

陈舒妍,张丹,周凯,等.邻苯二甲酸酯胁迫对茭白肉质茎营养品质及其代谢响应机制的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(2):228-239.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.024

## 邻苯二甲酸酯胁迫对茭白肉质茎营养品质 及其代谢响应机制的影响

陈舒妍<sup>1</sup>,张丹<sup>1</sup>,周凯<sup>2</sup>,钟兰<sup>2,3</sup>,李秀娟<sup>1</sup>

1. 华中农业大学食品科学技术学院/环境食品学教育部重点实验室/果蔬加工与品质调控湖北省重点实验室, 武汉 430070; 2. 武汉市农业科学院蔬菜研究所, 武汉 430064; 3. 湖北洪山实验室, 武汉 430070

**摘要** 为探究邻苯二甲酸酯类化合物(phthalic acid esters, PAEs)胁迫下茭白肉质茎营养品质的变化机制,采用超高效液相色谱串联质谱结合非靶向代谢组学技术对不同质量分数PAEs处理下茭白肉质茎代谢机制进行系统解析。结果显示,高质量分数PAEs显著增加肉质茎粗纤维(46.15%)、可溶性蛋白(410%)和游离氨基酸(22.96%)含量,但降低白度、维生素C(50.11%)及可溶性固形物含量;中质量分数PAEs提高肉质茎总灰分(25.00%)和可溶性固形物含量(64.99%),而低质量分数PAEs下肉质茎粗纤维与还原糖含量最低。代谢组学鉴定差异代谢物689个。中质量分数PAEs诱导了227种代谢物变化,其中氨基酸类下调、脂类上调,显著影响了精氨酸和脯氨酸代谢通路;高质量分数PAEs引发267种代谢物变化,导致氨基酸类和苯丙素类上调,核苷酸类和有机酸下调。

**关键词** 茭白; 邻苯二甲酸酯; 营养品质; 非靶向代谢组学; 胁迫响应

**中图分类号** TS207 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0228-12

邻苯二甲酸酯类化合物(phthalic acid esters, PAEs)作为一类广泛应用于塑料加工、化妆品、食品包装等领域的增塑剂,其年产量超千万吨,因化学稳定性强、难降解且易通过挥发、渗漏等途径进入环境,已成为全球分布最广的持久性有机污染物之一<sup>[1-2]</sup>。PAEs的脂溶性与生物富集特性使其易在农作物中累积,进而干扰细胞代谢、破坏膜结构完整性,导致营养组分失衡<sup>[3]</sup>,对作物的生长发育与食用品质构成潜在威胁<sup>[4-5]</sup>。研究表明,植物在外界污染物胁迫下,其营养品质与代谢途径均会发生显著改变。例如,在邻苯二甲酸二正丁酯(dibutyl phthalate, DBP)胁迫下,蒲公英半乳糖代谢、柠檬酸循环以及丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢途径发生显著改变,导致其碳水化合物、氨基酸和有机酸的合成和能量代谢受到影响<sup>[6]</sup>;水稻在DBP和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(di-(2-ethylhexyl)phthalate, DEHP)胁迫下,蔗糖分解衍生的糖酵解中间体优先流向氨基酸合成,导致淀粉和脂肪酸水平降低<sup>[7]</sup>。值得关注的

是,PAEs可通过“土壤/水-植物-食物链”传递累积,研究证实,塑料薄膜的使用使温室土壤与蔬菜中PAEs残留量增加,进而导致农民的健康风险增加,长期暴露可能诱发内分泌紊乱、生殖毒性等健康风险<sup>[8]</sup>,因此,解析PAEs对食用作物营养品质的影响具有重要公共卫生意义。

目前,PAEs对植物的胁迫研究多集中于陆生作物,而水生植物因生长环境特殊,其对PAEs的吸收累积规律及代谢响应机制与陆生植物存在差异。茭白(*Zizania latifolia*)是仅次于莲藕的第二大水生蔬菜,其生长环境和发达的根系使其容易受到环境中PAEs的胁迫。研究表明,在高质量分数PAEs胁迫下,肉质茎中邻苯二甲酸丁苄酯(benzyl butyl phthalate, BBP)含量达到0.75 mg/kg<sup>[9]</sup>,可能导致其营养品质发生变化。

本研究以邻苯二甲酸二丙烯酯(diallyl phthalate, DAP)、DBP、邻苯二甲酸二异丁酯(diisobutyl phthalate, DIBP)、BBP和DEHP为目标分析物,通过

收稿日期:2025-04-29

基金项目:湖北省农业科技创新中心创新团队项目(2021-620-000-001-31)

陈舒妍, E-mail: chensy9527@foxmail.com

通信作者:李秀娟, E-mail: lixiujuan@mail.hzau.edu.cn

盆栽试验构建不同污染水平PAEs复合胁迫体系,测定茭白肉质茎的营养指标,结合非靶向代谢组学与多元统计分析方法,系统解析PAEs暴露对茭白肉质茎营养品质的影响及其代谢调控机制,为茭白种植管理和环境污染防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器、试剂与材料

Centrifuge 5424R 冷冻离心机,德国Eppendorf公司;SBL-10TD 控温超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Wonbio-96c 多样品冷冻研磨仪,上海万柏生物科技有限公司;LNG-T88 台式快速离心浓缩干燥器,太仓市华美生化仪器厂;JXDC-20 氮气吹扫仪,上海净信实业发展有限公司;Vanquish Horizon system UHPLC 液相色谱系统、Q-Exactive 质谱仪,美国 Thermo Scientific 公司。

龙菱2号茭白幼苗取自武汉市农业科学院。土壤取自华中农业大学油菜基地0~20 cm 表层土。土壤理化性质:pH 6.09、有机质 14.52 g/kg、速效钾、速效磷、碱解氮分别为 201.41、50.57、34.06 mg/kg<sup>[10]</sup>。

丙酮和DBP均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司;DAP、BBP、DIBP和DEHP均为分析纯,购自上海麦克林生化科技有限公司;甲醇和乙腈均为HPLC级别,购自霍尼韦尔(中国)有限公司;甲酸为HPLC级别,购自美国Sigma-Aldrich公司;2-丙醇为HPLC级别,购自默克化工技术(上海)有限公司;2-氯-L-苯丙氨酸( $\geq 98\%$ )购自上海泰坦科技股份有限公司。

### 1.2 试验设计

设置对照(Control)、丙酮处理(T0)、低质量分数PAEs(T1)、中质量分数PAEs(T2)和高质量分数PAEs(T3)5个试验组,每组设置4个重复,共20个陶缸。陶缸规格为外口径45 cm、高30 cm。于2022年7月20日,将采集到的土壤除去残留的植物根系和石块等杂质后填入陶缸中,每缸加土32 kg(高约20 cm)并加水浸泡。于2022年7月22日,选择长势相近、大小高度一致的茭白苗分墩定植,每缸栽植1小墩。

待茭白苗存活、长势稳定后,于2022年10月1日施药。Control组不做任何添加,T0组为丙酮对照组,T1、T2和T3组均以15 mL丙酮作为助溶剂,每种PAE添加量分别为25 mg(T1组)、500 mg(T2组)和10 000 mg(T3组)。T1组沉积物加标量为0.78 mg/kg,该含量与土壤环境质量控制标准吻合<sup>[11]</sup>。预试验表明,该施加量在茭白组织中可检出PAEs。鉴于PAEs在环境中普遍存在,未设置低于该含量的处理组。T2、T3组加标量分别为T1组的20倍和400倍,旨在探究不同含量梯度PAEs在茭白体内的迁移规律及其对植株生长与品质形成的影响。为防止下雨影响缸中PAEs含量,搭建了遮雨大棚,大棚通风透气,仅在下雨时使用。在种植过程中,每缸施用复合肥2次,每次10 g。浇水次数依天气而定,保持水深3~7 cm。对茭白幼苗、溶剂、复合肥、空白土壤、水中PAEs进行了检测,其背景含量(表1)与施加量相比可忽略不计。

表1 不同基质中PAEs的背景含量和每个缸中的总质量

Table 1 Background concentrations of PAEs in different sources and the total amount in each tank

分析物 Analyte	土壤/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) Soil	自来水/( $\mu\text{g}/\text{L}$ ) Tap water	肥料/( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) Fertilizer	幼苗/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) Seedling	单缸中总质量/ $\mu\text{g}$ Total amount in each tank
DAP	ND	ND	0.60	ND	12.00
DIBP	ND	2.68	ND	ND	1 608.00
DBP	ND	1.37	ND	ND	822.00
BBP	ND	0.60	0.49	ND	369.80
DEHP	13.12	ND	0.80	11.67	552.54

注 Note:ND,未检出 No detected.

