

膜下滴灌施肥对樱桃产量品质和土壤肥力的影响

曹晓庆 杨培岭* 李憑峰

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 为寻求膜下滴灌施肥条件下果树栽培的最佳水肥调控阈值,以樱桃为试验材料,灌水量和施肥量各设3个水平(即设计灌溉定额的70%、85%和100%及推荐滴灌施肥量的60%、80%和100%),传统畦灌冲施为对照,为寻求膜下滴灌施肥条件下樱桃栽培的最佳水肥调控阈值进行了研究。结果表明:灌水量、施肥量和水肥交互作用对樱桃的产量品质和土壤养分含量等指标有不同程度的影响。相比传统畦灌冲施方式,膜下合理滴灌施肥能得到更佳的产量品质和土壤肥力,能有效提高樱桃树的水分利用效率和肥料偏生产力。其中,最佳水肥组合是中水高肥(W_2F_3),其产量($3\,174.61\text{ kg/hm}^2$)、纵径(23.15 mm)、可溶性总糖含量(17.82%)和水分利用效率(9.69 kg/kg)达到最高,可滴定酸较低(0.41%),主要吸水吸肥土层($20\sim 40\text{ cm}$)的全氮含量最高,其他品质、速效养分和有机质等指标也处较高水平。该研究为果园拟定高效高产的滴灌施肥制度提供了数据支撑。

关键词 膜下滴灌; 产量品质; 灌溉水利用效率; 肥料偏生产力; 土壤肥力

中图分类号 S275.6 **文章编号** 1007-4333(2018)11-0133-09 **文献标志码** A

Effects of drip fertigation beneath mulched film on cherry yield, quality and soil fertility in cherry orchard

CAO Xiaoqing, YANG Peiling*, LI Pingfeng

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To explore the optimal regulation combination of water and composite soluble fertilizers supplied with drip irrigation system beneath mulched film, a field drip fertigation experiment was conducted in a cherry orchard at three irrigation levels (W_1 , W_2 and W_3 , i. e. 70%, 85% and 100% of designed irrigation quota) and three fertilizer levels (F_1 , F_2 and F_3 , i. e. 60%, 80% and 100% of recommend dose of fertilizers for drip irrigation) were designed. Conventional border irrigation and fertilization method was set as control (CK). The results showed that the amount of irrigation and soluble fertilizers showed significant effects on the cherry yield, quality, irrigation water use efficiency (IWUE), partial factor productivity (PFP) and main nutrients content at the 0–100 cm soil layer. The drip fertigation beneath mulched film with reasonable regulation of water and fertilizer obtained better yield, quality and soil fertility than those of conventional method. IWUE and PFP were both improved effectively. The treatment with medium water deficit and enough fertilizer (W_2F_3) was considered as the best combination for cherry tree, which obtained the highest yield ($3\,174.61\text{ kg/hm}^2$), vertical diameter (23.15 mm), total soluble sugar content (17.82%) and IWUE (9.69 kg/kg), the lowest titratable acid (0.41%). Other quality indicators and soil nutrients such as the content of total nitrogen, available nutrients and organic matter at the 20–40 cm soil layer were relatively better. This study provided scientific data supports for the effective and productive water and fertilizer-saving system in orchard.

Keywords drip fertigation beneath mulched film; yield and quality; irrigation water use efficiency; partial factor productivity; soil fertility

收稿日期: 2017-07-02

基金项目: 北京市科技计划项目(D151100004115003)

第一作者: 曹晓庆, 硕士研究生, E-mail: xiaoqingcaoalice@163.com

通讯作者: 杨培岭, 教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: yangpeiling@126.com

樱桃果实酸甜可口,营养丰富,是中国的重点经济果树之一,目前红灯是我国栽培面积最大的早熟优良品种^[1]。据农业部统计,2014年北京市樱桃种植总面积达3 600 hm²,由于果实外观、营养及经济价值的优势,越来越受到人们的重视。由于樱桃树生育期集中在4—6月,需肥迅速、集中,磷钾等养分缺乏时新根徒长而分枝少,缺少氮又会引起根的衰老加剧。目前种植方面存在用水资源短缺、灌溉施肥管理不当和养分投入不平衡等问题,导致特色精品质量和投入产出比下降,对生态环境也造成了危害^[2]。因此,如何合理改善樱桃水肥管理模式,以提高产量为前提,达到提高品质、节水节肥、增加农民收益和减少污染的目的,是果树种植迫切需要解决的问题。

目前国内外对苹果、葡萄和核桃等多种果树展开了滴灌施肥研究^[3-5]。研究表明土壤中水分和养分的含量会影响植株的生长发育和吸收养分的能力,从而又影响果实的产量及土壤的养分分布^[1, 6-7]。滴灌施肥条件下土壤中硝态氮含量受灌水、施肥以及水肥交互效应影响显著,随灌水量的增加呈先增大后降低的趋势,随施肥量的增加逐渐增大^[8]。而且用新型水溶性复合肥比普通肥料进行沟灌或滴灌施肥更利于根系吸收养分和生长,提高了表层土壤的有效养分含量,减少滴头堵塞而提高了

