

基于混合通风的日光温室热湿环境协同控制策略

孙先鹏^{1,2} 付颖¹ 甘海玲³ 张凤敏¹ 张婷¹ 王子腾¹

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学智能农业装备研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 杨陵区农产品质量安全监管中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对日光温室樱桃生产中普遍存在的日间高温与夜间高湿问题, 本研究开发并验证一种基于强制对流的混合通风策略, 以优化设施内热湿环境, 提升果实品质。以榆林地区典型日光温室(栽培樱桃品种: 布鲁克斯、萨米脱、雷尼)为研究对象, 首先通过环境监测与计算流体力学(CFD)数值模拟, 对比分析了自然通风与不同强制对流模式(后墙风机向下/向上送风)对室内温湿度场及气流组织的影响, 确定了最优通风方案。随后, 通过田间对比试验, 验证了该优化策略在樱桃结果期的实际环境调控效果及其对果实品质的影响。CFD模拟与实测结果均表明, 采用“后墙风机向下送风”的混合通风策略效果最佳。与纯自然通风相比, 该策略可有效降低日间冠层温度(最大降幅3.9℃), 显著抑制夜间高湿(植株区相对湿度最大降幅14.6个百分点), 且避免了过度降温。品质测定结果显示, 该策略显著提升了果实商品性与营养价值: 布鲁克斯品种单果质量增加19.8%, 硬度提升31.6%; 萨米脱品种 a^* 值(红色度)和总酚含量分别提升26.9%和36.1%; 雷尼品种可食率与可溶性固形物含量亦显著提高。各品种的糖酸比均得到显著改善。本文所提出的混合通风策略能有效破解日光温室樱桃生产的环境瓶颈, 是实现果实高产优质的一种高效、低成本环境调控技术, 为设施园艺精准环控提供了工程依据与实践方案。

关键词: 甜樱桃; 日光温室; 强制对流; 计算流体动力学; 环境调控; 果实品质

中图分类号: S625.5; S662.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)05-0407-10

OSID:



Hybrid Ventilation-based Control Strategy for Coordinated Regulation of Thermal – Humidity Environment in Solar Greenhouses

SUN Xianpeng^{1,2} FU Ying¹ GAN Hailing³ ZHANG Fengmin¹ ZHANG Ting¹ WANG Ziteng¹

(1. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Intelligent Agricultural Equipment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Yangling District Center for Quality and Safety Supervision of Agricultural Products, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to address the prevalent issues of high daytime temperature and high nighttime humidity in solar greenhouse cherry production, a mixed-ventilation strategy was developed and validated based on forced convection to optimize the indoor thermal-humidity environment and enhance fruit quality. Taking typical solar greenhouses in Yulin (planted with cultivars ‘Brooks’, ‘Summit’, and ‘Rainier’) as the research object, computational fluid dynamics (CFD) simulations and environmental monitoring were firstly employed to compare the effects of natural ventilation and different forced convection modes (rear-wall fans blowing downwards/upwards) on the temperature, humidity, and airflow fields, thereby determining the optimal ventilation scheme. Subsequently, field comparison experiments were conducted to verify the practical effectiveness of the optimized strategy on environmental regulation and its impact on fruit quality during the fruiting stage. Both CFD simulations and field measurements indicated that the mixed-ventilation strategy with “rear-wall fans blowing downwards” performed optimally. Compared with natural ventilation, this strategy effectively reduced the daytime canopy temperature (max. reduction of 3.9℃) and significantly suppressed high nighttime humidity (maximum reduction of 14.6 percentage points in the plant zone) while avoiding excessive cooling. Quality assessments revealed that this strategy significantly improved the commercial and nutritional value

收稿日期: 2025-11-11 修回日期: 2025-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2001001)、榆林市科技计划项目(2023-CXY-182)和陕西省财政农业专项资金项目(2023-ZDLNY-27)

作者简介: 孙先鹏(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事设施农业智慧环控研究, E-mail: sunxianpeng@nwsuaf.edu.cn

of the fruit: for ‘Brooks’, single fruit weight was increased by 19.8% and firmness by 31.6%; for ‘Summit’, the a^* value (redness) and total phenolic content were increased by 26.9% and 36.1%, respectively; the edible rate and total soluble solids of ‘Rainier’ were also significantly enhanced. The sugar-acid ratio was significantly improved across all cultivars. The proposed mixed-ventilation strategy effectively overcame the environmental bottlenecks in solar greenhouse cherry production. It represented an efficient, low-cost environmental control technology for achieving high yield and quality, providing an engineering basis and practical solution for precision climate control in protected horticulture.

Key words: sweet cherry; solar greenhouse; forced convection; computational fluid dynamics (CFD); environmental control; fruit quality

0 引言

甜樱桃 (*Prunus avium* L.) 以其酸甜爽口的风味、富含维生素 C 和花青素,加之可观的经济收益(优质果品售价常达每千克百元以上),成为备受青睐的水果,市场需求持续攀升^[1-2]。日光温室、塑料大棚、植物工厂等设施栽培措施通过人工调控温度、光照、湿度等多种环境因素,有效克服了露地生产受制于天气和病虫害的问题,成为提升樱桃产量、品质和实现反季节供应的重要途径^[3]。然而,设施环境,特别是日光温室,在特定季节(如冬春季)或天气条件下,易形成高温高湿、低温高湿或温湿度分布不均的小气候环境^[4]。这种环境不仅抑制樱桃的光合作用与正常生长发育^[5],更显著增加了灰霉病、褐腐病等真菌性病害以及裂果发生的风险^[6-8],严重制约了设施樱桃产业的效益提升^[9]。

调控设施内不适宜温湿度环境的主要方法是通风。自然通风依赖内外温差和气压差,虽成本低但效果受外界气候波动影响大,稳定性不足^[10];机械通风(强制通风)通过风机驱动空气流动,能更主动、精确地调控环境,但存在额外的建设、运维成本^[11]。因此,探索高效、可行的通风策略对优化设施樱桃生长环境至关重要。有限元分析等数值模拟方法,如计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)、有限体积法(Finite volume method, FVM),在预测设施内复杂环境场(温度、相对湿度、气流)方面展现出强大能力^[12-14],为通风设计优化提供了有力工具。国内外在温室环境 CFD 模拟方面已取得显著进展^[15-18],并在智能化调控方向上不断发展^[19-21]。然而,针对设施樱桃生长特性(如对温湿度敏感度、不同生育期需求差异)的系统性湿热环境调控研究,尤其是基于实际验证的通风策略优化仍明显不足^[22-24]。现有研究多侧重于模拟预测或单一技术效果,缺乏将优化方案应用于实际生产并进行全面环境效应与最终果实品质响应的对比实证研究。

