

番茄果实与空气间对流换热研究

陈景玲 朱秀红 王 谦 袁 远 苗 蕾 赵 勇 吴明作

(河南农业大学 河南 郑州 450002)

摘要: 为了摸清番茄果实与空气间传热的对流换热系数,在人工气候室控温、控光环境下,测定了番茄果实不同风速时的表面温度与空气温度的温差,根据热平衡原理计算番茄果实表面的对流换热系数。用 Porter 和 Mitchell 模式计算对流换热系数,并计算了模式的回归系数。用称重法测定 1 d 中番茄果实水分损失量,分析了番茄水分损失产生的潜热交换量。结果表明,采样后 24 h 内番茄果实水分蒸发产生的潜热交换量平均为 2.3 W/m^2 ;番茄果实的对流换热系数随风速增加而线性增加。Porter 的模式回归系数修正后,可用 Porter 公式计算对流换热系数。这为以后的对流传热分析提供了较为确切的热物性参数。

关键词: 番茄果实;对流传热;气候空间;对流换热系数

中图分类号: S265.5⁺1; S16 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2012)06-0229-04

Study on the Heat Convection between Tomato Fruitage and Air

CHEN Jing-ling, ZHU Xiu-hong, WANG Qian, YUAN Yuan, MIAO Lei, ZHAO Yong, WU Ming-zuo
(Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To obtain the convection between tomato fruitage and air, the differences in temperature of tomato fruitage surface and air on controlled environment temperature, light intensity in different wind speeds were measured. The convection coefficient between tomato fruitage and air was calculated according to heat balance law, and k_c , k_s parameters of the models were calculated using Porter and Mitchell's models. The influence of hidden heat coming from tomato water loss was analyzed through 24 h time interval weight loss of the tomato fruitage. The result showed the hidden heat of the tomato fruitage was 2.3 W/m^2 . The measurement result of the convection coefficient increased according to the increase of wind speed, which confirms the view point of former researchers about convection coefficient. It gives a definite parameter for convection heat analyses. Not only did this paper provide a measurement method of the convection coefficient, it settled a base for tomato fruitage climate space study also.

Key words: Tomato; Heat convection; Climate space; Convection coefficient

植物生存在自然环境中,其中的主要生态因子温度和辐射构成了气候空间。祖元刚^[1]描述了气候空间的概念和气候空间研究的意义,气候空间是指适合植物生存的温度和辐射因子范围,在此空间以内适于植物生存,在此空间之外,植物将受害或死亡。王谦等^[2]对日光温室番茄气候空间的辐射特征进行了研究。气候空间决定了植物生存的温度辐射复合指标,是植物胁迫研究的基础^[3],其研究具有重要意义^[4-8]。气候空间研究需要对植物与环境间的辐射、对流等方面的传热进行分析,它属于生物传热学的范畴。对流换热系数是物体与其环境空气

之间温度相差 1°C 时,单位时间单位面积上因为空气对流而传递的热量。但是,目前少有植物与空气环境的对流换热系数研究,在研究植物与环境的传热问题时,参考的是生物医学的研究结果,引用的是生物医学中皮肤组织的对流换热系数。在日光温室植物与空气间传热研究中,包含有对流换热^[9]。另外,果蔬贮藏保鲜产业也关注果蔬贮藏时的对流换热问题^[10],它们都需要使用对流换热系数进行传热量的计算。但是,对流换热系数不易确定,有人采用反求方法确定^[11],有人采用人体与空气对流的经验公式计算^[12-14]。无论是引用生物医学的对流换

收稿日期: 2012-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31071321)

作者简介: 陈景玲(1964-),女,河南洛阳人,副教授,主要从事植物与环境传热研究。

通讯作者: 王 谦(1963-),男,吉林辉南人,副教授,博士,主要从事植物与环境传热研究。

热系数,还是反求法、经验公式法,均影响传热计算结果。所以在对流传热研究中,应当通过试验确定对流换热系数。现有文献仅有对流换热系数的一般变化规律^[15],即空气自然对流的表面传热系数为 $5 \sim 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,而受迫对流的流速较自然对流高,因而它的表面对流换热系数也更高,可达 $10 \sim 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。说明对流换热系数是一个随风速变化而变化的量^[15]。关于番茄的气候空间的研究中,番茄的对流换热系数是必需的热物性参数。鉴于此,拟通过人工气候室内不同风速下番茄果实传热,研究番茄表面对流传热,进而确定不同风速下番茄果实与空气间对流换热系数的变化规律。试图为植物与环境传热相关的研究提供较为可靠的对流换热系数,也为今后的气候空间研究提供基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料选择鲜番茄果实,品种为中蔬四号,果实为球形。测试样品周围用相近大小的番茄果实放置一圈,作为测试环境的保护样品。

