



高等学校教材

专科适用

# 水利计算及水利规划

黑龙江水利高等专科学校 季山 合编  
扬州大学水利学院 周倜

高等学校教材

||||| 专 科 适 用 |||||

# 水利计算及水利规划

黑龙江水利高等专科学校 季山  
扬州大学水利学院 周倜 合编

中国水利水电出版社

## 内 容 提 要

本书是为水利水电类高等工程专科学校编写的通用教材。书中主要介绍了水利计算、水利经济计算、水利规划的基本理论和基本方法。全书包括了蓄水、引水、提水、地下水灌溉工程以及水电站的兴利计算，水库、堤防、分(蓄)洪工程防洪计算，水库控制运用，水利经济计算，水资源供需分析，江河综合规划与水利规划系统分析等内容。

本书除可作为水资源与水文、陆地水文等专业的通用教材外，尚可供其他水利类专业的师生以及工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水利计算及水利规划/季山,周倜合编. —北京:中国水利水电出版社,1997

高等学校教材:专科适用

ISBN 7-80124-508-3

I. 水… II. ①季… ②周… III. ①水利计算-高等学校-教材 ②水利规划-高等学校-教材 IV. TV21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 18823 号

书 名	高等学校教材 水利计算及水利规划 (专科适用)
作 者	黑龙江水利高等专科学校 季山 合编 扬州大学水利学院 周倜
出 版 社	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行 所	新华书店北京发行所
经 售 处	全国各地新华书店
排 版 厂	北京市金剑照排厂
印 刷 厂	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 382 千字
版 次	1998 年 5 月第一版 1998 年 5 月北京第一次印刷
印 数	0001 — 1200 册
定 价	16.20 元

## 前 言

本教材是根据水利部“1990~1995年高等学校水利水电类专业专科教材选题和编审规划”的部署,按照“水利计算与水利规划”课程教学基本要求编写的。适用于水资源与水文、陆地水文等专业。

根据工程类专科生的培养目标和业务要求,在编写本教材时,我们以技术应用能力培养为主线来设计教学内容,在以下方面作了努力:①加强针对性和实用性,适应学生毕业后立即上岗工作的需要。比如,水库是生产实践中起兴利、防洪等综合利用作用的主要水工建筑物,此外,尚有引水、提水、蓄引提结合、地下水灌溉、堤防、分(蓄)洪等兴利、防洪工程。然而,以往大学有关教材多只介绍水库一种,这是不全面的,本教材补充介绍其他水工建筑物。又如水资源供需分析是水利规划的基础工作,是生产实践中普遍需要的,以往有关教材也未作介绍,本教材增加了这部分内容。②教材内容详略得当(仍以单一水利枢纽为主),精简某些理论推导部分,在阐述基本理论、基本方法的同时,列举较多的实例。再通过作业、课程设计等教学环节,使学生能较好地理解理论,掌握工程设计技能。③从学生未来工作的发展考虑,适当介绍一些新理论和新技术。如非工程防洪措施,水利规划系统分析等。总之,试图编写出一部具有专科特色的教材。

在编写本教材的过程中,参考并引用了国内外有关教材、参考书、工具书、资料和科研成果。因限于篇幅,未能一一注明。在此,对所引用的文献的作者表示深切的谢意。

黑龙江水利高等专科学校季山编写本教材的绪论,第一、二、八章及第四章六至八节;扬州大学水利学院周倜编写第三章及第四章一至五节;东北农业大学罗凤莲编写第五、六、七章;黑龙江水利高等专科学校胡志范编写第九章。全书由季山统稿,河北工程技术高等专科学校顾鼎仁主审。

受编者学识水平和实践经验的限制,教材中可能存在不少缺点和不妥之处,敬请使用本教材的师生和其他读者批评指正。

编 者

1995年6月

# 目 录

前 言	1
绪 论	1
第一节 我国水资源的特点	1
第二节 径流调节的概念	1
第三节 水利工程的分类、组成及作用	2
第四节 本课程的内容	3
第一章 灌溉水库兴利调节计算	4
第一节 概述	4
第二节 设计保证率的概念	4
第三节 兴利调节计算所需的来水和灌溉用水资料	5
第四节 水库特性资料	14
第五节 水库死水位的初步选择	18
第六节 年调节水库兴利调节计算方法	20
第七节 年调节水库保证供水量与设计库容的关系	26
第八节 时历法多年调节计算	28
第九节 数理统计法多年调节计算	32
第二章 引水、提水、蓄引提结合、地下水灌溉工程兴利调节计算	40
第一节 概述	40
第二节 引水灌溉工程兴利调节计算	41
第三节 提水灌溉工程兴利调节计算	44
第四节 蓄引提结合灌溉工程兴利调节计算	47
第五节 地下水灌溉工程兴利调节计算	51
第三章 水电站水能计算	57
第一节 水能利用的基本概念	57
第二节 电力系统的负荷和容量组成	64
第三节 水电站的保证出力和多年平均发电量	68
第四节 水电站装机容量选择	76
第五节 水电站水库调度图	87
第四章 防洪调节计算	92
第一节 概述	92
第二节 水库调洪计算的原理和方法	96
第三节 溢洪道上不设闸门与设闸门控制时水库的防洪计算	104

