



高等学校教材

灌排系统优化方法

武汉水利电力大学 刘肇祯 主编



PDG

高等学校教材



灌排系统优化方法

武汉水利电力大学 刘肇祯 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书内容主要介绍国外有关系统分析技术、自动控制技术、计算机辅助设计等在灌溉排水系统规划和管理中应用的成果和经验,其中包括灌溉制度与灌溉用水量、灌溉输水与配水、灌溉水库规划与管理、田间工程与农田排水、灌溉环境与综合水管理等部分。本书以叙述模型、方法及应用实例为主,也可供从事水利工作的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

灌排系统优化方法/刘肇祯主编. —北京:中国水利水电出版社, 1996

高等学校教材

ISBN 7-80124-258-0

- I. 灌… I. 刘… III. ①灌溉系统-规则-最佳化-方法-高等学校-教材
②排灌系统-规划-最佳化-方法-高等学校-教材 N. S27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 17461 号

书 名	高等学校教材 灌排系统优化方法
作 者	武汉水利电力大学 刘肇祯 主编
出 版	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京市密云红光照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 18印张 419千字
版 次	1997年6月第一版 1997年6月北京第一次印刷
印 数	001—380册
定 价	13.90元

前 言

80年代以来,国内高等院校有关专业先后为高年级本科生和研究生开设了系统分析及其应用等方面的课程。为了保证和提高教学质量,为教师和学生提供相应的教科书和教学参考书,是一项迫切而有意义的工作。同时,国内外学者在系统分析技术的应用领域内不断有涉及灌溉排水工程的研究成果和实践经验在有关学术刊物和学术会议上发表,需要加以概括、总结、归纳和提炼,以反映到教学内容中去。为此,在《一九九〇年至一九九五年高等学校水利水电类专业专科、本科、研究生教材选题和编审出版规划》中列出了本书的选题。

本书是一本选修教材和教学参考书,编写目的主要是向农田水利工程等有关专业本科生和研究生介绍近年来国外学者和工程技术人员在灌溉排水工程中运用系统分析、优化技术、自动控制技术、计算机辅助设计和管理等近代科学技术所取得的重要成就和最新成果。本书也可供从事水利工作的工程师和技术人员参考使用。编写本书主要参考了1988年以后有关国际学术会议论文集、国外出版的专著和国外有关知名学术刊物等。

全书共分灌溉制度与灌溉用水量、灌溉输水与配水、灌溉水库规划与管理、田间工程与农田排水、灌溉环境与综合水管理等五章,分别介绍在应用优化方法、系统分析技术以及自动控制技术时使用的模型、方法和实例。本书内容侧重方法和技术的应用,对基础理论问题的阐述从简。因此,本书读者应掌握系统分析的基本理论和基础知识,并对灌溉排水工程的主要内容比较熟悉,这是阅读本书的必要基础。

本书编写工作的分工是:第一章第一、二、三、六、七节:袁宏源、洪林,第四、五节:袁宏源、马文正;第二章:郭宗楼、刘肇祯;第三章第一、六节:马文正、刘肇祯,第二节:袁宏源、洪林,第三、七节:郭宗楼、刘肇祯,第四、五节:洪林、袁宏源;第四章:洪林、袁宏源;第五章:刘肇祯、郭宗楼;全书由刘肇祯主编统稿。本书由武汉水利电力大学冯尚友教授主审,提出许多宝贵意见,特致谢忱。本书在编辑出版过程中得到水利部教材编辑室奚广秀、王勤等同志的支持与帮助,一并致谢。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,定有不妥之处,恳请读者批评与指正。

编 者

1996年7月于武昌

目 录

前 言

第一章 灌溉制度与灌溉用水量.....	1
第一节 缺水灌溉的基本原理与应用	1
第二节 缺水灌溉制度的聚合 LP-DP 模型	22
第三节 缺水灌溉制度的模拟动态规划模型	31
第四节 多种作物水量分配的两级优化模型	38
第五节 季节内水量分配的随机动态规划模型	47
第六节 作物的最优种植面积	60
第七节 水稻的最优移栽日期	63
参考文献	70
第二章 灌溉输水与配水.....	72
第一节 输水控制方法	72
第二节 输水策略模型	81
第三节 输水实时控制	88
第四节 水稻灌区配水模拟	95
第五节 大型灌区配水模拟	99
第六节 最优配水策略	111
参考文献	117
第三章 灌溉水库的规划与管理.....	118
第一节 灌溉水库的机遇约束规划模型	118
第二节 灌溉水库的两级优化运行模型	125
第三节 多水库系统的多目标规划模型	136
第四节 多水库系统运行的随机优化模型	144
第五节 多水库系统的运行优化模拟模型	153
第六节 多水库系统运行的最优控制模型	162
第七节 水库最优供水的风险分析模型	173
参考文献	180
第四章 田间工程与农田排水	181
第一节 大型灌区的田间水管理自动化	181
第二节 田间工程的改建与优化水管理	187
第三节 排水系统规划设计的计算机辅助技术	197
第四节 排水再利用的优化方法	204
第五节 排水工程的优化设计	212
参考文献	218
第五章 灌溉环境与综合水管理.....	220
第一节 灌溉系统环境影响评估	220
第二节 考虑环境因素的水库规划模型	225

