

植物次生代谢产物的生物合成与生物活性研究

甘志凯

南昌理工学院, 江西 南昌 330044

摘要: 植物次生代谢产物是自然界中极具生物活性和多样性的化合物, 它们赋予植物适应复杂环境、抵御病原体的能力, 并在人类健康、药物研发及食品工业中展现出巨大潜力。这些化合物的生物合成途径错综复杂, 受到基因与环境因素的共同影响, 体现了植物在进化中的生物适应性。从抗氧化、抗菌到抗癌, 这些产物的生物活性为医药、农业、化妆品等领域提供了天然解决方案, 展现了广阔的研发前景。深入研究其合成机制与活性, 有助于理解自然界的化学多样性, 推动植物资源的可持续利用和技术创新。

关键词: 次生代谢产物; 生物合成; 抗氧化; 环境因素; 生物活性

Research on Bio-synthesis and Bio-activity of Plant Secondary Metabolites

Gan,Zhikai

Nanchang Institute of Tochnology, Nanchang, Jiangxi, 330044, China

Abstract: Plant secondary metabolites are compounds with immense biological activity and diversity in nature. They endow plants with the ability to adapt to complex environments and resist pathogens, and they exhibit great potential in human health, drug development, and the food industry. The bio-synthetic pathways of these compounds are intricate and influenced by both genetic and environmental factors, reflecting the biological adaptability of plants in evolution. From antioxidant, antibacterial, to anticancer activities, these metabolites provide natural solutions for medicine, agriculture, cosmetics, and other fields, demonstrating broad research and development prospects. In-depth study of their synthetic mechanisms and activities will help us understand the chemical diversity of nature and promote the sustainable utilization of plant resources and technological innovation.

Keywords: Secondary metabolites; Biosynthesis; Antioxidant; Environmental factors; Biological activity

DOI: 10.62639/sspis46.20240103

引言

植物次生代谢产物, 虽不直接参与能量代谢, 却在植物生态适应、抗逆及与环境的交互中扮演关键角色。这些通过特定代谢途径合成的化合物, 近年来因其生物活性备受瞩目。研究显示, 它们在抗氧化、抗菌、抗癌等方面拥有巨大潜力。次生代谢产物的生物合成受复杂基因调控与外界因素共同影响。深究这些机制, 展现了植物代谢的错综复杂性, 更为新药和天然化合物的研发提供了理论支撑。

一、植物次生代谢产物的种类与特性

(一) 酚类化合物

酚类化合物, 作为植物次生代谢的杰出代表, 凭借其结构多样性和广泛的生物活性而引入瞩目。这些化合物, 如黄酮类、鞣质和木质素, 主要存在于植物的叶、果实、种子及树皮中。其卓越的抗氧化能力, 通过清除自由基, 有效延缓植物细胞衰老并抵御外界环境压力。特别是黄酮类, 以其抗炎、抗病毒和抗肿瘤等多重药理作用, 成为天然药物和保健品的瑰宝。鞣质则展现出防腐与收敛双重功效, 既助植物抵御微生物侵害, 又在中药和食品工业中大放异彩。木质素, 作为植

物细胞壁的主要组分, 赋予植物坚固之躯, 更在抵御病原菌入侵时发挥关键作用。

(二) 萜类化合物

萜类化合物, 以异戊二烯为基本单位, 衍生出众多结构复杂的次生代谢产物, 在植物界中广泛存在。它们具有多样的生物功能, 包括挥发油、树脂、天然橡胶等。这类化合物的一个显著特征是强烈香气, 使植物能通过挥发性萜类吸引传粉者、驱赶害虫, 从而参与防御与繁殖, 如薄荷醇、松香等典型萜类, 拥有抗菌、抗病毒、驱虫等多重生物活性。而树脂类萜类则助植物自我修复, 分泌树脂覆盖损伤处以防感染^[1]。天然橡胶作为一种高弹性材料, 在工业领域应用广泛。

(三) 生物碱

生物碱, 作为植物次生代谢产物, 具有高度生物活性和复杂结构, 通常含氮。它们集中分布于特定植物, 如罂粟、颠茄、麻黄等, 并因显著的药理活性和毒性而受到广泛关注。例如, 罂粟中的吗啡和可待因是医学领域广泛应用的强效镇痛剂, 但滥用可致成瘾。颠茄的阿托品可治疗心脏病、解除肌肉痉挛, 然其高剂量具中毒风险。麻黄中的麻黄碱, 强烈刺激, 常用于治疗哮喘和鼻塞, 但滥用会损害心血管系统。尽管生物碱药用价值极高, 其毒性和潜在副作用却需严格控制。

