

BEIFANGSHANQIUQU JIYUJIEGUAN ZONGHEJISHU YANJIU YU YINGYONG

北方山丘区

集雨节灌综合技术研究与应用

徐建新 陈南祥 编著



黄河水利出版社

国家“863”高科技计划项目及
华北水利水电学院重点学科建设基金资助

北方山丘区集雨节灌 综合技术研究与应用

徐建新 陈南祥 编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书系统地论述和介绍了集雨节灌综合技术及其应用。主要内容包括灌区(区域)水资源评价及优化分配、雨水集蓄利用工程技术、集雨节灌工程规划设计、基于 GIS 的灌区水资源评价与实时灌溉决策支持系统、集雨补灌工程综合效益评价指标体系及模型等。全书以理论方法与工程实例相结合,配以先进的 GIS 技术,内容翔实,层次分明,具有较强的实用性和可操作性。本书主要供从事集雨节灌工程规划、设计、施工和管理工作的有关人员及基层水利技术人员使用,亦可供有关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

北方山丘区集雨节灌综合技术研究与应用/徐建新, 陈南祥编著. —郑州: 黄河水利出版社, 2006. 7

ISBN 7-80734-060-6

I. 北… II. ①徐…②陈… III. ①山区-农田灌溉-降水-蓄水-研究-中国 ②山区-农田灌溉-节约用水-研究-中国 IV. S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 022462 号

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940

传真: 0371-66022620

E-mail: hhslebs@126.com

承印单位: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 787mm×1 092mm 1/16

印张: 10.75

字数: 248 千字

印数: 1—1 000

版次: 2006 年 7 月第 1 版

印次: 2006 年 7 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-80734-060-6/S·80

定价: 25.00 元

前 言

水是生命之源,是人类赖以生存和发展的命脉。随着世界范围内的干旱加剧及水资源的日益短缺,解决好水资源问题已成为 21 世纪人类社会面临的战略重点。我国是一个水资源十分短缺的国家,被联合国列为世界 13 个贫水国家之一,按 1997 年人口统计,我国人均水资源量为 $2\,200\text{m}^3$,不足世界平均水平的 $1/4$ 。水资源紧缺,已成为我国经济社会可持续发展的重要制约因素。

解决水资源短缺,一是节水,二是开源。我国农业缺水问题要靠节水和集雨来解决。尤其在干旱、半干旱以及半湿润地区,发展现代农业节水和集雨利用等高新技术是保障我国食物安全、生态安全及国家安全的重大战略。近 20 年来,在科技部及有关部门的领导和组织下,通过节水农业技术的攻关研究与推广应用,有力地推进了我国节水农业的健康发展和科技进步。但与世界发达国家相比,在节水农业方面我国还存在相当大的差距,任务还十分艰巨。雨水集蓄节灌技术在农业上的运用是节水农业的发展趋势,而且发展集雨补灌节水农业具有实现降水资源的合理调配与高效利用、提高单位耕地产出效益和产品品质、促进农村经济发展和农业结构调整、改善农业生态环境等多种功能。为此,国家“863”高科技计划安排了“北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业综合技术体系集成与示范(河南豫北示范区)”项目,着重研究通过集雨、多水源优化配置与节灌综合技术与示范,建立健全适合我国北方旱地的集雨补灌旱作区节水农业综合技术体系,提高水资源利用效率,实现降水利用与生态环境改善的有机整合。本书为该项目研究中水利部分研究的总结,其成果已通过河南省科学技术厅组织的鉴定。

本书绪论、第 2 章、第 3 章由徐建新、张运凤撰写,第 1 章、第 4 章由陈南祥、徐建新撰写,第 5 章、第 6 章由徐建新、陈南祥、张运凤撰写。全书由徐建新统稿。由于编者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

参加本专题研究的主要人员还有曹玉升、陈卫宾、徐贵新等。本研究得到科技部及河南省科技厅的大力支持和帮助,也得到河南省辉县市政府的大力支持;本书的出版还得到了华北水利水电学院重点学科建设基金的资助。在此一并表示感谢。

