

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.09.010

基于氢氧稳定同位素的桃果原汁掺水鉴别

Identification of peach fruit juice adulterated with water based on hydrogen and oxygen stable isotopes

蒋越^{1,2} 李安² 靳欣欣² 潘立刚² 张志勇¹JIANG Yue^{1,2} LI An² JIN Xin-xin² PAN Li-gang² ZHANG Zhi-yong¹

(1. 北京农学院食品科学与工程学院, 北京 102206; 2. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097)

(1. College of Food Science and Engineering, Beijing Agricultural College, Beijing 102206, China;

2. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China)

摘要:以鲜榨桃汁为研究对象,利用全自动真空冷凝抽提技术,对桃汁样品中的水分进行无分馏提取,利用元素分析仪—稳定同位素质谱仪(EA-IRMS)对水样氢氧同位素进行同时测定,通过添加试验对分析方法可靠性进行评价,利用所建立的分析方法结合多重比较分析探讨桃汁掺不同比例水分后氢氧同位素比值的变化规律。结果表明:添加 USGS45 样品中 $\delta^2\text{H}$ 为 $(-11.10 \pm 1.39)\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $(-2.38 \pm 0.53)\%$; 添加 GB04459 样品中 $\delta^2\text{H}$ 为 $(-62.50 \pm 0.59)\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $(-7.95 \pm 0.41)\%$; 添加 GB04460 样品中 $\delta^2\text{H}$ 为 $(-142.00 \pm 3.40)\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $(-20.26 \pm 2.14)\%$; 与标准水样 USGS45、GB04459、GB04460 相比,3 个样品的氢氧同位素比值均无显著性差异($P>0.05$),说明试验方法操作过程中未发生明显的氢氧同位素分馏效应。鲜榨桃汁中掺杂外源地下水后氢氧同位素均呈明显的重同位素贫化趋势,综合这两种指标,说明地下水占比自 10% 起便可实现桃汁掺水的鉴别。

关键词:果汁掺假;全自动真空冷凝抽提技术;元素分析仪—稳定性同位素质谱法;氢氧同位素

Abstract: In this study, fresh peach juice is taken as the research object, and the moisture in the peach juice sample is extracted without fractionation by using the full-automatic vacuum condensation extraction technology. The hydrogen and oxygen isotopes in the water sample are simultaneously determined by using the element analyzer-stable isotope mass spectrometer (EA-IRMS). The reliability of the analysis method is evaluated by adding tests, and the change rule of hydrogen and oxygen isotope ratio

after the peach juice is mixed with different proportions of moisture is discussed by using the established analysis method and multiple comparative analysis. The results showed that the measured values of the added samples were as follows: $\delta^2\text{H} = (-11.10 \pm 1.39)\%$ and $\delta^{18}\text{O} = (-2.38 \pm 0.53)\%$ in the added USGS45 samples respectively. Adding $\delta^2\text{H} = (-62.50 \pm 0.59)\%$ and $\delta^{18}\text{O} = (-7.95 \pm 0.41)\%$ in GB04459 sample; Adding $\delta^2\text{H} = (-142.00 \pm 3.40)\%$ and $\delta^{18}\text{O} = (-20.26 \pm 2.14)\%$ in GB04460 samples, compared with standard water samples USGS45, GB04459 and GB04460, the hydrogen and oxygen isotope ratios of the three samples have no significant difference ($P>0.05$), indicating that no obvious hydrogen and oxygen isotope fractionation effect occurred during the operation of this method. The hydrogen and oxygen isotopes in freshly squeezed peach juice are obviously depleted in heavy isotopes after being doped with exogenous groundwater. Combining these two indexes, it is shown that the identification of mixing water in peach juice can be realized from 10% of groundwater.

