



表型可塑性研究的新进展与应用前景

张国捷^{1*}, 王立平^{2*}, 李英贤^{3*}, 王秀杰^{4*}, 孟安明^{5*}

1. 浙江大学生命演化研究中心, 杭州 310030

2. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518067

3. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094

4. 中国科学院遗传与发育生物学研究所, 北京 100101

5. 清华大学生命科学学院, 北京 100084

* 联系人, E-mail: guojiezhang@zju.edu.cn; lp.wang@siat.ac.cn; yingxianli@aliyun.com; xjwang@genetics.ac.cn; mengam@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-12-09; 网络版发表日期: 2025-12-12

表型可塑性是生命科学领域的核心概念之一, 它揭示了生物体在不改变基因型的前提下, 通过调整形态、生理或行为特征来响应环境变化的能力. 这一现象不仅是生物适应性演化的重要策略, 更是连接生态学、演化生物学和发育生物学(Eco-Evo-Devo)研究的关键桥梁. 近年来, 随着多组学技术、基因编辑和合成生物学等前沿技术的快速发展, 表型可塑性的分子调控机制逐渐明晰, 其研究已从现象描述走向机制解析, 并展现出巨大的应用潜力. 表型可塑性研究不仅具有重要的理论意义, 更在医学、农业和生态保护等领域展现出广阔的应用前景. 在医学领域, 理解细胞表型可塑性有助于揭示疾病发生发展的机制, 为精准医疗提供新思路; 在农业领域, 利用作物的表型可塑性可以培育适应气候变化、抗病虫害的新品种, 保障粮食安全; 在生态保护领域, 表型可塑性研究为物种保护和生态系统修复提供科学依据. 可以说, 表型可塑性研究正在成为推动生物经济发展的重要驱动力.

近年来在国家自然科学基金委员会等部门的支持下, 我国在表型可塑性研究领域取得了一系列重要进展. 特别是在植物免疫可塑性、昆虫表型及行为分化、表观遗传调控等方面, 我国科学家做出了具有国际影响力的原创性贡献. 然而, 在原创理论突破、关键技术创新和成果转化应用等方面, 我们仍存在显著短板. 如何将表型可塑性的基础研究成果转化为实际应用, 如何建立跨尺度、

多层次的研究体系, 如何整合人工智能等新技术手段, 都是当前亟待解决的重要问题.

在此背景下, 国家自然科学基金委员会召开了第387期双清论坛“表型可塑性和性状稳定性的分子调控机制”, 此论坛探讨了表型可塑性在生物学、医学和农业等多领域的研究进展和应用前景, 凝练了亟待解决的核心问题和重点发展方向. 本次论坛结束后, 我们进一步邀请国内相关领域的顶尖专家学者, 组织此“表型可塑性与生物经济专题”. 本专题共收录6篇评述文章, 内容涵盖从分子机制到应用转化的多个层面, 系统展示了表型可塑性研究的前沿进展和未来方向.

1 表型可塑性的理论框架与研究方法

表型可塑性研究需要坚实的理论基础和先进的研究方法支撑. 王娇、刘薇薇和张国捷的综述文章系统梳理了表型可塑性研究的历史脉络与理论演进. 文章指出, 表型可塑性是指同一基因型的生物体为响应环境变化而产生多样化表型的生物学特性, 这一概念最早可追溯到19世纪拉马克和达尔文的工作, 而20世纪初Richard Wollterek提出的“反应规范”(reaction norm)概念则为表型可塑性的定量研究奠定了基础. 文章特别强调了表型可塑性在演化理论中的重要地位. 可塑性先导演化理论认为,

引用格式: 张国捷, 王立平, 李英贤, 等. 表型可塑性研究的新进展与应用前景. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 2453–2456

Zhang G J, Wang L P, Li Y X, et al. Recent advances in phenotypic plasticity research and its prospective applications (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2025, 55: 2453–2456, doi: 10.1360/SSV-2025-0400

表型可塑性可以促进新表型的快速产生, 为自然选择提供原材料, 进而推动演化创新. 这一理论挑战了传统的“基因突变-自然选择”演化模式, 揭示了表型变异在演化过程中的主动作用. 值得注意的是, 并非所有表型可塑性都具有适应意义, 某些非适应性可塑性甚至可能对生物体有害, 这提醒研究者需要全面评估表型可塑性的生态和演化后果. 文章进一步探讨了表型可塑性在医学、农业和生态保护等领域的应用价值, 为理解表型可塑性与生物经济的关系提供了全面的视角.