编著者

2006 年 3 月 20 日

目 录

前言

绪论	(1)
0.1 研究意义	(1)
0.2 示范区基本情况	(2)
0.3 主要研究内容	(4)
第1章 灌区水资源评价及优化分配	(5)
1.1 灌区水资源评价的基本理论与方法	(5)
1.2 灌区水资源要素预测模型研究	(10)
1.3 灌区水资源优化分配	(17)
第2章 雨水集蓄利用工程技术研究	(30)
2.1 雨水汇集方式与集流场规划	(30)
2.2 雨水存储技术	(35)
第3章 核心示范区集雨节灌工程规划设计研究	(43)
3.1 本章主要研究内容及技术路线	(43)
3.2 典型水土保持措施与坡改梯工程规划设计	(43)
3.3 示范区水量平衡分析	(45)
3.4 雨水集流工程设计	(50)
3.5 灌溉工程设计	(54)
3.6 工程投资概算	(64)
3.7 经济效益分析与环境评价	(64)
3.8 示范区组织与管理	(67)
第4章 基于GIS的灌区水资源评价与实时灌溉决策支持系统	(69)
4.1 概述	(69)
4.2 基于GIS的灌区水资源评价与实时灌溉决策支持系统设计	(71)
4.3 基于GIS的灌区水资源评价与实时灌溉决策支持系统软件开发	(83)
4.4 灌区水资源评价与灌溉决策支持系统软件应用举例	(104)
第5章 集雨补灌工程综合效益评价指标体系及模型研究	(114)
5.1 主要研究内容及技术路线	(114)
5.2 雨水集蓄利用概况及区域生态经济系统的优化规划	(115)
5.3 集雨补灌工程综合效益评价指标体系	(125)
5.4 多层次模糊综合评价理论与方法	(134)
5.5 应用举例	(144)

第 6 章 结论.....	(154)
附录.....	(156)
附录 1 集雨补灌工程综合效益评价指标体系问卷调查表 I	(156)
附录 2 集雨补灌工程综合效益评价指标体系问卷调查表 II	(158)
附录 3 集雨补灌工程综合效益评价指标体系问卷调查表 III	(160)
参考文献.....	(162)

绪 论

0.1 研究意义

水资源紧缺,已成为我国国民经济和社会可持续发展的重要制约因素。江泽民同志强调指出“各级领导都要有一种强烈的意识,就是十分注意节约用地、节约用水,这两件事涉及农业的根本、人类生存的根本,在我国尤其意义重大”。但目前我国农业用水的状况,一边是水资源紧张,一边是浪费严重。据统计,农业用水的利用率为40%,仅为发达国家的一半左右;1m³水的粮食生产能力仅有0.85kg左右,远低于世界发达国家2kg以上的水平。发展集雨补灌节水农业,创建高效节水型的农业可持续发展模式是解决水资源短缺的重要措施之一。

河南省的水资源形势严峻。第一,水资源短缺。目前全省人均水资源仅414m³,不足全国人均水平的1/6,居全国第22位;耕地水资源拥有量不足400m³/亩^①,居全国第24位,属联合国划定的贫水区。第二,水资源区域分布不均。如豫南信阳、驻马店、南阳等市占全省人口的28.7%,水资源量却占全省的50.6%,人均922m³;而占全省人口57%的豫北、豫西和豫东等11个市的水资源却不足全省的1/3,人均仅322m³。其中豫西和豫北一些县(市)人均水资源不足250m³,仅为世界人均水量的1/40。第三,水资源利用率低,浪费严重。河南省工业用水重复利用率(除电力工业)均低于30%,不足全国先进水平的一半;全省多数灌区渠系水利用系数仅0.4~0.5,每立方米水粮食生产率0.8~1.2kg/m³,达不到全国平均水平。同时,受工业、乡镇企业发展和化肥施用等因素的影响,地表水被严重污染,至2000年有54.3%的河流全年期丧失供水能力。第四,地下水超采严重。全省地下水漏斗面积由1982年的2230km²扩大到1万多km²,年均增加534km²,如以地下水为主要供水源的濮(阳)、清(丰)、南(乐)漏斗区已连成一片,中心地下水埋深由9.2m降至17.4m,年均下降0.82m。第五,旱地面积大。据统计,全省旱地占总耕地面积的60%以上。第六,旱灾面积日趋递增。据统计,20世纪80年代受旱面积达2568万亩,比70年代增加1.45倍,90年代增至3500万亩,2001年增加到约4500万亩。

全球性的水资源危机,促使各国都在致力于发展各具特色的节水农业,以解决农业灌溉用水供应不足的问题。世界节水农业发达国家在生产实践中始终把灌溉水利用率和水分生产效率作为重点,并在水资源开发利用技术、田间节水灌溉技术、农艺节水技术、用水管理技术以及农业节水技术集成与产业化等方面取得领先优势。水资源多层次开发水平不断提高,在有效提高降水利用的同时,将劣质水优化利用也已成为许多国家减轻环境负担、缓解水资源矛盾的有效方法之一。目前以色列污水利用率达70%以上,其中1/3