本文首先对日光温室内樱桃生育期的温湿度数据进行监测,初步分析温室内的环境特点。并基于温室结构、实测温湿度数据以及作物生长情况,利用 CFD 技术模拟辅助确定了风机安装位置及送风角度作为试验方案依据,通过安装不同送风角度和位置的风机,在樱桃结果期内监测并对比分析仅自然通风温室和加入强制对流通风温室内的温湿度时空分布特征,评估不同通风模式对日光温室热湿环境及成熟樱桃果实品质的影响。旨在通过田间对比试验,评估风机强制对流通风对改善日光温室樱桃实际生长环境及提升果实品质的效果,为设施樱桃高效栽培的环境精准调控提供实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验于 2023 年至 2024 年在陕西省榆林市某樱桃种植园区内的日光温室内进行,温室类型为前屋面设置上、下两道开窗式通风口的日光温室,其地理位置为东经 109°83',北纬 38°36',位于陕西省北部,气候属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 10℃,年平均降水 400 mm 左右^[25]。

试验温室采光面朝正南向,东西长度 60 m,南北跨度 8 m,脊高度 3.6 m,后墙高度 3 m。温室采用镀锌铁骨架,覆盖 0.1 mm 厚聚乙烯薄膜。后墙为内外墙夹聚乙烯泡沫板结构,后屋面为彩钢板。温室配备可调开度的上下通风口,上通风口的调节范围为 0~0.6 m,下通风口的调节范围为 0~1.2 m,且温室通风口处均配备有 20 目防虫网。温室内栽培樱桃品种为:布鲁克斯、雷尼、萨米脱,树体平均高度约为 1.8 m。试验温室局部结构示意图及内外环境如图 1 所示。

1.2 试验设计与过程

1.2.1 2023 年温室内温湿度环境分析

樱桃日光温室内配备有环境温湿度监测传感器,监测位置为温室南侧靠近下通风口处,监测参数为上一年度樱桃结果期(2023 年 3 月 20 日—4 月

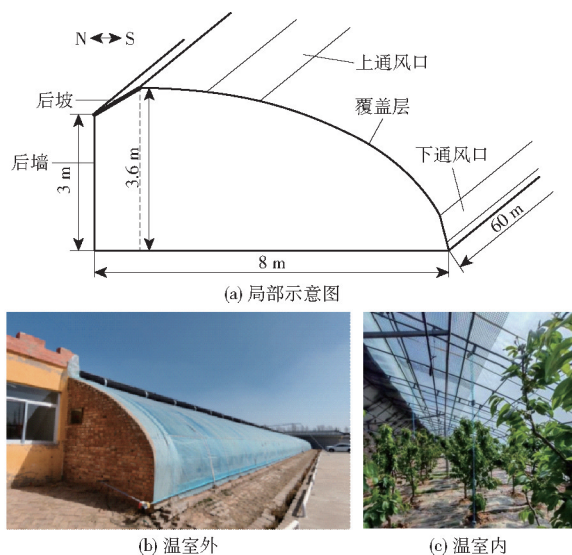


图1 樱桃日光温室

Fig.1 Cherry solar greenhouse

20日,共32d)与着色期(2023年4月21日—5月10日,共20d)的温度、相对湿度。图2为2023年樱桃结果期与着色期的温湿度变化图,在此期间,如遇雨天,将关闭上通风口,其他时间内温室上通风口与下通风口均为全部开启状态。

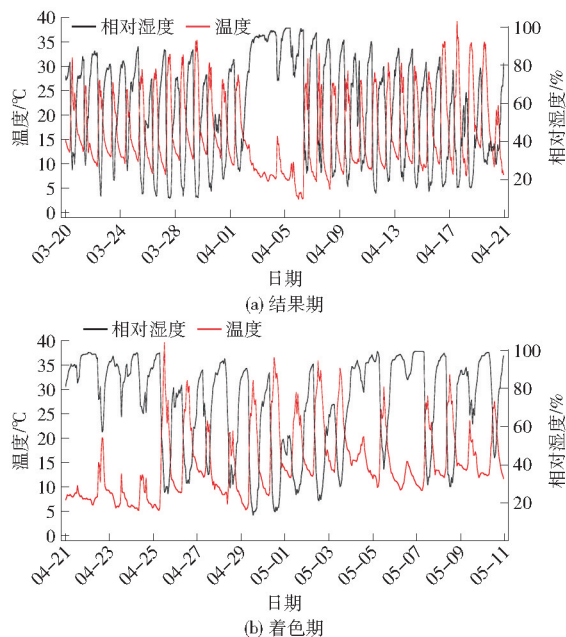


图2 2023年樱桃日光温室温湿度变化曲线

Fig.2 Curves of temperature and humidity in cherry solar greenhouse in 2023

在樱桃日光温室内,温度与相对湿度呈负相关关系。这主要是因为相对湿度定义为实际水汽压与饱和水汽压之比,而饱和水汽压随温度升高而显著增大。因此,当实际水汽含量不变时,温度上升将导致相对湿度降低。在樱桃结果期内,白天适宜环境温度为22~25℃,夜间适宜环境温度为10~12℃^[4]。实测数据显示,试验温室在樱桃结果期内的整体温度变化较为规律:每日12时至14时左右室内均出现温度峰值,该时段气温普遍高于25℃,最高可达39.4℃,远超出樱桃适宜生长温度范围;夜间温度则基本处于适宜生长区间。此外,4月2—5日期间因降雨影响,出现温度偏低和相对湿度偏高的异常情况。同时,在结果期内,樱桃适宜生长的相对湿度为60%左右,但实际测量值显示温室内相对湿度最高值大都处于70%~90%,最高相对湿度可达99.8%,远高于适宜生长相对湿度的要求。在樱桃着色期内,4月21—24日期间,同样存在由于降雨原因引起的温度偏低、相对湿度过高的问题。此外,在其他时间段内,白天温度高于适宜生长温度的天数较多,最高温度达40.8℃。夜间相对湿度均大于适宜生长相对湿度的要求,最高值多数处于80%~95%,最高达99.9%。

1.2.2 环境数据监测

温室外部安装小型气象站,用于监测温室外部环境参数。小型气象站安装在试验温室东南方向15m空旷处,监测内容包括温度、相对湿度、光照强度、风向、风速,设置为每1min采集一次数据。

温室内部监测太阳辐射、温度、相对湿度、土壤温湿度等环境数据,使用的各传感器参数如表1所示。在日光温室内樱桃开花后,进行连续的温室内外环境监测。

由于温室空间较大,所以采用多点位温湿度监测,依据图3进行温湿度传感器的布置,主要监测樱桃树体冠层的温湿度数据,因此按照树体高度,将0~21号传感器均安装在垂直高度1.6m处。温室中间位置为东、西两侧保温被交界处,存在一条宽度约为1m的保温被未被卷起,因此温室内中间位置受太阳辐射等的影响与其他没有保温被遮阴的地方

表1 传感器参数

Tab.1 Sensor parameters

仪器名称	型号	测量项目	量程	精度	分辨率
温湿度记录仪	COS-04	温度	-20~60℃	±0.3℃	0.1℃
		相对湿度	0~100%	±2%	0.1%
太阳辐射监测仪	RS-RA/GH	温室内太阳辐射	0~1800 W/m ²	±3%	1 W/m ²
土壤传感器	RS-TR	土壤温度	-40~80℃	±0.5℃	0.1℃
		土壤含水率	0~100%	±2%	0.1%