(稿件编号: IS-24-3-17013)

作者简介: 甘志凯 (1984-06), 男, 汉族, 江西樟树人, 南昌理工学院, 讲师职称, 教研室主任, 本科学历, 学士学位, 研究方向: 主要从事生物学教学及科学研究。

(四) 其他次生代谢产物

除酚类、萜类及生物碱外, 植物还产出醌类、内酯与苷类等多种次生代谢物, 均具关键生物活性及应用潜能。醌类以强大抗氧化、抗菌力著称, 于天然药物开发中大放异彩, 尤其在抗肿瘤领域前景广阔。内酯类则凭抗炎、抗病毒特质广为人知, 普遍存于药用植物, 为众多传统药物之活性成分。苷类, 由糖与非糖部组合而成, 拥有降血糖、抗癌及保护心血管等多重功能, 其分布与浓度因植物而异, 却在药用植物中举足轻重。这些次生代谢物之探研, 深化了我们对植物代谢复杂性的理解, 亦为新药与保健品研发提供了宝贵化学资源。

二、植物次生代谢产物的生物合成

(一) 生物合成的基本途径

植物次生代谢产物的生物合成途径, 如莽草酸、乙酸-丙二酸和甲羟戊酸途径, 在生物化学领域具有举足轻重的地位。莽草酸途径主要负责合成芳香族化合物, 如苯丙氨酸、酪氨酸等芳香族氨基酸, 并涉及酚类、黄酮类及生物碱等次生代谢产物的生成, 其中莽草酸激酶和莽草酸脱水酶是此途径的关键酶。而乙酸-丙二酸途径则主导脂肪酸和萜类化合物的合成, 以乙酰辅酶A为起点, 通过连续缩合形成长链脂肪酸; 在萜类合成中, 关键中间体为异戊二烯焦磷酸和法呢基焦磷酸^[2]。另一条重要的萜类合成通路是甲羟戊酸途径, 它通过生成异戊二烯单元来构建复杂的萜类分子。例如, 挥发油和树脂。这些途径均包含多个由特定关键酶催化的步骤, 且酶活性在合成过程中发挥调控作用。因此, 深入探究这些生物合成途径及其关键环节, 对于揭示植物代谢的复杂性至关重要, 同时也为通过生物技术提高次生代谢产物产量奠定了基础。

(二) 基因调控与生物合成

关键酶基因的激活或抑制, 受转录因子、非编码RNA、DNA甲基化等机制调节, 是基因表达调控的核心。以莽草酸途径为例, PAL基因(苯丙氨酸解氨酶)受特定转录因子调控, 响应生物或非生物胁迫, 上调以大量合成抗氧化物质。转录因子, 如MYB、bHLH、ERF等家族, 在次生代谢中扮演关键角色, 结合特定启动子区域, 调控相关基因表达。黄酮类化合物的合成便受MYB转录因子调控, 影响植物抗性与色素沉积。此外, miRNA和siRNA等非编码RNA也参与调控, 通过调节mRNA降解或翻译抑制, 影响代谢途径活跃度。这一复杂调控网络为次生代谢产物合成提供了多层次控制, 也展现了基因工程提高特定产物合成量的潜力。

(三) 环境因素对生物合成的影响

植物次生代谢产物的合成受内在基因与外界环境因素的共同调控。其中, 光照、温度、水分及营养状况为关键影响因素。光照, 尤其是其光质与光强, 能影响次生代谢途径的活跃度及产物积累, 如紫外线能刺激黄酮类化合物的合成, 助

植物抵御光氧化伤害; 蓝光与红光则对萜类和酚类合成起重要调控作用。温度亦影响次生代谢, 低温多抑制, 而高温则可能促进某些抗热次生代谢产物的生成, 如热激蛋白与生物碱。此外, 水分与营养状况亦不可忽视, 缺水时植物会增加黄酮类和鞣质等抗氧化物的合成以应对干旱; 营养不足时, 植物亦会调整次生代谢产物以适应环境, 如氮素缺乏时可能增加生物碱积累以提升防御能力。因此, 在农业生产中合理调控这些环境因素, 可优化次生代谢产物的产量与质量, 为农业及天然产物开发提供科学依据。