第四节	坝顶高程的确定 .....	113
第五节	水库防洪计算中的有关问题 .....	115
第六节	堤防水利计算 .....	118
第七节	分(蓄)洪工程防洪水利计算 .....	120
第八节	非工程防洪措施简介 .....	122
第五章	水利经济计算 .....	125
第一节	概述 .....	125
第二节	投入与产出 .....	126
第三节	资金的时间价值及基本折算公式 .....	127
第四节	水利工程经济效果分析的指标和参数 .....	142
第五节	动态经济分析方法 .....	146
第六节	静态经济分析方法 .....	155
第七节	水库参数的选择 .....	160
第六章	水库的控制运用 .....	166
第一节	灌溉水库年度供水计划的编制 .....	166
第二节	灌溉水库兴利调度图的编制和应用 .....	172
第三节	灌溉水库汛期控制运用计划的编制 .....	178
第四节	综合利用水库的调度 .....	188
第五节	中、小型水库防洪能力图 .....	193
第七章	水资源供需分析 .....	201
第一节	概述 .....	201
第二节	可供水量的计算 .....	201
第三节	需水量的计算 .....	205
第四节	供需平衡计算 .....	209
第五节	中国水资源供需分析简介 .....	215
第八章	江河综合规划 .....	216
第一节	江河综合规划的任务和作用 .....	216
第二节	江河综合规划的理论和技术 .....	218
第三节	江河规划工作的管理 .....	221
第九章	水利规划系统分析简介 .....	223
第一节	线性规划 .....	223
第二节	非线性规划 .....	230
第三节	动态规划 .....	236
第四节	多目标规划 .....	242
第五节	其他常用系统分析方法 .....	244
附录	.....	248
主要参考文献	.....	257

# 绪 论

## 第一节 我国水资源的特点

水资源是人类赖以生存、社会经济得以发展的重要物质资源。广义的水资源，指地球上拥有的气态、液态和固态的天然水。其中淡水储量占地球总储水量的 2.5% 左右。在淡水储量中，极地冰川和雪盖、永久冻土底冰、深层地下水尚不可能被利用。而与人类生活、生产活动最密切、可以利用的河流、湖泊、土壤水和地下淡水，常称狭义的水资源，约占地球总储水量的 0.3%，表明可供人类利用的淡水资源是有限的。我国水资源的主要特点如下。

### 1. 水资源相对量较少

我国多年平均淡水资源总量为 2.81 万亿  $m^3$ ，居世界第 6 位，绝对量是丰富的。但按人口、耕地面积平均，则处于较低的水平。我国人均水资源占有量在世界各国排第 109 位，只相当世界人均的 1/4；亩均水资源只有世界亩均的 3/4 左右。

### 2. 水土资源组合不平衡

45% 的国土处于年降水量少于 400mm 的干旱、少水地带。长江流域及其以南地区水资源量占全国的 82%，但耕地只占全国的 38%；黄河、淮河、海河三大流域水资源量只占全国的 6.6%，而耕地却占全国的 40%。目前北方水资源短缺的矛盾十分突出，特别是北方的城市和辽河、黄河中下游的工矿集中地区、海河流域及山东沿海地区，以及西北干旱地区及一些高原地区，城乡生产生活用水处于紧张状态，有的地区已经出现或将会出现严重的水危机。

### 3. 水资源时间分布不均匀

受季风气候等的影响，我国水资源年内、年际变化很大，并有少水年或多水年连续出现的现象。

我国天然水资源在时间上、空间上分布不均和变化，往往酿成洪涝旱等自然灾害。工农业等生产活动又使水资源经常受到污染。为此，需要兴建各种水利工程，对天然水资源进行调节，并采取各种保护水资源的措施，使水资源持续服务于经济建设。

## 第二节 径流调节的概念

### 一、径流调节的涵义

① 如前所述，我国水资源在时间分布上很不均匀，难于满足灌溉、发电和航运等用水部门的要求。比如水稻插秧时期农田需要用水，而多数河流水量往往不足。又如华北平原冬小麦生长，一些地区冬季发电也需要一定的用水量，但一般河流正处于枯水期。多数河流一年中水量集中于汛期，而河槽宣泄洪水能力有限，常造成洪水泛滥。有的年份水量过大，如 1991 年江淮等流域发生特大洪涝，波及 18 个省、市，直接经济损失 700 多亿元；有的

