

离子色谱同时测定果汁中 22 种糖、糖醇和醇

宋卫得¹, 王 凯¹, 胡首鹏¹, 高复生², 法 芸^{3*}, 林令海¹

(1. 中华人民共和国日照海关, 日照 276800; 2. 青岛市即墨区自然资源局, 青岛 266200;
3. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101)

摘 要: **目的** 建立积分安培-离子色谱法同时测果汁中 22 种糖、糖醇和醇定的方法。**方法** 在流速为 0.40 mL/min, pH 值在 6.5~8.6, 柱温为 30 °C 条件下, 在 CarboPacTM MA1(4 mm×250 mm) 色谱柱中进行分离。**结果** 22 种组分在测定浓度范围内具有良好的线性关系($r^2>0.999$); 除了甲醇外, 其他 21 种组分检出限在 0.006~0.203 mg/L 之间; 在 0.50、1.00、5.00 mg/L 3 个添加浓度水平下, 回收率为 75.83%~105.89%, 相对标准偏差(RSD)在 1.03%~10.39% 范围内。**结论** 该方法简便、快速、准确、灵敏, 完全适于果汁中 22 种糖、糖醇和醇的分析测定。

关键词: 积分安培; 离子色谱; 果汁; 糖; 糖醇; 醇

Simultaneous determination of 22 carbohydrates, sugar alcohols and alcohols in fruit juice by ion chromatography

SONG Wei-De¹, WANG Kai¹, HU Shou-Peng¹, GAO Fu-Sheng², FA Yun^{3*}, LIN Ling-Hai¹

(Rizhao Customs of the people's Republic of China, Rizhao 276800, China; 2. Natural Resources Bureau of Jimo District, Qingdao 266200, China; 3. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China)

ABSTRACT: Objective To establish an integrated ampere-ion chromatography method for simultaneous determination of 22 sugars, glycolols and alcohols in fruit juice. **Methods** CarboPacTM MA1(4 mm×250 mm) was used for separation at a flow rate of 0.40 mL/min, a pH value of 6.5~8.6, and a column temperature of 30 °C. **Results** The linear relation of the 22 components were good in the range of the detection and the linear correlation coefficient were not less than 0.999. Except Methanol, the limits of detection ($S/N=3$) of the other components were 0.006~0.203 mg/L. The recoveries of the twenty-two components in fruit juice were 75.83%~105.89% in the spiked levels of 0.50、1.00、5.00 mg/L, and the relative standard deviations were in the range of 1.03%~10.39%. **Conclusion** This method is easy efficient, accurate and sensitive for simultaneous determination of 22 carbohydrates, sugar alcohols and alcohols in fruit juice.

KEY WORDS: integrated amperometric; ion chromatography; fruit juice; carbohydrate; sugar alcohol; alcohol

基金项目: 国家自然科学基金项目(21405166)、海关总署科技项目(2017IK220)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21405166), and Science and Technology Projects of the General Administration of Customs(2017IK220)

*通讯作者: 法芸, 高级工程师, 主要研究方向为离子色谱分析。E-mail: fayun@qibebt.ac.cn

*Corresponding author: FA Yun, Senior Engineer, Key Laboratory of Bio-Based Materials, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China. E-mail: fayun@qibebt.ac.cn

1 引言

果汁含有糖类、糖醇类、醇类等成分,糖类是多羟基醛或酮,是人们维持生命活动的重要能量物质^[1,2],我国食品安全标准《预包装食品营养标签通则》中规定,必须在食品标签标注糖含量;糖醇是由糖分子的醛基或者酮基被还原成羟基而成的,是一种低热量的新型功能性甜味剂,不与微生物作用,不引起血糖值升高,可作为糖尿病、高血脂病等人群的营养性食品^[3,4];某些醇类对人体有害,如甲醇损害人的呼吸和视力,丙二醇引起肾脏障碍,因此许多国家已禁止在食品中使用。因此,建立果汁中的多种糖、糖醇和醇同时测定的方法,对食品安全质量控制具有重要意义。

目前,食品中糖类、糖醇、醇类检测方法有气相色谱^[5]、气相色谱-质谱联用法^[6]、液相色谱^[7,8]、液相色谱-质谱联用法^[9]、核磁共振法^[10]、离子色谱法^[11]等。目前,文献所报道的糖类、糖醇、醇类测定方法的共性不足,是一次性测定的组分数量少,前处理复杂、检测效率不高,灵敏度低等。其中离子色谱法具有简便、快速、灵敏等优点^[12-15],可以同时快速测定糖类、糖醇等多类别组分。

