

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.030

滴灌水肥条件对樱桃产量、品质和土壤理化性质的影响

李 凭 峰 谭 煌 王 嘉 航 杨 培 岭
(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 以樱桃果树为研究对象,通过滴灌对植株进行灌溉施肥,设置9个不同水、肥量的试验处理,测定了樱桃果园土壤水分和理化性质,同时测定不同处理下樱桃果实产量和品质,综合分析了土壤养分各指标与樱桃果实微量元素之间的线性关系,引入 Spearman 秩相关系数法对土壤养分各指标与果实品质各指标作了敏感性分析。结果表明:不同水分处理下,在樱桃整个生育期内,土壤含水率呈下降趋势,在灌水时期,灌水越多,浅层土壤含水率越高,而对较深层次土壤含水率无明显影响。试验处理下的水肥条件能显著提高樱桃果实品质,较高施肥量能提高果实果径;适当灌水量能显著提高果实硬度;较高施肥量和较低灌水量可降低可滴定酸含量;较低灌水量和施肥量能提高可溶性固形物含量;中等施肥量和较低灌水量能提高粗蛋白的含量;较低灌水量和较低施肥量能提高果实内维生素 C 含量;适当灌水量以及较低施肥量能提高可溶性总糖含量。土壤中铵态氮与硝态氮含量处于不稳定状况,养分变化无明显规律;土壤各养分指标中,有机质含量与果实内全铁含量正相关;有效铵态氮含量与全氯含量呈正相关;有效硝态氮含量与果实内全钙、全锌、全氯含量呈正相关;有效磷含量与全铁含量正相关;速效钾含量与全钙含量呈负相关。土壤养分中,铵态氮、硝态氮含量与果实品质中的大多数指标有着密切联系。

关键词: 樱桃;滴灌施肥;果实品质;土壤养分;层次分析法

中图分类号: S275.6; S152.7⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)07-0236-11

Effect of Water and Fertilizer Conditions under Drip Irrigation on Yield, Quality of Cherry and Physicochemical Properties of Soil

LI Pingfeng TAN Huang WANG Jiahang YANG Peiling
(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Totally nine experimental treatments for cherry trees with different water – fertilizer amounts were established through fertigation with drip irrigation method, based on which the soil moisture and physicochemical property of cherry orchard were measured, as well as output and quality of cherry fruit under different treatments. Results showed that under different treatments, during the whole growth period of cherry trees, soil moisture content had a downward trend; during the irrigation period, the more the irrigation amount was, the higher the moisture content of shallow soil was, and it had no obvious influence on the deep soil. Water – fertilizer conditions under such experimental treatments can significantly improve the fruit quality. Higher fertilizer amount can increase fruit diameters; appropriate water amount can significantly improve the fruit hardness; higher fertilizer amount and lower water amount can reduce the content of titratable acid; lower water and fertilizer amounts can increase the soluble solid content; middle-level fertilizer amount and lower water amount can increase the crude protein content; lower water and fertilizer amounts can increase the vitamin C content of fruit, and appropriate water amount and lower fertilizer amount can increase the content of total soluble sugar. The linear relations between various indexes of soil nutrients and microelements of cherry fruit were comprehensively analyzed, and the sensitivity analysis regarding various indexes of soil nutrients and fruit quality was conducted by introducing Spearman rank correlation coefficient method. Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents in soil were under instable conditions and no clear rules were found in nutrient changes;

收稿日期: 2016-11-04 修回日期: 2017-01-04
基金项目: 北京市科技计划项目(D151100004115003)
作者简介: 李凭峰(1986—),男,博士生,主要从事农业水土工程研究,E-mail: pingfeng_li@163.com
通信作者: 杨培岭(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程和水资源高效利用研究,E-mail: yangpeiling@126.com

among various indexes of soil nutrients, the organic content had positive correlation with full iron content of fruit; the content of available ammonium nitrogen had positive correlation with total chlorine content; content of available nitrate nitrogen had positive correlation with contents of total calcium, zinc and chlorine of fruit; content of available phosphate had positive correlation with full iron content; content of rapidly available potassium was negatively correlated with full calcium content. Among soil nutrients, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen had close relations with most indexes of fruit quality.

Key words: cherry; drip fertigation; fruit quality; soil nutrition; analytic hierarchy process

引言

滴灌施肥技术具有显著的省水、省肥、省工等效果。诸多学者研究表明,滴灌施肥技术可以提高果实品质^[1]。路永莉等^[2]和高义民等^[3]在渭北旱原的试验研究表明,与传统的地面灌溉配合施肥相比,滴灌施肥技术不仅不会使苹果减产,还能增产 13.0%,另外还有助于提高果实品质,果实硬度增加了 10.6%,糖酸比提高了 19.1%,果实中 N、P、K 累积量分别提高了 36%、75.3% 和 44.8%,值得注意的是,当施肥量减少 50% 时,并未导致减产。周罕觅等^[4]在半干旱地区研究了水肥精准管理模式下苹果幼树生理特性和水分生产率对不同水肥的响应,结果表明水肥耦合的交互效应更能提高水分生产率。

滴灌条件下櫻桃果树的水肥试验研究较少,本文通过水量和肥量各设置不同的 3 个梯度,共 9 个试验处理,探究不同水肥组合对土壤水分和化学性质的影响。研究不同处理对櫻桃产量、果径、硬度、维生素 C 含量、可溶性固形物含量等指标的影响。将土壤养分指标与果实所测上述指标联系起来,分析土壤养分指标与微量元素的相关关系,并进行果实品质与土壤养分指标的敏感性分析。进一步明确土壤中养分对果实品质提升的贡献率,以期为櫻桃果园科学灌水施肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于北京市通州区于家务乡(39°42'30"N、116°41'27"E),属北温带半湿润半干旱大陆季风气候区。多年平均气温 11.5℃,日照时数 2 250 ~ 2 600 h,无霜期 185 ~ 190 d,多年平均降水量 520 mm。多年平均天然水面蒸发量 1 140 mm。降水呈现年际变化大、年内集中的特点,汛期为 6—9 月份,一般汛期降水量占全年降水量的 80% 以上。冻土层深度 80 cm。供试品种为 3 年生红灯櫻桃 (*Prunus avium*)。

1.2 试验区布置方案

1.2.1 试验布置

所选用地块面积约为 0.67 hm²。种植行距、株

距为 4 m × 4 m,每个小区为 3 棵 × 6 棵。试验施肥装置采用海卓公司生产的 AquaBlend 型比例施肥泵。

灌溉方式采用滴灌,滴灌管采用双行布置,滴头间距为 0.3 m,滴头流量为 2 L/h,滴灌管距离植株 0.7 m。所有灌水、施肥操作均由一个统一的首部实现,其中施肥采用比例施肥泵,通过与主管线串联的方式(施肥时关闭并联主管道),同时调整吸肥比例,能准确控制吸肥比例,通过水表控制灌水量,能实现水肥用量的精确控制。其余田间管理措施与当地一致。

