

侯楚璇, 苏德智, 冯秀静, 等. 甘蔗汁中絮凝物产生的影响因素 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 50–56. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060002

HOU Chuxuan, SU Dezhi, FENG Xiujing, et al. Study on the Influencing Factors of Floc in Sugarcane Juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 50–56. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060002

· 研究与探讨 ·

甘蔗汁中絮凝物产生的影响因素

侯楚璇¹, 苏德智², 冯秀静³, 张昆华^{4,5,*}, 陆海勤¹, 李 凯^{1,5}

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004;

2. 广西宁明东亚糖业有限公司, 广西宁明 532501;

3. 崇左幼儿师范高等专科学校, 广西崇左 532200;

4. 许昌市建安区第一高级中学, 河南许昌 461111;

5. 广西大学, 糖业及综合利用教育部工程研究中心, 广西南宁 530004)

摘要:为了解决甘蔗汁絮凝物沉淀引起的饮料浑浊问题, 以甘蔗汁为原料, 对膜滤后的甘蔗清汁中影响絮凝物生成的因素进行了研究。通过控制温度、pH 来研究二者对絮凝物产生的影响, 并对絮凝物中蛋白质、总糖、灰分等成分进行分析, 利用傅里叶红外光谱和扫描电镜能谱仪观测絮凝物官能团结构和组成元素。研究发现, 温度对生成絮凝物的影响较小。絮凝物的产量随 pH 的升高而增加, 推断氢氧根会促进甘蔗汁中絮凝物的产生。傅里叶红外光谱结果表明, 絮凝物主要由多糖、蛋白质以及灰分等物质构成。通过能谱分析电子扫描和红外扫描可以看出, 絮凝物中含有铁、钙、磷、硅、锰等无机离子。说明在碱性条件下, 糖类与蛋白质分子相互作用产生絮凝结构, 铁、钙等金属离子生成的氢氧化铁、氢氧化钙与蛋白质和多糖产生的絮凝结构网络在一起, 形成饮料中的絮凝沉淀物。

关键词:甘蔗汁, 絮凝物, 蛋白质, 金属离子

中图分类号: TS275.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)07-0050-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060002

Study on the Influencing Factors of Floc in Sugarcane Juice

HOU Chuxuan¹, SU Dezhi², FENG Xiujing³, ZHANG Kunhua^{4,5,*}, LU Haiqin¹, LI Kai^{1,5}

(1. College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Ningming East Asia Sugar Co., Ltd, Ningming 532501, China;

3. Chongzuo College for Preschool Education, Chongzuo 532200, China;

4. Xuchang Jian'an District No.1 Senior High School, Xuchang 461111, China;

5. Sugar Industry and Comprehensive Utilization Research Center of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to solve the problem of beverage turbidity caused by flocculation precipitation of sugarcane juice, the factors affecting the formation of flocculation in sugarcane clear juice after membrane filtration were studied with sugarcane juice as raw material. The effects of temperature and pH on the formation of flocs were studied. The components of protein, total sugar and ash in flocs were analyzed. The functional group structure and constituent elements of flocs were observed by FTIR and SEM. It was found that temperature had little effect on the formation of flocs. The production of floc increased with the increase of pH, it was inferred that hydroxyl could promote the production of floc in sugarcane juice. FTIR results showed that the floc was mainly composed of polysaccharide, protein and ash. Through energy spectrum analysis, electronic scanning and infrared scanning, it could be seen that the flocculate contains iron, calcium, phosphorus, silicon, manganese and other inorganic ions. The results showed that under alkaline conditions, the interaction between

收稿日期: 2020-06-01

基金项目: 广西中青年骨干教师基础能力提升项目 (2020KY53010)。

作者简介: 侯楚璇 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 甘蔗制糖绿色加工技术, E-mail: 1033068035@qq.com。

* 通信作者: 张昆华 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 甘蔗制糖绿色加工技术, E-mail: 1733599201@qq.com。

sugars and protein molecules produces flocculation structure, and the flocculation structure network of iron hydroxide and calcium hydroxide produced by metal ions such as iron and calcium and protein and polysaccharide forms flocculation precipitate in beverage.

