

恒温下相对湿度对果蔬热风干燥特性和品质的影响及调控

巨浩羽¹, 张卫鹏², 于贤龙³, 王庆惠⁴, 高振江⁵, 肖红伟^{5*}

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 石家庄 050061; 2. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 3. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 4. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐 830091; 5. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 相对湿度作为干燥介质的重要参数, 对干燥热质传递过程和干燥品质具有显著影响。但由于相对湿度对干燥过程的影响机理及优化调控机制尚不明确, 导致相对湿度的调控方式多依靠经验, 造成干燥效率低、品质差、能耗高等问题。对于传质过程, 降低相对湿度能够增大对流传质系数, 加快物料表面水分蒸发; 而对于传热过程, 升高相对湿度能够增大对流传热系数, 加快物料升温速率。相对湿度较高时, 物料升温速率快, 内部水分迁移量增大, 但表面水分蒸发量较小; 而当相对湿度较低时, 物料升温速率较慢, 内部水分迁移量较小, 但表面水分蒸发量较大。相对传热和传质过程的影响此消彼长, 互相耦合。高相对湿度主要体现为对传热过程的影响, 低相对湿度主要体现为对传质过程的影响。高相对湿度能够抑制物料表面的结壳, 并能够提高复水性, 降低收缩率。阶段降湿及多阶段降湿干燥方式下物料表面形成和保持了蜂窝状多孔结构, 能够提高干燥效率和品质。基于监测物料温度的相对湿度调控方式被验证为较优的相对湿度控制方式。阶段降湿干燥方式适用性的实质为: 干燥过程中所体现出的对流传热热阻和内部导热热阻的相对大小, 及对流传质阻力和内部传质阻力的相对大小, 不同干燥条件和物料种类、厚度会影响以上传热传质阻力的大小, 从而呈现出不同适应性的结果。当阶段降湿干燥过程中传热毕渥数 >1 且传质毕渥数 >0.1 时, 说明阶段降湿干燥过程适用于此物料的干燥。该文综合论述了相对湿度对果蔬热风干燥过程中热质传递及干燥品质的影响, 优化调控策略及适用性范围4个方面内容, 明确了果蔬热风干燥过程中相对湿度的影响机理, 为相对湿度的优化调控提供理论依据和技术支持。

关键词: 干燥; 相对湿度; 传热过程; 传质过程; 调控策略; 适用性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307256

中图分类号: TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-02-0029-12

巨浩羽, 张卫鹏, 于贤龙, 等. 恒温下相对湿度对果蔬热风干燥特性和品质的影响及调控[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2):

29-40. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307256 <http://www.tcsae.org>

JU Haoyu, ZHANG Weipeng, YU Xianlong, et al. Influence of relative humidity on the drying characteristics and quality of fruits and vegetables during constant temperature hot air drying as well as controlling strategy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 29-40. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307256 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是果蔬生产大国, 果蔬产量位居世界首位。2022年, 中国蔬菜和水果产量分别为7.9亿t和3亿t^[1]。新鲜果蔬含水率高、呼吸代谢强、易腐烂变质、不耐贮藏。2021年, 中国果蔬采后损失率约为20%, 产量损失超过2亿t, 产值损失超过4000亿元。干燥通过降低果蔬水分含量, 可有效防止果蔬霉烂变质, 是延长货架期、丰富产品种类、增加附加值的重要加工方式, 对减损增效、保障国家食品安全具有重要意义^[2-4]。

热风干燥是目前果蔬干制产业最常用的干燥方式之一。干燥温度和风速对干燥过程的影响结论已逐渐明确:

提高干燥温度和风速有助于提高干燥效率, 反之降低干燥效率^[5-8]。干燥是湿物料与外部介质, 通过边界进行能量和质量传递与转换的开口系统, 干燥速率的变化完全取决于物系中水蒸气分压力的状态, 在外部水蒸气分压力不变条件下, 系统内部的水蒸气分压力逐渐降低最后趋于介质的水蒸气分压^[9]。当干燥温度和总压一定时, 通常以相对湿度(relative humidity, RH)来反映介质湿度、湿含量或水蒸气分压的大小。故RH对干燥过程同样具有显著影响。但由于RH对干燥过程的影响机理及优化调控机制尚不明确, 导致RH的调控方式多依靠经验, 造成干燥效率低、品质差、能耗高的问题。因此, 明确RH对果蔬热风干燥的影响机理及优化调控机制, 对促进果蔬干燥减损增效、节能减排具有重要意义。

RH对热质传递过程及干燥品质具有显著的影响。恒定干燥温度条件下, 针对传热过程, 升高RH有助于强化传热过程, 物料升温速率越快; 针对传质过程, 降低RH有助于强化传质过程; RH对传热和传质的影响此消彼长, 相互耦合^[8,10]。RH对于干燥品质的影响主要体现在物料表面结壳和收缩方面, 大量研究表明阶段降湿干燥方式能够缓解物料表面结壳, 减小收缩率^[11-12]。深

收稿日期: 2023-07-27 修订日期: 2023-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(32202233; 32102141; 32201691; 32260616); 河北省自然科学基金项目(C2020207004); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2023047)

作者简介: 巨浩羽, 博士, 副教授, 研究方向为农产品干燥技术和装备。

Email: ju56238@163.com

*通信作者: 肖红伟, 博士, 博士生导师, 教授, 研究方向为农产品干燥技术与装备。Email: xhwcaugxy@163.com

入解析 RH 对于热质传递过程和干燥品质的影响机理, 能够为优化调控 RH 以同步强化热质传递过程、提高干燥效率和品质提供理论依据。此外, 农产品物料种类多种多样, RH 优化调控干燥方式对物料的适用范围同样需要进一步定量描述。

因此, 本文综合论述恒定干燥温度条件下, RH 对果蔬热风干燥过程中热质传递的影响机理、对干燥品质的影响规律、RH 的优化调控机制及适用范围 4 个方面内容, 依次说明为什么调控 RH、如何调控 RH 及对谁调控 RH 的问题, 以期明确果蔬热风干燥过程中 RH 的影响机理及调控方式提供理论依据和技术支持。

1 恒定干燥温度条件下 RH 对热质传递过程的影响

1.1 RH 对传质过程的影响

干燥过程中, 物料的传质包括内部水分迁移和表面水分蒸发 2 个过程 (图 1) [13-14]。干燥介质和物料表面的水蒸气分压差为表面水分蒸发的主要推动力。根据费克第二定律及其边界条件, 在 RH 为 0~100% 范围内, RH 越低, 物料和干燥介质的水蒸气分压差越大, 表面水分蒸发速率越快 [15-18]。RH 的改变无法直接影响到内部水分迁移速率, 而以影响表面水分蒸发速率的前提下影响内部水分迁移速率。降低 RH 后, 表面水分大量蒸发从而增大了物料表面至内部的水分浓度梯度, 内部水分在此梯度的驱动下向表面扩散, 且浓度梯度越大, 内部水分迁移越快 [10]。另一方面, RH 越大, 表面水分蒸发速率降低; 但物料升温速率越快, 物料内部具有较高温度后, 同样可使得具有较高的内部水分迁移速率。但因表面水蒸气分压较小, 而使得整体干燥速率较低。故 RH 对于传质的影响可归结为: 降低 RH 有助于强化传质过程。

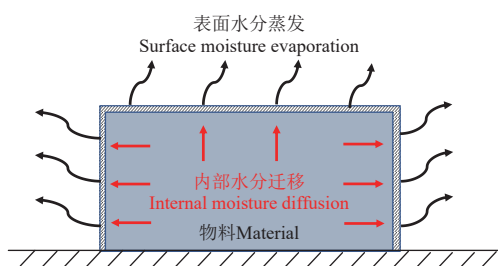


图 1 物料干燥传质过程示意图 [13]

Fig.1 Mass transfer process during material drying

对流传质系数 (mass transfer coefficient, h_m) 能够定量反映干燥过程中传质过程发生的快慢程度 [19-20]。笔者前期研究了胡萝卜切片厚度 10 mm, 干燥温度为 60 °C, 风速 3.0 m/s, 恒定 RH (20%、30%、40% 和 50%) 干燥条件下的 h_m , 结果如图 2 所示 [10]。由图 2 可知, h_m 随干燥时间呈现先上升后下降的变化趋势; RH 为 20% 时, h_m 为 $(1.01 \sim 2.54) \times 10^{-6} \text{ m/s}$; RH 为 50% 时, h_m 为 $(0.26 \sim 1.12) \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。降低 RH, 增大了干燥传质推动力, 体现为使 h_m 显著增大 ($P < 0.05$)。

