



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

# 沟畦灌溉稳健设计

Robust Design of Border Irrigation and Furrow Irrigation

缴锡云 王维汉◎著



河海大学出版社  
HOHAI UNIVERSITY PRESS



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

# 沟畦灌溉稳健设计

Robust Design of Border Irrigation and Furrow Irrigation

缴锡云 王维汉◎著



河海大学出版社  
HOHAI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书针对沟畦灌溉的灌水质量不高、波动较大的问题,研究了灌水技术要素稳健设计方法。在定义沟畦灌溉的灌水质量损失指标并建立信噪比计算公式的基础上,根据田口稳健设计理论,对各影响因素进行了正交设计,并利用沟畦灌溉一维模拟结果计算各方案的信噪比,筛选信噪比最大的作为稳健设计方案。结果表明,与普通优化设计相比,采用稳健设计得到的沟畦灌溉技术方案能够有效提高灌水质量并减小其波动性。本书适用于从事灌溉方面的研究人员和相关专业的研究生。

### 图书在版编目(CIP)数据

沟畦灌溉稳健设计 / 缴锡云,王维汉著. —南京:  
河海大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-5630-3228-0

I. ①沟… II. ①缴…②王… III. ①沟灌—研究  
IV. ①S275.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 285151 号

书 名 / 沟畦灌溉稳健设计

书 号 / ISBN 978-7-5630-3228-0/S·73

责任编辑 / 隋亚安

特约编辑 / 谢 云

责任校对 / 王 奕

封面设计 / 黄 煜

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

网 址 / <http://www.hhup.com>

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 / 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 / 南京工大印务有限公司

开 本 / 720×1000 1/16

印 张 / 9.5

字 数 / 192 千字

版 次 / 2012 年 12 月第 1 版

印 次 / 2012 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 20.00 元

# 前 言

地面灌溉是目前世界上应用最广泛的灌水方法。在我国,地面灌溉占总灌溉面积的比例在 95% 以上,其中沟畦灌溉占了大部分,但是由于灌水技术把握不当导致灌水质量仍然不高。因此,提高地面灌溉的灌水质量对缓解农业水资源短缺的矛盾,促进灌溉农业的可持续发展具有重要的现实意义。

由于沟畦灌溉系统的复杂性,加之灌水技术要素(流量、沟畦规格、改水成数等)存在控制误差,自然因素(入渗参数、糙率等)存在显著变异性,往往使得灌水质量波动较大,实际灌水效果与设计预期相差甚远,这就迫切需要寻找一种能够降低各种因素误差、变异性对灌水质量影响的灌水技术设计方法。基于损失模型的稳健设计是由日本学者田口玄一(Taguchi)于 20 世纪 70 年代创立的旨在提高产品质量稳定性的一种设计方法,近年来在工业领域得到了广泛应用。本书尝试将稳健设计应用到沟畦灌溉系统设计中,以提高灌水质量及其稳定性,丰富地面灌溉设计理论。

本研究工作得到了国家自然科学基金项目(50679021, 50979025)和国家科技支撑计划课题(2011BAD25B02)的资助,谨此致谢!

在研究工作中,朱霞、李盼盼、朱艳、朱春光、虞晓彬、王志涛等多名研究生在沟畦灌溉模拟与稳健设计研究中作出了贡献,还有多名研究生参与了田间试验与资料分析,包括阿不都加、雷万达、翟铎、李锋、朱艳、王树仿、谢菊、王颖聪、刘一休、石艳芬、杨风亮、张仙、许建武、姚山虎、苏欣、郭思怡、韩红亮、宋静茹、王婧雅、潘增辉、艾尔肯、卢健、王耀飞、王辉、刘懿、杨静平等同学。在此一并感谢!

由于笔者学术水平有限,本书关于灌水过程中各因素控制误差或变异规律的研究还不够深入,同时在研究过程中也发现了一些新的问题需要进一步研究,因此难免有疏漏和不足之处,敬请批评指正。

