

4 种枸杞果实发育过程中糖积累与蔗糖代谢酶的关系

赵建华^{1,2}, 李浩霞³, 尹 跃², 安 巍², 王华芳¹

(1. 北京林业大学 生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 宁夏农林科学院 国家枸杞工程技术研究中心, 宁夏 银川 750002; 3. 宁夏农林科学院 荒漠化治理研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要: 为了探讨枸杞 *Lycium* 果实糖积累差异及其品质形成的生理机制, 以 4 种枸杞为试材, 在枸杞果实发育期间, 测定果实糖质量分数与蔗糖代谢酶活性变化。结果表明: 宁夏枸杞 *Lycium barbarum* 果实中检测到 10 种糖, 云南枸杞 *L. yunnanense* 和中国枸杞 *L. chinense* 果实中检测到 7 种糖, 北方枸杞 *L. chinense* var. *potaninii* 果实中检测到 6 种糖; 成熟期枸杞果实以果糖、葡萄糖和蔗糖为主。在果实发育过程中 4 种枸杞果糖和葡萄糖质量分数整体呈现出逐渐升高趋势, 果实发育的后期升高幅度高于初期; 而蔗糖质量分数呈现出 2 种变化趋势, 不同发育时期种间有差异。4 种枸杞蔗糖代谢酶活性在枸杞果实发育过程中差异较大, 其中, 酸性转化酶(AI)在果实发育的初期活性较低, 种间差别小, 但在果实发育的后期活性高, 种间差别大。在整个果实发育过程中供试种蔗糖合成酶(SS)活性始终高于磷酸蔗糖合成酶(SPS); 云南枸杞维持着较低果糖和葡萄糖质量分数。3 种枸杞果实中果糖质量分数与 AI 活性显著正相关($P<0.05$), 转化酶在枸杞果实糖积累过程中发挥着重要作用。图 3 表 2 参 23

关键词: 植物学; 枸杞; 果实; 糖积累; 蔗糖代谢酶

中图分类号: S718.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2016)06-1025-08

Sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzyme activities in four *Lycium* species during fruit development

ZHAO Jianhua^{1,2}, LI Haoxia³, YIN Yue², AN Wei², WANG Huafang¹

(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. National Wolfberry Engineering Research Center, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 3. Desertification Control Research Institute, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: To explore differences between sugar accumulation and fruit quality formation for the physiology of *Lycium*, sugar contents and sucrose-metabolizing enzyme activities in four *Lycium* species (*Lycium barbarum*, *Lycium yunnanense*, *Lycium chinense*, and *Lycium chinense* var. *potaninii*) were determined during five stages of fruit development. The relationship between sugar contents and sucrose-metabolizing enzyme activities was determined using Data Processing System (DPS 14.5). Results of the gas phase chromatography (GC) showed ten sugars in *L. barbarum*, seven sugars in *L. yunnanense* and *Lycium chinense*, and six sugars in *L. chinense* var. *potaninii*. At the mature stage the main sugars were fructose, glucose, and sucrose. The fructose and glucose contents increased gradually with fruit growth and development, with growth rates of sugars in late fruit development stages being much higher than in the early stages. Sucrose content showed two changing trends during fruit development stages, and there were great differences among species for developmental stages. Also, during the fruit development process, three of the sucrose-metabolizing enzyme activities had large differences: acid invertase (AI) activity was low in the early fruit development stage with no major differences among

收稿日期: 2015-12-23; 修回日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31360191, 31060104); 宁夏农林科学院科技创新先导资金项目(NKYJ-14-07)

作者简介: 赵建华, 副研究员, 博士, 从事枸杞种质创新与利用研究。E-mail: zhaojianhua0943@163.com

species, but in later stages AI was high with species differences. During the fruit development process sucrose synthase (SS) activity in the four materials was higher than sucrose phosphate synthase (SPS) with the contents of fructose and glucose in *L. yunnanense* maintaining a lower level. Fructose content and AI activity were significantly ($P < 0.05$) and positively correlated ($r = 0.807, 0.949$ and 0.912) among the three species, Thus, increasing AI activity was favorable to hexose (fructose and glucose) accumulation, and invertase played an important role in sugar accumulation of wolfberry fruit. [Ch, 3 fig. 2 tab. 23 ref.]

Key words: botany; *Lycium* spp.; fruit; sugar accumulation; sucrose-metabolizing enzymes

