文章编号:1000-7601(2025)06-0162-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.16

干热河谷区番荔枝高效灌溉的 AHP-TOPSIS 多目标优化与综合评价

余 红,吴章伟,蔡礼良,王卫华

(昆明理工大学现代农业工程学院,云南 昆明 650500)

摘 要:为优化干热河谷区番荔枝的种植管理和增产提质,筛选出符合预期目标的最优处理设计,选取灌水量、施肥量和溶氧量进行三因素三水平正交试验,共设置 9 个处理组合,探究干热河谷区不同水肥气耦合处理对番荔枝生长、产量和品质的影响,并通过层次分析法(AHP)和 TOPSIS 模型相结合的综合评价方法筛选出最优处理方案。2023—2024 年研究结果表明:灌水量、施肥量和溶氧量对番荔枝叶面积、净光合速率、果实纵径、单果重、单株产量、维生素 C 含量、可溶性总糖和可溶性固形物含量均有显著影响。其中,W3F2O1 处理(高灌水量、中施肥量、低溶氧量)在提高叶面积、单果重和单株产量方面表现最优;而 W2F3O1 处理(中灌水量、高施肥量、低溶氧量)在提升维生素 C 和可溶性总糖含量方面效果显著。通过 AHP-TOPSIS 综合评价,W3F2O1 处理的综合评分最高,表明其对番荔枝生长、产量和品质的综合促进效果最优。本研究构建了番荔枝水肥气耦合效应的综合评价体系,推荐 W3F2O1 处理作为番荔枝高产栽培的最优方案,W2F3O1 处理作为高品质栽培的最优方案。该研究为番荔枝水肥气耦合优化进而实现干热河谷区番荔枝高品质、高效益生产的种植模式提供了理论依据和科学支撑。

关键词:番荔枝;水肥气耦合;增产提质;层次分析法;TOPSIS;干热河谷区

中图分类号:S667 **文献标志码**:A

AHP-TOPSIS multi-objective optimization and comprehensive evaluation for high-efficiency irrigation of *Annona squamosa* in dry-hot valley area

YU Hong, WU Zhangwei, CAI Liliang, WANG Weihua

(*Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan* 650500, *China*)

Abstract: In order to optimize the planting and management of *Annona squamosa* L. in the dry-hot valley area, this study conducted experiments in *A.squamosa* orchards in Lijiang Town, Yuanjiang County, Yunnan Province, from 2023 to 2024. The three-factor and three-level orthogonal experimental design of irrigation amount, fertilizer amount, and dissolved oxygen amount was adopted, and a total of 9 treatment combinations were set up to explore the effects of different water-fertilizer-gas coupling treatments on the growth, yield, and quality of *A.squamosa*, and the optimal treatment scheme was screened out by the comprehensive evaluation method combined with analytic hierarchy process (AHP) and TOPSIS model. The results showed that irrigation amount, fertilizer amount, and dissolved oxygen amount had significant effects on leaf area, net photosynthetic rate, fruit longitudinal diameter, single fruit weight, single plant yield, vitamin C content, soluble total sugar, and soluble solid content of *A.squamosa*. Among them, the W3F2O1 treatment (high irrigation volume, medium fertilization volume, and low dissolved oxygen volume) performed best in increasing leaf area, single fruit weight, and single plant yield, while the W2F3O1 treatment (medium irrigation volume, high fertilization volume, and low dissolved oxygen volume) was significantly effective in increasing vitamin C content and total soluble sugar content. Through the AHP-TOPSIS comprehensive evaluation, the W3F2O1 treatment had the highest comprehensive score, indicating that it

收稿日期:2025-03-31 **修回日期**:2025-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(52169008)

作者简介:余红(2002-),男,云南昭通人,硕士研究生,研究方向为植物节水灌溉。E-mail:2170227734@qq.com

通信作者:王卫华(1982-),女,陕西西安人,教授,主要从事土壤物理、节水灌溉、土壤生态环境调控研究。E-mail:wangweihua1220@163.com

had the best comprehensive promotion effect on the growth, yield and quality of *A.squamosa*. This study successfully constructed a comprehensive evaluation system for the coupling effect of water, fertilizer, and gas on *A.squamosa*, and recommended the W3F2O1 treatment as the optimal solution for high-yield cultivation of *A.squamosa* and the W2F3O1 treatment as the optimal solution for high-quality cultivation. At the same time, it provides a theoretical basis and scientific support for the precise regulation of water, fertilizer, and gas to achieve high-quality and high-efficiency production of sugar apple in dry-hot valley areas.

Keywords: *Annona squamosa*; coupling of water, fertilizer and gas; yield and quality improvement; analytic hierarchy process; TOPSIS; dry-hot valley

番荔枝(*Annona squamosa* L.)是番荔枝科落叶小乔木,外形酷似荔枝,又名凤梨释迦果,具有较高的种植效益,在干热河谷区的特色农业中备受关注[1]。根据最新统计数据,云南省干热河谷区,以元江县为代表,2024 年番荔枝种植面积已达到 11 406 hm^2,年产量约 2 697 t,但平均单产仅为 4 t,远低于其他适宜产区。主要问题是季节性干旱导致的水分胁迫以及土壤肥力不足和通气性差等问题严重影响了番荔枝的产量和品质。由于干热河谷区为半干旱气候,降雨量约为全年蒸发量的 1/6,降雨年际分布不均导致的季节性干旱常发生在作物需水关键期,导致干热河谷区农业发展受到限制[2-3]。因此,优化种植管理,特别是水肥气耦合调控,对提高番荔枝产量和品质具有重要意义。普遍的节水灌溉措施可以在一定程度上缓解干旱地区作物缺水的困境,但是传统灌溉模式多关注水肥耦合,忽视溶氧对根际微环境的调控,导致土壤缺氧抑制根系呼吸与养分吸收,影响光合产物分配,从而降低作物产量,这对于干热河谷地区农业发展来说是值得研究和关注的重点。已有研究表明,水肥气协同可优化作物生理代谢[4-5],许多作物在科学合理的水肥气耦合作用下都能达到增产提质的效果,水肥耦合是土壤营养元素与水之间的相互作用,会影响农业生态系统中植物的生长和发育[6-7]。科学合理的水肥耦合灌溉对作物生长具有积极的作用,有着增产提质的正向反馈;然而传统灌溉方式往往忽视了土壤通气性对根系生长和养分吸收的影响,导致土壤空气质量下降、理化性质变差,影响作物正常生长[8]。通过加气灌溉能有效缓解土壤通气不良,促进根系呼吸和发育,增强光合作用,提高作物对水分和养分的吸收,促进干物质积累[9-10]。针对番荔枝的多因素耦合效应研究中产量与品质指标常呈现拮抗关系,缺乏基于多目标决策的综合评价体系。

层次分析法(AHP)是指将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统,将目标分解为多个目标或准则,通过定性指标模糊量化方法计算出层次单排序和总排序,以作为多方案优化决策的系统方法,为决策提供科学依据[11]。TOPSIS 方法则通过计算各方案与理想解和负理想解的距离进行排序,具有计算简单以及结果直观等优点。AHP 主观性强而且一致性检验要求高[12];TOPSIS 对数据完整性和质量要求高,权重确定方法单一[13-14]。将 AHP 与 TOPSIS 结合既能平衡主观判断与客观数据,又能弥补单一方法的局限性,提高决策的科学性和实用性。两种方法相互结合可以科学筛选出番荔枝水肥气耦合最佳的处理设计,从而优化干热河谷区番荔枝的种植管理。

