北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

黑木相思心材形成中细胞生理活性及其次生代谢物变化

邓云涛 韦鹏练 符韵林

Changes in cellular physiological activity and secondary metabolites during formation of heartwood in *Acacia auriculiformis*

Deng Yuntao, Wei Penglian, Fu Yunlin

引用本文:
邓云涛, 韦鹏练, 符韵林. 黑木相思心材形成中细胞生理活性及其次生代谢物变化[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):166–176. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240361
Deng Yuntao, Wei Penglian, Fu Yunlin. Changes in cellular physiological activity and secondary metabolites during formation of heartwood in *Acacia auriculiformis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):166–176. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240361

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240361

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

UPLC–MS/MS测定植物组织中植物激素的含量
Determination of plant hormones in plant tissues by UPLC–MS/MS
北京林业大学学报, 2019, 41(8): 154–160. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190052

边材生理机能及心材形成机理的研究进展
A review of physiological function of sapwood and formation mechanism of heartwood
北京林业大学学报, 2018, 40(1): 120–129. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170295

大果紫檀心材色素纯化及成分研究
Purification and composition of heartwood pigment of *Pterocarpus macrocarpus*
北京林业大学学报, 2020, 42(10): 126–136. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200225

巴里黄檀心材色素为染料桉木单板仿珍染色工艺与着色机制
Dyeing process and mechanism of eucalyptus veneer with *Dalbergia bariensis* heartwood pigment as dye
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 151–159. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190270

3种植物次生代谢物质对舞毒蛾的杀虫活性分析
Insecticidal activity analysis of three plant secondary metabolites on *Lymantria dispar*
北京林业大学学报, 2017, 39(11): 75–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170214

不同季节遮荫对青钱柳生长和主要次生代谢物积累的影响
Effects of shading and season on growth and accumulation of major secondary metabolites in *Cyclocarya paliurus*
北京林业大学学报, 2017, 39(9): 66–75. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170144

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240361

黑木相思心材形成中细胞生理活性及其次生代谢物变化

邓云涛　韦鹏练　符韵林
（广西大学林学院，广西 南宁 530000）

摘要:【目的】黑木相思的心材具有优美的木纹和独特的美丽图案。作为特色速生树种，研究其心材形成机制，有助于提升心材的利用价值。然而，当前关于黑木相思心材形成的关键生理和化学机制仍不清晰。本研究旨在探究黑木相思心材形成的生理和化学基础，以深入理解其心材化过程。**【方法】**为实现上述目标，本研究采用组织化学染色法，观察黑木相思木质部不同部位薄壁细胞中细胞核、淀粉粒和还原糖的形态及数量变化。同时，利用超高效液相色谱–质谱联用仪（UPLC-MS/MS）鉴定心材、过渡材和边材提取物的成分，分析其化学组成特征。通过这些方法，系统探究黑木相思心材形成的生理和化学基础，揭示其在心材化过程中的关键变化。**【结果】**在从边材到心材的过渡过程中，细胞核数量逐渐减少，长宽比变小，形态从长梭形变为圆形，并在第 3 生长轮完全消失。淀粉粒和还原糖主要分布在射线薄壁细胞周围的轴向薄壁细胞，数量逐渐减少，最终在第 3 生长轮消失。第 4 生长轮细胞核形态由椭圆形变成圆形，淀粉粒几乎消失，推测此区域为过渡区内侧。这些变化反映了心材化过程中细胞内部生理活动的逐步调整。在化学成分方面，黑木相思心材的总酚（45.80 mg/g）和总黄酮（16.13 mg/g）含量显著高于边材（总酚 3.25 mg/g，总黄酮 0.50 mg/g）。利用 UPLC-MS/MS，鉴定出黑木相思心边材提取物中的 21 种酚类成分，涵盖黄酮类、酚酸类、单宁类、二苯乙烯类和香豆素类。其中，二氢槲皮素、圣草酚、伞形酮和 3-甲氧基木犀草素等酚类化合物相对含量较高。**【结论】**本研究揭示了黑木相思在生理活性和代谢产物方面的变化规律，明确了其木质部化学组成特征的关键部分。这些发现为黑木相思心材形成和颜色变化提供了重要的理论基础，也为黑木相思的高效利用提供了更深入的科学依据。

关键词：黑木相思；心材化过程；生理活性变化；提取物成分；化学组成；UPLC-MS/MS
中图分类号：S781.41；S792.99　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)05−0166−11
引文格式：邓云涛，韦鹏练，符韵林. 黑木相思心材形成中细胞生理活性及其次生代谢物变化［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：166−176. Deng Yuntao, Wei Penglian, Fu Yunlin. Changes in cellular physiological activity and secondary metabolites during formation of heartwood in *Acacia auriculiformis*［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 166−176.

Changes in cellular physiological activity and secondary metabolites during formation of heartwood in *Acacia auriculiformis*

Deng Yuntao　Wei Penglian　Fu Yunlin
(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract:［**Objective**］The heartwood of *Acacia auriculiformis* features beautiful wood grain and unique patterns. As a fast-growing tree species, understanding the formation mechanism of its heartwood can enhance its utilization value. However, the key physiological and chemical mechanisms of heartwood formation in *A. auriculiformis* remain unclear. This study aims to explore the physiological and chemical

收稿日期: 2024−11−01　**修回日期:** 2025−01−06
基金项目: 国家自然科学基金项目（32171702），广西林业科技项目（2024GXZCLK29）。
第一作者: 邓云涛。主要研究方向：珍贵树木心材形成。Email: 1220548219@qq.com　地址：530000 广西壮族自治区南宁市西乡塘区广西大学林学院。
责任作者: 符韵林，教授。主要研究方向：珍贵树木心材形成。Email: fylin@126.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

basis of heartwood formation in *A. auriculiformis* to gain a deeper understanding of this process. [**Method**] To achieve the above objectives, this study used histological staining to observe changes in morphology and quantity of nuclei, starch grains, and reducing sugars in parenchyma cells in different parts of xylem of *A. auriculiformis*. Additionally, UPLC-MS/MS was employed to identify the components of extracts from heartwood, transition wood, and sapwood, and to analyze their chemical characteristics. These methods were used to systematically investigate the physiological and chemical basis of heartwood formation and reveal key changes during the process. [**Result**] During the transition from sapwood to heartwood, the number of nuclei gradually decreased, their length-to-width ratio decreased, and their shape changed from elongated to round, completely disappearing in the third growth ring. Starch grains and reducing sugars were mainly distributed in axial parenchyma cells surrounding ray parenchyma cells, with their quantities gradually decreasing and disappearing in the third growth ring. In the fourth growth ring, nuclei changed from oval to round, and starch grains almost disappeared, suggesting this area was the inner side of transition zone. These changes reflected the gradual adjustment of physiological activities within cells during heartwood formation. Chemically, the total phenol (45.80 mg/g) and total flavonoid (16.13 mg/g) contents in *A. auriculiformis* heartwood were significantly higher than those in sapwood (total phenol 3.25 mg/g, total flavonoid 0.50 mg/g). Using UPLC-MS/MS, 21 phenolic compounds were identified in heartwood and sapwood extracts of *A. auriculiformis*, including flavonoids, phenolic acids, tannins, stilbenes, and coumarins. Among these, compounds such as dihydroquercetin, eriodictyol, umbelliferone, and 3-methoxy luteolin had relatively high contents. [**Conclusion**] This study reveals the changing patterns in physiological activity and metabolites in *A. auriculiformis*, clarifying the key parts of its xylem chemical composition. These findings provide important theoretical foundations for heartwood formation and color changes in *A. auriculiformis*, and offer deeper scientific evidence for its efficient utilization.

