

水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应*

周罕觅¹ 张富仓² Roger Kjelgren³ 吴立峰² 范军亮² 向友珍²

(1. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 犹他州立大学植物土壤和气候系, 洛根 84322)

摘要: 为探明半干旱地区苹果幼树水肥精准管理模式,研究了水肥耦合对3 a生苹果幼树生长、产量、品质及水肥利用的效应,试验设置4个灌水水平,其灌水上下限分别为田间持水率的75%~85%(W₁)、65%~75%(W₂)、55%~65%(W₃)、45%~55%(W₄);3个施肥水平(N-P₂O₅-K₂O),即高肥:30-30-10 g/株(F₁)、中肥:20-20-10 g/株(F₂)、低肥:10-10-10 g/株(F₃)。结果表明:苹果幼树萌芽开花期至新梢生长期控水控肥可有效调控苹果幼树植株和叶面积的增长;苹果产量最高和最低的处理分别为F₁W₁和F₃W₄(F₁W₁比F₃W₄增加139.1%),产量与干物质质量间相关关系的决定系数R²为0.9085,达到了极显著水平;增加灌水量提高了苹果着色指数却降低其果形指数,亏水处理和增加施肥量有利于提高苹果硬度;轻度亏缺(F₂)灌溉处理下,增加施肥量有利于提高苹果维生素C含量;灌水量对苹果可溶性固形物和可溶性糖影响不显著,但增加施肥量有利于提高苹果可溶性固形物和可溶性糖的含量;施肥量对苹果可滴定酸和糖酸比影响不显著,但增加灌水量可降低苹果可滴定酸含量,提高苹果糖酸比;高水低肥处理能够产生较高的肥料偏生产力(PFP);水分利用效率(WUE)最大值基本上出现在F₂W₂处理,与F₁W₁相比,虽然产量减小7.5%,但耗水量却减小16.7%,WUE增加11.2%,高水高肥的F₁W₁处理并不能得到最大的WUE,最大的WUE出现在F₂W₂处理。由此可见,F₂W₂处理是苹果幼树生长、产量、品质以及水肥利用效率方面的最佳水肥组合,达到了节水、节肥的最佳水肥耦合模式。

关键词: 苹果树 水肥耦合 产量 果实品质 水分利用效率 肥料偏生产力

中图分类号: S274; S661.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0173-11

Effects of Water and Fertilizer Coupling on Yield, Fruit Quality and Water and Fertilizer Use Efficiency of Young Apple Tree

Zhou Hanmi¹ Zhang Fucang² Roger Kjelgren³ Wu Lifeng² Fan Junliang² Xiang Youzhen²

(1. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Department of Plant Soils and Climate, Utah State University, Logan 84322, USA)

Abstract: In order to explore the accurate management mode of water and fertilizer supplies for young apple tree in semi-arid area field, the bucket cultivation experiment, including four levels of irrigation as 75%~85% (W₁), 65%~75% (W₂), 55%~65% (W₃) and 45%~55% (W₄) of field capacity, and three levels of fertilization (N-P₂O₅-K₂O) as 30-30-10 g/plant (F₁), 20-20-10 g/plant (F₂) and 10-10-10 g/plant (F₃), was conducted to study the effects of water and fertilizer coupling on yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of three-year old young apple tree. The results showed that controlled water and fertilizer can effectively regulate the plant and leaf area growth during bud flowering to new growth period; the highest and lowest yields were obtained by F₁W₁ and F₃W₄ treatments, respectively (compared with F₃W₄, yield of F₁W₁ was increased by 139.1%), and

收稿日期: 2015-09-15 修回日期: 2015-10-19
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100504)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)
作者简介: 周罕觅, 讲师, 博士, 主要从事农业节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhouthm@163.com
通讯作者: 张富仓, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

the determination coefficient between yield and dry mass was 0.908 5. Increasing irrigation depth could improve apple color index but it would reduce the shape index, deficit irrigation and increased fertilizer application rates both could improve apple firmness. Increased fertilizer application rates could improve the vitamin C content of apple under mild deficit irrigation treatment (F_2); irrigation depth had no significant effect on soluble solids content and soluble sugar content, but increased fertilizer application rates could improve both of them; increased irrigation depth could reduce titratable acid and improve the sugar acid ratio, but fertilization rate had no significant effect on them. High irrigation depth and low fertilization rate could get high partial factor productivity (PFP), but the maximum water use efficiency (WUE) could not be got by F_1W_1 treatment. The maximum WUE was appeared in F_2W_2 treatment with yield decreased by 7.5%, water consumption decreased by 16.7% and WUE increased by 11.2% compared with F_1W_1 treatment. Thus, F_2W_2 treatment was the best water and fertilizer application combination for the young apple tree and it reached the best water and fertilizer coupling mode.

Key words: Apple tree Water and fertilizer coupling Yield Fruit quality Water use efficiency Partial factor productivity

引言

随着节水、节肥等灌溉理论和技术的发展,国内外学者对节水节肥越来越重视并提出了许多节水和节肥的灌溉理论和技术,试验证明这些理论和技术都可以明显提高作物产量和水肥利用效率^[1-7],在现代农业发展中水肥之间有着明显和重要的交互作用,灌水和施肥对作物产量以及经济效益都起着决定性作用^[8]。

水肥的合理利用是作物产量、品质和水肥利用效率提高的关键因素。近年研究表明,水和肥对作物的生长存在相似的临界值,但水对产量的影响最大,其次是氮,磷的影响最小^[9];增加灌水和施肥用量能提高番茄产量^[10-11];一定条件下的水分亏缺处理不会明显降低西瓜的产量,且能获得较高的水分利用效率^[12];黄瓜的产量及其构成因素随着灌水量与施氮量的增加而增加^[13];灌水可增加番茄产量,却会降低果实内糖、有机酸等可溶物的含量^[14];在适宜的范围内增加施氮量可显著提高可溶性固形物含量,但施肥量对可溶物含量没有显著影响^[15];亏缺灌溉可以提高番茄品质,产量一定程度上虽然有所减少,但维生素 C、可溶性固形物和果实硬度增加^[16]。

国内对果树水肥耦合或者水肥调控的研究报道较少,即使有也主要针对成龄挂果的果树^[17-19],对结果初期幼树的产量、品质和水肥利用效率的报道很少。幼树是果树生长过程中必然经历的一个至关重要的阶段,幼树生长的优劣直接决定了当前以及将来果树挂果的个数、产量和品质。因此,为探明苹果幼树产量和品质对水肥耦合效应的响应规律和最佳水肥组合,本文研究不同水肥处理对苹果幼树生长、产量、品质和水肥利用效率的影响,确定苹果幼