① 1亩=1/15hm²,下同。

用于灌溉,约占总灌水量的 1/5。高效节水灌溉技术日趋精细,喷、微灌技术是现代农业节水技术的重要特征。美、英、法等国都相继大力推行了喷灌、滴灌、微灌、渗灌等先进节水灌溉技术,将先进的节水技术与优良的灌溉设备、自动化信息管理系统等有机地结合起来,是高效节水灌溉技术发展的总趋势。近年来,在墒情监测预报上大量采用了空间信息技术和计算机模拟技术,美、以等国已进入生产应用阶段。同时大力发展了补充灌溉、定量灌溉,非充分灌溉和调亏灌溉等先进节水理论支持的新型节灌技术也得到了充分重视。未来综合运用 GIS 技术,结合数据收集与计算机技术、智能化技术已成为现代农业的重要发展趋势。它推动了农业高效节水管理一体化建设,从而达到良好的节水、增产、增效的目的。

近 20 年来,在科技部及有关部门的领导下,通过节水农业技术的攻关研究与推广应用,有力地推进了我国节水农业的健康发展和科技进步。据统计,20 世纪 90 年代节灌面积已达 2.13 亿亩,约占全国灌溉面积的 28.0%,其中喷灌 1 600 多万亩,微灌 90 万亩。但与世界发达国家相比,在节水农业方面我国还存在相当大的差距,任务还十分艰巨。雨水集蓄节灌技术在农业上的运用是国际节水农业的发展趋势,而且发展集雨补灌节水农业具有解决人畜饮水问题、实现降水资源的合理调配与高效利用、提高单位耕地产出效益和产品品质、促进农村经济发展和农业结构调整、改善农业生态环境等多种功能。因此,通过集雨、多水源优化配置与节灌综合技术与示范,建立健全适合我国北方旱地的集雨补灌旱作节水农业综合技术体系,提高水资源利用效率,实现降水利用与生态环境改善的有机整合,是国家“863”高科技计划项目“北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业综合技术体系集成与示范(河南豫北示范区)”的重要研究内容。在其研究中,既有针对性较强的特点,同时又考虑了成果(例如 GIS 为平台的软件系统、评价体系等)普遍应用性,推动了我国北方旱地集雨补灌节水农业的高效、持续发展。

0.2 示范区基本情况

0.2.1 中心示范区概况

0.2.1.1 自然地理

中心示范区位于河南省辉县市豫北示范区东部,地势北高南低,属丘陵半山区。面积 104km²,其中耕地面积 51 160 亩。中心示范区内有 28 个行政村,35 个自然村,总人口 32 836 人。区域内地貌较为复杂,西北、北部为山区、丘陵区,东南部为山前倾斜平原,山丘区地形西北高东南低,平原区是南、北、西三面高,东面低,高程在 170~250m 之间,地面坡度 1/1 000~1/5 000。

土壤分布在山区多为灰棕色森林土和砾砂土,土层极薄,分布不均。山麓梯田多为红棕色壤土,冲积层一般厚为 1~2m。平原地带土壤岩性呈砂壤土或黄土亚砂土,含有机质较多,干时较为疏松,透水性能较强,土层较厚,土地肥沃,宜于农业生产。

0.2.1.2 水文气候特征

中心示范区位于亚热带向暖温带过渡地带,属大陆性季风半湿润半干旱气候,受季风影响较大,四季分明。冬季在蒙古高压控制下,盛行西北风,气候干燥,天气寒冷;夏季受

西太平洋副热带高压控制,多东南风,降水较为集中。多年平均降水量为 505.8mm,降水年际间差异很大,年最大降水量 874.8mm(1995 年),年最小降水量 318.8mm(1984 年),最大年为最小年的 2.7 倍;年内分配也极不均匀,一般 6~9 月降水量约占全年降水量的 70%。

区内平均气温 14.2℃,最低气温在 1 月份,1 月平均 -5.7℃;最高气温在 6 月份,6 月平均 32.5℃。极端最高气温为 43℃,极端最低气温为 -18.3℃。多年平均水面蒸发量 1 671.7mm。平均年内无霜期为 212 天,冰冻期 112 天左右。

0.2.1.3 社会经济状况

区内粮食生产以小麦、玉米为主,间种谷子和红薯等杂粮,经济作物以中药材、花生为主,间种棉花、蔬菜及瓜类等,复种指数为 1.71。土特产品有山楂、紫皮大蒜、粳米、松花皮蛋、核桃等。

