

# 集雨模式与氮肥运筹 对农田土壤水热状况 和作物水氮利用效率的影响

银敏华 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 集雨模式与氮肥运筹 对农田土壤水热状况 和作物水氮利用效率的影响

银敏华 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

中国西北地区降水年际变率大、年内分配不均衡的气候特点和氮肥投入量大、当季利用率低的生产现状,严重制约了农业可持续发展。本书分析了垄覆白膜沟不覆盖、垄不覆盖沟覆秸秆、垄覆白膜沟覆秸秆和垄覆黑膜沟覆秸秆(以平作不覆盖为对照)对农田土壤水分、温度、硝态氮和作物(冬小麦和夏玉米)生长生理、产量及水氮利用效率的影响。同时,尿素设置4个施氮水平(基追比为4:6),控释氮肥设置5个施氮水平(一次性基施),探究了不同氮肥运筹对作物生长和氮素吸收利用的影响。研究得出了冬小麦与夏玉米合理的集雨种植和氮肥运筹模式。

本书内容对农业工程及相关学科的科研工作者具有一定的参考与借鉴意义。

### 图书在版编目(CIP)数据

集雨模式与氮肥运筹对农田土壤水热状况和作物水氮利用效率的影响 / 银敏华著. — 北京:中国水利水电出版社, 2020.6

ISBN 978-7-5170-8616-1

I. ①集... II. ①银... III. ①降水—蓄水—影响—耕作土壤—研究②氮肥—影响—耕作土壤—研究 IV.

①S155.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第099892号

书 名	集雨模式与氮肥运筹对农田土壤水热状况和作物水氮利用效率的影响 JIYU MOSHI YU DANFEI YUNCHOU DUI NONGTIAN TURANG SHUIRE ZHUANGKUANG HE ZUOWU SHUI—DAN LIYONG XIAOLÜ DE YINGXIANG
作 者	银敏华 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 13.75印张 269千字
版 次	2020年6月第1版 2020年6月第1次印刷
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

干旱半干旱地区是中国乃至世界范围内农业生产的重要组成部分，也是粮油和林牧产业的主要基地。该地区气候干燥，地表水资源匮乏，降水量少且变率大。近年来，随着经济的快速发展、人口的增加以及生态环境建设的推进，工业用水、生活用水和生态用水量大幅度提升，使得本来就“屈指可数”的农业用水量“所剩无几”。中国是农业大国，农业年用水量占全国用水总量的60%以上，而灌溉水利用效率仅为50%左右，每立方米水的粮食生产能力仅1.03kg，远低于其他发达国家，这意味着中国在农业用水方面具有较大的改善与提升空间。发展节水农业、降低农业用水量、提高单位水资源利用效率是今后中国农业发展的客观要求和根本途径。现阶段，常见的农业节水措施包括：采用合理的种植模式集蓄降水，提高降水资源利用率；利用渠道衬砌与管道输水等方式，大大减少输配水渗透；改善灌水方式、种植模式、种植结构和田间管理措施；开发研制新型节水材料；优化用水管理体制等。

人口的持续增长，工业化、城镇化进程的加速以及退耕还林的生态需求，使得耕地面积呈逐年下降趋势。这对中国的粮食安全提出了新的考验，提高单位耕地面积的粮食产出是解决人地矛盾的有效手段。化肥尤其是氮肥的引入对中国农业生产力的快速增长发挥了积极作用。目前，中国已成为世界上最大的氮肥生产国和消费国。中国能以占世界7%的耕地面积养活占世界20%的人口，这在很大程度上依赖于氮肥的使用。然而，目前在农业生产实践中，过量施用氮肥的现象普遍存在，尤其是在果树、设施蔬菜等经济作物生产中更为突出。过量使用氮肥不仅会降低作物产量，提高农业生产成本，而且会诱发一系列生态环境问题。因此，研究氮肥的科学施用以及通过作物的生长状况进行氮素营养诊断显得尤为迫切。

