

孟维岩,尹忠俊,郑秋云,等.低含冰率冰浆预冷甜玉米温度场的数值模拟研究[J].江苏农业科学,2019,47(6):159-162.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.06.036

# 低含冰率冰浆预冷甜玉米温度场的数值模拟研究

孟维岩<sup>1,2</sup>, 尹忠俊<sup>2</sup>, 郑秋云<sup>1,3</sup>, 张信荣<sup>1,3</sup>

(1. 北京大学工学院, 北京 100871; 2. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083;

3. 北京市城市热管理工程技术研究中心, 北京 100871)

**摘要:**冰浆预冷能够迅速去除采后果蔬的田间热,抑制其呼吸热,是农产品采后预冷的新兴方法。预冷过程的核心问题是果蔬内部温度场判断准确性。为了更准确地了解预冷过程中果蔬内部温度场及冰浆流场,以甜玉米为例,利用有限元算法建立物理模型,并通过实际试验验证了物理模型的准确性,进而通过仿真模拟对比甜玉米装箱时不同排列方式对降温速度与均匀度的影响。发现自然对流的驱动力主要为重力,因此竖直方向通畅的排列方式有利于加速冰水对流,从而使甜玉米温度下降速度快且均匀。

**关键词:**采后甜玉米;冰浆预冷处理;蔬菜玉米;排列方式;温度场;对流

**中图分类号:** TS255.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)06-0159-04

大多数农产品在夏季高温时节成熟。由于夏季环境温度较高,采摘后的果蔬会继续进行旺盛且复杂的生命活动,不断消耗自身的营养成分,造成营养流失;同时释放出大量的呼吸热,使自身温度升高,对保存运输不利。抑制这种生命活动最有效、最常用的方法是给果蔬降温。预冷是果蔬降温的第 1 步,目的在于将果蔬温度尽快降至储藏温度,使果蔬的呼吸强度大大减弱,从而延长其储藏时间和货架寿命。

甜玉米别称蔬菜玉米,因其甜、鲜、脆、嫩且营养价值高而深受各阶层消费者青睐。甜玉米含糖量高、呼吸旺盛,只有采后及时预冷处理并低温储存才能最大程度地抑制其品质下降,本研究选取甜玉米作为研究对象。

预冷方法有许多,包括空气预冷法、真空预冷法和水预冷法等,其中速度最快的是水预冷法。水预冷法又分为冷水预冷法和冰水预冷法。冷水流动性好,无相变,因此冷水预冷法均匀性好,但换热效率低;冰水可相变,但流动性差,因此冰水预冷法换热效率高,但均匀性差,且冰块可能会划伤果蔬表面。冰浆预冷法是一种特殊的冰水预冷方法。冰浆是指某类(如盐、醇)水溶液和冰晶粒子的混合物,是一种呈浆状的悬浮流。冰浆中的冰粒子直径为几百个微米,相变吸热快,并且可以避免冰块对果蔬表面的物理损坏,兼具冰水与冷水的优点。甜玉米耐寒,且不存在沾水后易腐的现象,所以适宜采用预冷均匀且速度快的冰浆预冷法。目前,冰浆大多作为载冷剂应用于建筑空调方面,但由于冰浆中的冰粒子相变可吸收大量热量,低浓度盐溶液对蔬菜具有杀菌保绿的功效,且其本身具备流动性,因此,冰浆在蔬菜预冷保鲜方面也有很大的应

用前景。

冷水预冷研究较早,其中 Ferreira 等对比研究了包含冷水预冷在内的几种预冷方法的效果,发现冷水预冷速度最快<sup>[1-2]</sup>;李健等研究了果蔬冰水预冷过程中不同工况对果蔬品质的影响<sup>[3-5]</sup>;冰浆预冷是新兴的预冷方式,Ayel 等从流变模型、流态、黏性、流阻、传热系数等方面研究了冰浆的热物理性质<sup>[6-8]</sup>;Bellas 等研究了冰浆在各行业中的应用,包括食品预冷保鲜方面<sup>[9-10]</sup>。

