

本期论文主要涵盖新型甜味蛋白和麦角硫因的生物合成与腊梅类黄酮的代谢调控, 彩叶草及浙麦冬植物应答镉污染, 蛋白激酶参与的植物抗病与新型农药的合成与防治应用, 植物对环境因子高盐、高温、干旱及氮素适应的研究等方面。

都浩 《生物工程学报》编委

(浙江大学, 杭州 310058)

## 生物合成与代谢调控

人类过度消费和依赖蔗糖、葡萄糖等糖类甜味剂已经导致了糖尿病、肥胖症等健康问题。与此同时, 化学合成甜味剂如阿斯巴甜、糖精钠、三氯蔗糖等也存在潜在的健康风险。甜味蛋白质是一种超强甜味的大分子蛋白类甜味剂, 最初发现于非洲热带植物的果实中。相较于传统的甜味剂, 甜味蛋白质具有更高的甜味强度, 同时具有天然、安全、绿色、富含营养等特点。因此, 甜味蛋白质被认为是未来食品与饮料行业中具有巨大潜力的新型甜味剂。卢尚阳等<sup>[1]</sup>综述了 8 种植物来源的甜味蛋白的甜味性质及其甜味产生的分子机制; 重点讨论了莫内林(monellin)、植物甜蛋白(brazzein)和索马甜(thaumatin)代表性甜味蛋白的基因工程、异源表达和分子改性进展, 总结了它们在不同宿主中的表达产率和甜味性质; 并对甜味蛋白质的研究、应用和产业化发展进行了展望, 为相关领域的研究提供了参考。

麦角硫因(ergothioneine, EGT)是一种由组氨酸衍生的稀有化合物, 具有稳定性和抗氧化性。最初研究人员从麦角菌的菌核中分离并鉴定出麦角硫因的分子结构, 如今麦角硫因作为一种强效的天然抗氧化剂和抗炎剂, 已被广泛应用于食品、化妆品和药品领域。食用菌是天然合成麦角硫因的主要生物来源。杨林雷等<sup>[2]</sup>对食用菌中麦角硫因的含量、生理功能、提取检测、合成基

因及途径、通过菌丝体发酵和工程菌构建生产麦角硫因等方面的研究进展进行了综述, 为食用菌麦角硫因的研究和开发提供了参考。

类黄酮是蜡梅中具有药理活性的重要成分, 研究蜡梅类黄酮的功效成分及药理活性的作用机制对于其合理开发和高效利用具有重要意义。周丹等<sup>[3]</sup>利用超高效液相色谱-串联质谱技术全面鉴定了蜡梅中的类黄酮组分, 结合网络药理学的方法揭示了蜡梅功效类黄酮的作用机制, 并通过分子对接实验验证了网络预测结果。他们进一步评估了不同品种蜡梅功效类黄酮的含量, 发现这些化合物能够稳定地与关键作用靶点结合, 表明其具有潜在的生物活性。蜡梅类黄酮代谢产物的药理活性作用机制复杂多样, 包括多成分、多靶点和多通路, 代谢组学和网络药理学的交叉应用为深入研究蜡梅的药理功效和治疗机制提供了理论依据, 从而更好地指导蜡梅种质资源的开发与利用。

类黄酮 3-O-糖基转移酶(flavonoid 3-O-glucosyltransferase, 3GT)是植物花青素糖苷化的关键酶。为研究杜鹃花中的 3GT 基因功能, 鄢毅铨等<sup>[4]</sup>从红比利时杜鹃中克隆了 *Rh3GT* 基因, 花瓣中 *Rh3GT* 的瞬时过表达显著提高了总花青素的含量; 体外酶活分析表明, *Rh3GT* 重组蛋白可以催化矢车菊素和 UDP-葡萄糖合成矢车菊素 3-O-葡萄糖苷。该研究为进一步探讨杜鹃花花青素生物合成的分子调控机制提供了基础数据, 并

