果 树 学 报 2025,42(12):3018-3032
Journal of Fruit Science

1DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250140

气象因子驱动的红宝石青柚综合品质评价模型构建

李鸾翔,唐小霄#,李美莹,谭 海,黄桂香*

(广西大学农学院,南宁 530004)

摘 要:【目的】探究气象因子对红宝石青柚[*Citrus grandis* (L.) Osbeck. var. Ruby green pomelo]果实品质形成的影响,为广西引种区划及优质栽培提供理论依据。**【方法】**在广西7个红宝石青柚引种果园开展定点观测,采集温度、降雨量、光照时间和相对湿度等气象数据,测定35份资源的成熟果实外观与内在品质指标。通过相关性分析明确气象因子与品质指标的关系,结合主成分分析筛选核心品质因子并构建综合评价模型。**【结果】**不同采样点的果实品质指标存在显著差异:容县点的果皮和巴马县点的果肉的亮度值(L^*)显著高于其他地区;右江区点果皮薄、糖酸平衡、风味佳;环江县点的维生素C含量及固酸比高;隆安县点的无核特性突出;邕宁区点的果实出汁率(81.96%)高于其他地区;博白县点的果实中P(5.02 g·kg^{-1})、K(9.38 g·kg^{-1})和Zn(15.41 mg·kg^{-1})含量较为丰富。果实生长初期诺米林含量与降雨量呈显著正相关(r=0.776,P<0.05),而柠檬苦素含量与气象指标多为正相关(r=0.080~0.522)。果实膨大期,可滴定酸含量与温度呈显著正相关(r=0.740,P<0.05),与降雨量呈显著负相关(r=−0.724,P<0.05);近成熟期,可溶性固形物含量与相对湿度呈负相关(r=−0.469),与光照呈正相关(r=0.509)。矿质元素如Ca和Mg含量与气象因子关联性强。主成分分析提取7个主成分(累计贡献率为82.70%),分析结果表明,关键因子包括果实矿质元素、果皮厚度/酸度、果实大小、果形指数、可溶性固形物含量、柠檬苦素含量、囊瓣数和种子特性等。环江县、隆安县和右江区的果实综合得分较高。**【结论】**温度是调控红宝石青柚品质的关键因子,显著影响囊瓣分化、可滴定酸含量及柠檬苦素积累;光照和相对湿度协同调节可溶性固形物合成;降雨量显著调控诺米林代谢及成熟进程。本研究结果表明,广西适宜红宝石青柚优质栽培的气候区域较为有限,建议优先选择年均温26 ℃、年日照>1500 h和相对湿度86%~88%的区域引种。

关键词:红宝石青柚;气象因子;矿质元素;果实品质;品质综合评价模型

中图分类号:S666.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2025)12-3018-15

Meteorological-driven modeling of comprehensive quality evaluation for ruby green pomelo (*Citrus grandis*)

LI Luanxiang, TANG Xiaoxiao#, LI Meiying, TAN Hai, HUANG Guixiang*

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract:【Objective】Ruby Green pomelo [*Citrus grandis* (L.) Osbeck], a recently introduced cultivar from Thailand, is characterized by green peel and red flesh at maturity. Its trees exhibit vigorous growth and a short juvenile phase before fruiting. Its fruit is characterized by desirable flavor, strong resistance to storage and transport stress, and advantageous off-season productivity, a high import price per single fruit (200−300 yuan per fruit), and broad market prospects, which has set off a "boom" in domestic planting. However, significant regional differences in fruit quality and economic viability have been observed in Guangxi, where subtropical and South Asian monsoon climates (hot-humid summers, mild-dry winters, and hot and humid all year round) pose challenges to standardized cultivation practices. The purpose of this study is to clarify the regulation mechanism of climate factors on the quality formation of Ruby Green pomelo, determine the key climate-sensitive indicators, and simultaneously build a comprehensive quality evaluation model for pomelo by screening the core quality traits.【Methods】

收稿日期:2025-03-18 **接受日期:**2025-06-23

基金项目:巴马县人才科技计划项目(巴人科20220013);广西科技重大专项(桂科AA22068092)

作者简介:李鸾翔,硕士,研究方向为果树学。E-mail:Li_lx1228@163.com。#为共同第一作者。

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:hguixiang@163.com

The field investigation and sampling after the introduction of Ruby Green pomelo were carried out in seven representative orchards in Guangxi (Nanning, Yulin, Baise, Hechi, etc.), with a total of 7 sampling points, and 35 resources of Ruby Green pomelo were collected. The meteorological data of temperature, rainfall, illumination time, and relative humidity were collected throughout the whole development stage of fruit. Sensory evaluation of 35 fruits was carried out by a tasting panel composed of 20 members, and 24 quality indexes of all fruits were evaluated, including morphology (peel thickness, fruit weight), soluble solid content (SSC), titratable acidity (TA), solid-acid ratio, nutrients (vitamin C, Ca, Mg) and secondary metabolites (limonin and nomilin). Correlation analysis was used to quantify the relationship between climate variables and quality indicators. Principal component analysis (PCA) transformed the data into seven core components (eigenvalues ＞ 1) by dimensionality reduction, which explained the cumulative variance of 82.70%. A weighted evaluation model (F) is established to grade and rank the suitability of each region.【Results】Although the seven sampling points were located in a subtropical monsoon climate, there were differences in microclimate in each orchard. We obtained accurate orchard meteorological data for analysis through the intelligent agriculture cloud platform of Jiejiarun Company (http://www.jjr.vip). The comprehensive score ranking of sensory evaluation of Ruby Green pomelo is: YouJiang (YOQ) ＞ HuanJiang (HNJ) ＞ BaMa (BMA) ＞ RongXian (ROG) ＞ YongNing (YNG) ＞ BoBai(BBA) ＞ LongAn (LGA). The results of sensory evaluation were influenced by water content, bitterness, and the sugar-to-acid ratio of fruit, but also easily influenced by individual taste preference. Correlation analysis shows that temperature played a dominant role in quality regulation. The average temperature (＞ 25 ℃) during fruit expansion period strongly increased the number of fruit capsules (r=0.970, P ＜ 0.01), but it induced the accumulation of limonin in the case of more extreme temperatures, which affected the sweetness and sourness of the fruit. Soluble solid content was positively correlated with the duration of light during maturity (r=0.509). Rainfall negatively regulated TA (r=−0.724, P ＜ 0.01) and promoted the synthesis of nomilin (r=0.776, P ＜ 0.01), indicating the biphasic effect of water stress. Among the mineral elements, calcium was negatively correlated with average temperature (r=−0.884, P ＜ 0.01), and magnesium positively correlated with rainfall (r=−0.821, P ＜ 0.01). Potassium and zinc showed no climate sensitivity (P ＞ 0.05). Among the seven sampling points, the dominant areas of YOQ, HNJ and LGA had the highest comprehensive score (F=0.05−0.32), and were characterized by the balance of heat and water resources (effective accumulated temperature ＞750 Ac (℃ · d)/ month and rainfall of 1200−1450 mm). The single fruit weight of YOQ was the largest, and its juice yield (79.12%) was relatively high. The fruit of HNJ performed well in SSC (11.61° Brix), solid-acid ratio (25.47) and vitamin C content (66.58 mg · 100 g^{-1}). Although the fruit of LGA is seedless, its titratable acidity was very high (0.86 mg · L^{-1}). Principal component analysis (PCA) gave priority to seven quality components: nutrient elements (0.92), peel thickness and titratable acidity (0.87), fruit size (0.84), soluble solid content and fruit shape (0.81), bitterness (0.78), capsule number (0.75) and seed character (0.70). The model confirmed the relationship between climate and fruit quality, and the comprehensive score showed that HNJ, YOQ and LGA ranked the highest.【Conclusion】The synergistic effect of temperature, light and relative humidity is the key to fruit quality formation of Ruby Green pomelo. Based on principal component analysis, the key quality parameters include fruit nutrient elements, peel thickness and titratable acidity, fruit size, fruit shape and soluble solid content, nomilin and limonin abundance, capsule number and seed characteristics. The comprehensive evaluation results also show that the ranking of comprehensive performance in each place is: HNJ ＞ LGA ＞ YOQ ＞ ROG ＞ YNG ＞ BMA ＞ BBA. To sum up, it is suggested that standardized planting schemes

should be adopted in areas with high comprehensive scores to promote the improvement and stability of fruit quality, so as to obtain geographical indication certification. The future research must integrate soil-microorganism interaction and field cultivation management into the "climate-soil-management" coupling model, and adopt artificial intelligence algorithm to improve the prediction accuracy of the comprehensive evaluation model. This study provides scientific basis for the adaptability of introduction of green pomelo in subtropical areas.

