

基于多目标综合评价的滴灌苹果水肥协同调控研究

周罕觅 孙旗立 张 硕 王升升 秦 龙 李心平
(河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 为探寻滴灌水肥一体化条件下北方半干旱地区苹果树种植的最佳水肥协同调控制度,设置灌水与施肥 2 个试验因素,滴灌灌水量设 4 个水平,根据田间持水率 θ_f 的不同百分比确定灌水下限:75% $\theta_f \sim 90\%$ θ_f (W1)、65% $\theta_f \sim 80\%$ θ_f (W2)、55% $\theta_f \sim 70\%$ θ_f (W3)、45% $\theta_f \sim 60\%$ θ_f (W4);滴灌施肥量设 3 个水平,N、P₂O₅、K₂O 与风干土质量比分别为:0.9、0.3、0.3 g/kg (F1);0.6、0.3、0.3 g/kg (F2);0.3、0.3、0.3 g/kg (F3),分析滴灌施肥协同调控对苹果树生长生理指标、生物质量与产量、果实品质以及水肥利用效率的影响,最终基于 TOPSIS 法建立以高效、高产、高品为目标的苹果综合指标评价模型。结果表明,滴灌施肥协同调控下苹果树植株生长量、基茎生长量和叶面积最大值均出现在 F1W2 处理,苹果树净光合速率、蒸腾速率和叶绿素含量基本上随灌水量和施肥量的增加而增加,最大值均出现在 F1W1 处理,全生育期干物质质量和产量在 F1W1 和 F1W2 处理下差异不明显,水分利用效率和水分生产率最大值均出现在 F1W2 处理,与 F1W1 处理相比,分别提高 10.6% 和 11.1%,肥料偏生产力基本上随灌水量的增加和施肥量的减少而增加,增加灌水量有利于提高苹果着色指数、果形指数和糖酸比,增加施肥量有利于提高苹果单果质量、维生素 C 含量和可溶性糖含量。综合 4 类 17 个指标建立 TOPSIS 多目标综合评价模型,代入各指标最终权重计算得出 F1W2 处理贴近期度最大,为 0.765 3,此处理条件下苹果综合指标评价最优,而 F3W4 处理最差,仅为 0.258 3。综上,本试验水肥协同调控下灌水量下上限控制在田间持水率的 65% $\sim$ 80%,施 N、P₂O₅、K₂O 与风干土质量比分别为 0.9、0.3、0.3 g/kg 是苹果树的最佳水肥管理制度。

关键词: 苹果;滴灌施肥;协同调控;生长发育;TOPSIS;综合评价

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0335-12 OSID: 

Cooperative Regulation of Water and Fertilizer in Drip Irrigation Apple Based on Multi-objective Comprehensive Evaluation

ZHOU Hanmi SUN Qili ZHANG Shuo WANG Shengsheng QIN Long LI Xinping
(College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to explore the best water-fertilizer cooperative control system for apple tree planting in semi-arid northern China under the condition of integrated drip irrigation and fertilization, two experimental factors (irrigation and fertilization) were set, among which irrigation was 75% $\theta_f \sim 90\%$ θ_f (W1), 65% $\theta_f \sim 80\%$ θ_f (W2), 55% $\theta_f \sim 70\%$ θ_f (W3) and 45% $\theta_f \sim 60\%$ θ_f (W4) of field water capacity, respectively, and fertilization mass ratio of N, P₂O₅, K₂O to air-dried soil was 0.9 g/kg, 0.3 g/kg, 0.3 g/kg (F1), 0.6 g/kg, 0.3 g/kg, 0.3 g/kg (F2), and 0.3 g/kg, 0.3 g/kg, 0.3 g/kg (F3), respectively. The effects of cooperative regulation of drip irrigation and fertilization on the growth physiological indexes, dry matter quality and yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of apple trees were analyzed. Finally, an apple comprehensive index evaluation model aiming at high efficiency, yield and fruit quality was established based on TOPSIS method. The results showed that under the cooperative control of drip irrigation and fertilization, the maximum values of apple tree growth, basal stem growth and leaf area appeared in F1W2 treatment. The net photosynthetic rate, transpiration rate and chlorophyll content of apple tree were basically increased with the increase of irrigation amount

收稿日期: 2023-03-22 修回日期: 2023-07-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(52379039、51909079)、河南省科技攻关计划项目(182102310836)和河南科技大学青年骨干教师项目(13450001)
作者简介: 周罕觅(1986—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhouhm@163.com
通信作者: 李心平(1973—),男,教授,博士,主要从事农业工程理论与技术研究,E-mail: aalxp@126.com

and fertilizer application rate, and the maximum values appeared in F1W1 treatment. There was no significant difference between F1W1 and F1W2 in dry matter quality and yield during the whole growth period, and the maximum value of water use efficiency and water productivity appeared in F1W2 treatment, which was increased by 10.6% and 11.1% compared with that of F1W1 treatment, respectively. Fertilizer partial productivity was basically increased with irrigation increasing and fertilizer decreasing. Increasing irrigation amount was beneficial to increase apple color index, fruit shape index and sugar-acid ratio, and increasing fertilizer amount was beneficial to increase apple fruit quality, vitamin C content and soluble sugar content. The TOPSIS multi-objective comprehensive evaluation model was established by synthesizing 17 indexes of four categories, and the final weight value of each index was taken into the calculation. It was concluded that the closest degree of F1W2 treatment was 0.765 3, and the comprehensive index evaluation of apple was the best under this treatment, while that of F3W4 treatment was only 0.258 3. In conclusion, F1W2 treatment under the cooperative control of drip irrigation and fertilization was the best water and fertilizer management system for apple trees.

Key words: apple; drip irrigation and fertilization; cooperative regulation; growth and development; TOPSIS; comprehensive evaluation

0 引言

目前我国在实际农田生产中水肥利用效率与发达国家相比仍然较低,造成我国水肥利用率低的主要原因包括:①过量灌溉,农业实际种植生产中大水漫灌方式还普遍存在,对农田造成了肥料大量流失和土壤侵蚀板结^[1]。②过量施肥,农民缺乏施肥知识,普遍存在高肥高产的意识,过量施肥不仅造成作物贪青晚熟,生长发育不正常,而且造成肥料浪费和成本增加,严重污染了环境,影响产品的品质和产量^[2]。因此,以水促肥,以肥调水,两者协同调控是种植作物获得高水肥效的最佳途径。

果树作为经济作物,经营果园是增加农民收入的重要途径之一,现阶段在果园的实际种植生产中滴灌水肥一体化技术是较好的提高水肥利用率的水肥协同调控技术之一^[3-6]。然而,目前关于我国北方干旱或半干旱区滴灌水肥一体化对果树生长发育指标的协同效应研究还处于初步探索阶段。张超等^[7]探究了滴灌水肥一体化条件下适宜葡萄树生长并有利于提高葡萄产量和品质的水肥协同模式;张建锴等^[8]研究水肥一体化条件下滴灌水量和追施氮量对苹果生长指标、产量和品质的影响,以达到节水节肥的目的,这些研究主要集中在田间试验指标的规律性分析,而关于苹果的综合评价分析目前主要采用回归分析、主成分分析和聚类分析法对果实品质指标的综合评价^[9-10],这些算法只能对部分主要品质指标进行综合评价,而且均是以苹果品质为单一目标,基于 TOPSIS 法的高效、高产、高品多目标苹果综合指标评价模型还鲜有报道。前人采用熵权法和 TOPSIS 法分析得出陕北沙土马铃薯种植系统中兼顾高产、优质和水肥高效的参数组合^[11];使用 TOPSIS 方法进行多目标参数决策,以确定最适合

种植的果树^[12];以及建立了基于花生水分生产率、产量、品质和经济收益为多目标的 TOPSIS 综合评价方法,获得了最佳水肥组合^[13]。因此,本研究探讨滴灌水肥一体化协同调控对苹果树生长生理指标、干物质量与产量、果实品质以及水肥利用效率的影响,在此基础上建立以高效、高产、高品为多目标的苹果 TOPSIS 综合指标评价模型,以期为北方半干旱地区苹果科学合理的灌溉和施肥制度与品质调控策略提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2020 年 3—11 月在河南省洛阳市河南科技大学西苑校区果园试验棚(112°38'E,34°67'N)内进行,海拔 172 m,属于北方半湿润半干旱地区,年平均气温 12~15℃,年平均降水量为 550~600 mm,降雨多集中在 7—9 月,年平均蒸发量为 1 200 mm,无霜期为 218 d,年平均日照时数为 2 291.6 h。

