

不同产地库尔勒香梨果实生育期氢、氧 稳定同位素特征

张伟^{1,2}, 赵多勇^{2*}, 丁长伟^{1,2}, 赵丹^{1,2}, 李安³,
马雪^{1,2}, 康露², 刘志虎⁴

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院农业质量标准与检测技术研究所/农业农业农村部农产品质量安全风险评估实验室/新疆农产品质量安全重点实验室, 乌鲁木齐 830091; 3. 北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所, 北京 100097; 4. 酒泉市林果服务中心, 酒泉 735008)

摘要: 目的 分析库尔勒香梨果实生育期氢(H)、氧(O)稳定同位素比值及其变化规律, 比较不同产地香梨果实 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 差异。**方法** 以不同产地库尔勒香梨为研究对象, 采集花后 60~150 d 的果实样本, 采用真空冷凝提取法抽提果实中的水分, 用高温裂解-同位素比值质谱法测定其 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 分析香梨生育期 H、O 同位素特征, 通过方差分析法探讨各产地果实水分 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的差异。**结果** 新疆库尔勒市、阿克苏市和甘肃酒泉市的香梨生育期果实水 $\delta^2\text{H}$ 的变化范围分别为-49.9‰~-15.4‰、-62.0‰~-28.2‰、-61.5‰~-1.5‰, $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为-2.5‰~-6.7‰、-5.3‰~-3.4‰、-3.5‰~-14.2‰, 成熟期 3 个产地 $\delta^{18}\text{O}$ 值均存在极显著性差异 ($P<0.01$)。整个生育期 3 个产地 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 蒸发线均位于当地大气水线右下方, 香梨果实水富集作用明显。**结论** 新疆库尔勒市、阿克苏市和甘肃酒泉市香梨果实整个生育期 H、O 同位素具有各自的指纹特征, 库尔勒的蒸发线斜率和截距更低, 果实水蒸发富集 ^2H 、 ^{18}O 的能力更强。

关键词: 库尔勒香梨; 稳定同位素; 氢; 氧; 真实性鉴别; 生育期

Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in different origins Korla fragrant pear fruits in growth period

ZHANG Wei^{1,2}, ZHAO Duo-Yong^{2*}, DING Chang-Wei^{1,2}, ZHAO Dan^{1,2},
LI An³, MA Xue^{1,2}, KANG Lu², LIU Zhi-Hu⁴

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment Laboratory of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Xinjiang Agricultural Product Quality and Safety Key Laboratory, Urumqi 830091, China; 3. Institute of Quality Standard and Testing Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 4. Jiuquan Forest and Fruit Service Center, Jiuquan 735008, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the hydrogen (H) and oxygen (O) stable isotope ratios and their changing laws during the growth period of Korla fragrant pear fruits, and compare the differences in $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of fragrant pear

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960504、41563002)、自治区重点实验室开放课题项目(2019D04013)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31960504, 41563002), and the Open Project of Key Laboratories of the Autonomous Region (2019D04013)

*通信作者: 赵多勇, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量与食物安全。E-mail: Luckydyz@163.com

*Corresponding author: ZHAO Duo-Yong, Ph.D, Professor, Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, No.403, Nanchang Road, Shaybak District, Urumqi 830091, China. E-mail: Luckydyz@163.com

fruits from different origins. **Methods** Taking the Korla fragrant pear from different origins as the research object, the fruit samples were collected from 60 to 150 days after flowering, and the water in the fruit was extracted by vacuum condensation extraction method. The $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values were determined by high temperature isotope-ratio mass spectrometry, and the H and O isotopic characteristics of fragrant pear during the growth period were analyzed, the differences of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of fruit moisture in different producing areas were analyzed by variance analysis method. **Results** The variation ranges of $\delta^2\text{H}$ in fruit water during the growth period of fragrant pears in Korla, Aksu, and Jiuquan, Gansu were $-49.9\text{‰}\sim 15.4\text{‰}$, $-62.0\text{‰}\sim 28.2\text{‰}$, $-61.5\text{‰}\sim 1.5\text{‰}$, the variation ranges of $\delta^{18}\text{O}$ were $-2.5\text{‰}\sim 6.7\text{‰}$, $-5.3\text{‰}\sim 3.4\text{‰}$, $-3.5\text{‰}\sim 14.2\text{‰}$, and there were extremely significant differences in $\delta^{18}\text{O}$ values in the 3 production areas in the mature stage ($P<0.01$). During the whole growth period, the $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evaporation lines of the 3 production areas were located in the lower right of the local atmospheric water line, and the water enrichment effect of fragrant pear fruit was obvious. **Conclusion** The H and O isotopes of fragrant pear fruits in Korla, Aksu, and Jiuquan, Gansu have their own fingerprint characteristics. During the whole growth period, the slope and intercept of the evaporation line in Korla were lower, and the ability of fruit water evaporation to enrich ^2H and ^{18}O is stronger.