年份水量过小,造成旱灾。此外,我国水资源在地区分布上也很不均匀,南方地少水多,北方地多水少,水土资源组合不平衡。为了兴利和除害,需要对河川径流进行控制和调节。

径流调节的涵义可概括为:通过兴建蓄水、引水、提水、地下水灌溉、调水、水电站等工程,调蓄改变径流的天然状态(时间、空间和落差),解决供水与需水的矛盾,达到兴利和除害的目的。

径流调节有以下两方面的作用。一是协调统一国民经济各用水部门之间的矛盾;二是协调来水和用水在时间上和地区上的矛盾。

## 二、径流调节的分类

### (一) 按调节对象和重点分类

常分为枯水调节和洪水调节,前者重点在于增加枯水期的供水量,以满足各用水部门的需水要求,常称为兴利调节;后者重点在于削减洪峰和滞蓄洪水总量,为防汛工作争取主动,常称为防洪调节。

### (二) 按服务目标分类

按服务目标常分为灌溉、发电、给水、航运及防洪、除涝等调节,它们在调节要求和特点上各有不同。目前以单目标开发的径流调节已很少见,一般系兼有多目标开发的径流调节。

### (三) 按调节周期分类

按调节周期分类即按一次蓄泄循环的时间长短来分类,常分为日调节、周调节、年(季)调节和多年调节。日或周调节,一般见于发电、给水水库。年(季)及多年调节,通常用于兼有灌溉、发电、给水、航运及防洪多目标开发的水库。水库库容愈大,其调节周期就愈长,调节和利用径流的程度也愈高。多年调节水库一般可同时进行年、周和日的调节,年调节水库可同时进行周和日的调节。

### (四) 其他形式的调节

如补偿调节、反调节、库群调节等。当水库与下游用水的取水口之间有区间入流时,由于区间来水不能控制,上游水库的调度要根据区间来水情况进行补偿放水,称作补偿调节。日调节水电站的下游,若有灌溉和航运要求,需要对水电站的放水过程进行一次重新调节以适应用水需求,称作反调节。库群调节是河流上建有多个水库,研究它们的联合运行,以最经济、有效地满足各用水部门的要求,这是最为复杂的径流调节形式。

## 第三节 水利工程的分类、组成及作用

水利工程是实现径流调节的设施。

水利工程按其服务对象可分为以下几类:①防止洪涝灾害的防洪工程。②为农业生产服务的农田水利工程,又称农田灌溉排水工程。③将水能转化为电能的水力发电工程。④为水运服务的航运及港口工程。⑤为城镇及生活供水、排泄处理污水和雨水服务的城镇供水及排水工程等。

水利工程按其対水的作用可分为以下几类:蓄水工程、取水工程、输水工程、提水工程、排水工程、水质净化和污水处理工程等。



水利工程主要由各种类型的水工建筑物所组成,其中挡水建筑物,如堤、坝;泄水建筑物,如水闸、溢洪道、水工隧洞和涵管;输水建筑物,如人工河道、渠道、隧洞、涵洞、渡槽、倒虹吸管等。

我国是最早修建水利工程的国家之一。新中国成立之后,政府重视水利建设。截至1989年,我国灌溉面积已达7.2亿亩,是1949年的3倍;机电排灌能力6400多万kW,是1949年的890倍;水力发电总装机容量3458万kW,是1949年的96倍;建成各类水库8.3万座;水资源利用量5020亿 $m^3$ ,是1949年的5倍;新建和加固江河堤防总长度20万km。水利工程在抵御自然灾害、兴国安邦中发挥了巨大的作用。

#### 第四节 本 课 程 的 内 容

本课程的主要内容包括:

(1) 阐述根据设计来水情况及灌溉、发电等需水要求,进行蓄水、引水、提水及地下水灌溉工程兴利调节计算和水电站水能计算的原理及方法。

(2) 阐述根据设计来水情况及防洪要求,进行水库、堤防、分(蓄)洪工程防洪调节计算的原理和方法,简介非工程防洪措施的基本内容。

掌握上述两部分内容,即可初步确定水利工程的规模。

(3) 阐述运用经济学的一般原理和方法,对水利工程进行分析论证和经济效益评价,选择经济效果好,合理可行的水利工程规模方案。

(4) 阐述运行管理阶段水库控制运用的原理和方法,使水库在保证安全的前提下,发挥最大的防洪和兴利效益。

以上四部分内容为常规的水利工程规划设计、管理运行阶段的水利计算和水利经济计算的原理和方法。

(5) 阐述不同发展阶段、不同水量保证年份区域水资源供需平衡分析的原理和方法,为编制水利规划、解决水资源供需矛盾、合理开发利用水资源提供科学依据。

(6) 介绍水利规划的最高层次——江河综合规划的编制理论和方法,说明水利计算、水利经济计算、水资源供需分析与水利规划的关系。简介新兴的水利规划系统分析方法。

本课程是水资源与水文、陆地水文专业的一门专业课。它与“地表水资源与水文分析”、“地下水资源计算与评价”、“水利工程基础”等课程有着密切的联系。在开设本课程之前,原则上应讲完上述几门课程。