### 1.3 样品采集和处理

于2022年11月2日采收各组中成熟度和大小较为接近的茭白肉质茎,用超纯水洗净后剥去叶鞘,用滤纸吸干水分,去除基部苔管部分,对肉质茎硬度、白度、水分、可溶性固形物、维生素C、粗纤维、总灰分、还原糖、可滴定酸、可溶性蛋白、游离氨基酸、黄

酮与总酚进行测定<sup>[9]</sup>。

选取Control组、T0组、T2组和T3组新鲜样品剪切成边长为1~2 mm的小块,在液氮中研磨后储存于-80℃以便代谢物的提取。所有组设置6个平行处理。

准确称取(50 $\pm$ 5) mg样品至2 mL离心管,加入

1 颗直径 6 mm 的研磨珠和 400  $\mu\text{L}$  提取液 ( $V_{\text{甲醇}}:V_{\text{水}}=4:1$ ), 提取液含 0.02 mg/mL *L*-2-氯苯丙氨酸内标。用冷冻组织研磨仪研磨 6 min ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、50 Hz) 后, 在超声下提取 30 min ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、40 kHz)。将样品在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  静置 30 min, 再离心 15 min (13 000 r/min、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 最后移取上清液至带内插管的进样小瓶中上机分析。另外, 从每个样本中分别移取 20  $\mu\text{L}$  上清液, 混合后作为质控样本。

#### 1.4 LC-MS 检测条件

UHPLC-Q Exactive 系统色谱柱为 ACQUITY UPLC HSS T3 (100 mm  $\times$  2.1 mm i.d., 1.8  $\mu\text{m}$ ; Waters, Milford, USA); 流动相 A 为 95% 水 + 5% 乙腈 (含 0.1% 甲酸), 流动相 B 为 47.5% 乙腈 + 47.5% 异丙醇 + 5% 水 (含 0.1% 甲酸); 流速为 0.40 mL/min, 进样量为 2  $\mu\text{L}$ , 柱温为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。洗脱梯度见表 2。样品经电喷雾电离, 分别采用正、负离子扫描模式采集质谱信号。具体质谱参数见表 3。

表 2 液相色谱流动相洗脱梯度条件

Table 2 Elution conditions for liquid chromatography

时间/min Time	流速/(mL/min) Flow rate	A/%	B/%
0	0.4	100	0
0.1	0.4	95	5
2	0.4	75	25
9	0.4	0	100
13	0.4	0	100
13.1	0.4	100	0
16	0.4	100	0

表 3 质谱参数

Table 3 The parameters for mass spectrometry

描述 Description	参数 Parameter
扫描范围 ( $m/z$ ) Scanning range	70~1 050
鞘气流速/arb Sheath gas flow rate	40
辅助气流速/arb Auxiliary air flow velocity	10
加热温度/ $^{\circ}\text{C}$ Heating temperature	400
毛细管温度/ $^{\circ}\text{C}$ Capillary temperature	320
喷雾电压(正模式)/V Spray voltage (positive mode)	3 500
喷雾电压(负模式)/V Spray voltage (negative mode)	-2 800
Lens 电压/V Lens voltage	50
碰撞能/eV Collision energy	20, 40, 60
分辨率(Full MS) Resolution	70 000
分辨率/ $\text{MS}^2$ Resolution	17 500

#### 1.5 质控

质控 (quality control, QC) 样本由所有样本提取液等体积混合制备而成, 用于分析样本相同的方法处理和检测, 每个 QC 体积与样本相同。在仪器分析

的过程中, 每 5~15 个分析样本中插入 1 个 QC 样本, 以考察整个检测过程的稳定性。

#### 1.6 数据预处理和搜库

LC-MS 原始数据导入代谢组学处理软件 Progenesis QI (Waters Corporation, Milford, USA) 进行基线过滤、峰识别、积分、保留时间校正和峰对齐等处理, 最终得到 1 个保留时间、质荷比和峰强度的数据矩阵。数据矩阵用 80% 规则去除缺失值, 即保留至少 1 组样品中非零值 80% 以上的变量, 再用原始矩阵中最小值填补空缺值。为减小样品制备和仪器不稳定带来的误差, 用总和归一化法对样本质谱峰的响应强度进行归一化, 同时删除 QC 样本  $\text{RSD} > 30\%$  的变量, 并进行  $\log_{10}$  对数化处理, 得到最终用于后续分析的数据矩阵。将 MS 质谱信息与京都基因与基因组百科全书数据库 (Kyoto Encyclopedia of Genes and Enoemes, KEGG) 匹配, 得到代谢物信息。非靶向代谢组学检测过程中: 所有生物学重复样本的总离子流色谱图重叠率  $> 85\%$ , 特征峰保留时间偏差  $< 0.1\text{ min}$ , 主要代谢物峰面积的相对标准偏差 ( $\text{RSD}$ )  $< 20\%$ ; QC 样本的总离子流色谱图叠加图显示峰形一致、信号稳定 ( $\text{RSD} < 15\%$ ), 表明仪器检测稳定性良好, 样本前处理及数据采集过程的重现性符合非靶向代谢组学分析要求。

#### 1.7 差异代谢物分析

预处理后的数据上传美吉生物云平台上进行数据分析, 包括主成分分析 (principal component analysis, PCA)、偏最小二乘法判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)、一般变量权重值 (variable importance in projection, VIP)、单维  $t$ -test、变化倍数 (fold change, FC)、变异系数、单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和代谢通路分析。以  $\text{VIP} > 1$ 、 $\text{FC} > 1$  或  $< 0.5$ 、 $P < 0.05$  作为差异代谢物筛选阈值。代谢通路的注释基于 KEGG 数据库 ([www.genome.jp/kegg/ligand.html](http://www.genome.jp/kegg/ligand.html))。

## 2 结果与分析

### 2.1 PAEs 胁迫下肉质茎营养品质变化

表 4 为不同质量分数 PAEs 及丙酮胁迫对肉质茎营养品质的影响。T0、T1、T2 和 T3 组硬度均高于 Control 组, 但组间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 表明丙酮及不同质量分数 PAEs 胁迫对茭白肉质茎硬度影响不显著, 肉质茎的机械强度对外源胁迫具有一定耐受性。随 PAEs 施加质量分数升高, 肉质茎白度逐渐

降低。T3组白度显著低于Control组( $P<0.05$ ),说明高质量分数PAEs胁迫显著降低茭白肉质茎白度,进而影响其外观品质。T2组总灰分和水溶性灰分均显著高于其他组,T3组则显著降低( $P<0.05$ ),说明中质量分数PAEs胁迫促进灰分吸收或积累,使肉质茎中矿物质含量增加,而PAEs质量分数过高时,这

种现象受到抑制。

与Control组相比,T0、T1和T2组水分含量显著降低( $P<0.05$ ),T0和T3组粗纤维含量分别增加了7.69%和46.15%,表明丙酮和高质量分数PAEs胁迫显著增加茭白肉质茎粗纤维含量,可能导致肉质茎嫩度降低<sup>[12]</sup>。

