

# 白木香 *AsABCG1* 基因的克隆与表达分析

刘月阳<sup>1,2#</sup>, 郭冬<sup>2,3</sup>, 王颖<sup>2,3</sup>, 吴文丽<sup>2,3</sup>, 李玉姬<sup>2</sup>, 徐诗涛<sup>1\*</sup>, 朱家红<sup>2,3\*</sup>

(1. 海南大学热带农林学院, 海南 儋州 571737 中国; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所/海南省黎药资源天然产物研究与利用重点实验室, 海南 海口 571101 中国; 3. 中国热带农业科学院三亚研究院, 海南 三亚 572000 中国)

**摘要:** 沉香是一种传统的名贵药材与天然香料, 因蕴藏丰富的次生代谢产物而极具价值。ABC 转运蛋白是一类广泛分布于生物体的跨膜蛋白, 在植物次生代谢产物的运输与积累中起着关键作用。为探究 ABC 转运蛋白在沉香次生代谢物转运过程中的功能, 通过分析白木香 (*Aquilaria sinensis*) 转录组数据, 鉴定出一个编码 ABC 转运蛋白的基因 *AsABCG1*, 该基因编码区全长为 1 986 bp, 编码一个由 661 个氨基酸组成的蛋白, *AsABCG1* 具有典型的植物 ABC 转运蛋白结构特征, 包含两个保守结构域 MotifA 和 MotifB。 *AsABCG1* 启动子区含有茉莉酸、生长素、赤霉素、脱落酸等多种激素响应元件及厌氧诱导、机械损伤等胁迫响应元件。实时荧光定量 PCR (RT-qPCR) 分析表明, 茉莉酸甲酯和机械伤害处理均能够显著诱导白木香茎干中 *AsABCG1* 的表达。本研究为后续阐明 *AsABCG1* 基因在白木香防御胁迫响应和次生代谢物积累中的功能奠定了基础。

**关键词:** 白木香; ABC 转运蛋白; *AsABCG1*; 表达分析; 次生代谢物

中图分类号: Q78;S667.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7054(2026)03-0422-09

刘月阳, 郭冬, 王颖, 等. 白木香 *AsABCG1* 基因的克隆与表达分析[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(3): 422–430. DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.20250126 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdsxb.20250126



沉香是沉香属 (*Aquilaria*) 或拟沉香属 (*Gyrinops*) 植物茎干在受到损伤后, 分泌树脂并逐渐形成的树脂化木材, 具有极高的药用价值, 被誉为“药中黄金”和“众香之首”, 在传统药物、香水、化妆品、熏香和精油中均具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。研究表明, 沉香中富含倍半萜、色酮类和芳香族类等多种次生代谢物, 其中 2-(2-苯乙基)色酮和倍半萜是其特征成分和主要药理活性成分<sup>[2-3]</sup>。沉香提取物中具有多种生物活性, 包括神经活性、细胞毒性、抗菌、抗炎、和抗氧化活性等<sup>[4-6]</sup>。白木香 (*Aquilaria sinensis*) 是中国本土所产沉香的唯一来源植物<sup>[7]</sup>, 主要分布在中国华南地区<sup>[8]</sup>。白木香只有遭受自然因素 (雷击、虫噬、真菌感染等) 或人为因素 (砍伤、钻孔、打钉等) 胁迫后才会产生沉香<sup>[9]</sup>。在受到外界胁迫时, 白木香会启动防御反应系统,

激活倍半萜和色酮等次生代谢途径并合成相关代谢产物<sup>[10]</sup>。值得注意的是, 这些次生代谢产物的跨膜转运和区隔化储存过程不仅决定了沉香的化学组成谱, 更直接影响其品质。因此, 阐明沉香倍半萜和色酮类次生代谢物的转运机制, 对于揭示沉香形成机制及提升其品质具有重要的理论意义和应用价值。

ABC (ATP-Binding Cassette) 转运蛋白是迄今发现的最大转运蛋白家族之一, 在动物、植物和微生物中普遍存在<sup>[11]</sup>。该蛋白具有高度保守的核苷酸结合结构域 (NBD) 和包含 5 或 6 个跨膜螺旋的跨膜结构域 (TMD)<sup>[12]</sup>。ABC 转运蛋白主要以氨基酸、脂质体、多糖、多肽、生物碱和药物等为底物, 通过 ATP 水解为能量, 完成对底物的跨膜运输<sup>[13]</sup>。大多数 ABC 转运蛋白是膜蛋白, 可在细胞膜上运



收稿日期: 2025-09-17

修回日期: 2025-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32171747); 海南省自然科学基金项目 (323CXTD388)

\*第一作者: 刘月阳 (2000—), 男, 海南大学热带农林学院 2023 级硕士研究生。E-mail: 2545743994@qq.com

\*通信作者: 徐诗涛 (1968—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 热带植物资源利用。E-mail: xushitao@hainanu.edu.cn  
朱家红 (1982—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 植物次生代谢与调控。E-mail: zhujiahong@itbb.org.cn

输各种分子,按照其转运功能分为摄取型和外排型两类<sup>[14]</sup>。植物中共发现8个ABC转运蛋白亚家族:ABC-A、ABC-B、ABC-C、ABC-D、ABC-E、ABC-F、ABC-G和ABC-I<sup>[15]</sup>。ABC-G是植物中最大的ABC蛋白家族,相关研究表明ABC-G转运蛋白能广泛参与植物重金属、抗菌化合物、脱落酸,以及萜类、黄酮类、木脂素类等次生代谢物的转运<sup>[16]</sup>。

目前,关于沉香特征性成分形成的研究集中于解析沉香特征性成分的合成及调控方面,而关于特征性成分转运的机制研究较少,相关转运蛋白及其调控机制研究也未见报道。本研究从白木香中克隆了ABC-G转运蛋白编码基因*AsABCG1*,通过对其理化性质、结构域、蛋白二级结构和三级结构、启动子区的顺式调控元件等方面进行分析,并利用实时荧光定量PCR(qRT-PCR)技术对*AsABCG1*基因的表达变化趋势进行了分析,为进一步研究*AsABCG1*基因在白木香次生代谢物转运过程中的功能奠定基础。

