

# 小桐子

## 水氮高效利用理论与调控技术

杨启良 刘小刚 王卫华 刘艳伟 等 著

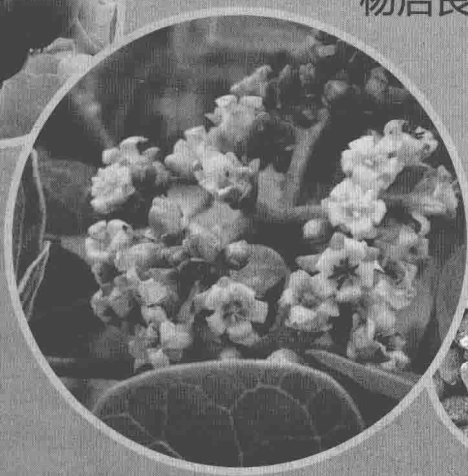
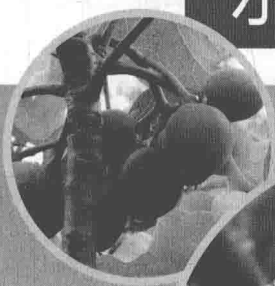


中国农业科学技术出版社

# 小桐子

## 水氮高效利用理论与调控技术

杨启良 刘小刚 王卫华 刘艳伟 等 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

小桐子水氮高效利用理论与调控技术 / 杨启良等著. —北京:  
中国农业科学技术出版社, 2017.1  
ISBN 978-7-5116-2804-6

I. ①小… II. ①杨… III. ①农田—土壤氮素—肥水  
管理 IV. ①S153.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 253568 号

责任编辑 范 潇

责任校对 马广洋

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82106625 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)  
(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106625

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 787mm × 1 092mm 1 / 16

印 张 18

字 数 420 千字

版 次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价 68.00 元

———— 版权所有 · 侵权必究 ————

## 前 言

植物液体燃料作为一种可再生和对环境友好的新型能源,正受到世界各国的重视。中国政府出于粮食安全考虑,自2007年开始将发展重点列有林业生物柴油在内的“非粮”生物液体燃料。开发、利用生物质能是我国目前应对能源危机和环境恶化两大难题的必然选择。能源植物在生物质能源开发利用中起重要的作用,在众多能源树种中,小桐子是目前研究最多、被认为最具发展潜力的原料树种,被公认为最有可能成为未来替代石化能源的生物质能源原料。国家发展和改革委员会颁布的《可再生能源发展“十一五”规划》提出,到2010年,可再生能源在能源消费中的比重达到10%,其中生物质能源作为重要的研究课题,受到国内外众多学者的高度关注。为了将云南省打造成为中国生物柴油大省,云南省政府计划在“十一五”期间种植小桐子1000万亩以上,将生物柴油产业作为云南省的优先发展主题。在科技部的支持下,云南省科技厅组织省内的云南神宇新能源公司、昆明理工大学、云南大学、西南林学院、云南省农业科学院、云南省林业科学院、中国科学院昆明植物研究所、中国科学院西双版纳植物园等8家科研单位和高校,联合申报国家科技支撑计划重大项目——“小桐子生物柴油产业化关键技术研究与示范”,于2007年获批立项。2007年1月23日,中国首辆使用膏桐(小桐子)生物柴油的汽车在云南试用成功,2011年10月28日,中国首次以小桐子精炼油作为航空生物燃料用于客机试飞取得成功。为了减少航空温室气体排放和保障航空能源安全,同时带动并支持中国航空生物燃料产业的发展和升级,从“十二五”规划开始,中国民航将逐步加大航空生物燃料方面的投入和工作力度。因此,小桐子生物质能源产业将有广阔的发展前景。加之,利用小桐子的提取物可以加工生物医药、农药、生物肥料、日常用品和工业用品等,还可以用于植被恢复和水土保持等方面。由于小桐子具有较强的抗环境胁迫能力,人们常认为小桐子能在极其贫瘠的土壤中较快生长并能取得较高的产量,这是误解。专家认为,“小桐子生物柴油产业发展超前了,但研发滞后”。通过科研,大规模提高小桐子的产量是亟待解决的问题。

小桐子(*Jatropha curcas* L.)属于大戟科麻疯树属,为多年生、落叶、茎秆多汁的灌木树种,其果实平均含油率高达40%以上,可提炼生物柴油,号称“生物柴油树”,广泛分布于亚洲、非洲和美洲的热带、亚热带及干热河谷地区。在中国集中分布于西南地区的云南、四川和贵州及东南地区的台湾、福建、广东、广西和海南等地。小桐子可以生长在其他作物难以生长的岩石、沙地和盐碱地等区域,主要用于废弃土壤的复垦和干旱半干旱土壤的植被恢复及重金属污染土壤的修复。然而,日益严重的干旱、水资源短缺和土壤肥力低下是制约季节性旱区小桐子产量提升的主要瓶颈。如何高效利用有限的土壤水肥资源,进一步提高我国小桐子相关产品的生产能力,确保农业和环境的可持续发展是目前我国农业面临的重大