灌水施肥的均匀度和滴灌系统的寿命^[6, 9]。此外,果园采用园艺地布不仅能减少水分蒸发、提高土壤理化性能,还能防长杂草,减少人工管理成本。

前人研究过不同条件下水分处理、氮肥形态或施氮量等单一因素对盆栽或大田樱桃水肥利用效率和产量品质的影响^[1-2, 10-11]。但仍缺乏关于膜下滴灌条件下灌溉和水溶性复合肥料对樱桃产量品质、水肥利用和土壤理化性质的影响的综合研究。本研究旨在以此确定出节水节肥、调质增肥的膜下灌溉施肥模式,以期为华北半干旱地区果树的精准管理制度提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 试验区概况

田间试验于2016年3月中—6月底在北京通州区于家务乡节水灌溉示范园内(39°43' N, 116°41' E)进行,系北温带半干旱大陆季风气候区,海拔23.73 m。全年日照时数2 562~2 744 h,多年平均气温11.5 °C,全年无霜期210 d左右,多年平均降水量585 mm,多年平均蒸发量1 140 mm。北京降水主要集中在6—9月,占全年总降水量75%以上,试验期间降水量118 mm。试验区土壤的理化性质如表1所示。

表1 试验区0~100 cm土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of 0-100 cm soil in study area

深度/cm Soil depth	容重/ (g/cm ³) Bulk density	饱和含水率/% Saturated water content	田间持水率/% Field water holding capacity	土壤质地/% Soil component			土壤质地 Soil texture	全氮/(g/kg) Total nitrogen
				粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand		
				0~20	1.26	26.4		
20~40	1.45	27.3	26.1	9.82	52.76	37.42	粉质壤土	0.86
40~60	1.48	31.6	27.8	5.27	31.25	63.48	砂质壤土	0.41
60~80	1.52	36.8	25.6	3.83	26.54	69.63	砂质壤土	0.41
80~100	1.46	36.5	25.4	0.84	6.53	92.63	砂土	0.52
深度/cm	全磷/ (g/kg) Total phosphorus	全钾/ (g/kg) Total Potassium	有机质/ (g/kg) Organic matter	铵态氮/ (mg/kg) Ammonium nitrogen	硝态氮/ (mg/kg) Nitrate nitrogen	有效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available potassium	
0~20	1.11	18.84	17.8	12.92	35.80	24.00	163	
20~40	0.89	18.63	9.53	7.58	20.41	21.90	102	
40~60	0.69	18.50	3.53	9.65	18.93	6.74	90	
60~80	0.62	18.81	3.77	9.52	13.03	3.83	93	
80~100	0.64	18.94	3.55	9.94	11.45	3.25	109	

1.2 供试作物和管理

供试树种为长势和大小基本一致的 5 年生露地栽培樱桃 (*Prunus avium*), 株距 4 m, 行距 4 m, 南北行向。采取一树双行方式布置滴灌管, 地面覆盖园艺地布, 滴灌管分别距树干两侧各 0.7 m, 滴头间距 0.3 m, 滴量 2 L/h, 取地下水灌溉。结合其整个生育期需水需肥特点和实际降雨情况进行灌水施肥, 保证各处理不低于土壤含水率 θ_F 下限 65%。在开花坐果期和盛果期进行滴灌施肥, 在施肥前将施入的肥量按施肥水平溶于桶中, 控制肥液比为 4%。在施肥的过程中选择中间施肥前后灌水的方式, 将带走肥液所需的水量计入灌水量之内。果园剪枝、病虫害防治、疏花疏果等均为常规管理

措施。

1.3 试验设计

樱桃树的计划湿润层为 70 cm, 根据田间持水量计算得设计灌水定额为 246.7 m³/hm²。试验所用追肥属复合型水溶肥, 其中 N:P₂O₅:K₂O (质量) 为 16:8:34, 并含有其他少量螯合态微量元素, 滴灌推荐施肥量为 150 kg/hm², 冲施推荐施肥量为 300 kg/hm²。灌水量和施肥量各设低、中和高 3 个梯度 (即设计灌水定额的 70%、85% 和 100% 和推荐施肥量的 60%、80% 和 100%) 采取完全组合设计, 传统的畦灌冲施方式为对照组 (灌水定额的 100% 和施肥量的 100%), 共 10 个处理, 每个处理 3 行重复。试验方案见表 2。

表 2 滴灌施肥和畦灌施肥试验设计方案

Table 2 Experimental design of drip fertigation and border fertilization

灌溉施肥方式 Irrigation and fertilization method	代码 Code	处理 Treatment	灌水水平/% Irrigation level	灌水定额/ (m ³ /hm ²) Irrigation quota	施肥水平/% Fertilizer level	施肥量/ (kg/hm ²) Fertilizer amount
膜下滴灌施肥	W ₁ F ₁	低水低肥	70	172.7	60	90
	W ₂ F ₁	中水低肥	85	209.7	60	90
	W ₃ F ₁	高水低肥	100	246.7	60	90
	W ₁ F ₂	低水中肥	70	172.7	80	120
	W ₂ F ₂	中水中肥	85	209.7	80	120
	W ₃ F ₂	高水中肥	100	246.7	80	120
	W ₁ F ₃	低水高肥	70	172.7	100	150
	W ₂ F ₃	中水高肥	85	209.7	100	150
	W ₃ F ₃	高水高肥	100	246.7	100	150
畦灌冲施	CK	高水高肥	100	519.4	100	300