第三节	考虑水质因素的水库运行模型	237
第四节	环境监测模型	252
第五节	环境质量的随机模型	256
第六节	灌溉系统分析中均衡性准则的应用	262
第七节	水资源开发规划优化模型	267
第八节	综合水管理的定量优化方法	273
参考文献		281

第一章 灌溉制度与灌溉用水量

第一节 缺水灌溉的基本原理与应用

一、概述

从 40 年代至今,制定灌溉制度和灌溉用水量分配方案时所遵循的一个基本原则是:对于旱田作物,当土壤含水量降到某一允许下限值(即适宜土壤含水量下限)时,则应进行灌溉,并使灌溉后土壤含水量达到上限,即田间持水量。在这种条件下,作物腾发量达到最大值,并使其单位面积产量达到最大。近些年来,在制定灌溉水量分配方案时,为使灌溉水产生更高的效益,人们将灌溉区分为充分灌溉与非充分灌溉(又称缺水灌溉)两种。凡是以能达到作物最大腾发量或最大单位面积产量为目标的灌溉,称为充分灌溉;反之,作物实际腾发量小于最大潜在腾发量,或实际产量小于最大单位面积产量的灌溉,称为非充分灌溉。

在有些情况下,灌溉的最大效益可能来自对作物蓄意进行的缺水灌溉。这个结论得到了经济理论及过去一系列研究工作的证实。然而,从工程角度出发处理缺水灌溉是困难的。对于缺水灌溉系统的规划、设计和管理必须依赖于反映用水量与作物产量之间关系的作物生产函数。但是,由于生产函数自身的不确定性,用它精确预报产量事实上是不可能的。由此,准确知道什么样的用水水平产生最大效益也是不可能的。然而,缺水灌溉是一个有用的概念。当今,有许多农场显然很少得到研究部门的指导,也在尝试使一些农田灌水不足以增加净收入。

英格利施(English)于 1990 年试图把各项研究成果汇集成一个通用的分析框架,以处理缺水灌溉问题。该项工作没有再推导特定作物的生产函数,因为已有的各种形式的生产函数中任何一种都可用于分析中。在这项工作开始时,假定已有了生产函数。该生产函数将纳入分析框架中,以计算影响灌溉效益的所有经济因素。该分析显然是针对供水量受到限制的情况,而在这种情况下,缺水灌溉可望得到更大的效益。分析框架可用来估计任何给定环境下使效益最大的用水水平,也可估计能使缺水灌溉比充分灌溉获得更大效益的用水范围。估计这个可获效益的用水范围,可能是解决不确定环境下合理运用缺水灌溉的关键。

缺水灌溉的理论研究说明,在灌溉费用高或供水量有限时,缺水灌溉或许是有效益的。当然,缺水灌溉的实际价值还取决于应用它的特定环境。本节列出对哥伦比亚河流域一组农场缺水灌溉经济性能的详细研究成果,其目的在于对这种技术及经济性能有一个更好的理解。

只考虑用水的中介费用时(如直接与灌溉有关的能源及劳力费),缺水灌溉的优点可能并不明显。因此,本分析还考虑了作物生产的其他可变费用以及投资和其他固定费用。对于那些在本项研究工作中实施缺水灌溉的农场而言,在播种、施用化肥、收割、运行投资的利率、税收等方面费用的节省比直接灌水费用的节省更明显。

正确的经济分析还应考虑水的机会费用。正如理论研究中提到的,缺水灌溉所节省的

水的价值可能是一个更值得考虑的问题。在供水有限的情况下，农场主的目标是使单位用水量的收益最大，而不是单位土地的收益最大。

二、概念模型

1. 概化作物生产函数

图 1-1-1 描述灌溉用水量与作物产量之间的一般关系。虚线表示蒸腾量与产量的关系，实线表示灌水量与产量的关系。尽管图 1-1-1 建立了产量与蒸腾量的关系，但必须牢记，灌水方法可能对产量产生很大的影响，而与用水量的多少无关。灌水曲线可分成两个区：Ⅰ区是非充分灌溉区，Ⅱ区是过量灌溉区。

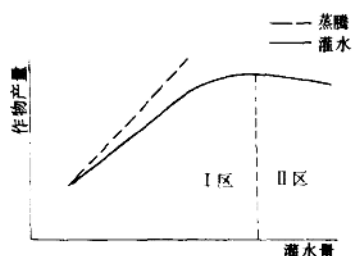


图 1-1-1 作物生产函数的一般形式

当灌水量很小时，它几乎完全被作物利用。喷洒损失及风的飘移将占到喷头配水量的一定份额，只有少量地表径流及深层渗漏发生。蒸腾与灌水曲线将大致重合。灌水量与产量的关系大致将呈线性增长直到充分灌溉的 50% 左右。