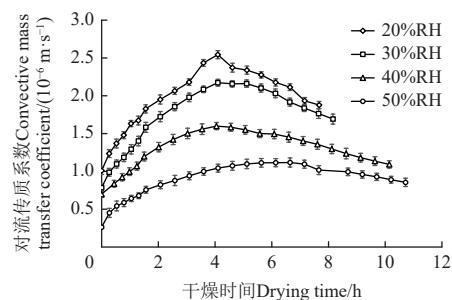


图 2 恒定相对湿度干燥条件下对流传质系数 [10]

Fig.2 Convective mass transfer coefficient under constant relative humidity

1.2 RH 对传热过程的影响

干燥过程中, 传热过程同样包含两个步骤 (图 3): 热量首先以对流传热形式传递至物料表面; 物料表面升温后再以热传导的方式传递至物料内部 [21-22]。由湿空气的焓湿图可知, 在 RH 为 0~100% 范围内, RH 越高, 则干燥介质的焓值越大, 根据傅里叶导热定律可知, 物料表面升温速率越快 [23]。物料表面具有较高温度后, 物料表面至内部的温度梯度增大, 使得物料内部迅速升温。RH 对传热的影响归纳为: 升高 RH 有助于强化传热过程。例如笔者研究发现, 胡萝卜切片厚度 10 mm, 干燥温度为 60 °C, 风速 3.0 m/s, 恒定 RH (20%、30%、40% 和 50%) 的干燥条件下, 物料温度变化趋势如图 4 所示 [15]。在 0~15 min 内, 物料温度迅速上升, 对应于干燥升温阶段, 且 RH 越大物料升温速率越快。当 RH 为 50% 时, 物料在 4 min 时迅速升至 48.9 °C, 而当 RH 为 20% 时, 物料在 4 min 时升至 34.9 °C。在 15~150 min 内, 物料温度缓慢上升, 对应于干燥恒速干燥阶段; 在 150 min 以后, 物料温度逐渐趋于干燥介质温度, 对应于干燥降速阶段。此外 KAYA 等 [24] 和 HII 等 [25] 同样得出 RH 越大, 物料升温速率越快的结论。

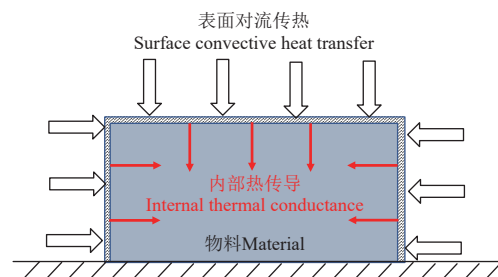


图 3 物料干燥传热过程示意图 [13]

Fig.3 Heat transfer process during material drying

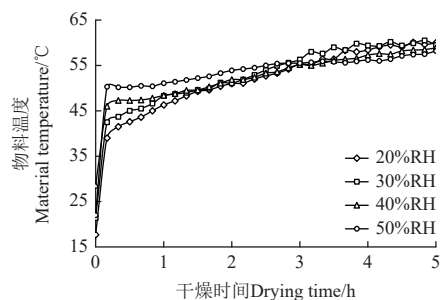


图 4 恒定相对湿度下胡萝卜温度曲线 [10]

Fig.4 Temperature curves of carrot under constant relative humidity drying condition

对流传热系数 (convective heat-transfer coefficient, h_t) 能够定量反映干燥过程中传热过程发生快慢程度^[26-27]。由于高 RH 能够促进物料迅速升温, 物料的预热阶段 (0~15 min) 能够很好反映出 RH 对于 h_t 的影响, 如图 5 所示^[10]。20%、30%、40% 和 50%RH 下, 干燥初始时刻 h_t 具有显著性区别 ($P<0.05$), 大小分别为 42.9、64.7、135.1 和 178.9 W/(m²·℃)。RH 为 50% 时相对于 20% 干燥条件下 h_t 提高了 3.17 倍。且在 0~15 min 范围内, RH 越高, h_t 越大。因此提高 RH, 物料升温速率加快, 体现为 h_t 显著增大 ($P<0.05$)。YU 等^[21] 同样发现, 热风干燥温度 60℃, RH 为 40%, 胡萝卜升温速率显著大于 RH 为 4% 的升温速率。此外, 张卫鹏等^[11] 研究表明, 高相对湿度有助于提高山药片热风干燥过程中的升温速率。

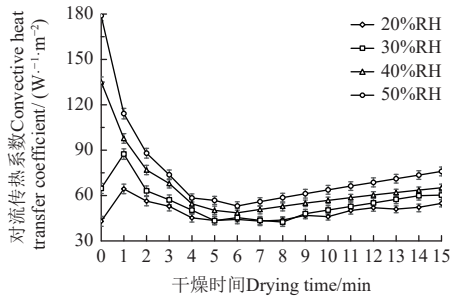


图5 恒定相对湿度下对流传热系数^[10]

Fig.5 Convective heat transfer coefficient at constant drying relative humidity

1.3 RH 对传热传质相互耦合的影响

由 RH 对传热传质的影响可知, 增加 RH 有助于强化传热过程, 使物料具有较高温度, 但减小了物料表面和干燥介质的水蒸气分压差, 不利于物料表面水分蒸发, 抑制了传质过程; 降低 RH 虽然强化了传质过程, 但不利于物料的升温, 抑制了传热过程。传热过程方向由干燥介质指向物料内部, 而传质过程由物料内部指向干燥介质。传热过程速率较快时, 传质过程相应减慢; 传质过程速率较快时, 传热过程会受到一定程度的影响。因此, 传热和传质之间方向相反, 且相互耦合, 同时受到 RH 的影响。

例如笔者前期研究了胡萝卜切片厚度 12 mm, 干燥温度为 60℃, 风速 3.0 m/s, 恒定 RH (20%、30%、40% 和 50%) 的干燥条件下, 在 0~15 min 内的传热传质情况^[10] (图 6)。当 RH 为 20% 时, 干燥速率最快, 蒸发水分量最多, 吸收总热量最多为 1 387.9 J, 其中 64.5% 的热量用于水分蒸发, 干基含水率由 12.8 g/g 降至 11.8 g/g; 温度由 20.0℃ 上升至 40.2℃。当 RH 为 50% 时, 干燥速率减小, 水分蒸发量较少, 物料吸收的总热量最少为 1 159.3 J, 总热量中仅有 33.0% 用于水分蒸发, 干基含水率由 12.8 g/g 降至 12.6 g/g, 温度由 20.0℃ 上升至 50.3℃。因此, 升高 RH 强化了传热过程, 使物料具有较高温度, 但物料水分脱除较少; 而降低 RH 强化了传质过程, 但不利于物料升温。

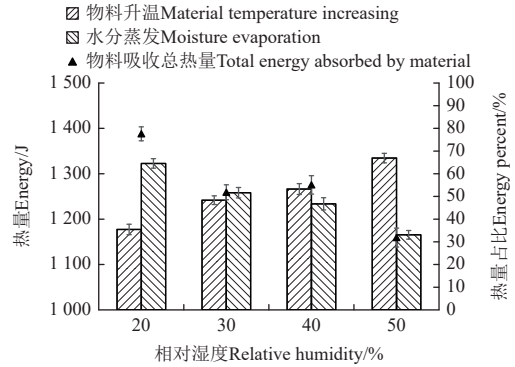


图6 恒定 RH 干燥条件下胡萝卜所吸收总热量及各部分占比^[10]

Fig.6 Total energy absorbed and each part percentage at constant relative humidity drying of carrot

