中国比较医学杂志
Chinese Journal of Comparative Medicine
ISSN 1671-7856,CN 11-4822/R

《中国比较医学杂志》网络首发论文

题目：　浅谈环境丰容对实验动物福利的影响与对策建议
作者：　耿祥飞，王鹏，王树新
收稿日期：　2026-02-11
网络首发日期：　2026-08-27
引用格式：　耿祥飞，王鹏，王树新．浅谈环境丰容对实验动物福利的影响与对策建议[J/OL]．中国比较医学杂志.
https://link.cnki.net/urlid/11.4822.R.20260826.1718.004

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

浅谈环境丰容对实验动物福利的影响与对策建议

耿祥飞[1,2]，王 鹏[3]，王树新[4]✉

（1.北京莱艾特科技发展有限公司，北京 100193；2.北京远大星火医药科技有限公司，北京 100886；3.北京大学第一医院实验动物中心，北京 100034；4.苏州猴皇动物实验设备科技有限公司，苏州 215143）

✉通信作者 王树新（1966—），男，高级工程师，研究方向：实验动物笼器具开发。E-mail：szhouhuang@163.com

摘要 环境丰容是提升实验动物福利、维护科研伦理的重要手段。其通过对环境物理、社交、感官及认知环境进行多维度调控，满足不同动物的物种特异性需求。适宜的环境丰容能够改善动物生理与行为状态；而设计不当，则可能诱发动物应激与社群冲突。环境丰容可通过调控应激-神经内分泌-免疫轴，直接影响动物实验质量与实验数据的稳定性。目前我国实验动物环境丰容落地实施仍面临诸多挑战：相关标准尚不健全、缺少针对不同物种的专用方案、实施与管理落地难度大、跨学科协作不足。未来应围绕精准化、标准化、智能化管理开展工作，强化机制研究、完善标准体系、推动多学科交叉融合，构建全链条实施体系。上述举措既可以保障实验动物福利，也能够提升科研数据的准确性与可重复性，助力我国生物医药研究朝着规范化、精细化、与国际接轨的方向发展。

关键词 环境丰容；实验动物；物种特异性；双重效应；标准化；科研数据质量

中图分类号 R-33；Q95-33；B82-058 文献标志码 A

Influence of environmental enrichment on laboratory animal welfare and related countermeasures

GENG Xiangfei[1,2], WANG Peng[3], WANG Shuxin[4]

(1. Beijing Lab Anim Tech Develp Co., Ltd., Beijing 100193, China. 2.Beijing Yuanda Xinghuo Pharmaceutical Technology Co., Ltd., Beijing 100886. 3. Laboratory Animal Center, Peking University First Hospital, Beijing 100034. 4. Suzhou Huanghou Animal Experiment Equipment Technology Co., Ltd., Jiangsu 215143)

Abstract Environmental enrichment is a key approach to improving laboratory animal welfare and upholding research ethics. It involves the multidimensional regulation of the physical, social, sensory, and cognitive environment to meet the species-specific needs of different animals. Appropriate environmental enrichment can improve physiological and behavioral status, whereas inappropriate design may induce stress and social conflicts. By modulating the stress–neuroendocrine–immune axis, environmental enrichment can directly influence the quality of animal experiments and the stability of experimental data. Current challenges in implementing environmental enrichment for laboratory animals in China include incomplete standards, a lack of species-specific protocols, difficulties in implementation and management, and insufficient interdisciplinary collaboration. Future efforts should be directed toward precision, standardization, and intelligent management by strengthening mechanistic research, improving the standard system, promoting interdisciplinary integration, and establishing a full-chain implementation system. These measures will not only safeguard the welfare of laboratory animals, but also enhance the reliability and reproducibility of research data and promote the standardized, refined, and internationally aligned development of biomedical research in China.

