pH 和温度对 8 种甜味剂甜味释放特征的影响

韩仁娇[1,2]，卞金梅[3]，王彩云[1,2]，何 剑[1,2]，SUN Peiwen[1,2]，
杨吉武[1,2]，云战友[1,2]，钟 芳[3]，夏熠珣[*3]

（1. 内蒙古乳业技术研究院有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010110；2. 内蒙古伊利实业集团股份有限公司，内蒙古 呼和浩特 010110；3. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122）

摘要：为探究 pH 和温度对 8 种不同甜味剂（蔗糖、果葡糖浆、麦芽糖醇、山梨糖醇、低聚果糖、甜菊糖苷 00、甜菊糖苷 07 和甜菊糖苷 14）甜味动态释放特征的影响规律，先通过成对比较法、量值估计法和单因素方差分析，确定了在常温中性条件下，与 5 g/dL 蔗糖甜度相等的其他 7 种甜味剂质量浓度。进一步通过时间-强度法（time-intensity）描绘了 8 种甜味剂在常温中性（25 ℃、pH 7.0）、常温酸性（25 ℃、pH 4.5）和低温中性（4 ℃、pH 7.0）3 种条件下的甜味动态释放特征。结果表明，对于大部分样品而言，酸性和低温条件均会降低最大甜味强度，其中，酸性条件对果葡糖浆和甜菊糖苷类样品的降低效果高于低温条件，而对于糖醇类、蔗糖和低聚果糖等样品，低温条件降低效果更显著。此外，各样品的整体甜味持续时间也受到酸性和低温条件的抑制而缩短，且低温条件影响更显著。因此，酸性或低温条件都会抑制不同甜味剂的甜味释放强度或释放时间，但影响程度不同；相比而言，3 种条件下，在甜味动态释放特征及变化趋势上，与蔗糖的表现最为接近的是山梨糖醇，其次是果葡糖浆和低聚果糖。

关键词：时间-强度法；甜味剂；甜味动态释放特征；pH；温度

中图分类号：TS 202.3；TS 241 **文章编号：**1673-1689（2023）05-0001-11 **DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.05.001

Effect of pH and Temperature on Sweetness Profiles of Eight Sweeteners

HAN Renjiao[1,2]，*BIAN Jinmei*[3]，*WANG Caiyun*[1,2]，*HE Jian*[1,2]，*SUN Peiwen*[1,2]，
YANG Jiwu[1,2]，*YUN Zhanyou*[1,2]，*ZHONG Fang*[3]，*XIA Yixun*[*3]

（1. Inner Mongolia Research Center of Diary Technology Co.，Ltd.，Hohhot 010110，China；2. Inner Mongolia Yili Industrial Group Co.，Ltd.，Hohhot 010110，China；3. School of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122 ，China）

Abstract：In order to explore the impact of pH and temperature on the temporal sweetness profiles of eight different sweeteners (sucrose, fructose syrup, maltitol, sorbitol, fructooligosaccharide, steviol glycoside 00, steviol glycoside 07 and steviol glycoside 14), this study first determined the concentration of the other seven sweeteners that had equivalent sweetness as 5 g/dL sucrose under neutral conditions at room temperature through paired comparison test, magnitude estimation method and single factor variance analysis. Further, the time-intensity method was used to describe the

收稿日期：2021-11-15

基金项目：国家自然科学基金项目（32001628）；江苏省青年基金项目（BK20200596）；江南大学未来食品中心基本科研项目（JUSRP52029A）。

作者简介：韩仁娇（1986—），女，高级工程师，主要从事乳品深加工以及乳制品开发研究。E-mail：hanrenjiao@yili.com

*** 通信作者：**夏熠珣（1987—），女，博士，副研究员，主要从事感官分析及消费者洞察研究。E-mail：yixun.xia@jiangnan.edu.cn

temporal sweetness profiles of eight sweeteners under three conditions including room-temperature-neutral (25 ℃, pH 7.0), room-temperature-acidic (25 ℃, pH 4.5) and low-temperature-neutral (4 ℃, pH 7.0). It was found that both acidity and low temperature could decrease the maximum sweetness intensity for most of the samples. Acidic conditions had a significantly higher reduction effect on fructose syrup and steviol glycoside samples than low-temperature conditions, while low-temperature conditions had a more significant reduction effect on sugar alcohols, sucrose and fructooligosaccharide. In addition, the overall sweetness duration of each sample was also inhibited and shortened under acidic and low-temperature conditions, with a more significant impact from low-temperature conditions. Therefore, acidic or low-temperature conditions could both inhibit the sweetness release intensity or release time of different sweeteners, but to varying degrees. Overall, in terms of temporal sweetness profiles and change trends under the three conditions, the closest performance to sucrose was sorbitol, followed by fructose syrup and fructooligosaccharide.

Keywords: time-intensity method, sweeteners, temporal sweetness profiles, pH,temperature

越来越多的研究表明食品中添加的蔗糖与血糖升高、肥胖、Ⅱ型糖尿病和心血管疾病有关[1],无热量高倍甜味剂和低热量糖醇等逐渐受到青睐。甜味剂,即赋予食品甜味的物质,通过结合甜味受体T1R2和T1R3而激发甜味[2]。根据甜味剂的营养价值和甜味效力(即相对甜度)分为营养型甜味剂和非营养型甜味剂[3]。营养型甜味剂包括糖类和糖醇类等,糖类如麦芽糖浆、果葡糖浆等,可提供较多能量,血糖指数高;糖醇类热量较低,甜味上也略逊于蔗糖;非营养型甜味剂有天然和人工之分,其中天然甜味剂甜菊糖苷近年来受到食品行业广泛推广,是甜菊糖和四环二萜的混合物,但由于其存在苦味、涩味和甜味持久低等缺陷应用受到限制[4]。

