

13327/jjjlau.2021.5565.

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90150

[文章编号] 1003-5788(2022)09-0234-05

澄清脱色技术在甘蔗制糖中的应用

Research progress of the application of clarification and decolorization techniques in sugarcane sugar production

许文婷 王 周 陈国强 邹芷若 陈文杰

XU Wen-ting WANG Zhou CHEN Guo-qiang ZHOU Zhi-ruo CHEN Wen-jie

(南宁学院, 广西 南宁 530005)

(Nanning University, Nanning, Guangxi 530005, China)

摘要:对近年来国内外制糖生产过程中糖液澄清脱色的研究概况进行了综述,分析对比了吸附法、氧化法、过滤法等各类澄清脱色技术在制糖生产过程中的研究情况,指出了各类方法在生产、推广等方面的不足之处,并展望了制糖行业用澄清技术今后的研究方向。

关键词:蔗糖;脱色;澄清;吸附;氧化

Abstract: In this review, the clarification and decolorization of sugar solution in the process of sugar production was summarized. The research status of various clarification and decolorization techniques such as adsorption, oxidation and filtration in sugar production process and the deficiencies of existing methods in production and popularization, were compared and introduced. In addition, the research direction of the clarification technology in sugar industry was discussed.

Keywords: sucrose; decoloration; clarify; adsorption; oxidation

甘蔗制糖是中国食糖消费的重要来源之一,占全国食糖消费的 50% 以上,其制糖的工艺流程为破碎→榨汁→澄清→脱色→蒸发→结晶→离心→干燥^[1]。其中,澄清和脱色是去除原糖汁中杂质的关键步骤,直接决定了蔗糖的质量^[2]。目前,甘蔗制糖澄清生产工艺主要分为亚硫酸法和碳酸法,尽管这些方法已经在甘蔗制糖工业中应用了数十年,但它们仍然存在较大的缺陷。亚硫酸法具有设备操作简单、生产成本低等优势,但对甘蔗原汁的浊度和色度去除不充分且成品残糖量高,存在食品安全风险;碳酸法所产蔗糖质量优于亚硫酸法,但是存在生产成本低、碱性废物难处理等问题^[3-4]。为了促进糖业澄清

脱色技术的发展,研究拟综述吸附法、氧化法、过滤法等各类澄清脱色技术在制糖生产过程中的研究情况,并分析各类方法在生产、推广等方面的不足之处,以期为甘蔗制糖用澄清脱色技术的研究和实践提供参考。

1 吸附法

1.1 离子交换树脂

离子交换树脂在与水溶液接触时,其所带离子被溶液中的同种离子取代^[5],从而达到吸附脱色的目的。该方法近年来被应用于制糖工业,如张新林等^[6]采用静态法考察了大孔离子交换树脂 D750 对甘蔗糖蜜的脱色效果,结果表明该脱色过程属于表面不均一的单分子层吸附。王利军^[7]利用离子交换树脂的交换和吸附原理,将糖蜜废液中带电离子色素等杂质交换或吸附在离子交换纤维表面,有效地去除了生色基团,所得清汁达到了精制糖生产的要求。

采用离子交换树脂对甘蔗糖液进行脱色虽然实现了产业化应用,但存在设备成本高的问题,导致前期推广应用困难,仍需不断优化完善。Heru 等^[8]将超滤膜和离子交换树脂技术相结合处理糖液,结果表明复合工艺比单独使用离子交换树脂的脱色性能更好,该研究说明如果采用多种工艺相结合处理糖液可能会取得更好的澄清脱色效果。

1.2 壳聚糖

甘蔗汁中酚类物质的存在影响糖制品的色值,磁性壳聚糖作为一种新型高分子材料,具有比表面积大、尺寸小、吸附能力强、可回收、脱色效果好等特点,可通过磁场将磁性壳聚糖从溶液中分离出来^[9]。Chai 等^[10]先使用离子交联技术制备磁性壳聚糖(MCS),然后用精氨酸修饰得到精氨酸改性磁性壳聚糖(AMCS),并将其作为新型蔗糖澄清吸附剂。结果表明 AMCS 能有效去除甘蔗汁中的没食子酸(GA),提高产品质量,最大吸附量为