树最佳水肥调控阈值,为干旱或半干旱地区苹果幼树水肥耦合效应研究提供一定的理论基础,对苹果幼树的种植具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于 2013-04-10—2013-09-20 在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院移动式防雨棚中进行。研究院地处 34°17'N、108°04'E,海拔高度 520 m,属半干旱半湿润气候,多年平均气温 12.5℃,日照时数 2 163.8 h,无霜期 210 d,降水量 500 mm,蒸发量 1 400 mm。供试土壤为壤土(经自然风干、磨细过 5 mm 筛),土壤 pH 值为 7.8,有机质质量比 6.38 g/kg,全氮质量比 0.82 g/kg,全磷质量比 0.55 g/kg,全钾质量比 11.2 g/kg,碱解氮质量比 48.3 mg/kg,速效磷质量比 13.68 mg/kg,速效钾质量比 138.47 mg/kg,田间持水率(θ_F) 0.24 g/g。2013 年试验地参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)和降水量见图 1,全年参考作物蒸发蒸腾量为 1 411 mm,降水量为 481 mm。

以近年来培育出的新型高产苹果品种柱状苹果(润太一号,基砧为新疆野苹果, *Malus sieversii*) 3 a 生幼树为试验材料,2013 年 4 月 18 日开始进行施肥和水分处理。

1.2 试验方法

采用防雨棚和蒸渗桶为种植环境,即将不锈钢桶埋于防雨棚田间,有效地控水控肥,温湿度等环境条件与田间一致,能准确地反映田间试验结果。设水分和施肥 2 个因素,其中水分处理设 4 个水平(充分供水、轻度亏缺、中度亏缺、重度亏缺),其灌水上下限分别为田间持水率的 75%~85% (W_1)、65%~

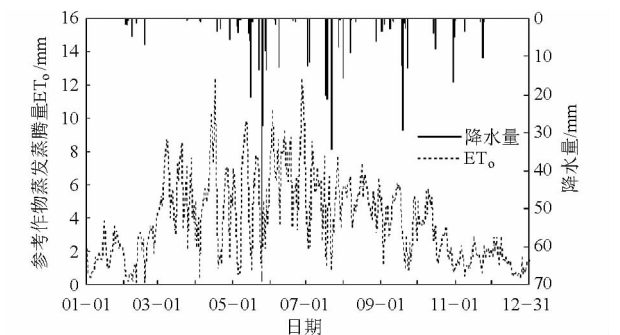


图 1 2013 年试验地参考作物蒸发蒸腾量和降水量
Fig.1 Reference evapotranspiration (ET_0) and precipitation of experimental field in 2013

75% (W_2)、55% ~ 65% (W_3)、45% ~ 55% (W_4)，称量法控制其土壤水分。施肥处理设 3 个水平（高肥、中肥、低肥），即施 N、 P_2O_5 、 K_2O 分别为 30、30、10 g/株 (F_1)，20、20、10 g/株 (F_2)，10、10、10 g/株 (F_3)，计划施肥深度为 30 ~ 40 cm。所用氮、磷、钾肥分别为尿素、磷酸氢二铵和氯化钾。试验进行完全组合设计，共 12 个处理，设 5 次重复。

试验地竖直铺设外径 60 cm、高 100 cm、厚 5 cm 水泥管，采用直径 50 cm、高 100 cm 蒸渗桶埋于水泥管内，桶面与地表相平。为防止滞水，每桶底部装河沙 10 kg、风干土 230 kg，装土容重 1.3 g/cm³。试验地上方安装有可移动电动葫芦门式 500 kg 起重机（西安神力起重运输机械有限公司）可升降蒸渗桶，起重机挂钩上安装电子吊秤（测量范围 4 ~ 500 kg，精度 25 g，杭州天辰称重设备有限公司）测其质量并以此来计算各水肥处理下苹果幼树的灌水量。

1.3 测定项目和计算方法

1.3.1 植株生长量和叶面积

以蒸渗桶上沿为基准至幼树最高点，用卷尺测量其垂直高度，每个生育期测定 1 次，2 次的差值即为苹果幼树该段时间的植株生长量（cm）。

采用手持叶面积仪（LI-3000C 型，LI-COR，USA），每棵样树选取冠层上、中、下 10 片叶测其叶面积，取平均值作为该样树单片叶面积，单片叶面积与整棵样树的叶片总数的乘积即为该棵样树的叶面积（m²/株），每个生育期测定 1 次。

1.3.2 干物质质量和耗水量

将所取柱状苹果样树基部与地下部分离，去掉表面的尘土放入干燥箱在 105℃ 下杀青 0.5 h，75℃ 干燥至质量恒定，之后放入干燥器中冷却，用电子天平称质量，即为干物质质量。

作物耗水量计算式^[20-21]为

$$ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W$$

式中 ET ——作物耗水量，mm
 P_r ——降水量，mm

U ——地下水补给量，mm
 I ——灌水量，mm
 D ——深层渗漏量，mm
 ΔW ——试验初期和末期土壤储水量的变化量，mm

R ——径流量，mm

由于采用防雨棚和蒸渗桶为种植环境，故 P_r 、 U 、 R 和 D 均忽略不计，式（1）简化为

$$ET = I - \Delta W$$

（2）

1.3.3 产量和品质

产量：苹果成熟期在果园连续多天不间断地采摘不同处理的苹果测其产量。

单果质量：采摘后用称量法测定每个处理选取的 20 个苹果的平均单果质量。

果形指数^[22]：每个处理随机选择 20 个苹果，用游标卡尺测量果实的纵径和横径，计算果形指数（果实纵径与横径的比值）。

着色指数^[18]：采用 5 级分类加权平均表示：着色面积小于 20% 为 1 级；着色面积 20% ~ 40% 为 2 级；着色面积 40% ~ 60% 为 3 级；着色面积 60% ~ 80% 为 4 级；着色面积大于 80% 为 5 级。

采用钼蓝比色法测定果实维生素 C 含量；用意大利 FT327 型硬度计测定果实硬度；用 RHBO-90 型手持折射仪测定可溶性固形物；可溶性糖采用蒽酮比色法测定；酸碱滴定法测定果实酸度。

1.3.4 水分利用效率

水分利用效率（Water use efficiency, WUE, kg/m³）计算公式^[23]为

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$

（3）

式中 Y ——产量，g/株

1.3.5 肥料偏生产力

肥料偏生产力（Partial factor productivity, PFP, kg/kg）计算公式^[24]为

$$PFP = \frac{Y}{F_T}$$

（4）

式中 F_T ——投入的 N、 P_2O_5 和 K_2O 总量，g/株

1.4 数据统计分析

应用 SPSS Statistics 18.0 统计软件对数据进行处理及相关性分析；对不同处理间各指标进行方差分析，若差异显著，再用 Duncan 多重比较进行分析。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合对苹果幼树植株生长量的效应

表 1 为不同水肥处理对苹果幼树各生育期植株生长量的影响。其中灌水量对苹果各生育期和全生育期植株生长量的影响均达到极显著的水平（ $P <$

0.01),这说明水肥耦合条件下苹果幼树植株生长量对水分的响应十分敏感;施肥量对苹果生育初期(萌芽开花期-新梢生长期)、中期(坐果期-果实膨大期)和后期(果实膨大期-成熟期)植株生长量影

响显著($P < 0.05$),对生育前期(新梢生长期-坐果期)和全生育期植株生长量影响极显著($P < 0.01$),水肥交互作用仅对苹果生育中期植株生长量影响显著($P < 0.05$)。