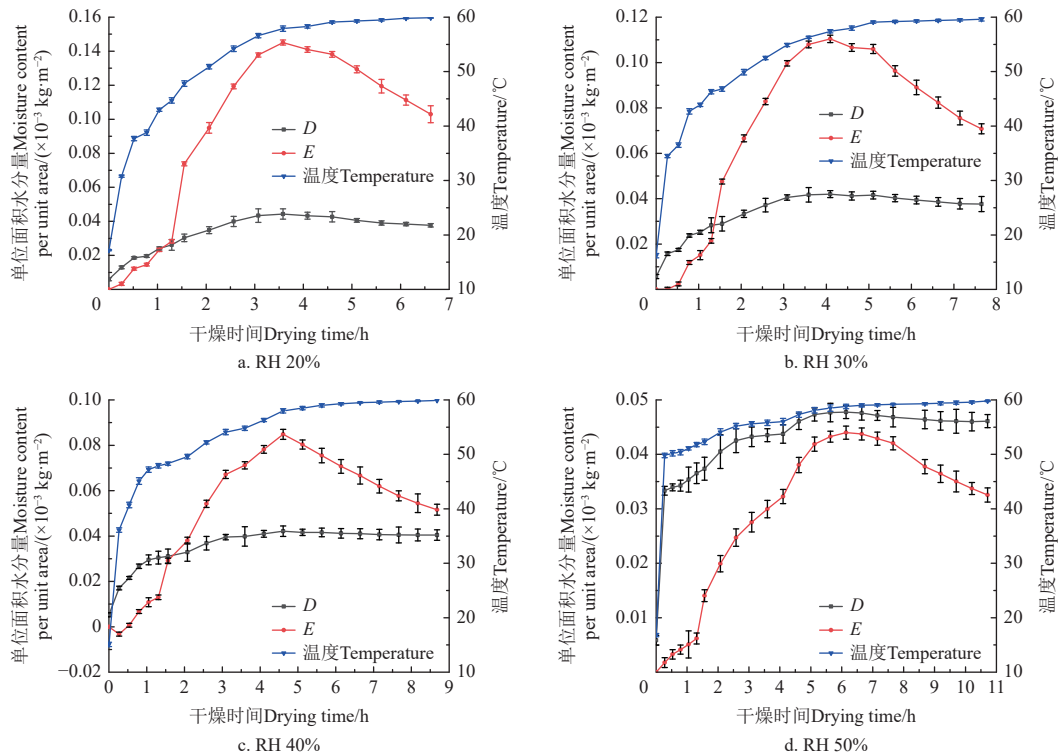
更进一步, 不同 RH 干燥条件下对传质过程中物料内部水分迁移、表面水分蒸发和物料温度的影响如图 7 所示^[28]。在 RH20% 时, 在 0~0.5 h 内, 物料脱除水分较少, 温度迅速上升, 最终体现为内部水迁移量迅速上升, 表明在干燥初期, 大量水分由内部迁移至表面。在 0.5~3.0 h 内, 内部水分迁移量变化趋势和物料温度变化趋势类似; 在 3 h 以后, 物料温度趋于定值, 对应内部水分迁移量趋于稳定。且在 30%、40% 和 50% 时, 内部水分迁移量变化规律相一致。当 RH 为 50% 时, 在 0~15 min 内物料升温速率最快, 内部水分迁移量急剧上升, 整个干燥过程中, 内部水分迁移量显著大于 RH 为 20%、30% 和 40% 条件下的值。故 RH 越大, 物料升温速率快, 物料具有较高温度后使得内部水分迁移量增大, 但因物料表面和干燥介质的水蒸气分压差较小使得表面水分蒸发量较小。李长友^[9] 指出, 当干燥介质存在水蒸气分压力时, 水分蒸发份数迁出物料的最终动力取决于物料表面水蒸气分压和介质水蒸气分压的差值, 且 RH 越低, 该驱动力越大。故 RH 越小, 物料升温速率较慢, 物料内部温度较低, 故内部水分迁移量较小, 但因物料表面和干燥介质的水蒸气分压较大使得表面水分蒸发量较大^[29-32]。

干燥过程中传热传质过程控制方程如下^[33-34]:

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = h_t A (T_a - T) + m_s \frac{dM}{dt} \Delta L_v \quad (1)$$

$$-(D \nabla M)|_s = h_m (M - d) \quad (2)$$

式中 ρ 为物料密度, kg/m³; V 为物料体积, m³; C_p 为物料的比热容, J/(kg·℃); T 为物料温度, ℃; t 为干燥时间, s; h_t 为对流传热系数, W/(m²·℃); m_s 为干物质质量, kg; M 为物料干基含水率, g/g; ΔL_v 为水分蒸发潜热, J/kg; D 为水分有效扩散系数, m²/s; ∇ 为哈密顿算子; h_m 为对流传质系数, m/s; d 为干燥介质的湿含量, kg/kg。由式 (1) 和 (2) 定性分析可知, RH 降低使得 d 降低, 故水分表面蒸发量 $h_m \cdot (M - d)$ 增大, 热量多用于水分蒸发, 物料升温速率较慢; 而当 RH 升高时使得 d 增大, ∇M 降低, 热量多用于物料升温, 故升温速率较快。



注：纵坐标单位面积水分量表示对应的单位面积的水分迁移量 D 或单位面积的水分蒸发量 E 的值。

Note: The ordinate moisture content per unit area represents the corresponding value of water migration per unit area D or water evaporation per unit area E .

图7 恒定 RH 对胡萝卜片内部水分迁移量和表面水分蒸发量的影响^[28]

Fig.7 Effects of constant RH on carrot slice internal moisture diffusion and surface moisture evaporation

此外,关于相对湿度对传热传质的影响也可以通过仿真模拟的方式来揭示。仿真模拟方式基于干燥过程的传热传质控制方程,可直观观测出干燥过程中的温度水分分布演变过程。例如张卫鹏等^[11]基于 Comsol 软件模拟了干燥温度 60℃,阶段降湿(RH 为 40% 保持 20 min 后降为 15%)及恒定 RH 15% 干燥条件下的水分分布演变规律。CURCIO 等^[35]研究了干燥温度 45℃,RH 为 10%~30% 下胡萝卜干燥过程中物料温度变化规律,结果表明 RH 越大,物料升温速率越快。AVERSA 等^[36]研究发现,RH 越大,干燥速率越低,且干燥初期存在短暂的含水率增大的现象。YU 等^[21]同样发现,高 RH 有助于物料迅速升温,但降低了干燥效率,阶段降湿条件下具有较高的焓效率。

由试验结果、理论分析及仿真模拟的结果可知,相对传热和传质过程的影响此消彼长,互相耦合,且高 RH 主要体现为对传热过程的影响,低 RH 主要体现为对传质过程的影响。充分利用 RH 对传热传质过程的影响,合理调控 RH 以同时强化传热传质过程,提高干燥效率为进一步研究的方向。

2 RH 对干燥品质的影响

2.1 RH 对干燥过程物料表面结壳的影响

RH 对于干燥品质的影响主要体现在对物料表面结壳的影响。目前,关于果蔬物料在热风干燥过程中结壳有 3 种解释机理:直接理论、蒸发前沿理论和玻璃态转变理论^[37]。1) 直接理论。干燥初期物料温度逐渐升高且

含水率较高,内部水分迁移量较大而表面水分蒸发量较小。内部水分能够迅速迁移至物料表面,补充因汽化蒸发失去的水分,维持表面湿润。随着干燥的进行,物料含水率减少,内部水分迁移量逐渐小于表面水分蒸发量,内部水分不能及时迁移至表面,导致表面因干燥过快而率先皱缩,硬化结壳,形成外干内湿的表面假干燥。2) 蒸发前沿理论^[38]。该理论假设物料存在一个移动的蒸发界面,它将物料分为湿区和干区,蒸发界面是物料湿区和干区的交界面。在干区内,水分以气态形式扩散;在湿区内,水分以液态形式迁移。随着干燥的进行,物料内部湿分减少,使得湿分迁移速率小于同一方向的蒸发速率,蒸发前沿向物料内部移动,从而产生结壳硬化。3) 玻璃态转变理论^[39-41]。随着表面迅速脱水,使得物料的玻璃态转变温度快速升高,表面迅速由橡胶态转变为玻璃态,阻碍了物料内部水分迁移至表面,最终导致物料表面收缩成玻璃态而结壳。

在实际的果蔬热风干燥过程中结壳现象的发生可能为上述 1 种或几种理论的综合表现。在 3 种理论中都涉及到内部水分迁移和表面水分的蒸发关系。内部水分迁移量和表面水分蒸发量的相关关系可能为结壳发生的主要机理。0~100% 范围内,RH 越大,则内部水分迁移量越大,内部水分迁移量小于表面水分蒸发量出现时机较晚,从而有助于缓解物料表面结壳;而当 RH 较低时,内部水分迁移量较小而表面水分蒸发量较大,物料可能在干燥初期因表面水分蒸发量较大而发生结壳硬化现象。例如笔者研究发现,RH 为 20%、30%、40% 时,胡萝