枸杞 *Lycium* 为茄科 Solanaceae 枸杞属 *Lycium* 多年生落叶灌木, 具有很强的抗逆性, 是改良盐碱地的先锋树种^[1]。全世界约有 80 种, 主要分布在北美洲和亚洲^[2]。中国自然分布有 7 种 3 变种, 多分布于西北和华北地区。在诸多种中, 绝大多数种质资源未被利用, 只有宁夏枸杞 *Lycium barbarum* 经过长期自然选择、人工驯化, 形成了 10 多个农家品种^[1], 其干燥果实具有味甘、性平、归肝、肾经、益精、明目的功能, 被历版《中国药典》收载^[3]。宁夏农林科学院自 20 世纪 80 年代开始枸杞种质资源收集与保存工作, 目前, 已建成世界上唯一枸杞种质资源圃, 保存枸杞种质 2 000 余份^[4]。枸杞属于浆果类植物, 其果实中含有丰富糖类物质^[5]。SUNG 等^[6]通过气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)在宁夏枸杞果实中检出 11 种单糖; 杨晓萍等^[7]通过气相色谱(GC)测定宁夏枸杞果实单糖的种类, 主要是果糖、葡萄糖和木糖; 欧阳华学等^[8]利用高效液相色谱法测定枸杞中单糖和低聚糖, 主要是鼠李糖、果糖、葡萄糖等 3 种单糖和蔗糖、麦芽糖 2 种低聚糖; 冯美等^[9]发现枸杞果实中糖的积累主要以葡萄糖和果糖为主; 郑国琦等^[10]利用高效液相色谱测定不同地区宁夏枸杞果实糖质量分数, 果实内的果糖量最高, 葡萄糖量其次, 蔗糖量最低。蔗糖是植物体内最重要的一种碳水化合物, 蔗糖代谢起主要作用的酶有蔗糖合成酶(SS)、磷酸蔗糖合成酶(SPS)和蔗糖转化酶(IN), 它们在糖代谢中发挥着重要的作用^[11]。目前, 枸杞蔗糖代谢的相关研究主要集中在宁夏枸杞^[12-15]上, 其他种枸杞资源尚未报道。本研究选用 4 种枸杞为试材, 研究枸杞果实发育过程中糖质量分数与蔗糖代谢酶活性的关系, 旨在探讨枸杞果实糖积累差异的生理基础, 为进一步阐明枸杞品质形成和调控机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料分别为宁夏枸杞 *Lycium barbarum*, 北方枸杞 *L. chinense* var. *potaninii*, 云南枸杞 *L. yunnanense* 和中国枸杞 *L. chinense*, 均来自于宁夏农林科学院西夏区芦花台园林试验场枸杞种质资源圃, 10~15 年生枸杞植株。选无性系 2 株·材料⁻¹, 选取果实发育的幼果期(开花后 9~12 d), 青果期(开花后 14~19 d), 色变期(开花后 20~25 d), 初熟期(开花后 25~30 d)和成熟期(开花后 34~45 d)等 5 个时期进行采样。4 种枸杞形态特征见图 1。样品采集后用铝箔纸包装放到液氮速冻, 运送回实验室立即放置到超低温冰箱中保存。

1.2 试验方法

1.2.1 糖质量分数测定 采用气相色谱(GC)进行糖质量分数测定。称取枸杞鲜样 3.0 g, 置于研钵中研磨后, 立即倒入鸡心瓶中, 加体积分数为 80%乙醇溶液 75.0 mL, 回流提取 1 h, 趁热过滤, 残渣用体积分数为 80%热乙醇溶液洗涤(约 25.0 mL), 洗后溶液一同过滤并入滤液中, 冷却后定容至 100.0 mL。移取 4.0 mL 滤液至具塞玻璃管中, 抽气泵将其抽干, 加入吡啶 1.0 mL 摇动使其溶解后, 于冰水浴中依次加入 0.4 mL 六甲基二硅胺烷、0.2 mL 三甲基氯硅烷, 于 20 ℃条件下静置 30 min, 离心, 收集上清液, 用气相色谱(GC)测定。气相测定条件: 升温程序为初温 180 ℃, 保持 20 min, 以 20 ℃·min⁻¹ 升至 280 ℃, 保持 10 min; FID 检测器温度为 300 ℃; 进样口温度为 280 ℃; 氦气(He)流速 30.0 mL·min⁻¹; 氮气(N₂)流速 30.0 mL·min⁻¹; 空气流速 300.0 mL·min⁻¹; 分流比为 20:1; 进样量为 1.0 μL。试验所需标样(果糖、葡萄糖、蔗糖、赤鲜糖、阿拉伯糖、鼠李糖、岩藻糖、半乳糖)均为 Sigma 公司生产。

1.2.2 蔗糖代谢酶活性测定 酸性转化酶(AI)活性测定按照 LOWELL 等^[16]方法进行, 略有改动。在 1.0 mL 的反应液中含 0.6 mL 0.1 mol·L⁻¹ 乙酸钠-乙酸(pH 4.8), 0.2 mL 0.1 mol·L⁻¹ 蔗糖, 0.2 mL 酶提液。在

