



Research and Application on
Water-saving Technology of Micro Irrigation
for Mature Grapes in Arid Area

干旱区成龄葡萄 微灌节水技术研究与应用

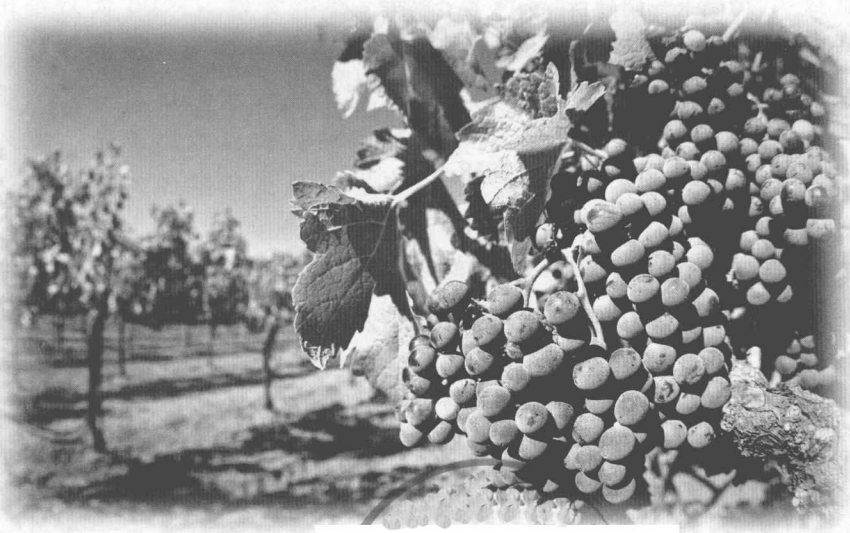
张江辉 白云岗 王全九 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

干旱区成龄葡萄 微灌节水技术研究与应用

张江辉 白云岗 王全九 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

大力发展节水技术,建设节水型社会是干旱区实现水资源合理配置与可持续利用的必由之路。本书较为系统地介绍了吐鲁番地区葡萄生长环境特点、葡萄需水规律及耗水特征、微灌成龄葡萄灌溉制度制定、葡萄园田间毛管布置方式优化、垂直线源灌与深层坑渗灌两种微灌灌水新方法、微灌成龄葡萄生长模型、葡萄水分高效利用综合调控技术应用模式等方面的内容。全书共分13章,包括概论、吐鲁番盆地自然与社会经济概况、试验研究区基本情况调查研究、土石混合介质水分入渗特性试验研究、潜在蒸散特征及葡萄水分传输机制研究、葡萄需水规律及灌溉制度研究、葡萄微灌技术研究、滴灌葡萄生长特征与作物模型、垂直线源灌葡萄生长与水分利用、坑渗灌葡萄生长与水分利用、葡萄水分高效利用综合调控技术研究、极端干旱区成龄葡萄水分高效利用模式及应用示范、结论与建议等内容。

本书可供农用水利、水资源、水文、林业、果树等专业的生产、教学、科研、管理及决策者使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

干旱区成龄葡萄微灌节水技术研究与应用 / 张江辉,
白云岗,王全九著. — 北京:中国水利水电出版社,
2014.12

ISBN 978-7-5170-2818-5

I. ①干… II. ①张… ②白… ③王… III. ①葡萄栽
培—节水栽培—研究 IV. ①S663.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第311252号

书 名	干旱区成龄葡萄微灌节水技术研究与应用
作 者	张江辉 白云岗 王全九 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 (发行部)
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 25.5印张 558千字
版 次	2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷
定 价	98.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

新疆地处我国典型的内陆干旱区,气候干燥、降雨稀少、蒸发强烈,水资源紧缺,生态环境脆弱。“荒漠绿洲、灌溉农业”是其显著特点,没有灌溉就没有新疆农业的发展。新疆河川径流总量为 879.0 亿 m^3 ,单位面积的产水量仅为 4.8 万 m^3/km^2 ,居全国倒数第三位,水资源短缺是制约新疆经济社会发展的主要障碍因素之一。因此,大力发展节水技术,建设节水型社会是新疆永恒的主题。新疆农业用水占总用水量的 95% 以上,但农业灌溉水利用率仅为 50%,粮食作物的水分生产率仅为 0.8 kg/m^3 ,农业节水潜力巨大。随着新疆经济社会的快速发展,绿洲社会经济与生态环境用水的矛盾会更加尖锐,以科技支撑农业高效节水灌溉技术的大规模推广应用,建立节水型农业,是实现水资源可持续利用的必由之路。