KEY WORDS: Korla fragrant pear; stable isotope; hydrogen; oxygen; authenticity identification; growth period

0 引言

库尔勒香梨是中欧互认的地理标志产品之一,目前,已销往 20 多个国家和地区^[1],具有较高的经济价值。但受经济利益驱动,非原产地产品冒充原产地香梨,不仅危害香梨产业的健康发展,甚至引发消费者对食品安全监管的信任危机^[2]。稳定同位素技术是应用于食品产地真实性鉴别的有效技术手段之一,H、O 稳定同位素是表征不同地域来源农产品最常用的特异性指标,往往与原产地域的环境因素密切相关。探讨不同产地来源的香梨果实 H、O 稳定同位素的变化规律,揭示原产地库尔勒香梨果实稳定同位素指纹特征,对稳定同位素指纹技术准确、稳定、可靠的溯源与确证香梨产地具有十分重要的意义。H、O 稳定同位素技术鉴别食品产地真实性是基于 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值在不同产地间具有各自的指纹特征。目前 H、O 稳定同位素在谷物^[3]、果蔬^[4-5]、葡萄酒^[6-7]、茶叶^[8]、果汁^[9-10]等多种植源性食品产地鉴别、掺假鉴别等均得到了广泛的应用,在香梨产地真实性鉴别中,赵多勇等^[11]发现新疆、甘肃与陕西 3 个产区库尔勒香梨 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均存在显著差异。然而,大量的研究资料证实,使用 H、O 稳定同位素指纹技术鉴别农产品产地真实性鉴别时 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值很容易受到地理因子、气象因子(气温、降雨等)、生态环境因子(干旱、日照时间等)的影响而发生不同程度的分馏^[12-13],使库尔勒香梨 H、O 稳定同位素随不同时间及空间的变化表现出不同的指纹特征,从而影响产地鉴别的准确性。因此本研究通过高温裂解-同位素比值质谱法(high temperature isotope-ratio mass spectrography, HT-IRMS)测定各产地库尔勒香梨生育期果实水分中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值,分析香梨生育期 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 特征,探讨不同产地香梨果实水蒸发过程中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 特征所反映的

气候变化,以期建立稳定、可靠的库尔勒香梨产地真实性鉴别模型及推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 产地概况

库尔勒市隶属新疆巴音郭楞蒙古自治州,位于新疆中部,地处中纬度地带,属于半干旱湿润高寒山地气候,属于灌溉型农业,水源来自孔雀河流域,发源于博斯腾湖,河流主要来源于南天山冰雪融水和降水^[14]。海拔 900~1000 m,年降水量为 50~60 mm,蒸发量 2775 mm,平均气温为 10.5~11.5℃。

阿克苏市隶属新疆阿克苏地区,位于新疆西南部,具有典型的暖温带大陆性干旱气候特征,属于灌溉型农业,水源来自阿克苏河流域,源于天山的西南部,阿克苏河是冰川融雪水和降水混合补给型河流^[15]。海拔 1000~1100 m,年降水量 53.2~120.6 mm,蒸发量 1500 mm,平均气温为 7.9~13.7℃。

甘肃省酒泉市肃州区,属大陆性干旱气候区,属于灌溉型农业^[16],水源来自黑河水系洪水坝河流域,河流发源于祁连山冰川积雪区^[17]。海拔 1100~1300 m,年降水量 150~500 mm,蒸发量超过 2000 mm,平均气温为 3.9~9.3℃。

1.2 实验材料

1.2.1 库尔勒香梨果实样品

不同生育期库尔勒香梨果实样品自 2020 年 6 月(花后 60 d)起开始采集,每隔 15 d 采集一次,在新疆、甘肃 2 个省区香梨生产基地的 13 户果园采集样品共计 105 份,每份样品不少于 3 kg。其中,新疆库尔勒香梨采自库尔勒市沙

依东园艺场、阿瓦提乡与阿克苏市依干其乡, 共 84 份样品; 甘肃香梨采自甘肃省酒泉市肃州区, 共 21 份样品。

2020 年 9 月 14~17 日香梨成熟期在库尔勒市采集香梨样品 27 份, 阿克苏市采集 22 份、尉犁县采集 5 份、轮台县采集 5 份、库车市采集 5 份、新和县采集 5 份、阿瓦提县采集 5 份、甘肃省酒泉市肃州区采集 3 份, 共 77 份香梨样品。

