

韩昊林, 韩菡, 韩健宝, 等. 氢医学在动物大健康领域的研究进展 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (8): 141-146.

HAN H L, HAN H, HAN J B, et al. Progress in research on hydrogen medicine in the field of animal great health [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (8): 141-146.

氢医学在动物大健康领域的研究进展

韩昊林¹, 韩菡², 韩健宝³, 彭海燕⁴, 周振雷^{1*}

(1. 南京农业大学动物医学院, 江苏 南京 210014;

2. 江苏农牧科技职业学院动物学院, 江苏 泰州 225300;

3. 南京美森生物科技有限公司, 江苏 南京 210014;

4. 溧阳市畜牧兽医站, 江苏 常州 213372)

摘要: 氢医学是基于氢分子选择性抗氧化、抗炎及抗细胞凋亡等生物学效应而发展的新兴交叉学科, 因其兼具绿色、安全、多靶点作用等优势, 近年来在动物大健康领域展现出重要的应用潜力。氢分子能特异性结合羟自由基和过氧亚硝酸盐, 并通过调控核因子 E2 相关因子 2 (Nrf2) 和核因子 κ B (NF- κ B) 等信号通路实现生物学作用。本文对氢医学在犬、猪、反刍动物、家禽及水产动物 (鳊鱼、鲈鱼、斑马鱼) 的研究进展进行综述, 旨在为氢医学在兽医临床的相关应用与产业转化提供参考。

关键词: 氢医学; 氢分子; 富氢水; 动物大健康; 抗氧化; 抗炎症; 抗凋亡

中图分类号: S854 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-5130(2026)08-0141-06

Progress in research on hydrogen medicine in the field of animal great health

HAN Haolin¹, HAN Han², HAN Jianbao³, PENG Haiyan⁴, ZHOU Zhenlei^{1*}

(1. College of Veterinary Medicine, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China;

2. College of Companion Animals, Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou 225300, China;

3. Nanjing Meisen Biotechnology Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

4. Liyang Animal Husbandry and Veterinary Station, Changzhou 213372, China)

Abstract: Hydrogen medicine is an interdisciplinary field which is built on some pretty specific biological effects of molecular hydrogen. Because of its advantages of being safe, green and of multiple-target effect, hydrogen medicine has shown important application potential in the field of animal great health in recent years. Hydrogen molecules can specifically bind to hydroxyl radicals and peroxynitrite, and they realizes its biological function by regulating signal pathways like nuclear factor erythroid 2-related factor 2 (Nrf2) and nuclear factor kappa-B (NF- κ B). This article reviews progress in existent researches on application of hydrogen medicine to dogs, pigs, ruminants, poultry and even aquatic species, in the hope of providing reference for applying hydrogen medicine to veterinary clinical practice and related industrialization transformation.

Keywords: hydrogen medicine; hydrogen molecule; hydrogen-rich water; animal great health; antioxidation, anti-inflammation; anti-apoptosis

氢医学是一门研究氢分子在生物体内生物效应及对疾病的治疗和预防的学科。上世纪初, Ohsawa 等^[1]在《Nature Medicine》发文, 阐述了氢分子能选择性清除如羟自由基 ($\cdot$ OH) 和过氧亚硝酸盐 (ONOO⁻) 等基团的生物学作用。自此, 有关氢分子生物学效应的研究出现快速增长, 在心血管系统疾病、神经系统疾病、泌尿系统疾病、消化系统疾病、

肿瘤等多个领域均有研究报道。氢分子具有抗氧化、抗炎症和抗细胞凋亡的效果, 在 170 余种动物疾病模型中展现出积极的生物学效应^[2-3]。本文旨在系统梳理氢医学在动物生产中的研究进展, 为氢医学在动物大健康领域的应用提供参考。

1 氢分子的生物学作用

1.1 抗氧化

氧化应激是引起多种疾病的主要因素之一, 是指机体内活性氧 (reactive oxygen, ROS) 和活性氮 (reactive nitrogen species, RNS) 产生过多, 氧化-抗