1.2.2 试验方案

CK 为对照处理,灌水施肥方式为当地传统的地面灌溉,施肥为行间沟施,施用的基肥为有机肥,追肥方式为冲施。设置水肥耦合不同梯度的 9 个处理(表 1)。经计算,灌水定额为 24.5 mm,并以此为 100%,按梯度递减灌水量,灌水时间为花前水(3 月下旬—4 月初)、膨果水(5 月 10 日—成熟前)、采收水(果实采收后)、封冻水(11 月中下旬);施用肥料为水溶肥 1 与水溶肥 2,其配比为:滴灌水溶肥 1: 18-10-18 (N-P-K) 2.0Mg + TE, 0.2B, 0.07Fe (螯合态);滴灌水溶肥 2: 18-10-28 (N-P-K) 1.0Mg + TE, 0.2B, 0.07Fe (螯合态)。追肥时期分别为花期、膨果期、采收后随水追施 3 次水溶肥,其中,花期施用滴灌水溶肥 1,膨果期和采收后施用滴灌水溶肥 2。当地肥料用量 225 kg/hm²,以此为 100% 用量,按梯度递减施肥量。其他果园管理方式均与园区内相统一。

表 1 试验处理设计		
Tab.1 Experimental treatment design		%
处理	施肥比例	用水比例
CK	100	100
W1F1	100	100
W2F1	100	85
W3F1	100	70
W1F2	80	100
W2F2	80	85
W3F2	80	70
W1F3	60	100
W2F3	60	85
W3F3	60	70

1.2.3 测定指标及测定方法

(1)土壤含水率

利用 TRIME 水分监测仪观测土壤含水率动态,并配合用取土烘干法进行标定测量。测点位于滴灌湿润区域,距离滴灌管外侧 10 cm 处。所有 TRIME 管长度为 1 m,管外径为 44.3 mm,管内径为 42 mm,基于 TDR(Time domain reflectometry)原理,利用圆柱式 T3 探头。埋深均为 0.8 m。数据分层采集,具体分层为 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm。测定时间:含水率监测每 3 d 进行一次,并在降水前、后以及灌水前、后加测。

(2)土壤理化参数

每个处理利用土钻取土,采集 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 土层土样。采集位置为滴灌灌水区域,距离滴灌管 10 cm 范围内的土壤。各生育期追肥后测量 1 次。

(3)樱桃产量

樱桃进入采收期后,在初期与末期进行 2 次采收,每次收获时,每个处理选取 3 株长势均匀的樱桃树进行摘收、计数并且称量计产。

(4)果实品质参数

果实成熟后于同一时间对不同处理分别摘收 50 个果实,测定品质参数:果实硬度采用 FHR-5 型硬度计测量;果径采用手持式游标卡尺测定;可溶性固形物采用 PR-32α 型手持数字糖量计测量;可滴定酸采用氢氧化钠滴定法测定;可溶性糖用硫酸蒽酮比色法测定;维生素 C 含量采用二氯靛酚(DPI)氧化还原滴定法测定。

2 结果与分析

2.1 不同水肥耦合条件对土壤含水率的影响

樱桃属于早熟果品,在 5—6 月份间果实迅速膨大并在 6 月初达到成熟水平;在此期间,北京市未进入汛期,降水量较少,但樱桃树正处于结果的关键生育期,需水量较大,需要进行合理灌溉并及时检测土壤墒情保证果实的优质高产。由图 1 试验期间降水资料可以看出,降水多集中在 6—9 月份,日降水量为 0 ~ 50 mm 不等。由图 2 可以看出,在无外来水分补给的情况下,土壤含水率呈缓慢下降趋势,其中绝大部分被樱桃树吸收利用,少部分逐渐上移至土壤表层并蒸发至大气中。当有降水或者灌溉时,土壤含水率会上升,之后再缓慢下降;当降水量小于 10 mm 时,对表层土壤含水率的贡献并不明显,其中绝大部分通过土壤表面和植株叶片蒸发或通过地表径流损失。

在 0 ~ 20 cm 土层间,土壤含水率变化的幅度比

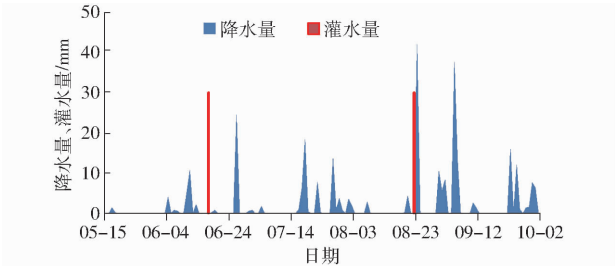


图 1 降水量及灌水量

Fig. 1 Rainfall and irrigation amount

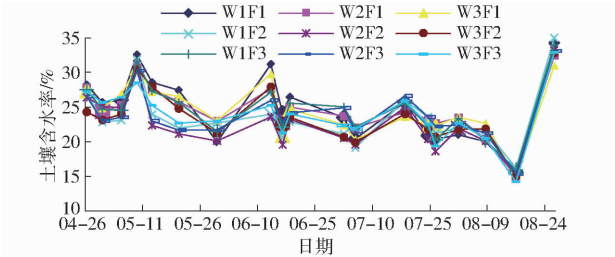


图 2 0 ~ 20 cm 土层土壤含水率

Fig. 2 Soil moisture content of 0 ~ 20 cm soil layer

较大,且含水率曲线斜率较大,变化速度较快。原因是由于土壤表层直接接受降水和灌溉等外来水源,水分很快进入土体中并运移,包括表土蒸发和入渗等,其中很少部分被植株吸收,所以在降水、灌水前后含水率有一个相对急剧变化的过程。土壤含水率在 15% ~ 35% 之间的不同处理中,在外来水源为灌溉时,体现为高水量处理土壤含水率大于中等水量处理,中等水量处理大于低水量处理;不同肥量处理之间并无显著差异。而当外来水源为降水时,不同处理间没有体现出规律性差异,土壤含水率有较强的随机性。

如图 3 所示,在 20 ~ 40 土层内,土壤含水率变化的趋势相对较缓,且在整个樱桃生育期内呈下降趋势,其可能原因是此层为樱桃果树主要的吸水层,外来水源从表层土入渗下来,会有一个短暂的上升过程,而其中的水分主要供植物体吸收利用,土壤含水率在不断减小。不同处理土壤含水率在 21% ~ 29% 之间,灌溉以后,显示出高水量处理含水率大于中等水量处理,中等水量处理大于低水量处理,不同施肥量并未对土壤含水率产生明显影响。

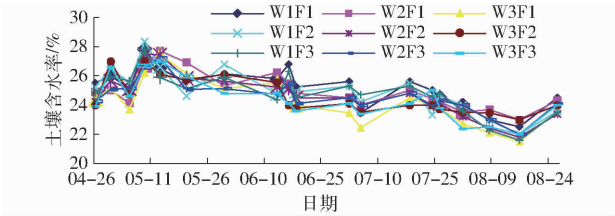


图 3 20 ~ 40 cm 土层土壤含水率

Fig. 3 Soil moisture content of 20 ~ 40 cm soil layer

如图 4 所示,在 40 ~ 60 cm 土层内,土壤含水率

维持在一个较高的水平,其可能原因是土壤容重较小,土壤比较黏重,能持有较多的水分,土壤含水率在 27% ~ 35% 之间;在滴灌条件下,灌溉不是造成土壤含水率升高的原因,因为滴灌水量较少,灌溉后植株吸收较快,所以灌溉水对此层土壤含水率影响较小。不同处理间,高水量处理的土壤含水率比中等水量和低水量处理高,而后两者之间没有明显的区别,由此可见,滴灌不同灌水量处理对 40 ~ 60 cm 的土壤含水率影响较小。