# 第一章 灌溉水库兴利调节计算

## 第一节 概 述

在自然条件下,因降水量不足或季节分布不均匀,农田水分往往与农作物的需求不相适应,人为地进行灌溉,可以满足农作物对水分的需求。此外,农田灌溉还可以起到培肥地力、调节地温、淋洗土壤盐分等作用。我国已有 4000 多年的农田灌溉历史,积累并创造了许多先进的灌溉理论和技术。现有灌溉面积居世界第一位。我国灌溉面积占耕地面积不到 1/2,但其生产量却占全国粮食和经济作物总产量的 2/3,经济效果显著。发展灌溉已成为进一步提高农业生产的重要手段。

实行灌溉,应具备水量充足、水质良好的水源。灌溉水源一般有地表水和地下水两类。地表水包括河川径流、湖泊和汇集拦蓄的地面径流;地下水主要是指浅层地下水。我国 7.2 亿亩灌溉面积中近 80% 以地表水为灌溉水源;北方地区以地下水为灌溉水源所占比重比南方大。自然条件下,灌溉水源的水量和水质(应满足作物生长发育要求,还要兼顾人畜饮用和鱼类生长的要求)往往不能完全适应农田灌溉的需求,这就需要兴建农田水利设施,以调节和改善水量的天然分布状况,处理和改善水的质量。同时在灌溉过程中,采取节水和保护水质的措施。

农田水利工程通常包括灌溉、排水、灌溉防洪、水土保持中的水利工程措施等。其中灌溉工程设施包括:①蓄水工程,即拦蓄河水或地面径流的水库、塘坝。②引水工程,即从河流或湖泊、水库、塘坝引水的渠首工程和从区外引水的渠道及建筑物。③提水工程,即从低处向高处送水的泵站、水轮泵站。④输水工程,即渠首以下的干渠段及建筑物。⑤配水工程,即干渠分水闸以下各级渠道及建筑物。⑥泄水工程。

本章阐述以灌溉为主要开发目标的灌溉水库兴利调节计算的原理和方法,目的在于确定灌溉水库的死水位、正常蓄水位及其相应的库容。

## 第二节 设计保证率的概念

设计保证率表示兴利用水的标准。通常有三种衡量方法,即按保证供水的年数、按保证供水的历时、按保证供水的数量来衡量,三者都是以多年工作期中的相对百分数表示。形式虽一样,但统计方法和涵义不同。目前在灌溉水库、年或多年调节水电站、工业和民用供水的规划设计中,最常用的是第一种衡量方法,设计保证率  $P$  用公式表示为

$$P = \frac{\text{总年数} - \text{破坏年数}}{\text{总年数}} \times 100\% \\ = \frac{\text{正常工作年数}}{\text{总年数}} \times 100\% \quad (1-1)$$

对于航运部门或无调节或日调节水电站,一般用正常工作的相对日数表示保证率。

我国有关技术规范,对不同的径流开发目标分别给出了设计保证率的取值范围,如表

1-1、表 1-2 所示。

表 1-1 灌溉设计保证率

地区	作物种类	灌溉设计保证率(%)
缺水地区	以旱作物为主	50~75
	以水稻为主	70~80
丰水地区	以旱作物为主	70~80
	以水稻为主	75~95

表 1-2 水电站设计保证率

电力系统中水电站容量的比重(%)	25 以下	25~50	50 以上
水电站设计保证率(%)	80~90	90~95	95~98

工业及民用供水的设计保证率要求较高,一般规定为 95%~99%。航运的设计保证率(按正常工作的相对历时表示)一般定为 80%~90%或更高。对以发电为主的水库,航运保证率同发电保证率。

下面解释设计保证率的涵义。例如灌溉设计保证率  $P$  为 75%,表示在灌溉工程运用期间,如果管理无误,则平均 4 年中有 3 年满足灌溉用水要求,1 年不能满足。

设计保证率的高低与用水部门的重要性及工程的等级规模等有关。仍以灌溉设计保证率为例。灌溉设计保证率的高低,将影响工程的规模(坝高、库容、渠系建筑物的尺寸、机电排灌站的装机容量等)或灌溉面积的大小。在一定的水源条件下,灌溉设计保证率定得高。灌区因缺水而造成的损失小,但保证灌溉的面积也小,水资源利用程度低;若灌溉设计保证率定得低,其优缺点则相反。在灌溉面积已定时,灌溉设计保证率越高,工程投资及年运行费用越大;反之,虽可减少工程投资及年运行费用,但作物遭受旱灾而减产的机率将会增加。灌溉设计保证率定得过高或过低都是不经济的。在进行灌溉工程设计时,应根据水源条件及灌溉面积,参照表 1-1 拟定各种方案,计算与各种灌溉设计保证率相应的灌溉工程净效益,在没有其他约束的条件下,选定一个经济效益最优的保证率,作为工程设计标准。