Key words: *Acacia melanoxylon*; heartwood formation process; physiological activity changes; extract components; chemical composition; UPLC-MS/MS

黑木相思（*Acacia melanoxylon*）属于豆科（Leguminosae）金合欢属（*Acacia*）常绿乔木，原产于澳大利亚，于 20 世纪 90 年代引入我国[1]。黑木相思的心材呈现出独特的金棕色至黑棕色，其间夹杂着红色条纹，木纹整齐且常带有带状、斑点状、雨点状、鸟眼状和提琴状等美丽图案，而且其生长速度快、树干通直、材质紧密，因此在高档家具[2]、贴面板[3]、乐器等领域具有较高的利用价值[4]。其心材比例大且形成速度快，研究其心材形成机理并有效调控心材形成，对于提高木材品质和利用效率具有重要意义，也是当前林业发展的重要课题之一。

近年来，关于树木心材形成的研究逐渐深入。心材的形成与转化过程中，木质部薄壁细胞的程序性死亡起着关键作用[5−6]，而薄壁细胞活力的变化主要通过细胞器（如细胞核、线粒体）和储藏物质（如淀粉粒、脂质）的变化来体现[7]。例如：Song 等[8]研究杉木（*Cunninghamia lanceolata*）薄壁细胞发现，细胞核变形指数从形成层到过渡区逐渐增加；Gartner 等[9]研究花旗松（*Pseudotsuga menziesii*）射线薄壁细胞发现，细胞核的体积、数量、活性从边材到心材呈降低趋势。此外，淀粉粒作为次生代谢物合成的重要物质以及细胞新陈代谢的能量和原料来源，其累积转化是心材化过程的一个重要特征[10]。然而，尽管已有研究表明心材形成过程中薄壁细胞在物质运输和储存营养物质方面发挥重要作用[11]，并且在细胞死亡前会合成酚类化合物等心材物质[12]，但对于这些次生代谢物积累会导致细胞死亡这一假设，尚未得到充分验证[13]。因此，深入研究心材化木质部薄壁细胞生理活性变化与代谢物变化之间的关系，对于揭示心材形成机制至关重要。

在黑木相思的研究方面，目前主要集中在栽培技术、物理性质和选育等方面，而关于其心材形成及成分分析的研究相对较少。近期，Zhang 等[3]的研究发现，黑木相思从边材到心材，淀粉总量减少，而酚类化合物及黄酮类化合物含量逐渐增加。参与苯丙烷与类黄酮代谢及生物合成过程的相关基因，以及对应的代谢产物，分别于过渡区和心材呈现上调趋势，进而在这些区域大量积累，并且分析出 10 种酚类和类黄酮代谢物的代谢图谱。然而，该研究仅停留在基因和代谢产物的分析层面，并未对木材提取物的主要成分进行鉴定。这表明：尽管已有研究为黑木相思心材形成的分子调控提供了理论基础，但在

心材形成的关键生理和化学机制方面仍存在空白。

鉴于上述研究现状和存在的问题，本研究以黑木相思为对象，拟采用组织化学染色法观察木质部不同部位薄壁细胞中细胞核、淀粉粒、还原糖的形态和数量变化，并利用超高效液相色谱–质谱联用仪（UPLC-MS/MS）鉴定心材、过渡材、边材提取物的成分。通过这些手段，旨在深入探究黑木相思心材形成的生理和化学基础，为其心材形成机制及心材颜色变化提供理论依据，从而推动黑木相思在林业生产和木材加工领域的高效利用。

1 材料与方法

1.1 材 料

2024 年 6 月，于广西壮族自治区玉林市六万林场采集了 3 棵 6 年生黑木相思。所选树木的生长条件基本一致，且无明显缺陷。其树高分别为 16.68、15.91、16.22 m，胸径分别为 17.29、17.05、16.38 cm。在采集过程中，对树木进行了南北向的标注。树木砍伐后，从基部开始用电锯切割出厚度为 4 cm 的圆盘。随后，沿着南北向过髓心将圆盘劈成长条。其中一部分样品被放入 FAA 固定液中，用于观察木质部薄壁的生理活性变化；另一部分样品则在常温下储存，用于后续的化学成分分析。

1.2 研究方法

1.2.1 心材形成过程中薄壁细胞生理变化的显微观察

将黑木相思样品置于 FAA 固定液中浸泡 48 h 以上，随后按生长轮将其处理成 6 小段（图 1）。使用滑走切片机制作径切面切片，切片厚度为 16 μm。对切片进行以下处理：首先，使用碘–碘化钾（I_2-IK）染色 10 min，然后依次经过 30%、50%、70%、90%、100% 的酒精梯度脱水，每级脱水 1 min；接着置于 TO 透明剂种 3 min，完成装片。最后，利用光学显微镜观察淀粉粒数量的变化情况，并选取 3 个长为 200 μm，宽为 100 μm 的轴向薄壁细胞区域，利用 Image-J 软件对淀粉粒数量进行统计。每个样品进行 3 次生物学重复，取其平均值。

接着，使用醋酸洋红染色 15 min，依次经过 30%、50%、70%、90%、100% 的酒精梯度脱水，每级脱水 4 min；置于 TO 透明剂中 3 min，完成装片。利用光学显微镜观察细胞核的形态和数量变化情况，并采用 ImageJ 软件在每个样品中测定细胞核的长度和宽度，计算选择区域内每个细胞核的长宽比。每个位置选取 3 张图片进行统计，每个样品进行 3 次生物学重复，取其平均值。最后，使用高碘酸染色 15 min，希夫试剂染色 5 min，依次经过 50%、70%、90%、100% 的酒精梯度脱水，每级脱水 5 min；置于 TO 透明剂中 5 min，完成装片。利用光学显微镜观察还原糖数量的变化情况，每个样品进行 3 次生物学重复。

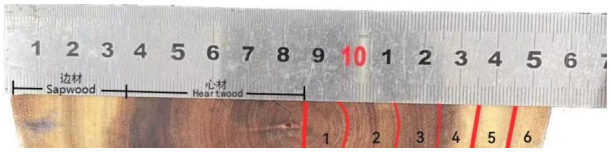


图 1 黑木相思取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling *Acacia melanoxylon*