Key words environmental enrichment; laboratory animals; species-specific; dual effects; standardization; research data quality

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

实验动物是生命科学研究的核心载体，其生存环境的适宜性直接关系到动物福利与研究数据的科

收稿日期：2026-02-11
作者简介：耿祥飞（1975—），男，高级兽医师，研究方向：实验动物环境丰容用品开发与推广应用。E-mail：info@bjlat.com
网络首发时间：2026-08-27 09:39:35 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.4822.R.20260826.1718.004

学性。我国出台多项国家标准与法规条例，明确要求动物实验遵循 3R 原则（替代、减少、优化）和动物福利五大自由，旨在改善实验动物福利，降低其痛苦。环境丰容源于动物园学术语，作为优化实验动物生存环境的关键手段，通过模拟自然环境、提供感官与社交刺激，满足动物生理及行为需求，促进其自然行为表达，已成为实验动物领域的研究重点[1]。《实验动物 环境及设施》[2]（GB 14925—2023）和《实验动物福利伦理审查指南》[3]（GB/T 35892—2018），为环境丰容实施提供了法律与技术支撑。当前，实验动物研究中仍存在动物生活环境标准化程度不足、福利保障措施参差不齐等问题，进而导致研究数据重复性差、个体差异显著等科研痛点。本文围绕环境丰容的内涵、其对动物福利与实验数据的影响以及应用挑战展开分析，提出针对性建议，为丰容用品规范化应用提供参考。

1 环境丰容的科学内涵

1.1 核心要素

环境丰容聚焦于饲养环境的物理结构与物质配置优化，是丰容的基础层面。核心内容包括笼具空间设计、垫料选择、环境参数精准调控以及功能性设施配置。美国《实验动物饲养管理与使用指南》明确规定，需要及时轮换或更新动物丰容用品以保持环境丰富及新鲜度，但要注意频繁的变更可能会造成动物应激[4]；我国 GB 14925—2023 要求实验动物丰容用品应符合实验动物的生活习性，如啮齿类动物需要提供筑巢材料，并在使用前经灭菌处理，保障其筑巢行为的表达和安全。环境丰容设计的核心原则要契合物种特异性，常规实验室饲养条件下，可通过构建人工洞穴结构，部分还原自然环境，例如，为小鼠等动物提供隐蔽空间，缓解其紧张情绪、改善繁殖条件与睡眠质量，进而提高繁殖成功率、减少个体间攻击行为、保障幼鼠存活率[5]。

1.2 实施原则

（1）福利原则导向：环境丰容的实施需严格遵循 3R 原则和动物福利五大自由，其中优化环境是核心导向。通过环境优化，可减少实验动物的应激反应，提升实验数据的稳定性，进而减少为弥补数据差异所需的样本量，实现“减少”原则的目标；同时，合理的环境丰容可替代部分侵入性实验手段（如应激模型构建中的人为刺激），契合“替代”原则的要求。

（2）标准化与个性化平衡原则：环境丰容的基础参数需严格遵循国家标准，同时，需结合不同物种的特异性需求进行个性化设计。

（3）伦理审查必备原则：根据国家标准《实验动物福利伦理审查指南》要求，环境丰容方案需纳入动物实验伦理审查的核心内容，审查要点包括方案的科学性（是否匹配物种需求）、合理性（是否过度消耗资源）以及安全性（是否存在动物受伤、交叉污染风险）[3]。

1.3 类型与实施标准

根据刺激类型将环境丰容分四大类，不同动物因物种特性、生活习性差异，其最优丰容类型与最低实施标准存在显著区别（表 1）。

表1 不同类型环境丰容的核心内容、代表动物最优选择及最低实施标准

Table 1 Core contents, optimal animal selection and minimum implementation standards for different types of environmental enrichment