卜干燥过程中内部水分迁移量等于表面水分蒸发量的时间分别为 1.11、1.36 和 1.70 h，即在此时刻之后物料表面可能会出现明显的结壳现象，且 RH 越大，出现结壳现象的时机越晚。当 RH 为 50% 时，内部水分迁移量始终大于表面水分蒸发量，可能未出现明显的结壳现象^[28]。此外，OGAWA 等^[42]研究了温度和相对湿度对意大利面条干燥特性的影响，结果表明，低 RH 下，面条表面更容易出现硬化裂纹现象。因此，高 RH 更有助于延缓物料表面发生结壳产生的时机^[43]。

2.2 RH 对收缩和复水性的影响

收缩率的大小可体现干燥后物料的体积大小，复水性可反映物料中组织细胞的破坏程度，皆为干燥后物料的重要品质指标^[44-45]。RH 对内部水分和表面水分蒸发的影响结果间接对收缩和复水性产生影响。在 RH 为 0~100% 范围内，RH 较低时，表面水分大量蒸发产生较大的由内向外的水分梯度，使其表层产生拉应力，内部产生压应力，当应力超过极限强度时导致物料收缩^[46]。而 RH 较高时，内部水分会及时迁移供给至表面，一定程度上减小了水分梯度，保持了细胞组织结构的骨架并降低了收缩率^[47]。复水性与物料细胞完整性及复水前物料含水率相关，RH 较高时，收缩率较小很好地保持了水分迁移孔道，且表面未产生明显的结壳现象，故可能具有较高的复水性。RH 较低时，物料收缩严重，水分迁移通路被堵塞且表面发生结壳硬化现象，故复水性较低。

韩隽丛等^[48]研究了干燥温度 60℃，切片厚度 9 mm，不同 RH 条件下的体积比。结果发现，RH 为 10%、20% 和 30% 时，体积比分别为 18.16%、20.57% 和 21.81%。其原因为 RH 的下降增加了干燥强度，加快了水分迁移速率而增加了火龙果的收缩程度。巨浩羽等^[12]研究发现，西洋参的热风干燥过程中，在 RH 为 10%、20% 和 30% 范围内，干制后的物料体积随 RH 的增大而增大。此外，BALBAY 等^[49]研究发现开心果干制品复水比随 RH 的升高而增大。FENG 等^[50]研究表明，阶段降湿热风干燥方式相对于连续排湿热风干燥方式具有更高的复水率和较小的收缩率。然而 XU 等^[51]研究表明，干燥温度 70℃，相对于 RH 为 40%、60%，RH 为 20% 时香橼片的干制时间最短，物料具有多孔结构且复水率最大，这可能与干制后物料较低的含水率和物料本身的物性相关。

2.3 RH 对物料中有效成分含量的影响

RH 一般不会直接影响到物料中有效成分的转化降解等，而通常是通过影响干燥时间而间接影响某种成分含量的变化。由于物料及干燥条件的不同，RH 对物料色泽及有效成分的影响可能未形成统一的规律。例如效碧亮等^[52]研究发现，干燥温度 70℃，风速 1.5 m/s，RH 为 20%、30% 和 40% 时，百合色差值分别为 5.43±0.13，4.31±0.15，6.13±0.12。色差值随 RH 的增加而先减小后增大；维生素 C 含量之间无显著差异 ($P>0.05$)。李星仪等^[47]等研究发现，干燥前期保持较高的 RH 不利于香菇干燥过程中风味物质 1-辛烯-3-醇的产生，而低 RH 下 1-辛烯-3-醇的相对含量显著增高 ($P<0.05$)。JU 等^[53]研

究发现，热风干燥后西洋参的明亮度 L^* 值随着 RH 的增大而减小，其归因于高 RH 延长了干制时间，从而引起了色泽的裂变；而总皂苷含量随着 RH 的上升而增大。

综上所述，RH 对干燥品质归纳如下：高 RH 可缓解干燥过程中物料表面的结壳现象，且有助于提高复水性降低收缩率。由于不同物料中所含有效成分不尽相同，RH 对有效成分的影响尚未得到统一结论。RH 对有效成分的影响研究应当聚焦于某一特定物料的有效成分降解规律之上。

3 恒定干燥温度下 RH 的调控策略

3.1 阶段降湿干燥方式

阶段降湿干燥方式是指热风干燥过程中，使用高 RH 维持一段时间，待物料升至较高温度后，降低 RH 至干燥结束。研究表明，相对于连续排湿干燥方式，阶段降湿干燥能够缓解物料表面的结壳，有助于形成和保持物料的水分迁移通路，从而能够提高干燥效率和品质^[44-46]。阶段降湿干燥方式现已成功应用于胡萝卜^[15]、香菇^[47]、山药片^[54-56]、圣女果^[57]、木瓜片^[58] 等的干燥加工中。

阶段降湿加快干燥速率的机理分析如下。阶段降湿中前期高 RH 使得物料迅速升温，较高的温度使得物料内部水分具有较高的扩散系数；RH 降低后，由于物料表面和干燥介质较大的水蒸气分压差使得内部迁移至表面的水分迅速蒸发，故提高了干燥效率。例如张卫鹏等^[11]研究发现，相对于恒定 20%RH，干燥温度 60℃，12 mm 的山药片，保持 RH 50% 15 min 而后降为 20%，干燥时间缩短了 14.3%。效碧亮等^[59]研究表明，相对于恒定 20%RH，干燥温度 60℃，RH 30% 保持 30 min 而后降为 20%，苹果片干燥时间缩短了 16.66%。

阶段降湿有助于缓解物料表面结壳的原因分析如下。在干燥前期保持较高 RH，令物料内部大量自由水迁移扩散至表面。内部水分迁移量迅速增大，表面会产生水分积累，物料表面保持湿润状态不会发生明显结壳现象。在干燥中期，物料脱除的为少部分自由水和大量的物理-化学结合水，内部水分迁移量逐渐降低直至与表面水分蒸发量相等，此时可能为物料将要产生结壳的临界点。在此阶段逐渐降低 RH 使得内部水分迁移量逐渐减小，表面水分蒸发量缓慢增大，以延缓表面结壳的产生时机，以使得脱除更多的水分。在干燥后期，物料脱除的为大量的物理-化学结合水，内部水分迁移量逐渐小于表面水分蒸发量，物料表面产生结壳现象，并逐渐增厚。结壳增厚以后进一步使得内部脱水通路发生堵塞，内部水分迁移速率变慢，若在此期间升高 RH，一方面抑制表面水分蒸发量，另一方面使得物料内部水分在梯度差的作用下进行热湿交换重新分布而趋于均匀，降低由于干燥过程中水分迁移所引起的内部应力冲击，故阶段降湿在干燥后期可能对脱水通路的演化具有显著影响，从而缓解物料表面结壳现象。例如，张卫鹏等^[11]研究发现干燥温度 60℃，12 mm 的山药片在 RH 15% 干燥时，表面水

分蒸发过快而发生结壳硬化, 而 RH 45% 保持 25 min 后降为 15% 时, 物料表面呈清晰的蜂窝状多孔结构, 且提高了干燥效率。DAI 等^[60] 研究了杏子在干燥温度 70 °C, 连续排湿 (图 8a) 以及阶段降湿 (第 1 阶段 41%, 2.5 h; 第 2 阶段 25%, 3.5 h; 第 3 阶段 7%, 6.0 h) 干燥后杏子表面的微观结构 (图 8b)。结果表明, 在连续排湿干燥条件下, 表面微孔出现堵塞的现象; 而阶段降湿干燥的样品, 表面形成疏松多孔的微观结构。

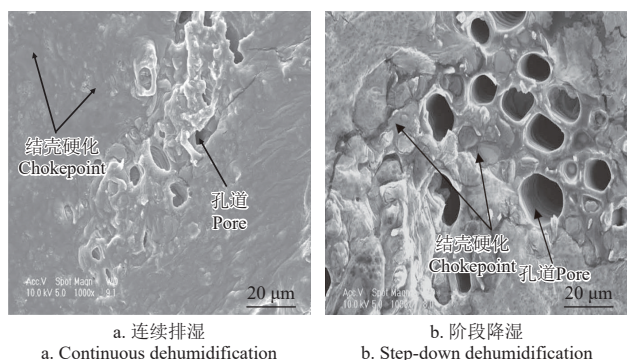


图 8 不同相对湿度干燥条件下杏子表面微观结构^[60]
Fig.8 Surface microstructure of apricot under different relative humidity drying conditions