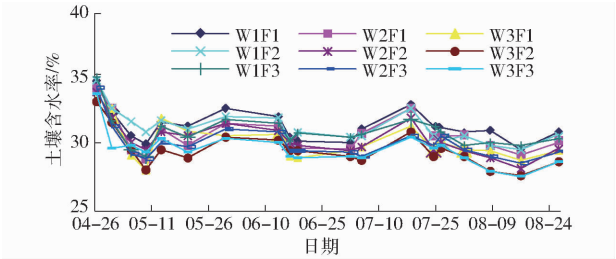


图 4 40 ~ 60 cm 土层土壤含水率

Fig. 4 Soil moisture content of 40 ~ 60 cm soil layer

如图 5 所示,在 60 ~ 80 cm 土层内,土壤含水率在开始阶段维持在一个较高的水平,从 5 月底开始有明显下降趋势,由 35% 左右下降至 8 月底的 25% 左右。可以看出,在有灌溉或者降水时,含水率没有相应地出现升高的现象,说明这些因素不是造成土壤含水率变化的原因。深层土壤含水率的变化或与其他因素有关。不同灌水量与施肥量对 60 ~ 80 cm 土层含水率几乎没有影响,不同处理之间的差异很小且不存在明显的规律。

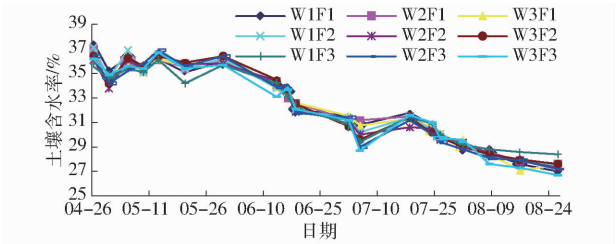


图 5 60 ~ 80 cm 土层土壤含水率

Fig. 5 Soil moisture content of 60 ~ 80 cm soil layer

2.2 不同水肥耦合条件对櫻桃产量及品质的影响

2.2.1 产量

如表 2 所示,传统的地面灌溉方式下产量最小,为 2.46 kg/棵,而高水高肥处理下的产量最高,为 2.92 kg/棵。整体来看,灌水量和施肥量对产量都有比较明显的影响;具体由大到小表现为:高肥、中肥、低肥处理,分别较 CK 提高了 8.6%、6.0%、5.2%;从灌水量处理来看,由大到小表现为高水、中水、低水处理,分别较 CK 提高了 10.1%、6.4%、3.0%。在本次试验中,较高的水肥量能促进产量。在方差分析中,灌水量 $P = 0.033 < 0.05$,施肥量 $P = 0.049 < 0.05$,故灌水量和施肥量对产量均有显

著影响,两因素交互也存在显著影响。

表 2 不同处理对櫻桃产量的影响及方差分析

Tab. 2 Effects and variance analysis of different treatments on cherry yield

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
产量/(kg·棵 ⁻¹)	2.92 ^b	2.75 ^b	2.68 ^b	2.80 ^c	2.75 ^a
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
产量/(kg·棵 ⁻¹)	2.59 ^a	2.78 ^b	2.66 ^b	2.64 ^c	2.46 ^b
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
灌水量	0.731	2	0.125	0.295	0.033
施肥量	1.214	2	0.167	0.475	0.049
水肥交互	0.815	4	0.258	1.154	0.042

注:不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.2.2 果径及果实硬度

(1) 果径

如表 3 所示,各处理中低水高肥处理(W3F1)果径最大,为 22.73 mm,较对照处理提高了 5.32%。整体来看,高肥量处理的果径大于中肥量处理,中肥量处理大于低肥量处理。在高肥量处理中,果径随灌水量减少而增加。就灌水量处理来看,3 个水平的果径并无差异。在双因素方差分析中,施肥量 $P = 0.046 < 0.05$,拒绝原假设,故施肥量对果径有显著影响。灌水量 $P = 0.097 > 0.05$,接受原假设,灌水量对果径无显著影响。而两因素交互对果径有影响。

表 3 不同处理对櫻桃果径的影响及方差分析

Tab. 3 Effects and variance analysis of different treatments on cherry diameter

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
果径/mm	22.13 ^b	22.58 ^a	22.73 ^a	22.21 ^b	21.98 ^c
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
果径/mm	21.73 ^c	21.72 ^c	21.65 ^c	21.61 ^c	21.58 ^c
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
灌水量	0.005	2	0.002	0.031	0.097
施肥量	1.024	2	0.512	6.840	0.046
水肥交互	0.311	4	0.078	3.549	0.031

(2) 硬度

如表 4 所示,各处理中果实硬度差异并不明显,其中中水高肥处理(W2F1)最大,为 0.63 kg/cm²,低水低肥处理(W3F3)最小,为 0.47 kg/cm²。滴灌施肥处理较 CK 硬度提高 16%。试验结果表明中等水量处理较其他水量处理的果实硬度大。如表 4 所示,在方差分析中,灌水量 $P = 0.045 < 0.05$,故对硬度有显著影响,施肥量及两因素交互无显著影响。而不同的施肥量处理对果实硬度无规律性影响。

2.2.3 可滴定酸及可溶性固形物含量

(1) 可滴定酸含量

如表 5 所示,高水低肥处理(W1F3)下的可滴

表 4 不同处理对樱桃硬度的影响及方差分析
Tab.4 Effects and variance analysis of different treatments on cherry firmness

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
硬度/(kg·cm ⁻²)	0.60 ^a	0.63 ^a	0.59 ^a	0.56 ^a	0.61 ^b
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
硬度/(kg·cm ⁻²)	0.52 ^a	0.57 ^a	0.58 ^b	0.47 ^b	0.49 ^b
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
灌水量	0.100	2	0.005	7.462	0.045
施肥量	0.060	2	0.003	4.724	0.088
水肥交互	0.003	4	0.001	3.549	0.096

定酸含量最大,低水中肥处理(W3F2)可滴定酸含量最低。在高肥和中肥处理下,可滴定酸含量能维持在一个较低水平,而在低肥处理下,酸度会明显上升。而在不同水量处理下,表现为高水量处理显著提升可滴定酸含量,而中水和低水处理酸度较低,但在这2种水量处理中可滴定酸含量并无规律性变化。两因素方差分析同样表明:灌水量 $P=0.012<0.05$,故拒绝原假设,灌水量对可滴定酸含量有显著影响;施肥量 $P=0.016<0.05$,同理也对可滴定酸含量有显著影响;而两者交互下 $P=0.063>0.05$,对其无显著影响。