## 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	001
1.1 地面灌溉的研究意义 .....	001
1.2 沟畦灌溉设计的基本概念与理论 .....	003
1.2.1 基本概念 .....	003
1.2.2 灌水质量评价 .....	005
1.2.3 田面水流运动的模拟 .....	006
1.3 沟畦灌溉设计的国内外研究动态 .....	007
1.3.1 灌水质量影响因素的变异规律 .....	007
1.3.2 地面灌溉模拟模型及其应用 .....	012
1.3.3 灌水技术要素的优化模型研究 .....	013
1.3.4 稳健设计理论研究及应用现状 .....	015
1.4 沟畦灌溉田间试验设计 .....	019
1.4.1 试验区概况 .....	019
1.4.2 田间试验布置 .....	020
1.4.3 田间试验观测 .....	021
<b>第 2 章 基于损失模型的稳健设计基本理论</b> .....	025
2.1 质量损失函数 .....	025
2.1.1 望小特性的质量损失函数 .....	025
2.1.2 望大特性的质量损失函数 .....	026
2.1.3 望目特性的质量损失函数 .....	026
2.2 信噪比计算 .....	027
2.2.1 望小特性的信噪比 .....	027
2.2.2 望大特性的信噪比 .....	027
2.2.3 望目特性的信噪比 .....	028
2.3 参数设计 .....	028
2.3.1 参数设计原理 .....	028
2.3.2 影响因素分类水平值确定 .....	029

2.3.3	正交试验设计	030
2.3.4	稳健技术参数的确定	031
2.4	容差设计	033
2.4.1	容差设计原理	033
2.4.2	容差设计方法	034

### 第3章 沟畦灌溉影响因素的变异规律

3.1	入渗参数的空间变异规律	035
3.1.1	田间试验设计与入渗参数估算方法	036
3.1.2	入渗参数的变异性分析	038
3.2	田面糙率的空间变异规律	041
3.2.1	糙率的估算方法	041
3.2.2	糙率的变异性分析	042
3.3	微地形的空间变异规律	043
3.3.1	田面平整精度指标的统计规律	044
3.3.2	纵坡的统计特征	045
3.4	沟畦规格误差的变异特征	046
3.4.1	畦宽误差	046
3.4.2	沟断面形状的变异特征	048
3.5	灌溉流量的变异特征	050
3.5.1	井间出流量的变异特征	050
3.5.2	井内出流量的变异特征	051
3.6	改水成数控制误差的统计特征	053

### 第4章 影响因素的变异性对灌水质量的影响

4.1	入渗参数变异性对灌水质量的影响	056
4.1.1	入渗参数对灌水质量的影响	056
4.1.2	入渗参数变异性对灌水质量的影响	058
4.2	糙率变异性对灌水质量的影响	060
4.3	田面微地形变异性对灌水质量的影响	062
4.3.1	田面平整精度对灌水质量的影响	062
4.3.2	纵坡变异性对灌水质量的影响	064
4.4	流量变异性对灌水质量的影响	066
4.5	改水成数变异性对灌水质量的影响	068
4.6	沟断面形状的变异性对灌水质量的影响	069

<b>第 5 章 基于稳健理论的灌水技术要素设计</b> .....	070
5.1 沟畦灌溉系统影响因素分类 .....	070
5.1.1 可控因素 .....	070
5.1.2 不可控因素 .....	070
5.2 灌水质量评价目标函数 .....	071
5.3 灌溉水流计算机模拟的正交试验设计 .....	072
5.3.1 可控因素的内表设计 .....	072
5.3.2 噪声因素的外表设计 .....	072
5.4 模拟结果分析 .....	074
5.4.1 信噪比计算结果 .....	074
5.4.2 灌水技术要素对信噪比的影响 .....	075
5.5 稳健灌水技术方案 .....	075
5.6 稳健灌水技术方案的验证 .....	075
5.6.1 一般优化计算结果 .....	076
5.6.2 稳健灌水技术方案与一般优化计算结果的对比 .....	076
<b>第 6 章 灌水技术要素的容差分析</b> .....	077
6.1 误差因素水平选取及试验设计 .....	077
6.1.1 误差因素水平确定 .....	077
6.1.2 模拟正交试验设计 .....	077
6.2 模拟结果分析 .....	078
6.2.1 方差分析辅助表 .....	078
6.2.2 总偏差平方和 .....	078
6.2.3 灌水质量的均方差及纯波动平方和 .....	079
6.2.4 方差分析结果 .....	079
6.3 各影响因素对灌水质量的贡献率 .....	080
6.4 灌水技术要素容差的确定 .....	081
6.4.1 灌水技术要素设计值的修正 .....	081
6.4.2 灌水技术要素容差的确定 .....	082
6.5 容差设计结果验证 .....	082
<b>第 7 章 沟畦灌溉稳健设计实例</b> .....	083
7.1 畦灌稳健设计 .....	083
7.1.1 畦灌系统影响因素分类及目标函数的确定 .....	083
7.1.2 畦灌计算机模拟的正交试验设计 .....	083