基金项目: 中青年教师科研基础能力提升项目(编号: 2022KY1784)

作者简介: 许文婷(1994—),女,南宁学院助教,硕士。

E-mail: 1210987708@qq.com

收稿日期: 2021-09-29 **改回日期:** 2022-03-05

48.38 mg/g。同时,AMCS具有良好的再生能力,实现了甘蔗汁的无硫澄清,与传统脱色方法相比更显著地提高了白糖的食用安全性。

但在上述研究中对于壳聚糖的吸附应用只是停留在理论层面,且只是以甘蔗汁中的代表性多酚类物质为研究基础,暂未考虑到其他杂质对澄清脱色效果的影响,在吸附效果上仅是单独讨论了对没食子酸的吸附,对其他物质的研究尚有待扩展。

1.3 纤维素

纤维素是自然界中来源丰富的天然高分子材料,具有良好的生物相容性、可再生性等优势,被广泛应用于环境、食品、化工等领域。Chai 等^[11]将乙二胺改性甘蔗渣作为吸附剂,研究了不同吸附剂用量、pH 值和接触时间对糖汁中有色物质的吸附性能,结果显示吸附剂用量为 0.05 g/mL、pH 为 5.0、吸附时间为 30 min 时吸脱色率可达 59.18%。黄琴等^[12]以甜菜粕纤维(SBPF)为原料,通过乙二胺改性获得一种富含氨基官能团的纤维素基吸附剂。在乙二胺质量分数为 30%、改性反应时间为 6 h、反应温度 80 °C 时制备得到的产物效果最好,对糖液的浊度去除率和脱色率分别为 92.46% 和 60.73%。上述研究表明利用改性纤维素去除糖汁中的有色化合物具有潜在的应用前景。但是环氧氯丙烷和乙二胺均有一定的毒害作用,应用于食品生产时,食品安全问题应给予适当的考虑。Moreno 等^[13]采用不同来源的纤维素化合物作为非离心糖(NCS)生产过程中的澄清剂,以取代聚丙烯酰胺等传统的澄清剂。研究结果表明,在加入石灰前加入纤维素化合物,可获得更好的糖汁澄清度并能提高汁液中颗粒的沉降率,该纤维素化合物在帮助蔗糖汁中的颗粒絮凝和沉淀方面较聚丙烯酰胺更有效。

在纤维素化合物的吸附应用中,其劣势主要表现在提取和制备过程中需要用到各种有机溶剂和试剂,对生态环境可能会造成一定的影响,而且过程繁琐操作复杂。要使纤维素材料在应用中能够得到充分的应用和推广,研究和开发制备工艺简单、清洁高效的澄清剂是非常重要的,在提高产品产量和生产效率的同时推动可持续环境技术进一步发展,以满足国内外的市场需求。

1.4 活性炭

活性炭结构中层与层之间不规则的堆积,使其拥有发达的孔隙结构和较高的比表面积,这可以增强吸附能力和吸附范围^[14]。在生产实践中常将活性炭广泛用于医疗卫生、生物化工、农业和食品等相关领域。Julio 等^[15]研究了甘蔗渣活性炭(BAC)在原糖或麝香果糖浆净化技术的使用情况,对 BAC 在甘蔗汁中的脱色效果进行了评估,结果显示在环境温度下对甘蔗汁中的脱色率可达 98%。Marta 等^[16]开发了一种用于甜菜糖蜜脱色的活性炭/超滤组合工艺,对糖蜜的脱色率可达 96.5%,且损失率低。

在甘蔗制糖方面,廖炳权^[17]将活性炭应用于甘蔗制糖清净工艺,通过脱色试验及电镜扫描筛选出适合于产业化应用的颗粒状活性炭和粉末状活性炭,并分析了其澄清效果。试验结果表明:活性炭对混合汁的脱色率可达 80%~85%,对糖浆的脱色率可达 70%~75%。