收稿日期: 2026-04-25; 修回日期: 2026-06-11

第一作者: 韩昊林, 男, 本科生

* 通信作者: 周振雷, 教授, 主要从事兽医外科与麻醉研究, E-mail: zhouzl@njau.edu.cn。

氧化系统失衡,从而损害细胞功能^[4]。氢分子不同于抗氧化酶如超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (catalase, CAT), 其能够特异性结合毒性强的羟自由基和过氧亚硝酸盐, 而不与其他参与正常生理过程的过氧化物及过氧化物阴离子结合。这种特异性结合的能力在有效减少机体损伤的同时保证了机体内生理功能的正常进行。氢分子还能够诱导例如核因子 E2 相关因子 2 (nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2) 的表达和其下游的血红素加氧酶-1 (heme oxygenase-1, HO-1), CAT, SOD 等抗氧化物质的表达, 改善机体抗氧化能力^[5-6]。

1.2 抗炎

炎症是机体对抗感染、损伤等机体内、外刺激的防御性反应, 过度的炎症会导致组织器官的损伤。氢分子主要通过抑制炎症因子和炎症信号通路的激活实现抗炎作用。氢分子主要抑制肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白介素 (IL)-6 和 IL-1 β 等促炎因子的表达^[7-8]。Yang 等^[8]的糖尿病中风模型的研究发现富氢水能抑制糖尿病中风引起的 TLR4/NF- κ B 通路的激活从而减弱小鼠炎症。此外, 长期的氧化应激也与炎症的产生有关。Papa-Wagner 等^[9]发现持续氧化应激会损伤神经元, 导致神经炎症和细胞凋亡。氢分子能通过特异性结合 ROS 和 RNS 的能力缓解持续性氧化应激, 实现抗氧化、抗炎症作用。

1.3 抗细胞凋亡

细胞凋亡是机体清除异常细胞, 保证组织稳态的细胞程序性死亡。氢分子通过对线粒体的保护作用抑制细胞凋亡, 核心机制包括提高线粒体膜电位和通过抗氧化作用阻止线粒体去极化和膜脂质氧化^[10]。内质网应激是内质网未折叠蛋白反应, 是细胞对缺氧、感染等刺激的保护机制, 但过度或过长内质网应激导致细胞异常凋亡。氢分子可通过抑制自噬和缓解内质网应激来抑制细胞凋亡^[11]。促进例如 B 细胞淋巴瘤-2 (B-cell lymphoma 2, Bcl-2) 等抗凋亡因子, 抑制如半胱天冬酶 (caspase)-3、caspase-8、caspase-9 等促凋亡因子也是氢分子抗细胞凋亡的作用机制之一^[12]。氢分子也可通过激活 PI3K/Akt 信号通路, 抑制 p53 信号通路, 激活 LKB1-AMPK 信号通路, 调控细胞凋亡^[13-15]。

2 氢气在生产中的使用方法

在生产实践中, 可以多途径给机体供给氢气, 如吸入氢气、使用富氢液体以及摄入可诱导内源性氢气生成的物质等等。吸入氢气, 氢气短时间内可分布到组织器官, 发挥生物学效应。富氢液体干预方法包括

饮用富氢水, 注射 0.9% 富氢生理盐水以及富氢溶液局部外用 (皮肤或黏膜涂布、冲洗、淋浴等)。富氢水中的氢气经胃肠道吸收, 使用便捷, 常用于日常外源性补充氢气。注射 0.9% 富氢生理盐水, 氢气直接被输送至循环系统, 能够更快起效。乳果糖、低聚果糖、菊粉、姜黄素等物质具有促进机体内源性氢气合成的作用。肠道菌群借助氢化酶对未被吸收的多糖进行代谢, 进而生成氢气。拟杆菌属、双歧杆菌属与乳杆菌属等特定菌属是氢气高效产生菌, 可发酵日粮膳食纤维, 释放氢气与短链脂肪酸, 发挥肠道健康调控作用^[16]。

3 氢医学在小动物临床的研究

Zhao 等^[17]构建了犬洋葱中毒模型, 试验组连续 12 d 皮下注射氢气, 氢气可有效缓解犬洋葱中毒的临床症状, 缓解红细胞损伤和肝功能损伤, 提升骨髓造血能力与机体抗氧化水平。Yoshida 等^[18]通过将比格犬冠状动脉左前降支结扎 90 min, 再灌注 6 h 构建心肌缺血再灌注损伤模型, 将犬分成对照组, 灌注前 10 min 至再灌注后 1 h 持续吸入 1.3% 氢气的干预组, 氢气联合 5-羟基癸酸组 (5-hydroxydecanoic acid, 5-HD), 氢气联合苍术苷 (atractyloside, ATR) 组, 以及仅给予 5-HD 和仅给予 ATR 组, 其中 5-HD 是一种选择性线粒体 ATP 敏感性钾通道抑制剂, ATR 是一种线粒体通透性转换孔开放剂。结果显示, 氢气可使犬心肌标准化梗死面积较对照组降低 50% 以上, 且该保护效应可被上述两种药物完全逆转, 证实了氢气通过打开线粒体 ATP 敏感性钾通道, 抑制线粒体通透性转换孔开放实现对心肌的保护, 这为氢气治疗急性心肌梗死的患犬提供了理论依据。