本文采用积分脉冲安培检测-离子色谱法,深入研究影响组分分离的淋洗液浓度、色谱柱温度、溶液 pH 值等实验因素,构建了一种同时测定果汁中 22 种糖类、糖醇、醇类的方法。以期实现多类别多组分同时定性定量分析,能够大幅提高检测工作效率,降低人力物力成本。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

木糖醇、山梨醇、阿拉伯糖醇、甘露醇、海藻糖、阿拉伯糖、蜜二糖、葡萄糖、半乳糖、果糖、核糖、蔗糖、棉子糖、麦芽糖(纯度>98%,德国 Dr.Ehrenstorfer 公司);2,3-丁二醇、丙二醇、甲醇、丙三醇、赤藓糖醇、鼠李糖、半乳糖醇(纯度>98%,上海安谱实验科技股份有限公司);2-脱氧-D-葡萄糖(纯度 98%,加拿大 Toronto Research Chemicals 公司);氢氧化钠溶液(50% w/w,美国 Thermo Fisher 公司);盐酸(优级纯,美国 Merck 公司);超纯水(电阻率 18.2 M Ω .cm);果汁样品均为市售。

2.2 仪器与设备

ICS 5000+离子色谱仪(配有四元梯度泵、脉冲安培检测器和自动进样器,Chromleon 7.0 色谱工作站,美国 Thermo Fisher 公司);Milli-Q 超纯水仪(美国 Millipore 公司);ML802/02 电子天平(瑞士梅特勒公司);IC-RP10 净化柱(美国 Agela Technologies 公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 色谱条件

Dionex CarboPacTM MA1(4 mm $\times$ 250 mm)离子色谱

柱, Dionex CarboPacTM MA1(4 mm $\times$ 50 mm)保护柱;工作电极: Gold(Au);参比电极: AgCl 电极;电位波形: Gold, Carbo, Quad;流动相: NaOH 淋洗液(氮气保护);流速: 0.40 mL/min;柱温: 30 $^{\circ}$ C;进样量: 10 μ L。淋洗液: A-超纯水、B-1000 mmol/L NaOH 溶液, NaOH 溶液的梯度淋洗程序: 0~80 min 500 mmol/L; 80~85 min, 500 mmol/L 增至 600 mmol/L; 85~105 min, 600 mmol/L; 105~110 min, 600 mmol/L 降至 500 mmol/L; 110~120 min, 500 mmol/L。

2.3.2 样品前处理方法

准确取果汁样品 0.100 g 于 100 mL 烧杯中,加入超纯水约 80 mL,混匀并静置 10 min。如果样品稀释液的 pH 值不在 6.5~8.6 范围内,调节样品稀释液的 pH 值至 6.5~8.6。而后全部稀释液转移至 100 mL 容量瓶中,采用超纯水定容至刻度,摇匀并静置 15 min。取 10.0 mL 上层清液,过 0.22 μ m 滤膜,再过已经预活化的 IC-RP10 柱,收集清液进行检测。

2.3.3 标准溶液配置

配置 22 种组分的标准储备液,根据每种组分在色谱柱中的响应值,而后配置浓度水平为 50 g/L 的混合储备液,根据检测需求,依次配置不同浓度的标准工作液,标准溶液均为现配现用。

