

● 国家自然科学基金资助项目
● 国家"九五"科技攻关项目

覆膜灌溉 理论与技术要素 试验研究

缴锡云 王文焰 张江辉 丁新利 著

中国农业科技出版社

国家自然科学基金资助项目

国家“九五”科技攻关项目

覆膜灌溉理论与 技术要素的试验研究

缴锡云 王文焰 张江辉 丁新利 著

中国农业科技出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

覆膜灌溉理论与技术要素试验研究/缴锡云等著. 北京: 中国农业科技出版社, 2001.10

ISBN 7-80167-248-8

I. 覆… II. 缴… III. 灌溉, 地膜覆盖-研究

IV. S275.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 071190 号

责任编辑	杜 洪
责任校对	张京红 贾晓红
出版发行	(中国农业科技出版社 邮编: 100081) 电话: (010) 68919711; 68975144; 传真: 62189014
经 销	新华书店北京发行所
印 刷	温泉印刷厂
开 本	850mm × 1168mm 1/32 印张: 5.75
印 数	1~500 册 字数: 160 千字
版 次	2001 年 10 月第一版 2001 年 10 月第一次印刷
定 价	25.00 元

前 言

我国是一个水资源短缺的国家，尤其是黄淮海流域和西北干旱地区这一问题更为突出。因此合理开发利用有限的水资源就成为我国改善人民生活及发展国民经济的重大任务。

众所周知，开源节流是解决水资源短缺的重要途径。根据一些发达国家的经验，在工农业发展过程中，农业用水比例逐渐降低，但绝对数量则基本保持不变，新开发的水资源量主要用于工业和生活用水的增加，而农业则主要靠节约用水以保持自身的发展。改革开放 20 年来，我国农业年用水总量占全国用水总量的比重从 88% 下降到 72%，维持在 $3900 \times 10^8 \text{ m}^3 \sim 4000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，基本处于零增长。到 21 世纪中叶，我国人口将增加到 16 亿，经济将达到中等发达国家水平，据估计全国总用水量将增加到 $8000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右，而农业用水的比重将下降到 52% 左右。由此可见，国内外的经验均表明，随着农业经济的不断发展，农业用水的供求矛盾只能靠自身的节约用水来得到解决。

无论如何，农业是耗水大户，这种局面在短时期内不会有性质上的改变。目前，我国灌溉水的利用率仅为 45% 左右，与发达国家 80% 的利用率相差很远，因此农业节水的潜力很大。目前，农业节水的措施很多，田间节水技术是其中的一个重要方面。

地膜覆盖栽培技术最早是日本于 1955 年开始在全国推广应用的，其增产效果非常显著。之后，世界上的一些发达国家也开

始推广该项技术。我国于 1978 年自日本引进了该项技术，目前全国地膜覆盖种植面积已居于世界首位。覆膜灌溉是在地膜覆盖栽培技术的基础上，由我国新疆首创的一种灌溉方法。实践证明，这是一种节水增产效果显著、成本低廉的实用地面灌溉方法，值得大力推广。目前，仅新疆就推广覆膜灌溉面积近 $100 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，取得了巨大的经济效益和社会效益。然而，对于覆膜灌溉来讲，由于田面的入渗性能和糙率都与露地灌溉有着显著的差别，所以原来从露地灌溉试验中得到的技术要素（如灌水流量、改水成数等），已不适用于覆膜灌溉。配套的灌水技术研究相对滞后，已经成为阻碍覆膜灌溉推广的重要影响因素。因此，针对覆膜灌溉，研究灌水技术问题，以取得较高的灌水均匀度和灌水效率，有着重要的现实意义。

本书是结合西安理工大学王文焰教授主持的国家自然科学基金项目“膜孔灌溉理论与技术要素的研究”（项目编号：59779027）、新疆水利水电科学研究院张江辉副研究员主持的国家及新疆“九五”科技攻关项目子专题“覆膜灌溉田间节水技术体系的研究与示范”（项目编号：95-01-04-03）及缴锡云主持的河北省教育厅博士基金项目“冬小麦膜孔灌溉试验研究”的成果综合完成的。全书主要包括 3 部分内容：1) 膜孔入渗的理论与试验研究；2) 覆膜灌溉的田间入渗特性与田面水流运动特性研究；3) 覆膜灌溉的灌水技术方案优化设计。