1.2.2 心材与边材提取物成分鉴定

将气干状态的黑木相思样品粉碎至颗粒度为 60 目（4.23×10^{-4} m）的木粉。分别准确称取边材和心材各 0.10 g 粉末，置于锥形瓶中，加入 10 mL 色谱级甲醇[14]，摇晃均匀后，将锥形瓶置于超声震荡仪中提取 1 h。提取完成后，将样品离心，取上清液，再通过 0.22 μm 滤膜过滤，得到待测样品溶液。使用超高效液相色谱–质谱联用仪（UPLC-MS/MS）对黑木相思木材提取物进行成分鉴定。采用 ACQUITY UPLC BEH C18 色谱柱（1.7 μm，2.1 mm × 50 mm），流动相由 A（0.1% 甲酸水）和 B（甲醇）组成，采用梯度洗脱程序，具体为：0 ~ 1 min、10% ~ 20% B，1 ~ 3 min、20% ~ 30% B，3 ~ 10 min、30% ~ 45% B，10 ~ 17 min，45% ~ 70% B，17 ~ 19 min，70% ~ 90%B，19 ~ 20 min，10% B；流速为 0.4 mL/min，柱温为 40℃；进样量为 0.2 μm。质谱条件：采用 ESI 离子源，正离子模式，扫描模式为 MRM；毛细管电压为 2 500 V，离子传输管温度为 100 ℃，质量扫描范围为 *m*/*z* 50 ~ 1 200，质量校正质荷比为 *m*/*z* 556.277 1。脱溶剂温度为 350 ℃，脱溶剂气体流速为 690 L/h。将质谱数据导入 Compound discover 3.2 软件进行处理分析，通过与质谱数据库及参考文献对比，完成物质鉴定。

1.2.3 总多酚含量测定

采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定黑木相思总多酚含量。首先，称取 0.01 g 没食子酸标准品，置于 100 mL 容量瓶中，用蒸馏水定容，得到 0.1 mg/mL 的标准液。分别取 0.25、0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 mL 的标准溶液，分别置于 25 mL 容量瓶中，各加入 1 mL 福林酚试剂，摇匀后再分别加入 2 mL（15%）碳酸钠溶液，用蒸馏水定容后摇匀。避光反应 30 min 后，在 760 nm 波长下测定吸光度值。以标准溶液质量浓度为横坐标，吸光度值为纵坐标，绘制标准曲线，得到方程：$y = 77.178x + 0.139\ 2$，$R^2 = 0.994$。随后，取 1.2.2 中适量黑木相思提取液，按照上述相同方法进行操作，并以蒸馏水为空白对照。在 760 nm 波长下测定吸光度值，根据标准曲线方程计算提取

液中总多酚含量，单位为 mg/g。每个样品重复 3 次，取平均值作为最终测定结果。

1.2.4　总黄酮含量测定

采用芦丁标准品进行比色法测定黑木相思总黄酮含量。首先，称取 0.01 g 芦丁标准品，置于 100 mL 容量瓶，用 50% 乙醇定容，得到 0.01 g/mL 的标准溶液。分别取 0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mL 的标准溶液，置于 10 mL 容量瓶中，各加入 50% 乙醇至 5 mL，然后依次加入 0.3 mL(5%)亚硝酸钠溶液、0.3 mL (10%)硝酸铝溶液，分别摇匀，最后加入 4 mL(4%)氢氧化钠溶液，用蒸馏水定容至刻度，摇匀。静置 15 min 后，在 510 nm 波长下测定吸光度值。以标准溶液质量浓度为横坐标，吸光度值为纵坐标，绘制标准曲线，得到方程：$y = 7.666\ 9x + 0.044$，$R^2 = 0.999$。随后，取 1.2.2 中适量提取液，按照上述相同步骤进行操作，并以蒸馏水为空白对照。测定吸光度值后，根据标准曲线方程计算提取液中目标成分的含量，结果以 mg/g 表示。每个样品重复测定 3 次，取平均值作为最终结果。

2　结果与分析

2.1　淀粉粒形态和数量变化

图 2 展示了黑木相思不同部位薄壁细胞的淀粉粒含量变化。通过 I_2-KI 染色观察发现，黑木相思淀粉粒多分布于射线薄壁细胞周围的轴向薄壁细胞中，而射线薄壁细胞中没有观察到淀粉粒的存在。在边材外层(第 6 生长轮)中，淀粉粒含量处于较高水平(图 2 A，B)。进入过渡区(第 4 生长轮)后，淀粉粒数量迅速减少(图 2C，D)。到了第 3 生长轮，淀粉粒几乎完全消失，仅存在微量零散的淀粉粒(图 2E，F)。心材形成后，薄壁细胞中的淀粉粒完全消失(图 3)。Mishra 等[15]对桉树(*Eucalyptus bosistoana*)的研究结果表明，淀粉粒存在于边材薄壁细胞中，而在心材中不存在，这一结果与本研究一致。与降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)[13]和西南桦(*Betula alnoides*)[16] 薄壁细胞研究对比发现，黑木相思边材中的淀粉粒含量明显低于其他树种，这种差异可能与采伐季节以及树木的遗传特性有关[17]。淀粉粒主要分布于射线薄壁细胞周围的轴向薄壁细胞中，这可能是由于不同部位的代谢活跃程度不同所致。淀粉粒作为薄壁细胞中的主要储能物质，在一定程度上可以反映细胞的代谢活动[11]。此外，Zhang 等[3]的研究发现，黑木相思边材射线薄壁细胞中存在较多的酚类物质，而轴向薄壁细胞则未检测到。这表明黑木相思边材射线薄壁细胞的代谢较活跃，导致淀粉粒等储藏物质快速消耗；而边材轴向薄壁细胞的代谢活跃程度较低，因此其淀粉粒含量相对较高。

2.2　细胞核形态和数量变化

图 4 展示了黑木相思木质部不同部位射线薄壁细胞细胞核的形态变化。在边材中，薄壁细胞的细胞核数量较多，且多呈长梭形或椭圆形，位于细胞腔的中间(如图 4A，B)。进入第 4 生长轮后，细胞核并未立即完全消失，而是长宽比和数量逐渐减少，长度明显变短(图 5)，细胞核出现皱缩，形态由椭圆形变为圆形(如图 4C，D)。到第 3 生长轮时，细胞核完全消失(图 4E)，表明细胞已经完全失活，心材形成。

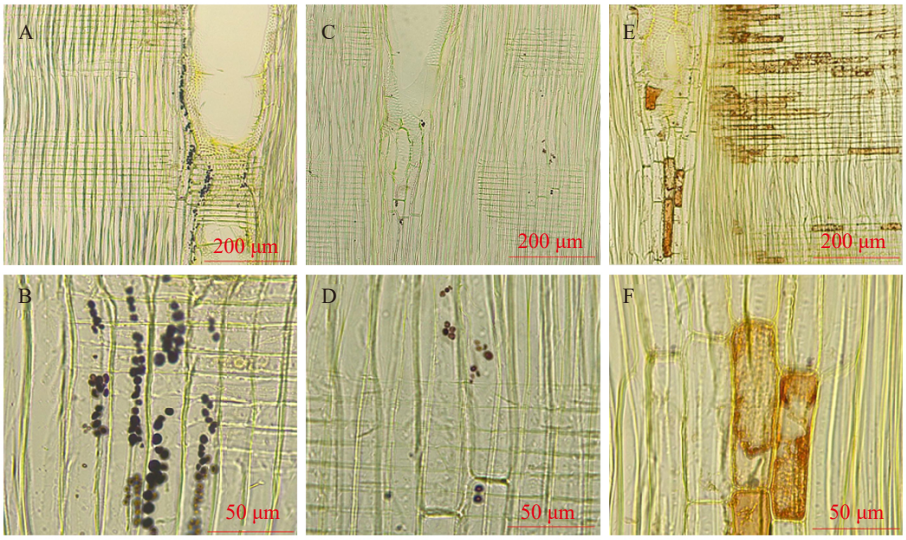
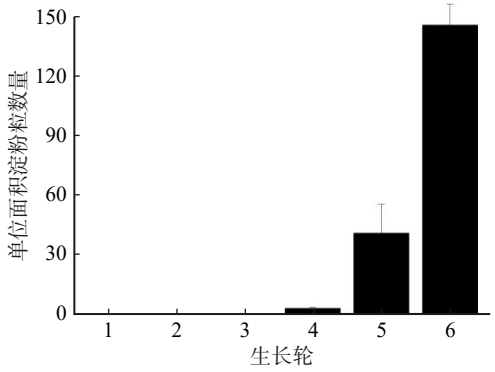


