

中间温度带理论在海产品贮藏保鲜中的应用研究进展

Application development and research of intermediate temperature area theory on preservation of seafood products

杨茜^{1,2} 谢晶^{1,2}

YANG Xi^{1,2} XIE Jing^{1,2}

(1. 上海水产品加工与保藏工程中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China;

2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:海产品极易腐败变质,贮藏温度是影响海产品货架期和品质的一个重要因素。 $-4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的中间温度带被广泛研究,其具有抑制有害微生物的生长繁殖,减少海产品的组织破坏和外界损伤,延缓脂质氧化和蛋白质分解等优点。文章综述了中间温度带对海产品感官、微生物、物理和化学品质的影响,以期为中间温度带保鲜贮藏海产品的应用提供理论参考。

关键词:中间温度带;保鲜;海产品;品质

Abstract: Seafood products were easier spoilage than others, storage temperature was an important factor of extending shelf life, maintaining quality. Intermediate temperature area, namely, $-4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ was widely studied, which inhibits breeding of harmful microorganism, reduces tissue destruction and external damage, recedes lipid oxidation and protein degradation. In this article, the influence of intermediate temperature area on sensory, microbiology, physics, and chemistry of seafood products was further explored. The article will provide some important theoretical references for the research on the application of intermediate temperature area storage on the quality of seafood products.

Keywords: intermediate temperature area; preservation; seafood produces; quality

中间温度带是以食品的冰点为中心温度的 $-4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围^[1]。冰温保鲜和微冻保鲜是中间温度带贮藏的两个区域,冰温保鲜(super-chilled)即食品保存在其冰点至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间,以 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右为中心温度的保鲜方法^[2],海产品冰点一般在 $-1.2\sim -2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,如鲳鱼冰点为 $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]、南

美白对虾冰点为 $-2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4];微冻保鲜(partial freezing or superchilling)即食品保存在低于冰点 $0\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度区间,以低于冰点 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为中心温度的部分冷冻保鲜方法^[5,6]。目前海产品在中间温度带的保鲜贮藏应用广泛,研究者对中间温度带贮藏的优越效果做了大量研究,但仍有许多机理未完全说明,对海产品品质的影响及应用也有待深入研究。

1 中间温度带贮藏对海产品感官品质的影响

感官评定是衡量海产品品质的重要指标之一。国外对不同食品进行定量分析并认证,如对鲑鱼的组织形态、气味、风味、质构等进行评定^[7,8],感官评定的评定员均通过国际标准培训^[9,10]。中国国内感官评定依据主要有国家标准如 GB 2733—2005《鲜、冻动物性水产品卫生标准》,行业标准如 SC/T 3101—2010《鲜大黄鱼、冻大黄鱼、鲜小黄鱼、冻小黄鱼》、NY/T 841—2004《绿色食品 鱼》,其中对鱼类感官指标主要通过眼、腮、体表外观、气味、组织形态和肌肉弹性进行评定。海产品腐败变质时,其黏性和酸败味均会逐渐增加,甚至出现褐变、黑斑等,根据海产品的感官性状进行评定打分。

王亮等^[11]通过感官评价员的检出力(感官敏感性)、识别力(等级尺度判断准确性)、记忆力(重复及再现一致性)及表现力(感觉表述精确性)评定冰温贮藏对凡纳滨对虾的熟鲜味(新鲜虾煮熟后的特有香味)、弹性、咀嚼性和纤维致密性的影响。结果表明,冰温贮藏对虾熟鲜味、弹性、咀嚼性虽呈下降趋势,但第 5 天才出现显著差异;其纤维致密性虽在第 3 天差异显著,但第 5 天时感官仍可接受。Sivertsvik 等^[12]研究微冻贮藏结合气调包装对大西洋鲑鱼品质的影响,感官指标数据显示,在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 微冻条件下的鲑鱼,无论有无气调包装,感官货架期均可达 21 d,而 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏对照组 7 d