1.2.2 灌溉水样品

在每个果园附近的机井或河水主干渠道采集灌溉水样本。库尔勒市沙依东园艺场、阿瓦提乡与阿克苏市依干其乡, 采集 8 份灌溉水样品; 甘肃香梨采自甘肃省酒泉市肃州区, 采集 2 份灌溉水样品。所有的水样用孔径 0.22 μm Nylon 滤膜过滤并转移至 2.0 mL 气相色谱进样瓶中并封口待测。

1.3 标准物质

USGS47 ($\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}=-150.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=-19.8\text{‰}$)、USGS45 ($\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}=-10.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=-2.238\text{‰}$)、VSMOW2 ($\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}=0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}=0\text{‰}$)标准物质(美国地质勘探局 Reston 稳定同位素实验室)。

1.4 仪器与设备

MAT253 型稳定同位素比值质谱仪、Flash2000HT 型元素分析仪(美国赛默飞世尔公司); Y68s 型搅拌机(山东九阳家电有限公司); BJL-2200 型全自动水分抽提系统(北京剑灵科技有限公司)。

1.5 果实水分提取方法

香梨采集后, 用干燥且干净的毛巾将果实表面的灰尘等杂物去除。去核、去蒂, 将果肉置于搅拌机中打碎至糊状, 取 2~3 mL 装入 10 mL 棕色螺口玻璃样品瓶中。封口-18 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻 24 h, 去瓶盖, 样品瓶内空隙填充脱脂棉, 通过全自动水分真空冷凝提取抽提水分。水分抽提系统冷阱温度为-90 $^{\circ}\text{C}$ 、加热套温度 105 $^{\circ}\text{C}$ 、真空度 ≤ 500 Pa、抽提时间 2 h 时, 提取完成后关闭加热, 待加热套温度下降至室温(25 $^{\circ}\text{C}$ 左右)取出冷阱中水样并迅速用封口膜封口, 待水样融化后用孔径为 0.22 μm Nylon 滤膜过滤并转移至 2.0 mL 气相色谱仪进样瓶中并封口冷藏保存。

1.6 检测方法

稳定 H、O 同位素比值测定方法^[11]: 采用 HT-IRMS 测定梨果实水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值。利用自动进样器吸取 0.1 μL 水样送入元素分析仪, 高温裂解生成 H_2 和 CO , 即样品中的 H 和 O 元素转化成 H_2 和 CO , 在载气 He 气流的作用下, 将 H_2 和 CO 气体带入 HT-IRMS 进行同位素比值测定。以 USGS47、USGS45、VSMOW2 为标准物质, 采用三点校正的方法对测试结果进行校正。

1.7 稳定性同位素比值计算方法

稳定 H、O 同位素比值用 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 表示, $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的相对标准为 V-SMOW。计算公式(1)为:

$$\delta/\text{‰}=(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}-1)\times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R 为重同位素与轻同位素丰度比, $^2\text{H}/^1\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 。