在新疆灌区的建设发展历程中,推广与应用农业节水灌溉技术一直是重要的内容。20 世纪 50 年代主要进行旧灌区改造,从 60 年代开始,随着新疆农田基本建设的蓬勃发展,各地区开展了改进地面灌水技术的研究与推广工作,主要针对传统的既浪费水量又破坏土壤结构的格田漫灌和大畦漫灌的灌水方法进行改进。70 年代中后期,许多地区引进和推广过小畦灌、长畦短灌、标准沟畦灌、细流沟灌和沟植沟灌等改进地面灌水技术,取得了显著的节水效果。80 年代后期由新疆的科技人员在地膜栽培的基础上首先提出膜上灌水技术,又是对传统地面灌技术的一大突破。新疆从 70 年代中期就开始了喷灌、微灌等高效节水技术的引进试验和示范,近 30 年来经历了起步、发展、徘徊、提高等几个阶段,取得了不少经验。到 90 年代后期,随着技术的逐渐成熟及其显著的节水增产效果,大田膜下滴灌技术发展迅速。近年来兵团系统几乎所有棉田都使用了膜下滴灌技术,地方系统也以每年新增 200 万~300 万亩膜下滴灌面积快速发展。截至 2013 年年底,新疆高效节水灌溉面积近 3800 万亩,占总灌溉面积的 41%;其中微灌面积已达 3600 万亩,占全国微灌面积的 75% 以上,成为全国高效节水面积最大的省区。

新疆大田作物膜下滴灌技术发展很快,也取得了系列成果,但新疆特色林果业高效节水技术的应用进展缓慢。这有诸多原因,但主要原因是缺乏对果树类作物微灌技术的系统研究,没有可供实际推广的综合技术体系与应用

模式。目前，新疆特色林果基地规模已达到 2000 万亩，特色林果已成为当地农民的主要收入来源。但新疆林果田间多以传统地面灌溉为主，灌溉效率低，平均毛灌溉定额高达每亩 1000m³ 以上，不仅造成大量水资源浪费，而且导致林果品质低、经济效益差，严重制约了新疆林果业的健康发展。十分高兴看到以新疆水利水电科学研究院张江辉研究员为首的研究团队撰写的这部葡萄微灌专著，本书是在“十一五”国家科技支撑计划课题“极端干旱区成龄葡萄微灌关键技术研究示范”、新疆自治区科技重大专项课题“果树和葡萄节水灌溉技术开发与示范”以及“十二五”国家科技支撑计划课题“新疆绿洲灌区林果高效节水综合技术研究示范”研究成果基础上，通过进一步的凝练、充实、深化和理论升华而形成。参加课题研究的新疆水利水电科学研究院、西安理工大学、吐鲁番地区水科所、新疆葡萄瓜果研究开发中心等区内外的科技人员，克服了种种困难，根据吐鲁番盆地的气候、土壤等自然环境条件，分别在吐鲁番地区的火焰山山南与山北地区，建立了两个葡萄高效节水试验基地。历经 5 年多的研究，通过大量现场田间试验、综合调查及数学模拟分析，解决了成龄葡萄应用微灌技术过程中存在的多项技术难题，实现了成龄葡萄微灌技术大面积应用推广，打破了多年以来当地干部群众认为在极端干旱的吐鲁番地区成龄葡萄不宜采用滴灌技术的结论，对于新疆乃至干旱区成龄葡萄高效节水技术的应用推广意义深远。

本书较为系统地介绍了吐鲁番地区葡萄生长环境特点、葡萄需水规律及耗水特征、成龄葡萄灌溉制度制定、葡萄园田间毛管布置方式优化、垂直线源灌与深层坑渗灌两种微灌灌水新方法、成龄葡萄微灌生长模型、葡萄水分高效利用综合调控技术应用模式等方面的内容。研究涉及内容较为全面，并取得了大量的新资料和新数据，形成了多项具有实用价值的创新成果。同时，研究取得的成果与生产实践紧密结合，体现了水利科研工作者把科研成果写在大地上，更好地服务于“三农”的务实精神。本书的出版必定会在今后的农业节水技术推广实践和理论研究方面发挥重要的作用。

中国工程院院士
中国农业大学教授



2014 年 10 月 8 日

吐鲁番地区地处天山博格达峰南麓，位于新疆维吾尔自治区中东部，东临哈密，西、南与巴音郭楞蒙古自治州的和静、和硕、尉犁、若羌县毗连，北隔天山与乌鲁木齐市及昌吉回族自治州的奇台、吉木萨尔、木垒县相接，是中国内地连接新疆以及中亚地区的重要交通枢纽。吐鲁番地区是天山东部的一个东西横置的形如橄榄状的山间盆地，四周高山环抱，形成了日照长、气温高、昼夜温差大、降水少、风力强五大特点，素有“火州”、“风库”之称。吐鲁番地势北高南低中间凹，火焰山自西而东横贯盆地中部，山前是戈壁、中部是低洼平原，南部土石山、戈壁、荒漠三种类型兼有。吐鲁番盆地最低处为艾丁湖，艾丁湖是我国大陆最低处（海拔-154m），也是世界陆地第二低处。