丰容类型 Enrichment types	核心内容 Core content	代表动物最优选择 Optimal animal selection	最低实施标准 Minimum implementation standards
听觉丰容 Auditory enrichment	控制环境噪音、提供适宜声音环境，避免突发强音刺激 Control environmental noise, provide an appropriate acoustic environment, and avoid sudden intense sound stimulation	啮齿类：避免高频持续噪音；非人灵长类：播放自然环境音（如鸟鸣、流水声） Rodents: Avoid continuous high-frequency noise. Non-human primates: Play natural environmental sounds (e.g., bird songs, running water)	噪音水平控制在国标规定范围（如啮齿类≤60 dB），避免突发音刺激，保持环境音稳定 Control the noise level within the range specified by national standards (e.g., ≤60 dB for rodents), avoid sudden sound stimulation, and maintain a stable acoustic environment
视觉丰容 Visual enrichment	调控光照周期、提供视觉遮挡空间、优化环境视觉复杂度 Regulate the light cycle, provide visual shelter space, and optimize the visual complexity of the environment	昼行性动物（如非人灵长类）：12 h 光/12 h 暗周期；夜行性动物（如大鼠）：弱光环境 ＋ 隐蔽空间 Diurnal animals (e.g., non-human primates): 12 h light / 12 h dark cycle; Nocturnal animals (e.g., rats): dim light environment+sheltered space	光照强度、周期严格符合对应动物国标要求，笼舍内设置至少 1 处视觉遮挡区域，避免动物长期暴露于强光下 The light intensity and cycle must strictly comply with the national standard requirements corresponding to the animal species. At least one visual shelter area should be set in the cage to avoid the animals being exposed to strong light for a long time
用品丰容 Toy and manipulative enrichment	提供啃咬、探索、益智类玩具，满足动物操作与探索需求 Provide chewing, exploring, and educational toys to meet the animals' needs for manipulation and exploration	啮齿类：跑轮、隧道、筑巢材料；非人灵长类：益智取食器、攀爬架 Rodents: Running wheels, tunnels, and nesting materials; Non-human primates: puzzle feeders and climbing frames	玩具需无毒、无尖锐边角，定期更换以避免动物习惯化，确保玩具尺寸与动物体型匹配，防止误食或窒息风险 The toys shall be non-toxic and free of sharp edges. They should be replaced regularly to avoid animals becoming habituated. Ensure the size of the toys matches the animal's body size to prevent the risk of ingestion or suffocation
空间丰容 Shelter and spatial enrichment	构建分层饲养空间、隐蔽区域，满足动物领地需求与躲避行为 Construct a multi-layered rearing space and hidden areas to satisfy the animals' territorial needs and avoidance behaviors	群居动物（如小鼠）：足够隐蔽空间以减少攻击行为；独居动物（如仓鼠）：专属领地空间 Social animals (e.g., mice): Provide sufficient hidden space to reduce aggressive behavior; Solitary animals (e.g., hamsters): Allocate exclusive territorial space	饲养空间面积、高度满足国标最低要求，笼舍内设置至少 1 处隐蔽区域，保障动物可自由选择暴露或躲避状态 The area and height of the rearing space shall meet the minimum requirements of national standards. At least one hiding area shall be set in the cage to ensure that the animals can freely choose to be exposed or hidden

2 环境丰容对实验动物福利的双重效应

2.1 正向福利提升效应

2.1.1 生理福利改善

环境丰容通过调控实验动物应激通路，降低生理应激水平，提升机体健康状态。研究表明，筑巢材料能够降低群居雄性动物的压力与攻击性，显著改善其福利水平。对大鼠提供筑巢材料，使其能够通过自主构筑巢穴来调节局部环境温度和光照强度，并构建具有遮蔽功能的避难空间，从而有效提升其安全感[6]。

2.1.2 心理与行为福利优化

环境丰容可有效减少实验动物刻板行为与异常行为，促进自然行为表达，改善心理状态。大量研究证实，适宜的环境丰容可减少攻击行为、刻板行为等异常行为的发生频率，促进自然行为的表达，并改善心率、呼吸频率等应激相关的生理指标。例如，放置镜子能减少异常行为、改善生长性能，尤其对缓解单独饲养兔子可能产生的孤独感具有积极效果[7]。环境丰富作为一种非侵入性干预手段，可通过下调海马体和下丘脑中糖皮质激素受体的表达，改善雄性大鼠因压力引起的行为异常及下丘脑-垂体-肾上腺轴的异常编程[8]。

2.2 潜在福利风险

2.2.1 过度丰容的负效应

环境丰容过度或设计不合理，可能引发新的福利问题。一是社交冲突风险，群养环境中，资源（如食物、玩具、隐蔽空间）竞争可能导致优势个体与弱势个体间的攻击行为增加。二是感官过载问题，高频、高强度的多感官刺激可能导致实验动物出现应激反应，如豚鼠在持续高分贝背景音响环境中，会出现食欲下降、体质量增长缓慢等症状，血清中应激标志物（皮质醇、肾上腺素）浓度显著升

高。三是环境对比负效应，适宜的运动有效减少大鼠刻板行为的发生，但运动疲劳可导致大鼠的空间认知能力受损，其机制可能与海马晚期长时程增强抑制、环磷腺苷反应元件结合蛋白磷酸化水平降低以及小清蛋白阳性神经元减少有关[9]。

2.2.2 物种特异性适配不足风险

不同物种的生理习性与行为需求差异显著，“一刀切”式的环境丰容设计不仅无法保障福利，甚至造成伤害。例如，将适用于小鼠的啃咬玩具应用于仓鼠，可能导致仓鼠牙齿过度磨损。