在室内外试验过程中，得到了西安理工大学张建丰高工、王全九教授、费良军教授、汪志荣副教授等的无私帮助；新疆水利水电科学研究院的郭谨工程师、潘渝工程师、毛广斌工程师、周黎勇工程师等参加了棉花覆膜灌溉的田间试验；河北工程技术高

等专科学校的田树魁副教授、李少华高工及沧州市农业局的郭虎将高工、路素梅高工等参加了冬小麦膜孔灌溉的田间试验；在试验过程中，还得到了新疆乌兰乌苏农业气象试验站孔祥耀站长、新疆农业科学院土壤肥料研究所钟新才副研究员、米恩孟副研究员、门旗副研究员等的大力协助。在成书过程中，得到了新疆水利水电科学研究院领导和清华大学雷志栋教授、杨诗秀教授的热情支持。在此，谨向以上各位老师和朋友致以衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中一定还有许多不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

缴锡云

2001 年 10 月于清华园

E-mail: jiaoxiyun@263.net

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
1 研究背景与意义	(1)
1.1 开展节水灌溉研究的意义	(1)
1.2 覆膜灌溉的发展	(3)
1.3 覆膜灌溉中需要重点研究的问题	(4)
1.4 覆膜灌溉理论与技术要素研究的意义	(5)
2 国内外覆膜灌溉研究概况与进展	(9)
2.1 膜孔入渗规律的研究现状	(9)
2.2 田间入渗参数估算方法的研究现状	(19)
2.3 覆膜灌溉田面水流运动特性的研究现状	(27)
3 本书的研究内容与研究方法	(34)
3.1 研究内容	(34)
3.2 研究方法	(35)
第二章 膜孔入渗的试验研究	(37)
1 单点膜孔入渗的试验研究	(38)
1.1 试验装置	(38)
1.2 湿润体描述	(39)
1.3 单点膜孔的入渗模型	(40)
1.4 单点膜孔入渗影响因素的研究	(42)
1.5 湿润锋的发展规律	(45)
1.6 湿润土体平均含水率的变化规律	(50)
2 多点膜孔干扰入渗的试验研究	(51)
2.1 试验装置	(52)

2.2	湿润体描述	(53)
2.3	多点膜孔干扰入渗的入渗规律	(55)
2.4	湿润深度的发展规律	(62)
3	膜孔二维入渗的试验研究	(63)
3.1	试验装置	(64)
3.2	试验结果	(65)
第三章	膜孔入渗的数值解法	(71)
1	单点膜孔入渗的数值解法	(71)
1.1	单点膜孔入渗的数学模型	(71)
1.2	离散化方法	(73)
1.3	计算方法	(76)
1.4	试验验证及计算结果	(78)
2	膜孔二维入渗的数值解法	(82)
2.1	膜孔二维入渗的数学模型	(83)
2.2	离散化方法	(85)
2.3	计算方法	(87)
2.4	试验验证及计算结果	(88)
第四章	单点膜孔入渗的线性化解析法	(91)
1	控制方程	(91)
2	控制方程的数学变换	(92)
2.1	控制方程的线性化	(92)
2.2	控制方程的齐次化	(94)
2.3	初始条件与边界条件	(94)
2.4	转化为一维扩散问题	(95)
3	方程求解	(96)
3.1	解析解	(96)
3.2	计算方法	(96)
4	算例	(97)
4.1	基本资料	(97)