Key words: *Citrus grandis* (L.) Osbeck. ruby green pomelo; Meteorological factors; Mineral elements; Fruit quality; Comprehensive quality evaluation model

红宝石青柚[*Citrus grandis*（L.）Osbeck. var. Ruby green pomelo]是芸香科柑橘属柚类果树，原产泰国南部，近年引进我国广西、云南等地种植，因成熟期果皮青绿、果肉红似宝石而得名。该品种树势强健，定植后挂果周期短，原产地风味优异，进口单果售价高达300元，兼具反季节效益突出、耐储运等优势，市场前景广阔，已引发国内种植"热潮"[1]。目前研究多集中于嫁接丰产技术[2]、栽培推广[3-4]、生产机械化[5]、果实性状解析[6-7]和柑橘褪绿性矮缩病（citrus chlorotic dwarf-associated virus，CCDaV）发生等方面[8-10]，而引种适应性、适栽区域规划及品质形成机制等制约引种成败的研究亟待深入开展。据调查，广西、海南及云南等地区引种面积逾6667 hm^2，广西不同引种地区的红宝石青柚果实品质存在显著差异，多数商品果率低，经济效益普遍不佳[3]。

柑橘果实品质可分为外观品质、内在品质、风味品质和营养品质[11]。不同的品质决定了果实不同的发展潜力。外观品质关乎果实的商品性和整齐度，包含果实色泽、形状、果形指数、单果质量等指标；内在品质与果实口感、风味相关，涵盖出汁率、可滴定酸含量、可溶性固形物含量、维生素C含量和苦味物质等指标。这两种品质所包含的多项指标直接决定了果实的外观和口感优劣[12-15]，影响红宝石青柚果实风味品质和商品价值的主要指标有可溶性固形物含量、可滴定酸含量、固酸比、果肉质地、苦味等。在果实品质评价过程中，可以运用聚类分析、相关性分析或主成分分析等方法，对外观和内在品质指标进行综合评估，此类方法已在不同柚类品种[16]果实品质评价中得到应用。营养品质指的是果实中含有的矿质元素及其他满足人体所需的营养成分，这些成分无法在人体内自行合成，需通过膳食摄入[17]。周媛[18]通过测定不同成熟期果实品质与养分含量，发现果实的糖、酸与镁元素含量均存在显著差异。同时，品种（基因型）与环境的互作共同影响果实品质的形成[19]，全球气候变化（如极端高温、暴雨和干旱）进一步加剧了品质发育的不确定性[20]。当前研究多聚焦于脐橙[20-22]与宽皮柑橘[23]，而红宝石青柚作为新引进的热带特色品种，其果实糖分积累等品质形成的气候响应机制尚不清晰。

本研究通过解析广西7个引种地区果实发育期的气象因子与品质指标的关联性，构建综合评价模型并划分适栽等级，旨在为红宝石青柚的科学引种及品质调控提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试材及取样

2021年9月至10月，在广西壮族自治区南宁市、玉林市、百色市、河池市等7个红宝石青柚引种区（表1）开展调查采样工作。每个采样点选取5株健康果树，每株采摘6个无病虫害成熟果实，共收集了35份红宝石青柚资源（单株），合计210个青柚果实样本。果实样品运至实验室后，分离果肉并分装，部分果肉经液氮速冻后置于−80 ℃冰箱保存（用于次生代谢物分析），其余样品保存于−40 ℃冰箱（用于生理指标测定）。

1.2 试验方法

1.2.1 气象数据采集 所有气象数据均由捷佳润公司的智慧农业云平台（http://www.jjr.vip）提供。各个采样地点的气象站搭载高精度气象综合传感器，具体性能如下：空气温湿度测量精度达±0.3 ℃（温度）和±3% RH（湿度），雨量测量精度为±0.4 mm（≤ 10 mm·h^{-1}）。所有传感器在出厂前均经过严格的实验室校准，符合气象观测标准，并支持通过云平台进行现场零点校准和量程校准。智慧农业系统配备自动校准功能，能根据气象数据变化规律进行实时修正。采用IP65防护等级设计，确保传感器在−10~

表1　红宝石青柚采样地点信息

Table 1　Sampling location information of Ruby green pomelo

采样地点及代码 Sampling location and code	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	海拔 Altitude/m
玉林市博白县 Bobai County, Yulin City/(BBA)	109.56	22.11	70.0
玉林市容县 Rongxian County, Yulin City/(ROG)	110.33	22.51	81.0
南宁市邕宁区 Yongning District, Nanning City/(YNG)	108.29	22.45	100.0
南宁市隆安县 Longan County, Nanning City/(LGA)	107.58	23.07	90.0
百色市右江区 Youjiang District, Bose City/(YOQ)	106.37	23.54	145.0
河池市巴马瑶族自治县 Bama Yao Autonomous County, Hechi City/(BMA)	107.10	24.01	323.0
河池市环江毛南族自治县 Huanjiang Maonan Autonomous County, Hechi City/(HNJ)	108.02	25.01	309.9

60 ℃环境下稳定工作，内置数据质量控制系统可自动剔除异常数据。主要搜集的气象数据包括全年（2021年）每天的平均气温、累积光照时长、累积降雨量和平均相对湿度。

1.2.2　*果实感官品质评价方法*　邀请了20名对柑橘有不同喜好且具备柚类消费经验的人员，组成红宝石青柚品质品鉴团。品鉴团从果实水分含量、果肉质地、风味、苦味及整体喜好等维度进行评价，采用1~10分赋值法对各评价指标进行定量描述，以确定红宝石青柚品评标准。在不同样品品鉴间隙，提供饮用水以去除前一个样品果肉残留的风味，避免对后续样品造成影响。

1.2.3　*果实品质指标测定*　使用色差仪对红宝石青柚果实的色差进行测定。果皮色差为果实赤道面上随机6个测定点的平均值；果肉色差则通过在果实横切面上随机选择6个测定点进行评估。

使用电子天平称量果实单果质量；使用游标卡尺测量果实的纵径、横径及果皮厚度。果形指数为果实纵径与果实横径的比值，果实可食率为果肉质量占果实质量的百分比。剥离果肉后，去除败育的种子，统计发育正常的种子数量和质量，种子粒质量为种子总质量与种子总数量的比值。称取100 g新鲜果肉样品榨汁后，计算果实出汁率，公式为：出汁率/%=汁液质量/果肉质量×100。使用折光仪测定可溶性固形物含量，每个样品设置3次重复。可滴定酸、维生素C含量均参照周彩霞等[24]的方法测定。柠檬苦素类似物提取与检测参照徐宸宇[25]方法，柠檬苦素和诺米林的检测色谱条件为流动相配置A相：乙腈（色谱级）需超声脱气15~25 min；B相：超纯水（表2）；色谱柱：C18（5 μm，250×4.6 mm）流速1 mL·min^{-1}，进样体积20 μL，柱温35 ℃，检测波长210 nm。矿质元素含量参照胡艺帆[26]的方法测定，烘干的果肉样品经硫酸、硝酸消煮至澄清透明后用蒸馏水定容，通过滤膜过滤得到上机待测液，利用ICP-MS仪器测定P、K、Ca、Mg、Mn、Fe、Cu、Zn元素含量。

表2　柠檬苦素类似物洗脱梯度

Table 2　Elution gradient of limonin analogues

时间 Time/min	流动相A Mobile phase of A/%	流动相B Mobile phase of B/%
0	95	5
4	95	5
14	60	40
16	60	40
24	30	70
18	95	5
30	95	5

1.2.4　*综合评价模型的构建*　对原始数据进行KMO和Bartlett球形检验，结果显示原始数据KMO值为0.622且Bartlett球形检验显著性$P<0.05$，表明数据间存在相关性，可以进行主成分分析。方差分析的多重比较采用Tukey HSD法。对原始数据进行标准化处理，公式为：$Z_i=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$，式中，$X_i$代表原始数据，$Z_i$代表标准化数据。根据主成分分析结果筛选关键因子，计算成分得分系数矩阵。利用系数矩阵和特征值平方根计算各个主成分表达式，得到F_1~F_n结果，通过加权运算求出指标权重，从而构建综合评价模型（F）。

1.2.5　*数据分析*　使用Excel进行数据处理，数据分析及模型构建采用SPSS软件，数据可视化使用Origin软件。

2　结果与分析

2.1　气象数据分析

2.1.1　*2021年重要气象指标的变化规律*　气象数据显示，7个采样点的最低气温均出现在1月和12月，1月的YOQ、BMA和HNJ等地的平均温度均低于10 ℃。除了YOQ和BMA外，其余5个采样点在7月已达到最高平均温度，但均未超过30 ℃。此外，BBA和YNG的全年有效积温最高，YOQ、HNJ和BMA的有效积温最低（图1-A）。全年光照时长