7.1.3	畦灌模拟结果分析 .....	086
7.1.4	稳健灌水技术方案 .....	100
7.1.5	稳健灌水技术方案的验证 .....	100
7.1.6	稳健灌水技术方案的容差分析 .....	103
7.2	沟灌技术要素的稳健设计 .....	112
7.2.1	沟灌系统影响因素分类及目标函数的确定 .....	112
7.2.2	沟灌计算机模拟的正交试验设计 .....	112
7.2.3	沟灌模拟结果分析 .....	117
7.2.4	稳健灌水技术方案 .....	131
参考文献 .....		132



# 第1章 绪 论

## 1.1 地面灌溉的研究意义

我国是一个水资源相对贫乏的国家,水资源总量约为 2.8 万亿  $\text{m}^3$ ,居世界第 6 位。人均水资源相当于世界平均值的 1/4 左右,明显偏少<sup>[1]</sup>。预计到 2030 年人口达到高峰时,人均水资源量仅有 1 760  $\text{m}^3$ ,因此,未来我国水资源紧缺的形势将更为严峻<sup>[2]</sup>,水资源短缺已严重阻碍了工农业生产发展、人民生活水平的改善。目前,中国已有 108 个城市严重缺水,40 多个城市进入了世界上严重缺水之列<sup>[3]</sup>。另一方面,我国用水浪费问题依然较为严重。2007 年全国用水消耗总量 3 022 亿  $\text{m}^3$ ,其中农业耗水占 74.6%,而农田灌溉的耗水率(消耗量占用水量的百分比)仅为 62%<sup>[4]</sup>。农业用水的利用效率低、浪费严重,加剧了水资源供需紧张的状况,因此,发展节水灌溉已成为缓解我国水资源紧缺矛盾的战略选择<sup>[5]</sup>。

在有限的水资源情况下提高粮食产量是 21 世纪灌溉农业面临的主要挑战<sup>[6]</sup>。目前,世界上农业可用的水资源正在逐渐减少,与其他用水相比其竞争力不强,估计到 2025 年人类淡水消耗量将占世界可利用淡水的一半以上,而农业用水又占人类淡水消耗的大部分,因而节水型灌溉是农业发展的必然选择<sup>[7]</sup>。中国可持续发展水资源战略研究综合报告中提出,地面灌溉节水技术耗能少、投入低,农民易掌握,符合国情和民情,因此节水灌溉技术应以改进地面灌溉为主<sup>[8]</sup>。

地面灌溉是目前世界上应用最广泛的灌水方法<sup>[9]</sup>,全世界的地面灌溉面积占灌溉总面积的 90%以上<sup>[10-11]</sup>,1997 年美国的这个比例为 50.7%<sup>[12]</sup>,中国为 95%,其中沟畦灌溉占了大部分<sup>[13]</sup>,因此,灌溉农业的可持续发展在很大程度上将取决于地面灌溉技术的改进与完善。目前,我国地面灌溉的灌水质量(如灌水均匀度、灌水效率等)仍然不高,因此在水资源日益紧缺的形势下,提高灌水质量仍然是地面灌水技术的研究重点。

地面灌溉具有投资省、技术简单、群众容易掌握等优点,多年来一直被广泛采用,也是我国农田灌溉的主体。目前,由于田间灌溉工程设施不够完善、农田规格和灌溉流量不合理、土地平整不够等原因,田间灌水质量不高(灌水均匀度、灌水效率等)<sup>[14]</sup>、浪费较为严重<sup>[15]</sup>。较低的田间灌水效率产生了灌溉水的深层渗漏,并将化肥和农药带入到深层土壤和地下水中,引起了农业面源污染及土壤的涝渍盐

碱化,破坏了农田生态环境<sup>[16]</sup>。通过应用不同的改进地面灌溉技术措施,提高灌水质量,可以大幅度减少地面灌溉过程中的水量损失,这对改变我国地面灌溉的落后状况,改善农田生态环境,从整体上缓解农业水资源短缺的矛盾,促进灌溉农业的可持续发展,具有重要的现实意义<sup>[17]</sup>。