本书以提高资源利用效率、保护农田生态平衡和实现干旱半干旱地区稳产高产的可持续发展为根本出发点，采用冬小麦-夏玉米轮作的种植制度，针对降水年际变率大、年内分配不均衡的气候特点，在常规施氮条件下，采用全程微型聚水二元覆盖，最大限度地实现自然降水的高效利用和时空调节，并改善作物耕层的土壤温度、养分状况，从而为作物创造适宜的生长环境。在此基础上，当作物生长关键期发生持续干旱时，进行必要的补充灌水，以保证作物的正常生长。针对氮肥投入量大、当季利用率低的普遍现象，在常规灌水条件下，利用控释氮肥代替普通尿素，以实现节能减排、环境保护和增产高效的有机统一。研究得出了高产、高效、环保和节能的冬小麦和夏玉米集雨施氮模式，可为进一步完善集雨种植体系提供一定的理论支撑，可为干旱半干旱地区农业的高产稳产提供切实可行的技术途径，也可为控释氮肥的开发研制和推广应用提供一定的理论参考。

本书内容的研究得到了国家重点研发计划项目子课题“内陆干旱草原区高效节水灌溉技术与集成应用”（2016YFC0400306）、公益性行业（农业）科研专项“河西走廊玉米小麦田间节水节肥节药综合技术方案”（201503125）和“残膜污染农田综合治理技术方案”（201503105），以及甘肃农业大学公招博士科研启动基金“覆膜施氮模式调控紫花苜蓿水氮吸收利用机制研究”（GAU-KYQD-2018-08）和甘肃省高等学校创新能力提升项目“西北荒漠灌区紫花苜蓿增产优质高效的覆盖节灌模式研究”（2019A-57）的资助，在此深表感谢。

由于笔者水平有限，书中难免有错误之处，恳请广大读者批评指正。

**编者**

2020年3月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景介绍	1
1.2 目的和意义	2
1.3 农田集雨种植技术的研究进展	3
1.3.1 雨水集流和集水农业的含义	4
1.3.2 垄沟集雨种植与传统覆盖的区别	4
1.3.3 农田垄沟集雨种植的研究进展	5
1.3.4 二元集雨种植的增产机理	13
1.4 氮肥优化管理技术的研究进展	14
1.4.1 氮肥在农业生产中的地位	14
1.4.2 氮肥施用不当产生的问题与对策	15
1.4.3 氮肥优化管理技术	16
1.4.4 缓/控释氮肥的发展与应用	20
1.4.5 现有的氮素营养诊断技术	25
1.5 存在的问题	25
1.6 研究内容	26
1.6.1 集雨模式对农田土壤水热状况和作物水氮利用效应的影响	27
1.6.2 氮肥运筹对作物生长和氮素吸收利用的影响	27
1.7 研究的创新点	28
1.8 技术路线	29
第 2 章 材料与amp;方法	30
2.1 试验地概况	30
2.2 试验设计	31
2.2.1 冬小麦试验设计	32
2.2.2 夏玉米试验设计	33
2.3 测定项目与方法	35
2.3.1 土壤储水量	35

2.3.2	径流量	35
2.3.3	地表温度和土壤温度	35
2.3.4	土壤硝态氮	35
2.3.5	形态指标	36
2.3.6	生理指标	36
2.3.7	生育进程	36
2.3.8	植株含氮量	36
2.3.9	产量和水氮利用效率	37
2.4	数据处理与统计分析	37
2.4.1	相关计算	37
2.4.2	数据分析	39
<b>第3章</b>	<b>集雨模式对冬小麦和夏玉米农田土壤水分的影响</b>	<b>40</b>
3.1	集雨模式对冬小麦农田土壤水分的影响	40
3.1.1	冬小麦生育期的降水特征	40
3.1.2	集雨效率	41
3.1.3	土壤储水量的时间变化特征	41
3.1.4	土壤含水率的空间变化特征	47
3.1.5	土壤水分亏缺度与储水亏缺补偿度	49
3.2	集雨模式对夏玉米农田土壤水分的影响	52
3.2.1	夏玉米生育期的降水特征	52
3.2.2	集雨效率	53
3.2.3	土壤储水量的时间变化特征	54
3.2.4	土壤含水率的空间变化特征	59
3.2.5	土壤水分亏缺度与储水亏缺补偿度	61
3.3	讨论与小结	64
<b>第4章</b>	<b>集雨模式对冬小麦和夏玉米农田土壤温度的影响</b>	<b>68</b>
4.1	集雨模式对冬小麦农田土壤温度的影响	68
4.1.1	根区土壤温度随播种后天数的动态变化	68
4.1.2	根区土壤温度的日变化	70
4.1.3	根区土壤温度的垂直变化	72
4.2	集雨模式对夏玉米农田土壤温度的影响	73
4.2.1	根区土壤温度随播种后天数的动态变化	74
4.2.2	根区土壤温度的日变化	77
4.2.3	根区土壤温度的垂直变化	80