Key words: sugarcane juice; floccules; protein; metal ion

甘蔗汁中含有多种维生素、果糖、氨基酸、有机酸等营养物质,具有清热解毒,止渴生津,滋阴润燥等功效。甘蔗汁拥有较高的甜度及特有的风味,无论是甘蔗汁饮料或与其他果汁搭配,均能得到较好的口感和营养价值。但随着我国消费者消费能力的提升,饮料体系稳定、果汁无浑浊已成为新的市场需求。因此,额外加工对产品进行加工或丢弃由絮凝物引起浑浊的产品对生产商造成了巨大的经济损失^[1-3]。

由于原料及加工工艺的不同,絮凝物的形成原因也各不相同,分子间的相互作用^[4]、原料所包含的特殊成分^[5-9]、微生物的作用^[1]以及饮料的贮存条件^[2,10]等均会影响絮凝物的生成。除此之外,由于所添加甜味剂的质量不达标,也是饮料产生絮凝物的原因之一^[11-13]。目前有研究利用化学溶解或物理消除等方法去除絮凝物,如利用超声技术处理白糖水溶液^[14]和利用陶瓷膜技术对甘蔗汁进行超滤^[15-16],但均未从根源上解决问题,抑制絮凝物的生成^[9,17]。已有针对饮料中酸性絮凝物的生成条件及原因的研究,但通过陶瓷膜过滤的甘蔗汁一般呈弱碱性,而这种碱性条件下甘蔗汁中絮凝物的生成条件及原因却鲜有报道^[18-21]。

本实验将通过控制 pH 确定其对甘蔗汁中碱性絮凝物的影响,并对碱性絮凝物的组成成分进行研究,为甘蔗汁饮料的工业化生产过程中抑制絮凝物的生成提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

甘蔗清汁 由广西某糖厂提供,经膜孔径为 50 nm 的陶瓷膜过滤后,于 -18 ℃ 冰箱冷冻保存;氢氧化钠、磷酸、硼酸、硫酸铜、硫酸钾、乙酸镁、溴化钾 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;无水乙醇、硫酸、浓盐酸 分析纯,成都市科隆化学品有限公司;甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、亚甲基蓝指示剂、碱性酒石酸铜 分析纯,上海化学试剂总厂试剂三厂。

TENSOR 傅里叶变换红外光谱仪 德国 BRUKER 公司;S-3400N 带能谱仪的电子扫描显微镜 日本日立公司;其他 均为实验室常用设备与仪器。

1.2 实验方法

1.2.1 温度对甘蔗汁产生絮凝物的影响 将 150 mL 甘蔗汁加入到 250 mL 的锥形瓶中,连接回流冷凝管与锥形瓶,然后将其置于水浴锅中,分别在 20、40、

60、80、100 ℃ 下水浴 40 min,并与放置在室温下的甘蔗汁空白样进行对照,观察水浴过程中是否生成絮凝物。水浴结束后,使其冷却至室温,并观察絮状物是否发生变化。

1.2.2 pH 对甘蔗汁产生絮凝物的影响 分别添加 20 mL 甘蔗汁至具塞玻璃试管中,使用 85% 的磷酸和 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液,将甘蔗汁的 pH 精准调节至:2、3、4、5、6、7、8、9、10、11。将调节过 pH 的甘蔗汁在室温下静置 1 h,这是由于甘蔗汁中含有大量的糖类物质,久置于室温下易腐坏,为防止样品腐坏影响到检测结果,将样品的静置时间合理缩短。静置后,将试管置于光线明亮处观察不同 pH 的甘蔗汁中絮凝沉淀物的生成情况。

1.2.3 絮凝物的制备 分别添加 200 g 经陶瓷膜过滤后的甘蔗汁至 500 mL 烧杯中,用 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液将甘蔗汁的 pH 精准调节至:7、8、9、10、11,获得含有絮凝物的甘蔗汁,等待进一步的实验。取离心管进行编号,并称量以记录每个管的质量。除去静置后得到的甘蔗汁上清液,并将下层沉淀物质转移至 50 mL 离心管中,以 4500 r/min 的速度离心 20 min,并再次除去上清液。向离心管中加入适量的 70% 乙醇溶液,并通过振荡洗涤沉淀物。重复上述步骤 5 次左右,直到清洗液呈无色透明状。洗涤后,带离心管称重,记录在不同 pH 下产生的絮凝沉淀物的质量,并用作提取得到的絮凝物以备后用。

1.3 絮凝物的成分分析

1.3.1 絮凝物中粗蛋白质含量的测定 絮凝物中蛋白质含量的检测方法将参考国家标准 GB5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[22],凯氏定氮法测定氮。

1.3.2 絮凝物中总糖含量的测定 准确称量 0.5 g 制备所得样品,并转移至 250 mL 锥形烧瓶中。分别量取 50 mL 蒸馏水和 25 mL 浓盐酸,依次加入到样品中。将锥形瓶固定在水浴锅中,设定温度 100 ℃,水浴 2 h,取出静置冷却至室温,向锥形瓶中添加适量 1 mol/L NaOH 溶液,调节样品溶液 pH 至中性,再将样品溶液转移至 250 mL 容量瓶中,并定容。