Keywords: fruit adulteration; full-automatic vacuum condensation extraction technology; elemental analysis-stable isotope mass spectrometry; hydrogen and oxygen isotope

中国作为世界上水果第一生产大国,其果汁类饮品因方便饮用、便于携带、营养价值高等诸多优势^[1]备受消费者青睐,且在软饮料行业中也占有越来越重要的地位^[2]。随着近年来果汁产量的不断增长,且果汁在生产加工过程中所需原料成本较高,一些不法企业常借以各种掺杂手段以达到降低成本的目的^[3-4],一定程度上阻碍了食品市场的稳定发展^[5-7]。

水果原汁掺水是影响产品顺利出口和国际声誉的主要问题之一。针对果汁市场上出现的掺假现象及多变的造假技术,越来越多的国内外学者展开了相关研究,并提出了一系列的鉴别方法。目前,果汁掺水检测可利用折

基金项目:北京市优秀人才项目(编号:201813);北京市农林科学院青年科研基金项目(编号:QNJJ201928)

作者简介:蒋越,男,北京农学院在读硕士研究生。

通信作者:潘立刚(1964—),男,北京市农林科学院研究员,博士。

E-mail: Panligang2012@126.com

收稿日期:2020-03-10

光计检测样品的可溶性固形物、果汁的缓冲能力^[8]、缓冲容量^[9-10]及单体氧同位素^[11-13]加以鉴别。而利用单体氧同位素进行果汁掺水鉴别时,存在一定局限性,往往会因同位素发生分馏使其准确性降低。试验拟以天然桃汁中水分的氢氧同位素组成为参照对象,利用全自动真空冷凝抽提技术—元素分析仪—稳定同位素质谱仪法,使样品在提水过程中同位素不发生分馏效应,综合比较不同掺水比例下果汁中 H、O 两种同位素组成同天然果汁中水分氢氧同位素组成的差异,并建立掺水鉴别方法,以弥补利用单体氧同位素鉴别方法的不足,旨在为建立桃汁掺水鉴别方法,建立食品安全可追溯体系^[14],推动稳定同位素技术在水果及其制品掺伪鉴别领域的深入研究和实际应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 主要仪器及试剂

VSMOW2($\delta^2\text{H}=0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=0\text{‰}$)、USGS45($\delta^2\text{H}$ VSMOW = -10.32‰, $\delta^{18}\text{O}$ VSMOW = -2.238‰)、USGS47($\delta^2\text{H}$ VSMOW = -150.2‰, $\delta^{18}\text{O}$ VSMOW = -19.80‰);美国地质勘探局 Reston 稳定同位素实验室; GB04459($\delta^2\text{H} = -63.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -8.61\text{‰}$)、GB04460($\delta^2\text{H} = -144\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -19.13\text{‰}$);中国地质科学院水文地质环境地质研究所;

稳定同位素比值质谱仪:MAT253 型,美国赛默飞世尔公司;

元素分析仪:Flash 2000HT 型,美国赛默飞世尔公司;

榨汁机:HR1832 型,飞利浦(中国)投资有限公司;

旋涡混匀器:IKA VORTEX 4 Digital 型,莱贝(上海)科技仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:SCIENTZ-18N 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

全自动真空冷凝抽提仪:LI-2000 型,北京理加联合科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集 2019 年 7~8 月于桃子成熟期前往北京市平谷区采摘同一品种的大桃样品若干,具体选果要求:成熟度一致、着色较好的果实;单果质量相近;出汁率不低于 75%;可溶性固形物含量为 11%~15%。外源水样:北京地区地下水,于 2019 年 8 月 1 日取自北京市平谷区。

1.2.2 样品预处理 干布擦拭干净样品表面,去除果核及果柄,切块,榨汁,将果渣与果汁分离,收集桃汁样品装盒后封口膜封口,于 -25℃ 冷冻保藏。

1.2.3 桃汁掺水方案 以水分提取的桃汁样品为掺伪对象,将已知氢氧同位素丰度比的外源地下水样与桃汁样

品以不同比例添加至 10 mL 具塞离心管中,其中混合样品的掺水比例依次为 0%,5%,10%,20%,40%,80%,100%,涡旋混匀。

1.2.4 果汁水分提取 准确称取 1 g 桃汁样品装入玻璃样品瓶中,顶部塞满脱脂棉以防止水果残渣暴沸污染管路,利用自动水分真空抽提仪对桃汁样品中的水分进行提取。提取时间 2 h,提取温度 100℃,样品收集冷阱温度 -90℃。待收集水分解冻后,过 0.45 μm 微孔滤膜并转入进样小瓶中,上机待测。