1.4 测定项目与方法

1.4.1 产量品质

进入采收期, 连续多天不间断地采摘不同处理的樱桃, 实收计产。在每个小区采用四分法取样, 选取采摘 100 个果实后用称重法计算果实的平均单果质量, 并用游标卡尺测量果实的纵径和横径, (FHR-5)/GY-1 型硬度仪测量果实硬度。营养品质指标主要包括果实可滴定酸、可溶性总糖、V_c 和可溶性固形物, 分别采用氢氧化钠滴定法、硫酸蒽酮比色法、钼蓝比色法、台式糖度仪测定, 糖酸比取果实可溶性糖与总酸度值之比。

1.4.2 土壤养分及其他数据

用土钻每隔 15 d (灌水前后加测) 取 0~10、

10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 各层土壤, 用烘干法测含水率。生育期前及收获后取以滴头附近 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 各层土壤, NO₃⁻-N 用流动分析仪法测量, 有机质用重铬酸钾容量-外加热法, 全氮用凯氏定氮法, 速效钾用乙酸氨浸提-火焰光度法, 有效磷用钼蓝比色法。降水量、温度、湿度、蒸发量等气象数据来自试验站内的气象观测站资料。

1.5 数据处理

灌溉水利用效率 (Irrigation water efficiency, IWUE, kg/m³) 计算公式为,

$$IWUE = Y / I \quad [5, 12] \quad (1)$$

式中: Y 为产量, kg/hm²; I 为灌水量, m³/hm²。

肥料偏生产力 (Partial factor productivity, PFP, kg/kg) 计算公式为,

$$PFP = Y / F_T^{[5, 12]} \quad (2)$$

式中: Y 为产量, kg/hm²; F_T 表示投入的 N、P₂O₅ 和 K₂O 总量, kg/hm²。

采用 Excel2007 和 Spss17.0 处理试验数据并进行方差分析, 采用 Duncan 检验法进行多重比较, 结果用字母法进行标记。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对樱桃产量品质特性的影响

果径和硬度是衡量樱桃品种的重要外观指标, 产量、灌溉水利用效率和肥料偏生产力是主要的经济指标。可溶性总糖、可滴定酸、糖酸比、V_c 和可溶性固形物是决定樱桃营养价值和口味的主要因子^[13]。表 3 描述了不同水肥处理对各指标的影响。

灌水、施肥水平及水肥交互作用对樱桃产量有显著影响 ($P < 0.05$)。F₁ 和 F₂ 条件下樱桃产量随着灌水量的增加而增加, 而 F₃ 条件下随灌水量增加呈先增加后降低的趋势。在 W₁ 和 W₂ 处理下产量随着施肥量的增加而增加, W₃ 处理下增产效果差

异较小, 平均为 54.09%。各处理中, W₂F₃ 的产量最高, 达 3 174.61 kg/hm², 比 CK 增产 59.26%, W₁F₁ 处理的产量最低, 比 CK 减少 4.75%。

灌水量、施肥量及水肥交互作用对单果重量和果径均有显著的影响 ($P < 0.05$), 而对樱桃的硬度无显著影响 ($P > 0.05$)。樱桃单果重随灌水水平和施肥量的增加而增加, F₃、F₂ 和 F₁ 处理分别比 CK 增加 23.35%、10.82 和 4.89%, W₃ 和 W₂ 分别增加 23.86% 和 20.89%, W₁ 处理比 CK 减少 5.69%。W₃F₃ 处理下的单果重最高 (8.28 g), 比 CK 处理提高 37.8%。从水肥的主效应来看, 果实的纵横径对灌水量和施肥量的响应不完全一致。横径随灌水量增加而增加, 纵径随灌水量增加呈先增加后降低的趋势。高肥处理使得横径比 CK 增大 4.14%, 纵径增大 7.29%。W₃F₃ 处理的横径最大 (27.86 mm), 比 CK 高 9.73%, W₁F₂ 比 CK 低 3.17%。W₂F₃ 处理的纵径最大 (23.15 mm), 比 CK 高 14.97%, W₁F₁ 纵径比 CK 低 2.88%。另外, W₁F₃ 处理的樱桃硬度最大 (3.72 kg/cm²), W₁F₁ 最小, 分别比 CK 处理增加 4.05% 和降低 5.02%, 其余处理与 CK 差异较小。

表 3 不同灌水施肥方式对樱桃产量品质及水肥利用效率的影响

Table 3 Comparison of different irrigation and fertilization methods on cherry yield, exterior quality, IWUE and PFP

