文章编号:1000-7601(2025)06-0140-10 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.14

基于 PCA-GRA 的番荔枝水肥气耦合效应解析与灌溉决策

余 红,刘娅芳,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:为实现番荔枝高效栽培和增产提质目标,实施有效的种植管理、筛选出最佳灌溉方案,以番荔枝为对象,在云南省干热河谷地区开展三因素三水平正交试验(灌溉量、施肥量、溶氧量),探究水肥气耦合对番荔枝生长、产量及品质的影响,并基于主成分分析(PCA)与灰色关联分析(GRA)构建综合评价模型。结果表明:不同水肥气处理对番荔枝的土壤酶活性、光合特性、产量和品质指标均有显著影响。其中,W3F2O1 处理(100%ET_c灌水+1 600 kg·hm^{-2}施肥+5 mg·L^{-1}溶氧)综合表现最优,其单株产量 9.83 kg,较对照处理提升 11.96%,净光合速率峰值 10.5 μmol·m^{-2}·s^{-1},通过平衡水肥气配比显著降低有机酸含量(0.30%)实现产量与品质协同优化。W3F3O2 处理(高水、高肥、中氧)虽在维生素 C(29.9 mg·$100g^{-1}$)和可溶性固形物(25.09%)含量方面表现突出,但存在有机酸积累问题。通过 PCA-GRA 综合评价方法验证,推荐 W3F2O1 处理作为番荔枝高产优质栽培的最优方案,W3F3O2 处理作为高品质栽培的备选方案。该研究为热带果树精准灌溉提供了理论依据并验证了多方法融合评价在农业系统中的适用性。

关键词:番荔枝;水肥气耦合;主成分分析;灰色关联度;综合评价

中图分类号:S667 **文献标志码**:A

Analysis of water-fertilizer-gas coupling effect and irrigation decision-making for *Annona squamosa* based on PCA-GRA

YU Hong, LIU Yafang, CAI Liliang, WANG Weihua

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

Abstract: To achieve efficient cultivation and improve the yield and quality of *Annona squamosa* L. (custard apple), effective planting management and optimal irrigation schemes were implemented. A three-factor, three-level orthogonal experiment (irrigation rate, fertilization rate, and dissolved oxygen) was conducted in the dry-hot valley region of Yunnan Province to investigate the effects of water-fertilizer-gas coupling on custard apple growth, yield, and quality. A comprehensive evaluation model was constructed based on principal component analysis and grey correlation analysis. The results showed that different water-fertilizer-gas treatments significantly affected soil enzyme activity, photosynthetic characteristics, yield, and quality indicators of custard apple. The W3F2O1 treatment (100% ET_c irrigation + 1 600 kg·hm^{-2} fertilization + 5 mg·L^{-1} dissolved oxygen) achieved the best overall performance, with a yield of 9.83 kg per plant, an 11.96% increase compared to the control treatment, and a peak net photosynthetic rate of 10.5 μmol·m^{-2}·s^{-1}. By balancing the water-fertilizer-gas ratio, the organic acid content was significantly reduced (by 0.30%), achieving synergistic optimization of yield and quality. While the W3F3O2 treatment (high water, high fertilizer, moderate oxygen) showed outstanding results in terms of vitamin C (29.9 mg·$100g^{-1}$) and soluble solids (25.09%), it also suffered from organic acid accumulation. Using the PCA-GRA comprehensive evaluation method, the W3F2O1 treatment was recommended as the optimal solution for high-yield and high-quality custard apple cultivation, while the W3F3O2 treatment was recommended as an alternative for

收稿日期:2025-07-21 **修回日期**:2025-09-03

基金资助: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

high-quality cultivation. This study provides a theoretical basis for precision irrigation of tropical fruit trees and validates the applicability of multi-method fusion evaluation in agricultural systems.

Keywords: *Annona squamosa* L.; water-fertiliser-air coupling; principal component analysis; grey relational analysis; comprehensive evaluation

番荔枝(*Annona squamosa* L.)位列世界五大热带名果之一,在我国广东、广西、福建、云南和海南等地区均有大面积种植。番荔枝果肉呈乳白色,口感绵密,富含糖类、氨基酸、蛋白质、维生素、矿物质[1-3]。水分管理、肥料施用和土壤通气性是影响番荔枝生长发育和优质高产的三个重要因素。在实际农业生产环节里,部分种植者为了单纯追求高产而大量投入水肥资源,这种过度的水肥投入不仅造成了大量养分在土壤中的无谓残留,还对土壤结构造成了严重破坏,导致土壤物理结构失衡、土壤通气性显著降低以及土壤板结和盐渍化等一系列问题[4],进而引发水肥资源过度消耗和作物产量和品质降低的问题[5-6]。云南干热河谷区属于典型的季节性干旱区,水资源短缺已成为制约热带果树产业发展的核心瓶颈,因此,如何科学合理地施用水肥,成为了农业生产中亟待解决的重要课题。干旱区作物通过调控水肥气耦合关系可提升水分利用效率 20%~30%,但针对番荔枝的相关研究仍集中于湿润地区,缺乏干旱胁迫下的优化方案。适度的水分亏缺不仅不会对其产量产生显著的负面影响,反而能够提升其品质[7],然而一旦水分亏缺超过了适宜范围,就会导致作物的光合性能和干物质积累量出现下降,进而引发产量和品质的双重降低[8]。在施肥方面,适量施用钾肥可以显著提高番荔枝果实中可溶性糖和维生素 C 含量[9],适量氮肥则能够提升可溶性固形物含量和果实品质,而过量施用氮肥可导致可溶性固形物含量降低[10-11]。与传统的水肥一体化灌溉方式相比,加气灌溉可有效缓解灌水过程中出现的土壤通气状况差的问题,有利于根系进行呼吸和发育,促进植株的光合作用,良好的土壤通气性是作物正常生长发育的保证[12-13]。众多国内外学者运用前沿技术构建了多指标评价分析模型,例如主成分分析法和层次分析法等[14-15];此外,隶属函数分析法、灰色关联度分析法以及基于组合赋权的 TOPSIS 模型等方法在多指标评价领域也展现出了良好的应用成效。这些基于单一评价方法的研究在利用信息时角度和侧重点各异,存在数据波动大、难以探寻典型分布规律,从而降低了评价结果的精准度。

