

短枝富士苹果不同负载和灌水量对新梢生长、产量和灌水利用效率的影响

赵先飞,张馨予,于国康,梁洁,赵紫嫣,刘宇,张林森*

(西北农林科技大学园艺学院,陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】探明黄土高原地区苹果优质高效生产的负载量与灌溉量的关系。【方法】以9年生短枝富士苹果树为研究对象,试验设3种负载量:低负载T1(2果·cm²主干横截面积)、中负载T2(4果·cm²主干横截面积)和高负载T3(6果·cm²主干横截面积),及6个灌水梯度:W0(0)、W1(40% ETc)、W2(60% ETc)、W3(80% ETc)、W4(100% ETc)和W5(120% ETc)。研究负载量与灌水处理对苹果生长、叶面积指数、光合特性、品质、产量及灌水利用效率的影响。【结果】在相同负载量条件下,随着灌水量的减少,新梢生长长度和叶面积指数LAI逐渐降低,光合速率 P_n 、蒸腾速率 T 和气孔导度 G_s 的日均值均会随灌水量的增加呈现先增加后减小的趋势。在相同灌水量条件下,随着负载量的增加,新梢生长长度显著降低($p<0.05$),其他无明显变化。负载量和灌水量对苹果产量和灌溉水利用效率(简称IWUE)有极显著影响,各处理以T3W4产量最高,T1W1处理产量最低;T3W1处理的IWUE最大,T1W5处理最小。【结论】回归分析表明,产量和IWUE同时获得最优解时,灌水量和负载量组合最接近T2W4处理,因此T2W4可作为黄土高原地区苹果节水增产推荐采用的方式。

关键词:短枝富士苹果;负载量;灌水量;新梢生长;叶面积指数;光合特性;产量;水分利用效率

中图分类号:S661.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2023)09-1860-11

Effect of different fruit loads and irrigation amounts on new shoot growth, yield and irrigation water use efficiency in spur-type Fuji apples

ZHAO Xianfei, ZHANG Xinyu, YU Guokang, LIANG Jie, ZHAO Ziyang, LIU Yu, ZHANG Linsen*

(College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: 【Objective】 The Loess Plateau is located in a typical area of arid and semi-arid, seasonal drought, low rainfall and insufficient irrigation water. When the lack of water leads to low irrigation consumption, reasonable control of crop load is a better strategy for perennial fruit crops, which not only reduces the application of water but also stabilizes the yield, so it is of great significance to explore the irrigation amount and fruit load mode of high-quality and efficient apple production in the Loess Plateau. 【Methods】 In this study, 9-year-old spur-type Fuji apple trees were used as the research objects, and three fruit loading capacities were set up: low load T1 (2 fruits · cm² trunk cross-sectional area), medium load T2 (4 fruits · cm² trunk cross-sectional area) and high load T3 (6 fruits · cm² trunk cross-sectional area), and six irrigation gradients: W0 (0), W1 (40% ETc), W2 (60% ETc), W3 (80% ETc), W4 (100% ETc) and W5 (120% ETc). An orthogonal experimental design was used for a total of 18 treatments. In order to comprehensively improve the growth, photosynthesis, fruit quality, yield and irrigation water use efficiency (hereinafter referred to as IWUE) of apple trees, the response pattern of fruit load and irrigation water treatment to apple canopy, photosynthesis, appearance quality, yield and IWUE was studied. 【Results】 Different irrigation treatments had significant effects on the length of

收稿日期:2023-02-23 接受日期:2023-04-22

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27);陕西省科技统筹创新工程项目(2015KJZDNY02-03-02)

作者简介:赵先飞,男,在读硕士研究生,研究方向为苹果生理生态。Tel:13645647569,E-mail:zhaoxianfeii@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13087500773,E-mail:linsenzhang@163.com

new shoots and leaf area index (LAI) in the experiment. The reduction of irrigation water significantly reduced the length of new shoots and LAI, and the highest treatment was W5 and the lowest treatment was the control W0. The effect of fruit load on leaf area index was small, and under the same irrigation water conditions, leaf area index did not change significantly with the increase of fruit load, but it had a significant relationship with the length of new shoots, which decreased significantly with the increase of fruit load. In the full treatment, the final maximum length of T1W5 shoots was 49.1 cm, and the final maximum length of T3W0 shoots was 25.2 cm. The largest exponential growth rate of leaf area was as high as 65.9% with T1W5 treatment, and the lowest was with T3W0 treatment, which decreased by 28.1% compared with T1W5. The irrigation amount had a significant effect on the daily mean values of net photosynthetic rate P_n , transpiration rate T_r , intercellular CO_2 concentration C_i and stomatal conductance G_s in apple leaves. Under the same fruit load conditions, the daily average values of photosynthetic rate P_n , transpiration rate T_r and stomatal conductance G_s all increased first and then decreased with the increase of irrigation volume, reaching the maximum with W3 treatment, and the intercellular CO_2 concentration was generally the smallest with W4 treatment. The highest treatment of P_n was T1W3, and the lowest treatment was T1W5 treatment, which significantly reduced by 46.1%; The highest treatment of T_r was T1W3, and the lowest treatment was T3W0 treatment, which significantly reduced by 33.1%; The highest treatment of C_i was T3W1, and the lowest treatment was T1W4 treatment, which significantly reduced by 11.8%; The highest treatment for G_s was T2W3 and the lowest treatment was T1W5 treatment, with a significant reduction of 46.6%. The fruit load and irrigation amount can adjust the fruit quality, and under the same load conditions, the single fruit weight and large fruit rate showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of irrigation volume, and reached the maximum with W3 and W4 treatments, respectively. The fruit hardness increased with the decrease in the amount of irrigation water. W4 treatment can increase the single fruit weight and large fruit rate, and the quality performance with W0 treatment being the worst, and the quality performance of T3 apples was the worst. Among them, the highest weight per fruit was T1W4, which was 281.06 g, which was 39.51% higher than the lowest T3W0 which was 201.46 g. The hardest T2W1 treatment was $7.73 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, which was 73.32% higher than the lowest T1W4 treatment of $4.46 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$. The T1W4 treatment with the highest fruit rate was 83.93%, which was 54.45% higher than the lowest T3W0 treatment of 54.34%. Load and irrigation volume had a significant impact on apple yield and irrigation water use efficiency (IWUE). T3W4 had the highest yield of $87\ 379 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and T1W1 was the lowest. Compared with T1W1 treatment, the yields of remaining treatments increased by 7.3%–178.5%, and the IWUE treated by T3W1 was the largest ($31.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), which was 6.7 times more than that of the smallest T1W5 treatment ($4.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). **【Conclusion】** Regression analysis showed that when yield and IWUE obtained the optimal solution at the same time, the combination of irrigation water and fruit load was closest to T2W4 treatment. Therefore, T2W4 can be used as a recommended method to save water and increase apple production in the Loess Plateau region.