鉴于我国水资源与能源短缺,广大农村地区的灌溉技术管理水平较低的现实,大面积推广喷灌、微灌等先进灌水技术还受到经济发展水平及土地经营方式等的限制,因此,我国在今后相当长的一段时间内,仍须加大田间节水技术的研究,大力研究和推广节水型地面灌水技术<sup>[18]</sup>。畦灌作为地面灌溉最主要的形式之一,在我国有着广泛的应用并取得了重要进展,但也存在着一系列的问题<sup>[19]</sup>。由于田面微地形、土壤入渗性能等具有显著的空间变异性<sup>[20-24]</sup>,而且灌水技术要素(流量、停水时间)存在一定的控制误差<sup>[25-28]</sup>,因此,当将基于个别畦灌技术试验得到的灌水技术方案应用于较大尺度的农田上时,很多畦田实际灌水效果与预期效果存在较大差异,导致了灌水质量在农田尺度上的显著波动。提高灌水质量的稳定性,也就是提高地面灌溉系统的稳健性,是推广先进地面灌溉技术,提高灌水质量的一个关键技术问题。提高灌水质量的稳健性有2个主要途径:一是工程措施,通过田间工程改造,如进行土地平整<sup>[29]</sup>、压实灌水沟土壤<sup>[30]</sup>、长畦改短畦等措施减小影响因素的变异性,从而提高地面灌溉系统的稳健性,国内外在此方面的研究推广已有不少的成果<sup>[31-32]</sup>;二是技术手段,考虑地面灌溉各影响因素的变异性或控制误差,采用已被广泛应用于工业的稳健设计理论,结合地面灌溉数值模拟模型来优化田间灌水技术要素组合,从而实现提高灌水质量稳定性的目的。

尽管利用工程措施来提高可控因素的精度是必要的,但是考虑地面灌溉的特点和经济、技术等方面的因素,欲使其控制精度对灌水质量的影响达到可以忽略的程度,在短时期内难以实现,并且成本也会很高。地面灌溉最显著的缺点就是管理粗放,灌水质量不易控制。因此,在我国目前的社会经济条件下,研究地面灌溉灌水技术要素稳健方案,采用数值模拟等方法来提高灌水质量的稳健性,是最为有效的手段之一,这对提高我国灌溉技术水平,发展节水农业,具有十分重要的意义。

基于损失模型的稳健设计是一种发展相对较为成熟的设计方法。其最显著的特征是在提高产品质量特性的同时,降低干扰因素对产品质量的影响。对任何一种产品来说,影响产品质量的干扰因素有很多,降低或消除这些干扰因素往往需要付出较高的经济代价。基于损失模型的稳健设计是通过寻找可控因素和干扰因素之间的相互影响,进而调整可控因素的水平组合来降低干扰因素的影响。因为可控因素往往容易调整,所以基于损失模型的稳健设计比直接消除或减小干扰因素更经济实惠。对于畦灌的灌水质量问题,影响灌水质量的因素有很多,包括灌水技术要素(灌水流量、畦田规格、改水成数等)、田面纵坡及土壤特性参数(入渗参数和

糙率系数)等。灌水技术要素的控制误差、田面纵坡及土壤特性参数的变异性将会对灌水质量产生一定的影响,要完全消除这些影响是不现实的,通过稳健设计,分析出这些因素与流量、畦田规格等的相互作用,可以筛选出稳健的灌水技术方案,进而提高灌水质量,并减小灌水质量对干扰因素的敏感性。

本书以畦灌为研究对象,分析灌水质量各影响因素的变异规律,模拟各影响因素变异性对灌水质量的影响,提出灌水技术要素的稳健设计方法,并揭示各影响因素对灌水质量的贡献程度。研究结果对提高我国灌溉技术水平,发展节水农业具有十分重要的意义。

## 1.2 沟畦灌溉设计的基本概念与理论

地面灌溉是指利用沟、畦等地面设施对作物进行灌水,水流边沿地面流动边向土壤入渗的灌溉方法。在地面灌溉过程中,灌溉水向土壤中的入渗主要借助于重力作用,兼有毛细管作用,因此,地面灌溉也称重力灌水方法。

地面灌溉是最古老的,也是世界上应用最广泛的农田灌溉技术措施。据统计,全世界地面灌溉面积约占总灌溉面积的95%,我国的地面灌溉面积所占比例也与世界水平相当,其中除水稻外,小麦、玉米、棉花、油料等主要旱作物多采用畦灌或沟灌。

与喷灌、滴灌等灌水方法相比,地面灌溉具有投资少,运行费用低,管理简单等优点,但灌水质量不易控制是其主要缺点。实践表明,如果运用得当,地面灌溉的灌水质量也可以达到较高的水平。

随着土地集约化规模经营的发展,大型农业机具的使用以及激光平地技术的应用,使得地面灌溉的灌溉质量有了很大的提高。计算机技术在地面灌溉设计和管理中的应用,为改进地面灌溉提供了更为有力的工具。