图 A、C、E 为 10 倍镜下观察效果图，图 B、D、F 为 40 倍镜下观察效果图，其中，A、B 为第 6 生长轮，C、D 为第 4 生长轮，E、F 为第 3 生长轮。

图 2　黑木相思不同部位薄壁细胞淀粉粒染色效果图

Fig. 2　Pictures of staining effect of starch granules in parenchyma cells of different parts of *Acacia melanoxylon*



单位面积为 0.02 mm^2。

图 3 黑木相思木质部不同部位薄壁细胞淀粉粒含量变化

Fig. 3 Variation in starch granule content in parenchyma cells of different parts of the xylem of *Acacia melanoxylon*

结合薄壁细胞中淀粉粒数量及细胞核形态变化，可以确定过渡区为第 4 生长轮。从边材到过渡材再到心材，黑木相思细胞核的形态变化规律为：长梭形→椭圆形→圆形→消失，其长宽比也呈现出从边材到心材逐渐减小的总体趋势，这一结果与 Ma 等[13]对降香黄檀心材化过程中细胞核变化的研究结果相似。

2.3 还原糖的分布和含量变化

图 6 展示了黑木相思木质部不同部位薄壁细胞还原糖含量变化。通过希夫–高碘酸试剂将还原糖染成紫色，可以清晰地观察到还原糖在边材中的分布。在边材（第 6 生长轮）中，还原糖含量丰富，不规则地分布于轴向薄壁细胞中（图 6A）。进入过渡区（第 4 生长轮）后，还原糖含量明显减少，仅少量散落在薄壁细胞中（图 6B）。在心材（第 3 生长轮）中，还原糖完全消失（图 6C）。有研究指出，淀粉粒和还原糖在过渡区被用于心材形成过程中心材物质的合成，并且还原糖参与心材物质的形成可能比淀粉粒的分解更早[12]。在本研究中，淀粉粒和还原糖主要存在于轴向薄壁细胞中，其分布差异可能与淀粉粒的代谢特性相似。

2.4 提取物成分鉴定及其含量变化

黑木相思心材与边材的颜色差异显著，边材呈浅褐色，而心材形成时为褐红色。其木材提取物的主要成分包括酚类、酸酯类和醇类物质等[18]。然而，目前关于黑木相思心材与边材主要成分的研究较少，且相关化合物鉴定缺乏理论基础。因此，本研究采用 UPLC-MS/MS 对黑木相思心材与边材的成分进行了鉴定分析。鉴定结果显示：黑木相思心材甲醇提取物中相对含量前 5 的物质为邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二（2-乙基己基）酯、N, N-二甲基苯胺、二氢槲皮素和圣草酚；而边材甲醇提取物中相对含量前 5 的物质为邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二（2-乙基己基）酯、甜菜碱、芥酸酰胺和己内酰胺。通过对比相关物质的保留时间、二级离子碎片、参考文献以及质谱库，本研究共鉴定出 21 种酚类化合物（见表 1），主要为黄酮类、酚酸类、单宁类、二苯乙烯

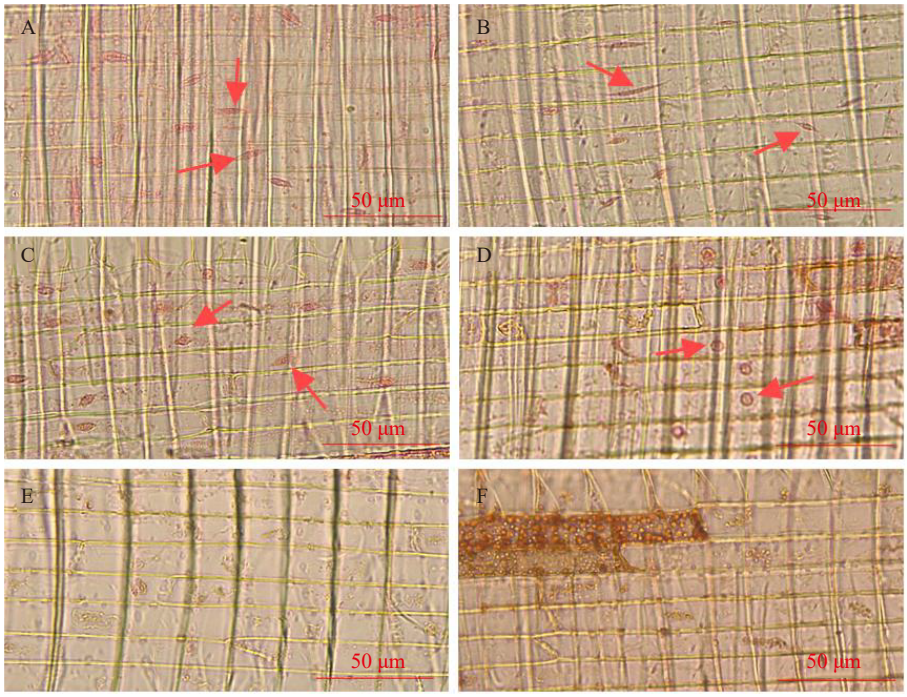


图 A～F 是细胞核在 40 倍镜下的形态。其中 A、B、E、F 分别为第 6、5、3、1 生长轮的细胞核形态，C、D 为第 4 生长轮细胞核形态。

图 4 黑木相思木质部不同部位射线薄壁细胞细胞核染色效果图

Fig. 4 Pictures of nucleus staining effect of ray parenchyma cells in different parts of *Acacia melanoxylon*