表 1 不同水肥处理对苹果幼树植株生长量的影响

Tab.1 Effects of different water and fertilizer treatments on plant growth of young apple tree							cm
施肥处理	水分处理	生育初期 04-18—05-21	生育前期 05-22—06-23	生育中期 06-24—07-26	生育后期 07-27—08-28	全生育期	
F ₁	W ₁	18.8±1.0 ^{ab}	6.9±0.5 ^a	4.0±0.6 ^a	7.5±1.1 ^{abc}	37.1±1.1 ^a	
	W ₂	21.1±2.1 ^a	5.9±1.3 ^{bc}	3.0±0.3 ^c	8.6±1.6 ^a	38.6±3.2 ^a	
	W ₃	15.1±0.8 ^{cd}	4.3±0.4 ^{de}	2.4±0.1 ^d	6.0±0.4 ^{cd}	27.8±1.8 ^b	
	W ₄	13.2±0.5 ^{de}	2.9±0.3 ^f	1.7±0.2 ^e	3.9±0.2 ^{efg}	21.6±1.0 ^c	
F ₂	W ₁	17.2±1.6 ^{bc}	6.5±1.2 ^{ab}	3.5±0.2 ^b	6.6±0.6 ^{bcd}	33.8±1.8 ^a	
	W ₂	20.0±2.9 ^{ab}	5.8±0.4 ^{bc}	3.1±0.3 ^{bc}	8.3±0.7 ^{ab}	37.1±4.0 ^a	
	W ₃	14.4±1.0 ^{cde}	4.7±0.6 ^{de}	2.4±0.2 ^d	5.5±0.7 ^{de}	27.0±2.1 ^b	
	W ₄	12.7±0.6 ^{de}	3.1±0.4 ^f	1.6±0.3 ^e	3.6±0.8 ^{fg}	20.9±1.4 ^c	
F ₃	W ₁	14.4±0.6 ^{cde}	5.1±0.5 ^{cd}	2.8±0.2 ^{cd}	5.7±0.4 ^{cde}	27.9±0.4 ^b	
	W ₂	15.5±0.4 ^{cd}	4.0±0.4 ^e	2.4±0.1 ^d	5.3±1.8 ^{def}	27.1±2.5 ^b	
	W ₃	12.0±1.2 ^{ef}	2.9±0.2 ^f	1.5±0.1 ^e	3.6±0.7 ^{fg}	19.9±1.7 ^c	
	W ₄	9.3±1.1 ^f	1.3±0.3 ^g	1.1±0.2 ^f	2.6±0.8 ^g	14.2±2.4 ^d	
显著性检验(F值)							
水分		31.616**	209.327**	102.156**	62.619**	98.035**	
施肥		55.389*	274.045**	73.000*	85.547*	251.449**	
水分×施肥		1.025	0.696	4.304*	2.369	3.508	

注: * 表示差异显著($P < 0.05$), ** 表示差异极显著($P < 0.01$); 同列数字后不同字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

如表 1 所示,施肥量一定的条件下,苹果幼树生育前期和中期植株生长量总体表现为:W₁ > W₂ > W₃ > W₄,生育初期和后期则表现为:W₂ > W₁ > W₃ > W₄,轻度亏水灌溉对生育初期和后期苹果植株生长量影响较大,这说明苹果幼树生育初期和后期是需水的关键时期,此时适当亏水灌溉有利于其植株的生长。灌水量一定的条件下,各生育期植株生长量均表现为:F₁ > F₂ > F₃,这说明苹果幼树植株生长量随着施肥量的增加呈现出明显的上升趋势。全生育期植株生长总量最大值表现为:F₁W₁ ≈ F₁W₂ ≈ F₂W₁ ≈ F₂W₂,这说明与 F₂W₂ 水肥组合处理相比, F₁W₁ 处理对苹果幼树植株生长没有任何影响,可以起到节水节肥的目的,最小值同样出现在低水低肥的 F₃W₄ 处理, F₂W₂ 比 F₃W₄ 增加了 161.3%。苹果幼树植株生长量和不同水肥处理下植株生长量的差异都表现为:生育初期 > 生育前期 ≈ 生育后期 > 生育中期,这说明苹果幼树植株生长在萌芽开花期至新梢生长期对水肥的需求最为敏感,此时期控水控肥可有效调控苹果幼树植株的生长。

2.2 水肥耦合对苹果幼树叶面积的效应

图 2 是不同水肥处理对苹果幼树叶面积的影响。全生育期除了水肥处理后第 1 次测定的叶面积

(萌芽开花期),灌水量对苹果幼树其他生育期叶面积的影响都达到了极显著水平($P < 0.01$),施肥和水肥交互作用对苹果幼树叶面积的影响不显著。

由图 2 可以看出施肥量一定的条件下,各水分处理间差异较大,全生育期高肥 F₁ 和中肥 F₂ 条件下叶面积总体表现为:W₂ > W₁ > W₃ > W₄,这说明水肥调控第 2 年施中肥和高肥条件下,轻度亏水灌溉 W₂ 最有利于苹果叶片的生长, W₂ 起到了促进叶片生长而且节水的作用;低肥 F₃ 条件下,叶面积总体仍表现为:W₁ > W₂ > W₃ > W₄;生育后期最大和最小叶面积分别为 1.34、0.88 m²/株,分别出现在 F₂W₂ 和 F₃W₄ 处理, F₂W₂ 比 F₃W₄ 增加了 52.3%,这说明 F₂W₂ 处理既增加了苹果幼树叶面积又是施肥和水分处理的最佳水肥组合,起到了节水、节肥的效果。全生育期苹果幼树萌芽开花期至新梢生长期叶面积增幅最大,说明此时期内苹果幼树对水肥的需求最为敏感,控水控肥可有效调控苹果幼树叶面积的增长。

2.3 水肥耦合对苹果幼树干物质质量、耗水量和产量的效应

表 2 是不同水肥处理对苹果幼树干物质质量、耗水量和产量的影响。其中灌水量对干物质质量、

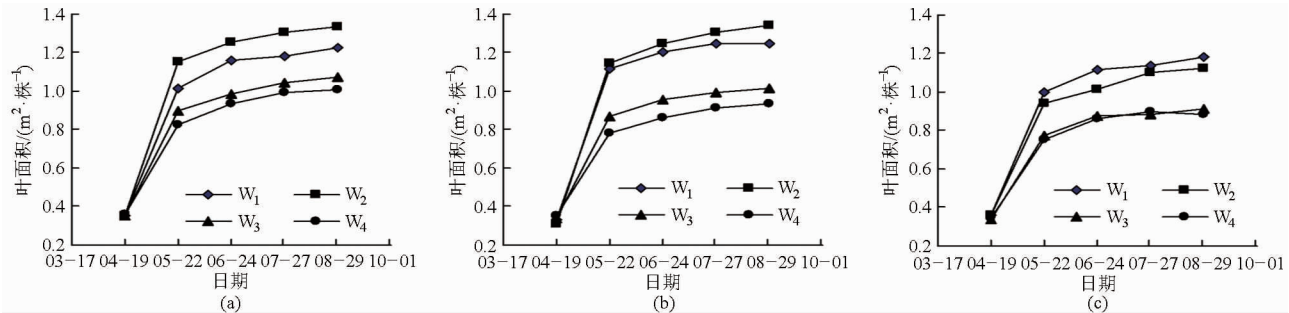


图 2 不同水肥处理对苹果幼树叶面积的影响

Fig. 2 Effects of different water and fertilizer treatments on leaf area (LA) of young apple tree