为潜在的杜鹃花分子育种提供了理论支持。

## 植物应答镉污染

随着现代工农业的快速发展,土壤受到日益严重的重金属污染,其中镉(cadmium, Cd)是主要的重金属污染物之一。镉容易富集到农作物果实中,具有生物迁移强、累积性强和易被植物吸收的特点,对生态环境和人类健康造成潜在危害。侯亚男等<sup>[5]</sup>以金边彩叶草为研究对象,通过测定彩叶草的生理代谢和根系损伤程度,探究丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对彩叶草在镉胁迫下的影响;发现镉胁迫导致彩叶草细胞内超氧化物歧化酶、过氧化物酶以及过氧化氢酶的活性、丙二醛和脯氨酸含量上升;进一步研究表明,金边彩叶草接种 AMF 可以促进彩叶草次生代谢产物的积累,缓解根系损伤,并增强其对镉胁迫的耐受性。这一发现为利用丛枝菌根真菌改善植物在重金属污染环境下的生长状况提供了重要的理论依据。

土壤镉污染也严重影响浙麦冬的生产,浙麦冬(*Ophiopogon japonicus*)作为一种多功能植物,在传统医学和环境修复领域均有很高的应用价值。王智慧等<sup>[6]</sup>探讨浙麦冬在不同浓度镉胁迫下的镉富集规律,鉴定和分析浙麦冬重金属转运蛋白 HMA 家族成员;研究发现浙麦冬富集系数高达 2.75,在土壤镉污染修复中显示出良好的镉富集潜力。基于大量转录组数据,作者发现 *OjHMA1*、*OjHMA2*、*OjHMA3* 和 *OjHMA7* 等基因在镉离子的吸收和转运过程中发挥核心作用。进一步分析发现这些基因的关键保守序列在金属离子配位和稳定中的重要作用。该研究结果不仅为通过基因工程提高浙麦冬对镉吸附和耐受性提供了分子靶点,也为培育具有镉吸附能力强的新品种提供了理论基础。

浙麦冬作为一种重要的药用植物,其块根中富含黄酮类等生物活性成分,具有抗炎、抗氧化和免疫调节的作用。为了探究镉胁迫对浙

麦冬黄酮类化合物积累及其生物合成途径的影响,高耸等<sup>[7]</sup>通过不同浓度的镉胁迫处理浙麦冬植株,并结合代谢组学和转录组学分析手段,揭示了其代谢特征;结果发现镉胁迫处理后,浙麦冬中黄酮类化合物含量显著增加,且随着镉浓度的增加而进一步增加;基因-代谢物调控网络分析表明, *4CL* 和 *CHI* 基因与多种黄酮类代谢物之间存在显著的正相关性,提示这 2 个基因可能通过调控黄酮类代谢物的合成来增强植物对镉胁迫的耐受性。这些结果为在镉污染环境栽培和利用药用植物提供了理论支持。

## 植物抗病与防治

真核细胞 3-磷酸肌醇依赖性蛋白激酶 1 (3-phosphoinositide-dependent protein kinase 1, PDK1) 是一种保守的丝氨酸/苏氨酸激酶。为了研究 *PDK1* 同源基因在四倍体烟草抗病中的作用,任茜薇等<sup>[8]</sup>对基因编辑创制的 *NtPDK* 多突变体株系进行了细胞死亡及抗病性分析,发现部分敲除 *NtPDK1a/1b/1c/1d* 虽然可延迟瞬时过表达激活态及大豆 *GmMEKK1* 诱导的超敏反应细胞死亡,但可显著增强烟草对假单胞杆菌以及烟草花叶病毒的抗性,而该抗性的增强与 *Ntpdk1a/1b/1c/1d* 部分敲除株系中 *NtMPK6*、*NtMPK3* 和 *NtMPK4* 激活程度的显著增强相关联。该研究表明 *NtPDK1a/1b/1c/1d* 正向调控细胞死亡,但可能通过抑制 MAPK 途径的激活而负向调控烟草免疫反应。