孙培森和叶凯的综述文章系统阐述了表型可塑性的概念框架、分子调控机制及其演化意义, 特别强调了表型可塑性本质上是生命体在亿万年演化历程中通过自然选择形成的“生存算法”. 文章指出, 尽管表型可塑性本身不涉及DNA序列的永久性改变, 但其背后的调控网络——从表观遗传标记的动态擦写、激素信号通路的级联放大, 到跨组织器官的协同响应——均受基因组内预先编码的遗传信息严格调控. 这一认识深化了我们对基因型-表型关系的理解. 文章还系统介绍了表型可塑性研究的前沿方法, 包括多组学技术整合、跨尺度分析和数学建模等. 特别值得关注的是, 如何利用人工智能技术学习从基因型到表型的层级映射关系, 这为未来研究开辟了新的方向.

2 表型可塑性的分子调控机制

深入理解表型可塑性的分子调控机制是该领域研究的核心任务. 本专题从不同生物系统和层次展示了表型可塑性调控的复杂性和精妙性.

在基因组层面, 马润泽、刘天成和朱冰的文章聚焦短串联重复序列(STR)及其异常扩增引发的重复扩增疾病. 短串联重复序列约占人类基因组的3%~5%, 其突变频率远高于单核苷酸多态性, 是重要的遗传变异来源. 文章系统阐述了短串联重复序列在DNA复制、修复和重组过程中容易形成特殊结构中间体, 导致长度改变, 从而呈现多态性特征. 目前已有60多种人类疾病被证实与短串联重复序列异常扩增相关, 包括脆性X染色体综合征、脊髓延髓性肌萎缩等. 这一研究揭示了基因组序列可塑性在疾病发生中的重要作用.

在发育层面, 张金利、徐海君和张传溪的文章深入探讨了昆虫翅多型现象的调控机制. 翅多型是相同基因型昆虫为响应异质环境条件而产生两种及以上翅型的经典表型可塑性现象. 文章系统综述了环境因子(如种群密度、营养条件、光周期等)、内分泌激素(特别是保幼激素和蜕皮激素)以及关键信号通路(如胰岛素信号通路)在

翅型分化中的作用. 得益于CRISPR等基因编辑技术的发展, 近十年来该领域取得了系列重要突破, 不仅深化了对物种适应性演化的理解, 也为害虫绿色防控和益虫高效利用提供了理论基础.

在免疫系统层面, 邓章雨滋和杨竞的文章揭示了中性粒细胞的功能可塑性. 中性粒细胞作为先天免疫系统的核心效应细胞, 长期以来被认为主要发挥促炎和杀菌功能. 然而, 单细胞测序技术的发展揭示了中性粒细胞的显著异质性和可塑性, 它们能够根据微环境信号动态调节表型和功能, 在不同条件下表现出促炎或抑炎特性. 在肿瘤微环境中, 中性粒细胞可极化为促肿瘤表型, 通过免疫抑制、促进血管生成等机制促进肿瘤发展. 这一发现为肿瘤免疫治疗提供了新的靶点.

3 表型可塑性在农业生物经济中的应用

农业是表型可塑性研究应用转化的重要领域. 面对全球气候变化、病虫害压力和粮食安全挑战, 如何利用作物的表型可塑性培育高产、多抗、适应性强的新品种, 是当前农业生物技术的核心任务.

张立、崔凯旋、林辉和何祖华的文章系统阐述了植物免疫可塑性与表观育种的关系. 植物在长期演化过程中形成了复杂的免疫系统来抵抗病原菌侵染, 这一系统具有显著的可塑性特征. 传统育种主要依赖抗病基因的挖掘和利用, 但面临抗性时效短、多抗耦合复杂等瓶颈. 文章指出, 表观遗传调控在植物免疫可塑性中发挥关键作用, DNA甲基化、组蛋白修饰、染色质重塑等表观遗传机制可以在不改变DNA序列的前提下, 调控植物的抗病性.

更重要的是, 表观遗传变异具有一定的可遗传性和可逆性, 这为表观育种提供了理论基础. 通过表观基因组编辑技术, 可以精准调控特定基因的表观遗传状态, 实现对植物免疫反应的精细调控. 结合CRISPR-Cas系统和表观编辑器, 可以在不引入外源基因的情况下, 增强作物的抗病性, 同时避免过度激活免疫反应导致的产量损失. 文章还展望了人工智能与合成生物学在未来抗病育种中的应用前景, 为解决粮食安全与绿色农业转型提供了新思路.

昆虫翅多型研究在害虫防控和益虫利用方面也展现出重要应用价值. 许多重要农业害虫如稻飞虱、蚜虫等具有翅多型特征, 长翅型个体的远距离迁飞能力是害虫暴发成灾的重要原因. 深入理解翅型分化的分子机制, 可以为开发新型害虫防控策略提供靶点. 例如, 通过干扰关键激素信号通路或转录因子, 可以阻止害虫产生长翅型

个体, 从而控制其种群扩散. 另一方面, 对于蜜蜂、寄生蜂等益虫, 可以通过调控翅型分化提高其种群建立和扩散能力, 增强生物防治效果.