灌水量更多时，函数开始成为曲线，反映了用水量接近充分灌溉时所产生的各种水量损失。深层渗漏随着灌溉水量的增加而增加。如果在增加灌水量的同时也增加灌水次数，则将产生更大的蒸发以及较小的产量增长。总之，当用水量接近充分灌溉时，灌溉系统的用水效率将会降低。灌水效率的降

低在很大程度上与灌水量、作物特性及土壤特征的变化有关。

因此，在低水平灌水之下，Ⅰ区的灌水曲线将大致与线性蒸腾曲线相重合，而当用水达到高水平时，该曲线将加速脱离蒸腾~产量线。这条曲线如果能从数学上加以定义，则可作为作物的生产函数。

该曲线Ⅱ区的形状受其他因素支配。在产量最大点以后，曲线开始下降，其原因是庄稼倒伏、根系活动层通气性能降低、养分流失以及与过湿土壤有关的病害。由于在Ⅱ区影响产量的因素与Ⅰ区完全不一样，Ⅱ区应有适合的不同数学模式。这种关系的精确特征将是超量灌水时间、超灌期的温度以及其他因素的一个复杂函数。例如，土壤的涝渍在某些环境下能够对产量有显著的影响，但作物也能在其他环境下从超量灌水的影响中恢复过来。当灌水量超过作物需水量时，净效益将随灌水量呈线性函数减少。

2. 效益与费用函数

由于毛效益等于作物产量同一个常数（作物价格）的乘积，灌溉用水量与毛效益的关系将与图 1-1-1 中灌水曲线的一般形状相同。图 1-1-2 的效益函数表示这种毛效益曲线。使产量达到最大的灌水量为图 1-1-2 中的 W_m 点。

图 1-1-2 中直线表示总生产费用与灌水量关系的费用函数。费用函数有三个重要特征，一是它的下限，也就是与纵坐标的截距，它与投资费用、税收、保险以及灌水的其他固定费用有关。费用函数的第二个特征是它的坡度，它表示可变生产费用的边际值。它包括灌溉可变费用，如抽水费用、劳力及维修费用等。其他费用也可能随产量而变，就像产量随用水量变化一样。农场主可能根据期望的作物产量调整他的化肥用量，收割费用也可能随

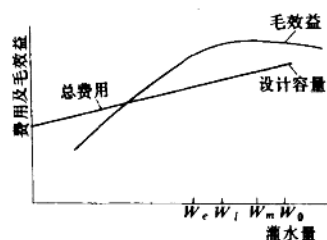


图 1-1-2 效益及费用函数

W_e —等量效益点。可以是土地有限时的等量效益点 W_{ed} ，即单位土地面积净收益正好等于充分灌溉时单位土地净收益的那一点，也可以是水量有限时的等量效益点 W_{ew} ，即单位水量净收益正好等于充分灌溉时单位水量净收益的那一点； W_l —单位土地面积净收益最大的灌水量； W_m —单位面积产量达到最大时的灌水量； W_o —过剩灌水量

产量而变化等等。所有这些因素都体现在费用函数的坡度之中。费用函数的第三个特征是上限，如图 1-1-2 中设计容量点所示，它表示灌溉系统的最大取水能力。虽然费用函数在图 1-1-2 中以直线表示，在通常情况下，它也可能是曲线。

如果土地是有限的，最优灌溉策略将是使单位土地面积取得的净收益最大，也就是使图 1-1-2 中两条曲线的差值最大。这个灌水量在图 1-1-2 中以 W_l 表示，它比 W_m 略小。因为这两条曲线在 W_m 左边范围内逐渐分开。如果灌水量更多 (W_m 或 W_o)，效益将随两条曲线的收敛而减少。根据经济理论， W_l 将是边际产量正好等于边际费用的那一点，也就是说，在这一点上费用函数的坡度等于毛效益曲线的坡度。

如果灌水量减到 W_l 点以下，将会达到 W_{ed} 点，在这一点上，单位土地面积的净收益正好等于充分灌溉时单位土地的净收益，在 W_m 与 W_{ed} 之间的范围内，其效益将比充分灌溉大。

3. 水的机会费用

农场运行往往受灌溉水量短缺的制约。在这种情况下，一块田地采用缺水灌溉而节约的水量可以用于多灌溉土地，这就增加了农场收益。农场收益增加的潜力是水的机会费用。在供水量有限的地方，机会费用可能是水管理中最重要考虑因素。当灌溉土地面积受到有限供水量的约束时，水的经济效益将由于减少灌溉水量及增加非充分灌溉面积而达到最大值，直到每公顷边际效益与灌溉公顷数的乘积正好等于每公顷总效益时为止。图 1-1-3 中的 W_o 表示这一点，即水的最大效益点。