Key words: Spur-type Fuji apples; Load; Irrigation volume; New shoot growth; Leaf area index; Photosynthetic characteristics; Yield; Water use efficiency

黄土高原处于典型的干旱半干旱地区,该区域季节性干旱、降雨量少,容易导致苹果产量不稳定^[1]。土壤水分的亏缺会造成作物气孔导度、蒸腾速率和光合速率的下降,并降低根系的吸收面积和吸

收能力,从而影响作物对养分的吸收和运输;而果实负载量是影响果树库源关系中最重要因素之一,疏果能够调节“库(果实)-源(叶片)”之间的关系,改变光合产物的运输与分配,从而影响果实的产量和品

质^[2-5],并对土壤水分亏缺具有一定调节作用。目前,关于苹果树生长、光合特性与产量品质的研究主要集中在苹果树灌水量的多少,忽略了负载量和灌水量两者对果树生长、光合特性与产量品质的互作效应,从而导致树势、产量无法得到有效提高。因此,在黄土高原地区探索苹果合理负载量下灌溉量对保证树体长势和连年丰产、稳产、优质具有重要意义。

已有研究表明苹果树可以适应一定程度的缺水,适度的水分亏缺对果树影响不显著^[6];随着水分亏缺程度的加大,苹果树的光合作用效率会显著降低,苹果产量也会降低^[7]。黄媛等^[8]发现不同灌溉制度下土壤含水量发生变化会对番茄生理、产量及水分利用效率产生影响,其中以50%田间持水量为灌溉条件时可在设施番茄秋冬茬栽培中获得较高的果实品质和商品价值,有效实现节水增效目标。黄土高原地区灌溉用水不足,当缺水导致灌溉用量低时,可能需要考虑进一步的适应策略。Francaviglia等^[9]研究发现,苹果对灌水水平反应较为敏感,不同响应程度受作物负载量大小影响较大。土壤水分不足对植物水分状况的负面影响可以通过减少作物负荷来抵消。在充分灌溉(100% ET替代)条件下,最佳作物负载为8个果·cm² TCSA(主干横截面积)。研究表明调整果实负载量对于多年生水果作物来说是一个较好的策略,既可减少水的利用^[10-12],又能保证适度的果实大小。它的成功使用主要是基于作物高负荷对碳分配和树木水分关系的主要影响^[13]。同时控制果实负载量可以有效调节植物体内碳和氮的分配,提高氮的利用率和果实质量^[14]。

目前,关于黄土高原区负载量与灌水量对苹果生长、产量及灌水利用的影响研究较少,且负载量与灌水量耦合的效益评价指标比较单一,很难找出综合效益最佳的负载量和灌水量组合。笔者在本研究中以综合分析苹果树生长、光合特性、品质、产量和灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency,以下简称IWUE)为目的,研究负载量与灌水量处理对苹果冠层、光合、外观品质、产量及IWUE的影响,并运用回归方程模拟寻求苹果节水优质高产的负载量与灌水量的最优解,为黄土高原区苹果高产优质生产提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2022年4—10月在陕西省宝鸡市千阳县

西北农林科技大学宝鸡千阳苹果试验示范站(107°59'48.5" E, 34°07'22.5" N)进行,海拔约861 m,属暖温带半大陆性气候,年均气温10.9 °C,全年太阳总辐射472.16 J·cm²,年日照总时数2 122.2 h。该地区土层深厚,昼夜温差大,土壤容重为1.31 g·cm³,田间持水量为20.5%。2022年4月选取9年生矮化中间砧短枝富士(中间砧M26,基础新疆野苹果),株行距1 m×3 m(3336株·hm²)。

1.2 试验设计

试验设有6个灌溉水平,3个负载水平,共18个处理。以不同灌溉量和负载量为1个试验小区,每个小区3次重复,试验前每个小区在离树干外缘挖1 m的深坑,用彩钢板(0.3 mm厚、1.2 m宽)将各个小区的树进行隔离,然后再用打上螺丝进行固定,用来防止水分迁移。为防止雨水影响需要搭建简易避雨设施,将塑料薄膜置于树冠之下,高度大约与树干一致,上部用绳子系于树体主枝或铁丝上,下部用木棍支撑。试验采用完全随机区组设计。每个处理均随机选取长势良好、大小均一的3株苹果树,各处理3次重复。6个灌溉量处理分别为:不灌溉(W0)、40% ETc(W1)、60% ETc(W2)、80% ETc(W3)、100% ETc(W4)、120% ETc(W5)。3个负载量处理分别为:低负载量(T1)主干横截面积每平方厘米2个果、中负载量(T2)主干横截面积每平方厘米4个果、高负载量(T3)主干横截面积每平方厘米6个果。在套袋前完成疏果定果,从4月开始每隔两周进行1次灌溉一直到果实采收后结束(表1)。施肥水平与果园一致。

表1 2022年4—9月各处理的总灌水量

Table 1 Total irrigation amount of each treatment from April to September in 2022

灌水水平 Level of irrigation	灌水次数 Number of irrigation	每株树总灌水量 Total irrigation amount per tree/L
W0	0	0
W1	10	262
W2	10	393
W3	10	524
W4	10	655
W5	10	785

根据Penman-Monteith方程($ET_c = KC \times ET_0$)进行灌溉,该方程由 ET_0 (参考蒸散发量)乘以作物系数(KC)得到^[15-17]。

1.3 试验方法

1.3.1 气象资料 在果园中心位置建立小型气象站用于温度、湿度、风速等的测量,根据彭斯曼方程计算ET₀值。

1.3.2 枝条生长测量 根据试验年实际生长情况,于2022年5—9月,在每棵试验果树的上、中、下三个部位的东、南、西、北方向均选取长势一致且有代表性的新梢,共36个新梢。并用挂牌标记其末端,用卷尺每隔1月测定新梢长度,计算平均生长量和枝条生长速率。

1.3.3 果实品质、产量和水分利用效率的测定 当年收获期每株树随机选择12个果实,用硬度计(EPT-1; Lake City Technical Products)测定硬度,用手持式酸度计(PAL-BXIACID5; Atago)测定酸度(TA),用糖度计(PAL-1; Atago)测定可溶性固形物(SSC)含量、用色度仪(LS173B; Atago)对果实的颜色(L^* 、 a^* 、 b^*)进行测定。用电子天秤测质量,用游标卡尺测量纵横径,计算果形指数。

10月中旬果实成熟采收后,每株单独称质量,计算重复的平均值。根据株产计算出各处理产量,再计算出每公顷果园产量,并调查各级果实的百分数。苹果等级分为:三级果(直径<60 mm),二级果(60 mm≤直径<75 mm),一级果(75 mm≤直径<90 mm)和特级果(直径>90 mm),其为直径≥75 mm为大果。大果率等于每株树上大于75 mm的果实占比。