(a) 高肥 F₁ (b) 中肥 F₂ (c) 低肥 F₃

耗水量和产量的影响都达到极显著水平 ($P < 0.01$);施肥量对产量的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$),对干物质质量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$),对耗水量的影响不显著;水肥交互作用仅对产量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$),对干物质质量和耗水量的影响不显著。

表 2 不同水肥处理对苹果幼树干物质质量、耗水量和产量的影响

Tab. 2 Effects of different water and fertilizer treatments on dry mass, water consumption and yield of young apple tree

施肥处理	水分处理	干物质质量/ (g·株 ⁻¹)	耗水量/ (L·株 ⁻¹)	产量/ (g·株 ⁻¹)
F ₁	W ₁	780.44 ± 19.09 ^a	276.23 ± 7.17 ^a	2 080.88 ± 38.11 ^a
	W ₂	768.78 ± 11.44 ^a	252.97 ± 10.19 ^{bc}	1 962.30 ± 55.01 ^{bc}
	W ₃	603.63 ± 28.26 ^{bc}	28.26 ± 9.90 ^d	1 390.40 ± 35.98 ^e
	W ₄	450.14 ± 22.88 ^d	171.82 ± 5.73 ^{ef}	921.29 ± 37.80 ^g
F ₂	W ₁	774.26 ± 17.38 ^a	269.91 ± 5.96 ^{ab}	2 035.40 ± 33.99 ^{ab}
	W ₂	762.82 ± 14.83 ^a	230.16 ± 12.01 ^{cd}	1 924.15 ± 28.64 ^c
	W ₃	583.34 ± 18.79 ^c	184.44 ± 6.43 ^e	1 317.36 ± 34.51 ^{ef}
	W ₄	433.58 ± 28.16 ^d	157.50 ± 8.70 ^f	905.30 ± 22.74 ^g
F ₃	W ₁	649.44 ± 34.64 ^b	245.83 ± 16.91 ^c	1 937.00 ± 48.69 ^c
	W ₂	627.37 ± 30.94 ^{bc}	217.94 ± 10.90 ^d	1 788.90 ± 51.62 ^d
	W ₃	486.73 ± 28.66 ^d	180.65 ± 14.14 ^e	1 258.32 ± 30.21 ^f
	W ₄	378.11 ± 28.42 ^e	156.20 ± 6.20 ^f	870.35 ± 9.89 ^g
显著性检验 (<i>F</i> 值)				
水分		162.653 ^{**}	1 699.485 ^{**}	3 558.888 ^{**}
施肥		64.605 [*]	8.391	177.996 ^{**}
水分 × 施肥		1.411	1.057	7.657 [*]

如表 2 所示,施肥量一定的条件下,苹果幼树干物质质量、耗水量和产量总体均表现为:W₁ > W₂ > W₃ > W₄;灌水量一定的条件下,苹果幼树干物质质量、耗水量和产量总体均表现为:F₁ > F₂ > F₃,由此可以说明苹果幼树干物质的积累、全生育期耗水量和产量随着灌水量和施肥量的增加呈现出明显的上升趋势,在水肥耦合条件下,苹果幼树干物质质量和耗水量可以反映其水肥亏缺状况和最终的苹果产

量。干物质质量和耗水量最大值一般都出现在高水高肥的 F₁W₁ 处理,最小值都出现在低水低肥的 F₃W₄ 处理,这说明苹果幼树在高水高肥的情况下耗水量最大,干物质质量积累的最多,干物质质量的积累与其耗水量密切相关。水肥耦合条件下,苹果产量最高和最低的处理也分别为 F₁W₁ 和 F₃W₄ (F₁W₁ 比 F₃W₄ 增加 139.1%),充分供水处理 W₁ 比重度亏缺灌溉处理 W₄ 产量平均增加 124.4%,高肥处理 F₁ 比低肥处理 F₃ 产量平均增加 8.5%,由此可见,灌水量对产量的影响明显高于施肥量的影响。

2.4 水肥耦合对苹果幼树果实品质的效应

2.4.1 水肥耦合对苹果物理品质指标的效应

表 3 是不同水肥处理对苹果物理品质指标的影响。其中,灌水量对苹果单果质量和果实硬度产生极显著影响 ($P < 0.01$),对苹果着色指数和果形指数产生显著影响 ($P < 0.05$);施肥量只对苹果单果质量和果实硬度产生显著影响 ($P < 0.05$);水肥交互作用对苹果单果质量、果实硬度、着色指数和果形指数的影响都不显著。

如表 3 所示,施肥量一定的条件下,苹果单果质量总体表现为:W₂ > W₁ > W₃ > W₄;灌水量一定的条件下,苹果单果质量总体表现为:F₁ > F₂ > F₃,单果质量最大值出现在 F₁W₂ 处理,最小值出现在低水低肥的 F₃W₄ 处理,F₁W₂ 单果质量比 F₃W₄ 和 F₁W₁ 分别增加 34.4% 和 3.8%,这说明轻度亏缺灌溉和增加施肥量有利于提高苹果单果质量。施肥量一定的条件下,苹果果实硬度总体表现为:W₄ > W₃ > W₂ > W₁;灌水量一定的条件下,则总体表现为:F₁ > F₂ > F₃,硬度最大值出现在 F₁W₄ 处理,最小值出现 F₃W₁ 处理,F₁W₄ 比 F₃W₁ 增加 10.8%,这说明亏水处理和增加施肥量有利于提高苹果果实硬度。不同水肥处理下灌水量对苹果着色指数和果形指数有明显的影 响,着色指数基本表现为:W₁ > W₂ > W₃ > W₄,果形指数则基本表现为:W₄ > W₃ > W₂ > W₁,由此可以看出柱状苹果幼树果实着色指

数和果形指数呈现为相反的变化趋势,增加灌水量有利于提高苹果着色指数,降低其果形指数。

2.4.2 水肥耦合对苹果化学品质指标的效应

表 4 是不同水肥处理对苹果化学品质指标的影响。其中,灌水量对苹果维生素 C、可滴定酸和糖酸比产生极显著影响 ($P < 0.01$),对可溶性固形物和

可溶性糖影响不显著;施肥对苹果维生素 C 和可溶性固形物产生极显著影响 ($P < 0.01$),对可溶性糖产生显著影响 ($P < 0.05$),对可滴定酸和糖酸比影响不显著;水肥交互作用仅对苹果维生素 C 和可溶性固形物产生显著影响 ($P < 0.05$)。

