山西大学学报(自然科学版)49(5):880—894,2026
Journal of Shanxi University(Nat. Sci. Ed. )

**DOI**:10.13451/j.sxu.ns.2025119

# 紫玉米花色苷的分离及抑制α-葡萄糖苷酶活性分析

郝瑞林*,胡晓燕,许海华,张霞
(忻州师范学院 生物系,山西 忻州 034000)

**摘 要**:本研究旨在明确紫玉米穗轴中具有α-葡萄糖苷酶抑制活性的花色苷组分,并分析其作用机制。使用高效制备液相色谱法从紫玉米穗轴中分离得到矢车菊素丙二酰葡萄糖苷、矢车菊素双丙二酰葡萄糖苷、矢车菊素琥珀酰葡萄糖苷、芍药素葡萄糖苷、芍药素丙二酰葡萄糖苷和天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷6种主要花色苷。以半数抑制浓度(Half Maximal Inhibitory Concentration,$IC_{50}$)评价其对α-葡萄糖苷酶的抑制活性。结果显示矢车菊素丙二酰葡萄糖苷、矢车菊素双丙二酰葡萄糖苷、矢车菊素琥珀酰葡萄糖苷和天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷对α-葡萄糖苷酶的$IC_{50}$分别为278.24、332.01、386.11和33.89 μmol/L。芍药素葡萄糖苷和芍药素丙二酰葡萄糖苷对α-葡萄糖苷酶的抑制能力较弱。米氏动力学常数分析结合紫外可见光谱分析、荧光光谱分析表明天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷可能以混合模式抑制α-葡萄糖苷酶。分子对接和分子动力学模拟表明,天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的Tyr605、Gln603、Arg526、Tyr299分别形成键长为2.7、2.7、3.1和3.3 Å的氢键。氢键稳定了天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的结合并使酶的空间结构更加紧凑,进一步阻止酶与底物的结合,抑制酶的活性。

**关键词**:花色苷;鉴定;α-葡萄糖苷酶;分子对接;互作机制
**中图分类号**:R567.3 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2395(2026)05-0880-15

# Isolation of Anthocyanins from Purple Corn and Analysis of Their α-Glucosidase Inhibitory Activity

Hao Ruilin*, Hu Xiaoyan, Xu Haihua, Zhang Xia
(*Department of Biology, Xinzhou Teachers University, Xinzhou* 034000, *China*)

**Abstract:** This study aimed to identify the anthocyanin components with α-glucosidase inhibitory activity in purple corn cob and to analyze their mechanism of action. Six major anthocyanins including cyanidin 3-O-(6'-O-malonylglucoside), cyanidin dimalonylglucoside, cyanidin succinylglucoside, peonidin glucoside, peonidin malonylglucoside, and pelargonidin dimalonylglucoside were isolated from purple corn cob using high-performance preparative liquid chromatography. Their inhibitory activity against α-glucosidase was evaluated by determining the half maximal inhibitory concentration ($IC_{50}$). The results showed that the $IC_{50}$ values of cyanidin 3-O-(6'-O-malonylglucoside), cyanidin dimalonylglucoside, cyanidin succinylglucoside, and pelargonidin dimalonylglucoside against α-glucosidase were 278.24, 332.01, 386.11, and 33.89 μmol/L, respectively. Peonidin glucoside and peonidin malonylglucoside exhibited weak inhibitory activity against α-glucosidase. Enzyme kinetic analysis combined with UV-Vis spectroscopy and fluorescence spectroscopy indicated that pelargonidin dimalonylglucoside inhibited α-glucosidase in a mixed mode. Molecular docking and molecular dynamics simulations revealed that pelargonidin dimalonylglucoside formed hydrogen bonds with Tyr605, Gln603, Arg526, and Tyr299 of α-glucosidase, with bond lengths of 2.7, 2.7, 3.1, and 3.3 Å, respectively. These hydrogen bonds stabilized the binding of pelargonidin dimalonylglucoside to α-glucosidase and made the spatial structure of the enzyme more compact, further preventing the binding of the enzyme to the substrate and inhibiting enzyme activity.

**收稿日期**:2024-10-25;**修回日期**:2025-10-22
**基金项目**:山西省自然科学基金(202403021221222)
* **通信作者**:郝瑞林(1987—),男,山西忻州人,博士,讲师,研究方向为天然产物。E-mail:haoruilin314@126.com
**引文格式**:郝瑞林,胡晓燕,许海华,等.紫玉米花色苷的分离及抑制α-葡萄糖苷酶活性分析[J].山西大学学报(自然科学版),2026,49(5):880-894. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2025119.

**Keywords:** anthocyanin; identification; α-glucosidase; molecular docking; mechanism of interaction

## 0 引言

山西广泛种植的紫玉米(又称黑玉米)因其富含花色苷(Anthocyanins)而具有显著的抗氧化、抗炎和抗脂肪生成的作用[1]。体外实验和动物实验表明花色苷可以有效清除自由基,抑制活性氧(Reactive Oxygen Species,ROS)的产生,通过抑制IL-8、NF-κB、激活过氧化物酶体增殖物激活受体(Peroxisome Proliferator-activated Receptors,PPAR)信号通路等途径降低炎症水平和肝损伤[2-4]。

Ⅱ型糖尿病是典型的代谢系统紊乱疾病,患者会出现胰岛素抵抗,进而改变代谢相关酶的活性,出现持续高血糖症状[5]。α-葡萄糖苷酶(α-Glucosidase),能水解非还原末端α-1,4糖苷键,与血糖水平直接相关。抑制α-葡萄糖苷酶活性可显著减少葡萄糖吸收而降低血糖水平,因此酶抑制剂的开发成为控制和改善II型糖尿病的重要途径[5]。

花色苷是由花色苷元通过糖苷键连接单糖及酰化单糖形成的糖苷化产物。包含矢车菊素、天竺葵素、芍药素在内的6种花色苷元对α-葡萄糖苷酶的抑制强度差异显著,半数抑制浓度(Half Maximal Inhibitory Concentration,$IC_{50}$)范围为4 μmol/L~55 μmol/L。其中,飞燕草素抑制活性最强,而锦葵素最弱[6-7]。分子对接显示花色苷对α-葡萄糖苷酶的抑制多为混合型抑制,既能与游离酶结合,也能与酶-底物复合物结合,但前者结合更紧密[8]。花色苷通过疏水作用、氢键和范德华力稳定结合到α-葡萄糖苷酶的活性位点,阻碍底物进入[8]。这种结合改变了α-葡萄糖苷酶的二级结构和微环境(如色氨酸残基的微环境),增强抑制效果[9]。糖基化可能降低花青素的生物活性,研究显示未糖基化的矢车菊素的抑制活性($IC_{50}$为$5.293\times10^{-3}$ mol/L)显著高于其糖苷形式(矢车菊素-3-葡萄糖苷无活性)[10]。而酰化可以增强花色苷元的抑制活性[11-12]。

多种花色苷提取物对α-葡萄糖苷酶的抑制活性显著强于临床常用药阿卡波糖[7,10]。阿卡波糖、米格列醇等是II型糖尿病的一线治疗药物,但可能引发肝损伤、肾肿瘤、胃肠道反应等并发症[13-14]。天然提取物为规避这些风险提供了新思路。花色苷通过抑制α-葡萄糖苷酶延缓碳水化合物降解,降低餐后血糖,可作为天然抑制剂用于功能食品或药物开发[14]。紫玉米花青素能有效抑制哺乳动物α-葡萄糖苷酶活性,阻断α-1,4糖苷键连接的碳水化合物分解为葡萄糖[15]。中国各种基因型紫玉米的花色苷成分主要是矢车菊素、芍药素、天竺葵素的糖苷化及酰糖苷化产物[16-18]。山西省农科院开发的晋糯系列紫玉米的穗轴、种皮和穗须中均富含花色苷,但穗轴中花色苷含量远高于籽粒,且穗轴相比穗须(具有最高的紫玉米花色苷含量)更容易获得[19-21]。

在本工作中我们对山西产晋糯8号紫玉米穗轴的花色苷进行提取、分离、纯化和鉴定,同时对比分析不同糖基化、酰基化花色苷对α-葡萄糖苷酶抑制活性,并使用光谱学分析、分子对接和分子动力学模拟探索单糖取代基和酰基对花色苷与酶活性中心结合能以及酶分子二级结构的影响。这项研究为开发Ⅱ型糖尿病天然治疗药物提供了新的分子靶点,同时为晋糯系列紫玉米的高附加值利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

晋黑糯8号紫玉米(*Zea mays* L.)于2020年8月至12月间从山西省静乐县五家庄村获得。收集玉米芯,清洗后置于烘箱40 ℃条件下干燥48 h至水分降至9.62%~12.60%。样品粉碎后过100目筛,4 ℃避光保存于储存在棕色瓶中[22]。

HPLC级乙腈、甲醇和甲酸购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;其他化学品均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 紫玉米花色苷的提取与分离

参考文献的方法并稍作修改,紫玉米穗轴样品(1 000 g)用含0.1%盐酸(体积分数)的甲醇(4 L)在4 ℃下浸泡提取2次,每次12 h[23]。35 ℃旋转蒸发除去甲醇后利用AB-8大孔树脂