灌溉水利用效率(IWUE 计算: $IWUE=Y \times S / (W \times 10^4)^{[18]}$ 。式中: IWUE为苹果树灌溉水利用效率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y为苹果总产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); S为苹果的种植面积(m^2); W为累计灌水量(m^3)。

1.3.4 光合参数的测量 在8月初,于灌溉后的第3天每株树选取树冠中部向阳面5根枝条,每根枝条选1片顶部成熟叶作为试材,将LI-6800光合仪的光照度设为 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,流速设为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$,湿度设为50%,在晴朗的上午9:00—11:00开始测量,包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)。

1.3.5 叶面积指数的测量 从4月初每隔30 d用冠层分析仪LAI-2000进行测量一直到果实采完结束。LAI-2000冠层分析仪每次观测时,先将探头放置于冠层上方,保持探头上水平泡水平,按下测定按钮,听到两声蜂鸣后将探头放入群体内地面上,仍需保持水平,按下测定按钮,听到两声蜂鸣声后选择冠层下地面树干的东南西北不同位置测量,重复测量

5次,然后仪器自动测定出群体叶面积系数LAI。

1.4 数据处理与分析

用SPSS 23.0数据处理系统进行苹果树生长、光合、外观品质与产量等指标的方差分析,采用Duncan多重比较法进行显著性分析,用Matlab进行回归方程拟合,用Origin作图软件进行折线图制作。

2 结果与分析

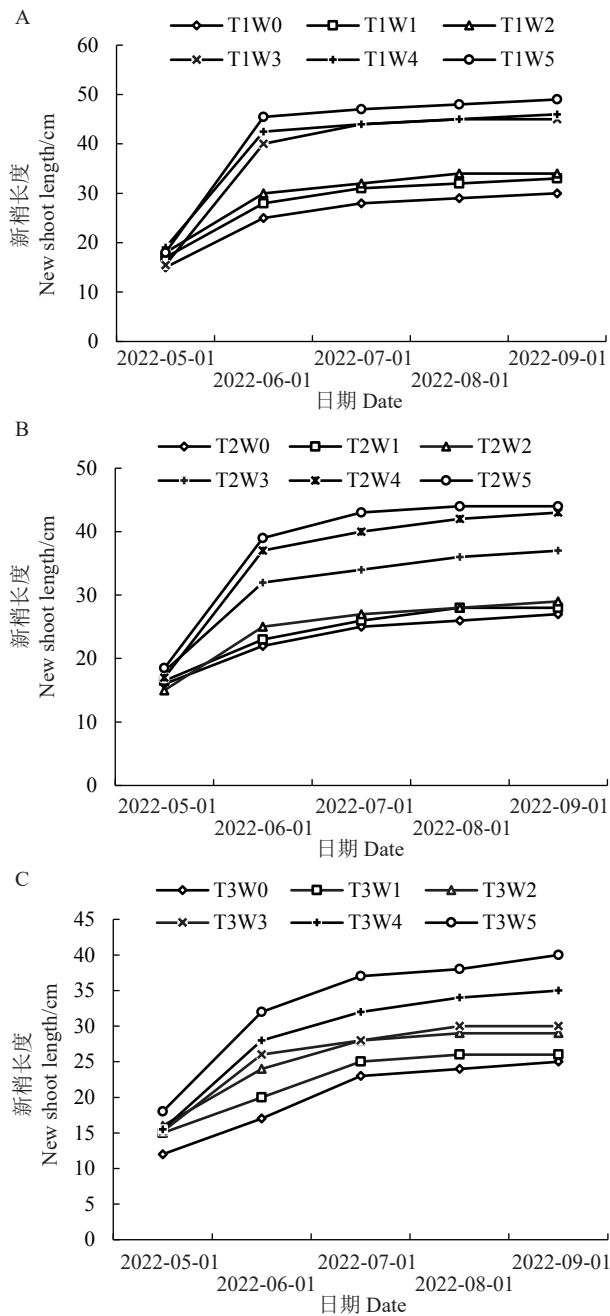
2.1 灌溉量和负载量对苹果树新梢生长的影响

图1为不同灌水量与负载量下苹果树新梢生长的变化曲线。可以看出苹果树新梢在5—6月生长速度最快。相同负载量水平下,随着灌水量的增加苹果树新梢生长速率也逐渐升高。其中,在低负载量条件下高灌水量(W5)对应的新梢生长速率最大(152.8%),不灌溉(W0)最小(66.7%),较W5降低了86.1%;在中负载量条件下灌水量(W5)对应的新梢生长速率最大(110.8%),不灌溉(W0)最小(37.5%),较W5降低了73.3%;在高负载量条件下灌水量(W5)对应的新梢生长速率最大(77.8%),不灌溉(W0)最小(41.7%),较W5降低了36.1%。6—7月份开始新梢虽有增长,但增长速率无明显变化,在7—9月苹果树的新梢基本停止生长,生长速率几乎为0。

负载量和灌水量不同对苹果树最终新梢长度的影响由图1可知,不同负载量下最终新梢长度均随着灌水量的减少而降低,其中,在低负载量条件下高灌水量(W5)对应的新梢长度最大(49.1 cm),不灌溉(W0)最小(30.5 cm),较W5降低了37.9%;在中负载量条件下灌水量(W5)对应的新梢长度最大(44.5 cm),不灌溉(W0)最小(27.2 cm),较W5降低了38.9%;在高负载量条件下灌水量(W5)对应的新梢长度最大(40.6 cm),不灌溉(W0)最小(25.2 cm),较W5降低了37.9%;试验全处理中T1W5最终新梢长度最大(49.1 cm),T3W0最终新梢长度最小(25.2 cm)。

2.2 灌溉量和负载量对苹果树叶面积指数的影响

不同负载量和灌水量处理下苹果树叶面积指数随时间变化曲线如图2所示,苹果树叶面积变化趋势基本相似,均随生长时间的增加呈现先快速增大,后逐渐减小至稳定的趋势。在不同物候期阶段内,各处理间均表现出较显著的差异性($p < 0.05$),在开花坐果期内试验区温度较低,平均温度<15 °C,导致果树叶面积指数增加缓慢,各处理叶面积指数差异不明显;随着苹果树进入果实膨大期,试验区平均温

