

微塑料对生殖系统毒性作用的研究现状

林家希*, 肖文字*, 张梦玉, 王明明, 赵雨, 殷灿, 王碧红, 苏玉军#

河北东方学院健康学院, 河北 廊坊

收稿日期: 2025年11月20日; 录用日期: 2026年1月7日; 发布日期: 2026年1月15日

摘要

微塑料对生殖系统的毒性作用研究是当前环境科学和公共卫生领域的热点。微塑料在环境中的广泛存在可能对生物体产生显著影响。本文系统综述了微塑料的环境行为、毒性机制及其对生殖系统的多层次影响。研究微塑料对生殖系统的毒性作用, 为环境保护和公众健康保障提供科学依据, 也为评估对环境和人类健康的潜在风险提供了重要参考。

关键词

微塑料, 生殖毒性, 环境污染

Current Status of Research on the Toxic Effects of Microplastics on the Reproductive System

Jiaxi Lin*, Wenyu Xiao*, Mengyu Zhang, Mingming Wang, Yu Zhao, Can Yin, Bihong Wang, Yujun Su#

School of Health, Hebei Oriental University, Langfang Hebei

Received: November 20, 2025; accepted: January 7, 2026; published: January 15, 2026

Abstract

Research on the toxic effects of microplastics on the reproductive system is a current hot topic in environmental science and public health. The widespread presence of microplastics in the environment may have significant effects on living organisms. This paper systematically reviews the environmental behavior of microplastics, toxicity mechanisms and their multilevel effects on the repro-

*共同一作。

#通讯作者。

文章引用: 林家希, 肖文字, 张梦玉, 王明明, 赵雨, 殷灿, 王碧红, 苏玉军. 微塑料对生殖系统毒性作用的研究现状[J]. 生物医学, 2026, 16(1): 60-66. DOI: 10.12677/hjbm.2026.161007

ductive system, and the study of the toxic effects of microplastics on the reproductive system helps provide a scientific basis for environmental protection and public health protection, and also offers important references for assessing potential risks to the environment and human health.

Keywords

Microplastics, Reproductive Toxicity, Environmental Pollution

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微塑料(plastic microparticles, MPs)是指直径小于 5 毫米的塑料颗粒, 具有数量大、分布广的特点。在 2023 年, 全球就生产了 4.03 亿吨塑料[1], 超过 40%用于一次性包装, 从而产生塑料垃圾, 塑料在释放到环境中时所经历的降解是一个严重的问题。随着工业化和城市化的快速发展, MPs 污染越来越严重, 对环境和人类健康造成了潜在威胁[2]。到 2040 年, 环境污染可能会翻一番, 预计会造成大规模的伤害[3]。在组织内, MPs 被宿主生物体视为异物, 因此会引发局部免疫反应。现有研究表明[4], 犬类和人类睾丸的男性生殖系统中普遍存在 MPs, 对男性生育能力有潜在影响。生殖系统的正常功能对于生物种的繁衍和生存至关重要。因此, MPs 作为新兴的环境污染物, 其对生物体的影响, 尤其是对生殖系统的毒性作用, 是当前环境科学和公共卫生领域的重要研究热点。

本研究从环境行为和毒性机制两个方面, 系统地综述 MPs 对生殖系统的毒性作用, 进一步丰富环境毒理学和生殖医学的理论体系。本研究旨在揭示 MPs 暴露与生殖系统功能障碍之间的潜在联系, 为环境污染健康风险评估提供了理论支撑。

2. 微塑料和生殖系统的概述

MPs 是指直径小于 5 毫米的塑料颗粒, 它们可能来自于大塑料的分解, 或者被直接排放到环境中。MPs 在环境中广泛存在, 并可能对各种生物产生影响。MPs 比塑料因其粒径效应更容易穿过细胞膜, 进入周边组织及体循环系统[5], 引起全身暴露, 并在生物体内长期积累。

生殖系统是生物体繁殖后代的重要系统, 包括男性和女性的生殖器官和相关的支持组织。生殖系统的功能是产生生殖细胞、受精、胚胎发育和分泌性激素等。这些功能可能会受到环境污染物的影响, 据报道[6], MPs 对生殖系统的毒性作用可能包括影响生殖细胞的产生、阻碍受精过程、影响胚胎发育以及干扰性激素的分泌等。此外, MPs 还可能通过影响其他器官或系统, 而对生殖系统产生间接影响。故研究 MPs 对生殖系统的毒性作用对于理解其在环境中的影响和制定相应的环境保护策略具有重要意义。