3 结果与分析

3.1 淋洗溶液的选择

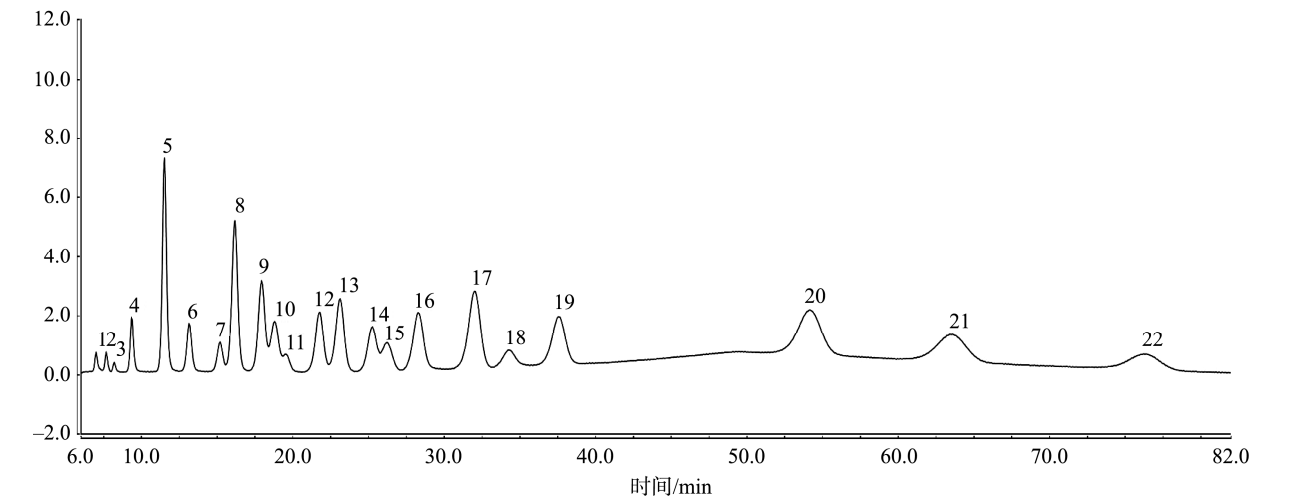
淋洗溶液的种类、浓度、梯度是影响组分分离的重要因素。本文所选 CarboPacTM MA1 色谱柱的功能基是烷基季铵类型的离子交换剂,固定相是苯乙烯-二乙烯基苯大孔树脂,在分离单糖、多糖、糖醇组分时适于采用 OH-淋洗液,经过实验研究分析,选择 NaOH 溶液为淋洗溶液。而后进行了 NaOH 溶液在等度和梯度条件下实验对比。发现在分离时间阶段(0~80 min),采用梯度淋洗时,测定基线出现大幅漂移,导致很多组分不能分离,难以实现定性定量分析;而采用等度淋洗时,基线稳定,22 种组分的分离理想。因此,选择等度 NaOH 淋洗溶液进行实验。图 1 是 22 种糖类、糖醇、醇类组分混合标准溶液的色谱图。

3.2 淋洗液浓度的选择

基于 22 种组分的物化特性和色谱柱的分离机理,选择氢氧化钠溶液浓度分别为 420、450、480、500、520、550 mmol/L 条件下进行实验分析,结果见图 2。淋洗液浓度对组分 20、21、22 这 3 种组分的分离度影响很小,因此重点讨论对前 19 种组分的影响。

从组分受影响程度来看,随着淋洗液浓度的增大,组分 1~6 的保留时间几乎不受影响,而组分 7~19 的保留时间均出现了不同程度的减小。其中,分离度受影响最大的 3 对组分分别是组分 7(鼠李糖,单糖)和 8(阿拉伯糖醇)、组分 10(海藻糖,二糖)和 11(半乳糖醇)、组分 14(阿拉伯糖,单糖)

和 15(蜜二糖, 二糖), 分离度变化很大。这是因为当淋洗离子浓度改变时, 淋洗离子和固定相之间的相互作用也在改变, 同时由于组分的分子半径大小、分子结构、带电荷、极化度等多种因素的共同影响, 每种组分的保留和选择性也随之改变。从总体上来说, 淋洗液浓度对不同类别组分的保留性能影响大小顺序是: 醇<糖醇<单糖<多糖。



注: 1. 2,3-丁二醇; 2. 丙二醇; 3. 甲醇; 4. 丙三醇; 5. 赤藓糖醇; 6. 木糖醇; 7. 鼠李糖; 8. 阿拉伯糖醇; 9. 山梨醇; 10. 海藻糖; 11. 半乳糖醇; 12.甘露醇; 13. 2-脱氧-D-葡萄糖; 14. 阿拉伯糖; 15. 蜜二糖; 16. 葡萄糖; 17. 半乳糖; 18. 果糖; 19. 核糖; 20. 蔗糖; 21. 棉子糖; 22. 麦芽糖。