目前,甜味剂的应用主要集中在糖果、风味饮料和乳品行业[4-7],覆盖了酸性和中性、常温和低温等食品体系,应用范围广。根据研究报道,不同的应用条件可能会影响不同甜味剂的感官特征。Yoshinaka等通过向三氯蔗糖溶液添加琥珀酸以及盐类物质,掩盖其异味,但同时也发现琥珀酸等的添加对于溶液的甜味特征及甜度等产生影响[8]。而在对添加不同甜味剂的巧克力牛奶饮料的研究中发现,随着饮料温度升高,添加三氯蔗糖和甜菊糖苷样品的甜度略有降低,但随着样品成分发生变化,这种温度的影响并没有显著规律[9]。可见,由于口腔中神经细胞的热敏感性[10],食物温度对基本味觉也会产生影响,但对于不同甜味剂类型以及不同应用条件,目前的报道中并没有非常明确的总结[11]。因此,系统地设置不同pH和温度组合条件,对具有代表性的甜味剂进行分析非常有必要。此外,目前关于pH和温度对于不同甜味剂的影响主要集中在静态强度的评估[12],或者在某一特定的产品中进行分析,而对于基本的水溶液体系中不同甜味剂的甜味动态释放特征并没有相关的研究报道。因此,本研究中设计了3种常见的食品体系所存在的应用条件:常温中性(25 ℃、pH 7.0)、常温酸性(25 ℃、pH 4.5)和低温中性(4 ℃、pH 7.0),对8种不同甜味剂的甜味动态释放特征进行探究。

关于甜味剂的甜味动态释放特征研究,目前最常见的评估方法是时间-强度法(time-intensity,TI),可以表征待测样品在时间维度上单一或多个属性的强度变化[13-14],已广泛应用在不同食品体系中关于甜味剂样品的筛选上。Andrade等采用TI评估添加不同量神秘果的柠檬水甜味和酸味强度的动态变化规律[5];Sousa等也采用相同的方法评估了添加不同甜味剂的罗望子功能饮料的甜味、酸味等6个属性指标的动态特征[10]。

为了有效地对甜味剂甜味动态释放特征进行评估,通过前期研究筛选了整体异味少、甜味特征接近蔗糖的7种甜味剂,分别为果葡糖浆、麦芽糖醇、山梨糖醇、低聚果糖、甜菊糖苷00、甜菊糖苷07和甜菊糖苷14,通过一系列感官评估方法,确定在常温中性条件下与5 g/dL蔗糖等甜的各甜味剂添加质量浓度,再通过时间-强度法采集样品在不同条件下的甜味动态表现,依此揭示pH和温度对各

甜味剂的甜味动态释放特征的影响规律，并对其机制进行了探讨，为甜味剂在不同食品体系中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

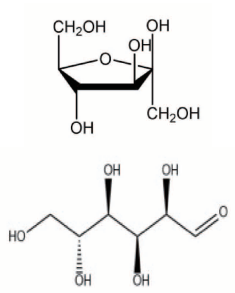
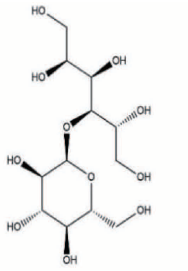
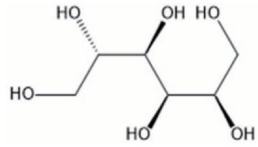
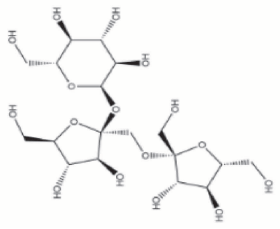
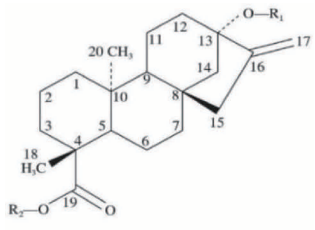
营养型甜味剂（蔗糖、果葡糖浆、麦芽糖醇、山梨糖醇）、非营养型甜味剂（甜菊糖苷 00（73.30% Reb A，18.05% Reb D）、甜菊糖苷 07（58.54% Reb D，33.91% Reb A）、甜菊糖苷 14（86.35% Reb M，6.5% Reb D））：内蒙古乳业技术研究院有限责任公司提供；无水柠檬酸：河南中泰食化有限公司产品；纯净水：无锡江大文化教育服务有限公司产品。常温样品和酸性条件样品均在当天配制，室温 25 ℃；酸性样品需添加无水柠檬酸，至 pH 4.5；低温样品则在评价前 1 d 完成配制并放入 4 ℃冰箱冷藏，储存时间保持为 20 h。

1.2 实验方法

1.2.1 样品等甜质量浓度确定 通过查阅文献[15]可以大致确定所给甜味剂的甜度比（见表 1）。首先，在

表 1 营养型甜味剂和非营养型甜味剂的相关信息

Table 1 Information about nutritive sweeteners and non-nutritive sweeteners

名称	结构	类型	甜度比
果葡糖浆（葡萄糖和果糖混合物）		天然营养型甜味剂（糖类）	0.75
麦芽糖醇		人工营养型甜味剂（糖醇类）	0.50~0.90
山梨糖醇		人工营养型甜味剂（糖醇类）	0.60
低聚果糖（果糖基接至蔗糖上生成的蔗果三糖等的混合物）		天然营养型甜味剂（糖类）	0.30
甜菊糖苷		天然非营养型甜味剂	200.00~250.00

常温(25 ℃)条件下,以质量浓度为 5 g/dL 的蔗糖溶液作为参照样,在所给 7 种甜味剂中以甜度比为参考,配制一系列质量浓度的样品。先通过成对比较法[16]选出与参照样相近的各甜味剂质量浓度,再通过量值估计法[17]调整到一个准确质量浓度,确保经过 ANOVA 分析(analysis of variance,方差分析)后,该质量浓度的甜味剂甜度打分与蔗糖参照样的甜度打分无显著差异。该蔗糖质量浓度与甜味剂质量浓度的比值即为甜味剂的相对甜度。

1.2.2 时间-强度曲线绘制 本研究中采用 SensoMaker 1.92 软件采集时间-强度数据[18],评价员打开软件后进入如图 1 所示界面。每个样品均在 60 s 内评估完成,点击开始按钮,鼠标置于▮,从 0 s(绿色)开始饮用样品,并在标尺上拖动,0 表示无感知,10 表示对属性的极端感知,5 s 后吞咽,甜味消失时,光标拖回至 0。60 s 计时完毕后,自动生成的文件记录每秒的瞬时甜度且自动取整,最终得到一条关于样品甜度随时间变化的曲线,即时间-强度曲线[5]。