### (1) 畦灌 border irrigation

将田块用畦埂分隔成许多矩形条状地块,灌溉水以薄层水流的形式输入田间并渗入土壤的灌水方法。

### (2) 沟灌 furrow irrigation

将灌溉水引入田间垄沟,并借助重力作用及毛细管作用向灌水沟四周土壤入渗的灌水方法。

### (3) 格田灌 check basin irrigation

将田块用土埂隔成方格状地块,灌溉水在格田内建立起比较均匀的水层,水主要借助重力作用下渗的灌水方法。主要适于水稻及水生作物的灌溉。

#### 1.2.1 基本概念

##### (1) 地面灌溉的分类

按照灌溉水向田间输送的形式及湿润土壤的方式,地面灌溉一般可分为畦灌、

沟灌和格田灌等几类。

**畦灌** 畦灌是指将田块用畦埂分隔成许多矩形条状地块,灌溉水以薄层水流的形式输入田间并渗入土壤的灌水方法。畦灌又分末端封堵和尾端自由排水 2 种,我国的畦灌多属于前者,称封闭畦灌。畦灌通常适用于大田作物。

**沟灌** 沟灌是指将灌溉水引入田间垄沟,并借助重力作用及毛细管作用向灌水沟四周土壤入渗的灌水方法。沟灌也分末端封堵和尾端自由排水 2 种,我国的沟灌多属于前者,称封闭沟灌。沟灌主要适用于宽行距作物,如玉米、棉花及薯类等作物。

**格田灌** 格田灌是指将田块用土埂隔成方格状地块,灌溉水在格田内建立起比较均匀的水层,水主要借助重力作用下渗的灌水方法。主要适于水稻及水生作物的灌溉。

## (2) 土壤的入渗规律

**入渗** 入渗是指水分从土壤表面进入土壤的过程。入渗是灌溉过程中非常重要的一个环节,因为灌溉水正是通过入渗才被转化为土壤水从而被作物吸收利用的。

**入渗率** 单位时间内通过单位面积的土壤表面所入渗的水量,称为入渗率,常用  $i$  来表示,其单位一般用 mm/min 或 cm/min。入渗率也称入渗强度。

**累计入渗量** 在某一时段内,通过单位面积的土壤表面入渗的水量,称为累计入渗量,常用  $I$  来表示,单位一般用 mm 或 cm。

显然,入渗率与累计入渗量之间的关系为

$$i = \frac{dI}{dt} \quad (1.1)$$

或

$$I = \int_0^t i(t) dt \quad (1.2)$$

式中:  $t$  为入渗历时, min;  $i$  为入渗率, mm/min;  $I$  为累计入渗量, mm。

**入渗模型** 自 20 世纪初以来,不少研究者提出了经验性的或半经验半理论性的入渗模型,其中,影响较大的有考斯加可夫(Kostiakov)模型、考斯加可夫-列维斯(Kostiakov-lewis)模型、格林-阿姆特(Green-Ampt)模型、菲利普(Philip)模型、霍顿(Horton)模型等。这里只对灌溉设计中应用最为广泛的考斯加可夫模型加以介绍。

考斯加可夫模型属于经验性模型,是 1932 年由前苏联的考斯加可夫提出的,其表达式为

$$I = Kt^\alpha \quad (1.3)$$

式中:  $I$  为累计入渗量, mm;  $t$  为入渗历时, min;  $\alpha$  为入渗指数, 无因次;  $K$  为入渗系数, mm/min $^\alpha$ 。  $\alpha$ 、 $K$  统称为入渗参数,属于经验常数,本身无物理含义,一般由

试验资料求得。

由式(1.1)可得考斯加可夫模型的入渗率形式为

$$i = \alpha K t^{\alpha-1} \quad (1.4)$$

式中：各符号意义同前。

需要特别指出的是,对于沟灌来讲,由于其入渗界面是一个曲面而非平面,所以用前述定义的入渗率、累计入渗量来表示入渗性能存在一定的困难。一般将沟灌的入渗概化为以沟为中心,以沟距为宽度范围内均匀入渗。按照此概化模型,累计入渗量为

$$I = \frac{I_L}{d} \quad (1.5)$$

式中： $I$ 为累计入渗量,mm； $I_L$ 为单位沟长上的累积入渗水量,L/m； $d$ 为灌水沟的沟距,m。

### (3) 灌水技术要素

地面灌溉的灌水技术要素主要包括畦田(沟)规格、入畦(沟)流量、改水成数(或灌水持续时间)。地面灌溉设计的任务就是以完成计划灌水定额为前提,确定合理的灌水技术要素,以得到较高的灌水质量。