图 1 22 种组分混合标准溶液的离子色谱图
Fig.1 Ion chromatogram of mixed standard solution

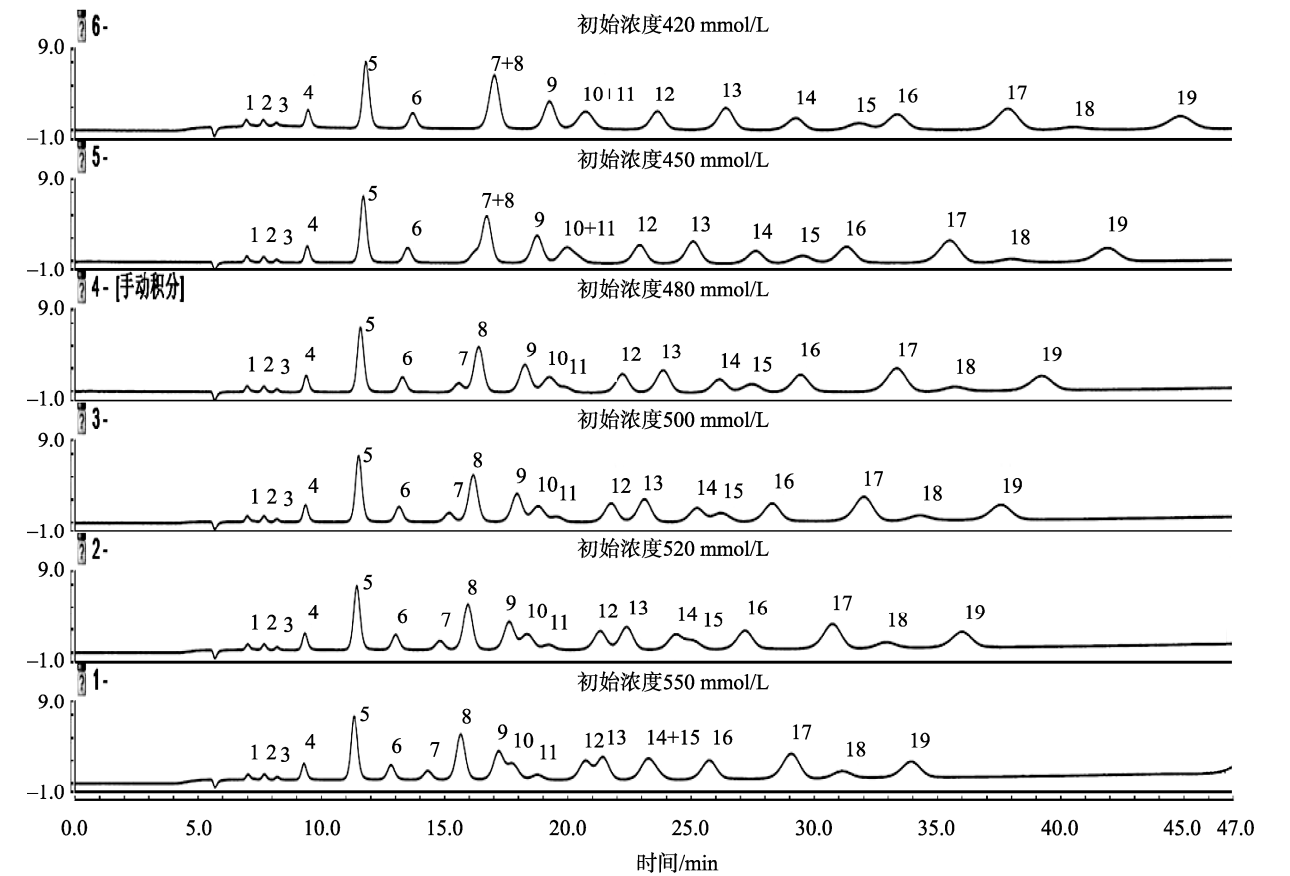


图 2 不同淋洗液浓度下混合标准溶液的离子色谱图
Fig.2 Ion chromatogram of mixed standard solution at different initial concentrations

从不同淋洗浓度来看,浓度为 420、450 mmol/L 时,组分 7 和 8、组分 10 和 11 2 对组分完全重叠;480 mmol/L 时,组分 10 和 11 分离度不高;520 mmol/L 时,组分 14 和 15 未实现完全分离;550 mmol/L 时,组分 9 和 10、组分 12 和 13、组分 14 和 15 这 3 对组分均未实现有效分离;而淋洗液浓度为 500 mmol/L 时,19 种组分的整体分离度和灵敏度均比较理想,选择在 500 mmol/L 条件下进行实验。

3.3 柱温的选择

温度影响色谱柱内离子交换树脂的化学活性和交换性能,而影响组分的选择性、灵敏度和分离度。一般情况下色谱柱温度越高,功能基化学活性增大,柱内离子交换速率越大,组分保留时间减小,但选择性会降低。温度可以改变组分的保留时间,但一般不会改变组分间的洗脱顺序。

依次进行了 25、27.5、30、32.5、35 °C 柱温下的分离实验。从图 3 中看出,温度增大,组分保留时间呈现出增大、减小和几乎不变 3 种不同趋势的变化。组分 1~6、组分 8~9、组分 12~14、组分 16、组分 17、组分 19 受温度影响较小,保留时间几乎不变,这些组分多数是醇、糖

醇和单糖;组分 10(海藻糖)、组分 15(蜜二糖)、组分 20(蔗糖)、组分 21(棉子糖,三糖)、22(麦芽糖)五种组分随着温度的增大,保留时间逐步缩小,这是因为它们都是二糖或者三糖,属于分子半径较大的强保留组分,它们的洗脱是吸热过程,温度升高更利于洗脱;组分 7(鼠李糖)、18(果糖)两种组分随着温度的增大,保留时间逐步增大,这两种组分都是分子半径较小的单糖,果糖是酮糖,鼠李糖有类似酮糖结构,它们的洗脱是放热过程,温度越高,保留就会增大。