1.2.5 果汁水分提取方法评价 将桃汁样品在真空冷冻干燥机中冻干 48 h,分别加入与失水重量相等的标准水样 USGS45、GB04459、GB04460,搅匀,按 1.2.4 方法提取水样并进行氢氧稳定同位素测定与分析评价。

1.3 氢氧稳定同位素分析及数据表达

将提取的样品水分置于元素分析仪的自动进样盘中,样品于 1380℃ 下在玻璃碳珠催化作用下裂解为 H₂ 和 CO,即样品中的 H 和 O 元素转化成 H₂ 和 CO 气体,在氦载气流和色谱柱吸附解吸后,H₂ 和 CO 先后进入稳定同位素质谱仪进行同位素比值的测定。以 VSMOW2、USGS45 和 USGS47 为标准物质,采用 3 点校正的方式对测试结果进行校正^[15]。元素分析—稳定同位素质谱仪(EA-IRMS)参数为:氦气载气流速 100 mL/min;H、O 裂解炉温度 1380℃;分子筛色谱柱温度 60℃。采用相对测量法表达样品同位素的组成,即将待测样品中的同位素比值与标准物质的同位素比值进行比较,其结果称为样品的 δ 值,并按式(1)进行计算。氢氧同位素相对丰度比值均以平均海洋水的丰度为参照。

$$\delta^h E = \frac{R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}}{R_{\text{标准}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$\delta^h E$ ——元素 E 的稳定同位素比率;

$R_{\text{样品}}$ ——样品中元素 E 的稳定同位素相对丰度比;

$R_{\text{标准}}$ ——标准参考物质中元素 E 的稳定同位素相对丰度比^[16]。

1.4 数据处理

使用 Excel 2007 软件整理各项结果,并采用 Origin 软件作图,采用 SPSS 16.0 软件进行均值的差异显著性及单因素方差分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 氢氧同位素同时测定方法评价

由表 1 可知,添加 USGS45 样品中 $\delta^2\text{H}$ 为 $(-11.10 \pm 1.39)\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $(-2.38 \pm 0.53)\text{‰}$;添加 GB04459 样品中 $\delta^2\text{H}$ 为 $(-62.50 \pm 0.59)\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $(-7.95 \pm 0.41)\text{‰}$;添加 GB04460 样品中 $\delta^2\text{H}$ 为 $(-142.00 \pm 3.40)\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $(-20.26 \pm 2.14)\text{‰}$,且 $P(\delta^2\text{H}) > 0.05$,

表 1 真空水分提取-EA-IRMS 方法评价

Table 1 Evaluation of the method of water extraction under vaccum-EA-IRMS

| 样品 | 真实值 | | 测定值 | | P($\delta^2\text{H}$) | P($\delta^{18}\text{O}$) |
|---------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | $\delta^2\text{H}/\text{‰}$ | $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ | $\delta^2\text{H}/\text{‰}$ | $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ | | |
| USGS45 | -10.30 | -2.24 | -11.10±1.39 | -2.38±0.53 | 0.416 | 0.695 |
| GB04459 | -63.40 | -8.61 | -62.50±0.59 | -7.95±0.41 | 0.132 | 0.109 |
| GB04460 | -144.00 | -19.10 | -142.00±3.40 | -20.26±2.14 | 0.489 | 0.456 |

$P(\delta^{18}\text{O}) > 0.05$,说明利用此方法进行水分抽提的过程中样品的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 无显著性差异,即此过程中并未发生氢氧同位素的分馏效应,故利用此方法可有效提取桃汁中的水分。