挑战。

作物水肥高效利用理论与调控技术,就是将灌溉与施肥技术有机结合的一项现代农业新技术。它实现了对作物的精准灌溉和施肥,将节水、节肥、节药等技术环节系统设计与管理,实现作物对水肥的协同管理和同步高效利用。自 20 世纪 90 年代开始,许多发达国家如美国、以色列、欧洲等国投入较多资金,研发作物灌溉和施肥技术,并广泛应用于大农场模式的作物水肥管理,不仅节水节肥增效显著,而且氮肥、磷肥用量分别下降了大约 30% 和 50%,曾经一度十分严重的地下水硝酸盐污染也有所缓解。

相对于国外技术水平,中国发展水肥高效利用技术,起步于 20 世纪 90 年代。到目前为止,也形成了较多具有自主知识产权的技术和产品,但自动化程度高的智能灌溉施肥设备多以进口为主,缺乏高水平的自动化控制灌溉施肥设备,特别是与灌溉施肥相配套的设备品种规格少,标准不规范,形式单一,技术含量低。大型过滤器和大容积施肥罐等装置尚属空缺。水肥高效利用与调控技术的研发尚未得到足够重视。还缺乏与灌溉施肥设备相适应的不同作物水分养分管理技术,包括不同作物灌溉施肥制度、可溶性肥料研发技术、作物养分诊断技术以及配套的作物水分养分监测、土壤、作物水分信息传递反馈控制技术等。

农业在追求作物最高产量、最佳品质和最低生产成本的同时,也要保持可持续发展。实现这个目标的前提是要有一个最优且平衡的水肥供应,为了构建生态文明建设,水土资源的保护也是需要考虑的另一个重要方面。在季节性干旱的气候条件下,有时甚至在湿润的气候条件下,最佳的供水状况取决于灌溉方式。在大部分情况下,供水是通过明渠、漫灌和沟灌来实现的。这些方法的水分利用率是相当低的,一般有  $1/3 \sim 1/2$  的带有营养元素的灌溉水不能被作物利用。而在加压灌溉系统中,水分利用率可达 70%~95%,这种灌溉系统可以很好地控制水肥的供应并大大降低水分的损失。

为探讨我国南方季节性旱区主要能源树种小桐子,对水肥资源高效利用机制与节水节肥模式,加速先进水肥高效利用技术的示范与推广,促进科技与生产紧密结合。“十二五”期间,在国家自然科学基金项目“限量灌溉和施氮对小桐子产量和品质效应研究(51009073)”和国家自然科学基金项目中青年-面上连续资助项目,“亏缺灌溉时小桐子对盐胁迫环境的响应与水氮高效利用机制研究”(51379004)及“高原旱区农业节水理论与新技术”团队项目的资助下,对我国南方季节性旱区小桐子水氮高效利用理论与调控技术进行了研究。

笔者的研究针对不考虑农业生产对环境带来的不利影响,只考虑农田生产力和作物单产潜力提高而导致农业面源污染、地下水污染等一系列环境问题,迫切需要在保持作物持续稳定生产的同时,提高水氮的利用效率,减少土壤环境和地下水污染,实现节水节氮增效的目的。这需要在考虑小桐子水氮高效利用的土壤和生理过程及其调控的基础上,研究不同水氮供应下小桐子水分—氮肥—生物量—经济产量的转化过程,探明不同水氮供应下小桐子水分氮肥高效利用的理论与调控技术,揭示有利于小桐子健康生长的水氮互作机制与定向调控途径;研究灌水量对小桐子生长、耗水特性和水分利用效率的影响,提出小桐子水分高效利用的最佳灌溉制度;研究灌溉模式对小桐子生长、耗水特性和水分利用效率的影响,筛选适宜于季节性旱区小桐子水分高效利用的最优灌溉方式;研究小桐子生长、耗水特性和水分利

用效率与保水剂和水氮的关系, 探明保水剂的用量与施用方式及水氮对小桐子水分高效利用的影响机制, 提出最佳的保水剂用量、施用方式和水氮用量; 研究小桐子生长、产量、品质 and 水分利用效率的水氮耦合效应, 提出小桐子水氮高效利用的水氮联合调控理论和技术体系与产品, 在此基础上构建小桐子优质高产栽培的水管理分析决策支持系统, 突破与创新小桐子水氮联合调控技术, 实现小桐子优质高效增产。

小桐子水氮高效利用技术研究, 以实施精确控制为手段, 以充分利用现代高新技术对传统农田灌溉施肥技术进行改造为特点, 达到以实现作物优质高效生产的同时显著提高小桐子水氮利用效率。2011—2015 年, 本课题组先后开展了“季节性旱区小桐子水分、氮肥高效利用的土壤和生理过程与调控技术”“灌溉模式对小桐子生长、耗水特性和水分利用效率的影响”“小桐子生长、耗水特性和水分利用效率对保水剂和水肥的响应、灌溉制度与施肥技术试验”“小桐子生长、产量、品质 and 水分利用效率的水氮耦合效应”“肥液氮素浓度在线检测装置设计与试验”“小桐子环境参数 Zigbee 无线传感器网络监测系统研究”“小桐子优质高产栽培的水管理分析决策支持系统的构建与实现”等 10 多项校内外定位科学试验, 积累了宝贵的科学试验数据。上述试验数据为研究小桐子水氮高效利用理论与调控技术奠定了基础。此项研究建立了大田与设施小桐子灌水与施氮的耦合效应以及小桐子生长、生理、产量和品质与水氮高效利用之间的定量关系, 提出了适合干热河谷区基于小桐子的生长动态、干物质累积、耗水特性和提质高产机理、最佳灌水和施氮指标及耦合模式和提高水氮利用效率的技术手段和调控模式, 为小桐子生长水氮提质提供技术支撑。此项研究成果在生产上已得到大面积推广应用, 取得了重要的经济、社会和生态效益。该项成果在《Agricultural Water Management》《Biomass and Bioenergy》《Procedia Engineering》《农业工程学报》《应用生态学报》《排灌机械工程学报》《干旱地区农业研究》《干旱区资源与环境》等国内外刊物上发表论文 20 余篇, 有关论文在学术界有一定的影响。