吐鲁番地区属典型温带大陆性气候，气候干燥少雨，太阳辐射强，夏季高温多风。年平均气温 13.9℃，年平均降水量仅为 16.5mm，而年平均蒸发能力高达 3300mm，蒸降比高达 200。全年气温高于 35℃ 的炎热天气平均为 99 天；高于 40℃ 的酷热天气平均为 28 天，属极端干旱区。吐鲁番地区也是我国资源性严重缺水的地区之一，水资源有天山水系、火焰山水系、坎儿井水系等。目前吐鲁番地区水资源开发利用程度已达本区占有水资源量的 130%，年超采地下水约 4 亿 m³，全地区 70% 的绿洲灌区都处于超采区。地下水位持续下降，平均年降落幅度 0.5~1m，一些地区累计降落深度已达 20m，我国古代三大水利工程之一的坎儿井也面临消失的局面。灌区周边天然生态日益退化，艾丁湖基本干涸，沙漠化和风沙危害日趋严重。水资源短缺已成为该地区农业及社会经济可持续发展的“瓶颈”。

吐鲁番地区农业是用水大户，农业用水占总引用水量的 95% 以上。由于气候干旱，日照时间长，葡萄种类多、品质高，吐鲁番葡萄举世闻名，吐哈地区（吐鲁番与哈密）为我国著名的葡萄生产基地。葡萄种植为吐哈地区重要的特色支柱产业，占农作物种植总面积的 80.3%，其中成龄葡萄园占葡萄种植总面积的 68.6%。但由于灌溉方式落后，大部分地区仍采用传统

的地面灌灌水方法，灌溉定额平均为 $1.8 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ ，部分区域灌溉定额高达 $2.7 \text{ 万 m}^3/\text{hm}^2$ ，总耗水量的 90%。因此，发展葡萄高效节水灌溉技术成为该地区缓解水资源供需矛盾的主要途径之一。

“十五”以来，随着吐鲁番地区经济的迅猛发展和相继发现的大型油气、煤等资源开发，工业对水资源的需求越来越大。作为当地支柱产业之一的葡萄种植业，也是最大的水资源消耗户，吐鲁番地区葡萄高效节水技术发展的问題引起了自治区科技、水利部门及吐鲁番地区政府的高度重视。为了探讨吐鲁番地区成龄葡萄微灌节水技术应用模式，加速先进节水技术的示范与推广，促进科技与生产实际的紧密结合，2007 年新疆水利水电科学研究院申请立项“十一五”国家科技支撑计划课题“极端干旱区成龄葡萄微灌关键技术研究示范”和新疆自治区科技重大专项课题“果树和葡萄节水灌溉技术开发与示范”，2011 年又申请立项了“十二五”国家科技支撑计划课题“新疆绿洲灌区林果高效节水综合技术研究示范”。课题主持单位新疆水利水电科学研究院与西安理工大学、吐鲁番地区水科所、鄯善瓜果研究所等单位密切合作，相继开展了成龄葡萄需水规律与耗水特征、微灌成龄葡萄需水量与优化灌溉制度、成龄葡萄微灌技术筛选与优化等方面的研究工作。研究工作开展以来，共投入 30 余名科技人员长期坚持在第一条线进行研究工作，共布置试验小区 300 余个，试验累计面积 35 hm^2 ，采集田间土壤水分、气象及植株等各类基础数据 9 万余组。通过近 6 年的研究工作表明：采用科学的田间水肥管理，成龄葡萄采用微灌技术是可行的，在节约用水的情况下还可保证葡萄稳产，提高葡萄品质。研究成果在生产实际中得到了较大面积的推广应用，取得了显著的经济、社会与生态效益。

在项目研究中，采用室内野外结合、点面结合、定位试验与现场示范相结合、实验分析与综合调查结合等研究方法，系统探索成龄葡萄微灌节水技术体系与应用模式。在试验研究方面：针对吐鲁番盆地气候、土壤等自然环境条件，分别在吐鲁番地区的火焰山山南与山北地区，建立了两个葡萄高效节水试验基地。通过分析测试土壤水分和养分变化、气象、葡萄根系分布、植株生长量、光合、产量、品质、微灌产品水力特性等指标，探讨了葡萄微灌节水增效的机制，确定优化的葡萄微灌节水技术模式；在模拟分析方面：通过采集的大量野外数据，基于水量平衡原理、空气动力学法、能量平衡原理以及 SPAC 水分传输理论，构建土壤水分入渗模型、果树水分生产模型、

根系吸水模型、蒸腾蒸散模型等，分析土壤水分动态分布、葡萄的水分散失途径及特征，为定量确定灌溉制度提供技术指导；在综合调查方面：设置全地区三个县（市）12个村镇为调查对象，通过谈话、问卷、个案研究等科学方式，调查近年农户的灌溉面积、灌溉水源、调蓄条件、灌溉用水量、水价、种植作物、栽培方式、作物产量、轮灌制度、灌水方式、灌水次数、灌水定额、农民对现状栽培方式与灌水方式的评价、当地对主要作物栽培方式与灌水技术应用的期望等，并对调查搜集到的大量资料进行分析、比较、归纳，总结凝练节水技术发展模式；在系统集成示范推广方面：通过对研究成果从节水灌溉技术、农艺节水技术、管理节水技术等方面进行技术筛选、优化、组装和集成，在吐鲁番市葡萄乡、鄯善县七克台镇建立2个核心示范区，以点带面，辐射推广。