水肥气耦合灌溉通过调节水、肥、气多因素作用,促进作物生长发育,提高产量、品质及资源利用效率并改善根区土壤环境。不同处理对作物生长、产量和品质的影响各异[15],但干热河谷区番荔枝的水肥气耦合效应研究仍鲜有报道。传统单因素试验难以全面反映耦合效应,而多因素试验面临处理组合多、数据分析复杂等问题,需结合多目标评价方法。因此,建立科学的综合评价方法,筛选最优的水肥气耦合方案,对干热河谷区番荔枝种植具有重要意义。本研究以该地区番荔枝为对象,通过测定生长、产量和品质指标,结合 AHP 和 TOPSIS 方法综合评价进而筛选最优灌溉方案,为优质高产栽培提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2023 年 3—10 月在云南省玉溪市元江哈县澧江镇那塘新村的 5 年生番荔枝果园进行(102°5′51″E,23°30′22″N,海拔 550 m)。属于南亚热带季风干热气候,全年降水分布不均,旱季和雨季分明。试验区光照充足,年均日照时数 2 291.7 h,年均降水量 786 mm,蒸发量 2 750 mm,年均气温 23.8℃,全年基本无霜。果园土壤类型以红壤土为主,土壤容重 1.35 g · cm^{-3},昼夜温差大,自然条件

优越,有利于作物营养成分的积累,适合番荔枝等热带作物的生长。

本研究以生长状况良好、长势一致的 5 年生番荔枝果树为研究对象,砧木为普通番荔枝,接穗为凤梨释迦,地径为 85~100 mm,树高 2.0~2.2 m,株行距为 2 m×3 m。果园土壤为红壤土,土壤 pH 为 6.7,供试肥料为易溶于水的果树专用复合肥(N-P_2O_5-K_2O 比例为 15-15-15,品牌为'雪绿丰',由赛固特生物科技有限公司生产)。本研究采用微纳米气泡发生装置和增氧泵制备溶氧气泡水,利用在线溶解氧测定仪实时监测灌溉水中的溶解氧含量[16]。

每个试验处理对应一个试验小区,灌水方式采用滴灌,每小区铺设两条滴灌带,与番荔枝树间距为 10 cm,每棵树环绕 4 个滴头。滴灌带直径 16 mm、滴头间距 40 cm,滴头流量 3 L·h^{-1},各生育期灌水、施肥、加气等严格按照试验方案进行,其他田间管理统一进行。

1.2 试验设计

本试验研究采用灌水量、施肥量和溶氧量三因素三水平正交试验设计,共设置 9 个处理(见表 1、2)。根据前期水肥耦合试验研究结果及干热河谷区的气候条件和番荔枝的需水规律,依据作物需水量(ET_c)设置 3 个灌溉量水平:重度亏水灌溉(W1,60%ET_c)、轻度亏水灌溉(W2,80%ET_c)和充分灌溉(W3,100%ET_c);施肥量设置为 3 个水平:高肥(F1,1 900 kg·hm^{-2})、中肥(F2,1 700 kg·hm^{-2})和低肥(F3,1 500 kg·hm^{-2});溶解氧设置 3 个水平:高氧(O1,9 mg·L^{-1})、中氧(O2,7 mg·L^{-1})和低氧(O3,5 mg·L^{-1})。施肥操作与灌溉同时进行,采用滴灌施肥技术,将果树专用复合肥溶解于灌溉水中,通过滴灌系统均匀施入土壤。施肥时间为每月灌溉周期的第一天,确保养分及时供应。溶氧量的控制通过微纳米气泡发生装置和增氧泵实现,灌溉水中的溶解氧含量通过在线溶解氧测定仪实时监测,确保其稳定在设定水平。作物需水量(ET_c)通过参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)与作物系数(K_c)的乘积计算得出。采用 Penman-Monteith 方程[17]估算 ET_0(式 1),相关气象数据来源于试验站的气象站。根据 Rodriguez-Pleguezuelo 等[18]的研究结果,不同生育期的作物系数 K_c 分别为花芽分化期和坐果期 K_c = 0.67、开花期和成熟期 K_c = 0.62、果实膨大期 K_c = 0.68。结合降雨量和作物需水量确定实际灌水量,灌水周期为 15 d,单个周期内的灌水量按式(2)计算。

$$ET_0 = \frac{0.41\Delta(R_n - G) + \gamma \dfrac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中,ET_0为参考蒸散量(mm·d^{-1});Δ 为饱和水汽压与气温关系曲线在 2 m 高度处的斜率(kPa·℃$^{-1}$);R_n为输入冠层的净辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1});G 为土壤热通量(MJ·m^{-2}·d^{-1});γ 为干湿温度计常数(kPa·℃$^{-1}$);T_{mean}为 2 m 高处的日平均温度(℃);u_2为 2 m 高处的风速(m·s^{-1});$e_s - e_a$为饱和水汽压与实际水汽压的差值(kPa)。

$$PIA = \left(\sum_{i=1}^{n} ET_{ci} - \sum_{i=1}^{n} P_i\right) \cdot S \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

式中,PIA 为单个周期内灌水量(m^3);ET_{ci}为第 i 天作物需水量(mm);n 为灌水周期(d);P_i为第 i 天降雨量(mm);S 为灌溉控制面积(m^2)。

表 1 水肥气耦合正交试验设计

Table 1 Orthogonal experimental design of water-fertilizer-gas coupling

水平 Level	灌水量 Irrigation amount	施肥量 Fertilizer amount /(kg·hm^{-2})	溶氧量 Dissolved oxygen /(mg·L^{-1})
1	100%ET_c	1900	9
2	80%ET_c	1700	7
3	60%ET_c	1500	5

表 2 正交试验方案设计

Table 2 Orthogonal experimental design

处理 Treatment	灌水量(W) Irrigation amount	施肥量(F) Fertilizer amount	溶氧量(O) Dissolved oxygen
W1F1O1	1	1	1
W1F2O2	1	2	2
W1F3O3	1	3	3
W2F1O2	2	1	2
W2F2O3	2	2	3
W2F3O1	2	3	1
W3F1O3	3	1	3
W3F2O1	3	2	1
W3F3O2	3	3	2

注:1、2、3 表示试验因素的水平。

Note: 1, 2 and 3 represents the level of experimental factor.

1.3 试验指标及测定方法

1.3.1 番荔枝叶面积、光合指标测定 叶面积指数(LAI):各小区选 3 株长势一致的番荔枝树,分别于番荔枝各生育期用卷尺测量其叶长和叶宽,根据式(3)计算叶面积指数。

$$LAI = \sum_{i=1}^{n} (a_i \times b_i) \times D \times 0.73 \quad (3)$$

式中,*LAI* 为叶面积指数;*a* 和 *b* 分别为叶片的长和宽(mm);*i* 为叶片个数;*D* 为番荔枝种植密度(846 株·hm^{-2});0.73 为校正系数。

采用 Li-6400 便携式光合仪(Li-Cor,美国)测定净光合速率、蒸腾速率及气孔导度。每个处理随机选取 3 株果树,测定并标记功能叶片。

1.3.2　*番荔枝产量指标测定*　番荔枝果实在进入成熟期后,采集每个处理树上的所有果实,然后进行分级筛选并称重。单果重:果实达到采摘标准时,每处理采摘标记的 12 个果实,用精度为 0.01 g 且最大可测质量为 1 000 g 天平称量单果重。单株产量:成熟期采收记录每棵番荔枝树的果实,对每个处理小区番荔枝测产。果径和果形指数:待番荔枝成熟采摘时,番荔枝果实纵横经采用游标卡尺测量,番荔枝果实纵径与横径的比值即为果实果形指数。