3. 环境行为

3.1. 微塑料的环境分布

环境中常见塑料包括聚酰胺、低密度聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚丙烯等。据报道[7], 1950 年至 2015 年期间全球累计产生约 63 亿吨塑料垃圾, 其中 79%被填埋或直接丢弃至自然环境, 仅 9%实现回收利用, 12%通过焚烧处理。塑料的化学稳定性导致其难以自然降解, 物理破碎成为主要降解方式。依据粒径分级标准, 直径小于 5 毫米的塑料碎片定义为 MPs [8], 当粒径进一步缩小至 100 纳米以下时则

称为纳米塑料。全球地表水监测数据显示[9], 91%的MPs粒径集中于20~100微米区间, 8%分布于100~300微米, 仅少数颗粒超过300微米, 则形态学分类显示, 地表水环境中64%的MPs呈纤维状, 其余为碎片形态。塑料污染与消费模式密切相关, 随着消费主义发展呈现增长趋势[10]。中国室内环境研究表明[11], 住宅公寓MPs污染水平显著高于商务酒店、大学宿舍、教室及办公场所, 纤维形态占比最高, 主要成分为聚乙烯和聚丙烯。多项独立研究证实, 合成纺织品是室内MPs的主要来源, 其次为塑料瓶(30%)和包装材料(10%) [12]。聚乙烯在纤维类微塑料中的主导地位得到广泛验证。

3.2. 微塑料的环境转化

塑料材料因塑料添加剂小分子的流失而发生老化是常见且广为人知的现象。从电缆到塑料椅子, 各类塑料制品在长期暴露于自然环境条件下会逐渐丧失原有性能。当塑料产品持续暴露于太阳辐射时, 其化学键会发生断裂, 同时伴随表面氧化现象。这种脆化过程随时间推移而逐步加剧, 最终导致材料发生物理碎裂, 形成微塑料颗粒并被风力携带至环境中。据报道[9], 在户外环境中, MPs的主要来源包括轮胎磨损产生的塑料碎片以及道路沥青中的瀝泥改性剂。国内研究中发现[13], 农业覆盖膜、温室塑料薄膜及绳索等可重复使用材料也是重要污染源。环境监测数据表明, 聚乙烯是室外空气MPs的主要成分, 在德国和中国城市空气样本中分别占比48%和82%。MPs向空气中的释放主要通过以下途径: 合成纺织品纤维脱落、轮胎磨损产生的橡胶颗粒、家庭垃圾焚烧过程以及垃圾填埋场和城市扬尘中的塑料碎片再悬浮[14]。据全球塑料垃圾管理现状显示[15], 垃圾填埋场和露天堆放场是主要处置场所, 城市固体废物中塑料垃圾占比达10%, 总量约3亿吨。国外监测数据显示[16], 澳大利亚受控垃圾填埋场渗滤液中MPs浓度达8.8颗粒/升, 露天处理场渗滤液中更高达9.9颗粒/升。

当已降解的MPs进入土壤环境后, 其强迁移性使得轻质小粒径颗粒可通过风力和水力作用实现长距离传输[17], 导致全球范围内大气、水体、沉积物及生物群落中普遍检出微塑料[18]。有研究表明[19], MPs可作为有机污染物的运输载体, 例如聚氯乙烯和聚乙烯对苯并芘和4,4'-DDT等持久性有机污染物具有显著吸附作用, 这种污染物-塑料复合体显著增强了持久性有机污染物的环境迁移能力。综上所述, MPs通过多重环境途径广泛分布, 其迁移与扩散过程涉及大气、水体、土壤及生物群落等多个环境介质, 形成全球性的污染网络。

3.3. 微塑料的毒性影响

近年来, MPs相关的健康危害越来越受到关注。一旦进入体内, MPs可能引发一系列不良影响, 这些影响取决于颗粒的大小、形状、成分和浓度等因素。在动物实验中, 摄入MPs与消化道的物理损伤、炎症、氧化应激及进食行为改变显著相关[20]。由于MPs的体积较小, 存在跨越生物屏障并进入组织和细胞的可能性, 从而导致细胞和分子水平的毒性。吸入MNP可能导致呼吸道刺激、炎症以及颗粒向其他器官的转移[21]。在植物中, 通过受污染的土壤或水吸收MNP会导致植物组织中的积累, 这可能会影响其生长、发育及光合作用[22]。这些颗粒在植物可食用部分中的存在引发了人们对于其通过食物链传递给人类的担忧。MPs作为持久性有机污染物和重金属载体的能力, 这些污染物能够吸附在其表面并被输送入体内[23]。