活性炭虽具备一定的吸附性能,但其制备过程中存在耗材多且工艺复杂、再生率低和成本高等缺陷。此外,活性炭结构中具有芳香环,不能除去离子性色素物质,因此利用活性炭脱色时,需要和其他脱色剂共同使用,才能达到更好的脱色效果。

1.5 其他吸附剂

硅藻土是一种环保非金属矿物吸附剂,具有丰富的多孔结构,可提供用于吸附的固体表面。但其吸附效果有待提升。Song 等^[18]采用共沉淀—交联法制备磁性壳聚糖改性硅藻土(MCMD),并用于吸附甘蔗汁中的两种酚酸:没食子酸(GA)和咖啡酸(CA)。结果表明,GA 和 CA 在 MCMD 上的吸附模型符合伪二级模型和 Langmuir 模型,最大吸附量分别为 31.94、27.64 mg/g。

Miljana 等^[19]研究了钠基和钙基膨润土对甜菜糖蜜的色值、浊度和纯化过程的影响,结果表明降低 pH 值和增加膨润土用量与糖蜜色值和浊度降低的效果呈正相关,与钙基膨润土相比,钠基膨润土在糖蜜颜色和浊度降低方面表现出更好的效果,色值减少 29%~39%、浊度减少 91%~98%。

上述吸附剂虽然可以有效地去除糖液中的有色物质,降低糖汁色值、提高白糖质量,但局限于实验室水平,离实际应用还存在较大差距。因此,仍需开发出对糖汁中有色物质选择性强,吸附效率高且可以广泛进行工业化应用的吸附剂。此外,甘蔗汁中含有大量的酚类物质、各类蛋白质和氨基酸等功能性成分,在设计吸附剂时应充分考虑将甘蔗汁中各类活性成分进行回收利用,减少环境污染的同时尽量降低成本投入,优化制糖企业的经济效益结构。

2 膜分离技术

膜分离技术是根据不同孔径的滤膜对微粒进行选择截留,达到对原液分离纯化的目的,是一种纯物理过程。膜过滤技术包括微滤(MF)^[20]、超滤(UF)^[21]、纳滤(NF)^[22]、反渗透(RO)^[23]、电渗析(ED)^[24]、正向渗析(FO)^[25]和膜蒸馏(MD)^[26],膜分离技术用于物质的分离与浓缩,具有不损坏物质结构、无环境污染、节约能耗等优点,在此基础上可以减少对化学品的使用,生产出高质量的澄清汁,在食品工业中显示出巨大的潜力。

在制糖过程中使用膜过滤可以提高澄清糖汁的质量,缩短加工时间,提高糖质量、产量和回收率,降低运营成本。Chirasmita 等^[27]通过试验证明微滤对离心甘蔗汁进行澄清处理,可以减少甘蔗汁中的微生物和多酚含量。

将甘蔗汁在 4 ℃ 下的保质期延长至 9 周。Luo 等^[28]提出集成膜 NF 工艺,将浓缩糖浆的色值和浊度分别降低 96.55% 和 99.99%,所得糖浆可直接用于白糖生产。

但由于蔗汁成分复杂,膜分离技术也存在部分亟待解决的问题,如 Li 等^[29]在应用孔径为 0.5 μm 的陶瓷膜澄清处理经过碳酸化和过滤后的重熔糖浆时,发现糖浆的高黏度会严重污染 MF 膜,导致在处理 20 min 后糖汁通量急剧下降。Heru 等^[8]使用超滤过滤和离子交换技术,在红糖重熔糖浆脱色一体化过程中发现,膜的再生需要使用化学品,并会产生大量含盐废水,这会增加投入成本并在一定程度上加重环境负担。此外,单一的商品化膜对甘蔗汁中的色素、蔗糖和还原糖分子的分离效果不佳,蔗糖纯度和回收率难以提高,这严重阻碍了膜分离技术在制糖行业中的产业化应用。

在制糖新工艺领域中,广西大学李凯教授团队研发了世界领先的制糖专用陶瓷膜,建立了 3 000 t/d 的甘蔗混合汁膜法绿色制糖澄清生产线并实现了产业化应用^[30]。但要实现全面产业化的应用,仍需进行优化,如可通过改进膜过滤工艺和设备,优化工艺参数,完善自动化控制系统等方法弥补现有技术的不足,进而促进膜法制糖技术的产业化推广。