本书由昆明理工大学杨启良、刘小刚、王卫华、刘艳伟著。全书由杨启良主编、统稿。

小桐子水氮高效利用理论与调控技术的研究, 是一项十分复杂的系统工程, 笔者的研究成果有限, 对某些问题的认识也较肤浅, 有待进一步探索和深化。书中不足之处, 恳请同行专家批评指正。

在小桐子水氮高效利用理论与调控技术研究过程中, 得到了西北农林科技大学张富仓教授, 广西大学李伏生教授、昆明理工大学杨具瑞教授等对本课题的指导和大力支持, 感谢昆明理工大学现代农业工程学院领导和教师的帮助。感谢在本书编写过程中, 得到了众多同仁和专家的热情帮助和技术指导。

杨启良

2016 年 8 月 26 日于昆明

## ||||||| 著者名单 |||||

第一章 杨启良 王卫华

第二章 杨启良 刘艳伟 孙英杰 刘柯楠 张 京

刘小刚 袁理春 杨具瑞

第三章 杨启良 孙英杰 荣 烨 齐亚峰 刘艳伟

刘小刚 张 京 王卫华

第四章 杨启良 刘小刚 荣 烨 刘艳伟 王卫华

第五章 杨启良 李 婕 王明克 周 兵 李伏生

张富仓 贾维兵 徐 曼

第六章 李云青 李加念 杨启良 雷龙海 武振中

第七章 张 京 杨启良 戈振扬 齐亚峰 周 兵

第八章 谢淑伟 杨启良

## 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 概述                          | 1  |
| 第一节 研究目的与意义                     | 1  |
| 第二节 小桐子水氮高效利用技术研究的总体思路          | 4  |
| 第三节 小桐子水肥高效利用技术与调控模式            | 10 |
| 参考文献                            | 15 |
| 第二章 灌水量对小桐子生长、耗水特性和水分利用效率的影响    | 17 |
| 第一节 国内外研究进展                     | 17 |
| 第二节 研究内容与方法                     | 27 |
| 第三节 灌水量对小桐子形态特征和水分利用的影响         | 30 |
| 第四节 不同灌水处理对小桐子生长及蒸散耗水特性的影响      | 34 |
| 第五节 限量灌溉对小桐子生长和水分利用的影响          | 38 |
| 第六节 基于水分胁迫的小桐子根系三维可视化模拟         | 40 |
| 第七节 讨 论                         | 43 |
| 第八节 小 结                         | 45 |
| 参考文献                            | 46 |
| 第三章 灌溉模式对小桐子生长调控与水分利用的影响        | 54 |
| 第一节 国内外研究进展                     | 54 |
| 第二节 研究内容与方法                     | 58 |
| 第三节 不同水量交替灌溉对小桐子生长调控与水分利用的影响    | 60 |
| 第四节 调亏灌溉对小桐子幼树形态特征与水分利用的影响      | 64 |
| 第五节 讨 论                         | 67 |
| 第六节 小 结                         | 70 |
| 参考文献                            | 71 |
| 第四章 小桐子生长、耗水特性和水分利用效率对保水剂和水肥的响应 | 75 |
| 第一节 国内外研究进展                     | 75 |
| 第二节 研究内容与方法                     | 81 |
| 第三节 灌水周期和保水剂施用方式对小桐子生长与水分利用的影响  | 84 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 第四节 水肥和保水剂处理对小桐子生长与水分利用的影响·····            | 88  |
| 第五节 讨 论·····                               | 91  |
| 第六节 小 结·····                               | 93  |
| 参考文献·····                                  | 93  |
| <br>第五章 小桐子生长、产量、品质 and 水分利用效率的水氮耦合效应····· | 98  |
| 第一节 国内外研究进展·····                           | 98  |
| 第二节 试验概况与研究方法·····                         | 108 |
| 第三节 灌水频率和施氮对小桐子生长和水分利用的影响·····             | 115 |
| 第四节 亏缺灌溉和施氮对小桐子根区土壤硝态氮分布及利用的影响·····        | 120 |
| 第五节 调亏灌溉和氮处理对小桐子生长及水分利用的影响·····            | 125 |
| 第六节 水氮耦合对小桐子生长和灌溉水利用效率的影响·····             | 130 |
| 第七节 水氮一体灌溉模式对小桐子生长及水氮利用的影响·····            | 135 |
| 第八节 限量灌溉和施氮对小桐子产量及品质的影响·····               | 140 |
| 第九节 讨 论·····                               | 144 |
| 第十节 小 结·····                               | 150 |
| 参考文献·····                                  | 151 |
| <br>第六章 肥液氮素浓度在线检测装置设计与试验·····             | 162 |
| 第一节 国内外研究背景·····                           | 162 |
| 第二节 相关理论基础·····                            | 167 |
| 第三节 检测装置设计·····                            | 179 |
| 第四节 试验与结果分析·····                           | 183 |
| 第五节 小 结·····                               | 192 |
| 参考文献·····                                  | 193 |
| <br>第七章 小桐子环境参数 Zigbee 无线传感器网络监测系统研究 ····· | 197 |
| 第一节 国内外研究进展·····                           | 197 |
| 第二节 系统硬件的设计与实现·····                        | 205 |
| 第三节 Zigbee 无线传感器网络执行策略·····                | 217 |
| 第四节 基于 WSN 的系统软件开发与应用 ·····                | 225 |
| 第五节 系统性能试验及结果分析·····                       | 233 |
| 第六节 小 结 ·····                              | 240 |
| 参考文献·····                                  | 241 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第八章 小桐子优质高产栽培的水管理分析决策支持系统构建与实现····· | 247 |
| 第一节 国内外研究背景·····                    | 247 |
| 第二节 技术简介和数据库理论基础·····               | 252 |
| 第三节 小桐子水管理决策系统的系统分析及总体设计·····       | 258 |
| 第四节 系统开发环境和数据库设计·····               | 260 |
| 第五节 设计介绍系统功能模块·····                 | 262 |
| 第六节 小 结·····                        | 272 |
| 参考文献·····                           | 273 |