2.2.3 卫生安全风险

环境丰容用品（如垫料、玩具、攀爬架）若清洁消毒不及时，会成为微生物滋生的温床，增加实验动物交叉感染的风险。例如，长期未更换的木质垫料会滋生真菌，导致小鼠出现皮肤感染；共享环境丰容用品可能传播病毒，引发群居动物的群体性疾病。选择易清洁、耐消毒的丰容用品材料（如食品级塑料、不锈钢等）；定期监测环境微生物指标，确保符合屏障环境标准[10]。

3 环境丰容对研究数据质量的影响

3.1 对行为学实验的影响

行为学实验数据的准确性与稳定性高度依赖实验动物的行为状态，环境丰容通过调控动物的心理与行为模式，对实验结果产生显著影响。

在正向影响方面，环境丰容可减少个体行为差异，提升数据的重复性。例如，在强迫游泳实验中，丰富环境饲养的小鼠行为表现更稳定，避免了因个体应激差异导致的实验误差。在负向影响方面，过度或不当的丰容可能导致动物行为异化，如过度探索行为会干扰实验任务执行，进而影响结果可靠性[11,12]。

3.2 对生理学指标的影响

生理学指标是反映动物健康状态最基础的依据，环境丰容对其影响主要体现在以下方面。（1）基础生理指标：适宜的环境丰容可稳定动物体温、心率、呼吸频率，减少应激导致的生理波动；（2）激素水平：丰容可降低血清皮质醇、肾上腺素等应激激素浓度，提升促性腺激素、生长激素等合成代谢激素水平；（3）代谢指标：丰富环境可促进动物活动量，改善糖脂代谢，降低肥胖、胰岛素抵抗等代谢异常风险[13,14]。

3.3 对免疫学指标的影响

环境丰容通过调控应激水平与行为状态，对动物免疫系统产生多维度影响。（1）免疫细胞数量：适宜丰容可提升外周血淋巴细胞、巨噬细胞等免疫细胞数量，增强固有免疫与适应性免疫功能；（2）细胞因子水平：可降低促炎性细胞因子（如 TNF-α、IL-6）浓度，提升抗炎性细胞因子（如 IL-10）水平，维持免疫稳态；（3）抗体应答：丰容可提升疫苗接种或抗原刺激后的抗体滴度，增强体液免疫应答能力[15-16]。

3.4 对特殊模型构建的影响

环境丰容对不同类型疾病动物模型的构建与表型稳定性具有关键调控作用。（1）肿瘤模型：适宜环境丰容可抑制肿瘤生长、减少转移风险，同时提升化疗药物的抗肿瘤效果，其机制与增强免疫监视、降低应激水平有关；（2）神经/精神类模型：在阿尔茨海默病模型中，丰容可改善认知功能、减少 β-淀粉样蛋白沉积；在抑郁症模型中，可缓解行为绝望、提升探索行为，其作用与促进神经可塑性、调控炎症因子相关；（3）代谢与心血管疾病模型：环境丰容在肥胖模型中所引起的变化可导致葡萄糖代谢正常化、脂肪组织炎症减弱、肝脂肪变性减少、血脂状况改善；在高血压模型中，该干预在腹外侧延髓和肾脏发挥抗氧化作用，减轻高血压大鼠的氧化损伤；上调肾脏及血管组织 SOD-3 表达，降低血管活性氧水平，进而改善内皮功能与血管反应性，实现降压效果。其作用机制与提升机体活动水平、调控肠道菌群结构密切相关[17-20]。

实验前实施稳定的环境丰容干预，降低动物应激水平、建立生理行为基线；实验期间延续优化丰容，缓解操作应激、促进恢复；实验前后保持环境丰容连续一致，保障实验数据准确可靠。

4 环境丰容应用现存问题、挑战及应对建议

4.1 潜在福利风险

过度丰容或丰容方案设计失当，同样会诱发新的动物福利风险：

（1）社群竞争加剧：群养模式下，丰容供给的食物、玩耍器具、躲避休憩位点等资源若分配不均衡，极易激化个体间地位博弈，提升优势个体对弱势个体的攻击、欺凌行为；可通过优化资源布设方式、管控饲养密度，降低此类社群冲突的发生概率。

（2）感官刺激负荷过高：若同时叠加高强度的多重感官刺激，会超出动物生理适应阈值，进而诱发应激损伤。以豚鼠为例，长期暴露于高响度声刺激环境下，可表现为采食欲望降低、体质量增长受阻，同时血清皮质醇、肾上腺素水平显著上调；实际应用中需把控各类刺激的强度与频次，维持饲养环境的稳态，规避感官过度负荷带来的负面影响[12]。