1.8 数据统计与分析

所有实验取 3 个平行, 采用 SPSS2.0 软件进行数据分析, OriginPro 2018C 作图。

2 结果与分析

2.1 不同产地库尔勒香梨生育期果实水分 H、O 同位素特征

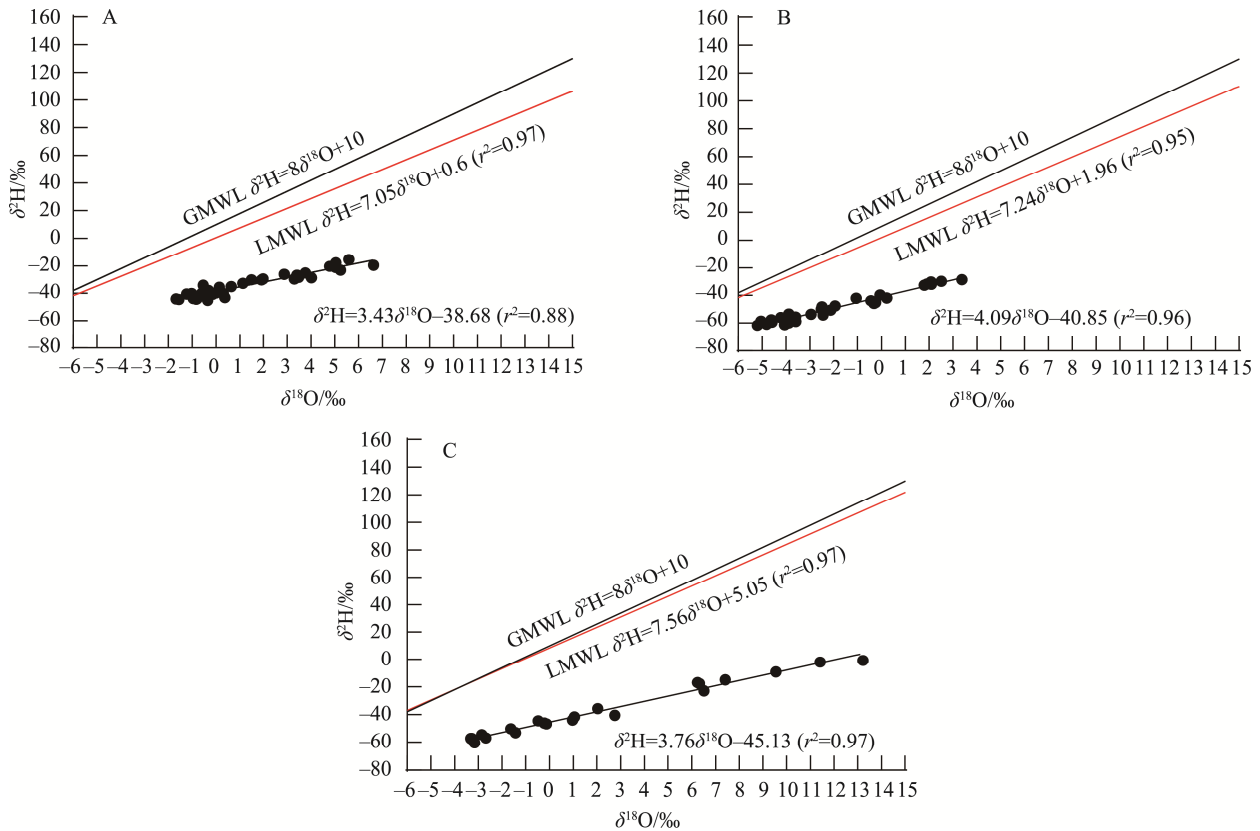
H、O 同位素线斜率代表 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的不同分馏程度差别, 截距代表 $\delta^2\text{H}$ 相对于平衡时的偏度程度。3 个产地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 水线方程的斜率和截距小于全球大气水线方程(global meteoric water line, GMWL)、当地大气水线方程(local meteoric water line, LMWL)^[18]的斜率和截距, 表明了 3 个产地气候较为干燥, 存在较强蒸发现象。就不同采样点来看, 库尔勒、阿克苏、酒泉 3 个产地香梨果实水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 拟合方程依次为图 1, 3 个产地拟合的斜率均不相同, 存在一定的差异, 阿克苏的斜率最大, 库尔勒的斜率最小, 酒泉的斜率处于二者之间, 阿克苏香梨果实水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 水线方程的变化波动整体小于酒泉和库尔勒, 库尔勒、阿克苏和酒泉香梨果实水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为-49.9 ‰ ~-15.4 ‰ 、-62.0 ‰ ~-28.2 ‰ 、-61.5 ‰ ~-1.5 ‰ 和-2.5 ‰ ~-6.7 ‰ 、-5.3 ‰ ~-3.4 ‰ 、-3.5 ‰ ~-14.2 ‰ 。3 个产地香梨果实水的 H、O 稳定同位素值全部位于当地大气降水线的右下方, 说明 3 个产地香梨果实水存在强烈的蒸发作用^[19], 重同位素明显富集, 库尔勒的方程线斜率和截距低于阿克苏和酒泉, 更偏离当地的大气水线方程, 说明在库尔勒的蒸发作用比阿克苏和酒泉更强^[20]。

2.2 成熟期香梨果实水 H、O 同位素的区域差异分析

通过对比 8 个县市的香梨成熟期果实水分的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布特征(图 2), 发现每个产地之间的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均呈现着不同的分布特征。库尔勒市、尉犁县、轮台县、库车市、新和县、阿瓦提县、阿克苏市、甘肃酒泉市 $\delta^2\text{H}$ 平均值分别为-41.3 ‰ 、-41.4 ‰ 、-48.7 ‰ 、-57.9 ‰ 、-59.1 ‰ 、-64.2 ‰ 、-61.7 ‰ 和-49.0 ‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为-0.3 ‰ 、0.05 ‰ 、-2.6 ‰ 、-4.3 ‰ 、-4.4 ‰ 、-5.4 ‰ 、-4.4 ‰ 和-1.5 ‰ 。另外, 不同县市之间 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现不同程度的差异。阿瓦提县、阿克苏市与库车市、新和县与轮台县与库尔勒市、尉犁县之间存在极显著差异($P<0.01$), 而阿瓦提县和阿克苏市; 库车市和新和县; 库尔勒市与