试验供试土壤为当地褐土,桶栽进行(桶高 50 cm,直径 35 cm),每桶装土 30 kg(土壤自然干燥后磨细过 5 mm 筛),装土容重 1.31 g/cm³,土壤理化性质为:硝态氮质量比 16.4 mg/kg、铵态氮质量比 8.3 mg/kg、有效磷质量比 13.2 mg/kg、速效钾质量比 198 mg/kg、pH 值 8.03、田间持水率 24.1%。供试果树为 4 a 生红富士苹果树(基砧为黄海棠),苹果树于 2020 年 3 月 21 日开始水肥处理。

1.2 试验设计

试验采用滴灌水肥一体化方式进行,滴灌管布设在桶沿上方基砧部,设灌水和施肥 2 因素,其中灌水设 4 个水平,施肥设 3 个水平,试验进行完全组合设计,共 12 个处理 3 次重复,选取 36 株长势和大小均一的苹果树。试验处理如表 1 所示,氮、磷、钾肥

分别为尿素、磷酸氢二铵和硫酸钾,肥料溶解后通过文丘里施肥器一次性随水施入。采用称重法和取土干燥法控制土壤质量含水率,含水率达到下限时灌水,达到上限时停止灌水,灌水量计算后通过水表控制。

表 1 试验处理设计
Tab.1 Experimental treatments

施肥处理(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 与风干土 质量比)/(g·kg ⁻¹)	灌水处理			
	W1(充分灌水)	W2(轻度亏缺)	W3(中度亏缺)	W4(重度亏缺)
高肥 F1(0.9、0.3、0.3)	灌水上限为 90% θ _f ,	灌水上限为 80% θ _f ,	灌水上限为 70% θ _f ,	灌水上限为 60% θ _f ,
中肥 F2(0.6、0.3、0.3)	灌水下限为 75% θ _f	灌水下限为 65% θ _f	灌水下限为 55% θ _f	灌水下限为 45% θ _f
低肥 F3(0.3、0.3、0.3)				

注:θ_f为田间持水率。

1.3 测定指标及方法

(1) 植株生长量和基茎生长量测定

用钢卷尺从桶沿固定标记点开始,到树顶最高点测量高度,不同时间段的差值即为植株生长量。用电子游标卡尺从基础上部固定标记点开始,采用十字交叉法测量基茎,取平均值,不同时间段的差值即为基茎生长量。全生育期生长总量为各生育期生长量累加值。

(2) 叶面积测定

植株单个叶片叶面积采用 Li-3000C 型手持式叶面积仪(Li-Cor 公司,美国)在每个生长期测定一次,随机选取上中下各方向叶片 10 片,测定后求平均值作为单片叶面积,植株叶面积为单片叶面积与叶片数乘积,全生育期叶面积采用成熟期叶面积测定值。

(3) 净光合速率和蒸腾速率测定

选择关键生育期-坐果膨大期 10:00(晴天),使用 Li-6400 型光合测定仪(Li-Cor 公司,美国),对不同水肥处理苹果树中上部完整叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)等光合指标进行测定。每株苹果树选择 3 片树叶,每次测定取 3 个稳定数据取平均值。

(4) SPAD 值测定

使用 SPAD-502Plus 型叶绿素计(柯尼卡美公司,日本)测定叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)。每棵树随机选取上中下各方向 12 片叶子测试 SPAD 值,然后求平均值,测量位置为叶片叶柄一侧 2/3 处。

(5) 干物质量和产量测定

将所取苹果树基础部与地下部分离,去掉表面的尘土放入干燥箱在 105℃ 下杀青 30 min,75℃ 干燥至质量恒定,之后放入干燥器中冷却,用电子天平称其质量,即为干物质量。

在果实成熟期内,连续采摘不同处理的果实,使用电子天平对果实质量进行称量测定产量。

(6) 水分利用效率、水分生产率与肥料偏生产力计算

水分利用效率(Water use efficiency, WUE,

μmol/mmol)计算公式为

$$WUE = P_n / T_r \tag{1}$$

作物水分生产率(Crop water productivity, CWP, kg/m³)反映作物产出量与其耗水量的关系,定义为^[14]

$$CWP = D_m / ET \tag{2}$$

式中 D_m——干物质量 ET——耗水量

肥料偏生产力(Fertilizer partial productivity, PFP, kg/kg)计算公式为^[15]

$$PFP = Y / F_T \tag{3}$$

式中 Y——产量

F_T——施入 N、P₂O₅、K₂O 总量

(7) 苹果果实品质测定

在果实成熟期内,连续采摘不同处理苹果树的果实,使用电子天平对果实质量进行称量,每个处理测定 20 个,求出平均单果质量。着色指数采用 5 个等级表示:1 级(着色面积小于 20%)、2 级(着色面积为 20%~40%)、3 级(着色面积为 40%~60%)、4 级(着色面积为 60%~80%)、5 级(着色面积大于 80%)。用电子游标卡尺测量苹果的横向直径与纵向直径,计算纵径与横径的比值,得出果形指数。

果实维生素 C 含量采用钼蓝比色法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;果实酸度采用酸碱滴定法测定,并计算糖酸比。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据整理和图表绘制;采用 Yaahp 软件设计解算苹果综合评价层次模型;使用 SPSS 26 软件进行数据分析与显著性检验;利用 SPSSPRO 进行各项指标的权重计算及综合评价分析。

2 结果与分析

2.1 滴灌施肥对苹果树生长指标的影响

滴灌施肥对苹果树生长量的影响如图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同)所示。从图中可以看出,灌水量相同时,苹果树

植株生长量随施肥量的增加而增加;施肥量相同时,在 F1 和 F2 施肥处理下,植株生长量由大到小依次为 W2、W1、W3、W4,在 F3 施肥处理下,依次为 W1、W2、W3、W4,这说明在一定施肥量区间下,轻度的亏水灌溉反而更有利于苹果树植株的生长,但在低肥条件下依旧表现为随灌水量的增加而增加。在

F1、F2 和 F3 处理下,植株生长总量分别为 205.1、189.2、167.3 cm,F2 和 F3 分别比 F1 减少 7.8% 和 18.4%;在 W1、W2、W3 和 W4 处理下,植株生长总量分别为 150.2、153.8、136.5、121.1 cm,W2 和 W1 处理差异不大,W2 比 W1 处理增加 2.4%,W3 和 W4 处理分别比 W1 处理减少 9.1% 和 19.4%。

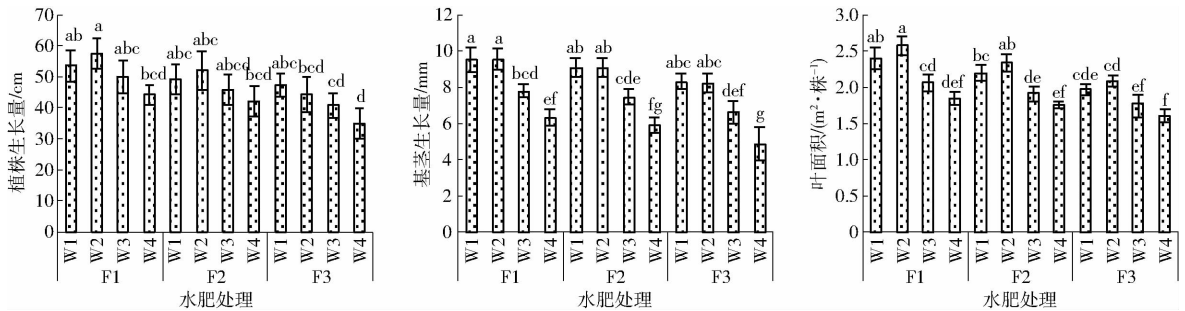


图 1 不同处理下苹果树生长指标
Fig. 1 Growth indicators of apple trees under different treatments