本书内容是在国家科技支撑计划课题与自治区科技重大专项课题的资助下，针对吐鲁番葡萄微灌技术应用中存在的问题，首次较为系统地开展葡萄微灌节水技术研究工作的总结；揭示了成龄葡萄需水规律和耗水特征，提出了成龄葡萄微灌灌水技术及灌溉制度、田间供水方式、工程设计参数，研发出垂直线源灌与深层坑渗灌两种新型微灌灌水新方法；创新性提出了成龄葡萄生长关键期冠层弥雾环境调控技术，解决了成龄果树应用微灌技术过程中存在的多项技术难题；对目前已有技术和新技术进行组装集成，形成了干旱区成龄果树植株冠层与大气界面、土壤与大气界面、根系与土壤界面的水肥综合调控立体节水农业技术与应用模式，并进行了推广应用。打破了在吐哈盆地极端干旱地区葡萄不能采用微灌灌水的说法，改变了当地干部群众对微灌灌水的认识。目前普遍认为该项技术不仅节水、节肥、节劳，而且能保证稳产和改善葡萄品质，研究成果的应用促进了人们起初抵触、怀疑到最终认可、欢迎的思想转变，取得了良好的示范带动作用和社会效果。

本书共分13章，前言、第1章由张江辉、白云岗撰写；第2章由关东海、张胜江、蔡军社、杨建云撰写；第3章由白云岗、卢震林、曾辰、蔡军社撰写；第4章由王全九、杨艳芬撰写；第5章由张江辉、刘洪波、白云岗撰写；第6章由白云岗、张江辉、王永杰、卢震林撰写；第7章由张江辉、白云岗、王全九、陈若男撰写；第8章由王全九、苏李君撰写；第9章由王全九、曾辰、程慧娟、李淑芹撰写；第10章由张建丰、李涛、杨潇撰写；第11章由张江辉、白云岗、卢震林、刘洪波撰写；第12章由白云岗、张江

辉撰写；第13章由张江辉、白云岗撰写。全书由张江辉、白云岗、王全九进行整理统稿，并由张江辉最后审定。新疆水利厅水利科技信息中心李晓萍对书稿进行了校核。此外，肖军、冯杰、丁平、李汉飞、南庆伟、裴青宝、陈光、赵荣华、白世践等人参与了课题研究的野外试验及数据采集工作。

在书稿付梓出版之际，感谢为干旱区成龄葡萄微灌节水技术研究付出辛勤努力和艰辛劳动的同事和同学们，特别是每年近8个月工作在现场的试验研究人员，是你们在40多度高温的酷暑和蚊虫肆虐的工作环境下采集到了第一手的宝贵资料。感谢新疆维吾尔自治区人大常委会副主任董新光教授，科技厅黄娟、刘志敏处长，水利厅王新、王永增处长，兵团水利局顾烈峰高级工程师，中科院新疆生态与地理研究所田长彦、周宏飞研究员，新疆农业大学马英杰、虎胆教授，新疆农科院钟新才、马雪琴研究员，新疆水科院荆汝康高级工程师等给予的关心与指导，感谢吐鲁番地区水利局、吐鲁番市水利局、鄯善县水利局、吐鲁番市葡萄乡等相关部门的大力支持与协助。

由于研究者水平和时间及经费所限，对有些问题的认识和研究还有待于进一步深化与完善，错误和不足之处亦必颇多，恳请同行专家批评指正。

作 者

2014年10月

目 录

MULU

序

前言

第1章 概论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 主要研究内容与方法	11
1.4 主要研究进展	13
本章参考文献	15
第2章 吐鲁番盆地自然与社会经济概况	17
2.1 自然条件	17
2.2 社会经济	24
2.3 水资源开发利用及水利工程现状	26
2.4 葡萄产业生产发展状况	29
本章参考文献	31
第3章 试验研究区基本情况调查研究	32
3.1 试验研究区基本概况	32
3.2 成龄葡萄年生长过程分析	40
3.3 葡萄的生理特征	59
本章参考文献	62
第4章 土石混合介质水分入渗特性试验研究	64
4.1 试验设计与方法	64
4.2 垂直一维土石混合介质的试验	68
4.3 水平一维土石混合介质的试验	77
4.4 点源及其交汇条件下的土壤试验	94
4.5 本章小结	115
本章参考文献	117
第5章 潜在蒸散特征及葡萄水分传输机制研究	120
5.1 潜在蒸散特征及计算方法研究	120