## 1 材料与方法

**1.1 植物材料与处理** 本次实验所用的白木香材料来源于中国热带农业科学院热带生物技术研究所基地,选取生长一致的3年生白木香进行胁迫处理。对于机械伤害处理,利用电钻对白木香茎干钻孔处理(图1-A);茉莉酸甲酯处理,使用溶于体积分数为0.1%乙醇溶液的180 μmol·L<sup>-1</sup>茉莉酸甲酯浸湿纸巾包裹白木香茎干(图1-B)。每个处理3个生物学重复,并于处理后0、3、6、24、

72、120 h后分别取样,立即放于液氮冷冻研磨,并于-80 °C冷冻保存,以供后续实验使用。

## 1.2 方法

**1.2.1 白木香 RNA 的提取与 cDNA 的合成** 采用诺维公司RNA提取试剂盒并按照说明书方法提取白木香茎干总RNA,提取后利用琼脂糖凝胶电泳评估其质量。RNA样本质量经检测条带正确后,使用RNA反转录试剂盒进行反转录,合成cDNA后置于-80 °C保存。

**1.2.2 白木香目的基因的筛选与 *AsABCG1* 基因的克隆** 结香剂处理能够激活白木香茎干次生代谢物合成并促进沉香的形成。先前研究中对白木香茎干进行结香剂处理并在0、3、6、9 d对处理后的白木香进行采样,之后对采取的白木香样品进行转录组测序得到白木香转录组数据<sup>[17]</sup>。基于转录组注释数据和FPKM的表达值分析,筛选出一条结香剂处理差异表达基因,将其命名为*AsABCG1*。通过软件SPSS v20.0分析差异表达基因与6种已知2-(2-苯乙基)色酮类化合物含量的皮尔逊相关系数。根据*AsABCG1*的CDS序列,使用软件CE Design v1.01设计其特异性引物(表1)。以逆转录获得的cDNA为模板进行PCR扩增,得到与目的基因大小一致的条带后,使用Agarose Gel DNA Recovery Kit [中科瑞泰(北京)生物科技有限公司]对扩增产物进行纯化。将纯化后的目的基因构建到PMD-19T载体上,并转入大肠杆菌感受态DH5α中,经菌液PCR鉴定为阳性后提取质粒,然后送测序。序列正确的质粒冻存于-20 °C冰箱供后续实验。

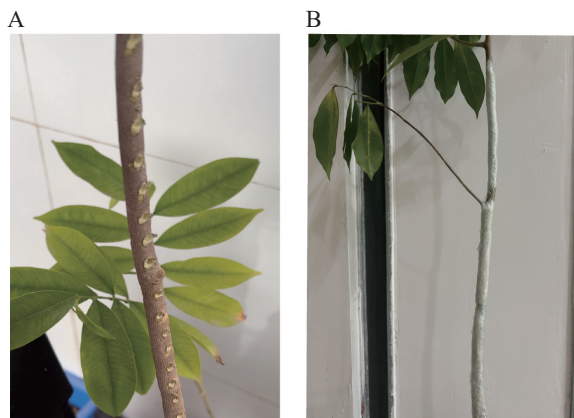


图1 白木香机械伤害处理(A)和茉莉酸甲酯处理(B)  
Fig. 1 *Aquilaria sinensis* mechanical damage treatment (A) and methyl jasmonate treatment (B)

表1 本实验中使用的引物

Tab. 1 The primers used in this experiment

引物名称 Primer	引物序列(5'—3') Sequence (5'—3')
<i>AsABCG1</i> -F	GAACCTTGGGATTGAGAAGACGA
<i>AsABCG1</i> -R	GCAACTAGTTTGCCCATACTAAAC-CAGACTCT
q <i>AsABCG1</i> -F	ATGGGATGGACATAGAGGATTG
q <i>AsABCG1</i> -R	GGAAGAATCCTCCCACCAATATC
<i>AsGADPH</i> -F	CTGGTATGGCATTCCGTGTA
<i>AsGADPH</i> -R	AACCACATCCTCTTCGGTGTA

**1.2.3 *AsABCG1* 蛋白生物信息学分析** 用ExPasy在线软件(ExPasy-SIB Swiss Institute of Bioinformatics)

对 AsABCG1 蛋白的理化性质、跨膜结构、信号肽、磷酸位点进行预测,利用 NPS@:SOPMA(ibcp.fr) 在线预测蛋白二级结构,使用 SWISS-MODEL(expasy.org) 在线预测蛋白三级结构;运用 PlantCARE(ugent.be) 在线软件查找启动子区顺式作用元件;使用 DNAMAN 软件对不同物种的蛋白序列进行对比分析,通过 MEGA v10.0 软件建立系统发育树。

**1.2.4 AsABCG1 基因表达分析** 依据荧光定量试剂盒说明书中的方法,设计用于检测 *AsABCG1* 基因表达的荧光定量引物和内参基因的荧光定量引物(表 1)。根据说明书中反应体系进行加样,并在实时荧光定量 PCR 仪上进行扩增,设置程序为二步法。对每种处理条件的样品均进行 3 次生物学重复实验,并采用  $2^{-\Delta\Delta Ct}$  法计算并分析该基因的相对表达水平。

## 2 结果与分析

**2.1 AsABCG1 基因的筛选、克隆及其与沉香色酮类化合物积累的相关性分析** 根据课题组梅文莉等专利结香技术处理的白木香转录组数据库<sup>[18]</sup>,共筛选出 10 个差异表达的 ABC 转运蛋白基因。利用软件 TBtools v2.056 分析其 FPKM 值并绘制表达量热图(图 2-A),结果显示, *evm.model.Scaffold2.763* 基因的表达在结香剂处理后上调最为明显,将其命名为 *AsABCG1*。将色酮类化合物含量与 ABC 基因表达进行相关性分析(图 2-B),结果显示,10 个具有差异表达的 *AsABC* 基因中 5 个与色酮类具有不同程度的正相关性,另外 5 个则具有不同程度的负相关性,而 *AsABCG1* 与几种主要的色酮类化合物均表现出较高的正相关性,说明 *AsABCG1* 可能参与沉香色酮等代谢物的积累。