4.2 计算结果	(98)
第五章 覆膜灌溉田间入渗特性的研究	(101)
1 田间入渗参数的推求	(101)
1.1 覆膜灌溉的入渗模型	(101)
1.2 田间入渗参数的推求方法	(104)
2 覆膜灌溉的田间入渗特性	(112)
2.1 试验的基本情况	(112)
2.2 观测资料及入渗参数估算结果	(114)
2.3 覆膜灌溉的田间入渗特性分析	(117)
3 覆膜灌溉田间入渗参数的预测	(121)
3.1 不同开孔率的入渗参数预测	(121)
3.2 不同灌水季节的入渗参数预测	(123)
第六章 覆膜灌溉田面水流运动特性的研究	(124)
1 覆膜灌溉田面水流运动特性的试验研究	(124)
1.1 水流推进过程	(125)
1.2 水流消退过程	(127)
1.3 灌水试验效果分析	(129)
2 覆膜灌溉田面水流运动的数值模拟	(132)
2.1 田面水流运动的数学模型	(133)
2.2 田面水流运动的数值计算	(135)
2.3 模拟计算与结果验证	(136)
3 棉花覆膜灌溉的糙率系数	(137)
3.1 糙率系数的推求方法	(137)
3.2 糙率系数的估算结果	(138)
4 冬小麦膜孔灌溉的田面水流运动分析	(138)
4.1 试验区概况	(139)
4.2 入渗参数及糙率系数	(140)
4.3 田面水流运动分析	(141)

第七章 覆膜灌溉最优灌水技术要素的计算.....	(146)
1 灌水质量评价方法	(146)
1.1 常用的灌水质量评价指标	(146)
1.2 灌水均匀度与灌水效率的关系	(147)
2 灌水技术要素对灌水质量的影响	(149)
2.1 流量对灌水质量的影响	(149)
2.2 开孔率对灌水质量的影响	(150)
3 覆膜灌溉的灌水技术优化设计	(152)
3.1 优化设计的数学模型	(152)
3.2 最优灌水技术要素	(153)
第八章 结论.....	(157)
1 主要研究结论	(157)
2 有待于进一步研究的问题	(160)
参考文献.....	(162)

第一章 绪 论

1 研究背景与意义

1.1 开展节水灌溉研究的意义

随着工业与农业的发展,人类对水的需求量不断增加,尤其是第二次世界大战以后,世界经济发展突飞猛进,用水量也随之急剧增加。据统计,在1900~1980年的80年中,全世界的用水量增加了4.7倍^[1]。目前,缺水与人口、环境、能源问题一样,已成为很多国家和地区面临的四大危机之一。

我国每公顷耕地占有水资源量为 28700m^3 ,仅为世界平均值的80%,人均占有水资源量只有 2300m^3 ,相当于世界人均水平的1/4,是世界上13个贫水国之一^[1]。按现状用水统计^[2],全国在中等干旱年份,农业缺水 $300 \times 10^8\text{m}^3$,工业与城市生活缺水 $58 \times 10^8\text{m}^3$ 。按九五发展目标测算,农业发展 $333.3 \times 10^4\text{hm}^2$ 灌溉面积需增加用水量 $300 \times 10^8\text{m}^3$,工业与城市生活需增加 $120 \times 10^8\text{m}^3$,合计为 $420 \times 10^8\text{m}^3$ 。水资源分布极不均匀的客观现实,更加剧了我国的水资源危机。特别是北方地区,耕地面积占全国的3/5,而水资源量仅占全国的1/5,水资源短缺已严重地制约着这一地区的经济发展。

随着农业生产规模不断扩大和气候的变化,干旱缺水越来越严重地影响到我国农业的持续发展。20世纪70年代全国农田受旱面积 $1100 \times 10^4\text{hm}^2$ 以上,20世纪90年代增加到 $2700 \times 10^4\text{hm}^2$ 以上。1997年,我国北方地区又遭受大旱,受灾面积达 $3300 \times$

10^4 hm^2 以上，因旱绝收和不能播种的面积近 $470 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，因旱减收粮食 $425 \times 10^8 \text{ kg}$ 。据专家预测，全球气候将继续变暖，我国干旱缺水的总趋势将不可逆转。因此，节约用水，缓解水资源危机，已成为刻不容缓的任务。