### 第三节 兴利调节计算所需的来水和灌溉用水资料

如上所述,径流调节计算的作用是协调来水和用水在时间上和地区上的矛盾。具体调节计算时需要以下来水和灌溉用水资料。

#### 一、兴利调节计算所需的来水资料

对于年调节水库,坝址处若具有几十年的实测(年、月、旬等)水文资料,即可据此进行兴利调节计算。这些来水资料,可用时历过程表或图表示,也可用累积(差累积)过程表或图表示。对于多年调节水库的兴利调节计算,则需要更长的实测水文资料,可以用时历累积(差累积)过程表、图或以某一数学模型及其统计参数均值、 $C_v$  和  $C_s$  值表示。

## 二、兴利调节计算所需的灌溉用水资料

一般需要典型干旱年或多年综合灌溉用水过程资料。与来水资料相同，灌溉用水资料也可用历时过程或累积(差累积)过程表或图表示。

### (一)作物田间需水量计算

田间适宜的水分，不仅供给作物生长的需要，而且能够调节土壤中的水分、养料和热状态等。农作物适宜水分的保持，除了大气的有效降水补给之外，需由灌溉工程不断地予以补充。为了适时适量地进行灌溉，必须掌握农作物田间需水规律。田间需水量的大小与气象条件(如光照、温度、湿度、风速等)、作物种类和品种特性、土壤含水状况、农业技术措施、水利措施等有关。各种作物在不同条件下的需水量各不相同，但又有一定的变化规律及大致的范围。下面介绍推求作物田间需水量的方法。

#### 1. 经验公式法

(1) 以水面蒸发为参数的需水系数法。灌溉试验资料表明，作物田间需水量与水面蒸发量之间存在一定的关系，可用下式表示

$$E = \alpha E_0 + b \quad (1-2)$$

式中  $E$ ——某时段(或全生育期)内作物需水量，以水层深度计，mm；

$E_0$ ——同期水面蒸发量，以水层深度计， $E_0$ 一般采用  $E-610$  型蒸发皿的观测值，mm；

$\alpha$ ——需水系数，根据试验资料确定；

$b$ ——经验常数，单位同  $E$ ，根据试验资料确定，有时取  $b=0$ 。

该法只要求具有水面蒸发量资料，即可计算出作物田间需水量，而水面蒸发量资料较容易获得，因而该法在我国得到了广泛应用。该法缺点是未考虑土壤、水文地质、农业技术措施和灌排措施等非气象因素的影响。

表 1-3 为江苏省常熟灌溉试验站 1959~1966 年实测水稻(双季早稻)生长期各阶段起迄日期和平均  $\alpha$  值(取  $b=0$ )。

表 1-3 江苏省常熟灌溉试验站水稻各生长阶段  $\alpha$  值和天数表

生育期名称	返青	分蘖	拔节	孕穗	抽穗	乳熟	黄熟	全生育期
日期	4月30日 ~5月7日	5月8日 ~6月3日	6月4日 ~6月15日	6月16日 ~6月25日	6月26日 ~7月1日	7月2日 ~7月18日	7月19日 ~7月25日	4月30日 ~7月25日
$\alpha$	1.15	1.35	1.55	1.65	1.70	1.65	1.55	1.50

表 1-3 中有的生育期跨两个日历旬，如 5 月上旬，5 月 1 日~7 日属返青期， $\alpha=1.15$ ；而 5 月 8 日~10 日属分蘖期， $\alpha=1.35$ 。计算 5 月上旬的  $\alpha$  值一般可采用加权法，即按下式计算：

$$\begin{aligned} \alpha_{5,上} &= \alpha_{返青} \times \frac{1}{10} (\text{返青期在 5 月上旬的天数}) \\ &\quad + \alpha_{分蘖} \times \frac{1}{10} (\text{分蘖期在 5 月上旬的天数}) \\ &= 1.15 \times \frac{7}{10} + 1.35 \times \frac{3}{10} = 1.21 \end{aligned}$$

有了各旬的  $\alpha$  值, 便于换算为各旬的需水量, 也便于以后的兴利调节计算。

(2) 以气温为参数的需水系数法。我国南方某些地区用下列公式估算水稻田间需水量

$$E = \beta T + b \quad (1-3)$$

式中  $E$ ——某时段(或全生育期)内水稻田间需水量, 以水层深度计, mm;

$T$ ——同期当地日平均气温的累积值, 简称积温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\beta$ ——需水系数, mm/ $^{\circ}\text{C}$ ;