本研究结合主成分分析(PCA)与灰色关联度分析(GRA),首先对原始数据进行标准化以消除量纲差异,利用 PCA 提取主成分并降维,依据方差贡献率确定权重;进而将主成分得分作为 GRA 输入,通过计算关联系数与关联度,结合两者结果构建综合评价指标,实现评价对象的排序与分类[16-17]。该方法可有效处理多指标复杂数据,提高评价的科学性与准确性,适用于番荔枝水肥气耦合方案的优化筛选,为实现作物优质高产及农业可持续发展提供理论依据与技术支撑[18]。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处理设计,从而优化番荔枝的种植管理,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 月在云南干热河谷区种植 5 年的番荔枝果园进行(102°5′51″E,23°30′22″N,)。本试验涵盖番荔枝生长的四个生育期,包括花芽分化期、开花坐果期、果实膨大期、成熟期。研究区属典型南亚热带季风干热气候,全年降水呈现明显的季节性差异,旱季与雨季界限分明。该地区太阳辐射资源丰富,年平均日照时间 2 291.7 h,年降水量 786 mm,年蒸发量 2 750 mm,年平均温度维持在23.8℃左右。由于气候温暖,该地区几乎不会出现霜冻现象。园地土壤主要为红壤,容重 1.35 g·cm^{-3},pH 为 6.7。显著的昼夜温度差和得天独厚的自然环境为作物养分合成创造了有利条件,特别适合番荔枝等热带经济作物的栽培。

本试验选取树龄 5 年、生长健壮且长势均匀的番荔枝(*Annona squamosal* L.)作为供试材料,砧木为普通番荔枝,嫁接品种为‘凤梨释迦’。供试果树地径 85~100 mm,株高 2.0~2.2 m,株行距为 2 m × 3 m。施用肥料为水溶性果树专用复合肥($N-P_2O_5-K_2O$ 配比 15-15-15,商品名‘雪绿丰’,赛固特生物科技有限公司生产)。采用微纳米气泡发生系统结合增氧设备制备富氧灌溉水,并利用在线溶氧仪实时监测水体溶解氧浓度。试验设计采用随机区组排列,每个处理对应独立小区,灌溉方式为滴灌,每小区布设两条滴灌带(内径 16 mm),沿树行方向铺设,距树干 10 cm,单株配置 4 个滴头(间距 40 cm、流量 3

L·h^{-1})。各生育阶段的灌溉、施肥及增氧操作均按试验方案执行,其余田间管理措施保持一致。

1.2 试验设计

设置三因素三水平正交试验探究灌溉量、施肥强度和溶解氧浓度对番荔枝生长的影响,共 9 种处理组合(详见表 1、2)。基于前期水肥协同效应研究成果,结合干热河谷地区气候特征及番荔枝水分需求特性,灌溉梯度设置重度缺水处理(W1,60% ET_c)、适度缺水处理(W2,80% ET_c)和充足供水处理(W3,100% ET_c),肥料施用设置高浓度(F1,1 900 kg·hm^{-2})、中浓度(F2,1 700 kg·hm^{-2})和低浓度(F3,1 500 kg·hm^{-2}),水体溶氧量设置高溶氧(O1,9 mg·L^{-1})、中溶氧(O2,7 mg·L^{-1})和低溶氧(O3,5 mg·L^{-1})。养分补充与水分管理同步实施,借助水肥一体化滴灌系统,将特制复合肥溶液均匀输送至作物根区。每月灌溉阶段首日进行营养补给,以保证植株养分高效吸收。通过微纳米气泡发生器和曝气设备调控水体溶氧水平,并利用在线溶氧监测仪维持预设浓度稳定。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[19] 方程估算 ET_0(式 1),相关气象数据来源于试验站的气象站。根据 Rodriguez-Pleguezuel 等[20] 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。

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

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和 e_a分别为饱和水汽压和实际水汽压(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 the experimental factor.

1.3 试验指标及测定方法

1.3.1 土壤含水率、土壤养分以及酶活性 土壤含水率:番荔枝的根系多分布在 15~35 cm 土层,在番荔枝的四个生育阶段最后一次灌水后 4 d 取 25 cm 土层土壤并采用烘干法测定土壤含水率。土壤养分含量:每个生育期结束阶段用土钻获取番荔枝根系 25 cm 土层土壤,过 2 mm 筛,硝态氮使用 1 mol·L^{-1}KCl 浸提,采用紫外可见分光光度测定;速效磷使用 0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提,采取钼锑抗比色法测定;速效钾使用火焰光度计测量。酶活性:在番荔枝的四个生育阶段每次灌水后 4 d 采集根区 0~35 cm 土层的混合土壤样品,使用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶活性;使用磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶活性;使用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶活性,每个土壤样品重复 3 次,同时做无土和无基质两种对照。

1.3.2 番荔枝叶面积、光合指标 试验方案实施后每个处理随机选取 3 棵果树,选每棵番荔枝树上主茎顶部的叶片进行标记,各生育期所测叶片均为标记叶片。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)。采用 Li-6400 便携式光合仪(Li-Cor,美国)测定净光合速率。在生育期第 30、60、100、150 天时每个处理随机选取 3 株果树,测定并标记功能叶片。

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

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。

1.3.3　*番荔枝产量指标*　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 个果实并使用天平称量。单株产量:成熟期采收记录每棵番荔枝树的果实并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。

1.3.4　*番荔枝品质指标*　待果实采摘放置常温软熟后进行各项指标测定,采用手持糖度计测定可溶性固形物含量,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素 C 含量,采用碱滴定指示剂法测定有机酸含量[21]。

1.4　主成分分析和灰色关联算法结合的综合评价

采用主成分分析(PCA)与灰色关联分析(GRA)相结合的方法进行综合评价。首先利用 PCA 对多指标数据进行降维处理,通过计算主成分得分并依据方差贡献率确定权重,提取核心信息;随后将得到的主成分得分作为 GRA 的输入,以理想方案为参考序列,通过计算关联系数和关联度,量化各方案与理想解的接近程度,最终根据关联度进行排序择优[22-23],具体步骤如图 1 所示。