根据白木香转录组中的序列设计 *AsABCG1* 基因的特异性引物并进行 PCR 扩增,经琼脂糖凝胶电泳检测显示获得一条清晰的条带(图 3)。测序结果表明,该基因的 CDS 序列全长为 1 986 bp,编码一个包含 661 个氨基酸的蛋白质。

### 2.2 AsABCG1 蛋白理化性质及结构分析

*AsABCG1* 蛋白(分子式:  $C_{3327}H_{5222}N_{872}O_{931}S_{38}$ ) 分子质量约为 73.56 kDa,理论等电点(*pI*)值为 8.64;脂肪系数为 96.07,不稳定系数为 40.98。电荷分析显示该蛋白含有 56 个负电荷残基(Asp + Glu)

和 62 个正电荷残基(Arg + Lys)。平均亲水性系数为 0.139,结合其多肽链存在显著的非亲水性区域,表明 *AsABCG1* 属于疏水蛋白(图 4-A)。TMHMM server v2.0 跨膜结构在线预测表明编码该蛋白的 661 个氨基酸中共包含 6 个跨膜结构域,确认为跨膜蛋白(图 4-B)。

信号肽在线预测显示 *AsABCG1* 蛋白 C-score、S-score 和 Y-score 分值都较低,且不存在信号肽剪切位点,为非分泌性蛋白(图 4-C)。此外,NetPhos v3.0 预测揭示 *AsABCG1* 存在较多的潜在磷酸化位点,其中丝氨酸(Ser)最多共有 33 个,苏氨酸(Thr)为 21 个,酪氨酸(Tyr)为 6 个(图 4-D)。

### 2.3 AsABCG1 蛋白二级结构和三级结构预测

蛋白二级结构有  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠、无规则卷曲和延伸链等。SOPMA 在线预测 *AsABCG1* 蛋白二级结构(图 5-A)结果显示,其结构主要为  $\alpha$ -螺旋(48.26%)、无规则卷曲(39.49%)另还有较少的延伸链(12.25%)。 $\alpha$ -螺旋是蛋白质二级结构的主要形式,主要由其精确的原子级结构决定,具有高度的规律性和稳定性,能够构成跨膜通道并转运蛋白;无规卷曲是由主链骨架无规律排列形成的构象,能够介导分子识别与结合、构成催化位点、作为翻译后修饰和调控的位点;延伸链指的是构成  $\beta$ -折叠的肽链构象,也称为  $\beta$ -构象,为蛋白质提供了独特的刚性、平坦和抗拉伸的结构基元。*AsABCG1* 中  $\alpha$ -螺旋为其主要结构,结合该结构的功能,可进一步证实该蛋白属于跨膜蛋白。

使用 SWISS-MODLE 预测三级结构(图 5-B),结果表明,该结构与已知榴莲中 ABC-G 基因家族成员(LOC111308351)的 GMQE 值为 0.81。证实了 *AsABCG1* 属于 ABC-G 亚家族成员,且该结构中存在较多的  $\alpha$ -螺旋,这也印证了二级结构的预测结果。二级结构和三级结构的预测结果均表明,*AsABG1* 符合 ABC 转运蛋白的结构特征。

### 2.4 AsABCG1 同源性比对和系统进化分析

从 NCBI 中下载与 *AsABCG1* 同源性较高的氨基酸序列,并做同源性对比(图 6)。结果显示 *AsABCG1* 具有典型的植物 ABC 转运蛋白结构特征,包含 2 个保守结构域(MotifA 和 MotifB)。*AsABCG1* 与木槿(*Hibiscus syriacus*)HsABCG、陆地棉(*Gossypium hirsutum*)GhABCG、榴莲(*Durio zibethinus*)DzABCG、可可树(*Theobroma cacao*)

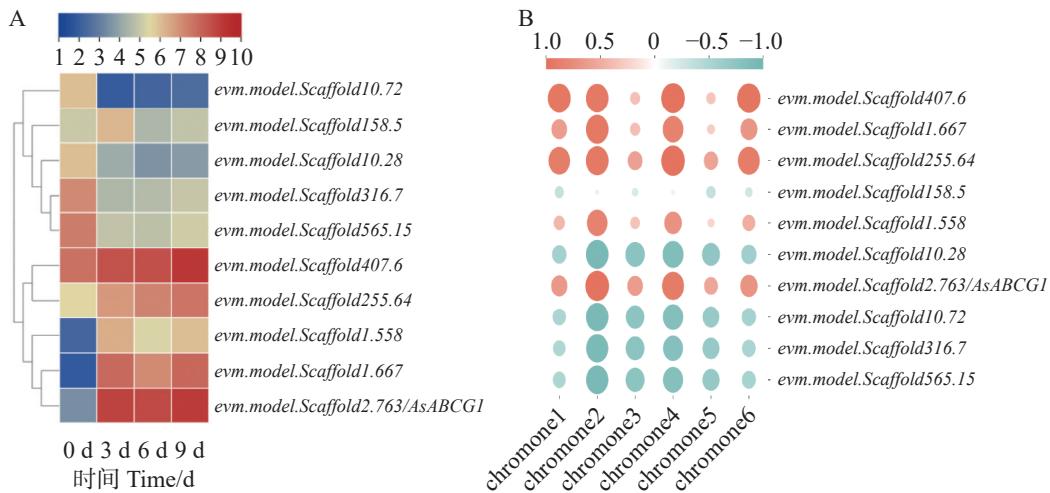


图 2 结香剂处理后 *AsABC* 基因的表达及色酮含量相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of *AsABC* gene expression and chromone content after treatment with agarwood inducer

注: chromone1, 2-[2-(3-甲氧基-4-羟基)苯乙基]色酮; chromone2, 6-羟基-2-[2-(4-甲氧基)苯乙基]色酮; chromone3, 6-羟基-2-(2-苯乙基)色酮; chromone4, 2-[2-(4-甲氧基)苯乙基]色酮; chromone5, 2-(2-苯乙基)色酮; chromone6, 6-羟基-2-[2-(3-甲氧基-4-羟基)苯乙基]色酮。

Note: chromone1, 2-[2-(3-methoxy-4-hydroxy)phenylethyl]chromone; chromone2, 6-hydroxy-2-[2-(4-methoxy)phenylethyl]chromone; chromone3, 6-hydroxy-2-(2-phenylethyl)chromone; chromone4, 2-[2-(4-methoxy)phenylethyl]chromone; chromone5, 2-(2-phenylethyl)chromone; chromone6, 6-hydroxy-2-[2-(3-methoxy-4-hydroxy)phenylethyl]chromone.

