

柑橘节水微灌系统的研究及应用*

刘行刚^{1,2}, 张治晖¹, 张云江³, 陈霄^{1,2*}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 北京中水润科认证有限责任公司, 北京 100048;
3. 重庆市云阳县水务局, 云阳 404500)

摘要:【目的】研究并采用柑橘节水灌溉系统, 可提高柑橘抵御干旱的能力, 增加产量。【方法】文章对柑橘的灌溉制度和系统设计流量进行了探讨, 对现行国家标准《微灌工程技术规范》中的设计供水强度取值进行了说明, 提出了考虑有效降水的观点; 针对山区自压灌溉存在的管道减压和气堵问题, 提供了排气管和蓄水减压池两种简单的解决方法; 在施肥器的应用方面, 对文丘里施肥器和压差式施肥器进行了比较。【结果】在供水强度计算中考虑有效降水的方法比较契合实际情况, 节约系统投资; 排气管和蓄水减压池可有效解决管道因气堵不出水的问题, 并起到降低管道压力的作用, 可替代减压阀和排气阀; 压差式施肥器比文丘里施肥器更适用于山区自压管道施肥。【结论】通过对灌溉系统的研究和示范区的建设实践, 对于完善微灌技术用于柑橘灌溉起到了促进作用。

关键词: 柑橘灌溉; 自压灌溉; 供水强度; 气堵; 施肥器

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20190411

0 引言

柑橘是世界第一大果树品种, 其种植面积和产量均居世界首位^[1]。我国 2016 年柑橘种植面积高达 255.67 万 hm^2 , 总产量为 3 616.8 万 t, 居世界首位^[2]。三峡库区属亚热带季风气候区, 年均温 17~19 $^{\circ}\text{C}$, 雨量 1 000~1 200 mm, 气候条件适合柑橘生长^[3], 是全国重要的柑橘主产区之一, 被划定为国家果品生产优势区, 柑橘产业也成为库区经济发展的优势产业^[4]。

柑橘属亚热带常绿果树, 好温喜湿, 土壤含水量在 60%~80% 最适宜, 过低则需要实施灌溉。雨量不足或分布不均匀时需增加灌溉设施以保证土壤含水量处于正常水平。对柑橘种植来说, 传统灌溉方法有沟灌、浇灌等, 此类方法通常耗水量大、需要大量人力劳动, 效率低且不易管理。在绿色农业发展需求下, 农业生产向节约化、高效化发展, 灌溉技术也向节水节能等方向发展, 目前发展起来的节水灌溉技术有滴灌、微喷等技术。

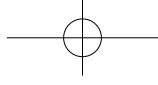
柑橘的设计供水强度是微灌系统设计的关键, 对工程投资影响很大。目前《微灌工程技术规范》^[5]中规定在无淋洗要求时, 设计供水强度等于设计耗水强度, 这种情况比

收稿日期: 2019-07-19

第一作者简介: 刘行刚 (1982—), 硕士、工程师。研究方向: 农田水利、产品认证与检测。Email: liuxg@iwhr.com

* 通信作者简介: 陈霄 (1984—), 工程师。研究方向: 农田水利。Email: xchen@163.com

基金项目: 国家农业标准化示范区项目 (SFQ9-175)



较适用于北方地区。若应用于降水量较大的南方地区，会增大系统设计流量，增加投资，另外，若设计不合理，由于气堵原因，管道在压力足够的情况下不会出水，文章对这一系列问题进行了系统分析，并提出了有效解决方案。

1 研究区概况

1.1 研究区生态环境

云阳县位于重庆市东北部，属三峡库区地带，南北长 99.5 km，东西宽 70.2 km，幅员面积 3 649 km²^[6]。示范区锦屏村位于凤鸣镇，全村面积 11.69 km²，村内地形海拔 200~685 m，其中林地 5.5 km²，草地 3.53 km²，裸石山地 1.2 km²，田地 1.46 km²。村内沟壑纵横，多为页岩和喀斯特地貌。村民居住分散，同村内各居民点距离大多在数公里以上，交通多不便利。

根据云阳县气象站观测资料统计，该地区 1961—2000 年平均气温 18.7℃，年际均温变化不大，其中最高 19.4℃，最低 17.7℃。8 月最热，平均气温可达到 29.4℃，1 月最冷，平均气温降至 8.0℃，年内温差在 21.4℃左右，偶有年份出现极端最高气温达到 40℃以上，极端最低气温降至 0℃以下。