# 第一章 概述

## 第一节 研究目的与意义

小桐子又名麻风树、膏桐、黑皂树、木花生、油芦子、老胖果、假花生、臭油桐、桐油树、油桐等，是大科麻疯树属的多年生落叶灌木或小乔木，树高 2.0~5.0m，树体中有着乳白状的液汁，树皮很平滑；枝条是苍灰色且没有毛；果实呈椭圆形或球形，长度 2.5~3.0cm，果皮黄色或青绿色，种仁是椭圆状，长度 1.5~2.0cm，呈黑色；开花期在 5—10 月。小桐子起源于中美洲北部，目前，小桐子已广泛分布于世界各国。小桐子传入中国已经有 200 多年的历史，分布于云南、四川、贵州、广东、广西壮族自治区（以下简称广西）、海南、中国台湾等省区，其中云南种植面积最大，四川次之。开发初期，小桐子因其植株各组成部分及种子均含有多种活性成分而引起人们的高度关注，可以用其作为原料加工农药和医药制品。特别是利用其种子加工的生物柴油其性能优于国内零号柴油，达到欧洲二号排放标准。还可以利用小桐子的种子油加工肥皂、染料等日用品；种子提取油后的副产品可加工有机肥，利用其树叶可饲养家蚕；作为行道树可用来美化、绿化环境。利用其大多数根系生长在 20~45cm 的土层，且沿水平方向生长的特点，通过庞大的根系可以固土护坡和保持水土；利用抗环境胁迫能力强的特点，用于干热河谷区、石漠化区、盐碱区和重金属污染土壤区的植被恢复和环境治理。此外，小桐子具有喜光，喜暖热气候和花期耐热耐旱，抗病虫害能力较强，还有一定的抗寒能力，能忍耐 -5℃ 的短暂低温。因此，小桐子是一种多功能树种，具有广阔的应用前景和推广应用价值。

（1）药用价值：小桐子的种子和种子油可作为泻药、催吐剂，也用于治疗皮肤病。小桐子油稀释后可作为慢性风湿病的涂抹剂；树体内的乳白色液体可用于治疗湿疹、疥疮和金钱癣；服用根皮煎剂对治疗麻疯及风湿症有很好的效果，外用可治无名疮毒；树体内的乳白色液体有杀菌和封闭人体伤口作用，也可治疗黄蜂及蜜蜂叮咬、牙龈炎、创伤、痔疮和疣等；叶、树皮和根具有止咳、散瘀、消肿、杀虫止痒、止血止痛等功效，主治创伤出血、关节挫伤、跌打损伤、骨折疼痛、湿疹、疥癣、麻疯、癩头疮、下肢溃疡、脚癣等；近年来研究还发现，小桐子还具有显著的抗病毒、肿瘤、艾滋病（AIDS）、真菌活性、微生物、利什曼原虫、寄生虫等功效，还可用于防治血吸虫病、糖尿病、终止妊娠和杀灭钉螺等。据国外资料报道，小桐子也可用于治疗坐骨神经痛、全身性水肿、胸膜炎、破伤风、黄热病、胃痛、烧伤、脱发、腹水、麻醉、利尿、淋病、梅毒等。

(2) 工业价值: 随着石油资源的逐渐枯竭, 国内外将目光转向燃料乙醇、甲醇、植物油等可再生液体燃料的开发利用。小桐子号称“生物柴油”树, 小桐子种子含油率介于 38%~41%, 种仁含油达 49%~62%, 其含油率均超过油菜和大豆等大众油料作物, 是一种理想的生物质液体燃料。研究发现, 这种“生物柴油”适用于各种发动机, 其一氧化碳排放量、硫含量、凝固点、颗粒值、闪点等关键指标均优于国内零号柴油。与传统柴油相比, 具有可再生、清洁、高效、加工成本低廉等优势。随着加工工艺的改进, 其新型燃料可以达到欧洲二号的排放标准。此外, 小桐子油可用做润滑油、制皂添加剂, 生产油漆、染料、化妆品、防腐剂等, 亦可用于照明、工业锅炉燃料等。因此, 小桐子油在工业领域具有广阔的应用前景。