表 5 不同处理对樱桃可滴定酸含量的影响及方差分析
Tab.5 Effects and variance analysis of different treatments on cherry titration acid content

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
可滴定酸含量/%	0.65 ^a	0.46 ^c	0.58 ^b	0.61 ^a	0.49 ^b
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
可滴定酸含量/%	0.40 ^c	0.66 ^a	0.60 ^b	0.61 ^a	0.65 ^a
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
灌水量	0.280	2	0.014	3.810	0.012
施肥量	0.220	2	0.011	2.997	0.016
水肥交互	0.150	4	0.004	0.985	0.063

(2)可溶性固形物含量

如表6所示,低水低肥处理(W3F3)下可溶性固形物含量最大,而高水中肥(W1F2)处理为最小。另外在低水量处理下,可溶性固形物含量较中等水量和低水量处理有显著提高。另外,值得注意的是,当施肥量减少至60%时,可溶性固形物含量有大幅度提升,较当地水平有16%~26%的提高。方差分析中,灌水量 $P=0.046<0.05$,拒绝原假设,即灌水量对可溶性固形物含量有显著影响。而施肥量以及两因素交互作用对可溶性固形物含量无显著影响。

2.2.4 粗蛋白及维生素C含量

(1)粗蛋白含量

如表7所示,低水中肥(W3F2)处理下粗蛋白含量最高,CK处理最低。整体来看,高肥和中肥处

表 6 不同处理对樱桃可溶性固形物含量的影响及方差分析
Tab.6 Effects and variance analysis of different treatments on cherry soluble solids content

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
可溶性固形物含量/%	16.60 ^b	16.43 ^b	20.56 ^a	14.77 ^b	20.53 ^a
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
可溶性固形物含量/%	20.73 ^a	20.56 ^a	21.08 ^a	21.73 ^a	17.56 ^b
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
灌水量	20.607	2	10.303	2.952	0.046
施肥量	17.275	2	8.638	2.475	0.078
水肥交互	13.962	4	3.491	1.354	0.125

理下的粗蛋白含量比低肥处理下的含量普遍偏高,其中中等施肥量下粗蛋白含量最高。灌水量对粗蛋白含量无明显影响,值得注意的是,高水量处理下粗蛋白含量较其他灌水量处理显著降低。方差分析表明:施肥量 $P=0.038<0.05$,故拒绝原假设,证明施肥量对粗蛋白含量有显著影响。而灌水量及水水量与施肥量的交互效应对粗蛋白含量无显著影响。

表 7 不同处理对樱桃粗蛋白含量的影响及方差分析
Tab.7 Effects and variance analysis of different treatments on cherry crude protein content

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
粗蛋白含量/%	2.34 ^b	2.33 ^b	2.39 ^b	2.40 ^b	2.56 ^a
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
粗蛋白含量/%	2.60 ^a	2.25 ^c	2.39 ^b	2.27 ^c	2.23 ^c
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
灌水量	0.018	2	0.009	1.889	0.263
施肥量	0.770	2	0.038	8.214	0.038
水肥交互	0.019	4	0.005	2.315	0.329

(2)维生素C含量

如表8所示,维生素C含量随施肥量的增加而减少。维生素C含量也同样随灌水量的增加而减少。由方差分析可得,灌水量 $P=0.007<0.05$;施肥量 $P=0.001<0.05$;水肥交互 $P=0.046<0.05$,都拒绝原假设,灌水量、施肥量、水肥交互都对维生素C含量有显著影响。

2.2.5 可溶性总糖含量

如表9所示,中等水量处理可溶性总糖含量较低水和高水处理有较大幅度提升,其次高水量处理比低水量处理可溶性总糖含量稍高。整体来看,滴灌施肥条件下各处理比CK可溶性总糖含量提高10.68%。而高、中、低肥量处理下可溶性总糖含量变化不明显。方差分析显示:灌水量 $P=0.049<0.05$,接受原假设,故灌水量对可溶性总糖含量有影

表 8 不同处理对樱桃维生素 C 的影响及方差分析

Tab.8 Effects and variance analysis of different treatments on cherry vitamin C content

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
维生素 C 含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)	18.64 ^c	19.91 ^c	22.12 ^b	20.54 ^c	24.65 ^b
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
维生素 C 含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)	25.60 ^b	25.28 ^b	28.44 ^a	31.44 ^a	19.91 ^c
	平方和	自由度	均方	F	P
灌水量	36.288	2	18.144	21.824	0.007
施肥量	100.954	2	50.477	60.713	0.001
水肥交互	3.326	4	0.831	1.956	0.046

表 9 不同处理对樱桃可溶性总糖含量的影响及方差分析

Tab.9 Effects and variance analysis of different treatments on total soluble sugar content

处理	W1F1	W2F1	W3F1	W1F2	W2F2
可溶性总糖含量/%	19.20 ^b	19.80 ^b	17.40 ^c	18.10 ^b	21.70 ^b
处理	W3F2	W1F3	W2F3	W3F3	CK
可溶性总糖含量/%	15.50 ^c	18.90 ^c	23.80 ^a	19.90 ^b	17.50 ^c
	平方和	自由度	均方	F	P
灌水量	27.847	2	13.923	6.904	0.049
施肥量	10.327	2	5.163	2.560	0.182
水肥交互	8.067	4	2.017	1.750	0.258

响,而施肥量及水肥交互效应则对其无显著影响。

以上研究结果表明,在高肥量情况下,灌水越多,果径越小,其可能的原因是在肥量充足的情况下,较为充分的水量会将土壤养分淋溶至土壤更深层,而樱桃树吸收根较浅,相对来说吸收养分较少,导致果径减小。而在中肥量和低肥量处理中,呈现出果径随水量减少而减小的趋势,此时水分的影响对果径有主导作用,在结果前的关键生育期,北京通州区降水量极少,所以花期和膨果期灌水 2 次,较多水分能刺激果实膨大。LI 等^[5]研究表明充分供水能提高单果质量及果径;冯梦喜^[6]研究表明在樱桃需水关键期进行充分灌水对果实增产膨大有很好的促进作用。

当灌水施肥量较多时,会显著提高果实的酸度,在此基础上减少灌水量能显著降低可滴定酸的含量。同时,较低水平施肥量下,可滴定酸含量也较高,在高肥量和中等水平施肥量的情形下,最有利于降低果实酸度。其可能原因是,施肥较多改善了土壤的物理及化学性质,促进了微生物活动,为植株提供了良好的养分吸收环境,从而抑制了合成有机酸酶的活性,导致有机酸含量下降。滴灌施肥较传统地面灌溉也能显著提高可溶性固形物含量。其可能原因是过多的水分对可溶性固形物具有稀释作用,且灌水量适当亏缺能够增强可溶性酸性转化酶和细

胞壁转化酶的活性,从而提高可溶性固形物的含量^[7-9]。LI 等^[5]研究表明果实成熟期局部控水可提高果实中可溶性固形物含量。而不同施肥量处理组间没有规律,差异并不明显。周罕觅等^[10]研究表明,在水肥一体化条件下,施肥量对苹果可滴定酸含量和糖酸比影响不显著。冯梦喜^[6]研究表明不同肥量处理下的樱桃果园可溶性固形物含量之间无显著差异。