生物合成的纳米硒(selenium nanoparticles, SeNPs)具有独特的物理、化学和生物学特性,可以应用于植物抗病。为了开发将硒盐还原为 SeNPs 的菌种,张琪等<sup>[9]</sup>以阿维链霉菌(*Streptomyces avermitilis*)为研究对象,通过添加一定量的  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ,借助多种技术对菌体及合成的 SeNPs 进行物理化学表征分析,同时选用枸杞根腐病主要病原真菌——尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporium*)对其抗菌活性进行研究。结果表明,阿维链霉菌可将  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  转化成

SeNPs, 具有良好的稳定性和抗菌活性, 对枸杞根腐病病原菌有显著抑制活性。该研究在 SeNPs 制备和枸杞根腐病防治方面具有潜在的应用价值, 并为全面认识微生物产 SeNPs 机理及生物源纳米硒的综合利用提供了参考。

双链 RNA (double-stranded RNA, dsRNA) 农药是一种绿色环保的农药, 通过外源添加特异性靶向病虫害的 dsRNA 来触发 RNA 干扰机制, 抑制病原菌或害虫的关键基因表达, 从而实现对特定病虫害的有效控制。虽然双链 RNA 农药具有较强的特异性和高效的基因沉默能力, 但目前仍存在生产成本高等问题。利用工程菌株生产 dsRNA 是一种可行的策略, 然而缺乏具有经济效益的 dsRNA 生产工程菌株。崔锦程等<sup>[10]</sup>对利用微生物生产 dsRNA 的研究进展和生产策略进行了综述, 为 dsRNA 生产提供了有益参考。

## 植物对环境适应的研究

植物生长在自然环境中对环境因子如温度、水分、盐分的变化非常敏感, 解析植物对环境因子的适应机制是植物学研究的热点和难点。前期研究发现水稻 *OsSPL10* 能够调控水稻表皮毛发育, 并与抗盐、耐干旱等性状相关。轩强兵等<sup>[11]</sup>利用 CRISPR/Cas9 技术, 对河南省沿黄稻区 3 个粳稻品种的 *OsSPL10* 基因进行编辑, 获得 6 种 *spl10* 突变体; 通过分子生物学结合生理生化分析发现, 这 6 种 *spl10* 突变体耐盐能力显著提高, 为沿黄水稻抗盐生物育种提供了新的种质资源。

黄瓜作为一种全球广泛栽培的蔬菜作物, 在面临高温等逆境胁迫时, 其生长发育受到影响, 甚至会导致产量和品质下降。植物中丝裂原活化蛋白激酶 MAPK 家族在逆境响应中扮演着重要角色, 然而黄瓜 *MPK4* 基因的功能及逆境响应机制研究尚未见报道。纪光昊等<sup>[12]</sup>在研究黄瓜 *CsMPK4* 基因时发现, 转基因超表达 *CsMPK4* 的黄瓜植株表现出矮化健壮、卷须变短减少、幼苗更耐高温的特点; 进一步的分子

生物学实验证实了 *CsMPK4* 与缬氨酸-谷氨酰胺家族因子 *CsVQ10* 存在蛋白互作, 表明 *CsVQ10* 可能与 *CsMPK4* 协同参与黄瓜高温等逆境胁迫的响应。这项研究为进一步探讨黄瓜 *CsMPK4* 在逆境应答机制中的作用以及黄瓜抗逆育种提供了基础。

梅花作为一种药食同源的生态经济型树种, 在我国北方干旱半干旱地区的推广栽培受到了干旱的限制。王梓煦等<sup>[13]</sup>研究以‘美人’梅为试验材料, 测定了渗透调节物质、光合参数和抗氧化酶活性等光合生理指标在干旱条件下的变化, 并利用转录组测序技术探究了梅花在干旱胁迫下的内在调控机制; 发现随着干旱胁迫程度的增加, ‘美人’梅的叶绿素 a、b 含量以及可溶性蛋白含量呈现先上升后下降的趋势, 净光合速率、气孔导度和蒸腾速率以及最大光化学效率、实际光化学电子产量、光化学猝灭系数、相对电子传递效率均显著下降, 同时丙二醛含量、抗氧化酶如超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶和渗透调节物质积累显著增强; 转录组分析显示梅花可能通过多个转录因子调节抗旱相关基因表达, 促进蔗糖等渗透调节物质积累, 提高超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (peroxidase, POD) 等抗氧化酶活性, 减弱逆境胁迫下活性氧的危害, 从而保护膜系统的结构和功能以抵御干旱。该研究为进一步挖掘梅花响应干旱胁迫的候选基因和抗旱育种提供了理论参考。