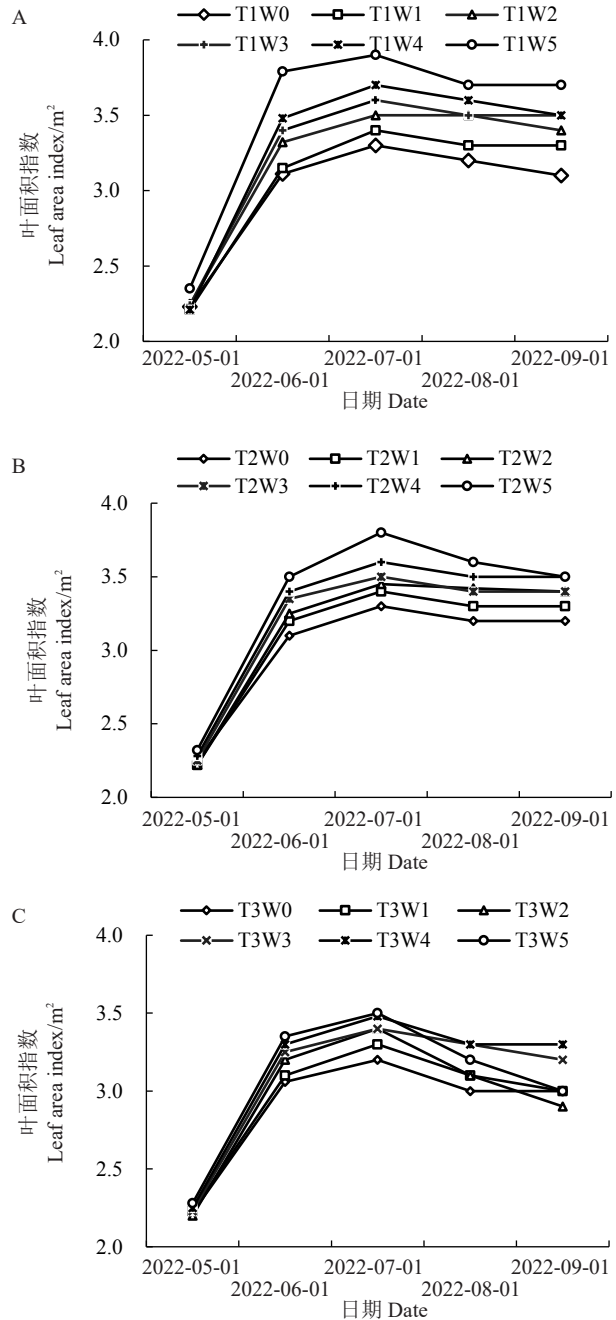


A. 低负载量T1; B. 中负载量T2; C. 高负载量T3。
A. Low load T1; B. Medium load T2; C. High load T3.

图1 不同负载量下灌水量对新梢生长的影响

Fig. 1 Effect of irrigation water volume on new shoot growth under different loads

度 $>15^{\circ}\text{C}$, 叶面积指数增长速率也发生明显的变化。其中增长速率最大的是T1W5处理, 高达65.9%, 最低的是T3W0处理, 较T1W5降低了28.1%。在低负载量条件下, W5处理的叶面积指数最快达到峰值, 较最慢的W0处理高26.4%; 在中负载量条件下, W5处理的叶面积指数最快达到峰值, 较最慢的W0处理高13.1%; 在高负载量条件下, W5



A. 低负载量T1; B. 中负载量T2; C. 高负载量T3。
A. Low load T1; B. Medium load T2; C. High load T3.

图2 不同负载量下灌水量对叶面积指数的影响

Fig. 2 Effect of irrigation water volume on leaf area index under different loads

处理的叶面积指数最快达到峰值, 较最慢的W0处理高9.1%, 可见负载量和灌溉处理对叶面积指数均有显著的影响($p < 0.05$)。

2.3 灌溉量和负载量对苹果树光合特性的影响

由表2可以看出, 灌溉量对苹果树叶片净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、胞间 CO_2 浓度 C_i 和气孔导度 G_s 的日均值均有极显著影响($p < 0.01$)。负载量和两

表2 不同灌水量和负载量对苹果树光合日均值的影响

Table 2 Effects of different irrigation amounts and loads on daily mean photosynthesis of apple trees

负载量 Fruit load	灌水量处理 Irrigation water treatment	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_r/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	$G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
低负载量T1 Low load T1	W0	10.95 h	6.28 g	332.33 c	0.23 hi
	W1	12.67 e	6.64 f	335.87 bc	0.24 hi
	W2	12.50 e	7.79 b	335.16 bc	0.30 bc
	W3	14.85 a	8.13 a	314.09 f	0.31 b
	W4	12.59 e	6.86 de	305.44 h	0.24 ghi
中负载量T2 Medium load T2	W5	10.17 j	6.70 ef	319.58 e	0.23 hi
	W0	10.56 i	6.95 e	320.43 e	0.26 efg
	W1	12.94 d	7.78 b	333.98 c	0.30 bcd
	W2	12.64 e	7.75 b	323.03 e	0.25 ghi
	W3	13.80 b	8.12 a	311.95 fg	0.34 a
高负载量T3 High load T3	W4	10.54 i	7.35 d	331.94 c	0.26 fghi
	W5	12.21 f	6.97 e	308.67 gh	0.25 ghi
	W0	11.09 h	6.11 g	339.02 ab	0.24 ghi
	W1	11.65 g	7.57 c	341.66 a	0.28 def
	W2	13.38 c	7.81 b	326.92 d	0.28 cde
	W3	13.57 c	7.98 a	306.93 h	0.30 bcd
	W4	13.07 d	7.45 cd	312.83 f	0.26 fgh
	W5	12.13 f	7.49 cd	306.22 h	0.28 cde
	双因素方差分析(F值检验)Two-Way ANOVA(F value test)				
负载量 Fruit load		**	ns	ns	ns
灌水量 Irrigation amount		**	**	**	**
负载量×灌水量 Fruit load× Irrigation amount		**	ns	ns	ns

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著;*和**分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平差异显著。ns 表示不显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate the significant difference at level of 0.05; * and ** indicate significant differences at $p<0.05$ and $p<0.01$ levels, respectively. ns means insignificant. The same below.

者的互作均仅对 P_n 有极显著影响($p<0.01$),对其他指标无显著影响。 P_n 最高的处理是 T1W3,最低的处理是 T1W5,显著降低了 46.1%($p<0.05$); T_r 最高的处理是 T1W3,最低的处理是 T3W0,显著降低了 33.1%($p<0.05$); C_i 最高的处理是 T3W1,最低的处理是 T1W4,显著降低了 11.8%($p<0.05$); G_s 最高的处理是 T2W3,最低的处理是 T1W0,显著降低了 46.6%($p<0.05$)。在低负载量条件下,与对照 W0 相比,其余各处理的 P_n 、 T_r 、 C_i 和 G_s 均有显著差异($p<0.05$),其中 P_n 、 T_r 最高的均是 T1W3 处理,均显著高于最低处理 T1W5 和 T3W0 (46.1% 和 29.6%) ($p<0.05$), C_i 最高的是 T3W0 处理,比最低处理 T1W4 显著降低了 9.8%($p<0.05$)。 G_s 最高的是 T1W3,比最低处理 T1W0 显著降低了 32.6%($p<0.05$)。在中负载量条件下,与对照 W0 相比,除 W5 处理外其余各处理的 P_n 、 T_r 、 C_i 和 G_s 均有显著差异($p<0.05$),其中 P_n 最高的是 T2W3 处理,比最低处理 T2W4 显著降低了 30.9%。 T_r 、 G_s 最高的处理均是 W3,比最低的处