3 氧化法脱色

3.1 臭氧氧化法

臭氧是一种具有广谱杀菌消毒作用的强氧化剂,对除去水中恶臭味道,降低水体颜色^[31]具有良好的作用,故常被广泛应用于水处理与纸浆漂白等领域^[32]。臭氧处理作为一种潜在的非热处理方法,可延长甘蔗汁的货架期,同时保持其新鲜度和感官特性,对甘蔗制糖行业的发展具有重要指导意义。

Panigrahi 等^[33]尝试将甘蔗汁进行臭氧氧化处理,试验表明臭氧氧化处理可以有效增强甘蔗汁的抗褐变特性和抗菌特性。Adriana 等^[34]对比使用臭氧和电化学工艺替代亚硫酸法进行甘蔗汁的澄清,研究了处理温度和臭氧浓度对甘蔗汁色值的影响,结果表明在温度为 55 ℃、臭氧质量浓度为 22.9 mg/L 时,臭氧对甘蔗汁色值去除率最高可达 75%,且未出现蔗糖损失率或甘蔗汁黏度的明显变化,表明臭氧在甘蔗制糖应用方面具有潜在的工业应用前景。但就等效的澄清性能而言,电化学过程被证明更具有节能优势,因此,对于臭氧氧化法澄清甘蔗汁的工艺还有待进一步深入研究。

3.2 过氧化氢氧化法

将过氧化氢加入到受污染的水体中,在一定程度上可明显抑制有色物质的生成,并起到杀菌、消毒、去异味以及澄清脱色的效果,且过氧化氢氧化法处理水体后的最终产物不会对环境造成污染,被视为环保型化学试剂。在此方面的研究中,唐振荣等^[35]采用过氧化氢氧化法进

行糖浆澄清,该试验初步证明过氧化氢氧化法可以起到澄清糖浆的作用,但脱色效果仍有待提高。毛善巧等^[36]利用过氧化氢—V_C复合体系处理甘蔗汁,结果表明适量的过氧化氢—V_C复合体系可将蔗汁的色值从 1 842 IU 降至 674 IU,表明该复合体系具有良好的糖汁脱色效果。在此基础上廖耀文等^[37]进行了更加深入的研究,将过氧化氢—V_C体系与壳聚糖/蒙脱土复合物进行协同脱色处理甘蔗汁,结果表明协同澄清工艺效果更加高效,脱色率可达 92.92%。

3.3 其他氧化法

Saddi 等^[38]在蔗糖溶液体系中研究了 Fenton 法降解糖汁中的酪氨酸和阿魏酸,凝胶渗透色谱分析证实甘蔗汁中低分子量杂质浓度显著降低。Fang 等^[39]对高锰酸盐(MnO₄⁻)氧化法在甘蔗汁中的脱色效果进行验证,试验结果表明高锰酸盐可以有效降低甘蔗汁的色值。高锰酸盐氧化法是一种潜在的有良好应用前景的澄清脱色方法。

综上所述,高级氧化法多数具有操作简单,氧化能力强、反应速率快且降解效果好等优势,对糖汁有明显的脱色性能。但试验过程中仍存在有待解决的问题,如臭氧氧化法可能会产生后期需要去除的含氧化合物副产物,这会加重生产负担,不适合用于糖液的脱色。Fenton 降解法会使蔗糖溶液酸碱度发生改变,存在蔗糖发生水解并转化为葡萄糖和果糖的问题;高锰酸盐氧化剂使用后需要考虑残留在糖液中锰离子的去除问题。因此,对于各种氧化法脱色方法而言,大多需要较大的资金投入,难以产业化推行。