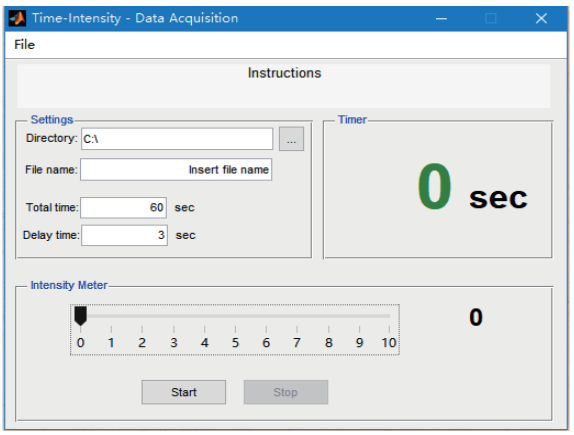


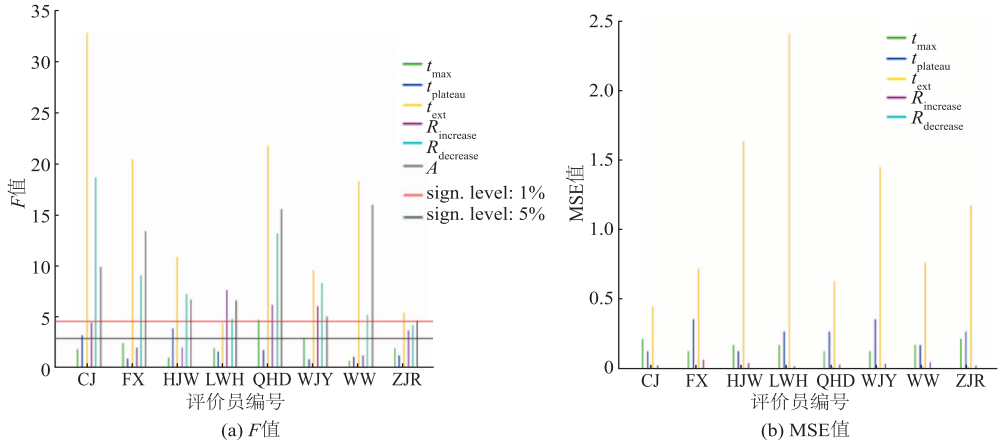
图 1 SensoMaker 1.92 软件测试界面

Fig. 1 Test screen of SensoMaker 1.92 Software

1.3 评价小组的建立

经问卷调查,在江南大学感官评价员报名人员中筛选出 80 名对甜味剂饮料感兴趣且有一定消费习惯的学生(17~21 岁),再通过基本味识别和三角检验等测试筛选灵敏度较高的候选人[19],进一步考核语言表达能力,最终招募了一组评价员(女性 11 人,男性 1 人)。

小组组建后,前期经过约 50 h 的培训,目的是提高评价员甜味识别和强度评分的能力以及使用 SensoMaker 1.92 软件绘制甜味时间-强度曲线的熟练度,培训后,选择表现较好的 8 位评价员数据。通过 PanelCheck V1.4.2 对评价员进行评估,如图 2 所示,该评价小组 F 值在重点参数(t_{ext}、$R_{increase}$、$R_{decrease}$ 和 A)上均超过 5%显著性水平,说明区分能力较强;重复性除了 A 值的 MSE 值略高,其他参数MSE 值大多稳定在 1.0 以下,表示重复性较好。



(a) F值 (b) MSE值

t_{max} 为达到最大甜度所需要的时间,s;$t_{plateau}$ 为最大甜度持续时间,s;t_{ext} 为甜味消失(持续)时间,s;$R_{increase}$ 为上升曲线的拟合直线斜率;$R_{decrease}$ 为下降曲线的拟合直线斜率;A 为整条曲线与 x 轴围成的面积(整体感知甜度)。

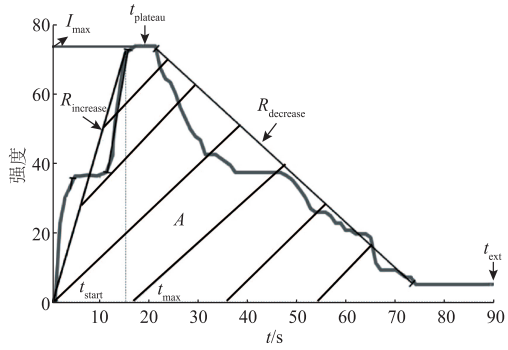
图 2 评价员培训结果

Fig. 2 Results of sensory panel training

测评中,评价员被依次提供 10 杯不同编码的样品,每个样品饮用 15 mL,5 s 后吞咽,两个样品间要注意使用纯净水和苏打饼干对口腔进行充分的清洁,并确保样品间有 5 min 的时间间隔,每个样品重复 2 次。

1.4 时间–强度曲线动态分析

时间–强度的动态分析主要使用 XLSTAT 2019.2.2 处理。首先，在确定甜味剂等甜质量浓度时采用方差分析；其次，通过 XLSTAT 2019.2.2 将不同评价员对不同样品的甜味动态评价结果进行处理，作出时间–强度曲线（见图 3）。各曲线参数经由主成分分析（PCA 分析）和聚类分析（AHC 分析）确定每个样品或一类样品的动态表现。



I_{max} 为最大甜味强度；t_{start} 为甜味开始时间，s。

图 3 典型时间–强度曲线及示意点

Fig. 3 Typical time–intensity curve and schematic points

2 结果与分析

2.1 样品等甜质量浓度及相对甜度的确定

经由成对比较法和量值估计法，确定常温条件下与 5 g/dL 蔗糖溶液甜味相当的其他甜味剂质量浓度，再通过蔗糖质量浓度与甜味剂质量浓度的比值求得相对甜度。其他 7 种甜味剂根据等甜质量浓度由低到高分别是：甜菊糖苷 14 质量浓度为 0.018 g/dL，相对甜度为 277.78；甜菊糖苷 00 和 07 质量浓度为 0.025 g/dL，相对甜度为 200.00；果葡糖浆质量浓度为 9.300 g/dL，相对甜度为 0.54；山梨糖醇质量浓度为 9.500 g/dL，相对甜度为 0.53；麦芽糖醇质量浓度为 12.000 g/dL，相对甜度为 0.42；低聚果糖质量浓度为 17.000 g/dL，相对甜度为 0.29。果葡糖浆、麦芽糖醇和山梨糖醇相对甜度相似，均为蔗糖一半左右，低聚果糖相对甜度最低，甜菊糖苷类样品相对甜度为 200.00~300.00，根据 ANOVA 显著性差异分析，在对应质量浓度下各甜味剂甜味打分无显著差异，即满足等甜，结果如表 2 所示。

表 2 甜味剂的等甜质量浓度和相对甜度测定表

Table 2 Determination of equi–sweet mass concentration and relative sweetness of sweeteners