在 250 mL 的锥形瓶中,依次加入 5 mL 的碱性酒石酸铜试液(甲液/乙液),加入 10 mL 的蒸馏水,加热煮沸,然后使用样品的水解液进行滴定,记录消耗的滴定剂的量^[16]。

计算公式如下:

$$X(\%) = \frac{f}{m/250 \times V \times 1000} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中, X : 样品中多糖的含量(以葡萄糖计), %; f : 10 mL 斐林试剂甲乙混合液相当的葡萄糖质量, mg; m : 样品质量, g; V : 所消耗样品总体积, mL。

1.3.3 絮凝物中灰分含量的测定 絮凝物中灰分含量的测定方法将参考国家标准 GB5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》^[23] 第一法。

1.3.4 傅里叶红外光谱分析絮凝物中官能团 将制备得到的絮凝物样品置于烘箱中,并在 60 ℃ 条件下干燥约 10 h。将 1~2 mg 干燥的待测样品与 50~60 mg 干燥的溴化钾粉末混合,置于玛瑙研钵中将其磨成均匀的细粉末,并放入压模中在 10 kPa 压制成为透明薄片。将薄片取出放入红外光谱仪,在 4000~500 cm^{-1} 波长范围内扫描。

1.3.5 扫描电子显微镜及能谱仪元素分析 取少量干燥过的待测絮凝物样品,研磨成粉末状,用扫描电镜(SEM)分析其絮凝结构,用能谱(EDs)分析絮凝物中主要元素种类,并对结果进行分析。

1.4 数据处理

每组实验均进行三次实验,所得数据为平行实验平均值。采用 Excel 2016 对实验数据进行处理,采用 Origin 2019 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 温度和 pH 对甘蔗汁中生成絮凝物的影响

图 1 为温度对甘蔗汁中絮凝物产量的影响,通过对比发现甘蔗汁中絮凝物的生成量没有明显的变化,因此温度对絮凝物的生成没有明显影响,在本研究中不再进行进一步研究。

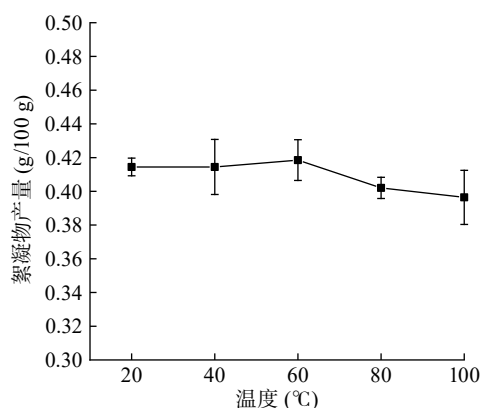


图 1 温度对甘蔗汁中絮凝物产量的影响

Fig.1 Effect of temperature on flocculation yield in sugarcane juice

从图 2 可以看出,甘蔗汁中的絮凝含量随 pH 的增加而增加。研究发现,在酸性条件(pH 小于 7)下没有产生絮凝,主要由于甘蔗汁中糖类物质主要由甘露醇和半乳糖单体组成,酸性条件下,二者相互作用

生成半乳甘露聚糖大分子物质,该物质可被陶瓷膜完全滤除^[15]。在碱性条件下,随着 pH 的增加,甘蔗汁中絮状物产量增加,表明碱性条件或氢氧根能促进甘蔗汁中絮状物的产生。

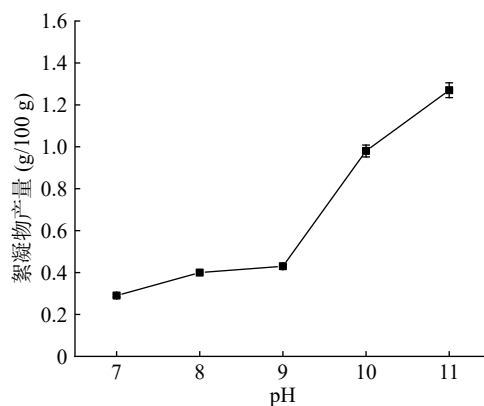


图 2 pH 对甘蔗汁中絮凝物产量的影响

Fig.2 Effect of pH on flocculation yield in sugarcane juice

2.2 絮凝物中蛋白质含量的变化

中国大多数制糖厂使用亚硫酸澄清工艺生产白糖,酸性絮凝物主要由含氮物质,如蛋白质组成,其含量约为 19.4%~30.7%^[24]。从图 3 可以看出,经陶瓷膜超滤后的甘蔗汁中絮凝物蛋白质含量随 pH 的增加有少量的增加,但蛋白质在总成分中均占比很小,仅占 3.00% 左右。这是由于孔径尺寸为 50 nm 的陶瓷膜可以有效过滤去除大部分的大分子量的蛋白质。因此,经过超滤的甘蔗汁所生成的絮状物中蛋白质含量较低。