(3) 农业价值: 近年来, 国内外众多研究者将目光转向高效绿色环保型植物源新农药的开发利用。而小桐子的种子、叶、茎和根均含有多种生物活性成分。小桐子体内富含乳白色液体汁, 对血吸虫、软体动物等具有较好的灭杀效果, 对抑制西瓜花叶病毒活性有明显功效; 其种子油及种子油乙醇提取物对萝卜蚜有显著触杀功效, 其石油醚提取物可抑制柠檬凤蝶三龄幼虫的进食; 因小桐子叶汁具有一定的毒性, 可作植物杀虫剂或消毒剂。可见, 小桐子对生物病虫害防治具有广阔的开发潜力。加之, 小桐子种子榨油后的油枯可加工有机肥, 中国科学院昆明植物研究所的研究发现, 油枯中有机质 91.67%, 全钾 12.45%, 速效钾 5.48mg/g, 全氮 3.046%, 水解氮 0.45mg/g, 全磷 2.5%, 速效磷 0.81mg/g, 酸碱度为 7.01, 可作为富钾有机肥的原料。其次, 小桐子种子富含蛋白质和氨基酸, 特别是种仁榨油后其油枯中的氨基酸总量高达 47% 以上, 其含量与植物性蛋白饲料相当, 且高于大多数植物性饲料, 特别是价格比豆饼粉更低, 因此可作为畜禽饲料的原料。除此之外, 小桐子的树叶也可用来饲养家蚕。可见, 小桐子的各器官、体内乳白色液体、榨油后的油枯、种子油提取物等在农业中具有广泛的应用前景。

(4) 环境价值: 小桐子具有较强的抗环境胁迫能力, 且水肥供应适宜时能较快生长, 有较大的生物量, 树高达 2~7m, 冠幅达 2~3m。① 可用于降雨量较少, 蒸发量较大, 水热矛盾突出地区 (如干热河谷区) 的植被恢复, 根据笔者在金沙江干热河谷元谋段进行的两年大田试验发现, 四年生的小桐子树, 行株距为 2m × 3m, 与自然降水条件相比, 适宜的水氮处理使得小桐子的产量大幅提高, 品质明显改善, 田间可形成郁闭的空间, 这样大大降低了土壤表面的蒸发量, 第三年末进行水氮处理, 小桐子生长依然旺盛。② 三年生小桐子树可以在中度以上的盐碱土壤中生长, 因此可用于盐碱区的植被恢复和治理。③ 由于小桐子能积累较大的生物量, 尤其是根系和叶片生物量较大, 其可用于重金属污染土壤的修复, 根据笔者进行的大田试验, 小桐子大树具有极高的抗铅胁迫能力, 因此可用于铅锌矿区污染土壤修复和植被恢复。④ 研究发现, 三年生以上的小桐子树的根系在地表以下 25~45cm 的区域沿着水平方向生长, 因此还可以利用小桐子庞大的根系进行固土护坡, 防治水土流失。⑤ 由于小桐子具有较强的抗干旱胁迫能力, 可以在岩石缝隙生长, 因此可利用其改善石漠化地区的生态环境。⑥ 可以利用小桐子美化、绿化环境, 作为植物墙和行道树植物。

干旱缺水是一个世界性问题, 我国西南地区水资源总量丰富, 但有效的可利用水资源

极其有限,季节性干旱特征明显,特别是干热河谷区的水热矛盾尤其突出。我国水资源总量为 2.8 万亿  $\text{m}^3$ , 低于巴西、俄罗斯和加拿大, 与美国和印度尼西亚相当, 但人均和亩均水资源量仅约为世界平均水平的 1/4 和 1/2, 而且水土资源不相匹配。长江流域以南地区, 耕地占全国耕地的 35%, 而水资源已占全国水资源总量的 81%。目前全国正常年份农业缺水约 300 亿  $\text{m}^3$ 。农业是用水大户, 其用水量约占全国用水总量的 70%, 在西南地区则占到 64.3%, 其中云南省占 76.6%, 干热河谷区占 90% 以上。为了应对日趋严重的缺水形势, 解决问题的关键是构建节水型社会和发展节水农业。

在我国, 缺水和农业用水效率低下并存。据农业部门测算, 我国农业天然降水利用率为 40% 左右, 而美国等发达国家达到 60%~70%。据水利部统计, 目前我国农田灌溉水利用系数为 0.53 左右, 美国已经达到 0.75。我国 1 $\text{m}^3$  水的农业产出只有 0.83kg, 比世界平均水平低 30%, 但我国的节水潜力巨大。我国化肥的生产量和消费量均占世界的 1/3, 氮肥表观年消费量达 3 950 多万 t。目前, 随着持续大量的氮肥投入, 我国农田氮肥的当年利用率逐步降低, 已低于 30%, 但氮肥的残留效应不断增加氮肥流失不仅造成资源的极大浪费, 而且造成严重的农业面源污染和水体富营养化。我国当季氮肥利用率不足 30%, 世界氮肥利用率平均 50%, 我国当季磷肥利用率 15%~25%, 世界的利用率平均 42%, 我国钾肥利用率 30%~50%, 世界的利用率平均 50%~70%。综上所述, 我国的肥料利用率提升空间的潜力巨大。造成我国水氮利用效率较低的主要原因一是大水漫灌, 在我国农田大水漫灌现象普遍存在, 大水漫灌不仅造成了水分损失, 还会产生肥料淋失, 导致农业面源污染和地下水污染加重。二是氮肥超量施用, 据调查发现, 全国已有 17 个省氮肥平均施用量超过国际公认的上限每公顷 225kg, 过量施氮不仅浪费氮肥资源, 而且导致土壤板结和通气效果变差, 影响作物生长发育, 进而造成作物产量和品质下降, 同时也出现因苗纤细而易倒伏, 贪青晚熟, 病虫害增多等突出问题。