区内矿产资源有煤、铜、锌、银等十几种,在发展乡镇企业上,坚持立足当地,强化管理,依靠科技,提高效益,初步形成以水泥、红砖、运输、医药、煤炭为主的基础产业,采石、印刷、化工、爆竹等工业行业并存的工业体系。

0.2.2 核心示范区概况

核心示范区位于豫北中心示范区东南部,主要粮食作物为冬小麦和玉米,经济作物主要以药材和红薯、黑豆等为主,果树主要是核桃树和柿子树等。核心示范区总人口 800 多人。该区域是河南省省级贫困地区,农业以种植业为主,经济收入以个体耐火砖原料生产为主,人均年收入不足 1 000 元。畜牧业仅限于家庭饲养,以猪、牛、羊和鸡为主。

核心示范区气候条件与中心示范区大气候基本一致,其降水量多年平均比中心示范区少 20mm 左右。由于位于丘陵区,其降雨中,暴雨所占全年降水量的比例大于全乡平均情况。

0.2.2.1 核心示范区土壤、地下水情况

核心示范区为山地丘陵区,地势起伏较大。土壤以黏土为主,土壤干容重 1.41 g/cm³,田间持水率为 25.47%(占干土重量百分数)。

灌区浅层地下水矿化度一般为 0.5~1.5g/L, pH 值 7.2 左右,属弱碱性淡水。地下水动态属“入渗补给—蒸发开采”型,水平运动较滞缓,垂向交替运动频繁,接受大气降水和其他地表水体补给,消耗于蒸发和开采。由于本示范区位于喀斯特地区,地下水渗漏严重,故难以开采利用。

0.2.2.2 核心示范区作物种植情况

核心示范区是以粮棉为主的旱作农业区,适种作物主要为冬小麦、夏玉米、棉花、大豆和花生等。耕作制度为:冬小麦—夏玉米(或夏播棉、夏大豆)一年两熟制;春播棉一年一熟制;冬小麦—夏玉米—春播棉(或者春大豆)二年三熟制。代表作物生育阶段见表 0-1。

根据区域现状种植结构和农业区划及各种作物的需水规律,确定区内代表作物和种植比例为:冬小麦 70%,春播棉 30%,夏玉米 35%,夏播棉 35%。复种指数 1.7。典型示范区总的灌溉面积约为 350 亩,根据各种作物的种植比例,求出各作物的种植面积为:冬小麦 245 亩,夏玉米 122.5 亩,夏播棉 122.5 亩,春播棉 105 亩。

表 0-1 核心示范区代表作物生育阶段表

作物名称	种植比例	生育阶段	起止日期(月·日)	生育期天数
冬小麦	70%	播种—越冬	10.22~12.20	60
		越冬—返青	12.21~3.10	80
		返青—拔节	3.11~4.10	31
		抽穗	4.11~4.30	20
		乳熟	5.1~5.20	20
		成熟	5.21~6.10	21
夏玉米	35%	播种—拔节	6.20~7.22	33
		拔节—抽穗	7.23~8.14	23
		抽穗—灌浆	8.15~8.31	17
		灌浆—成熟	9.1~9.29	29
春播棉	30%	苗期	4.26~6.10	46
		蕾期	6.11~7.13	33
		花铃期	7.14~9.9	58
		吐絮期	9.10~10.10	31
夏播棉	35%	苗期	6.10~7.19	40
		蕾期	7.20~8.19	31
		花铃期	8.20~9.17	29
		吐絮期	9.18~10.13	26

0.2.2.3 核心示范区水利工程状况

核心示范区内进行建设前没有任何可以用于灌溉的水利工程措施。虽然有一水井可作为灌溉用水的水源,但是由于水井距离耕作区较远,同时没有供水设施,因此该水井不能提供灌溉用水。示范区建设完成后建有容积分别为 1 500m³ 和 500m³ 的两座水池,以及 58 个容积为 35m³ 的水窖,同时铺设供水管道连接水窖、水池、水井,实现地表水以及地下水的联合调用。

0.3 主要研究内容

课题的主要研究内容如下:

(1)以 GIS 为平台,研制区域水资源评价管理信息数据库,建立水资源评价模型库,利用 GIS 的空间数据管理、空间数据分析、时域数据分析,以及可视化技术、集成数据库和模型库,在山丘区水资源评价中,使软件具有更强的实用性。