2.2 基于氢氧同位素分析的鲜榨桃汁掺水鉴别

2.2.1 果汁掺水后的氢氧稳定同位素变化 研究^[17]表明,北京地区大气降水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值在 7~9 月份内呈温度效应, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 呈上升趋势,且与地下水氢氧同位素较为接近。地下水来源于降水,在地下水形成过程(淋溶、径流等)中总体上要比降水贫化。果树的水源主要来源于大气降水和地下水灌溉^[18],而水果中的水在果树蒸腾、土壤水蒸发等共同作用下,导致果实吸收利用的水比地下水要富集。由图 1 可知,当桃汁样品中未加入外源水时,即在 0%处鲜榨桃汁提取的水分中 $\delta^2\text{H}$ 为 -44.55‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -4.70‰,地下水样的 $\delta^2\text{H}$ 为 -64.65‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -9.14‰。随着外源地下水样占比的不断增加,鲜榨桃汁中掺杂外源地下水后 H、O 同位素均呈明显的重同位素贫化趋势,且相关系数均 >95%,三者之间呈良好的负相关性。

2.2.2 外源水样的氢氧同位素多重比较分析 由表 2 可知,当地下水样占待测样品总比重 $\geq 10\%$ 时, $\delta^2\text{H}$ 差异显

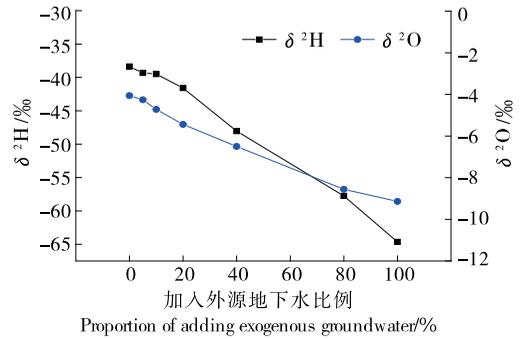


图 1 外源地下水样对鲜榨桃汁氢氧同位素组成的影响
Figure 1 Effect of exogenous water sample on hydrogen and oxygen isotope composition of freshly squeezed peach juice under different mixing ratios

著性概率依次为 0.032 9, 0.001 4, 0.000 2, 0.000 4, 0.000 9;当地下水样占待测样品总比重 $\geq 20\%$ 时, $\delta^{18}\text{O}$ 的显著性概率分别为 0.012 5, 0.000 2, 0.000 4, 0.000 5,说明当掺水比 $> 20\%$ 时, $P(\delta^{18}\text{O}) < 0.05$,此时掺水与未掺水桃汁存在显著性差异,可利用单体 O 同位素准确鉴别鲜榨桃汁的真实性;而鲜榨桃汁掺水后, H 同位素较 O 同位素变化更灵敏,当掺入外源地下水 $> 10\%$ 时,掺水果汁与同鲜榨桃汁两者的 H 同位素存在显著性差异,即可检出掺水,

表 2 掺不同比例地下水氢氧同位素多重比较[†]

Table 2 Multiple comparison of hydrogen and oxygen isotopes under different groundwater ratios

| 指标 | 地下水比例/% | 均值/‰ | 均值差/‰ | 显著性概率/% | 95%置信区间 | |
|-----------------------|---------|-----------------|------------|---------|----------|----------|
| | | | | | 下限 | 上限 |
| $\delta^2\text{H}$ | 5 | -46.195±0.417 2 | 1.641 67 | 0.179 7 | -0.911 3 | 4.194 7 |
| | 10 | -47.395±1.237 4 | 2.841 67* | 0.032 9 | 0.288 7 | 5.394 7 |
| | 20 | -49.695±0.063 6 | 5.141 67* | 0.001 4 | 2.588 7 | 7.694 7 |
| | 40 | -56.810±0.381 8 | 12.256 67* | 0.000 2 | 9.703 7 | 14.809 7 |
| | 80 | -59.315±1.152 6 | 14.761 67* | 0.000 4 | 12.208 7 | 17.314 7 |
| | 100 | -64.647±0.211 3 | 20.093 33* | 0.000 9 | 17.809 9 | 22.376 8 |
| $\delta^{18}\text{O}$ | 5 | -4.800±0.367 7 | 0.093 33 | 0.764 1 | -0.589 2 | 0.775 8 |
| | 10 | -5.260±0.735 4 | 0.553 33 | 0.099 8 | -0.129 2 | 1.235 8 |
| | 20 | -5.645±0.134 4 | 0.938 33* | 0.012 5 | 0.255 8 | 1.620 8 |
| | 40 | -6.565±0.374 8 | 1.858 33* | 0.000 2 | 1.175 8 | 2.540 8 |
| | 80 | -8.640±0.325 3 | 3.933 33* | 0.000 4 | 3.250 8 | 4.615 8 |
| | 100 | -9.143±0.100 7 | 4.436 67* | 0.000 5 | 3.826 2 | 5.047 1 |