苹果树基茎生长量随灌水量和施肥量的增加而增加,但轻度亏水灌溉(W2)与充分供水(W1)间差异不大,这说明在一定施肥量区间下,轻度的亏水灌溉并不影响苹果树基茎的生长。在 F1、F2 和 F3 处理下,基茎生长总量分别为 33.19、31.59、28.11 mm,F2 和 F3 分别比 F1 减少 4.8% 和 15.3%;在 W1、W2、W3 和 W4 处理下,基茎生长总量分别为 26.97、26.89、21.92、17.11 mm,W2、W3 和 W4 处理分别比 W1 处理减少 0.2%、18.7% 和 36.6%。

16.4%;在 W1、W2、W3 和 W4 处理下,叶面积增长总量分别为 6.57、7.02、5.76、5.21 m²/株,W2 处理比 W1 增加 6.7%,W3、W4 处理分别比 W1 处理减少 14.1%、20.1%。

2.2 滴灌施肥对苹果树生理指标的影响

灌水量相同时,苹果树叶面积随施肥量的增加而增加;施肥量相同时,苹果树叶面积由大到小依次为 W2、W1、W3、W4,这说明轻度的亏水灌溉更有利于其生长,W1 处理不利于其生长。在 F1、F2 和 F3 处理下,叶面积增长总量分别为 8.90、8.22、7.44 m²/株,F2 和 F3 分别比 F1 减少 7.6% 和

滴灌施肥对苹果树生理指标的影响如图 2 所示。从图中可以看出, P_n 基本上随灌水量和施肥量的增加而增加;不同水肥处理下 P_n 的最大值出现在高水高肥的 F1W1 处理,F1W2 处理与其相比降低 2.1%;不同水肥处理下 P_n 最小值均出现在 F3W4 处理。在 F1、F2 和 F3 处理下, P_n 总量分别为 115.71、110.83、100.79 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,F2 和 F3 分别比 F1 减少 4.2% 和 12.9%;在 W1、W2、W3 和 W4 处理下, P_n 总量分别为 90.63、87.84、77.96、70.91 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,W2、W3、W4 分别比 W1 减少 3.1%、14.3%、21.8%。

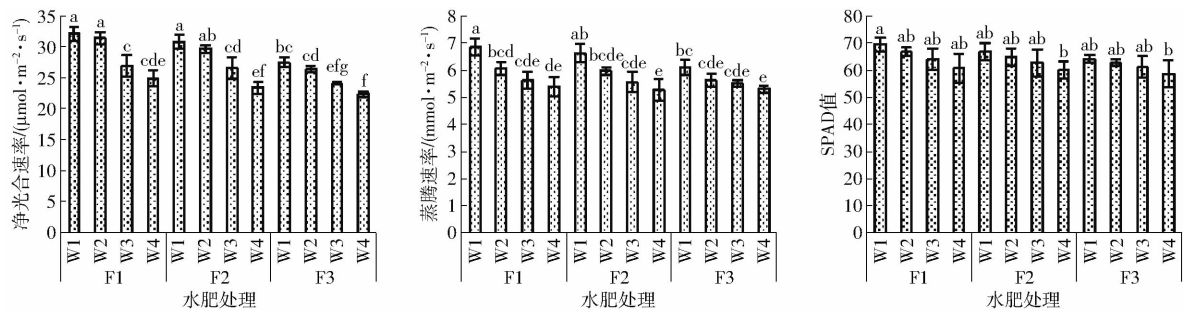


图 2 不同处理下苹果树生理指标
Fig. 2 Physiological indicators of apple trees under different treatments

灌水量相同时, T_r 随施肥量增加变化趋势并不明显;施肥量相同时, T_r 基本上随灌水量的增加而增加;不同水肥处理下 T_r 的最大值出现在高水高肥的 F1W1 处理,F1W2 处理与其相比降低 11.5%;不同

水肥处理下 T_r 最小值均出现在 F2W4 处理。在 F1、F2 和 F3 处理下, T_r 总量分别为 23.94、23.44、22.56 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,F2 和 F3 分别比 F1 减少 2.1% 和 5.8%;在 W1、W2、W3 和 W4 处理下, T_r 总

量分别为 19.60、17.67、16.71、15.96 mmol/(m²·s), W2、W3、W4 分别比 W1 减少 9.8%、14.7%、18.6%。

灌水量相同时,苹果树 SPAD 值整体随灌水量和施肥量的增加而增加。在 F1、F2 和 F3 处理下,各灌水处理 SPAD 总量分别为 261.7、255.1、247.5, F2 和 F3 分别比 F1 减少 2.5% 和 5.4%;在 W1、W2、W3 和 W4 处理下,各施肥处理 SPAD 总量分别为 200.9、195.0、188.4、180.0, W2、W3、W4 分别比 W1 减少 2.9%、6.2%、10.4%。

2.3 滴灌施肥对苹果树干物质和产量的影响

滴灌施肥对苹果树干物质和产量的影响如图 3 所示。从图中可以看出,灌水量相同时,苹果树干物质随施肥量的增加而增加;施肥量相同时,在

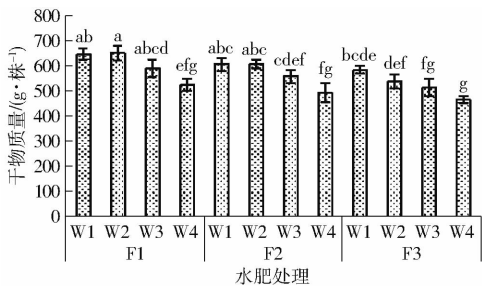


图 3 不同处理下苹果树干物质和产量

Fig. 3 Dry mass and yield of apple trees under different treatments

随着灌水量和施肥量的增加,苹果产量基本上呈梯度上升的趋势,充分供水处理 W1 比轻度亏水灌溉 W2 产量仅增加 1.4%,比重度亏水灌溉处理 W4 增加 102.6%,高肥处理 F1 比 F3 产量平均增加 17.2%,由此可见,轻度的亏水灌溉对于苹果树产量影响较小,且灌水对产量的影响明显高于施肥对其的影响。

2.4 滴灌施肥对苹果树水肥利用效率的影响

滴灌施肥对苹果树水肥利用效率的影响如图 4 所示。从图中可以看出,灌水量相同时,WUE 由大到小基本依次为 F1、F2、F3;施肥量相同时,WUE 在 F1 和 F2 处理下,由大到小依次为 W2、W3、W1、W4,在 F3 处理下,由大到小依次为 W2、W1、W3、W4,这说明在一定施肥量区间下,适度的亏水灌溉更有利于提高苹果树 WUE。WUE 最大值出现在

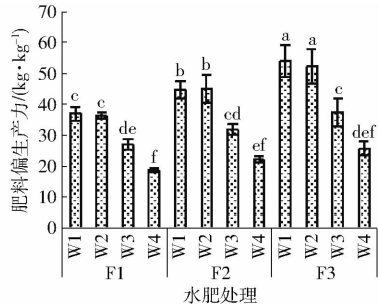
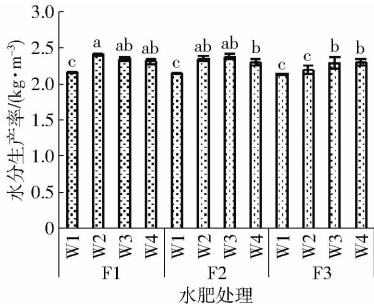
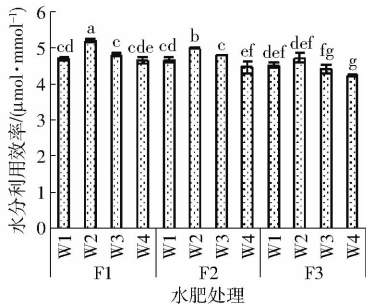
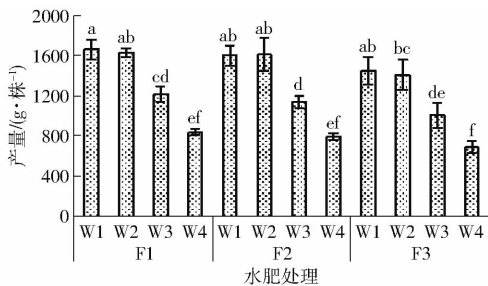