干旱缺水不仅限制我国经济社会的可持续发展, 而且造成了土壤荒漠化、沙漠化、石漠化、沙尘暴等一系列生态环境问题, 危及人类生存。随着人口的增长、工业化和城市化进程加快, 工业用水和城镇生活用水挤占农业用水, 进一步加剧了我国水资源供需之间的矛盾。同时, 大水漫灌和过量施化肥现象普遍存在, 作物水肥利用率低下、水土环境恶化等突出问题限制了我国农业的可持续发展。目前, 世界各国均十分重视农业节水减排技术与装备研发及应用。然而一切先进的农业节水减排技术要真正达到目的, 都必须充分考虑土壤—作物系统的水肥互作效应关系, 实现水分—养分—作物关系的最优协调。国内外研究表明, 科学合理灌溉施肥和最大限度提高作物对水肥的利用效率是提高农田水肥利用效率的基本途径, 也是季节性旱区改善作物根区微环境, 减轻农田面源污染和地下水污染, 提高作物产量和品质的重要举措。唯有此, 才有可能进一步大幅度减少农田水肥用量, 取得新的突破 (Behera, 2009)。

水肥是农业生产中的两大决定因素, 作物对肥料的吸收、传输和利用均依赖于土壤水分, 土壤水分状况在很大程度上决定着肥料的合理用量。近年来研究发现, 在季节性旱区和限量灌溉条件下, 土壤水分促进肥效更好的发挥作用, 土壤肥力是开发水分系统生产能的激

活剂,两者互相促进,互为制约,存在明显的互作效应关系。土壤水分亏缺不但影响土壤营养物质的迁移转化与吸收利用,而且还影响水分在植物体内的传输与营养代谢,过量的灌溉不仅会淋洗根区土壤的有效养分,而且还会降低根区土壤的透气效果、微生物的活性和根系的活力,进而影响根系对养分的吸收和利用。近年来的研究也表明,在雨养农业区,施肥通过补偿缺水条件下作物生长受限时的不良反应和调节改善植物的生理功能,达到提高作物水分利用效率的目的。在灌溉农业区,实施非充分灌溉技术,不但能有效地提高作物水氮的利用效率,而且生长会表现出明显的补偿效应,产品品质也会得到明显的改善。在水资源日益短缺的今天,如何最大限度地提高水分和氮肥利用效率,以有限的水分和氮肥供应获得最大经济效益,是当前我国西南季节性旱区农业可持续发展中迫切需要研究的关键问题。

## 第二节 小桐子水氮高效利用技术研究的总体思路

小桐子水氮高效利用理论与调控技术研究的总体思路即对过去只考虑农田生产力和作物单产潜力提高,忽视农业生产对环境带来的不利影响转变为在保持作物持续稳定生产的同时,减少农田面源污染和地下水污染,提高农田和作物水氮的利用效率,实现节水节氮增效的目的。这需要我们以小桐子为研究对象,充分考虑小桐子水氮高效利用的土壤和生理过程及其调控的基础上,研究不同水氮供应条件下小桐子水分和氮肥—生物量—经济产量的转化关系,探明不同水氮供应条件下小桐子水氮高效利用的土壤与生长和生理过程的调控机制,揭示有利于小桐子健康生长的水氮互作机制与定向调控途径;研究季节性干旱农田小桐子水氮联合高效利用的灌水与施肥方式、节水灌溉制度,构建小桐子节水高产的灌溉施氮技术指标体系和推广应用模式;研究设施小桐子水氮一体化灌溉技术与装备;提出农田水氮高效利用的水氮联合调控理论和技术体系与产品,突破与创新小桐子水氮联合调控技术,实现小桐子优质增产和增效。

通过“以水调氮”、“以氮促水”的水氮互作效应机制来提高小桐子水氮利用效率,是我国生态农业可持续发展的迫切需要。以研究小桐子与根区土壤水氮之间的互作效应关系为核心,以求减少奢侈生长消耗的水氮量而提高水氮利用效率为研究主线,通过点与面相结合、室内与室外大田相结合、定位试验与现场示范相结合,理论研究与技术开发应用相结合,系统探索小桐子水氮高效利用理论与调控技术。

### 一、小桐子水氮高效利用技术的研究现状

近年来,国内外专家、学者主要针对小桐子的生长和光合生理及其环境因子(土壤干旱、养分、温度和盐分)的生理生态适应性方面进行了较多的研究(栗宏林等,2010; Maes WH et al, 2009; 黄红英等,2009; 毛俊娟等,2007; 李清飞等,2009; 张明生等,2006; Kumar GP et al, 2007; 陈健妙等,2009)。同时也对不同产地的小桐子产量和果实的化学成分进行了大量的报道(李化等,2006; 罗长维等,2008; Gubitz GM et al, 1999;

Carvalho CR et al, 2008)。影响作物对生长及生理生态指标、产量和品质的土壤和环境因素很多,如温度、水分、养分等,其中水分和养分起关键作用,水肥一体灌溉模式是节水农业发展的必然趋势。