4.3	讨论与小结	82
<b>第5章</b>	<b>集雨模式与氮肥运筹对土壤硝态氮的影响</b>	<b>84</b>
5.1	控释氮肥的氮素累积释放速率	84
5.1.1	夏玉米农田中控释氮肥的氮素累积释放速率	84
5.1.2	冬小麦农田中控释氮肥的氮素累积释放速率	85
5.2	集雨模式与氮肥运筹对冬小麦农田土壤硝态氮的影响	85
5.2.1	集雨模式对土壤硝态氮含量和分布的影响	85
5.2.2	氮素运筹对土壤硝态氮含量和分布的影响	89
5.3	集雨模式与氮肥运筹对夏玉米农田土壤硝态氮的影响	92
5.3.1	集雨模式对土壤硝态氮含量和分布的影响	92
5.3.2	氮素运筹对土壤硝态氮含量和分布的影响	95
5.4	讨论与小结	98
<b>第6章</b>	<b>集雨模式与氮肥运筹对作物生理生长的影响</b>	<b>102</b>
6.1	集雨模式与氮肥运筹对冬小麦生理生长的影响	102
6.1.1	集雨模式与氮肥运筹对冬小麦地上部分生长的影响	102
6.1.2	集雨模式与氮肥运筹对冬小麦根系生长的影响	109
6.1.3	集雨模式对冬小麦生育进程的影响	113
6.1.4	集雨模式与氮肥运筹对冬小麦光合速率的影响	115
6.1.5	氮肥运筹对冬小麦叶绿素含量的影响	117
6.2	集雨模式与氮肥运筹对夏玉米生理生长的影响	118
6.2.1	集雨模式与氮肥运筹对夏玉米地上部分生长的影响	118
6.2.2	集雨模式与氮肥运筹对夏玉米根系生长的影响	125
6.2.3	集雨模式对夏玉米生育进程的影响	129
6.2.4	集雨模式与氮肥运筹对夏玉米光合速率的影响	130
6.2.5	氮肥运筹对夏玉米叶绿素含量的影响	132
6.3	讨论与小结	133
<b>第7章</b>	<b>集雨模式与氮肥运筹下植株氮素的累积、分配与诊断</b>	<b>138</b>
7.1	集雨模式与氮肥运筹下冬小麦植株的氮素累积、分配与诊断	138
7.1.1	不同氮肥运筹下冬小麦植株的氮素含量	138
7.1.2	集雨模式与氮肥运筹下冬小麦植株的氮素累积量	139
7.1.3	集雨模式与氮肥运筹下冬小麦植株的氮素分配	141
7.1.4	不同氮肥运筹下冬小麦植株的氮素营养诊断	143
7.2	集雨模式与氮肥运筹下夏玉米植株的氮素累积、分配与诊断	149
7.2.1	不同氮肥运筹下夏玉米植株的氮素含量	149

7.2.2	集雨模式与氮肥运筹下夏玉米植株的氮素累积量	149
7.2.3	集雨模式与氮肥运筹下夏玉米植株的氮素分配	151
7.2.4	不同氮肥运筹下夏玉米植株的氮素营养诊断	154
7.3	讨论与小结	158
<b>第8章</b>	<b>集雨模式与氮肥运筹下作物的产量和水氮利用效率</b>	<b>161</b>
8.1	集雨模式与氮肥运筹下冬小麦的产量和水氮利用效率	161
8.1.1	集雨模式对冬小麦耗水特性的影响	161
8.1.2	集雨模式对冬小麦产量的影响	163
8.1.3	集雨模式对冬小麦水分利用效率的影响	165
8.1.4	集雨模式对冬小麦氮肥偏生产力的影响	167
8.1.5	氮肥运筹对冬小麦产量的影响	168
8.1.6	氮肥运筹对冬小麦氮素利用的影响	169
8.1.7	冬小麦的合理氮肥施用量	172
8.2	集雨模式与氮肥运筹下夏玉米的产量和水氮利用效率	173
8.2.1	集雨模式对夏玉米耗水特性的影响	173
8.2.2	集雨模式对夏玉米产量的影响	174
8.2.3	集雨模式对夏玉米水分利用效率的影响	176
8.2.4	集雨模式对夏玉米氮肥偏生产力的影响	178
8.2.5	氮肥运筹对夏玉米产量的影响	179
8.2.6	氮肥运筹对夏玉米氮素利用的影响	180
8.2.7	夏玉米的合理氮肥施用量	183
8.3	不同集雨模式下冬小麦-夏玉米轮作系统的生产力	184
8.3.1	不同集雨模式下冬小麦-夏玉米轮作系统的周年产量	184
8.3.2	不同集雨模式下冬小麦-夏玉米轮作系统的周年水分利用效率	184
8.3.3	不同集雨模式下冬小麦-夏玉米轮作系统的总水分利用效率	185
8.4	不同氮肥运筹下冬小麦-夏玉米轮作系统的生产力	187
8.4.1	不同氮肥运筹下冬小麦-夏玉米轮作系统的产量	187
8.4.2	不同氮肥运筹下冬小麦-夏玉米轮作系统的氮素利用	188
8.5	讨论与小结	190
<b>第9章</b>	<b>主要结论与展望</b>	<b>193</b>
9.1	主要结论	193
9.1.1	集雨模式对冬小麦和夏玉米农田土壤水分的影响	193
9.1.2	集雨模式对冬小麦和夏玉米农田土壤温度的影响	193
9.1.3	集雨模式与氮肥运筹对土壤硝态氮的影响	193