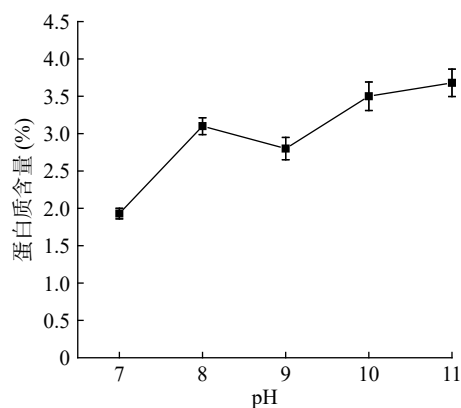


图 3 不同 pH 下絮凝物中蛋白质含量变化

Fig.3 The content of protein in flocculates varied at different pH values

2.3 絮凝物中总糖含量的变化

从图 4 可以看出,在不同 pH 下絮凝物中主要成分中,总糖含量为 60.98%~69.45%,随 pH 的升高,总糖含量呈下降趋势,其含量占比远高于蛋白质含量,这是因为甘蔗汁中的多糖物质包含鼠李糖、阿拉伯糖和葡萄糖等可形成多糖的单糖。这些多糖分子与其他物质(例如氢氧根、金属离子或蛋白质)相

互作用形成凝胶, 而金属离子, 尤其是钙离子, 促进了凝胶的三维网状结构的形成, 导致其形成了囊状结构, 该种结构对蛋白质等物质的吸引力增强, 从而引起了絮凝物的形成^[25]。从图 4 可以看出, 糖类物质在絮凝物中所占比重最大, 可以判断出絮凝物主要由糖类物质组成, 因此糖类是甘蔗汁中絮凝物的主要组成成分之一。

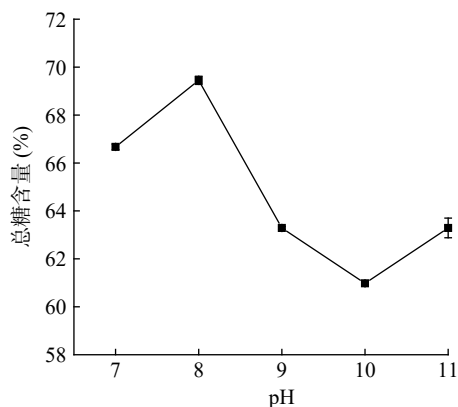


图 4 不同 pH 下絮凝物中总糖含量变化

Fig.4 The content of total sugar in floculates varied at different pH values

2.4 絮凝物中灰分含量的变化

从图 5 可以看出, 在碱性条件下, 随 pH 的增加, 絮凝物中的灰分含量先增加后减少, 当 pH 为 9 时, 絮凝物中的灰分含量最高, 约占 25.58%, 可以看出灰分是影响絮凝物生成的重要因素之一。虽然甘蔗植物中金属离子的含量较低, 主要包含钙、铁及少量其他金属元素, 然而在甘蔗汁压榨和运输的过程中, 由于设备的磨损及其他原因, 外部金属离子易混入甘蔗