(2)雨水集蓄与综合水资源调控工程技术研究。

(3)典型示范区集雨节灌工程规划设计研究。

(4)以灌区实时优化灌溉理论研究为基础,研制基于 GIS 的作物土壤水分信息管理与实时灌溉决策支持系统软件。

(5)在建立集雨补灌工程综合效益评价指标体系基础上,创立了集雨补灌工程综合效益评价模型,分析本课题典型示范区集雨补灌工程的综合效益。

第1章 灌区水资源评价及优化分配

1.1 灌区水资源评价的基本理论与方法

1.1.1 水资源组成及水资源评价的内容

水资源主要由地表水资源、土壤水资源和地下水资源三者共同组成。大气降水是水资源的总补给来源。地表水主要表现形式是河流水、湖泊水、水库水等,由大气降水、高山冰雪融水和地下水补给,以河川径流、水面蒸发、土壤入渗等形式排泄,其动态水量为河川径流量,因此通常地表水资源量以河川径流量表示。土壤水是联系地表水与地下水的纽带。地下水是指存在于地表以下岩(土)层空隙中各种形式的水体。以大气降水和地表水的入渗补给为主,排泄一方面是以地下渗流方式补给河流、湖泊等地表水体,另一方面又以蒸散发的形式回归大自然。

按照水资源评价相关技术标准和技术规程,水资源评价包括水资源数量评价和水资源质量评价。水资源数量评价包括降水量、蒸发量、地表水资源量、地下水资源量和总水资源量;水资源质量评价主要包括矿化度、污染程度等及其可利用价值。

1.1.2 水资源量及其计算

水资源量是指地表水资源量与地下水资源量的总和,再扣除重复计算量部分。

1.1.2.1 降水量的计算

1.1.2.1.1 降水资料的审查

对于确定的研究区来说,观测该研究区的降水站可能会有多个。由于各个观测站点的设置年份、观测模式、管理水平等主观和客观因素的影响,同一研究区不同观测站点具有不同步的降水观测资料,为了达到计算精度以及保证计算结果的合理性,就需要对资料进行审查。

1.1.2.1.2 降水资料的插补、延长

从诸多降水观测站点中,找出一个或者几个观测资料比较齐全、系列比较完整的站点作为参证站,以参证站为基础,对其他资料不完整的站通过适当的途径、方法进行插补或延长,从而使同一流域的所有观测站点具有同步系列的降水观测资料。

资料插补、延长的基本方法:对于需要插补、延长的某一站点来说,在对参证站的降水资料代表性、一致性、连续性分析的基础上,把其与参证站资料进行相关分析,进而建立相关方程。对于有多个参证站的流域,将建立多个相关方程,并需要对多个相关方程进行分析。根据最优性原理,采用相关系数最好的相关方程作为资料插补、延长的方程。

对资料进行插补、延长的常用方法有以下两种:

(1)比值法。比值法的基本计算公式为:

$$P_i = P_{i\text{站}} \frac{P}{P_{\text{站}}} \quad (1-1)$$

式中 P_i ——需要插补延长站的年降水量,mm;

$P_{i\text{站}}$ ——参证站的年降水量,mm;

P ——需要插补延长站已有的多年平均年降水量,mm;

$P_{\text{站}}$ ——与需要插补延长站同步系列的参证站多年平均年降水量,mm。

(2)相关法。在相关法中,最常应用的方法是最小二乘法。相关法的基本计算式为:

$$P_i = aP_{\text{站}} + b \quad (1-2)$$

式中 P_i ——需要插补延长站的年降水量,mm;

$P_{\text{站}}$ ——参证站年降水量,mm;

a 、 b ——待定系数,可以由最小二乘法计算得到。

此外,还要对相关方程进行检验,检查相关分析是否满足精度要求。

1.1.2.2 蒸发量的计算

1.1.2.2.1 水面蒸发量

水面蒸发是在充分供水条件下的蒸发现象,水面蒸发量又称为蒸发能力。

$$E = \alpha E_0 \quad (1-3)$$

式中 E ——计算的水面蒸发量,mm;

E_0 ——蒸发皿观测的水面蒸发量,mm;

α ——水面蒸发折算系数。

1.1.2.2.2 陆面蒸发量

依据水量平衡原理,可以计算研究区的陆面蒸发量,其计算式为:

$$\begin{aligned} E_{\text{陆蒸总}} &= P_{\text{降总}} + Q_{\text{来总}} - Q_{\text{出总}} \\ E_{\text{陆蒸}} &= \frac{E_{\text{陆蒸总}}}{F} \times 1000 \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 $E_{\text{陆蒸总}}$ ——研究区陆面蒸发总量, m^3 ;

$P_{\text{降总}}$ ——研究区降水总量, m^3 ;