表4 PAEs和丙酮胁迫对肉质茎营养品质的影响

Table 4 Effects of PAEs and acetone stress on nutritional quality of succulent stems

指标 Index	Control	T0	T1	T2	T3
硬度/g Hardness	3 282.73±473.94a	3 520.03±234.40a	3 658.80±705.91a	3 701.54±634.68a	3 617.85±493.51a
白度 Whiteness	73.57±4.00a	69.85±4.02a	69.71±3.88a	68.92±3.70a	65.93±4.32b
粗纤维/(g/100 g) Crude fiber	0.39±0.01bc	0.42±0.02b	0.34±0.01c	0.37±0.01bc	0.57±0.01a
总灰分/(g/100 g) Total ash	0.60±0.01b	0.58±0.01c	0.64±0.00b	0.75±0.01a	0.53±0.01d
水溶性灰分/(g/100 g) Water-soluble ash	0.62±0.00b	0.52±0.01c	0.58±0.00b	0.67±0.01a	0.47±0.01d
水分含量/(g/100 g) Moisture content	89.98±0.19a	88.06±0.15d	88.51±0.16c	89.11±0.11b	89.63±0.15a
可溶性固形物/(g/100 g) Soluble solids	5.17±0.12c	5.33±0.05c	5.73±0.09b	8.53±0.05a	4.83±0.05d
可滴定酸/% Titratable acid	0.33±0.00a	0.31±0.00a	0.29±0.00b	0.24±0.00c	0.23±0.00c
还原糖/(mg/g) Reducing sugar	45.39±0.09d	61.13±0.81a	44.33±0.40d	53.48±0.30b	47.94±0.09c
维生素C/(mg/100 g) Vitamin C	4.69±0.23a	4.39±0.07a	3.56±0.13b	3.06±0.06c	2.34±0.17d
可溶性蛋白/(g/100 g) Soluble protein	0.10±0.02c	0.14±0.03c	0.41±0.05b	0.44±0.04b	0.51±0.02a
游离氨基酸/(μg/g) Free amino acids	235.09±0.94e	248.36±2.37d	259.29±0.55c	271.27±4.24b	289.06±3.54a
黄酮/(mg/g) Flavonoid	1.68±0.11a	0.95±0.03b	0.95±0.09b	0.93±0.03b	0.73±0.05c
总酚/(mg/g) Total phenols	0.24±0.01b	0.25±0.01b	0.30±0.01a	0.27±0.00b	0.22±0.01c

注:同一行内不同小写字母代表组间差异显著( $P<0.05$ )。Note: The different lowercase letters in the same row represent significant differences among the groups( $P<0.05$ ).

在试验质量分数范围内,随着丙酮和PAEs的施加,肉质茎可溶性固形物含量逐渐增加,T2组可溶性固形物与总灰分含量较T0组分别增加64.99%、25.00%,显著高于其他组,T3组显著降低( $P<0.05$ ),说明丙酮和适量质量分数的PAEs能够促进肉质茎甜度增加,而PAEs质量分数过高时,可能导致代谢崩溃进而使可溶性固形物显著降低<sup>[13]</sup>。相较于T0组,T1、T2和T3组还原糖含量下降了27.48%、12.51%和21.58%( $P<0.05$ ),可滴定酸含量分别下降6.45%、22.58%和25.80%( $P<0.05$ ),使肉质茎的固酸比(可溶性固形物与可滴定酸的比值)增加,说明低质量分数和中质量分数PAEs的施加改善了肉质茎的整体风味。

与Control组相比,T0、T1、T2和T3组维生素C含量分别降低了6.40%、24.09%、34.75%和50.11%( $P<0.05$ ),黄酮类化合物含量分别降低了43.45%、43.45%、44.64%和56.55%( $P<0.05$ ),酚类化合物含量呈现先增大后减小的趋势且在低质量分数PAEs胁迫时达到峰值,表明茭白肉质茎受到丙酮和

PAEs胁迫时,黄酮和维生素C作为抗氧化剂被大量消耗以消除自由基(reactive oxygen species, ROS),同时会通过提高体内多酚含量来消除或减缓由胁迫引发的氧化伤害,但高质量分数PAEs会对茭白产生不可逆损伤,导致抗氧化物质进一步减少<sup>[14]</sup>。

游离氨基酸和可溶性蛋白是蔬菜营养价值的重要组成部分,参与植物的生长发育、抗逆性等生理过程的调控<sup>[15]</sup>。与Control组相比,T0、T1、T2和T3组游离氨基酸含量分别增加5.64%、10.29%、15.39%和22.96%;可溶性蛋白分别增加40%、310%、340%和410%,说明丙酮和PAEs胁迫均会显著促进游离氨基酸和可溶性蛋白的积累,且PAEs质量分数越高,积累量越大,以维持正常的代谢,从而起到自我保护的作用<sup>[16]</sup>。

结果表明,低质量分数PAEs胁迫使可滴定酸与还原糖含量下降,固酸比增加,改善肉质茎整体风味;游离氨基酸和可溶性蛋白含量显著提升,营养价值增强。中质量分数PAEs胁迫使矿物质和可溶性固形物含量最高,肉质茎风味最好;游离氨基酸和可

溶性蛋白含量持续提升。高质量分数PAEs胁迫超出肉质茎耐受阈值,导致代谢紊乱,使白度、矿物质、可溶性蛋白、可滴定酸、维生素C、黄酮含量显著下降,食用品质与抗氧化品质显著恶化,但应激性蛋白与氨基酸积累量达到峰值以维持基本代谢。

## 2.2 样本比较分析

采用无监督PCA方法观察样本间的总体分布趋势。结果如图1所示,第1主成分(PC1)和第2主成分(PC2)的贡献率分别为22.40%和16.90%。每组中平行样品的测量值都投射在同一个区域,表明组内变异度较低,证明了组内样品的重现性和可靠性。所有组都与Control组显著分离,说明PAEs和丙酮胁迫均显著影响了茭白代谢。QC样本在较小区域内显示出强聚类性,表明仪器具有较高的稳定性和重现性。

## 2.3 代谢物注释信息

将鉴定到的689个代谢产物与和人类代谢组数据库(human metabolome database, HMDB)进行比对,有526个化合物被注释到12个类别(图2)。185个化合物被注释到脂质和类脂分子类,92个化合物被注释到有机酸及其衍生物类,81个被注释

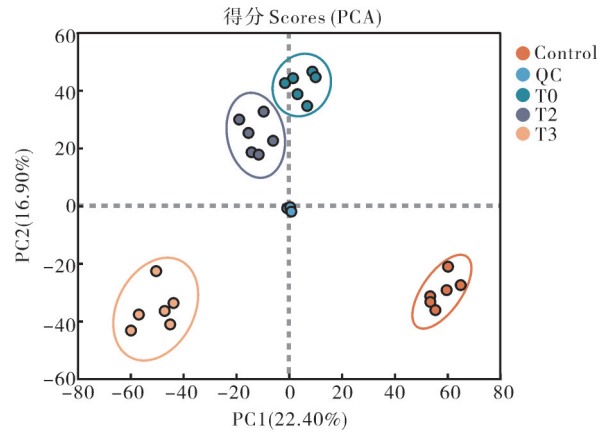


图1 4组样品和QC的PCA得分散点图  
Fig.1 PCA score plot for the 4 groups of samples and QC samples

到有机杂环化合物类,62个被注释到含氧有机化合物,38个被注释到苯环型化合物,26个被注释到苯丙类和聚酮类,19个被注释到核苷、核苷酸和类似物,14个被注释到有机氮化合物,4个被注释到碳氢化合物类,3个被注释到生物碱及其衍生物,1个被注释到均相非金属化合物,1个被注释到有机硫化物。