4 其他澄清方法

Pal 等^[40]探究了接枝共聚物诱导生产的絮凝剂在甘蔗汁澄清中的应用,利用微波辅助技术,将天然的肉桂酸接枝到田菁胶的结构中,开发出具有高度延伸结构的新型、无毒、环保的絮凝剂,实现了甘蔗汁中悬浮胶体杂质的分离。絮凝剂在 1.0 mg/kg 时表现出最大絮凝效果,获得的澄清糖液可用作直接饮用的饮料或用于白糖生产,为甘蔗制糖的澄清脱色开启了新的探索方向。

关瑞晨^[41]以铝为可溶性阳极,用电解法处理回溶糖液,并研究了电解法对糖液色值、纯度和胶体含量的影响,试验结果表明,在电解时间为 16 min、电解温度 60 ℃、电极间距 5 mm、初始 pH 为 5.0 时,糖液的脱色率为 88.9%。电解法具有设备简单、易于操作、占地面积小、处理时间短、无二次污染、适用范围广等优点,有利于推动甘蔗汁澄清脱色技术向环保、便捷的方向拓展延伸。

5 结论

随着科研水平和技术的不断提高,甘蔗澄清脱色的研究探索也更加深入和完善。在新技术的开发和研究中应致力于降低白糖中硫含量及无害化处理制糖生产过程

中产生的污水,如在使用氧化法去除糖液有色物质时,应考虑蔗糖成分的损失及副产物的去除问题,致力于环保和可持续澄清技术的研发。在开发糖液吸附剂的过程中,应更加注重开发低成本(如天然高分子物质壳聚糖、淀粉、甘蔗渣和纤维素),并结合糖液中有色物质(酚类物质)和其他功能性成分(蛋白质和氨基酸)的特点,针对性地设计糖液吸附剂,以期达到资源最优化的目的,在保证生产质量的同时做到选择性地吸附和回收有色物质与其他活性成分(酚类活性成分等),增加企业效益。就现有研究而言,膜分离技术作为一种新的澄清脱色工艺,是实现全面产业化应用的最有力支撑,因此在膜分离技术研发中,需充分考虑膜清洗废水的处理,开发更加简单、高效的膜清洗剂降低应用成本,助力实现膜分离技术的全面推广与应用。同时以实现糖液中的色素物质、蛋白质和蔗糖等成分分别截留分离为目标,可以将膜分离技术与其他方法进行有机组合,优化分离路径,延长膜的使用年限,达到更好的分离效果和资源化回收利用的目的。总之,糖业工作者为蔗糖生产作出了巨大的贡献,但是仍需结合实际生产情况,开发出新的糖液澄清工艺及技术,以符合日益提高的生产、生态和环保要求。