甜味剂种类	质量浓度/(g/dL)	相对甜度	甜味打分
蔗糖	5.000	1.00	7.400±0.771 [a]
果葡糖浆	9.300	0.54	7.250±0.783 [a]
麦芽糖醇	12.000	0.42	7.500±0.577 [a]
山梨糖醇	9.500	0.53	7.423±0.703 [a]
低聚果糖	17.000	0.29	6.769±0.525 [a]
甜菊糖苷 00	0.025	200.00	7.206±0.969 [a]
甜菊糖苷 07	0.025	200.00	7.107±0.594 [a]
甜菊糖苷 14	0.018	277.78	7.406±1.083 [a]

注：表中甜味打分值右上角为相同字母表示该属性无显著差异（$P > 0.05$），且分值越高，代表甜度越大。

2.2 不同甜味剂在各体系的时间–强度曲线分析

根据所得等甜质量浓度配制各甜味剂溶液，根据要求配制 3 种体系溶液，评价员品尝并作图，收集原始数据并通过 XLSTAT 2019.2.2 进行分析，得出蔗糖和 7 种甜味剂溶液在不同体系中的动态拟合曲线（见图 4）及曲线对应的各参数值（见表 3）。

根据表 3 和图 4(a)可以发现，常温中性条件下，蔗糖起甜最快，达到最大甜度所需要的时间（t_{max}）最短，且根据 A 值可知，甜味消失干净，无甜味持久等不良特征。图 4(b)和图 4(d)中果葡糖浆和山梨糖醇甜味持续时间较短且起甜较快；而图 4(c)和图 4(e)表示麦芽糖醇和低聚果糖甜味较饱满，持续时间较长。甜菊糖苷类样品较难消散，这可能是因为糖基化萜类化合物比低相对分子质量甜味剂在与甜味受体 T1R2 和 T1R3 结合时可结合位点更多[20]；此外，甜菊糖苷 00 和 07 起甜较慢，而甜菊糖苷 14 起甜较快，猜想 Reb D 和 Reb M 的 C13 位上葡萄糖基较多，与甜味受体的氢键作用较大，进入空间

较大的活性位点区并产生更多刺激。

从图 4 可以看出,常温酸性条件会抑制大部分甜味剂的最大甜味强度(I_{max},P<0.05),其中,果葡糖浆受到的影响最大,I_{max} 从 9.85 下降到 8.26,降低了 16.14%;麦芽糖醇、低聚果糖、甜菊糖苷 00 和甜菊糖苷 14 的 I_{max} 也显著降低(P<0.05),其余样品无显著变化(P>0.05)。这与 Schiffman 等的研究相似,从 pH 7.0 到 pH 4.0,蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨糖醇的甜度都呈下降趋势[12]。虽然本研究中各样品在 pH 4.5 条件下酸味并不明显,但 Tan 等认为当甜味与酸味形成鲜明对比时,总体甜味强度会降低,同时释放其他异味而影响产品的整体风味[21]。其次,比起中性条件,酸性条件下甜味持续时间普遍缩减,甜菊糖苷类样品表现得更加明显(P<0.05),同时,整体感知甜度 A 值与 t_{ext} 呈正相关(除了蔗糖),酸性条件下样品的 A 值减小,即整体感知甜度[22]降低。此