氢医学在预防手术并发症和术后组织恢复等临床常见场景中的效果同样值得关注。朱志伟等^[19]构建比格犬腹腔粘连模型, 关腹前用富氢水冲洗腹腔, 结果显示富氢水处理组的粘连评分显著低于对照组, 肠、子宫等组织的表面浆膜层增厚及炎症浸润程度低于对照组, 提示富氢水对比格犬术后腹腔粘连具有抑制作用。Qi 等^[20]的研究发现富氢水有效促进了犬只皮肤伤口愈合并且加速了伤口上皮化, 平均愈合时间 19 d 较对照组 22 d 显著缩短, 表明氢分子在促进术后预后方面有积极作用。

与犬相比, 氢医学在猫领域的研究较少。有研究以呼出气氢气浓度作为肠道菌群丰度评价指标, 分析日粮对猫的呼出气氢气水平的影响。相较于干日粮, 罐头日粮可显著提升猫咪内源氢气生成量, 提示其更利于肠道菌群定植增殖。猫易患下泌尿道综合征 (如特发性膀胱炎)^[21]。该病的发病机制涉及应激、

炎症及膀胱黏膜损伤。氢分子的选择性抗氧化和抗炎作用在人间质性膀胱炎模型中已显示积极治疗效果^[22]。未来可探索富氢水对猫氧化应激损伤的缓解作用。

4 氢医学在畜禽生产中的研究

4.1 猪

4.1.1 缓解断奶应激

断奶仔猪应激引起仔猪断奶后发生腹泻、水肿、内毒素休克,严重影响仔猪的生长发育。一项研究以断奶仔猪为对象,探究富氢水对断奶仔猪生长、腹泻率、抗氧化功能、肠道形态、肠道微生物群以及肝脏代谢物的影响。结果显示,富氢水能够显著改善肝脏代谢;调节应激相关信号通路,通过抗氧化能力缓解应激;提升仔猪生长性能,降低腹泻率;改善十二指肠、空肠、回肠形态结构,提高绒毛高度与隐窝深度比,从而增强肠道屏障和吸收消化功能;还可优化肠道菌落结构,丰富肠道菌落多样性,富集有益菌并抑制有害菌,改善肠道健康^[23]。

4.1.2 治疗霉菌素中毒

猪对镰刀菌产生的呕吐毒素和玉米赤霉烯酮极其敏感。霉菌毒素降低猪生长性能,抑制免疫和生殖功能,导致肝脏和脾脏损伤^[24-25]。多项研究证实呕吐毒素和玉米赤霉烯酮会造成断奶仔猪生长抑制、氧化应激损伤、肝脾损伤、血液生理生化异常、卵巢机能障碍等,乳果糖和富氢水能增加体内氢分子水平有效缓解并改善上述疾病症状^[26-28]。

4.2 反刍动物

4.2.1 围产期代谢调节

围产期是动物生产中的关键阶段,围产期出现异常会引发母体和子代的一系列疾病。Kuru 等^[29]给予产前 21 d 至分娩后 21 d 的山羊每天喂食富氢水,发现富氢水处理提高山羊分娩时血糖,降低总胆固醇和肌酐水平,血脂、肝肾功能及蛋白代谢均优于对照组;试验组幼崽存活率和腹泻率分别为 100% 和 0,优于对照组的 87% 和 13.3%。以上结果说明,氢分子能够改善山羊代谢,提高幼崽存活率。Kanmaz 等^[30]进一步研究了富氢水对山羊初乳的影响。饮用富氢水的山羊初乳中脂肪含量更高,抗氧化能力更强, α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制活性更高。此外,C8、C15、C20 等游离脂肪酸以及挥发成分在初乳中更丰富。富氢水有利于母畜分娩并提高母乳中的乳制品营养价值。