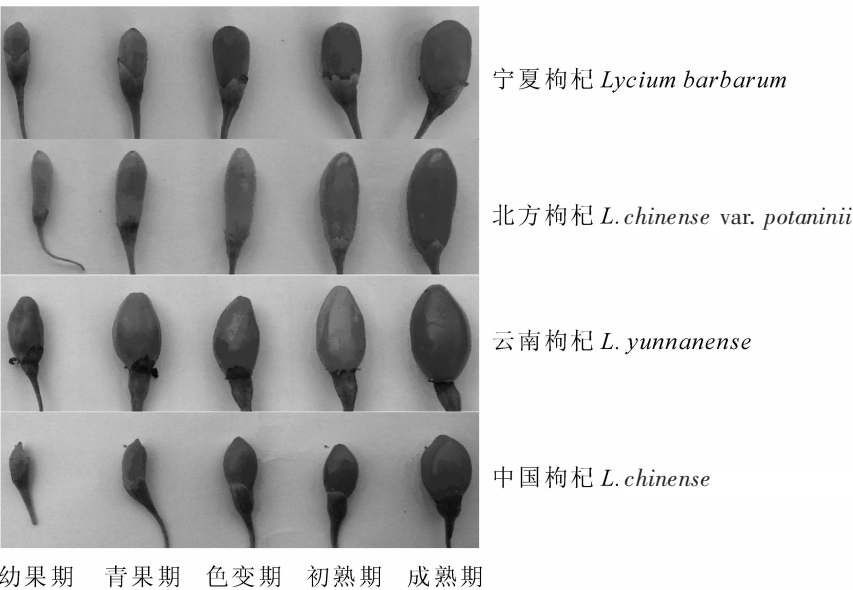


图 1 4 种枸杞 5 个发育期时期果实形态特征

Figure 1 Morphological characteristics in 4 wolfberry species at five stages of ripening

37 ℃水浴 40 min 后，加入 1.0 mL 3,5-二硝基水杨酸试剂(DNS)充分反应，在沸水浴 5 min，冷却至室温，4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min，测定吸光度 *D*(520)值，对照在反应体系中加入煮沸后酶液。用两者的差值来计算还原糖产生速率，表示转化酶的活性，通过测定还原糖的生成量表示其活性。中性转化酶(NI)活性测定方法同 AI，只是把乙酸钠-乙酸(pH 4.8)换成柠檬酸钠-柠檬酸(pH 7.2)。磷酸蔗糖合成酶(SPS)活性测定，70.0 μL 反应体系中含 50.0 mmol·L⁻¹ 4-羟乙基哌嗪乙磺酸(hepes)-氢氧化钠(pH 7.5)，15 mmol·L⁻¹ 氯化镁，1.0 mmol·L⁻¹ 乙二胺四乙酸(EDTA)，16.0 mmol·L⁻¹ 尿苷二磷酸葡萄糖(UDPG)，4.0 mmol·L⁻¹ 6-磷酸果糖(F-6-P)，20.0 mmol·L⁻¹ 6-磷酸葡萄糖(G-6-P)，30.0 μL 酶提取液。30 ℃反应 30 min，加入 70.0 μL 5 mol·L⁻¹ 氢氧化钠终止反应，沸水浴 10 min，冷却后加入 1.0 mL 0.14 mol·L⁻¹ 蒽酮(溶解在 13.80 mol·L⁻¹ 的硫酸中)，40 ℃反应 20 min，测定吸光度 *D*(620)。对照的反应体系中含 6-磷酸果糖和 6-磷酸葡萄糖。蔗糖合成酶(SS)活性测定与 SPS 类似，将反应体系中的 6-磷酸果糖换成果糖。

1.3 数据处理

利用 Excel 2003 和 DPS 数据处理系统(14.5 高级版)进行数据统计，采用最小显著性差异(LSD)法进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 枸杞成熟期果实糖质量分数

通过气相色谱(GC)法对 4 种枸杞成熟期果实糖组成和质量分数进行测定(表 1)。宁夏枸杞检测出 10 种糖，种类最多，分别为果糖、葡萄糖、蔗糖、赤藓糖、阿拉伯糖、鼠李糖、岩藻糖、半乳糖、木糖和山梨糖；云南枸杞和中国枸杞检测到 7 种糖，分别为果糖、葡萄糖、蔗糖、赤藓糖、阿拉伯糖、岩藻糖和半乳糖；北方枸杞检测到 6 种糖，分别为果糖、蔗糖、葡萄糖、赤藓糖、阿拉伯糖和半乳糖。在 4 种枸杞果实中均检测到糖为果糖、葡萄糖、蔗糖、赤藓糖、阿拉伯糖和半乳糖，其中，果糖、葡萄糖和蔗糖质量分数占总糖分的 98%以上。宁夏枸杞果实果糖和葡萄糖质量分数最高，北方枸杞次之，云南枸杞和中国枸杞较低。云南枸杞果实蔗糖质量分数最高，北方枸杞次之，宁夏枸杞最低。4 种枸杞间 3 种糖的质量分数均达到显著差异。可见，不同种枸杞的糖组成与质量分数存在较大差异。

分析不同种枸杞果实甜度值发现：宁夏枸杞甜度值最高，为 87.79；北方枸杞次之，为 31.57；云南枸杞最低，仅为 27.69。4 种枸杞间甜度值均达到显著差异，这也说明宁夏枸杞口感显著优于其他 3 种枸杞(表 1)。