滴灌施肥整体有助于樱桃果实内粗蛋白的积累,其中中等水平肥量最有利于提高粗蛋白含量。郁万文等^[11]研究表明合理使用含 N、P、K 的肥料能显著提高白果内粗蛋白的含量。OIKEH 等^[12]对 5 个品种玉米和 4 种施氮量进行的研究发现,施氮促进了玉米籽粒产量、籽粒质量和籽粒粗蛋白含量的增加。本试验中,在花期施用了含 N 量较高的水溶肥,故有利于粗蛋白的形成,其可能原因是 N 素是合成蛋白质的基本元素,适量 N 肥促进粗蛋白在果实内积累,但过多肥量或对粗蛋白的合成有抑制作用。整体来看,滴灌施肥能显著增加樱桃果实中维生素 C 含量,具体规律表现为水量和肥量的局部亏缺反而能增加维生素 C 含量,而再增加灌水施肥量则会降低维生素 C 含量。ZENG 等^[13]研究发现,在甜瓜中维生素 C 含量最高的处理是水分亏缺程度最高的处理,CUI 等^[14]研究发现,在果实成熟期进行水分亏缺处理可以显著增加梨枣中的维生素 C 含量。同时,张新明等^[15]研究表明在较低水平的水肥下,部分处理增加水、氮肥、钾肥的用量反而会降低维生素 C 的含量,这也与本研究所得出的结论相似。

高肥量处理较低肥量和中等肥量处理可溶性总糖含量有较明显的提高,而后两者对可溶性总糖含量的影响不大。整体来看,滴灌施肥能提高樱桃果实内可溶性总糖的含量,其规律表现为较合适的水量能促进可溶性总糖的合成,而较高或较低的灌溉水量或不利于其形成。其可能的原因是适当水分有利于植株叶片进行光合作用,从而促进糖分的合成。而在施肥量上,高肥量效果最好,低肥和中肥处理无显著差异。浦俊^[16]研究表明增加灌水量能提高红枣总糖含量,张福兴等^[17]研究表明灌水量超过一定限度反而会造成总糖含量降低。而杨俊华^[18]研究表明在黄瓜结果初期和中期,相同灌水水平下,各施肥处理之间果实可溶性糖含量差异不显著;结果末期高肥处理有利于可溶性糖含量的积累。与本研究结果较为相似。

2.3 不同水肥耦合条件对土壤化学性质的影响

樱桃树根系为浅根系,主要吸水吸肥的土壤深

度为 0 ~ 40 cm,本试验在樱桃树结果期追肥为速效肥,具有肥效高、作用快等特点。表 10 为不同水肥处理后 0 ~ 40 cm 深度土壤各养分指标值。其中全磷和全钾含量在短期耕作中的变化较小未列出。

表 10 不同处理对土壤养分的影响
Tab. 10 Effects of different treatments on soil nutrient

处理	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)		有机质含量/ (g·kg ⁻¹)		有效铵态氮含量/ (mg·kg ⁻¹)		有效硝态氮含量/ (mg·kg ⁻¹)		有效磷含量/ (mg·kg ⁻¹)		速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹)	
	初始		初始		初始		初始		初始		初始	
	初始	期末	初始	期末	初始	期末	初始	期末	初始	期末	初始	期末
W1F1	0.472	0.876	4.5	9.46	7.58	22.20	20.4	47.9	21.9	52.8	102	149
W2F1	0.472	1.110	4.5	14.00	7.58	25.70	20.4	45.7	21.9	122.0	102	199
W3F1	0.472	0.914	4.5	9.63	7.58	24.00	20.4	59.0	21.9	61.9	102	159
W1F2	0.472	0.918	4.5	8.05	7.58	35.40	20.4	76.8	21.9	44.1	102	146
W2F2	0.472	0.928	4.5	11.70	7.58	29.30	20.4	49.8	21.9	57.8	102	148
W3F2	0.472	0.977	4.5	11.00	7.58	25.80	20.4	68.1	21.9	58.3	102	128
W1F3	0.472	1.100	4.5	14.40	7.58	23.70	20.4	56.9	21.9	132.0	102	188
W2F3	0.472	1.240	4.5	18.70	7.58	23.70	20.4	55.3	21.9	193.0	102	176
W3F3	0.472	1.050	4.5	12.70	7.58	23.30	20.4	37.8	21.9	62.7	102	152
CK	0.472	0.457	4.5	4.12	7.58	6.58	20.4	18.4	21.9	19.3	102	85

从变化情况可以看出,全氮含量在 CK 处理较初始值降低了 13%,在不同施肥量处理下,由大到小为高肥、低肥、中肥,3 种处理平均值分别为 1.13、0.97、0.94 g/kg; 分别比 CK 高出 147%、112%、107%; 比初始值分别增加 139%、105%、99%; 同样肥量不同水分处理下,表现为 85% 的滴灌水量全氮含量最高,过多、过少的水量均不利于全氮在 0 ~ 40 cm 土层的积累。在有机质含量上,体现为高肥大于中肥和低肥处理,3 种处理的平均值为 15.3、11.0、10.3 g/kg; 比土壤初始值增加了 239%、145%、127%; 比 CK 增加了 272%、169%、150%; 在水分处理上,同样表现为 85% 的水量灌溉条件下土壤 0 ~ 40 cm 土层的有机质含量最高。CK 处理的有效铵态氮含量较土壤初始值降低了 15%,在不同肥量处理下由大到小体现为中肥、高肥、低肥,相对于初始值分别增加 216%、298%、210%; 比 CK 处理分别高出 264%、358%、258%; 有效硝态氮含量同样由大到小体现为中肥、高肥、低肥,分别为 50.0、64.9、50.9 mg/kg; 相对于初始值分别增加 145%、218%、149%; 比 CK 提高 164%、243%、169%。有效磷 CK 处理比土壤初始值降低 13%,在不同施肥量处理下,其值由大到小表现为高肥、中肥、低肥,分别为 129.2、78.9、53.4 mg/kg; 整体来看,85% 水量最有利于有效磷的积累,过多的灌水量容易将其淋洗到土壤深层,造成磷素的损失,而过少的水量又不利于其入渗; 不同肥量处理分别比土壤初始值提高 490%、260%、143%; 比 CK 处理高出 569%、308%、177%。速效钾含量,CK 处理比初始值降低了 20%,不同施肥量处理下由大到小表现为高肥、低肥、中肥,其值分别为 172、140、169 mg/kg; 与有效磷

含量的规律相似,中等水量滴灌条件下,土壤中速效钾含量最高。

2.4 樱桃果实微量元素与土壤养分的相互关系及敏感性分析

2.4.1 果实微量元素与土壤养分的相互关系

钙在果实的矿质营养中具有重要的地位,许多果树的生理病害与钙素营养失调有密切关系,果实钙含量不仅影响果实硬度,还影响果实的耐贮性^[19]。果树由于铁元素的供应不足导致叶片失绿黄化,而阻碍果树的生长,致使果实产量和品质下降,严重影响果农的经济收入^[20]。锌元素在植物体内主要是酶的金属活化剂,它能催化果树对二氧化碳的水合作用,促进其光合作用中二氧化碳的固定^[21]。