4.2.2 优化瘤胃发酵

Mao 等^[31]研究了 200、400、800 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 浓度富氢水对瘤胃发酵及菌群的影响。200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 浓度富氢

水能显著降低甲烷排放;400 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 浓度富氢水可显著提高微生物粗蛋白含量。菌群分析显示,富氢水处理增加了厚壁菌门、链球菌属 (*Streptococcus*) 等菌群丰度,降低了普雷沃氏菌属 (*Prevotella*) 和瘤胃杆菌属 (*Ruminobacter*) 等。这些结果说明,富氢水能够调节瘤胃发酵和微生物群落结构,减少甲烷排放,同时不影响挥发性脂肪酸的合成。

4.3 禽

4.3.1 改善肉品质

朱赫等^[32]为期 42 d 的研究选取了 120 只 1 日龄雄性 AA 肉鸡,随机分为饮用自来水组和富氢水组。结果显示,富氢水组鸡胸肉剪切力显著低于对照组,鸡胸肉中亮氨酸、赖氨酸等必需氨基酸比例显著高于对照组,棕榈油酸、油酸及单不饱和脂肪酸比例也显著高于对照组。Li 等^[33]的研究也证实了富氢水在提升鸡胸肉嫩度上的积极作用,推测富氢水通过其抗氧化能力减轻肌纤维的氧化应激或增强保湿能力,降低鸡胸肉剪切力。

4.3.2 调节肠道微生态

朱赫等^[32]证实了富氢水处理能增加罗氏菌属 (*Roseburia*) 等产丁酸盐菌的相对丰度,降低共生短杆菌属 (*Symbiobacterium*) 等的相对丰度。Li 等^[33]将富氢水和次氯酸水配合应用于饮水系统,发现其对水中浮游细菌灭菌率达到 99.90%,有效保护了饮水安全;同时该处理促使鸡盲肠乳酸菌和产短链脂肪菌富集,肠道形态和黏膜屏障完整性亦得到改善。赵星辰等^[34]创新性的使用寡聚纳米氢水作为氢气载体,证实了富氢水能富集白羽肉鸡肠道乳酸菌,增加肠道绒毛高度及绒毛高度/隐窝深度,改善肠道健康。

4.3.3 缓解应激损伤

热应激是影响集约化家禽生产的重要环境因素,严重热应激会导致家禽饲料转化率和生长率下降,死亡率攀升,严重威胁家禽生产性能。Zhang 等^[35]以热应激蛋鸡为研究对象,发现富氢水饮水可有效缓解热应激带来的生产性能下降,显著提升热应激状态下蛋鸡的产蛋率与蛋壳强度,降低热应激对养殖生产的负面影响。抗氧化应激是氢医学的核心效应,多项研究均表明氢分子能显著提高禽类血清和肝脏中 SOD,谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 及 CAT 的活性,同时降低丙二醛和 ROS 等氧化损伤产物的水平,从而增强机体的总抗氧化能力^[32-35]。

4.3.4 提高生长性能

目前,氢分子对禽的生长性能的调控仍然存在争议。一些研究均显示富氢水处理对禽的生长性能无显著影响^[32-33,35]。但赵星辰等^[34]运用的寡聚纳米氢水

却表现出显著的促生长效果,显著提高肉鸡平均日增重,降低料重比并提高养殖成活率。这一差异产生的原因可能是:寡聚纳米氢水物理解簇聚合的大分子水团形成低聚合态水分子团增强水流动性和离子通道穿透性,增加营养物质吸收率;低聚合态水分子团与纳米氢气泡结合形成超微纳米氢气泡,增强氢气在水中的稳定性,为氢气发挥生物学作用创造了条件。寡聚纳米氢水展现的积极结果为氢气的载体优化与应用形式提供了全新思路。