1.3.3　*番荔枝品质指标测定*　待果实采摘放置常温软熟后进行各项指标测定:可溶性固形物采用手持糖度计测定;蒽酮比色法测定可溶性糖含量;维生素 C 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定;采用碱滴定指示剂法测定有机酸含量[19]。

1.4　层次分析法和 TOPSIS 结合的综合评价

1.4.1　*层次分析法(AHP)确定主观权重*　构建层次结构模型:将决策问题分解为目标、准则和方案等层次。构建判断矩阵:通过专家打分或主观判断,构造准则层和方案层的判断矩阵。计算主观权重:利用特征值法或几何平均法等计算判断矩阵的最大特征值对应的特征向量,并归一化处理,得到主观权重[20]。最后计算一致性比例(*CR*),当 $CR<0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性可以接受,否则应对判断矩阵作适当修正(具体计算方法参考文献[21])。

1.4.2　*熵权法确定客观权重*　熵权法是一种客观赋权法,能够避免决策者主观因素的干扰。通过信息论原理可知,熵反映了信息的无须化程度,熵值越小,系统无序程度越小,利用价值越大,对应权重越大。数据标准化:对原始数据进行标准化处理,消除量纲影响。计算熵值:根据标准化数据计算各指标的熵值[22]。确定客观权重:利用熵值计算各指标的客观权重(具体计算方法参考文献[23])。

1.4.3　*组合权重*　主客观权重融合:将主观权重与客观权重结合,形成组合权重。

1.4.4　*TOPSIS 进行方案排序*　构建决策矩阵;采用向量归一化处理(消除量纲);确定正负理想解,根据指标方向性定义理想解;计算距离与接近度;相对接近度;按 C_i 从大到小排序,C_i 最大者为最优方案(具体计算方法参考文献[21])。

1.5　数据分析

采用 Excel 2023 进行数据整理、分类和绘表;利用 SPSS 软件统计数据分析相关性,采用 Origin 2021 进行图表的绘制。所有数据均以“平均值±标准差”方式表示,均值比较采用最小差异检验($P<0.05$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2　结果与分析

2.1　水肥气耦合对番荔枝生长生理的影响

2.1.1　*番荔枝叶面积*　通过正交试验对番荔枝生长周期中叶面积变化进行动态监测,其中包括花芽分化期,开花坐果期,果实膨大期和成熟期[24]。如表 3 所示,水分、养分和氧气的协同作用不仅体现在不同处理间叶面积的显著差异上,还通过调控植物生理代谢过程形成了独特的动态响应模式。W3F2O1 处理组合(高水、中肥、低氧)在整个生育期内表现出

表 3　正交试验番荔枝生育期内各处理叶面积变化/cm

Table 3　Changes in leaf area of each treatment during the growth periods of *Annona squamosa* in orthogonal experiment

处理 Treatment	花芽分化期 Flower bud differentiation period		开花坐果期 Flowering and fruiting period		果实膨大期 Fruit expansion period		成熟期 Maturity period
	04-15	05-05	05-25	06-15	07-05	07-25	08-15
W1F1O1	26.85±1.20d	45.64±1.80d	68.82±2.50f	84.90±2.20f	96.48±2.10e	102.79±2.30e	105.90±1.70f
W1F2O2	26.51±1.15d	52.71±1.90c	78.21±2.60e	93.44±2.40d	102.07±2.30d	110.61±2.50d	115.78±2.48d
W1F3O3	26.84±1.18d	54.27±1.85c	75.95±2.45e	88.45±2.30e	97.35±2.20e	105.66±2.40e	111.07±2.26e
W2F1O2	30.70±1.50ab	60.04±2.00b	85.86±2.80d	101.40±2.60c	111.51±2.70c	119.16±2.90c	123.08±2.40c
W2F2O3	29.78±1.45abc	63.86±2.10a	87.15±2.75cd	103.13±2.65bc	113.61±2.75bc	121.46±2.85bc	126.40±2.28bc
W2F3O1	29.26±1.40bcd	62.04±2.05ab	88.86±2.85bcd	105.32±2.70ab	114.77±2.80bc	123.17±2.95abc	127.83±2.19ab
W3F1O3	30.94±1.55ab	64.41±2.15a	89.59±2.90abc	103.88±2.75bc	114.01±2.85bc	120.33±2.80c	125.57±2.01bc
W3F2O1	31.19±1.60ab	63.67±2.12a	92.24±3.00a	108.43±2.90a	118.70±3.00a	126.93±3.10a	131.63±1.87a
W3F3O2	32.31±1.65a	65.02±2.20a	91.89±2.95ab	104.51±2.80bc	115.98±2.95ab	125.10±3.05ab	130.13±2.08ab

注:同列中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same blow.

最优的叶面积增长趋势,成熟期叶面积达到131.63 cm^2。这一优异表现主要得益于充分灌溉在果实膨大等关键生育阶段维持了土壤水分的稳定,显著增强了根系对矿质养分的吸收效率。适中的施肥量(1 700 kg·hm^{-2})在避免氮素过量引发叶片徒长的同时,确保了植株碳氮代谢平衡,为叶肉细胞分化和叶面积扩展创造了有利条件。值得注意的是,5 mg·L^{-1}的低氧环境可能通过调节土壤氧分压激活了根系抗氧化酶系统,减少了活性氧对根尖分生组织的损伤,从而间接提升了水分和养分的运输能力,这一机制在果实成熟期尤为显著。

W3F3O2处理(高水、高肥、中氧)在花芽分化期表现出较快的叶面积增长速率(32.31 cm^2),但7 mg·L^{-1}的氧浓度在生育后期导致根系呼吸代谢与土壤氧化还原状态失衡,降低了光合产物向生殖组织的转运效率,从而限制了叶面积的进一步扩展。W2F3O1处理(中水、高肥、低氧)在果实膨大期叶面积达到127.83 cm^2,表明80%ET_c的灌溉水平与1 900 kg·hm^{-2}的施肥量相结合能够提升叶片氮素的再利用率,延缓叶片衰老,但其整体效果仍受到水分不足对细胞膨压的制约。从植物生理生态学角度分析,W3F2O1处理的优异表现源于其对水分、养分和氧气的精准调控,实现了光合面积扩展与代谢消耗的最佳平衡。具体表现为充分灌溉增强了气孔导度和蒸腾作用,促进了光合产物在叶片中的定向积累;适中的施肥量避免了铵态氮过度转化为硝态氮,维持了叶片细胞的渗透平衡;低氧环境则通过激活根系乙烯信号通路,优化了激素调控下的源库关系。这一研究揭示了干热河谷地区番荔枝叶面积扩展的阈值规律,即水肥气协同效应在特定范围内呈现正向叠加,超出该范围则会因环境胁迫削弱其增益效果,为制定精准的水肥管理策略提供了科学依据。