柱进行纯化[24]。

纯化产物除去乙醇后使用Sepabean Mechine T快速纯化系统对样品进行粗分离。分离条件为:C18修饰硅胶柱(粒径40~75 μm,孔径100 Å,柱尺寸38.6 mm×261.5 mm);二元梯度洗脱;流动相A为含5%甲酸(体积分数)的水,流动相B为含5%甲酸(体积分数)的甲醇;流速为10 mL/min;280 nm和520 nm双波长检测;按520 nm峰自动收集(阈值10 mAU)。洗脱梯度:0~30 min,5% B相;30~180 min,5%~30% B相;180~210 min,30% B相;210~240 min,30%~5% B相。

粗分离样品经35 ℃旋蒸后,使用岛津LC-16P系统(检测器:SPD-M20A)在Shim-pack GIS C18柱(20 mm×250 mm,10 μm)纯化。流动相:水/乙腈/甲酸(体积比为80∶15∶5);流速10 mL/min;柱温35 ℃;检测波长520 nm;进样5 mL(15.3 mg/mL总花色苷)。经冷冻干燥得6个组分(P1—P6),通过LCMS-8050鉴定成分[25]。

### 1.3 UPLC-DAD-MS分析紫玉米花色苷

参考文献的方法,使用超高效液相色谱-二极管阵列-二级质谱(Ultra-Performance Liquid Chromatography-Diode Array Detector-Tandem Mass Spectrometry,UPLC-DAD-MS/MS)对花色苷组分进行表征[23]。色谱柱:Agilent SB-C18(4.6 mm × 150 mm,填料粒径2.7 μm);流速1.0 mL/min;进样体积20 μL;柱温35 ℃;流动相与方法1.2中快速纯化系统所用的流动相一致;洗脱梯度:0~5 min,5% B相;5~10 min,5%~10% B相;10~40 min,10%~27.5% B相。

质谱条件:正离子电喷雾离子化(Electrospray Ionization,ESI)模式;雾化气流速3.0 L/min;加热气流速10.0 L/min;接口温度350 ℃;DL温度250 ℃;加热模块温度400 ℃;干燥气流速10.0 L/min;碎裂电压4.5 kV;扫描模式Q3 scan;扫描范围100~1 000 $m/z$。

### 1.4 紫玉米花色苷的核磁共振分析

紫玉米花色苷的结构通过Bruker Avance III HD 500超导核磁共振波谱仪(5 mm BBO探头)进一步探究。将纯化产物溶解于氘代二甲基亚砜(DMSO-d6,原子氘的原子数比例为99.9%)中,浓度调整为10 mg/mL,25 ℃下测定。

### 1.5 α-葡萄糖苷酶抑制活性分析

25 μL样品与50 μL α-葡萄糖苷酶溶液(0.5 U/mL)混合,随后加入25 μL磷酸盐缓冲溶液(Phosphate Buffered Saline,PBS)(0.1 mol/L,pH 6.8),摇床震荡10 min。混合液在37 ℃恒温箱放置20 min,随后加入50 μL对硝基苯-α-D-吡喃葡糖苷溶液(pNPG,1 mmol/L,使用0.1 mol/L的PBS(pH 6.8)溶液溶解),摇床震荡10 min促进溶液混合。37 ℃恒温箱孵育20 min后加入100 μL $Na_2CO_3$溶液(1 mol/L)终止反应,在405 nm处测定吸光值[26]。对照样品为使用等体积的PBS(0.1 mol/L,pH 6.8),其余步骤相同。空白组为:100 μL PBS溶液与50 μL pNPG溶液混合,其余步骤相同。每次实验设置3组平行。样品的抑制率按以下公式计算:

$$\alpha-\text{葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=[1-(A_{样品}-A_{空白})/A_{对照}]\times 100,$$

其中$A_{样品}$为加入花色苷后反应体系的吸光度;$A_{空白}$为不含酶和样品的空白组吸光度(仅缓冲液+底物);$A_{对照}$为未加花色苷的对照组吸光度(含酶+底物)。

### 1.6 α-葡萄糖苷酶的抑制类型分析

#### 1.6.1 Lineweaver-Burk双倒数作图

采用酶动力学双倒数法分析抑制类型。实验设置5个pNPG浓度梯度(0.2、0.4、0.8、1.6、2.0 mmol/L),固定天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷浓度(0、25、50、100 μmol/L)及α-葡萄糖苷酶含量(0.5 U/mL)。测定初始反应速率后,以反应速率倒数($1/v$)对底物浓度倒数($1/[S]$)作图,通过分析曲线斜率变化($K_m$与$v_{max}$)确定抑制类型。

#### 1.6.2 紫外可见光谱测定

紫外光谱用于检测酶-配体相互作用。将1 mL不同浓度的天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷溶液与4 mL酶液(0.5 U/mL)混合,25 ℃反应10 min后,使用紫外分光光度计(狭缝宽度1 nm)进行全波段扫描(200 nm~700 nm)。重点观察230 nm~280 nm(肽键吸收)及280 nm~350 nm(芳香族氨基酸吸收)范围内的特征峰位移,分析酶构象变化。

1.6.3 荧光光谱测定

荧光猝灭实验参照文献进行:1 mL天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷溶液与4 mL酶液(0.5 U/mL)混合,25 ℃反应10 min后,使用荧光分光光度计(激发波长295 nm,发射扫描300~600 nm,狭缝宽度10 nm)。通过Stern-Volmer方程分析猝灭常数,判断结合方式[27]。

### 1.7 Autodock分子对接分析

按照文献方法,以α-葡萄糖苷酶(PDB编号:2QMJ)的441位的色氨酸(Trp441)的坐标作为对接中心坐标,坐标值为(−21.56,−6.936,−1.971)。对接盒子的大小为60 Å × 60 Å × 60 Å,配体构象搜索使用半经验打分函数与拉马克遗传算法,对接的轮数设置为50,对接精度设置为高,其他参数采用默认值[28]。

### 1.8 分子动力学模拟

采用格罗宁根化学模拟机(GROningen MAchine for Chemical Simulations, GROMACS)2020.4软件包对天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷(Pg3DM)与α-葡萄糖苷酶(PDB ID: 2QMJ)的复合物进行分子动力学模拟。配体Pg3DM使用GAFF力场进行参数化,受体蛋白采用amber14ffSB力场,通过ACPYPE程序生成配体拓扑文件以确保参数一致性。在1 $nm^3$的立方体盒子中添加水分子,并通过添加$Na^+$离子中和体系电荷。在NVT、NPT平衡后进行50 ns的模拟,模拟温度为300 K,模拟压力设置为100 kPa。使用VMD 1.14.3对轨迹进行可视化分析,重点考察氢键形成、RMSD/RMSF变化、吉布斯自由能分布及蛋白质二级结构的变化。

### 1.9 数据分析

数据采用Excel 2010软件进行预分析,绘图采用Origin 8.0软件。

## 2 实验结果

### 2.1 紫玉米穗轴花色苷的分离与鉴定

图1为紫玉米穗轴花色苷的HPLC检测色谱图。样品经含0.1%盐酸(体积百分数)的甲醇提取后,通过AB8大孔树脂纯化,并采用快速纯化系统结合高效制备液相色谱分离得到6个花色苷组分(P1—P6)。UPLC-DAD-ESI-MS分析结果见图2,其中正离子模式下各组分的紫外-可见光谱、一级质谱($MS^1$)及二级质谱($MS^2$)数据分别展示于图2和图3。

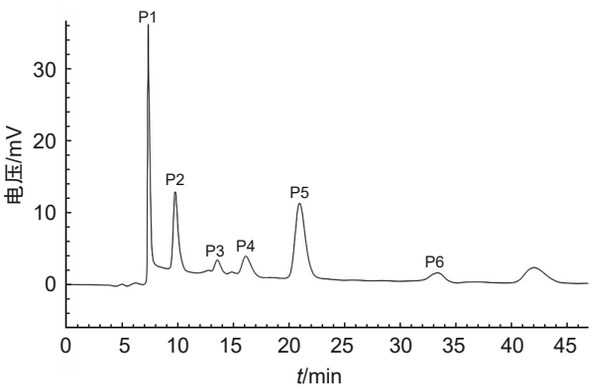



**图1** 制备液相分离紫玉米轴花色苷色谱图

**Fig. 1** Chromatogram of purple corn cob anthocyanins isolated by preparative liquid chromatography

P1在可见光区的最大吸收波长为501 nm(图2(a)),一级质谱($MS^1$)显示$m/z$ 463.123 17的强信号峰(图3(a)),与$C_{22}H_{23}O_{11}$的理论分子量(463.124 03)误差为0.000 86 Da。二级质谱($MS^2$)分析显示,母离子$m/z$ 463.123 17在35 eV碰撞能量下产生$m/z$ 301.070 25的离子碎片(图3(a)),这与芍药素的相对分子质量一致。P1的氢谱($^1$H-NMR)和碳谱($^{13}$C-NMR)如补充图1(a)、补充图2(a)所示,P1的$^1$H-NMR(500 MHz, DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),9.15, 8.24, 7.07, 6.85, 6.50, 5.21, 3.93, 3.72, 3.64, 3.46。P1的$^{13}$C NMR(125 MHz, DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),170.00, 163.91, 158.90, 157.58, 153.21, 150.33, 144.20, 136.06, 128.31, 120.60, 116.29, 114.25, 113.05, 103.49, 103.28, 95.93, 77.80, 76.67, 74.60, 70.51, 61.51, 56.14。查阅参考文献[29-30]可知,P1为芍药素葡萄糖苷(Peonidin-3-glucoside)。