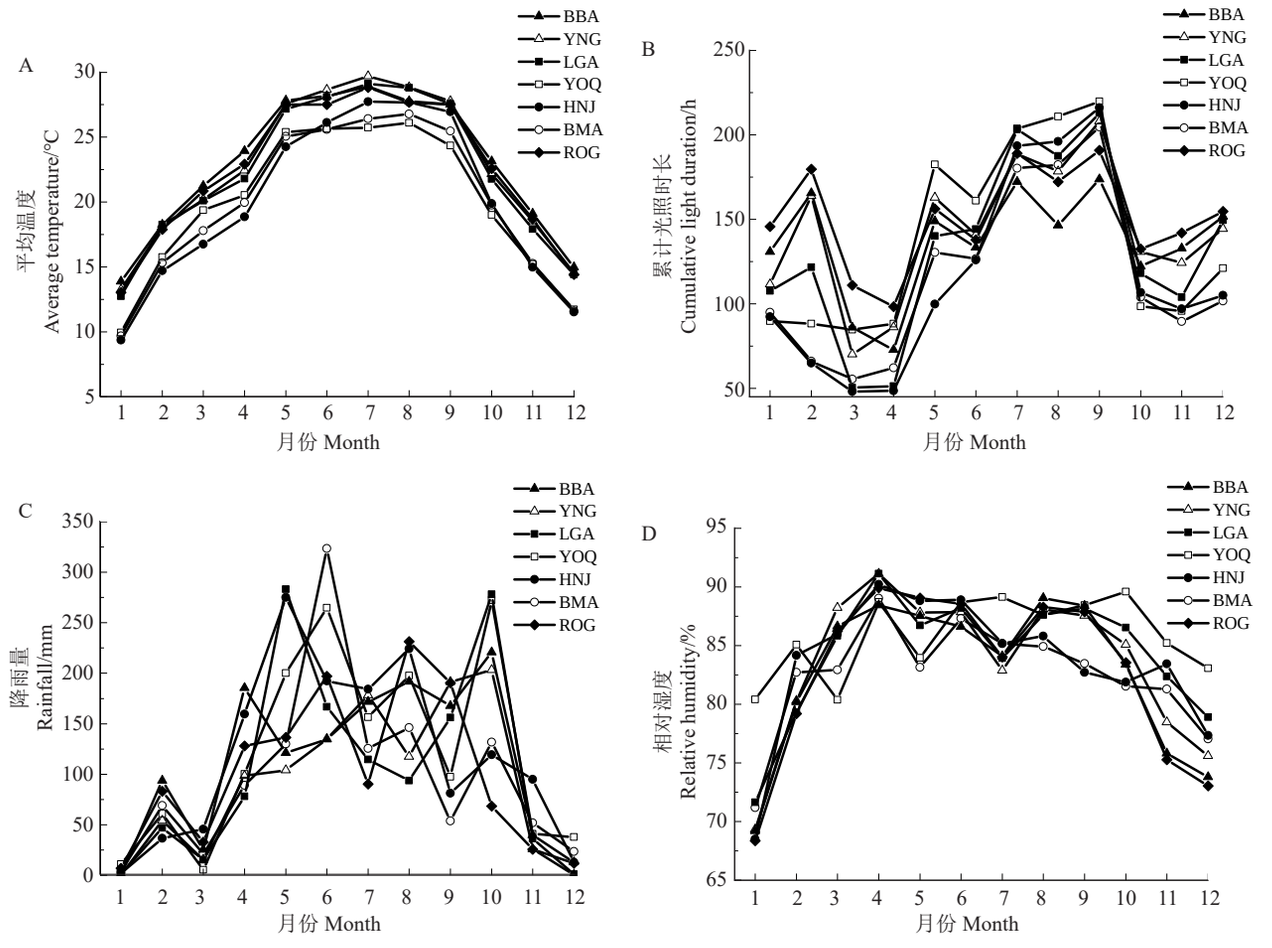

图 1　2021 年不同采样地点气象指标变化情况

Fig. 1　Changes in meteorological indicators at different sampling locations in 2021

以 ROG 为最高，达到 1 809.70 h；HNJ 则最低，为 1 394.10 h（图 1-B）。各地降雨集中，常见于第 2、3 季度。LGA 在 5 月和 10 月的累计降雨量最大，分别为 283.04 mm 和 278.27 mm。HNJ 在 5 月和 8 月的累计降雨量最大，分别为 275.13 mm 和 224.26 mm。YOQ 在 5 月、6 月和 10 月的降雨量分别为 200.25 mm、264.76 mm 和 272.11 mm。BBA 和 YNG 在 10 月的降雨量最大，分别为 220.85 mm 和 203.40 mm。BMA 在 6 月降雨量最大，为 323.57 mm。ROG 在 8 月降雨量达最大，为 231.40 mm。全年累计降雨量排名为 YOQ（1 444.28 mm）＞HNJ（1 427.51 mm）＞BBA（1 365.15 mm）＞LGA（1 271.23 mm）＞ROG（1 201.67mm）＞BMA（1 168.83 mm）＞YNG（1 123.75 mm）（图 1-C）。各地平均相对湿度范围为 82.48%~85.86%。当年 4 月 YNG、LGA 和 HNJ 的相对湿度最高，分别为 91.15%、91.14%和 90.21%；BBA 在 8 月的相对湿度最高，为 89.07%；YOQ 在 10 月的相对湿度最高，为 89.61%。年平均相对湿度以 YOQ 最高（85.86%），与年降雨量的分布一致（图 1-D）。

各地气候差异显著，其中，YOQ 全年光照充足、降雨丰富且空气湿度大；YNG 降雨量较少、光热充足；ROG 降雨量适中、光照强、热量充足；BBA 全年气温高、降雨多；HNJ 降雨丰富，但光照和热量较其他地区低；BMA 全年降雨较少且累计光照、温度也较低；而 LGA 的 4 项气候指标在 7 个地区处于中等水平。

2.1.2　*2021 年红宝石青柚果实发育期（4—9 月）气象数据分析*　根据表 3 可知，与其他地区相比 YNG 在发育期内的平均温度最高，达到 27.49 ℃；YOQ 的平均温度最低，为 24.63 ℃。HNJ 的温度变化范围为 18.87~27.73 ℃，该地区平均温度变异系数最大，表明该地区发育期内温度波动较大（图 1-A）。在此期间，各地区光照时长呈波动上升趋势，其中 YOQ 的平均光照时长最高，为 177.62 h。HNJ 光照时长变异系数最大为 44.92%，表明该地区各月份光照分布差异较大。充足的光照对红宝石青柚的光合作用至关重要，有助于果皮转色和果实糖酸积累。

表3　红宝石青柚发育期（4—9月）内气象数据分析

Table 3　Analysis of meteorological data during the development period of Ruby green pomelo (April to September)

气象指标 Meteorological indicators	采样地 Sampling location	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	变异系数 Coefficient of variation，*CV*/%
平均温度 Average temperature/℃	BBA	28.89	23.95	27.35	6.34
	YNG	29.69	22.43	27.49	9.45
	LGA	29.12	21.81	27.10	9.93
	YOQ	26.10	20.55	24.63	8.46
	HNJ	27.73	18.87	25.27	13.41
	ROG	28.82	22.91	26.99	7.64
	BMA	26.78	19.96	24.88	10.02
光照时长 Light duration/h	BBA	173.70	72.80	141.22	26.20
	YNG	208.00	86.20	160.83	26.80
	LGA	212.80	51.40	156.53	38.09
	YOQ	219.80	88.30	177.62	27.38
	HNJ	215.90	48.50	146.60	44.92
	ROG	190.90	98.40	157.40	22.38
	BMA	204.70	62.10	147.70	35.27
相对湿度 Relative humidity/%	BBA	89.07	84.10	87.36	2.07
	YNG	91.15	82.87	87.56	3.03
	LGA	91.14	83.93	87.64	2.67
	YOQ	89.14	83.95	87.76	2.21
	HNJ	90.21	82.72	86.95	3.26
	ROG	89.93	84.04	87.96	2.33
	BMA	89.05	83.15	85.51	2.67
降雨量 Rainfall/mm	BBA	191.57	121.15	162.00	17.39
	YNG	191.29	98.36	137.36	28.41
	LGA	283.04	78.07	148.71	49.98
	YOQ	264.76	97.40	169.44	38.22
	HNJ	275.13	81.25	186.12	34.92
	ROG	231.40	90.14	162.21	32.42
	BMA	323.57	53.61	144.66	64.83
≥10 ℃有效积温 ≥10 ℃ Effective accumulated temperature/（℃·d）	BBA	895.70	718.35	834.59	56.14
	YNG	920.49	672.79	839.16	79.59
	LGA	902.58	654.18	827.06	82.09
	YOQ	809.20	616.61	751.78	65.50
	HNJ	859.68	566.03	771.33	99.46
	ROG	893.36	687.35	823.85	65.20
	BMA	830.08	598.80	759.41	76.06

7个地区相对湿度的变异系数均低于5%，表明相对湿度变化较小且保持稳定。HNJ在果实发育期内的平均降雨量最大，为186.12 mm；YNG的平均降雨量最小，为137.36 mm。而BMA的降雨量变异系数高达64.83%，表明该地区发育期内水分分布不均匀，临近成熟期时会出现灌溉水分不足的情况。有效积温（≥10 ℃）在不同采样地之间差异较大。BBA、YNG和LGA的月平均有效积温最高，分别为834.59 ℃·d、839.16 ℃·d和827.06 ℃·d，表明这些地区在发育期间热量积累更充足，有助于果实的快速发育和成熟。相较之下，YOQ和BMA的平均有效积温较低，分别为751.78 ℃·d和759.41 ℃·d，可能导致果实发育缓慢，但有利于风味物质的积累。而变异系数结果显示，HNJ的有效积温波动最大（*CV*=99.46%），说明该地区易出现极端低温或高温天气。而ROG和YOQ的变异系数较低（*CV*分别为65.20%和65.50%），表明热量供应相对稳定，有利于果实品质的形成。

2.2　红宝石青柚品质分析

2.2.1　*红宝石青柚外观品质分析*　色差测定结果显示（表4），不同采样地的果皮亮度差异明显，ROG果实的*L**值最高（62.43），YOQ果实最低（51.03），表明ROG果实的果皮较亮，YOQ果实较暗。*a**值从−20.14（HNJ）到−2.24（ROG），表明大多数果皮偏绿色，HNJ果实最绿，ROG果实接近中间值。*b**值在41.02（YOQ）到54.93（LGA）之间，表明果皮多偏黄色，LGA果实的果皮黄色最明显。ROG果实的ΔE最大（23.94），表明果皮颜色变化显著，而YOQ果实的ΔE最小（7.14），表明果皮颜色较均匀。

不同采样地的果肉*L**值变化较小，BMA最高（39.78），LGA最低（32.08）。LGA的*a**值最高（13.29），表明果肉偏红，BMA最低（1.19），表明果肉接近中性。*b**值从7.57（BMA）到15.02（ROG），表明多数果肉偏黄色，ROG果肉黄色最明显。BMA的ΔE最小（4.13），表明果肉颜色均匀，而LGA的ΔE最大（15.25），表明果肉颜色差异显著。

2.2.2　*不同引种地区红宝石青柚感官品质分析*　根据感官品评结果（图2），红宝石青柚的感官评价综合得分排名依次为YOQ＞HNJ＞BMA＞ROG＞YNG＞BBA＞LGA。感官评价的结果受到果实水分含量、苦味和风味的共同影响。此外，由于个体对酸甜口感的偏好差异，这也对品评结果产生了影响。在5项评估指标中，YOQ的果实表现最为优异，其果肉质地细腻、水分充足、风味良好，且回甘清爽甜美，因而获得了品鉴团的一致好评，综合得分最高。相对而言，YNG的果实虽然汁水充足、酸甜适中，但回甘带有明显苦味，导致最终得分较低。LGA和BBA的果实则因果肉质地粗糙化渣性差、水分不足且风味淡，综合得分最低。尽管品鉴团成员对风

表 4 红宝石青柚果实色差测定结果

Table 4 Determination of fruit color difference of Ruby green pomelo

采样地 Sampling location	果皮色差 Peel color difference				果肉色差 Color difference of pulp			
	*L**	*a**	*b**	ΔE	*L**	*a**	*b**	ΔE
BBA	60.84 ab	−11.02 ab	47.88 b	15.00 ab	32.17 b	9.64 ab	11.62 bc	13.48 a
LGA	54.19 ab	−19.65 b	54.93 a	14.24 ab	32.08 b	13.29 a	8.99 cd	15.25 a
ROG	62.43 a	−2.24 a	48.79 ab	23.94 a	33.20 b	2.33 c	15.02 a	11.14 a
YOQ	51.03 b	−14.80 b	41.02 c	7.14 c	39.23 a	4.82 bc	9.47 cd	6.35 b
YNG	53.63 ab	−17.84 b	47.57 b	13.05 b	32.92 b	11.81 a	11.03 c	14.12 a
BMA	57.23 ab	−14.54 b	49.74 ab	15.59 ab	39.78 a	1.19 c	7.57 d	4.13 b
HNJ	57.27 ab	−20.14 b	53.39 ab	14.08 ab	33.39 b	4.38 c	14.46 ab	12.17 a

注：同一列的不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$.