2.1.2 *番荔枝叶片净光合速率* 番荔枝叶片的净光合速率在不同处理条件下,其在生长周期内的动态变化规律展现了水分、养分、氧气三者协同作用对光合生理的调控模式。从表4可以看出,番荔枝在11∶00和15∶00的净光合速率均随开花后天数呈现单峰变化趋势,并于开花后60 d达到峰值。然而午前(11∶00)的净光合速率显著高于午后(15∶00),表明其光合碳同化效率在上午更具优势。其中,高灌水量处理(例如W3F3O2、W3F1O3)在峰值时段的光合效率明显高于低灌水量处理,这说明充足的水分供应通过提升根系吸水能力以及叶片膨压保持了气孔的开放程度,进而增强了CO_2的同化能力。溶氧量的影响呈现出非线性特点:低溶氧处理(O1)相较于中高溶氧处理(O2、O3)并没有显著地抑制光合作用,甚至在高水肥条件下(如W3F2O1)还表现出协同增效的作用,这与干热河谷区土壤通气性普遍受限有关,适量的溶氧已经能够满足根系呼吸的需求。

施肥量的效应会随着生长周期而动态变化,比如高施肥处理(F3)在开花后30 d对光合速率的提升效果并不明显,但在果实膨大期(开花后150 d)与高灌水量相结合时(如W3F3O2)则显著地促进了光合产物向果实的分配。水分、养分、氧气的交互作用在生长后期(开花后100~150 d)表现得尤为显著。例如,W3F2O1处理通过高水、中肥、低氧的协同作用,既避免了过量施肥导致的离子失衡,又通过充足的水分缓解了高温对光系统的损害,从而保持了较高的光合稳定性。从生理机制角度分析,净光合速率的提升不仅依赖于光反应中光能的捕获效率,还与暗反应中Rubisco酶的活性以及碳同化能力密切相关。水肥气耦合通过调节叶片氮素的分配以及酶的活性,间接地影响光合碳代谢途径。因此,不同处理组合之间的差异本质上是水分、养分、氧气三者在时空尺度上对光合生理的协同优化结果,而非单一因素的简单相加。这一发现为干热河谷区番荔枝栽培过程中水肥气资源的精准配置提供了理论依据。

2.2 水肥气耦合对番荔枝产量和品质的影响

2.2.1 *番荔枝产量* 通过对不同水肥气耦合处理下番荔枝产量指标的综合分析发现,不同处理对果实形态及产量形成具有显著的调控作用。如表5所示,W3F2O1处理(高水、中肥、低氧)在关键产量指标上表现最为突出,其果实纵径、横径、单果重、单株产量分别达到111.78 mm、90.30 mm、350.04 g、9.83 kg,较对照处理W1F1O1分别提升22.62%、22.14%、13.45%、11.96%。这一优异表现主要得益于高灌水量增强了土壤水分的有效性,促进了根系对养分的吸收与转运,从而优化了光合产物的分配效率。适中的施肥量在避免根际盐害的同时,为果实膨大提供了充足的矿质营养支持。值得注意的是,5 mg·L^{-1}的低溶氧量不仅未对产量产生负面影响,反而与高灌水量形成了协同效应,其机制通过调节土壤氧化还原电位优化了根系呼吸代谢与养分利用的平衡。

表 4　不同处理番荔枝叶片净光合速率生育期变化/(μmol · m^{-2} · s^{-1})

Table 4　Changes in net photosynthetic rate of *Annona squamosa* leaves during the growth periods under different treatments

处理 Treatment	开花后 After flowering							
	30 d		60 d		100 d		150 d	
	11 : 00	15 : 00	11 : 00	15 : 00	11 : 00	15 : 00	11 : 00	15 : 00
W1F1O1	6.27±0.15e	4.04±0.12d	8.87±0.18f	5.27±0.14e	8.39±0.17e	4.90±0.13e	7.59±0.16e	4.01±0.11d
W1F2O2	7.52±0.17d	4.55±0.13cd	10.07±0.20e	5.92±0.15d	9.51±0.19d	5.47±0.14d	8.55±0.18d	4.78±0.12cd
W1F3O3	6.71±0.16de	4.41±0.13d	9.26±0.19ef	5.43±0.14de	9.01±0.18de	5.12±0.14de	7.87±0.17de	4.49±0.12d
W2F1O2	6.82±0.16de	4.61±0.14cd	9.29±0.19ef	6.16±0.16cd	8.74±0.18e	5.85±0.15c	7.82±0.17de	4.95±0.13c
W2F2O3	6.75±0.16de	4.11±0.12d	9.14±0.18f	5.39±0.14e	8.50±0.17e	5.15±0.14de	7.39±0.16e	4.27±0.11d
W2F3O1	6.86±0.16de	4.37±0.13d	9.25±0.19ef	5.47±0.14de	8.95±0.18de	5.18±0.14de	7.86±0.17de	4.36±0.12d
W3F1O3	8.03±0.18c	4.56±0.14cd	10.64±0.21d	5.91±0.15d	10.10±0.20c	5.55±0.15d	9.27±0.19c	4.45±0.12d
W3F2O1	7.59±0.17d	5.01±0.15bc	10.50±0.21d	6.13±0.16cd	9.71±0.19cd	5.60±0.15cd	8.64±0.18d	4.77±0.13cd
W3F3O2	8.46±0.19b	5.03±0.15b	11.53±0.23c	6.37±0.16bc	10.33±0.21b	5.88±0.16bc	9.47±0.20b	5.04±0.14b

表 5　不同处理对番荔枝产量指标影响

Table 5　Effects of different treatments on the yield indexes of *Annona squamosa*

处理 Treatment	果实纵径/mm Fruit longitudinal diameter	果实横径/mm Fruit transverse diameter	单果重/g Single fruit weight	单株产量/kg Single plant yield	果形指数 Fruit shape index
W1F1O1	91.16±1.70f	73.93±1.40e	308.54±4.82e	8.78±0.21f	1.23
W1F2O2	95.24±2.48ef	78.57±2.09d	317.63±5.49de	9.22±0.17e	1.21
W1F3O3	99.43±2.26de	80.83±0.97d	322.30±4.47cd	9.32±0.16de	1.23
W2F1O2	101.31±2.40cd	84.82±1.52c	324.02±5.50cd	9.43±0.18cde	1.19
W2F2O3	105.5±2.28bc	86.85±1.72bc	332.88±5.09bc	9.62±0.15bc	1.21
W2F3O1	103.88±2.19bcd	85.59±1.80c	330.41±5.63c	9.52±0.18cd	1.21
W3F1O3	107.62±2.01ab	87.53±2.09bc	342.96±5.16ab	9.63±0.14bc	1.23
W3F2O1	111.78±1.87a	90.30±1.68a	350.04±4.78a	9.83±0.13a	1.24
W3F3O2	110.95±2.08a	89.79±1.45ab	348.88±5.11a	9.82±0.19a	1.24

果形指数(1.24)的稳定性进一步表明,W3F2O1 处理下果实形态发育更为协调,这主要归因于水分与矿质元素的均衡供应。相比之下,W3F3O2 处理(高水、高肥、中氧)的单株产量(9.82 kg)与 W3F2O1 相近,但其单果重(348.88 g)略有下降,表明 7 mg · L^{-1} 的溶氧量通过改变根际微生物活性或引发氧化胁迫,抑制了干物质积累。这些结果揭示了水、肥、气三因素之间的非线性交互作用,即灌水量是产量提升的主导因素,而施肥量与溶氧量的阈值效应则决定了资源利用效率的最大化。W3F2O1 处理的优势不仅体现在单一指标的优化上,更在于其通过精准调控水、肥、气的配比,实现了光合产物分配、养分吸收与根系微环境的多维度协同,为干热河谷区番荔枝的高产稳产提供了理论依据。

