

用 HPLC 法测定槟榔碱在大鼠血浆中浓度及
药代动力学研究

Determination and pharmacokinetic study of arecoline in rat plasma by HPLC

赵春雪, 李雨洙, 刘 峰,
钟 莲, 陈兰君, 李 伟,
谢跃生

(华北理工大学 药学院, 河北 唐山 063210)

ZHAO Chun - xue, LI Yu - zhu,
LIU Feng, ZHONG Lian,
CHEN Lan - jun, LI Wei,
XIE Yue - sheng

(College of Pharmacy, North China
University of Science and Technology,
Tangshan 063210, Hebei Province,
China)

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目
(H202209064)

作者简介: 赵春雪(2001 -), 女, 硕士研究生, 主
要从事药代动力学研究

通信作者: 谢跃生, 副教授, 硕士生导师

Tel: (0315) 8805801

E - mail: 719007716@qq.com

摘要:目的 采用高效液相色谱法建立槟榔碱在大鼠血浆中含量测定方法, 研究
槟榔碱在大鼠体内药代动力学行为, 为槟榔碱的药效物质基础提供科学依据。
方法 SD 大鼠灌胃给予低、中、高 (10、20、30 mg · kg⁻¹) 三个剂量槟榔碱水溶
液, 于不同时间点眼底静脉丛采血, 采用乙酸乙酯萃取后取上清进样分析。以葛
根素为内标物采用 HPLC 法检测血浆中槟榔碱含量, 流动相为乙腈 - 甲醇 -
0.1% 三乙胺水溶液 (6: 16: 78, pH = 4.5), 等度洗脱, 流速 1.0 mL · min⁻¹, 检测
波长 215 nm, 柱温 30 ℃, 运用 DAS 2.0 软件计算药代动力学参数。**结果** 槟榔
碱在 0.5 ~ 32.0 μg · mL⁻¹ 内线性关系良好, 其标准曲线为 $y = 5.12 \times 10^{-2}x - 3.26 \times 10^{-2}$ ($r = 0.9960$), 定量下限 0.5 μg · mL⁻¹, 精密性、重复性、稳定性及回
收率试验结果良好。槟榔碱低、中、高剂量组主要药代动力学参数: 药峰浓度
(C_{max}) 分别为 (1.36 ± 0.21)、(2.15 ± 0.72) 和 (2.75 ± 0.69) mg · L⁻¹, 药时曲线
下面积 (AUC_{0-1}) 分别为 (3.04 ± 0.24)、(3.87 ± 1.02) 和 (4.49 ± 0.76) mg · L⁻¹ · h,
消除半衰期 ($t_{1/2}$) 分别为 (3.67 ± 1.73)、(2.88 ± 1.66) 和 (3.12 ± 1.86) h。
结论 该方法简便快捷, 适用于槟榔碱大鼠血浆中的药代动力学研究。

关键词: 槟榔碱; 药代动力学; 大鼠; 高效液相色谱法

DOI: 10.13699/j.cnki.1001-6821.2025.20.013

中图分类号: R97 文献标志码: A

文章编号: 1001-6821(2025)20-2924-05

Abstract: Objective To establish a high performance liquid
chromatography method for the determination of arecoline in rat plasma,
to study the pharmacokinetic behavior of arecoline in rats, and to provide
a scientific basis for the pharmacodynamic substance basis of arecoline.

Methods SD rats were given low, medium and high (10, 20 and
30 mg · kg⁻¹) aqueous solutions of arecoline by gavage, and blood was
collected from the fundus venous plexus at different time points, and the
supernatant was extracted by ethyl acetate and then injected for analysis.

Puerarin was used as the internal standard to detect the content of arecoline
in plasma by HPLC, the mobile phase was acetonitrile - methanol -
0.1% triethylamine aqueous solution (6: 16: 78, pH = 4.5), isocratic
elution, flow rate 1.0 mL · min⁻¹, detection wavelength 215 nm,
column temperature 30 ℃, and the pharmacokinetic parameters were
calculated by DAS2.0 software. **Results** The linear relationship
between arecoline in 0.5 - 32.0 μg · mL⁻¹ was good, the standard curve
was $y = 0.0512x - 0.0326$ ($r = 0.9960$), the lower limit of quantification
was 0.5 μg · mL⁻¹, and the precision, repeatability, stability and
recovery test results were good. The main pharmacokinetic parameters of

arecaine in the low -, medium -, and high - dose groups were (1.36 ± 0.21) , (2.15 ± 0.72) and (2.75 ± 0.69) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the area under the curve (AUC_{0-1}) was (3.04 ± 0.24) , (3.87 ± 1.02) and (4.49 ± 0.76) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$, and the elimination half - lives ($t_{1/2}$) were (3.67 ± 1.73) , (2.88 ± 1.66) and (3.12 ± 1.86) h.