从分析温度点来看,25 °C 和 27.5 °C 时,多数组分分离效果良好,但组分 10 和 11 完全重叠。32.5 °C 时,组分 14 和 15,几乎重叠在一起,无法保证定性定量的准确性。35 °C 时,共出现 3 对共洗脱组分,分别是组分 7 和 8,组分 9 和 10,组分 14 和 15。另外,从图 3 中还可以看出,随着温度升高,组分 18(果糖)和组分 22(麦芽糖)的灵敏度越来越小,在 35 °C 时 2 种组分均未检出。由此可见,温度对组分的分离度和灵敏度均具有很大的影响。30 °C 时,22 种组分的总体分离度和灵敏度均比较理想,因此,选择在 30 °C 条件下进行实验分析。

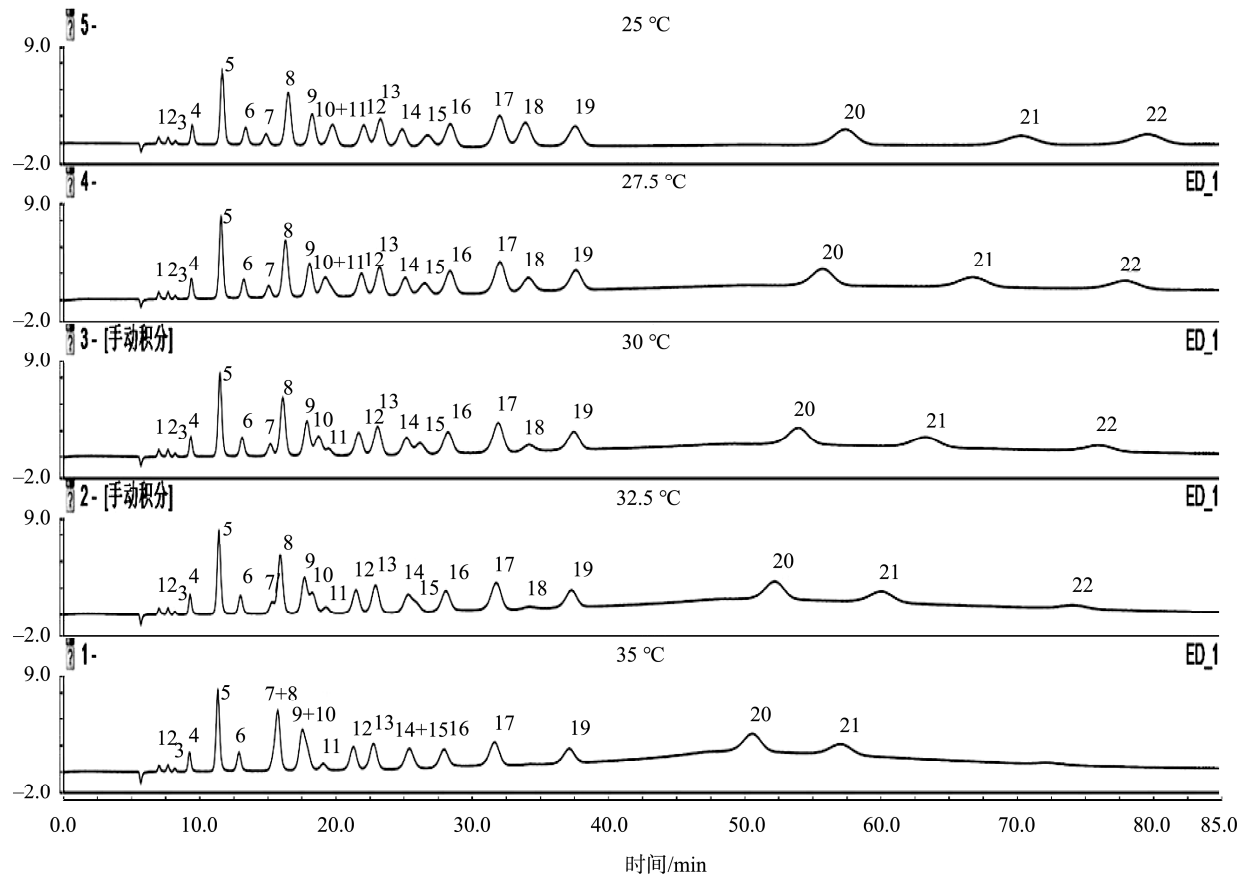


图 3 不同色谱柱温度下标准溶液的离子色谱图
Fig.3 Ion chromatogram of standard solution at different column temperature