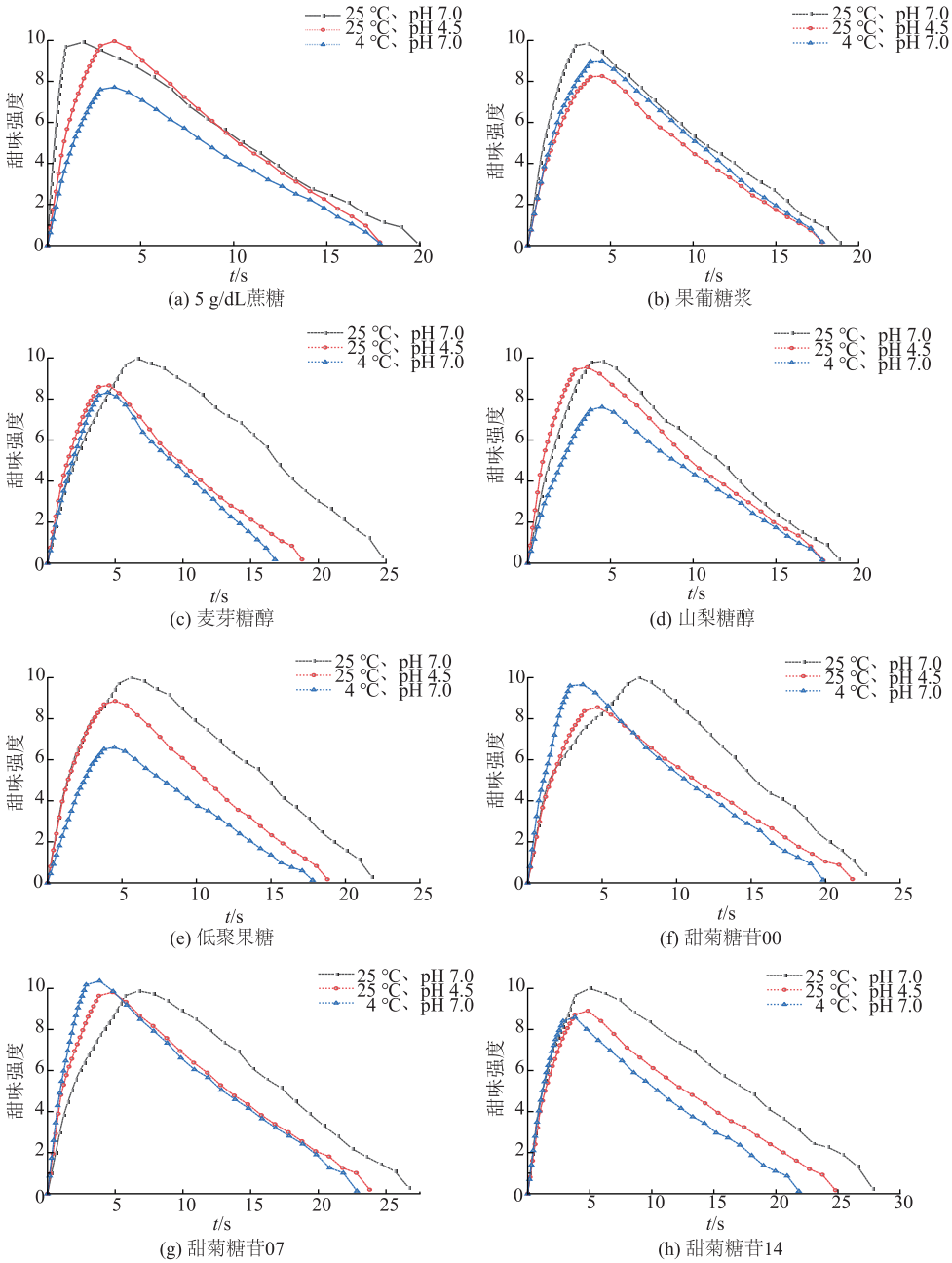


图 4　不同甜味剂在各体系时间–强度曲线

Fig. 4　Time–intensity curve of different sweeteners in each system

外，蔗糖、果葡糖浆等糖类物质在酸性条件下 t_{max} 增大，起甜速度减慢；而糖醇类和甜菊糖苷类物质的 t_{max} 减小，即起甜速度加快，但 $R_{increase}$ 不存在显著差异（P>0.05）。这些现象的发生可能是由于柠檬酸水解的 H^+改变了甜味分子与受体的结合数量和位置[23]，导致酸性条件下解吸量增加，分子与受体结合较弱，使得整体甜味持续时间变短、强度变弱。而对于甜菊糖苷类样品，可能是由于酸刺激后，口腔环境变化引起唾液形成胶束球和叠覆的网状格，减少对呈味分子的包裹量，从而促进了最大甜度的提前到达，但对于蔗糖则没有这些影响。

类似地，与常温酸性条件下一致，在低温中性条件下，大部分甜味剂 I_{max} 呈下降趋势，其中，低聚果糖的 I_{max} 从 10.00 降低到 6.61，降低了 33.90%；蔗糖、麦芽糖醇、山梨糖醇、低聚果糖和甜菊糖苷 14 的 I_{max} 均显著性降低（P<0.05），其余样品无显著变化（P>0.05），可以看出，相比高倍甜味剂，填充型甜味剂的 I_{max} 随温度降低而明显下降。Talavera 等表示甜味强度随温度升高而提高是因为瞬态受体电位通道 TRPM5 的热激活，激活后诱导味觉受体细胞的去极化，反过来导致甜味刺激向味觉传入纤维的传递更强[24]。8 种甜味剂的甜味持续时间和整体感知甜度同样呈现缩短和降低的趋势，低温条件可以使口腔中感受到的苦味和异味减少[25]，甜苦味下降，因此造成评价员对甜味感知时间缩减。t_{max} 和 $R_{increase}$ 两个参数的变化受到低温条件的影响与酸性条件基本保持一致，对于糖类和糖醇类等营养型甜味剂，t_{max} 增大，相当于起甜速度减慢；对于甜菊糖苷类

表 3　不同甜味剂在各体系时间–强度曲线各参数值

Table 3　Parameter values of the time–intensity curve of different sweeteners in each system

样品	参数	I_{max}	t_{max}/s	$t_{plateau}$/s	t_{ext}/s	$R_{increase}$	$R_{decrease}$	A
蔗糖	25 ℃、pH 7.0	9.91^{a}	1.90^{b}	2.85^{a}	19.95^{a}	9.85^{a}	-0.56^{a}	771.2^{a}
	25 ℃、pH 4.5	9.97^{a}	3.65^{a}	2.55^{b}	18.85^{a}	3.38^{b}	-0.65^{a}	964.05^{a}
	4 ℃、pH 7.0	7.72^{b}	3.60^{a}	2.40^{b}	17.85^{a}	2.65^{c}	-0.55^{a}	731.48^{b}
果葡糖浆	25 ℃、pH 7.0	9.85^{a}	3.65^{b}	2.55^{a}	18.85^{a}	3.40^{a}	-0.63^{a}	939.37^{a}
	25 ℃、pH 4.5	8.26^{b}	4.50^{a}	2.50^{a}	17.80^{a}	2.23^{c}	-0.62^{a}	819.49^{b}
	4 ℃、pH 7.0	8.96^{ab}	4.50^{a}	2.30^{a}	17.80^{a}	2.34^{b}	-0.66^{a}	940.52^{a}
麦芽糖醇	25 ℃、pH 7.0	9.97^{a}	6.65^{a}	3.80^{a}	24.70^{a}	1.62^{a}	-0.58^{a}	$1\ 627.51^{a}$
	25 ℃、pH 4.5	8.66^{b}	4.55^{b}	2.45^{b}	18.80^{b}	2.24^{a}	-0.59^{a}	888.55^{b}
	4 ℃、pH 7.0	8.32^{b}	4.45^{b}	2.15^{b}	16.80^{b}	2.16^{a}	-0.68^{a}	836.85^{b}
山梨糖醇	25 ℃、pH 7.0	9.84^{a}	4.55^{a}	2.45^{a}	18.80^{a}	2.57^{a}	-0.69^{b}	$1\ 044.13^{a}$
	25 ℃、pH 4.5	9.55^{a}	3.60^{b}	2.40^{a}	17.85^{a}	3.26^{a}	-0.67^{b}	887.38^{a}
	4 ℃、pH 7.0	7.60^{b}	4.50^{a}	2.30^{a}	17.80^{a}	1.96^{b}	-0.56^{a}	791.97^{b}
低聚果糖	25 ℃、pH 7.0	10.00^{a}	5.60^{a}	2.55^{a}	21.75^{a}	1.92^{ab}	-0.63^{b}	$1\ 470.29^{a}$
	25 ℃、pH 4.5	8.87^{b}	4.55^{b}	2.45^{b}	18.80^{b}	2.26^{a}	-0.63^{b}	964.07^{b}
	4 ℃、pH 7.0	6.61^{c}	4.50^{b}	2.30^{b}	17.80^{b}	1.73^{b}	-0.49^{a}	682.29^{b}
甜菊糖苷 00	25 ℃、pH 7.0	10.00^{a}	7.45^{a}	2.40^{a}	22.65^{a}	1.32^{a}	-0.65^{b}	$1\ 711.48^{a}$
	25 ℃、pH 4.5	8.56^{b}	4.70^{b}	2.90^{a}	21.80^{ab}	2.18^{a}	-0.49^{a}	990.63^{b}
	4 ℃、pH 7.0	9.66^{ab}	3.70^{b}	2.70^{a}	19.85^{b}	3.34^{a}	-0.59^{b}	927.49^{b}
甜菊糖苷 07	25 ℃、pH 7.0	9.88^{a}	6.75^{a}	4.20^{a}	26.70^{a}	1.60^{a}	-0.51^{a}	$1\ 619.68^{a}$
	25 ℃、pH 4.5	9.82^{a}	4.80^{ab}	3.20^{a}	23.80^{b}	2.47^{a}	-0.50^{a}	$1\ 204.49^{ab}$
	4 ℃、pH 7.0	10.37^{a}	3.85^{b}	3.15^{a}	22.85^{b}	3.54^{a}	-0.53^{b}	$1\ 122.50^{b}$
甜菊糖苷 14	25 ℃、pH 7.0	10.00^{a}	5.00^{a}	3.60^{a}	27.80^{a}	2.41^{a}	-0.45^{a}	$1\ 571.33^{a}$
	25 ℃、pH 4.5	8.91^{b}	4.85^{b}	2.30^{b}	24.80^{b}	2.26^{a}	-0.44^{a}	$1\ 170.81^{b}$
	4 ℃、pH 7.0	8.60^{b}	3.80^{b}	2.05^{b}	21.85^{b}	2.93^{a}	-0.46^{a}	931.21^{b}