理 W0 和 W5 分别高 16.8% 和 40%, C_i 最大的处理是 T2W1,比最低的处理 T2W5 显著降低了 8.2%($p<0.05$);在高负载量条件下,与对照 W0 相比,其余各处理的 P_n 、 T_r 、 C_i 和 G_s 均有显著差异($p<0.05$),其中 P_n 和 G_s 最大的处理均是 W3,最低处理也均是 W0,分别相差 22.4% 和 22.1%, T_r 最大的处理是 T3W3,比最低的处理 W0 显著降低了 30.6%, C_i 最大的处理是 T3W1,比最低的处理 W5 显著降低了 10.8%。

2.4 灌水量和负载量对苹果果实品质的影响

不同处理对苹果果实品质的影响如表 3 所示。灌水量和负载量对单果质量和大果率均有显著影响($p<0.05$),其中单果质量最高的是 T1W4 处理 (281.06 g),比最低的 T3W0 处理 (201.46 g) 高 39.51%。不同灌水量和两者的互作均对果实硬度有显著影响($p<0.05$),其中硬度最大的 T2W1 处理为 $7.73\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$,比最低的 T1W4 处理 ($4.46\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) 高 73.32%,负载量对果实硬度无显著影响,灌水量对果实硬度有显著影响($p<0.05$),在相同负载量条

表 3 不同灌溉量和负载量对苹果果实品质的影响

Table 3 Effects of different irrigation amounts and loads on apple fruit quality

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	硬度 Fruit firmness/ (kg·cm ⁻²)	果形指数 Fruit shape index	w(可溶性 固形物) Soluble solids content/%	w(可滴定酸) Titratable acid content/%	大果率 Big fruit percentage/ %	L*	a*	b*
T1W0	238.80 c	6.95 abc	0.94 a	9.87 a	0.25 a	64.69 gh	47.38 ab	20.25 b	15.73 a
T1W1	237.80 c	6.14 abcd	0.90 a	10.37 a	0.20 ab	70.93 de	48.60 ab	29.30 ab	13.21 ab
T1W2	254.93 bc	6.81 abc	0.89 a	9.50 a	0.18 b	74.57 c	49.54 ab	26.82 ab	11.39 b
T1W3	272.90 ab	6.20 abcd	0.89 a	10.27 a	0.18 b	77.57 b	53.68 a	25.05 ab	12.77 ab
T1W4	281.06 a	4.46 d	0.92 a	10.97 a	0.18 b	83.93 a	50.66 ab	26.11 ab	12.86 ab
T1W5	267.76 abc	5.66 cd	0.88 a	9.40 a	0.19 ab	80.06 b	50.46 ab	29.61 ab	11.53 b
T3W0	237.53 c	7.55 ab	0.95 a	11.13 a	0.21 ab	58.12 j	50.36 ab	25.84 ab	12.97 ab
T3W1	248.19 bc	7.73 a	0.93 a	9.77 a	0.19 ab	66.83 fg	44.23 b	32.45 a	10.39 b
T3W2	241.14 c	7.21 abc	0.86 a	9.43 a	0.17 b	66.44 fg	45.63 b	31.27 a	9.52 b
T3W3	268.39 ab	7.03 abc	0.96 a	10.50 a	0.16 b	68.58 ef	46.55 ab	30.25 a	11.18 b
T3W4	266.86 ab	6.33 abc	0.94 a	10.97 a	0.17 b	74.15 c	48.42 ab	30.18 a	11.56 b
T3W5	237.20 c	5.76 bcd	0.90 a	10.10 a	0.16 b	72.90 cd	47.11 ab	30.51 a	12.83 ab
T3W0	201.46 d	7.11 abc	0.90 a	10.00 a	0.16 b	54.34 k	45.51 b	32.86 a	10.75 b
T3W1	229.20 c	7.24 abc	0.92 a	11.23 a	0.19 ab	58.68 j	43.10 b	33.89 a	10.13 b
T3W2	228.07 c	6.86 abc	0.95 a	9.93 a	0.18 b	61.52 i	48.51 ab	30.96 a	11.54 b
T3W3	234.71 c	6.93 abc	0.96 a	10.67 a	0.20 ab	62.65 hi	47.62 ab	28.68 ab	11.30 b
T3W4	231.66 c	6.00 abcd	0.87 a	10.17 a	0.19 ab	67.21 fg	48.79 ab	27.31 ab	11.11 b
T3W5	228.18 c	5.95 abc	0.90 a	9.23 a	0.17 b	70.77 de	47.50 ab	30.58 a	10.05 b

双因素方差分析(F值检验)Two-Way ANOVA (F value test)

负载量 Fruit load	*	ns	ns	*	ns	**	ns	ns	ns
灌溉量 Irrigation amount	*	*	ns	ns	ns	**	ns	ns	*
负载量×灌溉量 Fruit load×Irriga- tion amount	ns	*	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns

件下,随着灌溉量的增加,其硬度呈现减小的趋势。负载量、灌溉量以及两者互作均对苹果果实的果形指数、酸度无显著影响。对于色差来说,仅有灌溉量对b*(黄色和蓝色值)有显著影响(p<0.05),负载量和两者互作均对L*(亮度)、a*(红色和绿色值)和b*无显著影响。负载量对苹果果实的可溶性固形物含量有显著影响(p<0.05),其中最高的处理T3W1为11.23%,比最低的T3W5处理(9.23%)高2个百分点。在相同灌溉量条件下,可溶性固形物含量随着负载量的增加显著降低。负载量、灌溉量以及两者互作均对苹果果实的大果率有极显著影响(p<0.01),在同一负载量下,随着灌溉量的增加,其大果率显著升高,其中大果率最高的处理T1W4为83.93%,比最低的T3W0处理(54.34%)高29.59个百分点。

2.5 灌溉量和负载量对苹果产量和水分利用效率的影响

由表4可知,负载量和灌溉量对苹果产量和灌溉水利用效率(IWUE)有极显著影响(p<0.01)。各

表 4 不同灌溉量和负载量对苹果产量和水分利用效率的影响

Table 4 Effects of different irrigation amounts and loads on apple yield and water use efficiency

