



农业重大科学研究成果专著

RESEARCH ON RAINFALL
COLLECTING PLANTING OF
ROOT-ZONE IN DRY FARMLAND

贾志宽 任小龙 丁瑞霞 等 著

旱作农田根域 集水种植技术研究



科学出版社

www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

农业重大科学研究成果专著

旱作农田根域集水种植技术研究

贾志宽 任小龙 丁瑞霞 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是依托省、部及国家科技项目,在作物根域集水种植技术多年研究工作的基础上,对研究工作进行的系统性和阶段性总结,主要内容反映了作者近十五年旱作农业研究中独具特色的部分。内容包括:国内外根域集水种植研究进展、根域集水种植的农田水温状况、根域集水种植对作物光合生理生态特性的影响、根域集水种植对作物生长发育的影响、根域集水种植对土壤速效养分及利用效率的影响、根域集水种植农田的水分调控、根域集水种植带型的优化设计、半干旱偏旱区主要作物根域集水种植技术研究、半湿润偏旱区主要作物根域集水种植技术研究、半干旱区主要作物根域集水种植技术研究等方面。

本书可为从事旱地农业研究、节水农业技术研发、农业资源高效利用方面的研究人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

旱作农田根域集水种植技术研究/贾志宽等著. —北京:科学出版社,2010
(农业重大科学研究成果专著)

ISBN 978-7-03-027113-6

I. ①旱… II. ①贾… III. ①旱作土壤-根系-蓄水-种植-研究
IV. ①S35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 052822 号

责任编辑:李秀伟 李晶晶/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:美光制版

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

盛 志 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 4 月第一次印刷 印张:15 1/2 插页:4

印数:1—1 000 字数:292 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《旱作农田根域集水种植技术研究》
著 者 名 单

贾志宽 西北农林科技大学农学院

任小龙 西北农林科技大学农学院

丁瑞霞 西北农林科技大学农学院

韩清芳 西北农林科技大学农学院

王俊鹏 西北农林科技大学农学院

李永平 固原市农业科学研究所

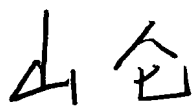
序

全球淡水资源日趋紧张，干旱面积不断扩大，干旱程度日益加剧，旱地农业的研究与开发越来越引起人们的关注。我国旱地主要分布在北方 16 个省（直辖市、自治区），北方旱地农业是我国农业的重要组成部分，在我国 21 世纪农业发展中占有重要的地位。该地区是我国粮、棉、油、豆的重要产地，也是林果业和畜牧业的重要基地，名特优农产品资源丰富。提高北方旱农区农业生产水平对保证我国粮食安全具有重要意义。

水资源短缺是制约该地区农业发展的一个主要因素。农业用水紧缺在相当程度上是水资源有效利用率低下造成的。目前，旱农地区对自然降水及转化为土壤水的平均利用率还较低，旱作农业区的有限降水并未得到充分利用，致使当前农田实际生产力水平显著低于当地降水生产潜势。

综观现有研究，研究者在覆盖栽培、保护性耕作、集雨补灌、抗旱作物和品种选用等方面均做了不少工作，并取得了明显成效；但针对旱地雨水就地蓄积利用的技术开发研究还不够系统深入。贾志宽教授及其研究团队依托承担的各类课题，多年来在不同类型旱农区围绕降水高效利用致力于旱地农业研究，《旱作农田根域集水种植技术研究》一书是对他们“九五”以来研究工作的一个颇具特色的反映。该书在总结分析国内外集水农业研究的基础上，较为全面地介绍了他们在半干旱区及半湿润易旱区开展的农田集雨种植试验研究的工作进展。从书中介绍的内容看，“根域集水种植”抓住了当前旱区农业生产发展过程中的关键环节，思路有创意，研究内容丰富，研究成果符合当前实际，易于采用。他们多年、多点、多作物的研究表明，该技术体系增产效果显著，可以极大地提高旱区降水生产率，在旱农区具有良好的推广前景。

该书的出版，为从事旱农研究的科技人员提供了一部有价值的参考读物，其内容对丰富旱农理论也有一定意义。尽管书中内容和研究工作仍有一些地方需要进一步完善，但它对生产的价值和给予我们的启示是十分可贵的。在该书出版之际，愿以序为贺。