$Q_{\text{来总}}$ ——流入研究区的径流总量, m^3 ;

$Q_{\text{出总}}$ ——流出研究区的径流总量, m^3 ;

$E_{\text{陆蒸}}$ ——研究区平均陆面蒸发量,mm;

F ——计算区总面积, m^2 。

1.1.2.2.3 干旱指数

干旱指数是指年蒸发能力与年降水量之比,通常以此作为区别各地区气候干湿程度的指标。

$$\gamma = \frac{E}{P} \quad (1-5)$$

式中 E ——研究区年水面蒸发量,mm;

P ——研究区年降水量,mm;

γ ——研究区干旱指数。

1.1.2.3 地表水资源量

地表水资源量 R 常用多年平均河川径流量来表示。其计算方法有代表站法、等值线法、年降水—径流函数关系法等。

1.1.2.3.1 代表站法

地表水资源量就等于控制性水文站还原得到的天然径流量加上根据代表站计算得到的非控制区天然径流量,即

$$R = \sum R_{\text{Con}} + \sum R_{\text{Other}} \quad (1-6)$$

式中 $\sum R_{\text{Con}}$ ——控制性水文站还原得到的天然径流量,万 m^3 ;

$\sum R_{\text{Other}}$ ——根据代表站计算得到的非控制区天然径流量,万 m^3 。

根据代表站的径流量计算非控制区天然径流量方法如下:

在计算区域内,如果能够选择一个或几个基本能控制本区域大部分面积、实测径流资料系列较长、精度满足要求的代表性水文站,且区域内上、下游自然地理条件比较一致,可用代表性水文站年径流量按面积比的方法,推算区域多年平均年径流量。

假如区域仅有一个控制站,且上、下游的降水量差别较大,自然地理条件也不太一致,但下垫面却相差不大,这样,可以用降水量作为权重来计算区域多年平均年径流量,即

$$R = R_a \left(1 + \frac{P_b f_b}{P_a f_a} \right) \quad (1-7)$$

式中 R ——区域多年平均年径流量,万 m^3 ;

R_a ——控制站以上面积的实测年径流量,万 m^3 ;

P_a 、 f_a ——控制站以上面积的平均年降水量、集水面积;

P_b 、 f_b ——控制站控制面积以外的平均年降水量、集水面积。

1.1.2.3.2 等值线法

等值线法的具体做法是将流域内测量的雨量绘出的等值线,用求积仪求出各相邻等雨量线间的面积,然后乘上各相邻等雨量线雨深的平均值,得出该面积的降水总量,再将各面积上的降水总量相加,即得全流域的降水总量。

1.1.2.3.3 年降水—径流函数关系法

根据降雨历时及降雨强度,分析径流深和径流系数,即

$$R = \alpha P \quad (1-8)$$

式中 R ——区域多年平均年径流深,mm;

α ——径流系数;

P ——控制站以上面积的平均年降水量,mm。

以径流深乘以控制站面积得出径流量。

1.1.2.4 地下水资源量

地下水资源量是指某时段内地下含水层接收降水、地表水体、侧向径流及人工回灌等项渗透补给量的总和。

计算参数是地下水资源量计算的重要基础,也是各补给项、排泄项实际计算的依据。计算参数选用是否合理,考虑的因素是否全面,都直接影响到地下水资源量的计算精度。在地下水资源计算中,计算参数主要包括降水入渗补给系数(α)、河流入渗补给系数(M)、渠系入渗补给系数(m)、田间灌溉入渗补给系数(β)、水库入渗补给系数($\alpha_{\text{库}}$)、潜水蒸发系数(C)等。

1.1.2.4.1 山前侧渗补给量

山前侧渗补给量是指山区地下水径流中直接补给平原区的水量。山前侧渗补给量的计算是利用地下水径流模数资料,分别计算地下水的径流量,并根据实测泉水流量,计算地下水山前侧渗补给量。计算公式为:

$$Q_{\text{侧渗}} = Q_{\text{地下径}} - Q_{\text{山泉溢}} \quad (1-9)$$

式中 $Q_{\text{地下径}}$ ——地下水径流量, m^3 ;
 $Q_{\text{山泉溢}}$ ——山区泉水溢流量, m^3 ;
 $Q_{\text{侧渗}}$ ——山前侧渗补给量, m^3 。

1.1.2.4.2 降水入渗补给量

降水入渗补给量的计算可采用如下公式:

$$Q_{\text{降渗}} = \alpha P \quad (1-10)$$

式中 $Q_{\text{降渗}}$ ——降水产生的入渗补给量, m^3 (或者 mm);
 α ——降水入渗补给系数;
 P ——产生入渗补给量的降水,由经验可以得到大于 10mm 的降水才有可能产生入渗补给, m^3 (或者 mm)。