图 4 不同处理下苹果树水肥利用效率

Fig. 4 Water and fertilizer utilization efficiency of apple trees under different treatments

F1 和 F2 施肥处理下,干物质量由大到小依次为 W2、W1、W3、W4,在 F3 施肥处理下,由大到小依次为 W1、W2、W3、W4,这说明在一定施肥量区间下,轻度的亏水灌溉反而更有利于苹果树生物量的积累,但低肥条件下依旧表现为随灌水量的增加而增加。在 F1、F2 和 F3 处理下,干物质量总量分别为 2 424、2 274、2 111 g, F2 和 F3 分别比 F1 减少 6.2% 和 12.9%;在 W1、W2、W3 和 W4 处理下,干物质量总量分别为 1 845、1 805、1 670、1 490 g, W2 处理与 W1 处理差异不大,仅减少 2.2%, W3 和 W4 处理分别比 W1 处理减少 9.4% 和 19.24%,在 F1W2 水肥处理下苹果树全生育期干物质量达到最大值,与 F1W1 处理相比增加 0.6%。



F1W2 处理,与 F1W1 处理相比,提高 10.6%;WUE 最小值出现在 F3W4 处理。在 F1、F2 和 F3 处理下, WUE 总量分别为 19.34、18.90、17.87 μmol/mmol, F2 和 F3 分别比 F1 减少 2.3% 和 7.6%。在 W1、W2、W3 和 W4 处理下, WUE 总量分别为 13.87、14.90、14.00、13.34 μmol/mmol, W2 和 W3 分别比 W1 增加 7.4%、0.9%, W4 比 W1 减少 3.8%。

在 F1 处理下,CWP 由大到小依次为 W2、W3、W4、W1;在 F2 处理下,CWP 由大到小依次为 W3、W2、W4、W1;在 F3 施肥处理下,苹果全生育期 CWP 由大到小依次为 W4、W3、W2、W1,这说明苹果树在充分供水时水分生产率反而最小,CWP 最大值为 2.41 kg/m³,出现在 F1W2 处理,与高水高肥的 F1W1 处理相比增加 11.1%。PFP 基本随着灌水量的增加而增加,但轻度亏水灌溉与充分供水间差异

不明显,W2 比其它亏水处理 W3、W4 肥料偏生产力分别增加 38.6% 和 100.6%; PFP 随着施肥量的减少而增加,低肥 F3 处理比高肥 F1 和中肥 F2 处理分别增加 115.0% 和 57.8%;水肥交互作用下 PFP 最大值出现在 F3W1 和 F3W2 处理,分别为 54.13、52.44 kg/kg,这说明轻度亏水和低施肥能够产生较高的肥料偏生产力。

2.5 滴灌施肥对苹果果实品质的影响

滴灌施肥对苹果果实品质的影响如表 2 所示,施肥量相同时,苹果单果质量总体由大到小依次为

W2、W1、W3、W4(W1、W2 近似);灌水量相同时,单果质量由大到小依次为 F1、F2、F3,最大值出现在 F2W2 处理,最小值出现在 F3W4 处理,F2W2 比 F3W4 和 F1W1 分别增加 38.6% 和 2.0%,这说明轻度亏水灌溉和增加施肥量有利于提高苹果单果质量。灌水对苹果着色指数和果形指数有明显的影响,着色指数和果形指数由大到小依次为 W1、W2、W3、W4,不同水肥处理间果形指数差异较小,由此可见苹果树果实着色指数和果形指数呈现为相同的变化趋势,增加灌水量有利于提高苹果着色指数和

表 2 不同处理下苹果果实品质
Tab.2 Apple fruit quality under different treatments

施肥处理	灌水处理	单果质量/g	着色指数	果形指数	维生素 C 含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	可溶性糖含量/ %	糖酸比
F1	W1	(164.27 ± 11.24) ^a	(4.05 ± 0.27) ^a	(1.14 ± 0.04) ^a	(3.67 ± 0.13) ^{ab}	(11.34 ± 0.16) ^{ab}	(24.74 ± 1.25) ^a
	W2	(166.82 ± 6.77) ^a	(4.00 ± 0.40) ^{ab}	(1.13 ± 0.01) ^a	(3.74 ± 0.11) ^a	(11.55 ± 0.28) ^a	(25.50 ± 1.44) ^a
	W3	(149.24 ± 12.28) ^{ab}	(3.40 ± 0.37) ^{abcd}	(1.11 ± 0.03) ^{ab}	(3.61 ± 0.12) ^{abc}	(11.20 ± 0.42) ^{abc}	(22.04 ± 1.07) ^{bc}
	W4	(129.41 ± 14.08) ^{bc}	(3.01 ± 0.43) ^d	(1.06 ± 0.07) ^{ab}	(3.59 ± 0.16) ^{abcd}	(10.92 ± 0.11) ^{abc}	(18.89 ± 1.16) ^{def}
F2	W1	(160.14 ± 10.87) ^a	(4.05 ± 0.05) ^a	(1.13 ± 0.04) ^{ab}	(3.45 ± 0.12) ^{abcd}	(10.74 ± 0.15) ^{abcd}	(23.78 ± 2.34) ^{ab}
	W2	(167.61 ± 10.64) ^a	(3.95 ± 0.25) ^{ab}	(1.12 ± 0.03) ^{ab}	(3.58 ± 0.11) ^{abcd}	(10.83 ± 0.44) ^{abc}	(22.88 ± 0.85) ^{ab}
	W3	(140.11 ± 12.09) ^{abc}	(3.47 ± 0.21) ^{abcd}	(1.10 ± 0.03) ^{ab}	(3.43 ± 0.16) ^{abcde}	(10.83 ± 0.55) ^{abc}	(19.55 ± 0.19) ^{cde}
	W4	(126.74 ± 11.57) ^{bc}	(3.26 ± 0.10) ^{cd}	(1.10 ± 0.01) ^{ab}	(3.33 ± 0.14) ^{cde}	(10.32 ± 0.13) ^{cd}	(17.98 ± 0.48) ^{ef}
F3	W1	(151.19 ± 12.20) ^{ab}	(3.85 ± 0.02) ^{abc}	(1.09 ± 0.09) ^{ab}	(3.31 ± 0.11) ^{bcde}	(10.33 ± 0.35) ^{cd}	(21.34 ± 0.28) ^{bcd}
	W2	(154.08 ± 12.94) ^{ab}	(3.95 ± 0.06) ^{ab}	(1.07 ± 0.08) ^{ab}	(3.40 ± 0.10) ^{cde}	(10.52 ± 0.51) ^{bcd}	(20.08 ± 1.19) ^{cde}
	W3	(132.73 ± 11.55) ^{bc}	(3.38 ± 0.38) ^{bcd}	(1.06 ± 0.08) ^{ab}	(3.28 ± 0.16) ^{de}	(10.34 ± 0.50) ^{cd}	(18.51 ± 1.32) ^{ef}
	W4	(120.92 ± 6.13) ^c	(3.24 ± 0.27) ^{cd}	(0.99 ± 0.09) ^b	(3.12 ± 0.14) ^e	(9.87 ± 0.43) ^d	(16.47 ± 0.10) ^f
F	灌水	844.222 **	22.857 *	45.656 **	42.024 **	5.165	37.214 **
	施肥	961.944 **	0.125	2.353	3 202.905 **	29.195 *	7.860
	灌水 × 施肥	1.465	1.297	1.773	11.566 **	0.977	2.558

注:同列数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.5);** 表示差异极显著(P<0.01),* 表示差异显著(P<0.05)。