### 1. 土壤水分对小桐子生长、生理生态指标、产量和品质的影响

水分是植物体的重要组成部分,它几乎参与了植物所有的生理生化过程。Riyadh (2002)的研究发现,小桐子(又名麻疯树)在较高的气候环境条件下,既能在降雨量为200mm左右的范围内存活,依靠减小气孔开度和大多数叶片的遮荫来减少蒸腾失水,Heller (1996)的研究发现,小桐子能在降雨量为1380mm左右的范围内较快生长。种植密度为1600~2200株/公顷时,其产量能达到794Kg/公顷,单株产量为318g/株。光合作用是植物生长的生理基础,可以作为判断植物生长势和抗逆性强弱的指标。在国内,姚史飞(2009)等人采用停止灌水后以5d为时间间隔进行干旱胁迫处理,研究了干旱胁迫对小桐子幼苗光合特性及生长的影响,结果表明:在轻度和中度干旱胁迫下小桐子幼苗光合能力下降的主要原因是气孔限制,而重度干旱胁迫下光合能力下降的主要原因是非气孔限制。同时,在轻度和中度干旱条件下,小桐子幼苗以降低光合生长和蒸腾耗水、提高水分利用效率来适应环境、维持生命,但长势变弱,而严重干旱时小桐子幼苗的生长受到土壤水分的严重限制。毛俊娟(2008)等人采用停止浇水后分别在第1,3,6,9d测定生理指标,研究了干旱胁迫下外源钙对小桐子相关生理指标的影响,结果表明:外源钙能提高小桐子幼苗的抗旱性,增强干旱胁迫下的渗透调节作用,保护细胞质膜的结构,调节干旱胁迫导致的生理反应。窦新永(2008)等人采用营养液培养7d后,用分别含有0(对照)、5%、10%、15%、20%和25%PEG26000的Hoagland营养液培养幼苗,研究了小桐子幼苗的光合气体交换和叶绿素荧光参数对干旱胁迫的响应,结果表明:在较低浓度PEG( $\leq 15\%$ )处理下,随PEG浓度的增加,小桐子叶片净光合速率( $P_n$ )和气孔导度( $G_s$ )下降,水分利用效率(WUE)则逐渐升高,他认为在高浓度PEG处理下, $P_n$ 的下降则是由非气孔和气孔因素的共同限制作用造成的。在国外,Abdrabbo(2009)等人采用不同的水分梯度50%、75%、100%和125%的ET<sub>p</sub>处理下,研究发现,ET<sub>p</sub>为100%的处理产量和品质最好,但不同水分胁迫处理对脂肪酸并没有显著影响。Maes(2009)等人采用停止充分浇水后,在第62d时按照充分灌水量的40%处理直到114d,研究发现,小桐子较强的抗旱性与茎干较小的木质部密度密切相关。

### 2. 土壤养分对小桐子生长、生理生态指标、产量和品质的影响

养分胁迫是影响抑制植物生长和产量降低的重要制约因素之一。近年来,我国西南及其他地区积极发展小桐子产业,随着幼林相继进入初产期,对土壤养分需求增大,如何合理施肥,协调营养生长与生殖生长的关系,具有现实意义。刘朔(2009a)等人采用不同种类的N、P、K处理下对小桐子的生长和结实状况进行了研究,结果表明:N、P、K混合施肥能显著促进小桐子的地径、冠幅和树高的生长;单施N肥也能明显促进主干地径生长,但单施P、K肥对地径生长影响不大;N肥和P肥混合施用能显著促进小桐子幼树冠幅生长,单施N肥、P肥或K肥对小桐子冠幅生长促进作用不明显。刘朔(2009b)单施N肥对小桐

子增产作用不明显,但单施P肥或K肥对促进小桐子增产具有明显的作用,在氮、钾一定时,施磷肥量超过一定水平,对小桐子产果量影响不大,施肥处理对出仁率和出油率影响不明显。

### 3. 小桐子生长、产量和品质的水肥互作效应

在西南地区,小桐子的初花期为3月—4月,盛花期为4月—5月,进入雨季后小桐子花蕾数量减少,直至10月底,花期基本结束。小桐子初花期正值高温干旱季节,又是果实生长发育高峰。小桐子果实发育的特点是前期缓慢生长,中期快速生长,果实迅速膨大,后期生长以种子重量的迅速增加为主。因此,根据不同生长发育阶段保持均衡的水肥供应。生育前期水肥供应过量会导致营养生长过旺,造成果实生长养分不足,引起大量落果。果实膨大期是影响产量的关键时期,应保证充足的水分供应,干旱胁迫不利于植株对营养的吸收和转化,影响植株正常生长和开花结实。由此可见,小桐子生长周期内适宜的水肥供应对确保单位面积上的产量提高和品质改善均具有重要的作用。