1.1.2.4.3 河流入渗补给量

采用河流入渗补给系数计算河流入渗补给量:

$$Q_{\text{河渗}} = MQ_{\text{河径}} \quad (1-11)$$

式中 $Q_{\text{河径}}$ ——河流径流量, m^3 ;
 M ——河流入渗补给系数。

若由水量平衡方程 $Q_{\text{入}} - Q_{\text{出}} = \Delta Q_{\text{蓄变}}$ 计算河流入渗补给量,其计算式如下:

$$Q_{\text{河渗}} = Q_{\text{河入径}} + Q_{\text{降}} - Q_{\text{河蒸}} - Q_{\text{河出径}} - Q_{\text{河引}} \pm Q_{\text{河蓄变}} \quad (1-12)$$

式中 $Q_{\text{河入径}}$ ——入河流径流量, m^3 ;
 $Q_{\text{河出径}}$ ——出河流径流量, m^3 ;
 $Q_{\text{降}}$ ——降水产生的水量, m^3 ;
 $Q_{\text{河蒸}}$ ——河流水面蒸发量, m^3 ;
 $Q_{\text{河引}}$ ——自河道的引水量, m^3 ;
 $Q_{\text{河蓄变}}$ ——河流蓄变量,多年平均为零, m^3 。

1.1.2.4.4 渠系入渗量

渠系入渗量计算公式为:

$$Q_{\text{入}} = mQ_{\text{引}} = \gamma(1 - \eta)Q_{\text{引}} \quad (1-13)$$

式中 $Q_{\text{入}}$ ——渠系入渗补给量, m^3 ;

$Q_{\text{引}}$ ——渠系引水量, m^3 ;

m ——渠道入渗补给系数, $m = \gamma(1 - \eta)$;

γ ——修正系数;

η ——渠系水有效利用系数, 对于防渗渠系来说, 依据渠道防渗材料及结构型式不同而不同。

1.1.2.4.5 田间灌溉入渗补给量

田间灌溉入渗补给量的计算如下式:

$$Q_{\text{灌渗}} = Q_{\text{引}} \eta \beta \quad (1-14)$$

式中 $Q_{\text{灌渗}}$ ——田间灌溉入渗补给量, m^3 ;

$Q_{\text{引}}$ ——河道渠首引水量, m^3 ;

η ——渠系综合利用系数;

β ——田间灌溉入渗补给系数。

1.1.2.4.6 潜水蒸发量

潜水蒸发量按下式计算:

$$Q_{\text{潜}} = CE_0 F = EF \quad (1-15)$$

式中 $Q_{\text{潜}}$ ——潜水蒸发量, m^3 ;

F ——计算面积, km^2 ;

C ——潜水蒸发系数, $C = \frac{E}{E_0}$;

E ——潜水蒸发量;

E_0 ——水面蒸发量, 用 $E_{20} \mu = E_{601}$ 换算, μ 为 E_{20} 与 E_{601} 的换算系数。

地下水资源量一般可分为山丘区地下水资源量和平原区地下水资源量。山丘区的降水由于其所处山坡较陡, 水流较急速, 再者, 在山区下垫面一般不易形成地表水下渗, 因此对于山区地下水资源量, 多数情况下可以忽略不计。而在平原区, 地下水资源量的形成与转化具有多种形式(诸如降水补给量、水库补给量等)。

1.1.2.5 水资源总量

按照上述方法, 分别计算地表水资源量和地下水资源量, 再汇总, 其值往往大于水资源总量。原因是, 在计算地表水资源量和地下水资源量时, 有一部分水量是重复的。因此, 需要把重复量从二者之和中扣除, 这样才真正得到水资源总量。针对一个特定的区域, 计算重复水量 C , 只需把重复部分的水量计算项找出来, 再汇总即可。

区域水资源总量可用下式计算:

$$W = P - E_s = R_s + U_p \quad (1-16)$$

$$W = R + E_g + U_g \quad (1-17)$$

式中 W ——水资源总量, m^3 ;

P ——区域降水总量, m^3 ;

E_s ——区域地表蒸散发量, m^3 ;

R_s ——地表径流量, m^3 ;
 U_p ——降水入渗对地下水的补给量, m^3 ;
 R ——河川径流量, m^3 ;
 E_g ——潜水蒸发量, m^3 ;
 U_g ——地下潜流量, m^3 。