表 3 不同水肥处理对苹果物理品质指标的影响

Tab.3 Effects of different water and fertilizer treatments on physical qualities of apple					
施肥处理	水分处理	单果质量/g	硬度/($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	着色指数	果形指数
F ₁	W ₁	190.08±3.46 ^{ab}	8.08±0.12 ^{de}	4.01±0.18 ^a	0.86±0.01 ^{ab}
	W ₂	197.23±5.50 ^a	8.39±0.08 ^{abc}	3.86±0.45 ^{ab}	0.84±0.02 ^b
	W ₃	175.05±4.50 ^{de}	8.47±0.08 ^{ab}	3.36±0.28 ^{bc}	0.89±0.03 ^{ab}
	W ₄	155.22±6.30 ^{gh}	8.58±0.05 ^a	2.97±0.34 ^c	0.91±0.03 ^a
F ₂	W ₁	185.95±3.09 ^{bc}	8.06±0.11 ^e	4.01±0.04 ^a	0.86±0.03 ^{ab}
	W ₂	193.42±2.86 ^{ab}	8.28±0.09 ^{bcd}	3.91±0.34 ^{ab}	0.84±0.03 ^b
	W ₃	165.92±4.31 ^{ef}	8.37±0.08 ^{abc}	3.43±0.13 ^{abc}	0.91±0.01 ^a
	W ₄	152.55±3.79 ^{gh}	8.47±0.11 ^{ab}	3.22±0.01 ^c	0.91±0.02 ^a
F ₃	W ₁	177.00±4.43 ^{cd}	7.74±0.13 ^f	3.81±0.06 ^{ab}	0.86±0.02 ^{ab}
	W ₂	179.89±5.16 ^{cd}	8.18±0.06 ^{cde}	3.91±0.03 ^{ab}	0.86±0.04 ^{ab}
	W ₃	158.54±3.78 ^{fg}	8.28±0.08 ^{bcd}	3.34±0.29 ^{bc}	0.90±0.02 ^{ab}
	W ₄	146.73±1.65 ^h	8.28±0.04 ^{bcd}	3.20±0.18 ^c	0.92±0.02 ^a
显著性检验(<i>F</i> 值)					
水分		1125.112 **	373.364 **	28.501 *	23.436 *
施肥		92.107 *	67.727 *	0.139	0.067
水分×施肥		2.380	1.053	0.735	0.423

表 4 不同水肥处理对苹果化学品质指标的影响

Tab.4 Effects of different water and fertilizer treatments on chemical qualities of apple						
施肥处理	水分处理	维生素 C/ ($\text{mg}\cdot(100\text{g})^{-1}$)	可溶性固形物/ %	可溶性糖/ %	可滴定酸/ %	糖酸比
F ₁	W ₁	3.84±0.06 ^{ab}	13.25±0.18 ^a	11.12±0.15 ^a	0.48±0.04 ^f	23.24±1.75 ^a
	W ₂	3.90±0.04 ^a	13.00±0.05 ^a	11.01±0.13 ^a	0.49±0.03 ^{ef}	22.52±1.56 ^{ab}
	W ₃	3.77±0.06 ^{ab}	12.62±0.28 ^b	10.78±0.12 ^{ab}	0.55±0.04 ^{cde}	19.81±1.07 ^{cde}
	W ₄	3.72±0.04 ^{bcd}	12.33±0.08 ^b	10.50±0.41 ^{bc}	0.62±0.02 ^{ab}	17.10±1.25 ^{efgh}
F ₂	W ₁	3.61±0.06 ^{cde}	12.38±0.06 ^b	10.32±0.15 ^{bcd}	0.49±0.04 ^{ef}	21.14±2.14 ^{abc}
	W ₂	3.75±0.05 ^{bc}	12.31±0.01 ^b	10.41±0.14 ^{bc}	0.51±0.03 ^{def}	20.44±0.86 ^{bcd}
	W ₃	3.59±0.10 ^{def}	12.34±0.29 ^b	10.41±0.25 ^{bc}	0.59±0.10 ^{abc}	17.65±0.10 ^{efg}
	W ₄	3.50±0.08 ^{ef}	11.94±0.23 ^c	9.90±0.16 ^d	0.61±0.10 ^{ab}	16.23±0.64 ^{gh}
F ₃	W ₁	3.47±0.04 ^{ef}	11.90±0.01 ^c	9.91±0.05 ^d	0.52±0.01 ^{def}	19.05±0.42 ^{cdef}
	W ₂	3.57±0.04 ^{ef}	11.86±0.13 ^c	10.10±0.21 ^{cd}	0.56±0.01 ^{bcd}	18.05±0.83 ^{defg}
	W ₃	3.45±0.09 ^f	11.90±0.18 ^c	9.92±0.21 ^d	0.60±0.02 ^{abc}	16.68±0.93 ^{fgh}
	W ₄	3.29±0.08 ^g	11.42±0.10 ^d	9.45±0.13 ^e	0.64±0.02 ^a	14.88±0.28 ^h
显著性检验(<i>F</i> 值)						
水分		65.348 **	5.743 **	6.416	59.857 **	31.608 **
施肥		704.005 **	311.063 **	42.983 *	3.687	8.304
水分×施肥		6.584 *	4.917 *	0.729	2.086	3.045

如表 4 所示,施肥量一定的条件下,苹果维生素 C 含量总体表现为:W₂ > W₁ > W₃ > W₄;灌水量一定的条件下,苹果维生素 C 总体表现为:F₁ > F₂ > F₃,苹果维生素 C 最大值出现在 F₁W₂ 处理,最小值出

现在低水低肥的 F₃W₄ 处理,F₁W₂ 维生素 C 比 F₃W₄ 增加 18.5%,这说明轻度亏缺灌溉和增加施肥量有利于提高苹果维生素 C 含量。灌水处理对苹果可溶性固形物和可溶性糖影响不显著,故灌水量一

定的条件下,苹果可溶性固形物和可溶性糖总体表现为: $F_1 > F_2 > F_3$,高肥 F_1 处理比低肥 F_3 处理可溶性固形物和可溶性糖分别平均增加 8.7%、10.3%,这说明增加施肥量有利于提高苹果果实可溶性固形物和可溶性糖的含量。施肥量对苹果可滴定酸和糖酸比影响不显著,故施肥量一定的条件下,苹果可滴定酸含量总体表现为: $W_1 < W_2 < W_3 < W_4$,糖酸比总体表现为: $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$,充分供水 W_1 处理比重度亏缺 W_4 处理可滴定酸平均降低 19.9%,糖酸比平均增加 31.6%,说明增加灌水量可降低苹果可滴定酸含量,提高苹果糖酸比,不同水肥处理下苹果可滴定酸含量与糖酸比呈相反的态势。

2.5 水肥耦合对苹果幼树水分利用效率的效应

图 3 是不同水肥处理对苹果幼树水分利用效率 (WUE) 的影响,其中灌水量对苹果幼树 WUE 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$, $F = 484.410$);施肥量和水肥交互作用对苹果幼树 WUE 影响均不显著。

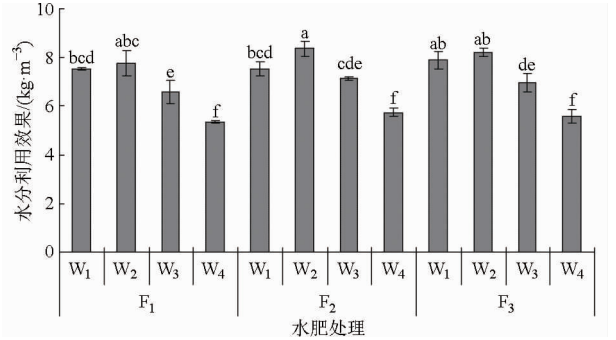


图 3 不同水肥处理对苹果幼树水分利用效率的影响
Fig. 3 Effects of different water and fertilizer treatments on water use efficiency of young apple tree