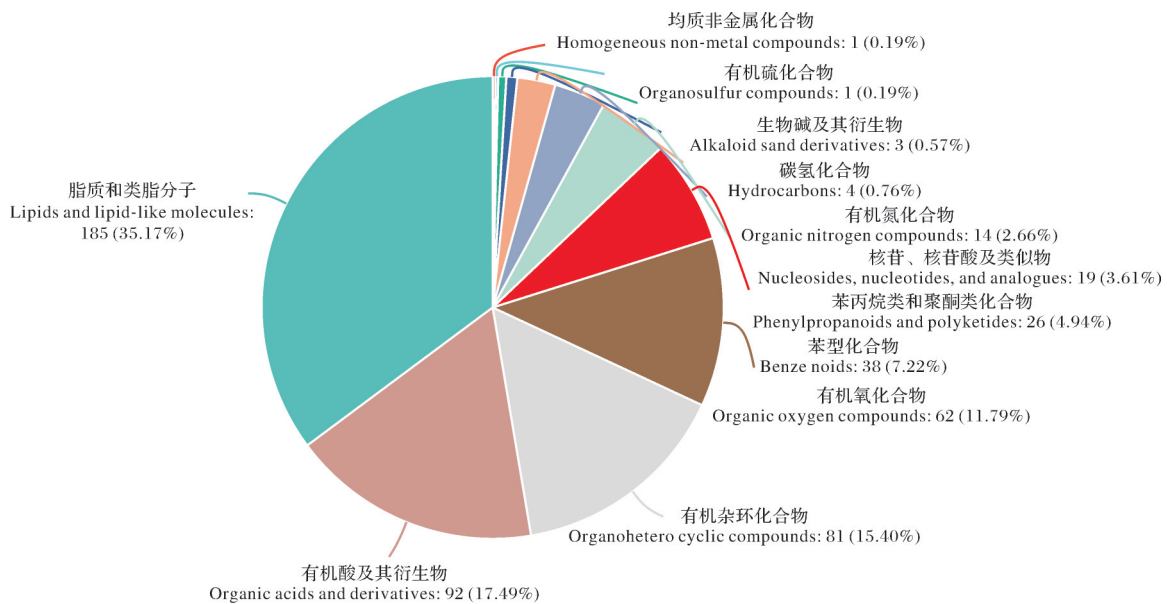


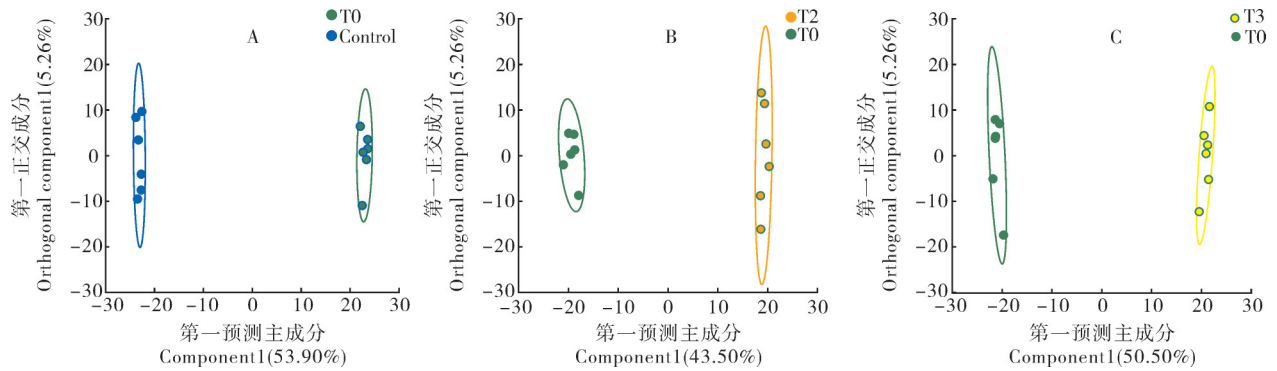
图2 HMDB化合物分类

Fig.2 The classification of metabolites compared with HMDB database

## 2.4 正交偏最小二乘法判别分析

由图3可知, T0 vs Control, T2 vs T0和 T3 vs T0这三个对比组有很好的区分效果。在OPLS-DA模型中,  $R^2_Y$ 表示所建模型对Y矩阵的解释率,  $Q^2$ 表示模型的预测能力,这两个指标越接近于1时表示模型越稳定可靠,越能更好地解释2组差异<sup>[17]</sup>。所有

成对比较结果显示  $R^2_Y$ 值均大于0.997且  $Q^2$ 值均大于0.951,表示该模型是可靠的且能解释样本间的代谢差异。为验证OPLS-DA模型是否存在过拟合现象,通过随机改变分类变量Y的排列顺序,置换检验200次以获取随机模型的  $R^2$ 和  $Q^2$ 值(图4),结果表明模型可靠,不存在过拟合现象。



A: T0 vs Control; B: T2 vs T0; C: T3 vs T0.

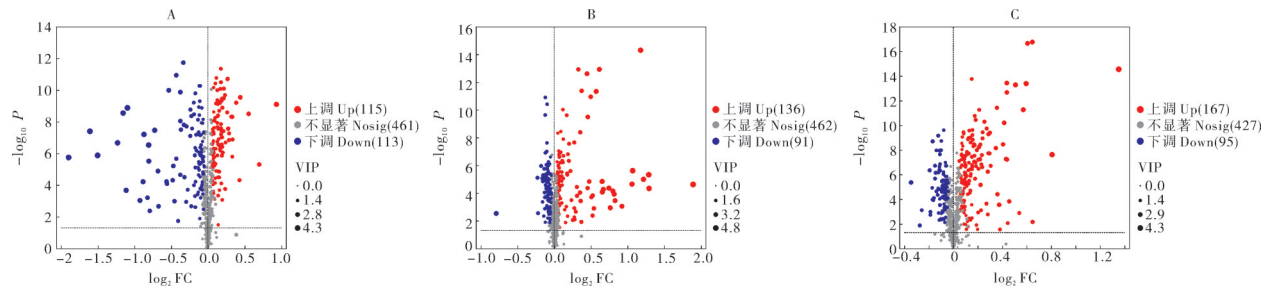
图3 成对比较的OPLS-DA得分散点图

Fig.3 Pairwise comparison OPLS-DA score scatter plots

## 2.5 差异代谢物的筛选和鉴定

为了进一步阐明不同质量分数PAEs及丙酮胁迫对茭白代谢物的影响,对T0 vs Control、T2 vs T0和T3 vs T0各组中的部分代谢物进行筛选。从图4可以看出,T0 vs Control组中鉴定到的有名称的差异代谢物数量为228,包括115个上调和113个下调;T2 vs T0组中鉴定到的有名称的差异代谢物数量为

227,包括136个上调和91个下调;T3 vs T0组中鉴定到的有名称的差异代谢物数量为267,包括139个上调和128个下调。在3个处理组中,上调代谢物数量均大于下调代谢物数量,表明PAEs和丙酮胁迫能激活茭白的部分关键生理代谢活动。结合T2 vs T0和T3 vs T0组可以发现,差异代谢物数量与PAEs质量分数之间呈现出正向剂量效应关系。



A: T0 vs Control; B: T2 vs T0; C: T3 vs T0.