2009 年 9 月于杨凌

前 言

中国是一个旱区农业比重很大的国家，其土地面积约占国土陆地总面积的 56%，在北方旱区，旱作耕地约占全国耕地面积的 38%。在作物生产中，雨水的 70%~80% 以径流及土壤无效蒸发形式损失，仅有 20%~30% 被作物利用，作物生产潜力由于水分的限制衰减了 67%~75%。旱农区水资源严重短缺导致粮食生产水平低下，原因主要表现在两个方面：一是水资源从数量上不能满足作物需水量的要求，二是由于水资源年内时空分布极不均匀，从时间上不能满足作物需水的要求。多年的旱农研究表明，该地区发展集水农业是一条重要的技术途径。农田根域集水种植（也称微集水种植或沟垄集雨种植）是在旱作农业极为普遍的中国北方地区发展起来的一种旱作农业技术，该技术基于雨水就地利用的理念，通过改变农田地表微地形，形成沟垄状，垄上覆膜，沟内种植，使降雨在农田内就地实现空间再分配，将有限的降水尽量集中到沟内种植区，达到雨水在农田内叠加利用的目的。该技术不但能够使降雨集中利用，还可以降低无效蒸发，同时可以显著降低土壤水蚀。研究表明，该技术的应用在正常年景可使作物增产 30%~60% 以上，其推广应用前景十分广阔。

本书是依托省、部及国家科技项目，在作物根域集水种植技术多年研究工作的基础上，对研究工作进行的系统性和阶段性总结。研究项目包括：“九五”国家旱农攻关专题“宁南半干旱偏旱区农业综合发展研究”（96-004-04-07，1996~2000 年）、杨凌科技专项“旱作农田微集水种植技术开发及示范”（99KG16，2000~2002 年）、陕西省推广项目“旱作农田微集水种植技术示范与推广”（1999 年）、科技部农业科技成果转化资金项目“西北旱区农田高效微集水种植技术示范与开发”（02EFN216901259，2002~2004 年）、“863”项目“区域节水型农作制度与节水高效旱作保护耕作技术研究”（2002AA2Z4021-2，2002~2005 年）、宁夏科技厅攻关项目“宁南旱作农区集雨节水高效种植技术研究”（2001-19-07，2004~2005 年）、“十一五”国家科技支撑计划课题“农田集雨保水关键技术研究”（2006BAD29B03，2006~2010 年），其中以作物根域集水种植技术研究为核心内容的三项研究先后获得了陕西省及宁夏回族自治区科技进步奖。

在多年作物根域集水种植技术研究方面，除了本书作者外，其他许多老师和研究生也参与了大量工作，并付出了辛勤努力。他们是聂俊峰老师、刘世新老师、张睿老师，刘正辉、李荣、刘艳红等研究生，在本书出版之际向他们表示衷心的感谢！

本书内容涉及多年、多区域、多作物的研究工作，遗漏及不足之处在所难免，在共同分享这一技术成果的同时，敬请读者提出宝贵意见及建议，让我们共同为旱区农业研究作出更大贡献。

著 者

2009 年中秋于杨凌

目 录

序

前言

第一章 国内外根域集水种植研究进展	1
第一节 雨水集流的概念与类型	1
一、雨水集流的概念	1
二、雨水集流的类型	1
第二节 根域集水种植的发展阶段	2
一、雨水集流与利用初始发展阶段	2
二、雨水集流基础研究及根域集水种植技术模式初步形成阶段	3
三、集水技术系统研究及根域集水种植技术快速发展阶段	4
第三节 集水农业理论基础	7
一、自然降水资源的时间空间分配	7
二、雨水利用潜力	8
三、集水农业的发展模式	9
第四节 根域集水种植国外研究进展	15
一、降雨特性对径流的影响	15
二、下垫面特征对径流的影响	16
三、地形对径流的影响	16
四、雨水集流的模型	16
第五节 根域集水种植国内研究进展	17
一、根域集水种植产量效果	17
二、根域集水种植带型及集水效果	19
三、关于根域集水种植影响作物生产力与降雨量关系的探索	19
四、存在问题	20
五、我国根域集水种植技术发展前景展望	21
第二章 根域集水种植的农田水温状况	23
第一节 试验设计与测定方法	23
一、试验区概况	23
二、试验设计	24
三、测定方法	26