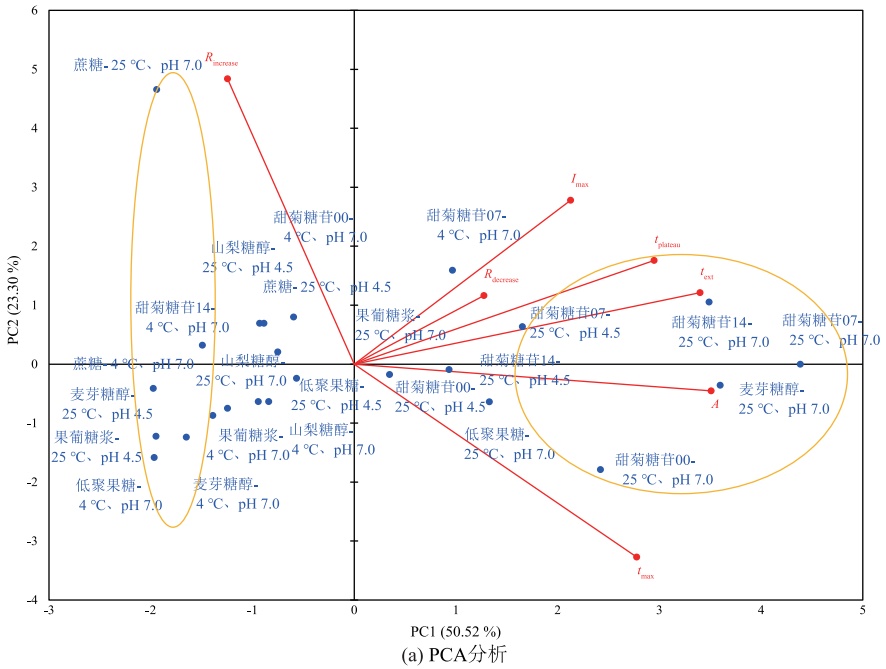
注：表中数值右上角字母不同表示在显著性水平（P<0.05）下，该样品在不同条件下的参数差异显著。

非营养型甜味剂,t_{max} 减小，即起甜速度加快,但 $R_{increase}$ 不存在显著差异(P>0.05)。

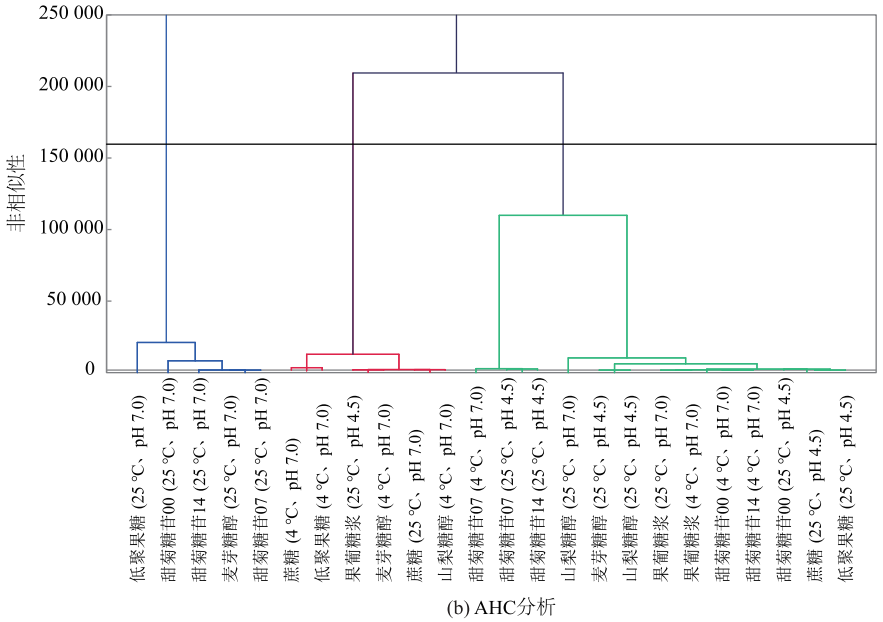
在最大甜味强度方面,果葡糖浆和甜菊糖苷类样品在酸性条件比低温条件中下降更明显,而糖醇类、蔗糖和低聚果糖在低温条件比酸性条件中降低更明显;同时,综合 7 种甜味剂 t_{ext} 和 A 值,比起酸性条件,低温条件在更大程度上减少了甜味持续时间和整体感知甜度。整体而言,不同物质的甜味特征受不同因素的影响程度存在差异。

2.3 不同甜味剂在 3 种条件下的分类

为了更有效地呈现 3 种条件下 8 种甜味剂的甜味动态释放特征分布,针对各甜味剂的动态甜味表征结果进行了 PCA 分析和 AHC 分析(见图 5)。主成分分析通过降维分析,体现样品与各属性特征