如图 3 所示,施肥量一定的条件下,苹果幼树 WUE 总体表现为: $W_2 > W_1 > W_3 > W_4$,轻度亏缺灌溉处理 W_2 比充分供水 W_1 和重度亏缺灌溉处理 W_4 WUE 分别平均增加 6.0%、45.9%。在水肥耦合条件下,WUE 最大值基本上出现在 F_2W_2 处理,与 F_1W_1 相比,虽然产量减小了 7.5%,但耗水量却减小了 16.7%,WUE 增加了 11.2%,这也说明高水高肥的 F_1W_1 处理并不能得到最佳的 WUE,最佳的 WUE 出现在 F_2W_2 处理, F_2W_2 处理达到了节水、节肥的最佳水肥耦合模式。

2.6 水肥耦合对苹果幼树肥料偏生产力的效应

图 4 是不同水肥处理对苹果幼树肥料偏生产力 (PFP) 的影响,其中灌水量、施肥量和水肥交互作用分别对苹果幼树 PFP 的影响都达到了极显著水平 ($P < 0.01$, $F = 2\,040.425$; $F = 6\,090.588$; $F = 150.295$)。

如图 4 所示,施肥量一定的条件下,PFP 随着灌水量的增加而增加,总体表现为: $W_1 > W_2 > W_3 >$

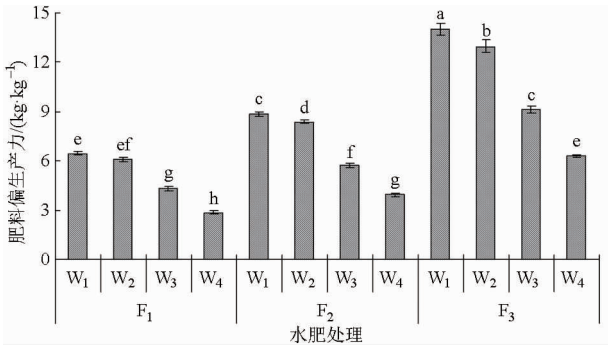


图 4 不同水肥处理对苹果幼树肥料偏生产力的影响
Fig. 4 Effects of different water and fertilizer treatments on partial factor productivity of young apple tree

W_4 ,充分供水处理 W_1 比其他亏水处理 W_2 、 W_3 、 W_4 PFP 分别平均增加 7.1%、52.2% 和 123.9%;施肥量一定的条件下,PFP 随着施肥量的减少而增加,总体表现为: $F_3 > F_2 > F_1$,低肥 F_3 处理比高肥 F_1 和中肥 F_2 处理 PFP 分别平均增加 115.0%、57.8%;水肥交互作用下 PFP 最大值出现在 F_3W_1 和 F_3W_2 处理,分别为 14.04、12.97 kg/kg,这说明高水低肥能够产生较高的肥料偏生产力。

2.7 水肥耦合条件下苹果产量与干物质质量的关系

图 5 是不同水肥处理下苹果幼树产量与干物质质量的关系。如图 5 所示,由苹果产量与干物质质量之间的相关分析可知,二者呈现线性分布规律,且具有较强的相关性,决定系数 R^2 为 0.908 5,达到了极显著的水平 ($P < 0.01$)。这说明不同水肥处理对苹果幼树干物质质量与产量的影响规律基本一致,呈现正相关性,结合不同水肥处理对产量和干物质累积的影响表明,适宜的水肥供应对于提高产量与干物质质量有积极作用。

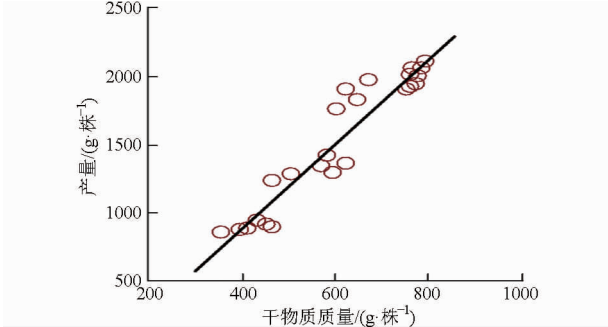


图 5 苹果幼树产量与干物质质量的关系
Fig. 5 Relationship between yield and dry mass of young apple tree

3 讨论

作物基础生长指标是最容易监测获得的基本数据,是决定作物其他指标的最关键因素,适量的水肥调控有利于作物的生长。国外研究表明,适量的氮、

磷肥供应有利于作物营养器官(根、茎、叶等)的发育和植株群体指标的协调发展,可增加植株和茎生长量,同时又能够改善水分胁迫条件下作物叶片伸展缓慢和叶面积减小等不良效应,增加作物干物质的积累,减少产量损失^[25-26]。国内研究表明,水肥对冬小麦株高和叶面积指数有明显影响,随灌水量和施肥量的增加而增加^[27];水分逆境条件下,氮肥对冬小麦植株生长和干物质积累以及氮素的吸收都具有明显的调节作用,任何生育期内水分亏缺都会影响冬小麦的株高、叶面积、干物质累积及对氮素的吸收^[28];不同灌水量对黄瓜株高、叶面积指数、干物质质量均有明显影响,黄瓜株高、叶面积指数、干物质质量均随灌水量的增加而增加^[29]。这些结果与本研究的结论基本一致。蒋耿民等^[30]在施氮量对陕西关中地区夏玉米生理生长的影响中得出,在相同的揭膜时期施氮处理的夏玉米株高、叶面积均高于不施氮处理,而高氮和低氮处理间无显著差异,这与本研究的结论不太一致,本研究表明高肥条件下苹果幼树植株生长量和叶面积均大于低肥处理。诸葛玉平等^[31]认为过高的灌水和施肥量在番茄生长旺盛期反而会抑制茎粗增长,番茄株高、生物量分别随灌水下限的增大而减小,这也与本研究的结论不一致,本研究表明施中肥和高肥在一定的条件下苹果幼树株高、叶面积的增长和干物质的积累差异不明显,但高肥处理并不会抑制苹果幼树株高、叶面积的增长和干物质的积累,随着灌水上下限的增大苹果幼树株高和干物质质量基本都呈增大的趋势。

Turner^[32]研究指出,在作物特定生育期适度水分亏缺有助于提高作物产量。干旱缺水并不总是降低作物产量,在一定时期水分亏缺对增产和提高水分利用效率都有利^[33]。水肥耦合存在阈值反应,低于阈值,增加水肥投入增产效果明显;高于阈值,增产作用不大^[34]。增加灌水量或者增施氮肥都可以增加甜瓜产量^[35],而过量灌水并没有提高产量^[36],当氮肥过量时,会对产量产生负效应^[37]。本研究表明,随着灌水量和施肥量的增加,苹果产量呈梯度上升的趋势,总体分别表现为: $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$ 、 $F_1 > F_2 > F_3$,灌水量对产量的影响明显高于施肥量的影响。