† * 表示差异显著(P<0.05)。

因此,可利用 H 同位素进行更少量的桃汁掺水鉴别。
 2.2.3 基于 H、O 同位素桃汁掺水综合鉴别 参照李涛等^[19]的方法表达基于以 H、O 同位素两项指标协同检测桃汁在掺水过程中 H、O 同位素组成的变化关系。若其中的一项或两项指标同鲜榨桃汁的有显著性差异即可鉴别为阳性样本,两项均与鲜榨桃汁的无显著性差异,则为阴性样本。由表 3 可知,当地下水样占待测样品总比重为 5%时, $P(\delta^2\text{H}) > 0.05$,无显著性差异,记作阴性样品;当地下水样占待测样品总比重 $\geq 10\%$ 时, $\delta^2\text{H}$ 差异显著

性概率值 $P < 0.05$,即此时存在显著性差异,记作阳性样本;而当地下水样占待测样品总比重为 5%,10%时, $\delta^{18}\text{O}$ 差异显著性概率值 $P > 0.05$,记作阴性样品;当地下水样占待测样品总比重 $\geq 20\%$ 时, $\delta^{18}\text{O}$ 显著性概率 $P < 0.05$,较鲜榨桃汁相比存在显著性差异,记作阳性样本。综合鉴定后表明:当鲜榨桃汁中掺加外源地下水样,且地下水占比 $\geq 10\%$ 时,可利用 H、O 同位素协同鉴定实现对桃汁的掺水鉴别,与牛丽影等^[20]、高敏^[21]的方法相比,此方法具有无分馏、回收率高等优势。

表 3 氢氧同位素综合鉴别结果[†]

Table 3 Comprehensive identification results of hydrogen and oxygen isotopes

| 样品 | H 同位素 | | | O 同位素 | | | 综合鉴别结果 |
|-------------|-----------------------------|---------|------|--------------------------------|---------|------|--------|
| | $\delta^2\text{H}/\text{‰}$ | P 值 | 鉴别结果 | $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ | P 值 | 鉴别结果 | |
| 鲜榨桃汁 | -44.55 | 1.000 0 | 阴 | -4.70 | 1.000 0 | 阴 | 阴 |
| 鲜榨桃汁+5%地下水 | -46.19 | 0.179 7 | 阴 | -4.80 | 0.764 1 | 阴 | 阴 |
| 鲜榨桃汁+10%地下水 | -47.39 | 0.032 9 | 阳 | -5.26 | 0.099 8 | 阴 | 阳 |
| 鲜榨桃汁+20%地下水 | -49.70 | 0.001 4 | 阳 | -5.64 | 0.012 5 | 阳 | 阳 |
| 鲜榨桃汁+40%地下水 | -56.81 | 0.000 2 | 阳 | -6.56 | 0.000 2 | 阳 | 阳 |
| 鲜榨桃汁+80%地下水 | -59.32 | 0.000 4 | 阳 | -8.64 | 0.000 4 | 阳 | 阳 |

[†] $P < 0.05$ 鉴别结果为阳,反之为阴。

3 结论

通过已知氢氧同位素比值水样添加试验证实了氢氧同位素协同鉴定方法在果汁水分提取过程中分馏效应不显著,但方法具有可靠性;当地下水占比 $\geq 10\%$ 时便可实现桃汁掺水的鉴别,弥补了利用单体氧同位素进行果汁掺水鉴别的不足,但围绕稳定同位素技术的应用原理、关键溯源因子及其影响因素等问题还有待深入研究。随着掺假手段的层出不穷,应积极发展应用前景广泛的新兴技术,如稳定同位素技术等,通过多仪器、多方法、多元素连用的手段大力开发检测技术^[22],通过实践来改进方法,提高检测的可靠性。