3.2 多阶段降湿干燥方式

多阶段降湿干燥方式为前期保持高 RH, 待物料升至较高温后, 分 3 个或更多的阶段降低 RH 直至干燥结束。在两阶段降湿干燥过程中, 高 RH 直接降为很低值后, 由于表面水分大量蒸发, 消耗了大部分热量, 可能会导致物料温度降低, 抑制了传热过程。物料温度降低后使得内部水分迁移作用减弱。故 RH 的降低幅度不宜过大, 而应以不导致物料温度下降为基本约束条件,

由此来逐步降低 RH。因此由双阶段降湿干燥方式衍生出多阶段降湿干燥方式。

例如王庆惠等^[57] 研究了干燥温度 70 °C, RH 为 70%, 2 h; 50%, 2 h; 30%, 2 h、10% 直至干燥结束的条件下能够显著提高圣女果的热风干燥效率。巨浩羽等^[55] 研究了干燥温度 60 °C、风速 3.0 m/s, 切片厚度为 4 mm 的山药片在 RH50%, 10 min、40%, 20 min、30%, 20 min, 20%, 20 min、10% 至干燥结束的条件下的干燥特性, 结果表明多阶段降湿方式相对于 RH50%, 10 min 直接降为 10% 的双阶段干燥方式, 干燥时间缩短了 25%。

在双阶段或者多阶段降湿干燥过程中, 没有充分揭示 RH 降低幅度以及降湿的时机的依据, 最优的调控方式仍然需要通过单因素试验、正交试验或者响应面试验来确定。合理调控 RH 以同步强化传热传质过程为进一步研究的方向。

3.3 基于物料温度监测的 RH 调控方式

根据干燥过程中物料温度的变化规律来动态调控 RH, 以同步强化传热传质过程。基于物料温度变化规律将干燥过程分为干燥前期、干燥中期和干燥后期 3 个阶段。在干燥前期物料温度迅速上升, 干燥中期物料温度缓慢上升, 在干燥后期物料温度上升逐步趋于干燥介质的温度^[61]。该相对湿度控制方式是基于湿度控制的箱式热风干燥设备实现的, 实施的前提是要保证干燥室内温度、风速流场分布的均匀性^[62]。干燥过程中使用 Pt100 温度传感器 (北京昆仑工控公司, 精度 ± 0.2 °C) 采集 3 个位置的物料温度, 对其求解平均值作为控制依据。

如图 9 所示, 在干燥前期, 利用 RH 有助于传热的影响, 设定为很高的 RH, 监测物料温度的变化率小于某一值后转为干燥中期。在干燥中期, 开启排湿风机令 RH 降低。

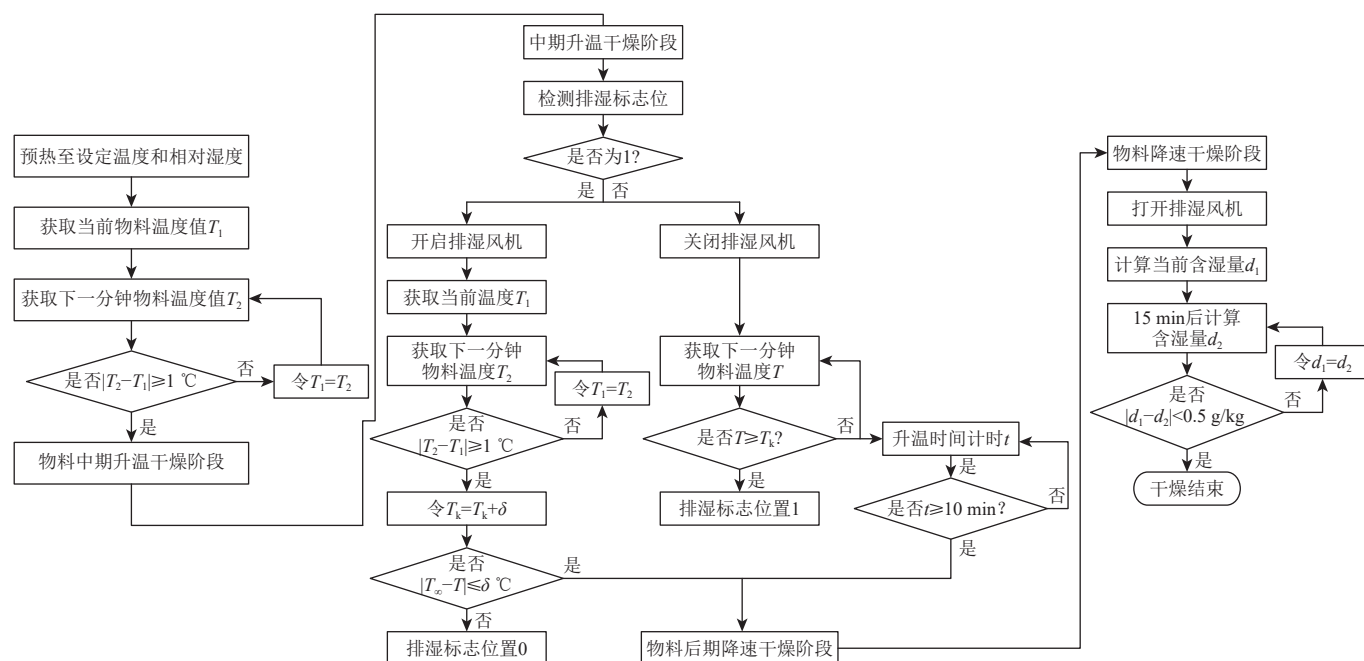


图 9 基于物料温度的 RH 控制流程图^[50]

Fig.9 RH control flow chart based on material temperature

由于物料内部温度较高, 大量水分迁移至表面并在表面蒸发。表面水分大量蒸发消耗热量, 如果物料温度值有下降趋势时, 则说明此时物料所吸收的热量有一部分开始用于加热物料, 物料内部温度不足以使更多的水分迁移至表面, 物料需要升温才能使得内部水分迁移至表面。故此时提示应当升高 RH 以升高物料温度。当物料温度升高 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 9 中 δ) 后再次降低 RH, 再进一步增大表面水分蒸发量。通过不断的升高和降低 RH, 以同步强化传热传质过程。研究表明^[9,63-64], 对于特定的物料, 在特定的干燥工艺和介质条件下, 对应其干燥区段, 均存在相应的干燥速率最大值, 发生在物料内部水分均匀一致的情况下。在每个升高 RH 区段使得物料温度和水分分布趋于一致, 再次降低 RH 后可能为当前区段物料能够获得的最大干燥速率。因此在干燥中期调控 RH 使得物料在最大干燥速率下进行干燥。

当物料温度上升至趋近于干燥介质温度或关闭排湿后干燥介质中的热量不足以使物料升温时, 则说明干燥过渡为降速干燥阶段, 物料已具备较高温度, 此时开启排湿, 使物料在高温低湿下干燥。干燥过程变为由内部结合水控制的降速干燥过程^[65-67]。监测一定时间间隔空气中的绝对湿度的差值, 当差值小于一定范围时则认为干燥结束。基于物料温度变化的 RH 调控方式流程图如图 9 所示。此控制方式下相对湿度最大偏差为 1.0%, 且相对于两阶段的降湿干燥方式, 能够更进一步地提高干燥效率和品质^[61,68]。然而干燥室内不同位置物料的温度及脱水速率不可能完全一致, 仅依靠 3 个位置的温度变化来调控相对湿度难免会造成干燥不均匀或者干燥终点判断不准确的现象。未来的研究可以通过增加物料温度采集位置数量或基于干燥室内相对湿度的变化规律来实时调控相对湿度, 以达到干燥均匀, 且强化传热传质的目的。

4 阶段降湿干燥方式适用性

虽然阶段降湿干燥方式能够提高某些果蔬物料的干燥效率和品质, 但果蔬物料多种多样, 该技术能否适用于所有果蔬物料的干燥仍有待进一步验证核实。基于传热角度, 阶段降湿干燥前期, 高 RH 能够使表面温度升高, 物料表面温度升高后进一步以热传导方式促进内部温度升高。基于传质角度, 前期高 RH 能够抑制表面水分蒸发, 防止表面干燥过快而发生结壳现象, 待物料温度升高后降低 RH, 内部水分能够及时迁移至表面并在表面蒸发。由此可见, 物料表面和内部温度的差异, 内部水分能够及时迁移至表面是决定阶段降湿是否有效的关键因素。物料表面和内部温度存在显著的温度梯度差异, 内部水分和表面水分浓度存在着显著的浓度梯度差异, 才能够充分体现出高湿强化传热的作用以及低湿强化传质的作用。而物料表面和内部升温速率一致, 在低湿阶段内部水分能够及时迁移至表面, 则阶段降湿干燥方式可能并不能够显著提高效率, 反而前期高 RH 会延长干燥时间^[69]。因此, 阶段降湿干燥技术的适用性实质为: 干燥过程中所体现出的对流传热热阻和内部导热热