如果灌水量减少到 W_{ew} 点以下，将会达到 W_{ew} 点。在这一点上，单位水量的净收益正好等于充分灌溉时单位水量的净收益，在 W_m 与 W_{ew} 之间的范围内，其效益将比充分灌溉大。

由于土地有限时的最优灌溉水平 (W_l) 或水量有限的最优灌溉水平 (W_{ew}) 将小于产量最大时的水平 (W_m)，投资费用可能由于设计一个供水能力 (容量) 较小的系统而减少，这种系统可能使用较小的干渠，少量配水支渠和较小或较少的井及水泵。图 1-1-3 说明了增加

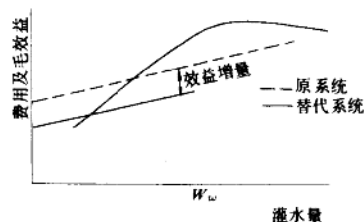


图 1-1-3 减少系统的容积
 W_m —单位水量净收益最大的
 灌水量

效益的潜力，它表示根据灌溉水平 W_m 设计一个配水系统的替代费用函数。

农场通常是对几种轮作的作物进行灌溉。有些作物很适合缺水灌溉而另一些作物则不适合缺水灌溉。例如，在哥伦比亚河流域，缺水灌溉的小麦有时与充分灌溉的土豆进行轮作。因此，灌溉系统很少能够在某些轮作年份内对土地实施充分灌溉。不过，由于农场总用水量因对任一种轮作作物实行缺水灌溉而减少，仍有可能因配水系统（泵、井及干渠）供水能力减少而减少投资费用。这些费用常常

是灌溉投资费用的主要组成部分。

4. 不确定性

如果图 1-1-1、图 1-1-2 和图 1-1-3 所示的关系曲线能准确确定，对任何特定情况选择一个最好的用水水平将是一件轻而易举的事。然而，只有费用函数是可以精确确定的，而作物生产函数却是变化很大而不可预测的。已知气候、土壤、原含水量分布均匀度的变化及其他因素也难以预测作物根系活动层中储存的水量。当这种不确定性与施用化肥对作物的影响、天气变化、病害、虫害等相结合时，给定灌水水平下的实际产量就相当不好预测了。这种不确定性暗示了经济上的风险。农作物生产人员可以通过用水策略、作物轮作等将风险减缓到一定程度，但实质程度的不确定性还会存在，而这种不确定性将会使准确确定最优用水计划的任何企图失败。这就是缺水灌溉的实质性问题。我们不可能知道用水量与产量关系曲线的准确形状，因此，也就不可能准确确定用水水平的最大效益是多少。

有人利用一个可能的灌水效益范围与腾发量 ET 为基础的生产函数相结合处理过这一问题。利用他们的方法，毛用水量曲线可以用一个允许变化的乘子加以改变，模拟用水量与产量关系的不确定性。然而，这种方法并没有考虑这个事实，即灌水无效性的真实特征将随灌水量的增加而变化。

5. 通用数学公式

有可能推导出一组方程式来估算上述变量的值 (W_m 、 W_f 、 W_w 、 W_d 、 W_{wm})，这些方程式对于分析系统设计及运行各种方案的最优用水量是有用的。正如前面讨论的，灌溉的效益将由灌溉水量、土壤原含水量、作物生产函数的形状、灌溉的变动及固定费用和作物价格等决定。这些因素对于每个农场及每一年都不一样。此外，随着条件的变化，农场可能选择不同的作物种植比例，并且这些决策将影响到水和土地的适用性。其结果是，对最优用水量的规定将随农场及年份而异。

假定我们所关心的只是一种作物，并且固定的土地及用水量已分配到生产该种作物。所有农场灌溉土地上的净收益 $I_f(W)$ 可用下式表示：

$$I_f(W) = A_i(W) \quad (1-1-1)$$

而每公顷净收益 $i_i(W)$ 则是灌水量的函数

$$i_i(W) = P_i Y(W) - C(W) \quad (1-1-2)$$

式中 $I_f(W)$ ——所有灌溉土地上的农场净收益 (美元);

A ——该作物的总灌溉面积 (ha);

$i_i(W)$ ——单位灌溉土地面积的净收益 (美元/ha);

P_c ——作物价格 (美元/kg);

$Y(W)$ ——单位土地面积的产量, 以 W 的函数表示 (kg/ha);

$C(W)$ ——单位土地面积的生产费用, 以 W 的函数表示 (美元/ha)。

灌溉面积 A 也可能是用水量的函数。如果供水量有限, 农场管理人员可能使足够多的土地得到灌溉而正好用光其供水量。那么灌溉面积将是,

$$A = \frac{W_T}{W} \quad (1-1-3)$$

式中 W_T ——可利用的总供水量 (m^3);