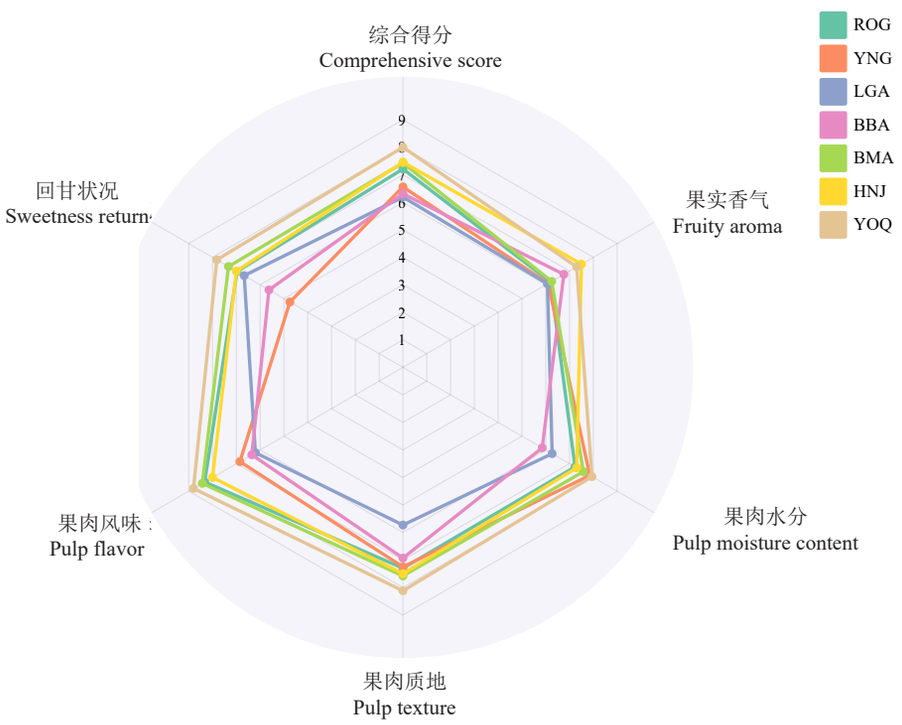

图 2 红宝石青柚感官评价

Fig. 2 Sensory evaluation of Ruby green pomelo

味的偏好有所不同，有些人喜欢酸甜适中的清爽口感，而另一些人则偏爱甜美多汁的果实，但酸甜适中、无苦味及回甘表现成为了决定最终评分的关键因素。

2.2.3 不同引种地区红宝石青柚内在品质比较 根据表 5 可知，各引种地区果实单果质量均大于 1 168.16 g，其中，YOQ 引种的红宝石青柚果实平均单果质量最大。LGA 的红宝石青柚果皮较厚（25.40 mm），同时果实可食率最低；YOQ（13.86 mm）和 BMA（12.51 mm）等地区的果皮最薄。红宝石青柚在 HNJ 引种后较其他引种地区果实种子数量多且种子粒质量大；而 LGA 的红宝石青柚果实出现无核特性。

内在品质比较显示，YNG 引种的红宝石青柚果实出汁率（81.96%）高于其他引种地果实的出汁率，而 BBA 引种的红宝石青柚果实的出汁率（67.51%）低于其他引种地区。HNJ 引种的红宝石青柚表现出较高维生素 C 含量（w，后同，66.58 mg·100 g^{-1}），ROG 引种的红宝石青柚果实则表现出较低维生素 C 含量（35.08 mg·100 g^{-1}）。BBA（8.47 °Brix）、LGA（8.67 °Brix）等地区果实的可溶性固形物含量偏小；YNG（12.03 °Brix）和 HNJ（11.61 °Brix）等地区果实的

表 5　不同地区红宝石青柚品质比较

Table 5　Quality comparison of Ruby green pomelo pomelo from different regions

品质指标 Quality index	采样地 Sampling location						
	BBA	YNG	ROG	LGA	YOQ	BMA	HNJ
单果质量 Single fruit mass/g	1414.94±299.57 ab	1251.66±311.23 ab	1168.16±181.75 b	1 269.00±166.84 ab	1629.82±233.71 a	1196.67±221.67 ab	1489.47±89.29 ab
纵径 Longitudinal diameter/mm	144.14±21.18 b	158.72±16.81 a	135.26±11.61 c	151.59±10.58 ab	158.34±13.50 a	141.86±13.32 b	156.09±5.88 ab
横径 Transverse diameter/mm	147.67±9.65 ab	149.00±11.13 ab	142.10±11.29 b	148.35±8.05 ab	154.62±6.37 ab	150.31±9.16 ab	158.65±6.62 ab
果形指数 Fruit shape index	0.97±0.10 ab	1.06±0.06 a	0.94±0.08 b	1.03±0.09 a	1.03±0.10 a	0.95±0.06 b	0.98±0.01 ab
果皮厚度 Peel thickness/mm	18.50±4.88 b	17.34±4.16 b	15.37±2.58 bc	25.40±2.12 a	13.86±4.09 c	12.51±2.54 c	15.72±4.69 bc
可食率 Edible rate/%	0.63±0.06 ab	0.61±0.07 ab	0.68±0.03 a	0.54±0.04 b	0.61±0.02 ab	0.59±0.04 ab	0.62±0.05 ab
囊瓣数 Capsule valve number	14.83±1.34 b	15.17±0.9 b	14.83±1.07 b	15.60±0.80 ab	16.80±2.14 ab	16.36±1.37 ab	17.33±0.47 a
种子数量 Number of seeds	36.57±28.10 cd	26.17±28.45 cd	48.83±31.21 bc	ns	30.40±39.30 cd	78.64±34.34 b	126.33±54.26 a
种子粒质量 Seed mass/g	0.29±0.17 ab	0.20±0.21 bc	0.28±0.13 ab	ns	0.22±0.19 bc	0.32±0.07 ab	0.41±0.01 a
出汁率 Juice yield/%	67.51±6.29 c	81.96±5.33 a	75.75±38.62 abc	68.64±1.66 bc	79.12±4.06 a	77.59±5.81 a	76.89±5.84 ab
w（可溶性固形物）Soluble solid content /°Brix	8.47±0.80 c	12.03±1.65 a	10.29±1.8 bc	8.67±0.43 c	10.65±1.29 bc	10.60±1.19 bc	11.61±1.09 a
ρ（可滴定酸）Titrable acid content/（mg·L^{-1}）	0.65±0.13 abc	0.67±0.11 ab	0.51±0.08 bc	0.86±0.09 a	0.49±0.15 bc	0.44±0.02 c	0.46±0.01 bc
固酸比 Solid acid ratio	13.80±4.15 bc	18.05±2.40 ab	20.10±1.56 ab	10.19±1.41 c	22.92±3.47 a	24.32±2.72 a	25.47±1.98 a
w（维生素 C）Vitamin C content/（mg·100 g^{-1}）	52.38±11.87 bc	58.52±6.47 ab	35.08±2.21 c	49.62±10.07 bc	55.45±7.81 ab	58.35±10.95 ab	66.58±21.13 a
w（P）/（g·kg^{-1}）	5.02±0.04 a	2.90±0.07 d	0.84±0.02 f	1.13±0.04 e	4.36±0.15 c	4.77±0.17 b	2.69±0.18 d
w（K）/（g·kg^{-1}）	9.38±0.12 a	4.83±0.02 d	1.87±0.02 e	1.92±0.10 e	7.15±0.15 b	6.99±0.10 b	6.33±0.00 c
w（Ca）/（g·kg^{-1}）	2.24±0.07 d	1.59±0.09 e	2.17±0.11 d	1.09±0.05 f	3.88±0.11 b	3.67±0.13 c	4.24±0.02 a
w（Mg）/（g·kg^{-1}）	0.28±0.01 f	0.49±0.01 e	0.27±0.02 f	0.63±0.01 d	0.75±0.01 a	0.71±0.01 b	0.67±0.00 c
w（Fe）/（g·kg^{-1}）	0.10±0.00 e	0.25±0.00 bc	0.14±0.01 d	0.02±0.00 f	0.26±0.01 b	0.23±0.02 c	0.34±0.02 a
w（Mn）/（mg·kg^{-1}）	1.64±0.02 c	4.58±0.51 a	1.14±0.02 d	1.73±0.01 c	3.08±0.07 b	1.83±0.12 c	2.82±0.02 b
w（Cu）/（mg·kg^{-1}）	9.62±0.25 d	13.13±0.09 c	18.27±1.13 a	18.86±0.91 a	18.22±0.31 a	18.83±1.11 a	16.50±0.43 b
w（Zn）/（mg·kg^{-1}）	15.41±0.33 a	12.37±0.13 c	10.91±0.49 d	13.72±0.23 b	14.20±0.15 ab	10.99±1.50 d	11.54±0.30 cd
ρ（柠檬苦素）Limonin content/（μg·mL^{-1}）	47.25±0.58 bc	46.97±0.26 c	48.10±1.02 b	49.21±0.48 a	47.50±0.47 b	47.07±1.50 bc	47.78±0.35 b
ρ（诺米林）Nomilin content/（μg·mL^{-1}）	35.77±1.22 bc	32.83±0.30 d	34.51±0.24 c	40.22±0.30 a	34.25±1.16 c	33.50±0.29 c	37.02±0.09 bc

注：同行之间不同小写字母表示不同地区该性状差异显著（P＜0.05）；ns 表示无。

Note: Different small letters in the same row indicate significant differences in this trait in different regions (P＜0.05). ns indicates none.