2015 年 6 月底果实采收后,对各处理果实内微量元素进行测试,测试内容包括全钙、全铁、全锌、全氯含量,不同处理的测试值如表 11 所示。就全钙含量而言,不同肥料处理间,中等肥料处理全钙含量最高,为 164 mg/kg,其次为低肥量处理,为 148 mg/kg,高肥量和 CK 处理含量最低,分别为 115 mg/kg、的 127 mg/kg。而不同水量处理对果实全钙含量并无明显影响。对于全氯含量来说,高水中肥处理下含量最大,为 85.7 mg/kg,CK 处理最小,为 8.1 mg/kg,整体而言,中肥处理对全氯含量有显著提高,其平均值为 51.4 mg/kg,较 CK 处理提高 5 倍左右。而灌水量对全氯含量无规律性影响。

将果实所测试 4 种微量元素与果实发育期间土壤 6 项主要养分指标进行相关性分析,结果见表 12。结果表明,在果实发育期间,全钙含量与土壤有效硝态氮、速效钾含量显著相关;全铁含量与土壤

表 11 不同处理对果实微量元素的影

Tab. 11 Effects of different treatments on microelement

处理	全钙含量/ (mg·kg ⁻¹)	全铁含量/ (mg·kg ⁻¹)	全锌含量/ (mg·kg ⁻¹)	全氯含量/ (mg·kg ⁻¹)
W1F1	131	2.4	1.36	10.4
W2F1	104	5.2	1.35	11.1
W3F1	111	10.8	1.77	60.5
W1F2	177	3.9	1.99	85.7
W2F2	130	7.1	0.91	34.9
W3F2	186	6.1	1.78	33.6
W1F3	129	1.4	0.25	33.9
W2F3	150	15.0	2.02	48.0
W3F3	167	3.3	1.55	11.6
CK	127	5.7	1.12	8.1

有机质、有效磷含量显著相关;全锌含量与土壤有效硝态氮含量显著相关;全氯含量与土壤有效硝态氮、有效铵态氮含量显著相关。

表 12 果实微量元素与土壤养分各指标的相关系数

Tab. 12 Correlation coefficient between microelement and soil nutrients

	全钙含量	全铁含量	全锌含量	全氯含量
全氮含量	0.123	0.430	0.484	0.211
有机质含量	-0.006	0.657 **	0.328	0.021
铵态氮含量	0.345	-0.045	0.394	0.648 **
硝态氮含量	0.760 **	-0.128	0.678 **	0.801 **
有效磷含量	-0.155	0.722 **	0.383	0.068
速效钾含量	-0.660 **	0.255	0.224	0.079

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关。

如图 6 所示,将存在显著相关的微量元素与土壤养分的 2 项指标提取出来,建立土壤养分指标与果实内微量元素的线性回归方程。果实内全钙含量与其发育期间土壤内硝态氮含量呈正相关关系,决定系数达到 0.724 0,而与速效钾呈负相关关系,决定系数为 0.435 9;说明硝态氮或有利于果实内全钙

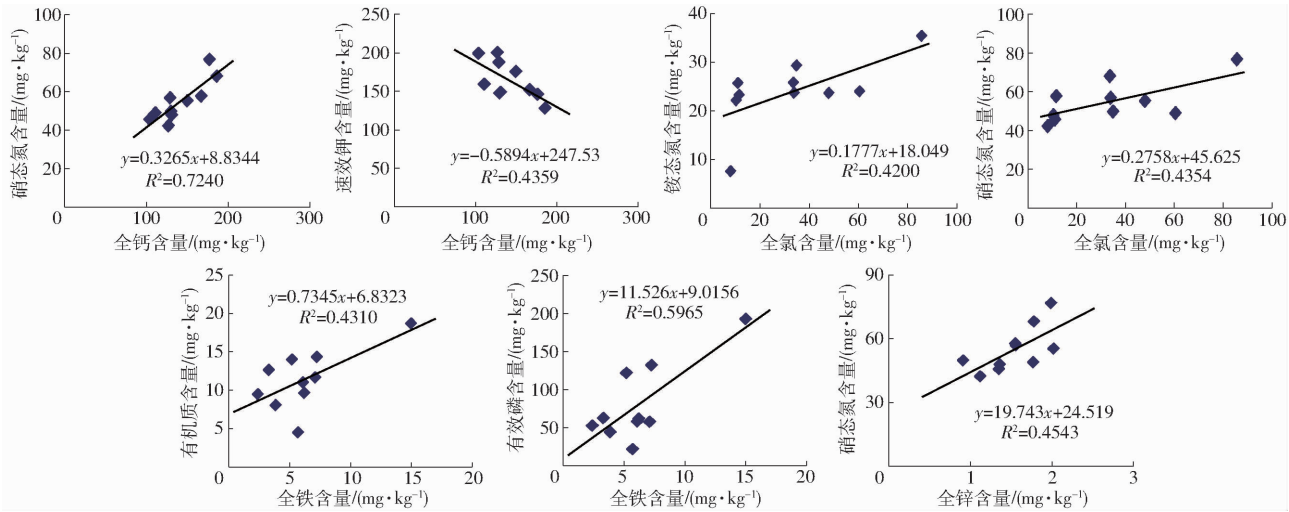


图 6 果实微量元素与土壤各养分指标相关关系

Fig. 6 Correlations between microelement and soil nutrients

含量的积累,而速效钾则相反。全氯含量与铵态氮、硝态氮含量都呈显著正相关,决定系数分别为 0.420 0和 0.435 4,说明这 2 项指标可能有益于全氯含量的增加。就全铁含量来看,它与土壤有机质、有效磷含量密切相关,决定系数分别为 0.431 0、0.596 5,随着这 2 项指标的增加,果实内全氯含量增加。全锌含量与硝态氮含量密切相关,决定系数为 0.454 3。

2.4.2 果实品质参数对土壤养分的敏感性分析

科学施肥是提高产量和品质的重要因素之一^[22]。通过测定果实发育期间各处理土壤养分指标和采收后各处理果实品质指标,利用非参数统计方法,分析土壤各养分指标对各项果实品质的贡献。

(1)敏感性分析概述

常用的敏感性分析方法大多是针对单因素进行研究的,但本文存在多指标,对果品的影响也是多方面的,因而简单的指标敏感性分析并不能满足本研究的要求。其次,由于数据的强非线性,对所得数据结果的分布不得而知。在这种情况下采用非参数统计的方法进行随机变量之间的相关性分析是一个比较接近实际的方法^[23]。为此采用一种多因素分析方法,将所有变化一起进行分析。虽然尚未明确数据整体分布的形式,但可以将其按大小排序,使得每一个数据都有自己的位置,称为“秩”。在非参数统计中用 Spearman 秩相关系数来度量 2 个随机变量之间的相关性。它利用 2 个变量的秩次作线性相关分析,对原始变量的分布不作要求,属于非参数统计的方法,适用范围广^[24]。