3.4 溶液 pH 值的选择

分别移取一系列相同体积 22 种糖类、糖醇、醇类的标准储备液, 依次调节酸碱性配成不同 pH 值的标准溶液, 而后定容至相同体积, 最终配成 pH 值分别为 2.0、3.3、5.0、6.5、8.6、10.5、12.0 的相同理论浓度的标准溶液, 上机检测。实验证实, 葡萄糖、丙三醇、半乳糖、核糖、蜜二糖、麦芽糖这 6 种组分检测含量受溶液 pH 值的影响较大, 其他组分受 pH 值影响较小。在图 4 中, 当 pH 值小于 8.6 时, 葡萄糖、半乳糖、核糖、蜜二糖、麦芽糖这 5 种糖检测含量几乎不变, 而当 pH 值大于 8.6 时, 葡萄糖含量大幅增加, 而另外 4 种糖测定含量均出现下降, 这是因为麦芽糖、蜜二糖是二糖, 可以在碱性条件下, 水解生成一定量的葡萄糖; 半乳糖、核糖在碱性条件下含量降低, 初步分析可能是 2 者都具有 α -H 的醛糖, 在强碱催化下, 易与其他组分发生醇醛缩合反应, 造成含量减小。而丙三醇在 pH 值小于 6.5 和 pH 值大于 8.6 时, 测定含量均出现一定程度的增大, 这是因为丙三醇是一种三元醇, 受酸碱性影响较大, 在强酸或者强碱条件下, 其离子化程度更高, 测定含量增大。综合考虑 22 种组分物化特性、等电点、解离常数等影响因素, 选择在 pH 值为 6.5~8.6 条件下进行分析测定。

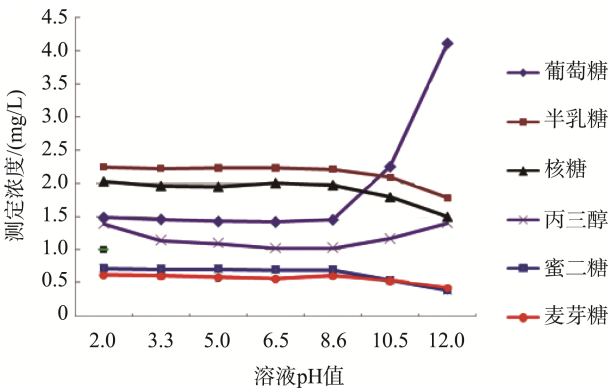


图 4 溶液 pH 值对 6 种组分检测的影响(n=6)
Fig.4 Effect of solution pH value on the determination of six Components (n=6)

3.5 线性范围和检出限

进行了 8 个浓度水平(0.10、0.20、0.40、1.0、2.0、4.0、10.0、20.0 mg/L)标准工作液的检测和校准曲线拟合, 组分检出限以色谱峰信噪比(S/N=3)处检测浓度来计算, 22 种组分同时测定时线性良好, 相关系数(r^2)均大于 0.999。除了甲醇外, 其他 21 种组分检出限在 0.006~0.203 mg/L 之间, 定量限在 0.020~0.677 mg/L 之间(表 1)。

表 1 测定组分的线性范围、线性方程、相关系数及检出限
Table 1 Linear ranges, linear equations, correlation coefficient and LODs of components