5.2 葡萄 SPAC 水分传输机制研究	137
5.3 本章小结	155
本章参考文献	157
第 6 章 葡萄需水规律及灌溉制度研究	159
6.1 基于能量平衡法的葡萄蒸散研究	159
6.2 成龄葡萄需水规律研究	165
6.3 戈壁砾石区域成龄葡萄灌溉制度研究	170
6.4 壤土区域成龄葡萄灌溉制度研究	176
6.5 本章小结	179
本章参考文献	180
第 7 章 葡萄微灌技术研究	182
7.1 成龄葡萄微灌技术筛选	182
7.2 地表滴灌田间毛管布置方式优化研究	189
7.3 滴灌带合理布置参数的数值分析	191
7.4 地下滴灌毛管的布置及灌水器技术参数筛选研究	206
7.5 本章小结	211
本章参考文献	211
第 8 章 滴灌葡萄生长特征与作物模型	213
8.1 滴灌葡萄生长特征	213
8.2 滴灌葡萄根系吸水模型	218
8.3 滴灌成龄葡萄生长模型	237
8.4 本章小结	256
本章参考文献	257
第 9 章 垂直线源灌葡萄生长与水分利用	260
9.1 垂直线源灌溉技术的研发	260
9.2 垂直线源规格对入渗的影响	261
9.3 垂直线源灌水条件下土壤水分分布与模拟	277
9.4 垂直线源灌水条件下的葡萄生长特征	285
9.5 垂直线源灌水条件下的葡萄产量和品质	297
9.6 垂直线源灌水方法的经济性分析与田间优化布设	301
9.7 本章小结	306
本章参考文献	309
第 10 章 坑渗灌葡萄生长与水分利用	311
10.1 坑渗灌灌水技术方法	311

10.2	坑渗灌条件下土壤水分分布特征	313
10.3	坑渗灌条件下葡萄生长特性	346
10.4	葡萄产量与水分利用效率	349
10.5	合理灌溉制度与灌水方法	351
10.6	本章小结	359
	本章参考文献	361
第 11 章	葡萄水分高效利用综合调控技术研究	363
11.1	蓄水保墒技术	363
11.2	覆盖保墒技术	367
11.3	抗旱蒸腾剂喷施技术	370
11.4	弥雾调控技术	373
11.5	本章小结	378
	本章参考文献	379
第 12 章	极端干旱区成龄葡萄水分高效利用模式及应用示范	381
12.1	技术体系	381
12.2	立体节水技术应用模式	383
12.3	应用示范	384
	本章参考文献	387
第 13 章	结论与建议	389
13.1	结论	389
13.2	问题与建议	393
	本章参考文献	395

21.83%，产量占到全国葡萄总产量的 28.47%，葡萄产业现已成为新疆维吾尔自治区和部分地区农民增收的重要途径。就以新疆地区 2009 年葡萄产值占农业总产值的 21.83% 来看，农民人均收入的 60% 来自于葡萄产业。

新疆吐鲁番地区（吐鲁番市和哈密地区）属世界干旱区，也是我国最干旱、最缺水的地区之一。吐鲁番地区年平均降水量仅 45.5mm，而年平均蒸发能力高达 3200mm，蒸发比率为 20%。目前吐鲁番地区水资源开发利用率已达本区占有水资源量的 1/3 左右，年总用水量达 4 亿 m³，全地区 70% 的绿洲都位于灌溉区，但 20 世纪 70 年代以前，随着当地人口日益增加，灌溉的需求不断加大，地下水位持续下降，年总用水量达 4.3 亿 m³。该地区年总需水量达 5 亿 m³，供需差距达 1 亿 m³，随着人口和耕地的不断增加，农业用水需求也在不断增加，同时，该地区的生态环境也在恶化，为了维持生态平衡，必须对农业用水进行严格控制。水资源短缺已成为制约该地区农业和生态经济发展的主要因素。

吐鲁番地区是干旱区，农业用水占总用水量的 80% 以上，由于当地气候干旱，日照时间长且葡萄种植历史悠久，品质高，因此是我国著名的葡萄生产基地，葡萄种植

第 1 章 概 论

1.1 背景与意义

我国水资源总量为 2.8 万亿 m^3 ，占世界水资源总量的 5.6%，人均占有量为 2200 m^3 ，不足世界人均占有量的 1/4，是世界上贫水国家之一。水是人类社会生存与发展的命脉，是干旱区更为稀缺的资源，而节水则是维系干旱区社会经济发展的重要措施。处于内陆干旱地区的新疆是我国缺水最严重的地区之一，“荒漠绿洲、灌溉农业”是其显著特点，没有灌溉就没有新疆农业的发展。新疆河川径流总量为 882 亿 m^3 ，单位面积的产水量仅为 4.8 万 m^3/km^2 ，为全国倒数第三位，干旱缺水是新疆经济发展的主要制约因素之一。从宏观上看，一方面水资源十分匮乏，另一方面由于田间灌溉水平低，灌溉不合理，农业水资源浪费现象严重。

葡萄是人们普遍喜爱的果品，不仅色香味俱佳，营养丰富，保健价值高，用途广泛，可用于酿酒、制干和制汁，而且葡萄树具有适应性强、容易栽培、结果早等优点，使其成为世界五大类果树之一，其栽培面积和产量仅次于柑橘，居世界第二位。新疆是我国第一大葡萄产区，不论是栽培面积，还是产量一直都在国内处于领先地位，而且生产的葡萄品质优良，含糖量高，风味佳，在国内外享有较高的声誉。目前新疆的葡萄栽培面积已经达到 10.99 万 hm^2 ，年产量 165.46 万 t，占到全国葡萄栽培面积的 21.83%，产量占到全国葡萄总产量的 26.47%。葡萄产业现已成为新疆的优势产业和部分主产区农民收入的重要来源，如吐鲁番地区 2009 年葡萄产值占农业总产值的 50% 以上，农民人均收入的 60% 来自于葡萄产业。