图4 混合离子模式下成对比较的差异代谢产物火山图

Fig.4 Volcanic diagrams of differential metabolites obtained from paired comparison in the mixed ion mode

## 2.6 差异代谢物的变化及分析

表5为不同对比组中主要差异代谢物的变化。数据表明,在PAEs和丙酮的胁迫下,肉质茎中氨基酸含量整体呈现上调的趋势,与前文中的结果一致,核苷酸类代谢物含量整体呈现下调趋势。

与Control组相比,T0组中L-天冬氨酸上调了1.10倍,表明L-天冬氨酸积累与氧化应激密切相关<sup>[17]</sup>。T0组中 $\beta$ -丙氨酸相较Control组上调了1.1311倍,T3组中 $\beta$ -丙氨酸相较T0组上调了1.06倍,表明 $\beta$ -丙氨酸对PAEs和丙酮引起的氧化应激起到重要调节作用,有研究报道了类似结果<sup>[18-19]</sup>。谷氨酰胺是参与植物从土壤中吸收和固定无机氮的主要代谢产物之一<sup>[20]</sup>,T0组中L-谷氨酰胺与Control组相比下调了0.94倍,T2组中L-谷氨酰胺与T0组

相比下调了0.97倍,而高质量分数PAEs胁迫时L-谷氨酰胺无显著变化,表明丙酮和中质量分数PAEs胁迫会干扰茭白肉质茎吸收无机氮的过程。与T0组相比,T3组中L-色氨酸和L-酪氨酸分别上调了1.07和1.10倍。酪氨酸是莽草酸途径的重要前体<sup>[21]</sup>,该途径能产生大量抗氧化剂以清除ROS。色氨酸是谷胱甘肽生物合成的中间体,谷胱甘肽是抵抗植物体内ROS积累的重要代谢产物<sup>[22-23]</sup>。有研究报道,色氨酸和酪氨酸是植物生物碱和萜类物质合成的前体物质,在植物受到胁迫时会显著增加<sup>[24]</sup>,因此茭白体内酪氨酸和色氨酸含量的上调促进了抗氧化防御。

本研究中,T0、T2和T3组核苷酸类代谢物均显著下调,表明受到PAEs和丙酮胁迫后,核苷酸类化合物的代谢途径遭到了破坏。在T0 vs Control组

中,1-十六酰-sn-丙三醇-磷酸胆碱上调了1.10倍以增强植物对丙酮胁迫的适应能力。在T3 vs T0组中,亚油酸上调了1.04倍,提升脂质代谢水平,维护细胞膜正常功能,促进体内信号转导,增强抗逆性以适应外界胁迫<sup>[25-26]</sup>。

由表5可知,T0 vs Control组蔗糖和麦芽三糖分

别上调了1.18和1.158倍,可能是茭白需要更多的能量以耐受丙酮胁迫产生的不利影响并发挥渗透调节作用。与T0组相比,T3组中麦芽三糖下调了0.89倍,说明高质量分数PAEs抑制了糖类的产生<sup>[27]</sup>。

前文研究结果表明,丙酮胁迫下的茭白可溶性固形物含量增加,高质量分数PAEs会抑制其含量,与代

表5 不同对比组别中主要差异代谢物的变化

Table 5 Changes of the major differential metabolites in different contrast groups

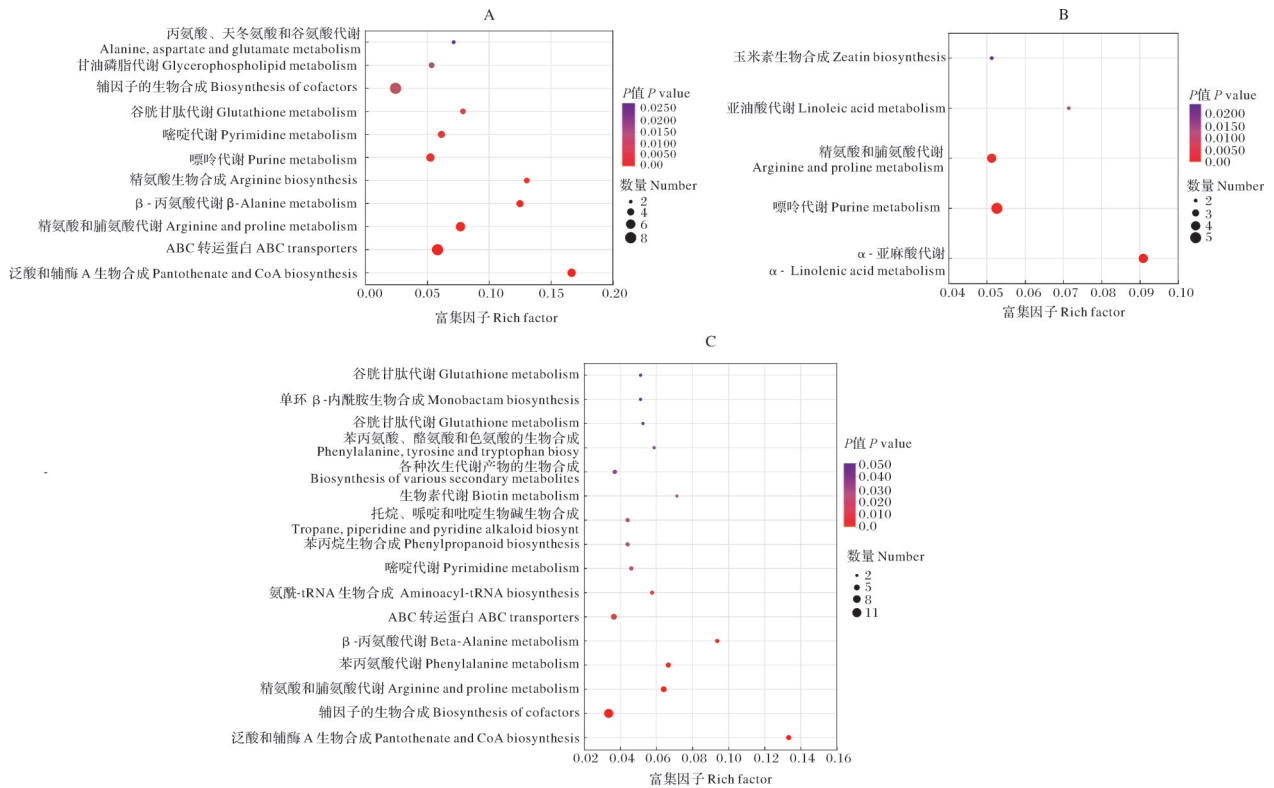
类别 Category	组别 Group	代谢产物 Metabolite	VIP	FC	P
氨基酸类 Amino acids	T0 vs Control	L-天冬氨酸 L-Aspartic acid	1.585 8	1.101 0	0.000 0
		$\beta$ -丙氨酸 $\beta$ -Alanine	1.732 7	1.131 1	0.000 0
		L-谷氨酰胺 L-Glutamine	1.348 6	0.943 1	0.000 0
	T2 vs T0	L-谷氨酰胺 L-Lysine	1.032 7	0.973 2	0.000 1
		L-赖氨酸 L-Lysine	1.298 7	1.050 7	0.000 0
		$\beta$ -丙氨酸 $\beta$ -Alanine	1.282 5	1.056 1	0.000 0
	T3 vs T0	L-色氨酸 L-Tryptophan	1.363 3	1.066 8	0.000 0
		L-酪氨酸 L-Tyrosine	1.595 7	1.099 9	0.000 0
		胞苷 Cytidine	1.564 8	0.921 2	0.000 0
核苷酸类 Nucleotides	T0 vs Control	胞嘧啶 Cytosine	1.144 5	0.957 0	0.000 0
		次黄嘌呤 Hypoxanthine	1.593 4	0.894 4	0.000 0
		腺苷 Adenosine	1.025 0	0.961 6	0.000 0
	T2 vs T0	鸟嘌呤 Guanine	1.009 5	0.954 7	0.000 0
		鸟苷 Guanosine	1.074 1	0.960 9	0.000 0
		鸟苷酸 Guanylic acid	1.460 0	0.946 4	0.000 0
	T3 vs T0	环磷腺苷 Cyclic adenosine monophosphate	1.966 8	0.883 6	0.000 0
		腺嘌呤 Adenine	1.315 2	1.040 9	0.000 0
		胞苷 Cytidine	1.342 4	0.939 9	0.000 9
脂类 Lipids	T0 vs Control	尿苷 2',3'-环磷酸 Uridine 2',3'-cyclic phosphate	1.140 2	0.954 1	0.000 4
		磷脂酰胆碱(16:0/0:0) Phosphatidylcholine	1.688 5	1.099 7	0.000 0
		亚油酸 Linoleic acid	1.124 7	1.039 7	0.010 1
糖类 Carbohydrates	T0 vs Control	蔗糖 Sucrose	1.905 0	1.176 6	0.000 2
		麦芽三糖 Maltotriose	1.908 2	1.150 1	0.000 0
		麦芽三糖 Maltotriose	1.677 9	0.892 9	0.000 1
有机酸类 Organic acids	T3 vs T0	柠檬酸 Citric acid	1.391 6	0.864 6	0.000 0
		泛酸 Pantothenic acid	1.062 3	1.040 7	0.000 0
		烟酰胺 Nicotinamide	1.242 7	0.953 1	0.000 0
维生素类 Vitamins	T0 vs Control	吡哆醛 Pyridoxal	1.693 6	0.901 8	0.000 0
		泛酸 Pantothenic acid	1.044 7	1.032 9	0.000 1
		D-泛酸 D-Pantothenic acid	1.283 1	1.070 0	0.000 0
苯丙素类 Phenylpropanoids	T3 vs T0	莽草酸 Shikimic acid	1.415 8	1.091 2	0.000 0
		芥子醇 Sinapyl alcohol	1.085 1	1.048 3	0.004 4
		反式肉桂酸 trans-Cinnamic acid	1.660 5	1.064 9	0.000 0
黄酮类 Flavonoids	T0 vs Control	间羟基肉桂酸 m-Hydroxycinnamic acid	1.837 4	1.181 2	0.000 0
		柚皮素 Naringenin	4.118 5	2.323 7	0.000 0
		芹菜素 Apigenin	2.385 0	0.728 6	0.001 0
	T2 vs T0	柚皮素 Naringenin	4.260 6	0.327 9	0.000 0
	T3 vs T0	柚皮素 Naringenin	2.751 6	0.625 5	0.000 3