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 和 Matlab 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($P \leqslant 0.05$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2　结果与分析

2.1　水肥气耦合对土壤水分、养分及酶活性的影响

2.1.1　*土壤含水量*　通过对番荔枝生育期土壤含水率的正交试验分析发现,水肥气耦合对土壤水分状况产生显著影响(图 2)。不同水分管理模式对土壤含水率起决定性作用,其中 W1 处理的土壤持水能力明显优于 W3 处理。在相同水分条件下,施肥通过改变作物蒸腾速率和土壤物理性质来调控水分动态,如高氮处理加速水分耗散,而有机改良剂则增强土壤保水性。研究还揭示了水肥交互作用的复杂性,W1F1O1 等优化组合实现了水分高效利用,而 W3F3O2 等处理则因双重胁迫导致水分状况恶化。另一方面,施肥量主要影响番荔枝根系对水分的吸收,对土壤含水率的影响不显著。各处理不同生育期的土壤含水率随时间变化而变化,开花坐果期土壤含水率最低,成熟期土壤含水率最高,主要原因是 5 月温度较高,蒸发作用增强,9 月气温降低,蒸发量减小。

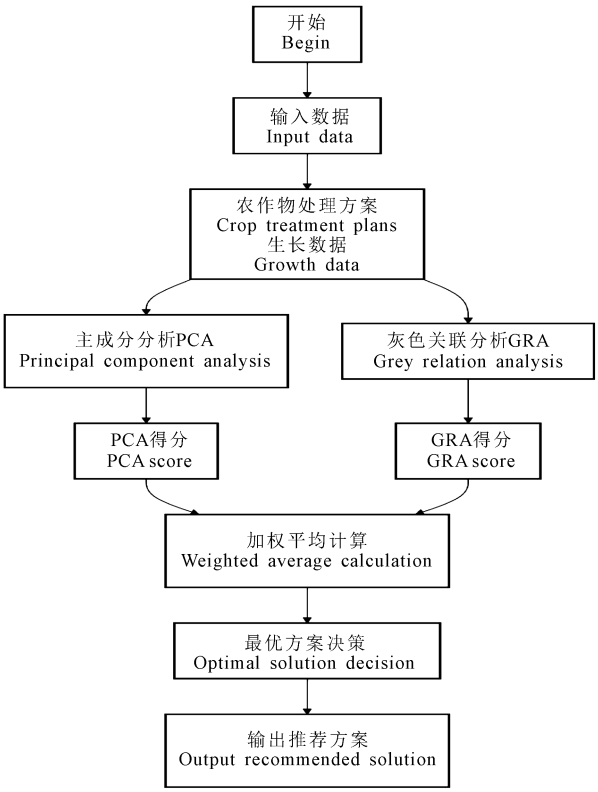
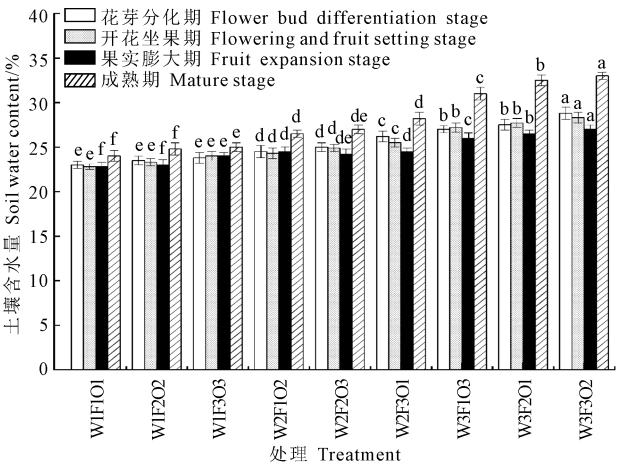


图 1　基于 PCA-GRA 的综合算法步骤

Fig.1　Comprehensive algorithm steps based on PCA-GRA



注:不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$, the same below.

图 2　生育期内各处理土壤含水率变化

Fig.2　Changes in soil moisture content during growth stages of different treatments

2.1.2 土壤养分 通过对番荔枝生育期土壤养分的正交试验分析发现,如图 3 所示,硝态氮含量随施肥量增加而升高,且花芽分化期和成熟期含量普遍高于开花坐果期和果实膨大期,表明后期氮素吸收减弱。速效磷和速效钾的变化趋势相似,均在开花坐果期显著下降,果实膨大期略有回升,成熟期又显著增加,说明开花坐果期磷、钾吸收最强。在各处理中,W1F3O3 处理的速效磷和速效钾含量最高,而 W3F1O3 处理含量最低,反映出高水低肥条件不利于磷钾积累,低水高肥则显著促进养分供应。同时看出,水、肥、气三因素对土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量的影响程度表现为施肥量(F)>灌水量(W)>溶氧量(O)。番荔枝对三种养分的吸收量表现为硝态氮>速效磷>速效钾,且不同生育期吸收强度差异显著:开花坐果期和果实膨大期对氮、磷、钾的吸收量显著高于花芽分化期和成熟期,整体随生育进程呈先升后降趋势。

2.1.3 土壤酶活性 在番荔枝的生育期内,水肥气耦合对土壤中过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶的活性产生了显著影响,这些酶的活性变化与土壤养分的转化和循环密切相关,进而影响作物的生长和发育。不同处理下的酶活性在各个生育阶段表现出明显差异(图 4)。在花芽分化期,W1F3O3 处理土壤过氧化氢酶活性相对较高;随着生育期推进,W2F2O3 处理在果实膨大期其土壤过氧化氢酶活性较高,这是因为该处理的水肥气条件更有利于土壤微生物的繁殖和代谢活动,进而提高了酶活性,有助于分解土壤中的有机物质,释放出更多的养分供植物吸收。对于磷酸酶和脲酶而言,其活性的变化也呈现出类似趋势,不同处理在不同生育阶段的酶活性高低反映出水肥气条件对土壤微生物活性和酶合成的影响。W1F3O3 处理在成熟期的磷酸酶活性相对较高,这意味着该处理下土壤中的磷素循环较为活跃,有利于植物对磷素的吸收和利用;而脲酶活性的变化则与土壤中的氮素转化过程紧密相关,较高的脲酶活性有助于将尿素等有机氮源转化为植物可利用的无机氮,促进植物生长。总体而言,高水或高肥处理土壤中过氧化氢酶活性有较大值,灌水定额和施肥量对土壤中过氧化氢酶活性影响显著;磷酸酶活性在整个生育周期内呈现出先上升后下降趋势,三因素中灌水定额和溶氧量对土壤中磷酸酶影响显著;脲酶活性在开花期有最大值,对应 W1F3O3 处理。