Conclusion The method is simple and rapid, suitable for the pharmacokinetic study of arecoline in rat plasma.

Key words: arecoline; pharmacokinetic; rat; high performance liquid chromatography

槟榔碱 (arecoline) 是一种天然生物碱, 主要来源于棕榈科槟榔属植物槟榔的果实。槟榔是临床上常用的一种驱虫类的中药, 同时也可以作为一种被广泛使用的嗜好品 (咀嚼槟榔), 在亚太地区超过 6 亿消费人群使用咀嚼槟榔^[1]。槟榔碱作为槟榔的主要活性成分则同时具有广泛的药理作用以及不可忽视的毒副作用。槟榔碱既能促唾液分泌、肠道蠕动和支气管收缩、兴奋机体^[2]; 也能够发挥抗动脉粥样硬化^[3]、抗炎抗氧化以及利尿收敛强心等作用^[4]。此外, 槟榔碱仍具有导致口腔粘膜纤维化以及口腔癌等疾病的风险^[5]。本研究主要通过高效液相色谱法明确不同剂量下槟榔碱在大鼠体内的动态变化过程, 可以为槟榔碱剂量优化以及进一步临床开发和应用提供基础参考。

材料与方法

1 材料

动物 SPF 级 SD 大鼠, 雄性, 6 ~ 8 周, 体质量 250 ~ 300 g, 购自华北理工大学实验动物中心, 动物使用许可证号: SYXK (冀) 2020 - 007, 动物生产许可证号: SCXK (辽) 2020 - 0001。适应性饲养一周, 给药前 12 h 禁食, 可自由饮水。本实验经华北理工大学实验动物福利伦理委员会批准 (伦理批号: 2023 - SY - 033)。

药品与试剂 槟榔碱对照品, 规格: 每瓶 50 mg, 纯度: $\geq 98\%$, 购自上海晨微生物科技有限公司; 葛根素对照品, 规格: 每瓶 20 mg, 纯度: $\geq 98\%$, 购自中国食品药品检定研究院; 纯净水, 购自杭州娃哈哈集团有限公司; 色谱级甲醇、乙腈, 购自北京迈瑞达科技有限公司; 分析纯三乙胺, 购自上海麦克林生化科技股份有限公司。

仪器 Shimadzu LC - 20AT 型高效液相色谱仪, 日本岛津公司产品; ME155DE/02 型十万分之一电子天平, 梅特勒 - 托利多上海有限公司产品; JW - 3021 - HR 型高速冷冻离心机, 安徽省嘉文仪器装备有限公司产品; XH - C 型涡旋混合器, 金坛白塔新宝仪器厂产品; 水浴氮吹仪, 无锡沃信仪器制造有限公司产品。

2 给药方法与血样采集

24 只健康雄性大鼠随机均分为 3 组, 分别为槟榔碱低剂量组 ($1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 槟榔碱溶液, 灌胃体积 $10 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中剂量组 ($2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 槟榔碱溶液, 灌胃体积 $10 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)、高剂量组 ($3 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 槟榔碱溶液, 灌胃体积 $10 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$), 每组 8 只。实验前适应性饲养 1 周, 给药前 12h 禁食不禁水, 给药前于眼底静脉丛取血 0.3 mL。给药后 0.25、0.5、1、1.5、2、2.5 和 3 h, 在大鼠眼底静脉丛取血 0.3 mL, 置于 1.5 mL 肝素抗凝管中, 12 000 rpm 离心 10 min, -80°C 冰箱冷冻保存至测定分析。

3 测定条件、溶液配制与血浆样本处理

色谱条件 色谱柱: Diamonsil C_{18} 色谱柱 ($250 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm}$, $5 \mu\text{m}$), 流动相为乙腈 - 甲醇 - 0.1% 三乙胺水溶液 ($6:16:78$, $\text{pH} = 4.5$), 等度洗脱, 流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 检测波长 215 nm, 柱温 30°C , 进样量为 $10 \mu\text{L}$ 。