参考文献

[1] GÓMEZ-ARIZA J L, VILLEGAS-PORTERO M J, BERNAL-DAZA V. Characterization and analysis of amino acids in orange juice by HPLC-MS/MS for authenticity assessment[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 540(1): 221-230.
 [2] 张宏康, 李笑颜, 吴戈仪, 等. 果汁加工研究进展[J]. *农产品加工*, 2019(2): 86-88.
 [3] 张森, 李燮昕, 贾洪锋, 等. 我国果汁掺假检测技术研究现状[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(5): 205-208.
 [4] 李莹婷, 程钊, 闵小珍. 果汁及果汁饮料中原果汁含量的检测现状与发展[J]. *食品安全导刊*, 2016(27): 94.
 [5] 雷鸣, 何晋浙, 孙培龙. 掺假蜂蜜检测技术的研究综述[J]. *食品科技*, 2012, 37(7): 283-287.
 [6] 张浩. 泛在网在食品安全领域的可行性研究: 以建设泛在食

品安全网为例[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 89-93.
 [7] FEDRICA C, ROBERTO L, MATTEO P, et al. Characterisation of authentic Italian extra-virgin olive oils by stable isotope ratios of C, O and H and mineral composition[J]. *Food Chemistry*, 2008, 118(4): 901-909.
 [8] 吴继军, 肖更生, 陈卫东, 等. 利用缓冲能力检测橙汁饮料中橙汁含量的方法研究[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(8): 96-98.
 [9] 高海燕, 周晓慧, 吴继红, 等. 利用缓冲容量检测梨汁饮料中的果汁含量[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(11): 101-104.
 [10] 高海燕, 赵镭, 吴继红, 等. 利用缓冲容量检测苹果汁饮料中原果汁含量的方法研究[J]. *中国食品学报*, 2007, 7(3): 122-126.
 [11] LES M, GUERIN R, MARTIN G J, et al. Improved detection of added water in orange juice by simultaneous determination of the oxygen-18/oxygen-16 isotope ratios of water and ethanol derived from sugars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(18): 5 202-5 206.
 [12] AOAC Official Method 992.09 Sugar-beet-derived syrups in frozen concentrated orange juice ¹⁸O measurements in water-method using isotope ratio mass spectrometry[S]. Gaithersburg: AOAC International, 2005.
 [13] 蒋露, 薛洁, 林奇, 等. SNIF-NMR 和 IRMS 技术在葡萄酒质量评价中的初步研究[J]. *食品与发酵工业*, 2008, 34(11): 139-143.
 [14] 罗辉. 中国食品安全监管的问题审视与机制向度[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 100-103.

(下转第 210 页)

表 2 网络模型预测值与真实值统计分析

Table 2 Statistical analysis of network model predicted and true value

| 项目 | 出料含水率/% | 出料温度/℃ |
|---------|-------------|------------|
| 工艺技术标准 | 17.00±1.50 | 58.00±3.00 |
| 真实值 | 16.97±0.075 | 58.42±0.31 |
| 预测值 | 16.98±0.30 | 58.40±0.50 |
| 预测值占比/% | 64.34 | 65.72 |

由表 2 可知,出料含水率的工艺技术标准要求为(17.0±1.5)%,生产实际值为(16.97±0.075)%,而预测值为(16.98±0.30)%,占 64.34%;出料温度的工艺技术标准要求为(58.0±3.0)℃,生产实际值为(58.42±0.31)℃,而预测值为(58.40±0.50)℃,占 65.72%;说明预测值具有较好的预测精度和预测效果。

综上,试验构建的工艺参数与出料质量贝叶斯网络模型在预测应用方面拥有较好的精度和效果,具有较好的实用价值和前景。

3 结论

基于烟叶松散回潮工艺参数和出料质量数据组成的复杂网络节点集,采用协方差方法计算节点间相关性,确定网络路径,初步构建复杂网络结构,并采用最大最小爬山算法对网络结构进行优化,采用最大似然估计法,确定网络路径参数,构建了工艺参数与出料质量贝叶斯网络模型,并结合松散回潮生产实际情况,通过添加网络结构“白名单(允许)”和“黑名单(禁止)”等约束方式,保证了网络模型构建的合理性。网络模型对出料含水率和出料温度的预测结果表明,构建的网络模型是切实有效的。后续可将网络模型应用于打叶复烤、润叶加料、叶丝干燥、加香等卷烟加工关键工序,辅助工艺技术人员开展过程质量维护、工艺参数设计及工艺标准制修订,对提升卷烟加工工艺水平意义重大。

参考文献

[1] 徐维华, 罗登山, 雷樟泉, 等. 卷烟工艺规范[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016: 12.