9.1.4	集雨模式与氮肥运筹对作物生理生长的影响 .....	194
9.1.5	集雨模式与氮肥运筹下植株氮素的累积、分配与诊断 .....	195
9.1.6	集雨模式与氮肥运筹下作物的产量和水氮利用效率 .....	195
9.2	存在的问题与建议 .....	196
参考文献 .....		198

# 第1章 绪 论

## 1.1 背景介绍

中国是水资源极度匮乏的国家，人均水资源占有量不足世界平均水平的25%，已被列为严重缺水国家（Macedonio 等，2012 年提出）。与此同时，中国也是农业大国，农业年用水量占全国用水总量的60%以上。随着经济社会和第二、第三产业的快速发展，农业可用水量的比例只能是有减无增。现阶段，中国农业灌溉水利用率仅为50%左右，每立方米水的粮食生产能力仅为1.03kg左右，远低于发达国家，但这也意味着中国在农业用水方面具有较大的改善和提升空间。发展节水农业、降低农业用水量、提高单位水资源利用效率是今后中国农业发展的客观要求和根本途径。

干旱半干旱地区是中国乃至世界范围内农业生产的重要组成部分，也是粮油和林牧产业的主要基地。中国北方旱区的耕地面积约占全国耕地总面积的50%，然而其年径流量仅为全国的18%左右。为了保证农业产出，一般采用地下水进行农田灌溉。然而，由于长期频繁地对地下水进行过度开采，该地区已形成复杂的地下水降落漏斗，也导致地下水的更新速率和补给过程发生变化，同时也引发了一系列的生态和环境问题，如地面沉降、塌陷、土壤次生盐渍化等（Foster 等，2004 年提出）。研究发现，冬小麦-夏玉米轮作的高耗水种植模式，使得华北地区的浅层地下水下降到了30m以下（Zhang 等，2003 年提出）。华北平原大部分地区的农田灌溉用水强度已与其地下水承载力呈现出严重或极严重不适应的状况（张光辉等，2013 年提出）。此外，由于目前的农田灌溉仍以传统的地面灌溉为主，灌溉水有效利用系数较低（张鹏，2016 年提出）。因此，为了提高农业产出的同时兼顾资源、环境的承载能力和强度，降水资源化成为现阶段干旱半干旱地区可开发利用的主要水分来源和重要战略方向。传统耕作条件下，自然降水的有效利用率普遍较低，尤其是10mm以下的降水。该类降水的发生频率高达70%以上，总量相当于2次左右的灌溉用水量，拥有4500kg/hm<sup>2</sup>的增产潜力（Deng 等，2006 年提出）。此外，干旱半干旱地区年降水总量少、变率大，且在年内分配不均匀，60%~70%的降水主要分布于7—9月。降水分布与作物生长需求的不同步，造成大部分降水以地表蒸发、径流等



形式散失，而真正转化为作物产量的比例较小。因此，研究如何提高降水资源的保蓄率、改善土壤水分状况、协调作物需水与土壤供水之间的矛盾，以提高降水资源利用效率和实现现代生态型旱作农业的可持续发展成为旱区农业生产亟待解决的核心问题。