2.2.2　*番荔枝品质*　通过对不同水肥气耦合处理下番荔枝品质指标的系统分析,发现不同处理对果实营养物质的积累具有显著的调控作用,其机制与水分、养分及溶氧的动态协同效应密切相关。如表 6 所示,W3F3O2 处理(高水、高肥、中氧)的维生素 C 含量达到峰值(29.90 mg · $100g^{-1}$),较 W1F1O1 处理(22.96 mg · $100g^{-1}$)提升 30.2%,表明高水肥条件与适度的溶氧环境通过提升光合碳代谢效率、激活抗坏血酸合成路径中的关键酶活性,从而显著促进了维生素 C 的积累[25]。

表 6　不同处理番荔枝品质指标总汇

Table 6　Summary of quality indicators of *Annona squamosa* under different treatments

处理 Treatment	维生素 C 含量 Vitamin C content /(mg · $100g^{-1}$)	可溶性总糖含量 Soluble total sugar content/%	可溶性固形物含量 Soluble solid content/%	有机酸含量 Organic acid content/%
W1F1O1	22.96±0.65e	16.17±0.48c	18.95±0.51e	0.33±0.01bc
W1F2O2	26.32±0.27bc	18.23±0.60ab	21.48±0.70c	0.28±0.03cd
W1F3O3	27.14±0.43b	18.83±0.56a	21.87±0.54bc	0.38±0.02ab
W2F1O2	25.22±0.53e	17.32±0.41bc	20.15±0.52d	0.32±0.04bc
W2F2O3	27.44±0.88b	18.56±0.52ab	22.07±0.32bc	0.23±0.02d
W2F3O1	29.24±0.81a	19.01±0.49a	22.98±0.76b	0.33±0.03bc
W3F1O3	23.93±0.73d	17.37±0.85bc	20.21±0.57d	0.38±0.04ab
W3F2O1	26.79±0.89b	18.46±0.53ab	22.56±0.66bc	0.30±0.02c
W3F3O2	29.90±0.71a	18.96±0.68a	25.09±0.47a	0.41±0.03a

过高的溶氧量(如 W3F1O3 处理)会引发根系氧化应激,抑制维生素 C 的合成,提示溶氧调控需考虑其阈值效应。在可溶性总糖含量方面,W2F3O1

处理(中水、高肥、低氧)表现最优(19.01%),较对照处理提高17.6%。这可能与中水条件下适度的水分胁迫诱导了糖分积累响应机制有关,同时高施肥量通过提供充足的氮、磷、钾元素,激活了糖代谢相关酶的活性,进一步促进了糖分的合成。此外,W3F3O2处理的可溶性固形物含量最高(25.09%),表明尽管高水肥条件稀释部分可溶性物质,但通过溶氧对根系呼吸效率的协同调控,仍能维持较高的固形物积累,揭示了水肥气耦合对干物质分配的复杂影响。有机酸含量在W3F3O2处理中显著升高(0.41%),较W2F2O3处理(0.23%)增加78.3%,表明高溶氧环境下三羧酸循环活性增强促进了有机酸前体物质的合成,而高灌水量改善的土壤通气性进一步加速了有机酸的代谢周转。综合分析表明,品质指标之间存在显著的权衡关系。例如,虽然W3F2O1处理维生素C和可溶性糖含量略低于W2F3O1和W3F3O2处理,但其通过平衡水肥气配比,在单果重、产量及综合品质上表现最优,体现了多目标决策中"木桶效应"的规避策略。此外,品质指标对水肥气响应的非线性特征(如维生素C含量随溶氧量增加呈先增后减趋势)提示,精准调控需结合阈值模型优化参数组合,而非单一因素的线性叠加。综上所述,品质提升不仅依赖于单一因素的强化,更需通过水肥气的协同优化,在代谢通路的动态平衡中挖掘提质潜力。

2.3 层次分析法和TOPSIS模型对番荔枝生长综合评价

采用组合赋权法将层次分析法和熵权法计算的权重进行融合,在满足主观赋权法反映决策者意愿的同时,又可为客观赋权法提供理论依据。在此基础上应用TOPSIS模型构建评价体系[26]对不同处理水平进行综合评价,进而筛选出最优水肥气耦合处理水平。

2.3.1 *综合评价体系指标层次模型* 在综合评价的层次模型(图1)中,设置生产性能指标(B1,包括单株产量C1、单果重C2、净光合速率C3、叶面积C4)、品质指标(B2,包括有机酸含量C5、维生素C含量C6、可溶性总糖含量C7、可溶性固状物含量C8)和环境指标(B3,包括速效磷C9、硝态氮C10、速效钾C11、土壤pH C12)。通过这种结构化建模,层次分析法不仅将复杂问题转化为可管理的模块化组件,更通过层次间的权重传递机制(如一致性检验与权重合成)确保决策逻辑的正确性。

2.3.2 *评价指标权重的确定* 基于AHP确定权重,层次模型建立后构造判断矩阵(表7),并对判断矩阵的一致性进行检验。

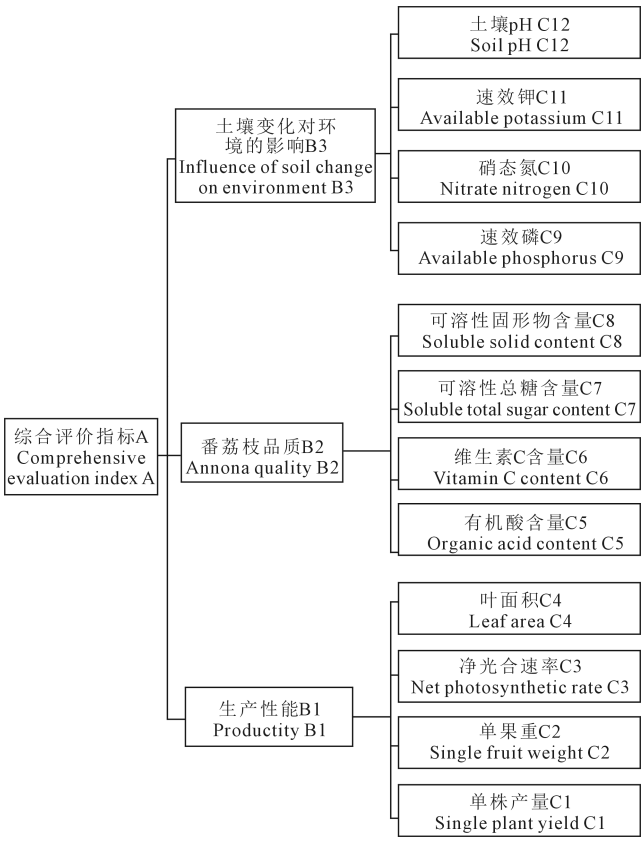

图1 综合评价体系指标层次模型

Fig.1 Hierarchical model of comprehensive evaluation system indicators

2.3.3 *由判断矩阵计算主观权重* 计算得C1~C12的主观权重分别为0.195、0.348、0.035、0.035、0.057、0.154、0.056、0.016、0.030、0.055、0.012、0.005,一致性指标 CR 均小于0.10,判断矩阵具有较好的一致性。

2.3.4 *熵权法计算客观权重* 熵权法确定指标权重主要步骤如下:根据 n 个评价处理、m 个评价指标的数据资料构造矩阵,并对数据进行处理,标准化消除量纲和数量级的影响。其中"成本型"指标的数据需先取倒数。根据二级指标的属性,将正向指标和负向指标转化为规范化值,并将评价指标归一化后计算出大豆的各项指标(C1~C12)权重,分别为0.092、0.088、0.085、0.087、0.079、0.083、0.081、0.081、0.082、0.084、0.080、0.077。