尉犁县 $\delta^2\text{H}$ 比较相近, 甘肃酒泉除与轮台县比较相近外与新疆各产区之间都存在极显著差异($P<0.01$)。O 同位素中, 库车市、新和县、阿瓦提县、阿克苏市和库尔勒市、尉犁县和轮台县之间存在极显著差异($P<0.01$), 阿瓦提县

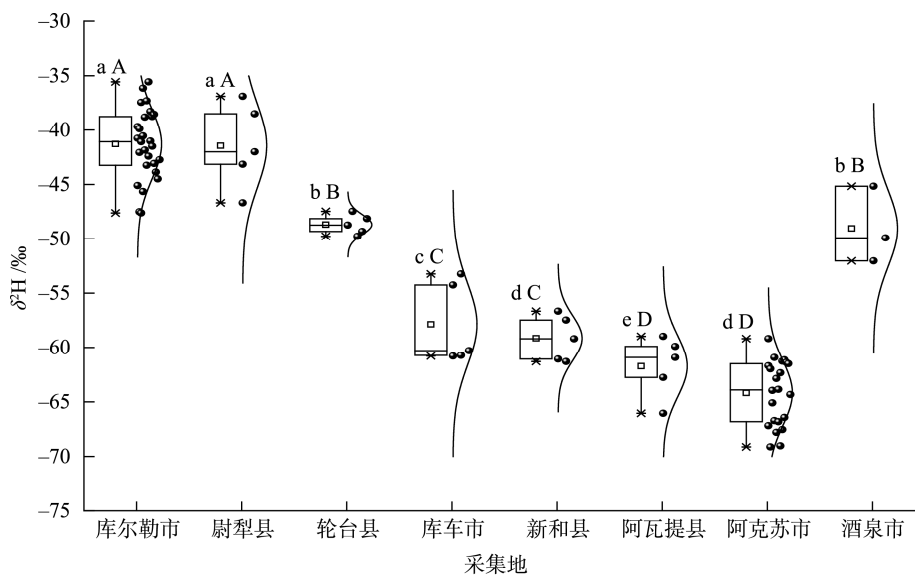
与库车市、新和县、阿克苏 3 个产地存在显著差异($P<0.05$); 库尔勒市、尉犁县两地比较相近。甘肃酒泉与新疆各产区之间都存在极显著差异($P<0.01$)。3 个产区之间存在极显著差异($P<0.01$)。



注: A. 库尔勒; B. 阿克苏; C. 酒泉。

图 1 库尔勒香梨生育期 H、O 同位素关系

Fig.1 H and O isotopic relationship of Korla fragrant pear



注: 不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著, 大写字母表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著。

图 2 不同产地成熟期香梨果实水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化($n=77$)

Fig.2 Variation of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in fruit water of fragrant pears in different origins ($n=77$)

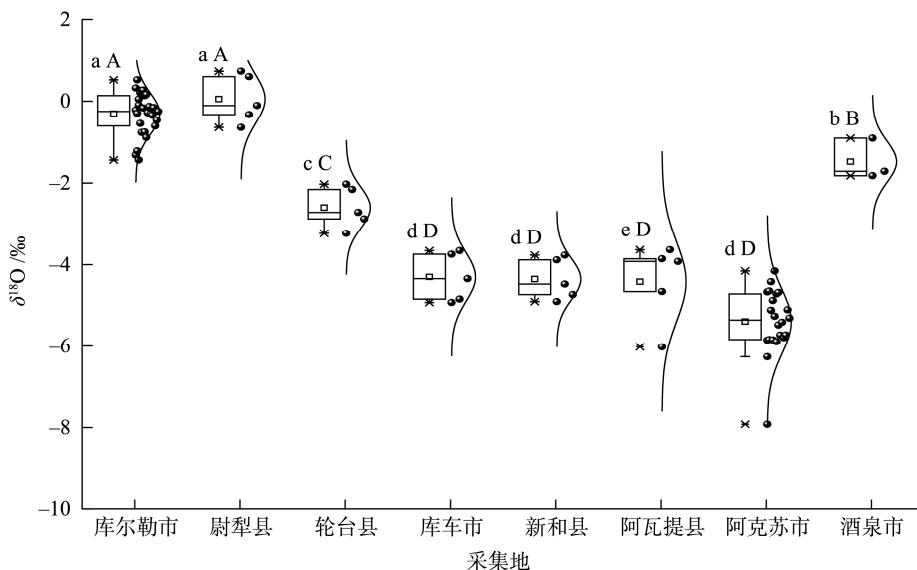


图 2(续) 不同产地成熟期香梨果实水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化($n=77$)
 Fig.2 Variation of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in fruit water of fragrant pears in different origins ($n=77$)