处理 Treatment	产量 Fruit yield/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Irrigation water use efficiency/ (kg·m ⁻³)
T1W1	31 376.20 i	12.00 f
T1W2	33 653.93 m	8.60 g
T1W3	36 020.60 h	6.96 h
T1W4	36 765.97 g	5.67 i
T1W5	35 340.50 gh	4.63 j
T2W1	65 520.07 f	25.00 b
T2W2	63 664.63 fg	16.30 d
T2W3	70 852.99 d	13.28 e
T2W4	70 451.20 d	10.80 f
T2W5	67 898.93 e	8.84 g
T3W1	81 262.73 c	31.11 a
T3W2	82 776.90 c	21.24 c
T3W3	85 419.40 b	16.35 d
T3W4	87 379.80 a	13.35 d
T3W5	86 398.33 b	11.03 f

双因素方差分析(F值检验)Two-Way ANOVA (F value test)

负载量 Fruit load	**	**
灌溉量 Irrigation amount	**	**
负载量×灌溉量 Fruit load×Irrigation amount	**	**

处理以 T3W4 产量最高,为 87 379 kg·hm⁻², T1W1 处理产量最低,与 T1W1 处理相比,其余处理产量增加 7.3%~178.5%,表明适量增加灌水量和负载量有助于苹果树增产。T3W1 处理的 IWUE 最大(31.11 kg·m⁻³),是最小的 T1W5 处理(4.63 kg·m⁻³)的 6.7 倍。在相同负载量条件下, IWUE 随灌水量增加而显著降低; T1W1、T1W2、T1W3、T1W4 和 T1W5 处理的 IWUE 最低,均低于 31.11 kg·m⁻³;在相同灌水量下,苹果不同负载量条件下 IWUE 随着负载量的增加而显著升高($p < 0.05$)。

2.6 不同负载量和灌水量下苹果产量和水分利用效率的回归分析

通过建立回归模型(表 5),发现当苹果产量和 IWUE 分别达到最大值时,对应不同的灌水和负载组合,无法同时满足灌水量最少和负载量最多、产量最高的要求。在优化管理制度时,二者不能同时考虑。当产量和 IWUE 获得最优解时,灌水量分别为 597.34 和 731.12 L,负载量分别为 3.5 和 5.7 个(每平方厘米主干横截面积的果数),与 T2W4 组合最接近,表明中水中负载组合(T2W4)是最优组合,在不

表 5 不同灌溉量和负载量下苹果产量和水分利用效率的回归分析

Table 5 Regression analysis of apple yield and water use efficiency under different irrigation amounts and loads

因变量 Dependent variable	回归方程 Regression equation	R^2	p	因变量最大值 Maximum of dependent variable	对应负载量 Corresponding load capacity	对应灌水量 Corresponding irrigation amount/L
产量 Yield	$Y1 = -4000T^2 - 0.033W^2 + 0.67TW + 2.81 \times 10^4 T + 41.77W + 2.587 \times 10^4$	0.89	<0.01	63 925.00	3.5	597.34
水分利用效率 IWUE	$Y2 = -0.45T^2 + 4.933 \times 10^{-5}W^2 - 0.005 TW + 9.367 - 0.055W + 12.3$	0.88	<0.01	13.11	5.7	731.12

注: Yi(i=1~2)的单位分别为 kg·hm⁻²、kg·m⁻³。W、T 分别为当季灌水量(L)和负载量(果数/每平方厘米主干横截面积)。

Note: The units of Yi (i = 1-2) are kg·hm⁻², kg·m⁻³. W and T were the amount of irrigation (L) and load (main trunk cross-sectional area per square centimeter/fruit), respectively.

影响产量的同时,提高了水分利用效率。

3 讨论

水分对植物的影响主要表现在生长和生理两个方面,在不同水分条件下,植物的产量、水分利用效率和品质等指标会受到不同的影响,同时对水分亏缺作出一定程度的响应^[19]。大量田间实际研究表明,作物能够适应一定程度的水分亏缺,且适宜的水分能使作物稳产甚至增产^[20]。果实负载量是影响果树库源关系中最重要因素之一,疏果能够调节“库(果实)-源(叶片)”之间的关系,改变光合产物的运输与分配,从而影响果实的产量和品质^[2-5],因此,合理的负载量和灌溉量可以协调作物营养物质的分配,促进光合产物的合成,提高作物产量和水分利用效率,改善果实品质^[21-23]。笔者在本研究中探讨了黄土高原区苹果冠层结构、光合特性、外观品质、产量及 IWUE 对负载量与灌水量耦合的响应规律。运用回归方程模拟分析得出了苹果优质节水丰产的滴灌组合,为黄土高原区苹果的滴灌应用提供科学的理论基础。

灌溉通过调节土壤水分含量来控制作物根系发

育,进一步控制作物地上部分的营养生长^[24]。作物对水分需求的响应因不同作物的生物学特性而不相同,新梢长度可以间接体现作物的生长状况。本研究表明,苹果树新梢全物候期增长呈现先快后慢的趋势,在每次灌水后,新梢和果径会出现迅速增长的现象,这与前人研究结果类似^[25]。负载量和灌水量对苹果树新梢最终长度的影响达显著水平,而两者的交互作用对其影响不显著。本研究表明,各负载量下苹果树新梢长度均在 W0 处理最小,这可能是因为苹果树受到严重的水分亏缺时,其细胞体积被抑制而无法增大,而在对水分的响应中细胞分裂明显弱于细胞体积的增大,因此使得新梢生长受到明显抑制;而在 W4 和 W5 处理下新梢长度达到最大,这可能是因为其灌水方式更适合苹果树的主要根系分布区^[26],使得水分能最大程度地被果树吸收利用。在相同灌水量条件下,新梢生长长度随着负载量的增大而减小,这可能是因为所灌溉的水主要用于果实的生殖生长从而抑制了新梢的营养生长。

作物冠层结构是光能接收与转化的重要工具,适宜的冠层结构能够提高对光能的接收和转化效率来增加光合物质积累进而增产^[27]。而叶面积指数作

为冠层的重要结构构建对冠层功能的发挥起到了关键作用。本研究表明叶面积指数随着灌水量的增加而增加,均随生长时间的增加呈现先快速增大,后逐渐减小至稳定的趋势。其中 W5 处理下峰值能够达到最大,这说明叶面积指数的变化对水分含量较敏感,果树过度缺水会严重影响光合作用和蒸腾作用,使得果树生长代谢减缓,抑制了叶面积指数的增大^[28]。同时也可以看出负载量对叶面积指数影响较大,在相同灌水量条件下,叶面积指数随着负载量的增大而减小,与薛晓敏等^[29]研究发现盛果期富士苹果负载量的增加会降低叶面积系数的结论一致。