P2在可见光区的最大吸收波长为518 nm(图2(b)),一级质谱($MS^1$)显示$m/z$ 535.108 64的强信号峰(图3(b)),与$C_{24}H_{23}O_{14}$的理论分子量(535.108 78)误差为0.000 14 Da。二级质谱($MS^2$)分析显示,母离子$m/z$ 535.108 64在35 eV碰撞能量下产生$m/z$ 287.054 75的离子碎片(图3(b)),这与矢车菊素的相对分子质量一致。P2的氢谱($^1$H-NMR)和碳谱($^{13}$C-NMR)如补充图1(b)、补充图2(b)所示,P2的$^1$H-NMR(500 MHz, DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位

移),8.80,8.22,8.14,7.98,6.94,6.74,5.40,4.70,4.38,3.87,3.79,3.59,3.44,3.43。P2的$^{13}$C NMR(125 MHz,DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),178.04,167.98,116.41,68.34,67.35,65.76,56.05,43.74,41.45,37.07,28.35,23.27,22.43,21.95,21.51。查阅参考文献[31-32]可知,P2为矢车菊素丙二酰葡萄糖苷(Cyanidin 3-O-(6′-O-malonylglucoside))。

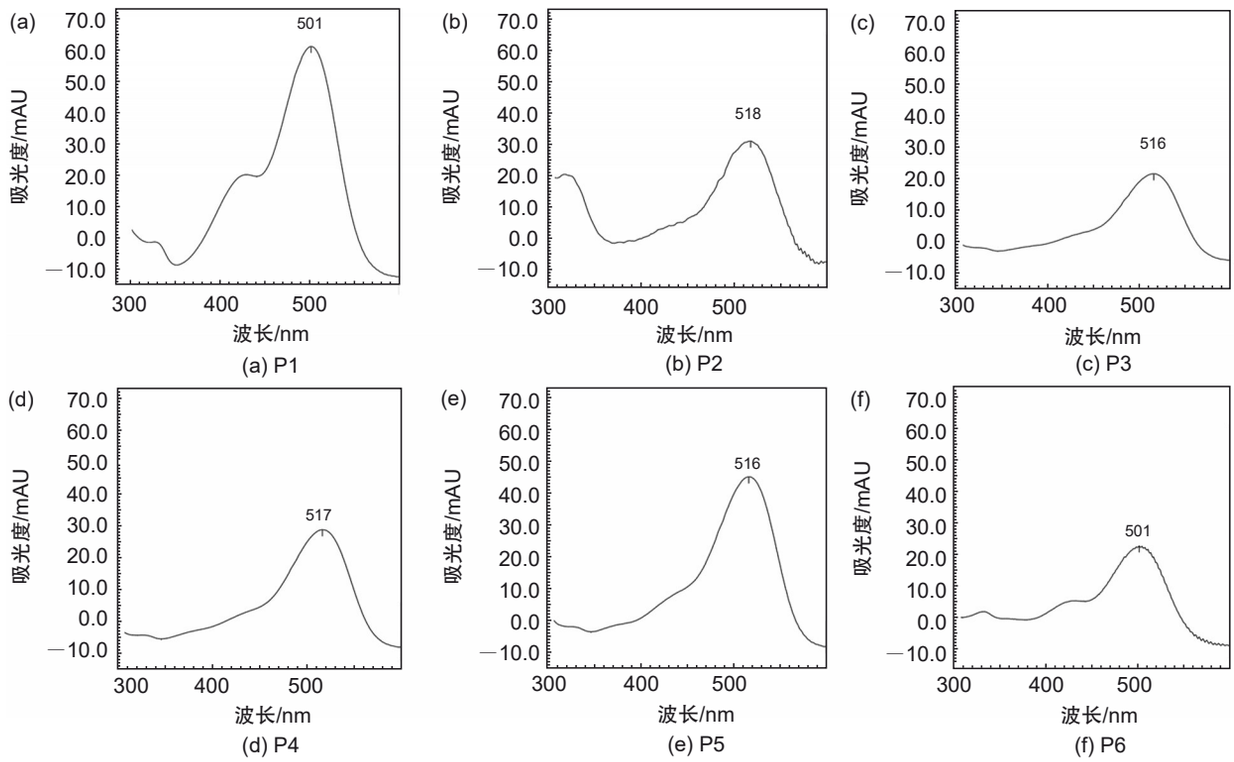



**图2** 紫玉米花色苷紫外可见光谱扫描

**Fig. 2** UV-Vis absorption spectrum of purple corn anthocyanins

P3在可见光区的最大吸收波长为516 nm(图2(c)),一级质谱(MS$^1$)显示$m/z$ 549.124 37的强信号峰(图3(c)),与$C_{25}H_{25}O_{14}$的理论分子量(549.124 43)误差为0.000 06 Da。二级质谱(MS$^2$)分析显示,母离子$m/z$ 549.124 37在35 eV碰撞能量下产生$m/z$ 287.054 25的离子碎片(图3(c)),这与矢车菊素的相对分子质量一致。P3的氢谱($^1$H-NMR)和碳谱($^{13}$C-NMR)如补充图1(c)、补充图2(c)所示,P3的$^1$H-NMR(500 MHz,DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),9.53,8.30,8.11,7.08,6.86,6.83,5.42,4.57,4.56,4.40,4.38,4.09,4.00,3.89,3.76,3.58,3.54。P3的$^{13}$C NMR(125 MHz,DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),177.92,171.96,170.00,163.80,158.90,157.58,155.55,147.42,145.45,136.07,128.45,120.96,117.96,117.79,113.05,103.49,102.69,95.93,77.55,75.53,74.24,71.61,64.53,30.45,30.37。查阅参考文献[33-34]可知,P3为矢车菊素琥珀酰葡萄糖苷(Cyanidin 3-O-(6″-succinyl-glucoside))。

P4在可见光区的最大吸收波长为517 nm(图2(d)),一级质谱(MS$^1$)显示$m/z$ 621.109 12的强信号峰(图3(d)),与$C_{27}H_{25}O_{17}$的理论分子量(621.109 17)误差为0.000 05 Da。二级质谱(MS$^2$)分析显示,母离子$m/z$ 621.109 12在35 eV碰撞能量下产生$m/z$ 287.054 55的离子碎片(图3(d)),这与矢车菊素的相对分子质量一致。P4的氢谱($^1$H-NMR)和碳谱($^{13}$C-NMR)如补充图1(d)、补充图2(d)所示,P5的$^1$H-NMR(500 MHz,DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),8.30,8.02,7.08,6.86,5.49,5.21,4.77,4.37,3.74,3.45,3.43。P4的$^{13}$C NMR(125 MHz,DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),170.20,170.00,169.79,167.46,167.40,163.79,158.90,157.58,155.55,147.42,

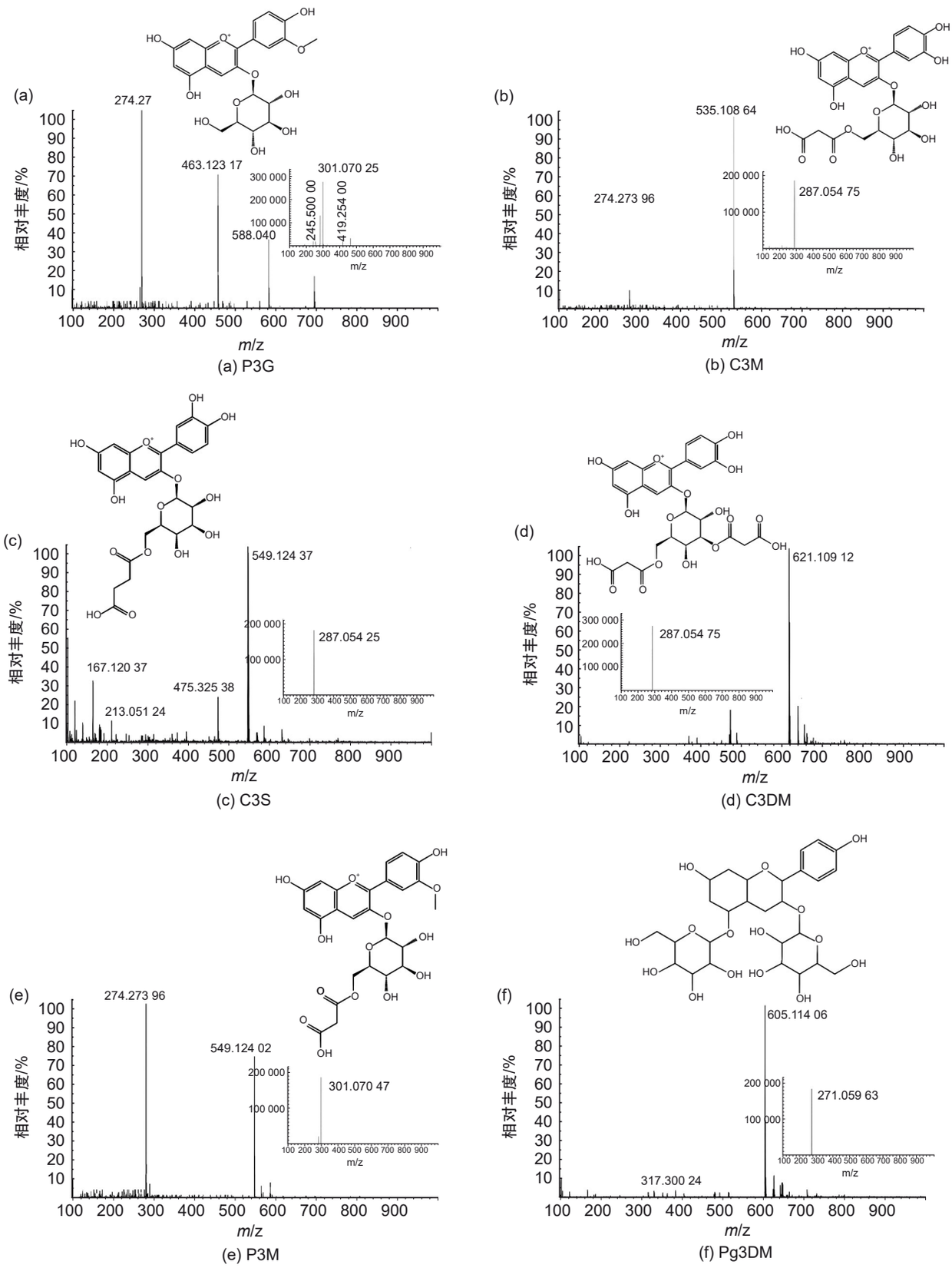



**图3** 紫玉米花色苷的一级及二级质谱图

**Fig. 3** Primary and secondary mass spectra of purple corn anthocyanins

144.10, 136.08, 128.45, 120.96, 117.96, 117.79, 113.05, 103.49, 102.46, 95.93, 76.82, 74.89, 72.62, 69.91。查阅参考文献[31, 35]可知, P4为矢车菊素双丙二酰葡萄糖苷(Cyanidin 3-(3″,6″-dimalonylglucoside))。