人口的持续增长，工业化、城镇化进程的加快和退耕还林的生态需求，使得有效耕地面积逐年下降。据中国人口与发展研究中心预测，到2050年，中国人口数量将突破15亿，达到历史最高峰。同时加之人们的生活水平正在快速提升，已经由解决温饱变为实现小康生活，也更加关注饮食健康和营养协调，对肉、蛋、奶等动物性食品的需求量逐渐提高。耕地面积的减少、人口数量的增加和生活水平的提高，对农业生产和粮食安全提出了新的挑战。提高单位耕地面积的作物产出已成为现阶段农业生产的根本途径和必然选择。

化肥的诞生和使用是现代农业的重要标志。20世纪70年代以来，作物产量的增加有近一半归功于化肥的施用。目前，在农业生产实践中，为了追求高产，普遍存在肥料投入量大、利用率低等现象。这不仅造成了资源的严重浪费，同时也带来了一系列的环境问题，如耕地质量退化、水体富营养化、地下水污染和温室气体大量排放等。氮是作物生长中需求量最大的营养元素。在中国农业生产中，2000年之前，氮肥的施用量与作物产量呈同步增长的态势，氮肥的施用为保障国家粮食安全做出了重要贡献；2000年之后，氮肥的施用量仍呈逐年增加的趋势，然而作物产量的增长速率则逐渐下降甚至出现了负值。研究表明，中国的氮肥年使用量占世界氮肥使用总量的25%左右（FAO，2016年提出），而氮肥的平均回收利用率仅约为30%。氮肥施入土壤后，其氮素主要有3种去向：约35%可被当季作物吸收和利用；约13%在土壤剖面中以硝态氮、铵态氮等无机氮的形式或以有机结合的形态残留；其余52%则以各种形式发生损失。因此，在保证作物产量和品质的同时，进行氮肥优化管理，以实现节本增效和环境友好的有机统一是农业可持续发展的必然选择，也是现阶段迫切需要解决的重要问题。

土壤水分和养分（尤其是氮元素）是作物生长的两大物质基础，也是影响干旱半干旱地区农业生产的主要制约因子。两者在作物产量和品质形成方面扮演着重要角色。采用合理的集雨种植和氮肥运筹调控技术，有助于实现资源的高效利用和环境的友好相处，这对节能抗旱和农业的健康、持续发展具有重要意义。

## 1.2 目的和意义

冬小麦-夏玉米轮作是华北地区主要的种植形式之一。在该地区，作物生



长期间的降水总量基本可以满足作物的生长需求，但由于降水年际变率大、年内分配不均衡，在很大程度上，降水分配与作物需水关键期严重不协调。因此，为了确保作物产量，需要进行大量灌溉，这对于缺乏灌溉条件或是具备灌溉条件但灌溉成本和代价不断加大的地区是一种挑战。针对现阶段农业水资源短缺的问题，集雨种植（或者适度旱作、水旱结合）已逐步成为实现该地区农业旱涝保收的重要措施。为了获得高产，农民往往施用过量的氮肥，然而作物产量与施氮量、土壤含氮量并非总是正相关关系。一定范围内提高氮肥施用水平可有效提高农田氮素供应能力、促进作物生长，从而获得高产。然而，当土壤氮素供应量远高于作物需求量时，不仅会限制植株生长、提高病虫害发生频率、降低肥料利用率，造成不必要的资源浪费和成本增加，还会导致农业面源污染。合理的氮肥运筹应是既可满足作物氮素需求，又可避免养分流失的土壤-作物系统氮素供需平衡状态。

农业可持续发展是关乎国计民生的重大问题。如何有效地利用自然降水对提高作物节水抗旱的能力十分重要。长期以来，大量使用氮肥的作物生产模式已引发了一系列环境和生态问题。如何在节能、减排和环保的前提下实现肥料的高效利用，对于农业生产的持续进行和健康发展意义深远。本书以提高资源利用效率、保护农田生态平衡和实现干旱半干旱地区稳产高产的可持续发展为根本出发点，以陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作的种植形式为载体，针对旱区降水年际变率大、年内分配不均衡的气候特点，在常规施氮条件下，采用全程微型聚水二元覆盖以最大限度地实现自然降水的高效利用和时空调节，并改善作物耕层的土壤温度、养分状况，从而为作物创造适宜的生长环境。在此基础上，当作物生长关键期发生持续干旱时，进行必要的补充灌水，以保证作物的正常生长。针对氮肥投入量大、当季利用率低的普遍现象，在常规灌水条件下，利用控释氮肥代替普通尿素以实现节能减排、环境保护和增产高效的有机统一。简言之，目的在于探究高产、高效、环保和节能的冬小麦和夏玉米集雨施氮模式。本书内容可为进一步完善集雨种植体系提供一定的理论支撑，也可为干旱半干旱地区农业的高产稳产提供切实可行的技术途径。除此之外，还可为控释氮肥的开发研制和推广应用提供一定的理论参考。