对策建议：合理控制饲养密度，优化丰容用品、隐蔽空间等资源配置，建立动物行为日常监测机制；严格遵循 GB 14925—2023，控制噪音、光照等刺激，贴合动物昼夜节律；构建物种专属丰容方案数据库，实施前开展预实验，验证丰容方案的适配性；选用易于消毒的材质，建立清洁消毒台账，定期监测微生物指标，保障各项条件满足屏障环境相关标准。

4.2 成本与管理复杂性制约应用推广

环境丰容的实施需要额外的资源投入，其成本与管理复杂性成为制约其在部分动物实验室推广的关键因素：

（1）成本因素：受行业起步较晚的影响，实验动物丰容用品行业发展受限，从业企业较少，行业监管体系尚不完善。作为实验动物专用产品，丰容用品市场使用总量偏低，本身成本较高，同时，生产加工过程对环境卫生等条件要求严苛，进一步推高了产品成本。

（2）管理因素：实际应用中还需开展定期清洁、消毒灭菌等操作，人力物力消耗较大，造成丰容用品普及率低，市场需求有限，进而制约丰容用品行业的发展水平与推广应用。

对策建议：加强行业监管，推动科研机构与企业产学研合作，研发高性价比、可重复使用的实验动物环境丰容用品；建立跨机构集中采购机制，降低采购成本；制定统一管理 SOP，采用简易监测手段，开展管理人员专项培训；加强福利伦理宣传，争取专项经费支持，推动环境丰容用品标准化、通用化。

4.3 环境丰容研究学科交叉融合不足

当前环境丰容研究仍存在学科交叉融合不足的问题。行为学、生理学、免疫学等领域研究相对独立，缺乏跨学科的整合研究，难以全面揭示环境丰容对动物福利的调控机制，未来需加强多学科协作，推动环境丰容研究向纵深发展。

对策建议：搭建跨学科研究平台，设立专项项目，联合攻关丰容机制、物种适配等核心问题；建立研究成果共享数据库，推动基础研究与实践应用转化；优化人才培养方案，开展跨学科交流，借鉴国际先进经验，提升研究深度。

5 结论

当前，我国实验动物环境丰容的研究与应用仍面临若干关键瓶颈：标准化评估体系尚不健全、物种与基因型特异性需求研究相对滞后、丰容产品成本及管理复杂度制约规模化推广以及多学科交叉融合深度不足。以 GB 14925—2023、GB/T 35892—2018 为基础，完善丰容专项标准，结合物种特性制定个性化方案；建立生理、行为、免疫多维度效果评估体系；强化伦理审查，建立常态化监管与奖惩机制，推动标准与国际接轨。

未来应围绕“精准化、标准化、智能化”发展方向，整合科学数据与物种特异性信息，深入阐明环境丰容对实验动物生理与行为的分子调控机制；加快完善环境丰容标准化评估体系，推动多学科协同创新，逐步构建集环境设计、福利评价、数据验证于一体的全链条研究与实践体系。该体系不仅能够切实保障实验动物福利、严守科技伦理底线，还可提升我国生物医学研究数据的可靠性与国际认可度，推动实验动物科学高质量可持续发展，为生命医学领域的突破与创新提供坚实支撑。

参考文献：

[1] 刘帅， 宋佳阳， 吕赛， 等． 环境丰容对 SD 大鼠行为和肾上腺皮质激素的影响研究 [J]． 中国比较医学杂志， 2020， 30（12）： 92-97．
Liu S, Song J Y, lyu S, et al. Effect of environmental enrichment on behavior and cortin levels in SD rats [J]. Chin J Comp Med, 2020, 30(12): 92-97.

[2] GB 14925—2023 实验动物 环境及设施 [S]．
GB 14925—2023 Laboratory animal environment and facilities [S].

[3] GB/T 35892—2018 实验动物 福利伦理审查指南 [S]．
GB/T 35892—2018 Laboratory animal—Guideline for ethical review of animal welfare [S].

[4] National Research Council US Committee for the Update of the Guide for the Care, Use of Laboratory Animals. Guide for the Care and Use of Laboratory Animals [M]. 8th ed. Washington (DC): National Academies Press (US), 2011.