式(1-16)、式(1-17)剔除了地表水和地下水互相转化的重复水量,原则上适用于山地、丘陵、平原等各种类型区的水资源总量计算,可根据研究评价区域的水文、地质特性和资料条件加以选用。例如,在半干旱半湿润地带的平原区,降水入渗补给量占产水量的比例较大,且有地下水位动态资料作为计算依据,通常采用式(1-16)来计算水资源总量。在山区和丘陵区,河川径流是产水量的主要组成部分,有水文站的流量观测资料作为计算依据,则宜采用式(1-17)来计算水资源总量。在分区进行大流域水资源评价时,除了知道流域内各种类型区的三水转化关系外,还要分析上、下游相邻区之间的水量转化关系,以便计算全流域水资源总量。山区和平原之间的水量转化关系表现为:山区地下水潜流补给平原地下水,或以泉水形式溢出流入平原河流;山区河川径流在流经平原的过程中渗漏补给地下水;平原利用山区来水灌溉,通过渠系渗漏和田间回归补给地下水。由此可见,平原区地下水除了当地降水入渗补给外,还有山前侧渗、河渠渗漏、田间回归等项补给,但这些补给量来源于上游山区产水量,在计算全流域水资源总量时,应作为重复水量予以扣除。

1.2 灌区水资源要素预测模型研究

1.2.1 灰色 Verhulst 模型

灰色系统预测模型用于中长期预测是一种有效的方法。但是,当需水量按照 S 型曲线增长或增长处于饱和阶段时,采用灰色 GM(1,1)模型进行预测的误差较大,预测精度不能满足实际要求。将灰色 Verhulst 模型引入到需水量预测中,可以很好地解决这个问题。

1.2.1.1 灰色 GM(1,1)模型

设有 n 个原始数据构成一维时间序列 $\{X_i^{(0)}, i=1, 2, \dots, n\}$, 对此序列进行一阶累加 (1-AGO) 生成, 得新数据序列为:

$$x_i^{(1)} = \sum_{k=1}^i x_k^{(0)}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1-18)$$

建立灰色 GM(1,1)模型的一级白化微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (1-19)$$

式中 a, b ——待定参数。

灰色 GM(1,1)模型参数 $A = [a, b]^T$ 的最小二乘估计为:

$$A = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (1-20)$$

式中

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1), k = 2, 3, \dots, n$$

将计算求得的参数 a 、 b 代入式(1-19),并求解,取 $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$,即得灰色 GM(1,1)预测模型:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (k = 0, 1, \dots) \quad (1-21)$$

灰色 GM(1,1)模型比较适用于具有较强指数规律的序列,只能描述序列的单调变化过程,而对于一些特殊的序列增长公式,例如当序列按照 S 型曲线增长或增长处于饱和阶段时,采用灰色 GM(1,1)模型将产生较大的预测误差,精度不能满足实际要求,将灰色 Verhulst 模型引入到需水量预测中,很好地解决了这个问题,同时保留了灰色预测方法的优势和特点。

1.2.1.2 灰色 Verhulst 模型

1.2.1.2.1 Verhulst 模型

1937 年,德国生物学家 Verhulst 从生物繁殖过程中数量变化特征将 Malthurian 模型作了修正,加入了一个限制发展项,得到了如下的 Verhulst 模型:

$$\frac{dp(t)}{dt} = ap(t) - bp^2(t) \quad (1-22)$$

这是一个非线性微分方程,其解为:

$$p(t) = \frac{ap_0}{bp_0 + (a - bp_0)e^{-a(t-t_0)}} \quad (1-23)$$

式中 t_0 ——起始时刻;

p_0 —— $p(t)$ 在 t_0 时的值,即初始值。

1.2.1.2.2 灰色 Verhulst 模型的建立

Verhulst 模型主要用于描述具有饱和状态的过程,即 S 型过程,常用于人口预测、生物繁殖预测和产品经济寿命预测等。

在实际问题中,常遇到原始数据本身呈 S 型,这时我们可以取原始数据为 X_1 ,而认为 X_0 为 X_1 的 1-AGO 序列,建立 Verhulst 模型直接对 X_1 进行模拟。

与灰色 GM(1,1)模型的建立方法类似,取原始数据为 X_1 ,而把 X_1 的一次累减(1-IAGO)记为 X_0 ,即 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$,建立灰色 Verhulst 模型的白化微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b[x^{(1)}(t)]^2 \quad (1-24)$$

式中, a 、 b 为参数项,其最小二乘估计为:

$$A = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (1-25)$$

式中