### 1.3 农田集雨种植技术的研究进展

农田集雨种植兼顾了覆盖和垄作的优点，是干旱半干旱地区调控土壤水、肥、气、热状况，实现农业旱涝保收的一项重要措施。有研究表明，集雨种植对粮食作物和经济作物均具有显著的增产效果和经济效益，同时可大幅度提高水分和养分利用效率。目前，关于农田集雨种植的研究大多集中于不同种植模



式、耕作方式、覆盖材料、覆膜时长及垄沟比例（尺寸）等方面，研究的内容主要涉及集雨效应、土壤水热状况、土壤理化性状（土壤结构、土壤微生物、土壤酶活性等）、养分运移、植株生长、养分吸收、水肥利用等方面。

### 1.3.1 雨水集流和集水农业的含义

雨水集流简称集水，由 Geddes（1963）首次提出，其含义为“收集和储存径流或溪流用于农业灌溉”。此后，Myers 等（1967）对该定义进行了补充，集水的含义进一步拓展为“通过人为措施处理集流面增加降雨和融雪径流，进而收集利用的过程”。现阶段比较全面和完善的集水定义由 Reij（1988）提出，即：“收集各种形式的径流用于农业生产、人畜饮水或其他用途”，并指出集水的关键在于地表径流。简言之，集水就是采用工程的手段和措施，对自然降水进行收集、整合和存储，使之变为可直接被人、畜、农业生产等利用的水资源。相应地，集水农业指通过一定的措施对降水资源进行富集、叠加和储存，并将其引入作物根区土壤，以补偿农田水分的不足，从而改善作物耕层的土壤水分状况、提高作物产出，实现旱地农业生产的持续性和稳定性。集水农业具体包括雨水的汇集、存储和利用三方面内容。

### 1.3.2 垄沟集雨种植与传统覆盖的区别

在作物生长期或休闲期进行地表覆盖具有改善耕层土壤水热条件、防止农田水土流失和减少氮素淋溶、风蚀、水蚀等诸多优点，但也存在一些问题，主要表现在：对不大于 10mm 的降水资源利用率较低（李荣等，2016 年提出）；平作覆盖地膜不利于降水的入渗，且在作物生长后期地膜覆盖较高的土壤温度容易造成土壤通透性差、根系活力下降、呼吸受阻和植株衰老加快等负面效应（蒋耿民等，2013 年提出）；秸秆覆盖较低的土壤温度不利于植株的早期生长和最终产量的提高等。垄沟集雨种植技术尤其是垄沟二元集雨种植技术，被认为是现阶段干旱半干旱地区保墒抑蒸、改善土壤水热条件、促进作物生长和实现高产高效的一种有效措施和重要途径。它通过在田间修筑沟垄、垄体覆膜、沟内种植，使降水由垄面（集水区）向沟内（种植区）汇集，形成降水资源的有效叠加。垄沟二元集雨条件下，垄体覆膜的同时在种植沟中覆盖其他材料（如秸秆、沙石等），通过全程地表覆盖可最大限度地集蓄降水、减少土壤无效蒸发，抑制杂草生长，从而显著改善作物耕层的田间小气候，并促进作物生长。此外，在部分半干旱地区，作物生育期的降水总量基本可以满足作物生长的水分需求，但由于降水季节分配与作物关键需水期严重失衡和错位，使得降水的有效性降低。垄沟二元集雨种植可充分发挥区域降水资源和水肥光热生态因子的协同增效作用，能够同时从时间和空间上提高降水资源的可控性。