## 1.2.2 灌水质量评价

### (1) 地面灌溉的灌水过程

以末端封堵的畦灌为例,其灌水过程可分为推进、成池、消退、退水等4个阶段。

**推进阶段** 从放水入畦时刻开始,田面的水流前锋在到达畦尾前一直向前推进,这一过程称为推进阶段。

**蓄水阶段** 水流前锋到达畦尾后,开始积水成池,直至畦首切断灌水流量为止,这一阶段称为蓄水阶段。

**垂直消退阶段** 畦首切断灌水流量后,土壤入渗使得田面积水逐渐减少,直至畦首的地表水深为0,露出地面为止,这一阶段称为垂直消退阶段。

**水平消退阶段** 畦首露出地面后,畦田的积水部分的土壤入渗仍然在持续,田面积水逐渐减少,退水前锋不断地由畦首向畦尾移动,直至达到畦尾为止,这一阶段称为水平消退阶段。

在实际灌水过程中,蓄水阶段不一定存在,对于顺坡畦灌通常没有蓄水阶段和垂直消退阶段。当 $t_{co} > t_L$ 时,有蓄水阶段;当 $t_{co} \leq t_L$ 时,无蓄水阶段。对于土壤入渗能力中等以上的顺坡畦灌,为了提高灌水均匀度,常常在水流推进到田块末端以前切断灌水流量,即 $t_{co} \leq t_L$ ,所以无蓄水阶段。

## (2) 灌水质量评价指标

目前,对于地面灌溉的灌水质量评价,最常用的指标有灌水均匀度和灌水效率。

**灌水均匀度** 灌水均匀度是指灌溉范围内,田间土壤湿润的均匀程度,通常用沿畦(沟)长多点入渗水深的值进行统计计算

$$E_d = 1 - \frac{\Delta I}{\bar{I}} = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |I_j - \bar{I}|}{\bar{I}} \quad (1.6)$$

其中 
$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_j$$

式中:  $E_d$  为灌水均匀度,无量纲;  $n$  为沿畦(沟)长测量的入渗水深的横断面个数;  $I_j$  为第  $j$  个横断面上的平均入渗水深,沟灌的入渗水深为单位沟长上的入渗水量除以沟距计算得到,mm;  $\bar{I}$  为沿畦(沟)长各横断面的平均入渗水深,mm;  $\Delta I$  为沿畦(沟)长各横断面的入渗水深的平均离差,mm。

**灌水效率** 灌水效率是指灌溉范围内,计划湿润层内增加的水量与灌入田间的水量之比,其计算式为

$$E_a = \frac{W_1}{0.06qt_{co}} \quad (1.7)$$

其中 
$$W_1 = \frac{1}{1000} \left[ I_{req} x_c + \sum_{j=n_c}^{n-1} \left( \frac{I_j + I_{j+1}}{2} \Delta x_j \right) \right]$$

式中:  $E_a$  为灌水效率,无量纲;  $W_1$  为单位宽度上渗入有效根系贮水层的水量,  $m^2$ ;  $q$  为入畦(沟)单宽流量,沟灌的入沟单宽流量应以单沟流量除以沟距求得,  $L/(m \cdot s)$ ;  $t_{co}$  为灌水持续时间,  $min$ ;  $I_{req}$  为按灌水定额计算的需要入渗水量,  $mm$ ;  $x_c$  为超灌与欠灌分界点对应的离畦首的距离,  $m$ ;  $n$  为沿畦(沟)长测量的入渗水深的横断面个数;  $n_c$  为  $x_c$  对应的横断面序号;  $\Delta x_j$  为沿畦(沟)长方向第  $j$  个横断面和第  $j+1$  个横断面之间的距离,  $m$ ;  $I_j$ 、 $I_{j+1}$  分别为第  $j$  个横断面、第  $j+1$  个横断面上的平均入渗水深,沟灌的入渗水深为单位沟长上的入渗水量除以沟距计算得到,  $mm$ 。

此外,作为评价灌水质量的附加指标,还有贮水效率、需水效率、深层渗漏率和尾水率等。

### 1.2.3 田面水流运动的模拟

田面水流运动模拟的目的就是要通过求解数学模型来计算田面水流运动过

程,得到其运动特性,以便评价灌水效果,选择合理的灌水技术要素。

### (1) 田面水流运动的基本方程

畦灌水流是透水底板上的明渠非恒定流。整个灌水过程可分为推进、蓄水、垂直消退和水平消退几个基本阶段,各阶段的地面水流运动规律均满足圣维南方程组(Saint-Venant Equations)

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = -i \\ \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} = g(S_0 - S_f) + \frac{Vi}{2h} \end{cases} \quad (1.8)$$