花生是我国广泛种植的豆科油料作物, 其与根瘤菌形成共生根瘤, 能将空气中  $N_2$  转化为可吸收的氨态氮。在结瘤固氮过程中, 氮磷营养发挥关键作用, 硝酸盐诱导的转录因子参与氮和磷信号整合, 通过抑制硝酸盐转运蛋白的转录水平响应植物的氮吸收。然而, 豆科植物结瘤过程中 NIGT1 的作用尚不清楚。李晓亮等<sup>[14]</sup>发现了一个在花生根瘤中高表达的 NIGT 家族成员 AhNIGT1.2, 研究表明 AhNIGT1.2 正向调控花生结瘤。AhNIGT1.2 可能通过影响硝酸盐转运、

硝酸盐响应等通路来调控花生的结瘤过程。这一研究对于揭示氮磷营养调控豆科植物结瘤固氮的分子机制以及创制在高氮环境下高效结瘤固氮的豆科作物具有重要意义。

## REFERENCES

- [1] 卢尚阳, 常诗瑜, 王语晴, 刘波. 甜味蛋白质基因工程与分子改性研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 559-573.  
LU Shangyang, CHANG Shiyu, WANG Yuqing, LIU Bo. Advances in genetic engineering and molecular modification of sweet-tasting proteins[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 559-573 (in Chinese).
- [2] 杨林雷, 沈真辉, 罗祥英, 李荣平, 李荣春. 食用菌麦角硫因的研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 574-587.  
YANG Linlei, SHEN Zhenhui, LUO Xiangying, LI Rongping, LI Rongchun. Recent progress in ergothioneine of edible fungi[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 574-587 (in Chinese).
- [3] 周丹, 赵彦贝, 王梓煦, 李庆卫. 基于代谢组学和网络药理学的蜡梅类黄酮组分评价[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 602-617.  
ZHOU Dan, ZHAO Yanbei, WANG Zixu, LI Qingwei. Evaluation of flavonoids in *Chimonanthus praecox* based on metabolomics and network pharmacology[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 602-617 (in Chinese).
- [4] 鄢毅铖, 吴泽航, 姜宇航, 胡高源, 杨宇杰, 谢晓鸿, 吴月燕, 贾永红. 比利时杜鹃类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的克隆、原核表达及功能分析[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 881-895.  
YAN Yicheng, WU Zehang, JIANG Yuhang, HU Gaoyuan, YANG Yujie, XIE Xiaohong, WU Yueyan, JIA Yonghong. Cloning, prokaryotic expression, and functional validation of flavonoid 3-O-glycosyltransferase gene (*Rh3GT*) from *Rhododendron hybridum* Hort[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 881-895 (in Chinese).
- [5] 侯亚男, 江帆, 周舒扬, 陈丁尹, 朱怡杰, 缪怡宁, 岑钢, 王怡芳, 吴敏, 刘鹏. 镉胁迫下丛枝菌根真菌对彩叶草生理代谢和根系损伤的影响[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 680-692.  
HOU Yanan, JIANG Fan, ZHOU Shuyang, CHEN Dingyin, ZHU Yijie, MIAO Yining, CENG Kai, WANG Yifang, WU Min, LIU Peng. Arbuscular mycorrhizal fungi improve physiological metabolism and ameliorate root damage of *Coleus scutellarioides* under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 680-692 (in Chinese).
- [6] 王智慧, 牛二利, 高远亮, 朱倩, 叶子弘, 俞晓平, 赵倩, 黄俊. 浙麦冬 HMA 基因家族鉴定及镉胁迫响应分析[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 771-790.  
WANG Zhihui, NIU Erli, GAO Yuanliang, ZHU Qian, YE Zihong, YU Xiaoping, ZHAO Qian, HUANG Jun. Identification of HMA gene family and response to cadmium stress in *Ophiopogon japonicas*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 771-790 (in Chinese).
- [7] 高耸, 邱梦丽, 李晴, 赵倩, 牛二利. 代谢组与转录组联合分析镉胁迫下浙麦冬黄酮类化合物积累及生物合成途径[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 588-601.  