目前，我国灌溉面积占耕地面积的 50% 左右，全国年灌溉用水量为 $3800 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占总用水量的 3/4。由于灌水技术、管理水平不高等原因，灌溉水的有效利用率很低，有效利用的灌溉水只有 1/3 左右^[3]。农业先进的国家，如以色列，灌溉水有效利用率可达 70% ~ 80%。因此，节约灌溉用水是缓解我国水资源危机的一项重要措施。提高用水效率、发展节水灌溉势在必行。

灌溉水从水源到合成农作物的干物质，要经过输水、配水、灌水而形成土壤水，其中一部分被作物吸收成为植物水用于合成干物质，另一部分在以上各环节中，通过渗漏、蒸发损失掉。节水灌溉的研究任务，就是要探求从水源到形成农作物干物质各环节中的节水增产措施。概括起来，灌溉节水有以下几个途径：

(1) 优化配置区域水资源

水资源的优化调配、地表 - 地下水联合调度以及微咸水 - 淡水混合灌溉等措施。

(2) 减少从水源到田间输水过程中的水量损失

渠道衬砌、管道输水等是效果良好的节水工程措施。

(3) 实施先进的灌水技术

目前先进的灌水技术有喷灌、滴灌、覆膜灌溉、隔沟灌、小畦灌等。灌水技术的研究目的主要是通过调控灌水流量等要素来提高灌水均匀度、灌水效率，从而达到田间节水的目的。

(4) 制订合理的灌溉制度

近年来，针对各类作物，各地根据当地的自然条件研究出了许多节水效果较好的灌溉制度，特别是在缺水地区进行的非充分灌溉试验已取得了一些重要的研究成果。

(5) 实施农艺节水技术

农艺节水技术包括：节水增产的水肥综合管理技术、蓄水保墒的耕作技术、适雨种植的作物合理布局、秸秆及地膜覆盖的增温保墒技术、抗旱剂及保水剂的应用技术，以及节水抗旱作物品种的选育选用技术等。

近年来，我国在节水灌溉方面取得了许多重要的研究成果，经过示范与推广产生了巨大的经济效益和社会效益。然而，与其它科学一样，各项节水灌溉理论与技术成果本身仍需要不断深化与完善，此外许多新的灌溉方法的出现也对灌溉理论与技术提出了新的要求，比如覆膜灌溉的出现从一开始就呼唤着与之配套的系统的灌溉理论与技术。因此，节水灌溉理论与技术是一个重要的、长期的研究课题。

1.2 覆膜灌溉的发展

日本首先于 1948 年开始对地膜覆盖栽培技术进行研究，1955 年开始在全国推广这一技术。到 20 世纪 60 年代，世界上的一些发达国家也开始推广该项技术。我国于 1978 年自日本引进地膜覆盖栽培技术。这是一项成功的农业增产技术，是我国六五期间在农业科技战线上应用作物种类多、适用范围广、增产幅度大的一项重大科技成果，并取得了巨大的经济效益和社会效益。目前，我国的地膜覆盖种植面积已居世界首位^[4]。

起初，地膜覆盖栽培技术主要用于蔬菜和旱地种植。随着该项技术的推广，覆膜作物的灌溉以揭膜灌的方式进行。在 20 世纪 80 年代初期，我国的新疆自治区首创了覆膜灌溉（也称膜上灌溉）技术^[5]，它是在地膜覆盖栽培的基础上，将地膜铺在畦内，灌溉时水从膜上流动的一种灌水方式。现在覆膜灌溉已衍生出了开沟扶埂膜上灌、培埂膜上灌、膜缝灌、膜孔灌和膜上膜侧灌等许多形式^[6]。与此同时，全国其它一些省市也进行了覆膜灌溉试验研究，河北、河南等地还研究出了麦棉套种情况下的覆膜