据云阳气象站 1961—2018 年资料统计，该地区雨量充沛，降水在年内各个月份分配十分不均衡。该地区年平均降水量为 1 120 mm，年际变化大，据记录最大的年降水量为 1963 年的 1 752.6 mm，而最小年降水量为 1966 年的 730.5 mm，相差很大；在年内不同月份降水量也不均匀，4—10 月降水量超过了全年的 4/5 以上，而其他月份的降水量不到 1/5，通常 7 月降水量最大而 2 月最小。

云阳地处中亚热带湿润季风气候区，是长江三峡库区的核心区域。三峡库区冬暖春早、秋短夏长，降水量充沛，库区土壤磷、钾含量丰富，对柑橘生长十分有利。锦屏村山坡地土层深厚肥沃，酸碱适度，大多土壤富含钙、镁、钾、磷和微量元素，海拔 500 m 高程以下的山区适宜种植柑橘，目前已种植 120 hm²。但由于普遍无灌溉工程设施，导致干旱时期柑橘得不到灌溉，柑橘产量低，品质不高。

锦屏村地处山区，受不同程度的坡度影响，常会造成水土流失，不易保水、保肥、保土，土质比较贫瘠，成为不利于柑橘生长的主要矛盾。为了在该地区实施柑橘的种植发展，首先需要对山地进行整理，将山坡地整治为梯田，从而有效改变地形坡度，拦蓄雨水，增加土壤水分，减少水肥流失，便于灌溉。

柑橘施肥通常采用水肥一体化技术，将液体肥料或水溶性固体肥料溶解在水中，并采用管道和滴头形成滴灌，通过将水和肥料进行优化组合，使其得到更有效率的吸收和利用。该技术能够按需供应柑橘水肥，节水节肥性好，劳动投入低，能显著增加水肥利用率、增加产量，是当前广泛推广使用的节水灌溉施肥技术^[7]。

1.2 研究区水资源条件

锦屏村集雨面积大，现有大小塘坝 20 多处，但多数塘坝常年未清淤，库容减少，亟待整治。为提高灌溉和供水的保证率，对村内 6 处塘坝进行整治。塘坝整治的主要措施

2019年8月

有：(1) 清除塘底淤泥；(2) 检查是否有渗漏处，对渗漏处进行封堵，一般渗漏处发生在坝体，对坝体进行防渗处理，坝体迎水面采用土工膜防渗，防渗膜上采用预制混凝土块护面；(3) 对达不到标准的溢洪道、放水涵管、闸门等建筑物进行整治。整治后这6座塘坝的总库容达到5.46万m³，其中最大的丰收塘达到4.5万m³，基本解决了柑橘灌溉水源问题，6座塘坝的基本情况见表1。

表1 6处塘坝基本情况
Table 1 The characteristic of 6 ponds

序号	名称	流域面积 (万m ²)	年蓄水量 (万m ³)	原容积 (万m ³)	整治后容积 (万m ³)	备注
1	丰收塘	20.6	7.42	0(新建)	4.50	柑橘灌溉和供水水源
2	杨柳湾塘	1.1	0.40	0.07	0.28	调节池、柑橘灌溉
3	松树梁	0.8	0.29	0.05	0.10	调节池、柑橘灌溉
4	大堰塘	1.3	0.47	0.05	0.10	调节池、柑橘灌溉
5	黄家梁	2.3	0.83	0.05	0.10	调节池、柑橘灌溉
6	庙梁塘	18.6	6.70	0.08	0.378	调节池、柑橘灌溉
	合计	44.7	16.11	0.30	5.458	

1.3 研究区柑橘种植现状

柑橘种植密度一般采用3m×4m或3m×5m的株行距，每公顷栽667~833株。灌溉时，在定植15d内根据土壤干湿程度确定浇水量，采取滴灌方法每天或几天灌水1次，定植30d后每周滴灌1次，以保持土壤通透性，并满足柑橘需水要求。

2 灌溉系统设计

2.1 微灌系统设计参数

根据柑橘作物需水量，确定系统流量和灌水周期等参数。

(1) 设计灌水定额

柑橘微灌采用滴灌或微喷灌，设计灌水定额为：

$$m = 0.1\gamma zp (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (1)$$

式(1)中， m 为设计灌水定额(mm)； γ 为土壤容重(t/m³)，为1.4t/m³； z 为计划湿润土层深度(m)，为0.45m； p 为设计土壤湿润比(%)，为10%； θ_{\max} 为适宜土壤含水率上限(占干土重量的百分比，%)，为田间持水量的90%； θ_{\min} 为适宜土壤含水率下限(占干土重量的百分比，%)，为田间持水量的65%。