基金项目:国家“十二五”支撑计划课题(编号:2013BAD19B06);上海市农委项目[编号:沪农科攻字(2013)第 3-4 字]

作者简介:杨茜(1989—),女,上海海洋大学在读硕士研究生。

E-mail: mickeyxiaoxixi@126.com

通讯作者:谢晶

收稿日期:2015-02-01

后气味异常,发生腐败。Beaufort 等^[13]研究-2℃微冻条件下鲑鱼的感官性质,微冻的鱼肉在2~3周内粉色加深、酸味稍升但鱼肉的质地、风味影响很小。不少研究者^[14,15]研究得出微冻对海产品感官品质的降低影响很小。可见中间温度带贮藏一定程度上可减缓海产品感官品质的下降,保持海产品较好的感官品质。

2 中间温度带贮藏对海产品的微生物变化的影响

海产品腐败变质的主要原因之一是体内腐败微生物所引起的物理、化学变化。海产品贮藏的冰温区间时,水分子的有序排列导致自由水可利用度降低^[16];而贮藏在微冻区间时,部分自由水被冻结也降低了微生物的利用,因此,海产品贮藏在中间温度带中均会抑制腐败微生物的生长繁殖。

李蕾蕾等^[17]得出虾蛄在冷藏、冰温、冻藏条件下,随着贮藏时间延长,3个试验组的细菌总数均不断增加,其中冻藏<冰温<冷藏,冷藏货架期仅2 d(7.25 lg CFU/g),冰温货架期为6 d(6.75 lg CFU/g)。Zeng 等^[18]研究不同冷却方式和贮藏温度对北极虾的质量变化,将北极虾存放于保藏箱中,每个保藏箱分别用不同冷却方式与虾均匀放置(碎冰与虾比例为1.5:1、液冰与虾比例为2.9:1),装好后将保藏箱分别放在(1.5±0.4)、(-1.5±0.4)℃的环境中贮藏,结果显示北极虾的细菌总数增长速度为:(1.5±0.4)℃环境中碎冰贮藏>(1.5±0.4)℃环境中液冰贮藏>(-1.5±0.4)℃环境中液冰贮藏,结果表明处于(-1.5±0.4)℃中间温度带贮藏对微生物的生长抑制的效果较(1.5±0.4)℃冷却贮藏的强。Lauzon 等^[19]研究在0,-2℃下,以(2.5±1.0)% NaCl 浸渍、气调(CO₂:O₂:N₂=50:5:45)方式处理鲑鱼,测定鲑鱼中含磷发光杆菌的生长情况,结果得出:4周后,含磷发光杆菌在0℃条件下均生长较快,而在-2℃微冻条件下的微生物生长数量最低。Hansen 等^[20]研究微冻对鲑鱼微生物的影响中,得出的结果与 Lauzon 等的^[19]相似,21~28 d 内,微冻处理后的鱼片均比冷藏处理后的细菌总数低。

3 中间温度带贮藏对海产品汁液流失情况的影响

冰温能保持海产品较好的细胞完整性,维持细胞活体状态,使海产品的组织结构损伤小,由于冰温区间未达海产品冰点,海产品内的自由水未结晶。当温度稍降至微冻区间时,部分细胞的自由水开始形成冰晶,且微冻速度变快,排热越快,从而迅速形成大量小型晶核,导致细胞内外生成大量小冰晶^[21,22]。微冻贮藏时冰晶尺寸的增加会破坏细胞壁,造成机械损伤,使细胞破裂,导致品质变化,增加解冻时的汁液流失,降低持水力及其他与细胞结构有关的质量参数^[23]。

海产品的汁液流失会导致营养流失,因为海产品的汁液中含大量水溶性蛋白质。且微冻过程中,海产品比陆生动物的蛋白质更易分解^[24]。Bahuaud 等^[25]研究得出肌纤维破损

会引起汁液流失。Duun 等^[5]研究表明盐溶蛋白的减少同样会导致汁液流失率的增加,鲑鱼-2.2℃微冻贮藏15 d 时汁液流失率(不高于总重1.5%)要比冷冻组的(高于总重5%)低,且微冻结合真空包装可使鲑鱼的货架期延长至49 d。