1.2 仪器

试验在河南农业大学省部共建实验室的人工气候室内进行。该人工气候室由浙江大学电气设备厂生产,杭州求是人工环境有限公司在河南农业大学建设。该人工气候室可模拟自然界气象条件,控制室内温度、湿度、光照、 CO_2 。它采用进口大功率农艺用灯模拟阳光,其光强达 $5\,000 \sim 15\,000 \text{ lx}$,控温范围为 $10 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

人工气候室内可设定温度,但为准确测定试验材料附近的空气温度,选择美国 Li-cor 公司生产的 1400-101/102 空气温度和湿度传感器,并通过 1400-301 扩展槽作为接口连接 Li-1400 数据采集器进行空气温度和湿度实测。

番茄表面温度采用热电偶测温仪,以保证对番茄表面仅有较小损伤条件下,能准确测定番茄表面温度。使用北京雅欣理仪科技有限公司生产的 Yaxin0232 测温仪,该仪器测温精度为 0.1 ,可设定自动测温时间间隔,自动记录。另外,根据热电偶测温仪测温的特点,它在参考端与测量端温度接近时测量更准确,所以不用冰点槽,而选择将参考端和 Li-cor 测温仪的温度传感器放置于空气中的相同位置,这样热电偶测温仪测得番茄与空气的温差,将该温差和 Li-cor 测温仪测得的温度相加,即得到番茄表面的实际温度。

辐射平衡仪为锦州阳光科技公司生产的 PC-2

型太阳辐射仪,其辐射感应波段为 $0.25 \sim 30 \mu\text{m}$ 。该波段既包括太阳辐射的光谱范围,也包括生物体的红外辐射光谱范围。

风速的测定使用北京检测仪器厂生产的 QDF-2A 型热球微风仪,测量精度 0.01 m/s 。

辐射强度测定用 Li-cor 的 LI-190SA 量子传感器,连接前述的 Li-1400 数据采集器 I1 接口。

仪器布置如图 1 所示。

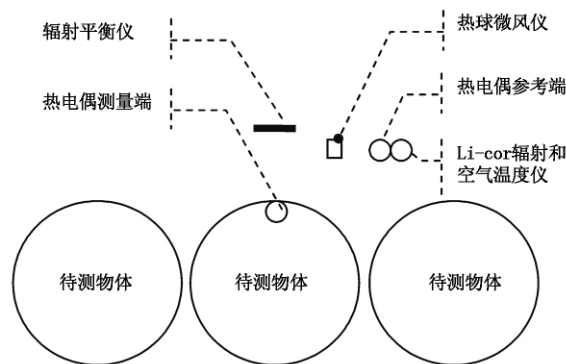


图 1 番茄果实与环境传热测定仪器布置

Fig. 1 The instrument arrangement of heat transfer between tomato fruit and its environment

1.3 番茄体积、直径、质量的测定

番茄体积计算采用排水法。将待测番茄果实整体放入大烧杯中,加水至烧杯满刻度,使水面浸没整个果实。然后将番茄取出,用量杯量取剩余水量。用满刻度水量减去剩余水量,即为番茄体积。番茄直径用游标卡尺量取。番茄质量用精度为 0.1 g 的电子天平称量。

1.4 对流换热系数模型

1.4.1 热平衡模型 动物行为学者 Porter 分析空气中的物体与环境间传热时,将生物体近似看成圆柱形,其生物体的热量收支分析参见文献[16]。对于植物来讲,进入植物体的能量必须等于传出植物体的能量,则必须考虑番茄果实水分损失产生的潜热交换量(LE),于是有

$$Q_a = \varepsilon \sigma (T_s + 273)^4 + H_c (T_s - T_a) + LE \quad (1)$$

其中 Q_a 为生物体长波和短波辐射吸收 (W/m^2) ε 为出射率 (0.96) σ 为斯忒芬-波尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$) T_s 为生物体表温度 ($^\circ\text{C}$) T_a 为气温 ($^\circ\text{C}$) h_c 为对流换热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) LE 为水分损失产生的潜热交换量 (W/m^2)。