2.3.5 *构建TOPSIS综合评价* 整合所有样本的C1~C12指标数据(表8),通过对评价指标无量纲化,建立加权决策矩阵,确定理想解和贴合度,得出基于组合赋权TOPSIS综合模型评价结果及排序[26]。通过AHP可以确定指标权重(主观赋权,体现专家经验),然后用TOPSIS方法进行方案排序(客观计算距离,避免主观偏差),如表9所示,W3F2O1处理

表 7　判断矩阵

Table 7　Judgment matrix

评价指标 Evaluation index	判断矩阵 Judgment matrix	一致性检验 Consistency test
A	B1 生产性能 Production performance, B2 番荔枝品质 *Annona squamosa* quality,B3 土壤 Soil $\begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 0.33 & 1 & 2 \\ 0.2 & 0.5 & 1 \end{pmatrix}$	$CI=0.00184$ $CR=0.00355$
B1~C 生长性能指标 Growth performance indicators	C1 单株产量 Yield per plant,C2 单果重 Single fruit weight, C3 净光合速率 Net photosynthetic rate,C4 叶面积 Leaf area $\begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 5 & 5 \\ 2 & 1 & 8 & 8 \\ 0.2 & 0.13 & 1 & 1 \\ 0.2 & 0.13 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$CI=0.00207$ $CR=0.00233$
B2~C 番荔枝品质指标 Quality indicators of *Annona squamosa*	C5 有机酸含量 Organic acid content,C6 维生素含量 Vitamin content, C7 可溶性总糖含量 Total soluble sugar content, C8 可溶性固体物含量 Soluble solid content $\begin{pmatrix} 1 & 0.25 & 0.5 & 5 \\ 4 & 1 & 3 & 8 \\ 2 & 0.33 & 1 & 3 \\ 0.2 & 0.13 & 0.33 & 1 \end{pmatrix}$	$CI=0.05360$ $CR=0.06023$
B3~C 土壤变化对环境影响指标 Indicators of soil change impact on the environment	C9 速效磷 Fast-acting phosphorus,C10 硝态氮 Nitrate nitrogen, C11 速效钾 Fast-acting potassium,C12 土壤 pH Soil pH $\begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 3 & 5 \\ 2 & 1 & 6 & 8 \\ 0.33 & 0.17 & 1 & 3 \\ 0.2 & 0.13 & 0.33 & 1 \end{pmatrix}$	$CI=0.02255$ $CR=0.02534$

表 8　样本指标数据

Table 8　Sample indicator data

处理 Treatment	C1 单株产量 *YPP*	C2 单果重 *WPF*	C3 净光合速率 *NPR*	C4 叶面积 *LA*	C5 有机酸含量 *OAC*	C6 维生素含量 *VC*	C7 可溶性总糖含量 *TSSC*	C8 可溶性固体物含量 *SSC*	C9 速效磷 *AP*	C10 硝态氮 *NN*	C11 速效钾 *AK*	C12 土壤 pH *SpH*
W1F1O1	8.78	308.54	7.59	105.90	0.33	22.96	16.17	18.95	192.4	165.0	540	6.5
W1F2O2	9.22	317.63	8.55	115.78	0.28	26.32	18.23	21.48	215.3	181.2	560	6.7
W1F3O3	9.32	322.30	7.87	111.07	0.38	27.14	18.83	21.87	205.8	185.6	610	6.3
W2F1O2	9.43	324.02	7.82	123.08	0.32	25.22	17.32	20.15	175.1	151.3	490	6.5
W2F2O3	9.62	332.88	7.39	126.41	0.23	27.44	18.56	22.07	200.7	176.4	510	6.0
W2F3O1	9.52	330.41	7.86	127.83	0.33	29.24	19.01	22.98	190.6	178.1	500	6.4
W3F1O3	9.63	342.96	9.27	125.57	0.38	23.93	17.37	20.21	185.0	153.5	500	6.9
W3F2O1	9.83	350.04	8.64	131.63	0.3	26.79	18.46	22.56	170.2	163.1	510	7.0
W3F3O2	9.82	348.88	9.47	130.13	0.41	29.90	18.96	25.09	185.9	156.9	510	6.4

表 9　TOPSIS 综合评价排序

Table 9　TOPSIS comprehensive evaluation ranking

处理 Treatment	正理想解距离(*D*+) Positive ideal solution distance	负理想解距离(*D*-) Negative ideal solution distance	接近度(C_i) Closeness	排名 Ranking
W3F2O1	0.032	0.078	0.709	1
W3F3O2	0.030	0.075	0.682	2
W2F3O1	0.038	0.072	0.655	3
W1F3O3	0.041	0.069	0.627	4
W2F2O3	0.044	0.066	0.600	5
W1F2O2	0.047	0.063	0.573	6
W3F1O3	0.050	0.060	0.545	7
W2F1O2	0.053	0.057	0.518	8
W1F1O1	0.056	0.054	0.491	9

的综合评分最高,表明其对番荔枝生长、产量和品质的综合促进效果最优。从农业实践角度,W3F2O1 处理的综合优势体现了多目标协同的“帕累托最优”原则:高水保障光合基础,中肥避免离子拮抗,低溶氧维持氧化稳态,从而在产量与品质间取得平衡。品质指标间的权衡关系(如维生素 C 与有机酸的负相关)揭示,单一处理难以满足多元化市场需求,未来需基于功能组学建立分级栽培体系。此外,AHP-TOPSIS 模型的应用凸显了主客观权重融合的科学性,AHP 通过专家经验赋予产量指标更高权重,而熵权法客观反映品质指标的离散程度,两者的结合有效规避了单一方法的局限性,为

复杂农业系统的决策优化提供了方法论参考。值得注意的是,本试验未涵盖生育期需氧差异对品质的时序影响,建议引入动态调控模型,结合根系分区供氧技术,进一步提升精准管理水平。

为了验证 AHP-TOPSIS 模型中各指标权重的合理性,本研究进行了敏感性分析。结果表明,当各指标权重在±10%的范围内变化时,综合评价结果的排序变化较小。例如,将单株产量(C1)的权重从 0.195 降低到 0.175,而将维生素 C 含量(C6)的权重从 0.154 提高到 0.174,W3F2O1 处理的综合评分仍保持最高。这表明本研究中各指标权重的设置较为合理,模型结果具有较高的稳健性。

3 讨 论

作物的健康生长依赖于水、肥、气三者的协调平衡,其中叶面积和新梢长度是反映番荔枝营养和生长状况的重要指标,叶面积与光合作用和蒸腾作用密切相关,直接影响光合生产力[27]。研究发现,叶面积与净光合速率之间存在显著的正相关关系($R^2=0.85$,$P<0.01$)。叶面积的增加为光合作用提供了更大的光合面积。W3F2O1 处理叶面积达到 131.63 cm^2,净光合速率在开花后 60 d 达到峰值(10.5 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$),显著高于其他处理。这表明合理的水肥气耦合不仅能够促进叶面积的扩展,还能提高光合效率,进而增加光合产物的积累。研究表明,增加灌水量可提升番荔枝叶面积和光合速率,因为充足的水分促进根系对矿物质的吸收,加速新陈代谢和营养生长[28]。光合作用是作物干物质积累的基础(占比>95%),也是决定产量和品质的关键因素[29]。通过改善土壤水、肥、气状况,可增强光合作用,进而影响作物的产量及品质。农业生产以高产优质为目标,而作物根区的水分、养分和通气性直接影响其对水肥的吸收利用,最终影响产量和品质。本研究基于水肥耦合,结合加气处理,探索水肥气耦合灌溉技术,旨在保证番荔枝产量的同时提升品质。适量增加灌水量和施肥量可提高产量,但过量施肥可能导致减产。作物根区缺氧会抑制水肥及矿质营养的吸收与传输进而导致减产,而增氧灌溉则能提高产量,促进肥料利用,减少肥料用量[30-31]。研究表明,加气灌溉条件下,过量施肥并未带来更高产量,反而可能抑制作物干物质积累[32]。因此,合理调控水、肥、气之间的耦合关系是实现作物高产优质的关键。