表 1 枸杞成熟期果实糖质量分数变化

糖组分	不同种枸杞的糖质量分数/(mg·g ⁻¹)				最小显著性差异 (LSD, <i>P</i> <0.05)
	宁夏枸杞	北方枸杞	云南枸杞	中国枸杞	
果糖	48.99 ± 1.081	31.57 ± 1.112	9.39 ± 0.300	14.99 ± 0.221	3.874
葡萄糖	2.34 ± 0.063	1.57 ± 0.077	0.42 ± 0.025	0.71 ± 0.030	0.118
蔗糖	0.43 ± 0.068	1.11 ± 0.156	1.40 ± 0.054	0.96 ± 0.027	0.189
赤藓糖	0.07 ± 0.003	0.16 ± 0.003	0.31 ± 0.025	0.03 ± 0.001	0.027
阿拉伯糖	0.04 ± 0.000	0.05 ± 0.004	0.11 ± 0.008	0.01 ± 0.001	0.011
鼠李糖	0.02 ± 0.000				
岩藻糖	0.01 ± 0.001		0.08 ± 0.005	0.01 ± 0.001	0.008
半乳糖	0.02 ± 0.001	0.08 ± 0.004	0.04 ± 0.014	0.02 ± 0.001	0.018
木糖	0.01 ± 0.000				
山梨糖	0.02 ± 0.000				
甜度值	87.79 ± 2.000	57.46 ± 2.160	18.14 ± 0.600	27.69 ± 0.380	6.900

2.2 枸杞果实发育过程中果实糖质量分数变化

4 种枸杞在果实发育过程中果糖和葡萄糖质量分数变化如图 2A 和 2B 所示。随着果实的生长发育，果糖和葡萄糖质量分数总体呈现出不断升高趋势。从幼果期到青果期果糖和葡萄糖质量分数较低，呈现出缓慢增高趋势。在云南枸杞中未检测出葡萄糖，且中国枸杞 2 种糖质量分数显著高于其他 3 种枸杞；从青果期之后，宁夏枸杞、北方枸杞和中国枸杞呈现出显著增长，在初熟期，中国枸杞到达峰值，分别为 26.09 mg·g⁻¹ 和 1.03 mg·g⁻¹，而宁夏枸杞和北方枸杞仍缓慢增高，在果实成熟期达到最高值，此时，宁夏枸杞果糖和葡萄糖质量分数为 49.08 mg·g⁻¹ 和 2.34 mg·g⁻¹，北方枸杞为 31.54 mg·g⁻¹ 和 1.58 mg·g⁻¹，2 种枸杞间达到显著差异。在整个果实发育过程中，云南枸杞维持着较低果糖和葡萄糖质量分数，且从初熟期到成熟期显著低于其他 3 种枸杞。

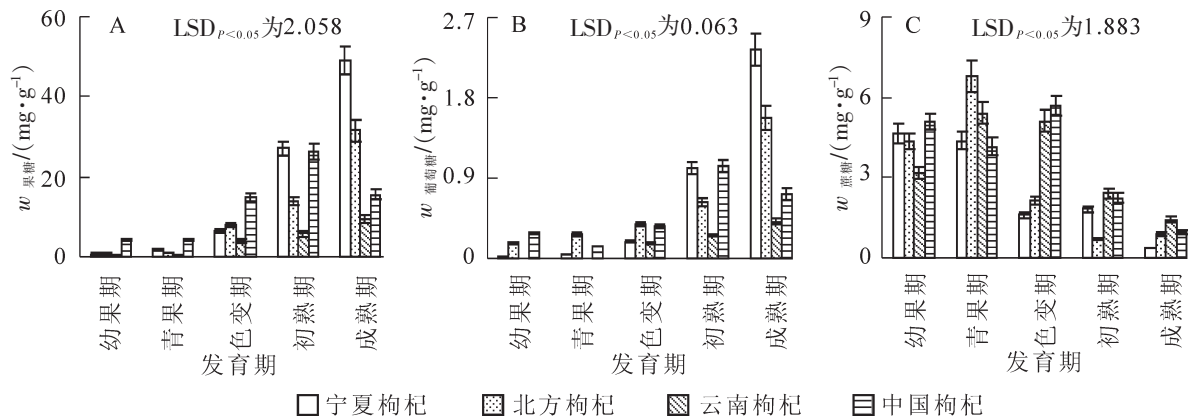


图 2 4 种枸杞果实发育期过程中糖质量分数变化

Figure 2 Changes of sugar contents in four wolfberry species at five stages of ripening

随着枸杞果实的生长发育，4 种枸杞果实蔗糖质量分数呈现出 2 种变化趋势(图 2C)，其中，宁夏枸杞和中国枸杞呈现出“降—升—降”趋势，从幼果期到色变期缓慢降低，在青果期中国枸杞出现第 1 个低谷值，之后缓慢升高，而宁夏枸杞继续不断降低，在色变期宁夏枸杞出现低谷值，而中国枸杞呈现出峰值，随后两者均呈现出快速降低，在果实成熟期到达最低值。北方枸杞和云南枸杞从幼果期到青果期缓慢升高，在青果期到达到最高，值分别为 6.76 mg·g⁻¹ 和 5.40 mg·g⁻¹，接着继续降低。在初熟期北方枸杞达到低谷值，而云南枸杞继续降低，且在整个发育过程中两者间均未达到显著差异。

2.3 枸杞果实发育过程中果实蔗糖代谢酶活性变化

4 种枸杞果实发育期过程中果实 AI 活性变化如图 3A 所示，随着果实发育，AI 活性呈现出 2 种变化趋势，宁夏枸杞呈现出先升后降的趋势，在果实发育的色变期之前 AI 活性增幅较小，没达到显著差