Porter 和 Gates 曾建议采用风速和物体直径构成的模式计算对流换热系数,模式如下:

$$h_c = k_c V^{0.33} D^{-0.67} \quad (2)$$

其中 k_c 为 Porter 模式的回归系数,对于北美红雀和蜥蜴这样大小的动物,在自然风速下为常数

0.927 4; V 为风速(m/s); D 为生物体的直径(m)。

(1) 式可写成: $R - LE = h_c(T_s - T_a)$ (3)

其中 R 为辐射平衡, 由辐射平衡仪测得 $R = Q_a - \varepsilon\sigma(T_s + 273)^4$ 。

1.4.2 Michell 模型 Michell^[17] 曾给出与 Porter 相类似的形式 $h_c = k_s V^{0.60} M_b^{-0.133}$ (4)

其中 k_s 为回归系数(17.24) , M_b 为生物体质量(kg) h_c 和 V 意义同上。

热平衡公式则可写成: $Q_a = \varepsilon\sigma(T_b + 273)^4 + k_s V^{0.60} M_b^{-0.133}(T_b - T_a) + LE$ (5)

类似地, 有 $R - LE = k_s V^{0.60} M_b^{-0.133}(T_b - T_a)$ (6)

2 结果与分析

2.1 对流换热分析

把人工气候室内温度设定为 20℃。测得人工气候室内到达番茄果实表面的辐射强度为 139.2 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。实测了番茄果实在人工气候室内 24 h 的水分蒸发损失量为 4.8 g。经计算潜热交换量(LE) 为 2.3 W/m^2 。将人工气候室内不同风速下测得的辐射平衡(R)、果实表面温度与空气温度之差($T_s - T_a$)、潜热交换量(LE) 代入(3) 式计算对流换热系数(h_c) , 并分析其与风速的关系, 结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 对流换热系数随风速明显呈线性变化, 随风速的增加而增加。其线性回归方程为 $h_c = 39.86V + 31.348$, 二者相关系数为 0.976 6, 显著相关。在人工气候室不采取任何通风设施的情况下, 微风仪测得的风速很低, 约为 0.17 ~ 0.24 m/s, 其对应对流换热系数为 26.0 ~ 28.9。这与文献[15]中自然对流的换热系数比较接近。随着风速增加, 对流换热系数增加, 印证了该文献所述的对流换热系数的规律。总体来看, 计算得到的 h_c 略大于该文献中给出的数值。

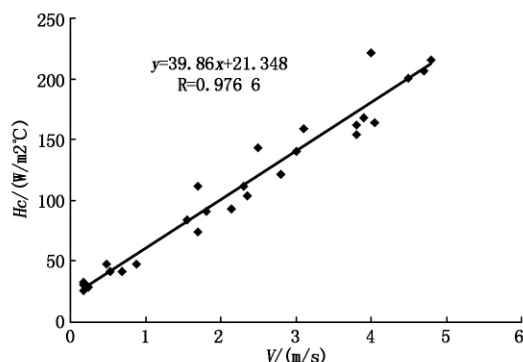


图2 番茄果实对流换热系数随风速的变化

Fig.2 The convection coefficients of tomato fruits change with wind speeds

2.2 Porter 公式结果分析

将 2.1 中按公式(3) 计算出的 h_c 、风速(V)、番茄果实的直径(D) 代入公式(2) 计算出回归系数(k_c) , 该回归系数与风速的关系示于图 3 中。从图 3 可以看出 k_c 随风速增加有明显的线性规律, 二者相关系数为 0.896, 它们的线性方程表达为:

$$k_c = 2.5V + 7.1$$

用(7) 式修正 Porter 公式中的 K_c 后, 则可将(2) 式用于番茄对流换热系数计算。

王谦等^[18] 指出, 当风速一定时, 对流热交换量主要受物体与环境温差的影响, 生物体与环境温差在 1 ~ 15℃ 对流换热系数都可取定值, 这说明确了对流换热系数测定结果的稳定性。一般自然环境下生物体与环境温差均不会超过 15℃, 所以, 本试验测得的对流换热系数是可靠的。