在与MPs相关的健康问题中, 生殖与发育损害是亟需深入调查的重要领域。生殖系统特别容易受到环境污染物的影响, 因为其涉及配子形成、受精、植入及胚胎发育的复杂过程。研究表明, MPs可以在生殖组织中积累, 如卵巢和睾丸, 导致氧化应激和炎症[6]。在男性中, MPs与睾丸损伤、精子质量下降及荷尔蒙失衡有关。在女性中, 接触这些颗粒与卵巢功能的改变、卵母细胞质量的下降及胚胎发育的损害相关。MPs的潜在毒性也日益引发关注, 尤其是在怀孕期间的暴露可导致这些颗粒的母胎转移。已有研究表明, MPs可以穿过胎盘屏障并在胎儿组织中积累, 从而可能影响胎儿的发育。在一项对怀孕大鼠

的研究中,接触聚苯乙烯纳米塑料(PS-NPs)导致其在胎盘及胎儿大脑中的积累,最终导致后代的神经发育异常[24]。针对 MPs 生殖与发育毒性的机制尚未完全了解,但已有研究提出了几种可能的途径,包括氧化应激、炎症、内分泌失调和表观遗传学修饰[25]。总之,MPs 的潜在健康风险,特别是在生殖与发育方面,亟需对其机制进行深入研究,以制定有效的公共卫生政策。

4. 微塑料对生殖系统的毒性作用

4.1. 微塑料对睾丸的毒性作用

男性生殖系统受到复杂激素的严格调节,其中睾丸激素是维持正常生殖和性功能的主要合成代谢激素,对于男性次要性特征的发展及精子生成至关重要[26]。睾丸激素的产生减少被认为与睾丸间质细胞中类固醇生成酶的下调相关,这些酶包括 3β -羟基类固醇脱氢酶(3β -HSD)、 17β -羟基类固醇脱氢酶(17β -HSD)和类固醇源性急性调节蛋白(StAR) (Hamza 等人, 2023 年)。这些酶的活性受 LH 介导的 LH 受体(LHR)/cAMP/蛋白激酶 A (PKA)/StAR 信号通路调节。然而,动物模型研究表明[27],MPs 暴露导致睾丸组织学改变、精子生成异常和小鼠血清激素分泌的干扰,MPs 通过对 LH 介导的 LHR/cAMP/PKA/StAR 途径的下调诱导睾丸激素水平下降,表明 MPs 可能通过干扰这一信号来减少睾丸激素的合成,且接触 MPs 对男性生殖内分泌学有显著影响。

除了直接影响睾丸激素的生产外,MPs 暴露可能通过调节抑制素表达间接影响 FSH 水平。抑制素是一种由支持细胞(Sertoli 细胞)产生的糖蛋白激素,能够抑制垂体前叶的 FSH 分泌[28]。MPs 暴露可能导致对支持细胞的损伤及精子生成的损害,进而激活抑制素的表达,通过反馈机制导致 FSH 水平升高。接触 MPs 对精子质量造成显著的不良影响,包括精子浓度、运动性和生存能力的下降,以及精子异常的增加[29]。这些异常可能受到许多复杂因素的相互作用影响,包括颗粒的特定物理化学特性、暴露的剂量和持续时间,以及氧化应激和细胞功能障碍的诱导。鉴于 MPs 在环境中普遍存在且具有在食物链中积累的潜力,解决这一问题对于保障下一代的生殖健康至关重要。

4.2. 微塑料对卵巢的毒性作用

卵巢是女性生殖系统的关键组成部分,负责产生卵母细胞并分泌调节月经周期及维持生育能力的关键激素。卵巢的功能单元为卵巢卵泡,该卵泡由肉芽细胞和卵母细胞组成[30]。卵巢卵泡的发育与成熟是一个复杂的过程,受多种激素和信号通路的严密调节。对此过程的任何干扰均可对女性生育能力造成严重后果。研究表明,连续暴露于不同浓度(0、0.015、0.15 和 1.5 毫克/天)的 MPs 显著减少了生长卵泡的数量,并显示出肉芽细胞凋亡和卵巢纤维化的证据[31]。该研究表明,长期接触 MPs 会干扰卵泡发育的正常过程,并导致卵巢储备的过早枯竭。表明 MPs 在各类浓度及暴露持续时间下可能对卵巢累积毒性的趋势。