处理 Treat ment	产量/ (kg/hm ²) Yield	单果重/g Average fruit weight	横径/mm Equatorial diameter	纵径/mm Longitudinal diameter	硬度/ (kg/cm ²) Firmness	灌水利用 效率/ (kg/m ³) IWUE	肥料偏 生产力/ (kg/kg) PFP	可滴定 酸/% Titratable acid	可溶性 总糖 /% TSS	V _c / (mg/ 100 g)	可溶性固 形物/% Soluble solid
W ₁ F ₁	1 841.08 i	5.67 g	24.98 def	19.75 f	3.41 d	7.03 f	33.75 f	0.55 b	10.51 f	7.51 g	16.73 b
W ₂ F ₁	2 030.27 g	6.06 e	25.25 d	20.28 d	3.50 c	6.20 g	36.09 d	0.54 b	14.82 c	8.16 f	16.08 c
W ₃ F ₁	2 896.52 d	7.18 d	26.00 c	20.67 c	3.69 a	7.51 e	51.49 a	0.59 a	14.24 c	10.02 c	15.46 c
W ₁ F ₂	2 356.35 f	5.30 h	24.67 g	20.13 de	3.58 b	8.72 c	31.42 g	0.38 f	12.40 e	7.71 g	17.73 a
W ₂ F ₂	3 076.17 c	7.45 c	25.86 c	20.32 cd	3.62 b	9.39 b	41.02 c	0.44 d	16.70 b	9.28 e	17.13 b
W ₃ F ₂	3 156.15 b	7.23 d	24.92 ef	19.88 ef	3.70 a	8.19 d	42.08 b	0.55 b	13.11 d	11.81 a	14.60 d
W ₁ F ₃	2 614.75 e	6.04 ef	24.86 fg	20.33 cd	3.72 a	9.69 a	27.89 h	0.52 c	14.92 c	10.86 b	17.56 a
W ₂ F ₃	3 174.61 a	7.92 b	26.68 b	23.15 a	3.58 b	9.69 a	33.86 e	0.41 e	17.82 a	10.80 b	16.83 b
W ₃ F ₃	3 162.30 b	8.28 a	27.86 a	21.22 b	3.62 b	8.20 d	33.73 f	0.58 a	13.97 c	10.61 b	14.90 d
CK	1 993.36 h	6.01 f	25.21 de	20.14 de	3.60 b	2.47 h	10.63 i	0.58 a	12.51 e	9.72 d	14.65 d

注: 同列数据的不同小写字母表示 $\alpha = 0.05$ 水平上不同处理之间的差异显著。W₁、W₂ 和 W₃ 分别表示设计灌水定额 70%、85% 和 100% 的处理, F₁、F₂ 和 F₃ 分别表示滴灌推荐施肥量的 60%、80% 和 100%, CK 为常规畦灌施肥。下表同。

Note: Different small letters in the same column are significantly different among treatments at $\alpha = 0.05$ level. W₁, W₂ and W₃ mean 70%, 85% and 100% of designed irrigation quota, respectively. F₁, F₂ and F₃ mean 60%, 80% and 100% of recommended fertilizer amount under drip irrigation, CK is conventional border irrigation and fertilization. The same as follows.

由表 3 还可知,施肥量和水肥交互作用对 IWUE 和 PFP 有显著影响。在同一灌水条件下, IWUE 随施肥量增大而增大, PFP 随施肥量增大而减小。而 F_2 和 F_3 条件下充分灌溉会使 IWUE 明显下降, F_3 条件下 PFP 随灌水量的增加而减小。各处理中, W_1F_3 和 W_2F_3 的 IWUE 最高, 均为 9.69 kg/m^3 , W_3F_1 处理的 PFP 较高, 为 51.49 kg/kg 。CK 处理的 IWUE 和 PFP 均为最低, 分别为 2.47 和 10.63 kg/kg 。

灌水和施肥水平及水肥交互作用对可滴定酸和可溶性总糖含量均有显著影响。可滴定酸含量均随灌水量和施肥量的增加呈先降低后增加的趋势。 W_3F_1 处理的可滴定酸含量最高 (0.59%), W_1F_2 最低 (0.38%)。可知适当减少水肥供应会显著降低果实的可滴定酸含量。可溶性总糖随施肥量增加而增加, 随灌水量增加呈先增加后降低的趋势。各处理中, W_2F_3 的可溶性总糖含量最高 (17.82%), 比 CK 高 42.45% , 只有 W_1F_1 和 W_1F_2 处理低于优质樱桃果实可溶性总糖含量 (12.42%)^[13]。

灌水量和水肥交互作用对可溶性固形物有显著影响, 而灌水量、施肥量及交互作用对 V_c 含量均有显著影响。可溶性固形物随灌水量增加而降低, 在 W_1F_2 和 W_1F_3 处理下可溶性固形物获得较高值, W_3F_2 处理获较小值。中低水肥条件下 V_c 含量随着灌水量和施肥量增加而增大, F_3 条件下随着灌水量增加而降低, W_3 条件下随施肥量呈先增加后降低的趋势。 W_3F_2 处理的 V_c 含量比 CK 提高 21.26% , W_3F_1 、 W_3F_2 、 W_1F_3 、 W_2F_3 和 W_3F_3 也达到优质标准 ($9.89 \text{ mg}/100 \text{ g}$)^[13], W_1F_1 比 CK 低 22.74% 。

2.2 不同水肥处理对土壤养分的影响

樱桃根系较浅, 主要分布在地表以下 80 cm 内,

而 $20\sim 40 \text{ cm}$ 为主要吸水吸肥的深度^[2, 14-15]。表 4 反映了灌水施肥前和收获后的 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层的主要养分指标情况。结果表明除 W_3F_1 处理外, 其余处理的土壤全氮、有机质和硝态氮含量均比 CK 高。滴灌施肥条件下, 灌水量、施肥量及水肥交互作用对全氮、有机质、硝态氮和速效钾均有显著影响, 四者随施肥量的增加而增大, 随灌水量的增加而降低。且施肥量对硝态氮含量影响极显著。而有效磷只受施肥量显著影响, F_1 、 F_2 和 F_3 处理分别比初始值增加 35% 、 38% 和 51% 。 W_2F_3 处理下全氮含量最高 (1.51 g/kg), 其有机质、硝态氮和速效钾含量仅次于 W_1F_3 , 有效磷含量仅次于 W_3F_3 。