可溶性固形物含量显著高于其他地区。LGA（0.86 mg·L^{-1}）、YNG（0.67 mg·L^{-1}）及BBA（0.65 mg·L^{-1}）等地区果实的可滴定酸含量较高。HNJ的果实具有高可溶性固形物含量、高维生素C含量且低可滴定酸含量的特点；而BBA、LGA等地区的果实可溶性固形物含量偏低、可滴定酸含量偏高。

矿质元素含量测定结果显示，BBA引种的红宝石青柚果实中P（5.02 g·kg^{-1}）、K（9.38 g·kg^{-1}）和Zn含量（15.41 mg·kg^{-1}）最高，而ROG样品中P（0.84 g·kg^{-1}）、K（1.87 g·kg^{-1}）、Zn含量（10.91 mg·kg^{-1}）最低。HNJ样品中Ca（4.24 g·kg^{-1}）、Fe含量（0.34 g·kg^{-1}）最高，LGA样品中Ca（1.09 g·kg^{-1}）、Fe含量（0.02 g·kg^{-1}）最低。YOQ样品中Mg含量（0.75 g·kg^{-1}）最高，而ROG和BBA中Mg含量（0.27 g·kg^{-1}和0.28 g·kg^{-1}）最低。YNG样品中Mn含量（4.58 mg·kg^{-1}）最高，ROG样品中Mn含量（1.14 mg·kg^{-1}）最低。

综上所述，YNG引种的红宝石青柚果实较其他引种地区的红宝石青柚果实在出汁率、可溶性固形物含量等指标上具有显著优势；BBA果实的可溶性固形物含量较低，而矿质元素含量丰富；HNJ果实的种子数量虽最多，但果实固酸比较高；而LGA果实虽然具有无核的优异性状，但果实表现为皮厚高酸；ROG和BMA果实虽偏小，但综合品质良好。

2.3 气象因素与红宝石青柚果实品质之间的相关性分析

基于物候期观测将果实发育进程划分为三个阶段：生长初期（S1，4—5月）、膨大期（S2，6—7月）和接近成熟期（S3，8—9月）。采用Z-score标准化后的数据进行各阶段气候因子与果实品质指标的关联性分析，结果显示（表6）不同发育阶段的气象因子对

表6 气象指标与红宝石青柚品质指标的相关性

Table 6 Correlation between meteorological indicators and quality indicators of Ruby green pomelo

品质指标 Quality index	气象指标 Meteorological index											
	Tm4-5	Tm6-7	Tm8-9	Pr4-5	Pr6-7	Pr8-9	S4-5	S6-7	S8-9	RH4-5	RH6-7	RH8-9
单果质量 Single fruit mass	−0.389	−0.472	−0.524	0.518	0.377	−0.003	0.036	0.425	0.398	−0.293	0.719*	0.049
纵径 Longitudinal diameter	−0.217	0.058	0.041	0.346	0.006	−0.139	0.023	0.578	0.568	0.200	0.345	0.135
横径 Transverse diameter	−0.517	−0.239	−0.160	0.697	0.206	−0.064	−0.278	0.376	0.558	0.138	0.534	−0.165
果形指数 Fruit shape index	0.080	0.260	0.166	−0.035	−0.141	−0.258	0.254	0.643	0.462	0.128	0.116	0.354
果皮厚度 Peel thickness	0.450	0.675	0.685	0.359	−0.732*	−0.037	−0.207	0.228	−0.130	0.466	−0.402	0.446
可食率 Edible rate	0.206	−0.008	−0.073	−0.131	−0.105	0.833*	0.361	−0.289	−0.404	0.204	0.047	0.137
囊瓣数 Capsule valve number	0.970**	−0.787*	−0.611	0.495	0.761*	−0.527	−0.469	0.229	0.783*	−0.341	0.713*	−0.712*
种子数量 Number of seeds	−0.712*	−0.471	−0.235	0.357	0.502	−0.055	−0.611	−0.507	0.149	0.031	0.167	−0.837*
种子粒质量 Seed mass	−0.425	−0.416	−0.313	0.074	0.468	0.223	−0.245	−0.597	−0.146	−0.081	0.115	−0.563
出汁率 Juice yield	−0.460	−0.281	−0.249	0.059	0.523	−0.723*	−0.273	0.091	0.424	−0.374	0.162	−0.334
可溶性固形物含量 Soluble solid content	−0.501	−0.238	−0.150	−0.195	0.399	−0.066	0.026	0.042	0.509*	0.152	0.232	−0.469
可滴定酸含量 Titrable acid content	0.594	0.740*	0.676	0.087	−0.724*	−0.060	0.007	0.247	−0.190	0.378	−0.478	0.575
固酸比 Solid acid ratio	−0.759*	−0.748	−0.637	−0.026	0.775*	−0.111	−0.106	−0.116	0.443	−0.299	0.534	−0.695
维生素C含量 Vitamin C content	−0.661	−0.343	−0.207	0.272	0.566	−0.593	−0.529	−0.132	0.414	−0.189	0.163	−0.607
P含量 P content	−0.190	−0.474	−0.572	−0.240	0.647	−0.330	0.052	−0.298	−0.153	−0.748*	0.141	−0.172
K含量 K content	−0.204	−0.401	−0.464	−0.005	0.542	−0.160	−0.073	−0.367	−0.211	−0.559	0.131	−0.180
Ca含量 Ca content	−0.832*	−0.884**	−0.776*	0.261	0.855*	−0.219	−0.259	−0.082	0.426	−0.489	0.668	−0.672
Mg含量 Mg content	−0.834*	−0.691	−0.569	0.229	0.728*	−0.821*	−0.328	0.419	0.869*	−0.484	0.614	−0.572
Fe含量 Fe content	−0.711*	−0.539	−0.439	0.037	0.663	−0.127	−0.125	−0.051	0.497	−0.112	0.445	−0.607
Mn含量 Mn content	−0.175	0.068	0.029	−0.194	0.170	−0.177	0.188	0.280	0.437	0.125	0.111	−0.024
Cu含量 Cu content	−0.538	−0.524	−0.402	0.102	0.347	−0.374	−0.104	0.457	0.686	−0.215	0.528	−0.379
Zn含量 Zn content	0.413	0.184	−0.011	0.188	−0.221	0.059	0.244	0.275	−0.234	−0.213	0.053	0.644
柠檬苦素含量 Limonin content	0.080	0.239	0.329	0.552	−0.498	0.014	−0.246	0.433	0.206	0.368	0.058	0.198
诺米林含量 Nomilin content	−0.021	0.232	0.364	0.776*	−0.413	−0.135	−0.553	0.204	0.098	0.317	−0.042	0.058

注：Tm. 平均温度；Pr. 降雨量；S. 平均光照时长；RH. 相对湿度；4~9 等数字表示月份。*和**分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平的显著性情况。

Note: Tm. The average temperature; Pr. The rainfall; S. The average light duration; RH. The relative humidity; Numbers such as 4-9 indicate months. * and ** indicate the significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ respectively.

果实品质形成具有特异性调控作用。

生长初期，温度与囊瓣数呈极显著正相关（r=0.970），但膨大期转为负相关；与种子数量、Mg 含量呈显著负相关（r=−0.712，r=−0.834）；与可溶性固形物含量呈负相关（r=−0.501）。此外，次生代谢物呈现差异响应，诺米林含量与生长初期降雨量呈显著正相关（r=0.776），而柠檬苦素含量与气象指标多呈正相关，表明极端气候胁迫可诱导其次生代谢。膨大期的温度与可滴定酸含量呈显著正相关（r=0.740），而与固酸比呈负相关（r=−0.748），同时该阶段降雨量与可滴定酸含量呈显著负相关（r=−0.724），高温极显著抑制 Ca 元素积累（r=−0.884）。近成熟期的光照条件对品质形成具有关键影响，与囊瓣数（r=0.783）、可溶性固形物含量（r=0.509）及 Mg 含量（r=0.869）均呈显著正相关；而相对湿度则与可溶性固形物含量呈负相关（r=−0.469），与种子数量呈显著负相关（r=−0.837）。上述表明温度、光照与水分协同调控可溶性固形物和可滴定酸含量积累。矿质元素中，Ca 和 Mg 元素含量与温度、降雨量以及光照存在显著相关关系（P<0.05），其余元素（如 K、Zn）与气象因子无显著关联。

2.4　红宝石青柚果实综合评价模型构建

2.4.1　主成分分析筛选关键评价因子　原始数据 KMO 值为 0.622，Bartlett 球形检验结果 P<0.05，表明数据间存在相关性，可进行主成分分析。基于特征值＞1 和凯撒正态化最大方差法，将 24 个品质指标最终转化为 7 个主成分，这 7 个主成分能够代表 82.70% 的原始信息（表 7）。其中，第一主成分的方差贡献率为 24.55%，主要由果实的矿质元素（Cu、K、P、Mn、Fe、Ca）含量指标主导，这部分指标载荷最大，可反映为果实矿质元素因子。第二主成分的方差贡献率为 12.90%，在出汁率、可滴定酸含量、Zn 含