(2) 灌水周期

灌水周期按下式计算：

$$T = \frac{m}{E_a - E} \quad (2)$$

式(2)中， T 为设计灌水周期(d)； E 为有效降水(mm)，为2mm； E_a 为设计耗水

强度 (mm)，为 3 mm。

(3) 灌溉系统设计灌水流量可按下式计算：

$$Q = \frac{10mA}{T \cdot t \cdot \eta} \quad (3)$$

式(3)中， Q 为灌溉系统设计灌水流量 (m^3/h)； t 为终日工作小时数 (h/d)，为 22 h； η 为灌溉水利用系数，为 0.95； A 为灌溉面积 (hm^2)，为 70.33 hm^2 。

微灌系统设计流量是微灌设计的重要参数，是计算管径的重要依据。系统设计流量取决于设计灌水定额、灌溉面积、灌水周期、每天灌水时间和灌溉水利用系数。《微灌工程技术规范》^[5]中规定，在无淋洗要求时，灌水周期取决于一次灌水定额和设计供水强度。一般在干旱或半干旱地区，设计供水强度可等于设计耗水强度，比如在美国中央河谷、以色列等地区种植柑橘属于这种情况。对于三峡库区这种湿润地区的柑橘种植，设计供水强度还应该考虑有效降水^[8]。计算结果见表 2。

表 2 微灌设计参数

Table 2 Design parameters of micro-irrigation

项目	单位	参数	项目	单位	参数
日耗水强度 (E_a)	mm	3.0	土壤湿润比 (p)	%	10
有效降水强度 (E)	mm	2.0	设计灌水定额 (m)	mm	3.98
计划湿润深度 (Z)	m	0.45	设计灌水周期 (T)	d	3.8
土壤容重 (γ)	t/m^3	1.40	灌溉面积 (A)	hm^2	70.33
田间持水率 (F)	-	0.24	系统日工作小时 (t)	h	22
土壤含水率上限 (为田间持水率的百分比)	%	90	灌溉水利用系数 (η)	-	0.95
土壤含水率下限 (为田间持水率的百分比)	%	65	系统设计流量 (Q)	m^3/h	35.42

该研究区规划柑橘灌溉面积为 70.33 hm^2 ，根据当地柑橘灌溉经验，在降水较少的干旱时期，若采用穴灌，每棵灌水 50 kg，灌水周期一般 4 d，柑橘每 hm^2 种植 750 棵，计算可知灌水定额为 $37.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，得到面积 70.33 hm^2 系统设计流量为 $31.55 \text{ m}^3/\text{h}$ ，略小于表 2 中的系统设计流量 $35.42 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.2 灌溉系统规划布置

灌溉系统首部采用水泵抽丰收塘的水入杨柳湾塘，之后为自压。管道分为干管、支管、分管、毛管，共 4 级，均采用 PE 塑料管。干管沿等高线布置，外径有两种尺寸，分别是 110 mm 和 75 mm，其中外径 110 mm 对应的干管长度为 2 454 m，外径 75 mm 的干管长度 2 848 m。干管上安装减压排气管，每 200~500 m 一个。支管垂直于等高线，外径为 40 mm，布置蓄水减压池和减压排气管，减压排气管水压不超过 50 m，蓄水减压池水压不超过 40 m，使滴头在压力补偿范围内工作，系统布置如图 1 所示。

每个灌溉单元由分管引出，单元首部布置施肥装置和过滤器，分管垂直于等高线布置，外径仍为 40 mm，分管再接毛管，毛管沿等高线布置。滴灌毛管有外径

2019年8月

16 mm (壁厚 1.5 mm) 和 20 mm (壁厚 2.3 mm) 两种, 最大长度分别为 340 m 和 460 m。微喷灌毛管也有外径 20 mm (壁厚 2 mm) 和 25 mm (壁厚 2.3 mm) 两种, 最大长度分别为 340 m 和 460 m。每棵柑橘树下面配置一个滴头或微喷头, 滴头选用压力补偿式, 补偿范围 100~300 kPa, 流量 4 L/h, 微喷头流量选用 40 L/h。在工程实施过程中, 要求管道和灌水器质量满足相关标准^[9-11]。