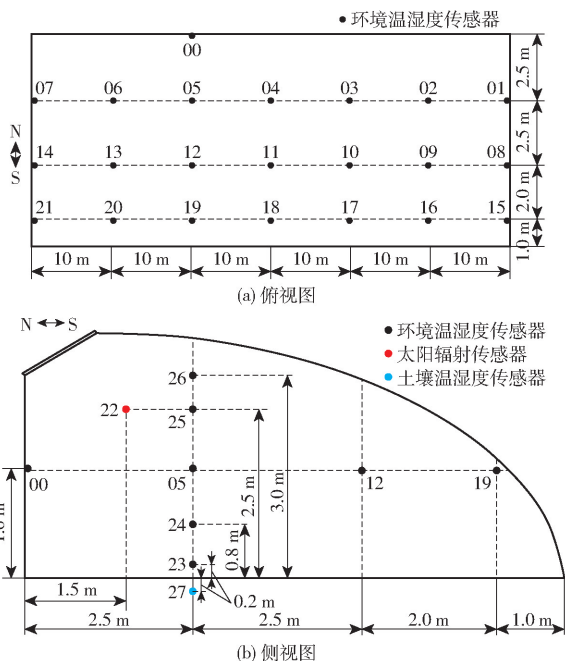


图3 温室内传感器布点图

Fig. 3 Layout of sensors inside greenhouse

不同,若在此监测温室内不同高度、沿跨度的温湿度分布情况,可能会有误差,因此根据实际安装情况限制,选择在靠温室西侧20 m处监测不同高度、沿跨度方向的温湿度分布及变化情况。即在12号传感器位置对应的后墙处安装00号温湿度传感器,以此监测沿跨度方向的温湿度分布情况;分别在05号传感器位置高度为0.2、0.8、2.5、3.0 m处加配23、24、25、26号温湿度传感器,以此监测温室内不同高度的温湿度分布情况。在距后墙1.5 m位置处安装高度为2.5 m的22号太阳辐射传感器,来监测不同天气状况、不同时间的温室内太阳辐射强度变化情况。在地下0.2 m深处安装27号土壤温湿度传感器。监测时间为2024年日光温室樱桃结果期及着色期,设置以上传感器每5 min采集一次数据。

1.3 CFD模拟及强制对流方式确定

为不破坏温室墙体与本身结构的机械通风形式,并考虑实际安装操作便捷程度、可推广性以及不影响温室内人员作业,在温室后墙上方处安装风机进行送风,温室风机选用400型不锈钢材质,扇叶为5叶,外径460 mm,功率150 W,风量4 200 m³/h,在温室内东西方向上每隔10 m安装一个,共安装5个。

根据供试温室情况,本文将温室通风方式分为自然通风、混合通风-风机朝温室下通风口送风、混合通风-风机朝温室上通风口送风3种,通过CFD模拟确定最终风机安装方式。

运用ANSYS SpaceClaim对供试温室进行1:1建模,将樱桃作物区域简化为各向同性且均匀的多孔

介质模型。孔隙率、黏性阻力系数和惯性阻力系数等物性参数设为固定常数,且忽略多孔介质模型的内部辐射。樱桃作物模型从距离地面0.2 m处开始建模,根据实际温室内樱桃的高度与体积参数,将樱桃多孔介质模型设定为两部分,靠近温室后墙即温室内侧北部为长56 m,宽4.5 m,高1.8 m;靠近温室下通风口即温室内侧南部为长56 m,宽1.5 m,高1.3 m,简化后的樱桃日光温室内流场区域几何模型如图4所示。

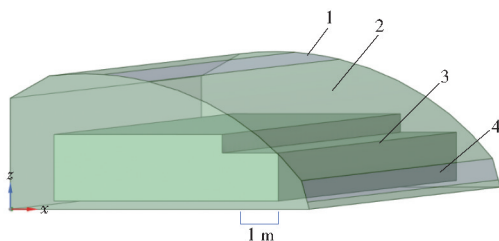


图4 日光温室几何模型示意图

Fig. 4 Schematic of geometric model of solar greenhouse

1. 上通风口
2. 内流场区域
3. 作物区域多孔介质模型
4. 下通风口

网格通过ANSYS Fluent中自有网格划分软件划分,并对温室的上、下通风口处进行网格局部加密处理。将几何图形定义为仅有没有空隙的流体区域组成,添加一组边界层,偏移方法类型为smoot-transition,边界层层数为3,过渡比为0.272,增长率为1.2,体网格使用polyhedra进行填充。本文引入Boussinesq假设,分析日光温室内自然对流特性,温室内气流数值模拟设定为湍流运动,并采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算,采用DO离散坐标辐射模型和组分运输模型,基于质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程,采用ANSYS Fluent软件进行模拟,并通过软件模拟3种通风方式的影响,确定风机安装形式。

1.4 樱桃果实品质测定

樱桃果实品质的测定分为外观品质测定和内在品质测定两部分,外观品质指标包括果形指数、单果质量、可食率、果实硬度、果实色泽;内在品质指标包括果实含水率、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、可溶性糖含量、还原糖含量、总酚含量、总黄酮含量、可溶性蛋白含量、游离氨基酸含量和花青素含量。

1.4.1 果实外观指标测定方法

果实果形指数采用游标卡尺测量果实纵径与最大横径并计算其比值;单果质量使用电子天平(精度0.01 g)称量;可食率基于单果质量与果核质量计算,计算方法为除去果核质量的单果质量与单果质量的百分比;果实硬度使用FT-011型水果质地分析仪穿刺测定,单位为N/cm²;果实色泽采用美能达

CR-400型色差仪测定,测得色差值包括 a^* 、 b^* 、 L^* ,其中, L^* 表示明度(0为黑,100为白), a^* 表示红绿方向色度(a^* 值越大表示果皮越红), b^* 表示黄蓝方向色度(b^* 值越大表示果皮越黄)。

1.4.2 果实内在指标测定方法

果实含水率采用常压干燥法测定;可溶性固形物含量(TSS)使用 ATACO 手持数显折光仪测定,结果以 Brix $^{\circ}$ 表示;可滴定酸、可溶性糖、还原糖、总酚、总黄酮、可溶性蛋白、游离氨基酸和花青素的含量测定分别参照文献[26-33]的方法进行。各项测定均设置3次重复。

2 结果与分析

2.1 强制对流方式选择

通过 CFD 模拟温室在上下通风口均开启的情况下,不同机械送风方式对温室内环境的影响,各模拟具体工况如图5所示,分别为自然通风(NV)、混合通风-风机朝下通风口送风(MF-D)、混合通风-风机朝上通风口送风(MF-U)3种不同通风方式模拟模型示意图。为简化计算,模拟过程中将风机简化为圆形平面,在边界条件中设置为 fan 界面。