本研究基于有限元算法建立玉米冰浆预冷模型、模拟预冷过程的流场和温度场,研究摆列方式对预冷过程的影响,为实际生产提供理论依据。

## 1 物理模型的建立

预冷过程是复杂的非稳态降温过程,以对流换热与固体导热为主,其中还掺杂着呼吸热、冰浆相变潜热等物理过程。在试验过程中发现,冰浆含冰率较低时,由于水的浮力作用,冰浆冰水分层严重。冰粒子全部漂浮在表面,形成富冰层,富冰层下几乎没有冰粒子,只是冷水。因此可简化为上边界 0℃ 恒温,其余边界绝热的冷水预冷模型。试验对象为甜玉米,形状可抽象为圆柱,且大小均匀,故简化为如图 1 所示的 2D 模型。图 1 代表边长( $a$ )为 1 m 的方腔容器,内部摆放若干直径( $d$ )为 80 mm 的圆表示甜玉米。方腔上边界为 0℃ 等温边界模拟水面富冰层,其余 3 个边界绝热。模型分为固体域和流体域,固体域以热传导为主,初始温度为 26.85℃;流体域以热对流为主,初始温度为 0℃。

## 2 冰浆预冷数学模型

蔬菜的冰浆预冷是一种复杂的非稳态冷却降温过程,以蔬菜表面对流换热与蔬菜内部导热为主,还有蔬菜呼吸作用产生的呼吸热、热辐射等的影响。根据传热类型可将预冷流场计算分为流体对流换热区和固体导热区。由于预冷时间短且温度低,忽略热辐射影响,对求解问题做出以下假设:(1)玉米简化为大小相同、各向同性的圆柱形,因此可进一步简化

收稿日期:2017-10-09

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2015BAD19B02-04)。

作者简介:孟维岩(1993—),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事果蔬采后预冷方面的研究。E-mail: mwy\_ustb@126.com。

通信作者:张信荣,博士,教授,主要从事可再生热能源的生产、传输、储存、转换、利用研究和建筑、工业过程中的冷热能高效利用研究。

E-mail: xrzhang@pku.edu.cn。

为 2D 模型。(2)玉米的密度、比热及导热系数保持不变,冷水的热物性均为常量。(3)预冷过程为自然对流换热,玉米表面对流换热系数不变。

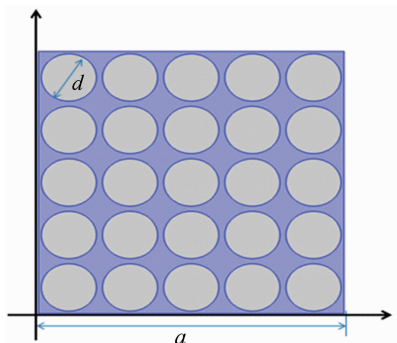


图1 物理模型与坐标系

## 2.1 冰水流域方程

连续性方程:

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \nabla) u = \nabla [-\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F. \quad (2)$$

式中: $u$  为速度,  $\text{m/s}$ ;  $\rho$  为水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $z$  表示水的冲量,  $\text{N} \cdot \text{s}$ ;  $\mu$  为水的动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $F$  为广义源项, 因为水是不可压缩流体, 预冷过程中只须考虑重力作用,

$$F = -\rho g. \quad (3)$$

式中: $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = \rho Q_{vd}; \quad (4)$$

$$q = -d_k \nabla T. \quad (5)$$

式中: $a$  为容器边长,  $\text{m}$ ;  $T$  为水的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k$  为冷水的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $C_p$  为冷水的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $q$  为热通量,  $\text{J/s}$ ;  $Q$  为热源,  $\text{W/m}^3$ 。

## 2.2 固体域方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T_1 + \nabla q = \rho Q + \rho Q_{\text{bio}}; \quad (6)$$

$$q = -dk \nabla T. \quad (7)$$

$$Q_{\text{bio}} = 1.63 \times 10^{-3} K \cdot T \cdot \rho. \quad (8)$$

式中: $d$  为玉米尺寸;  $T_1$  为玉米的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_1$  为玉米的导热系数,  $\text{W}/(\text{mg} \cdot \text{K})$ ;  $C_{p1}$  为玉米的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。  $Q_{\text{bio}}$  为呼吸热;  $K$  为呼吸强度系数。