土壤水分的过度亏缺会造成作物气孔导度、蒸腾速率和光合速率的下降,并降低根系的吸收面积和吸收能力,从而影响作物对养分的吸收和运输^[30]。本研究表明,净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)均会随着水分亏缺程度的增大而显著下降。这可能是因为苹果树在水分亏缺后,会使得叶片叶绿体膨胀、排列紊乱、部分超微结构受到损坏,而树体为了保持水分,会相应地调节气孔闭合来防止体内水分的损失和水势的下降^[31];有研究表明,当土壤含水率降低时,根系吸水速率降低,导致果树体内水分减少,叶片气孔开度主动减小以适应周围环境的变化,叶片水分利用效率由于蒸腾速率显著降低而明显提升^[32],与本研究结果类似。另外,本研究还表明,3种负载量下中水处理均有较高的光合速率和蒸腾速率,这可能是因为土壤水分在满足作物需求下,环境湿度较大,增加了过多的无效蒸腾,进而降低了水分利用效率。笔者在本研究中发现相同灌水量条件下,负载量除了对光合速率有显著影响外,对其他光合指标无显著影响。张秀美等^[33]认为负载量过高时叶绿素含量快速降低,叶片的脱落酸含量升高,从而加速叶片的衰老,进而促使净光合速率下降,叶片库制造的养分不能充分地供应果实,也产生了净光合速率下降的情况,这与本研究结果一致。而冉辛拓等^[34]对乔化长富1号研究表明,随着负载量增加,光合速率与留果量呈极显著正相关。关于负载量与光合速率关系的分歧有待进一步研究。

本研究表明,负载量和灌溉量对苹果树的产量均有极显著影响,这与 Naor 等^[12]研究的结果一致,都显示出树木水分状况和作物负载之间的相互作用。水分对果实的品质也有至关重要的作用,果实

的各项品质指标对水分亏缺也会出现不同程度的响应。灌溉量和负载量对单果质量和大果率均有显著影响。相比于低负载量和高负载量处理,中负载量处理能够提高单果质量与产量,提高 IWUE。同时能够提高果实硬度、果形指数和大果率,提高苹果的商品价值。这可能是中负载量处理显著提高了光合产物向产量品质形成器官的分配比例,同时也提高了光合器官的光合生产能力和产量贡献率,这与 Neilsen 等^[35]的结果一致。

4 结 论

综上所述,通过回归分析,表明产量、品质和 IWUE 同时获得最优解时,灌水量和负载量组合最接近 T2W4 处理,因此,综合考虑以苹果增产和提高水分利用率为目的,建议灌水水平为 100% ETc,负载量为主干横截面积每平方米 4 个果实为黄土高原地区苹果推荐的组合。

参考文献 References:

- [1] 毕润霞,杨洪强,杨萍萍,范伟国,陈锦璞,樊树雷,吴瑞刚. 地下穴灌对苹果冠下土壤水分分布及叶片水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(17):3651-3658.
BI Runxia, YANG Hongqiang, YANG Pingping, FAN Weiguo, CHEN Jinpu, FAN Shulei, WU Ruigang. Effect of cavity irrigation underground on the distribution of soil water under the canopy and leaf water use efficiency of apple[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17): 3651-3658.
- [2] 刘悦萍,郭金丽,张玉兰,张志友,张建新. 负载量与金红苹果树生长结果、叶片衰老的关系[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2003,24(1):39-45.
LIU Yueping, GUO Jinli, ZHANG Yulan, ZHANG Zhiyou, ZHANG Jianing. The relation between fruit load and growth and foliage senescence of Jinhong apple trees[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2003, 24(1): 39-45.
- [3] 刘传和,陈杰忠,刘运春,李娟. 疏果对黄皮果实发育着色及树体器官碳水化合物含量的影响[J]. 园艺学报,2008,35(6):869-872.
LIU Chuanhe, CHEN Jiezhong, LIU Yunchun, LI Juan. Effects of fruit-thinning on fruits development, pigmentation and carbohydrate content in plant organs of wampee[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2008, 35(6): 869-872.
- [4] NJOROGÉ S M C, REIGHARD G L. Thinning time during stage I and fruit spacing influences fruit size of 'Contender' peach[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 115(4): 352-359.
- [5] MORANDI B, CORELLI GRAPPADELLI L. Source and sink limitations in vascular flows in peach fruit[J]. The Journal of

- Horticultural Science and Biotechnology, 2009, 84(6): 150-156.
- [6] 钟韵, 费良军, 曾健, 傅渝亮, 代智光. 根域水分亏缺对涌泉灌苹果幼树产量品质和节水的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 78-87.
ZHONG Yun, FEI Liangjun, ZENG Jian, FU Yuliang, DAI Zhi-guang. Effects of root-zone water deficit on yield, quality and water use efficiency of young apple trees under surge-root irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 78-87.
- [7] 李中杰, 费良军, 郝琨, 刘腾, 张全菊, 陈南束, 刘利华, 钟韵. 涌泉根灌下水氮耦合对陕北山地苹果光合特性、产量和水氮利用的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 967-975.
LI Zhongjie, FEI Liangjun, HAO Kun, LIU Teng, ZHANG Qian-ju, CHEN Nanshu, LIU Lihua, ZHONG Yun. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics, yield, water and nitrogen use efficiency for mountain apple trees under surge-root irrigation in Northern Shaanxi area of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 967-975.
- [8] 黄媛, 于景鑫, 杜亚茹, 康艺凡, 杜鹏飞, 田国英. 基于土壤含水量的灌溉制度对番茄生理、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(3): 64-68.
HUANG Yuan, YU Jingxin, DU Yaru, KANG Yifan, DU Pengfei, TIAN Guoying. Effects of irrigation system based on soil water content on tomato physiology, yield and water use efficiency[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(3): 64-68.
- [9] FRANCAVIGLIA D, FARINA V, AVELLONE G, LO BIANCO R. Fruit yield and quality responses of apple cvs Gala and Fuji to partial rootzone drying under Mediterranean conditions[J]. The Journal of Agricultural Science, 2013, 151(4): 556-569.
- [10] GIRONA J, MARSAL J, ARBONES A, DEJONG T M. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2004, 79(2): 308-315.
- [11] MARSAL J, MATA M, ARBONES A, DEL CAMPO J, GIRONA J, LOPEZ G. Factors involved in alleviating water stress by partial crop removal in pear trees[J]. Tree Physiology, 2008, 28(9): 1375-1382.
- [12] NAOR A, NASCHITZ S, PERES M, GAL Y. Responses of apple fruit size to tree water status and crop load[J]. Tree Physiology, 2008, 28(8): 1255-1261.
- [13] PALMER J W, GIULIANI R, ADAMS H M. Effect of crop load on fruiting and leaf photosynthesis of 'Braeburn'/M. 26 apple trees[J]. Tree Physiology, 1997, 17(11): 741-746.
- [14] 冯焕德, 李丙智, 张林森, 金会翠, 李焕波, 韩明玉. 不同施氮量对红富士苹果品质、光合作用和叶片元素含量的影响[J]. 西北农业学报, 2008, 17(1): 229-232.
FENG Huande, LI Bingzhi, ZHANG Linsen, JIN Huicui, LI Huanbo, HAN Mingyu. Influences of different rates of nitrogen on fruit quality, photosynthesis and element contents in leaves of Red Fuji apples[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2008, 17(1): 229-232.
- [15] DING N, CHEN Q A, ZHU Z L, PENG L, GE S F, JIANG Y M. Effects of crop load on distribution and utilization of ^{13}C and ^{15}N and fruit quality for dwarf apple trees[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14172.
- [16] WÜNSCHE J N, PALMER J W, GREER D H. Effects of crop load on fruiting and gas-exchange characteristics of 'Braeburn'/M. 26 apple trees at full canopy[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2000, 125(1): 93-99.
- [17] UCAR Y, KADAYIFCI A, ASKIN M A, KANKAYA A, SENYIĞIT U, YILDIRIM F. Yield and quality response of young 'Gala, Galaxy' trees under different irrigation regimes[J]. Erwerbs-Obstbau, 2016, 58(3): 159-167.
- [18] ZHOU Y P, LI Y K, LIU X J, WANG K Y, MUHAMMAD T. Synergistic improvement in spring maize yield and quality with micro/nanobubbles water oxygenation[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 5226.
- [19] 李萌. 新疆膜下滴灌棉花灌溉和施肥调控效应及生长模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
LI Meng. Study on effect of irrigation and fertilization regulation and simulation of cotton growth under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [20] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 李岩. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116-123.
KOU Dan, SU Derong, WU Di, LI Yan. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 116-123.
- [21] 彭福田, 姜远茂, 顾曼如, 束怀瑞. 氮素对苹果果实内源激素变化动态与发育进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 208-213.
PENG Futian, JIANG Yuanmao, GU Manru, SHU Huairui. Effect of nitrogen on apple fruit hormone changing trends and development[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2003, 9(2): 208-213.
- [22] RAESE J T, DRAKE S R, CURRY E A. Nitrogen fertilizer influences fruit quality, soil nutrients and cover crops, leaf color and nitrogen content, biennial bearing and cold hardiness of 'Golden Delicious' [J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(10): 1585-1604.
- [23] 赵林, 姜远茂, 彭福田, 李盼盼, 王磊, 李洪波. 嘎拉苹果对春施 ^{15}N -尿素的吸收、利用与分配特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1439-1443.
ZHAO Lin, JIANG Yuanmao, PENG Futian, LI Panpan, WANG Lei, LI Hongbo. Characteristics of absorption, utilization and distribution of spring soil ^{15}N -urea application for Gala/Malus hupehensis[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1439-1443.