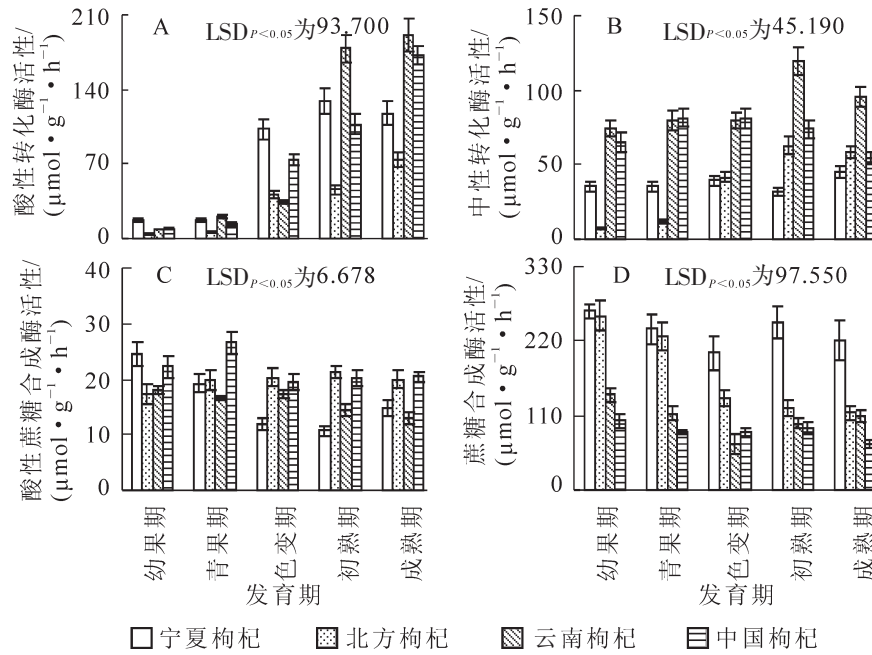


图 3 4 种枸杞果实发育期过程中蔗糖代谢酶活性变化

Figure 3 Changes of sucrose-metabolizing enzymes activity in four wolfberry species at five stages of ripening

异; 随后快速升高, 在果实发育的初熟期达到最高峰。然后又呈现出缓慢降低趋势。北方枸杞、云南枸杞和中国枸杞呈现出逐渐升高的趋势, 在果实发育的色变期前缓慢升高, 随后快速升高, 成熟期达到最高值。在果实成熟期云南枸杞 AI 活性最高, 达 $191.07 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 中国枸杞次之, 北方枸杞最低, 且显著低于云南枸杞和中国枸杞。在整个果实发育过程中北方枸杞维持较低 AI 活性。因此, 可以看出从果实发育的幼果期到色变期, 供试材料 AI 活性低、种间变化小, 但从色变期到果实成熟, 供试材料 AI 活性高、种间变化大。

图 3B 所示: 从幼果期到色变期宁夏枸杞 NI 活性缓慢升高, 随后缓慢降低, 接着又升高, 在果实成熟期升至最高, 为 $45.29 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 北方枸杞、云南枸杞和中国枸杞呈现出先升后降变化趋势, 从幼果期到青果期不断升高, 在色变期中国枸杞升至最高值, 为 $81.07 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 而北方枸杞和云南枸杞继续升高, 且在初熟期两者到达峰值, 分别为 $62.50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $119.46 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 两者间差异显著, 随后缓慢降低。在整个果实发育过程, 云南枸杞保持着较高 NI 活性, 而宁夏枸杞和北方枸杞维持着较低 NI 活性。

4 种枸杞果实发育期过程中果实 SPS 活性变化如图 3C 所示, 宁夏枸杞 SPS 活性呈现出先降后升的变化趋势, 从幼果期到初熟期 SPS 活性缓慢降低, 在初熟期低出现谷值, 从初熟期到成熟期 SPS 活性缓慢升高; 北方枸杞和中国枸杞从幼果期到青果期不断升高, 在青果期中国枸杞升值最高值, 达 $26.51 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 而北方枸杞继续升高, 在初熟期达到最高值, 为 $21.41 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 随后两者基本维持稳定水平; 随着果实生长发育云南枸杞 SPS 活性总体呈现出降低趋势, 从幼果期到色变期呈现出平稳状态, 接着缓慢降低, 在果实成熟降至最低, 为 $12.95 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著低于北方枸杞和中国枸杞。在整个果实发育过程中, 北方枸杞和中国枸杞保持着较高 SPS 活性, 云南枸杞维持着较低 SPS 活性。可见, 4 种枸杞在果实发育过程中 SPS 活性差异较大。

4 种枸杞果实发育期过程中果实 SS 活性变化(图 3D)表明: 宁夏枸杞、云南枸杞和中国枸杞随着果实生长发育, 从果实幼果期到色变期 SS 活性缓慢降低, 从色变期到初熟期缓慢升高, 在初熟期宁夏枸杞和中国枸杞达到峰值, 而云南枸杞继续升高, 且在整个果实发育过程中, 宁夏枸杞 SS 活性显著高于后 2 种枸杞, 后 2 种枸杞间无显著差异; 北方枸杞 SS 活性呈现出不断降低趋势, 从幼果期到青果期缓慢降低, 随后显著下降, 从初熟期到成熟期又缓慢下降, 且此时期显著低于宁夏枸杞。