## 3 温度场的模拟

### 3.1 网格划分

实际情况中,方腔容器与玉米,玉米与玉米之间应相切接触,但这样会造成流体计算域不连通,网格质量差。因此,玉米与容器、玉米与玉米之间均应保留一定的空隙。三角形网格前处理简单,局部网格尺寸好控制,因此采用三角形网格(图2),流体域与固体域边界加密处理。网格质量较好,网格规模 1.5 万个。

### 3.2 结果与分析

#### 3.2.1 呼吸热对单个玉米预冷的影响 蔬菜采后呼吸强度

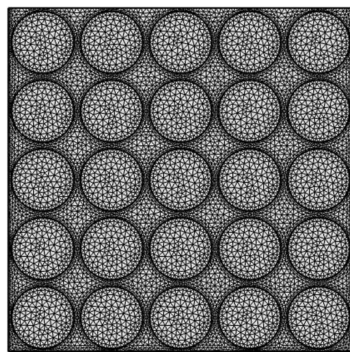


图2 模型网格划分

会随温度变化,以玉米为例,呼吸强度与温度的关系可简化成线性关系<sup>[11]</sup>:

$$M = K T_2. \quad (9)$$

式中: $M$  为呼吸强度,  $\text{mgCO}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ;  $T_2$  为蔬菜温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

根据呼吸化学式<sup>[12]</sup>:



可以计算出呼吸作用每释放出 1 mg  $\text{CO}_2$  的同时释放出 10.67 J 能量,其中 55% 以热能的形式释放,使蔬菜本身温度升高。蔬菜温度升高又促进了呼吸作用,因此可以推导出蔬菜呼吸热内热源与蔬菜温度的关系式:

$$Q_{\text{bio}} = 1.63 \times 10^{-3} K T_2 \rho. \quad (11)$$

式中: $\rho$  为蔬菜密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $T_2$  为蔬菜温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

预冷过程中蔬菜温度降低会抑制呼吸热。建立 2 个物理模型,一个添加呼吸热内热源,一个忽略呼吸热作为对照,其他条件保持一致,分别计算 2 个模型所需的预冷时间。考虑有无呼吸热对预冷时间的影响,计算忽略呼吸热带来的误差,建立一条误差为 5% 的临界曲线。由图 3 可知,根据蔬菜半径与呼吸强度对应在坐标系中的位置,判断蔬菜的呼吸热能否忽略。如果蔬菜半径与呼吸强度对应的坐标位置在曲线的左下方,说明误差小于 5%,呼吸热可忽略;同理,在曲线右上方说明误差大于 5%,呼吸热不可忽略。

本试验研究对象为玉米,半径为 4 cm,呼吸强度系数  $K$  为 15,对应坐标位置处于曲线右上方,因此呼吸热不可忽略。

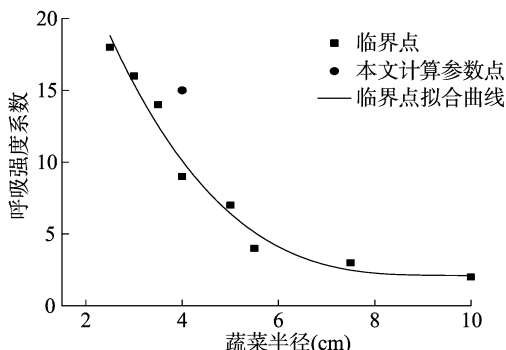


图3 临界呼吸强度与蔬菜半径的关系

3.2.2 对齐排列和错位排列的影响 玉米排列方式决定了整个物理模型的内热源排列方式和流体的对流通道的,从而影响着整个温度场和流场,因此须要对不同排列方式——直排(A1)和错排(A2)的预冷过程进行模拟对比,观察排列方式对预冷效果的影响,对实际生产进行指导。由图 4 可知,从直排和错排 2 种工况模拟结果的温度云图可以看出,由于上边