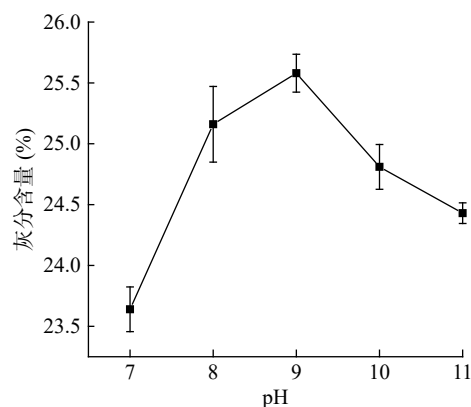


图 5 不同 pH 下絮凝物中灰分含量变化

Fig.5 The content of ash in floculates varied at different pH values

汁中, 从而增加了甘蔗汁的灰分含量^[26]。

2.5 絮凝物红外光谱分析

通过上述研究可以发现, pH 较小的升高对不同成分的占比影响较小, 因此取 pH 为 7、9、11 三个位置的絮凝物进行红外光谱分析。通过对以上红外光谱图进行观察, 可以发现, 不同 pH 下絮凝物的官能团组成类型相对一致, 但絮凝物中存在代表蛋白质 N-H 键的伸缩振动峰以及分子间氢键 O-H 的伸缩振动峰, 在不同 pH 条件下出现的位置有所差异^[27]。当 pH 为 7、9 和 11 时, 这两个峰分别出现在 3418、3421、3423 cm^{-1} 三个位置。另外, 三张图中均出现了向内弯曲的 N-H 键特征峰, 其位置分别出现在 1621、1625 cm^{-1} 以及 1627 cm^{-1} 。样品中也均包括了烷烃向内弯曲的 C-H 键吸收峰以及代表醇类的向内弯曲的-OH 键吸收峰。区别在于, C-H 键吸收峰