为了进一步探讨 MPs 对卵巢功能毒性的潜在机制,有研究利用人类卵巢肉芽细胞(KGN)进行体外实验[32]。结果显示,接触 MPs 可导致 KGN 细胞的形态与细胞死亡异常,且河马信号通路在这些影响中起到关键介导作用。河马信号通路是调节卵巢细胞增殖、凋亡及组织稳态的重要通路,其失调与多种卵巢病理(如早产卵巢衰竭和多囊卵巢综合征)密切相关[33]。此外,使用斑马鱼卵巢进行的体外研究表明,暴露于不同剂量的 MPs 对卵巢整体产生影响,导致 NF- κ B 和 TNF- α 等促炎反应基因的显著上调[34]。这些发现暗示 MPs 可能诱导卵巢的炎症与氧化应激,从而破坏正常的排卵过程。

5. 研究争议与方法学挑战

尽管微塑料(MPs)对生殖系统的毒性作用已得到大量研究证实,但由于环境介质的复杂性、MPs 自身

特性的多样性及研究技术的局限性, 当前领域仍存在诸多争议点和方法学瓶颈, 制约了研究结论的一致性和实际应用价值。现有研究中, MPs 对生殖系统的毒性表现存在显著差异, 部分研究证实高浓度聚苯乙烯纳米塑料(PS-NPs)可导致睾丸间质细胞凋亡, 但也有研究发现低浓度聚氯乙烯(PVC)微塑料对小鼠精子质量无显著影响。争议的核心在于: 毒性效应是 MPs 自身理化特性(粒径、形状、成分)主导, 还是其吸附的持久性有机污染物(如多环芳烃)、重金属等复合污染物协同作用的结果。此外, 不同研究中实验动物品系、暴露周期、性别差异等因素的干扰, 也导致生殖毒性终点(如激素水平变化、配子质量下降)的关联性结论难以统一。

MPs 对生殖系统的毒性机制尚未完全阐明, 现有研究多集中于氧化应激、炎症反应等宏观层面, 而分子机制研究面临技术局限。例如, MPs 是否通过干扰生殖内分泌通路(如下丘脑-垂体-性腺轴)、影响表观遗传修饰(DNA 甲基化、非编码 RNA 表达)等途径导致生殖损伤, 缺乏直接的实验证据; 同时, 针对 MPs 跨屏障转运(如血-睾屏障、胎盘屏障)的分子机制研究, 受限于体外模型(如细胞共培养体系)无法完全模拟体内生理微环境, 导致机制推导存在不确定性。

6. 未来与展望

尽管现有研究已证实 MPs 对生殖系统的广泛影响, 但其长期暴露效应、跨代毒性及剂量-效应关系仍需深入探究。未来研究应聚焦以下方向: 建立标准化暴露模型, 明确 MPs 的临界毒性阈值; 解析 MPs 与污染物复合暴露的协同机制; 评估 MPs 经食物链的生物累积效应及人类暴露风险。综上所述, MPs 通过多重环境途径对生殖系统构成严重威胁, 其健康风险具有长期性、隐蔽性及全球性特征。加强 MPs 污染防控、完善环境健康风险评估体系, 是保障人类生殖健康与生态安全的迫切需求。