4 表型可塑性在医学领域的应用前景

表型可塑性研究在医学领域同样具有重要意义. 细胞表型可塑性在肿瘤发生发展、免疫调节、组织再生等过程中发挥关键作用, 理解其机制有助于开发新的诊断和治疗策略.

中性粒细胞可塑性研究为肿瘤免疫治疗提供了新视角. 传统观点认为中性粒细胞主要发挥抗肿瘤作用, 但近年来研究发现, 在肿瘤微环境中, 中性粒细胞可以被重编程为免疫抑制性表型(类似于骨髓来源抑制性细胞, MDSCs), 通过多种机制抑制T细胞功能, 促进肿瘤血管生成和转移. 基于这一认识, 靶向中性粒细胞的治疗策略正在兴起, 包括: (i) 阻断中性粒细胞向肿瘤组织募集; (ii) 重编程肿瘤相关中性粒细胞, 恢复其抗肿瘤功能; (iii) 抑制中性粒细胞胞外陷阱(NETs)形成, 减少其促转移作用. 这些策略与免疫检查点抑制剂等疗法联合应用, 有望提高肿瘤治疗效果.

行为可塑性是机体稳态调控的重要组成部分, 其核心在于通过行为策略的动态重构, 实现对多系统、多器官功能状态的协调调节. 多学科交叉技术综合支撑下的国际进展表明, 行为的生成与调控并非单一中枢神经系统即可缜密完成. 作为多模态信息流的整合枢纽, 中枢在外界刺激下需同步整合外周代谢与免疫网络的层层调控, 因而行为表型本质上体现了多系统网络的耦合特性.

这一研究框架正在重塑行为生物学的范式. 因此, 围绕以中枢神经系统-外周器官互作为核心框架, 解析中枢与外周器官双向调节的神经-免疫-代谢机制, 将为构建通过行为可塑性调节机体稳态失衡的新策略提供关键的科学方向与技术支持. 此类跨系统调控模式不仅为理解神经精神疾病及睡眠障碍与其共病的代谢、免疫异常之间的因果联系提供新的理论基础, 也为实现多系统精准干预开辟了新的可能.

短串联重复序列异常扩增引发的重复扩增疾病研究, 为神经退行性疾病等的诊断和治疗提供了新思路. 这类疾病通常表现出遗传早现(anticipation)现象, 即疾病发病年龄随代际传递而提前, 症状加重, 这与短串联重复序列的不稳定性密切相关. 深入理解短串联重复序列扩增的分子机制, 包括DNA复制滑移、错配修复缺陷、表观遗传调控等, 有助于开发针对性的治疗策略. 例如, 利用反义寡核苷酸(ASO)技术降低含有扩增重复序列的RNA水平, 或利用CRISPR技术切除扩增的重复序列, 都显示出治疗潜力.

总之, 尽管表型可塑性研究取得了显著进展, 但仍面临诸多挑战. 首先, 表型可塑性的分子机制极其复杂, 涉及基因表达调控、表观遗传修饰、信号转导、代谢重编程等多个层面的协同作用, 需要发展更加精密和高效的研究技术. 其次, 表型可塑性的演化意义和生态学后果仍需深入探讨, 特别是在快速变化的环境中, 表型可塑性如何影响物种适应和演化方向. 最后, 从基础研究到应用转化还存在较大距离, 如何将表型可塑性的研究成果应用于作物育种、疾病治疗和生态保护, 需要跨学科协作和技术创新.

Recent advances in phenotypic plasticity research and its prospective applications

ZHANG GuoJie^{1*}, WANG LiPing^{2*}, LI YingXian^{3*}, WANG XiuJie^{4*} & MENG AnMing^{5*}

¹ Centre for Evolutionary & Organismal Biology, Zhejiang University, Hangzhou 310030, China

² Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518067, China

³ China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China

⁴ Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

⁵ School of Life Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding authors, E-mail: guojiezhang@zju.edu.cn; lp.wang@siat.ac.cn; yingxianli@aliyun.com; xjwang@genetics.ac.cn; mengam@mail.tsinghua.edu.cn

doi: 10.1360/SSV-2025-0400



张国捷, 浙江大学求是讲席教授, 生命演化研究中心主任。曾任哥本哈根大学终身教授、生物多样性基因组研究中心主任。主要从事基因组学和生物多样性研究, 相关工作厘清了多个代表性物种类群的起源及演化之谜, 阐述了演化历史上辐射性物种大爆发过程的基本规律, 并揭示调控多种生物复杂性状的遗传机制, 丰富了我们对于物种形成、自然选择学说和物种适应性遗传创新的理解, 并为人类组织器官和功能的溯源及发育调控机制提供了演化视角下的新见解, 相关研究成果多次入选“中国十大生命科学研究进展”。此外, 研究团队结合计算生物学和大数据信息处理, 开发了一系列基因组学和演化基因组学的新方法, 为未来健康大数据分析和多学科交叉研究奠定了基础。