界富冰层影响,位于上层的玉米的预冷速度较快;冰水的自然对流作用使得方腔内的玉米温度下降不均匀;直排温度场比错排温度场均匀性更好。图 5 为 2 种工况所有玉米中心温度最大值、最小值与平均值随时间的变化曲线。对比直排与错排 2 种工况发现,直排最大值曲线(A1MAX)低于错排最大值曲线(A2MAX);直排最小值曲线(A1MIN)高于错排最小值曲线(A2MIN),说明直排温度场比错排温度场均匀。直排平均值曲线(A1AVE)曲线略高于错排平均值曲线(A2AVE),说明直排降温速度略低于错排。

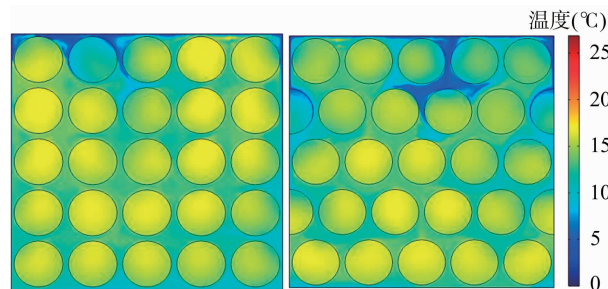


图4 直排与错排温度场对比

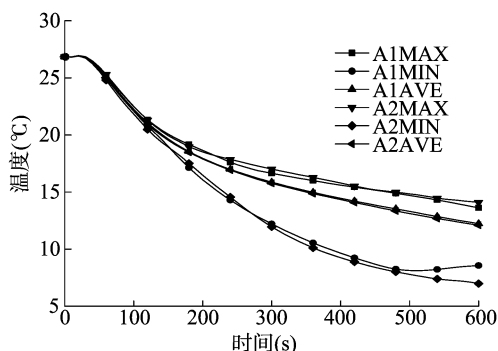


图5 直排与错排预冷速度对比

预冷过程中,除了预冷速度,温度场的均匀性也是衡量预冷效果的重要指标。温度场不均匀,冷量利用不充分,易造成资源浪费,严重时还可能造成局部冻害。温度极值并不能准确地反映整个温度场的均匀性,因此须要检测每个玉米的中心温度随时间的变化趋势,计算数据的离散程度。玉米中心温度平均值随时间变化较大,标准差不能准确反映出数据随时间变化的离散程度,因此引入离散系数。离散系数是一组数据的标准差与其相应的均值之比,反映单位均值上的离散程度,是测度数据离散程度的相对指标,可以用作比较平均值变化时数据的离散程度。离散系数的定义式为

$$CV = \frac{\sigma}{T} \quad (12)$$

式中: $\sigma$  表示玉米中心温度的标准差; $T$  表示玉米中心温度的平均值。

通过计算得到玉米中心温度离散系数随时间的变化曲线,如图 6 所示。

玉米中心温度离散系数整体呈增长趋势,说明玉米在降温过程中,温度场越来越不均匀。直排工况(A1) CV 值始终小于错排工况(A2) CV 值,说明直排比错排更有利于冰水对流,使温度场下降得更均匀。

3.2.3 摆放余量形式的影响 在试验中发现,玉米装箱时不

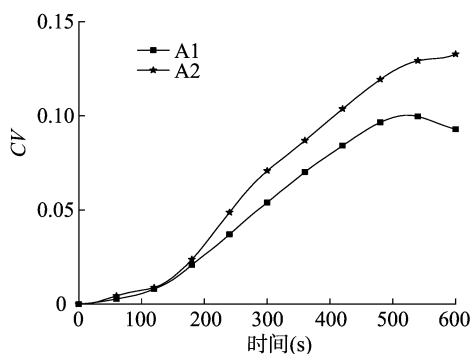


图6 直排与错排预冷均匀性对比

全装满,留有一些余量对整个预冷过程更有利,玉米温度下降速度更快。如果合理利用余量,找到最有利于冰浆对流的玉米排列方式,还可以大大提高预冷时温度场的均匀性。因此,本节讨论了有余量和无余量对预冷效果的差别,还讨论了有余量时 3 种不同的排列方式对预冷效果的差别,对比出最优的排列方式。其中,3 种有余量的排列工况分别为中间留余量工况(B1)、上边留余量工况(B2)、下边留余量工况(B3)。