谢组学结果一致。柠檬酸参与细胞能量代谢,是三羧酸循环中的重要中间产物<sup>[28]</sup>。与T0组相比,T3组中柠檬酸含量下调了86%,表明高质量分数PAEs抑制了茭白体内的三羧酸循环。T0 vs Control组中泛酸含量上调了1.04倍,T3 vs T0组中泛酸和D-泛酸分别上调了1.03和1.07倍,表明高质量分数PAEs和丙酮胁迫促进了泛酸积累以抵御胁迫导致的机体内自由基过量蓄积<sup>[29]</sup>。相反,高质量分数PAEs暴露使得烟酰胺和吡哆醛含量减少。

在高质量分数PAEs和丙酮胁迫下,茭白中苯丙素类代谢物水平上调,苯丙烷代谢被激活以抵抗ROS伤害<sup>[30]</sup>。非生物胁迫产生的ROS可能与木质素反应生成信号分子,引发植物防御反应。高质量分数PAEs胁迫使得木质素前体物质芥子醇的水平上升,这与关于非生物胁迫会使木素前体物升高的理论相吻合<sup>[31]</sup>。黄酮类化合物是植物次生代谢中防御外源胁迫的重要物质。研究发现,PAEs胁迫使黄酮类下调,与前文营养品质分析中结果一致。

### 2.7 显著差异代谢通路分析

对显著差异代谢物进行KEGG注释后,进一步开展富集分析,以确定显著差异代谢途径。如图5所示,在T0 vs Control中,51个差异代谢物中有9个被注释到13个代谢通路中,其中发生显著变化的代谢通路分别为:精氨酸和脯氨酸代谢,谷胱甘肽代谢,托烷、哌啶和吡啶生物碱的生物合成以及泛酸和辅酶A生物合成。命中这4条代谢通路的差异代谢物有5个,其中3个参与多条代谢通路,表明这3个差异代谢物处于多条通路的交集。在T2 vs T0中,42个差异代谢物中只有1个被注释到1个发生显著变化的代谢通路中:精氨酸和脯氨酸代谢。在T3 vs T0中,45个差异代谢物中有8个被注释到9个代谢通路中,其中发生显著变化的代谢通路为:谷胱甘肽代谢,精氨酸和脯氨酸代谢,托烷、哌啶和吡啶生物碱的生物合成,泛酸和辅酶A生物合成以及β-丙氨酸代谢。



A: T0 vs Control; B: T2 vs T0; C: T3 vs T0.

图5 成对比较的显著改变代谢通路富集图

Fig.5 The plot of significantly changed metabolism pathway enrichment for groups obtained from paired comparison

T3组中受影响的代谢通路最多,T2 vs T0组中的代谢通路最少,说明高质量分数PAEs胁迫对茭白代谢的影响最大,中质量分数PAEs和丙酮胁迫对茭

白代谢影响差别不大。高质量分数PAEs和丙酮胁迫均可以通过调控精氨酸和脯氨酸代谢,谷胱甘肽代谢,托烷、哌啶和吡啶生物碱的生物合成以及泛酸

和辅酶A生物合成来影响茭白肉质茎的代谢。另外,高质量分数PAEs胁迫还会影响β-丙氨酸代谢。

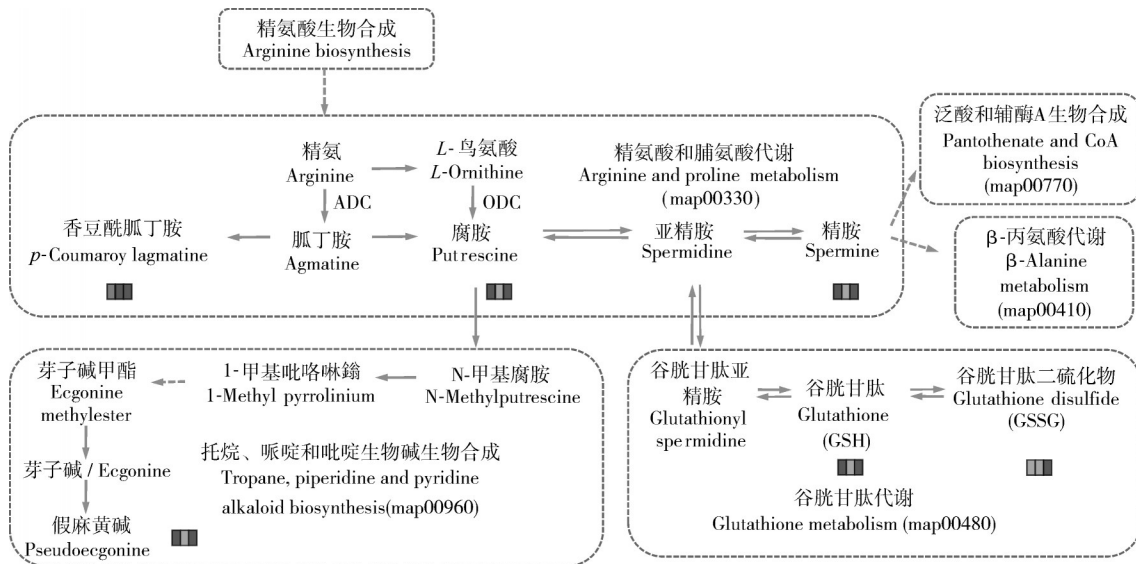
表6为注释到代谢通路的差异代谢物信息。将分布在不同代谢途径上的代谢物构建相互作用网络,推测出茭白受胁迫的主要代谢途径,如图6所示。多胺有2个以L-精氨酸为起始的合成途径。本试验中,高质量分数PAEs或丙酮胁迫主要通过提高精氨

酸脱羧酶和鸟氨酸脱羧酶活性或者降低多胺氧化酶和二胺氧化酶活性来增加腐胺和精胺的含量<sup>[32]</sup>。有研究表明精胺的氨基化程度最高,清除ROS的能力大于亚精胺<sup>[33-34]</sup>。本试验结果表明,高质量分数PAEs或丙酮胁迫并未提高亚精胺含量,可能是茭白更倾向于提高腐胺和精胺来预防体内的氧化伤害。