2.4 枸杞果实枸杞糖质量分数与蔗糖代谢酶活性的关系

4 种枸杞果实发育过程中糖质量分数与蔗糖代谢酶活性之间相关性分析表明: 宁夏枸杞果糖质量分

数与葡萄糖质量分数极显著正相关($r=0.993$), 与蔗糖质量分数显著负相关($r=-0.830$), 与 AI 活性显著正相关($r=0.807$), 其蔗糖质量分数与 AI 活性显著负相关($r=-0.934$); 北方枸杞果糖质量分数与葡萄糖质量分数极显著正相关($r=0.987$), 与 AI 和 NI 活性显著正相关($r=0.949$ 和 0.809), 其蔗糖质量分数与 AI 和 NI 活性显著负相关($r=-0.866$ 和 -0.917), 其蔗糖质量分数 SS 显著正相关($r=0.870$); 云南枸杞果糖质量分数与葡萄糖质量分数极显著正相关($r=0.999$), 与 AI 活性显著正相关($r=0.912$), 与 SPS 活性显著负相关($r=0.870$), 其葡萄糖质量分数与 AI 活性显著正相关($r=0.918$), 其葡萄糖质量分数与 SPS 活性显著负相关($r=-0.891$); 中国枸杞果糖质量分数与葡萄糖质量分数显著正相关($r=0.925$), 其蔗糖质量分数与 AI 活性显著负相关($r=-0.806$)(表 2)。可见, 枸杞果实发育过程中降低蔗糖质量分数有利于果实中果糖和葡萄糖积累, 转化酶在枸杞果实糖积累过程中发挥着重要作用。

表 2 4 种枸杞果实糖质量分数与蔗糖代谢酶活性的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between sugar content and activity of sucrose-metabolizing enzymes in 4 wolfberry species							
材料	葡萄糖	蔗糖	酸性转化酶	中性转化酶	磷酸蔗糖合成酶	蔗糖合成酶	
宁夏枸杞	果糖	0.993**	-0.830*	0.807*	0.554	-0.500	-0.241
	葡萄糖		-0.804	0.684	0.627	-0.423	-0.246
	蔗糖			-0.934*	-0.604	0.804	0.665
北方枸杞	果糖	0.987**	-0.748	0.949**	0.809*	0.391	-0.784
	葡萄糖		-0.635	0.895*	0.716	0.319	-0.695
	蔗糖			-0.866*	-0.917*	-0.473	0.870*
云南枸杞	果糖	0.999**	-0.720	0.912*	0.629	-0.896*	-0.366
	葡萄糖		-0.727	0.918*	0.647	-0.891*	-0.371
	蔗糖			-0.811*	-0.592	0.739	-0.311
中国枸杞	果糖	0.925*	-0.531	0.713	-0.063	-0.721	-0.247
	葡萄糖		-0.741	0.759	-0.367	-0.648	-0.249
	蔗糖			-0.806*	0.634	0.204	0.646

说明: * 代表显著水平($P<0.05$); ** 代表极显著水平($P<0.01$)。

3 结论与讨论

糖分的积累是果实品质形成的关键, 其糖种类与糖质量分数对果实风味和品质具有重要影响^[17-18]。糖也是色素、氨基酸、维生素和芳香物质等其他营养成分合成的基础原料, 还与其他重要的生理功能有关, 如参与果实细胞膨大渗透推动力, 调节植物生长发育过程中许多相关基因的表达^[19-20]。本研究利用 GC 对不同种枸杞材料进行检测, 共检测出 10 种糖, 分别为果糖、葡萄糖、蔗糖、赤藓糖、阿拉伯糖、鼠李糖、岩藻糖、半乳糖、木糖和山梨糖, 其中宁夏枸杞检测出 10 种糖, 种类最多; 云南枸杞和中国枸杞检测到 7 种糖, 种类次之; 北方枸杞检测到 6 种糖, 种类最少。其结果与 SUNG 等^[6]利用气相质谱联用法(GC-MS)在宁夏枸杞检测出 11 种糖和杨晓萍等^[7]利用 GC 法检测到枸杞 4 种主要糖基本相一致, 但因检测方法的差异, 本研究在宁夏枸杞果实中没有检测到核糖。不同种间果实中糖种类与质量分数差异较大。宁夏枸杞是中国传统名贵中药材, 至今已有 500 多年栽培历史^[1], 而另外 3 种枸杞近年来在中国一些地区零星栽植, 其果实的苦涩味偏重(资料未发表), 这与本研究测定果实甜度值相一致。枸杞果实糖种类与糖质量分数差异一方面取决于自身遗传特性, 另一方面取决于栽培环境条件, 此外, 也可能与枸杞遗传进化也有关, 有待于进一步研究。