利用“3.2.2”节所得结果对比玉米装箱时无余量工况(A1、A2)和有余量工况(B1、B2、B3)预冷过程中玉米中心温度平均值随时间的变化曲线。由图 7 可以看出,有余量的 3 种工况(B1、B2、B3)温度下降比无余量的 2 种工况(A1、A2)快,并且 3 种有余量的工况温度下降速度也有较大差异。说明预冷过程中,装箱时给容器内留有一些余量有利于冰水的对流,可以加快预冷速度,不同的排列方式对温度场的均匀性有较大的影响。

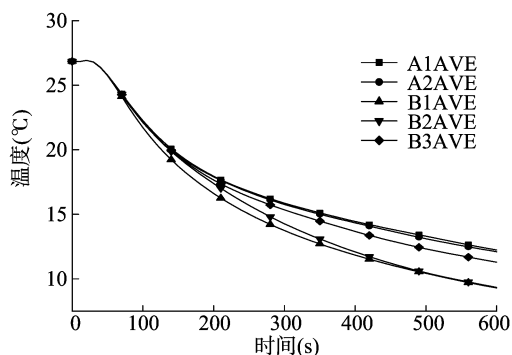


图7 5 种工况预冷速度对比

在玉米总个数不变的情况下,改变排列方式,分别为中间留余量(B1)、上边留余量(B2)和下边留余量(B3)3 种工况,模拟对比温度场与流场的优劣,旨在寻求最佳的排列方式。

从不同工况温度场可以看出,(1)不同的排列方式对预冷效果有很大的影响。其中中间留余量(B1)情况的速度较快且均匀;上边留余量(B2)工况的速度最快但不均匀;下边留余量(B3)的工况均匀但速度慢(图 8)。(2)结合速度云图发现,中间留余量(B1)工况中,中间留白部分形成对流回路,使整个速度场的方向以竖直方向为主,从而使上部温度低、密度高的流体在重力的作用下下降,迫使底部温度高、密度低的流体上升加速对流。而上边留余量(B2)工况对流主要形成在上部留白处,速度方向以水平方向为主,导致温度下降不均匀。而下边留余量(B3)工况对流速度小,没有形成明显的对流回路,因此温度下降最均匀,但降温速度最慢(图 8、图 9)。