新疆吐哈地区（吐鲁番与哈密地区）属极端干旱区，也是我国资源性严重缺水的地区之一。吐哈地区年平均降水量仅 16.5mm，而年平均蒸发能力高达 3300mm，蒸降比高达 200。目前吐哈地区水资源开发利用程度已达本区占有水资源量的 130%，年超采地下水约 4 亿 m^3 ，全地区 70% 的绿洲都处于超采区。自 20 世纪 70 年代以来，随着当地经济社会发展对水资源的需求不断加大，地下水位持续下降，平均年降落幅度 0.5~1m，一些地区累计降落深度已达 20m。许多浅层机井报废，更新的机井抽水扬程接近 100m，农业生产成本也大幅增加。同时，灌区周边生态环境日益退化，艾丁湖基本干涸，沙漠化和风沙危害日趋严重。水资源短缺已成为制约该地区农业及社会经济可持续发展的瓶颈。

吐哈地区农业是用水大户，农业用水占总引用水量的 95% 以上。由于当地气候干旱，日照时间长且葡萄的种类多、品质高，因此是我国著名的葡萄生产基地。葡萄种植

为吐哈地区重要的特色支柱产业,占农作物种植总面积的80.3%,其中成龄葡萄园占葡萄种植总面积的68.6%。但由于灌溉方式落后,大部分地区采用传统的地面灌灌水方法,部分区域灌溉定额高达 $2.7\text{万 m}^3/\text{hm}^2$,葡萄耗水量占农作物总耗水量的90%,发展葡萄高效节水灌溉技术成为该地区缓解水资源供需矛盾的主要途径之一。

吐哈地区早在1980年就开始葡萄滴灌方面的试验研究,20世纪90年代后陆续引进了以色列滴灌技术和美国渗灌技术,特别是1997年后开始了较大规模的葡萄滴灌技术的示范工程建设,整个吐鲁番地区陆续建设的葡萄滴灌面积累计达到 1000hm^2 以上。但采用滴灌技术后,由于对吐鲁番地区极端干旱的区域自然环境条件认识不足、对成龄葡萄耗水特征及需水规律认识不足,盲目照搬其他地区滴灌技术应用于当地,加之缺乏有效的技术成果支撑,无科学的田间水分管理技术进行指导等,导致成龄葡萄落花落果,产量大幅度降低,极大地挫伤了农民的积极性,也使人们得出了这样的结论:在极端干旱的吐哈地区发展微灌技术是不适宜的,特别是对于耗水量大的成龄葡萄,应用滴灌技术供水不足。截止到2006年年底,吐鲁番地区建成的葡萄滴灌示范区相继被废弃,造成了大量滴灌器材的损失与浪费。

因此,针对吐哈地区成龄葡萄微灌技术应用中存在的问题,探讨成龄葡萄需水规律及耗水特征,研究适应极端干旱区域及成龄葡萄需水要求的田间供水方式、制定科学的田间水分管理模式,对于该区域高效节水技术的推广应用,提高区域水资源的利用效率,实现社会经济的可持续发展具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 葡萄生长发育与生理特征研究

葡萄的营养生长和生殖生长在葡萄的整个生育期内是同时进行的,但在葡萄的生育前期以营养生长为主,在生育期后期以生殖生长为主。葡萄的营养生长主要是根系和枝蔓叶片的生长,生殖生长主要是果实的生长。国内外众多研究学者对葡萄枝、芽、叶等器官的生长发育特性、规律和调控技术途径做了大量的研究。葡萄新梢生长一年有两次高峰期。第一次生长高峰以主梢的生长为代表,从萌芽展叶开始至开花前,随气温、土温的升高,根系活动旺盛,新梢也随之加速生长。此后,随着果穗的生长至果实着色,新梢生长速度减缓,而且此时进行田间剪枝管理,地上生物量大小基本维持稳定。第二次生长高峰是以副梢为代表,当浆果中种子胚珠发育结束和果实采收后才表现出来,这次生长量小于第一次。第一次新梢生长的强弱,对当年花芽分化、产量的形成有密切关系,长势过强过弱对开花、坐果都不利。葡萄花序形成与树体营养条件极为密切,若营养条件好,则花序形成也较好,否则花序形成不良,花冠脱落过程推迟,整个授粉受精过程也相应被延长。葡萄的浆果生长一般经历快速生长初期、缓慢生长期和第二次生长高峰期三个阶段。果实糖度是评价葡萄果实品质的重要指标之一,它在生长第二期产生