图 1 微灌系统布置

Fig.1 Layout of micro-irrigation system

在压力输水过程中, 管道内易产生气体, 需采取措施, 否则会导致管道气堵或发生气爆水锤^[12-13]。对于自压管道, 气堵或气爆水锤更易发生。若按满管流能量方程计算, 当管道进水口处总水头不小于出水口处总水头与水头损失之和的情况下, 水应为流动状态。但若管道铺设在起伏较大的山区或丘陵, 在管道的高点通常会存在气体, 形成气阻, 导致水不流动。产生气阻现象必须同时存在两个基本条件: (1) 管道系统存在波状起伏; (2) 管道系统内同时存在气、液两相介质^[14]。起伏较大的山区或丘陵, 在管道的高点, 应设计安装自动排气装置, 即使是地形起伏不大的平原地区, 也要在挖槽时, 人为将管线设计出起伏, 呈循环上升或下降, 坡度不小于 1/500, 在每公里的最高处设计 1~2 个排气装置^[15]。若地形条件允许, 可在灌溉系统中布置减压排气管和蓄水减压池。排气管直接安装在管道上, 管顶安装高度可略高于此处的工作水头。蓄水减压池既可以对管道进行排气减压, 又能调节灌溉水源。若采用减压阀和排气阀, 需关注产品质量, 因减压阀和排气阀失效导致不出水和管道破坏的案例时有发生。在该工程实施中, 干管首尾高程差 60 m, 减压排气管主要作用是排气。支管垂直等高线, 最大高差

250 m，超过管道工作压力（1.6 MPa），需要减压排气。在支管上布置蓄水减压池，既可以对管道进行排气减压，又能够调节灌溉水源，在有泉水的地方，可引泉水入蓄水减压池。

在示范区的建设过程中，对文丘里施肥器和压差式施肥器的使用情况进行了比较。由于文丘里施肥器需要较高的流速才能实现真空吸水，在自压管内水流达不到较高流速的情况下，会导致文丘里施肥器不吸水。而采用压差式施肥器则工作正常。

3 试验分析

图 2~ 图 5 为节水微灌系统在示范区的安装应用现场。滴灌系统安装完毕后，为了检测滴头的产品质量，对灌水器的均匀性进行现场试验。选择 3 条滴灌管，对每条滴灌管的 25 个滴头进行测量。根据规范^[5]，微灌系统灌水小区灌水器设计允许流量偏差率应满足下式要求：

$$[q_v] \leq 20\% \tag{4}$$

$$q_v = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_d} \times 100\% \tag{5}$$

式（4）~（5）中， $[q_v]$ 为灌水器设计允许流量偏差率（%）； q_v 为灌水器流量偏差率（%）； q_{\max} 为灌水器最大流量（L/h）； q_{\min} 为灌水器最小流量（L/h）； q_d 为灌水器设计流量， $q_d=4\text{L/h}$ 。

采用克里斯琴（Christiansen）灌水均匀系数描述灌溉系统流量均匀性，公式为：

$$C_u = \frac{1 - \overline{\Delta q}}{\bar{q}} \tag{6}$$

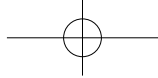
$$\overline{\Delta q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}| \tag{7}$$

式（6）~（7）中， C_u 为克里斯琴灌溉均匀系数； $\overline{\Delta q}$ 为灌水器流量平均偏差（L/h）； \bar{q} 为灌水器平均流量（L/h）； q_i 为田间实测的第 i 个灌水器流量（L/h）； n 为田间实测的灌水器个数。

田间实测结果如表 3 所示。由表 3 中 3 组试验的计算结果可以看出，灌溉系统的灌水器流量偏差率均小于 20%，Christiansen 灌溉均匀系数大于 0.95，说明自压灌溉系统灌水器流量均匀性满足要求。

表 3 滴灌灌水器试验结果
Table 3 Test results of emitter

组别	n	\bar{q}	$[q_v]$	C_u
第一组	25	4.031	16.65	0.966
第二组	25	4.071	18.60	0.959
第三组	25	4.077	12.55	0.964