Spearman 秩相关系数假设 2 个随机变量 X 和 Y 。两者的样本值分别为 $X_1, X_2, \dots, X_n, Y_1, Y_2, \dots, Y_n$,以 T_i 和 Q_i 分别表示 X_i 和 Y_i 在 $(X_1, X_2, \dots, X_n), (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ 中的秩,则定义统计量 r_s 为 Spearman 秩相关系数,计算式为

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n T_i Q_i - \frac{1}{4}n(n+1)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2 - \frac{1}{4}n(n+1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^2 - \frac{1}{4}n(n+1)^2}}$$

(2) 计算结果及分析

果实发育膨大期间所测各处理下土壤养分指标分别是全氮含量、有机质含量、铵态氮含量、硝态氮含量、有效磷含量、速效钾含量 6 项指标;9 种不同

水肥处理以及 CK 共 10 种参数组合。不同处理下果实品质指标分别是维生素 C 含量、粗蛋白含量、果实硬度、可滴定酸含量、可溶性固形物含量和可溶性总糖含量 6 项指标。

利用 Spearman 秩相关系数计算方法,可以得到有关果品的秩相关系数,由此可以分析果实品质对土壤养分各指标的敏感性程度。计算结果如表 13 所示。

表 13 果实品质的秩相关系数
Tab. 13 Rank correlation coefficient of fruit quality

	维生素 C 含量	粗蛋白含量	果 径	果实硬度	可滴定酸含量	可溶性固形物含量	可溶性总糖含量
全氮含量	-0.552	-0.067	0.103	-0.152	0.321	-0.382	0.104
有机质含量	0.018	0.018	0.139	-0.248	0.224	-0.491	-0.612
铵态氮含量	-0.612	-0.612	-0.576	-0.297	0.564	0.261	-0.539
硝态氮含量	-0.552	-0.552	-0.467	-0.030	0.212	0.018	-0.406
有效磷含量	0.091	0.091	0.042	-0.200	0.200	-0.539	-0.442
速效钾含量	0.309	0.309	-0.285	0.503	0.055	-0.127	-0.455

由计算结果可以看出,樱桃中维生素 C 含量与土壤中的氮素含量较其他养分指标相关性更强,即土壤中氮含量是维生素 C 含量的决定性因素,由大到小表现为:铵态氮、硝态氮、全氮、速效钾含量,且与铵态氮、硝态氮含量呈负相关关系,与速效钾含量呈正相关关系;对于粗蛋白含量,同样由大到小表现为:铵态氮、硝态氮、速效钾含量,值得注意的是,土壤中全氮含量或与粗蛋白含量无直接关系,其中与铵态氮、硝态氮含量呈负相关关系,与速效钾含量呈正相关关系;对于果径,由大到小表现为:铵态氮、硝态氮、速效钾含量,均呈负相关关系;对于果实硬度,土壤中速效钾含量成为关键因素,表现为速效钾含量越高,果实硬度越大;对于可滴定酸含量,土壤中铵态氮含量相关系数最大,表现为铵态氮含量越高,可滴定酸含量越高;对于可溶性固形物含量,则与有效磷、有机质含量较为相关,由大到小表现为:速效磷、有机质含量;对于可溶性总糖含量,除了与全氮无直接联系外,其他指标均有较大的相关性,由大到小表现为:有机质、铵态氮、速效钾、有效磷、硝态氮含量。

土壤中氮素的含量并未随施肥量减少而由高到低排列,其原因可能是土壤中的铵态氮容易挥发,且容易被植物吸收,还能发生硝化反应转化为硝态氮,作用因素复杂,易损失,所以不一定施肥量越多,土壤中氮素越多。

樱桃果实内钙的含量与土壤养分有较大关系,张彤彤^[25]研究表明,氮肥和钾肥的配施尤其为高氮高钾条件下,可促进梨枣树体对土壤中钙含量的吸收和利用,并具有一定协同作用。而本研究表明土

壤中以硝态氮形式存在的氮素更能促进植株对钙的利用。土壤中较高的速效钾含量会被迅速吸收至植株,钾主要以离子状态存在,具有很强的移动性,在果实发育时会大量由叶片运送至果实,而这一过程可能会抑制果实对钙的吸收。宋刚等^[26]研究表明土壤有机质含量与有效铁含量呈正相关关系,本文认为土壤中有机质含量能影响有效铁的含量,从而促进植株对铁离子的吸收。同时,柴仲平等^[27]在对梨树施用氮、磷、钾复合肥时,得出较合适的配比才能获得果实中 Fe 元素的最大含量。本试验中,在花期和膨果期均使用含氮、磷较高比例的复合水溶肥,此时,磷素相对来说较为缺乏,或成为影响 Fe 吸收的关键因素。同时,柴仲平等^[27]还指出土壤中增施氮肥可以改善苹果果实中矿质 Zn 的含量。值得注意的是,全氮和铵态氮均与果实内全锌的含量无关,而硝态氮与其含量呈较为显著的正相关关系,这或许表明土壤有效硝态氮中的氮素是促进植株吸收、利用 Zn 的关键所在。果实内全氮含量与土壤氮素也密切相关,彭致功等^[28]研究表明不同铵硝比的相同氮质量浓度情况下,叶片氮含量有随铵硝比增大而提高的趋势,表明铵态氮有利于叶片氮的积累,本文发现果实的氮含量也与土壤氮素有关联。而本研究表明铵态氮、硝态氮在一定程度上都对果实氮的积累起到积极作用。

土壤中的氮素对果实品质的影响尤为突出,在果实生长的过程中,氮作为养分的一种会直接影响植株的发育,同时它也能间接影响光合作用或植物的激素水平。氮素作为合成蛋白质的元素之一,与果实内的粗蛋白具有一定的相关关系,而速效钾能

促进果实内微量元素钙的积累,从而能提高果实硬度,这也解释了速效钾与果实硬度的相关关系较大的原因。同时,氮素能提高 PEPC 的活性,提高了果实内可滴定酸的含量;本试验中过量氮素与可溶性总糖呈负相关关系,可能是增施氮肥光合产物的分配量较对照减少,ABA/IAA 降低,蔗糖代谢相关酶(特别是分解酶类)的活性增加,最终导致果实中糖含量降低。

3 结论

- (1)田间不同处理下土壤含水率在整个生育期内整体呈下降趋势,且在 0 ~ 40 cm 土层,在灌水期,灌水量较多的处理含水率较高,而在非灌水期,主要外来水源是降水,各处理间含水率差异无明显规律。
- (2)不同水肥处理对櫻桃果实产量和品质都会产生不同的影响,在本试验滴灌条件下,高水高肥处理下的产量最大;对于粗蛋白而言,低水中肥处理下最高,且肥量对粗蛋白含量影响较为显著;低水中肥处理下果径最大,整体来看,在本次试验中,施肥越

多,果径越大,灌水量对果径无明显影响;在滴灌条件下,9 个试验处理硬度平均比 CK 提高了 16%,而不同处理之间并未显示出明显的规律;在灌水量较少、施肥量较多的情况下,可滴定酸的含量较低;对于可溶性固形物含量,低水低肥处理的含量最高,灌水量和施肥量均能对可溶性固形物含量产生显著影响;櫻桃果实中维生素 C 含量介于 15 ~ 35 mg/(100 g)之间,维生素 C 含量随施肥量的增加而减少,同样也随灌水量的增加而减少;可溶性总糖含量在中等灌水量下其含量最高,而施肥量对其含量无明显影响。