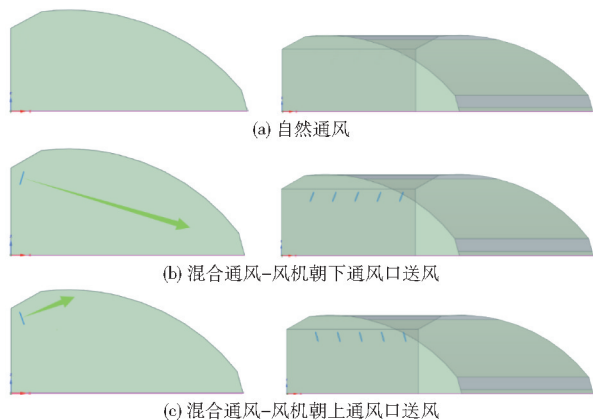


图5 不同通风方式模型

Fig. 5 Models under different ventilation conditions

模拟以典型晴日(2024年4月12日)午间(12:00)及夜间(00:00)工况为边界条件,重点关注樱桃日间温度及夜间湿度的环境变化特征,采用瞬态模拟,结果在 CFD-Post 中查看分析,为更显著表征温室内环境特点,体现机械送风对于环境场的影响,选取图6所示的4个平面进行分析(其中 P1: $y=10\text{ m}$, P2: $y=25\text{ m}$, P3: $y=40\text{ m}$, P4: $y=55\text{ m}$)。在结果中显示温室和樱桃模型的 Wireframe,便于分析樱桃区环境特点。

加入机械通风后,温室内风速较自然通风有明显提升,在速度云图、速度矢量云图中使用双标尺表征,左侧标尺作用于 P2、P3、P4,右侧标尺作用于 P1。

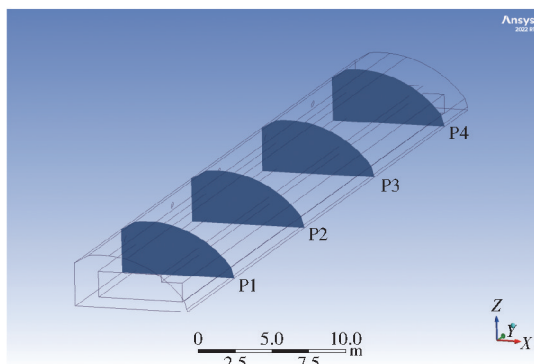


图6 后处理平面示意图

Fig. 6 Schematic of post-processing plan

日光温室日间不同通风方式下的模拟结果如图7所示。樱桃日光温室在白天中午时段,室内温度显著高于室外温度,且白天室外风速大,在通风口全开的情况下,温室内存在2种主导气流,分别是由太阳辐射加热引起的热浮力驱动气流,和外界风速引起的气流运动。自然通风中,温室内底部和后墙处温度明显降低,但受到太阳辐射与多孔介质阻力影响,樱桃区域降温并不明显。在加入机械送风后,当朝向温室下通风口送风时,风机产生的气流受到温室内部本就存在的气流耦合作用影响(即热浮力向上运动的气流,和从下通风口进入温室后贴近覆盖层向上通风口运动的两种气流影响),产生了明显的气流抬升效应。风机送出的风在三者交汇处向上通风口处运动。而当朝向温室上通风口送风时,其对于温室内自然气流的加速作用并不明显。

在日间加入机械通风的主要目的是降低温室内温度,使其维持在适宜樱桃生长的温度环境。对比3种通风方式下温室内环境分布状况,发现当风机朝向下通风口送风时,可以有效改善樱桃植物区的温度。并在机械通风时间加长的情况下,樱桃区域(尤其是上部分温度)有所下降,并有向均匀分布发展的趋势。相对应的,混合通风也有使樱桃区域相对湿度均匀分布的迹象。

但同时也发现,由于风机功率较小,当它主动送风时,对所在位置下的环境影响较大,距离风机远的地方,温湿度及风速也呈现出与自然通风相近的分布。

日光温室夜间不同通风方式下的模拟结果如图8所示。夜间温室内温度高于外界环境,在热压通风效应驱动下,形成由底部进风口至顶部排风口的气流循环,气流呈现“双路径运输”特征:一部分气流穿透植株多孔介质垂直上升,一部分气流沿地面形成贴附射流,在后墙的作用下转向上升。同时,受植株冠层多孔介质阻滞作用影响,气流场呈现出空间异质性:樱桃栽培区因叶面积指数导致的湍流