2.2 水肥气耦合对番荔枝生长生理的影响

2.2.1 叶面积 水、肥、气三因素对叶面积的扩展具有显著的协同效应。如图 5 所示,W3F2O1 处理(充分灌溉、中施肥量、低溶氧量)在整个生育期内表现出最优的叶面积增长趋势,成熟期叶面积达到 131.63 cm^2。这一结果主要归因于充分灌溉(100% ET_c)在果实膨大期等关键阶段维持了土壤水分的稳定供应,促进了根系对养分的吸收;中等施肥量(1 700 $kg \cdot hm^{-2}$)避免了氮素过量导致的叶片徒长,同时保证了碳氮代谢的平衡。值得注意的是,低溶氧量(5 $mg \cdot L^{-1}$)可能通过调节根系抗氧化酶活性减少了活性氧对根尖分生组织的损伤,间接提升了叶片的扩展能力。相比之下,W3F3O2 处理(充分灌溉、高施肥量、中溶氧量)在花芽分化期表现出较快的叶面积增长(32.31 cm^2),但在生育后期叶面积扩展受到抑制,表明高施肥量在短期内可能促进叶片生长,但长期来看可能导致养分失衡。此外,W2F3O1 处理(中等灌溉、高施肥量、低溶氧量)在果实膨大期叶面积达到 127.83 cm^2,说明 80%ET_c的灌溉水平与高施肥量的组合能够延缓叶片衰老,但其效果仍受限于水分不足对细胞膨压的影响。

2.2.2 叶片净光合速率 不同处理下番荔枝叶片的净光合速率在生长周期内呈现动态变化,且表现出明显的日变化特征(图 6)。总体来看,净光合速率在开花后 60 d 达到峰值,且上午(11∶00)的光合效率显著高于下午(15∶00)。其中,W3F3O2 处理(充分灌溉、高施肥量、中溶氧量)在峰值时段的光合速率最高(11.53 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$),表明充足的水分和养分供应显著提升了 CO_2 的同化效率。高灌水量处理(如 W3F1O3、W3F2O1)叶片光合速率普遍高于低灌水量处理,进一步证实了水分对光合作用的关键作用。施肥量的效应随生育期动态变化,高施肥量在果实膨大期与高灌水量结合时(如 W3F3O2 处理),显著促进了光合产物向果实的分配,表明水肥协同对光合碳代谢具有重要调控作用。溶氧量的影响表现出非线性特征,W3F2O1 处理(低溶氧量)叶片光合速率与中高溶氧处理相近,甚至在某些生育期表现更优,说明在干热河谷区,适度的溶氧量已能满足根系呼吸需求,过高的溶氧量并未带来额外增益。

2.3 水肥气耦合对番荔枝产量和品质的影响

2.3.1 产量 由图 7 可知,W3F2O1 处理(充分灌溉、中等施肥量、低溶氧量)的单果重(350.04 g)和单株产量(9.83 kg)表现最优,较对照处理(W1F1O1)分别提升 13.45%和 11.96%。这一结果主要得益于充分灌溉提高了水分利用效率,而中等施肥量避免了根际盐害,同时低溶氧量通过调节土壤氧化还原电位改善了根系代谢环境。W3F3O2 处

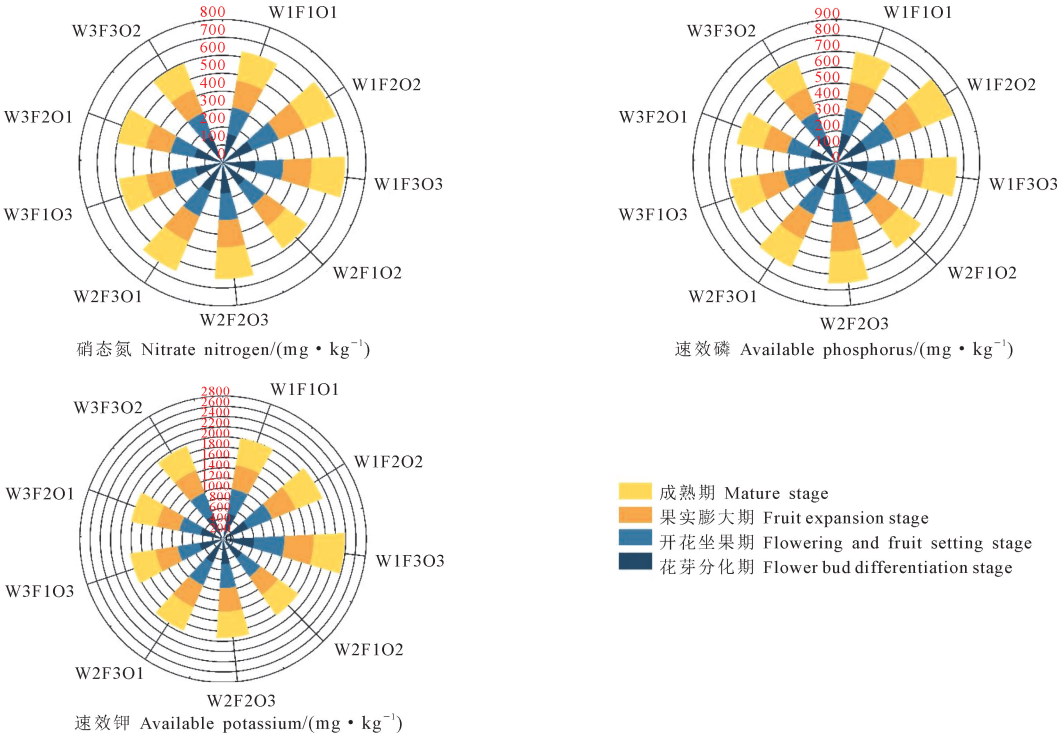


图 3　生育期内各处理土壤硝态氮、速效磷、速效钾含量变化

Fig.3　Changes in nitrate nitrogen, available phosphorus, and available potassium content in the soils during growth stages of different treatments