5 氢医学在水产动物中的研究

5.1 鳊鱼

Wang 等^[36]在 200~320 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的溶解氢浓度范围内设置了每日 1 h、2 h 和 3 h 的富氢水处理组,系统探究其对鳊鱼养殖的效应。结果显示,富氢水处理能够显著提高鳊鱼生长效率和肝脏抗氧化水平。其中 3 h 处理组具有最佳生长性能,氢分子上调了鳊鱼刺鼠基因相关蛋白(agouti-related protein, AGRP),神经肽(neuropeptide Y, NPY)等促食欲基因,生肌决定因子(myoblast determination protein, MYOD),生肌因子 4(myogenic factor 4, MYF4)等肌肉生长关键基因的表达,下调了可卡因-苯丙胺调节转录肽(cocaine - and amphetamine - regulated transcript, CART)等抑制食欲的基因的转录水平,显著提高鳊鱼的体重增重率、特定生长率和摄食率。2 h 处理组则展现出最佳抗氧化效果,肝脏 SOD 和 GSH-Px 活性显著升高,丙二醛含量显著下降;同时,Nrf2, CAT, Kelch 样 ECH 关联蛋白(kelch-like ech associated protein 1, KEAP1)和糖皮质激素受体(glucocorticoid receptor, GR)等抗氧化相关基因表达上调。该研究明确了富氢水在鳊鱼养殖中的适宜处理时长与浓度范围,为富氢水在水产养殖的推广应用提供了重要参数依据。

5.2 鲈

5.2.1 调控生长性能

Yuan 等^[37]的研究发现了富氢水对大口黑鲈生长性能的促进作用涉及生理与代谢等多种途径的整合。富氢水处理能提高肠道胰蛋白酶活性,促进蛋白质消化和吸收;同时激活雷帕霉素靶蛋白(mammalian target of rapamycin, mTOR)通路调节细胞生长和代谢。富氢水通过促进糖酵解关键限速酶丙酮酸激酶的基因表达和糖异生关键酶磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶的活性实现对肝糖原代谢的调节。富氢水能维持肠道完整性并增加肠道菌群多样性,显著提高能参与宿主代谢与健康调节的布劳特氏菌属(*Blautia*)。

5.2.2 缓解应激

适量浓度的富氢水经过适宜时间的处理有助于缓解鱼的运输应激。曾倩楠等^[38]发现对运输应激后的鲈鱼以 0.3 和 0.5 mg/L 浓度富氢水通气 6 h 以上,能改善肝细胞空心化和肠道炎症。Yuan 等^[37]的研究进一步表明适宜浓度富氢水处理能显著降低肝脏过氧化氢含量,而高浓度富氢水处理会导致丙二醛含量上升加重氧化应激。

5.3 斑马鱼

5.3.1 防治细菌感染

富氢水在鱼类细菌感染中的治疗中展现显著的潜力。两项以斑马鱼为模式动物进行的独立研究表明富氢水能显著降低病原菌感染后的死亡率。Hu 等^[39]的研究表明 1% 或 4% 浓度富氢水能将 48 h 内感染嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)的斑马鱼存活率从 51.7% 提升至 72.5%。细菌学检测结果证实了富氢水能显著抑制病原菌在鱼体内的增殖。Önalán 等^[40]用不同浓度富氢水治疗感染格氏乳球菌(*Lactococcus garvieae*)的斑马鱼,死亡率随富氢水浓度升高而降低,100% 浓度富氢水能使斑马鱼死亡率降低至 0.10% 和 20% 富氢水分别将死亡率从 100% 降至 80% 和 66%。这些结果展现了氢医学在水产动物细菌性疾病绿色防控方面的重要潜力。

5.3.2 防治病毒感染

Li 等^[41]用纳米气泡氢水治疗感染鲤春病毒血症病毒(SVCV)的斑马鱼。富氢水处理后的斑马鱼死亡率较对照组下降一半。组织病理学染色检查说明纳米气泡氢水能减轻感染引起的肠道损伤和脑组织坏死,同时促炎细胞因子 IL-1 β 、IL-8 和 TNF- α 水平受到显著降低,病毒感染引起的 ROS 积累显著减少。

5.3.3 环境毒物暴露保护

Jin 等^[42]构建了 4 种氢气载体(无纳米气泡富氢水、氢纳米气泡水、纳米硅粉、海藻酸钠包被纳米硅凝胶微球),研究对重金属铜离子诱导的斑马鱼胚胎毒性的保护作用。结果显示 4 种处理均能显著降低胚胎死亡率、提升孵化率、减少铜积累并起到抗氧化作用。转录组分析揭示纳米气泡氢水可调控 GTPase 活性、离子通道功能及神经元发育相关基因表达,从分子层面证实了氢分子的缓解毒性效应。