研究表明,水肥气耦合对番荔枝品质的影响是多因素生理代谢与环境因子协同作用的结果。维生素 C 的积累呈现非线性特征。高水肥条件(如 W3F3O2)虽通过增强光合作用为抗坏血酸合成提供碳源,但溶氧量过高诱导活性氧积累,激活抗坏血酸氧化酶,加速其降解,导致净含量增速放缓。这揭示了溶氧调控的双刃剑效应,即适度增氧可促进根系呼吸与养分吸收,但过量可能打破氧化还原平衡,需通过动态监测根际溶解氧阈值优化加气策略。可溶性糖与固形物的积累差异反映了水肥耦合的“双向驱动”机制;中水条件(W2F3O1)通过诱导蔗糖磷酸合成酶活性上调促进糖分合成,而高肥供应为糖代谢提供酶促反应的 ATP 与辅因子;高水肥组合(W3F3O2)虽可能稀释细胞内可溶性物质,但通过改善土壤通气性增强磷钾吸收效率,促进淀粉向可溶性固形物的转化。总体来看,产量和品质的形成与光合产物的分配和养分吸收密切相关。在 W3F2O1 处理中,高灌水量和适中施肥量显著提高了光合产物向果实的分配效率。例如,该处理下单果重达到 350.04 g、单株产量为 9.83 kg,较对照处理分别提高了 13.45%、11.96%。从养分吸收角度来看,适中的施肥量(1 700 $kg \cdot hm^{-2}$)避免了根际盐害,同时促进了根系对矿质元素的吸收,为果实膨大提供了充足的营养支持。在品质指标方面,维生素 C 和可溶性糖的积累与光合碳代谢效率密切相关。W2F3O1 处理维生素 C 含量(29.24 mg · $100g^{-1}$)和可溶性糖含量(19.01%)表现最优。这可能是由于中等灌水量和高施肥量通过激活抗坏血酸合成路径中的关键酶活性,促进了维生素 C 的积累。适度的水分胁迫诱导了糖分积累响应机制,进一步提高了可溶性糖含量。值得注意的是,水肥气耦合对各品质指标的影响存在异质性。如表 6 所示,W3F2O1 处理的可溶性固形物含量(22.56%)与 W3F3O2(25.09%)差异显著($P<0.05$),但前者通过平衡水肥供应避免了高溶氧可能引发的根系氧化应激(有机酸含量降低 23%)。这种非同步响应的特征提示,实际应用中需根据市场需求选择方案,若以鲜食市场为主,可优先选择 W3F2O1 保证产量与口感平衡;若用于加工高维生素 C 产品,则 W2F3O1 更为适宜。

AHP 和 TOPSIS 方法是解决多准则决策问题的两种常用工具。AHP 通过构建层次结构和判断矩阵,依赖专家打分量化指标重要性,具有系统性和逻辑性,但其结果易受主观性影响,且对判断矩阵的一致性要求较高。TOPSIS 方法通过计算方案与理想解和负理想解之间的接近度,直观呈现方案优劣,具有较强的客观性,但对数据质量和完整性要

求高且权重确定方法单一,可能影响结果的准确性。将 AHP 与 TOPSIS 结合既能通过 AHP 反映决策者主观意愿,又能利用 TOPSIS 的客观计算提升决策的科学性和全面性,降低主观偏误风险。本研究采用 AHP 确定权重,结合 TOPSIS 对水肥气三因素进行综合评价,筛选最优处理水平,可为干热河谷区农业种植模式提供可借鉴的参考方案。

云南干热河谷区广泛分布于省内多个流域,其中以红河流域的元江县最具代表性。该地区气候特征表现为显著的干热条件,日照时数长,终年无霜冻,形成了得天独厚的天然温室环境。基于这一独特的自然资源优势,该区域已发展成为云南省重要的热带水果生产基地、反季节蔬菜种植区和高档花卉产业带。这种特殊的自然环境禀赋不仅为区域经济增长提供了持续动力,更成为引领云南高原特色现代农业发展的关键推动力。然而该地区年降水量稀少,且降水年际分配不均,常在作物需水关键期出现季节性干旱,严重制约了干热河谷区农业的可持续发展。在此背景下,番荔枝种植作为干热河谷区特色农业的典型代表,实现了生态环境保护与区域经济协调发展的双赢局面。该研究通过 AHP-TOPSIS 相结合的综合评价方法筛选出最优处理方案,不仅可提升作物产量和经济效益,还能为类似生态脆弱区的农业可持续发展提供方法论参考;同时可为精准调控水、肥、气耦合关系实现干热河谷区番荔枝高品质、高效益生产的种植模式提供了理论依据和科学支撑。

4　结　论

1)综合表现最优处理:W3F2O1(高水、中肥、低溶氧)在多数指标上表现均衡,其单株产量(9.83 kg)、单果重(350.04 g)和叶面积(131.63 cm^2)均显著优于其他处理($P<0.05$),虽有机酸含量(0.3%)略低于 W3F3O2 处理(0.41%),但差异不显著($P>0.05$),表明该方案在保证高产的同时未显著牺牲果实风味品质。

2)产量与品质权衡策略:W2F3O1(中水、高肥、低溶氧)在特定品质指标上表现突出,其维生素 C(29.24 mg · $100g^{-1}$)和可溶性糖含量(19.01%)较 W3F2O1 分别提升 9.1%和 2.9%,但单株产量降低 3.2%,建议作为高品质栽培的备选方案。

3)综合评价体系验证:通过 AHP-TOPSIS 模型分析,产量指标(权重 0.348)与品质(权重 0.057)的权重差异显著,W3F2O1 处理在核心指标上的优势弥补了次要指标的微小不足,符合农业生产中保产量、调品质的优先策略。AHP-TOPSIS 模型融合主客观权重,筛选出 W3F2O1 为综合最优方案,W2F3O1 处理则适合高品质栽培。

参 考 文 献:

[1] 郑树芳, 陈海生, 谭秋锦, 等. AP 番荔枝在广西崇左的引种表现及栽培技术[J]. 中国热带农业, 2024, (2): 11-16.
ZHENG S F, CHEN H S, TAN Q J, et al. Introduction performance and cultivation techniques of AP *Annona squamosa* L. in Chongzuo of Guangxi[J]. China Tropical Agriculture, 2024, (2): 11-16.

[2] 穆军, 李占斌, 李鹏, 等. 干热河谷干季土壤水分动态研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 22-25.
MU J, LI Z B, LI P, et al. Study on soil moisture dynamic variation law in dry seasons in dry-hot valley areas[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12): 22-25.

[3] 何永彬, 朱彤, 卢培泽. 云南干热河谷特色农业开发[J]. 山地学报, 2002, 20(4): 445-449.
HE Y B, ZHU T, LU P Z. The research on the exploitation of featured agriculture in the hot and dry valley of Yunnan [J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(4): 445-449.