式中:  $h$  为地面水深, L;  $V$  为断面平均流速,  $LT^{-1}$ ;  $t$  为时间, T;  $x$  为沿畦长方向的距离, L;  $i$  为入渗率,  $LT^{-1}$ ;  $S_0$  为田面纵坡;  $S_f$  为阻力坡降;  $g$  为重力加速度,  $LT^{-2}$ 。

圣维南方程组是田面水流运动规律的基本方程。在该方程组中,第1个方程为连续方程,第2个方程为动量方程。将其与入渗模型联立,便可得到完整的田面水流运动数学模型。

圣维南方程组是一阶非线性双曲型偏微分方程组,目前还难以得到其严格的解析解。采用数值计算的方法进行求解是一个有效的途径,目前以经过简化的零惯量模型应用较为广泛。

### (2) 田面水流运动的零惯量模型

Strelkoff 等(1977)将动量方程中的惯性项和加速度项忽略,得到简化的水动力学模型,即零惯性量模型(Zero-Inertia Model)

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = -i \\ \frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f \\ i = f(t) \end{cases} \quad (1.9)$$

由于实际田面水流的水深很小、速度很慢,所以这种简化是较为合理的。Strelkoff 等利用零惯性量法计算了畦灌的田面水流运动特性,结果令人满意。

## 1.3 沟畦灌溉设计的国内外研究动态

### 1.3.1 灌水质量影响因素的变异规律

灌水质量影响因素包括入渗参数、糙率、田面微地形、流量、沟畦规格和改水成数等<sup>[13]</sup>。地面灌溉系统的设计、管理和评价及数学模拟模型的确定都需要大量的

技术参数,灌溉性能对这些参数表现出了不同程度的敏感性<sup>[28, 13]</sup>,灌区不理想的灌水效果将会带来一系列的社会、经济、环境问题<sup>[33]</sup>。在灌水技术设计时,常假定土壤入渗特性均一、畦宽恒定、田间纵坡平坦等,并以此来确定入畦流量及灌水时间。但实际上,受农田土地平整、田间耕作、地面灌溉等人为生产活动干扰的影响,田面微地形分布状况及畦田规格参数表现出一定的时空变异特性<sup>[34, 20, 35]</sup>,即田面是凹凸不平的微地形环境,畦宽在畦长方向上也有变化,受非均质分布性状影响土壤入渗特性也显示出较强的时空变异性<sup>[36]</sup>,这对以田面土壤作为输水和受水界面的地面灌溉而言,地表水流的推进过程及消退过程必然受到影响,进而使畦田的灌水质量随之波动。

Mailhol 针对不同灌溉形式流量变差情况的调查分析表明,闸管灌溉系统的流量变差系数在 5%~28% 范围内,而软管灌溉系统的流量变差系数甚至可以超过 35%<sup>[37]</sup>。由于中国农业分散经营的特点,在农田的实际灌水过程中,灌水流量、改水成数相对于设计值都存在一定的控制误差。因此,这些参数的空间变异性的存在必然会对畦灌的灌水质量产生影响。国内外许多学者对畦灌各因素的变异规律及其对灌水质量的影响进行了研究。

#### (1) 入渗参数的变异性及其对灌水质量的影响

土壤入渗特性是影响地面灌溉过程的重要因素,是地面灌溉系统设计的重要依据<sup>[38, 28, 39]</sup>,其空间变异性也是实施精细农业耕作管理的主要障碍之一<sup>[40]</sup>。入渗参数的变异性使得地面灌溉系统的管理变得困难了许多。由于入渗参数估计的精度不够,往往会使得地面灌溉的设计与管理不合理,从而产生大量的深层渗漏或径流失,进而引起广泛关注的面源污染问题<sup>[41]</sup>。土壤特性空间变异的研究始于 1960 年,自 1970 年以来,土壤特性空间变异一直是人们关注的研究热点,早期的研究方法基于传统统计学原理,根据变异系数的大小确定土壤特性变异程度的强弱,但由于该方法假设样本之间是完全独立的并以服从正态分布为前提,它只能在一定程度上反映样本总体,而不能定量地描述土壤特性的随机性和不规则性。后来,人们应用地统计学原理,采用半方差函数来定量研究土壤特性的空间变异,它克服了传统统计学方法的缺点,是目前土壤特性空间变异研究的一种重要方法。在入渗模型确定之后,入渗参数是土壤入渗性能的定量表示,因此其确定方法及空间变异性分析是地面灌溉研究的重要内容之一,特别是在进行地面灌溉数值模拟时显得尤为重要。入渗参数的确定方法主要有 2 种,野外试验直接测定法和灌溉试验估算法。野外试验直接测定法主要采用双环入渗仪及一些入渗计等<sup>[26, 42-47]</sup>,这种方法耗时、繁杂<sup>[48]</sup>,而且静态的水分入渗状况不能很好地模拟田面水流运动状况下的土壤入渗过程<sup>[49]</sup>。灌溉试验估算法主要是利用田间灌水资料进行参数估算,包括两点法<sup>[50]</sup>、一点法<sup>[44]</sup>、优化算法<sup>[51, 41, 52]</sup>及一些改进算法<sup>[53-56]</sup>等,这些方法不仅需要水量平衡条件,还需要流量、水流运动参数、田块几何尺寸等,甚至需