在遭遇极端干旱或是长时间持续无降水发生时，进行必要的补充灌水可达到不同降雨年型下作物保产、稳产和高产的目的。

### 1.3.3 农田垄沟集雨种植的研究进展

与平作相比，垄作种植具有诸多优点。垄作可通过改变微地形增加农地表面积，从而增加可接收太阳辐射的面积；可加大昼夜温差，进而提高光合产物的累积而降低光合产物的消耗。此外，垄作覆膜还具有集蓄降雨、减少蒸发等功能（赵爱琴等，2015年提出）。表面覆盖具有保水保墒、调节土壤温度、防止农田水土流失和减少氮素淋溶等多重功效。农田垄沟集雨种植技术是将地表覆盖和垄沟技术相结合的复合模式。该技术利用地膜覆盖作物行间非种植区（垄）的地块，使覆盖区的降水汇集并叠加到种植区（沟），以提高作物耕层的土壤水分状况，供作物吸收利用（丁瑞霞，2006年提出）。即将“垄”“沟”在田间相间排列，垄面覆膜集蓄降水，沟内种植作物，降水从垄面汇入沟内，形成降水叠加，从而有效收集5mm以下的微型降雨，将小雨和无效降雨变为植株可吸收利用的有效水，并储存于根区土壤中，从而缓解作物的水分亏缺状态，提高作物产量和降水资源的有效性。

#### 1.3.3.1 农田垄沟集雨种植技术的类型

农田垄沟集雨种植的核心思想是通过微集雨技术收集和储存降水→形成土壤水库→实现作物的高效生产，即形成集雨-蓄水-种植的模式。现阶段存在的农田集雨种植技术的分类方法主要有以下5种：

（1）按地面覆盖度的不同，可分为一元覆盖集雨种植技术（包括垄覆盖、沟不覆盖和垄覆盖、沟半覆盖等）和二元全程覆盖集雨种植技术（垄覆地膜，沟覆盖不同的材料，如秸秆、生物降解膜、液态地膜和砂石等）。

（2）按覆盖时间的不同，可分为仅在作物生育期内进行集雨保墒，仅在休闲期进行集雨保墒和在生育期、休闲期均采取集雨保墒措施等。

（3）按种植制度的不同，可分为单一作物的集雨种植、间作套种的集雨种植和轮作系统的集雨种植。

（4）按作物类型的不同，可分为大田作物的集雨种植和经济作物的集雨种植；长生育期作物的集雨种植和短生育期作物的集雨种植；旱作作物（如小麦、玉米）的集雨种植和水作作物（如水稻）的集雨种植；雨季作物（作物生育期的降水总量较多，如夏季作物，在数量上基本可以满足作物的水分需求）的集雨种植和旱季作物（作物生育期的降水总量较少，如冬小麦、冬油菜，仅依靠集雨措施保墒蓄水不能满足作物的水分需求，应适时给予一定的补充灌水）的集雨种植等。



(5) 按种植模式的不同,可分为垄沟集雨种植(垄沟等间距、宽沟窄垄等)、连垄集雨种植和全膜双垄沟集雨种植等形式。

不同的集雨种植技术在形式上存在一定的差异,但本质思想基本相同,即通过垄面集蓄降水、富集到作物根区、减少土壤蒸发、改善土壤水分供应与作物水分需要间的矛盾,从而促进作物生长,提高降水利用效率,实现农业的稳产和高产。

### 1.3.3.2 垄沟集雨种植的集雨效率

垄沟集雨种植增产增效的主要原因是其能够有效地集蓄降水,通过抑蒸聚雨变小雨为中雨,变无效雨为有效雨,从而形成边蓄边用,用中有蓄的土壤-作物水分供需状态。王琦等(2004)通过设置3种垄沟比和2种下垫面材料(膜垄和土垄)进行集雨效应的研究发现,膜垄和土垄的平均集雨效率分别为90.0%和16.8%。周昌明等(2016)在不同覆盖种植方式(覆盖生物降解膜)对夏玉米集雨效果进行的研究中得出,在玉米生长前期,垄沟集雨处理和连垄集雨处理的蓄水效率分别较平作不覆盖提高34.51%和45.71%;在玉米生长中期,随着降水量的增加,2种集雨处理的蓄水效率较前期均有所增加(分别较平作不覆盖提高49.93%和42.83%);到玉米生长后期,植株冠层基本封垄,2种集雨处理的蓄水效率较前期和中期大幅度降低。韩思明等(1993)在渭北旱塬区夏闲期聚水保墒技术的研究表明,人工降水45mm后24h,平作和垄作覆膜处理的土壤水分入渗深度分别为30cm和50mm。2种处理除入渗深度有差异外,前者的水分侧渗程度也不及后者。李小雁和张瑞玲(2005)在垄沟集雨系统的蓄水保墒效应研究中也发现了集雨种植的优越性,膜垄较土垄可显著提高小雨的利用率,膜垄的最小产流降水量仅为0.8mm,膜垄的平均集雨效率高达87%,而土垄仅为7%。