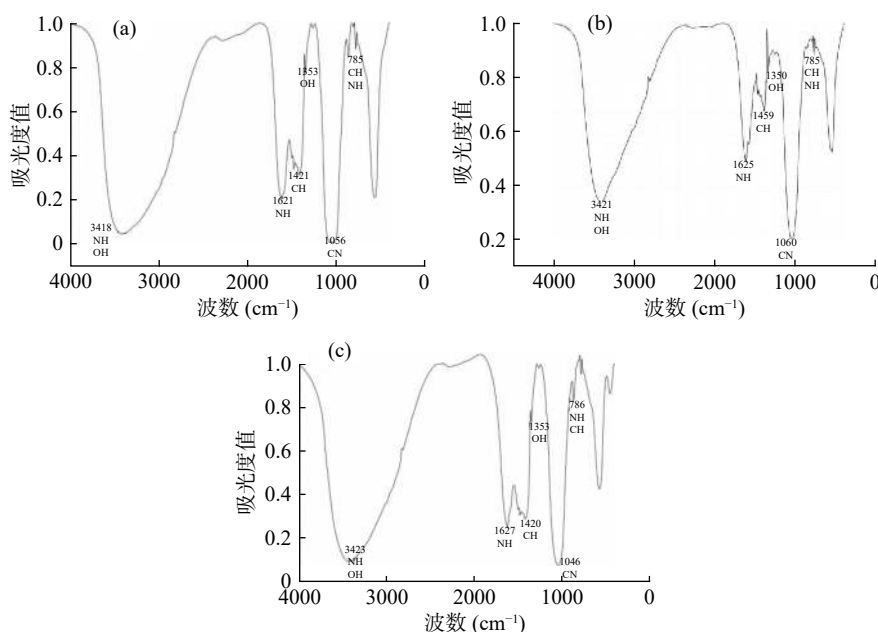


图 6 不同 pH 条件下絮凝物的红外光谱图

Fig.6 Infrared spectrogram of flocs with different pH environments

注: a、b、c 分别为 pH7、9、11 时絮凝物的红外光谱图。

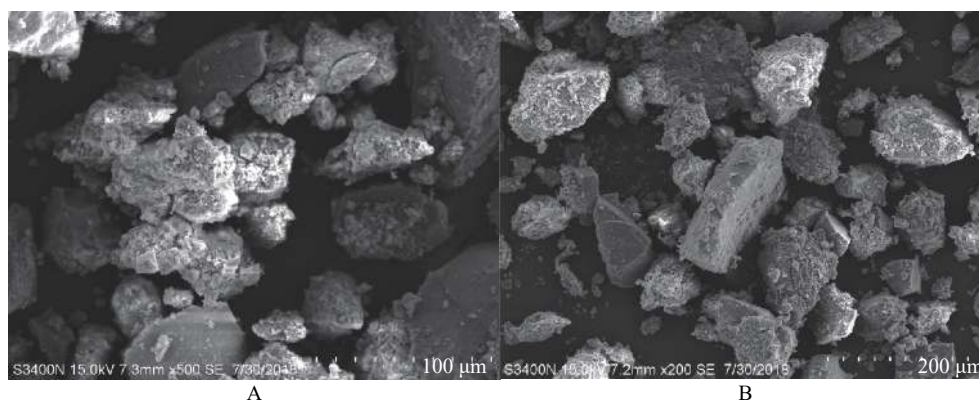


图 7 pH9 时絮凝物扫描电镜图

Fig.7 SEM of flocculent at pH9

注: A、B 分别为絮凝物放大倍数 500 倍和 2000 倍时扫描电镜图。

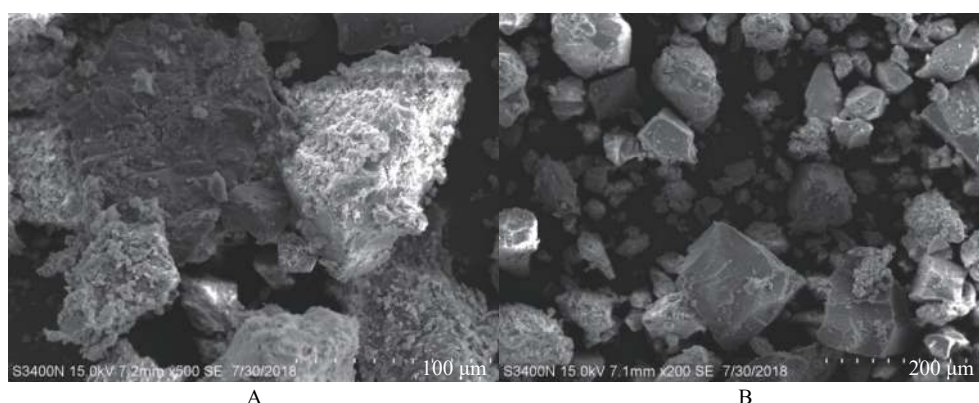


图 8 pH11 时絮凝物扫描电镜图

Fig.8 SEM of flocculent at pH11

注: A、B 分别为絮凝物放大倍数 500 倍和 2000 倍时扫描电镜图。

在 pH 为 7、9 和 11 时分别出现在 1421 、 1459 cm^{-1} 和 1420 cm^{-1} 三个位置, 而 -OH 键吸收峰在 pH 为 7 和 11 时均出现在 1353 cm^{-1} 处, pH 为 9 时出现在 1350 cm^{-1} 处。当 pH 为 7、9 和 11 时, 均在 785 cm^{-1} 左右, 发现代表含醛基类物质的向外弯的 C-H 键吸收峰以及代表胺类的向外弯曲的 N-H 键的吸收峰, 在 $1045\sim 1060\text{ cm}^{-1}$ 处均存在代表蛋白质 C-N 键的吸收峰。通过以上可以判断出, 甘蔗汁中的絮凝物中含有具有 N-H 键的蛋白质, 以及具有羟基、醛基等官能团的多糖, 即絮凝物主要由蛋白质、多糖为主的多种有机物质组成。

2.6 扫描电子显微镜及能谱仪元素分析

通过比较在 pH 为 9 和 pH 为 11 情况下絮凝物的 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的 SEM 图像, 可以看出在 pH 为 9 时絮凝物的沉淀颗粒比在 pH 为 11 时絮凝物的沉淀颗粒小。这是由于随着 pH 的升高, 使甘蔗汁内生成更多盐类沉淀物质。在后续的能谱分析中也可以发现, 沉淀物质主要由钙盐组成, 可能是碳酸钙和磷酸钙。这类钙盐在碱性条件下更易产生, 且会与蛋白质等胶质物质网络在一起, 形成了较大的絮状结构。

由图 9 可以看出, 能谱的采样点在晶体材料上。从图 10 可以看出, 絮凝样品中所含的元素是 C、O、Si、P、K、Ca、Mn 和 Fe。其中, Ca 元素相对含量最大, 而钙元素仅有少部分来自于甘蔗本身, 大部分钙元素主要在生产过程中通过添加石灰乳以调节甘蔗汁的酸碱值而添加到甘蔗汁中。其次是磷元素, 其主要来源是在澄清工段中所添加的磷酸, 在此阶段, 钙离子将与磷酸盐反应生成磷酸钙沉淀。钾元素的主要来源有两个, 分别是甘蔗和水, 而铁元素主要来源于榨汁工段, 由于榨机磨损而混入榨汁中。甘

