科学通报 2026 年 第 71 卷 第 22 期: 5206 ~ 5208
悦读科学
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

不止一个生物钟: 草莓在极端环境中的“应急时钟”被破解

黄颖琪, 周冕*

首都师范大学生命科学学院, 北京 100048
* 联系人, E-mail: mianzhou@cnu.edu.cn

More than one circadian clock: the “emergency clock” of strawberries in extreme environments deciphered

Yingqi Huang & Mian Zhou*

College of Life Sciences, Capital Normal University, Beijing 100048, China
* Corresponding author, E-mail: mianzhou@cnu.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0704

地球上的生物为了适应光照和温度等环境因素的昼夜节律性变化, 演化出了一套精密的内源计时器——生物钟(circadian clock)[1]. 这种“生理时钟”让生物体提前预判环境变化, 协调代谢、生长、发育与免疫节律, 提升生存与适应能力.

生物钟的主要驱动力是生物体内在的基因调控网络(gene regulatory network, GRN), 不同物种的生物钟GRN组分不同, 但生物钟网络的底层调控逻辑却基本一致——由相互耦联的转录-翻译反馈环(transcriptional-translational feedback loops, TTFLs)组成[2]. 以往的研究表明, 从单子叶植物到双子叶植物, 从模式植物拟南芥到经济作物番茄, 植物的生物钟GRN组分具有高度的保守性[3]. 这些GRN组分在一天中依次高表达: *CCA1*和*LHY*在清晨工作, *PRR9*、*PRR7*和*PRR5*在白天接力, 而*TOC1*、*ELF3*、*ELF4*和*LUX*则在傍晚接手调控[2]. 它们大多为转录因子, 对其余组分的基因表达产生激活或抑制作用. 基于这种反馈调节机制, 生物钟构建出内源性的节律, 从而在宏观层面实现对生理活动的精准时序调控.

越来越多的报道表明, 在极端环境(极地、洞穴、高原等)中生活的动物也具有生物钟, 但其工作模式与经典的生物钟存在较大差异[4~6]. 目前, 关于植物生物钟的研究多集中在适宜环境或短暂的逆境胁迫环境中, 对极端环境条件下植物生物钟的认知几乎为空白. 然而, 自然极端环境下的研究通常面临样品采集难度大、相关物种的遗传信息未知、研究周期长等诸多挑战. 那么, 是否存在一种便于研究且兼具生理和社会经济意义的极端环境条件呢?

其实, 这样的极端环境就在我们身边. 家中的冰箱(持续低温、持续黑暗)和商场中的生鲜展示柜(持续低温、持续光照)由于温度和光照恒定, 存放其中的果蔬处于一个无环境因素变化的状态, 是研究植物内源生物钟在极端环境中运行规律的理想条件.

近日, 北京大学王伟研究员团队突破传统框架, 以4℃低温、无昼夜交替的极端环境下的采后草莓为研究对象, 发现了采后冷藏草莓中存在一套全新的非经典节律调控网络, 它既能独立维持节律运转, 还能增强果实抗病能力, 为植物节律研究打开了全新视角[7](图1).

长期以来, 植物昼夜节律由保守稳定的生物钟GRN控制已成为共识. 然而研究团队发现, 在低温、持续光照的采后逆境中, 草莓果实内*LHY*、*TOC1*、*PRR*家族及*ELF*/*LUX*等核心GRN基因的表达完全丧失节律性, 经典生物钟近乎停摆, 但仍有275个基因保持近24 h节律, 且集中在蛋白合成、折叠与储存等维持果实存活的关键通路. 这一结果提示草莓在经典生物钟失效时, 会启动一套完全独立的备用生物钟系统, 充当逆境中的“应急生物钟”.

为揭开这一逆境应急生物钟的分子奥秘, 研究团队对发

引用格式: 黄颖琪, 周冕. 不止一个生物钟: 草莓在极端环境中的“应急时钟”被破解. 科学通报, 2026, 71: 5206–5208
Huang Y, Zhou M. More than one circadian clock: the “emergency clock” of strawberries in extreme environments deciphered (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 5206–5208, doi: 10.1360/CSB-2026-0704

© 2026《中国科学》杂志社

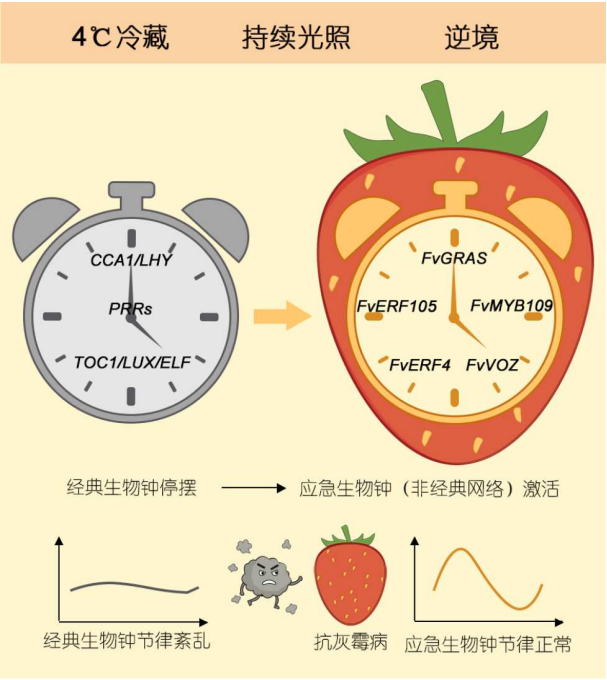


图 1 草莓的双生物钟基因调控网络
Figure 1 Dual circadian gene regulatory networks in strawberry

现的275个节律基因开展系统筛选与分析，最终锁定了*FvGRAS*、*FvMYB109*、*FvVOZ*、*FvERF4*、*FvERF105*五个核心转录因子，它们彼此交织，搭建起一套以负反馈调控为主的转录调控网络. 该网络具备生物钟的标志性特征: (1) 内源节律的周期接近24 h: 新型GRN的振荡周期稳定在17.6~26.6 h; (2) 可驯化性: 新型GRN可被环境温度循环同步引导, 逐步校准至24 h节律; (3) 温度补偿性, 即在一定的温度范围内, 节律的周期波动极小[8]: 新型GRN在4℃与14℃下的周期无较大变化.