集雨种植条件下较优的集雨效率与垄沟尺寸、比例等垄沟性状密切相关。合理的垄沟设计可充分发挥垄作覆膜的集雨效果,且不同作物的合理垄沟尺寸不尽相同。王琦等(2005)和Wang等(2005)在马铃薯的研究中发现,在垄沟比为40:60时,具有较好的土壤水分状况,可获得较高的马铃薯产量。王俊鹏等(2000)对玉米、谷子、小麦、豌豆和糜子5种作物,分别设置垄宽60cm、沟宽60cm和垄宽75cm、沟宽75cm的垄沟尺寸进行微集水研究,发现无论在丰水年还是欠水年,5种作物均在垄沟宽为60cm的垄沟集雨模式下增产效应较高,即垄沟比60:60为该5种作物的合理垄沟尺寸。寇江涛和师尚礼(2011)在对苜蓿集雨种植的研究中得出,垄膜种植的集雨效率显著高于土垄,其中垄沟比为60:60和60:75的集雨处理效果较好。丁瑞霞(2006)在宁南旱区的农田微集水种植研究中发现,矮秆作物如小麦、糜子、谷子和豌



豆的适宜垄沟比为 45 : 45；而高秆作物如玉米、葵花的适宜垄沟比为 60 : 60。可见，不同作物的合理垄沟尺寸差异较大，甚至同一种作物在不同气候条件下的适宜垄沟尺寸可能不同。因此，在生产实践中，需要根据特定的气候状况、耕作习惯、作物种类等进行相关的试验研究，以充分发挥垄沟集雨种植的优势。

### 1.3.3.3 垄沟集雨种植的土壤水分效应

垄沟集雨措施通过改变下垫面特性来促使降水再分布，抑制表层土壤水分的无效蒸发，从而改善土壤水分状况。在集雨种植系统中，“垄水”和“沟水”可相互转化、互为源库。当沟中水分被植株吸收出现不足时，垄内的水分可通过扩散作用对沟中水分进行补充；当沟中水分充沛时，可通过侧渗作用储存在垄内，尤其在作物生长需水关键期，或是持续干旱无降水时，这种土壤水分间的相互补给对于作物维持生命活动具有重要意义。

不同的覆盖材料会产生不同的土壤水分效应。刘艳红（2010）在不同垄沟覆盖材料对冬小麦农田土壤水分的研究中发现，不同集雨处理均可提高拔节期前 0~40cm 土层的土壤水分含量，其中垄覆普通地膜处理的 2m 土层平均土壤含水率高于垄覆液态地膜处理，垄覆普通地膜或液态地膜沟覆秸秆处理在冬小麦生长前期的保水效果显著优于沟覆液态地膜和沟不覆盖，而在冬小麦生长后期，不同处理间土壤水分状况的差异有所减小，其中垄覆普通地膜沟覆秸秆在冬小麦生长季的保墒蓄水效果最佳。不同的气候条件会产生不同的土壤水分效应。任小龙（2008）通过模拟降水量研究得出，在降水量为 230mm、340mm 和 440mm 时，垄膜集雨处理的 0~200cm 土层土壤储水量分别较平作不覆盖提高 2.3%、5.2% 和 4.5%。韩娟等（2014）在半湿润偏旱区不同垄沟覆盖种植冬小麦的研究中表明，垄沟单一集雨处理和垄沟二元集雨处理均可提高冬小麦生长前期 0~20cm 和 20~100cm 土层的土壤储水量，且二元集雨处理的保墒效应较好，与沟覆秸秆相比，沟覆液态地膜随生育期推进逐渐降解，仅在冬小麦生长前期具有一定的蓄水作用。由此可见，二元集雨处理可更有效地集蓄降水、改善土壤水分状况、促进作物生长，但不同作物的合理二元集雨模式存在一定差异，需要根据实际情况结合试验研究进行选择。

### 1.3.3.4 垄沟集雨种植的土壤温度效应

集雨种植的另一重要特点是可以显著改善作物耕层的土壤温度。土壤温度会影响土壤微生物数量（种类）、土壤微生物活性、土壤溶质的溶解与释放、土壤有机质的分解与矿化、土壤水盐运移等，而这些土壤理化性状与作物的生长密切相关。对于喜温作物而言，适宜的耕层土壤温度更是实现高产、优质和高效的重要环境因子。集雨种植的土壤温度效应受土壤类型、气候条件和覆盖