$b$ ——经验常数, 单位同  $E$ , 有时取  $b=0$ 。

该法适用于南方湿润地区, 北方半旱和半干旱地区不宜采用。

(3) 以多种因素为参数的公式。一种以温度和水面蒸发量为参数的公式

$$E = \sum \beta_i \varphi_i = \sum \beta_i (\bar{t}_i + 50) \sqrt{E_0} \quad (1-4)$$

式中  $E$ ——全生育期水稻总需水量, mm;

$\beta_i$ ——各生育阶段水稻的耗水系数, 根据试验资料确定;

$\varphi_i$ ——各生育阶段水稻消耗于蒸发蒸腾的太阳能累积值,  $\varphi_i = (\bar{t}_i + 50) \sqrt{E_0}$ ;

$\bar{t}_i$ ——各生育阶段的日平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$E_0$ ——水面蒸发量, mm。

另一种以作物产量和水面蒸发量为参数的公式

$$E = aE_0 + bY + c \quad (1-5)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ——经验常数, 根据试验资料确定;

$E$ 、 $E_0$ ——意义同上;

$Y$ ——作物产量, kg/亩。

这种方法考虑多种因素对作物田间需水量的影响, 理论基础优于上述单因素法。

## 2. 能量平衡法

作物在腾发(植株蒸腾和株间蒸发)过程中, 需要消耗热量。作物需水量的大小与腾发消耗的能量密切相关。腾发过程中的能量消耗, 主要以热能形式进行。在气温为  $25^{\circ}\text{C}$  时, 每腾发 1g 重的水大约需消耗 2466J 的热量。假如能够测出作物腾发消耗的热量, 便可折算求出相应的作物田间需水量。

彭曼根据热量平衡原理, 导出作物田间需水量计算公式

$$E_p = \frac{1}{L} \times \frac{\left(\frac{\Delta}{\nu}\right) H_0 + LE_a}{1 + \frac{\Delta}{\nu}} \quad (1-6)$$

$$E_a = 0.35 \left(0.5 + \frac{5u}{800}\right) (e_s - e) \quad (\text{对于自由水面})$$

$$E_a = 0.35 \left(1 + \frac{5u}{800}\right) (e_s - e) \quad (\text{对于矮秆作物})$$

式中  $E_p$ ——作物腾发量即作物田间需水量, mm;

$L$ ——腾发单位重量的水所需的热量, J/g, 该值随气温而变, 当气温为  $25^{\circ}\text{C}$  时,  $L = 2466\text{J/g}$ ;

$\frac{\Delta}{\nu}$ ——比值，式中  $\Delta$  为气温与水汽压关系曲线上的斜率， $\nu$  为湿度常数；

$H_0$ ——地面净辐射， $J/(cm^2 \cdot d)$ ；由气象仪器测定；

$E_a$ ——干燥力， $mm/d$ ，即在蒸发面上的温度等于气温时的蒸发量；

$u$ ——风速， $m/s$ ；

$e_s$ 、 $e$ ——饱和水汽压和实际水汽压， $hPa$ 。

式(1-6)是在土壤水分充足，作物覆盖茂密条件下的最大可能腾发量，即所谓潜在腾发量或潜在作物需水量。对不同作物不同生育阶段，应根据作物和土壤的具体情况折算为实际腾发量(实际田间需水量)。

经验公式法或能量平衡法中的主要参数均依据灌溉试验站的资料确定，因此做好试验站的工作是十分重要的。表 1-4 为综合我国各地灌溉试验站资料给出几种作物田间需水量的变化范围。

表 1-4

几种作物全生育期需水情况

单位： $m^3/亩$

作物	地区	年份		
		干旱年	半干旱年	湿润年
双季稻 (每季)	华中、华东	300~450	250~400	200~300
	华南	300~400	250~350	200~300
中 稻	华中、华东	400~550	300~500	200~450
一季晚稻	华中、华东	500~700	450~650	400~600
冬小麦	华北	250~500	200~400	160~350
	华中、华东	250~450	200~350	150~280
春小麦	西北	250~350	200~300	—
	东北	200~300	180~280	150~250
玉 米	西北	250~300	200~250	—
	华北	200~250	150~200	130~180
棉 花	西北	350~500	300~450	—
	华北	400~600	350~500	300~450
	华中、华东	400~650	300~500	250~400

## (二) 作物田间耗水量计算

作物田间耗水量，对旱作物和水稻可分别用不同的公式计算：

旱作物：田间耗水量 = 田间需水量

水稻：田间耗水量 = 田间需水量 + 水稻田渗漏量 + 育秧水 + 泡田水

作物田间需水量的计算已如上述，以下介绍水稻田渗漏量、育秧水和泡田水的确定方法。

### 1. 水稻田渗漏量

水稻田渗漏量包括田面渗漏量和田埂渗漏量，前者与土壤质地、地下水位高低、水田位置、灌排措施等有关，后者决定于田埂的质量、养护情况和田埂的位置等。对于连片的

面积较大的稻田，田埂渗漏量甚微，一般可忽略不计。对于分散位置较高的田块则应考虑田埂渗漏量。

目前尚难从理论上推算水稻田渗漏量，生产实践中以实测或调查方法确定。种稻多年的水田，在田面以下 20cm 左右处形成一个透水性较弱的土层，俗称犁底层。由于犁底层的作用会减小水分渗漏量。