水分是作物进行光合作用制造有机质的原料,是向作物体内输送营养的媒介,决定着作物的生长状况、产量和品质。土壤干旱条件下氮肥可以显著影响作物的干物质累积、营养吸收与分配,从而改变作物产量与品质的形成^[38-39]。滴灌施肥条件下,增加灌水量可以提高果实产量和氮肥利用效率,而增大施氮量则降低了黄瓜的品质及氮素利用效率^[13];

适宜的灌水或施肥量可以促进西瓜的生长,提高其光合效率,从而最终增加西瓜产量,改善西瓜品质^[40];降低施氮量对番茄产量影响较小,但能增加果实干物质质量,改善果实品质^[41]。Ozbahce 等^[42]通过对半干旱地区番茄的喷灌试验得出,适当的水分亏缺不仅不会影响番茄的产量,而且还可以提高其品质。本研究表明,轻度亏缺灌溉和增加施肥量有利于提高苹果单果质量;亏水处理和增加施肥量有利于提高苹果果实硬度;着色指数基本表现为: $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$,果形指数则基本表现为: $W_4 > W_3 > W_2 > W_1$,苹果幼树果实着色指数和果形指数呈现为相反的变化趋势;轻度亏缺灌溉和增加施肥量有利于提高苹果维生素 C 含量;灌水量对苹果可溶性固形物和可溶性糖影响不显著,增加施肥量有利于提高苹果果实可溶性固形物和可溶性糖的含量;施肥量对苹果可滴定酸和糖酸比影响不显著,故施肥量一定的条件下,苹果可滴定酸含量总体表现为: $W_1 < W_2 < W_3 < W_4$,糖酸比总体表现为: $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$ 。

肥料偏生产力(PFP)是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的指标。Fritsch 等^[43]认为,在营养生长和生殖生长部分增长非常均衡的条件下,最高施氮量时可以获得最高的氮肥利用效率,反之,过量施氮会打破营养生长与生殖生长的平衡,进而导致营养生长过于旺盛,推迟棉花成熟并且降低棉花产量。吴立峰等^[44]在新疆大田棉花滴灌施肥的研究中指出,施肥量和灌水量对 PFP 的影响有极显著的交互作用;邢英英等^[45]在温室番茄滴灌施肥试验中指出,增大灌水量和降低施肥量条件下,番茄的肥料偏生产力增大。这些结果与本研究的结论基本一致,本研究表明,施肥量一定的条件下, PFP 随着灌水量的增加而增加,灌水量一定的条件下, PFP 随着施肥量的减少而增加,低肥虽然可以获得最高的肥料利用效率,但是减产比较严重,中肥和高水处理更有利于兼顾产量与肥料利用效率,可以在不影响产量的同时,大幅度节省肥料投入量。

4 结论

(1) F_2W_2 处理与 F_1W_1 处理相比苹果幼树植株生长量和叶面积大小并没有降低, F_2W_2 处理是促进苹果幼树生长的最佳水肥组合,起到了节水、节肥的目的。

(2) 充分供水处理 W_1 比重度亏缺灌溉处理 W_4 产量平均增加 124.4%,高肥处理 F_1 比低肥处理 F_3 产量平均增加 8.5%,苹果产量最高和最低的处理分别为 F_1W_1 和 F_3W_4 (F_1W_1 比 F_3W_4 增加

139.1%);产量与干物质质量之间具有较强的线性相关性,决定系数 $R^2=0.9085$ 。

(3)单果质量最大值、最小值分别出现在 F_1W_2 、 F_3W_4 处理, F_1W_2 单果质量比 F_3W_4 和 F_1W_1 分别增加了 34.4% 和 3.8%;硬度最大值、最小值分别出现在 F_1W_4 、 F_3W_1 处理, F_1W_4 硬度比 F_3W_1 增加 10.8%, 亏水处理和增加施肥量有利于提高苹果果实硬度;增加灌水量提高了苹果着色指数,却降低其果形指数。

(4)轻度亏缺灌溉和增加施肥量有利于提高苹果维生素 C 含量;灌水量对苹果可溶性固形物和可

溶性糖影响不显著,增加施肥量有利于提高苹果可溶性固形物和可溶性糖的含量;施肥量对苹果可滴定酸和糖酸比影响不显著,增加灌水量可降低苹果可滴定酸含量,提高苹果糖酸比。

(5)水肥耦合条件下,高水低肥能够产生较高的 PFP; WUE 最大值出现在 F_2W_2 处理,与 F_1W_1 相比,虽然产量减小 7.5%,但耗水量减小 16.7%, WUE 增加 11.2%,高水高肥的 F_1W_1 处理并不能得到最大的 WUE,最大的 WUE 出现在 F_2W_2 处理, F_2W_2 处理达到了节水、节肥的最佳水肥耦合模式。

参 考 文 献

- 1 Sassenrath-Cole G F. Dependence of canopy light distribution on leaf and canopy structure for two cotton (*Gossypium*) species[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(1-2): 55-72.
- 2 Lafarge T A, Hammer G L. Predicting plant leaf area production: shoot assimilate accumulation and partitioning, and leaf area ratio, are stable for a wide range of sorghum population densities[J]. Field Crops Research, 2002, 77(2): 137-151.
- 3 Zhao D, Huang L, Li J, et al. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(1): 25-33.
- 4 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1247-1253.
Ma Guosheng, Xue Jiquan, Lu Haidong, et al. Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1247-1253. (in Chinese)
- 5 刘小刚, 张富仓, 田育丰, 等. 水氮处理对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 24(11): 19-24.
Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Tian Yufeng, et al. Effects of irrigation and fertilization treatments on transfer and utilization of water and nitrogen in maize root zone[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 24(11): 19-24. (in Chinese)
- 6 刘小刚, 张岩, 程金焕, 等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 160-166.
Liu Xiaogang, Zhang Yan, Cheng Jinhuan, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young Arabica coffee tree under water and nitrogen coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 160-166. (in Chinese)
- 7 周罕觅, 张富仓, 李志军, 等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 171-180.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 171-180. (in Chinese)
- 8 张宾, 赵明, 董志强, 等. 2007. 作物产量“三合结构”定量表达及高产分析[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1674-1681.
Zhang Bin, Zhao Ming, Dong Zhiqiang, et al. “Three combination structure” quantitative expression and high yield analysis in crops[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10): 1674-1681. (in Chinese)
- 9 张洁瑕. 高寒半干旱区蔬菜水肥耦合效应及硝酸盐限量指标的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2003.
- 10 Favati F, Lovelli S, Galgano F, et al. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122(4): 562-571.
- 11 Patanè C, Tringali S, Sortino O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(4): 590-596.
- 12 Cabello M J, Castellanos M T, Romojaro F, et al. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 866-874.
- 13 Zhang H, Chi D, Qun W, et al. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization under subsurface drip irrigation in solar greenhouse[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(6): 921-930.
- 14 Baselga Yrisarry J J, Prieto Losada M H, Rodríguez del Rincon A. Response of processing tomato to three different levels of water and nitrogen applications [C] // International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, Acta Horticulturae 335, 1992: 149-156.
- 15 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性固形物含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(5): 893-901.
Niu Xiaoli, Zhou Zhenjiang, Li Rui, et al. Effects of water and fertilizers applied on the soluble solid content in tomato under