参考文献

- [1] 宋小荣. 氨基化磁性硅藻土糖用澄清剂的制备、表征及其应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019: 1.
SONG X R. Preparation, characterization and application of clarifier for aminoated magnetic diatomite sugar[D]. Nanning: Guangxi University, 2019: 1.
- [2] MENG L D, LI K, LI J B, et al. Understanding the pathways for irreversible aggregate clusters formation in concentrated sugarcane juice derived from the membrane clarification process[J]. LWT, 2021, 151: 112204.
- [3] 沈石妍, 郭家文, 崔杰, 等. 制糖生产糖液脱色方法研究进展[J]. 中国糖料, 2015, 37(5): 68-71.
SHEN S Y, GUO J W, CUI J, et al. Advances in method for decolorization of sugarcane juice during sugar manufacturing[J]. Sugar Crops of China, 2015, 37(5): 68-71.
- [4] 李煜堃. 膜法制糖过程中的生物污染控制及清洗[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2020: 1.
LI Y K. Biofouling control and cleaning in membrane technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Master of Science in Engineering in Biological Engineering), 2020: 1.
- [5] 李会娟. 甘蔗制糖脱色新方法的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007: 6-7.
LI H J. Research of a new method to decolorize in cane sugar manufacture[D]. Nanning: Guangxi University, 2007: 6-7.
- [6] 张新林, 龙为, 于淑娟, 等. 大孔树脂对甘蔗糖蜜色素的吸附性能和动力学[J]. 食品工业科技, 2015, 36(22): 111-114, 120.
ZHANG X L, LONG W, YU S J, et al. Adsorption performance of macroporous resin on sugarcane molasses pigments[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(22): 111-114, 120.
- [7] 王利军. 用离子交换纤维从糖蜜酒精废液中提取色素的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008: 9.
WANG L J. Studies on extraction of pigment from sugarcane molasses alcohol waster by ion exchange fiber[D]. Nanning: Guangxi University, 2008: 9.
- [8] HERU S, ANIS R. Production of colorless liquid sugar by ultrafiltration coupled with ion exchange[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 98: 11-20.
- [9] 杜楠, 胡东彬, 陆海勤, 等. 制糖过程中吸附剂脱色的研究及应用[J]. 中国调味品, 2021, 46(7): 196-200.
DU N, HU D B, LU H Q, et al. Research Process and application of adsorbent decolorization in sugar production process[J]. China Condiment, 2021, 46(7): 196-200.
- [10] CHAI Z H, LI C L, ZHU Y, et al. Arginine-modified magnetic chitosan: Preparation, characterization and adsorption of gallic acid in sugar solution[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 506-516.
- [11] CHAI B H, MENG H C, ZHAO Z G, et al. Removal of color compounds from sugarcane juice by modified sugarcane bagasse: Equilibrium and kinetic study[J]. Sugar Tech, 2016, 18(3): 317-324.
- [12] 黄琴, 陈博儒, 高梓原, 等. 改性甜菜纤维的制备及其在糖液脱色中的应用[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 121-129.
HUANG Q, CHEN B R, GAO Z Y, et al. Preparation of modified beet fiber and its application in decolorization of sugar liquid[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(2): 121-129.
- [13] MORENO L, MEDINA O, ROJAS A L. Mucilage and cellulosic derivatives as clarifiers for the improvement of the noncentrifugal sugar production process[J]. Food Chemistry, 2021, 367: 130657.
- [14] 李兴才. 颗粒活性炭在葡萄糖生产中的应用研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2012: 2.
LI X C. Study on granular activated carbon in the glucose production[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2012: 2.
- [15] JULIO A, SOLÍS F, FRIXIA G M, et al. Effectiveness of bagasse activated carbon in raw cane juice clarification [J]. Food Bioscience, 2019, 32: 100437.
- [16] MARTA B, MARIA O R, RAMONA M G, et al. Colour removal from beet molasses by ultrafiltration with activated charcoal[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 283: 313-322.
- [17] 廖炳权. 活性炭在制糖清净工艺中的试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015: 49-50.
LIAO B Q. Applied research of activated carbon in the purification of sugarcane in dusty[D]. Nanning: Guangxi University, 2015: 49-50.
- [18] SONG X R, CHAI Z H, ZHU Y, et al. Preparation and characterization of magnetic chitosan-modified diatomite for the removal of gallic acid and caffeic acid from sugar solution[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 219: 316-327.
- [19] MILJANA D, ZITA Š, TATJANA D, et al. Sugar beet molasses purification by bentonite addition: Analysis of quality