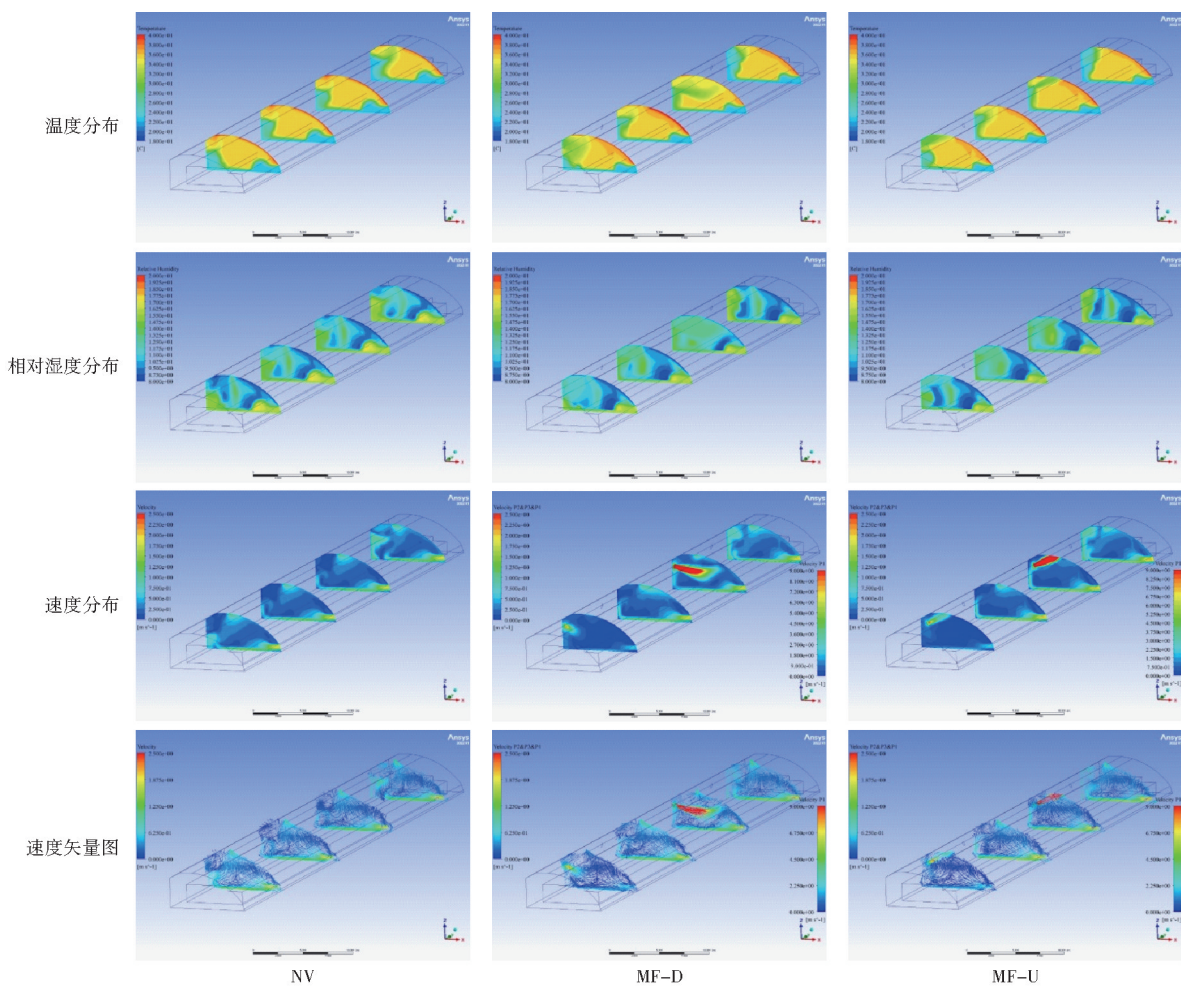


图7 日间不同通风方式模拟结果

Fig. 7 Simulation results under different ventilation modes at noon

耗散增强,形成相对风速低值区,致使该区域成为热湿环境调控的薄弱环节。温度场分布显示:近地面0.2 m高度存在明显温度分层现象,且南北向温度存在差异。温室内的降温主要集中在近地面与近后墙区域。湿度场分析表明:虽然室外干燥空气通过底部进风口的置换作用使整体环境相对湿度降低,但植株冠层内部因气流量不足,中间部位仍维持相对湿度87%~96%的高湿微环境。

当风机朝下通风口送风时,尽管与自然压驱动的自然气流方向相反(自然流动表现为“下进上出”),但在夜间低外界风速与温室内低自然流速的情况下,风机输出的高速气流形成明显的动量交换:一部分气流通过下通风口排出,一部分气流与自然对流碰撞后发生流场重构,迫使气团沿温室覆盖层与近地面形成贴壁流动,最终从上通风口排出。该模式下,樱桃植株区风速有所提升,可以满足作物生长所需的适宜气流环境。

当风机朝上通风口送风时,风机尾流效应加速了顶部区域的空气抽吸,形成“上送+上排”的强化对流通道,助力自然上升气流的运动。同时,一部分

射流冲击上通风口下方覆盖层时,形成了贴附流动,也可以抑制可能存在的薄膜结露现象。然而,该模式下植株区风速提升幅度低于下送风模式。对比3种通风形式发现:机械干预均可以降低室内相对湿度,其中下送风模式凭借气流对植株冠层的直接穿透作用,使樱桃区域相对湿度有所降低,温室内温度场分布相对均匀,且并不存在过度降温,影响樱桃生长的现象。综合流场稳定性、樱桃微环境适配性,风机朝下通风口送风时,在夜间温湿度调控中表现较好。

2.2 强制对流对樱桃日光温室热湿环境的影响

根据CFD模拟结果,将风机按照模拟中设定的位置安装,使其朝下通风口送风,并将风机接入温室内配备的自动控制系统中,设置为阈值控制:当温度大于25℃时开启风机,或当相对湿度大于50%时开启风机。将该机械通风应用在本文研究的温室樱桃结果期后期与着色期(2024年4月15日—5月30日),设置为试验组,选取距离该温室较近同样尺寸与栽培模式的一个日光温室(仅进行自然通风)作为对照组,继续对温室内温湿度环境进行监测。