- (3)土壤养分中,硝态氮与铵态氮在土壤中的相互转化不稳定,与施肥量不呈绝对的线性关系;在土壤各养分指标中,有机质的含量与果实内全铁含量正相关;有效铵态氮与全氯的含量呈正相关;有效硝态氮含量与果实内全钙、全锌、全氯含量呈正相关;有效磷含量与全铁含量正相关;速效钾含量与全钙含量呈正比。同时土壤中硝态氮和铵态氮含量与果实中例如可溶性固形物、维生素 C 含量等都有密切联系。

参 考 文 献

- 1 杨林林,王成志,韩敏琦,等.我国水肥一体化技术发展前景及技术要点分析[J].北京农业,2016(1):50-51.
- 2 路永莉,高义民,同延安,等.滴灌施肥对渭北旱塬红富士苹果产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2013(1):48-52.
LU Yongli,GAO Yimin,TONG Yan'an, et al. Effects of fertigation on yield and quality of Fuji apple in Weibei dry-land region[J]. Chinese Soil and Fertilizer,2013(1):48-52. (in Chinese)
- 3 高义民,同延安,路永莉,等.长期施用氮磷钾肥对黄土高原地区苹果产量及土壤养分累积与分布的影响[J].果树学报,2012,29(3):322-327.
GAO Yimin,TONG Yan'an, LU Yongli,et al. Effect of long-term application of nitrogen, phosphorus and potassium on apple yield and soil nutrient accumulation and distribution in orchard soil of Loess Plateau[J]. Journal of Fruit Science,2012,29(3):322-327. (in Chinese)
- 4 周罕觅,张富仓,ROGER Kjelgren,等.苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(4):77-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150413&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.013.
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER Kjelgren, et al. Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):77-87. (in Chinese)
- 5 LI Xian Yue, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Modeling cherry orchard evapotranspiration based on an improved dual-source model[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98: 12-18.
- 6 冯梦喜.下坝乡櫻桃果园土壤肥力与肥、水调控试验研究[D].贵阳:贵州大学,2009.
- 7 陈秀香,马富裕,方志刚,等.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(4):1-4.
CHEN Xiuxiang, MA Fuyu, FANG Zhigang, et al. Preliminary study on the influence of soil moisture on yield and quality of processed tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2006(4):1-4. (in Chinese)
- 8 王连君,王程翰,乔建磊,等.膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J/OL].农业机械学报,2016,47(6):113-119,92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160615&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.015.
WANG Lianjun,WANG Chenghan,QIAO Jianlei, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth, yield and quality of grape under drip irrigation with film mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(6):113-119,92. (in Chinese)
- 9 BASELGA Yrisarry J J, PRIETO Losada M H, RODRIGUEZ del Rincón A. Response of processing tomato to three different levels of water nitrogen applications[J]. Acta Horticulturae, 1993,335: 149-156.
- 10 周罕觅,张富仓,ROGER Kjelgren,等.水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J/OL].农业机械学报,2015,

- 46(12):173–183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151224&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.024.
- ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGERKjelgren, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of young apple tree[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):173–183. (in Chinese)
- 11 郁万文, 曹福亮, 谢友超. 氮磷钾配施对白果产量和品质的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(3):9–15.
- YU Wanwen, CAO Fuliang, XIE Youchao. Effects of N, P, K combinations fertilization on yield and quality of Ginkgo nuts[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(3):9–15. (in Chinese)
- 12 OIKEH S O, KLING J G, OKORUWA A E, et al. Nitrogen ferrillzer management effects on maizegrain quality in the West African moist savanna[J]. Crop Science, 1998, 38(4):1056–1061.
- 13 ZENG Chunzhi, BIE Zhilong, YUAN Baozhong. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(4):595–602.
- 14 CUI Ningbo, DU Taisheng, KANG Shaozhong, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit and water use efficiency of pear-jujube trees[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4):489–497.
- 15 张新明, 李华兴, 吴文良. 氮素肥料对环境与蔬菜的污染及其合理调控途径[J]. 土壤通报, 2002, 33(6):471–475.
- ZHANG Xinming, LI Huaxing, WU Wenliang. Contamination of nitrogen-containing fertilizers to environment and vegetable and rational regulation and control measures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(6):471–475. (in Chinese)
- 16 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]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- 17 张福兴, 孙庆田, 姜学玲, 等. 论甜樱桃优质果品生产[J]. 烟台果树, 2013(4):3–5.
- 18 杨俊华. 不同水肥组合对温室沙地栽培黄瓜生长发育、产量和品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- 19 王高伍, 张文莲, 雷冬玲, 等. 苹果果实中钙含量对贮藏品质影响效果初探[J]. 山西农业科学, 2013, 59(5):68–69.
- 20 叶优良, 张福锁, 史衍玺, 等. 用花铁含量作为苹果和桃缺铁诊断指标的研究[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(1):89–94.
- YE Youliang, ZHANG Fusuo, SHI Yanxi, et al. Flower feasan index to diagnosing nutrition status of apple and peach trees[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(1):89–94. (in Chinese)
- 21 陆景陵. 植物营养学:上册[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2003:13–30.
- 22 代志国, 曲柏宏, 王颖, 等. 钾肥对苹果梨树生长和果实产量与品质的影响[J]. 北方园艺, 2002(6):60–61.
- 23 YANG I H. Uncertainty and sensitivity analysis of time-dependent effects in concrete structures[J]. Engineering Structures, 2007, 29:1366–1374.
- 24 李峥然, 商拥辉. 基于非参数统计的隧道围岩参数敏感性分析[J]. 低温建筑技术, 2014(4):139–141.
- 25 张彤彤. 施肥对山地梨枣叶片矿质元素季节动态变化的影响[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2012.
- 26 宋刚, 胡腾胜. 剑河县土壤微量元素与有机质、pH 值的关系研究[J]. 耕作与栽培, 2014(3):20–21, 26.
- SONG Gang, HU Tengsheng. Relationship between microelements and organic matter, pH of soil in Jianhe[J]. Tillage and Cultivation, 2014(3):20–21, 26. (in Chinese)
- 27 柴仲平, 王雪梅, 蒋平安, 等. 氮磷钾配方施肥对库尔勒香梨果 7 种重要元素含量的影响[J]. 西部林业科学, 2012(6):20–25.
- CHAI Zhongping, WANG Xuemei, JIANG Ping'an, et al. Effects of N, P and K fertilization on seven important elements in fruit of Korla fragrant pear[J]. Journal of West China Forestry Science, 2012(6):20–25. (in Chinese)
- 28 彭致功, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对草坪草植株体内氮磷钾及氯元素分配规律的影响[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6):58–65.
- PENG Zhigong, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of reclaimed water irrigation on the distribution of nitrogen, phosphorus, potassium and chloride in turfgrass tissue[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(6):58–65. (in Chinese)