灌溉方式^[7,8]。

·覆膜灌溉属于地面灌溉的一种方式。膜孔灌溉和膜上膜侧灌溉是覆膜灌溉中一种最先进的灌溉方式，它是利用地膜输水，通过作物的出苗孔、专用灌水孔及膜侧渗水带入渗来进行灌溉，是现行各类覆膜灌溉技术实践中最有发展前景的一种节水新技术。由于其节水、增产效果好，所以受到了普遍关注，目前已在我国的新疆等地广泛推广。近年来，小麦穴播覆膜栽培技术的出现，使得膜孔灌溉和膜上膜侧灌溉不仅适用于蔬菜、棉花、玉米等作物，也适用于冬、春小麦。

1.3 覆膜灌溉中需要重点研究的问题

覆膜灌溉是一种新型的灌溉方式，在大面积推广的同时，还有许多问题需要加以研究。目前，需要重点研究的问题有以下几个方面：

(1) 灌溉制度的研究

由于各地的气候、土壤等自然条件差异较大，所以在覆膜灌溉条件下的灌溉制度也必然应该有所不同。虽然在过去十几年中，许多地区针对覆膜灌溉进行过一些试验研究，取得了一些成果，但是由于在膜孔灌溉及膜上膜侧灌溉条件下的地膜覆盖率高、灌溉水有效利用率高，所以与其它覆膜灌溉条件下的灌溉制度应有所不同。因此针对各地区的自然条件，进一步研究覆膜灌溉条件下的灌溉制度，十分必要。

(2) 灌水技术的研究

灌水技术研究的任务就是通过田间试验与理论分析，提出合理的灌水技术要素，以使灌溉最均匀、灌水效率最高。对于覆膜灌溉来说，至今还没有一套科学、系统的灌水技术理论。特别是对于膜孔入渗规律、田面水流推进与消退规律等还有待于进一步研究。

(3) 农艺问题的研究

由于各地的气候、土壤等自然条件差异较大，因此对于在作物生长后期是否揭膜以及何时揭膜等问题都不能一概而论，需要针对各地区的自然条件加以研究。例如，对于覆膜棉花，在新疆按昌吉回族自治州等地的情况以不揭膜为好；而在山西当降雨量较大时则要在7月中、下旬揭膜，否则脱铃、烂铃较多，显著减产^[9]。此外，播种时间、施肥方式等也需要进一步研究。

(4) 农机具的研制与改进

目前新疆建设兵团已经开发出铺膜、打埂、播种联合一次完成的大型机械，使用效果很好。但是，对于目前我国以家庭联产承包为主的农业生产形式来说，更需要轻便、灵活的小型铺膜、打埂、播种机械。该问题是涉及覆膜灌溉能否大面积推广的重要问题，应加以认真解决；配合覆膜灌溉的追肥机械的开发研制，也是一个重要问题。目前在某些地方所采用的“一炮轰”是将所有肥料全作为底肥在播前施入，以后不再追肥。实践证明，这种方法并不科学，在作物生长后期往往会因肥料不足而出现早衰现象。

目前，农业研究部门已经推出了长效缓释化肥，对于解决覆膜灌溉的施肥问题是一个促进，但尚需进一步研究，以期取得更为稳定的效果。

1.4 覆膜灌溉理论与技术要素研究的意义

实践已经证明，覆膜灌溉的节水增产效果非常显著，并且成本低、适用范围广，具有广阔的应用前景，因此应大力推广。由于灌水效果的好坏直接影响到作物产量的高低，因此直接影响到人们对覆膜灌溉的正确认识，所以其灌水技术及其相关理论是覆膜灌溉发展中亟待解决的问题，覆膜灌溉理论与技术要素研究是

推动覆膜灌溉这项新技术健康发展的关键因素之一。

1.4.1 覆膜灌溉是一种效果显著的节水灌溉技术

覆膜灌溉是在地膜覆盖栽培技术基础上发展起来的一种新的灌溉方法，是一种效果显著的节水灌溉技术。它是将地膜平铺在畦中，畦田全部或部分被地膜所覆盖，从而实现利用地膜输水，并通过作物的出苗孔、专用灌水孔及膜侧渗水带入渗来进行灌溉的方法。膜孔灌溉、膜上膜侧灌溉是覆膜灌溉中较为先进的两种方式，与一般的覆膜灌溉相比，节水效果显著，主要表现在：