对生物节律系统最有力的证明，便是实现人工重构. 原核生物蓝藻的生物钟，即KaiABC系统，已率先在大肠杆菌中完成跨物种移植, 证实生物钟具备可移植性[9,10]. 然而蓝藻的生物钟依赖蛋白磷酸化/去磷酸化产生节律，与植物的TTFL型机制截然不同. 在真核系统中尚未实现生物钟GRN的重构. 研究团队利用烟草瞬时表达体系，成功在异源系统中实现了草莓生物钟的重构. 该表达体系由三个模块组成: 瞬时激活后沉默的驱动模块、承载核心转录因子的调控网络模块、高通量监测节律的双荧光素酶报告模块. 研究通过多组实验排除了烟草内源生物钟节律对外源草莓生物钟GRN的节律影响，证实了烟草系统中检测的节律信号是由异源草莓生物钟GRN产生的. 该网络具有生物钟的特性，可自主产生稳定近24 h振荡, 为独立的节律起搏器.

“应急生物钟”绝非演化冗余, 而是草莓采后逆境中的“免疫守护者”. 灰霉病作为采后草莓的头号病害[11], 其侵染发病与果实免疫节律高度相关. 该研究发现，冷藏条件下草莓对灰霉菌(*Botrytis cinerea*)的抗病性呈现近24 h的节律性波动, 一旦用dsRNA破坏草莓的生物钟GRN，防御节律彻底消失, 果实抗病能力大幅下降，并且发挥作用的是完整网络而非单个基因. 进一步研究发现，离体是激活草莓“应急生物钟”的必需条件，低温是优选条件. 研究团队在其他物种里也做了类似实验，发现番茄中可能也存在相似的非经典生物钟调控网络.

研究团队从冷藏草莓的意外发现出发，通过异源重构实验，打破了植物仅依赖单一经典生物钟的传统认知，首次揭示植物存在“经典主时钟+非经典应急时钟”的双系统模式: 经典主时钟调控常态生长节律，备用时钟则在极端条件(离体、冷藏、持续光照)下启动, 维系节律与免疫防御.

草莓是全球贸易中最活跃的浆果类作物之一，其跨国流通量急剧增长. 作为非呼吸跃变型水果，草莓需成熟后才可采摘，这使其采后储运面临巨大风险. 跨时区运输及冷藏库中的恒定光照或黑暗环境, 会导致草莓内在生物钟发生偏移, 进而造成由生物钟调控的免疫防线出现“空窗期”. 该研究发现的新型草莓生物钟GRN，为采后保鲜、绿色抗病及延长货期提供了关键分子靶点，也是未来攻克跨国贸易中高损耗难题的潜在手段.

研究中使用了栽培草莓(*Fragaria* × *ananassa*)的祖先种之一, 基因组信息完整的二倍体森林草莓(*Fragaria vesca*). 后续也可以在不同的栽培草莓品种中探究这一非经典生物钟GRN的普适性. 另外，低温信号以及采摘时产生的机械损伤信号如何促进非经典草莓生物钟GRN的激活也是未来值得深入探索的关键问题.

推荐阅读文献

1 Nohales M A, Kay S A. Molecular mechanisms at the core of the plant circadian oscillator. Nat Struct Mol Biol, 2016, 23: 1061–1069
2 Xu X, Yuan L, Yang X, et al. Circadian clock in plants: linking timing to fitness. J Integr Plant Biol, 2022, 64: 792–811
3 Calixto C P G, Waugh R, Brown J W S. Evolutionary relationships among barley and *Arabidopsis* core circadian clock and clock-associated genes. J Mol Evol, 2015, 80: 108–119
4 Liu N, Tian H, Yu Z, et al. A highland-adaptation mutation of the Epas1 protein increases its stability and disrupts the circadian clock in the plateau pika. Cell Rep, 2022, 39: 110816

5 Lin Z, Chen L, Chen X, et al. Biological adaptations in the Arctic cervid, the reindeer (*Rangifer tarandus*). Science, 2019, 364: eaav6312
6 Mack K L, Jaggard J B, Persons J L, et al. Repeated evolution of circadian clock dysregulation in cavefish populations. PLoS Genet, 2021, 17: e1009642
7 Wang S, Su Y, Xu Y, et al. Discovery and heterologous reconstitution of a plant noncanonical quasi-circadian gene regulatory network. Cell, 2026, doi: 10.1016/j.cell.2026.04.033
8 Pittendrigh C S. On temperature independence in the clock system controlling emergence time in *Drosophila*. Proc Natl Acad Sci USA, 1954, 40: 1018–1029
9 Chen A H, Lubkowicz D, Yeong V, et al. Transplantability of a circadian clock to a noncircadian organism. Sci Adv, 2015, 1: e1500358
10 Nakajima M, Imai K, Ito H, et al. Reconstitution of circadian oscillation of cyanobacterial KaiC phosphorylation *in vitro*. Science, 2005, 308: 414–415
11 Petrasch S, Knapp S J, van Kan J A L, et al. Grey mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen *Botrytis cinerea*. Mol Plant Pathol, 2019, 20: 877–892