为进一步分析灌水施肥量对土壤有效养分的影响, 图 1、2 和 3 分别描述了采收后 $0\sim 100 \text{ cm}$ 土壤中硝态氮、有效磷和速效钾的分布情况。由图 1 可知, CK 条件下土壤中硝态氮主要集中在 $0\sim 20$ 和 $40\sim 100 \text{ cm}$, 含量明显高于滴灌施肥处理。滴灌施肥条件下 $20\sim 40 \text{ cm}$ 硝态氮含量差异较大, F_2 和 F_3 处理均显著高于 CK, 且减少灌水量和增加施肥量有利于硝态氮的积累。 50 cm 以下硝态氮含量随灌水量和施肥量增加而增加, 且均低于 CK 处理。由图 2 可知, 滴灌施肥能有效增加土壤中有效磷含量。各处理表层土壤有效磷含量最高, W_1F_3 处理达到 97.67 mg/kg , 比 CK 高 26% , 40 cm 以下有效磷含量比较稳定, 在 $80\sim 100 \text{ cm}$ 中 W_1F_1 和 W_1F_2 处理分别比 CK 降低 4.36% 和 13.24% 。由图 3 可知, 滴灌施肥显著提高了 $0\sim 40 \text{ cm}$ 土壤的速效钾含量。各层土壤速效钾含量随施肥量增加而增加, $0\sim 40 \text{ cm}$ 土壤速效钾含量随灌水量增加而降低, 而深层变化相反。

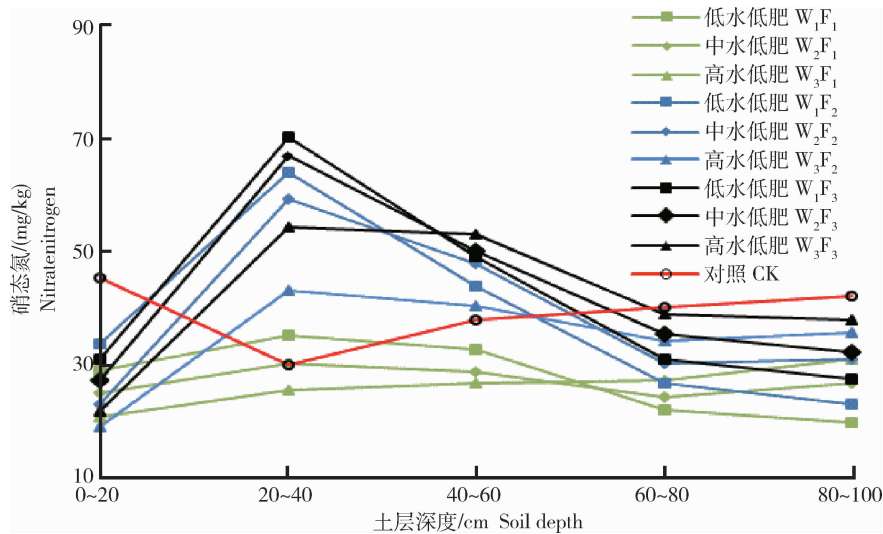
表 4 不同灌水施肥方式对土壤养分的影响

Table 4 Comparison of different irrigation and fertilization methods on soil nutrient content

处理 Treatment	全氮/(g/kg) Total nitrogen	有机质/(g/kg) Organic matter	硝态氮/(mg/kg) Nitrate nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium
初始值	0.86	9.53	20.41	21.9	102
W_1F_1	1.08 e	12.24 d	35.11 e	30.54 b	129.62 d
W_2F_1	1.05 e	11.80 e	30.28 e	28.91 c	126.98 d
W_3F_1	1.00 f	10.42 f	25.62 f	29.11 c	118.87 e
W_1F_2	1.38 b	12.56 cd	64.14 b	31.76 b	140.71 c
W_2F_2	1.25 c	12.45 d	59.19 c	29.12 c	136.78 c

表4(续)

处理 Treatment	全氮/(g/kg) Total nitrogen	有机质/(g/kg) Organic matter	硝态氮/(mg/kg) Nitrate nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium
W ₃ F ₂	1.15 d	10.43 f	43.11 d	29.61 bc	125.06 d
W ₁ F ₃	1.48 a	14.98 a	70.26 a	32.37 a	158.96 a
W ₂ F ₃	1.51 a	13.80 b	66.91 b	33.03 a	154.06 b
W ₃ F ₃	1.31 b	12.66 c	54.30 c	33.56 a	152.71 b
CK	1.04 f	10.51 f	30.10 f	23.62 d	108.19 f



W₁、W₂和W₃分别表示设计灌水定额70%、85%和100%的处理，F₁、F₂和F₃分别表示滴灌推荐施肥量的60%、80%和100%，CK为常规畦灌施肥。下图同。

W₁、W₂ and W₃ mean 70%, 85% and 100% of designed irrigation quota, respectively. F₁, F₂ and F₃ mean 60%, 80% and 100% of recommended fertilizer amount under drip irrigation, CK is conventional border irrigation and fertilization. The same as follows.