[5] 耿祥飞， 王鹏， 赵欢， 等． 玩具在实验动物福利中的作用和发展趋势分析 [J]． 实验动物科学， 2024， 41（6）： 102-105．
Geng X F, Wang P, Zhao H, et al. Trend of development analysis and the role of toys in the laboratory animals welfare [J]. Lab Anim Sci, 2024, 41(6): 102-105.

[6] 张孟蕾， 牛屹东． 筑巢材料在实验大、小鼠环境丰荣中的应用 [J]． 中国实验动物学报， 2012， 20（2）： 93-98．
Zhang M L, Niu Y D. Nesting materials in environmental enrichment for laboratory rats and mice [J]. Acta Lab Animalis Sci Sin, 2012, 20(2): 93-98.

[7] Krunt O, Zita L, Kraus A. A review of the effects of housing system on production and welfare in growing rabbits} [J]. Anim Sci Pap Rep, 2020, 38(4): 321-332.

[8] Fan Z, Chen J, Li L, et al. Environmental enrichment modulates HPA axis reprogramming in adult male rats exposed to early adolescent stress [J]. Neurosci Res, 2021, 172: 63-72.

[9] 金硕， 李鸿扬， 张晓晓， 等． 运动疲劳损害大鼠空间认知能力并导致海马 CA1 区 L-LTP 抑制 [J]． 神经解剖学杂志， 2023， 39（2）： 172-178．
Jin S, Li H Y, Zhang X X, et al. Exercise-induced chronic fatigue impairs spatial cognition of rats and causes L-LTP inhibition in hippocampal CA1 region [J]. Chin J Neuroanat, 2023, 39(2): 172-178.

[10] 张薇， 王牧孜， 邓少嫦． 实验动物屏障设施微生物污染防控管理要点 [J]． 中国比较医学杂志， 2023， 33（7）： 117-122．
Zhang W, Wang M Z, Deng S C. Operational management and prevention of contamination in barrier environment facilities of laboratory animals [J]. Chin J Comp Med, 2023, 33(7): 117-122.

[11] Kentner A C, Speno A V, Doucette J, et al. The contribution of environmental enrichment to phenotypic variation in mice and rats [J]. eNeuro, 2021, 8(2): ENEURO.0539-20.2021.

[12] Domínguez-Oliva A, Hernández-Avalos I, Bueno-Nava A, et al. Environmental enrichment for laboratory rats and mice: endocrine, physiological, and behavioral benefits of meeting rodents' biological needs [J]. Front Vet Sci, 2025, 12: 1622417.

[13] Villiger P, Calvet C, Pastor-Arroyo E M, et al. Thermoneutral environment improves mouse welfare and reduces stress in metabolic cages [J]. Lab Anim, 2025, 54(11): 303-312.

[14] Manzo R, Al E. Environmental enrichment prevents gut dysbiosis progression and enhances glucose metabolism in high-fat diet-induced obese mice [J]. Int J Mol Sci, 2024, 25(13): 6904.

[15] Liu D, Jiang X Y, Zhou L S. Enriched environment on the intestinal mucosal barrier and brain-gut axis in rats with colorectal cancer [J]. Exp Biol Med (Maywood), 2018, 243(15/16): 1185-1198.

[16] Gurfein B T, Davidenko O, Premenko-Lanier M, et al. Environmental enrichment alters splenic immune cell composition and enhances secondary influenza vaccine responses in mice [J]. Mol Med, 2014, 20(1): 179-190.

[17] Díaz de León-Guerrero S, Salazar-León J, Meza-Sosa K F, et al. An enriched environment re-establishes metabolic homeostasis by reducing obesity-induced inflammation [J]. Dis Models Mech, 2022, 15(6): dmm048936.

[18] Chen H C, Cao J X, Zhang Y S, et al. Enriched environment alleviate AD pathological progression by reducing microglia complement signaling in aged male APP/PS1 mice [J]. FASEB J, 2025, 39(17): e71026.

[19] Zhang W, Jiang G, Kang H, et al. Environmental enrichment exposure alleviates geriatric depressive-like symptoms through regulating neurogenesis and neuroinflammation [J]. Environ Health (Wash), 2025, 3(3): 259-270.

[20] Sousa L E, Favero I F D, Bezerra F S, et al. Environmental enrichment promotes antioxidant effect in the ventrolateral medulla and kidney of renovascular hypertensive rats [J]. Arq Bras Cardiol, 2019, 113(5): 905-912.