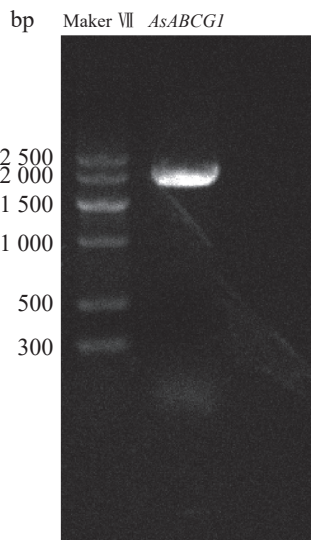


图 3 白木香 *AsABC*G1 PCR 扩增产物

Fig. 3 PCR amplification product of *AsABC*G1 from *Aquilaria sinensis*

TcABC<sub>G</sub>、哥伦比亚锦葵 (*Herrania umbratica*) HuABC<sub>G</sub> 中 ABC 蛋白同源性分别为 69.39%、69.77%、69.77%、69.24%、69.20%。

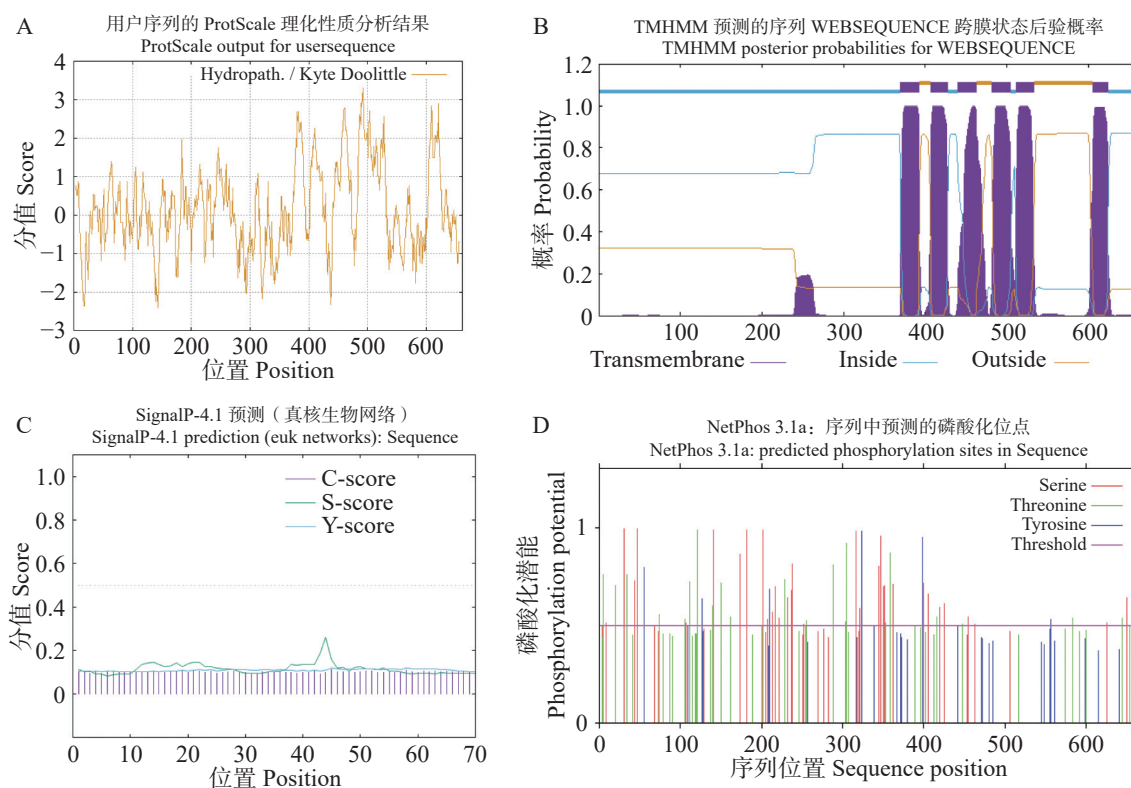
将 10 个具有差异表达的 *AsABC* 蛋白与其他植物中的 ABC 蛋白氨基酸序列进行系统发育树构建(图 7), 结果表明, 有 4 个 *AsABC* 蛋白 (*AsABC*G1、em.model.Scaffold158.5、ev.model.Scaffold407.6 和 evm.model.Scaffold1.667)属于 ABC-G 亚家族, 该家族成员在调控植物次生代谢物转运过程中具有重要的作用。

**2.5 *AsABC*G1 基因的启动子分析** 用 PlantCARE 对 *AsABC*G1 基因启动子区进行分析, 结果(图 8)显示, 该区域存在多种参与植物表达调控的顺式作用元件, 包括参与光响应调控(G-box cis-acting element)G-box; 参与茉莉酸(jasmonic acid response element)TGACG-motif、生长素(auxin response element)AuxRR-core、赤霉素(gibberellin response element)GARE-motif、脱落酸(abscisic acid response element)ABRE 等多种激素调控; 参与胁迫响应如厌氧诱导反应(anaerobic response element)ARE、机械损伤响应元件(wound responsive element 3)WRE3 及参与植物生长发育等相关元件。以上结果表明, *AsABC*G1 基因的表达可能受到这些因素的调控。

**2.6 *AsABC*G1 基因表达分析** 采用 RT-qPCR 技术分析了 *AsABC*G1 在茉莉酸甲酯和机械伤害处理下的表达模式, 结果显示, *AsABC*G1 基因对 2 种处理均表现出显著的应答反应。在茉莉酸甲酯处理下(图 9-A), *AsABC*G1 的表达在各时间点均明显上调, 其中在处理 6 h 后表达量达到最高, 为对照组的 21.1 倍。而在机械伤害处理中, 基因表达量在处理 5 d 后才达到峰值, 为对照组的 4.5 倍(图 9-B)。上述结果表明, *AsABC*G1 可能参与了茉莉酸信号通路和机械伤害应答的生理过程。