(1) 地膜覆盖率高，保温保墒效果好

膜孔灌溉的地膜覆盖率一般在 97% 左右，膜上膜侧灌溉的地膜覆盖率一般也在 80% 左右，而膜侧沟灌、膜缝灌方式下的地膜覆盖率一般在 80% 以下。因此，膜孔灌溉的保温保墒效果更好。据新疆水利水电研究所观测^[10]，在膜孔灌溉条件下，棉花生长期为 70 天，平均日耗水量为 4.1mm；在膜侧沟灌条件下，棉花生长期为 75 天，平均日耗水量为 14.7mm。灌后 7 天内，膜孔灌溉与膜侧沟灌相比，膜下 5cm 的土壤积温高出 2.3℃。

(2) 具有局部灌溉的效果，提高了水的利用率

侧沟灌、膜缝灌时，膜下土壤中的水分靠侧向入渗来补给，因此沟底或膜缝下方的土壤含水率大而膜下的土壤含水率相对较低；进行膜孔灌溉时，水通过膜孔渗入土壤，因此土壤的湿润范围与作物的根系分布更加吻合。据新疆水利水电研究所观测^[10]，在相同的灌水定额（ $275\text{m}^3/\text{hm}^2$ ）的情况下，膜孔灌与膜侧沟灌，苗行下 30cm 的土壤平均重量含水率分别为 18.2%、14.1%。因而，在膜孔灌溉条件下水分的有效利用率更高。

(3) 可以通过调节膜孔的分布等措施，提高灌水均匀度

对于地面灌水技术来讲，传统的地面灌水技术，由于人们无法对灌溉水流的推进与入渗所共有的界面特性（农田土表特性）进行调控，因此在灌水定额一定的情况下，只能通过调节入畦流

量和灌水时间以求达到最佳灌水质量，这在灌水实践中是很难实现的。1978年美国提出的波涌灌溉，就是通过间歇向畦中灌水的方式，试图改变各周期的水流界面特性（糙率降低、入渗能力下降）来为下一周期创造一个有利于提高灌水质量的新界面，从而达到节水的目的。覆膜灌溉是在利用地膜种植的同时，为灌溉提供一个人们可以根据灌水要求，自行设计和调控的人工界面。这个界面不仅较传统地面灌的田面特性，以及波涌灌所形成的表土致密层的特性简单而稳定，更重要的在于它为加快水流推进过程、实现小定额灌溉，以及提高灌水效率提供了重要条件。

1.4.2 覆膜灌溉具有广阔的应用前景

覆膜灌溉作为一种新的地面灌溉技术，具有显著的节水、增产效果，应用前景十分广阔。

(1) 随着超薄膜的出现，目前地膜价格已经降到 0.06 元/m^2 左右。按种棉花计算，与露地灌溉相比，覆膜灌溉可增产 $10\% \sim 15\%$ ，农民增收 $750 \sim 1800 \text{ 元/hm}^2$ ，并节水 30% 以上，而地膜投入只有 600 元/hm^2 。因此经济效益相当显著^[11]。

(2) 随着对残膜回收机具的研制与改进，以及可降解薄膜成本的进一步降低，残膜污染将得到解决，不会成为阻碍这一先进灌溉技术的因素。

(3) 据统计^[12]，我国现有耕地面积约 $1 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。到 1995 年，我国灌溉面积达 $0.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，其中中低产田占 $0.13 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，地面灌溉面积占总灌溉面积的 98% 以上。因此，发展覆膜灌溉不仅能增加单产，而且可通过节水来扩大灌溉面积。

(4) 随着小麦全生育期地膜覆盖栽培技术的推广，小麦覆膜灌溉将得以实现与推广。新疆巴音郭楞蒙古自治州 1997 年对春小麦进行的覆膜灌溉试验表明^[13]，覆膜灌溉春小麦与露地春小麦相比较，在节水 51% 的情况下，平均增产 1465 kg/hm^2 。

综上所述，覆膜灌溉有着广阔的推广前景。发展覆膜灌溉是