P5在可见光区的最大吸收波长为516 nm(图2(e)),一级质谱(MS$^1$)显示$m/z$ 549.124 02的强信号峰(图3(e)),与$C_{25}H_{25}O_{14}$的理论分子量(549.124 43)误差为0.000 41 Da。二级质谱(MS$^2$)分析显示,母离子$m/z$ 549.124 02在35 eV碰撞能量下产生$m/z$ 301.070 47的离子碎片(图3(e)),这与芍药素的相对分子质量一致。P5的氢谱($^1$H-NMR)和碳谱($^{13}$C-NMR)如补充图1(e)、补充图2(e)所示,P5的$^1$H-NMR(500 MHz, DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),10.03, 9.93, 9.41, 8.92, 8.26, 8.24, 8.22, 8.15, 7.33, 7.17, 7.12, 7.11, 7.05, 7.04, 5.77, 5.42, 5.26, 5.05, 4.93, 4.67, 4.46, 4.34, 4.27, 4.26, 4.16, 4.14, 4.13, 4.12, 4.11, 4.10, 4.02, 4.01, 4.00, 3.99, 3.94, 3.93, 3.92, 3.89, 3.87, 3.84, 3.83, 3.81, 3.79, 3.78, 3.77, 3.76, 3.75, 3.74, 3.73, 3.71, 3.70, 3.69, 3.68, 3.60, 3.51, 3.44, 3.39, 3.38, 3.37, 3.26, 3.25, 3.17, 3.14, 3.05。P5的$^{13}$C NMR(125 MHz, DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),166.71, 159.86, 144.72, 130.33, 125.13, 115.81, 114.25, 69.45, 68.36, 67.37, 65.65, 62.72, 43.74, 37.07, 35.74, 21.96, 21.51, 21.33, 18.59。查阅参考文献[34,36]可知,P5为芍药素丙二酰葡萄糖苷(Peonidin 3-O-(6″-malonyl-glucoside))。

P6在可见光区的最大吸收波长为501 nm(图2(f)),一级质谱(MS$^1$)显示$m/z$ 605.114 06的强信号峰(图3(f)),与$C_{27}H_{25}O_{16}$的理论分子量(605.114 26)误差为0.000 2 Da。二级质谱(MS$^2$)分析显示,母离子$m/z$ 605.114 06在35 eV碰撞能量下产生$m/z$ 271.059 63的离子碎片(图3(f)),这与天竺葵素的相对分子质量一致。P6的氢谱($^1$H-NMR)和碳谱($^{13}$C-NMR)如补充图1(f)、补充图2(f)所示,P6的$^1$H-NMR(500 MHz, DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),9.53, 8.92, 8.43, 8.30, 7.63, 7.62, 7.62, 7.61, 7.61, 7.60, 6.86, 5.21, 5.20, 5.19, 5.01, 5.00, 4.99, 4.98, 4.97, 4.78, 4.77, 4.37, 4.36, 4.34, 4.33, 4.27, 4.26, 4.24, 3.79, 3.78, 3.77, 3.76, 3.75, 3.74, 3.63, 3.62, 3.59, 3.58, 3.57, 3.34, 3.30, 3.26。P6的$^{13}$C NMR(125 MHz, DMSO-D6)波谱数据:$\delta$(化学位移),170.20, 170.00, 169.79, 167.46, 167.40, 165.19, 164.84, 158.90, 157.01, 144.33, 103.49, 102.46, 95.93, 76.82, 74.89, 72.62, 69.91, 64.67, 41.85, 41.76。查阅参考文献[37]可知,P6为天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷(Pelargonidin 3-O-3″,6″-O-dimalonylglucoside)。

**表1** 紫玉米穗轴中花色苷组分的鉴定

**Table 1** Identification of anthocyanin components in purple corn cob

| 峰号 | 母离子[M]$^+$($m/z$) | 碎片离子[M+H]$^+$($m/z$) | 可见光区最大波长/nm | 鉴定化合物 |
|---|---|---|---|---|
| P1 | 463.123 17 | 301.070 25 | 501 | 芍药素葡萄糖苷(P3G) |
| P2 | 535.108 64 | 287.054 75 | 518 | 矢车菊素丙二酰葡萄糖苷(C3M) |
| P3 | 549.124 37 | 287.054 25 | 516 | 矢车菊素琥珀酰葡萄糖苷(C3S) |
| P4 | 621.109 12 | 287.054 35 | 517 | 矢车菊素双丙二酰葡萄糖苷(C3DM) |
| P5 | 549.124 02 | 301.070 47 | 516 | 芍药素丙二酰葡萄糖苷(P3M) |
| P6 | 605.114 06 | 271.059 63 | 501 | 天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷(Pg3DM) |

经高分辨质谱(HRMS)与核磁共振波谱(1H/13C NMR)鉴定,6个紫玉米花色苷分别为:芍药素-3-O-葡萄糖苷(Peonidin-3-O-glucoside, P3G,组分P1),矢车菊素-3-O-丙二酰葡萄糖苷(Cyanidin-3-O-malonylglucoside, C3MG,组分P2),矢车菊素-3-O-琥珀酰葡萄糖苷(Cyanidin-3-O-succinylglucoside, C3SG,组分P3),矢车菊素-3-O-双丙二酰葡萄糖苷(Cyanidin-3-O-dimalonylglucoside, C3DG,组分P4),芍药素-3-O-丙二酰葡萄糖苷(Peonidin-3-O-malonylglucoside,P3MG,组分P5)和天竺葵素-3-O-双丙二酰葡萄糖苷(Pelargonidin-3-O-dimalonylgluco-

side,Pg3DM,组分P6)。经峰面积归一化分析,6个组分的纯度分别为:P3G(95.4%)、C3M(95.6%)、C3S(80.1%)、C3DM(90.5%)、P3M(90.3%)、Pg3DM(91.5%)。

### 2.2 紫玉米花色苷抑制α-葡萄糖苷酶活性

如表2所示,6种紫玉米花色苷单体中,天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷对α-葡萄糖苷酶的抑制活性最强,其$IC_{50}$值为33.89 μmol/L,而芍药素葡萄糖苷在测试浓度范围内未显示显著抑制活性($IC_{50}$无法拟合)。后续实验将重点探究天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷的抑制机制。

**表2** 紫玉米花色苷抑制α-葡糖糖苷酶的$IC_{50}$和分子对接结合自由能分析

**Table 2** The $IC_{50}$ values and molecular docking binding free energy analysis for anthocyanins from purple corn inhibiting α-glucosidase

| 化合物名称 | 结合自由能/(kJ/mol) | $IC_{50}$/(μmol/L) |
|---|---|---|
| 芍药素葡萄糖苷(P3G) | −32.09 | 无法拟合 |
| 矢车菊素丙二酰葡萄糖苷(C3M) | −33.60 | 278.24 |
| 矢车菊素琥珀酰葡萄糖苷(C3S) | −30.75 | 332.01 |
| 矢车菊素双丙二酰葡萄糖苷(C3DM) | −30.50 | 386.11 |
| 芍药素丙二酰葡萄糖苷(P3M) | −30.88 | 918.01 |
| 天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷(Pg3DM) | −32.13 | 33.89 |
| 阿卡波糖 | −31.92 | 261.56 |

### 2.3 分子对接分析紫玉米花色苷不同组分与α-葡萄糖苷酶的结合

如图4所示,紫玉米花色苷与α-葡萄糖苷酶(PDB ID:2QMJ)的分子对接结果表明,6种花色苷均成功嵌入活性中心,其中Arg202、Thr203、Tyr299、Arg334、Arg526、His600和Gln603残基与配体形成氢键(距离≤3.5 Å),结合能范围为−30.50至−33.60 kJ/mol(表2)。天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶(PDB ID:2QMJ)的分子对接显示,其最低结合自由能为−32.13 kJ/mol,体外抑制实验测得$IC_{50}$为33.89 μmol/L,显著低于其他花色苷组分和阿卡波糖($IC_{50}$ = 261.56 μmol/L)。