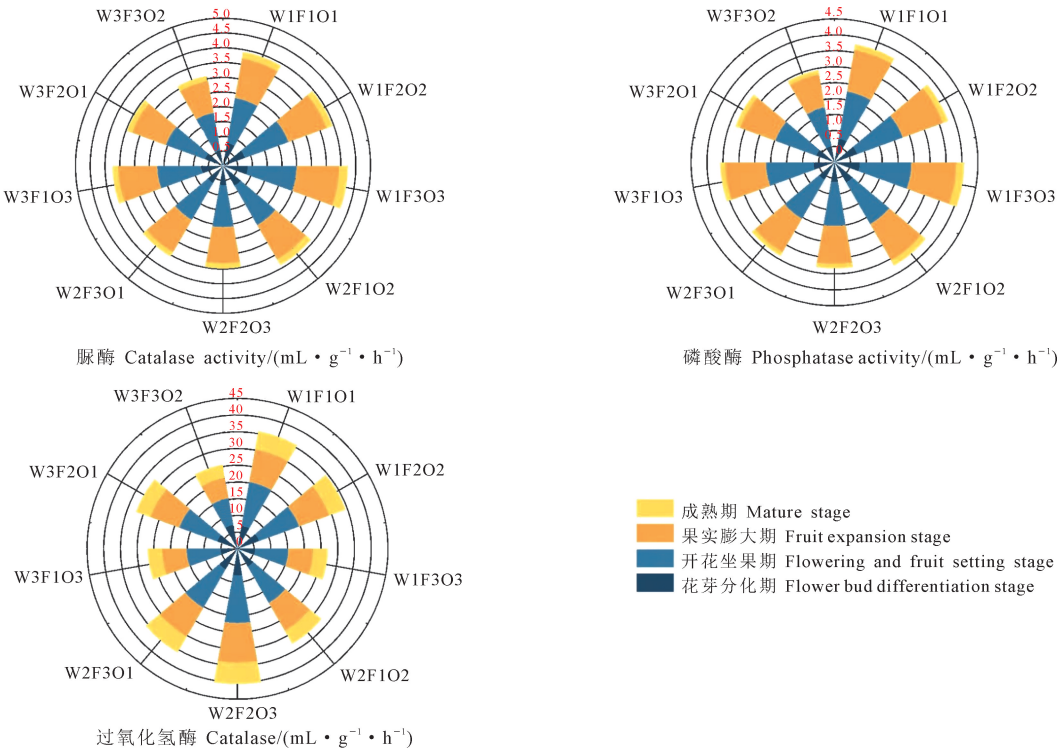


图 4　生育期内各处理土壤酶活性变化

Fig.4　Changes in soil enzyme activity during growth stages of different treatments

理(充分灌溉、高施肥量、中溶氧量)的单株产量(9.82 kg)与 W3F2O1 相近,但单果重略低(348.88 g),表明高施肥量可能并未显著提升干物质积累效率。此外,W2F3O1 处理(中等灌溉、高施肥量、低溶氧量)的产量表现也较为突出,说明在水分受限条件下,高施肥量仍能通过促进养分吸收支持产量

形成。

2.3.2 品质 从图 8 可知,W3F3O2 处理的维生素 C 含量最高(29.90 mg · 100g^{-1}),较对照提升 30.2%,表明高水肥与中溶氧量组合能够有效激活抗坏血酸合成路径。W2F3O1 处理(中等灌溉、高施肥量、低溶氧量)的可溶性总糖含量最高(19.01%),与适度的水分胁迫诱导糖分积累有关。此外,W3F3O2 处理的可溶性固形物含量最高(25.09%),进一步证实了水肥气协同对干物质分配的积极影响;该处理有机酸含量也显著升高(0.41%),与高溶氧环境下三羧酸循环活性增强有关。相比之下,W3F2O1 处理的维生素 C 和可溶性糖含量略低于上述处理,但其通过平衡水肥气配比实现了产量与品质的综合优化,体现了多目标决策的科学性。

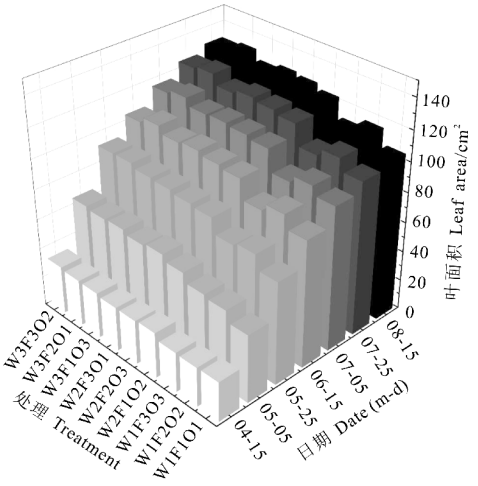


图 5 生育期内各处理叶面积变化

Fig.5 Changes in leaf area during growth stages of different treatments

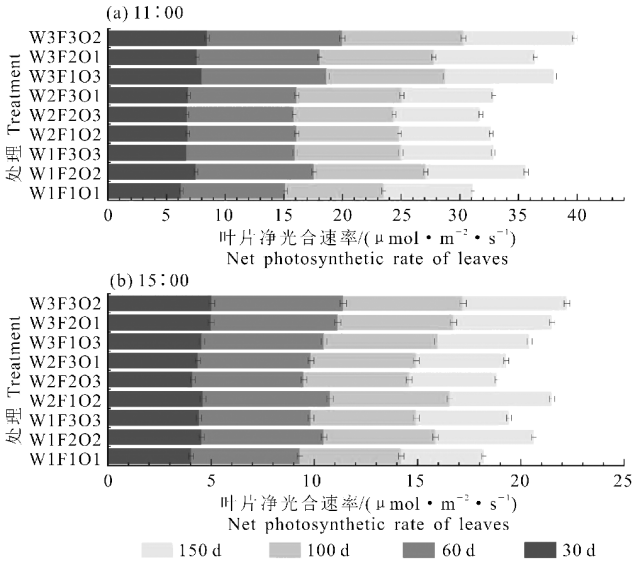


图 6 生育期内各处理叶片净光合速率变化

Fig.6 Changes in net photosynthetic rate of leaves during growth stages of different treatments