2.3 各产地香梨灌溉水 H、O 同位素特征

3 个产地灌溉水 H、O 稳定同位素比值也存在一定的差异, 库尔勒市的灌溉水源 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均值最大, 阿克苏最小, 酒泉的处于二者之间, 库尔勒、阿克苏和酒泉灌溉水源 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为 $-53.29\text{‰}\sim 42.19\text{‰}$ 、 $-81.83\text{‰}\sim -76.51\text{‰}$ 、 $-55.86\text{‰}\sim -51.19\text{‰}$ 和 $-7.8\text{‰}\sim -5.54\text{‰}$ 、 $-12.34\text{‰}\sim -11.31\text{‰}$ 、 $-10.15\text{‰}\sim -8.12\text{‰}$, 均值如表 1。与成熟期 3 个产地香梨果实水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值大小分布的规律相同, 即库尔勒产区 > 酒泉产区 > 阿克苏产区, 通过将库尔勒市、阿克苏市、甘肃酒泉市 3 个产地的香梨果实水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与灌溉水源的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行比较发现成熟期果实水与灌溉水源 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相比, 香梨果实水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值更为富集。

表 1 3 个产地灌溉水源 H、O 稳定同位素数据的基本统计特征 ($n=10$)

Table 1 Basic statistical characteristics of H and O stable isotope data of irrigation water sources in 3 production areas ($n=10$)

	采样点名称	均值/‰
$\delta^2\text{H}$	库尔勒产区	-49.20 ± 3.87^a
	阿克苏产区	-79.08 ± 2.36^b
	酒泉产区	-53.65 ± 1.76^c
$\delta^{18}\text{O}$	库尔勒产区	-6.7 ± 0.84^a
	阿克苏产区	-11.81 ± 0.45^b
	酒泉产区	-9.23 ± 0.58^c

注: 不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

3 讨论

在自然界中, 生物体不断与外界环境进行物质交换, 其体内的 H、O 同位素组成受生物代谢类型、环境、气候等因素的影响而存在差异^[6]。气候条件可以改变树叶和果实水的蒸散量, 在植物的蒸腾作用下, 带 ^1H 的水比带 ^2H 的水更容易从果实扩散到大气, 蒸腾作用导致 ^2H 在果实水中的富集, 从而导致果实水的 ^2H 和 ^{18}O 同位素比地下水富集。直到果实水达到同位素平衡状态, 即进入果实与从果实中出来的水具有相同的同位素组成^[21-22]。巴州地区属于暖温带气候, 主要是半湿润半干旱气候特征, 温度变化较大^[23], 而阿克苏地区气候偏干旱为典型大陆性干旱气候, 甘肃酒泉市也为大陆性干旱气候区, 但相较两地年平均温度较低为 $3.9\sim 9.3^\circ\text{C}$ (库尔勒为 $10.5\sim 11.5^\circ\text{C}$ 、阿克苏为 $7.9\sim 13.7^\circ\text{C}$), 相较其他两地库尔勒气温较高及昼夜温差大^[24], 果树受其生长条件的影响, 蒸腾强度更大, 果实更容易富集水分中 ^2H 与 ^{18}O , 使 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 产生富集, 所以库尔勒的方程线斜率和截距低于阿克苏和酒泉, 更偏离当地的大气水线方程, 库尔勒的蒸发作用比阿克苏和酒泉更强, 重同位素明显富集, 相较其他两地果实水中的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值更为偏正。

影响植物水中同位素分布的主要因素是植物有效水的来源^[25], 是造成成熟期 3 个产地 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均存在极显著性差异的主要原因。植物蒸腾作用会导致果实水中的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 富集, 而在果实水达到同位素稳定状态, 进入果实与从果实中出来的水具有相同的同位素组成, 使果实水与灌溉水之间有很好的相关性^[26], 库尔勒与阿克苏地区年

降水量小于 150 mm, 属于灌溉型农业。库尔勒地区香梨灌溉水源来源孔雀河流域, 河流主要来源于南天山冰雪融水和降水。阿克苏地区香梨灌溉水源来源于阿克苏河流域, 起源于天山的西南部冰川融雪水和降水。在天山南翼, 大部分降水在夏季出现^[27], 高纬度地区影响降水中 H、O 稳定同位素比率变化的主要因素是温度^[28], 夏季高温会造成降雨中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高, 中高纬度地区, 相对较高的降雨蒸汽形成温度导致分馏较少(蒸汽中的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 较高), 同时夏季温暖月份蒸散速率的增加也会使大陆降水的同位素 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 富集^[29]。所以来自天山南部冰雪融水和降水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 较高, 库尔勒与阿克苏地区灌溉水源 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均表现出库尔勒市>阿克苏市的分布规律, 库尔勒地区井水河水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 更为富集, 库尔勒产区香梨果实水富集 ^2H 、 ^{18}O 的能力相较于阿克苏更强^[30], 所以在两地区库尔勒香梨成熟期库尔勒香梨果实水中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 更为富集。而酒泉市位于甘肃省西北部, 属于灌溉型农业, 水源为黑河水系洪水坝河流域, 河流发源于祁连山冰川积雪区。甘肃酒泉产区灌溉水源 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布于库尔勒与阿克苏之间, 并且甘肃酒泉产区香梨果实水富集 ^2H 、 ^{18}O 的能力介于库尔勒产区与阿克苏产区之间, 所以成熟期酒泉香梨 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出库尔勒市>酒泉市>阿克苏市的分布规律。