W ——单位土地面积的供水量 (m^3/ha)。

另一方面, 如果土地资源是有限的, 期望农场把所有可利用的土地都用于生产是合理的。这时, 灌溉面积将与 W 无关。

使产量达到最大的用水水平 (W_m) 可以对产量函数取导数求得,

$$\frac{\partial Y(W)}{\partial W} = 0 \quad (1-1-4)$$

满足式 (1-1-4) 的 W 值便是 W_m 。

当土地有限时, 为了确定使净收益最大的用水水平, 可对式 (1-1-1) 取偏导数:

$$\frac{\partial I_f(W)}{\partial W} = A \frac{\partial i_i(W)}{\partial W} + i_i \frac{\partial A}{\partial W} \quad (1-1-5)$$

在土地有限的情况下, A 是一个预先假定的常数。取导数等于零并消除 A , 最优用水水平 (W_i) 即可由下式确定:

$$\frac{\partial i_i(W)}{\partial W} = 0 \quad (1-1-6)$$

这也就是式 (1-1-2) 的导数, 并使其等于零。

当水量有限时, 正如前面指出过的, A 是 W 的函数, 最优的用水水平 (W_w) 可由式 (1-1-5) 确定。式 (1-1-5) 与式 (1-1-6) 的导数可以写成:

$$\frac{\partial i_i(W)}{\partial W} = P_c \frac{\partial Y(W)}{\partial W} - \frac{\partial C(W)}{\partial W} \quad (1-1-7)$$

$$\frac{\partial A}{\partial W} = -\frac{W_T}{W^2} \quad (1-1-8)$$

于是, 最优用水量方程式为:

$$P_c \frac{\partial Y(W)}{\partial W} = \frac{\partial C(W)}{\partial W} \quad (\text{土地有限时}) \quad (1-1-9)$$

$$\text{和} \quad W \left[P_c \frac{\partial Y(W)}{\partial W} - \frac{\partial C(W)}{\partial W} \right] = P_c Y(W) - C(W) \quad (\text{水量有限时}) \quad (1-1-10)$$

对 W 求解式 (1-1-9) 及式 (1-1-10) 将得到最优灌水量值 W_i 及 W_w 。

式 (1-1-9) 是一经济学公理的表达式, 即最优值出现在边际生产费用等于边际产值的那一点。式 (1-1-9) 的左边是边际产值的表达式, 而右边是边际费用。这就重复了早先的一段叙述, 即土地是一个限制因素时, 最优用水量将出现在图 1-1-2 中两条曲线的坡度相等的那一点 (W_l)。

式 (1-1-10) 表示的经济关系有所不同。如果重申式 (1-1-10) 是式 (1-1-5) 在评价优化时的一次重复描述 (即当导数取值等于零时), 式 (1-1-10) 的含义就看得更加清楚。得到的方程式为:

$$-A \frac{\partial i_l(W)}{\partial W} = i_l \frac{\partial A}{\partial W} \quad (1-1-11)$$

假定一个农场所有农田用水量都减少一个小数量, 而由此节约的水量用于增加灌溉的部分土地。式 (1-1-11) 的左边则表示所有原灌溉土地收益减少的累计值, 而右边则是增加灌溉土地所获得的收益。当这些量达到平衡时, 用水量就达到了最优水平。

上述方程式可用于确定 W_m [式 (1-1-4)]、 W_l 及 W_w [式 (1-1-9) 和式 (1-1-10)]。而两个等量用水水平 (W_n 及 W_w) 仍有待确定。将 W_m 代入式 (1-1-2), 充分灌溉的净收益由下式确定:

$$i_l(W_m) = P_c Y(W_m) - C(W_m) \quad (1-1-12)$$

然后, 再将这个净收益代入式 (1-1-2) 的左边,

$$i_l(W_m) = P_c Y(W) - C(W) \quad (1-1-13)$$

这个方程式的根将是使单位土地面积上生产的收益等于充分灌溉条件下收益时的用水水平, 那就是 W_n 。

同理, 水量有限时等量收益的灌水水平可从式 (1-1-1) 及式 (1-1-3) 导出, 即

$$I_j(W_m) = \frac{W_r}{W_m} i_l(W_m) \quad (1-1-14)$$

$$I_j(W_m) = \frac{W_r}{W} i_l(W) \quad (1-1-15)$$

然后, 从式 (1-1-15) 可解出 W_w 。

6. 确定最优用水量的特定方程式

式 (1-1-4)、(1-1-9)、(1-1-10)、(1-1-13) 和式 (1-1-15) 都是一般表达式。它们可用于推导计算最优灌溉用水量的显性公式。为此, 有必要首先提出产量与费用 [$Y(W)$ 与 $C(W)$] 的特定数学模型, 然后把把这些模型代入通式并解出不同的 W 值。

作为一个例子, 现假定产量函数可以用二次多项式表示

$$Y(W) = a_1 + b_1 W + c_1 W^2 \quad (1-1-16)$$

这种函数形式与灌水量函数在 I 区内的基本特征是一致的。该函数在低用水水平下近似为线性, 然后, 由于系统的非有效性随用水量的增加而增加, 使之迅速变为曲线。许多研究人员已对这种关系提出了一个二次函数。