基金项目

2025 年度河北东方学院校级科研项目(XJYB2025003); 2025 年度河北东方学院校级教育教学改革研究与实践项目(JXJGYB2025029)。

参考文献

- [1] Fallah, H. (2024) Effects of Microplastics on Human Health: A Review. *The Scientific-Cultural Journal of Ecosphere*, 7, 16-22.
- [2] Priya, A.K., Jalil, A.A., Dutta, K., Rajendran, S., Vasseghian, Y., Qin, J., *et al.* (2022) Microplastics in the Environment: Recent Developments in Characteristic, Occurrence, Identification and Ecological Risk. *Chemosphere*, 298, Article 134161. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134161>
- [3] Deng, Y., Wu, J., Chen, J. and Kang, K. (2023) Overview of Microplastic Pollution and Its Influence on the Health of Organisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 58, 412-422. <https://doi.org/10.1080/10934529.2023.2190715>
- [4] Hu, C.J., Garcia, M.A., Nihart, A., Liu, R., Yin, L., Adolphi, N., *et al.* (2024) Microplastic Presence in Dog and Human Testis and Its Potential Association with Sperm Count and Weights of Testis and Epididymis. *Toxicological Sciences*, 200, 235-240. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae060>
- [5] Das, A. (2023) The Emerging Role of Microplastics in Systemic Toxicity: Involvement of Reactive Oxygen Species (ROS). *Science of The Total Environment*, 895, Article 165076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165076>
- [6] Hong, Y., Wu, S. and Wei, G. (2023) Adverse Effects of Microplastics and Nanoplastics on the Reproductive System: A Comprehensive Review of Fertility and Potential Harmful Interactions. *Science of The Total Environment*, 903, Article 166258. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166258>
- [7] Ding, Y., Zou, X., Chen, H., Yuan, F., Liao, Q., Feng, Z., *et al.* (2022) Distribution Pattern and Influencing Factors for the Microplastics in Continental Shelf, Slope, and Deep-Sea Surface Sediments from the South China Sea. *Environmental Pollution*, 309, Article 119824. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119824>
- [8] An, L., Cui, T., Zhang, Y. and Liu, H. (2022) A Case Study on Small-Size Microplastics in Water and Snails in an Urban River. *Science of The Total Environment*, 847, Article 157461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157461>

- [9] Uurasjärvi, E., Hartikainen, S., Setälä, O., Lehtiniemi, M. and Koistinen, A. (2019) Microplastic Concentrations, Size Distribution, and Polymer Types in the Surface Waters of a Northern European Lake. *Water Environment Research*, **92**, 149-156. <https://doi.org/10.1002/wer.1229>
- [10] García Rellán, A., Vázquez Ares, D., Vázquez Brea, C., Francisco López, A. and Bello Bugallo, P.M. (2023) Sources, Sinks and Transformations of Plastics in Our Oceans: Review, Management Strategies and Modelling. *Science of The Total Environment*, **854**, Article 158745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158745>
- [11] Zhu, J., Zhang, X., Liao, K., Wu, P. and Jin, H. (2022) Microplastics in Dust from Different Indoor Environments. *Science of the Total Environment*, **833**, Article 155256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155256>
- [12] Tian, L., Skoczynska, E., Siddhanti, D., van Putten, R., Leslie, H.A. and Gruter, G.M. (2022) Quantification of Polyethylene Terephthalate Microplastics and Nanoplastics in Sands, Indoor Dust and Sludge Using a Simplified in-Matrix Depolymerization Method. *Marine Pollution Bulletin*, **175**, Article 113403. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113403>
- [13] Mehmood, T. and Peng, L. (2022) Polyethylene Scaffold Net and Synthetic Grass Fragmentation: A Source of Microplastics in the Atmosphere? *Journal of Hazardous Materials*, **429**, Article 128391. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128391>
- [14] Amato-Lourenço, L.F., dos Santos Galvão, L., de Weger, L.A., Hiemstra, P.S., Vijver, M.G. and Mauad, T. (2020) An Emerging Class of Air Pollutants: Potential Effects of Microplastics to Respiratory Human Health? *Science of The Total Environment*, **749**, Article 141676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141676>
- [15] Huang, Q., Cheng, Z., Yang, C., Wang, H., Zhu, N., Cao, X., et al. (2022) Booming Microplastics Generation in Landfill: An Exponential Evolution Process under Temporal Pattern. *Water Research*, **223**, Article 119035. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119035>
- [16] Leterme, S.C., Tuuri, E.M., Drummond, W.J., Jones, R. and Gascooke, J.R. (2023) Microplastics in Urban Freshwater Streams in Adelaide, Australia: A Source of Plastic Pollution in the Gulf St Vincent. *Science of The Total Environment*, **856**, Article 158672. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158672>
- [17] Rezaei, M., Riksen, M.J.P.M., Sirjani, E., Sameni, A. and Geissen, V. (2019) Wind Erosion as a Driver for Transport of Light Density Microplastics. *Science of The Total Environment*, **669**, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.382>
- [18] Li, C., Zhu, L., Wang, X., Liu, K. and Li, D. (2022) Cross-Oceanic Distribution and Origin of Microplastics in the Subsurface Water of the South China Sea and Eastern Indian Ocean. *Science of The Total Environment*, **805**, Article 150243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150243>
- [19] Bakir, A., Rowland, S.J. and Thompson, R.C. (2014) Transport of Persistent Organic Pollutants by Microplastics in Estuarine Conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **140**, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.01.004>
- [20] Zhao, B., Rehati, P., Yang, Z., Cai, Z., Guo, C. and Li, Y. (2024) The Potential Toxicity of Microplastics on Human Health. *Science of The Total Environment*, **912**, Article 168946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168946>
- [21] Amato-Lourenço, L.F., Carvalho-Oliveira, R., Júnior, G.R., dos Santos Galvão, L., Ando, R.A. and Mauad, T. (2021) Presence of Airborne Microplastics in Human Lung Tissue. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, Article 126124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- [22] Boots, B., Russell, C.W. and Green, D.S. (2019) Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environmental Science & Technology*, **53**, 11496-11506. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- [23] Cong, J., Wu, J., Fang, Y., Wang, J., Kong, X., Wang, L., et al. (2024) Application of Organoid Technology in the Human Health Risk Assessment of Microplastics: A Review of Progresses and Challenges. *Environment International*, **188**, Article 108744. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108744>
- [24] Feng, Y., Tu, C., Li, R., Wu, D., Yang, J., Xia, Y., et al. (2023) A Systematic Review of the Impacts of Exposure to Micro- and Nano-Plastics on Human Tissue Accumulation and Health. *Eco-Environment & Health*, **2**, 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2023.08.002>
- [25] Bai, J., Wang, Y., Deng, S., Yang, Y., Chen, S. and Wu, Z. (2024) Microplastics Caused Embryonic Growth Retardation and Placental Dysfunction in Pregnant Mice by Activating GRP78/IRE1 α /JNK Axis Induced Apoptosis and Endoplasmic Reticulum Stress. *Particle and Fibre Toxicology*, **21**, Article No. 36. <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00595-5>
- [26] Pencina, K.M., Travison, T.G., Cunningham, G.R., Lincoff, A.M., Nissen, S.E., Khera, M., et al. (2023) Effect of Testosterone Replacement Therapy on Sexual Function and Hypogonadal Symptoms in Men with Hypogonadism. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, **109**, 569-580. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgad484>
- [27] Jin, H., Yan, M., Pan, C., Liu, Z., Sha, X., Jiang, C., et al. (2022) Chronic Exposure to Polystyrene Microplastics Induced Male Reproductive Toxicity and Decreased Testosterone Levels via the LH-Mediated LHR/cAMP/PKA/Star Pathway. *Particle and Fibre Toxicology*, **19**, Article No. 13. <https://doi.org/10.1186/s12989-022-00453-2>
- [28] Yin, Y., Ma, J., Lu, X., Yan, S., Jiang, Q., Wu, D., et al. (2023) FSH Promotes Immature Porcine Sertoli Cell Proliferation