[4] 徐娜. 水肥气耦合滴灌调控温室生菜土壤微环境及生产性能的效应研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2024.
XU N. Study on the effect of water fertilizer air coupling drip irrigation on regulating the soil microenvironment and production performance of lettuce in greenhouse[D]. Yantai: Ludong University, 2024.

[5] 唐志瀚. 水肥气耦合地下滴灌对温室番茄生长影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
TANG Z H. Study on the effect of water fertilizer gas coupled underground drip irrigation on the growth of greenhouse tomatoes[D]. Tyan: Shandong Agricultural University, 2022.

[6] WANG Y, FU D L, PAN LL, et al. The coupling effect of water and fertilizer on the growth of tea plants[*Camellia sinensis*(L.)O.Kuntz][J]. Journal of Plant Nutrition, 2016, 39(5): 620-627.

[7] EDWARDS A C, WITHERS P J A. Soil phosphorus management and water quality:a UK perspective[J]. Soil Use and Management, 1998, 14(S4): 124-130.

[8] 再吐娜·买买提, 艾则提古力·阿里木, 姚军, 等. 电霸鲜技术对温室甜瓜产量和品质的影响[J]. 种子科技, 2021, 39(4): 13-14.
ZAI TU NA M M T, AI ZE TI GU LI A L M, YAO J, et al. The effect of Dianba fresh technology on the yield and quality of greenhouse melons[J]. Seed Science & Technology, 2021, 39(4): 13-14.

[9] ESSAH S Y, HOLM D G. Air injection of subsurface drip irrigation water improves tuber yield and quality of russet potato[J]. American Journal of Potato Research, 2020, 97(4): 432-438.

[10] ZHU Y, DYCK M, CAI H J, et al. The effects of aerated irrigation on soil respiration, oxygen, and porosity[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(12): 2854-2868.

[11] 张茉莉, 袁鹏, 宋永会, 等. 基于案例推理的突发环境事件应急管理案例库构建技术研究[J]. 环境工程技术学报, 2015, (5): 386-392.
ZHANG M L, YUAN P, SONG Y H, et al. Development of establishing technology of abrupt environment accident case library for emergency management based on case-based reasoning[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, (5): 386-392.

[12] 黄兰馨. 基于层次分析法的图书馆人工智能服务质量评价研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.

HUANG L X. Research on the evaluation of library artificial intelligence service quality based on analytic hierarchy process[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.

[13] 王文迪, 张智勇, 刘晓芳, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的大豆种质资源综合评价[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(18): 20-23.
WANG W D, ZHANG Z Y, LIU X F, et al. Comprehensive evaluation of soybean germplasm resources based on entropy weight TOPSIS method[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2024, 30(18): 20-23.

[14] 马永仁, 徐文修, 朱美玲, 等. TOPSIS 法在设施农业种植模式综合评价中的应用[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(12): 2367-2370.
MA Y R, XU W X, ZHU M L, et al. Application of TOPSIS to the comprehensive evaluation of cropping patterns in facility agriculture [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(12): 2367-2370.

[15] 雷宏军, 肖哲元, 肖让, 等. 水、肥、气耦合滴灌对温室番茄生长和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 168-175.
LEI H J, XIAO Z Y, XIAO R, et al. The effect of water, fertilizer, and gas coupled drip irrigation on the growth and quality of greenhouse tomatoes[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 168-175.

[16] 蔡礼良. 水肥气耦合对干热河谷区番荔枝生长、产量及品质的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
CAI L L.The effect of water fertilizer air coupling on the growth, yield, and quality of litchi in dry-hot valley areas[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D; et al. Crop evapotranspiration:guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation Drain, 1998, 56: 147-151.

[18] PLEGUEZUELO C R R, ZURZO V H D, MARTÍNEZ J R F, et al. Monitoring the pollution risk and water use in orchard terraces with mango and cherimoya trees by drainage lysimeters[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2011, 25(2): 61-79.

[19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[20] 鲁玲, 蒲秋平, 王敏, 等. 基于博弈论与改进 CRITIC-AHP 的配电网线路脆弱性评估[J]. 水电能源科学, 2024, 42(9): 208-211, 129.
LU L, PU Q P, WANG M, et al. Distribution line vulnerability assessment based on game theory and improved CRITIC-AHP [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(9): 208-211, 129.

[21] BHADRA D R D, DHAR N R, SALAM M A. Sensitivity analysis of the integrated AHP-TOPSIS and CRITIC-TOPSIS method for selection of the natural fiber[J]. Materials Today:Proceedings, 2022, 56: 2618-2629.

[22] 杜辉. H 县配电网线损预测及管理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
DU H. Research on line loss prediction and management of H county distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[23] 信桂新, 杨朝现, 杨庆媛, 等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 238-249.
XIN G X, YANG Z X, YANG Q Y, et al. Post-evaluation of well-facilitied capital farmland construction based on entropy weight method and improved TOPSIS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 238-249.

[24] 臧明. 水肥气耦合滴灌下土壤--作物响应机理研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
ZANG M. Study on soil crop response mechanism under water fertilizer air coupled drip irrigation[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.

[25] 宋夏夏, 束胜, 郭世荣, 等. 黄瓜基质栽培营养液配方的优化[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(2): 197-204.
SONG X X, SHU S, GUO S R, et al. Optimization of nutrient solution formula applied in cucumber cultivation with substrate [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2015, 38(2): 197-204.

[26] 汪精海, 李广, 余晓雄, 等. 调亏微喷灌对高寒荒漠区人工草地产量、品质及水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 200-207, 216.
WANG J H, LI G, YU X X, et al. Effects of regulated deficit microsprinkler irrigation on the yield, quality and water utilization of artificial grassland in alpine desert area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 200-207, 216.

[27] 崔亮, 苏本营, 杨峰, 等. 带状套作大豆群体冠层光能截获与利用特征[J]. 中国农业科学, 2015, (1): 43-54.
CUI L, SU B Y, YANG F, et al. Relationship between light interception and light utilization of soybean canopy in relay strip intercropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, (1): 43-54.

[28] 房祥吉, 姜远茂, 彭福田, 等. 灌水量对盆栽平邑甜茶生长与 15N 吸收、利用和损失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 76-78, 122.
FANG X J, JIANG Y M, PENG F T, et al. Effect of irrigation amount on growth and 15N absorption, utilization and loss of potted *Malus hupenhensis*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 76-78, 122.

[29] AHMAD N, ZAIDI S S, MANSOOR S. Alternative routes to improving photosynthesis in field crops[J]. Trends in Plant Science, 2020, 25(10): 958-960.

[30] 赵丰云, 郁松林, 孙军利, 等. 加气灌溉对温室葡萄生长及不同形态氮素吸收利用影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 228-234.
ZHAO F Y, YU S L, SUN J L, et al. Effect of rhizosphere aeration on growth and absorption, distribution and utilization of NH_4^+-N and NO_3^--N of red globe grape seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 228-234.

[31] 乔建磊, 张冲, 徐佳, 等. 加气滴灌对蓝莓光合生理的影响[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(5): 89-93.
QIAO J L, ZHANG C, XU J, et al. Effects of aeration irrigation on photosynthetic physiology of blueberry[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(5): 89-93.

[32] 李元, 牛文全, 吕望, 等. 加气灌溉改善大棚番茄光合特性及干物质积累[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 125-132.
LI Y, NIU W Q, LV W, et al. Aerated irrigation improving photosynthesis characteristics and dry matter accumulation of greenhouse tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 125-132.