4 结 论

本研究基于不同产地库尔勒香梨生育期果实水分的 H、O 同位素数据, 分析了不同产地库尔勒香梨生育期果实 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 富集变化规律, 探讨了不同产地库尔勒香梨生育期果实水分 H、O 同位素变化的可能影响因素, 得出以下主要结论: 在新疆产区的 7 个县市香梨 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 从西至东逐步增高的趋势, 库尔勒香梨果实水富集 ^2H 、 ^{18}O 的能力与香梨产区各产地气温变化有关, 成熟期香梨果实 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值、灌溉水源 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值共同表现出库尔勒市>酒泉市>阿克苏市的规律特征。

参考文献

- [1] 张钊, 王野苹. 香梨品种溯源问题的探讨[J]. 果树科学, 1993, 10(2): 113-115.
ZHANG Z, WANG YP. Discussion on the provenance of fragrant pear varieties [J]. J Fruit Sci, 1993, 10(2): 113-115.
- [2] 马宇轩, 谢立娜, 谭丽芹, 等. 不同泌乳期牛奶矿物元素特征及产地溯源研究[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 950-956.
MA YX, XIE LN, TAN LQ, et al. Study on the characteristics of milk mineral elements and origin traceability in different lactation periods [J]. J Nuclear Agric Sci, 2022, 36(5): 950-956.
- [3] WADOOD SA, BOLI G, YIMIN W. Geographical traceability of wheat and its products using multielement light stable isotopes coupled with chemometrics [J]. J Mass Spectrom, 2019, 54(2): 178-188.
- [4] BONTEMPO L, VAN-LEEUEWEN KA, PAOLINI M, et al. Bulk and compound-specific stable isotope ratio analysis for authenticity testing of organically grown tomatoes [J]. Food Chem, 2020, 318: 1-6.
- [5] MIHAILOVA A, PEDENTCHOUK N, KELLY SD. Stable isotope analysis of plant-derived nitrate—novel method for discrimination between organically and conventionally grown vegetables [J]. Food Chem, 2014, 154: 238-245.
- [6] VICTOR V, ROSS S, KARINE P, et al. Strontium isotope characterization of wines from the Quebec (Canada) terroir [J]. Proced Earth Planet Sci, 2015, 13: 252-255.
- [7] FAN S, ZHONG Q, GAO H, et al. Elemental profile and oxygen isotope ratio ($\delta^{18}\text{O}$) for verifying the geographical origin of Chinese wines [J]. J Food Drugs Anal, 2018, 26(3): 1033-1044.
- [8] LIU Z, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Influence of leaf age, species and soil depth on the authenticity and geographical origin assignment of green tea [J]. Rapid Commun Mass SP, 2019, 33(7): 625-634.
- [9] 雷佳蕾, 田丹, 薛佳, 等. δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素比率质谱法在鲜榨苹果汁鉴别中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 234-242.
LEI JL, TIAN D, XUE J, et al. Application of isotope ratio mass spectrometers of δD , $\delta^{18}\text{O}$, & $\delta^{13}\text{C}$ in the authentication of fresh apple juice [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(9): 234-242.
- [10] 蒋越, 李安, 靳欣欣, 等. 基于氢氧稳定同位素的桃果原汁掺水鉴别[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 63-66.
JIANG Y, LI AN, JIN XX, et al. Identification of peach juice mixed with water based on stable isotopes of hydrogen and oxygen [J]. Food Mach, 2020, 36(9): 63-66.
- [11] 赵多勇, 李安, 郭航, 等. 稳定同位素技术鉴别库尔勒香梨产地可行性研究[J]. 核农学报, 2020, 34(S1): 37-42.
ZHAO DY, LI AN, GUO H, et al. Geographical origins identification of korla fragrant pear based on stable isotope ratio [J]. Nuclear Agric Sci, 2020, 34(S1): 37-42.
- [12] BAT KB, ELER K, MAZEJ D, et al. Isotopic and elemental characterisation of Slovenian apple juice according to geographical origin: Preliminary results [J]. Food Chem, 2016, 203: 86-94.
- [13] 庞荣丽, 王书言, 王瑞萍, 等. 同位素技术在水果及制品产地溯源中的应用研究进展[J]. 果树学报, 2018, 35(6): 747-759.
PANG RL, WANG SY, WANG RP, et al. Advancement of applied studies of isotope technique in fruits and products geographical origin traceability [J]. J Fruit Sci, 2018, 35(6): 747-759.
- [14] DAI X, YANG X, WANG M, et al. The dynamic change of bosten lake area in response to climate in the past 30 years [J]. Water, 2019, 12(1): 4-11.
- [15] 余斌, 李升, 王友年. 阿克苏河流域地表水与地下水转化关系研究[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 56-62.
YU B, LI S, WANG YN. Transformation of surface water and groundwater in Aksu River Basin [J]. Yangtze River, 2021, 52(8): 56-62.
- [16] 王娟. 酒泉地区农业种植特点分析[J]. 农业技术与装备, 2021, (7): 42-43.
WANG J. Analysis on characteristics of agricultural planting in Jiuquan region [J]. Agric Technol Equip, 2021, (7): 42-43.
- [17] 吴光银, 刘金辉, 孙占学, 等. 河西走廊酒泉玉门-肃州地区地下水水文地球化学特征[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 111-118.
WU GY, LIU JH, SUN ZX, et al. Hydrogeochemical characteristics of groundwater in Jiuquan Yumen-Suzhou area of Hexi Corridor [J]. Water Res Hydropower Eng, 2020, 51(10): 111-118.
- [18] 黄天明, 聂中青, 袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8): 76-81.