第二节 作物生育期农田水分动态变化	27
一、集水效率	27
二、玉米生育期农田水分动态变化	29
第三节 农田土壤温度效应	40
一、玉米生育期耕层 5cm、10cm、15cm 和 20cm 处土壤温度及变化	40
二、玉米生育期耕层 0~20cm 平均地温	43
三、玉米播种前期土壤表层 10cm 处地温变化	44
第三章 根域集水种植对作物光合生理生态特性的影响	47
第一节 测定项目与方法	47
一、光合测定	47
二、叶绿素荧光测定	47
三、相对叶绿素含量测定	47
第二节 根域集水种植对作物功能叶片光合参数的影响	48
根域集水种植对玉米功能叶片光合参数的影响	48
第三节 根域集水种植对作物功能叶片荧光参数的影响	52
根域集水种植对玉米功能叶片荧光参数的影响	52
第四节 根域集水种植下作物功能叶 SPAD 值的变化	56
第四章 根域集水种植对作物生长发育的影响	58
第一节 根域集水种植对作物生育进程与生物量的影响	58
一、生育进程	58
二、株高	59
三、功能叶面积	59
四、生物量累积	63
五、玉米单株株高、叶面积和生物量累积动态模型特征值分析	63
六、玉米单株地上、地下部生物量及根冠比	65
七、干物质分配	67
第二节 根域集水种植对作物根系生长的影响	68
第三节 根域集水种植的作物产量与水分利用效率	70
一、籽粒产量及其构成因素	70
二、籽粒产量水分利用效率	72
三、微集水种植玉米适宜生育期雨量范围探讨	73
第五章 根域集水种植对土壤速效养分及利用效率的影响	74
第一节 测定项目与方法	74
一、土壤速效养分的测定	74

二、植物及土壤全 N、全 P、全 K 的测定	74
三、农田养分利用效率	74
第二节 根域集水种植对根层速效养分的影响	75
一、耕层 (0~40cm) 土壤速效 N (碱解 N)、速效 P、速效 K 和有 机质含量	75
二、农田 (0~100cm) 土壤速效 N、速效 P、速效 K 和有机质各层 分布	77
第三节 根域集水种植对农田养分利用效率的影响	81
一、单株养分吸收量	81
二、养分利用效率 (NUE)	82
三、养分收获指数 (NHI)	84
第六章 根域集水种植农田的水分调控	86
第一节 沟垄系统与集水功能	87
一、沟垄系统结构描述	87
二、沟垄系统的集水功能解析	88
第二节 根域集水种植农田水分调控效果	89
一、试验及数据处理方法	90
二、微集水种植农田的蓄水效果	94
三、微集水种植农田的保墒效果	99
四、小结	118
第七章 根域集水种植带型的优化设计	120
第一节 带型优化设计的基本问题及思路	120
一、带型优化设计的基本问题	120
二、带型优化设计的基本思路	122
第二节 优化设计的基本方法	122
一、集种比值优化设计	122
二、沟垄间几何关系参数的优化设计	126
三、带型优化设计中存在的问题	129
第三节 根域集水种植带型优化模式试验	130
第八章 半干旱偏旱区谷子根域集水种植技术研究	135
第一节 不同带型对谷子生长发育及光合生理的影响	135
一、试验点概况及试验方法和材料	135
二、结果与分析	138
三、小结	144
第二节 不同带型的边际效应及产量效果分析	145