表 7　主成分分析结果

Table 7　Principal component analysis results

指标 Index	主成分 Principal component						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Cu 含量 Cu content	0.91	0.06	−0.01	0.18	0.00	−0.08	0.06
K 含量 K content	0.91	0.03	−0.04	0.20	0.14	−0.10	0.01
P 含量 P content	0.89	−0.02	−0.10	0.11	0.02	0.07	−0.08
Mn 含量 Mn content	0.82	0.15	−0.11	−0.02	0.05	−0.33	0.10
Fe 含量 Fe content	0.75	0.52	0.03	−0.03	0.09	0.11	0.07
Ca 含量 Ca content	0.74	−0.06	0.04	−0.03	0.49	−0.28	0.09
柠檬苦素含量 Limonin content	−0.63	0.19	0.07	0.25	0.51	0.00	0.01
维生素 C 含量 Vitamin C content	0.52	0.39	−0.09	0.24	−0.14	0.04	−0.17
可食率 Edible rate	−0.09	−0.72	0.26	−0.31	−0.26	0.26	−0.08
纵径 Longitudinal diameter	−0.53	−0.71	0.10	0.26	0.15	−0.24	0.04
出汁率 Juice yield	0.62	0.67	0.01	0.00	−0.26	0.16	−0.01
Zn 含量 Zn content	−0.21	0.61	0.24	−0.52	−0.33	−0.13	0.01
可滴定酸含量 Titrable acid content	−0.56	0.60	−0.12	0.18	−0.10	0.29	0.29
果皮厚度 Peel thickness	−0.56	0.59	0.09	0.25	0.09	−0.20	0.13
诺米林含量 Nomilin content	−0.52	0.53	0.24	0.00	0.48	0.14	−0.12
单果质量 Single fruit mass	0.13	0.14	0.86	0.22	−0.28	−0.10	−0.13
横径 Transverse diameter	−0.04	−0.03	0.85	0.37	−0.06	−0.05	−0.11
Mg 含量 Mg content	0.52	0.46	0.23	−0.54	0.13	0.03	−0.02
果形指数 Fruit shape index	−0.08	0.29	−0.05	0.51	−0.39	−0.32	0.32
可溶性固形物含量 Soluble solid content	0.42	−0.39	−0.27	0.43	−0.23	0.42	0.12
囊瓣数 Capsule valve number	0.43	0.06	0.30	0.27	0.27	0.54	−0.17
固酸比 Solid acid ratio	0.48	−0.34	−0.02	0.07	−0.06	−0.25	−0.54
种子数量 Number of seeds	0.48	−0.37	0.31	−0.12	0.27	0.08	0.49
种子粒质量 Seed mass	0.38	−0.46	0.39	−0.18	−0.08	0.02	0.49
特征值 Eigenvalue	5.89	3.10	2.80	2.23	2.20	2.06	1.57
方差百分率 Variance percentage/%	24.55	12.90	11.66	9.29	9.18	8.59	6.53
累计百分率 Cumulative percentage/%	24.55	37.45	49.11	58.40	67.58	76.17	82.70

量、果皮厚度等指标上具有较高的正载荷，同时在可食率和纵径上具有较高的负载荷，表明果皮较厚时可食率较低，可定义为果皮厚度因子或酸度因子。第三主成分的方差贡献率为11.66%，主要由单果质量和果实横径决定，可定义为果实大小因子。第四主成分的方差贡献率为9.29%，主要由果形指数和可溶性固形物含量决定，Mg和Zn含量在该主成分上的负载荷较高，表明当果形指数或SSC较高时Mg和Zn的含量可能偏低，因此可定义为果形因子或甜度因子。第五主成分的方差贡献率为9.18%，柠檬苦素含量具有较高的正载荷，因此可定义为苦味因子。第六主成分的方差贡献率为8.59%，在囊瓣数上具有较高的正载荷，可定义为囊瓣数因子。第七主成分的方差贡献率为6.53%，主要由种子性状决定，同时在固酸比上也表现出较高的负载荷，可定义为种子因子。

2.4.2 评价模型的构建及综合得分情况 以F_1~F_7分别代表PC1~PC7等主因子，X_1~X_{24}分别代表24个果实品质指标，以标准化数据运算得到成分得分系数矩阵，将其用于计算各个因子的得分情况，因子得分（以F_1为例）：F_1=0.91X_1+0.91X_2+0.89X_3+0.82X_4+0.75X_5 + 0.74X_6− 0.63X_7 + 0.52X_8− 0.09X_9− 0.53X_{10} + 0.62X_{11}− 0.21X_{12}− 0.56X_{13}− 0.56X_{14}− 0.52X_{15} + 0.13X_{16}− 0.04X_{17} + 0.52X_{18}− 0.08X_{19} + 0.42X_{20} + 0.43X_{21} + 0.48X_{22} + 0.48X_{23}+0.38X_{24}。

以每个特征向量载荷值为系数，得到主成分的线性方程，再将每个主成分所对应的方差贡献率占7个主因子的累计贡献率的比例作为权重，即可构建主成分综合评价模型（综合得分表达式）：F=（0.245 5×F_1+0.129 0×F_2+0.116 6×F_3+0.092 9×F_4+0.091 8×F_5+0.085 9×F_6+0.065 3×F_7）/0.827 0

=0.350 2X_1 + 0.319 9X_2 + 0.317 1X_3 + 0.279 0X_4 + 0.275 6X_5 + 0.267 4X_6 + 0.262 3X_7 + 0.227 5X_8 + 0.188 4X_9 + 0.165 2X_{10} + 0.149 2X_{11} + 0.148 0X_{12} + 0.118 7X_{13} + 0.104 2X_{14} + 0.101 6X_{15} + 0.099 5X_{16} + 0.084 9X_{17} + 0.034 1X_{18} + 0.026 8X_{19} + 0.017 2X_{20} − 0.013 1X_{21} − 0.180 2X_{22} − 0.189 8X_{23} − 0.195 8X_{24}。

评价模型中，将每个品质指标系数的绝对值视为该指标在模型中的权重，权重越大的指标对该品质模型贡献率越高。根据图3可知，24个品质指标权重的平均值为0.123 2。其中，Cu含量、P含量、Ca含量、Mn含量、K含量、Fe含量、可溶性固形物

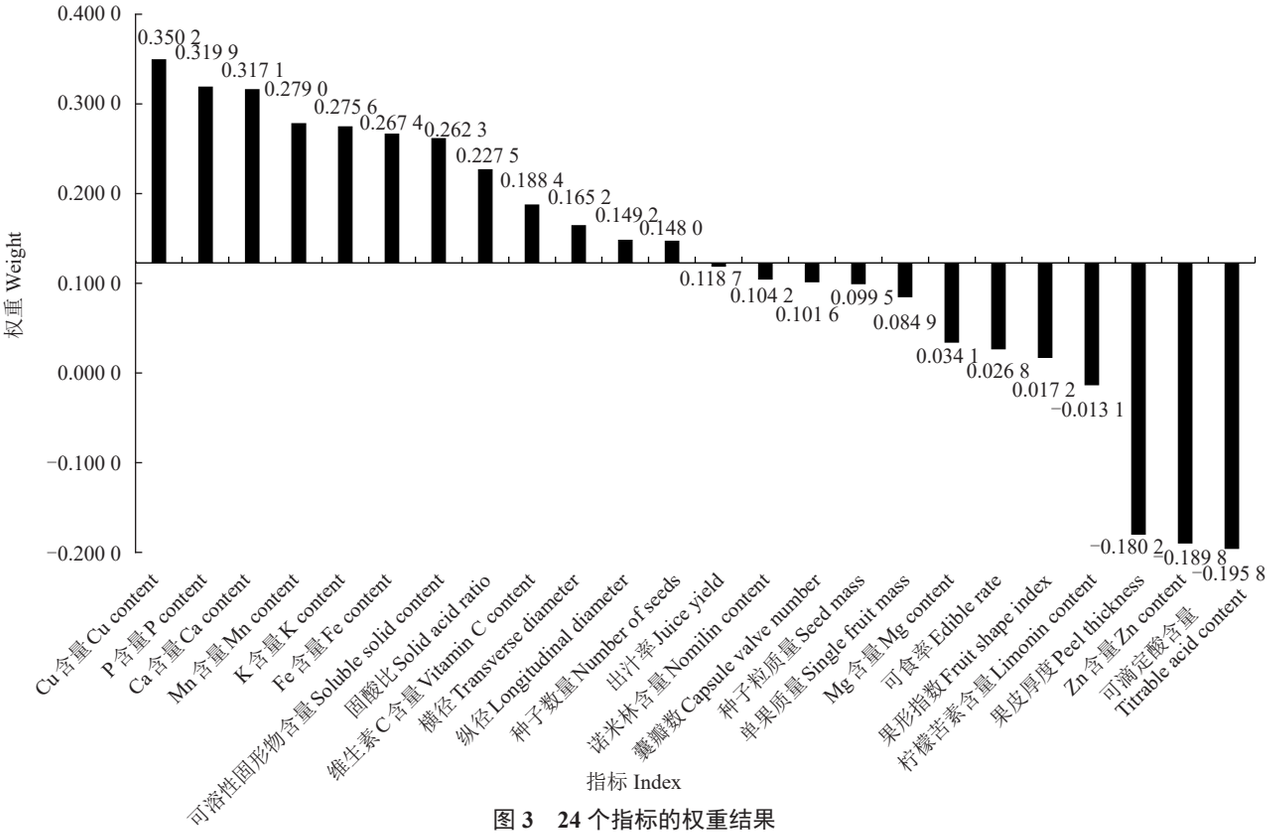

图3 24个指标的权重结果

Fig. 3 Weight results of 24 indicators

含量、固酸比、维生素C含量、纵横径、种子数量等12项指标的权重大于平均值，说明对红宝石青柚品质模型具有较高的贡献率。在构建的品质模型中，这部分指标数据优异的样品将得到较高的综合评分。

利用该综合模型计算各地果实的综合得分，结果显示排名依次为HNJ＞LGA＞YOQ＞ROG＞YNG＞BMA＞BBA（表8）。其中，排名前三中（综合评分≥0.05）HNJ维生素C含量（66.58±21.13 mg·100 g^{-1}）及固酸比（25.47±1.98）突出；LAG果实无核特性突出；YOQ以果皮薄（13.86±4.09 mm）、糖酸平衡、风味佳著称。模型证实在基于权重判断不同产区果实品质优劣的7个关键因子上，HNJ、LGA和YOQ等地区的果实品质得分更高，表明这7个关键因子的优越程度越高，果实品质越佳。