果形指数。

施肥量相同时,苹果维生素 C 含量由大到小总体依次为 W2、W1、W3、W4;灌水量相同时,苹果维生素 C 由大到小依次为 F1、F2、F3,维生素 C 含量最大值出现在 F1W2 处理,最小值出现在 F3W4 处理,F1W2 比 F3W4 增加 19.9%,这说明轻度亏水灌溉和增加施肥量有利于提高苹果维生素 C 含量。灌水对苹果可溶性糖含量影响不显著,苹果可溶性糖含量由大到小依次为 F1、F2、F3,高肥 F1 比 F2、F3 处理平均增加 5.4%、8.4%,这说明增加施肥量有利于提高苹果果实可溶性糖含量。施肥对苹果糖酸比影响不显著,故施肥量一定的条件下,苹果糖酸比由大到小总体依次为 W1、W2、W3、W4,充分供水 W1 处理比重度亏水 W4 处理糖酸比平均增加 30.9%,这说明增加灌水量可一定程度提高苹果糖酸比。

2.6 苹果树生长综合评价模型

2.6.1 苹果树综合评价模型构建

通过试验分析滴灌施肥协同调控对苹果树生长生理指标、干物质质量与产量、果实品质以及水肥利用效率的影响规律,采用 AHP 层次分析法和熵权法对各单一指标分别进行主观和客观赋权,然后利用组合赋权法求出各个指标最终权重。采用 TOPSIS 法建立以高效、高产、高品为目标的苹果综合指标评价模型(图 5),寻求苹果树种植的最佳水肥调控制度。使用 Yaahp 软件建立苹果树生长综合评价层次结构(图 6),综合评价指标 C 目标层有 4 个准则层,分别为:生长生理指标 C1、水肥利用效率指标 C2、生物质量和产量指标 C3、果实品质指标 C4。4 个准则层包含 17 个指标层。

2.6.2 指标权重确定

(1) 基于层次分析法(AHP)计算权重
层次分析法(AHP)是一种常用主观赋权法。

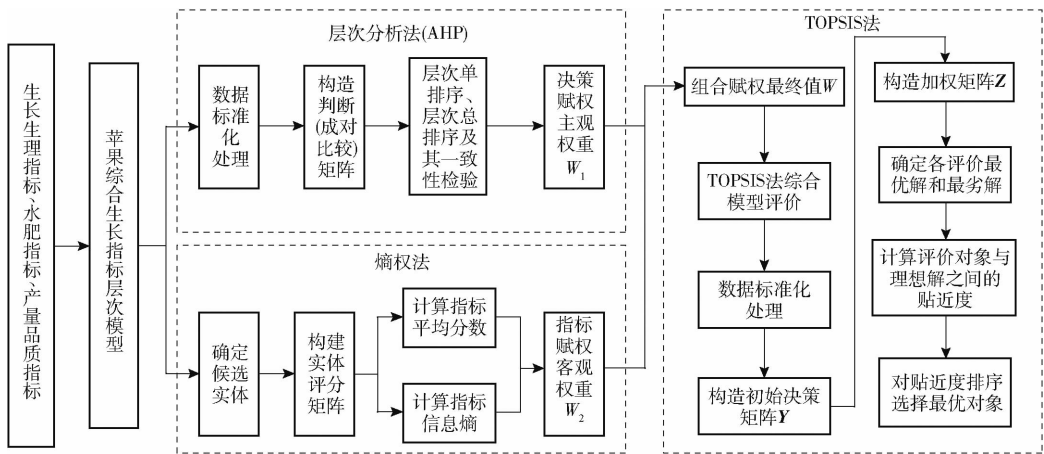


图 5 苹果树生长综合评价模型结构框图

Fig. 5 Structure block diagram of apple tree growth comprehensive evaluation model

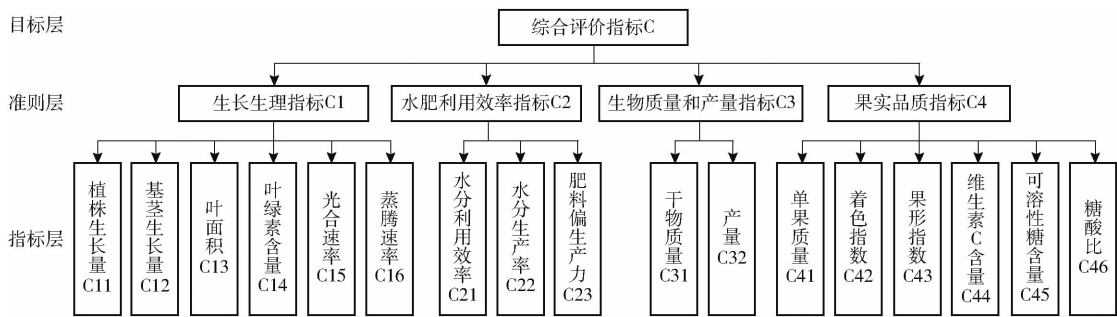


图 6 苹果综合生长指标层次模型

Fig. 6 Hierarchical model of comprehensive growth indicators for apple

根据图 6 建立的苹果树生长综合评价层次结构对各指标进行综合评判。基于层次分析法中的 1~9 比例标度法,按照各评价指标对品质影响的重要程度构建底层指标相对于上一级指标的判断矩阵并进行一致性检验,通过计算得到各个指标的权重^[16]。经过层次分析法赋权计算得出综合评价指标 C、生长生理指标 C1、水肥利用效率指标 C2、生物质量和产量指标 C3 和果实品质指标 C4 的判断矩阵分别为(具体计算方法和步骤见文献[17])

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 0.2 & 0.333\ 3 \\ 0.333\ 3 & 1 & 0.166\ 7 & 0.125 \\ 5 & 6 & 1 & 1 \\ 3 & 8 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.25 & 0.166\ 7 & 0.166\ 7 & 0.5 \\ 2 & 1 & 0.25 & 0.166\ 7 & 0.142\ 9 & 0.5 \\ 4 & 4 & 1 & 0.333\ 3 & 0.5 & 2 \\ 6 & 6 & 3 & 1 & 1 & 4 \\ 6 & 7 & 2 & 1 & 1 & 4 \\ 2 & 2 & 0.5 & 0.25 & 0.25 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.333\ 3 & 0.5 \\ 3 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0.25 \\ 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_4 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 1 & 2 & 2 \\ 0.2 & 1 & 1 & 0.25 & 0.5 & 0.333\ 3 \\ 0.333\ 3 & 1 & 1 & 0.25 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 4 & 4 & 1 & 2 & 3 \\ 0.5 & 2 & 2 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0.5 & 3 & 2 & 0.333\ 3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

如表 3 所示,生长生理指标、水肥利用效率指标、生物质量和产量指标、果实品质指标的检验结果 CR 均小于 0.1,说明一致性检验结果较好,所建立的判断矩阵具有合理性和可靠性。结果表明,苹果各项指标的权重由大到小依次为:产量(C32)、维生素 C 含量(C44)、单果质量(C41)、干物质质量(C31)、糖酸比(C46)、可溶性糖含量(C45)、叶绿素含量(C14)、光合速率(C15)、果形指数(C43)、着色指数(C42)、水分生产率(C22)、肥料偏生产力(C23)、叶面积(C13)、蒸腾速率(C16)、水分利用效率(C21)、基茎生长量(C12)、植株生长量(C11)。

(2) 基于熵权法计算权重

熵权法是常用客观赋权法的一种,基本思想是根据待评价方案指标本身的属性及特点来确定权

表 3 基于 AHP 层次分析法计算的权重
Tab.3 Weight calculation based on AHP

	局部权重	最终权重	一致性检验参数 (CR < 0.1)
目标层 C	0.122 1	0.122 1	CR = 0.028 4 < 0.1 检验通过
	0.052 6	0.052 6	
	0.429 7	0.429 7	
	0.395 6	0.395 6	
准则层 C1	0.042 9	0.005 2	CR = 0.0172 < 0.1 检验通过
	0.053 0	0.006 5	
	0.161 9	0.019 8	
	0.337 2	0.041 2	
	0.319 4	0.039 0	
	0.085 5	0.010 4	
准则层 C2	0.169 2	0.008 9	CR = 0.017 6 < 0.1 检验通过
	0.443 4	0.023 3	
	0.387 4	0.020 4	
准则层 C3	0.2	0.085 9	CR = 0 < 0.1 检验通过
	0.8	0.343 8	
准则层 C4	0.277 9	0.109 9	CR = 0.009 4 < 0.1 检验通过
	0.063 7	0.025 2	
	0.073 7	0.029 2	
	0.303 0	0.119 9	
	0.139 8	0.055 3	
	0.142 0	0.056 2	