- enhancement and treatment conditions[J]. LWT, 2018, 93: 142-149.
- [20] AANISHA A, SENTHILMURUGAN S, KAUSTUBHA M, et al. Sugarcane juice clarification by lanthanum phosphate nanofibril coated ceramic ultrafiltration membrane: PPO removal in absence of lime pre-treatment, fouling and cleaning studies[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 249: 117157.
- [21] JEGATHEESAN V, PHONG D D, SHU L, et al. Performance of ceramic micro and ultrafiltration membranes treating limed and partially clarified sugar cane juice [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 327(1/2): 69-77.
- [22] GUO S W, LUO J Q, YANG Q J, et al. Decoloration of molasses by ultrafiltration and nanofiltration: Unraveling the mechanisms of high sucrose retention[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(1): 39-53.
- [23] MADAENI S S, ZERESHKI S. Energy consumption for sugar manufacturing Part I: Evaporation versus reverse osmosis[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(6): 1 270-1 276.
- [24] JOGI G D T, SHILPI J, SUJAY C, et al. Selection of the best process stream to remove Ca^{2+} ion using electrodialysis from sugar solution[J]. International Journal of Electrochemistry, 2014, 2 014: 235-247.
- [25] AN X C, HU Y X, WANG N, et al. Continuous juice concentration by integrating forward osmosis with membrane distillation using potassium sorbate preservative as a draw solute [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 573: 192-199.
- [26] SANJAY N, SUHKVINDER K, SUMOD K, et al. Membrane distillation for the concentration of raw cane-sugar syrup and membrane clarified sugarcane juice[J]. Desalination, 2002, 147(1/2/3): 157-160.
- [27] CHIRASMITA P, MRINMOY M, SANKHA K, et al. Shelf life extension of sugarcane juice by cross flow hollow fibre ultrafiltration[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 274: 109880.
- [28] LUO J Q, HANG X F, ZHAI W, 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.
- [29] LI W, LING G Q, HUANG P, et al. Performance of ceramic microfiltration membranes for treating carbonated and filtered remelt syrup in sugar refinery[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 170: 41-49.
- [30] 潘莉莉, 李文, 谢彩锋, 等. 甘蔗制糖无机膜法工艺研究进程[J]. 广西糖业, 2018(3): 38-40.
- PAN L L, LI W, XIE C F, et al. Research process of inorganic membrane technology of sugar industry [J]. Guangxi Sugar Industry, 2018(3): 38-40.
- [31] QIANG X F, LUO J Q, GUO S W, et al. A novel process for molasses utilization by membrane filtration and resin adsorption[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 432-443.
- [32] 何惠欢, 李文, 项俊华, 等. 臭氧脱色技术在制糖工业中的应用研究进展[J]. 中国调味品, 2015, 40(6): 127-131.
- HE H H, LI W, XIANG J H, et al. Application of ozone decoloration technology in sugar industry[J]. China Condiment, 2015, 40(6): 127-131.
- [33] PANIGRAHI C, MISHRA H N, DE S. Effect of ozonation parameters on nutritional and microbiological quality of sugarcane juice[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(11): 13542.
- [34] ADRIANA C G R, ANTONIO C S C T. Clarification of sugarcane juice by ozonation and anodic electrooxidation: Effects of process variables and energy consumption [J]. Sugar Tech, 2021, 23(5): 1 183-1 191.
- [35] 唐振荣, 宁方尧. 响应曲面法优化过氧化氢脱色糖浆的研究[J]. 轻工科技, 2014, 30(1): 5-6, 20.
- TANG Z R, NING F X. Study on optimization of hydrogen peroxide decolorizing syrup by response surface methodology [J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2014, 30(1): 5-6, 20.
- [36] 毛善巧, 黄永春, 杨锋, 等. 过氧化氢- V_C 体系对甘蔗汁色值的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 73-76.
- MAO S Q, HUANG Y C, YANG F, et al. Effect of hydrogen peroxide and V_C system on color value of sugarcane juice[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 73-76.
- [37] 廖耀文, 黄承都, 黄永春. 过氧化氢—维生素 C 体系协同壳聚糖/蒙脱土复合物对甘蔗汁的脱色研究[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(4): 59-67.
- LIAO Y W, HUANG C D, HUANG Y C. Decolorization of sugarcane juice by hydrogen peroxide-vitamin c system with chitosan/montmorillonite composite[J]. Sugarcane and Canesugar, 2020, 49(4): 59-67.
- [38] SAADI G B, JAVAD K, NASSER H, et al. Optimization of fenton oxidation process for the degradation of color precursors in raw sugar beet juice[J]. Sugar Tech, 2016, 18(3): 273-284.
- [39] FANG Y D, ANDERSON E, MINORI U, et al. Selective oxidation of colourinducing constituents in raw sugar cane juice with potassium permanganate[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125036.
- [40] PAL P, PANDEY J P, SEN G. Grafted sesbania gum: A novel derivative for sugarcane juice clarification[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 349-356.
- [41] 关瑞晨. 糖液电化学澄清的研究[D]. 柳州: 广西工学院, 2011: 20-21.
- GUAN R C. Study on clarification of syrup with electrochemical treatment[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2011: 20-21.