表8　红宝石青柚品质综合评价结果

Table 8　Comprehensive evaluation results of Ruby Green pomelo quality

引种地区 Introduction zones	主成分得分 Principal component score							综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
	*F*1	*F*2	*F*3	*F*4	*F*5	*F*6	*F*7		
BBA	−0.09	−0.32	−0.51	−0.07	−1.70	0.14	−0.26	−0.23	7
LGA	0.07	0.05	1.70	−0.83	−0.19	−0.10	−0.01	0.09	2
YNG	0.29	−0.17	−0.89	−0.43	0.67	−0.21	1.29	−0.02	5
YOQ	0.55	0.30	−0.16	−0.14	0.06	0.84	0.10	0.05	3
HNJ	0.53	−0.43	0.71	1.21	0.95	0.88	−0.55	0.32	1
BMA	0.65	−0.02	−0.37	0.32	0.13	−0.58	−0.42	−0.07	6
ROG	−2.36	0.48	0.25	0.03	0.53	−0.19	−0.23	−0.01	4

3　讨　论

3.1　不同地区红宝石青柚果实品质的差异

本研究结果显示，不同地区的红宝石青柚果实在外观品质（如果皮厚度、单果质量）、内在品质（如可溶性固形物含量、糖酸比、风味特性）和感官评价方面存在显著差异，初步证实了气候导致红宝石青柚的品质分化。YNG（12.03 °Brix）和HNJ（11.61 °Brix）地区的果实可溶性固形物含量显著高于其他地区（P＜0.05）；YOQ地区的红宝石青柚果实皮薄、单果质量较大、糖酸平衡、果肉质地细腻且风味优异，在感官品评中得分最高。这几处产地均具备全年光照充足、降雨丰富且空气湿度较高的气候特点。这与吴雅诺[27]提出的“生态-果实”关联模式一致。值得注意的是，相较于其他地区，LGA地区的果实虽具有无核特性，但固酸比偏低且酸度较高，柠檬苦素含量高（49.21 μg·mL^{-1}），显著影响适口性，这可能与当地日均温度变化较大且光照不足从而抑制糖代谢诱发次生代谢有关。相较于李金强等[28]对贵州山地柑橘的研究结果，笔者发现光照、温度对红宝石青柚果实糖、酸以及苦味平衡的调控更显著，表明红宝石青柚对光温存在特殊敏感需求，需根据地域气候特点对栽培模式进行优化。

3.2　气候因子的多尺度调控

前人研究表明，石榴中花青素积累与季节性温度变化存在负相关关系[29]。黑加仑果实色素物质的积累、有机酸水平分别受降雨量、温度的影响，揭示了气象指标对果实风味形成具有部分决定性[19]。研究指出，降雨量显著影响摩洛哥苹果果实的总产量和甜度，需冷量和热量则会影响果实的质量、大小及硬度[30]。长达9年的甜橙季节性气候与品质研究表明，在果实膨大期过量的降雨、较低有效积温及较小的昼夜温差会抑制可滴定酸含量降低，而较低的降雨、较高有效积温及较大的昼夜温差则会促进可溶性固形物含量积累[20]。气象因子与果实品质的相关性分析表明，可溶性固形物含量与生长初期的温度呈负相关（r=−0.501），与光照呈正相关（r=0.026、0.042、0.509），与接近成熟期的相对湿度呈负相关（r=−0.469）。可滴定酸含量与膨大期的温度呈显著正相关（r=0.740），与降雨量呈显著负相关（r=−0.724），降雨量越大的地区果实酸度越低。柠檬苦素含量与极端气温呈正相关，这与Dong等[20]对甜橙的研究结果一致，随着果实的膨大和水分的不断增加，产生“生理稀释”作用导致果实有机酸含量降低，即有机酸代谢关键酶系统的改变会抑制柠檬酸合成，导致酸的持续氧化分解。

此外，果实中的矿质元素如钙和镁的含量与温

度、降雨量和光照显著相关，表明气候条件显著影响果实中钙镁的分布，还可能间接影响果实的质地和口感。总体而言，气象因子在果实发育后期发挥的作用更为显著，光照、温度和湿度的平衡有利于果实品质提升。气象因子（年均温、≥10 ℃年有效积温、最冷月均温、无霜期、日照等）对红美人品质（可食率、可溶性固形物含量、含糖量、糖酸比、固酸比）影响显著，特别是降雨量和日照时数与果实品质密切相关[28]。

3.3 主成分建模综合评价差异

感官评价结果易受品鉴人员的口味喜好影响，而基于主成分分析构建的综合评价模型较传统感官评价更能客观反映果实品质的差异，被广泛应用于多种果树的果实品质评价，在柚类研究上已见报道[31-33]。综合评价模型结果显示，不同地区的果实品质综合排名依次为HNJ（环江）＞LGA（隆安）＞YOQ（右江）＞ROG（容县）＞YNG（邕宁）＞BMA（巴马）＞BBA（博白）。HNJ、LGA和YOQ地区的果实在综合品质上更具优势。HNJ地区的果实凭借较高的可溶性固形物含量、维生素C含量和固酸比，综合得分显著高于其他产区。但模型对于无核特性等消费偏好指标的权重分配不足，导致LGA地区综合排名虚高。综上，对于评分结果较高的引种地区，可充分利用区域气候特点与土壤优势，构建标准化栽培技术体系，提升红宝石青柚品质均一性，推动其获得地理标志产品认证。

4 结 论

笔者阐明了气象因子通过差异化的生理调控机制塑造红宝石青柚品质特征的内在规律。温度通过激活次生代谢途径对物候期表现出特异性调控作用：生长初期高温促进囊瓣分化（r=0.970，P＜0.01），而膨大期则通过调控有机酸代谢关键酶活性显著影响可滴定酸积累（r=0.740），同时通过抑制钙离子转运蛋白表达降低Ca元素含量（r=−0.884）。光湿平衡机制在成熟期发挥核心作用，充足光照通过增强光合碳同化效率促进可溶性固形物（r=0.509）和镁元素积累（r=0.869），而适宜的相对湿度则通过调节水分胁迫响应基因表达，进而抑制种子发育（r=−0.837）。降雨量通过双重调控机制影响品质形成，既通过“生理稀释”作用降低可滴定酸含量（r=−0.724），又作为生物胁迫信号通过激活类黄酮代谢途径诱导诺米林合成（r=0.776）。综合评价显示环江、隆安和右江等3个适宜地区的气候条件年均温25~27 ℃、日照＞1500 h和相对湿度86%~88%等，因其优化的光湿平衡条件和温度调控效应，在果实糖酸平衡和营养品质方面表现突出，可作为红宝石青柚引种和优质栽培的参考气候条件。

下一步还可建立基于土壤类型（如砂质土、黏土占比）、生物胁迫（褪绿矮缩病、柑橘木虱等病虫害阈值）等关键影响因子的适应性评价体系。同时，构建融合气候波动特征、土壤理化参数动态监测数据及田间管理响应的“气候-土壤-管理”多因子耦合模型，通过随机森林算法与卫星遥感数据同化技术优化果实糖酸比、质地、风味及单果质量等品质指标的预测精度，最终形成红宝石青柚适宜种植区的精准水肥调控方案与风险预警机制。

参考文献 References：

[1] 梅正敏，雷新南，唐燕玲，区善汉. 不同产地泰国红宝石青柚果实品质分析[J]. 南方园艺，2021，32(6)：1-4.
MEI Zhengmin，LEI Xinnan，TANG Yanling，OU Shanhan. Analysis of fruit quality of Thai ruby grapefruit in different regions[J]. Southern Horticulture，2021，32(6)：1-4.

[2] 阮宾，陈海坚，周少新，余涛. 红宝石青柚嫁接及丰产栽培技术简介[J]. 南方农业，2021，15(22)：54-56.
RUAN Bin，CHEN Haijian，ZHOU Shaoxin，YU Tao. Introduction for the grafting and high-yield cultivation techniques of ruby green pomelo[J]. South China Agriculture，2021，15(22)：54-56.

[3] 覃任贞. 泰国青柚在中国的栽培技术和发展前景[J]. 世界热带农业信息，2020(8)：1-2.
QIN Renzhen. Cultivation techniques and development prospect of Thai green pomelo in China[J]. World Tropical Agriculture Information，2020(8)：1-2.

[4] 刘开崇，刘成娟. 泰国青柚新品种的丰产栽培技术研究[J]. 河北农机，2023(2)：156-158.
LIU Kaichong，LIU Chengjuan. Study on high-yield cultivation techniques of new varieties of Thai green pomelo[J]. Hebei Agricultural Machinery，2023(2)：156-158.

[5] 谢爱明. 青柚生产全程机械化示范建设项目技术模式[J]. 广西农业机械化，2021(2)：26-30.
XIE Aiming. Technical model of demonstration construction project of whole mechanization of green pomelo production[J]. Guang Xi Agricultural Mechanization，2021(2)：26-30.

[6] 赵东兴，岳建伟，赵志昆，杨永智，陈林杨，陈鸿洁，李春，张荣琴，毕光林. 47份青皮红心柚果实农艺性状的综合分析与优异种质筛选[J]. 果树学报，2022，39(9)：1553-1561.
ZHAO Dongxing，YUE Jianwei，ZHAO Zhikun，YANG Yong-

zhi，CHEN Linyang，CHEN Hongjie，LI Chun，ZHANG Rongqin，BI Guanglin. Comprehensive analysis of fruit agronomic traits of 47 pomelos with green skin and red pulp as well as screening of excellent germplasm[J]. Journal of Fruit Science，2022，39(9)：1553-1561.