### 3 讨论

ABC 转运蛋白参与植物体内多种次生代谢产

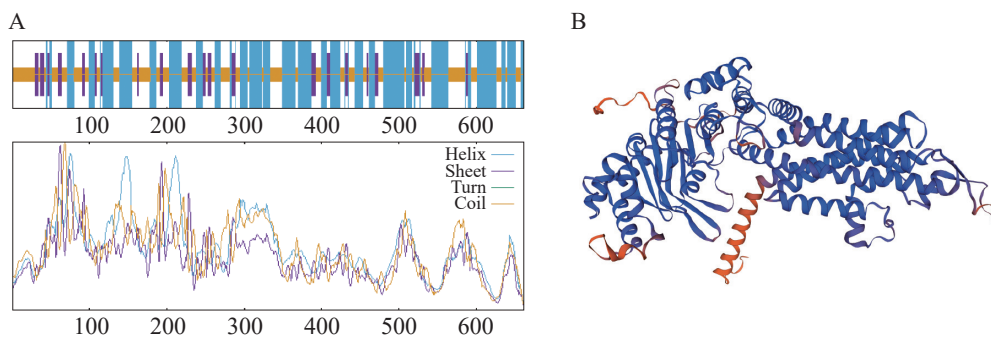


A. AsABC1 亲水与疏水性; B. AsABC1 信号肽; C. AsABC1 跨膜结构; D. AsABC1 磷酸化位点。

A. AsABC1 hydrophilicity and hydrophobicity; B. AsABC1 signal peptide; C. AsABC1 transmembrane structure; D. AsABC1 phosphorylation sites.

图 4 AsABC1 蛋白理化性质及结构分析

Fig. 4 Physicochemical properties and structural analysis of AsABC1 protein



A. AsABC1 蛋白的二级结构; B. AsABC1 蛋白的三级结构。

A. The secondary structure of AsABC1 protein; B. The tertiary structure of AsABC1 protein.

图 5 AsABC1 蛋白结构预测

Fig. 5 Prediction of the structure of the AsABC1 protein

注: 蓝色,  $\alpha$ -螺旋; 紫色, 延伸链; 橙色, 无规则卷曲; 越接近蓝色表示该部分结构与已知植物相似度高, 越接近橙色表示相似度越低。

Note: blue,  $\alpha$ -helix; purple, extended chain; orange, random coil; The closer to blue, the higher the similarity of this part of the structure to the reported plants; the closer to orange, the lower the similarity.

物的运输, 在促进次生代谢物积累中起着关键作用, 现已成为植物次生代谢工程领域的研究热点之一<sup>[18]</sup>。本研究基于课题组的白木香转录组数据, 克隆出一条编码 ABC 转运蛋白的基因 *AsABC1*。并对其理化性质、蛋白结构及基因表达量进行分析, 旨在阐明 ABC 转运蛋白对白木香中次生代谢物的转运机制, 为揭示沉香特征性成分积累机制

和提高人工诱导沉香中特征性成分含量奠定基础。

近些年来, 关于 ABC 转运蛋白对植物次生代谢产物转运功能的研究, 已有了很大的进展。有研究表明, ABC 转运蛋白能够参与萜类化合物的转运, 例如, 丹参中 SmABC1 参与二萜类化合物丹参酮的转运<sup>[19]</sup>; EIABC39 是续随子 (*Euphorbia lathyris*) 大环二萜类化合物的关键转运蛋白<sup>[20]</sup>;

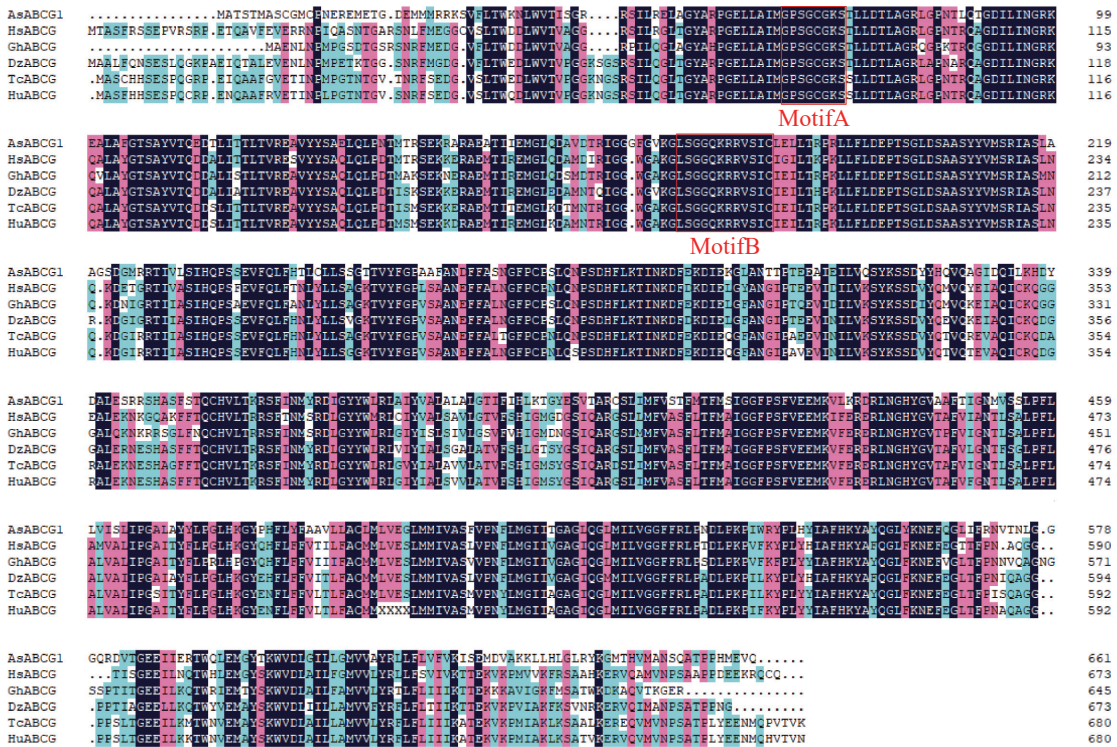


图 6 *AsABCG1* 与其他植物 ABCG 多序列比对  
 Fig. 6 Comparison of sequences between *AsABCG1* and other plant ABCG proteins