海产品的持水力与其质构成分有紧密联系,持水力的降低是由于肌丝晶格收缩,肌球蛋白变性,胞外空间增加,肌肉结构变化引起的^[26]。Erikson 等^[27]研究微冻贮藏对鱼片品质的影响发现,微冻组在第11天后有显著下降(P<0.05),但对蛋白质网状结构影响很小。Kaale 等^[23]进一步研究发现,大西洋鲑鱼微冻贮藏21 d 前持水力和汁液流失的变化与 Erikson 等^[27]研究一致,但21 d 开始,微冻贮藏的鱼片汁液流失率显著下降,这可能与微冻贮藏时冰结晶的再结晶过程有紧密联系。

4 中间温度带贮藏对海产品化学品质变化的影响

4.1 中间温度带贮藏对鲜度的影响

目前测定海产品鲜度指标主要有K值、三甲胺(TMA-N)、挥发性盐基氮(TVB-N)等。K值是次黄嘌呤核苷和次黄嘌呤之和与腺苷三磷酸及其分解物总量之比的百分率;TMA-N是由氧化三甲胺在微生物和酶的作用下还原形成的;TVB-N由氨基酸、核苷酸分解代谢物等含氮化合物通过微生物降解形成的氨、甲胺、二甲胺、三甲胺所组成。

杨胜平等^[16]研究K值与温度变化的曲线显示,K值与温度变化的关系曲线不连续,且在冰点附近的温度区间,曲线出现弯折,说明在冰点附近的K值有较大变化。Wang 等^[28]通过冰温结合气调延长鲑鱼片的货架期,以(1.5±0.2)℃为对照组,数据显示,0~3 d 内各组均无显著变化;对照组6 d 后TMA-N曲线迅速上升,冰温组TMA-N含量在贮藏期间均小于对照组;12 d 时,冰温组TMA-N含量仅为20 mg/100 g,冰温结合气调包装组的TMA-N含量更低(接近于零)。Pineiro 等^[15]以0.5℃冰藏为对照,研究了一1.5℃流化冰微冻试验组对养殖大菱鲆的品质影响发现,2组鱼片10 d 时TMA-N含量差异不大,但试验组的K值(20.6)较对照组的K值(40.7)明显偏低;17 d 时,试验组TMA-N含量和K值(0.81 mg/kg 和45.0)均比对照组(3.47 mg/kg 和60.7)低,试验表明大菱鲆经-1.5℃流化冰微冻贮藏能减缓TMA-N、K值的增加。

Olafsdottir 等^[29]研究微冻及温度波动对鲑鱼品质影响中显示,以TVB-N含量确定鲑鱼货架期:0℃冰藏的货架期仅13 d,而-1.5℃微冻的货架期可长达15 d。Múgica 等^[30]研究得出3 d 内,0.75℃薄冰片冷藏与-0.75℃贮藏处理的鱼片TVB-N含量无显著差异且均未上升;3~8 d 内,0.75℃冷藏的TVB-N上升较快,结果表明-0.75℃贮藏较0.75℃冷藏对TVB-N的抑制更有效。周娟娟等^[31]研究冰藏、冰温结合气调对南美白对虾品质的影响,结果显示冰藏组的TVB-N均高于其他组别,冰藏结合气调虽比冰藏组含量

低,但仍高于冰温组、冰温结合气调组,以二级鲜度(TVB-N=30 mg N/100 g)为货架期标准;冰温组的货架期为 6 d,冰温结合真空组为 10 d,冰温结合气调组为 12 d。以上研究成果均表明中间温度带贮藏下的海产品能在一定程度上保持鲜度,且中间温度带结合其他技术对海产品的保鲜效果更显著。