表6 注释到代谢通路的代谢产物信息

Table 6 Metabolite information annotated to the metabolic pathways

组别 Group	代谢产物 Metabolite	VIP	FC	P	参与代谢通路的ID ID of metabolic pathway
T0 vs Control	腐胺 Putrescine	2.458 2	1.577 2	0.004 2	map00330, map00480, map00960
	精胺 Spermine	2.207 0	1.270 0	0.000 0	map00330, map00480, map00770
	假蜕皮素 Ecdysone	1.760 6	1.258 1	0.000 0	map00960
	4-羟基肉桂酰丁胺 4-Hydroxycinnamoyl butylamine	3.349 2	0.461 6	0.000 2	map00330
	谷胱甘肽 Glutathione	3.429 9	1.258 5	0.000 0	map00480
T2 vs T0	4-羟基肉桂酰丁胺 4-Hydroxycinnamoyl butylamine	3.478 6	1.895 2	0.000 9	map00330
	腐胺 Putrescine	1.713 7	1.697 0	0.044 4	map00330, map00480, map00960
	氧化型谷胱甘肽 Oxidized glutathione	2.566 1	1.200 0	0.000 0	map00480
T3 vs T0	精胺 Spermine	2.626 6	1.344 1	0.000 0	map00330, map00480, map00770, map00410
	假蜕皮素 Ecdysone	2.439 2	1.380 0	0.000 0	map00960
	4-羟基肉桂酰丁胺 4-Hydroxycinnamoyl butylamine	2.150 6	1.718 7	0.012 4	map00330
	谷胱甘肽 Glutathione	2.566 1	1.400 0	0.000 0	map00480



物质下方的3个框从左到右分别表示T0 vs Control、T2 vs T0和T3 vs T0中物质的变化情况,红色表示上调,绿色表示下调,灰色表示无显著变化。The three boxes below the substance represent the changes of the substance in T0 vs Control, T2 vs T0, and T3 vs T0 from left to right. Red indicates upregulation, green indicates downregulation, and gray indicates no significant change.

图6 茭白受PAEs或丙酮胁迫的主要代谢途径

Fig.6 The main metabolic pathways of *Zizania latifolia* under the stress of PAEs or acetone

本研究中,4-羟基肉桂酰丁胺的前体物质是腐胺和苯丙烷代谢产物对香豆酰辅酶A。PAEs胁迫能够促使茭白中4-羟基肉桂酰丁胺大量积累,以缓解胁迫

对植物造成的伤害。高质量分数PAEs或丙酮胁迫使茭白体内的谷胱甘肽含量明显升高,这表明茭白处于氧化应激状态,体内的抗氧化系统被启动。

### 3 讨论

本研究通过盆栽试验结合非靶向代谢组学技术,系统解析了5种PAEs(DAP、DBP、DIBP、BBP、DEHP)及丙酮胁迫对茭白肉质茎营养品质及代谢网络的调控机制。肉质茎中营养品质指标与PAEs胁迫质量分数呈现质量分数效应,其中水分、可溶性蛋白和游离氨基酸含量随PAEs质量分数增加而增加,白度、可滴定酸、维生素C和黄酮等指标随PAEs胁迫质量分数增加而降低,而硬度、总灰分、水溶性灰分、可溶性固形物、总酚等含量随PAEs质量分数增加呈现“低促中优高抑制”的质量分数效应。

丙酮胁迫导致228种代谢物变化,其中氨基酸、脂类、糖类及苯丙素类物质显著积累,核苷酸类物质显著下调,影响了精氨酸和脯氨酸代谢,谷胱甘肽代谢,托烷、哌啶和吡啶生物碱的生物合成以及泛酸和辅酶A生物合成等4条代谢通路,说明丙酮干扰了细胞内的能量代谢和核酸合成,同时诱导植物启动渗透调节和抗氧化防御机制。

中质量分数PAEs诱导了227种代谢物变化,主要表现为氨基酸类下调和脂类上调,显著影响了精氨酸和脯氨酸代谢通路,反映了植物在中等质量分数PAEs胁迫下,优先分配资源用于细胞膜修复和信号转导,同时抑制氨基酸合成以减少能量消耗。

高质量分数PAEs引发267种代谢物变化,主要表现为氨基酸类和苯丙素类显著上调,核苷酸类、有机酸类和糖类显著下调,显著影响了谷胱甘肽代谢,精氨酸和脯氨酸代谢,托烷、哌啶和吡啶生物碱的生物合成,泛酸和辅酶A生物合成以及 $\beta$ -丙氨酸代谢等5条代谢通路,表明高质量分数PAEs对茭白代谢的干扰更为剧烈,茭白通过增强氨基酸合成和苯丙烷代谢来强化抗氧化防御,同时抑制能量代谢以应对胁迫。

本研究从代谢组学角度揭示了PAEs胁迫下茭白肉质茎的营养品质变化与代谢适应机制,发现其通过多通路协同调控应对氧化应激,可为水生蔬菜抗逆研究提供新视角。

#### 参考文献 References

[1] LI X X, WANG Q, JIANG N, et al. Occurrence, source, ecological risk, and mitigation of phthalates (PAEs) in agricultural soils and the environment: a review [J/OL]. *Environmental research*, 2023, 220: 115196 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115196>.

[2] XU Y L, SUN Y Q, LEI M, et al. Phthalates contamination in sediments: a review of sources, influencing factors, benthic toxicity, and removal strategies [J/OL]. *Environmental pollution*, 2024, 344: 123389 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123389>.

[3] LI Y, YAN H Q, LIU Q Y, et al. Accumulation and transport patterns of six phthalic acid esters (PAEs) in two leafy vegetables under hydroponic conditions [J/OL]. *Chemosphere*, 2020, 249: 126457 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126457>.

[4] YANG J T, WANG J F, LIAO X Y, et al. Chain modeling for the biogeochemical nexus of cadmium in soil-rice-human health system [J/OL]. *Environment international*, 2022, 167: 107424 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107424>.

[5] 陈学斌, 赵海明, 莫测辉, 等. 接种邻苯二甲酸酯(PAEs)降解菌缓解PAEs对玉米胁迫效应和机制研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 493-499. CHEN X B, ZHAO H M, MO C H, et al. Alleviation of phthalic acid ester (PAE) stress on maize by inoculating PAEs-degrading strain [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2017, 26(3): 493-499 (in Chinese with English abstract).

[6] PATEL M K, KUMAR M, LI W Q, et al. Enhancing salt tolerance of plants: from metabolic reprogramming to exogenous chemical treatments and molecular approaches [J/OL]. *Cells*, 2020, 9(11): 2492 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.3390/cells9112492>.

[7] LI X F, ZHANG Y, WANG J X, et al. Revealing the metabolomics and biometrics underlying phytotoxicity mechanisms for polystyrene nanoplastics and dibutyl phthalate in dandelion (*Taraxacum officinale*) [J/OL]. *Science of the total environment*, 2023, 905: 167071 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.167071>.

[8] WANG J, CHEN G, CHRISTIE P, et al. Occurrence and risk assessment of phthalate esters (PAEs) in vegetables and soils of suburban plastic film greenhouses [J]. *Science of the total environment*, 2015, 523: 129-137.

[9] SUN Y Y, CHEN J, ZHU L Z. Phthalate esters decreased nutritional value of rice grains *via* redirecting glycolytic carbon flow from grain quality formation toward antioxidative defense [J/OL]. *Journal of hazardous materials*, 2025, 488: 137358 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.137358>.

[10] ZHANG D, ZHOU K, LIU C Q, et al. Dissipation, uptake, translocation and accumulation of five phthalic acid esters in sediment-*Zizania latifolia* system [J/OL]. *Chemosphere*, 2023, 315: 137651 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137651>.

[11] WANG L J, LIU M M, TAO W D, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of phthalate esters in urban soil in the typical semi-arid city of Xi'an, Northwest China [J].