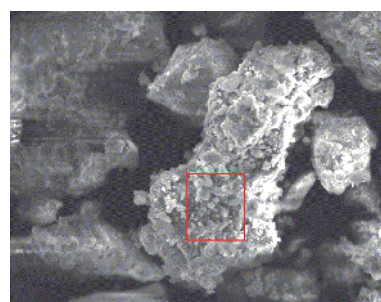


图 9 pH 为 9 的絮凝物扫描电镜的能谱取样点

Fig.9 EDS sampling point of flocs at pH 9

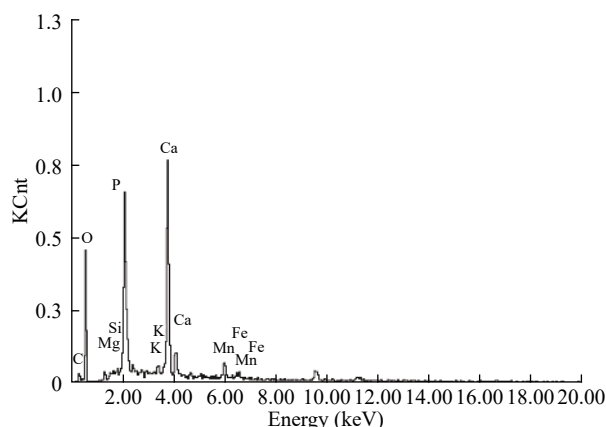


图 10 pH 为 9 的絮凝物的能谱图

Fig.10 EDS of flocs at pH 9

蔗汁中铁离子可与氢氧根反应生成沉淀物,也会与其他无机物质发生络合反应,形成絮状沉淀。甘蔗中含有一定量的硅元素,硅在甘蔗汁体系中可与其他金属离子发生反应,生成结构复杂的沉淀物,这也是造成甘蔗汁产生絮凝的一个重要原因。除此之外,在碱性条件下,锰离子和镁离子与甘蔗汁中游离的氢氧根反应,形成氢氧化锰、氢氧化镁两种沉淀物质。碱性条件还可以促进金属离子(如铁离子和钙离子)与蛋白质的反应,生成絮凝物胶体结构。氢氧化铁胶体结构可以通过吸附带负电荷的游离氢氧根离子,进而在甘蔗汁中吸附带正电的离子及大分子,生成絮凝物。另外磷酸钙物质可通过聚集其他沉淀物质,构成絮凝物。

由图 11、图 12 可知,当 pH 为 11 时,元素类型与 pH9 时的元素类型相同,并且均为钙和磷的含量最高。因此,可以推断出絮凝的无机物成分主要由磷酸钙组成。另外还含有钾、锰、钙、铁、碳、氧等元素。pH 为 11 时絮凝中各种元素的含量较高,表明甘蔗汁的碱度越强,氢氧化铁胶体能够凝结的金属离子和有机物越多,产生的絮凝沉淀越多。

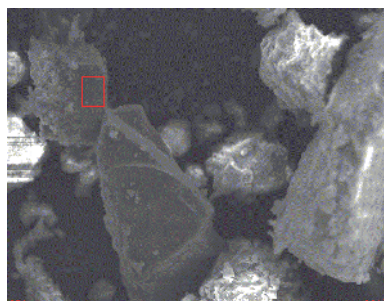


图 11 pH11 的絮凝物扫描电镜的能谱取样点

Fig.11 EDS sampling point of flocs at pH11

3 结论

甘蔗汁的 pH 对絮凝物的形成具有明显影响。在酸性条件下,甘蔗汁中没有明显的絮凝,因此甘蔗汁在生产酸性饮料时,具有较大优势;调整甘蔗汁的

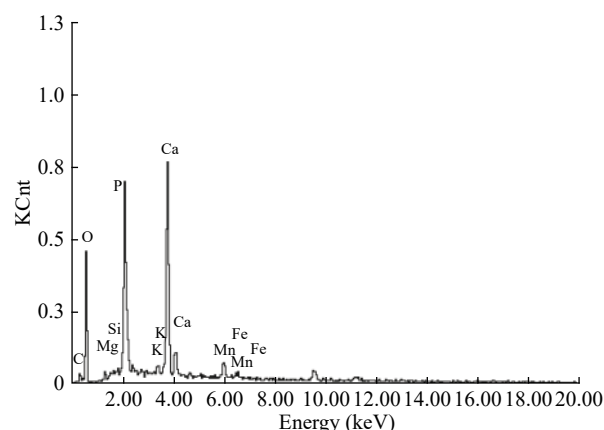


图 12 pH11 的絮凝物的能谱图

Fig.12 EDS of flocs at pH11

酸碱度至碱性,果汁中会迅速产生絮凝,且随着碱性的增加,絮凝物增多,因此,通过调节经膜过滤的甘蔗汁的 pH 可以抑制絮凝的产生。若需要用甘蔗汁生产弱碱性饮料,则需注意饮料中絮凝物的去除。