图1 收获后不同灌水施肥方式下土壤各层硝态氮含量

Fig. 1 Residual NO₃⁻-N at different soil depths as influenced by drip fertigation and border fertigation

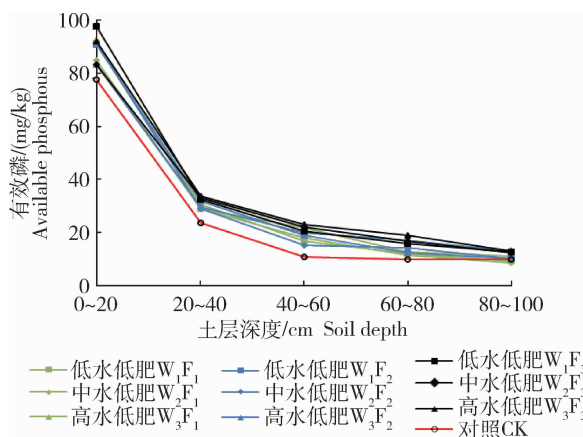


图2 收获后不同灌水施肥方式下土壤各层有效磷含量

Fig. 2 Residual available P at different soil depths as influenced by drip fertigation and border fertigation

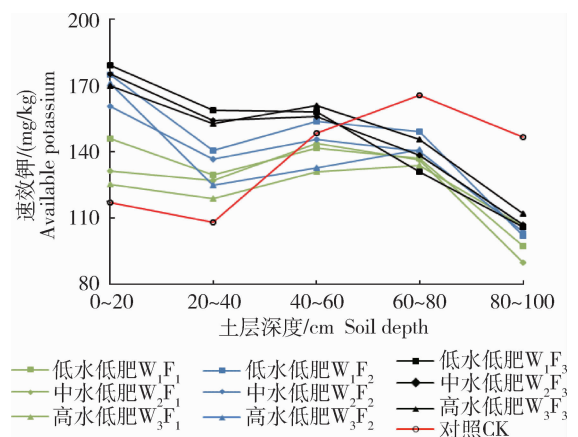


图3 收获后不同灌水施肥方式下土壤各层速效钾含量

Fig. 3 Residual available K at different soil depths as influenced by drip fertigation and border fertigation

3 讨 论

3.1 不同水肥处理对产量品质的影响

膜下适当进行水肥调控能使樱桃的产量品质明显优于 CK 处理。综合考虑, W_2F_3 处理就能满足高产高效目的, 而 W_1F_2 和 W_1F_1 分别比 CK 处理的横径和纵径小 3.17% 和 2.88%, W_1F_1 产量、单果重和硬度也比 CK 低。说明水肥供应量过低并不利于果树生长, 而水分超过一定水平时也不会带来更佳的经济效益, 还可能产生环境污染。Hebbar 等^[6]也有类似结果, 滴灌条件下 75% 的施肥处理比传统灌水施肥方式有综合优势。因为滴灌施肥条件下滴头可以将水溶性肥料输送到根系活动最多的区域^[6, 16], 适宜的水肥条件及水肥协同效应促进了植物的根系发育及保证了植株生长阶段更高的水肥可获得性, 养分不断朝生殖部位转移, 进而提高了产量特性^[8, 12]。此外, 产量相关特性对灌水量和施肥量的响应并不一致, 如粒径或单果重过大可能会影响产量。横径随灌水量增加而增加, 而纵径随灌水量增加呈先增加后降低的趋势, 也说明灌水量对果实横径和纵径的影响有差别^[17]。综合多个指标评价水肥调控对樱桃的影响尤其重要。

灌水和施肥水平及水肥交互作用对可滴定酸、可溶性总糖和 V_c 含量均有显著影响, 可溶性固形物受灌水量和水肥交互作用的影响显著。在 W_2 和 F_2 条件下樱桃的可滴定酸含量较低, W_2F_3 处理有最高的可溶性总糖, W_1F_2 和 W_1F_3 处理有最高的可溶性固形物。同周罕冕等^[5]的结论类似, 说明水肥供应过少不利于果实营养的积累, 过量灌溉又会导致果实成熟延迟, 使得果实酸含量较大, 多余的水分对可溶性固形物也有稀释作用。适当水分亏缺有利于增强可溶性酸性转化酶和细胞壁转化酶的活性^[18-19], 能促进酸向糖的转化, 光合作用积累形成的产物也会更多分配给生殖器官^[8, 20-21], 从而提高樱桃的质量。此外, 不同肥量处理下樱桃的可溶性固形物之间无显著差异, 这与李仙岳^[2]和冯梦喜等^[22]的研究结果一致。结果还表明 V_c 含量随着灌水量和施肥量增加而增大, 而过多水肥会抑制樱桃果实中 V_c 含量, 这与 Cui^[23]和浦俊等^[24]结论一致。

3.2 不同水肥处理对水肥利用及土壤养分分布的影响

土壤中养分的分布与易获得性与土壤的水分、施肥量、养分溶解性和植物的吸收利用均有

关^[12, 25], 土壤肥力直接影响果树的生长发育, 对下一年度的产量产生显著性影响, 因此研究灌溉施肥后土壤中的养分情况对判断土壤的增产潜力有重要意义^[15]。结果表明增加施肥量能有效提高土壤中的氮磷钾和有机质含量, 对果园土壤肥力有很大的促进作用。同时, 水分利用率得到了提高, 但肥料利用率有所降低, 这与对核桃^[3]和棉花^[12]的研究结果一致。在中高肥条件下充分灌溉会使 IWUE 和 PFP 下降, 说明灌溉水超过一定额度时, 不仅会降低水分利用率, 多余的灌溉水可能将土壤养分淋溶至土壤更深层, 而樱桃树吸收根较浅, 不利于果树对养分的吸收利用。