阻的相对大小, 及对流传质阻力和内部传质阻力的相对大小。不同干燥条件和物料种类、厚度会影响以上传热传质阻力的大小, 从而呈现出不同适应性的结果。传热毕渥数 (Bi_h) 和传质毕渥数 (Bi_m) 恰好能够体现两种阻力的相对大小。

传热毕渥数 (Bi_h) 表示传热过程中物料的导热热阻与物料表面对流热阻之比, 无量纲^[70-73]。张卫鹏等^[74]指出, 当 $0.1 < Bi_h < 100$ 时, 表明物料温度变化由物料内部热阻和物料表面对流传热热阻共同决定, 在实际应用中也最为常见; 当 $Bi_h > 100$ 时, 物料表面温度完全取决于内部导热热阻, 是一种极限情况; 当 $0 < Bi_h < 0.1$ 时, 物料表面和内部温度在任意时刻都趋于一致, 且变化快慢取决于物料表面对流传热强度。巨浩羽等^[75]研究发现干燥温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 胡萝卜切片厚度为 6、12、18 mm 时, Bi_h 分别为 0.582 7、1.165 5 和 1.748 2。胡萝卜片内部和表面温度相对偏差分别为 2.7%、8.6%、13.8%。 Bi_h 值越大, 则内外表面温差越大。MRKIĆ 等^[76]在研究西兰花干燥和 DINCER 等^[77]研究不同形状物料干燥时得到同样的结论。传质毕渥数 (Bi_m) 表示传质过程中物料内部水分迁移扩散的阻力与物料表面对流传质的阻力之比^[78]。GÓRNICKI 等^[79]指出, 当 $Bi_m < 0.1$ 时, 表明内部传质阻力远小于外部对流传质阻力, 干燥过程由表面水分汽化所控制; 当 $0.1 < Bi_m < 100$ 时, 内部传质阻力和外部对流传质阻力差异较小, 干燥过程由内部水分扩散和表面水分汽化同时控制; 当 $Bi_m > 100$ 时, 表明内部传质阻力远大于外部对流传质阻力, 干燥过程主要由内部水迁移所控制。

为充分发挥阶段降湿干燥技术的作用, 并结合 Bi_h 和 Bi_m 的取值范围所体现的阻力大小相对关系, 可得出如下结论。阶段降湿干燥过程中, 首先确保 $Bi_h > 1$, 即物料内部和表面存在显著的温度差异, 降低表面水分蒸发速率同时增大内部水分迁移扩散速率; 其次保证 $Bi_m > 0.1$, 使得内部水分能够及时扩散至表面。即干燥过程中 $Bi_h > 1$ 且 $Bi_m > 0.1$ 时, 说明阶段降湿干燥过程适用于此物料的干燥, 否则宜采用连续排湿干燥方式^[75]。

5 结论与展望

本文综合论述了相对湿度 (relative humidity, RH) 对果蔬热风干燥过程中热质传递及干燥品质的影响, 优化调控策略及适用性范围 4 个方面内容, 明确了果蔬热风干燥过程中 RH 的影响机理, 为恒定干燥温度下 RH 的调控方式提供理论依据和技术支持。热风干燥过程中, 针对于传热过程, 升高 RH 能够增大对流传热系数, 加快物料升温速率。针对于传质过程, 降低 RH 能够增大对流传质系数, 加快物料表面水分蒸发。针对两者的耦合作用: RH 较高时, 物料升温速率快, 物料内部水分迁移量增大, 但表面水分蒸发量较小; 而当 RH 较低时, 物料升温速率较慢, 内部水分迁移量较小, 但表面水分蒸发量较大。相对传热和传质过程的影响此消彼长, 互相耦合。高 RH 主要体现为对传热过程的影响, 低 RH

主要体现在对传质过程的影响。

高 RH 能够延缓物料表面产生结壳的时机, 并能够提高复水性, 降低收缩率。低 RH 易使得物料表面产生结壳硬化, 降低复水性, 增大收缩率。阶段降湿及多阶段降湿干燥方式下物料表面形成和保持了蜂窝状多孔结构, 有助于内部水分迁移, 能够提高干燥效率和品质。基于物料温度的 RH 调控方式验证为较优的 RH 控制方式。

阶段降湿干燥技术适用性的实质为: 干燥过程中所体现出的对流传热热阻和内部导热热阻的相对大小, 及对流传质阻力和内部传质阻力的相对大小, 不同干燥条件和物料种类、厚度会影响以上传热传质阻力的大小, 从而呈现出不同适应性的结果。当阶段降湿干燥过程中传热毕渥数 >1 且传质毕渥数 >0.1 时, 说明阶段降湿干燥过程适用于此物料的干燥, 否则宜采用连续排湿干燥方式。

此外, 可结合干燥温度进一步研究多阶段变温变湿干燥方式, 以提高干燥效率; 深入解析相对湿度对于干燥过程中水分迁移孔道的演化过程; 相对湿度对于物料中有效成分的降解动力学等。

[参 考 文 献]

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 2023-2-28, https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html?eqid=95fd25e8000c492f00000006644a904f.
- [2] XIAO H W, MUJUMDAR A S. Importance of drying in support of human welfare[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(12): 1524-1543.
- [3] PASHAZADEH H, REDHA A A, KOCA I. Effect of convective drying on phenolic acid, flavonoid and anthocyanin content, texture and microstructure of black rosehip fruit[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 125: 105738.
- [4] KUMAR G, JOSHI J, RAO P S, et al. Effect of thin layer drying conditions on the retention of bioactive components in Malabar spinach (*Basella alba*) leaves[J]. *Food Chemistry Advances*, 2023, 3: 100419.
- [5] TAŞERI L, AKTAŞ M, ŞEVIK S, et al. Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer[J]. *Food Chemistry*, 2018, 260: 152-159.
- [6] CUEVAS M, LOURDES MARTINEZ-CARTAS M, PEREZ-VILLAREJO L, et al. Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 911-920.
- [7] NGUYEN T T, ROSSELLO C, RATTI C. Simple mathematical modelling to represent air-drying kinetics of potato peel[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 357: 111634.
- [8] XING T Y, LUO X, LI M, et al. Study on drying characteristics of *Gentiana macrophylla* under the interaction of temperature and relative humidity[J]. *Energy*, 2023, 273: 127261.
- [9] 李长友. 干燥物系的特征函数及其理论解[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 286-295.
- LI Changyou. Characteristic functions of drying material system and its theoretical solution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(12): 286-295. (in Chinese with English abstract)
- [10] 巨浩羽, 赵海燕, 张卫鹏, 等. 相对湿度对胡萝卜热风干燥过程中热质传递特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 295-302.
- JU Haoyu, ZHAO Haiyan, ZHANG Weipeng, et al. Effects of relative humidity on heat and mass transfer characteristics of carrot during hot air drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 295-302. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张卫鹏, 韩梦悦, 巨浩羽, 等. 山药片阶段降湿促干特性及多物理场耦合模型[J]. *食品与机械*, 2022, 38(1): 115-122, 240.
- ZHANG Weipeng, HAN Mengyue, JU Haoyu, et al. Drying efficient improvements with step-down relative humidity and multi-field coupling model construction during hot air drying of yam slices[J]. *Food and Machinery*, 2022, 38(1): 115-122, 240. (in Chinese with English abstract)
- [12] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 干燥介质相对湿度对西洋参根干燥特性和品质的影响[J]. *中草药*, 2020, 51(3): 631-638.
- JU Haoyu, ZHAO Shihao, ZHAO Haiyan, et al. Effect of relative humidity on drying characteristic and quality of *Panax quinquefolii Radix*[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2020, 51(3): 631-638. (in Chinese with English abstract)
- [13] PASBAN A, SADRINIA H, MOHEBBI M, et al. Spectral method for simulating 3D heat and mass transfer during drying of apple slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 212: 201-212.
- [14] CASTRO A M, MAYORGA E Y, MORENO F L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 223: 152-167.
- [15] 巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 296-304.
- JU Haoyu, XIAO Hongwei, ZHENG Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(16): 296-304. (in Chinese with English abstract)
- [16] JU H Y, LAW C L, FANG X M, et al. Drying kinetics and evolution of the sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying[J]. *Drying Technology*, 2016, 34(11): 1297-1306.
- [17] JU H Y, EL-MASHAD H M, FANG X M, et al. Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions[J]. *Drying Technology*, 2016,