- HUANG TM, NIE ZQ, YUAN LJ. Temperature and geographical effect of hydrogen and oxygen isotope in precipitation west of China [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2008, 22(8): 76–81.
- [19] 苏鹏燕. 基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河岸植物水分来源研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- SU PY. Research on water sources of riparian plants based on stable hydrogen and oxygen isotopes in Lanzhou section of the Yellow River, China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [20] 刘佳驹, 郭怀成. 雅鲁藏布江干流河水氢氧同位素时空变化特征及其影响因素分析[Z].
- LIU JJ, GUO HC. Spatial and temporal variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the mainstream of the Yarlung Zangbo River and analysis of its influencing factors [Z].
- [21] GAT JR. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. *Annu Rev Earth PL SC*, 1996, 24(1): 225–262.
- [22] CALDERONE G, GUILLOU C. Analysis of isotopic ratios for the detection of illegal watering of beverages [J]. *Food Chem*, 2008, 106(4): 1399–1405.
- [23] 王光焰. 塔里木河干流区极端气温变化特征研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(3): 16–26.
- WANG GY. Study on the change characteristics of extreme temperature of the mainstream of Tarim river [J]. *J North China Univ Water Res Elect Power (Nat Sci Ed)*, 2019, 40(3): 16–26.
- [24] 黄娟. 库尔勒香梨气候品质评价指标及模型的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- HUANG J. Research on evaluation index and model of the climatological quality for the korla fragrant pear [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.
- [25] 李雨芊, 孟玉川, 宋泓苇, 等. 典型林区水分氢氧稳定同位素在土壤-植物-大气连续体中的分布特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2–9.
- LI YQ, MENG YC, SONG HW, *et al.* Distribution of hydrogen and oxygen stable isotope of water in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) system of a typical forest area [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, 32(6): 12–18.
- [26] DE-RIJKE E, SCHOORL JC, CERLI C, *et al.* The use of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic analyses combined with chemometrics as a traceability tool for the geographical origin of bell peppers [J]. *Food Chem*, 2016, 204: 122–128.
- [27] BERSHAW J, LECHLER AR. The isotopic composition of meteoric water along altitudinal transects in the Tian Shan of central Asia [J]. *Chem Geol*, 2019, 516: 68–78.
- [28] BERSHAW J, PENNY SM, GARZIONE CN. Stable isotopes of modern water across the Himalaya and eastern Tibetan Plateau: Implications for estimates of paleoelevation and paleoclimate [J]. *J Geophys Res-Atmos*, 2012, 117(D2): 18–28.
- [29] WU Y, DU T, WANG L. Isotope signature of maize stem and leaf and investigation of transpiration and water transport [J]. *Agric Water Manage*, 2021, 247: 58–65.
- [30] NOVAK V, KHATRI PK, LAURSEN KH. The oxygen isotopic signature of soil-and plant-derived sulphate is controlled by fertilizer type and water source [J]. *Plant Cell Environ*, 2021, 44(1): 203–215.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



张 伟, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 15739833210@163.com



赵多勇, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量与食物安全。

E-mail: Luckydyz@163.com