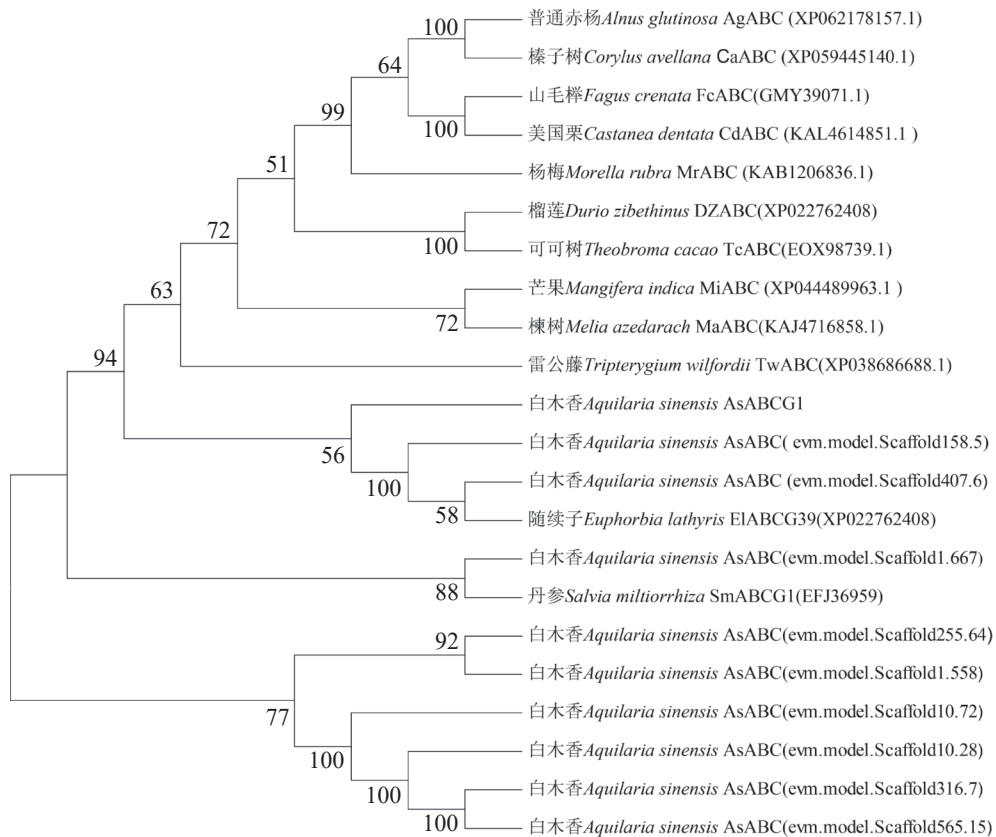
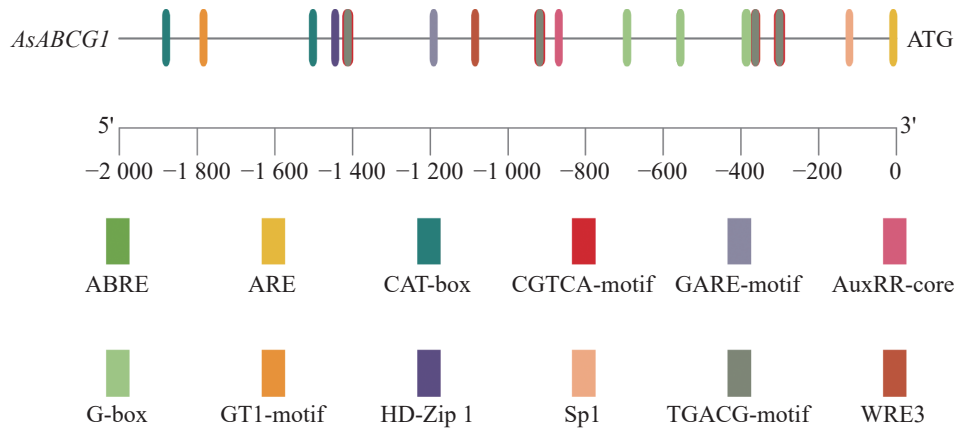
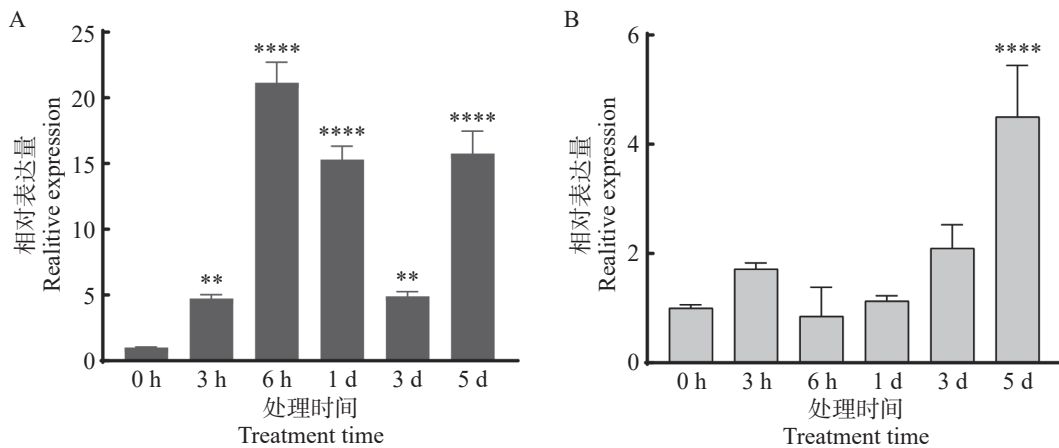


图 7 *AsABCG1* 与其他物种 ABC 氨基酸序列系统发育树  
 Fig. 7 Phylogenetic tree of sequences of *AsABCG1* and ABC amino acids of other species