- [24] 强敏敏, 费良军, 刘扬. 调亏灌溉促进涌泉根灌枣树生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19):91-96.
QIANG Minmin, FEI Liangjun, LIU Yang. Regulated deficit irrigation promoting growth and increasing fruit yield of jujube trees[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19):91-96.
- [25] 邢英英, 张富仓, 张燕, 李静, 强生才, 李志军, 高明霞. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21):70-80.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, LI Jing, QIANG Shengcai, LI Zhijun, GAO Mingxia. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21):70-80.
- [26] 宋小林, 吴普特, 赵西宁, 高晓东. 黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7):121-128.
SONG Xiaolin, WU Pute, ZHAO Xining, GAO Xiaodong. Distribution characteristic of soil moisture and roots in rain-fed old apple orchards with water-fertilizer pit on the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7):121-128.
- [27] 郝琨, 刘小刚, 韩志慧, 余宁, 程金焕, 刘闯, 李义林, 杨启良. 不同荫蔽栽培下亏缺灌溉对干热区小粒咖啡水光利用和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11):3550-3558.
HAO Kun, LIU Xiaogang, HAN Zhihui, YU Ning, CHENG Jinhuan, LIU Chuang, LI Yilin, YANG Qiliang. Effects of deficit irrigation on water-radiation use and yield of *Coffea arabica* under different shade cultivation modes in dry-hot region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11):3550-3558.
- [28] LI Y L, LIU X G, HAO K, YANG Q L, YANG X Q, ZHANG W H, CONG Y. Light-response curve of photosynthesis and model fitting in leaves of *Mangifera indica* under different soil water conditions[J]. Photosynthetica, 2019, 57(3):796-803.
- [29] 薛晓敏, 陈鸿飞, 王金政, 李治梅, 路超, 聂佩显. 盛果期红富士苹果适宜负载量的研究[J]. 江西农业学报, 2012, 24(9):31-34.
XUE Xiaomin, CHEN Hongfei, WANG Jinzheng, LI Zhimei, LU Chao, NIE Peixian. Research on suitable fruit load of red fuji apple in full fruit period[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(9):31-34.
- [30] 孙光照, 刘小刚, 余小弟, 彭有亮, 冷险险, 黄一峰, 杨启良. 微润管布设方式和施肥水平对蓝莓生长及光合特性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2):604-611.
SUN Guangzhao, LIU Xiaogang, YU Xiaodi, PENG Youliang, LENG Xianxian, HUANG Yifeng, YANG Qiliang. Effects of moistube patterns and fertilization levels on growth and physiological characteristics of blueberry[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2):604-611.
- [31] 张效星, 樊毅, 贾悦, 崔宁博, 赵璐, 胡笑涛, 龚道枝. 水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):143-150.
ZHANG Xiaoxing, FAN Yi, JIA Yue, CUI Ningbo, ZHAO Lu, HU Xiaotao, GONG Daozhi. Effect of water deficit on photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency in Shiranui citrus under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(3):143-150.
- [32] XIA J B, ZHANG S Y, GUO J, RONG Q Q, ZHANG G C. Critical effects of gas exchange parameters in *Tamarix chinensis* Lour. on soil water and its relevant environmental factors on a shell ridge island in China's Yellow River Delta[J]. Ecological Engineering, 2015, 76:36-46.
- [33] 张秀美, 王宏, 刘志, 于年文, 李宏建, 里程辉. 岳阳红苹果矮化栽培与负载量关系研究[J]. 果树学报, 2021, 38(7):1077-1083.
ZHANG Xiumei, WANG Hong, LIU Zhi, YU Nianwen, LI Hongjian, LI Chenghui. A study on the relationship between dwarfing cultivation and load of Yueyanghong apple[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(7):1077-1083.
- [34] 冉辛拓, 张新生. 不同负载量对苹果光合速率及干物质生产的影响[J]. 华北农学报, 2003, 18(S1):131-132.
RAN Xintuo, ZHANG Xinsheng. Effect of crop load on photosynthetic rate and dry matter production of apple[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(S1):131-132.
- [35] NEILSEN D, NEILSEN G, GUAK S, FORGE T. Consequences of deficit irrigation and crop load reduction on plant water relations, yield, and quality of 'Ambrosia' apple[J]. HortScience, 2016, 51(1):98-106.