[7] 唐娟，望飞勇，高明，张兰. 无核柚新品种宝石红柚的选育[J]. 果树学报，2023，40(4)：818-821.
TANG Juan，WANG Feiyong，GAO Ming，ZHANG Lan. Breeding report of a new red pomelo cultivar Baoshi Hongyou[J]. Journal of Fruit Science，2023，40(4)：818-821.

[8] YANG Z，ZHANG L，ZHAO J F，LI T S，LIU Q Y，CAO M J，ZHOU Y. First report of citrus chlorotic dwarf-associated virus on pomelo in Nakhon，Thailand[J]. Plant Disease，2020，104(4)：1262.

[9] GUO J，LAI X P，LI J X，YUE J Q，ZHANG S Y，LI Y Y，GAO J Y，WANG Z R，DUAN H F，YANG J D. First report on citrus chlorotic dwarf associated virus on lemon in Dehong prefecture，Yunnan，China[J]. Plant Disease，2015，99(9)：1287.

[10] LOCONSOLE G，SALDARELLI P，DODDAPANENI H，SAVINO V，MARTELLI G P，SAPONARI M. Identification of a single-stranded DNA virus associated with citrus chlorotic dwarf disease，a new member in the family *Geminiviridae*[J]. Virology，2012，432(1)：162-172.

[11] 郑苍松. 南丰蜜橘果实品质与土壤-树体营养的关系及其调控[D]. 武汉：华中农业大学，2015.
ZHENG Cangsong. Relationships between fruit quality and soil-plant nutrients of Nanfeng tangerine and regulation by fertilization application[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2015.

[12] 蔡润. 口感型番茄品种筛选与评价[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2024.
CAI Run. Selection and evaluation of palatable tomato varieties[D]. Yangling：Northwest A & F University，2024.

[13] 张琳. 不同产区琯溪蜜柚的品质分析及克里曼丁橘有性杂交后代的杂种鉴定[D]. 武汉：华中农业大学，2015.
ZHANG Lin. The quality analysis of Guanxi pummelo from different production regions and the identification of hybrid from clementina's sexual hybridization[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2015.

[14] 张珊. 柚子汁产品质量控制研究[D]. 广州：暨南大学，2021.
ZHANG Shan. Quality control of pomelo juice[D]. Guangzhou：Jinan University，2021.

[15] 王森，何平，王海波，高文胜，常源升，何晓文，郑文燕，李林光. 鲁丽苹果在不同产地果实风味及品质差异分析[J]. 果树学报，2023，40(6)：1135-1145.
WANG Sen，HE Ping，WANG Haibo，GAO Wensheng，CHANG Yuansheng，HE Xiaowen，ZHENG Wenyan，LI Linguang. Analysis of fruit flavor and quality variation of Luli apple from different regions[J]. Journal of Fruit Science，2023，40(6)：1135-1145.

[16] 邓素枫，廖炜，龚碧涯，李先信，曾斌，杨水芝. 湖南30个柚类品种（资源）果实品质分析与评价[J]. 中国南方果树，2021，50(3)：36-41.
DENG Sufeng，LIAO Wei，GONG Biya，LI Xianxin，ZENG Bin，YANG Shuizhi. Analysis and evaluation of fruit quality of 30 pomelo varieties (resources) in Hunan province south[J]. South China Fruits，2021，50(3)：36-41.

[17] 万晓霞，孙庆文，陈春伶，徐文芬，祝久洁，陈亮. 红果参矿质元素含量测定及膳食营养评价[J]. 现代食品，2022，28(23)：109-114.
WAN Xiaoxia，SUN Qingwen，CHEN Chunling，XU Wenfen，ZHU Jiujie，CHEN Liang. Determination of mineral elements in *Cyclocodon lancifolius* and evaluation of dietary nutrition[J]. Modern Food，2022，28(23)：109-114.

[18] 周媛. 柑橘果实糖酸代谢与镁的关系及其机制[D]. 武汉：华中农业大学，2020.
ZHOU Yuan. The relationship between citrus fruit sugar and organic acid metabolism and magnesium and its mechanism[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2020.

[19] POTT D M，DURÁN-SORIA S，ALLWOOD J W，PONT S，GORDON S L，JENNINGS N，AUSTIN C，STEWART D，BRENNAN R M，MASNY A，SØNSTEBY A，KRÜGER E，JARRET D，VALLARINO J G，USADEL B，OSORIO S. Dissecting the impact of environment，season and genotype on blackcurrant fruit quality traits[J]. Food Chemistry，2023，402：134360.

[20] DONG Z H，CHEN M X，SRIVASTAVA A K，MAHMOOD U H，ISHFAQ M，SHI X J，ZHANG Y Q，MOUSSA M G，LI X X，HU C X，ZHANG F S. Climate changes altered the citrus fruit quality：A 9-year case study in China[J]. Science of the Total Environment，2024，923：171406.

[21] 李翔翔，杨爱萍，金国花，丁美萍，杨军. 赣南脐橙气候品质归一化指数构建[J]. 农业工程学报，2024，40(7)：335-342.
LI Xiangxiang，YANG Aiping，JIN Guohua，DING Meiping，YANG Jun. Constructing normalized climate-quality index for Gannan navel orange[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(7)：335-342.

[22] 刘思雨. 纽荷尔脐橙负载量分级和产量气象预测模型构建研究[D]. 重庆：西南大学，2024.
LIU Siyu. Research on the classification of fruit loading grade and the construction of a meteorological prediction model for yield in Newhall navel oranges[D]. Chongqing：Southwest University，2024.

[23] 付世军，李梦，杨晓兵，何震，袁佳阳，刘书慧，徐越，卢德全，张利平. 基于D-S证据理论的农作物气候品质预测方法研究：以晚熟杂交柑橘春见为例[J]. 贵州农业科学，2024，52(5)：122-132.
FU Shijun，LI Meng，YANG Xiaobing，HE Zhen，YUAN Jiayang，LIU Shuhui，XU Yue，LU Dequan，ZHANG Liping. Research on prediction method for crop climate quality based on D-S evidence theory：Taking late mature hybrid citrus Harumi as

an example[J]. Guizhou Agricultural Sciences，2024，52(5)：122-132.

[24] 周彩霞，黄桂香，潘贞珍，胡艺帆，苏美玲，何新华. 甜橙无核品系“春蜜”遗传背景分析[J]. 中国南方果树，2019，48(3)：21-26.
ZHOU Caixia，HUANG Guixiang，PAN Zhenzhen，HU Yifan，SU Meiling，HE Xinhua. Genetic background analysis of sweet orange seedless strain “Chunmi”[J]. South China Fruits，2019，48(3)：21-26.

[25] 徐宸宇. 马家柚优系遗传鉴定及提高品质技术研究[D]. 武汉：华中农业大学，2021.
XU Chenyu. Genetic identification of superiority and quality improvement technology research of Majia pomelo[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2021.

[26] 胡艺帆. 夏梢防控沃柑日灼及其生理机制的研究[D]. 南宁：广西大学，2020.
HU Yifan. Study on the prevention and control of sunburn and its physiological mechanism by orah summer shoot[D]. Nanning：Guangxi University，2020.

[27] 吴雅诺. 基于感官评价及代谢组学比较不同产地柑橘果实品质差异[D]. 武汉：华中农业大学，2023.
WU Yanuo. Intergrated sensory evaluation with metabolomics to compare the quality differences of citrus fruits from different regions[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2023.

[28] 李金强，李文云，柏自琴，方明忠. 贵州山地气象因子与柑橘果实品质的相关性研究[J]. 西南农业学报，2013，26(5)：2009-2012.
LI Jinqiang，LI Wenyun，BAI Ziqin，FANG Mingzhong. Study on relationship between meteorological factors and quality of citrus fruit in Guizhou mountainous areas[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2013，26(5)：2009-2012.

[29] BOROCHOV-NEORI H，JUDEINSTEIN S，HARARI M，BARYA’AKOV I，PATIL B S，LURIE S，HOLLAND D. Climate effects on anthocyanin accumulation and composition in the pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit arils[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2011，59(10)：5325-5334.

[30] EL YAACOUBI A，EL JAOUHARI N，BOURIOUG M，EL YOUSSFI L，CHERROUD S，BOUABID R，CHAOUI M，ABOUABDILLAH A. Potential vulnerability of Moroccan apple orchard to climate change-induced phenological perturbations：Effects on yields and fruit quality[J]. International Journal of Biometeorology，2020，64(3)：377-387.

[31] 胡安华，窦万福，祁静静，雷天刚，陈善春，邹修平，彭爱红，许兰珍，姚利晓，何永睿，李强. 柚类种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 分子植物育种，2020，18(2)：650-664.
HU Anhua，DOU Wanfu，QI Jingjing，LEI Tiangang，CHEN Shanchun，ZOU Xiuping，PENG Aihong，XU Lanzhen，YAO Lixiao，HE Yongrui，LI Qiang. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of pomelo germplasms[J]. Molecular Plant Breeding，2020，18(2)：650-664.

[32] 吴昊，苏万龙，石美娟，薛晓芳，任海燕，王永康，赵爱玲，李登科. 枣种质果实性状多样性分析与综合评价[J]. 植物遗传资源学报，2022，23(6)：1613-1625.
WU Hao，SU Wanlong，SHI Meijuan，XUE Xiaofang，REN Haiyan，WANG Yongkang，ZHAO Ailing，LI Dengke. Diversity analysis and comprehensive evaluation of jujube fruit traits[J]. Journal of Plant Genetic Resources，2022，23(6)：1613-1625.

[33] 徐宸宇，唐启正，刘慧宇，吴巨勋，伊华林. 基于主成分分析综合评价6个杂交授粉组合的马家柚果实品质[J]. 果树学报，2024，41(2)：282-293.
XU Chenyu，TANG Qizheng，LIU Huiyu，WU Juxun，YI Hualin. Comprehensive evaluation on fruit quality of six hybrid pollination combinations of Majiayou based on the principal component analysis[J]. Journal of Fruit Science，2024，41(2)：282-293.