4.2 中间温度带贮藏对脂质氧化的影响

自动氧化和酶水解是导致脂肪氧化的主要原因。海产品中大量的不饱和脂肪酸^[32],致其更易自动氧化。测定脂肪氧化程度常用硫代巴比妥酸法(TBA)。Losada 等^[33]以碎冰贮藏做对照组,−1.5℃流化冰处理竹荚鱼测定 TBA 含量,数据显示各试验组在 0~2 d 的 TBA 含量均较低且相似;第 2 天开始,碎冰处理组曲线上升速度较流化冰的快;2~19 d 内流化冰试验组含量均低于碎冰处理组,结果表明,−1.5℃流化冰能减缓竹荚鱼中 TBA 活性物质的形成。Duy 等^[34]研究 3,−2℃对北极嘉鱼的 TBA 影响,测定结果得出,TBA 含量最初均为 1.9 μmol/kg;13 d 时各试验组的 TBA 含量出现差异,其中−2℃试验组的 TBA 含量最低(6 μmol/kg)。

TBA 是测定脂肪氧化过程中二次氧化产物的指示剂,但二次氧化产物可能会进一步发生反应,所以研究者们不仅通过测 TBA 含量评估海产品品质,还通过测定其他指标对脂肪氧化进行分析。色泽变化的主要原因除脂肪氧化以外,还有色素的影响,脂肪二次氧化产物在中间温度带贮藏过程中与氨基酸、蛋白质、磷脂、DNA 等含氮化合物反应,形成对人体有害的褐色素和荧光化合物^[35]。胡烨^[36]研究冰温保鲜对大黄鱼色度 *a*, *b*, *L* 的变化,冷藏、冰温等处理条件对 *a* 值的变化均不明显,这是由于大黄鱼鱼肉偏白,无血色;*b* 值在冷藏、冰温中均略有上升,其中冷藏组上升较冰温组明显,说明冰温对脂肪氧化的抑制效果较好。

4.3 中间温度带贮藏对蛋白质水解氧化的影响

海产品在中间温度带贮藏期间的蛋白质结构会发生改变,蛋白质发生水解氧化,破坏肌球蛋白的完整性,影响肌原纤维蛋白的性质,其中肌原纤维蛋白的稳定性直接影响水产品品质^[37]。测定蛋白质的指标有肌原纤维蛋白、α-葡萄糖苷酶活性、组织蛋白酶 B+L 含量等。Gallart-Jornet 等^[38]通过测定细胞组织液中的溶酶体酶——α-葡萄糖苷酶活性研究蛋白质水解氧化情况得出,大西洋鲑鱼在−1℃冰温条件下 16 d 内不会破坏溶酶体细胞。

组织蛋白酶的降低表明溶酶体膜破裂,释放水解蛋白酶水解鱼肉^[25],因此测定组织蛋白酶的含量也是有效评估蛋白质水解氧化的方法。微冻较冷藏能加速释放组织蛋白酶,这是由于微冻产生的冰晶体会破坏上层肌纤维,加速蛋白酶释放,从而引起鱼肉腐败^[25]。但 Duun 等^[39]研究显示−1.4℃和−3.6℃均不影响组织蛋白酶 B+L 总活性。有关中间温度带与蛋白质分解的关系仍是目前研究者深入研究的内容。

5 总结与展望

海产品在中间温度带贮藏的优点已逐渐被研究者所认可。中间温度带:①可抑制有害微生物的生长繁殖,降低海产品的腐败变质;②与冻藏相比,可减少海产品组织破坏和外界损伤;③可抑制脂质氧化,降低蛋白酶活性,减少蛋白质分解;④中间温度带一定程度上可提高品质和延长货架期。但不可忽视的是:①中间温度带中冰温区间太小,而海产品在微冻区间时会造成冷冻损伤,形成内外冰晶。加速微冻会加大肌纤维间距,增加肌纤维破裂^[40];②中间温度带的温度波动不能较大。较大的温度波动在微冻条件下会加快冰晶的形成速度;温度上升时,小冰晶融化的速度比大冰晶快;当温度又下降时,小冰晶再结晶从而形成更大的晶体^[21],对鱼肉品质造成不可逆的破坏。对于冰晶与海产品品质之间的关系,冰晶再结晶的形成原理、过程、抑制等仍有待解明。随着研究者对中间温度带保鲜贮藏的深层次研究,中间温度带结合其他技术(流化冰、超高压、抗氧化生物薄膜等)也将成为发展趋势。

参考文献

1 Huss H H. Quality and quality changes in fresh fish[M]. FAO Fisheries Technical Paper. Rome: Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), 1995.