费用函数可以合理地用线性函数表示:

$$C(W) = a_2 + b_2 W \quad (1-1-17)$$

其中系数 a_2 及 b_2 分别为固定生产费用及可变生产费用。

使分析人员感兴趣的各种用水水平 ($W_i, W_w, W_m, W_d, W_{cw}$) 可以将式 (1-1-16) 及式 (1-1-17) 代入早先推导出的通式中而推求出来。然后, 5 种用水水平可以表示为:

$$W_m = \frac{b_1}{2c_1} \quad (1-1-18)$$

$$W_d = \frac{b_2 - P_c b_1 + z_1}{2P_c c_1} \quad (1-1-19)$$

$$W_{cw} = \frac{-z_2 + [z_2 - 4P_c c_1 (P_c a_1 - a_2)]^{1/2}}{2P_c c_1} \quad (1-1-20)$$

$$W_i = \frac{b_2 - P_c b_1}{2P_c c_1} \quad (1-1-21)$$

$$W_w = \frac{(P_c a_1 - a_2)^{1/2}}{P_c c_1} \quad (1-1-22)$$

$$\text{其中} \quad z_1 = \left[(P_c b_1 - b_2)^2 - 4P_c c_1 \left(\frac{P_c b_1^2}{4c_1} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \right) \right]^{1/2} \quad (1-1-23)$$

$$\text{而} \quad z_2 = \frac{P_c b_1^2 - 4a_2 c_1 + 4P_c a_1 c_1}{2b_1} \quad (1-1-24)$$

三、实例研究

(一) 应用实例 I (单项因素)

用一个实例说明上述方程式的用法。最近邦纳维尔(Bonneville)电力管理局完成了哥伦比亚河流域的一项灌溉研究工作。图 1-1-4 表示各个农场 11 块冬小麦田的用水量与产量的关系, 这些数据是作为 1986 年研究工作的一部分而监测的。上述分析框架用于研究了某一块田, 即农场 L 的田块 7 (表 1-1-1) 的最优灌溉实践。图 1-1-4 中的实线四方形表示田块 L-7 的观测资料。农场用 409mm 水量灌溉那块

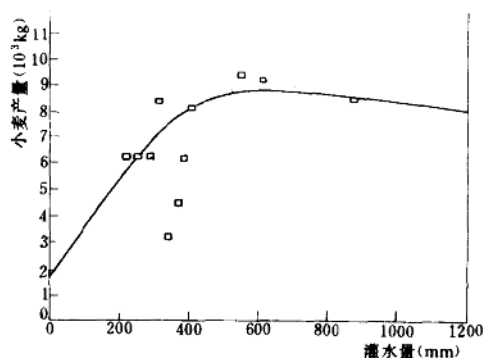


图 1-1-4 哥伦比亚河流域 11 块小麦田的灌水量与产量关系

田, 得到了 8140kg/ha 的小麦产量。正如一个当地修正过的彭曼(Penman)模型所估算的, 充分灌溉则需要 615mm 的水。图 1-1-4 中的实线是作物生产函数, 它是根据研究实例特定环境下的一个模拟模型推导出来的。(图 1-1-4 中呈现出来的产量变化是由许多因素造成

的,包括土地类型的差异,作物倒伏以及其他因素。这些数据在推导田块7的作物生产函数时没有用上。)

表 1-1-1 生产费用 (田 块 7)

费 用 分 类 (1)		生产费用(美元/ha)(2)
固 定 费 用	灌溉设备	152.36
	田间机械	116.23
	田间操作(耕作、施用化肥、种植)	114.73
	小 计	383.32
两 种 生 产 水 平 的 变 动 费 用	产量为 1950kg/ha 时(无灌溉)生产费用	
	施用 22.5kg/ha 氮肥时的费用, 单价为 1.273 美元/kg	28.7
	种子费用	6.92
	收割费用	63.36
	小 计	98.98
	产量为 8138kg/ha 时的生产费用	
	灌溉(42.2cm) 费用	137.59
	施用 117.9kg/ha 氮肥时的费用, 单价为 1.273 美元/kg	150.44
	种子费用	29.65
	收割费用	109.75
	小 计	427.44
总 费 用	无灌溉	482.30
	灌溉(42.2cm)	810.76
费用函数: 总费用 = 482.30 + 7.79W (美元/ha)		

图 1-1-4 所示的产量曲线是相当合理的。无灌溉时的预测产量是 1660kg/ha, 它与该地区农场旱田的产量十分吻合(典型的为 2000kg/ha 左右)。在有灌溉的情况下, 该函数预测的产量比其余 10 个田块上实测最高产量略小。

用水量在 0 到 615mm (充分灌溉) 内的产量曲线可用下列回归方程很好地近似表达:

$$Y(W) = 1445 + 242.13W - 1.96954W^2 \quad (1-1-25)$$

式中 $Y(W)$ —— 产量, 以 kg/ha 计;