一、边际效应·····	145
二、边行和中行的增产效应·····	146
三、产量·····	147
四、水分利用效率·····	148
五、经济效益分析·····	148
六、谷子最佳沟垄宽度的确定·····	149
第九章 半干旱偏旱区糜子根域集水种植技术研究·····	151
第一节 不同带型对糜子生长发育及光合生理的影响·····	151
一、试验点概况及试验方法和材料·····	151
二、结果与分析·····	152
第二节 不同带型的边际效应及产量效果分析·····	166
一、边际效应·····	166
二、糜子产量和水分利用效率·····	166
三、经济效益分析·····	167
四、小结·····	168
第十章 半干旱偏旱区玉米根域集水种植技术研究·····	169
第一节 不同带型对玉米生长发育及光合生理的影响·····	169
一、试验点概况及试验方法和材料·····	169
二、结果与分析·····	170
第二节 不同带型的产量效果分析·····	177
一、玉米产量和水分利用效率·····	177
二、玉米穗部性状·····	178
三、经济效益分析·····	178
第十一章 半湿润偏旱区玉米根域集水种植技术研究·····	180
第一节 试验设计与测定方法·····	180
一、试验区概况·····	180
二、试验设计·····	180
三、测定项目与方法·····	181
第二节 不同覆盖模式下根域集水种植农田水温状况·····	182
一、玉米生育期土壤水分状况·····	182
二、土壤温度·····	187
第三节 不同覆盖模式下根域集水种植对玉米生长发育的影响·····	192
一、生育进程·····	192
二、玉米株高·····	193
三、玉米生物量·····	194

四、籽粒产量及其构成因素·····	195
五、籽粒产量水分利用效率·····	196
第十二章 半干旱区作物根域集水种植技术研究·····	198
第一节 旱地胡麻根域集水种植技术研究·····	198
一、试验设计·····	198
二、结果与分析·····	199
第二节 马铃薯根域集水种植模式研究·····	203
一、试验设计·····	203
二、结果与分析·····	204
第三节 玉米根域集水结合覆盖种植技术研究·····	213
一、试验设计·····	213
二、结果与分析·····	214
第四节 旱地冬小麦根域集水种植增产效应及土壤水分动态·····	224
一、试验设计·····	224
二、结果与分析·····	224
参考文献·····	227
图版	

第一章 国内外根域集水种植研究进展

第一节 雨水集流的概念与类型

一、雨水集流的概念

雨水资源的利用有广义和狭义之分。从广义上讲,凡是利用雨水的活动都可以称为雨水集流利用。如兴建水库、塘坝和灌溉系统等开发利用地表水,打井开采地下水以及人工增雨措施等活动。而狭义的雨水集流是指直接利用雨水的活动,如利用一定的集水面收集雨水用于生活、农业生产和城市环境卫生等。雨水集流(集水, water harvesting)术语最早是由 Geddes (1963) 提出的,并将其定义为:“收集和贮存径流或溪流用于农业灌溉使用。”后来,在此基础上, Myers (1964, 1967) 对雨水集流的概念进行了修改,将其定义为“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”,并指出“贮存”是集水系统重要的有机组成部分。后来, Reij 等 (1988) 比较全面地将雨水集流定义为收集各种形式的径流,用于工农业生产、人畜饮水或其他用途。地表径流是集水系统中的关键因素,包括降雨、融雪径流和季节性溪流。

二、雨水集流的类型

降雨径流的收集和利用是集水的主要形式,曾出现了“径流农业”(runoff agriculture, runoff culture, runoff farming)、“雨水集流”(rainwater harvesting, rain harvesting, rainwater collection, rainfall collection)、“雨水集流农业”(rainwater harvesting agriculture)、“洪水收集”(floodwater harvesting, water pounding)、“生物集水”(biological water harvesting)等术语。其中所谓径流农业,又称聚流农业、集水农业等,就是充分利用现有的降水资源和径流资源,把集水技术与农业生产相结合的农业生产技术的总称(马天恩和高世铭, 1997)。其中的集水农业这一概念也有狭义和广义之别,狭义的概念是指干旱地区为满足农作物和其他植物的生长用水,采取综合措施,将大面积的降水集中到小面积上使用,将汛期降水转移到旱季使用,以保证农业稳产和高产。广义的概念是指重点解决旱区生态经济中的脆弱环节——“水”的问题,即在旱区进行农业的综合开发,从而促进旱区整个生态经济的良性循环。它包括聚流(集水)措