溶液制备 精密称取一定量槟榔碱对照品, 甲醇溶解, 容量瓶定容, 得到浓度为 $32 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 对照品溶液; 精密称取一定量葛根素对照品, 甲醇溶解, 容量瓶定容, 得到浓度为 $80 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 内标溶液; 精密称取槟榔碱对照品适量, 加入纯水, 涡旋混匀, 得到浓度分别为 1、2、3 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的低、中、高浓度的槟榔碱给药液。

血浆样品处理 取大鼠血浆样品 $100 \mu\text{L}$ 加入相同体积的甲醇和内标溶液 $50 \mu\text{L}$, 涡旋, 加入乙酸乙酯 $900 \mu\text{L}$ 进行第一次萃取, 涡旋 3 min, 12 000 rpm 离心 15 min, 取上清液再加入乙酸乙酯 $500 \mu\text{L}$ 进行二次萃取, 取上清液在 25°C 氮气下低速吹干, 最后加入流动相 $100 \mu\text{L}$ 进行复溶, 经 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜滤过, 至带有内插管进样瓶中进样分析。

4 方法学考察

专属性 分别吸取大鼠空白血浆、含槟榔碱血浆、给药后血浆 $100 \mu\text{L}$, 按血浆样品处理方法操作, 进样分析, 考察血浆中内源性物质是否会对待测物及内标造成干扰, 记录色谱图。

标准曲线与定量下限 精密量取一定量的槟榔碱对照品溶液, 用甲醇进行梯度稀释, 得到一系列标

准溶液浓度,浓度为32.0、16.0、8.0、4.0、2.0、1.0、0.5 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$,每个浓度制备6份。取大鼠空白血浆100 μL 加入一系列浓度的槟榔碱对照品溶液100 μL 和内标溶液50 μL ,其余步骤按照“血浆样品处理”方法操作,进样分析,记录待测组分峰面积。以槟榔碱与内标物峰面积比值(Y)为纵坐标,槟榔碱浓度(X)为横坐标,得回归方程。

精密度与准确度 取大鼠空白血浆100 μL 加入低、中、高(1、4、16 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)三个质量浓度对照品溶液100 μL 和内标溶液50 μL ,其余步骤按照“血浆样品处理”方法操作,每个质量浓度平行6份,每天测定1个浓度,连续测定3 d,以1 d内测定结果计算日内精密度,一周内连续3 d内测定结果计算日间精密度。

稳定性 配制低、中、高(1、4、16 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)的质量浓度对照品溶液,每个浓度各3份,考察对照品标准溶液在室温下放置6 h后的稳定性;取大鼠空白血浆100 μL 加入相同体积低、中、高对照品溶液于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱放置15 d,考察样品经冷冻放置的稳定性及其处理后在自动进样器放置12 h后的稳定性。

提取回收率 取大鼠空白血浆100 μL 加入低、中、高(1、4、16 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)的质量浓度对照品溶液100 μL 和内标溶液50 μL ,其余步骤按照“血浆样品处理”方法测定分析,计算槟榔碱峰面积与内标物峰面积的比值为A1(取3次进样平均值);另取大鼠空白血浆100 μL ,不加内标溶液,其余按照“血浆样品处理”方法操作,将相应浓度和体积的槟榔碱和内标溶液加到上清液中,涡旋混合,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 氮气下低速吹干,100 μL 流动相进行复溶后过滤进样分析,获得槟榔碱与内标物的峰面积比值A2(取3次进样平均值),提取回收率 $R = A1/A2 \times 100\%$ 。

5 统计学处理

使用DAS 2.0软件通过非房室模型计算槟榔碱药代动力学参数,使用Origin软件对大鼠血浆中槟榔碱平均血药浓度-时间曲线以及槟榔碱暴露量与给药剂量线性回归关系进行拟合。

结 果

1 方法学评价

专属性 在拟定色谱条件下,槟榔碱与内标物葛根素保留时间分别在8 min与14 min左右,2者分离

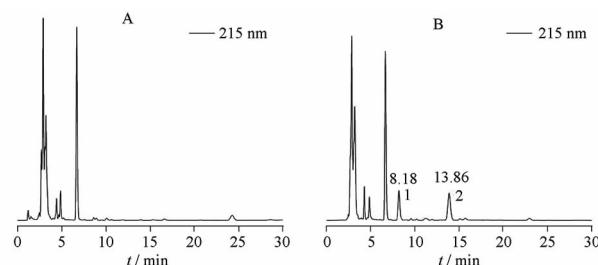


图1 大鼠血浆样品色谱图(A:空白血浆色谱图;B:含药血浆色谱图);1-槟榔碱,2-葛根素(内标)