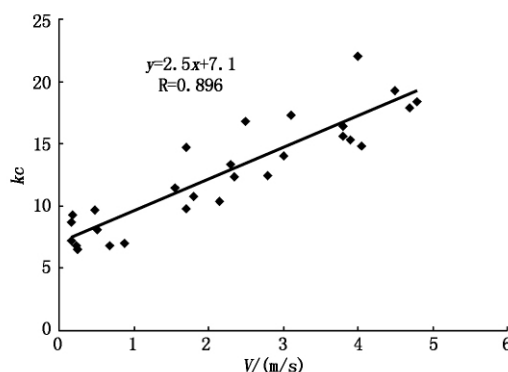


图3 Porter 模式回归系数与风速的关系

Fig.3 The relation of regression coefficient of Porter's model and wind speed

2.3 Michell 公式结果分析

将 2.1 中按公式(3) 计算出的 h_c 、风速(V)、番茄果实的质量(M_b) 代入(4) 式计算 k_s 。结果表明, k_s 与风速变化不呈线性关系, 说明公式(4) 不适用于模拟计算番茄果实的对流换热系数。

3 结论和讨论

通过番茄果实表面热平衡分析得到, 对流换热系数随风速增加而增加, 呈明显的线性变化规律。二者相关系数为 0.976 6, 显著相关。

Porter 模式中的系数 k_c 随风速有明显的线性变化规律, 二者相关系数为 0.896。表明对 Porter 公式中的 k_c 修正后, 公式(2) 可以用于计算番茄果实在不同风速下的对流换热系数。

为了研究番茄果实的传热特征, 避免番茄植株放入人工气候室内因其不规则形状给研究带来的不确定因素, 本研究采用离体番茄果实进行试验, 这与活体番茄果实的传热会有一定的差异。活体番茄果

实表面的传热状况会受到植株其他部分的影响。如果进行活体番茄果实试验研究,就必须区分番茄果实的辐射和植株茎叶的辐射。而本试验中采用的辐射平衡仪则无法区分果实的辐射和植株茎叶的辐射,这要求有感应区域可限制在番茄果实表面范围内的辐射平衡仪器来测定番茄果实周围的辐射平衡。在同时测定番茄果实周围的风速、气温和果实温度的情况下,则可以实现活体测定对流换热系数。这方面有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 祖元刚. 能量生态学引论[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1990: 127 - 132.
- [2] 王 谦, 沈连峰, 陈景玲, 等. 日光温室番茄气候空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 183 - 186.
- [3] 陶大立, 何兴元. 国内植物环境胁迫研究应注意的几个基本问题[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 102 - 107.
- [4] 朱光明. 生物组织传热及其若干应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [5] 洪 军. 生物质热裂解制油机理试验研究及流化床闪速热裂解装置设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [6] 胡银平. 离体生物组织冻结过程温度场和应力场的数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [7] 杨俊红. 植物性含湿多孔介质在干燥过程中优化传热传质机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [8] 丁海峰. 皮肤生物组织光热响应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [9] 汪小昆, 丁为民, 罗卫红, 等. 南方现代化温室能耗预测模型的建立与分析[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(1): 116 - 120.
- [10] 高海生, 梁建兰, 柴菊华. 果蔬贮藏保鲜产业现状研究进展与科技支持[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(9): 118 - 123.
- [11] 张延蕾. 对流换热系数的反求方法[D]. 大连: 大连交通大学, 2005.
- [12] 孟力力, 杨其长, Gerard P A Bot, 等. 日光温室热环境模拟模型的构建[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 164 - 170.
- [13] Roy J C, Boulard T, Kittas C *et al.* Convective and ventilation transfers in greenhouse, Part I: The greenhouse considered as a perfectly stirred tank[J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(1): 1 - 20.
- [14] 高旭东, 靳 松, 渠亚东. 屋顶绿化对室内人体热舒适的影响研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(5): 44 - 48.
- [15] 王厚华. 传热学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 94 - 95.
- [16] Porter W P, Gates D M. Thermodynamic equilibriums of animals with environment[J]. Ecological Monographs, 1969, 39(3): 245 - 270.
- [17] Mitchell J W. Heat transfer from spheres and other animal forms[J]. Biophysical Journal, 1976, 16(6): 561 - 569.
- [18] 王 谦, 李胜利, 孙治强, 等. 日光温室番茄植株与环境传热研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 220 - 223.