(a) PCA分析



(b) AHC分析

图 5　3 种条件下各甜味剂感官动态参数

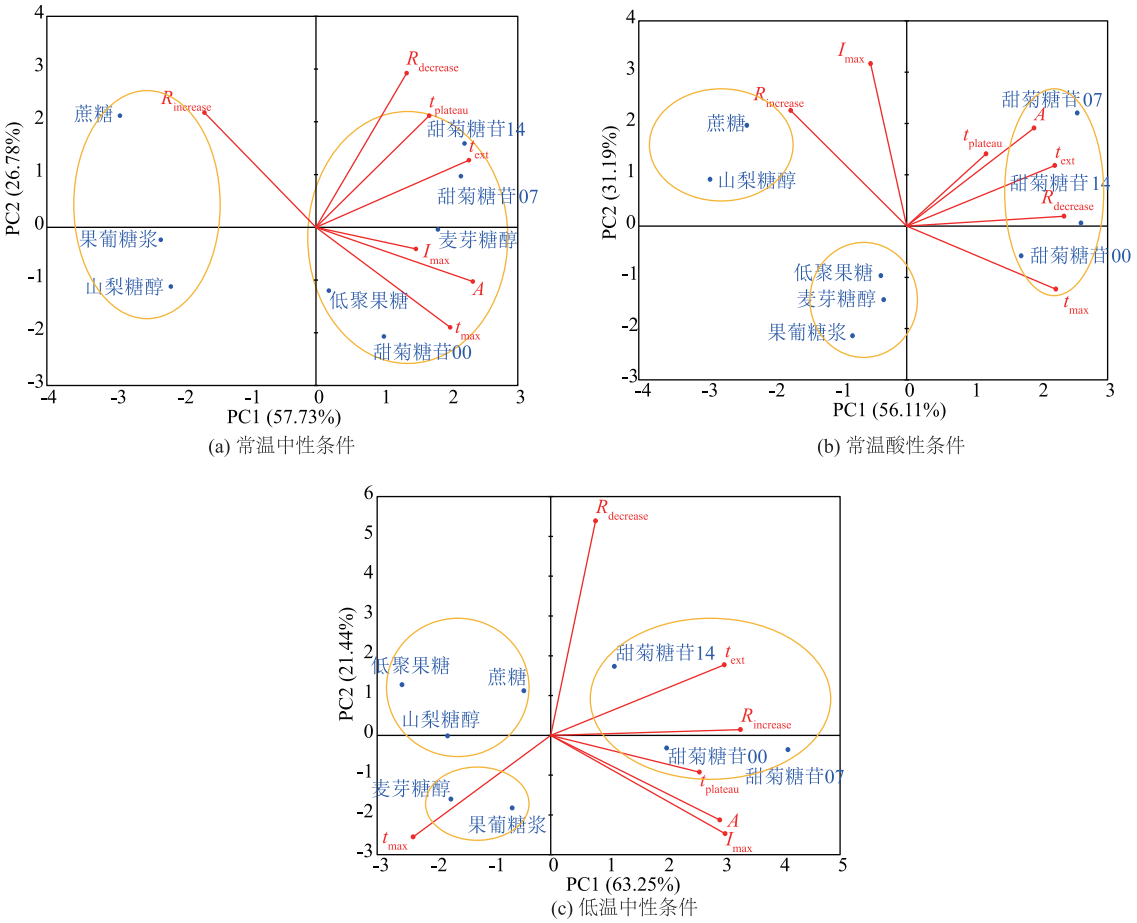
Fig. 5　Sensory temporal parameters of each sweetener under three conditions

（动态释放参数）之间的相关性。通过主成分分析图（见图 5(a)）可以看出，前两个主成分累计提取总方差的 73.82%，第一主成分 PC1（50.52%）解释了 $t_{plateau}$、t_{ext} 和 A，第二主成分 PC2(23.30%)主要解释了 $R_{increase}$。结合聚类分析可以看出低温和酸性条件都减少了麦芽糖醇、山梨糖醇、低聚果糖和甜菊糖苷类样品的甜味持续时间，且低温条件的影响更显著；对蔗糖和果葡糖浆而言，在低温中性和常温中性条件下整体感知甜度相近，尽管前者在常温酸性条件下整体感知甜度较大，后者相反，但仍被划分为一类。

进一步分别对 3 种条件下不同样品间的特征分布进行 PCA 分析。根据图 6(a)可知，常温中性条件下，第一主成分 PC1(57.73%)解释了 t_{ext} 和 A，第二主成分 PC2(26.78%)解释了 $R_{increase}$，发现与蔗糖相近的样品为果葡糖浆和山梨糖醇，起甜快、甜味持续时间短；而其他样品，尤其是甜菊糖苷类样品表现出起甜慢和甜味持续时间较长的特点。与 Tan 等研究的结果相似，高倍甜味剂与蔗糖动态特征差别较大，而葡萄糖、果糖和麦芽糖醇较为接近[26]。

根据图 6(b)可知，常温酸性条件下，第一主成分 PC1(56.11%)解释了 $R_{decrease}$、t_{ext} 和 A，第二主成分 PC2(31.19%)解释了 I_{max} 和 $R_{increase}$，可以看出甜菊糖苷类样品因为甜味持续时间较长且酸性条件对最大甜味强度抑制效果相似分为一组，而蔗糖和山梨糖醇因为起甜速度快且最大甜味强度未受到酸性条件影响可分为一组。Bulbul 等关于不同 pH 条件下甜味剂在口腔吸附的研究中发现，蔗糖的吸附率随 pH 升高而轻微上升，而 Reb A 则为下降，但整体吸附量并没有随 pH 产生显著的变化[27]，所以本实验中蔗糖和甜菊糖苷类样品在最大甜味强度和甜味持续时间上受到的影响较小。

根据图 6(c)可知，低温中性条件下，第一主成分 PC1(63.25%)解释了 $R_{increase}$、t_{ext} 和 A，第二主成分 PC2(21.44%)解释了 $R_{decrease}$，负方向解释了 t_{max} 和



(a) 常温中性条件　(b) 常温酸性条件　(c) 低温中性条件

图 6　不同条件下各甜味剂感官动态参数 PCA 分析

Fig. 6　PCA analysis of sensory temporal parameters of each sweetener under different conditions

I_{max},蔗糖、山梨糖醇和低聚果糖最大甜味强度相近,甜菊糖苷类样品的甜味持续时间较长而分为一组,这可能是因为甜菊糖苷本身甜苦味较重,持续时间较长。

综上,可以发现无论是酸性条件还是低温条件,与蔗糖甜味动态释放特征最接近的是山梨糖醇,甜菊糖苷类样品因为甜味持续时间整体较长而在3种条件下均为一组,因此不具备与蔗糖动态描述相似的特点。果葡糖浆虽然在常温中性条件下与蔗糖动态特征相似,然而在常温酸性和低温中性条件下与蔗糖相差较远;相反,低聚果糖在常温中性条件下的动态特征表现较差,但在另两种条件下表现较优,与蔗糖相似。虽然目前研究中涉及的样品数量有限,但也足以反映不同条件下对甜味剂的选择,不仅需要进行静态强度分析,动态评估也是判断甜味剂是否适合的重要参考依据。