- 34(3): 296-306.
- [18] AGNIHOTRI V, JANTWAL A, JOSHI R. Determination of effective moisture diffusivity, energy consumption and active ingredient concentration variation in *Inula racemosa*, rhizomes during drying[J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 106: 40-47.
- [19] CHEN B L, JIANG J H, AMANI M, et al. Numerical and experimental study on the heat and mass transfer of kiwifruit during vacuum freeze drying process[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 73: 427-442.
- [20] WANG C, WANG S G, JIN X, et al. Analytical solution for the heat and mass transfer of spherical grains during drying[J]. *Biosystem Engineering*, 2021, 212: 399-412.
- [21] YU X L, ZIELINSKA M, JU H Y, et al. Multistage relative humidity control strategy enhances energy and exergy efficiency of convective drying of carrot cubes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 149: 119231.
- [22] 朱文学. 食品干燥原理与原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [23] 李长友. 粮食热风干燥系统火用评价理论研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 1-6.
- LI Changyou. Exergy evaluation theory of hot air drying system for grains[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(12): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [24] KAYA A, AYDIN O, DINCER I. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia deliciosa Planch*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 88: 323-330.
- [25] HII C L, LAW C L, LAW M C. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54: 264-271.
- [26] KUMAR A, KANDASAMY P, CHAKRABORTY I, et al. Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer[J]. *Biosystem Engineering*, 2022, 219: 85-102.
- [27] PERAZZINI H, LEONEL A, PERAZZINI M T B. Energy of activation, instantaneous energy consumption, and coupled heat and mass transfer modeling in drying of sorghum grains[J]. *Biosystem Engineering*, 2021, 210: 181-192.
- [28] 巨浩羽, 邹燕子, 肖红伟, 等. 相对湿度对胡萝卜热风干燥过程中水分迁移和蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 232-240.
- JU Haoyu, ZOU Yanzi, XIAO Hongwei, et al. Effects of relative humidity on water diffusion and evaporation during hot air drying of carrot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(1): 232-240. (in Chinese with English abstract)
- [29] VOSSEN E, DEWULF L, ROYEN G V, et al. Influence of aging time, temperature and relative humidity on the sensory quality of dry-aged Belgian Blue beef[J]. *Meat Science*, 2022, 183: 186659.
- [30] NAMKANISORN A, MURATHATHUNYALUK S. Sustainable drying of galangal through combination of low relative humidity, temperature and air velocity[J]. *Energy Reports*, 2020, 6(2): 748-753.
- [31] SASONGKO S B, HADIYANTO H, DJAENI M, et al. Effects of drying temperature and relative humidity on the quality of dried onion slice[J]. *Heliyon*, 2020, 6: 043338.
- [32] NAMKANISORN A, MURATHATHUNYALUK S. Sustainable drying of galangal through combination of low relative humidity, temperature and air velocity[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 748-753.
- [33] RANI P, TRIPATHY P P. CFD coupled heat and mass transfer simulation of pineapple drying process using mixed-mode solar dryers integrated with flat plate and finned collector[J]. *Renewable Energy*, 2023, 217: 119210.
- [34] HOU L X, ZHOU X, WANG S J. Numerical analysis of heat and mass transfer in kiwifruit slices during combined radio frequency and vacuum drying[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 154: 119704.
- [35] CURCIO S, AVERSA M, CALABRÒ V, et al. Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(4): 541-553.
- [36] AVERSA S, CURCIO S, CALABRO V, et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78: 922-932.
- [37] 唐欣, 李远辉, 谢好, 等. 中药浸膏真空干燥过程中表面结壳行为的成因、影响因素与研究策略[J]. 中草药, 2022, 53(2): 619-626.
- TANG Xin, LI Yuanhui, XIE Hao, et al. Discussion of causes, influencing factors and research strategies of surface crusting behavior of traditional Chinese medicine extracts during vacuum drying[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2022, 53(2): 619-626. (in Chinese with English abstract)
- [38] LUIKOV A V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1975, 18(1): 1-14.
- [39] 岳鹏飞, 许俊男, 谢元彪, 等. 论中药丸剂“类玻璃化转变”的干燥机制与品质调控对策[J]. 中草药, 2016, 47(11): 1825-1829.
- YUE Pengfei, XU Junnan, XIE Yuanbiao, et al. Drying mechanism of “like-glass transition” and quality control strategy on Chinese materia medica pills[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2016, 47(11): 1825-1829. (in Chinese with English abstract)
- [40] SANTHALAKSHMY S, DON B S J, FRANCIS S, et al. Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder[J]. *Powder Technol*, 2015, 274: 37-43.
- [41] ISLAM M Z, KITAMURA Y, YAMANO Y, et al. Effect of

- vacuum spray drying on the physicochemical properties, water sorption and glass transition phenomenon of orange juice powder[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169: 131-140.
- [42] OGAWA T, CHUMA A, AIMOTO U, et al. Effects of drying temperature and relative humidity on spaghetti characteristics[J]. *Drying Technology*, 2017, 35: 1214-1224.
- [43] ZHANG W P, YANG X H, MUJUMDAR A S, et al. The influence mechanism and control strategy of relative humidity on hot air drying of fruits and vegetables: A review[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(11): 2217-2234.
- [44] DOYMAZ I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2017, 53: 25-35.
- [45] 代建武, 杨升霖, 王杰, 等. 微波真空干燥对香蕉片干燥特性及品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 11(51): 493-500.
- DAI Jianwu, YANG Shenglin, WANG Jie, et al. Effect of microwave vacuum drying conditions on drying characteristics and texture structure of banana chips[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 11(51): 493-500. (in Chinese with English abstract)
- [46] WU J, ZHANG H, LI F. A study on drying models and internal stresses of the rice kernel during infrared drying[J]. *Drying Technology*, 2017, 35(6): 680-688.
- [47] 李星仪, 张悦, 谢永康, 等. 热风干燥过程相对湿度对香菇品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(24): 281-291.
- LI Xingyi, ZHANG Yue, XIE Yongkang, et al. Effects of relative humidity on the exterior quality of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) during hot air drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(24): 281-291. (in Chinese with English abstract)
- [48] 韩录丛, 金听祥, 张振亚, 等. 火龙果热泵干燥特性及收缩动力学模型分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(10): 242-248.
- HAN Lucong, JIN Tingxiang, ZHANG Zhenya, et al. Drying characteristics and shrinkage model analysis of pitaya heat pump drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(10): 242-248. (in Chinese with English abstract).
- [49] BALBAY A. Effects of environmental temperature and relative humidity on the rehydration of dried pistachios[J]. *Drying Technology*, 2019, 37: 1239-1250.
- [50] FENG Y F, XU B G, YAGOUR A E. Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic[J]. *Food Chemistry*, 2021, 343: 128404.
- [51] XU W X, ISIAM M N, CAO X H, et al. Effect of relative humidity on drying characteristics of microwave assisted hot air drying and qualities of dried finger citron slices[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 137: 110413.
- [52] 效碧亮, 孙静, 刘晓风. 百合热风薄层干燥特性及干燥品质[J]. *食品与机械*, 2022, 36 (2): 48-55, 218.
- XIAO Biliang, SUN Jing, LIU Xiaofeng, et al. Drying characteristics and drying quality of *Lilium* by hot-air thin-layer drying[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(2): 48-55, 218. (in Chinese with English abstract)
- [53] JU H Y, ZHAO S H, MUJUMDAR A S, et al. Step-down relative humidity convective air drying strategy to enhance drying kinetics, efficiency, and quality of American ginseng root (*Panax quinquefolium*)[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(7): 903-916.
- [54] 陆学中, 刘亚男, 张德榜, 等. 高湿预处理对怀山药热风干燥特性及复水性的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(11): 147-151, 183.
- LU Xuezhong, LIU Yanan, ZHANG Debang, et al. Effect of high humidity preconditioning on hot air drying and its rehydration of Chinese yam[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(11): 147-151, 183. (in Chinese with English abstract)
- [55] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 阶段降湿对山药热风干燥特性和品质的影响[J]. *中草药*, 2021, 52(21): 6518-6527.
- JU Haoyu, ZHAO Shihao, ZHAO Haiyan, et al. Influence of step down relative humidity on drying characteristic and quality of hot air drying of *Dioscoreae Rhizoma* slices[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(21): 6518-6527. (in Chinese with English abstract)
- [56] JU H Y, ZHANG Q, MUJUMDAR A S, et al. Hot-air drying kinetics of yam slices under step change in relative humidity[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2016, 12(8): 783-792.
- [57] 王庆惠, 李忠新, 杨劲松, 等. 圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 271-276.
- WANG Qinghui, LI Zhongxin, YANG Jingsong, et al. Dried characteristics of cherry tomatoes using temperature and humidity by stages changed hot-air drying method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(3): 271-276. (in Chinese with English abstract)
- [58] JU H Y, VIDYARTHI S K, KARIM M A, et al. Drying quality and energy consumption efficient improvements in hot air drying of papaya slices by step-down relative humidity based on heat and mass transfer characteristics and 3D simulation[J]. *Drying Technology*, 2023, 41(3): 460-476.
- [59] 效碧亮, 效碧彩, 刘晓风. 苹果片双段控湿干燥特性及干燥品质工艺研究[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(5): 237-246.
- XIAO Biliang, XIAO Bicai, LIU Xiaofeng. Drying characteristics, quality, and process optimization of apple slices during two stage relative humidity-controlled drying[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(5): 237-246. (in Chinese with English abstract)
- [60] DAI J W, RAO J Q, WANG D, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying

- kinetics of apricot halves[J]. *Drying Technology*, 2015, 33(3): 365-376.
- [61] 巨浩羽, 张茜, 郭秀良, 等. 基于监测物料温度的胡萝卜热风干燥相对湿度控制方式[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 269-276.
- JU Haoyu, ZHANG Qian, GUO Xiuliang, et al. Control method of relative humidity of carrot hot air drying based on detecting material's temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(4): 269-276. (in Chinese with English abstract)
- [62] 巨浩羽, 赵海燕, 于贤龙, 等. 基于温湿度控制的箱式果蔬热风干燥机设计[J]. *食品与机械*, 2020, 36(7): 97-103.
- JU Haoyu, ZHAO Haiyan, YU Xianlong, et al. Design and experiment of box type hot air drier for fruits and vegetables based on temperature and humidity control[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(7): 97-103. (in Chinese with English abstract)
- [63] 李长友. 粮食干燥传递和转换特征及其理论表达[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(19): 1-8.
- LI Changyou. Theoretical analysis of exergy transfer and conversion in grain drying process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(19): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [64] 方壮东, 李长友, 赵懿琨. 稻谷逆流循环干燥瞬态解析模型[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 286-295.
- FANG Zhuangdong, LI Changyou, ZHAO Yikun. Transient mathematical modeling of circulation counter-flow rice drying system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(23): 286-295. (in Chinese with English abstract)
- [65] LIU S C, LI X Q, SONG M J, et al. Experimental investigation on drying performance of an existed enclosed fixed frequency air source heat pump drying system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 735-744.
- [66] 黄光群, 余浩, 方晨, 等. 奶牛粪固形物热风干燥特性及工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 186-193.
- HUANG Guangqun, YU Hao, FANG Chen, et al. Hot-air drying characteristics and optimization of the process parameters for the solid fraction of dairy manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(23): 186-193. (in Chinese with English abstract)
- [67] PINHEIRO M N C, MADALENO R O, CASTRO L M M N. Drying kinetics of two fruits Portuguese cultivars (*Bravo de Esmolfe* apple and Madeira banana): An experimental study[J]. *Heliyon*, 2022, 8(4): 09341.
- [68] JU H Y, ZHAO S H, MUJUMDARC A S, et al. Energy efficient improvements in hot air drying bycontrolling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2018, 111: 20-29.
- [69] JANJAI S, PRECOPPE M, LAMLERT N, et al. Thin- layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2011, 89(3): 194-201.
- [70] GÓRNICKI K, WINICZENKO R, KALETA A. Estimation of the Biot number using genetic algorithms: Application for the drying process[J]. *Energies*, 2019, 12(14): 2822.
- [71] BARATI E, ESFAHANI J A. A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(4): 302-309.
- [72] BARATI E, ESFAHANI J A. Mathematical simulation of convective drying: Spatially distributed temperature and moisture in carrot slab[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, 56: 86-94.
- [73] 程新峰, 潘玲, 李宁, 等. 菊芋微波真空干燥过程的水分扩散特性及模型拟合[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(6): 33-40.
- CHENG Xinfeng, PAN Ling, LI Ning, et al. Moisture diffusivity characteristics and model fitting of jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) during microwave vacuum drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(6): 33-40. (in Chinese with English abstract)
- [74] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 269-276.
- ZHANG Weipeng, XIAO Hongwei, GAO Zhenjiang, et al. Improving quality of *Poria cocos* using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(10): 269-276. (in Chinese with English abstract)
- [75] 巨浩羽, 张卫鹏, 张鹏飞, 等. 基于毕渥数的果蔬阶段降湿热风干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 317-324.
- JU Haoyu, ZHANG Weipeng, ZHANG Pengfei, et al. Hot drying characteristics of fruits and vegetables during heat and mass transfer using Biot numbers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(12): 317-324. (in Chinese with English abstract)
- [76] MRKIĆ V, UKRAINCZYK M, TRIPALO B. Applicability of moisture transfer *Bi-Di* correlation for convective drying of broccoli[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79: 640-646.
- [77] DINCER I, HUSSAIN M M. Development of a new *Bi-Di* correlation for solids drying[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 3065-3069.
- [78] CÓRDOVA-QUIROZ A V, RUIZ-CABRERA M A, GARCÍA-ALVARADO M A. Analytical solution of mass transfer equation with interfacial resistance in food drying[J]. *Drying Technology*, 1996, 14: 1815-1826.

Influence of relative humidity on the drying characteristics and quality of fruits and vegetables during constant temperature hot air drying as well as controlling strategy

JU Haoyu¹, ZHANG Weipeng², YU Xianlong³, WANG Qinghui⁴, GAO Zhenjiang⁵, XIAO Hongwei^{5*}

(1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China; 2. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China; 4. Agricultural Mechanization Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, 830091, China; 5. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Drying temperature, air velocity and humidity of drying medium are the three important parameters during hot air drying of fruits and vegetables. Among them, drying temperature and air velocity are positively related to drying efficiency. Relative humidity (RH) is usually used to reflect the size of the humidity or humidity content of the medium at the constant drying temperature and total pressure. However, it is still unclear on the influence mechanism of RH on drying. The manual regulation of relative humidity cannot fully meet the large-scale production, due to the low quality, drying efficiency, and high energy consumption. Therefore, this study aims to clarify the influence and control mechanism of RH on the heat and mass transfer during hot air drying of fruits and vegetables, in order to reduce the emission and loss for energy saving with high efficiency. The drying quality was optimized in the control of RH in four aspects. The low RH was used to increase the mass transfer coefficient and the evaporation of water on the surface of the material. While the high RH was to increase the convective heat transfer coefficient and the heating rate of the material. In the high RH, there was the increase in the temperature rise rate of the material, and the internal water migration, but there was the low evaporation of surface water. In the low RH, there was a low heating rate of the material and the internal water migration, but there was a high evaporation of surface water. As such, there was the coupled influence of RH on the heat and mass transfer. High RH was mainly reflected in the heat transfer, whereas, low RH was in the mass transfer. High RH was used to avoid crust formation on the surface of the material, in order to improve the rehydration for the less shrinkage rate. The honeycomb porous structure was formed and maintained on the surface of the material under the step-down dehumidification and multi-stage dehumidification drying, leading to high drying efficiency and quality. An optimal RH control was achieved using material temperature. The stage dehumidification and drying were attributed to: the relative magnitude of thermal resistance to heat transfer and internal heat conduction, and the relative magnitude of mass transfer resistance and internal mass transfer resistance during drying. The heat and mass transfer resistance depended mainly on the drying conditions, types and thicknesses of materials. The stage dehumidification and drying were suitable for the drying of this material at $Bi_h > 1$ and $Bi_m > 0.1$. The influence mechanism was given on the relative humidity during hot air drying of fruits and vegetables. The finding can also provide the theoretical basis and technical support to the influence and control mode of RH in the hot air drying of fruits and vegetables.

Keywords: drying; relative humidity; heat transfer process; mass transfer process; control strategy; applicability