### 2.4 天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷对α-葡萄糖苷酶的抑制类型分析

#### 2.4.1 抑制动力学实验结果

经Lineweaver-Burk双倒数作图,得到$1/[S]$对$1/v$的线性回归关系(图5(a))。随着天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷浓度的上升,α-葡萄糖苷酶催化的pNPG水解反应的米氏常数$K_m$逐渐增加,最大反应速度$v_{max}$逐渐减小,拟合曲线相交表明天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷采用竞争性与非竞争性结合的混合模式抑制α-葡萄糖苷酶。

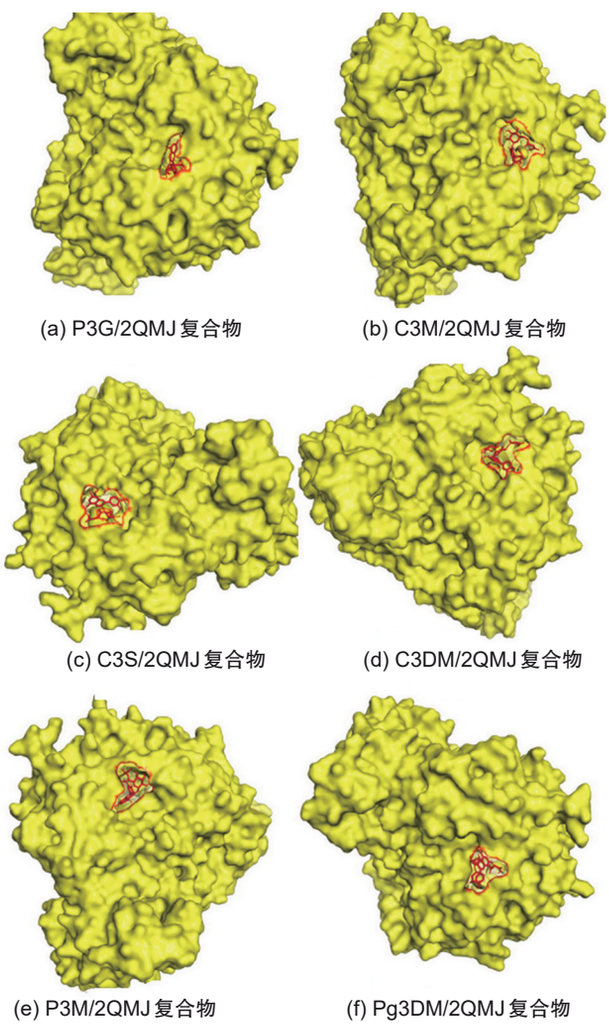



**图4** 紫玉米花色苷与α-葡萄糖苷酶的分子对接分析

**Fig. 4** Molecular docking analysis of anthocyanins from purple corn with α-glucosidase

#### 2.4.2 紫外光谱分析

紫外可见吸收光谱法(UV-Vis)是研究小分子与生物大分子相互作用的常用技术,适用于配体-蛋白结合的初步分析。α-葡萄糖苷酶(PDB ID:2QMJ)的苯丙氨酸(Phe)、酪氨酸(Tyr)和色氨酸(Trp)残基因共轭双键在280 nm附近具有特征吸收峰(Tyr/Trp贡献为主)。如图5(b)所示,随着天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷浓度增加,酶分子在280 nm的吸收减弱,表明配体与酶结合可能通过空间位阻或屏

蔽芳香族氨基酸的光吸收。

2.4.3 荧光光谱分析

荧光光谱法是基于小分子与酶蛋白相互作用引起的Trp/Tyr残基内源荧光变化(激发295 nm,发射360 nm)。图5(c)可见,以295 nm波长的光激发时,α-葡萄糖苷酶在360 nm波长处有明显的荧光信号。随着天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷浓度的增大,荧光强度下降,说明天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶之间的相互作用促进了荧光猝灭,但体系的最大发射波长未发生位移。

## 2.5 天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的结合位点分析

天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的分子对接结果见图6和表3,天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的Gln603、Tyr605、Phe575、Asp327、Tyr299形成键长分别为3.3、3.4、3.1、3.6、3.3 Å疏水作用。花色苷与酶形成丰富的疏水作用力,从而屏蔽了芳香族氨基酸在280 nm附近的光吸收,这与紫外和荧光实验结果一致。天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的Tyr605、Gln603、Arg526、Asp443、Asp327、Tyr299分别形成键长为2.7、2.7、3.1、4.0、3.6和3.3 Å的氢键。氢键和疏水作用力是维持花色苷与酶稳定结合的主要作用力。

**表3** 基于AutoDock分析PgDM与2QMJ之间的相互作用

**Table 3** Interaction between PgDM and 2QMJ based on AutoDock analysis

| 作用力类型 | 氨基酸编号 | 氨基酸 | 键长/Å |
|---|---|---|---|
| 疏水作用力 | 605 | Tyr | 3.4 |
| | 603 | Gln | 3.3 |
| | 575 | Phe | 3.1 |
| | | | 3.4 |
| | 327 | Asp | 3.6 |
| | 299 | Tyr | 3.3 |
| 氢键 | 605 | Tyr | 2.7 |
| | 603 | Gln | 2.7 |
| | | | 3.5 |
| | 526 | Arg | 3.1 |
| | 443 | Asp | 4.0 |
| | 327 | Asp | 3.6 |
| | 299 | Tyr | 3.3 |

## 2.6 分子动力学模拟

为了进一步分析天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶之间相互作用对酶的空间结构和活性的影响,我们借助GROMACS对天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的作用过程进行了分子动力学模拟。主要指标为2QMJ与

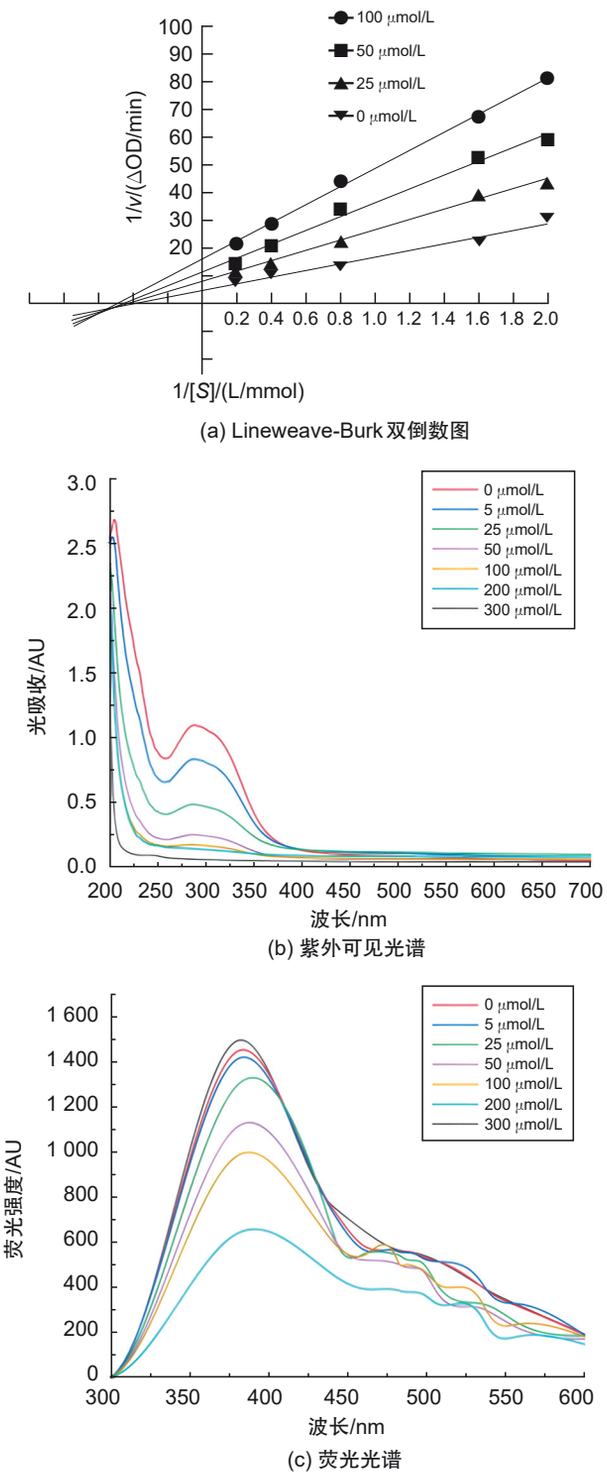
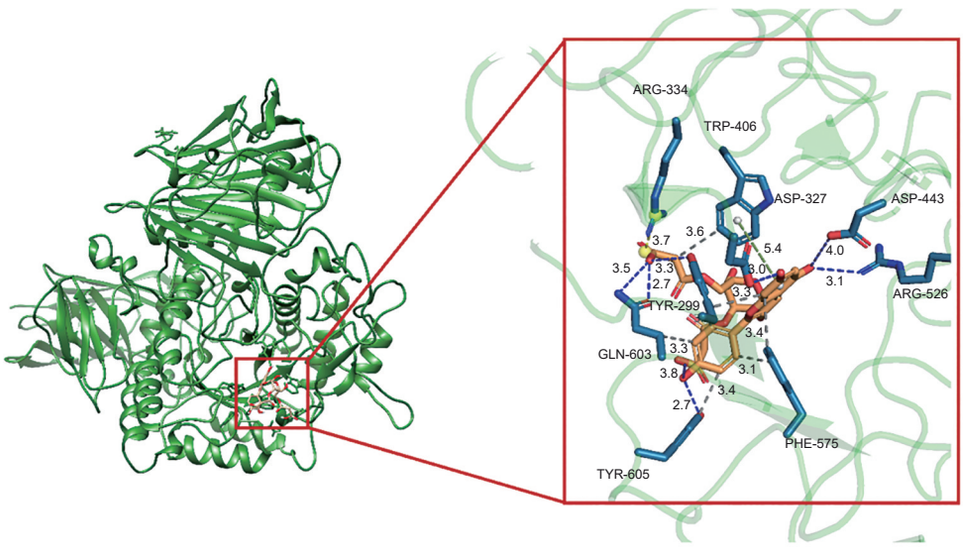