目前,水肥一体化技术在中国正处于发展阶段,理论研究与示范和推广应用不断深入。由过去只注重土壤水分影响下的节水提质和增产增效的试验研究,逐渐发展到水肥一体化条件下作物生长、生理、产量和品质的水肥互作效应研究、水分和养分在土壤中的运移和分布规律等方面的研究;由过去只注重灌溉技术与方法、节水灌溉制度转变为灌溉与施肥的运筹机制。随着水肥一体化技术与装备的不断改进,其技术水平不断提高。目前,我国水肥一体化技术与装备的管理水平低下,水肥一体化技术推广与应用面积较小,理论研究与技术应用研究的相关成果较少,深度较浅,水肥一体化技术领域的相关产品的质量与国外同类产品相比存在较大差距。这需要我们以智能化和信息化为引领,多学科交叉融合创新为突破口,依据作物健康生长和提质增效为目标,进一步挖掘作物需水需肥信息的实时在线和自动监测技术,研发出适宜不同作物和生长条件的智能型自动灌溉控制系统,提出不同作物的精准灌溉和施肥制度,开发出具有自主知识产权的水肥一体化技术与装备。

## 二、小桐子水氮高效利用技术研究内容

针对我国旱区农田水肥利用率低的问题,以我国八大生态脆弱区——干热河谷区生长的小桐子为对象,以同步提高水氮利用效率及其最优调控技术为目标,挖掘小桐子节水节氮潜力,提高土壤水氮生产潜力,实现增产优质和高效。主要研究不同水氮供应下小桐子水分和氮肥—生物量—经济产量的转化过程以及生理调控技术;研究不同灌溉方式下小桐子水氮高效利用技术与模式,提出适宜的不同水量交替灌溉技术与调控模式,考虑生长又考虑生理要求的调亏灌溉与施肥模式;研究小桐子保水保肥技术与保水剂施用方式,构建生态脆弱区保水保肥技术指标体系;研究小桐子水氮一体化施用技术与肥液氮素检测设备,并开发新产品;研究小桐子环境参数 Zigbee 无线传感器网络监测系统和优质高产栽培的水管理分析决策支持系统,构建考虑环境要素和基于水氮运筹机制的优质高产和高效的用水管理分析决策支持系统。综合考虑小桐子的两大特点(抗旱能力强、生物量较大)、两大机制(生长生理调节、水氮高效利用)、三大影响因素(灌溉制度、土壤、大气)、四大灌溉方式(限量灌

溉、亏缺灌溉、调亏灌溉、不同水量交替灌溉), 解决两大问题(水肥利用效率低下、产量较低和品质较差), 整体提高小桐子水氮利用效率, 实现小桐子增产优质高效。具体研究内容如下:

### 1. 小桐子水氮高效利用的土壤和生理过程及其调控

研究建立土壤水分、氮素迁移和转化与高效利用模式。研究不同水分、氮素胁迫条件下小桐子水分养分吸收与利用特征、生长和生理生态特性、同化物合成转化、运输与分配、以及产量和品质构成等的变化规律、根冠和胡伯尔值等形态特征关系, 提出不同水氮条件下小桐子水氮高效利用的策略与调控机制。

### 2. 不同灌溉方式下小桐子水氮高效利用技术与模式

研究小桐子调亏灌溉的水氮高效调控技术, 建立调亏灌溉条件下小桐子水氮高效利用模式, 提出既考虑生长又考虑生理要求的调亏灌溉与施肥模式; 研发与不同水量交替灌溉相适应的水氮高效利用技术, 提出适宜的不同水量交替灌溉技术与调控模式。

### 3. 小桐子保水保肥技术与保水剂施用方式研究

研究小桐子对土壤水分、施肥与保水剂的响应规律, 探讨其各阶段需水需肥量、最适宜生长量与水氮需求的关系、获得土壤水分、施肥与保水剂之间的最佳组合; 通过土壤应用不同量的保水剂后, 分析保水剂对土壤水分和硝态氮、铵态氮的保持、转化和利用的长期动态效应, 以及对小桐子的生长和水分利用的时空有效性, 建立相应的效应关系。结合保水剂不同施用方法(环施、半环施和混施), 分析保水剂适宜的应用方法, 揭示保水剂对土壤水分和氮素保持、转化和小桐子利用的机理和时空有效性, 以及对小桐子生长效应的生理调控机制; 建立保水剂对水分和氮肥保持、转化和小桐子利用的效应理论体系, 提出土壤水分、施肥与保水剂之间的最佳组合模式。

### 4. 小桐子水氮一体化施用技术与肥液氮素检测设备

研究小桐子栽培时最佳水氮供应的影响因素, 研究土壤—植物系统水分、肥液氮素的检测与诊断指标, 获得有利于提高小桐子苗木质量和提高水氮利用效率的灌溉施氮制度, 提出基于小桐子生长的水肥量化管理指标, 建立不同水氮配比条件下小桐子水氮一体灌溉模式和相配套的栽培技术, 提出灌溉施氮系统运行参数优化设计方案。开发基于离子选择电极设计了肥液氮素浓度检测装置, 并对离子选择电极、信号调理电路、温度传感器、微处理器等组成部件等检测装置性能进行了测试与分析。

### 5. 小桐子环境参数监测系统及优质高产栽培的水管理分析决策支持系统的构建

针对传统温室环境参数监测系统布线繁杂、成本较高、监测灵活性差以及一般无线传感器网络能耗较高等问题, 设计了一种基于 WSN 的温室环境参数监测系统, 实现了生长环境参数的实时采集、传输、存储和浏览功能, 基于小桐子验证并分析了 CC2530 芯片的无线传感器网络模块的传输特性和能量消耗特征。根据小桐子生长的外部环境条件、土壤水资源含量等信息, 通过作物系数法计算出具体的需水量; 并依据作物土壤墒情的决策模型, 开发了用水管理决策系统软件。