王立平, 研究员, 中国科学院深圳先进技术研究院脑认知与脑疾病研究所所长、深港脑科学创新研究院院长、深圳理工大学讲席教授、广东省脑连接图谱重点实验室主任; 享受国务院政府特殊津贴, 曾获广东省自然科学奖一等奖、广东省丁颖科技奖等。担任中国神经科学学会副理事长等。聚焦本能行为神经环路解析与脑体互作的神经调控机制研究, 解析了调控恐惧、摄食与睡眠等本能行为的细胞特异性皮层下神经环路机制, 揭示了负性情绪状态影响本能恐惧行为反应及骨、糖代谢等机体稳态失衡的神经-分子机制, 开发并发展了AI辅助的动物行为精细分析方法及与光遗传匹配的神经调控技术。为机体“生存功能环路”及“神经系统为中心的大脑-器官间的调控机制”研究提供了关键的结构与功能证据, 为从机体整体观出发认识本能行为对个体生存与稳态维持的调控机制探索提供了创新研究框架。研究成果发表在*Nature*, *Nat Rev Neurosci*, *Neuron*, *JCI*, *Nat Commun*等期刊。



李英贤, 航天医学与生物学家, 中国航天员科研训练中心研究员, 博士生导师, 航天分子医学科技创新团队带头人。针对航天特殊环境因素对机体的影响, 尤其是“机体如何感应重力”这一航天医学领域的基本科学问题, 在分子、细胞和组织器官等不同尺度上揭示了失重信号的感知、传导及调控机制, 解析了失重条件下机体不同组织的响应特征及其交互作用, 建立了“机体的多层级重力感应与重塑”理论体系, 不仅为航天医学奠定理论基石, 更在临床医学领域为废用性骨丢失、心肌重塑等难题提供创新解决方案。相关成果发表在*Nat Med*, *Nat Commun*, *Circulation*, *Eur Heart J*, *Proc Natl Acad Sci USA*等刊物。获国家杰出青年科学基金资助, 国家“万人计划”科技创新领军人才、国家百千万人才, 第十三届中国青年科技奖、第十一届中国青年女科学家奖、第十九届中国科协“求是”奖、女科技工作者社会服务奖等, 享受国务院政府特殊津贴。



王秀杰, 研究员, 中国科学院遗传与发育生物学研究所零一创新研究中心主任。主要从事RNA调控相关的生物信息学与实验生物学研究, 近年来也开展人类多组织拟胚胎体外模型的构建和基于3D打印的心脏组织构建研究。多项工作得到*ScienceNow*, *Nat Rev Genet*等科技媒体的推荐, 一项成果入选国家“十三五”科技创新成就展。兼任国家重点研发计划项目首席科学家、ISCB-China副主席、中国细胞生物学学会功能基因组信息学与系统生物学分会会长等职务。曾获国家杰出青年科学基金资助, 及“中央和国家机关青年五四奖章标兵”“中国青年五四奖章”“全国五一巾帼标兵”“全国三八红旗手”等荣誉称号。获得首届“中源协和生命医学创新突破奖”、第八届“中国侨界贡献奖”一等奖和2022年度3D *Pioneers Challenge MEDTECH*奖。2014年和2016年分别作为第二完成人和第四完成人获得“国家自然科学基金”二等奖。



孟安明, 清华大学生命科学学院钱塘讲席教授, 清华-北大生命科学联合中心研究员, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士, 宗座科学院(Pontifical Academy of Sciences)院士。曾获何梁何利基金科学与技术进步奖、谈家桢生命科学成就奖、中国细胞生物学学会杰出成就奖、中国斑马鱼研究终身成就奖等奖励。长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者。主要以斑马鱼和小鼠为模式动物, 聚焦胚胎早期发育的分子机制, 研究发现了数十个调控胚胎卵裂期和早期囊胚的细胞命运、胚层诱导和分化、背-腹轴和头-尾轴形成的重要因子, 并揭示其作用机制, 丰富了胚胎发育相关知识; 研究成果发表在*Science*, *Cell*, *Dev Cell*, *Nat Cell Biol*, *Development*等国际著名期刊上。曾任中国科学院动物研究所所长、中国科协生命科学学会联合体主席、中国动物学会理事长等职。