**图5** Pg3DM与α-葡萄糖苷酶的Lineweave-Burk双倒数图和光谱分析

**Fig. 5** Lineweaver-Burk double reciprocal plot and spectroscopic analysis of Pg3DM with α-glucosidase

2QMJ/Pg3DM在模拟前后α-葡萄糖苷酶的C原子主链的均方根偏差(Root Mean Square Deviation,RMSD)、氨基酸的均方根波动(Root Mean Square Fluctuation,RMSF)、密度变化(Density)和溶剂可及表面积(Solvent Accessible Surface,SAS)、天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶之间的氢键变化、α-葡萄糖苷酶的吉布斯(Gibbs)自由能变化和二级结构变化。




注:灰色虚线表示疏水作用力,蓝色虚线表示氢键,黄色虚线表示盐桥,绿色虚线表示π键。

Note: The gray dotted lines represent the hydrophobic interaction, the blue dotted lines represent the hydrogen bond, the yellow dotted lines represent the salt bridge, and the green dotted lines represent the π-stacking.

**图6** Pg3DM与α-葡萄糖苷酶的结合模式分析

**Fig. 6** Analysis of the binding mode of Pg3DM and α-glucosidase

2.6.1 RMSD、RMSF、密度和SAS分析

本研究采用分子动力学模拟方法,系统分析了天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷(Pg3DM)与α-葡萄糖苷酶的相互作用机制。通过对比游离酶(2QMJ)与复合物(2QMJ/Pg3DM)的模拟结果,分析了Pg3DM对2QMJ的空间构象以及构象稳定性的影响。均方根偏差(RMSD)和均方根波动(RMSF)分析(图7(a)—图7(b))表明,配体结合后α-葡萄糖苷酶的主链C原子和氨基酸残基波动未发生显著变化,说明Pg3DM的结合未破坏酶分子的整体构象稳定性。密度分布和溶剂可及表面积(SAS)分析(图7(c)—图7(d))显示,复合物的平均坐标系宽度从5.8 nm显著缩小至4.7 nm,但内部密度和表面亲水性氨基酸分布未发生显著改变,提示配体诱导的构象重排主要表现为酶分子的空间结构更加紧凑。

2.6.2 天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶的相互作用

分子动力学模拟分析了天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷结合前后α-葡萄糖苷酶与配体之间的氢键数量变化和吉布斯自由能分布。图8(a)显示,Pg3DM与α-葡萄糖苷酶之间形成稳定的氢键网络,键长 < 3.5 Å的氢键数量在模拟过程中稳定维持在3个,这一结果与分子对接的一致。图8(b)—图8(c)分别展示了2QMJ与2QMJ/Pg3DM中蛋白质的吉布斯自由能的空间分布,天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷稳定了α-葡萄糖苷酶的空间构象,使其结构更加紧凑。这一结果与蛋白质密度(Density)分析结果一致。

2.6.3 二级结构的变化

这项研究采用蛋白质二级结构字典(Dictionary of Secondary Structure in Proteins,DSSP)分析了酶及花色苷/酶复合物分子动力学模拟的结果,揭示了花色苷配体结合后对α-葡萄糖苷酶二级结构的影响。结果如图9所示,在结合天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷后,随着模拟时间的延长,2QMJ的301到401位氨基酸所形成的二级结构倾向于从无规则卷曲

(Bends)向β转角(Turns)转变。这种转变主要发生在酶的活性区域(301到401位氨基酸是α-葡萄糖苷酶的底物结合区),表明花色苷与酶的相互作用促使酶的活性区域的空间结构更加紧凑。这种改变可能增强了花色苷对酶的抑制作用。

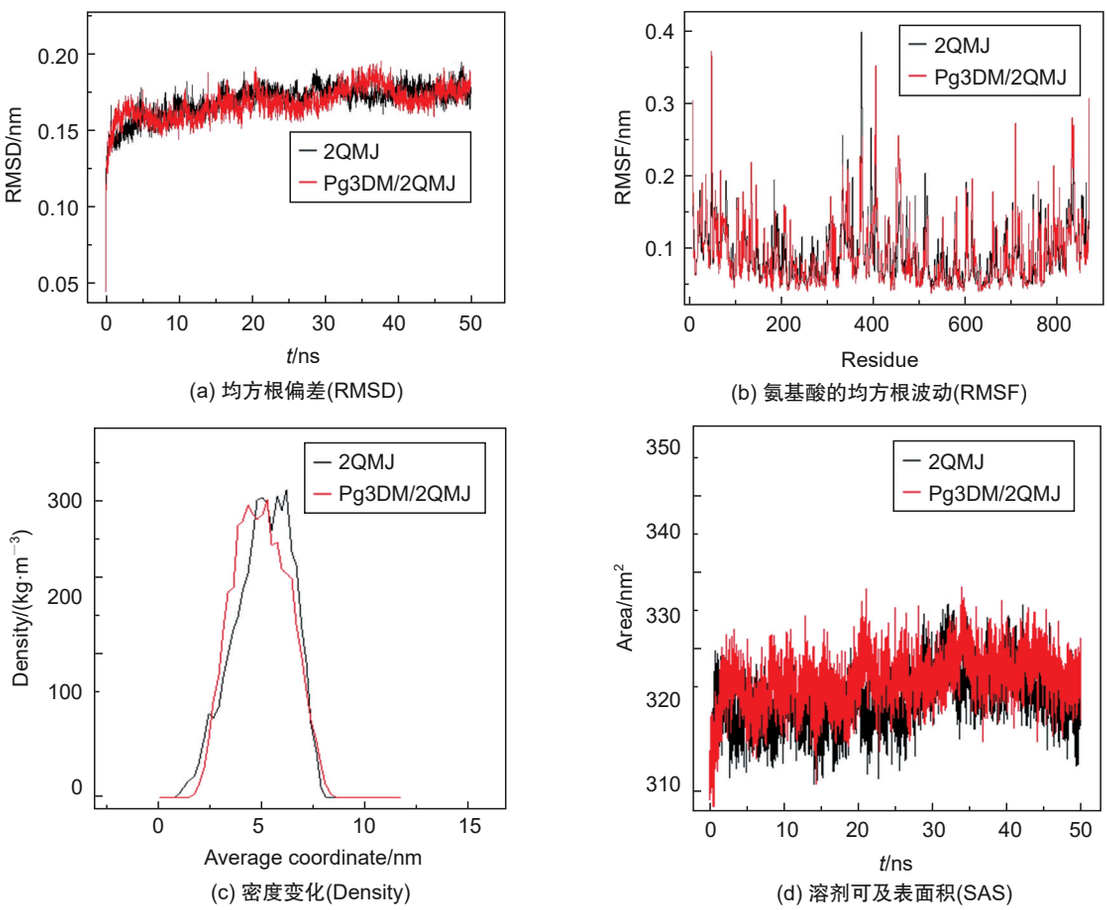



**图7** 2QMJ与2QMJ/Pg3DM复合物的50 ns分子动力学模拟结果

**Fig. 7** Results of 50 ns molecular dynamics simulations for 2QMJ and 2QMJ/Pg3DM complexes

## 3 分析与讨论

### 3.1 紫玉米花色苷对α-葡萄糖苷酶的抑制作用分析

天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷(Pg3DM)的半数抑制浓度($IC_{50}$)为33.89 μmol/L,显著低于其他花色苷组分及阿卡波糖组($IC_{50}$ = 261.56 μmol/L)。Lineweaver-Burk双倒数分析显示,Pg3DM的抑制类型为混合型。紫外光谱和荧光光谱分析表明天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与酶的结合屏蔽了芳香族氨基酸在紫外区的光吸收。

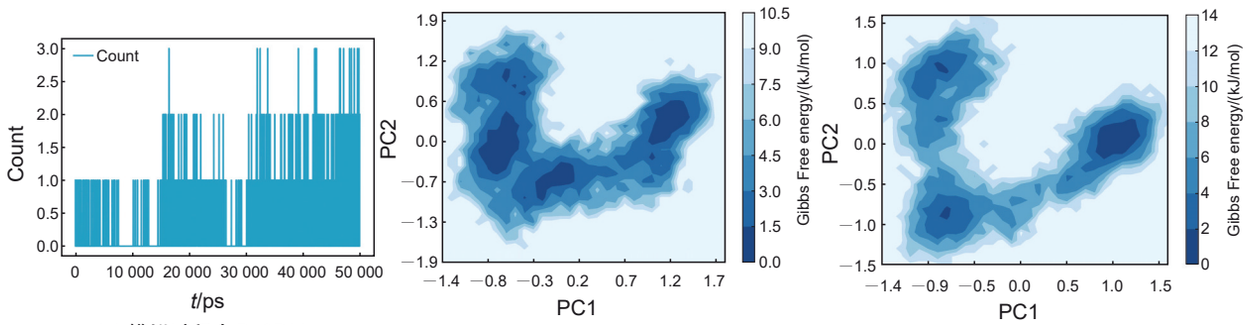
### 3.2 天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶结合的分子对接