W —— 灌水量, 以水层深度或 $10m^3/ha$ 计。

在分析中, 考虑了两种小麦价格: 0.0996 美元/kg 和 0.147 美元/kg。这两个价格中的较低值是 1986 年农场实际接受的价格, 它比近几年的价格低些, 这是不正常的。较高的价格是根据历史上的价格趋势估算出来的。式 (1-1-25) 乘以这两个价格, 就得到两个方案的

效益函数。这些函数点绘在图 1-1-5 上。

该田块的生产费用，在与农场主及运行管理人员协商后确定。其费用函数成果点绘于图 1-1-5 上，为

$$C(W) = 482.3 + 7.79W \tag{1-1-26}$$

式中 $C(W)$ —— 总生产费用，以美元/ha 计。

在图 1-1-5 上也显示了充分灌溉时的需水量 615mm 及实际灌水量 405mm。

利用式 (1-1-18) ~ (1-1-24) 可以确定每种作物价格下的 W_m, W_l, W_w, W_d 及 W_{ew} 等值。表 1-1-2 总结了分析结果。假定作物价格为 1986 年的低价格，在最优灌水量的情况下，农场正好好不亏不赢。实际用水量大致与估计的最优水平吻合。如果多灌水或少灌水，农场都会遭受损失。在较高作物价格下，最大净效益出现在用水水平稍高于实际灌水水平的情况下。

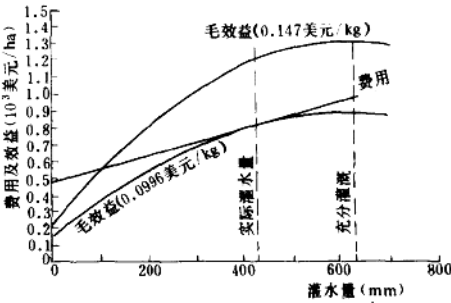


图 1-1-5 田块 L-7 的毛效益与生产费用

表 1-1-2 实例研究总结

灌溉策略 (1)	作物单价 0.0996 美元/kg		作物单价 0.147 美元/kg	
	用水量 (mm) (2)	$i(W)$ (美元/ha) (3)	用水量 (mm) (4)	$i(W)$ (美元/ha) (5)
W_m	615	-76.03	615	345.2
W_d	218	-76.03	346	345.2
W_{ew}	281	-34.71	152	85.17
W_l	416	4.56	481	397.6
W_w	415	4.54	305	309.0

在可利用的土地有限时，最优灌水策略是使土地净效益最大的那一个。在图 1-1-6 中，将土地净效益点绘成灌水量的函数。如上所述，缺水灌溉比充分灌溉有更高效益的范围在低小麦价格时是从 218mm 即充分灌溉用水量的 35% 处开始，在高小麦价格时是从 346mm 即充分灌溉用水量的 56% 处开始。这两种价格情况下的最优情况分别出现在充分灌溉用水量的 68% 和 78% 处。

在水量有限的情况下 (如图 1-1-7 所示)，缺水灌溉有效益的范围于低作物价格时是从充分灌溉用水量的 46% 处开始，而高作物价格时是从充分灌溉用水量的 25% 处开始。这两种价格的最优情况分别出现在充分灌溉用水量的 67% 和 50% 处。

这些结果可以下列两种方式中的一种加以利用。决策人员可以把最优用水量的估值看作是供水量的严格规定。或者说，知道图 1-1-6 和图 1-1-7 所提供的信息是表示不确定的估值，可以利用最优用水量的估值作为指南，同时利用有效益的缺水范围作为相应风险的一

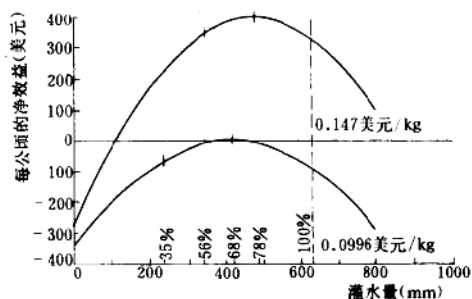


图 1-1-6 土地净效益 (土地有限)

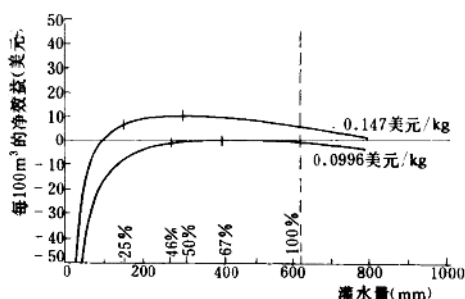


图 1-1-7 水量净效益 (水量有限)

个象征。如果这个范围很宽，则可认为风险小。一个很窄的范围将意味着更大的风险而且需要认真的考虑及管理。利用这些信息，结合自己关于风险及效益的感受和对估值的信心，决策人员即可以选一个与自己的偏好相吻合的用水水平。