通过检测絮凝物的主要成分,可以发现在 pH 为 7~11 的条件下,该种絮凝物中蛋白质含量约为 1.93%~3.68%,糖类物质含量约为 60.98%~69.45%,灰分物质含量约为 23.64%~25.58%。通过电子扫描-能谱分析,甘蔗汁中的絮凝主要由钙、磷、铁、硅、锰、碳、氧和其他元素组成。磷酸钙是絮凝的主要成分。通过分析红外光谱结果发现,在不同 pH 条件下,絮凝物中的官能团(主要是蛋白质和糖类)保持不变,这表明在碱性条件下,糖和蛋白质之间的相互作用可能产生絮凝。此时甘蔗汁是碱性的,可与铁、钙离子生成氢氧化铁、氢氧化钙沉淀,这些沉淀会与多糖,蛋白质网络起来,生成肉眼可见的絮状沉淀物。

参考文献

- [1] Gazzola D, Pasini G, Tolin S, et al. Characterization of chitinase isoforms from grape juice[J]. Italian Journal of Food Science, 2017, 29(1): 50-62.
- [2] Rice C J, Pawlowsky K, Smart C. Evaluating haze formation in flavoured lager beers using a range of forcing methods[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2017, 123(3): 388-395.
- [3] 陈菊, 陈林, 胡涛, 等. 苹果醋饮料生产过程微生物污染关键点的分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(21): 195-200.
- [4] 王振斌, 马海乐, 钟惠惠, 等. 草莓胡萝卜复合澄清汁后浑浊机理研究[J]. 农业工程学报, 2007(6): 246-251.
- [5] 马梦君, 罗理勇, 曾亮. 绿茶饮料沉淀机制及澄清技术[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(4): 1212-1218.
- [6] 林晓蓉. 茶汤浓度对绿茶沉淀形成的影响. 中国食品科学技术学会第八届年会暨第六届东西方食品业高层论坛论文摘要集[C]. 中国食品科学技术学会, 2011: 2.
- [7] 杨军. 酶解技术改善绿茶浓缩液品质的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2018.

- [8] Xu Y Q, Hu X F, Tang P, et al. The major factors influencing the formation of sediments in reconstituted green tea infusion[J]. *Food Chemistry*, 2015, 172: 831–835.
- [9] 许勇泉, 尹军峰. 茶汤沉淀形成及其调控方法研究进展[J]. *茶叶科学*, 2016, 36(4): 337–346.
- [10] 殷浩, 孙波, 刘刚, 等. 储存温度和氧气对澄清型桑椹汁后浑浊的影响[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(4): 1700–1703.
- [11] 程江玲. 以原糖为原料制备高纯蔗糖糖浆的工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [12] 平秋婷, 肖爱玲, 余娟, 等. 白砂糖絮凝实验方法比对和分析[J]. *甘蔗糖业*, 2018(6): 10–14.
- [13] 李慰霞. 镁盐在糖汁澄清脱色中的应用研究[D]. 南宁: 广西科技大学, 2019.
- [14] 罗英极, 黄凯. 超声场抑制白砂糖中酸性絮凝物的初步研究[J]. *食品工业*, 2012, 33(4): 112–114.
- [15] 李文, 朱瓌之, 漆虹, 等. 陶瓷膜超滤净化石灰法制糖清汁[J]. *食品科学*, 2019, 40(2): 252–258.
- [16] Jianquan Luo, Xiaofeng Hang, Wei Zhai, et al. Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: Filtration behavior of polymeric membrane at high temperature[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 509: 105–115.
- [17] 袁星星. 乳酸菌发酵荔枝饮料的二次沉淀及褐变控制关键技术研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- [18] 罗英极, 黄凯. 超声场抑制白砂糖中酸性絮凝物的初步研究[J]. *食品工业*, 2012, 33(4): 112–114.
- [19] Ban Jia, Chen Jun-jia, Hu Xue-mei, et al. Isolation and monosaccharide composition analysis of indigenous sugarcane polysaccharide[J]. *Food Science*, 2013, 34(20): 182–185.
- [20] Jansen T M. Raw sugar quality from a refiner's perspective[J]. *International Sugar Journal*, 2010, 112(1337): 250–256.
- [21] 莫佳琳, 谢彩锋, 缪璐, 等. 白砂糖酸性絮凝物的主要成分及其形成的影响因素[J]. *广州化学*, 2012, 37(3): 24–28, 32.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会; 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4-2016, 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [24] 黄凯. 白砂糖中酸性絮凝物的成分分析及快速测定的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [25] Lidija Jakobek. Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins[J]. *Food Chemistry*, 2015, 175: 556–567.
- [26] 刘桂云, 柳颖, 常国炜, 等. 甘蔗亚硫酸法制糖过程中的灰分及其对生产的影响[J]. *甘蔗糖业*, 2018(3): 24–29.
- [27] 王宗明, 何欣翔, 孙殿清. 实用红外光谱学[M]. 北京: 北京科学出版社, 1982: 77–87.