(四) 生物合成的进化意义

次生代谢产物在植物生态适应和进化中占据举足轻重的地位。这些产物助力植物适应特定环境、抵御生物胁迫, 并在漫长进化中固化为物种的标志性特征。例如, 酚类化合物对紫外线防御和病原菌抵抗至关重要, 使植物能在恶劣环境中生存。同样, 萜类化合物凭其挥发性和抗菌性, 有效吸引传粉者、驱赶害虫、防御病原体, 构成独特的化学防御系统。此外, 次生代谢产物的差异性和复杂性推动植物物种分化, 不同物种通过其多样性展现各异的生态适应性和抗性, 从而获得进化优势, 如生物碱的类型和含量差异, 反映了物种对特定生境和捕食者的适应过程^[3]。这种适应进化促进植物多样化, 为生态系统平衡奠定化学基础。因此, 深究次生代谢产物生物合成的进化意义, 对揭示植物多样性和生态适应性至关重要, 也为植物资源的可持续利用与保护提供科学指引。

三、植物次生代谢产物的生物活性

(一) 抗氧化活性

植物次生代谢产物因卓越的抗氧化活性备受科学界瞩目。其抗氧化机制涵盖自由基清除、脂质过氧化抑制及氧化还原反应调控等。自由基, 尤其是活性氧(ROS), 虽为体内代谢必然产物, 但过量积聚会触发氧化应激, 导致细胞受损与衰老。黄酮类、酚类及萜类化合物等次生代谢产物, 能有效中和自由基、阻断氧化链反应, 并通过调控内源性抗氧化酶活性, 强化细胞抗氧化防御, 减轻自由基对细胞膜及生物大分子的攻击, 如多酚类中的鞣质和木质素便能显著抑制脂质过氧化, 保护细胞膜完整性。在应用层面, 这些代谢产物的抗氧化特质使其在食品、化妆品等领域大放异彩。作为天然抗氧化剂, 它们不仅延长食品保鲜期、防止脂肪氧化, 更在化妆品中担当抗氧化护肤要角, 延缓衰老、抵御环境侵害。展望未来, 随着对其抗氧化机制的深入探索, 这些化合物在健康产品及药物研发中的潜力将更加巨大。

(二) 抗菌活性

植物次生代谢产物的抗菌活性备受瞩目, 这主要归功于其多重抗菌机制, 包括破坏细菌细胞壁与细胞膜、遏制细菌生长繁殖, 以及阻断其代谢途径。具体来说, 众多酚类和萜类化合物能改

变细菌细胞膜的通透性,致使细胞内容物外泄,细菌最终死亡。以黄酮类化合物为例,它们能与细菌细胞壁上的特定蛋白质结合,削弱细菌结构稳定性,从而遏制其生长。另外,某些生物碱则通过抑制细菌 DNA 和蛋白质的合成来阻断其繁殖。在应用层面,这些次生代谢产物的天然抗菌特性使其成为传统化学抗菌剂的有力替代品。鉴于当前抗生素耐药性问题日益严峻,对这类天然抗菌剂的研究与开发愈发受到重视。它们在食品保鲜中发挥着抑菌作用,有效延长食品保质期,同时也在天然药物和抗菌护理产品的生产中占据一席之地。值得一提的是,部分植物次生代谢产物已证实对多种抗药性病原菌有显著抑制作用,为抗菌药物研发开辟了新的路径。综上,植物次生代谢产物在抗菌药物研发和食品安全领域具有不可估量的应用前景。

(三) 抗癌活性

近年来,植物次生代谢产物因其显著的抗癌活性而成为肿瘤研究领域的热点。次生代谢产物通过多种机制发挥抗癌作用,包括诱导癌细胞凋亡、抑制癌细胞增殖、阻断癌细胞血管生成以及抑制癌细胞的侵袭和转移^[4]。以黄酮类化合物为例,它们通过激活细胞内的凋亡信号通路,促进癌细胞的程序性死亡,从而减少癌细胞的数量。同时,黄酮类化合物还能够通过抑制特定的蛋白激酶(如 PI3K/Akt 通路),阻止癌细胞的增殖。此外,许多酚类和萜类化合物可以抑制肿瘤细胞的血管生成过程,这对于肿瘤的生长和扩散至关重要。血管生成抑制剂能够有效减少癌细胞获得养分的途径,从而延缓肿瘤的进展。在抗癌领域的研究进展方面,近年来,越来越多的植物次生代谢产物被发现具有广泛的抗癌活性。例如,茶多酚已被证明能够有效抑制多种癌症细胞的生长,姜黄素也因其强大的抗氧化和抗炎特性成为了抗癌研究的热门对象。植物次生代谢产物的抗癌潜力使其成为癌症预防和治疗的重要资源,在药物开发中具有巨大的应用前景。