青蒿 (*Artemisia annua*) AaPDR3 具有转运半萜类化合物  $\beta$ -石竹烯的功能。此外, ABC 转运蛋白也参

与黄酮类化合物的转运, 例如, 拟南芥中 AtABCC1、AtABCC2、AtABCC14 参与花青素的转运<sup>[21]</sup>; 佛手

图 8 *AsABCG1* 基因启动子区调控元件分析Fig. 8 Analysis of regulatory elements in the promoter region of the *AsABCG1* gene图 9 茉莉酸甲酯(A)和物理损伤处理(B)对 *AsABCG1* 基因表达的影响Fig. 9 The effects of methyl jasmonic acid (A) and mechanical damage (B) treatment on the expression of the *AsABCG1* gene注: \*\*表示  $P < 0.01$ ; \*\*\*\*表示  $P < 0.0001$ 。Note: \*\*Indication  $P < 0.01$ ; \*\*\*\*Indication  $P < 0.0001$ .

(*Citrus medica*)中 CmABCB19、CmABCC10 参与蜜橘黄素、橙皮素、柚皮苷等黄酮类次生代谢物的转运<sup>[22]</sup>。倍半萜类和 2-(2-苯乙基)色酮类化合物是沉香中的特征性成分和主要生物活性成分,其中 2-(2-苯乙基)色酮类化合物与黄酮类化合物结构相似<sup>[23]</sup>。据此推测 ABC 转运蛋白在沉香倍半萜和 2-(2-苯乙基)色酮类化合物的转运和积累过程中发挥重要的调控作用。蛋白结构预测结果表明, *AsABCG1* 为跨膜蛋白,具有 ABC 转运蛋白的基本特征;在结香剂处理下,该基因表达与色酮类化合物积累正相关,表明 *AsABCG1* 可能参与沉香色酮类等次生代谢物的转运。

通常健康的白木香树不会产生沉香,只能在损伤后诱导才能形成<sup>[24]</sup>。研究表明,伤害处理和茉莉酸甲酯处理可诱导沉香中倍半萜和 2-(2-苯乙基)色酮类化合物产生并促进次生代谢物形成<sup>[25-28]</sup>。

本研究发现 *AsABCG1* 启动子存在多个茉莉酸和防御胁迫相关响应元件,进一步表达分析显示茉莉酸甲酯处理和伤害处理均可显著诱导 *AsABCG1* 基因的表达,说明 *AsABCG1* 参与了白木香伤害和茉莉酸信号转导,可能介导倍半萜和 2-(2-苯乙基)色酮类化合物的转运。本研究不仅为沉香属植物研究提供了一个新的候选基因,也为深入揭示 *AsABCG1* 在沉香特征性成分转运与积累中的功能奠定了重要基础。后续将该基因是否参与次生代谢物的转运等功能进行验证,并进一步解析其表达调控机制,以系统阐明 ABC 转运蛋白在沉香特征性成分转运过程中的功能及调控网络。相关研究结果有望为开发新型结香诱导技术、提升沉香特征性成分的积累水平提供理论依据和技术支撑。在此基础上可对该基因是否具有转运次生代谢物等功能进行验证,以期探究 ABC 转运蛋