要一些难以定值的系数(如地表储水形状因子)<sup>[57-58]</sup>,而且所得到的计算结果为一个平均值,不能充分反映整个田面入渗能力的差异性<sup>[50]</sup>。土壤结构由于灌溉和降雨的原因会不断地发生变化<sup>[59]</sup>,这就使得土壤的入渗特性在相同的土壤水分条件下会有较大的差异。人们对入渗参数的空间变异性进行过大量的研究<sup>[60-61, 26, 42, 43, 62]</sup>,发现入渗参数在田间尺度上存在一定的时空变异性,并建议在灌水技术要素设计中充分考虑入渗参数的变异性<sup>[63]</sup>。Vieira (1981)采用地统计学研究入渗参数时发现,128个样本点获得的信息和1280个样本点获得的一样多。Haws等采用地统计学研究了稳定入渗率受空间尺度影响的情况,结果表明在坡面景观尺度上用入渗计测定稳定入渗率需要的范围远大于区域尺度RMA<sup>[64]</sup>。Bautista等研究发现,累积入渗量和入渗率的空间变异系数分别达到53%和21%<sup>[61]</sup>。Trout和Mackey通过对50条完整灌水沟的研究也发现入渗率的变异系数达到25%<sup>[65]</sup>。但针对土壤入渗性能的空间变异性对灌水质量影响的研究还是近些年的事情。Or Dani基于Philip入渗模型,对入渗参数的(沟间)空间变异进行了分析,并利用蒙特卡罗随机模拟的方法,研究了入渗参数空间变异性对水流推进过程和灌水质量的影响<sup>[24]</sup>。Raghuwanshi在进行沟灌系统设计时,评价了入渗参数的变异对灌水效率、深层渗漏率和尾水率的影响<sup>[66]</sup>。Mateos建立了考虑入渗参数变异的数学模型,并分析了入渗参数的空间变异性对灌水质量的影响,认为其对灌水均匀度的影响较大,对灌水效率的影响较小<sup>[10]</sup>。Mailhol等假定累计入渗量和入渗历时为线性关系,对入渗参数的空间(沟间)变异性、时间变异性进行了分析,利用蒙特卡罗随机模拟的方法研究了入渗参数时空变异性对灌水质量的影响<sup>[37]</sup>。Oyonarte等通过试验与计算分析,着重研究了Kostiakov入渗参数、灌水沟湿周、入渗历时的空间变异性,并分析了它们对沟灌入渗量空间变异性的影响,认为入渗参数的影响较大<sup>[39, 67]</sup>。Ito研究了考虑入渗和沟断面参数的空间变异性情况下的沟灌最优设计,并分析了由于不考虑入渗和沟断面参数空间变异所造成的经济损失<sup>[68]</sup>。有研究表明,田间土壤入渗性能的时空变异性对灌水均匀度的影响较大,在田面平整精度较好且设计坡度为零的情况下,入渗参数空间变异性对畦灌性能的影响非常显著,在实际应用中不容忽视<sup>[69]</sup>。Philip分析了由单个测点得到的入渗数据来估算灌水质量带来的误差,认为灌水流量、纵坡及停水时间导致了入渗参数计算结果的差异性,从而产生了灌水效率估算的实际误差<sup>[70]</sup>。

目前,在农田尺度土壤入渗特性空间变异的研究中,地统计学方法(Geostatistical approach)和尺度法(Scaling approach)是主要的分析工具<sup>[71]</sup>。基于地统计学方法研究土壤入渗特性的空间变异规律,弥补了经典统计学不考虑样本点空间分布的不足,提供了一种分析土壤结构特性的有效方法<sup>[72-73]</sup>,为提高灌水过程预测、模拟的精度提供了有效途径,获得了广泛应用<sup>[45, 64, 74]</sup>。地统计学方法在田间尺度