Promyos等的实验表明花色苷元C环上的C3位上添加糖苷基团会显著降低花色苷分子与α-葡萄糖苷酶的氢键形成能力,从而降低花色苷对酶的抑制效果[6,38]。本研究中,Pg3DM的酰化修饰可能通过增强酶和配体之间的氢键和疏水作用增强抑制活性。

### 3.3 天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶结合过程的分子动力学模拟

均方根偏差(RMSD)分析显示,α-葡萄糖苷酶Cα原子骨架在模拟过程中波动范围稳定在0.16 nm~0.2 nm;残基均方根波动(RMSF)和溶剂可及表面积(SAS)分析结果表明氨基酸残基波动较小;基于回转半径(Rg)分析,酶蛋白的平均空间尺寸由5.8 nm(2QMJ)缩小至4.7 nm(2QMJ/Pg3DM),表明Pg3DM诱导酶蛋白的构象更加紧凑。天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶形成稳定的氢键,模拟后期,键长小

于3.5 Å的氢键数量稳定在3,这一结果与分子对接的一致,表明氢键依然是主导天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶结合的主要作用力。分子动力学模拟结果揭示Pg3DM可能通过与Asp327、Tyr299之间的氢键,推动α-葡萄糖苷酶的301到401之间的部分氨基酸由无规则卷曲转变为β转角,进而使酶的空间结构更加紧凑,进一步阻碍了酶与底物的结合。




(a) 模拟过程中Pg3DM与2QMJ之间的氢键 (b) 纯蛋白模拟后2QMJ的吉布斯自由能分布 (c) Pg3DM/2QMJ复合物模拟后2QMJ的吉布斯自由能分布

注:吉布斯自由能分布图采用主成分分析对分子动力学轨迹进行降维后绘制,选取第一主成分(PC1)与第二主成分(PC2)构建二维吉布斯自由能面,表征蛋白构象的动态分布;PC1和PC2分别代表体系中贡献最高与次高的蛋白集体构象波动。

Note: The Gibbs free energy distribution diagram is plotted by performing dimensionality reduction on molecular dynamics trajectories using Principal Component Analysis, and then constructing a two-dimensional Gibbs free energy surface using the first principal component (PC1) and the second principal component (PC2) to characterize the dynamic distribution of protein conformations; PC1 and PC2 represent the collective conformational fluctuations of proteins that contribute the most and the second most in the system, respectively.

**图8** 分子动力学模拟过程中Pg3DM与2QMJ之间的氢键(键长小于3.5 Å)的动态变化与2QMJ的吉布斯自由能分布

**Fig.8** Dynamic changes of hydrogen bonds (with bond length less than 3.5 Å) between Pg3DM and 2QMJ during molecular dynamics simulation and Gibbs free energy distribution of 2QMJ

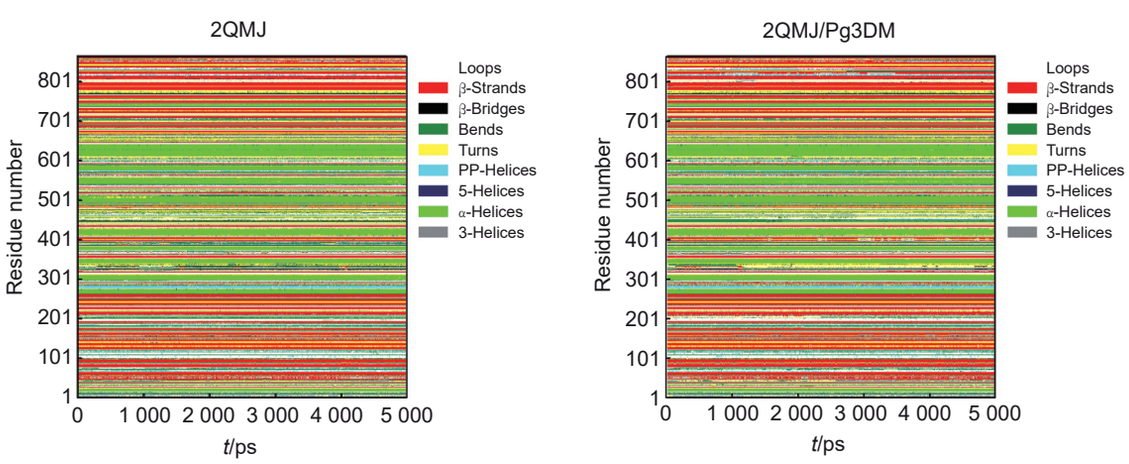



**图9** 由α-葡萄糖苷酶和α-葡萄糖苷酶/Pg3DM复合物的所有氨基酸残基形成的二级结构

**Fig. 9** Secondary structure formed by all amino acid residues of α-glucosidase and α-glucosidase/Pg3DM complex

## 4 结论

本研究系统比较了紫玉米中6种花色苷的α-葡萄糖苷酶抑制活性,结果显示相比阿卡波糖和其他花色苷,天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷(Pg3DM)表现出显著的酶抑制优势。天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷与α-葡萄糖苷酶活性中心的Tyr605和Gln603形成较强的氢键和疏水作用力主导了它对α-葡萄糖苷酶的结合。Pg3DM与Asp327、Tyr299之间的氢键,推动α-葡萄糖苷酶的301~401的氨基酸由无规则卷曲转变为β转角,进而使酶的空间结构更加紧凑,进一步阻挡了酶对底物的结合。紫玉米穗

轴作为紫玉米加工副产物,其中的天竺葵素双丙二酰葡萄糖苷可作为先导化合物用于开发干预糖尿病的小分子药物。后续研究我们将开展糖尿病模型动物实验来评估紫玉米花色苷作为改善糖尿病的功能食品的可能,为紫玉米的高价值开发利用提供参考。

**参考文献:**


[1] Verediano T A, Sant' Ana C T, Grancieri M, *et al*. Black Corn (*Zea mays* L.) Whole Flour Improved the Antioxidant Capacity and Prevented Adipogenesis in Mice Fed a High-fat Diet[J]. *Food Funct*, 2022, **13**(10): 5590−5601. DOI: 10.1039/d1fo04205j.

[2] 李亚巍, 昌盛, 王黎明, 等. 蓝莓花色苷对2型糖尿病小鼠氧化损伤的保护作用[J]. 食品研究与开发, 2016, **37**(8): 5−8. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2016.08.002.
Li Y W, Chang S, Wang L M, *et al*. Protective Effect of Blueberry Anthocyanins on Oxidative Damage in Type 2 Diabetes Mice[J]. *Food Res Dev*, 2016, **37**(8): 5−8. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2016.08.002.

[3] 焦岩, 王振宇. 蓝靛果花色苷对高脂膳食诱导肥胖大鼠脂代谢和抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2010, **31**(3): 230−234. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201817028.
Jiao Y, Wang Z Y. Effect of *Lonicera caerulea* Anthocyanin on Lipid Metabolism and Antioxidant Function in High Fat Diet-induced Obese Rats[J]. *Food Sci*, 2010, **31**(3): 230−234. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201817028.

[4] 曾画艳, 郎春辉, 何方, 等. 紫甘薯花色苷制备及其抑制3T3-L1前脂肪细胞生长增殖研究[J]. 食品科技, 2014, **39**(7): 194−198. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2014.07.039.
Zeng H Y, Lang C H, He F, *et al*. Proliferation Inhibition Effect of Purple Sweet Potato Anthocyanins Extract on 3T3-L1 Preadipocytes[J]. *Food Sci Technol*, 2014, **39**(7): 194−198. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2014.07.039.

[5] Tang H J, Huang L, Sun C Y, *et al*. Exploring the Structure-Activity Relationship and Interaction Mechanism of Flavonoids and *α*-glucosidase Based on Experimental Analysis and Molecular Docking Studies[J]. *Food Funct*, 2020, **11**(4): 3332−3350. DOI: 10.1039/C9FO02806D.

[6] Promyos N, Temviriyanukul P, Suttisansanee U. Investigation of Anthocyanidins and Anthocyanins for Targeting *α*-glucosidase in Diabetes Mellitus[J]. *Prev Nutr Food Sci*, 2020, **25**(3): 263−271. DOI: 10.3746/pnf.2020.25.3.263.

[7] Ren L, Dong Q, Liu Z H, *et al*. Optimization of Subcritical Water Extraction, UPLC-Triple-TOF-MS/MS Analysis, Antioxidant and *α*-glucosidase Inhibitory Activities of Anthocyanins from *Nitraria sibirica* Pall. Fruits[J]. *Food Chem X*, 2024, **23**: 101626. DOI: 10.1016/j. fochx.2024.101626.

[8] Zhang J T, Sun L J, Dong Y S, *et al*. Chemical Compositions and *α*-glucosidase Inhibitory Effects of Anthocyanidins from Blueberry, Blackcurrant and Blue Honeysuckle Fruits[J]. *Food Chem*, 2019, **299**: 125102. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125102.

[9] Wang S, Li Y, Huang D J, *et al*. The Inhibitory Mechanism of Chlorogenic Acid and Its Acylated Derivatives on A-amylase and *α*-glucosidase[J]. *Food Chem*, 2022, **372**: 131334. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131334.

[10] Chen J G, Wu S F, Zhang Q F, *et al*. *α*-glucosidase Inhibitory Effect of Anthocyanins from *Cinnamomum camphora* Fruit: Inhibition Kinetics and Mechanistic Insights through in Vitro and in Silico Studies[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, **143**: 696−703. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.09.091.