白对调控沉香特征性成分转运的分子机制并进一步揭示沉香特征性成分的转运和调控机制。

## 参考文献:

- [1] 李慧婷, 王露露, 王雅丽, 等. 白木香 6 个不同种质所结沉香的 GC-MS 分析 [J]. *热带作物学报*, 2024, 45(8): 1727–1741. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.022>
- [2] Zhou H, Li X Y, Fang H B, et al. Five new sesquiterpenoids from agarwood of *Aquilaria sinensis* [J]. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 2023, 19: 998–1007. <https://doi.org/10.3762/bjoc.19.75>
- [3] Zhang H, Ma J L, Chang C, et al. Gastroprotective 2-(2-phenylethyl) chromone-sesquiterpene hybrids from the resinous wood of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg [J]. *Bioorganic Chemistry*, 2023, 133: 106396. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2023.106396>
- [4] Xia L L, Li W, Wang H, et al. LC-MS guided identification of dimeric 2-(2-phenylethyl) chromones and sesquiterpene-2-(2-phenylethyl) chromone conjugates from agarwood of *Aquilaria crassna* and their cytotoxicity [J]. *Fitoterapia*, 2019, 138: 104349. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2019.104349>
- [5] Li C G, Pan L, Han Z Z, et al. Antioxidative 2-(2-phenylethyl) chromones in Chinese eaglewood from *Aquilaria sinensis* [J]. *Journal of Asian Natural Products Research*, 2020, 22(7): 639–646. <https://doi.org/10.1080/10286020.2019.1607841>
- [6] Wei S Y, Hu D B, Xia M Y, et al. Sesquiterpenoids and 2-(2-phenylethyl) chromone derivatives from the resinous heartwood of *Aquilaria sinensis* [J]. *Natural Products and Bioprospecting*, 2021, 11(5): 545–555. <https://doi.org/10.1007/s13659-021-00313-0>
- [7] Wang Z F, Cao H L. The complete mitochondrial genome sequence of *Aquilaria sinensis* [J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2021, 6(2): 381–383. <https://doi.org/10.1080/23802359.2020.1869609>
- [8] Chen Y, Wu K L, Xu J R, et al. Development and application of SSR markers for *Aquilaria sinensis* on the basis of whole-genome resequencing data [J]. *Plants*, 2025, 14(9): 1323. <https://doi.org/10.3390/plants14091323>
- [9] 黄兴, 梅文莉, 王昊, 等. 白木香 *AsCYP131* 基因的克隆及表达分析 [J]. *热带作物学报*, 2025, 46(5): 1076–1083. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2025.05.006>
- [10] Nazir P S, Das R, Sen S. The scent of stress: evidence from the unique fragrance of agarwood [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 840. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00840>
- [11] Alam A, Locher K P. Structure and mechanism of human ABC transporters [J]. *Annual Review of Biophysics*, 2023, 52: 275–300. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-111622-091232>
- [12] Locher K P. Mechanistic diversity in ATP-binding cassette (ABC) transporters [J]. *Nature Structural & Molecular Biology*, 2016, 23(6): 487–493. <https://doi.org/10.1038/nsmb.3216>
- [13] Dhara A, Raichaudhuri A. ABCG transporter proteins with beneficial activity on plants [J]. *Phytochemistry*, 2021, 184: 112663. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112663>
- [14] Lewinson O, Orelle C, Seeger M A. Structures of ABC transporters: handle with care [J]. *FEBS Letters*, 2020, 594(23): 3799–3814. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.13966>
- [15] Yan L, Zhang J H, Chen H Y, et al. Genome-wide analysis of ATP-binding cassette transporter provides insight to genes related to bioactive metabolite transportation in *Salvia miltiorrhiza* [J]. *BMC Genomics*, 2021, 22(1): 315. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07623-0>
- [16] Ichino T, Yazaki K. Modes of secretion of plant lipophilic metabolites via ABCG transporter-dependent transport and vesicle-mediated trafficking [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2022, 66: 102184. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2022.102184>
- [17] LI R S, ZHU J H, GUO D, et al. Genome-wide identification and expression analysis of terpene synthase gene family in *Aquilaria sinensis* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 164: 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.028>
- [18] 梅文莉, 戴好富, 王辉, 等. 一种生产沉香的方法: 中国, 201310150138.5 [P]. 2013-04-26. <https://d.wanfangdata.com.cn/patent/Ch1QYXRlbnROZXdtb2xyOVMyMDI2MDYyNzE1NTEzORIpWkxfQ04yMDEzMTAxNTAxMzguNV9DTjEwMzIyOTY3N0JfMjAxNDA1MTQaCdG-zbGlxemIy>
- [19] How S S, Nathan S, Lam S D, et al. ATP-binding cassette (ABC) transporters: structures and roles in bacterial pathogenesis [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 2025, 26(1): 58–75. <https://doi.org/10.1631/jzus.B2300641>
- [20] Li Y J, Chen J F, Zhi J Y, et al. The ABC transporter SmABCG1 mediates tanshinones export from the peridermic cells of *Salvia miltiorrhiza* root [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2025, 67(1): 135–149. <https://doi.org/10.1111/jipb.13806>
- [21] Lin G Y, Li P R, Li L W, et al. Discovery of ElABCG39: a key player in ingenol transmembrane efflux identified through genome-wide analysis of ABC transporters in *Euphorbia lathyris* L. [J]. *Plant Cell Reports*, 2024, 43(11): 274. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03361-1>
- [22] Dean J V, Willis M, Shaban L. Transport of acylated anthocyanins by the *Arabidopsis* ATP-binding cassette transporters AtABCC1, AtABCC2, and AtABCC14 [J]. *Physiologia Plantarum*, 2022, 174(5): e13780. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04511-1>

- doi.org/10.1111/ppl.13780
- [23] Zhang M, Zhao Y Y, Nan T G, et al. Genome-wide analysis of *Citrus medica* ABC transporters reveals the regulation of fruit development by CmABCB19 and Cm-ABCC10 [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 215: 109027. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109027>
- [24] 王昊, 丁旭坡, 曾军, 等. 沉香种质资源、品质评价与形成机制研究进展 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2024, 54(10): 1885–1906. <https://doi.org/10.1360/SSV-2023-0291>
- [25] Ding X P, Mei W L, Lin Q, et al. Genome sequence of the agarwood tree *Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng: the first chromosome-level draft genome in the Thymelaeaceae family [J]. *GigaScience*, 2020, 9(3): giaa013. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giaa013>
- [26] Xu J R, Du R Y, Wang Y, et al. Wound-induced temporal reprogramming of gene expression during agarwood formation in *Aquilaria sinensis* [J]. *Plants*, 2023, 12(16): 2901. <https://doi.org/10.3390/plants12162901>
- [27] 张鹏, 徐谔为, 杨光大, 等. 物理伤害诱导白木香应激反应的生理特征 [J]. *热带作物学报*, 2021, 42(12): 3521–3528. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2021.12.019>
- [28] Xu Y H, Sun P W, Tang X L, et al. Genome-wide analysis of WRKY transcription factors in *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3018. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59597-w>

## Cloning and expression analysis of *AsABCG1* gene in *Aquilaria sinensis*

Liu Yueyang<sup>1,2#</sup>, Guo Dong<sup>2,3</sup>, Wang Ying<sup>2,3</sup>, Wu Wenli<sup>2,3</sup>,  
Li Yuji<sup>2</sup>, Xu Shitao<sup>1\*</sup>, Zhu Jiahong<sup>2,3\*</sup>

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Natural Products Research and Development of Li Folk Medicine of Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Sanya Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya, Hainan 572000, China)

**Abstract:** Agarwood is a traditional precious medicinal material and a natural aromatic material, which is highly valuable due to its rich secondary metabolites. ABC transporters are a type of transmembrane proteins widely distributed in organisms and play a crucial role in the transport and accumulation of secondary metabolites in plants. To deeply explore the function of ABC transporters in the transport process of secondary metabolites in agarwood, a gene encoding an ABC transporter *AsABCG1*; was identified by analyzing the transcriptome data of *Aquilaria sinensis*. The coding sequence (CDS) length of this gene is 1986 bp, encoding a protein consisting of 661 amino acids. *AsABCG1* has typical structural characteristics of plant ABC transporters, including two conserved domains, Motif A and Motif B. The promoter region of *AsABCG1* contains various hormone response elements such as jasmonic acid, auxin, gibberellin, abscisic acid, as well as stress response elements such as anaerobic induction and mechanical injury. The real-time fluorescence quantitative PCR (RT-qPCR) analysis showed that methyl jasmonic acid and mechanical injury treatments could significantly induce the expression of *AsABCG1* in the stems of *A. sinensis*. All these findings laid the foundation for further elucidating the function of the *AsABCG1* gene in the defense response to stress and the accumulation of secondary metabolites in *A. sinensis*.

**Keywords:** *Aquilaria sinensis*; ABC transporter protein; *AsABCG1*; expression analysis; secondary metabolite

(责任编辑: 邹游兴)