较少,进入第三期后,浆果慢慢变软,酸度下降,糖度会迅速增加,直到果实生理成熟为止。葡萄的果实品质和产量是人们追求的目标,葡萄树体质量与果实品质、产量有着因果关系,前者是后者的基本保证,所以营养生长和生殖生长在葡萄的整个生育期内都非常重要。王世平等对巨峰葡萄的根域限制研究发现抑制树体的营养生长可以提高果实的品质和产量。有学者认为,可以通过调整干物质在植物不同器官间的分配来优化物质和能量的获取和利用,以获得最大产量。杜太生等研究结果表明,通过调控葡萄营养生长与生殖生长,减少生长冗余,可以起到节水高效的作用。葡萄的叶片既是葡萄进行光合作用和蒸腾作用的主要器官,同时也起到遮阴降温防止葡萄果粒受高温灼伤的作用。因此,了解葡萄营养生长与生殖生长的规律,弄清其相互联系,可以更好地指导田间管理,提高水肥资源的利用效率,从而对实现葡萄生产中的节本、增效具有重要的现实意义。

葡萄的生理生态指标除了受到自身生长条件的影响,还要受到许多外界因素的影响,其中人们研究最多的因素有光照、温度和土壤水分状况等。Ramon Mira de Orduña 指出气候变化,特别是在葡萄成熟期改变温度,会增加葡萄果实的糖度,并同时指出在一些地区已经得到验证,极端高温使葡萄树体的新陈代谢减慢,从而影响葡萄芳香和颜色的形成。董金皋等研究得出延长光照时间可以提高新梢生长速率。白先进等通过对4年生的巨峰葡萄进行补光处理试验研究,研究结果显示,节能灯补光会促进巨峰葡萄的二茬营养生长,而使葡萄新梢生长旺盛,增加枝条节数、叶面积、穗梗长度和果柄长度及果粒大小,也能明显延缓叶片的衰老。徐德源等通过对8个试验点无核白和马奶子葡萄3年的浆果含糖量、含酸量及糖酸比与气象因子的相关分析和回归统计分析,得出热量、日照时数和空气相对湿度对葡萄糖酸含量有密切影响,且对含糖量的影响程度从大到小依次是相对湿度、日照时数、积温;对含酸量影响的关键因子是积温;而气温日夜差不是影响干旱区的新疆葡萄糖酸含量的主要因子。房玉林等研究表明,土壤水分状况会影响葡萄的生理特征,水分胁迫会导致叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度的降低,并且水分胁迫程度越深,各生理指标越低。交替滴灌是布置在葡萄植株两侧的毛管交替供水的一种灌溉方式,该种灌水方式主要是通过改变土壤含水率分布状况从而间接地影响葡萄植株的生长发育特征。Taisheng Du 等学者通过对我国西北干旱区葡萄进行2年交替滴灌试验研究发现,与常规滴灌比较,交替滴灌保持相同的光合速率,但是却可以减小蒸腾速率,从而提高了叶片的水分利用效率,并且7:00到14:00之间叶水势没有显著的差别。

1.2.2 SPAC 系统水分传输机制研究

Philip (1996) 提出土壤—植物—大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, 简称 SPAC) 以来,研究田间土壤水分循环和平衡、土壤—植物水分关系以及地下水—土壤水—地表水—大气水转化均是以 SPAC 为基础的。在 SPAC 中,统一的能量关系对分析和研究水分运移、能量转化的动态过程创造了条件。Thom (1975) 应用扩散理

论,提出了动量和水汽及热量等阻力之间的关系式,并通过大田试验提出了大田风速廓线函数。之后 Bailey 和 Davies (1981) 通过研究得出了动量传输的边界层阻力。Choudhury 和 Monteith (1986) 在前人研究的基础上考虑了表面温度的影响,并计算了边界层阻力。Penning Devries (1972)、Jarvis (1976)、Thorpe et al (1980) 等人模拟出了气孔阻力的模型。国内刘萱和王天铎在借鉴国外研究成果的基础上提出了计算气孔导度的经验公式。卢振民通过分析不同气候因子间的相互关系,得出了气孔阻力与净辐射、空气饱和水汽压、气温等气象因素间的经验公式。康绍忠等通过对小麦等水分状况及水势梯度的研究,得出了 SPAC 系统水流阻力的一般规律。冷石林的研究指出,主要的阻力发生在土—叶和叶—大气两个环节上。邵明安等对水流阻力 Poiseuille 公式计算值与实测值的比较得出了 SPAC 中水流阻力的各个阻点,如茎叶传导阻力、气孔扩散阻力和边界层扩散阻力等,并研究了 SPAC 系统中水流阻力的分布规律。郭庆荣、张喜英等针对小麦、玉米以及油松人工林等水流阻力进行了研究并计算得到所研究作物的水流阻力值。张斌对不同耕作制度下大豆、花生等作物气孔阻力和水流阻力的分布及其日变化规律进行了研究。

赵萍通过对宁夏盐池沙地两种植物的水分生理特征与环境的相互关系的影响分析表明:两种作物的水势梯度和时空变异规律明显,叶水势和大气水势相关性显著。刘广全对黄土高原半干旱地区沙棘人工成林的研究说明,SPAC 系统水势梯度明显,大气水势远远高于叶片水势和土壤水势,而叶片水势略高于土壤水势。杨晓光通过对华北平原夏玉米农田 SPAC 系统中不同界面的水势的测定,经过水流阻力的计算结果表明,水流阻力对作物水分的散失和调节具有重要作用。韩磊对青海 2 年生蒙古莠叶水势变化进行的动态研究表明,SPAC 中水势大小依次为大气水势、叶水势和土壤水势,以此形成水势梯度。徐军亮、周晓燕对油松人工林及盆景植物的水势研究表明,水势梯度会受到不同地区与物种的影响。