- alternate partial root-zone irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(5): 893–901. (in Chinese)
- 16 刘明池, 张慎好, 刘向莉. 亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊): 92–95.
Liu Mingchi, Zhang Shenhao, Liu Xiangli. Effects of different deficit irrigation periods on yield and fruit quality of tomato[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp.): 92–95. (in Chinese)
- 17 朱德兰, 王文娥, 楚杰. 黄土高原丘陵区红富士苹果水肥耦合效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(1): 152–155.
Zhu Delan, Wang Wen'e, Chu Jie. Study on the coupling effect of water and fertilizer on apple in hilly area of Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(1): 152–155. (in Chinese)
- 18 孙霞, 柴仲平, 蒋平安. 氮磷钾配比对南疆红富士苹果产量和品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(6): 130–134.
Sun Xia, Chai Zhongping, Jiang Ping'an. Different ratios of N, P and K fertilizers on yield and quality of Fuji apple in south Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(6): 130–134. (in Chinese)
- 19 王巧仙, 张江红, 张玉星. 水肥耦合对梨园土壤养分和果实品质的影响[J]. *中国果树*, 2013(4): 18–23.
- 20 Oweis T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1239–1248.
- 21 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]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 77–87.
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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 77–87. (in Chinese)
- 22 焦蕊, 于丽辰, 贺丽敏, 等. 有机肥施肥方法和施肥量对富士苹果果实品质的影响[J]. *河北农业科学*, 2011, 15(2): 37–38, 61.
Jiao Rui, Yu Lichen, He Limin, et al. Effects of fertilization methods and application rate of organic fertilizer on fruit quality of red Fuji apple[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(2): 37–38, 61. (in Chinese)
- 23 邓忠, 白丹, 翟国亮, 等. 膜下滴灌水氮调控对南疆棉花产量及水氮利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2525–2532.
Deng Zhong, Bai Dan, Zhai Guoliang, et al. Effects of water and nitrogen regulation on the yield and water and nitrogen use efficiency of cotton in south Xinjiang, Northwest China under plastic mulched drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2525–2532. (in Chinese)
- 24 Ierna A, Lombardo G P, Mauromicale G. Tuber yield, water and fertilizer productivity in early potato as affected by a combination of irrigation and fertilization[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 101(1): 35–41.
- 25 Longnecker N, Kirby E J M, Robson A. Leaf emergence, tiller growth, and apical development of nitrogen-dificient spring wheat[J]. *Crop Science*, 1993, 33(1): 154–160.
- 26 Rodriguez D, Goudriaan J. Effects of phosphorus and drought stresses on dry matter and phosphorus allocation in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18(11): 2501–2517.
- 27 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节[J]. *生态学报*, 1996, 16(3): 256–264.
Liang Yinli. The adjustment of soil water and nitrogen phosphorus nutrition on root system growth of wheat and water use[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 256–264. (in Chinese)
- 28 祁有玲, 张富仓, 李开峰. 水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2399–2405.
Qi Youling, Zhang Fucang, Li Kaifeng. Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen uptake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2399–2405. (in Chinese)
- 29 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 376–381.
Li Shao, Xue Xuzhang, Guo Wenshan, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield and water use efficiency in greenhouse potted cucumber[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 376–381. (in Chinese)
- 30 蒋耿民, 李援农, 周乾. 不同揭膜时期和施氮量对陕西关中地区夏玉米生理生长、产量及水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1065–1072.
Jiang Gengmin, Li Yuannong, Zhou Qian. Effects of different uncovering plastic film periods and nitrogen rates on physiology, growth, yield and water use efficiency of summer maize in Guanzhong Region, Shaanxi Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(5): 1065–1072. (in Chinese)
- 31 诸葛玉平, 张玉龙, 张旭东, 等. 塑料大棚渗灌灌水下限对番茄生长和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 767–771.
Zhuge Yuping, Zhang Yulong, Zhang Xudong, et al. Effects of lower limit of subsurface drip irrigation on tomato growth and its yield in plastic tunnel[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 767–771. (in Chinese)
- 32 Turner N C. Plant water relations and irrigation management[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1): 59–73.
- 33 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. *应用生态学报*, 1991, 2(1): 70–76.
Shan Lun, Xu Meng. Water-svaing ariculture and its physio-ecological bases[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991,

- 2(1): 70 – 76. (in Chinese)
- 34 王新, 马富裕, 刁明, 等. 不同施氮水平下加工番茄植株生长和氮素积累与利用率的动态模拟[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1043 – 1050.
Wang Xin, Ma Fuyu, Diao Ming, et al. Dynamics simulation on plant growth, N accumulation and utilization of processing tomato at different N fertilization rates[J]. Agricultural Water Management, 2014, 25(4): 1043 – 1050. (in Chinese)
- 35 吴海华, 盛建东, 陈波浪, 等. 不同水氮组合对全立架栽培伽师瓜产量与品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 885 – 892.
Wu Haihua, Sheng Jiandong, Chen Bolang, et al. Effect of different irrigation and nitrogen levels on the yield and quality of trellis-cultivated custard apple (*Cucumis melo* var. *saccharinus* Naud) [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(4): 885 – 892. (in Chinese)
- 36 Fabeiro C, de Santa Olalla F M, De Juan J A. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(2): 93 – 105.
- 37 Kirnak H, Higgs D, Kaya C, et al. Effects of irrigation and nitrogen rates on growth, yield, and quality of muskmelon in semiarid regions[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28(4): 621 – 638.
- 38 庞云, 刘景辉, 郭顺美, 等. 不同饲用高粱品种群体光合性能指标变化的研究[J]. 西北农业学报, 2007, 16(5): 180 – 183.
Pang Yun, Liu Jinghui, Guo Shunmei, et al. The study on the index of community photosynthesis capability of different varieties of forage sorghum[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2007, 16(5): 180 – 183. (in Chinese)
- 39 Cabello M J, Castellanos M T, Romojaro F, et al. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 866 – 874.
- 40 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 109 – 118.
Yang Xiaozhen, Zhang Xian, Ma Jianxiang, et al. Effects of drip fertigation on growth, yield and quality of watermelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 109 – 118. (in Chinese)
- 41 Bénard C, Gautier H, Bourgaud F, et al. Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(10): 4112 – 4123.
- 42 Ozbahce A, Tari A F. Effects of different emitter space and water stress on yield and quality of processing tomato under semi-arid climate conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(9): 1405 – 1410.
- 43 Fritschi F B, Roberts B A, Travis R L, et al. Response of irrigated acala and pima cotton to nitrogen fertilization[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(1): 133 – 146.
- 44 吴立峰, 张富仓, 周罕觅, 等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 137 – 146.
Wu Lifeng, Zhang Fucang, Zhou Hanmi, et al. Effect of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 137 – 146. (in Chinese)
- 45 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 110 – 121.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 110 – 121. (in Chinese)