(二) 应用实例Ⅱ (综合因素)

1. 合作农场简介

近年来，研究人员与哥伦比亚河流域内对小麦及玉米实施了缺水灌溉的农场主们进行了协作。在 1984~1986 年各季节期间的一项田间研究记载了其中某些农场的实践活动。对这些农场的实践进行的观测说明并确认了早期理论分析所提出的经济关系。

本例叙述了对小麦缺水灌溉的一些新的发现。在 3 年期间对 9 个合作农场冬小麦的用水进行了监测。这些农场是在熟悉当地农场灌溉实践的三个灌溉制度服务中心的帮助下挑选出来的，初步感兴趣的是那些近年来实施了缺水灌溉的农场。而另一些农场主则习惯于对它们的田块进行充分灌溉，这些农场可用来进行对比。表 1-1-3 列出了这些合作农场的有关特征。

每个农场的经济资料通过与合作农场主的交谈来收集。每一田块的生产输入，包括田间操作的劳力工时、机械工时以及肥料与农药等化学物品输入是从农场记载中摘录出来的。种植、收割和灌溉等田间工作的费用则可从每一田块使用的输入资料中计算出来。固定费用也是从农场记载中摘录出来的，它是现成的，或者是由一个经济咨询公司从农场设备利用情况的调查中估算出来的。如果费用要由许多田块进行分摊时，如抽水灌溉及配水系统，则可使用整个农场每公顷的平均费用。产量及作物价格各农场也有记载。

应当强调指出，费用是以若干不同的农场所提供的资料为依据的，这些农场从家庭操作的小农场到很大的合作农场，并有不同的记录制度和办法。虽然尽了最大的努力来保证精度，但从这些形形色色的资料来源中获取的费用资料可能是不太一致的。

田间资料的收集包括确定用水量及能源消耗量，测定季节内各时段的土壤含水量以及天气情况。在喷灌系统进口处装设了压力传感器及在线流量计，它们都装有显示累计记录的读数器和送到一台记录器上的电子输出设备。在整个灌溉季节内，以 15 分钟为一时段对喷头的压力及流量进行抽样、数字化并记录下来。累计流量的显示每两周进行一次读数并

表 1-1-3

合作农场概况

农 场	灌溉土地 (ha)	总土地面积 (ha)	灌溉土地百分数 (%)	提水扬程 (m)	运行压力 (kPa)	水泵/电动机 效率 (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
A	567	2428	23	146	379	71
B	4047	4047	100	145	276	74
C	1619	2266	71	168	551	70
D	372	1303	29	221	345	71
E	607	2023	30	85	345	70
F	1416	1619	87	177	414	70
G	263	3258	8	18	310	65
K	445	445	100	30	414	63
L	809	1416	57	127	379	65
备 注	农场 K 灌溉了全部土地, 但供水受到限制; 农场 C 对它进行灌溉的那部分土地实施了充分灌溉					

做记录(有两个农场只装有累计流量计)。灌水量及降雨量分别用雨量计测量。消耗的能量根据喷灌系统进水点处测得的静压力和流量、静扬程、估计的干管及支管水头损失以及水泵和电动机的效率试验来计算。

记录器及传感器的偶然失效造成了某些资料系列的短暂间断。这些缺测的资料可用其他的资料来源来填补。例如, 农场的灌水记录可用于填补某些情况下实测用水量的缺测点。各种资料来源的精度分析说明, 所有灌水量的确定, 其精度都在 $\pm 10\%$ 以内。这里报告的作物产量是田块平均产量, 按售出产品的重量确定。

2. 成果

总结评估了 9 个合作农场内的 31 块麦田。表 1-1-4 概括了这些田块的资料。7 个农场上的 19 个田块实施了缺水灌溉, 这些农场的观测资料列于表 1-1-4 的上半部。其余 3 个农场的 12 个田块实施了充分灌溉, 这些农场的观测资料列于表 1-1-4 的下半部。(农场 G 出现在表中的两部分内, 因为该农场的—个田块在—种情况下是缺水灌溉, 而在另—种情况下为充分灌溉)。

3. 用水量

图 1-1-8、图 1-1-9 及图 1-1-10 说明了在这 3 年中每—年内所研究田块上用水量与产量的关系。每年估算的充分灌溉需水量如图中阴影带所示。阴影带的宽度表示充分灌溉需水量的变化范围, 反映了各个农场不同的环境及管理实践。充分灌溉需水量是利用—个当地校正过的彭曼腾发量(ET)模型并结合利用—个灌溉系统效率模型而估算出来的, 腾发量(ET)的估值通常是用中子仪测得的土壤水分亏缺来确认。

正如图 1-1-8~图 1-1-10 所示, —些田块实施的是缺水灌溉, 缺水量为充分灌溉需水量的 30%~70%。同农场主们讨论后才发现, 他们一般是了解这些缺水的多少的。有些人还