2 山根昭美. 冰温贮藏的科学[M]. 东京:日本农山渔村文化协会出版,1996.

3 施建兵,谢晶,高志立,等. 臭氧水浸渍后冰温贮藏提高鲳鱼块的保鲜品质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 274~279.

4 周娟娟,马海霞,李来好,等. 无硫复合保鲜剂结合冰温气调保鲜南美白对虾[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 204~208.

5 Duun A S, Rustad T. Quality changes during superchilled storage of cod(*Gadus morhua*) fillets[J]. Food Chemistry, 2007, 105(3): 1 067~1 107.

6 Ingrid C Claussen. Superchilling concepts enabling safe, high quality and long term storage of foods[J]. Procedia Food Science, 2011(1): 1 907~1 909.

7 Stone J L H Sidel. Sensory evaluation practices[M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.

8 Martinsdottir E. Sensory analysis for food and beverage quality control[M]. Abington: Woodhead Publishing, 2010.

9 ISO. ISO 8586—1993 Sensory analysis—general guidance for selection, training and monitoring of assessors[S]. Geneva, Switzerland: The International Organization for Standardization, 1993.

10 ISO. ISO 13299—2003 Sensory analysis—methodology - general guidance for establishing a sensory profile[S]. Geneva, Switzerland: The International Organization for Standardization, 2003.

11 王亮,曾名湧,董士远,等. 凡纳滨对虾在冰温贮藏下品质特征的评价[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(1/2): 71~79.

12 Sivertsvik M, Rosnes J T, Kleiberg G H. Effect of modified atmosphere packaging and superchilled storage on the microbial and sensory quality of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets[J].

Journal of Food Science, 2003, 68(4): 1 467~1 472.

13 Beaufort A, Cardinal M, Le-Bail A, et al. The effects of super-chilled storage at −2 °C on the microbiological and organoleptic properties of cold-smoked salmon before retail display[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32 (7): 1 850~1 857.

14 Rodnríguez O, Losada V, Aubourg S, et al. Enhanced shelf-life of chilled European hake (Merluccius merluccius) stored in slurry ice as determined by sensory analysis and assessment of microbiological activity[J]. Food Research International, 2004, 37 (8): 749~757.

15 Pineiro C, Bautista R, Rodriguez O, et al. Quality retention during the chilled distribution of farmed turbot (Psetta maxima): effect of a primary slurry ice treatment[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2005(40): 817~824.

16 杨胜平,谢晶. 冰温结合生物保鲜剂技术在水产品保鲜中的应用[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10 664~10 666.

17 李蕾蕾,任怡然,王素英. 虾蛄在低温贮藏过程中的细菌菌相分析[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 331~335.

18 Zeng Qing-zhu, Thorarinsdottir K A, Olafsdottir G. Quality changes of shrimp (Pandalus borealis) stored under different cooling conditions[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(7): 459~466.

19 Lauzon H, Magnusson H, Sveinsdóttir K, et al. Effect of brining, modified atmosphere packaging and superchilling on the shelf life of cod (Gadus morhua) loins[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(6): 258~267.

20 Hansen A A, Mørkøre T, Rudi K, et al. The combined effect of superchilling and modified atmosphere packaging using CO₂ emitter on quality during chilled storage of pre-rigor salmon fillets (Salmo salar) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(10): 1 625~1 633.

21 Kaale L D, Eikevik T M, Bardal T, et al. The effect of cooling rates on the ice crystal growth in air-packed salmon fillets during superchilling and superchilled storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(1): 110~119.