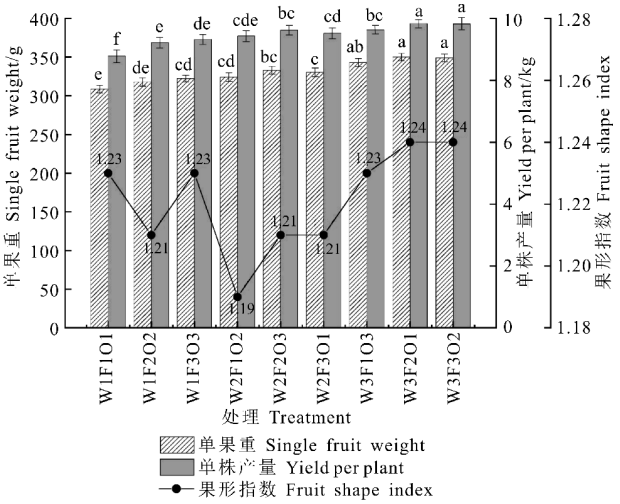


图 7 不同处理对番荔枝产量指标影响

Fig.7 Effects of different treatments on yield indicators for *Annona squamosa*

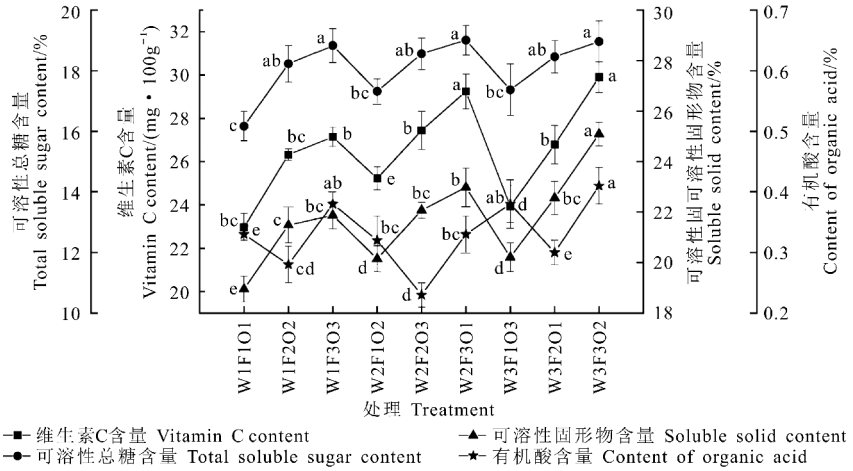


图 8 不同处理番荔枝品质指标变化

Fig.8 Changes in quality indicators for *Annona squamosa* of different treatments

2.4　基于 PCA-GRA 的番荔枝水肥气耦合生长综合评价

本研究采用 PCA 与 GRA 相结合的方法构建综合评价模型。PCA 通过降维保留 85%以上核心信息,并基于方差贡献率客观赋权,避免多重共线性对产量指标的放大;GRA 则有效量化各处理与理想方案在品质指标上的接近程度,弥补 PCA 非线性分析的不足。经检验,PCA 与 GRA 以 50%-50%加权整合后,W3F2O1 处理稳定性最高(变异系数<5%),两者标准化得分相关性达 0.89。该权重分配契合"高产—优质"双目标需求,兼具可解释性与决策直观性。

通过对番荔枝生理生长及产量品质相关指标进行测量,并依前述计算步骤获得初步数据后,按图 1 所示流程进一步处理,最终得到如图 9 所示的结果。基于 PCA-GRA 综合评价算法对各处理进行排序,从而确定最优方案。从图 9 可以看出,W3F2O1 处理的综合得分最高,说明其在促进番荔枝生长、产量和品质方面具有最优的综合效果。从农业生产实际来看,W3F2O1 处理所体现的综合优势符合多目标协同下的"帕累托最优"原则:充足的灌溉为光合作用提供了良好基础,适中的施肥处理避免了离子拮抗效应,较低的溶氧水平有利于维持氧化还原稳态,从而在产量和品质之间实现了良好平衡。值得注意的是,部分品质指标间存在权衡关系(如维生素 C 与有机酸含量呈负相关),这意味着单一处理难以全面应对多元化、差异化的市场需求,未来需结合功能组学研究建立分级栽培体系。综上所述,W3F2O1 被确定为番荔枝水肥气耦合灌溉中的最佳处理。此外,W3F3O2 处理(高水、高肥、中氧)的 PCA 得分与 GRA 关联度均位列第二,综合评分排名也为第二,且在维生素 C 和有机酸等特定品质指标上表现突出,表明该处理对果实品质具有显著提升作用,可作为面向高品质需求的栽培备选方案。

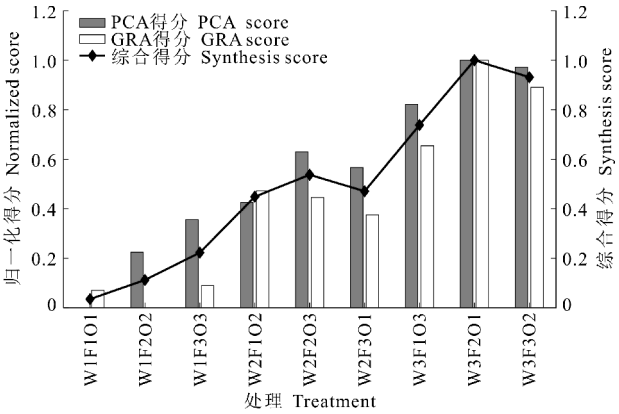


图 9　基于 PCA-GRA 的综合算法的番荔枝生长综合评价得分

Fig.9　Comprehensive evaluation score of growth for *Annona squamosa* based on PCA-GRA comprehensive algorithm