GAO Song, QIU Mengli, LI Qing, ZHAO Qian, NIU Erli. Integrated transcriptomics and metabolomics analysis of flavonoid biosynthesis in *Ophiopogon japonicum* under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 588-601 (in Chinese).
- [8] 任茜薇, 兰胡娇, 刘天瑶, 赵焕停, 赵雅婷, 张蕊, 刘建中. 部分敲除 *NtPDK1a/1b/1c/1d* 增强烟草抗病性[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 670-679.  
REN Qianwei, LAN Hujiao, LIU Tianyao, ZHAO Huanting, ZHAO Yating, ZHANG Rui, LIU Jianzhong. Partial knockout of *NtPDK1a/1b/1c/1d* enhances the disease resistance of *Nicotiana tabacum*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 670-679 (in Chinese).
- [9] 张琪, 李亚妮, 周荣娟, 秦佳圆, 岳思君. 阿维链霉菌合成纳米硒的物理化学表征及其对枸杞病原真菌的抑菌活性[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 693-705.  
ZHANG Qi, LI Yani, ZHOU Rongjuan, QING Jiayuan, YUE Sijun. Selenium nanoparticles synthesized by *Streptomyces avermitilis*: physical and chemical characteristics and inhibitory activity on a pathogen of *Lycium barbarum*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 693-705 (in Chinese).
- [10] 崔锦程, 崔浩, 卞小莹. 生产双链 RNA 工程菌的研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 546-558.  
CUI Jincheng, CUI Jie, BIAN Xiaoying. Research progress in the engineering strains for producing double-stranded RNA[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 546-558 (in Chinese).
- [11] 轩强兵, 周慧岗, 朱明兰, 王俊杰, 梁卫红. 基于 *OsSPL10* 编辑创制沿黄光叶耐盐水稻新种质[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 706-718.  
XUAN Qiangbing, ZHOU Huigang, ZHU Minglan, WANG Junjie, LIANG Weihong. Creation of new glabrous and salt-tolerant rice germplasm along the Yellow River by CRISPR-Cas9-mediated editing of *OsSPL10*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 706-718 (in Chinese).
- [12] 纪光昊, 鲁迁里, 余月, 王鹤冰, 汤青林. 黄瓜丝裂原活化蛋白激酶 *CsMPK4* 基因的功能鉴定[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 857-868.  
JI Guanghao, LU Qianli, YU Yue, WANG Hebing, TANG Qinglin. Function identification of the mitogen-activated protein kinase gene *CsMPK4* in cucumber[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 857-868 (in Chinese).
- [13] 王梓煦, 罗春燕, 童宇航, 郑为军, 李庆卫. ‘美人’梅在干旱胁迫下的生理响应及相关基因筛选[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 618-638.  
WANG Zixu, LUO Chunyan, TONG Yuhang, ZHENG Weijun, LI Qingwei. Physiological responses and transcriptional regulation of *Prunus mume* ‘Meiren’ under drought stress[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 618-638 (in Chinese).
- [14] 李晓亮, 何海通, 何苏秦, 王路瑶, 张威, 孔照胜, 王利祥. 硝酸盐诱导的 GARP 类转录因子 AhNIGT1.2 调控花生结瘤的功能分析[J]. 生物工程学报, 2025, 41(2): 657-669.  
LI Xiaoliang, HE Haitong, HE Suqin, WANG Luyao, LI Xiaoliang, HE Haitong, HE Suqin, WANG Luyao, ZHANG Wei, KONG Zhaosheng, WANG Lixiang. Functional analysis of a nitrate-induced GARP transcription factor AhNIGT1.2 in peanut nodulation[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(2): 657-669 (in Chinese).