Figure 1 High performance liquid chromatography (HPLC) chromatograms of Arecoline in rat plasma (A: Rat blank plasma; B: Rat blank plasma + Arecoline + internal standard); 1 - Arecoline, 2 - Puerarin (Internal standard)

完全,基线平稳,血浆中槟榔碱的测定不受血浆内源性物质干扰,专属性良好。色谱图见图1。

标准曲线与定量下限 槟榔碱在浓度线性范围为0.5~32.0 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 线性关系良好,线性方程为 $y = 5.12 \times 10^{-2}x - 3.26 \times 10^{-2}$, $r = 0.996\ 0$ ($n = 6$)。结果表明,定量下限为0.5 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

精密度与准确度 结果表示低、中、高三个质量浓度实测均值日内精密度相对标准偏差(relative standard degree, RSD)分别为13.03%、14.23%、4.71%($n = 6$),准确度分别为20.81%、-5.64%、1.19%;日间精密度分别为10.50%、10.28%、1.82%($n = 3$),准确度分别为19.18%、-4.48%、0.18%,实验结果良好。

稳定性 对照品标准溶液低、中、高三个浓度在室温下放置6 h后实测均值RSD分别为10.05%、14.01%、5.81%($n = 3$),低、中、高三个浓度生物样品在三次冻融循环条件下样品浓度

表1 低、中、高剂量槟榔碱在大鼠体内的药动学参数

Table 1 Pharmacokinetic parameters of rats after low, medium and high dose administration ($n = 8$, $\bar{x} \pm s$)

Parameter	Low dose	Medium dose	High dose
$AUC_{0-1}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h})$	3.04 ± 0.24	3.87 ± 1.02	4.49 ± 0.76
$AUC_{0-\infty}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h})$	7.60 ± 2.95	8.04 ± 2.32	9.35 ± 3.58
$t_{1/2}(\text{h})$	3.67 ± 1.73	2.88 ± 1.66	3.12 ± 1.86
$MRT_{0-1}(\text{h})$	1.49 ± 0.06	1.46 ± 0.07	1.36 ± 0.08
$MRT_{0-\infty}(\text{h})$	5.92 ± 2.62	4.44 ± 2.38	4.71 ± 2.26
$CL/F(\text{L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.48 ± 0.50	2.65 ± 0.67	3.61 ± 1.27
$V_z/F(\text{L} \cdot \text{kg}^{-1})$	6.79 ± 0.84	10.02 ± 3.70	13.70 ± 3.68
$C_{\max}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.36 ± 0.21	2.15 ± 0.72	2.75 ± 0.69
$t_{\max}(\text{h})$	0.75 ± 0.27	0.69 ± 0.26	0.81 ± 0.37

RSD 分别为 3.84%、4.23%、2.63%，样品处理后在自动进样器放置 12 h 后实测均值 RSD 分别为 3.43%、3.15%、0.93%。由结果可见槟榔碱在以上条件下稳定性良好。

提取回收率 低、中、高三个质量浓度实测浓度均值提取回收率 RSD 分别为 11.20%、3.38%、

5.08%，结果满足实验要求。

2 槟榔碱药代动力学研究结果

槟榔碱药代动力学参数见表 1，大鼠血浆中槟榔碱平均血药浓度-时间曲线进行拟合，拟合曲线见图 2A，并对槟榔碱暴露量与给药剂量线性回归关系进行拟合，拟合关系见图 2B。