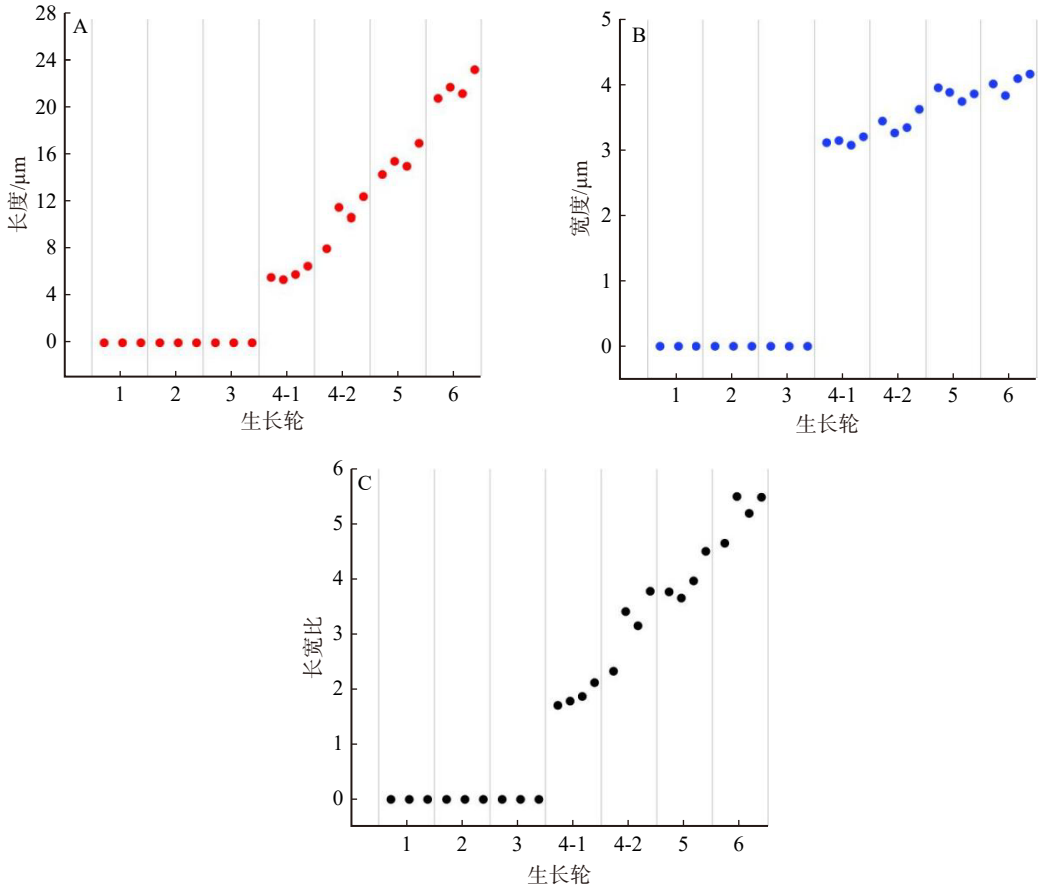


图 A 为细胞核长度变化，B 为细胞核宽度变化，C 为细胞核长宽比变化。其中 4-1 为第 4 生长轮靠近心材部分，4-2 为第 4 生长轮靠近边材部分。

图 5　黑木相思木质部不同部位射线薄壁细胞细胞核的形态指标统计

Fig. 5　Statistical analysis of morphological indicators of nuclei in ray parenchyma cells of different parts of xylem in *Acacia melanoxylon*

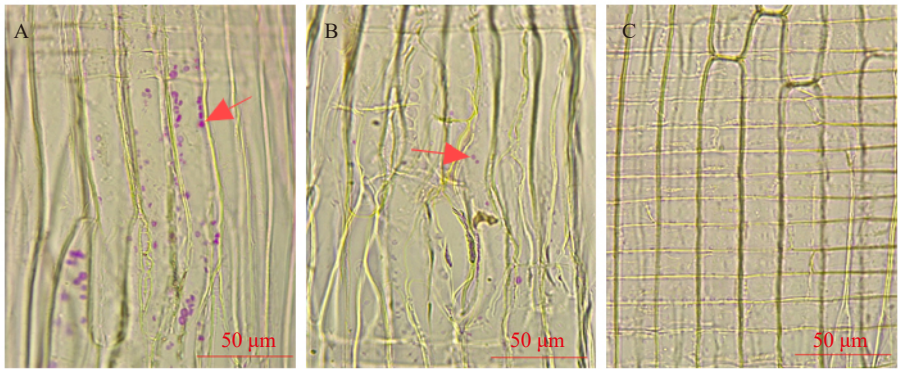


图 A～C 分别为第 6、4、3 生长轮还原糖在 40 倍镜下观察效果图。

图 6　黑木相思木质部不同部位射线薄壁细胞还原糖染色效果图

Fig. 6　Pictures of reduced sugar staining effect in ray parenchyma cells of different parts of xylem of *Acacia melanoxylon*

类和香豆素类化合物，其化学结构见图 7。黑木相思边材、过渡材和心材的酚类化合物含量分别为 3.25、26.93 和 45.80 mg/g，黄酮类化合物含量分别为 0.50、6.29 和 16.13 mg/g，心材含量高于边材（图 8）。图 9 展示了黑木相思 21 种酚类物质在心材和边材的峰面积。其甲醇提取物中的主要酚类成分为二氢槲皮素、圣草酚、伞形酮、3-甲氧基木犀草素和槲皮素。

黑木相思心材的总酚和总黄酮含量明显高于边材，酚类化合物从边材向心材不断积累，其心材形成类型属于胡桃型[10]。对黑木相思特征代谢物在边材、过渡材和心材相对含量变化研究表明，木质部心材次生代谢物的相对含量在过渡区突然上升（图 10）。Zhang 等[4]的研究发现，黑木相思边材中少量酚类物质存在于射线薄壁细胞中，过渡区中射线薄壁细胞

表 1 UPLC-MS/MS 鉴定黑木相思木材甲醇提取物中的酚类物质

Tab. 1 Identification of phenolics in methanolic extract of *Acacia melanoxylon* by UPLC-MS/MS

编号No.	离子模式	保留时间/min	分子式	理论分子量	实测分子量	二级质谱碎片离子质荷比	化合物
1	$[M+H]^+$	9.763	$C_{16}H_{12}O_5$	285.075 96	285.076 05	285.075 90、270.052 28、229、225、167	黄豆黄素[19−20]
2	$[M+H]^+$	8.506	$C_{15}H_{10}O_7$	303.050 29	303.050 35	257.044 49、285.038 36、275.052 83、247.059 40、165.018 83	槲皮素[21]
3	$[M+H]^+$	8.639	$C_{15}H_{10}O_6$	287.055 33	287.055 39	287.055 05、153.018 36、257.044 28、	木犀草素[22]
4	$[M+H]^+$	8.635	$C_{15}H_{12}O_5$	273.076 05	273.076 14	147.044 24、153.018 36、119.049 56、179.034 18、231	柚皮素[23]
5	$[M+H]^+$	9.419	$C_{15}H_{10}O_5$	271.060 27	271.060 42	147.044 71、153.069 35、253.049 90、243.064 68、227.070 47	芹菜素[24]
6	$[M-H]^-$	6.676	$C_{15}H_{12}O_7$	303.051 09	303.051 00	285.040 04、125.023 12、178.997 51、151.002 58	二氢槲皮素[25]
7	$[M-H]^-$	9.604	$C_{15}H_{14}O_5$	273.076 81	273.076 81	167.033 87、123.043 85、273.076 48	根皮素[26]
8	$[M+H]^+$	12.353	$C_{15}H_{22}O_2$	235.169 48	235.169 53	179.106 72、57.070 78、123.042 08	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛[27]
9	$[M+H]^+$	9.799	$C_{17}H_{14}O_6$	315.086 70	315.086 49	315..086 52、300.063 11、255.101 79、285.112 40	荼麻素
10	$[M+H]^+$	8.767	$C_{16}H_{12}O_7$	317.066 04	317.066 19	302.042 27、301.107 27、274.046 72、137.023 06、228.042 11	3-甲氧基木犀草素
11	$[M+H]^+$	9.512	$C_{15}H_{12}O_4$	257.080 96	257.081 05	137.023 45、147.044 19、239.070 14、211.075 61、242.057 48	异甘草素[28]
12	$[M+H]^+$	7.211	$C_{15}H_{10}O_4$	255.065 43	255.065 41	199.075 41、181.064 82、227.070 25、237.054 63	黄豆苷元[20]
13	$[M+H]^+$	0.837	$C_7H_8O_3$	141.054 79	141.054 82	81.034 25、53.039 53、109.028 92、127.039 17、86.068 77	2-甲氧基间苯二酚
14	$[M+H]^+$	9.342	$C_{16}H_{12}O_7$	317.065 92	317.066 04	302.042 02、285.039 36、257.045 41、273.075 78	异鼠李素[21]
15	$[M+H]^+$	6.129	$C_6H_6O_3$	127.039 22	127.039 22	109.028 87、81.034 20、53.039 49	邻苯三酚
16	$[M+H]^+$	12.817	$C_9H_6O_3$	163.038 97	163.038 96	135.044 22、119.019 34	伞形酮
17	$[M+H]^+$	9.534	$C_{16}H_{12}O_6$	301.070 89	301.071 11	301.070 98、286.047 33、183.079 82	4′-甲基木犀草素
18	$[M+H]^+$	7.438	$C_{15}H_{14}O_5$	275.091 61	275.091 61	197.059 75、215.070 24、135.044 24、133.028 59、169.065 26	3,3′, 5,5′-四羟基-4-甲氧基芪
19	$[M+H]^+$	12.725	$C_9H_8O_4$	181.049 77	181.049 77	149.023 42、163.038 97、121.028 96、181.083 91	阿司匹林
20	$[M+H]^+$	8.043	$C_{15}H_{12}O_6$	289.071 08	289.070 98	163.039 03、153.018 34、179.034 15、271.060 33、253.049 58	圣草酚[29]
21	$[M+H]^+$	9.430	$C_{15}H_{10}O_5$	271.060 52	271.060 55	253.049 29、243.069 04、215.930 54	木黄酮[21]