施、集约用水（旱区节水农业）、保水措施和集水区综合开发。其实质一方面是控制耕地径流非目标性输出和汇聚非耕地的径流，另一方面是对汇聚的宝贵的径流水资源加以充分和高效利用。在降水是唯一水源或主要水源的旱农地区，根据水量平衡原理，为了增加土壤的贮水量，只有通过减少或消除地表径流、抑制土壤无效蒸发，才能达到提高土壤含水量的目的。其中集水技术是一种十分有效的方法，它把较大范围上的降水（地表径流）聚集到小面积农田上使用，以弥补农田水分的不足。也就是将旱地农业区有限的、季节分布不均的降水，尽量保留和集中在农田里，供农作物生长发育之需，从而获得旱地作物的稳产和高产。高世铭（1995）、赵松岭（1996）和李凤民（2000）等学者提出的集水农业（catchment agriculture）、集水补灌（catchment supplement irrigation）等概念是对集水农业利用的扩展和完善。集水措施从形式和种类上常常取决于当地的地理环境和气候条件，其集水方式千差万别，例如，集流梯田、微型集水区集雨等。但各种措施有以下共同特点：①各种集水技术都适用于干旱和半干旱地区，由于径流产生的间歇性，贮存是集水系统的一个有机组成部分；②集水系统基于利用地表径流，由产流区和存水区组成；③大部分集水系统是就近利用水源，不包括水库中贮存的河水和开采的地下水；④集水系统在集水区面积、贮存量和资金投入方面属于小规模操作。

第二节 根域集水种植的发展阶段

根域集水种植技术的雏形最早可追溯到公元前 6000 多年前的阿兹泰克和玛雅文化时期。在青铜时代，沙漠的居民将山坡修整以增加雨水径流，又挖沟截引使水流入较低的田地，这一措施使平均雨量约为 100mm 地区的农业得到了发展，距今已有 4000 多年的历史。我国科学家把雨水集流的发展划分为雨水利用初始阶段、雨水集流基础性研究阶段和集水技术系统研究三个阶段（高前兆等，2004）。在雨水集流基础性研究阶段，我国农业科技工作者在雨水集流快速发展的基础上，提出了农田根域集水种植技术，近几年，关于此种植技术方面的研究迅速增多，并日趋成熟。

一、雨水集流与利用初始发展阶段

在古代，伊拉克被认为是集水技术起源和发展的地区，在 4000~6000 年前，这一技术被用来为穿越沙漠的商旅提供水源；4000 多年以前，以色列内格夫（Negev）沙漠地区的农民利用修整过的山坡来增加雨水的径流，并且把径流直接引入山谷中的耕地中；1000 多年前，在墨西哥、秘鲁和南美的安第斯山山坡

上建造了既能灌又能排的旱作梯田；15 世纪，印度的 Thar 沙漠地区就开始采用集水农业系统；20 世纪 70 年代从卫星照片上发现了埃及北部古代的径流收集系统；在美国的西南地区也有一些印第安人 500 年前使用过类似的系统收集雨水，种植玉米、南瓜和甜瓜。我国在唐代时期盛行“淤灌”，600 多年前就已经有水窖、旱井等设施。雨水的利用开始基本都是从洪水灌溉开始的，比较传统的利用方式有以下几种：一是在漫长的边坡上沿等高线筑堤坝以拦截分散降雨径流，一方面灌溉田地，另一方面通过泥沙淤积，逐渐形成窄条梯田；二是在山坡的排水沟中修筑拦水设施，通过泥沙淤积变成小块田地；三是修筑引水渠，将山前洪水引进邻近的耕作区灌溉；四是修筑小的蓄水坝，将季节性洪水贮存起来，通过渠道系统浇灌农田或供人畜饮用。这个时期，只建了少数的人造集雨区，主要是由政府部门经办的（高前兆等，2004）。