5.4 其他

微塑料污染水体是当今水产养殖中急需解决的重要环境问题,微塑料易导致鱼类生理损伤和免疫力下降,严重威胁水产养殖的可持续发展。Atamanalp 等^[43]发现富氢水干预能缓解微塑料介导的毒性。用聚丙烯和聚乙烯的微塑料处理虹鳟,研究 21 d 富氢水干预对微塑料毒性的缓解作用。结果表明微塑料对

抗 CAT 有抑制作用, 并诱导丙二醛、ROS、8-羟基脱氧鸟苷等氧化损伤物质。富氢水能通过活性氧/谷胱甘肽/丙二醛等途径缓解微塑料介导的毒性。

6 展望

氢气为小分子活性气体, 兼具抗氧化、抗炎、抗凋亡等生物学活性, 能够改善畜禽生产性能、缓解热应激、调节肠道菌群, 产业应用潜力突出。随着我国畜牧养殖集约化、减抗和替抗政策推进、宠物市场规模扩大, 氢医学的应用愈加广泛。目前氢医学在动物大健康领域已经取得一系列的进展, 然而尚存在若干问题有待解决。当前氢气规模化应用仍存在短板, 其介导肠道菌群稳态的分子互作机制尚不清楚, 剂量-效应关系缺乏系统数据支撑, 各类补氢手段无统一应用规范。氢气吸入因成本与剂量管控缺陷难以规模化; 日粮调控内源产氢简便易行, 但和外源补氢的药效等效性有待佐证; 富氢水凭借安全易得等优势成为优选补氢剂型, 现有试验多统一采用饱和富氢水, 缺少分品种、分生长阶段的适宜剂量研究, 安全剂量、疗程设计等保障动物健康的关键信息依然匮乏, 缺乏可靠的标准。

未来氢医学在动物大健康领域的发展需拓展研究物种, 同步开展大量系统化、规范化的临床试验以明确不同动物、不同给药途径的剂量、疗程和安全阈值, 深入研究氢调控 Nrf2、NF- κ B 等信号通路及肠道菌群-宿主代谢轴的核心机制。此外, 根据氢医学对病毒性疾病、细菌耐药性感染的干预作用已经在模式动物中崭露头角, 针对猪流行性腹泻、禽白血病等重大动物疫病的临床防治值得关注。通过多学科交叉, 开发多种给氢途径, 挖掘氢医学在饮水改良、环境修复及兽医临床辅助治疗等方面的多元化价值。在当今追求绿色高效、可持续发展的背景下, 氢医学有望凭借其安全、环保、多功能调控的天然优势为绿色养殖贡献力量。

参考文献:

- [1] OHSAWA I, ISHIKAWA M, TAKAHASHI K, et al. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals [J]. *Nat Med*, 2007, 13 (6): 688-694.
- [2] SIM M, KIM C S, SHON W J, et al. Hydrogen-rich water reduces inflammatory responses and prevents apoptosis of peripheral blood cells in healthy adults: a randomized, double-blind, controlled trial [J]. *Sci Rep*, 2020, 10: 12130.
- [3] TAO G, SONG G, QIN S. Molecular hydrogen: current knowledge on mechanism in alleviating free radical damage and diseases [J]. *ABBS*, 2019, 51 (12): 1189-1197.
- [4] ĎURAČKOVÁ Z. Some current insights into oxidative stress [J]. *Physiol Res*, 2010; 459-469.
- [5] GUO Y, QIN J, SUN R, et al. Molecular hydrogen promotes retinal vascular regeneration and attenuates neovascularization and neuroglial dysfunction in oxygen-induced retinopathy mice [J]. *Biol Res*, 2024, 57 (1): 43.
- [6] ZHANG Y, CHEN J, WU H, et al. Hydrogen regulates mitochondrial quality to protect glial cells and alleviates sepsis-associated encephalopathy by Nrf2/YY1 complex promoting HO-1 expression [J]. *Int Immunopharmacol*, 2023, 118: 110009.
- [7] SHEN N Y, BI J B, ZHANG J Y, et al. Hydrogen-rich water protects against inflammatory bowel disease in mice by inhibiting endoplasmic reticulum stress and promoting heme oxygenase-1 expression [J]. *World J Gastroenterol*, 2017, 23 (8): 1375-1386.
- [8] YANG W C, LI T T, WAN Q, et al. Molecular hydrogen mediates neurorestorative effects after stroke in diabetic rats: the TLR4/NF- κ B inflammatory pathway [J]. *J Neuroimmune Pharmacol*, 2023, 18 (1/2): 90-99.
- [9] POPA-WAGNER A, MITRAN S, SIVANESAN S, et al. ROS and brain diseases: the good, the bad, and the ugly [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2013, 2013 (1): 963520.
- [10] WOOD K C, GLADWIN M T. The hydrogen highway to reperfusion therapy [J]. *Nat Med*, 2007, 13 (6): 673-674.
- [11] JIANG B, LI Y, DAI W, et al. Hydrogen-rich saline alleviates early brain injury through regulating of ER stress and autophagy after experimental subarachnoid hemorrhage [J]. *Acta Cir Bras*, 2021, 36 (8): e360804.
- [12] WANG B, LI Z, MAO L, et al. Hydrogen: a novel treatment strategy in kidney disease [J]. *Kidney Dis*, 2022, 8 (2): 126-136.
- [13] JIANG Y, LIU G, ZHANG L, et al. Therapeutic efficacy of hydrogen-rich saline alone and in combination with PI3K inhibitor in non-small cell lung cancer [J]. *Mol Med Rep*, 2018, 18 (2): 2182-2190.
- [14] DU H, SHENG M, WU L, et al. Hydrogen-rich saline attenuates acute kidney injury after liver transplantation via activating p53-mediated autophagy [J]. *Transplantation*, 2016, 100 (3): 563-570.
- [15] LEE J, YANG G, KIM Y J, et al. Hydrogen-rich medium protects mouse embryonic fibroblasts from oxidative stress by activating LKB1-AMPK-FoxO1 signal pathway [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2017, 491 (3): 733-739.
- [16] LUO M, YAN C, HU W, et al. Review and application of hydrogen in regulating production performance, stress tolerance, and gut microbiota in livestock [J]. *J Agric Food Chem*, 2025, 73 (28): 17331-17343.
- [17] ZHAO J, ZHANG M, LI Y, et al. Therapeutic effect of hydrogen injected subcutaneously on onion poisoned dogs [J]. *J Vet Res*, 2017, 61 (4): 527-533.
- [18] YOSHIDA A, ASANUMA H, SASAKI H, et al. H₂ mediates cardioprotection via involvements of KATP channels and permeability transition pores of mitochondria in dogs [J]. *Cardiovasc Drugs Ther*, 2012, 26 (3): 217-226.
- [19] 朱志伟, 韩玮, 丁厚中, 等. 氢分子对比格犬盆腹腔粘连形成的影响及其机制 [J]. *中国医师杂志*, 2020, 22 (4): 529-