酚类物质含量增加，并且导管周围的轴向薄壁细胞开始形成酚类物质；在心材中，射线薄壁细胞及导管周围的轴向薄壁细胞积累了大量的酚类物质。

结合本研究中薄壁细胞的生理变化情况，推测黑木相思心材物质积累主要发生在第 4 生长轮的射线薄壁细胞和导管周围的轴向薄壁细胞中，且主要积累的心材物质为酚类化合物。然而，代谢物的累积是细胞衰老的代谢表现，并非导致细胞死亡的直接原因[13]。

3 结　　论

为了深入探究黑木相思心材形成的生理和化学基础，本研究分析了黑木相思心材形成过程中细胞生理活性和代谢产物的变化，并鉴定了木质部提取物的主要成分。研究揭示心材形成的关键生理和化学特征，为黑木相思心材的高效利用提供理论基础。主要研究结论有以下 3 点。

（1）在木质部从边材逐渐过渡至心材的进程中，细胞核、淀粉粒以及还原糖在形态和数量上发生了显著改变。细胞核数量持续减少，长宽比不断变小，形态从长梭形逐步转变为圆形，并最终在第 3 生长轮完全消失，这一系列变化直观反映出细胞内部生理活动的复杂调整与重构。淀粉粒和还原糖主要分布于射线薄壁细胞周围，其数量随着木质部的发育逐渐降低，同样在第 3 生长轮彻底消失，表明细胞内的能量代谢与物质存储模式发生了根本性转变。

（2）在化学成分分析方面，研究明确了黑木相思边材、过渡材以及心材在总酚与总黄酮含量上存在

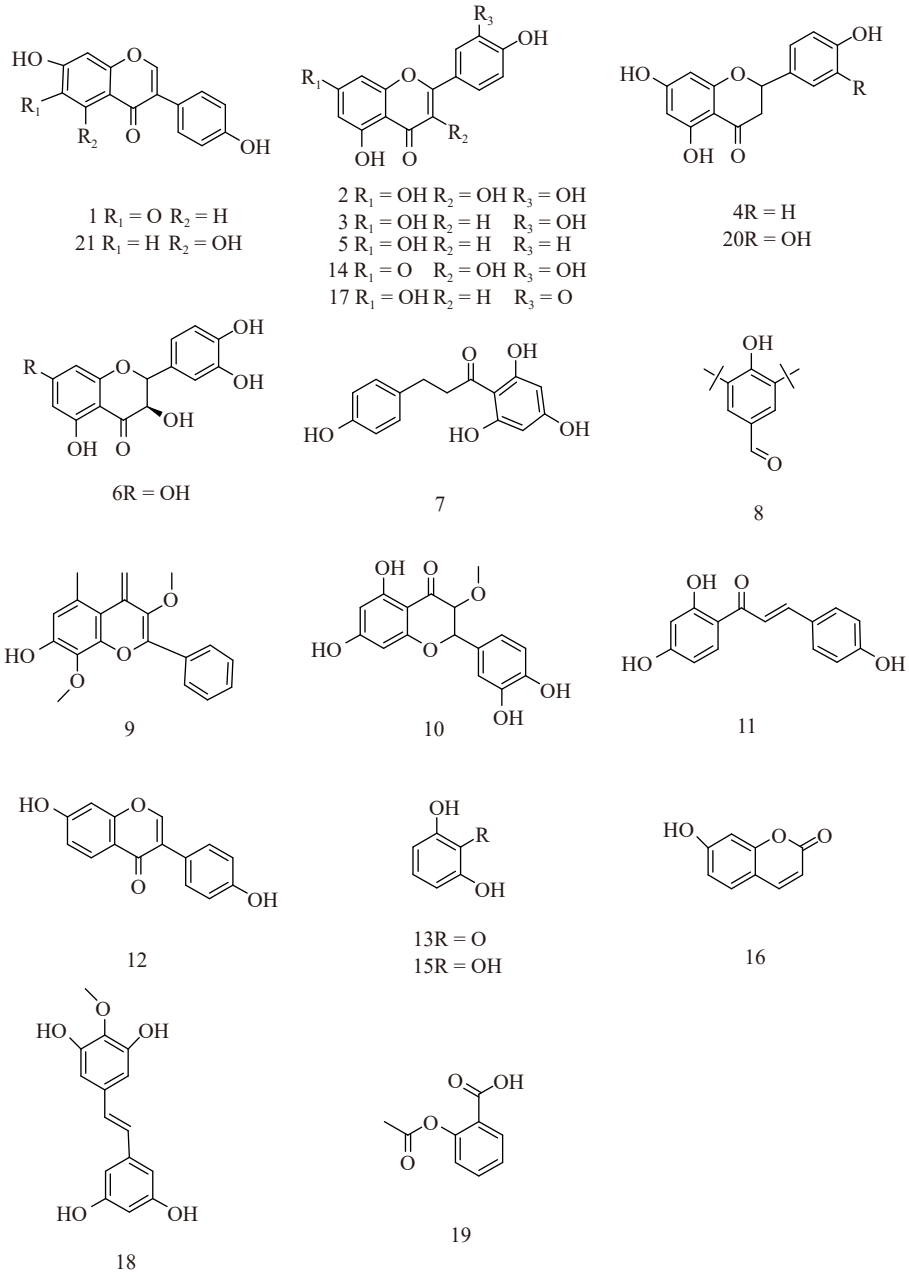


图 7　黑木相思心边材提取物中酚类化合物的化学结构

Fig. 7　Chemical structure of phenolic compounds in *Acacia melanoxylon* heartwood and sapwood extract