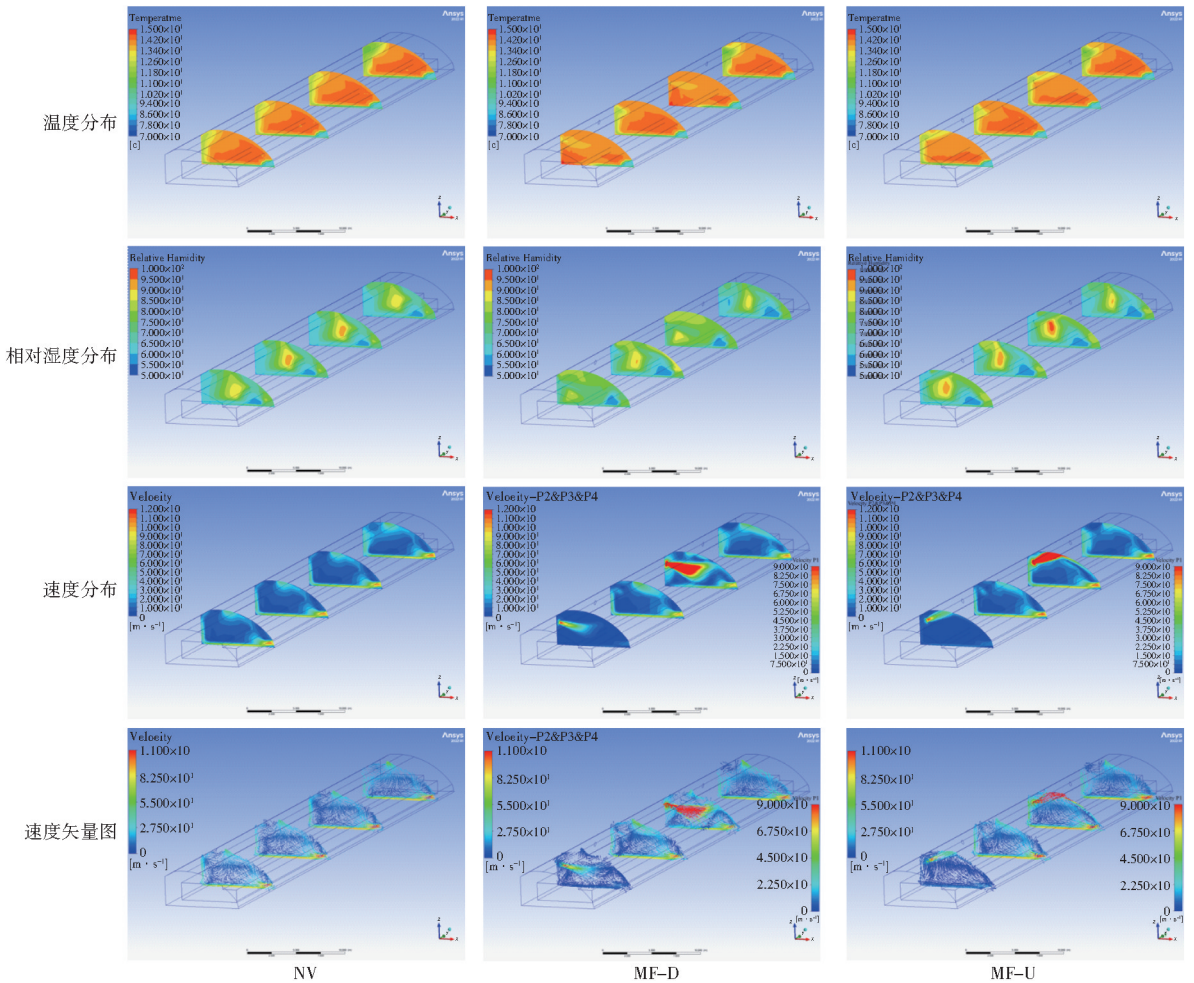


图8 夜间不同通风方式模拟结果

Fig. 8 Simulation results under different ventilation modes at night

图9分析了任意2 d时间内(2024年5月15日和19日),混合通风与自然通风对于温室内温湿度环境的影响。

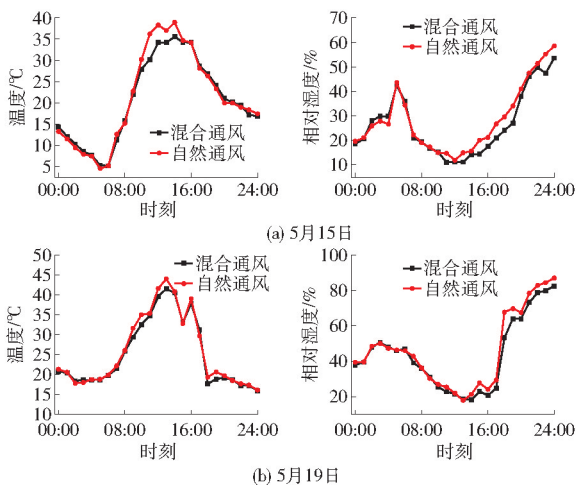


图9 不同通风方式下温室内温湿度变化曲线

Fig. 9 Temperature and relative humidity variation curves inside the greenhouse under different ventilation modes

5月15日与19日数据表现出相同趋势,混合通风比自然通风更有效地在温室内温度过高时降温,在相对湿度过高时降湿。5月15日10:00,温室

内气温高于25℃,风机开始运行,温室内温度较自然通风有所降低。自然通风下,温室内最高温度为38.2℃,而混合通风下的最高温度为34.3℃。从10:00打开风机到17:00后关闭,10:00—15:00时混合通风可以有效降低温室内温度,但在15:00后,混合通风效果不如之前显著,可能是因为室内室外温度趋同,风机通风方式对温度的调控达到阈值。5月19日温度有同样趋势,混合通风最高温度为41.3℃,自然通风最高温度为44.2℃。

夜间使用混合通风也起到了降低温室内相对湿度与相对湿度增幅的效果。从5月15日相对湿度数据变化来看,在22:00打开风机,虽然温度略有下降(最高相差1.2℃),但可以显著降低温室内相对湿度,最高降低9个百分点。5月19日18:00相对湿度过高时,开启风机,与15日有相同趋势,温室内温度略有降低(最高相差1.7℃),相对湿度显著下降(降低14.6个百分点),20:00之后相对湿度降低幅度减小,可能是因为外界环境相对湿度较高,风机通风方式对相对湿度的调控达到阈值。

2.3 强制对流对樱桃果品质影响

将仅进行自然通风的温室内樱桃设置为对照组,

将安装了风机进行混合通风控制的温室内樱桃设为试验组。从2个温室中随机摘取外观性状、尺寸一致的樱桃,3个品种(布鲁克斯、萨米脱、雷尼)各30颗。

由表2、3数据可知,机械通风的应用对3个樱

桃品种的品质指标产生了差异化影响。B、S、L分别是自然通风温室下的布鲁克斯、萨米脱和雷尼,BF、SF、LF分别为采用混合通风日光温室内的布鲁克斯、萨米脱和雷尼。

表2 不同通风方式对3个品种樱桃外在品质的影响

Tab. 2 Effect of different ventilation methods on external quality of three cherry varieties

处理	果形指数	单果质量/g	可食率/%	硬度/(N·cm ⁻²)	L*	a*	b*
B	(0.95 ± 0.02) ^a	(9.64 ± 0.41) ^{bc}	(96.11 ± 0.72) ^c	(4.62 ± 0.55) ^b	(31.31 ± 1.23) ^{bc}	(27.57 ± 0.94) ^{ab}	(10.03 ± 1.16) ^{bc}
BF	(0.75 ± 0.03) ^c	(11.55 ± 0.91) ^a	(97.19 ± 0.32) ^{ab}	(6.08 ± 0.70) ^a	(31.49 ± 0.57) ^b	(27.48 ± 1.91) ^{ab}	(9.56 ± 1.13) ^{bc}
S	(0.96 ± 0.03) ^a	(8.81 ± 0.68) ^c	(95.05 ± 0.74) ^d	(4.76 ± 0.57) ^b	(29.81 ± 1.54) ^{bc}	(23.96 ± 1.96) ^b	(7.75 ± 1.13) ^c
SF	(0.95 ± 0.05) ^a	(9.89 ± 0.95) ^{bc}	(97.08 ± 0.38) ^{ab}	(4.92 ± 0.61) ^b	(29.35 ± 1.00) ^c	(30.4 ± 1.84) ^a	(11.05 ± 0.8) ^b
L	(0.81 ± 0.02) ^b	(11.1 ± 0.90) ^{ab}	(96.54 ± 0.42) ^{bc}	(4.62 ± 0.23) ^b	(61.07 ± 1.32) ^a	(8.15 ± 2.87) ^c	(34.47 ± 3.31) ^a
LF	(0.81 ± 0.01) ^b	(11.52 ± 0.89) ^a	(97.62 ± 0.17) ^a	(5.63 ± 0.24) ^{ab}	(62.42 ± 0.42) ^a	(6.67 ± 3.11) ^c	(35.07 ± 1.13) ^a

注:表中同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

测试数据显示,在果形方面,混合通风处理对布鲁克斯品种影响最为显著,其果形指数由0.95显著降低至0.75($P < 0.05$),果实更趋扁圆形,而萨米脱和雷尼品种的果形指数无显著变化;在单果质量与可食率方面,混合通风处理均表现出积极作用:布鲁克斯品种的单果质量由9.64 g显著提升至11.55 g,增幅达19.8%,雷尼和萨米脱品种的单果质量亦有增加,但未达到显著性差异水平。值得注意的是,3个品种的可食率在处理后均有显著提高($P < 0.05$),其中雷尼品种的可食率最高,达到97.62%;在果实硬度方面,混合通风显著

提升了布鲁克斯和雷尼品种的硬度,布鲁克斯的硬度从4.62 N/cm²增加到6.08 N/cm²,增幅达31.6%;雷尼的硬度从4.62 N/cm²增加到5.63 N/cm²,萨米脱品种的硬度略有上升,但差异不显著。从果实色泽上来看,混合通风对不同色系品种的影响不同,对于暗红色的布鲁克斯和黄色的雷尼品种,处理前后的L*、a*、b*值均无显著差异。而对于萨米脱品种,a*值(红色度)由23.96显著增加至30.40,b*值(黄色度)由7.75显著增加至11.05,表明混合通风使萨米脱果实颜色更红、更亮,更加符合消费者对樱桃的期待。

表3 不同通风方式对3个品种樱桃内在品质的影响

Tab. 3 Effect of different ventilation methods on internal quality of three cherry varieties