1.2.3 SPAC 系统蒸散特征研究

计算蒸散耗水量的方法大致可以分为微气象学法、水文学法、红外遥感法、植物生理学法以及 SPAC 综合模拟法。对于蒸散问题的研究始终是 SPAC 系统研究中重要的一步,多年来,国内外诸多学者对蒸散问题进行了大量的研究,也取得了很多重要的研究成果。其中 Penman 于 1948 年首次将能量平衡原理和空气动力学原理结合起来计算潜在蒸发量,提出了著名的 Penman 公式。由于 Penman-Monteith 模式是将植被群丛看成位于动量汇源处的一片大叶,而将植被冠层和土壤看成一层,故也被称为“大叶”模式或一层模型。由于这种单一性,一层模型受到地面覆盖情况、植被高矮等条件的限制,其很难将植物的蒸腾和土壤的蒸发两者分开计算。基于上述认识,Shuttleworth 等人在对一层模型的概念及其局限性进行了广泛的探讨和研究的基础上提出了二层模型,即所谓的 Shuttleworth-Wallace 模式 (S-W 模式)。国内很多学者针对不同的作物、不同区域的研究环境开展了许多关于计算参考作物潜在腾散量的变化规律及其影响因素的研

究,如 Axel 利用中国 65 个气象站点数据分析了不同区域 ET_0 的时空变化特征。苏春宏通过多年的气象数据资料运用多种蒸散方法计算了内蒙古中部呼和浩特与河套灌区的 ET_0 ,结果显示 FAOPenman 方法与 FAO56 Penman-Monteith 标准公式的计算结果最为接近,且适用于大多数气候条件。胡顺军、史晓楠等人对新疆塔里木盆地、阿克苏地区通过利用 Penman-Monteith 公式或 Penman 修正式计算该地区的参考作物的潜在腾发量,并分析了其影响因素。刘晓英通过 Penman-Monteith 等多个公式对北京地区参考作物潜在腾发量进行了计算,建立了参考作物潜在蒸发量与气象要素的经验关系,并可利用所得经验关系进行该地区参考作物潜在腾发量的估算。李孝广分析了影响 Penman-Monteith 模型精确性的关键因子如净辐射和空气动力项的计算方法。徐俊增通过 ASCE 和 FAO56 两种公式计算了参考作物腾发量小时的差异,康绍忠、吕晓东针对干旱半干旱地区、河西内陆河流域和干旱荒漠草原等不同地区蒸散量的计算方法进行了研究。众多学者的研究表明 FAO56 Penman-Monteith 公式尽管是目前被公认为计算参考作物潜在腾发量最精确、最方便的方法,但受地区差异限制较大,不同地区不同气候条件下存在较大差异。

近年来,由于计算机应用技术与计算机编程语言的迅速发展,为研究和模拟 SPAC 水分传输动态提供了有力的帮助。基于 SPAC 水分传输理论,作物蒸散耗水量的模拟现已成为研究蒸散计算的重要方法,如 Flerchinger 等人在这方面的研究均取得了比较满意的结果。在我国,谭孝元首次提出了 SPAC 水分传输的电模拟程式以及流经 SPAC 水分通量的数学模型,刘昌明提出了 SPAC 蒸散法模型。目前数值计算是求解土壤水分运动最直接有效的方法,虽然该方法存在着所需数据多、运算量大的缺点,但随着计算机技术的发展与应用,前面所提到的问题均可通过计算机软件采用数学模拟方法定量求解。我国在 20 世纪 80 年代后开始利用数值模拟来分析土壤水分运动。雷志栋等在有限元分析基础上,编制了非饱和一维流动 BASIC 计算程序。谢正桐对蒸散二维模型也做过了一些相关研究。杨诗秀等同样通过室内试验对非饱和一维水流数值计算模型 FORTRAN 语言进行了验证。从发展的历程来看,土壤水分运动的研究越来越深入化和系统化,为发展和丰富 SPAC 理论奠定了更为坚实的理论基础。

1.2.4 葡萄需水规律及耗散特征研究

水分是影响果树生长及果品产量、质量的最重要环境因子之一,水分胁迫对果树的形态及生理代谢方面影响的研究揭示了水分亏缺的作用机理及对果树生理生化的影响。D. S. Intrigliolo 等对葡萄叶水势、茎水势和气孔导度的季节变化及不同灌溉方式下的叶水势变化研究表明,中午的叶水势与中午的茎水势相似,气孔导度能很合理地反映葡萄的水分状况。应用根系分区交替滴灌也能达到调控营养生长与生殖生长,减少生长冗余,大量节水而提高水分利用效率的目的。采用垂直线源灌可将水分直接输送到果树的根系,减少土面蒸发损失,同样可以达到提高水分利用效率的目的。M. I. Al-Qinna 研究了湿润体的形状,结果表明湿润体形成成一个 V 形横截面,水平方向水分增长较快而