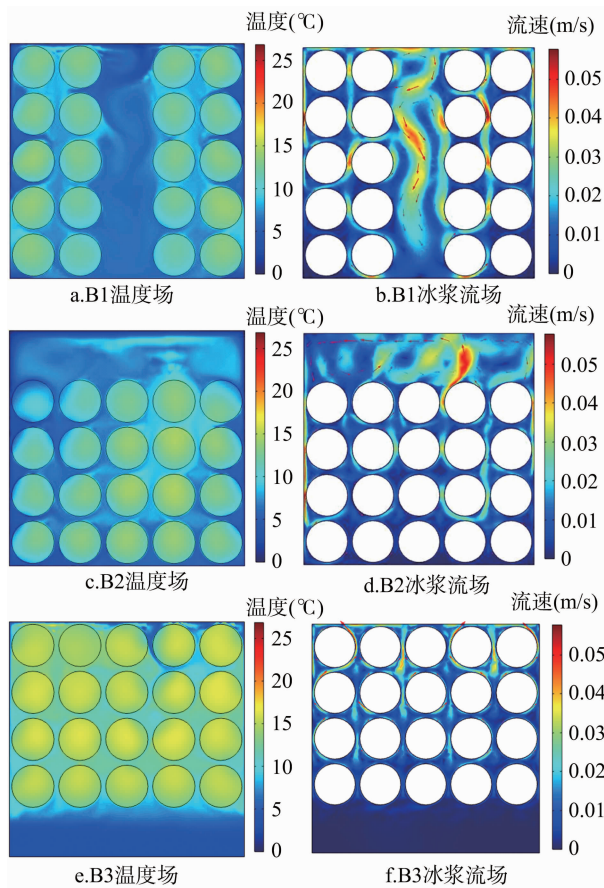


图8 3种不同排列方式温度与速度场对比

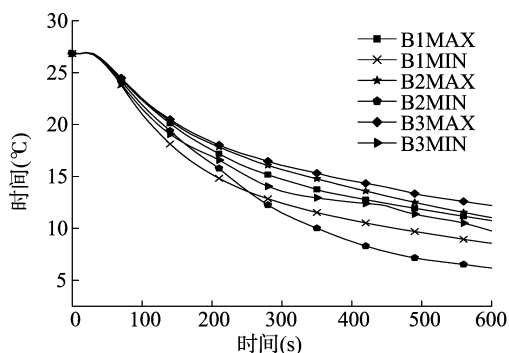


图9 3种不同留白方式预冷速度对比

由图 10 可以看出,总体来看,温度场均匀性是 B3 略优于 B1,远优于 B2。工况 B2 在前 100 s 温度下降比较均匀,150 s 开始 CV 值陡增。而 B1 和 B3 这 2 种工况趋势较为相似,CV 值都是先迅速增加后趋于平缓。

#### 4 结论

本研究结合试验现象建立了低含冰率冰浆预冷甜玉米的物理模型。基于有限元法进行模拟仿真,模拟直排错排 2 种工况的预冷过程,对比 2 种工况温度场与流场随时间的变化情况,发现直排工况有利于冰水对流,预冷均匀度均优于错

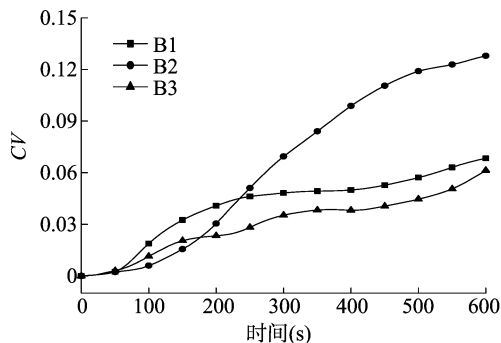


图10 3种不同留白方式预冷均匀性对比

排,预冷速度与错排几乎一致。模拟 3 种有余量的直排排列的预冷过程,对比 3 种工况温度场与流场随时间的变化,发现合理留白有利于预冷过程。综合预冷速度与均匀度考虑发现,中间留余量的工况为最佳排列方式。

#### 参考文献:

- [1] Ferreira M D, Bartz J A, Sargent S A, et al. An assessment of the decay hazard associated with hydro-cooling strawberries[J]. Plant Disease, 1996, 80(10): 1117-1122.
- [2] 阮文璇, 刘宝林, 宋晓燕. 荔枝的冷却方式选择[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 352-353, 362.
- [3] 李健, 王友升, 曹建康, 等. 冷水预冷对芒果贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(16): 314-317.
- [4] Liang Y S, Wongmetha O, Wu P S, et al. Influence of hydrocooling on browning and quality of litchi cultivar Feizixiao during storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 1173-1179.
- [5] 胡花丽, 李鹏霞, 王伟. 预冷方式对李果实呼吸强度、乙烯生成量及贮藏品质的影响[J]. 中西北林学院学报, 2009, 24(2): 80-83.
- [6] Ayel V, Lottin O, Peerhossaini H. Rheology, flow behaviour and heat transfer of ice slurries; a review of the state of the art[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 95-107.
- [7] Kitanovski A, Poredoš A. Concentration distribution and viscosity of ice-slurry in heterogeneous flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(6): 827-835.
- [8] Matsumoto K, Namiki Y, Okada M, et al. Continuous ice slurry formation using a functional fluid for ice storage[J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating & Air Conditioning Engineers, 2004, 27(1): 73-81.
- [9] Bellas I, Tassou S A. Present and future applications of ice slurries[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 115-121.
- [10] Davies T W. Slurry ice as a heat transfer fluid with a large number of application domains[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(1): 108-114.
- [11] 谢玉花, 宋洪波, 刘升, 等. 贮藏温度和薄膜包装袋对甜玉米呼吸强度及品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 282-286.
- [12] 朱向秋. 果蔬呼吸热计算常数的推导和应用[J]. 河北果树, 1996(3): 32-33.