注:CR 表示随机一致性比率,CR 小于 0.1 时校验通过,层次分析法结果有效。

表 4 基于熵权法计算的熵值及权重

Tab.4 Calculating entropy value and weight based on entropy weight method									
指标	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C21	C22	C23
熵值	0.936 0	0.930 0	0.907 0	0.911 0	0.903 0	0.838 0	0.924 0	0.894 0	0.904 0
权重	0.040 5	0.044 6	0.059 6	0.057 0	0.061 8	0.103 0	0.048 4	0.067 4	0.061 1
指标	C31	C32	C41	C42	C43	C44	C45	C46	
熵值	0.919 0	0.904 0	0.906 0	0.916 0	0.867 0	0.931 0	0.928 0	0.912 0	
权重	0.051 9	0.061 0	0.060 1	0.053 5	0.084 6	0.043 7	0.045 8	0.056 2	

组合权重值之间的差异分析来定义目标函数为

$$\text{Min}Y = \sum_{j=1}^n [(W_j - W_j^*)^2 + (W_j - W_j^{**})^2] \quad (10)$$

对式(10)进行求导并令其等于 0,可计算得 $\alpha = 0.5$,则

$$W_j = 0.5W_j^* + 0.5W_j^{**} \quad (11)$$

由表 5 可知,苹果各项指标的权重由大到小依次为:产量(C32)、单果质量(C41)、维生素 C 含量(C44)、干物质量(C31)、果形指数(C43)、蒸腾速率(C16)、糖酸比(C46)、可溶性糖含量(C45)、光合速

重,它不受人为主观因素影响,能科学合理地确定评价对象属性的权重^[18]。使用熵权法计算的苹果各项评价指标的权重如表 4 所示(具体计算方法和步骤见文献[17])。

苹果各项指标的权重由大到小依次为:蒸腾速率(C16)、果形指数(C43)、水分生产率(C22)、光合速率(C15)、肥料偏生产力(C23)、产量(C32)、单果质量(C41)、叶面积(C13)、叶绿素含量(C14)、糖酸比(C46)、着色指数(C42)、干物质量(C31)、水分利用效率(C21)、可溶性糖含量(C45)、基茎生长量(C12)、维生素 C 含量(C44)、植株生长量(C11)。

(3)组合赋权

设 $W = (W_1, W_2, \cdots, W_n)$ 为层次分析法和熵权法组合权重。将 $W_j (j = 1, 2, \cdots, n)$ 表示为 W_j^* 和 W_j^{**} 的线性组合,即 W_j 为

$$W_j = \alpha W_j^* + (1 - \alpha) W_j^{**} \quad (9)$$

式中 α 为组合系数, $0 < \alpha < 1$ 。 W_j^* 是层次分析法中计算确定的第 j 个指标的主观权重。 $1 - \alpha$ 是在此组合权重中熵权法权重的分数, W_j^{**} 是确定熵权法的第 j 个指标的客观权重。以平方和最小化,层次结构权重和组合权重之间的差异分析,熵权重值和

率(C15)、叶绿素含量(C14)、水分生产率(C22)、肥料偏生产力(C23)、叶面积(C13)、着色指数(C42)、水分利用效率(C21)、基茎生长量(C12)、植株生长量(C11)。

2.6.3 TOPSIS 法综合评价模型计算

TOPSIS 是解决多目标决策分析问题的一种常用方法,找出多个目标中最优目标和最劣目标(分别用理想解和负理想解表示)^[19],按理想解贴近度的大小排序,贴近度取值在 0 ~ 1 之间,该值越接近 1,表示相应的评价目标越接近最优水

表 5 基于组合赋权法计算的权重

Tab.5 Calculated weight based on combination weighting method									
指标	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C21	C22	C23
权重	0.022 9	0.025 5	0.039 7	0.049 1	0.050 4	0.056 7	0.028 6	0.045 3	0.040 7
指标	C31	C32	C41	C42	C43	C44	C45	C46	
权重	0.068 9	0.202 4	0.085 0	0.039 3	0.056 9	0.081 8	0.050 5	0.056 2	

平;反之,该值越接近 0,表示评价目标越接近最劣水平。基于组合赋权的 TOPSIS 综合模型对各指标综合评价,评价指标完成组合赋权后,建立基于组合权重 W 的加权规范化评价矩阵,计算各指标的理想解及贴近度(具体计算方法和步骤见

文献[17])。根据 TOPSIS 计算各处理的结果如表 6 所示,F1W2 处理苹果的综合指标贴近度最大,为 0.765 3,此处理条件下苹果的综合评价最优,F1W1 处理次之,而 F3W4 处理最差,仅为 0.258 3。

表 6 基于 TOPSIS 的苹果综合指标评价结果
Tab.6 Comprehensive index evaluation results of apple based on TOPSIS

处理	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C21	C22	C23	C31	C32
F1W1	0.095 4	0.102 7	0.098 0	0.091 1	0.098 3	0.098 0	0.083 8	0.079 1	0.085 7	0.095 4	0.110 3
F1W2	0.102 0	0.102 8	0.104 9	0.087 7	0.096 2	0.086 7	0.092 6	0.087 9	0.084 0	0.096 0	0.108 2
F1W3	0.089 0	0.083 9	0.084 2	0.084 0	0.082 6	0.080 5	0.085 6	0.086 0	0.062 8	0.087 2	0.080 8
F1W4	0.078 7	0.067 9	0.075 2	0.079 7	0.076 4	0.077 1	0.082 7	0.084 6	0.043 3	0.077 4	0.055 8
F2W1	0.087 8	0.098 0	0.089 5	0.087 7	0.094 3	0.094 8	0.083 1	0.078 4	0.103 3	0.089 5	0.106 4
F2W2	0.092 9	0.098 0	0.095 6	0.084 9	0.091 0	0.085 4	0.088 9	0.086 0	0.104 1	0.089 5	0.107 2
F2W3	0.081 4	0.080 5	0.078 1	0.082 3	0.081 5	0.079 6	0.085 4	0.087 1	0.073 6	0.082 2	0.075 8
F2W4	0.074 8	0.063 6	0.071 6	0.078 9	0.071 7	0.075 4	0.079 6	0.084 2	0.051 2	0.072 8	0.052 8
F3W1	0.084 2	0.089 7	0.080 1	0.084 1	0.084 2	0.087 5	0.080 4	0.078 0	0.124 8	0.086 1	0.096 4
F3W2	0.078 9	0.088 7	0.085 0	0.082 6	0.081 1	0.080 5	0.084 1	0.080 6	0.121 0	0.079 5	0.093 4
F3W3	0.072 6	0.071 6	0.072 4	0.080 2	0.074 0	0.078 8	0.078 5	0.083 8	0.086 7	0.075 8	0.066 9
F3W4	0.062 1	0.052 6	0.065 5	0.076 9	0.068 5	0.075 7	0.075 5	0.084 2	0.059 6	0.068 6	0.046 0

处理	C41	C42	C43	C44	C45	C46	$D+$	$D-$	贴近度	排序
F1W1	0.093 2	0.092 9	0.087 2	0.088 5	0.088 0	0.098 3	0.340 0	0.879 1	0.721 1	2
F1W2	0.094 6	0.091 8	0.086 4	0.090 0	0.089 7	0.101 3	0.278 2	0.907 2	0.765 3	1
F1W3	0.084 6	0.078 0	0.084 9	0.086 9	0.086 9	0.087 6	0.463 7	0.594 0	0.561 6	5
F1W4	0.073 4	0.069 0	0.081 1	0.086 5	0.084 8	0.075 0	0.702 1	0.426 2	0.377 8	9
F2W1	0.090 8	0.092 8	0.086 0	0.083 0	0.083 4	0.094 4	0.415 0	0.743 4	0.641 8	4
F2W2	0.095 1	0.090 6	0.085 6	0.086 3	0.084 1	0.090 9	0.353 8	0.771 9	0.685 7	3
F2W3	0.079 5	0.079 6	0.083 8	0.082 6	0.084 1	0.077 6	0.560 4	0.480 2	0.461 4	8
F2W4	0.071 9	0.074 8	0.084 3	0.080 3	0.080 1	0.071 4	0.802 7	0.290 4	0.265 7	11
F3W1	0.085 7	0.088 2	0.083 0	0.079 7	0.080 2	0.084 8	0.538 8	0.566 0	0.512 3	6
F3W2	0.087 4	0.090 6	0.081 8	0.082 0	0.081 7	0.079 8	0.532 8	0.546 2	0.506 2	7
F3W3	0.075 3	0.077 4	0.080 7	0.079 1	0.080 3	0.073 5	0.707 4	0.322 2	0.312 9	10
F3W4	0.068 6	0.074 3	0.0753	0.075 2	0.076 6	0.065 4	0.920 6	0.320 6	0.258 3	12