(四) 其他生物活性

除了抗氧化、抗菌和抗癌活性外,植物次生代谢产物还具有多种其他重要的生物活性。例如,抗炎活性是次生代谢产物中的一个重要功能。许多次生代谢产物通过抑制炎症因子的释放、减少氧化应激和降低炎症介质的生成,表现出显著的抗炎作用。萜类化合物如紫苏醇和某些生物碱通过阻断 NF- κ B 信号通路,能够抑制炎症反应,广泛应用于抗炎药物的开发。次生代谢产物的神经保护作用也得到了广泛关注。黄酮类和生物碱类化合物通过减轻氧化应激和抑制神经炎症,有助于预防神经退行性疾病,如阿尔茨海默症和帕金森症。这些化合物能够通过调节脑部氧化应激水平、减少炎症因子的产生,从而保护神经元不受损伤。此外,次生代谢产物还在降血糖、降血脂和抗辐射等领域展现出显著的生物活性。例如,黄酮类化合物已被证明具有显著的降血糖效果,通过调节葡萄糖代谢和提高胰岛素敏感性,对糖尿病具有潜在的治疗价值。苷类化合物则具有降

血脂的功能,有助于降低血液中的胆固醇水平,预防心血管疾病。次生代谢产物的多样性和广泛的生物活性,为在医学、保健、食品和化妆品领域的应用提供了丰富的资源和潜力。

四、植物次生代谢产物的生物合成与生物活性挑战与展望

在植物次生代谢产物的研究中,尽管近年来成果显著,但挑战仍存。次生代谢产物种类繁多、结构功能复杂,其生物合成途径错综交织,调控网络庞大。全面解析这些途径并理解其调控机制,难度极大。同时,这些产物的生物活性受结构、浓度及环境等多重因素影响,评估其活性及生物学效应充满挑战^[5]。传统研究方法耗时低效,难以揭示复杂机制。因此,如何高效利用现代技术,深入解析这些化学物质的生物合成与活性,成为当前的关键问题。展望未来,技术创新与学科融合将推动该领域更广阔发展。多组学技术将深入解析次生代谢途径,揭示调控网络;高通量筛选与精准检测技术将提升活性产物筛选与鉴定效率;合成生物学与代谢工程将实现规模化生产,推动产业化发展。为应对挑战、推动进展,需加强跨学科合作,整合资源优势。同时,技术创新至关重要,应推动新兴技术应用,提升科研人员技能。此外,需加速成果应用,通过产学研合作,推动技术转移,创造经济与社会价值。加强新兴领域研究,拓展应用范围,提升竞争力与实用价值。总之,该领域研究学术前景广阔,应用潜力巨大,通过合作、创新与应用,将取得更辉煌成就。

五、结语

植物次生代谢产物是自然界中珍贵的生物活性化合物,既体现了植物的环境适应智慧,又为人类带来了无限资源。它们展现出卓越的抗氧化、抗菌及抗癌潜力,成为药物研发的重要源泉。通过深入探索其生物合成与基因调控机制,并结合环境影响因素,科学家能够高效利用这些化合物,推动其在医药、农业及工业的广泛应用。随着分子生物学与生物技术的不断进步,植物次生代谢产物的研究将迎来更广阔的发展空间,为人类健康与环境问题的解决贡献新思维。

参考文献:

- [1] 甄梦缘,王丽芝,孙超. 脱落酸及其调控植物次生代谢产物生物合成的研究进展[J]. 天津中医药大学学报, 2024, 43(03): 259-267.
- [2] 朱璐,袁冲,刘义飞. 植物次生代谢产物生物合成基因簇研究进展[J]. 植物学报, 2024, 59(01): 134-143.
- [3] 崔雯,白雪松,王建,等. 脱落酸调控与植物抗病相关次生代谢产物生物合成的研究进展[J]. 植物医学, 2022, 1(06): 1-11.
- [4] 曾珍,陈万生,肖莹. 植物必需金属离子对药用植物次生代谢产物生物合成的作用[J]. 植物生理学报, 2022, 58(04): 597-606.
- [5] 李永康,马雪祺,冯婧娴,等. 细胞色素 P450 酶在植物次生代谢产物生物合成中的研究进展[J]. 分子植物育种, 2024, 22(07): 2176-2183.