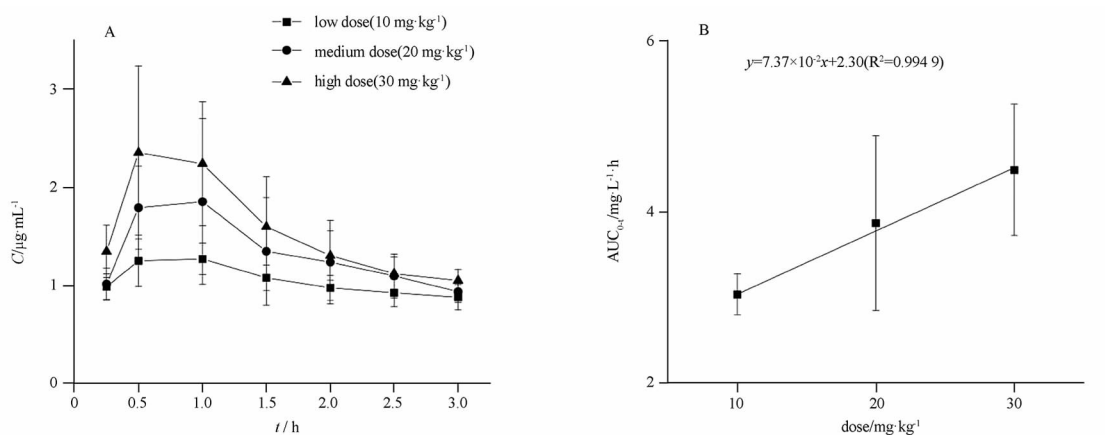


图 2 槟榔碱在大鼠体内药代动力学行为图 (A - 大鼠给予低、中、高剂量槟榔碱后平均血药浓度-时间曲线图; B - 槟榔碱的 AUC_{0-t} 与给药剂量的线性回归关系图)

Figure 2 Diagram of the pharmacokinetic behavior of arecaine in rats (A - Average blood concentration-time curves of rats in low, medium and high dose groups; B - Linear regression plot of AUC_{0-t} versus administered dose of arecaine)

讨 论

在此前对于槟榔碱的研究主要集中在其药理作用的探索^[6-7]，以及非生物样品类的含量测定^[8-10]。本研究采用成本低且应用广泛的高效液相色谱法^[11]，测定槟榔碱经灌胃途径在大鼠体内的动态变化。在血浆样品预处理阶段，本实验对比了蛋白沉淀法(甲醇、乙腈)和液液萃取法(乙酸乙酯)，蛋白沉淀法色谱峰响应值不高，采用乙酸乙酯萃取能够获得较好的色谱峰响应值，而槟榔碱同时具有一定的脂溶性和水溶性，因此采用二次萃取的方法进一步提高回收率。

实验中，灌胃给予大鼠低、中、高三个剂量(10、20、30 mg · kg⁻¹)的槟榔碱，计算药代动力学参数。低、中、高三个剂量组 C_{max} 分别为(1.36 ± 0.21)、(2.15 ± 0.72)和(2.75 ± 0.69) mg · L⁻¹，暴露量 AUC_{0-t} 分别为(3.04 ± 0.24)、(3.87 ± 1.02)和(4.49 ± 0.76) mg · L⁻¹ · h，并以剂量为 X 轴， AUC_{0-t} 为 Y 轴绘制线性回归图，回归方程为 $y = 7.37 \times 10^{-2}x + 2.30$ ，拟合优度 $R^2 = 0.9949$ ，表明槟榔碱在一定剂量范围内

AUC_{0-t} 与给药剂量成正相关，与剂量呈现线性关系。清除率 CL_z 和分布容积 V_z 随剂量增加而增加，提示在剂量增加情况下清除能力增强、分布更广泛可能发生组织蓄积。这种剂量依赖性的组织分布变化提示槟榔碱存在组织蓄积的潜力，更加提示对评估其长期给药的安全性和潜在的器官特异性毒性具有重大意义。

本实验获得了大鼠在口服不同剂量槟榔碱后的血浆中槟榔碱含量并获得了槟榔碱在大鼠体内的药代动力学参数，由此得到槟榔碱在大鼠体内吸收较快并迅速消除。另外在本次研究中尝试过槟榔碱更高剂量(4 mg · mL⁻¹ 槟榔碱溶液，灌胃体积 10 mL · kg⁻¹)，大鼠经灌胃后出现了严重腹泻症状，造成血药浓度水平显著降低，药代动力学参数明显改变。更高剂量下其药代动力学行为转变可能归因于槟榔碱用量过多促进肠胃蠕动亢进，大鼠胃肠道黏膜出现损伤，从而对槟榔碱吸收过程造成影响^[12-13]；另一方面说明了槟榔碱作用强、用量范围以及给药方式值得进一步研究。由此发现，槟榔碱作为 M 受体激动剂具有直接药理毒性，同时表现出狭窄的治疗窗口特征：在较低剂量下具有可预测的线性动力学，但其显著的受体激