-
- by Activating the CCR7/Ras-ERK Signaling Axis. *Reproduction*, **165**, 593-603. <https://doi.org/10.1530/rep-22-0441>
- [29] Ijaz, M.U., Najam, S., Hamza, A., Azmat, R., Ashraf, A., Unuofin, J.O., *et al.* (2023) Pinostrobin Alleviates Testicular and Spermatological Damage Induced by Polystyrene Microplastics in Adult Albino Rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **162**, Article 114686. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114686>
- [30] Guo, Y., Xue, L., Tang, W., Xiong, J., Chen, D., Dai, Y., *et al.* (2024) Ovarian Microenvironment: Challenges and Opportunities in Protecting against Chemotherapy-Associated Ovarian Damage. *Human Reproduction Update*, **30**, 614-647. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmae020>
- [31] An, R., Wang, X., Yang, L., Zhang, J., Wang, N., Xu, F., *et al.* (2021) Polystyrene Microplastics Cause Granulosa Cells Apoptosis and Fibrosis in Ovary through Oxidative Stress in Rats. *Toxicology*, **449**, Article 152665. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2020.152665>
- [32] Zeng, L., Zhou, C., Xu, W., Huang, Y., Wang, W., Ma, Z., *et al.* (2023) The Ovarian-Related Effects of Polystyrene Nanoplastics on Human Ovarian Granulosa Cells and Female Mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **257**, Article 114941. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114941>
- [33] Hsueh, A.J.W. and Kawamura, K. (2020) Hippo Signaling Disruption and Ovarian Follicle Activation in Infertile Patients. *Fertility and Sterility*, **114**, 458-464. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2020.07.031>
- [34] Pei, J., Chen, S., Li, L., Wang, K., Pang, A., Niu, M., *et al.* (2024) Impact of Polystyrene Nanoplastics on Apoptosis and Inflammation in Zebrafish Larvae: Insights from Reactive Oxygen Species Perspective. *Science of The Total Environment*, **948**, Article 174737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174737>