### 2. 育秧水

通常采用下式计算育秧水：

$$\text{育秧水} = \text{秧田耗水量} - \text{有效降雨量}$$

式中秧田耗水量等于秧田日耗水量乘以秧龄期。据江苏省的资料，每亩秧田总耗水量为 300~400mm；有效降雨量等于秧田期降雨量乘以利用系数，有些地区中小雨利用系数取 0.5~0.7。

### 3. 泡田水

水稻在插秧前需耕翻耙平土地，在田面建立一定深度的水层，这部分水量为泡田水。泡田水多少与土壤性质、泡前土壤湿度、地下水位高低、泡田方法、泡田天数等有关。一般粘土和粘壤土泡田水量约为 50~80m<sup>3</sup>/亩，中壤土和砂壤土约为 70~120m<sup>3</sup>/亩，轻砂壤土约为 80~160m<sup>3</sup>/亩。一般常用调查的方法确定。

### (三) 灌区综合灌溉用水过程计算

计算步骤大致是：首先选择和确定作物种类和种植面积，然后计算各单种作物所需灌溉用水量，最后编制综合灌溉用水过程。

#### 1. 水稻灌溉用水量

(1) 水稻田水量平衡方程。任意时段水稻田水量平衡方程可写为

$$h_1 + P + m - \Sigma E - C = h_2 \quad (1-7)$$

式中  $h_1$ 、 $h_2$ ——时段初、末田面水层深度，mm；

$P$ ——时段内降雨量，mm；

$m$ ——时段内灌水量，又称灌水定额，mm；

$\Sigma E$ ——时段内田间耗水量，mm；

$C$ ——时段内排水量，mm。

以上各项数值也可用 m<sup>3</sup>/亩表示。

如果时段末田面水深  $h_2$  小于适宜下限  $h_{\min}$ ，表示本时段内必须进行灌溉，最小灌水量  $m_{\min} = h_{\min} - h_2$ ，最大灌水量  $m_{\max} = h_{\max} - h_2$ ；如果时段内降雨量较大，时段末田面水深  $h_2$  大于雨后最大蓄水深度  $h_p$ ，表示本时段内必须排水，排水量  $C = h_2 - h_p$ 。根据水稻田间耗水过程和降雨过程，按上述水量平衡方程计算，可求得各旬水稻灌溉用水量。

(2) 稻田田面水层。为了水稻正常生长，须在田间经常保持一定的水层深度。有三种田面水层深度对水稻生长起控制作用，它们是：

1) 适宜下限 ( $h_{\min}$ )：田间最低水深，主要控制作物不致因田间水深不足，失水凋萎影响产量。当田间实际水深低于  $h_{\min}$  时应及时进行灌溉。

2) 适宜上限 ( $h_{\max}$ )：在正常情况下，田间允许的最大水深，每次灌水时以此深度为限度。

3) 雨后最大蓄水深度( $h_p$ ):在不明显影响作物正常生长的情况下,为提高降雨的利用率,允许雨后短期田间蓄水的极限水深(即作物耐淹深度)。实际水深超过 $h_p$ 时应及时排水。

以上三种田面水深因自然条件、水稻品种、灌溉方式及管理经验等不同而存在差异。

## 2. 旱作物灌溉用水量

(1) 生育期用水。为了促进旱作物正常生长,要求土壤在作物根系活动范围的湿润层内保持一定的含水量。仿照水稻田水量平衡方程,土壤湿润层水量平衡方程可写为

$$W_1 + P' + K + m - E = W_2 \quad (1-8)$$

式中  $W_1$ 、 $W_2$ ——时段初、末土壤湿润层储水量, mm;

$P'$ ——时段内有效降雨量, mm;

$K$ ——时段内地下水补给量, mm;

$m$ ——时段内灌水量, mm;

$E$ ——时段内作物田间需水量, mm。

以上各项也可用  $m^3$ /亩表示。

有效降雨量  $P'$  为降雨量中扣除地面径流量和深层渗漏量以后,蓄存在土壤湿润层中可供作物利用的水量,常用下式计算:

$$P' = \sigma P \quad (1-9)$$

式中  $P$ ——降雨量, mm;

$\sigma$ ——降雨有效利用系数,它与降雨总量、降雨强度、土壤性质等有关,一般通过观测确定。分析河南、山西省资料得出  $\sigma = 0.7 \sim 0.8$ 。