[11] Kaeswurm J A H, Könighofer L, Hogg M, *et al*. Impact of B-ring Substitution and Acylation with Hydroxy Cinnamic Acids on the Inhibition of Porcine A-amylase by Anthocyanin-3-glycosides[J]. *Foods*, 2020, **9**(3): 367. DOI: 10.3390/foods9030367.

[12] Pahlke G, Ahlberg K, Oertel A, *et al*. Antioxidant Effects of Elderberry Anthocyanins in Human Colon Carcinoma Cells: A Study on Structure-activity Relationships[J]. *Mol Nutr Food Res*, 2021, **65**(17): e2100229. DOI: 10.1002/mnfr.202100229.

[13] Etxeberria U, De La Garza A L, Campión J, *et al*. Antidiabetic Effects of Natural Plant Extracts *via* Inhibition of Carbohydrate Hydrolysis Enzymes with Emphasis on Pancreatic Alpha Amylase[J]. *Expert Opin Ther Targets*, 2012, **16**(3): 269−297. DOI: 10.1517/14728222.2012.664134.

[14] Barik S K, Russell W R, Moar K M, *et al*. The Anthocyanins in Black Currants Regulate Postprandial Hyperglycaemia Primarily by Inhibiting *α*-glucosidase while Other Phenolics Modulate Salivary A-amylase, Glucose Uptake and Sugar Transporters[J]. *J Nutr Biochem*, 2020, **78**: 108325. DOI: 10.1016/j.jnutbio.2019.108325.

[15] Lee T W, Song Y B, Kim C Y, *et al*. Regulation of Glucose Uptake Level by Black Corn-derived Anthocyanins at the Small Intestinal *α*-glucosidases and Different Types of Glucose Transporters[J]. *J Agric Food Chem*, 2025, **73**(23): 14523−14532. DOI: 10.1021/acs.jafc.5c04779.

[16] Zhang C, Ma Y, Zhao X Y, *et al*. Effect of Drying Treat-

ments on Anthocyanin, Fumonisin $B_1$, Aflatoxin $B_1$ Content of Anthocyanin Extract from Purple Corn (*Zea may L.*) in North China[J]. *Adv Mater Res*, 2011, **335/336**: 1396−1401. DOI: 10.4028/www. scientific. net/amr.335-336.1396.

[17] Zhao X Y, Corrales M, Zhang C, *et al*. Composition and Thermal Stability of Anthocyanins from Chinese Purple Corn (*Zea mays* L.)[J]. *J Agric Food Chem*, 2008, **56**(22): 10761−10766. DOI: 10.1021/jf8025056.

[18] Ozgen M, Scheerens J C, Reese R N, *et al*. Total Phenolic, Anthocyanin Contents and Antioxidant Capacity of Selected Elderberry (*Sambucus canadensis* L.) Accessions[J]. *Pharmacogn Mag*, 2010, **6**(23): 198−203. DOI: 10.4103/0973-1296.66936.

[19] Díaz-garcía A, Salvá-ruíz B, Bautista-cruz N, *et al*. Optimization of a Natural Low-calorie Antioxidant Tea Prepared from Purple Corn (*Zea mays* L.) Cobs and *Stevia* (*Stevia rebaudiana* L.)[J]. *Lwt*, 2021, **150**: 111952. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111952.

[20] Fernandez-aulis F, Hernandez-vazquez L, Aguilar-osorio G, *et al*. Extraction and Identification of Anthocyanins in Corn Cob and Corn Husk from Cacahuacintle Maize[J]. *J Food Sci*, 2019, **84**(5): 954−962. DOI: 10.1111/1750-3841.14589.

[21] De Nisi P, Borlini G, Parizad P A, *et al*. Biorefinery Approach Applied to the Valorization of Purple Corn Cobs [J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2021, **9**(10): 3781−3791. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c08717.

[22] Yang Z D, Zhai W W. Identification and Antioxidant Activity of Anthocyanins Extracted from the Seed and Cob of Purple Corn (*Zea mays* L.)[J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2010, **11**(1): 169−176. DOI: 10.1016/j. ifset.2009.08.012.

[23] Li J, Li X D, Zhang Y, *et al*. Identification and Thermal Stability of Purple-fleshed Sweet Potato Anthocyanins in Aqueous Solutions with Various pH Values and Fruit Juices[J]. *Food Chem*, 2013, **136**(3/4): 1429−1434. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.09.054.

[24] Chen C. Chemical Characterization of Proanthocyanidins in Purple, Blue, and Red Corn after Different Milling Processes and Their Anti-inflammatory Properties [D]. Urbana−Champaign: University of Illinois Urbana−Champaign, 2017.

[25] Zhao X, Zhang S S, Zhang X K, *et al*. An Effective Method for the Semi-preparative Isolation of High-purity Anthocyanin Monomers from Grape Pomace[J]. *Food Chem*, 2020, **310**: 125830. DOI: 10.1016/j. foodchem.2019.125830.

[26] 贾亚楠, 逯海朋, 喻艳, 等. 桑枝内生菌代谢产物抑制α-葡萄糖苷酶和抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2017, **43**(11): 132−139. DOI: 10.13995/j. cnki. 11-1802/ts.014921.
Jia Y N, Lu H P, Yu Y, *et al*. The Inhibition of *α*-glucosidase and Antioxidant Activity of Endophyte Metabolite Isolated from Mulberry[J]. *Food Ferment Ind*, 2017, **43**(11): 132−139. DOI: 10.13995/j. cnki. 11-1802/ts.014921.

[27] 韩芬霞, 范新景, 耿升, 等. 异甘草素抑制α-葡萄糖苷酶的分子机制[J]. 食品科学, 2019, **40**(15): 37−42. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180830-337.
Han F X, Fan X J, Geng S, *et al*. Inhibitory Mechanism of Isoliquiritigenin Against *α*-glucosidase[J]. *Food Sci*, 2019, **40**(15): 37−42. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180830-337.

[28] 徐晓梅, 温家颖, 王庆华. 小分子糖及其类似物与α-葡萄糖苷酶的分子对接[J]. 食品科学, 2020, **41**(8): 139−143. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20181201-001.
Xu X M, Wen J Y, Wang Q H. Molecular Docking of Small-molecule Monosaccharides and Their Analogues with *α*-glucosidase[J]. *Food Sci*, 2020, **41**(8): 139−143. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20181201-001.

[29] Sun L L, Gao W, Zhang M M, *et al*. Composition and Antioxidant Activity of the Anthocyanins of the Fruit of *Berberis heteropoda* Schrenk[J]. *Molecules*, 2014, **19**(11): 19078−19096. DOI: 10.3390/molecules191119078.

[30] Guo L C, Qiao J L, Mikhailovich M S, *et al*. Comprehensive Structural Analysis of Anthocyanins in Blue Honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.), Bilberry (*Vaccinium uliginosum* L.), Cranberry (*Vaccinium macrocarpon* L.), and Antioxidant Capacity Comparison[J]. *Food Chem X*, 2024, **23**: 101734. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101734.

[31] Andersen Ø M, Fossen T. Anthocyanins with an Unusual Acylation Pattern from Stem of *Allium victorialis* [J]. *Phytochemistry*, 1995, **40**(6): 1809−1812. DOI: 10.1016/0031-9422(95)90025-Q.

[32] Chen S M, Li C H, Zhu X R, *et al*. The Identification of Flavonoids and the Expression of Genes of Anthocyanin Biosynthesis in the *Chrysanthemum* Flowers[J]. *Biologia Plant*, 2012, **56**(3): 458−464. DOI: 10.1007/s10535-012-0069-3.

[33] Fossen T, Andersen Ø M. Cyanidin 3-O-(6″-succinyl-β-glucopyranoside) and Other Anthocyanins from *Phragmites australis*[J]. *Phytochemistry*, 1998, **49**(4): 1065−1068. DOI: 10.1016/S0031-9422(98)00064-8.

[34] Peniche-pavía H A, Tiessen A. Anthocyanin Profiling of Maize Grains Using DIESI-MSQD Reveals that

Cyanidin-based Derivatives Predominate in Purple Corn, whereas Pelargonidin-based Molecules Occur in Red-pink Varieties from Mexico[J]. *J Agric Food Chem*, 2020, **68**(21): 5980−5994. DOI: 10.1021/acs.jafc.9b06336.

[35] Chen L Y, Yang M, Mou H J, *et al*. Ultrasound-assisted Extraction and Characterization of Anthocyanins from Purple Corn Bran[J]. *J Food Process Preserv*, 2018, **42**(1): e13377. DOI: 10.1111/jfpp.13377.

[36] Fossen T, Slimestad R, Andersen Ø M. Anthocyanins with 4'-glucosidation from Red Onion, *Allium cepa*[J]. *Phytochemistry*, 2003, **64**(8): 1367−1374. DOI: 10.1016/j.phytochem.2003.08.019.

[37] Hao R L, Shan S H, Yang D D, *et al*. Peonidin-3-O-glucoside from Purple Corncob Ameliorates Nonalcoholic Fatty Liver Disease by Regulating Mitochondrial and Lysosome Functions to Reduce Oxidative Stress and Inflammation[J]. *Nutrients*, 2023, **15**(2): 372. DOI: 10.3390/nu15020372.

[38] You Q, Chen F, Wang X, *et al*. Inhibitory Effects of Muscadine Anthocyanins on $\alpha$-glucosidase and Pancreatic Lipase Activities[J]. *J Agric Food Chem*, 2011, **59**(17): 9506−9511. DOI: 10.1021/jf201452v.