二、雨水集流基础研究及根域集水种植技术模式初步形成阶段

雨水集流技术在 20 世纪 50 年代以前发展得比较缓慢，由于第一次、第二次世界大战和政治动荡，许多古老的径流农业区已遭破坏而被遗弃。加之由于机械动力开发河流与地下水技术的迅速发展，人们对于雨水集流利用的兴趣在这个阶段有所下降。在 20 世纪五六十年代以后，随着第二次世界大战的结束、经济的复苏、全球旱灾频率的加快和人口的增长，特别是 70 年代非洲大旱灾发生后，古代雨水集流的利用技术重新受到人们的关注，在有关国家政府的参与和科技人员的努力下，随即投入了较大规模的理论与技术开发。仅 1910~1980 年就有 170 篇有关集水的文章发表。1950 年，在西澳大利亚，修整了几千平方千米（数万亩^①）的集水区，为家庭及牲畜供水，这在当时是最大的人工集雨场。后来，1956~1968 年，以 Evenari 等（1968）为代表的科学家在内格夫荒漠区的萨夫塔和阿夫达特两个地区重建集水农场并进行研究。十多年的研究取得了丰硕的成果，摸清了内格夫地区在不同集水区面积、坡度和石子覆盖度下降雨量与径流量的关系，以及集水措施对作物和草场产量的影响，提出了黄土径流理论，主要结论为：集水区和耕作区面积之比为（17 : 1）~（30 : 1），平均为 20 : 1，即每公顷耕地以 20km² 山坡麓陵集水区收集径流，耕地上可得到 300~400mm 的径流和 100mm 的直接降雨，单位面积径流量和产流率随着集水区面积的增大而降低。在美国，以 Frasier 等（1975，1979）科学家为代表主要集中研究了集水面处理方式对于径流的收集效率及其水质的影响。集流面的处理方式包括机械处理（清除杂草、平整土表和夯实），喷洒化学剂及用膜覆盖地表。澳大利亚科学

① 1 亩≈666.7m²，后同。

家 Hollick (1982) 等对道路型集流面的降雨到形成径流过程、集水面的坡度和面积、土壤的冲刷和风险评价、径流的分散和贮存以及对蒸发和下渗的防治做了深入研究。印度广泛盛行集水种植技术, 70 年代以来印度西北地区研究提出了暴雨集水法。集水种植是印度旱地农业技术的重要组成部分, 主要在降水量少的地区采用, 有三种形式: 一是利用蓄水池收集田间降雨, 在降水好的年份可以把总降水量 16%~26% 的径流收集起来, 作为补充灌溉的水源; 二是利用田内集水, 即通过收集周围平地或集水区的水分来稳定作物产量。位于左德薄尔的干旱地带研究所, 采用把耕地分成不同条带的办法 (分为种植带和不种植带, 后者为集水区, 向种植区倾斜), 在雨水好的年份, 种植区除可得到 117~528mm 的直接降水外, 还可从集水区获得 23~100mm 的径流作为灌溉水; 三是发展微型集水区种植。种植区为沟, 集水区为垄, 分别单行向沟倾斜, 类似我国的微集水种植, 只是作物种在沟里, 不是种在垄上。同时, 印度在坡降 3%~5% 的旱坡地下方修 2000m³ 水池作为补灌水源。在南部山区上, 坡耕地采用种植带和非种植带等高相间排列, 丰水年种植带可获得 328mm 的直接降水和 100mm 的集流水。60 年代, 中国科学家在黄土高原进行水土保持研究时就提出了鱼鳞坑和水平沟技术, 70 年代在吕梁山还采用反坡梯田发展雨养农业。在此阶段, 集水技术在伊朗主要用于果树如杏扁桃、阿月浑子、石榴、橄榄以及草场植物苜蓿、兰草的种植。这时期的重要著作有: 美国国家科学院编著的《干旱地区集水保水技术》(1974 年); Frasier 主编的《集水会议论文集》(1974 年); Hillel 主编的美国农业部科技报告《干旱区径流增加措施》(李小雁和张瑞玲, 2005)。