22 Kaale L D, Eikevik T M, Rustad T, et al. Ice crystal development in pre-rigor Atlantic salmon fillets during superchilling process and following storage[J]. Food Control, 2013, 31(2): 491~498.

23 Kaale D L, Eikevik T M, Rustad T, et al. Changes in water holding capacity and drip loss of Atlantic salmon(Salmo salar) muscle during superchilled storage[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 55(2): 528~535.

24 Benjakul S, Visessanguan W. Impacts of freezing and frozen storage on quality changes of seafoods[M]. Devahastin S(Ed.). London: Physicochemical Aspects of Food Engineering and Processing, 2010.

25 Bahuaud D, Mørkøre T, Langsrud Ø, et al. Effects of −1.5 °C Super-chilling on quality of Atlantic salmon (Salmo salar) pre-rigor Fillets: Cathepsin activity, muscle histology, texture and liquid leakage[J]. Food Chemistry, 2008, 111(2): 329~339.

26 Duun A S. Superchilling of muscle food storage stability and quality aspects of salmon (Salmo salar), cod (Gadus morhua) and pork (Doctoral theses)[M]. Trondheim: Dep. Biotechnology, NTNU, 2008.

27 Erikson U, Misimi E, Gallart-Jornet L. Superchilling of rested Atlantic salmon: Different chilling strategies and effects on fish and fillet quality[J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1 427~1 437.

28 Wang T, Sveinsdóttir K, Magnússon H, et al. Combined application of modified atmosphere packaging (MAP) and superchilling storage to extend the shelf life of fresh cod (Gadus morhua) loins[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(1): 11~19.

29 Olafsdottir G, Lauzon H L, Martinsdottir E, et al. Evaluation of shelf life of superchilled cod(Gadus morhua) fillets and the influence of temperature fluctuations during storage on microbial and chemical quality indicators[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(2): 97~109.

30 Múgica B, Barros-Velázquez J, Miranda J M, et al. Evaluation of a slurry ice system for the commercialization of ray (Raja clavata): Effects on spoilage mechanisms directly affecting quality loss and shelf-life[J]. LWT - Food Science and Technology, 2008, 41(6): 974~981.

31 周娟娟,马海霞,李来好. 南美白对虾冰温气调保鲜效果评价[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 332~336.

32 Lee C H, Krueger C G, Reed J D, et al. Inhibition of hemoglobin-mediated lipid oxidation in washed fish muscle by cranberry components[J]. Food Chemistry, 2006, 99(3): 591~599.

33 Losada V, Pineiro C, Barros-Velazquez J, et al. Inhibition of chemical changes related to freshness loss during storage of horse mackerel (Trachurus trachurus) in slurry ice[J]. Food Chemistry, 2005, 93(4): 619~625.

34 Duy B H N, Arason S, Thórarinsdóttir K A. Effects of dry ice and superchilling on quality and shelf life of Arctic charr (Salvelinus alpinus) fillets[J]. International Journal of Food Engineering, 2007,3(3): 1~27.

35 Kubow S. Routes of formation and toxic consequences of lipid oxidation products in foods[J]. Free Radical Biology and Medicine, 1992, 12(1): 63~81.

36 胡烨. 大黄鱼冰温保藏关键技术研究及应用[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2013.

37 Rodríguez O, Barros-Velazquez J, Pineiro C, et al. Effects of storage in slurry ice on the microbial, chemical and sensory quality and on the shelf life of farmed turbot(Psetta maxima) [J]. Food Chemistry, 2006, 95(2): 270~278.

38 Gallart-Jornet L, Rustad T, Barat J M, et al. Effect of superchilled storage on the freshness and salting behavior of Atlantic salmon(Salmo salar) fillets[J]. Food Chemistry, 2007, 103 (4): 1 268~1 281.

39 Duun A S, Rustad T. Quality of super-chilled vacuum packed Atlantic salmon (Salmosalar) fillets stored at −1.4 and −3.6 °C[J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 122~131.

40 Kaale L D, Eikevik T M, Rustad T, et al. Superchilling of food; a review[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 141~146.