

Advanced Genetics

机械应力下跨物种抗氧化防御策略的进化逻辑

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41894.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！



研究背景

机械应力作为自然界中普遍存在的物理刺激，不仅塑造了生物体的结构形态，还通过力学信号转导过程触发细胞内的氧化应激反应，进而影响生物体的生理功能与适应性。传统上，抗氧化防御系统被视为应对氧化损伤的被动机制，但随着对机械应力与氧化应激关系的深入研究，科学家们发现这一防御系统远非被动——不同物种在进化过程中发展出了多样化的主动抗氧化策略，以应对机械应力带来的挑战。这些策略不仅体现了生命对环境的适应智慧，也为开发新型抗氧化疗法和材料提供了宝贵灵感。

COMMENT |  Open Access |  

Antioxidation is a Common Defense Strategy for Different Species Under Mechanical Stress

Feixiang Zhu, [Kai Huang](#) 

First published: 13 March 2026 | <https://doi.org/10.1002/ggn2.202500043> | [VIEW METRICS](#)

文章概述

近日，上海交通大学黄凯课题组受邀在Advanced Genetics上发表了题为Antioxidation is a Common Defense Strategy for Different Species Under Mechanical Stress的评论文章，系统探讨了不同物种在机械应力下采用的抗氧化防御机制/策略。文章从分子进化的角度，揭示了抗氧化策略的保守性与物种特异性，为理解生命对机械应力环境的适应性进化提供了新视角。

图文导读

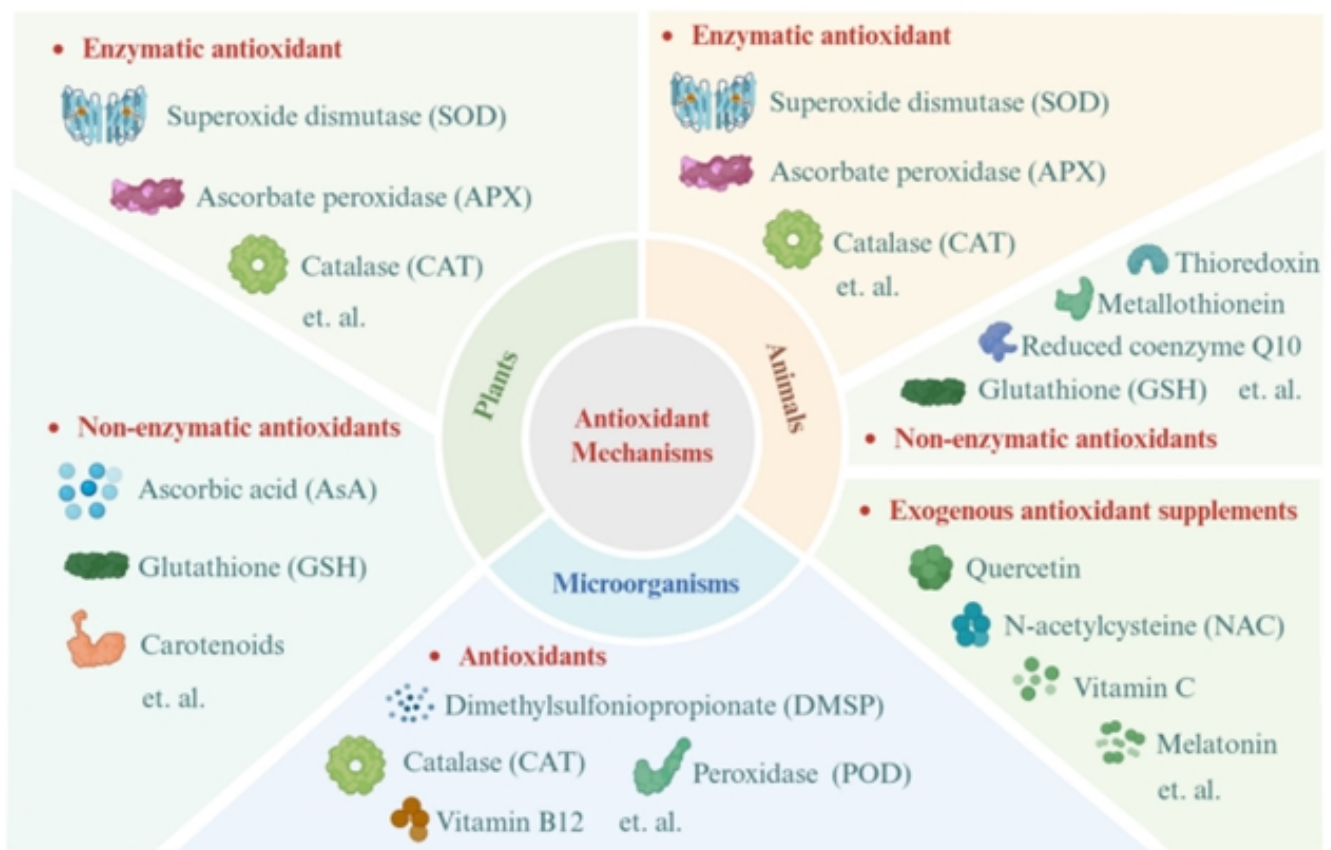


图1. 不同物种应对机械应力诱导的氧化应激的抗氧化机制

文章围绕以下五个方面展开：

机械应力诱导氧化应激的分子基础。机械刺激可通过多种途径在亚细胞水平引发氧化损伤：膜蛋白功能紊乱（如Piezo1、NOX2）、线粒体嵴结构改变导致呼吸链阻断、内质网蛋白折叠能力下降，以及细胞骨架重塑激活氧化还原敏感信号通路。这些扰动可触发连锁反应，最终导致氧化还原失衡。适度的ROS升高有益于细胞代谢与信号传导，而过量ROS则转变为“细胞破坏者”，攻击脂质、蛋白质和核酸等生物大分子，严重时可导致细胞死亡和组织病变。