注: $D+$ 、 $D-$ 分别表示评价对象与正理想解的距离和与负理想解的距离。

3 讨论

水分和肥料在作物生长和发育中起着至关重要的作用,是影响作物的两个关键可控因素,作物的生长发育与合理的灌溉和施肥制度密不可分^[20-21]。前人研究表明,滴灌施肥条件下较高的肥料和轻度水分亏缺的水肥调控制度最有利于苹果幼树的生长和发育^[22];滴灌水肥调控下灌水下限在 70% 田间持水率时梨树根系活力最强,有利于其生长发育,此时梨树果实产量也有提高^[23];水分胁迫下适度施肥有利于矮砧苹果幼树的生长,水肥交互作用下生长生理指标基本上都优于单独施用肥料的效果^[24]。本研究表明,苹果树植株生长指标随施肥量的增加而提高,由大到小依次为 F1、F2、F3;在 F1 和 F2 处理下,苹果树植株生长指标由大到小依次为 W2、

W1、W3、W4,在 F3 处理下,由大到小依次为 W1、W2、W3、W4,这说明在一定施肥量区间下,轻度的亏缺灌溉反而更有利于苹果树的生长,但在低肥条件下植株生长量、基茎生长量和叶面积依旧表现为随灌水量的增加而增加,这与前人在滴灌施肥条件下对两年生苹果树的研究结果并不完全一致^[25],考虑是种植气候环境等试验条件不同,研究结果有所不同。

作物水分生产率反映了作物产出量与其耗水量间的关系,而耗水量与实际灌水量间联系紧密,且作物的耗水量与施肥量间也密切相关。前人研究表明,滴灌水肥一体化对温室葡萄水分生产率影响显著,中肥和低水条件下水分生产率最高^[26];采用滴灌施肥方式较传统灌溉和施肥可以提高椰子的生产力,同时保证更高的水分、养分利用效率和经济效

益^[27];水肥一体化条件下宁夏中部干旱地区苹果水分生产率在中水中肥处理下最大,但各处理间差异不大^[28],这些与本研究结果基本一致。本研究表明,苹果树耗水量随灌水量和施肥量的增加而增加,在 F1 处理下,水分生产率由大到小依次为 W2、W3、W4、W1;在 F2 施肥处理下,由大到小依次为 W3、W2、W4、W1;在 F3 施肥处理下,由大到小依次为 W4、W3、W2、W1,这说明充分供水时苹果树不能获得较高的水分生产率,适度的亏缺灌溉有利于提高其水分生产率。

果实的品质指标是评价果树生长状况的重要指标,在果实形成阶段充足适量的水肥供应是果实生长发育和品质形成的关键。前人研究表明,滴灌施肥在提高产量、改善品质及增加果实养分吸收方面效果显著^[29]。滴灌施肥条件下,灌水量和施肥量对温室番茄产量的影响显著,在施肥水平较低时,灌溉对产量的影响较低,灌水量越高影响越大^[30]。滴灌施肥处理能显著提高樱桃果实品质,较高的施肥量能提高果实果径,较高施肥量和较低灌水量能降低果实可滴定酸含量,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^[31]。本研究表明,相同施肥处理下,苹果单果质量基本上随灌水量和施肥量的增加而增加,但轻度亏水灌溉和增加施肥量有利于提高苹果单果质量。不同水肥处理间苹果果实着色指数和果形指数差异较小并呈现为相同的变化趋势。相同施肥处理下,苹果维生素 C 含量由大到小总体依次为 W2、W1、W3、W4;相同灌水处理下,依次为 F1、F2、F3,这说明轻度亏水灌溉和增加施肥量有利于提高苹果维生素 C 含量。灌水对苹果可溶性糖影响不显著,增加施肥量有利于提高苹果可溶性糖含量。施肥对苹果糖酸比影响不显著,W1 处理比 W4 处理糖酸比平均增加 30.9%,这说明增加灌水量可一定程度提高苹果糖酸比。

前人研究中果树综合评价模型多采用部分指标构建数学模型进行分析,所用的评价方法偏向主观或客观,易受人为因素和样本差异对指标重要程度的影响^[32]。本研究采用不同赋权方法得到了苹果各指标权重,使评价结果较为平衡和科学,从苹果树生长生理、水肥利用效率、生物质量和产量以及果实品质共 4 类 17 个指标构建综合评价体系,评价指标

较为全面,可以更准确地反映滴灌施肥协同调控对苹果树生长发育的影响规律,使综合评价模型更接近实际情况,而 TOPSIS 法可以通过计算各指标数据到正负理想解的距离,得到评价目标与理想解的贴近度^[33]。前人研究表明,使用组合赋权法对甜瓜生长、产量等 4 类因素 12 个指标综合赋权,使用 TOPSIS 法建立的甜瓜综合生长评价体系,可以得出促进甜瓜类指标最优的水肥调控处理^[34]。将 AHP 法和熵权法相结合确定指标权重,并采用 TOPSIS 评价方法来探究番茄不同生育时期水肥施加量对番茄生长状况及产量和品质的影响,进行综合评价^[35]。本研究基于 TOPSIS 法对以高效、高产、高品为多目标的苹果综合指标评价模型进行计算,分析滴灌施肥协同调控对苹果多指标综合评价的影响,得出 F1W2 处理苹果的综合指标与最优解贴近度最大,即 F1W2 水肥调控处理是苹果树种植的最佳水肥调控制度,研究结果对于制定科学合理的苹果树灌溉和施肥制度与品质调控策略具有一定的指导意义。

4 结 论

(1)滴灌施肥协同调控下苹果树植株生长量、基茎生长量和叶面积最大值均出现在 F1W2 处理,净光合速率、蒸腾速率和叶绿素含量基本上随灌水量和施肥量的增加而增加,最大值均出现在 F1W1 处理,全生育期干物质质量和产量在 F1W1 和 F1W2 处理下差异不明显。

(2)水分利用效率和水分生产率最大值均出现在 F1W2 处理,与 F1W1 处理相比,分别提高 10.6% 和 11.1%,肥料偏生产力基本上随灌水量的增加和施肥量的减少而增加,增加灌水量有利于提高苹果着色指数、果形指数和糖酸比,增加施肥量有利于提高苹果单果质量、维生素 C 含量和可溶性糖含量。

(3)综合 4 类 17 个指标建立 TOPSIS 多目标综合评价模型,代入各指标最终权重计算得出 F1W2 处理贴近度最大,为 0.765 3,此处理下苹果综合指标评价最优,F1W1 处理次之,而 F3W4 最差,仅为 0.258 3。

(4)本试验滴灌水肥协同调控下,灌水量上下限控制在田间持水率的 65% ~ 80%,施 N、P₂O₅、K₂O 肥与风干土质量比分别为 0.9、0.3、0.3 g/kg 是苹果树的最佳水肥管理制度。

参 考 文 献

[1] 王庆锁,梅旭荣. 中国农业水资源可持续利用方略[J]. 农学报, 2017, 7(10): 80 - 83.
WANG Qingsuo, MEI Xurong. Strategies for sustainable use of agricultural water resources in China[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(10): 80 - 83. (in Chinese)
[2] 孙锦,高洪波,田婧,等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 594 - 604.

SUN Jin, GAO Hongbo, TIAN Jing, et al. Development status and trends of protected horticulture in China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019, 42(4): 594–604. (in Chinese)

[3] BIEL C, CAMPRUBÍ A, LOVATO P E, et al. On-farm reduced irrigation and fertilizer doses, and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation improve water productivity in tomato production[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288: 110337.

