潮汐、潮流、泥沙、盐度时空变化规律。进行长江口的气象、水文、泥沙、盐度等系统测验和河道测量,为河床演变积累资料