滴灌施肥有利于消除硝态氮的表聚现象和降低深层渗漏量。因为滴灌条件下滴头正下方含水量较高, 水分向下运动减缓, 减弱了硝态氮向下运移的对流作用, 硝态氮随着水平方向的水流运动在湿润体的横向边缘产生累积, 同时滴头下方通气状况较差, 局部反硝化作用增强^[8], 使得硝态氮主要集中在 20~60 cm 土层。另外, 在低湿度土壤中硝态氮主要以固体硝酸盐形态存在, 移动性较差, 灌水量较低不利于硝态氮向下运移, 而增加灌水量不仅降低了土壤硝态氮浓度, 重力水下渗还加剧了硝态氮向下运移, 并不断溶解土壤中的固体硝酸盐, 此时硝态氮以硝酸根离子形态存在, 导致深层土壤硝态氮浓度偏高^[8, 26]。因此对于深层土壤 W_3F_3 处理硝态氮含量最高, 而浅层土壤 W_3F_1 处理最低, 不能满足樱桃根系吸收和生长需求。

磷在土壤中很难获得较好的分布^[6], 但水溶肥的高溶解性及持续供应使得各土层有效磷含量明显提高。但磷肥仍容易固定在施肥处, 其含量随深度下降而减少。钾肥相对容易溶解, 由于 CK 条件下钾肥一次施入, 下渗量较大。而滴灌施肥能有效增加 0~40 cm 处速效钾含量, 减少了深层渗漏。综合看来, 低水高肥 (W_1F_3) 和中水高肥 (W_2F_3) 的养分分布情况最优, 有效磷在各层土壤中维持较高水平, 硝态氮和速效钾含量在 20~40 cm 较高, 40~100 cm 较低。

4 结 论

1) 膜下滴灌条件下适当水肥处理比畦灌冲施方式获得更优的樱桃产量品质, 提高了灌溉水利用效率和肥料偏生产力。还有效提高了土壤潜在肥力, 消除了硝态氮的表聚现象, 减少了硝态氮和速效

钾的深层渗漏。

2)产量、单果重、果径、可溶性总糖、可滴定酸和 V_c 均受水肥及其交互作用显著影响,可溶性固形物、灌溉水利用效率和肥料偏生产力仅受灌水量和水肥交互作用的显著影响。此外,全氮、有机质、硝态氮和速效钾受三者的显著影响,有效磷仅受施肥量的显著影响。

3)综合考虑樱桃产量品质、节水节肥和土壤增产潜力等多种因素,认为中水高肥(W_2F_3)是效益最佳的水肥组合。樱桃产量、纵径、可溶性总糖、IWUE及20~40 cm土层中全氮含量均最高,有机质、硝态氮和速效钾含量仅次于低水高肥(W_1F_3),有效磷含量仅次于高水高肥(W_3F_3),其他指标也占绝对优势。

参考文献 References

- [1] 李蕊,张宽地,陈俊英.无压灌溉条件下不同滴灌施氮量对樱桃生长发育及产量的影响[J].节水灌溉,2016(1):23-6
Li R, Zhang K D, Chen J Y. Influence of different fertigation quantity on growth and yield of cherry under non-pressure irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(1): 23-6 (in Chinese)
- [2] 李仙岳.微灌条件下樱桃果园耗水规律及蒸散估算模型研究[D].北京:中国农业大学,2010
Li X Y. Water consumption and evapotranspiration model of cherry orchard under the micro-irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [3] 王忠任,赵经华,付秋萍,马英杰.水肥耦合对南疆滴灌核桃树生长指标和产量的影响[J].节水灌溉,2016,(12):50-3
Wang Z R, Zhao J H, Fu Q P, Ma Y J. Effects of water and fertilizer coupling on growth index and yield of walnut trees under drip irrigation in southern Xinjiang[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016 (12): 50-3(in Chinese)
- [4] 王连君,王程翰,乔建磊,肖英奎.膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J].农业机械学报,2016,47(6):113-9
Wang L J, Wang C H, Qiao J L, Xiao Y K. Effects of water and fertilizer coupling on growth, yield and quality of grape under drip irrigation with film mulching[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 113-9(in Chinese)
- [5] 周罕觅,张富仓,吴立峰,范军亮,向友珍.水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J].农业机械学报,2015,46(12):173-83
Zhou H M, Zhang F C, Wu L F, Fan J L, Xiang Y Z. Effects of water and fertilizer coupling on yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of young apple tree[J].

Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 173-83(in Chinese)

- [6] Hebbar S S, Ramachandrapa B K, Nanjappa H V, Prabhakar M. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill)[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 21(1): 117-27
- [7] 何岸谿,张芮,安进强,齐广平,贾生海,王俊林,陈娜娜,王菲.水肥调控对设施延后栽培葡萄生长特性的影响[J].节水灌溉,2016(12):27-31
He A R, Zhang R, An J Q, Qi G P, Jia H S, Wang J L, Chen N N, Wang F. Effects of fertigation treatment on growth characteristic of greenhouse grape under delayed phenological period[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(12): 27-31 (in Chinese)
- [8] 邢英英,张富仓,张燕,李静,强生才,吴立峰.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):713-26
Xing Y Y, Zhang F C, Zhang Y, Li J, Qiang S C, Wu L F. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 713-26(in Chinese)
- [9] Hopkins B G, Rosen C J, Shiffler A K, Taysom T W. Enhanced efficiency fertilizers for improved nutrient management; Potato (*Solanum tuberosum*)[J]. *Crop management*, 2008, 7(1)
- [10] 李祝贺,吕德国,秦嗣军,刘国成,刘坤.不同形态氮肥处理对樱桃植株生长发育影响的研[J].辽宁林业科技,2007(3):7-9
Li Z H, Lv D G, Qin S J, Liu G C, Liu K. Influences of different nitrogen fertilizers on growth and development of cherry[J]. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2007(3): 7-9(in Chinese)
- [11] 房宇波,孟春玲.樱桃氮肥效应研究[J].辽宁农业科学,2009(4):53-4
Fang Y B, Meng C L. Studying the effect of nitrogen on cherry[J]. *Liaoning Agricultural Science*, 2009(4): 53-4(in Chinese)
- [12] Jayakumar M, Surendran U, Manickasundaram P. Drip fertigation program on growth, crop productivity, water, and fertilizer-use efficiency of bt cotton in semi-arid tropical region of india [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(3): 293-304
- [13] 蔡宇良,李珊,陈怡平,赵桂仿,付润民.不同甜樱桃品种果实主要内含物测试与分析[J].西北植物学报,2005,25(2):304-10.
Cai Y L, Li S, Chen Y P, Zhao G F, Fu R M. Determination and analysis of main fruit inclusions of different varieties of *Prunus avium* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(2): 304-10(in Chinese)
- [14] 史洪琴,邹陈,陈荣华.引种到贵州的几个樱桃品种的根系分布[J].北方园艺,2012(14):9-11

- Shi H Q, Zou C, Chen R H. The root distribution of cherries introduced to Guizhou [J]. *Northern Horticulture*, 2012 (14): 9-11(in Chinese)
- [15] 高义民. 陕西渭北苹果园土壤养分特征时空分析及施肥效应研究[D]. 陕西:西北农林科技大学, 2013
- Gao Y M. Study on spatio-temporal characteristic of soil nutrient and effect of fertilization in apple orchard of Shaanxi Weibei area[D]. Shanxi: Northwest A& F University, 2013 (in Chinese)
- [16] Patel N, Rajput T. Simulation and modeling of water movement in potato (*Solanum tuberosum*) [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2011(81):25-32
- [17] 张芮, 成自勇, 王旺田, 吴玉霞, 牛黎莉, 张晓霞, 高阳, 陈娜娜, 马奇梅. 不同生育期水分胁迫对延后栽培葡萄产量与品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 105-13
- Zhang R, Cheng Z Y, Wang W T, Wu Y X, Niu L L, Zhang X X, Gao Y, Chen N N, Ma Q M. Effect of water stress in different growth stages on grape yield and fruit quality under delayed cultivation facility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 105-113(in Chinese)
- [18] 陈秀香, 马富裕, 方志刚, 褚贵新, 杨建荣, 薛琳, 李燕, 王建江. 土壤水分含量对加工番茄产量和品质影响的研究[J]. 节水灌溉, 2006(1):1-4
- Chen X X, Ma F Y, Fang Z G, Zhu G X, Yang J R, Xue L, Li Y, Wang J J. Preliminary study on the influence of soil moisture on yield and quality of processed tomato[J]. *Water Saving Irrigation*, 2006(1):1-4(in Chinese)
- [19] Baselga Y J J, Prieto L M H, Rodriguez D R A. Response of processing tomato to three different levels of water and nitrogen applications[J]. *Acta Horticulturae (Netherlands)*, 1993, 335
- [20] Erdem Y, Yuksel A N. Yield response of watermelon to irrigation shortage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98 (4): 365-83
- [21] 雷廷武, 肖娟, 王建平, 刘志忠. 微咸水滴灌对盐碱地西瓜产量品质及土壤盐渍度的影响[J]. 水利学报, 2003(4): 85-9.
- Lei T W, Xiao J, Wang J P, Liu Z Z. Experimental investigation on the effects of saline water drip irrigation on water use efficiency and quality of watermelons grown in saline soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003 (4): 85-9(in Chinese)
- [22] 冯梦喜. 下坝乡樱桃果园土壤肥力与肥、水调控试验研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2009
- Feng M X. Experimental study on the control of soil fertility and fertilizer and water in the cherry orchard of lower dam Township [D]. Guiyang: Guizhou University, 2009 (in Chinese)
- [23] Cui N B, Du T S, Kang S Z, Li F S, Zhang J H, Wnag M X, Li Z J. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(4): 489-97
- [24] 浦俊. 水肥一体化对沙地红枣树生长及枣果产量和品质的影响[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2014
- Pu J. Effect of fertigation on the growth, yield and quality of Chinese jujube in loess hilly region[D]. Shanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014 (in Chinese)
- [25] Thind H, Aujla M, Buttar G. Response of cotton to various levels of nitrogen and water applied to normal and paired sown cotton under drip irrigation in relation to check-basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 25-34
- [26] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 张洪华, 李飞, 华芳霞, 孟淑华. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(2): 685-694
- Wang X Y, He M R, Liu Y H, Zhang H H, Li F, Hua F X, Meng S H. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 685-694

责任编辑:王燕华