- Chemosphere, 2018, 191: 467-476.
- [12] CHENG Z P, YAO Y M, SUN H W. Comparative uptake, translocation and subcellular distribution of phthalate esters and their primary monoester metabolites in Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *Chinensis*) [J/OL]. Science of the total environment, 2020, 742: 140550 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140550>.
- [13] SINGH V, GUIZANI N, AL-ZAKWANI I, et al. Sensory texture of date fruits as a function of physicochemical properties and its use in date classification [J]. Acta alimentaria, 2015, 44 (1): 119-125.
- [14] 戚姝姝, 刘晓晨. 邻苯二甲酸二丁酯和邻苯二甲酸单丁酯对菠菜生长的毒性效应及累积特征数据集 [J]. 农业大数据学报, 2025, 7(1): 132-140. QI S S, LIU X C. Toxic effects and cumulative characteristics of dibutyl phthalate and monobutyl phthalate on spinach datasets [J]. Journal of agricultural big data, 2025, 7(1): 132-140 (in Chinese with English abstract).
- [15] 侯伶俐, 杨雄榜, 董雪妮, 等. 逆境胁迫对苦荞花期总黄酮含量及关键酶基因表达的影响 [J]. 核农学报, 2016, 30(1): 184-192. HOU L L, YANG X B, DONG X N, et al. Effect of environmental stresses on the contents of total flavonoids and corresponding gene expression in *Fagopyrum tataricum* during florescence [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2016, 30(1): 184-192 (in Chinese with English abstract).
- [16] DI MARTINO C, DELFINE S, PIZZUTO R, et al. Free amino acids and glycine betaine in leaf osmoregulation of spinach responding to increasing salt stress [J]. New phytologist, 2003, 158(3): 455-463.
- [17] LIANG L J, LI W B, TIAN M, et al. Metabolomic profiling of five hullless barley (*Hordeum vulgare* L.) with different [J]. Genetic resources and crop evolution, 2022, 69(5): 1843-1853.
- [18] FOUGÈRE F, LE RUDULIER D, STREETER J G. Effects of salt stress on amino acid, organic acid, and carbohydrate composition of roots, bacteroids, and cytosol of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Plant physiology, 1991, 96(4): 1228-1236.
- [19] HOCHBERG U, DEGU A, CRAMER G R, et al. Cultivar specific metabolic changes in grapevines berry skins in relation to deficit irrigation and hydraulic behavior [J]. Plant physiology and biochemistry, 2015, 88: 42-52.
- [20] QUAN X Y, QIAN Q F, YE Z L, et al. Metabolic analysis of two contrasting wild barley genotypes grown hydroponically reveals adaptive strategies in response to low nitrogen stress [J]. Journal of plant physiology, 2016, 206: 59-67.
- [21] DIAZ C, PURDY S, CHRIST A, et al. Characterization of markers to determine the extent and variability of leaf senescence in *Arabidopsis* a metabolic profiling approach [J]. Plant physiology, 2005, 138(2): 898-908.
- [22] CHEYNIER V, COMTE G, DAVIES K M, et al. Plant phenolics: recent advances on their biosynthesis, genetics, and eco-physiology [J]. Plant physiology and biochemistry, 2013, 72: 1-20.
- [23] GILL S S, ANJUM N A, HASANUZZAMAN M, et al. Glutathione and glutathione reductase: a boon in disguise for plant abiotic stress defense operations [J]. Plant physiology and biochemistry, 2013, 70: 204-212.
- [24] NIKOLANTONAKI M, JULIEN P, COELHO C, et al. Impact of glutathione on wines oxidative stability: a combined sensory and metabolomic study [J/OL]. Frontiers in chemistry, 2018, 6: 182 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00182>.
- [25] RUELLAND E, VALENTOVA O. Editorial: lipid signaling in plant development and responses to environmental stresses [J/OL]. Frontiers in plant science, 2016, 7: 324 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00324>.
- [26] UPCHURCH R G. Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress [J]. Biotechnology letters, 2008, 30(6): 967-977.
- [27] ZHANG H L, DU W C, PERALTA-VIDEA J R, et al. Metabolomics reveals how cucumber (*Cucumis sativus*) reprograms metabolites to cope with silver ions and silver nanoparticle-induced oxidative stress [J]. Environmental science & technology, 2018, 52(14): 8016-8026.
- [28] MA B, HE Y, CHEN H H, et al. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere: synthesis through meta-analysis [J]. Environmental pollution, 2010, 158 (3): 855-861.
- [29] HANSON A D, BEAUDOIN G A, MCCARTY D R, et al. Does abiotic stress cause functional B vitamin deficiency in plants [J]. Plant physiology, 2016, 172(4): 2082-2097.
- [30] ZHAO L Q, ZHANG Y W, WANG L, et al. Stereoselective metabolomic and lipidomic responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposing to chiral triazole fungicide tebuconazole [J/OL]. Food chemistry, 2022, 371: 131209 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131209>.
- [31] SHARMA A, SHAHZAD B, REHMAN A, et al. Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress [J/OL]. Molecules, 2019, 24 (13) : 2452 [2025-04-29]. <https://doi.org/10.3390/molecules24132452>.
- [32] CHATTOPADHAYAY M K, TIWARI B S, CHATTOPADHAYAY G, et al. Protective role of exogenous polyamines on salinity-stressed rice (*Oryza sativa*) plants [J]. Physiologia plantarum, 2002, 116(2): 192-199.
- [33] ROUSSOS P A, PONTIKIS C A. Changes of free, soluble conjugated and bound polyamine titers of jojoba explants under sodium chloride salinity *in vitro* [J]. Journal of plant physiology, 2007, 164(7): 895-903.
- [34] NOCTOR G, MHAMDI A, CHAOUCH S, et al. Glutathione in plants: an integrated overview [J]. Plant, cell & environment, 2012, 35(2): 454-484.

## Effects of phthalic acid esters on nutritional quality and mechanisms of metabolic response in succulent stems of *Zizania latifolia*

CHEN Shuyan<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>2</sup>, ZHONG Lan<sup>2,3</sup>, LI Xiujuan<sup>1</sup>

1. College of Food Science and Technology/Ministry of Education Key Laboratory of Environment Correlative Dietology/Hubei Province Key Laboratory of Fruit & Vegetable Processing & Quality Control, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Vegetable Research Institute, Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

3. Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China

**Abstract** The mechanisms of metabolic response in the succulent stems of *Zizania latifolia* under different concentrations of phthalic acid esters (PAEs) were systematically analyzed using ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry combined with untargeted metabolomics to study the mechanism underlying changes in nutritional quality of *Zizania latifolia* succulent stems under phthalate esters (PAEs) stress. The results showed that high concentrations of PAEs significantly increased the content of crude fiber (46.15%), soluble protein (410%), and free amino acids (22.96%) in the succulent stems, but decreased the whiteness, the content of vitamin C (50.11%), and the content of soluble solids. Medium concentrations of PAEs increased the content of total ash (16.67%) and water-soluble ash (11.48%) in the succulent stems, while the content of crude fiber and reducing sugars in the succulent stems were the lowest under low concentrations of PAEs. 689 differential metabolites were identified with untargeted metabolomics. Medium concentrations of PAEs induced changes in 227 metabolites, among which amino acids were down-regulated and lipids were up-regulated, significantly affecting the metabolic pathways of arginine and proline. High concentrations of PAEs triggered changes in 267 metabolites, leading to the up-regulation of amino acids and phenylpropanoids, and the down-regulation of nucleotides and organic acids. It will help to clarify the effects of PAEs pollution on the nutritional quality of crops, and provide a scientific basis for agricultural production and environmental protection to promote the sustainable development of agriculture and ensure food security.

**Keywords** *Zizania latifolia*; phthalic acid esters (PAEs); nutritional quality; untargeted metabolomics; response to stress

(责任编辑:陆文昌)