3 结 语

作者通过对蔗糖和7种甜味剂在常温中性、常温酸性和低温中性3种条件下时间-强度曲线的绘制,描述营养型和非营养型甜味剂的甜味动态释放特征,考虑动态特征有助于选择更加优良的代糖。主要从最大甜味强度、甜味持续时间和起甜速度来分析,发现在最大甜味强度方面,酸性和低温条件整体呈现能够降低最大甜味强度的特征,对于不同甜味剂种类,两种条件效果不同;在甜味持续时间方面,酸性和低温条件都能够抑制甜味持续时间,低温更显著,但甜菊糖苷类样品的甜味持续时间在各条件下依旧较长;且可以发现,在3种条件下7种甜味剂中,与蔗糖最相似的是山梨糖醇。通过成对比较法和量值估计法的常见方法思路得出各甜味剂等甜质量浓度,同时反映了不同条件下各甜味剂的动态表现,为酸性和低温条件下甜味剂的选择提供了一定的参考,后期可以通过扩大样本量,将各样品按类别进行扩充,为甜味剂甜味动态释放特征分布数据库的构建和不同应用体系中甜味剂的选择提供参考。

参考文献:

[1] FITCH C,KEIM K S. Position of the academy of nutrition and dietetics:use of nutritive and nonnutritive sweeteners[J]. **Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics**,2012,112(5):739-758.

[2] GREMBECKA M. Sugar alcohols-their role in the modern world of sweeteners:a review[J]. **European Food Research and Technology**,2015,241(1):1-14.

[3] MOUILLOT T,PARISE A,GRECO C,et al. Differential cerebral gustatory responses to sucrose,aspartame,and stevia using gustatory evoked potentials in humans[J]. **Nutrients**,2020,12(2):322-337.

[4] KUMAR M D,RUSSELL K,GIE L D,et al. Sugar reduction in dairy food:an overview with flavoured milk as an example[J]. **Foods**,2020,9(10):1400-1434.

[5] ANDRADE A C,MARTINS M B,RODRIGUES J F,et al. Effect of different quantities of miracle fruit on sour and bitter beverages[J]. **LWT-Food Science and Technology**,2019,99:89-97.

[6] CADENA R S,BOLIN H M A. Time-intensity analysis and acceptance test for traditional and light vanilla ice cream[J]. **Food Research International**,2011,44(3):677-683.

[7] MORAIS F J M,AZEVEDO B M,DRUMMOND E S F G,et al. Isosweetness concentrations of sucrose and high-intensity sweeteners and antioxidant activity in white chocolate with functional properties[J]. **International Journal of Food Science and Technology**,2016,51(9):2114-2122.

[8] YOSHINAKA K,TOKUMURA T. Method for ameliorating taste quality of high-sweetness sweetener:JP2010279350[P]. 2010-03-24.

[9] PAIXAO J A,RODRIGUES J B,ESMERINO E A,et al. Influence of temperature and fat content on ideal sucrose concentration,sweetening power,and sweetness equivalence of different sweeteners in chocolate milk beverage[J]. **Journal of Dairy Science**,2014,97(12):7344-7353.

[10] SOUSA L R,CAZELATTO D M A,ANDRE B H M. Sucrose replacement:a sensory profile and time-intensity analysis of a tamarind functional beverage with artificial and natural non-nutritive sweeteners[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2021,101(2):593-602.

[11] SHALLENBERGER R S，ACREE T E. Molecular structure and sweet taste[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，1969，17(4)：701-703.
[12] SCHIFFMAN S S，SATTELY-MILLE E A，GRAHAM B G，et al. Effect of temperature，pH，and ions on sweet taste[J]. **Physiology & Behavior**，2000，68(4)：469-481.
[13] LAWLESS H T，HEYMANN H. Sensory evaluation of food[M]. 2th ed. New York：Springer-Verlag，2010：179-180.
[14] LIU Y H，MACFIE H J H. Methods for averaging time-intensity curves[J]. **Chemical Senses**，1990，15(4)：471-484.
[15] 万会达，李丹，夏咏梅. 甜菊糖苷类物质的功能性研究进展[J]. 食品科学，2015，36(17)：264-269.
[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 感官分析方法　成对比较检验：GB/T 12310—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2012：24.
[17] 中国标准化研究院，中国农业大学动物科技学院，中国肉类食品综合研究中心，等. 感官分析 方法学　量值估计法：GB/T 19547—2004[S]. 北京：中国标准出版社，2004：24.
[18] MARQUES P A C M，NUNES C A，VIETORIS V. SensoMaker：a tool for sensorial characterization of food products[J]. **Ciência e Agrotecnologia**，2013，37(3)：199-201.
[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则：第 1 部分 优选评价员：GB/T 16291.1—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2012：24.
[20] ACEVEDO W，RAMIREZ-SARMIENTO C A，AGOSIN E. Identifying the interactions between natural，non-caloric sweeteners and the human sweet receptor by molecular docking[J]. **Food Chemistry**，2018，264：164-171.
[21] TAN V W K，WEE M S M，TOMIC O，et al. Rate-all-that-apply（RATA）comparison of taste profiles for different sweeteners in black tea，chocolate milk，and natural yogurt[J]. **Journal of Food Science**，2020，85(2)：486-492.
[22] NUNES N M，COELHO Y L，CASTRO J S，et al. Naringenin-lactoferrin binding：impact on naringenin bitterness and thermodynamic characterization of the complex[J]. **Food Chemistry**，2020，331：127337-127351.
[23] LYALL V，ALAM R I，MALIK S A，et al. Basolateral Na^{+}-H^{+} exchanger-1 in rat taste receptor cells is involved in neural adaptation to acidic stimuli[J]. **Journal of Physiology**，2004，556(1)：159-173.
[24] TALAVERA K，NINOMIYA Y，WINKEL C，et al. Influence of temperature on taste perception[J]. **Cellular and Molecular Life Sciences**，2007，64(4)：377-381.
[25] BRAGION D M D L，BOLINI H M A. Is the edulcorate power of two intense sweeteners sucralose and stevia same in ice cream and frozen desserts?[J]. **British Food Journal**，2019，121(12)：3321-3337.
[26] TAN V W K，WEE M S M，TOMIC O，et al. Temporal sweetness and side tastes profiles of 16 sweeteners using temporal check-all-that-apply(TCATA)[J]. **Food Research International**，2019，121：39-47.
[27] BULBUL G，CELLI G B，ZAFERANI M，et al. Quantitative comparison of adsorption and desorption of commonly used sweeteners in the oral cavity[J]. **Food Chemistry**，2019，271：577-580.