本研究对不同种枸杞果实发育过程中果糖和葡萄糖质量分数的变化研究发现: 不同种间果糖和葡萄糖质量分数差异较大, 其中, 在幼果期和青果期云南枸杞中未检测出葡萄糖, 而中国枸杞 2 种糖质量分数较高; 在初熟期和成熟期宁夏枸杞 2 种糖质量分数较高; 在整个果实发育过程中, 云南枸杞维持着较低果糖和葡萄糖质量分数。在宁夏枸杞上结果与前人的研究基本相一致^[14, 21]。本研究发现不同种枸杞果实蔗糖质量分数呈现出不同变化趋势, 其中, 宁夏枸杞呈现出“降—升—降”趋势, 从幼果期到色变期缓慢降低, 之后缓慢升高, 从初熟期到成熟期快速降低。郑国琦等^[10]和冯美等^[9]发现‘宁杞 1 号’蔗糖

质量分数随着果实生长蔗糖质量分数逐渐增加,在花后 31 d 升至最高,随后又降低。其结果与本研究在宁夏枸杞上变化不一致。栽培环境、气候因素可能是造成本研究不同于前人结果的主要因素。

蔗糖是大多数植物同化产物运输的主要物质,也是许多果实中糖积累的主要成分^[22]。蔗糖进入果实后,要经过一系列的酶代谢过程,在这些过程中起主要作用的有转化酶(IN)、蔗糖合成酶(SS)和蔗糖磷酸合成酶(SPS),最终将蔗糖转化成其他糖形式被植物体利用^[23]。冯美等^[9]发现宁夏枸杞果实转色前后枸杞果实中 AI 和 SPS 的活性均明显升高,SS 的活性明显降低;郑国琦^[14]发现宁夏枸杞果实中的 2 种转化酶随着果实的发育呈现逐渐增大的趋势,SS 呈现出先增加后下降趋势,而 SPS 变化幅度较小,整个果实发育过程中活性明显低于 SS;张萍等^[13]发现亏缺灌溉下枸杞果实全生育期转化酶活性保持在较高水平,但从转色期到成熟期呈下降趋势。本研究结果表明:不同种枸杞果实蔗糖代谢酶活性变化呈现不同变化趋势,其中宁夏枸杞转化酶活性总体呈现为逐渐升高的趋势,这与前人研究基本相一致。本研究中宁夏枸杞在果实发育前期 SPS 和 SS 的活性变化情况不同于前人研究,但在果实发育的后期 AI 和 SS 活性高于 NI 和 SPS,这与郑国琦等^[10]研究基本一致。说明宁夏枸杞果实发育过程中蔗糖代谢酶也存在时空差异。进一步分析果实糖质量分数与蔗糖代谢酶之间相关性表明:在枸杞果实发育过程中,3 种枸杞果实中果糖质量分数与 AI 活性显著正相关,而郑国琦等^[10]和冯美^[12]也有相似的发现,这也说明转化酶在枸杞果实糖积累过程中发挥着重要作用。

4 参考文献

- [1] 白守宁. 宁夏枸杞研究[M]. 银川:宁夏人民出版社,1999: 3 - 10.
- [2] 董静洲, 杨俊军, 王瑛. 我国枸杞属物种资源及国内外研究进展[J]. 中国中药杂志, 2008, **33**(18): 2020 - 2027.
DONG Jingzhou, YANG Junjun, WANG Ying. Resources of *Lycium* species and related research progress [J]. *China J Chin Mater Med*, 2008, **33**(18): 2020 - 2027.
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2010 年版一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010: 232 - 233.
- [4] 赵建华, 安巍, 石志刚, 等. 枸杞种质资源若干植物学数量性状描述指标的探讨[J]. 园艺学报, 2008, **35**(2): 301 - 306.
ZHAO Jianhua, AN Wei, SHI Zhigang, *et al.* Evaluation criteria of some botanical quantitative characteristics of wolfberry (*Lycium* L.) germplasm resources [J]. *Acta Horti Sin*, 2008, **35**(2): 301 - 306.
- [5] ZHAO Jianhua, LI Haoxia, XI Wanpeng, *et al.* Changes in sugars and organic acids in wolfberry (*Lycium barbarum* L.) fruit during development and maturation [J]. *Food Chem*, 2015, **173**: 718 - 724.
- [6] SUNG C K, OH M J, KIM C J. On the composition of free sugars, fatty acids, free amino acids and minerals in *Lycium fructus* [J]. *J Agric Sci Chungnam Univ*, 1994, **21**(1): 22 - 27.
- [7] 杨晓萍, 张声华. 枸杞子糖类的研究[J]. 林产化学与工业, 1998, **18**(2): 65 - 68.
YANG Xiaoping, ZHANG Shenghua. Studies on saccharides in fruits of *Lycium chinense* [J]. *Chem Ind For Prod*, 1998, **18**(2): 65 - 68.
- [8] 欧阳华学, 黎源倩, 肖全伟. 高效液相色谱法同时测定枸杞中单糖和低聚糖的含量[J]. 四川大学学报: 医学版, 2007, **38**(6): 1040 - 1042.
OUYANG Huaxue, LI Yuanqian, XIAO Quanwei. Simultaneous determination of monosaccharides and oligosaccharides in *Lycium barbarum* L. by high performance liquid chromatography [J]. *J Sichuan Univ Med Sci Ed*, 2007, **38**(6): 1040 - 1042.
- [9] 冯美, 孙慧芳. 枸杞果实转色前后糖积累与相关酶活性的研究[J]. 宁夏农林科技, 2007(4): 9 - 10.
FENG Mei, SUN Huifang. Study on sugar accumulation and metabolizing enzymes in wolfberry (*Lycium barbarum* L.) fruits before and after fruit color turning [J]. *Ningxia J Agric For Sci Technol*, 2007(4): 9 - 10.
- [10] 郑国琦, 罗霄, 郑紫燕, 等. 宁夏枸杞果实糖积累和蔗糖代谢相关酶活性的关系[J]. 西北植物学报, 2008, **28**(6): 1172 - 1178.
ZHENG Guoqi, LUO Xiao, ZHENG Ziyang, *et al.* Relationship between sugar accumulation and its metabolizing enzymes in *Lycium barbarum* L. [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2008, **28**(6): 1172 - 1178.
- [11] 张上隆, 陈昆松. 果实品质形成与调控的分子生[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1 - 2.