序号	化合物	线性范围/(mg/L)	线性方程	相关系数 r^2	检出限/(mg/L)	定量限/(mg/L)
1	2,3-丁二醇	0.10~20.00	$Y=0.100X+0.032$	0.9998	0.060	0.200
2	丙二醇	0.10~20.00	$Y=0.044X+0.009$	0.9999	0.108	0.360
3	甲醇	20.0~2000	$Y=0.0007X-0.011$	0.9993	20.44	68.133
4	丙三醇	0.025~5.00	$Y=1.098X-0.075$	0.9991	0.034	0.113
5	赤藓糖醇	0.05~10.00	$Y=1.190X+0.010$	0.9997	0.011	0.037
6	木糖醇	0.025~5.00	$Y=0.601X-0.004$	0.9998	0.024	0.080
7	鼠李糖	0.05~10.00	$Y=0.445X-0.008$	0.9998	0.036	0.120
8	阿拉伯糖醇	0.05~10.00	$Y=1.140X-0.004$	0.9998	0.017	0.057
9	山梨醇	0.025~5.00	$Y=1.553X-0.023$	0.9998	0.019	0.063
10	海藻糖	0.025~5.00	$Y=0.909X+0.036$	0.9991	0.006	0.020
11	半乳糖醇	0.10~10.00	$Y=0.149X-0.011$	0.9995	0.106	0.353
12	甘露醇	0.025~5.00	$Y=1.219X-0.006$	0.9998	0.024	0.080
13	2-脱氧-D-葡萄糖	0.10~20.00	$Y=0.413X+0.019$	0.9996	0.050	0.167
14	阿拉伯糖	0.05~10.00	$Y=1.004X-0.005$	0.9997	0.035	0.117
15	蜜二糖	0.05~10.00	$Y=0.675X+0.003$	0.9997	0.036	0.120
16	葡萄糖	0.05~10.00	$Y=1.468X-0.020$	0.9998	0.032	0.107
17	半乳糖	0.05~10.00	$Y=1.098X+0.015$	0.9998	0.042	0.140
18	果糖	0.20~20.00	$Y=0.130X-0.010$	0.9996	0.202	0.673
19	核糖	0.10~10.00	$Y=0.797X-0.025$	0.9997	0.094	0.313
20	蔗糖	0.10~20.00	$Y=0.548X+0.037$	0.9997	0.106	0.353
21	棉子糖	0.20~20.00	$Y=0.406X+0.000$	0.9992	0.186	0.620
22	麦芽糖	0.20~20.00	$Y=0.253X-0.039$	0.9991	0.203	0.677

3.6 回收率和精密度

选取1种代表性果汁样品,向样品中添加标准溶液,经过稀释过滤处理后浓度水平分别为0.50、1.00、5.00 mg/L,每个回收水平进行6次平行实验,来验证方法的回收率和精密度。

从表2中看出,在0.50 mg/L添加浓度下,仅有2,3-丁

二醇和甲醇的回收率低于80%,分别为76.37%和75.83%,这是因为两种醇挥发性强,在测定时会有一定的挥发损失。

22种组分测定的回收率在75.83%~105.89%之间,相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)在1.03%~10.39%范围内,满足食品理化检验技术要求。

表 2 22 种组分 3 个加标水平下的平均回收率及精密度(n=6)
Table 2 Average recoveries and precisions of 22 compounds spiked at three levels(n=6)

化合物	加标水平 0.50 mg/L		加标水平 1.00 mg/L		加标水平 5.00 mg/L	
	平均回收率/%	RSD/%	平均回收率/%	RSD/%	平均回收率/%	RSD/%
2,3-丁二醇	76.37	3.25	80.73	4.61	91.76	1.41
丙二醇	92.48	3.79	94.02	2.65	94.05	1.25
甲醇	75.83	3.94	87.20	5.39	90.82	3.30
丙三醇	85.87	3.34	84.76	3.72	99.36	2.55
赤藓糖醇	86.31	4.38	90.21	2.80	93.98	4.29
木糖醇	84.83	2.80	91.45	1.56	95.15	1.03
鼠李糖	85.35	3.87	90.42	4.01	97.45	1.17
阿拉伯糖醇	83.93	3.72	85.85	2.25	98.29	2.18
山梨醇	105.89	4.31	99.26	5.87	101.99	3.25
海藻糖	92.74	5.37	90.63	2.09	100.04	2.32
半乳糖醇	101.13	4.92	93.71	5.04	97.01	1.96
甘露醇	91.46	8.91	90.73	3.49	95.83	2.63
2-脱氧-D-葡萄糖	85.98	4.68	88.59	2.30	98.17	3.03
阿拉伯糖	93.04	5.25	97.01	2.81	95.47	1.24
蜜二糖	94.25	6.30	91.97	8.02	94.88	4.46
葡萄糖	97.08	10.39	97.45	7.30	93.94	6.07
半乳糖	104.68	10.05	101.83	8.47	98.00	5.36
果糖	102.19	7.33	97.71	9.36	100.49	4.18
核糖	92.73	8.92	89.81	5.82	94.85	3.04
蔗糖	103.63	2.57	97.62	1.99	97.68	4.09
棉子糖	100.70	6.41	99.49	7.46	98.46	4.63
麦芽糖	96.84	3.93	104.69	5.38	97.60	3.24

4 结论与讨论

本文通过对初始淋洗浓度、柱温、溶液 pH 值等多种实验影响因素的研究,探索出了果汁中22种糖、糖醇及醇类同时测定的色谱分离条件,建立了积分脉冲安培-离子色谱法同时测定22种糖、糖醇及醇类的分析方法。方法简便实用、灵敏准确、绿色环保,解决了以往采用多种标准、多种仪器、多种处理方法进行多类别多组分测定的技术难题,可以为果汁的生产监控、质量监管、营养价值评估等

提供的技术支撑,同时将来可能成为果汁产品辨别真伪的重要技术手段之一。

参考文献

[1] 韦升坚. 高效液相色谱-蒸发光散射法检测无糖饮料中7种糖类物质的含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(19): 6519-6526.
Wei SJ. Determination of 7 kinds of sugar substances in sugar-free beverage by high performance liquid chromatography-evaporative light scattering dection [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(19): 6519-6526.