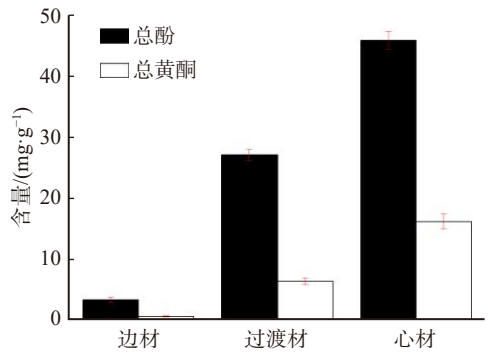


图 8　黑木相思边材、过渡材、心材总酚和总黄酮含量对比

Fig. 8　Comparison of total phenol and flavonoid contents in *Acacia melanoxylon* sapwood, transition wood and heartwood

的显著差异。其总酚含量分别为 3.25、26.93、45.80 mg/g; 总黄酮含量分别为 0.50、6.29、16.13 mg/g。心材的总酚、总黄酮含量明显高于边材。

(3)利用 UPLC-MS/MS, 分别鉴定出心边材提取物中相对含量较高的 5 种物质, 并从黑木相思甲醇提取物中成功鉴定出 21 种酚类成分, 主要为黄酮类、酚酸类、单宁类、二苯乙烯类以及香豆素类。其中, 二氢槲皮素、圣草酚、伞形酮和 3-甲氧基木犀草素等酚类化合物在提取物中相对含量较高。

本研究通过系统的生理和化学分析, 揭示了黑木相思心材形成过程中的关键变化, 为心材形成机制提供了重要理论基础。研究结果不仅丰富了心材形成领域的科学知识, 而且对于黑木相思这一特色速生心材树种而言, 其心材形成机制的研究对于提升木材品质和利用效率具有重要意义。然而, 研究

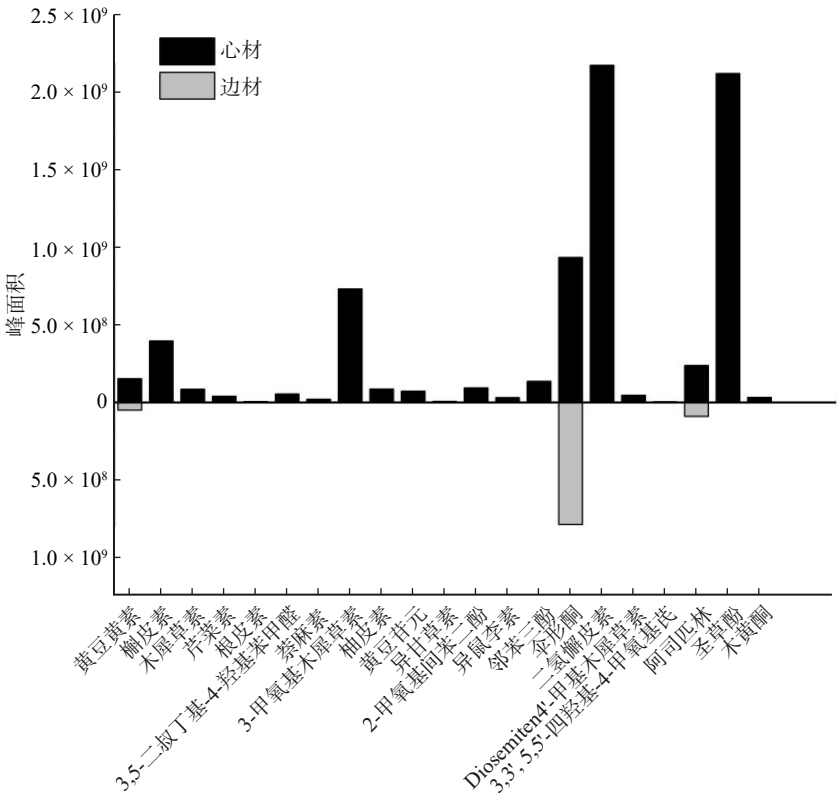


图 9 黑木相思心材和边材 21 种酚类化合物峰面积

Fig. 9 Peak area of 21 phenolic compounds in *Acacia melanoxylon* heartwood and sapwood

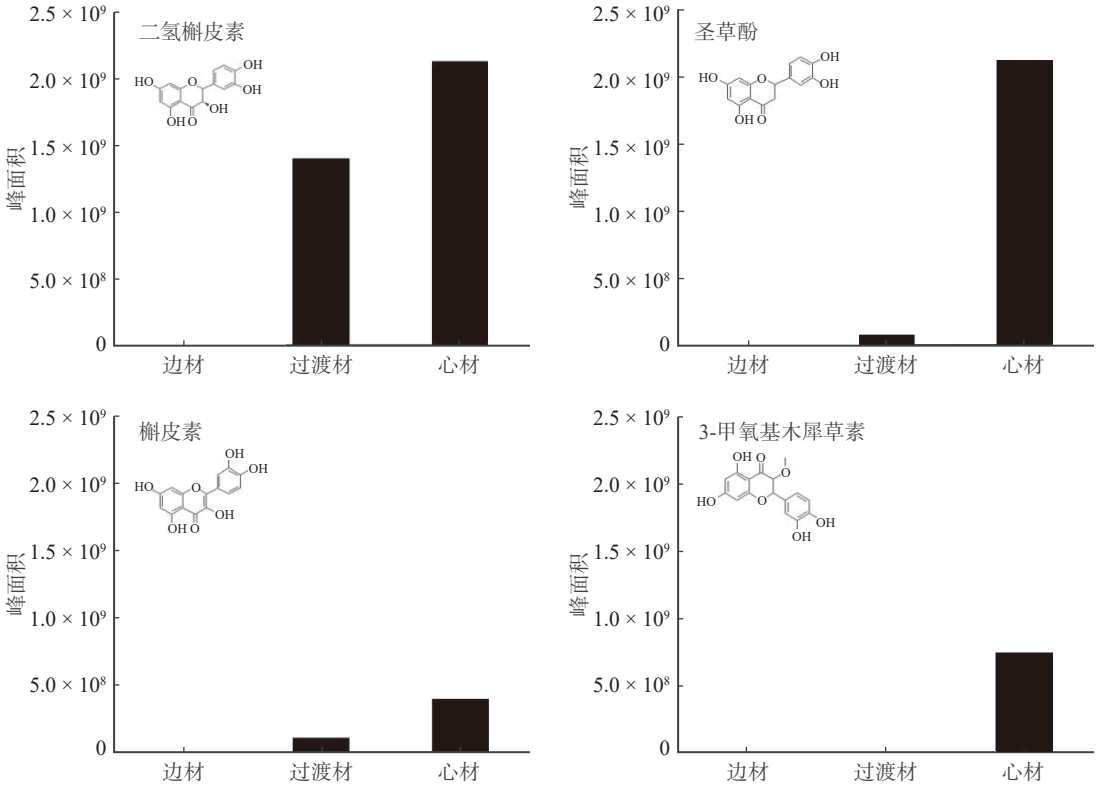


图 10 黑木相思次生代谢物含量变化

Fig. 10 Content changes of secondary metabolites in *Acacia melanoxylon*

的局限性在于对心材形成过程中基因表达和蛋白质组学的深入分析不足。尽管对心边材提取物进行了初步鉴定，但尚未充分将其与心材形成机制紧密联系起来。未来研究可进一步探索心材形成的关键基

因和蛋白质调控机制，结合多组学技术，全面解析心材形成的分子基础，从而深入理解心边材提取物鉴定结果在心材形成机制中的具体作用。此外，结合实际应用需求，研究心材颜色变化的调控机制，有望为木材品质改良和可持续利用提供新方向。

参 考 文 献

[1] Huang Y, Liu L, Zhao M, et al. Test on ex vitro rooting technology of tissue culture seedlings of *Acacia melanoxylon*[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(1): 21−26.