抗氧化机制的分子进化逻辑。文章提出了机械应力响应的三层分子进化逻辑：原始共性、真核分化与动物特化。在原始共性层面，力学激活的Piezo通道等机械敏感离子通道在动植物中高度保守，构成跨界响应的分子基础，其介导的Ca²⁺内流与氧化应激响应密切相关；在真核分化层面，动物依赖FoxO/Nrf2转录因子轴上调谷胱甘肽合成酶，而植物则通过增强抗坏血酸-谷胱甘肽循环（AsA-GSH）来应对机械压力；在动物特化层面，机械应力与免疫系统的耦合尤为突出，例如机械刺激可导致巨噬细胞ROS产生增加，损害其胞葬功能并引发无菌炎症。

跨物种抗氧化机制的比较分析。三类生命形式呈现出截然不同的防御路径：植物构建了以SOD-CAT-APX酶促网络为核心、辅以抗坏血酸（AsA）、谷胱甘肽（GSH）和类胡萝卜素等非酶抗氧化剂的复杂协同防御体系；微生物则奉行极简主义策略——深海细菌合成多功能有机硫分子二甲基硫代丙酸盐（DMSP）兼作抗氧化剂与高压保护剂，铜绿假单胞菌借助过氧化氢酶和过氧化物酶降解ROS，c-di-GMP信号系统亦参与增强细菌对氧化应激的耐受性；而动物则构建了以Nrf2调控轴为核心的多系统集成防御网络，并在内源性防御不足时依赖外源抗氧化剂的补偿介入——机械应力诱导NOX2过表达可促进呼吸机相关肺损伤中的氧化应激，而槲皮素的抗氧化干预能有效靶向NOX2并减轻损伤。也提示人和动物科学饮食的抗氧化意义。

抗氧化策略的进化生态意义。抗氧化系统的保守性与多样性共同构成了生命进化的双重驱动力：保守性策略确保了生命在面对根本性挑战时的稳定性，而多样性策略则使生命能够适应不断变化的环境与生态位。从生命起源的视角来看，SOD、CAT等酶促抗氧化系统及抗坏血酸、谷胱甘肽等非酶抗氧化剂在真核生物中的高度保守性，提示这些机制可能起源于生命早期演化阶段，是应对氧化应激的原始生存工具包。

从基础研究走向应用转化。文章展望了抗氧化策略在农业育种、生物材料设计和医学治疗三大领域的转化潜力：借助基因编辑技术等，将植物在机械应力适应中演化出的抗氧化模块精准引入栽培作物，有望提升作物对强风、暴雨等机械胁迫的抵抗力；微生物在极端环境下演化的极简高效抗氧化策略，可为设计智能自修复生物材料提供分子仿生灵感；而通过解析Nrf2泛素化修饰、NOX2活性调节等调控节点，有望开发出将机械应力敏感性转化为临床治疗靶点的新型抗氧化疗法。

通讯作者简介



黄凯，2023年入职上海交通大学，| 入选2023年上海海外高层次人才计划，现为长聘教轨副教授、| 博士生导师。该课题组隶属于上海交大学生命科学技术学院力学生物学研究所，齐颖新（国家杰青、国家优青）特聘教授为研究所负责人。研究方向：心肺血管疾病的力-化-生信号转导机制与防治策略。2022年8月回国以来以通讯作者或者第一作者在Circulation Research (2026), Redox Biology (2026, 2022), Aging Cell (2026), Advanced Science (2025), Regenerative Biomaterials (2025), Biomaterials Advances (2025), Mechanobiology in Medicine (2023)等期刊发表研究论文；Advanced Genetics (2026), MedComm (2026), Biophysics Reports (2025), International journal of biological macromolecules (2025), Trends in Cardiovascular Medicine (2025), Mechanobiology in Medicine (2025), Biomedicine Pharmacotherapy (2024)等期刊发表综述或观点文章（部分为受邀）。指导博士生入选首批中国科协青年人才托举工程博士生专项计划等奖项。

论文信息

Antioxidation is a Common Defense Strategy for Different Species Under Mechanical Stress

Feixiang Zhu, Kai Huang

Advanced Genetics

DOI:10.1002/ggn2.202500043

原文链接：<http://dx.doi.org/10.1002/ggn2.202500043>

更多关于Advanced Genetics

Vol. 7 • No. 1 • March • 2026

ADVANCED GENETICS

Open Access

WILEY-VCH

TC GA GE O PDMSA
www.advgenetics.com

Homepage: www.advgenet.com

E-mail: advgenet@wiley.com

PubMed: Adv Genet (Hoboken)

Social Media :

LinkedIn: Advanced Portfolio

X:@Adv_Genet

ResearchGate:

<https://www.researchgate.net/journal/Advanced-Genetics-2641-6573>



Advanced Portfolio 公众号



Advanced Portfolio

微信搜索Advanced Portfolio
或长按二维码关注我们
拓展学术视野，提升科研影响力！

来源：Advanced Genetics

The banner features a dark green background with a subtle pattern of glowing dots and lines. A white search bar at the top contains a magnifying glass icon and the text 'Advanced Portfolio'. Below this, on the left, is a call to action in white Chinese text. On the right is a square QR code with a white 'A' logo in the center. A vertical white line separates the text from the QR code.

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发