处理	含水率/%	可溶性固形物含量/Brix ^o	可滴定酸含量/%	可溶性糖质量比/(mg·g ⁻¹)	还原糖质量比/(mg·g ⁻¹)	总酚质量比/(mg·g ⁻¹)	总黄酮质量比/(mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白质量比/(mg·g ⁻¹)	游离氨基酸质量比/(mg·g ⁻¹)	花青素质量比/(mg·g ⁻¹)
B	(77.62 ± 3.54) ^a	(19.20 ± 0.72) ^{ab}	(0.956 ± 0.004) ^b	(83.12 ± 0.84) ^b	(142.55 ± 1.17) ^b	(16.493 ± 0.075) ^d	(14.16 ± 0.06) ^c	60.91 ± 0.05 ^b	0.708 ± 0.012 ^e	8.18 ± 0.03 ^b
BF	(78.35 ± 1.92) ^a	(22.23 ± 2.55) ^a	(0.920 ± 0.005) ^c	(92.25 ± 0.09) ^a	(155.07 ± 1.20) ^a	(23.803 ± 0.352) ^a	(19.88 ± 0.02) ^a	(62.07 ± 0.13) ^a	(0.886 ± 0.006) ^c	(10.07 ± 0.04) ^a
S	(79.79 ± 0.97) ^a	(16.23 ± 1.52) ^b	(1.023 ± 0.007) ^a	(58.33 ± 0.60) ^f	(134.79 ± 0.47) ^d	(18.612 ± 0.033) ^c	(10.6 ± 0.05) ^d	(55.28 ± 0.02) ^d	(0.563 ± 0.010) ^f	(6.29 ± 0.03) ^d
SF	(79.13 ± 2.66) ^a	(20.13 ± 1.42) ^a	(0.890 ± 0.006) ^d	(61.46 ± 0.76) ^e	(137.66 ± 0.78) ^c	(23.338 ± 0.097) ^b	(15.15 ± 0.6) ^b	(58.63 ± 0.03) ^c	(0.929 ± 0.003) ^b	(7.13 ± 0.01) ^c
L	(76.48 ± 1.40) ^a	(21.30 ± 1.32) ^a	(0.870 ± 0.005) ^c	(74.08 ± 0.10) ^d	(138.20 ± 0.81) ^c	(12.921 ± 0.008) ^f	(5.27 ± 0.03) ^e	(52.89 ± 0.35) ^e	(0.794 ± 0.004) ^d	(3.23 ± 0.02) ^f
LF	(76.98 ± 2.08) ^a	(22.47 ± 2.03) ^a	(0.801 ± 0.005) ^f	(76.63 ± 0.04) ^c	(143.84 ± 1.21) ^b	(14.839 ± 0.011) ^e	(5.68 ± 0.02) ^e	(58.74 ± 0.04) ^c	(1.052 ± 0.005) ^a	(3.44 ± 0.02) ^e

由表3可知,混合通风处理对樱桃的风味品质和营养成分含量产生了显著影响。在糖酸组分方面,混合通风处理显著提升了果实的糖含量并降低了酸度。3个品种的可溶性固形物、可溶性糖和还原糖含量均显著增加($P < 0.05$)。其中,萨米脱品种的可溶性固形物含量增幅最为显著,从

16.23 Brix^o提升至20.13 Brix^o,增幅高达24.0%。与此同时,3个品种的可滴定酸(TA)含量均显著下降($P < 0.05$),雷尼品种的酸度最低。

在功能活性物质方面,混合通风处理显著促进了酚类、黄酮及花青素的积累。处理后,3个品种的总酚和总黄酮含量均得到显著提升,布鲁克斯品种的

提升尤为突出,其总酚含量从 16.493 mg/g 增至 23.803 mg/g,总黄酮含量从 14.16 mg/g 增至 19.88 mg/g,增幅分别达到 44.3% 和 40.4%。萨米脱品种的总酚和总黄酮含量也显著增加。雷尼品种的增幅相对较小,其总黄酮含量变化未达到显著水平;另外,混合通风显著提高了 3 个品种的花青素含量。红色品种布鲁克斯和萨米脱的花青素含量远高于黄色品种雷尼。处理后,布鲁克斯的花青素含量增幅最大(由 8.18 mg/g 增加到 10.07 mg/g)。在其他营养成分方面,混合通风处理对可溶性蛋白和游离氨基酸含量也表现出积极影响。3 个品种的可溶性蛋白和游离氨基酸含量在处理前后均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。各品种的果实含水率在处理前后并无显著差异。

3 结论

(1) 日光温室在樱桃果实发育期存在显著的环境胁迫,即自然通风条件下难以消除的“日间高温”与“夜间高湿”现象。CFD 模拟精准揭示了该环境下热压驱动的“双路径运输”气流特征以及植株冠

层形成的“气流低速区”,阐明了局部高湿微环境形成的物理机制。

(2) 基于后墙安装风机的强制对流策略可有效优化温室内气流组织,重构热湿环境场。其中,“风机朝下通风口送风”的混合通风模式综合效果最佳。该模式通过强化冠层区域的动量与热质交换,日间可将冠层峰值温度降低 3.9℃,夜间可将植株区相对湿度最高降低 14.6 个百分点,有效解决了自然通风的调控瓶颈。

(3) 优化的混合通风策略显著提升了樱桃果实的商品性和内在品质,且存在显著的品种差异性。该策略对布鲁克斯品种的增重(质量提高 19.8%)和硬化(硬度提高 31.6%)效果最显著;对萨米脱品种的促色(a^* 值提高 26.9%)和功能性物质积累(总酚提高 36.1%)作用最强;并全面改善了 3 个品种的甜酸风味。研究证实,通过强制对流精准调控微环境是提升设施樱桃品质的有效工程途径。本研究成果为日光温室等半封闭设施的低成本、高效环境改造提供了理论依据和可行的技术方案,对推动设施樱桃产业的精准化、标准化生产具有重要的实践指导意义。