[2] Aguilera A, Zamora R. Surface roughness in sapwood and heartwood of Blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.) machined in 90-0 direction[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2009, 67(3): 297−301.

[3] Machado J S, Louzada J L, Santos A J A, et al. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.)[J]. Materials & Design, 2014, 56: 975−980.

[4] Zhang R P, Zhang Z W, Yan C Z, et al. Comparative physiological, biochemical, metabolomic, and transcriptomic analyses reveal the formation mechanism of heartwood for *Acacia melanoxylon*[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 308.

[5] Nakaba S, Yamagishi Y, Sano Y, et al. Temporally and spatially controlled death of parenchyma cells is involved in heartwood formation in pith regions of branches of *Robinia pseudoacacia* var. *inermis*[J]. Journal of Wood Science, 2012, 58(1): 69−76.

[6] Nakaba R, Fukatsu E. Seasonal variation of heartwood formation in *Larix kaempferi*[J]. Tree Physiology, 2012, 32(12): 1497−1508.

[7] Arakawa I, Funada R, Nakaba S. Changes in the morphology and functions of vacuoles during the death of ray parenchyma cells in *Cryptomeria japonica*[J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(3): 177−185.

[8] Song K, Liu B, Jiang X, et al. Cellular changes of tracheids and ray parenchyma cells from cambium to heartwood in *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2011, 23(4): 478−487.

[9] Gartner B L, Baker D C, Spicer R. Distribution and vitality of xylem rays in relation to tree leaf area in Douglas-fir[J]. IAWA Journal, 2000, 21(4): 389−401.

[10] Chen S Y, Yen P L, Chang T C, et al. Distribution of living ray parenchyma cells and major bioactive compounds during the heartwood formation of *Taiwania cryptomerioides* Hayata[J]. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2018, 38(2): 84−95.

[11] Spicer R. Symplasmic networks in secondary vascular tissues: parenchyma distribution and activity supporting long-distance transport[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(7): 1829−1848.

[12] Nakaba S, Arakawa I, Morimoto H, et al. Agatharesinol biosynthesis-related changes of ray parenchyma in sapwood sticks of *Cryptomeria japonica* during cell death[J]. Planta, 2016, 243(5): 1225−1236.

[13] Ma R K, Luo J, Wang W J, et al. Changes in the physiological activity of parenchyma cells in *Dalbergia odorifera* xylem and its relationship with heartwood formation[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 10.

[14] Tham M W, Liew K C. Influence of different extraction temperatures and methanol solvent percentages on the total phenols and total flavonoids from the heartwood and bark of *Acacia auriculiformis*[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2014, 72(1): 67−72.

[15] Mishra G, Collings D A, Altaner C M. Cell organelles and fluorescence of parenchyma cells in *Eucalyptus bosistoana* sapwood and heartwood investigated by microscopy[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2018, 48: 10.

[16] Wen L L, Chen S X, Wei P L, et al. Morphological, physiological, biochemical and metabolite analyses of parenchyma cells reveal heartwood formation mechanism of *Schima superba*[J]. Forests, 2024, 15(6): 16.

[17] Elisabeth M, Huttunen S, Heikkilä H, et al. Trends in European forest tree physiology research: cost action E6: EUROSILVA[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001.

[18] 周凡, 高鑫, 付宗营, 等. 黑木相思木材化学组分对其颜色株内变异的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(6): 42−50.
Zhou F, Gao X, Fu Z Y, et al. Effect of chemical components on wood color variation of *Acacia melanoxylon*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(6): 42−50.

[19] 孙建锋, 董文婷, 陈丽艳, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS 分析人参豆豉复合发酵物化学成分 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(6): 1417−1429.
Sun J F, Dong W T, Chen L Y, et al. Analysis of chemical constituents of Ginseng-Douchi compound fermentation products based on UPLC-Q-TOF-MS[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(6): 1417−1429.

[20] Wu Q L, Wang M F, Sciarappa W J, et al. LC/UV/ESI-MS analysis of isoflavones in edamame and tofu soybeans[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(10): 2763−2769.

[21] Avula B, Katragunta K, Wang Y H, et al. Chemical profiling and UHPLC-QToF analysis for the simultaneous determination of anthocyanins and flavonoids in *Sambucus berries* and authentication and detection of adulteration in elderberry dietary supplements using UHPLC-PDA-MS[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 110: 17.

[22] Qiao X, He W N, Xiang C, et al. Qualitative and quantitative analyses of flavonoids in *Spirodela polyrrhiza* by high-performance liquid chromatography coupled with mass spectrometry[J]. Phytochemical Analysis, 2011, 22(6): 475−483.

[23] 刘渝辰, 余迎利, 甘思逸, 等. 联合 UPLC-QTOF-MS 与 HS-SPME-GC-MS 测定赣南脐橙果肉化学成分 [J]. 食品科学, 2023, 44(14): 216−228.

Liu Y C, Yu Y L, Gan S Y, et al. Identification of chemical components in Gannan navel orange pulp by UPLC QTOF-MS coupled with HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2023, 44(14): 216−228.

[24] 昝立峰, 杨香瑜, 张蕾, 等. UPLC-Q-TOF/MS 技术结合网络药理学系统分析君迁子的抗炎活性成分 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 264−274.
Zan L F, Yang X Y, Zhang L, et al. Systematic analysis of anti-inflammatory active components in *Diospyros lotus* fruit using UPLC-Q-TOF/MS combined with network pharmacology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 264−274.

[25] Santos S A O, Villaverde J J, Freire C S R, et al. Phenoliccomposition and antioxidant activity of *Eucalyptus grandis, E. urograndis* (*E. grandis* × *E. urophylla*) and *E. maidenii* bark extracts[J]. Industrial Crops and Products, 2012, 39: 120−127.

[26] Santos S A O, Vilela C, Freire C S R, et al. Ultra-high performance liquid chromatography coupled to mass spectrometry applied to the identification of valuable phenolic compounds from *Eucalyptus* wood[J]. Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2013, 938: 65−74.

[27] Meyer L F, Shah D K. Development and validation of an LC-MS/MS method for tyrphostin A9[J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2019, 9(3): 163−169.

[28] 马若克. 降香黄檀叶抽提物主要化学成分研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2023.
Ma R K. The main chemical composition of *Dalbergia odorifera* t. Chen leaves extraction[D]. Nanning: Guangxi University, 2023.

[29] Iijima Y, Suda K, Suzuki T, et al. Metabolite profiling of chalcones and flavanones in tomato fruit[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2008, 77(1): 94−102.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 曹金珍）