2019年8月



图2 柑橘滴灌安装

Fig.2 Installation of citrus drip irrigation



图3 支管蓄水减压池

Fig.3 Storage and decompression tank



图4 压差施肥器

Fig.4 Differential pressure fertilizer



图5 滴头流量均匀性试验

Fig.5 Drip emitter flow uniformity test

4 结论

该文采用的柑橘节水灌溉系统充分利用水资源，减少了水资源浪费，涵养了水环境。在三峡库区建设柑橘微灌系统，设计供水强度时需要考虑当地的气候条件，既要考虑设计耗水强度，也要考虑有效降雨量，避免设计流量过大，工程投资高，造成不必要的浪费。在起伏较大的山区或丘陵铺设管道，需要考虑气阻对管道的影响，尽可能采用排气管和减压池，而不用减压阀和排气阀，避免因减压阀或排气阀出现故障造成管网不工作或破坏。在该应用中发现文丘里施肥器需要较高流速才能实现真空吸水，有些情况下自压管道达到较高流速难以实现，因此一般自压灌溉施肥器不宜采用文丘里施肥器。在三峡库区为柑橘提供有效的灌溉，配备可靠的施肥器，可增加产量，提高品质，显著提高当地果农的经济效益。柑橘节水微灌系统在重庆云阳县的应用研究为柑橘生产灌溉系统设计提供了有益的示范。

参考文献

- [1] 张规富, 谢深喜. 柑橘对水分胁迫的反应特点及研究方向. 天津农业科学, 2012, 18(6): 5~8.
- [2] 向劲松. 柑橘种植存在的问题及对策. 现代农业科技, 2017(14): 75~77.

- [3] 淳长品, 彭良志, 江才伦, 等. 三峡库区部分柑桔园土壤营养状况的初步研究. 中国南方果树, 2009, 38(2): 1~6.
- [4] 李念军, 常胜. 三峡库区柑橘用地适宜性评价. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2390~2392.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 微灌工程技术规范 (GB/T 50485-2009), 2009.
- [6] 蒲清三, 范学坤. 重庆市云阳县环境概况. 重庆: 重庆文理学院, 2016.
- [7] 崔国亮. 世界果树生产特点对松滋市柑橘产业发展的启示. 现代农业科技, 2018(5): 87~88, 91.
- [8] 水利部农村水利司, 中国灌溉排水发展中心. 节水灌溉工程实用手册. 北京: 水利水电出版社, 2005.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 给水用聚乙烯 (PE) 管道系统 第 2 部分: 管材 (GB/T 13663.2-2018), 2018.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 塑料节水灌溉器材 第 2 部分: 压力补偿式滴头及滴灌管 (GB/T 19812.2-2017), 2017.
- [11] 中华人民共和国水利部. 微灌灌水器 - 微喷头 (SL67.3-1994), 1994.
- [12] 高仁超, 马传波. 长距离输水工程中管路进排气设计. 水科学与工程, 2005(4): 43~45.
- [13] 米海蓉. 长距离压力输水管道排气问题的研究. 黑龙江水利科技, 2006, 3(34): 67~71.
- [14] 安金龙. 长输管道排水过程中的气阻现象与气阻定律. 石油工程建设, 2010, 36(5): 13~16.
- [15] 阳国斌. 造成 PVC-U 给水管道故障的原因分析. 科技资讯, 2008(8): 82.

Research and application of micro-irrigation system for citrus

Liu Xinggang^{1, 2}, Zhang Zhihui¹, Zhang Yunjiang³, Chen Xiao^{1, 2*}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Beijing Zhongshui Runke Certification Co., LTD, Beijing 100048, China; 3. Water Bureau of Yunyang County of Chongqing, Chongqing 404500, China)

Abstract: [Purpose] The research and application of water-saving irrigation system for citrus can improve the ability of citrus to withstand drought and increase its yield. [Method] Water application rate and system design flow of citrus were discussed in this paper. The design of water supply intensity in the current national standard “Technical Code for Micro-irrigation Engineering” was explained, and the viewpoint of considering effective precipitation was put forward. Aiming at the problems of pipeline decompression and air blockage in self-pressurized irrigation in mountainous areas, two simple solutions of exhaust pipe and water storage decompression tank are provided. In the application of fertilizer, Venturi fertilizer and differential pressure fertilizer were compared. [Result] Calculating water supply intensity by considering effective precipitation is more in line with the actual situation and saves system investment. Exhaust pipe and water storage decompression tank can effectively solve the problem of pipeline water blockage due to gas. Moreover, it plays the role of reducing pipeline pressure, and can replace the decompression valve and exhaust valve. Pressure differential fertilizer is more suitable for gravity irrigation pipeline in mountainous areas than Venturi fertilizer. [Conclusion] Through the research of irrigation system and the construction practice of demonstration area, the micro-irrigation technology can be improved for citrus irrigation.

Key words: citrus irrigation; gravity flow irrigation; water application rate; air plugging; fertilizer devices