3　讨　论

水、肥、气是影响作物生长的重要因素,研究土壤中水分变化对明确水肥气热耦合作用影响作物生长的机制至关重要。相关研究表明,长期施用有机肥能显著增加土壤养分含量和作物产量[24],同时随着硝态氮、速效钾、速效磷等土壤速效肥料的不断增加,土壤全氮、全钾和全磷含量也呈相同的增加趋势[25]。土壤酶活性是评价土壤肥力的关键指标,脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶等土壤酶与土壤元素转化密切相关,可参与土壤化学循环。酶是催化和分解养分周转及转化的关键成分,也是衡量土壤健康的重要指标[26]。土壤微生物是土壤根系环境的重要组成部分,其中部分有益微生物有利于保持土壤肥力同时加速进入土壤有机质的矿化[27-28],作物的良好生长不仅需要适宜的水肥条件,更需要协调土壤水、肥、气的关系。叶面积和净光合速率是反映番荔枝生长状况的关键指标[29]。合理的水肥气耦合(如 W3F2O1 处理)显著提升了光合效率,叶面积达 131.63 cm^2,净光合速率峰值提高 23%,这得益于适度灌水、合理施肥和优化增氧的协同作用。该处理在产量上表现最优,单果重和单株产量分别较对照提高 13.45%和 11.96%,而过度施肥或增氧会抑制干物质积累。不同处理对品质的影响差异显著,例如 W2F3O1 处理维生素 C 含量最高(29.24 mg·$100g^{-1}$),而 W3F3O2 处理可溶性固形物含量最高(25.09%),但可能引发根系氧化应激;W3F2O1 处理通过平衡水肥供应降低有机酸含量 23%,实现了产量与品质的协同优化。研究结果为精准灌溉提供了依据:鲜食栽培推荐 W3F2O1,加工用途可优先选择 W2F3O1。通过精确调控水、肥、气的耦合关系,可以实现番荔枝产量和品质的协同提升,这为制定精准栽培方案提供了理论支撑和实践指导。

干热河谷属于半干旱地区,降水量少且时空分布不均,作物生长更易受到水分供应的限制,如何利用有限的水资源、节水灌溉以及合理灌溉已成为区域生态农业发展研究的热点,更是促进干旱半干旱地区经济发展和改善生态环境的有效途径[30-31]。大田试验中肥随水滴施的过程会受到灌水均匀度、灌水稳定性以及土壤结构紧密程度等影响,导致肥水在渗透过程中存在不确定性。因此,在水肥相互配合施用过程中,要适当发挥水分的增产增效作

用,促进水分将肥料直接输送到作物根部[32]。本研究表明,番荔枝对水肥气耦合具有显著干旱适应性,其中 W3F2O1 处理(100%ET_c灌水+1 600 kg·hm^{-2}施肥+5 mg·L^{-1}溶氧)表现最优,这揭示了干旱区作物管理的两大机制:适度水分亏缺(如 W2 处理)在保证产量(降幅<8%)的同时显著提升了果实糖分(19.01%),低溶氧即可维持根系平衡且效果与高溶氧无显著差异(P>0.05)。实践表明,关键生育期(花芽分化期和果实膨大期)需保持(80%~100%)ET_c灌水量,成熟期可适度控水;溶氧管理应因地制宜,黏土设置 7 mg·L^{-1}溶氧而砂土 5 mg·L^{-1}即可。这一适应性策略不仅为干热河谷番荔枝栽培提供了可行方案,也为其他旱区果树的水肥气管理提供了重要参考。

主成分分析(PCA)与灰色关联分析(GRA)相结合的综合评价方法通过整合两种算法的优势,在多指标决策问题中展现出独特的应用价值。该方法的核心优势体现在三个方面:首先,PCA 通过降维处理有效解决了高维数据的冗余问题,在保留主要信息的同时消除了指标间的相关性;其次,GRA 弥补了 PCA 在贫信息、小样本数据中的局限性,能够在不完全信息条件下进行有效评估;最后,二者的结合实现了主客观权重的平衡,既通过 PCA 的方差贡献率确定客观权重,又利用 GRA 的关联度分析反映各方案与理想解的接近程度[33]。这种方法特别适用于农业可持续发展评估、生态环境质量评价等需要兼顾多维度指标的场景,其可视化结果(如主成分载荷图和关联度排序)也便于决策者理解。然而该方法也存在若干需要改进的局限性:PCA 提取的主成分可能缺乏明确的现实意义,且对非线性数据适应性较差;GRA 中分辨系数的选择会影响结果稳定性,参考序列的设置也具有一定主观性;此外,组合算法的计算复杂度较高,权重的分配方式需要谨慎设计。针对这些问题,建议在应用时加强数据预处理(如标准化处理),采用组合赋权法(如 AHP+熵权法+PCA)优化权重分配,并通过敏感性分析验证结果的稳健性。未来研究可将机器学习算法或模糊数学理论与该组合方法相结合,以进一步提升评价的准确性和适用性。总体而言,PCA-GRA 组合方法为复杂系统的综合评价提供了有效工具,为本试验筛选出最佳处理方案和高品质栽培的备选方案。

4 结 论

1)正交试验表明 W3F2O1 处理(充分灌溉、中等施肥量、低溶氧量)在番荔枝的生长、产量和品质方面表现最优,其叶面积、净光合速率、单果重和单株产量等关键指标均显著优于其他处理。

2)不同处理对番荔枝品质指标的影响差异明显。例如 W2F3O1 处理在维生素 C 含量上表现最优,而 W3F3O2 处理的可溶性固形物含量最高,但其有机酸含量也显著升高。这表明单一的处理方式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,以实现产量与品质的综合优化。

3)将主成分分析与灰色关联分析相结合的综合评价方法能够有效处理多指标评价中的复杂数据,提高评价的科学性和准确性。该方法通过降维和关联性评估,整合了主客观权重,为农业可持续发展评估等多维度指标场景提供了有力的决策支持。

参 考 文 献:

[1] PANDEY N, BARVE D. Phytochemical and pharmacological review on *Annona squamosa*[J]. International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Science, 2011, 2(4): 2229-3701.