参 考 文 献

- [1] 邵柯森. 陕西铜川地区不同甜樱桃品种发育期与果实品质对比及需冷量分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023. SHAO Kesen. Comparison of developmental period and fruit quality and analysis of chilling requirement of different sweet cherry cultivars in Tongchuan area of Shaanxi Province[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)
- [2] 王归鹏,王文元,袁泽南,等. 全有机营养栽培对樱桃番茄养分吸收、产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(10):128-137. WANG Guipeng, WANG Wenyuan, YUAN Zenan, et al. Effects of organic nutrition cultivation on nutrient absorption, yield and quality of cherry tomato[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2022(10):128-137. (in Chinese)
- [3] 师静雅. 铜川新区大樱桃产业发展现状、问题与对策[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020. SHI Jingya. Development status, problems and countermeasures of big cherry industry in Tongchuan New Area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [4] 吕守岩. 樱桃日光温室室内热湿环境实验与数值模拟研究[D]. 天津:河北工业大学,2018. LÜ Shouyan. Experimental and numerical simulation study on the greenhouse thermal and humidity environment for cherry[D]. Tianjing: Hebei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] SØNSTEBY A, HEIDE O M. Temperature effects on growth and floral initiation in sweet cherry (*Prunus avium* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 257: 108762.
- [6] KNOCHE M, PESCHEL S. Water on the surface aggravates microscopic cracking of the sweet cherry fruit cuticle[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2006, 131(2):192-200.
- [7] RANJAN R, SINHA R, KHOT L R, et al. Thermal-RGB imagery and in-field weather sensing derived sweet cherry wetness prediction model[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 294: 110782.
- [8] GONZÁLEZ-NÚÑEZ M, SANDÍN-ESPAÑA P, MATEOS-MIRANDA M, et al. Development of a disease and pest management program to reduce the use of pesticides in sweet-cherry orchards[J]. Agronomy, 2022, 12(9):1986.
- [9] MAO Q, LI H, JI C, et al. Experimental study of ambient temperature and humidity distribution in large multi-span greenhouse based on different crop heights and ventilation conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 248:123176.
- [10] FU Q, LI X, ZHANG G, et al. A temperature and vent opening couple model in solar greenhouses for vegetable cultivation based on dynamic solar heat load using computational fluid dynamics simulations[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(2):e14240.
- [11] BONUSO S, PANICO S, BAGLIVO C, et al. Dynamic analysis of the natural and mechanical ventilation of a solar greenhouse by coupling controlled mechanical ventilation (CMV) with an earth-to-air heat exchanger (EAHX) [J]. Energies, 2020, 13(14): 3676.
- [12] SI C, QI F, DING X, et al. CFD analysis of solar greenhouse thermal and humidity environment considering soil-crop-back

- wall interactions[J]. *Energies*, 2023, 16(5):2305.
- [13] CHOI Y L, DANIEL F K, LEE Y S, et al. CFD simulation of dynamic temperature variations induced by tunnel ventilation in a broiler house[J]. *Animals*, 2024, 14(20):3019.
- [14] WANG L, LI Y, SUN Z, et al. Utilization of surplus air thermal energy by a water cycle system in a Chinese-Type solar greenhouse[J]. *Agronomy*, 2024, 14(2):270.
- [15] MISTRIOTIS A, DEJONG T, WAGEMANS M J M, et al. Computational fluid dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1997, 45(1):81–96.
- [16] KIM K, GIACOMELLI G A, YOON J Y, et al. CFD modeling to improve the design of a fog system for cooling greenhouses [J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2007, 41(4):283–290.
- [17] 万敏, 杨魏, 刘竹青, 等. 不同通风方式日光温室微环境模拟与作物蒸腾研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(1):328–338,349.
WAN Min, YANG Wei, LIU Zhuqing, et al. Microenvironment simulation and crop transpiration analysis of solar greenhouse with different ventilation modes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(1):328–338, 349. (in Chinese)
- [18] 赵娜, 李明, 赵淑梅, 等. 管道送风系统对塑料大棚气流场和温度场影响的 CFD 模拟[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(8):272–281.
ZHAO Na, LI Ming, ZHAO Shumei, et al. CFD simulation on the influence of pipe air supply system on airflow field and temperature field in plastic tunnel[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8):272–281. (in Chinese)
- [19] 杨晓平, 李雪寒, 聂鹏程. 设施生猪环境调控现状研究和未来展望[J]. *中国农业信息*, 2024, 36(2):83–96.
YANG Xiaoping, LI Xuehan, NIE Pengcheng. Research on the current situation and future prospect of environmental regulation of pigs in facilities[J]. *China Agricultural Informatics*, 2024, 36(2):83–96. (in Chinese)
- [20] 张大可. 基于人工神经网络的地理管换热器传热模型研究[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
ZHANG Dake. Heat transfer model of ground-coupled heat exchanger based on artificial neural network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
- [21] 陈禹霏, 聂鹏程. 基于 CFD 的温室环境控制方法研究现状分析与展望[J]. *中国农业信息*, 2024, 36(2):60–72.
CHEN Yufei, NIE Pengcheng. Analysis and prospect of research status on greenhouse environmental control methods based on CFD[J]. *China Agricultural Informatics*, 2024, 36(2):60–72. (in Chinese)
- [22] ZHANG L, FERGUSON L, WHITING M D. Temperature effects on pistil viability and fruit set in sweet cherry[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 241:8–17.
- [23] CORTÉS-MONTAÑA D, BERNALTE-GARCÍA M J, VELARDO-MICHARET B, et al. Impact of pre-storage melatonin application on the standard, sensory, and bioactive quality of early sweet cherry[J]. *Foods*, 2023, 12(8):1723.
- [24] XIN Y, LIU Z, ZHANG Y, et al. Effect of temperature fluctuation on colour change and softening of postharvest sweet cherry [J]. *RSC Advances*, 2021, 11(37):22969–22982.
- [25] 刘亚辰, 王苗, 陶泽兴, 等. 榆林市沙溪化演变及其驱动力分析[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(2):9–16.
LIU Yachen, WANG Miao, TAO Zexing, et al. Temporal variations of desertification and its driving forces in Yulin City[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(2):9–16. (in Chinese)
- [26] 候璇, 尹凯花, 聂国伟, 等. 山西地区 39 份甜樱桃种质果实品质分析与综合评价[J]. *果树学报*, 2025, 42(4):752–764.
HOU Xuan, YIN Kaihua, NIE Guowei, et al. Analysis and comprehensive evaluation of fruit quality of 39 sweet cherry accessions in Shanxi region[J]. *Journal of Fruit Science*, 2025, 42(4):752–764. (in Chinese)
- [27] GE L, JIA F, YU J, et al. Hybrid pasteurization strategy for energy conservation and quality preservation in cloudy apple juice processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2024, 382:112217.
- [28] 张新宪, 焦旋, 冯志宏, 等. 压差预冷结合高分子隔热保温膜处理对甜樱桃货架品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(18):109–117.
ZHANG Xinxian, JIAO Xuan, FENG Zhihong, et al. Effect of forced-air precooling combined with high-molecular thermal insulation film treatment on quality of cherry during shelf-life period[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(18):109–117. (in Chinese)
- [29] DONG F, WANG X. Guar gum and ginseng extract coatings maintain the quality of sweet cherry[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 89:117–122.
- [30] MOHAMMADREZA A, ZAHRA A, ALIREZA F, et al. Use of an edible coating containing galbanum gum and cumin essential oil for quality preservation in sweet cherries[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(8):5123–5131.
- [31] BIN Y, LIU C, XIE J, et al. Quality changes of two sweet cherry cultivars with different susceptibility to cracking during the storage[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2024, 65(3):477–489.
- [32] CAGNO D R, SURICO F R, MINERVINI G, et al. Exploitation of sweet cherry (*Prunus avium* L.) puree added of stem infusion through fermentation by selected autochthonous lactic acid bacteria[J]. *Food Microbiology*, 2010, 28(5):900–909.
- [33] GAI S, DU B, XIAO Y, et al. bZIP transcription factor PavbZIP6 regulates anthocyanin accumulation by increasing abscisic acid in sweet cherry[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(18):10207.