[4] MÉNDEZ-CIFUENTES A, VALDEZ-AGUILAR L A, CADENA-ZAPATA M, et al. Water and fertilizer use efficiency in subirrigated containerized tomato[J]. Water, 2020, 12(5): 1313.

[5] RASOOL G, GUO X, WANG Z, et al. Coupling fertigation and buried straw layer improves fertilizer use efficiency, fruit yield, and quality of greenhouse tomato[J]. Agricultural Water Management, 2020, 239: 106239.

[6] WANG H, WU L, CHENG M, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 169–179.

[7] 张超, 白云岗, 柴仲平, 等. 水肥协同对葡萄果粒生长、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 44–50. ZHANG Chao, BAI Yungang, CHAI Zhongping, et al. Effects of fertigation on growth and fruit yield and quality of grape[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 44–50. (in Chinese)

[8] 张建锴, 曹红霞, 潘小燕, 等. 基于产量和品质的陕北苹果滴灌水量和追施氮量优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 143–152. ZHANG Jiankai, CAO Hongxia, PAN Xiaoyan, et al. Optimization of drip irrigation and topdressing nitrogen based on apple yield and quality in Northern Shaanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 143–152. (in Chinese)

[9] 张军科, 李兴亮, 李民吉, 等. 影响消费者对‘富士’苹果品质主观评价的因素分析及评价模型建立[J]. 果树学报, 2017, 34(10): 1316–1322. ZHANG Junke, LI Xingliang, LI Minji, et al. Factors involved in the consumer’s sensorial evaluation of fruit quality and the construction of the subjective evaluation models of the ‘Fuji’ apple[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(10): 1316–1322. (in Chinese)

[10] 公丽艳, 孟宪军, 刘乃侨, 等. 基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 276–285. GONG Liyan, MENG Xianjun, LIU Naiqiao, et al. Evaluation of apple quality based on principal component and hierarchical cluster analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 276–285. (in Chinese)

[11] 孙鑫, 张富仓, 杨玲, 等. 基于熵权法和 TOPSIS 法优化马铃薯钾肥种类和滴灌量组合[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 279–290. SUN Xin, ZHANG Fucang, YANG Ling, et al. Optimal combination of potassium fertilizer and drip irrigation for potato production based on entropy weight method and TOPSIS analysis[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 279–290. (in Chinese)

[12] YULIANTI E, NANDA R R. Decision support system of fruit cultivation using technique for other reference method by similarity to ideal solution (TOPSIS)[C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018: 01006.

[13] RATHORE V S, NATHAWAT N S, BHARDWAJ S, et al. Optimization of deficit irrigation and nitrogen fertilizer management for peanut production in an arid region[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1–14.

[14] 徐迪, 龚时宏, 李益农, 等. 作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 631–639. XU Di, GONG Shihong, LI Yinong, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 631–639. (in Chinese)

[15] IERNA A, PANDINO G, LOMBARDO S, et al. Tuber yield, water and fertilizer productivity in early potato as affected by a combination of irrigation and fertilization[J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1): 35–41.

[16] SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83–98.

[17] 李曼宁. 不同水肥滴灌条件对草莓的综合生长调控[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021. LI Manning. Regulation of different irrigation and fertilizer on comprehensive growth of strawberry with drip irrigation conditions [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[18] 张智, 李曼宁, 杨志, 等. 基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 267–276. ZHANG Zhi, LI Manning, YANG Zhi, et al. Comprehensive regulation of water and fertilizer coupling based on multi index collaboration of strawberry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 267–276. (in Chinese)

[19] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 258–265. YAN Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Optimal irrigation and nitrogen application amounts for spring maize based on evaluation model in sandy soil area in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 258–265. (in Chinese)

[20] 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]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 173–183. ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER Kjelgren, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of young apple tree[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 173–183. (in Chinese)

[21] LI J, ZHANG Z, YAO C, et al. Improving winter wheat grain yield and water-/nitrogen-use efficiency by optimizing the micro-

- sprinkling irrigation amount and nitrogen application rate[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(2): 606–621.
- [22] 周罕觅, 牛晓丽, 燕辉, 等. 水肥耦合对苹果幼树生长及光合特性的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(10): 112–119.
ZHOU Hanmi, NIU Xiaoli, YAN Hui, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth and photosynthetic characteristics of young apple tree[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(10): 112–119. (in Chinese)
- [23] 王林林. 不同滴灌模式对梨园土壤水肥分布及果树生长影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
WANG Linlin. Study on effects of different drip irrigation modes on soil moisture and fertilizer distribution and fruit tree growth in pear orchard[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [24] 石美娟, 续海红, 郭华, 等. 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树生长及保护酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 146–154, 162.
SHI Meijuan, XU Haihong, GUO Hua, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth and protective enzyme activities of dwarf rootstock Fuji sapling under water stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 146–154, 162. (in Chinese)
- [25] 周罕觅. 苹果幼树水肥耦合效应及高效利用机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
ZHOU Hanmi. Water and fertilizer coupling effects and efficient utilization mechanism of young apple tree[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [26] 付诗宁, 魏新光, 郑思宇, 等. 滴灌水肥一体化对温室葡萄生理特性及水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 61–72.
FU Shining, WEI Xinguang, ZHENG Siyu, et al. Effects of integrated management of water and fertilizer on the physiological characteristics and water-fertilizer use efficiency of grapes in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 61–72. (in Chinese)
- [27] JAYAKUMAR M, JANAPRIYA S, SURENDRAN U. Effect of drip fertigation and polythene mulching on growth and productivity of coconut (*Cocos nucifera* L.), water, nutrient use efficiency and economic benefits[J]. Agricultural Water Management, 2017, 182: 87–93.
- [28] 梁博惠, 唐瑞, 张上宁, 等. 宁夏中部干旱带水肥一体化苹果滴灌灌溉制度及生长影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 105–110, 115.
LIANG Bohui, TANG Rui, ZHANG Shangning, et al. Research on the apple drip irrigation system of integrative water and fertilizer in arid areas of central Ningxia[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 105–110, 115. (in Chinese)
- [29] 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与品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1): 48–52.
LU Yongli, GAO Yimin, TONG Yanan, et al. Effects of fertigation on yield and quality of Fuji apple in Weibei dry-land region [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(1): 48–52. (in Chinese)
- [30] STOYANOVA A, KOSTADINOV G, MOTEVA M. Influence of controlled water deficit at different levels of fertilization on the yield of greenhouse tomatoes[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2020, 26(1): 9–18.
- [31] 李憑峰, 谭煌, 王嘉航, 等. 滴灌水肥条件对樱桃产量、品质和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 236–246.
LI Pingfeng, TAN Huang, WANG Jiahang, et al. Effect of water and fertilizer conditions under drip irrigation on yield, quality of cherry and physicochemical properties of soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 236–246. (in Chinese)
- [32] 张腊腊, 韩明虎, 胡浩斌, 等. 基于主成分分析的苹果品质综合评价[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(3): 209–213.
ZHANG Lala, HAN Minghu, HU Haobin, et al. Comprehensive evaluation of apple quality based on principal component analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(3): 209–213. (in Chinese)
- [33] 李若帆, 马娟娟, 孙西欢, 等. 不同水肥管理模式下糯玉米水氮利用及熵权 TOPSIS 综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 111–120.
LI Ruofan, MA Juanjuan, SUN Xihuan. Comprehensive evaluation of water and nitrogen utilization of waxy corn based on entropy weight TOPSIS model under different water and fertilizer treatments[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 111–120. (in Chinese)
- [34] 张智, 杨志, 黎景来, 等. 基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 302–311, 330.
ZHANG Zhi, YANG Zhi, LI Jinglai, et al. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 302–311, 330. (in Chinese)
- [35] 郑健, 朱传远, 齐兴赞, 等. 不同生育阶段水/沼液一体化灌溉对番茄生长及产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 64–71.
ZHENG Jian, ZHU Chuanyuan, QI Xingyun, et al. The effects of irrigation with diluted biogas slurry on growth, yield and fruit quality of tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 64–71. (in Chinese)