动效应在高剂量下迅速转化为剂量限制性毒性(腹泻),并伴随药动学行为的恶化。因此,充分阐明槟榔碱显著的药代动力特征及其代谢与毒理学特征,将为实现对槟榔碱科学认知与合理应用、促进槟榔碱更加合理与安全的应用做出更多努力。

参考文献:

- [1] 刘书伟,张田田,王燕,等. 槟榔化学成分及其生物活性研究进展[J]. 现代食品科技,2024,40(6):347—355.
- [2] 易攀,汤嫣然,周芳,等. 槟榔的化学成分和药理活性研究进展[J]. 中草药,2019,50(10):2498—2504.
- [3] 山丽梅,张锦超,赵艳玲,等. 槟榔碱抗动脉粥样硬化分子机制的研究[J]. 中国药理学通报,2004,(2):146—151.
- [4] YAO N, FENG L, JIANG W, *et al.* An emerging role of arecoline on growth performance, intestinal digestion and absorption capacities and intestinal structural integrity of adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Anim Nutr*, 2023, 15:173—186. 2023-08-09 [2025-04-16]. <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38023377/>.
- [5] 张丹丹,谢玉兰,梁翠芬. 槟榔碱对口腔黏膜下纤维化 NF- κ B、TGF- β 1 信号通路的影响研究[J]. 中国现代药物应用, 2024,18(11):173—175.
- [6] LIU Y J, PENG W, HU M B, *et al.* The pharmacology, toxicology and potential applications of arecoline: A review [J]. *Pharmaceutical Biology*, 2016, 54(11): 2753—2760.
- [7] LIU H, ZHENG H, ZHANG J, *et al.* Review of the toxic effects and health functions of arecoline on multiple organ systems [J]. *Food Innovation and Advances*, 2024, 3(1): 31—41.
- [8] 杜攀,李培,董清,等. 高效液相色谱法测定四消丸中氢溴酸槟榔碱含量[J]. 中国药业,2020,29(15):90—92.
- [9] 屈文佳,贾哲,辛洁萍,等. 高效液相色谱法同时测定槟榔中4种生物碱的含量[J]. 中南药学,2020,18(3):485—488.
- [10] 张莹,刘冰,陈秀梅,等. 高效液相色谱法测定达原饮中槟榔生物碱的含量[J]. 江西化工,2023,39(5):29—32.
- [11] 陈兰君,赵春雪,韩妮,等. 用 HPLC 法测定大鼠血浆中 3-去甲基秋水仙碱的浓度及药代动力学研究[J]. 中国临床药理学杂志,2024,40(24):3626—3630.
- [12] 孙娟,曹立幸,陈志强,等. 中药槟榔及其主要成分的药理和毒理研究概述[J]. 广州中医药大学学报,2018,35(06):1143—1146.
- [13] 陈金子,潘星宇,郭焘,等. 槟榔的研究进展[J]. 中国中药杂志,2025,50(17):4748—4758.

(收稿日期 2025-04-17)

· 科学文摘 ·

大肠杆菌中一种基于淀粉样蛋白的抗噬菌体防御系统的表征

引自: IBARLOSA L, DHEUR S, SANCHEZ C, *et al.* Characterization of an amyloid - based antiphage defence system in *Escherichia coli*. *Nat Microbiol*, 2025, 10(9): 2168—2178.

淀粉样蛋白是由 β -片层结构主导的蛋白质聚合物,既可引起疾病,也能在细胞中发挥功能性作用。在动物和真菌中,功能性淀粉样蛋白作为分子开关参与调节性细胞死亡,能够激活关键的细胞死亡效应因子。本文描述了大肠杆菌中一种基于淀粉样蛋白的流产感染抗噬菌体防御系统。该系统可导致被噬菌体感染的细胞死亡,涉及两种具有共同淀粉样蛋白结构基序、由相邻基因编码的蛋白质——Bab 与 Agp。感染发生后,Agp 通过淀粉样蛋白信号激活 Bab;被激活的 Bab 进而引起膜结构改变并导致细胞死亡。我们解析了 Bab 蛋白的细胞死亡执行域结构,该结构域与真菌、动物及植物中发现的成孔结构域存在远缘关联。实验证明,Bab 与来自粗糙链孢菌的真菌淀粉样蛋白调控细胞死亡执行蛋白 HET-S 具有功能互换性。这些发现揭示了淀粉样蛋白介导的免疫信号传导在生物界中存在跨界的保守性。