三、集水技术系统研究及根域集水种植技术快速发展阶段

20 世纪 80 年代以后, 面对地表水的匮乏、地下水位下降、水质变坏、土壤的盐渍化和沙漠化等环境问题, 人们对于雨水资源的合理利用有了更深刻的认识。80 年代初, 国际雨水收集系统协会成立以来, 各国对雨水的利用进行了系统的研究, 如东南亚的尼泊尔、菲律宾、印度和泰国, 非洲的纳米比亚、坦桑尼亚和马里等国。雨水利用范围从生活用水向城市用水和农业用水发展, 这一阶段雨水集流的研究主要集中在以下几个方面 (高前兆等, 2004): ①集雨系统的分类研究。Boers 和 Ben-Asher (1982) 将此前世界各地的集水系统分为两类: ①微型集水区集雨系统 (micro-catchment water harvesting, MCWH)。MCWH 具体指收集面积为 0.5~1000m² 的集水区 (contributing area, CA) 上的地表径流, 经过不大于 100m 的距离, 存入邻近的称为入渗区 (infiltration basin, IB) 的根系土壤中, 供植物吸收利用。CA 和 IB 是 MCWH 的两个基本元素, 其面积之比 (CA/IB) 是 MCWH 设计的关键参数, 因此是各国科学家研究的重点, 但

他们得出的结论相差很大,为1~25,主要是由于各地气候、土壤条件和作物需水量不同所致。MCWH的优点是径流率高,投资少,容易建设;缺点是单位面积产量低,因为MCWH工程占地较多,作物密度小。⑤径流农场集雨系统(runoff farming water harvesting, RFWH)。所谓RFWH是指收集CA上地表径流,通过沟、渠、坝等将其引入地面贮水设备(surface reservoir, SR)蓄存或将其导入作物根区直接为作物所利用,其设计关键是依据CA与SR的相对大小的确定。没有SR的RFWH称为径流农场,如上文所述的内格夫集雨径流农场。RFWH的优点是,通过SR可以使有限的水在时间和空间上得更合理地分配,因此常用于家畜饮用或关键期的农田灌溉;其缺点是建设SR和从SR到农田的输水系统需较大的投资。Prinz等(2000)将集雨系统进一步细分为4种类型:①屋顶集雨系统。在屋顶和庭院安装管道、输水设备和蓄水设备,收集屋顶上的雨水供家庭饮水、卫生、养畜等使用。②小型集雨系统。与上述MCWH相似,集水区面积在 1000m^2 以下,种植区面积在 100m^2 以下,两者之比为 $(1:1) \sim (10:1)$;种植区仅种一棵树或部分灌木或一年生作物;主要由手工建成,不设溢流口。③中型集雨系统。集水区经过处理或不处理,坡度为 $5\% \sim 50\%$,面积为 $1000 \sim 2\,000\,000\text{m}^2$;种植区或为梯田或为坡度小于 10% 的缓坡;集水区面积与种植区面积之比为 $(10:1) \sim (100:1)$;由手工或机械建成,设溢流口。④大型集雨系统洪水集流系统。需建设复杂的渠坝体系,收集雨季时季节性河流形成的洪水;集水区面积为200万~500万 m^2 ,集水区面积与种植区面积之比为 $(100:1) \sim (10\,000:1)$;收集的雨水蓄存于水库、池塘和农田土壤中,其主要用途为补充作物所需的土壤水分、回补地下水和减小洪水灾害造成的损失。主要由机械建成,设溢流口。

②关于集雨模型的研究。1982年以前,专门针对雨水收集利用的模型研究很少,相关研究集中在模拟降水-径流关系的水文模型和模拟雨水入渗、径流等物理过程的土壤物理模型两个方面(程序等,1997)。比较著名的降水-径流关系模型有径流系数模型、等时线模型、单位过程线模型、SCS模型、Orstom模型等(赵松岭,1996)。1982年以后,随着国际上集雨农业研究热潮的形成,关于集雨模型的研究也逐渐多了起来。Boers(1986a)为探寻不同气候、土壤条件下小型集雨系统工程建设中合理确定集水区面积与种植区面积的最佳比值的考虑,应用一维瞬时有限差分土壤水分平衡模型建立了一个描述缺乏长期气象水文资料地区降水和径流关系的线性回归模型,并应用内格夫集雨径流农场的试验资料对此模型进行了检验校正。Critchley和Siegert(1991)在考虑生长季作物需水量、预期降水量、集水区径流系数及种植区内水分的蒸发、渗漏和非均匀分布等因素的基础上,提出了一个简单的集水系统模型,该模型也旨在确定合适的集水区面积与种植区面积之比。近些年来,集雨系统模型逐步向全面、准确和实用的方向发展,模型中大多详细考虑了土壤水