[2] 陈杰, 徐永虎, 吴昌军, 等. 松散回潮工序工艺参数对片烟加工物理性能的影响[J]. 烟草科技, 2018, 51(11): 85-90.

[3] 邵惠芳, 赵蓉蓉, 范磊, 等. 松散回潮回风温度对烟叶化学成分与中性致香物质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(6): 138-145.

[4] 高翔, 黄传喜, 陈杰. 松散回潮模式对烟叶加工质量的研究[J]. 南方农机, 2018, 49(16): 84.

[5] 唐军, 周冰, 唐丽, 等. 松散回潮工序加工强度对烟丝致香物质的影响[J]. 江西农业学报, 2015, 27(3): 66-69, 73.

[6] 邓国栋, 姚光明, 李晓, 等. 松散回潮工序加工强度对烤烟烟叶感官特性的影响[J]. 郑州轻工学院学报(自然科学版), 2011, 26(2): 32-35.

[7] 李秀芳. 烟片松散回潮关键工艺参数过程控制系统的优化设计[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(3): 34-41.

[8] 范勇, 郑利锋, 庞天航, 等. 烟叶松散回潮含水率控制方法的优化[J]. 轻工科技, 2019, 35(4): 123-125.

[9] 容秀英, 林明, 冯志斌. 烟叶松散回潮热风温度极值的控制方法研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2017, 39(2): 105-108.

[10] TANG Li-jun, FANG Ying-jie, YIN Jian-chun. The effects of exercise interventions on Parkinson's disease: A Bayesian network meta-analysis[J]. Journal of Clinical Neuroscience, 2019, 70(8): 47-54.

[11] MAURO S, ANTONIO S, FABIO S. A survey on Bayesian network structure learning from data[J]. Progress in Artificial Intelligence, 2019, 8(4): 425-439.

[12] 范慧敏. 基于贝叶斯网络的动态数据流分类研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 1-4.

[13] 李艳美. 基于贝叶斯网络的数据挖掘应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 1-7.

[14] 何林海. 基于贝叶斯网络的概率图模型变分近似推理研究[J]. 山东农业工程学院学报, 2019, 36(4): 26-27.

[15] 周冰, 唐军, 文里梁, 等. 连续型贝叶斯网络在制丝工艺过程稳态优化中的应用[J]. 烟草科技, 2019, 52(12): 93-99.

[16] 李涛, 朱小红, 盛喜霞, 等. 基于棕榈油酸和异丁烯醛双指标鉴别地沟油的方法[J]. 食品科学, 2013, 34(8): 199-203.

[17] 牛丽影, 胡小松, 赵镭, 等. 稳定同位素比率质谱法在 NFC 与 FC 果汁鉴别上的应用初探[J]. 中国食品学报, 2009, 9(4): 192-197.

[18] 高敏. 苹果原汁的鉴别研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.

[19] 胡桂仙, 赵首萍, 朱加虹, 等. 多元素及稳定同位素技术在有机食品鉴定中的应用[J]. 农产品质量与安全, 2016(6): 47-54.

(上接第 66 页)

[15] 李安, 陈秋生, 赵杰, 等. 基于稳定同位素与稀土元素指纹特征的大桃产地判别分析[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 322-328.

[16] 靳欣欣, 潘立刚, 李安. 稳定同位素技术在农产品安全中的应用研究进展[J]. 蔬菜, 2018(9): 29-34.

[17] 郝玥, 余新晓, 邓文平, 等. 北京西山大气降水中 D 和 ¹⁸O 组成变化及水汽来源[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1 211-1 221.

[18] 石辉, 刘世荣, 赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 163-166.