- [12] 冯美. 枸杞果实生长发育及化学成分积累规律的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2005: 23 – 26.
FENG Mei. *Study on the Berry Development and Chemical Composition Accumulation During Berry Development of Lycium barbarum L.* [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2005.
- [13] 张萍, 郑国琦, 郑国保, 等. 亏缺灌溉对枸杞果实糖积累和蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, **27**(6): 160 – 163.
ZHANG Ping, ZHENG Guoqi, ZHENG Guobao, *et al.* Effects of deficit irrigation on accumulation of sugar and activity of sugar metabolism-related enzyme of *Lycium barbarum L.* [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2009, **27**(6): 160 – 163.
- [14] 郑国琦. 宁夏枸杞果实结构、发育与糖分积累关系研究[D]. 西安: 西北大学, 2011: 37 – 39.
ZHENG Guoqi. *The Studies on the Relationship Between the Structure, Development and Sugar Accumulation in Fruits of Lycium barbarum L.* [D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [15] 赵建华, 李浩霞, 周旋, 等. 干旱胁迫对宁夏枸杞生长及果实糖分积累的影响[J]. 植物生理学报, 2012, **48**(11): 1063 – 1068.
ZHAO Jianhua, LI Haoxia, ZHOU Xuan, *et al.* Influence of drought stress on plant growth and sugar accumulation in fruit of *Lycium barbarum L.* [J]. *Plant Physiol J*, 2012, **48**(11): 1063 – 1068.
- [16] LOWELL C A, TOMLINSON P T, KOCH K E. Sucrose-metabolizing enzymes in transport tissues and adjacent sink structures in developing citrus fruit [J]. *Plant Physiol*, 1989, **90**(4): 1394 – 1402.
- [17] 张永平, 乔永, 喻景权, 等. 园艺植物果实糖积累的研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(4): 1151 – 1157.
ZHANG Yongping, QIAO Yong, YU Jingquan, *et al.* Progress of researches of sugar accumulation mechanism of horticultural plant fruits [J]. *Sci Agric Sin*, 2008, **41**(4): 1151 – 1157.
- [18] 齐红岩, 李天来, 张洁, 等. 番茄果实发育过程中糖的变化与相关酶活性的关系[J]. 园艺学报, 2006, **33**(2): 294 – 299.
QI Hongyan, LI Tianlai, ZHANG Jie, *et al.* Relationship between carbohydrate change and related enzymes activities during tomato fruit development [J]. *Acta Horti Sin*, 2006, **33**(2): 294 – 299.
- [19] 秦巧平, 林飞凡, 张岚岚. 枇杷果实糖酸积累的分子生理机制[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(3): 453 – 457.
QIN Qiaoping, LIN Feifan, ZHANG Lanlan. Review of the studies on the accumulation mechanisms of sugar and organic acids in *Eriobotrya japonica* fruit [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29**(3): 453 – 457.
- [20] 张上隆, 陈昆松. 果实品质形成与调控的分子生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [21] 冯美, 宋长冰. 枸杞果实发育过程中果实色素、糖含量的变化[J]. 北方园艺, 2005(6): 68 – 69.
FENG Mei, SONG Changbing. Changes on sugar and pigment content in wolfberry fruit during the development [J]. *Northern Hortic*, 2005(6): 68 – 69.
- [22] 赵智中, 张上隆, 徐昌杰, 等. 蔗糖代谢相关酶在温州蜜柑果实糖积累中的作用[J]. 园艺学报, 2001, **28**(2): 112 – 118.
ZHAO Zhizhong, ZHANG Shanglong, XU Changjie, *et al.* Roles of sucrose-metabolizing enzymes in accumulation of sugars in *Satsuma mandarin* fruit [J]. *Acta Horti Sin*, 2007, **28**(2): 112 – 118.
- [23] 赵建华, 李浩霞, 安巍, 等. 干旱胁迫对宁夏枸杞叶片蔗糖代谢及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(5): 970 – 975.
ZHAO Jianhua, LI Haoxia, AN Wei, *et al.* Sugar metabolism and photosynthetic characteristics in leaf of *Lycium barbarum L.* under drought stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2013, **33**(5): 970 – 975.