地下水补给量  $K$  与地下水埋深、土壤性质、作物种类等有关。某些地区经验,地下水埋深在 1~2m 之内,可考虑地下水利用量占总耗水量 20% 左右;地下水埋深超过 3m 时,不考虑地下水补给。

如果时段末湿润层蓄水量  $W_2 < W_{\min}$ ,表示本时段内应进行灌溉,最小灌水量  $m_{\min} = W_{\min} - W_2$ ,最大灌水量  $m_{\max} = W_{\max} - W_2$ 。逐旬依次连续进行计算,即可求得旱作物灌溉用水过程。

(2) 湿润层深度与适宜含水量。不同作物、不同生育阶段有不同的土壤湿润层深度和适宜含水量。表 1-5 为河南省引黄灌溉试验场分析得出的小麦各生育阶段的土壤湿润层深度和适宜含水量。

表 1-5 河南省小麦各生育阶段土壤湿润层深度和适宜含水率

生育阶段	土壤湿润层深度(cm)	占干土重(%)			占田间持水率的百分比(%)
		青沙土	两合土	粘土	
出苗~返青	40	15~17	17~19	20~22	70~80
返青~拔节	60	15~17	17~19	20~22	70~80
拔节~抽穗	80	17~19	19~22	20~25	80~90
抽穗~乳熟	60	15~17	17~19	20~22	70~80
乳熟~黄熟	60	13~15	14~17	17~20	60~70
全生长期		15~19	17~22	20~25	70~90



土层含水量在达到毛细管最大持水能力时,最大悬着水的平均含水量,称为该土层的田间持水量。小于凋萎系数(植物由于水分不足开始发生永久凋萎时的土壤含水量称凋萎系数)的土壤含水量不能被作物吸收,所以土壤允许最小含水量  $W_{\min}$  应大于凋萎系数。北京地区的经验认为  $W_{\min}$  可取田间持水量的 60%。土壤最大含水量  $W_{\max}$  以不造成深层渗漏为原则,  $W_{\max}$  可取土壤田间持水量。土壤湿润含水量应经常保持在  $W_{\min}$  与  $W_{\max}$  之间,小于  $W_{\min}$  时需灌溉,最多可灌至  $W_{\max}$  为止。

(3) 播前用水。一般按下式计算

$$m_0 = 6.67(\beta_{\max} - \beta_0)\gamma h \quad (1-10)$$

式中  $m_0$ ——播前用水量,  $m^3/\text{亩}$ ;

6.67——单位换算系数;

$\beta_{\max}$ ——土壤最大持水率,以占干土重的百分数计;

$\beta_0$ ——播前计划湿润层实际含水率, %;

$\gamma$ ——湿润层土壤干容重,  $t/m^3$ ;

$h$ ——计划湿润层深度, m。

### 3. 灌区综合灌溉用水过程

某种作物某时段灌水定额求出后,可根据该作物的种植面积,求得净灌溉用水量

$$M_{\text{净}} = m\omega \quad (1-11)$$

式中  $M_{\text{净}}$ ——净灌溉用水量,  $m^3$ ;

$m$ ——灌水定额,  $m^3/\text{亩}$ ;

$\omega$ ——灌溉面积, 亩。

灌区内往往有多种作物,求出各种作物的灌水定额后,以各种作物种植面积比例为权重,将同时段各种作物的灌水定额进行加权平均,即可求得全灌区的综合净灌水定额。计算公式如下

$$m_{\text{综,净}} = a_1m_1 + a_2m_2 + \dots + a_nm_n \quad (1-12)$$

式中  $m_{\text{综,净}}$ ——某时段全灌区综合净灌水定额,  $m^3/\text{亩}$  或 mm;

$m_1, m_2, \dots, m_n$ —— $n$  种作物在该时段内的灌水定额,  $m^3/\text{亩}$  或 mm;

$a_1, a_2, \dots, a_n$ —— $n$  种作物灌溉面积占全灌区灌溉面积的比值。

全灌区某时段净灌溉用水量  $M_{\text{净}}$  由下式计算

$$M_{\text{净}} = m_{\text{综,净}}\omega \quad (1-13)$$

式中  $\omega$ ——全灌区的灌溉面积。

全灌区某时段毛灌溉用水量  $M_{\text{毛}}$ , 由下式计算

$$M_{\text{毛}} = \frac{M_{\text{净}}}{\eta_{\text{水}}} \quad (1-14)$$

式中  $\eta_{\text{水}}$ ——灌溉水量利用系数,其值与渠系长度、灌溉流量、沿渠土壤、水文地质条件、工程质量及管理水平等有关,一般可取 0.6~0.8。

综合净灌水定额与灌溉水量利用系数的乘积为综合灌水定额。作物生育期各时段综合灌水定额之和即为灌区综合灌溉定额。而全年各时段灌区灌溉用水量之和即为灌区年灌溉用水量。