[2] PÉREZ A, GONZÁLEZ E A, MORALES M C, et al. Oxoaporphine alkaloids in *Guatteria diospyroides Baill*. and *Annona squamosa* L.(*Annonaceae*)[J]. International Journal of Experimental Botany, 2004, 53(4): 53-55.

[3] YU J G, LUO X Z, SUN L, et al. Chemical constituents from the seeds of *Annona squamosa*[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2005, 40(2): 153-158.

[4] 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.
MAIMAITI Z, ALIMU A, 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.

[5] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2): 117-127.

[6] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778-783.

[7] 原保忠, 千晶晶, 别之龙, 等. 亏缺灌溉对大棚甜瓜果实发育及品质影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2053-2059.
YUAN B Z, QIAN J J, BIE Z L, et al. Effect of deficit irrigation on development and quality of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8): 2053-2059.

[8] 李毅杰, 原保忠, 别之龙, 等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 132-138.
LI Y J, YUAN B Z, BIE Z L, et al. Effects of drip irrigation threshold on yield and quality of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 132-138.

[9] LESTER E G, JIFON L J, MAKUS J D. Impact of potassium nutrition on postharvest fruit quality: melon (*Cucumismelo* L) case study[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1): 117-131.

[10] ARAUJO W F, BARROS M M, MEDEIROS R D, et al. Crescimentoe

produao de melancia submetida a doses de nitrogenio[J]. Revista Caatinga, 2011, 24(4): 80-85.

[11] 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 Z, YANG Z, LI J L, 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 李灿东. 黑龙江省北部大豆主栽品种产量性状主成分分析[J]. 现代化农业, 2020, (12): 4-8.
LI C D. Principal component analysis of yield characteristics of major soybean varieties in northern Heilongjiang province[J]. Modernizing Agriculture, 2020, (12): 4-8.

[15] 金宁. 基质栽培黄瓜生长生理、产量及品质对不同灌水下限的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
JIN N. Response of growth physiology, yield and quality of cucumber under substrate culture to different irrigation lower limit [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.

[16] GREENACRE M, GROENEN P J F, HASTIE T, et al. Principal component analysis[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2022, 2(1): 100.

[17] 薛晓静. 基于主成分分析法和灰色关联度分析法对树莓品种的综合评价[D]. 新乡: 河南科技学院, 2022.
XUE X J. Comprehensive evaluation of raspberry varieties based on principal component analysis and grey relational analysis[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2022.

[18] 张智, 和志豪, 洪婷婷, 等. 基于多层次模糊评判的樱桃番茄综合生长水肥耦合调控[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 278-287.
ZHANG Z, HE Z H, HONG T T, et al. Coupling regulation of water and fertilizer factors for comprehensive growth of cherry tomatoes based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 278-287.

[19] RG A. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation Drainage, 1998, 56: 147-151.

[20] RODRÍGUEZ-PLEGUEZUELO C R, DURÁN-ZUAZO V H, FRANCIA-MARTÍNEZ J R, 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.

[21] 方仁, 安振宇, 黄伟雄, 等. 不同砧木对凤梨释迦'吉夫纳'品种生长发育和果实品质的初步研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(10): 2398-2402.
FANG R, AN Z Y, HUANG W X, et al. Effects of different rootstock on growth and fruit quality of *Annona atemoya* Hort. cv.'gefner'[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(10): 2398-2402.

[22] CÉCCOLI G, ORTIZ S A G, BUTTARELLI M S, et al. Salinity tolerance determination in four sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids using yield parameters and principal components analysis model[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2022, 67(2): 211-219.

[23] KUO Y Y, YANG T, HUANG G W. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 55(1): 80-93.

[24] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, (1): 6-18.
LIN B, LIN J X, LI J K. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1994, (1): 6-18.

[25] 魏猛. 潮土有机碳库及肥力特性对长期施肥的响应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
WEI M. Response of soil organic carbon pools and fertility characteristics to long-term fertilization in fluvo-aquic soil [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.

[26] 温璇. 吉林西部不同土壤类型与植被类型下土壤理化性质、酶活性特征研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2024.
WEN X. Characterization of soil physical and chemical properties and enzyme activities under different soil types and vegetation types in western Jilin, China[D]. Shenyang: Shenyang University, 2024.

[27] 付雪蛟, 郑舒文, 吕小红, 等. 有机复合生物肥与速效肥配施对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 北方水稻, 2021, 51(6): 14-18.
FU X J, ZHENG S W, LV X H, et al. Effects of combination of organic compound biological fertilizer and readily available fertilizer on rice yield and soil fertility[J]. North Rice, 2021, 51(6): 14-18.

[28] ZHAO Z H, MAO Y L, GAO S F, et al. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice-wheat cropping system[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 3665.

[29] 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, 48(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, 48(1): 43-54.

[30] 郭淑萍, 杨顺林, 杨玉皎, 等. "无核翠宝"葡萄在云南干热河谷区的引种表现及栽培技术[J]. 中国南方果树, 2020, 49(4): 169-171.
GUO S P, YANG S L, YANG Y J, et al. Introduction performance and cultivation techniques of "seedless cuibao" grape in the dry hot valley of Yunnan province[J]. South China Fruits, 2020, 49(4): 169-171.

[31] 赵文举, 李宗礼, 范严伟, 等. 干旱半干旱地区集雨利用模式及可持续发展对策[J]. 农业现代化研究, 2011,32(5): 623-626.
ZHAO W J, LI Z L, FAN Y W,et al. Rainwater harvesting utilization mode and sustainable development strategies in arid and semi-arid regions[J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(5): 623-626.

[32] 王艳丹, 何光熊, 杨淏舟, 等. 水肥耦合对干热河谷冬春番茄产量及其品质的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(8): 2297-2304.
WANG Y D, HE G X, YANG H Z, et al. Coupling effects of water and fertilizer on the yield and quality of winter and spring tomato in dry-hot valley[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(8): 2297-2304.

[33] 郭慧芳, 莫连光. 灰色关联理论运用于农民收入分析的研究[J]. 财贸研究, 2007, (1): 31-37.
GUO H F, MO L G. The application of grey relevancy theory in the analysis of farmers´ income[J]. Finance and Trade Research, 2007, (1): 31-37.