- 534.
- [20] QI D D, DING M Y, WANG T, et al. The therapeutic effects of oral intake of hydrogen rich water on cutaneous wound healing in dogs [J]. Vet Sci, 2021, 8 (11): 264.
- [21] BACKUS R C, PURYEAR L M, CROUSE B A, et al. Breath hydrogen concentrations of cats given commercial canned and extruded diets indicate gastrointestinal microbial activity vary with diet type [J]. J Nutr, 2002, 132 (6): 1763S-1766S.
- [22] MATSUMOTO S, UEDA T, KAKIZAKI H. Effect of supplementation with hydrogen-rich water in patients with interstitial cystitis/painful bladder syndrome [J]. Urology, 2013, 81 (2): 226-230.
- [23] ZHANG P, YANG J, LU Z, et al. Hydrogen-rich water attenuates diarrhea in weaned piglets via oxidative stress alleviation [J]. Biology, 2025, 14 (8): 997.
- [24] 王定发, 彭运智, 张妮娅, 等. 日粮中玉米赤霉烯酮和大豆异黄酮联合作用对后备母猪生殖器官发育和雌激素受体基因转录的影响 [J]. 畜牧兽医学报, 2011, 42 (2): 243-250.
- [25] 葛昆陇, 余福泽, 李坤, 等. 玉米赤霉烯酮对猪毒性作用及其脱毒方法研究进展 [J]. 饲料研究, 2025, 48 (10): 152-155.
- [26] 郑卫江, 计徐, 张青, 等. 富氢水和乳果糖对镰刀菌毒素污染日粮引起的仔猪生长抑制和氧化损伤的保护作用 [C]. 世界动物福利科学大会, 成都, 2019.
- [27] 张青, 计徐, 姚文, 等. 乳果糖和富氢水对采食镰刀菌污染玉米的仔猪血液指标和肝脾形态的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2018, 50 (5): 56-64.
- [28] 陈亚, 魏全伟, 杜文超, 等. 乳果糖和富氢水对断奶仔猪采食霉变玉米后引起卵巢机能障碍的缓解作用 [J]. 畜牧兽医学报, 2018, 49 (12): 2641-2651.
- [29] KURU M, MAKAV M, BOĞA KURU B, et al. Hydrogen-rich water supplementation improves metabolic profile during peripartum period in Gurcu goats and enhances the health and survival of kids [J]. Res Vet Sci, 2024, 171: 105208.
- [30] KANMAZ H, ŞAHINGİL D, ALWAZEER D, et al. Hydrogen-rich water consumption modifies the chemical, biochemical, nutritional, and bioactive properties of the goat's colostrum and mature milk [J]. Food Chem, 2025, 480: 143855.
- [31] MAO K, LU G, ZANG Y, et al. Hydrogen-rich water 400ppb as a potential strategy for improving ruminant nutrition and mitigating methane emissions [J]. BMC Microbiol, 2024, 24 (1): 469.
- [32] 朱赫, 王亚梅, 胡恒, 等. 富氢水对肉鸡生长性能、抗氧化能力、肉品质和盲肠微生物的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2025, 48 (1): 180-189.
- [33] LI J, LIU C, PENG C, et al. Effects of hydrogen-rich hypochlorous acid water on broiler drinking water bacterial level, growth performance, antioxidant capacity, and intestinal environment [J]. Poult Sci, 2025, 104 (12): 106009.
- [34] 赵星辰, 代林, 王宝维, 等. 低聚合态纳米氢水对白羽肉鸡生长性能、屠宰性能、血清脂质指标、抗氧化能力及肠道健康的影响 [J]. 动物营养学报, 2025, 37 (1): 307-319.
- [35] ZHANG B, LU C, ZANG Y, et al. Drinking with electrolyzed reduced hydrogen-rich water alters egg quality, intestinal morphology, and antioxidant activities in heat-stressed layers [J]. J Appl Poult Res, 2022, 31 (2): 100244.
- [36] WANG H, HUANG J, LIU H, et al. Role of hydrogen-rich water on growth performance and liver antioxidant capacity of Mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) [J]. Fishes, 2025, 10 (11): 581.
- [37] YUAN Y, LI H, CHEN S, et al. The effects of different concentrations of hydrogen-rich water on the growth performance, digestive ability, antioxidant capacity, glucose metabolism pathway, mTOR signaling pathway, and gut microbiota of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Fishes, 2024, 9 (6): 210.
- [38] 曾倩南, 温嘉怡, 杨映, 等. 富氢水对加州鲈幼苗运输应激的调节作用研究 [J]. 广东畜牧兽医科技, 2024, 49 (5): 48-55.
- [39] HU Z, WU B, MENG F, et al. Impact of molecular hydrogen treatments on the innate immune activity and survival of zebrafish (*Danio rerio*) challenged with *Aeromonas hydrophila* [J]. Fish Shellfish Immunol, 2017, 67: 554-560.
- [40] ÖNALAN Ş, BULUT M, ALWAZEER D. Evaluation of the potential use of oxy-hydrogen gas for the treatment of *Lactococcus garvieae* infected zebrafish in hydrogen-rich water aquarium [J]. Braz Arch Biol Technol, 2023, 66: e23220750.
- [41] LI C, CAO Y, KOHEI F, et al. Nano-bubble hydrogen water: an effective therapeutic agent against inflammation related disease caused by viral infection in zebrafish model [J]. Virol Sin, 2022, 37 (2): 277-283.
- [42] JIN Z, LV S, ZHANG L, et al. Nanobubble and slow-release hydrogen delivery methods for interfacial remediation of copper-induced toxicity in aquatic environments [J]. Langmuir, 2025, 41 (27): 17590-17601.
- [43] ATAMANALP M, KLRLCL M, KÖKTÜRK M, et al. Does hydrogen-rich water mitigate MP toxicity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)? Monitoring with hematology, DNA damage, and apoptosis via ROS/GSH/MDA pathway [J]. Oceanol Hydrobiol Stud, 2023, 52 (2): 206-220.