[2] Schievano E, Tonoli M, Rastrelli F. NMR quantification of carbohydrates

- in complex mixtures. A challenge on honey [J]. *Anal Chem*, 2017, 89(24): 13405–13414.
- [3] Takuya S, Hirokazu K, Chinatsu M, *et al.* Catalytic conversion of a chitin-derived sugar alcohol to an amide containing isosorbide analog [J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2019, 7(17): 14883–14888.
- [4] Bagga P, Wilson N, Rich L, *et al.* Sugar alcohol provides imaging contrast in cancer detection [J]. *Sci Reports*, 2019, 9(6): 115–152.
- [5] Lein S, Van-Boven M, Holser R, *et al.* Simultaneous determination of carbohydrates and simmondsins in jojoba seed meal (*Simmondsia chinensis*) by gas chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 2002, 977(2): 257.
- [6] Becker M, Zweckmair T, Forneck A, *et al.* Evaluation of different derivatisation approaches for gas chromatographic–mass spectrometric analysis of carbohydrates in complex matrices of biological and synthetic origin [J]. *J Chromatogr A*, 2013, 1281(3): 115–126.
- [7] 熊科胜, 檀华蓉, 葛宇, 等. 高效液相色谱法测定油梨种子热处理后水溶性糖含量的变化[J]. *分析试验室*, 2017, 36(7): 794.
- Xiong KS, Tan HR, Ge Y, *et al.* Analysis of saccharides in avocado seed after heat treatment by high performance liquid chromatography [J]. *Chin J Anal Lab*, 2017, 36(7): 794.
- [8] Liu K, Huang J, Luo DL, *et al.* Analysis and quality control of carbohydrates in therapeutic proteins with fluorescence HPLC [J]. *Biochem Bioph Res Co*, 2016, 478(2): 864–867.
- [9] 徐虹, 张海静, 宋焕禄. 高效液相色谱–质谱法同时测定食品中 5 种单、双糖的含量[J]. *食品科学*, 2011, 32(12): 234.
- Xu H, Zhang HJ, Song HL. Simultaneous determination of monosaccharide and disaccharide contents in foods by high performance liquid chromatography–mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2011, 32(12): 234.
- [10] Stryeck S, Horvath A, Leber B, *et al.* NMR spectroscopy enables simultaneous quantification of carbohydrates for diagnosis of intestinal and gastric permeability [J]. *Sci Reports*, 2018, 8(1): 14650.
- [11] Butler O, Forder J, Saunderson J. Analytical protocol for the sensitive determination of mannitol, sorbitol and glucose containing powders in pharmaceutical workplaces by ion chromatography using a pulsed amperometric detector [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2015, 106(15): 204.
- [12] Ahmed–Adel B, Soher E, Hassan S, *et al.* Biogenic amine contents in selected egyptian fermented foods as determined by ion–exchange chromatography [J]. *J Food Protection*, 2011, 74(4): 681–685.
- [13] 陈锦超, 张婉, 魏沙沙, 等. 加速溶剂萃取–离子色谱法测定 PM_{2.5} 中 5 种水溶性阴离子[J]. *分析试验室*, 2019, 38(2): 131.
- Chen JC, Zhang W, Wei SS, *et al.* Determination of five water–soluble anions in PM_{2.5} by accelerated solvent extraction–ion chromatography [J]. *Chin J Anal Lab*, 2019, 38(2): 131.
- [14] Fa Y, Yang HY, Ji CS, *et al.* Simultaneous determination of amino acids and carbohydrates in culture media of *Clostridium thermocellum* by valve–switching ion chromatography [J]. *Anal Chimica Acta*, 2013, 33(8): 97–102.
- [15] 孙文闪, 诸骏杰, 董叶菁, 等. 离子色谱–串联质谱法测定生活饮用水中的高氯酸盐、氯酸盐和溴酸盐[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(7): 2150–2154.
- Sun WS, Chu JJ, Dong YQ, *et al.* Determination of perchlorate, chlorate and bromate in drinking water by ion chromatography– tandem mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(7): 2150–2154.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介

宋卫得, 高级工程师, 主要研究方向为食品检测技术。

E-mail: woxinyh2006@163.com

法 芸, 高级工程师, 主要研究方向为离子色谱分析。

E-mail: fayun@qibebt.ac.cn