

胡 伟,李正田,王卓标,等. 氢气在现代农业应用中的研究进展[J]. 江苏农业科学,2024,52(10):39–48.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.10.005

氢气在现代农业应用中的研究进展

胡 伟^{1,2}, 李正田³, 王卓标¹, 陈奕羽¹, 唐中林^{1,2}

(1. 佛山鲲鹏现代农业研究院, 广东佛山 528226; 2. 中国农业科学院深圳农业基因组研究所, 广东深圳 518120;

3. 曲靖师范学院生物资源与食品工程学院, 云南曲靖 655011)

摘要:绿色健康是现代农业的新要求,因此在现代农业生产中需要探索更多绿色健康生产的新技术、新工艺,氢农业便是其中一个重要的发展方向。氢气是一种具有生物学效应的信号分子,在动植物机体体内已被证明具有选择性抗氧化、抗炎、抗凋亡等生理作用,其分子作用机制研究已取得一些重要进展。氢生物学作为新兴的交叉学科,前期研究主要集中在氢医学的基础与临床医学领域。而随着基础理论与制氢技术、方法及设备的成熟与普及,氢生物学延伸至农业生产领域并逐步形成氢农学与氢农业,助力农业产业绿色健康发展。在介绍氢气生物学理论假说的基础上,归纳氢气在种子萌发、作物根系发育、作物茎叶花等器官发育等作物生长发育方面和农产品品质与贮藏保鲜方面的研究及应用。总结氢气对作物干旱胁迫、盐胁迫、高低温胁迫、光照胁迫、重金属胁迫等作物适应性方面的研究成果,以及综述富氢水在养鸡生产、养猪生产和水产养殖等畜禽养殖中的研究进展。进一步指出目前氢气在现代农业应用中存在的一些问题和挑战,并结合国家部委发布的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》,对下一步氢气在未来农业中的发展趋势及研究重点进行科学展望,旨在为进一步的氢农业发展理清思路与方向。

关键词:氢;农业;粮食;园艺;畜牧;水产

中图分类号:S18 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)10-0039-10

氢气(hydrogen, H₂)是一种无色无臭无味的、已知密度最小的透明气体,很长的一段时期内一度被认为是一种惰性气体,对人体功能不会产生任何影响,早些时候主要应用于潜水医学。而在 1975 年,美国科学家 Dole 等对皮肤鳞状细胞癌小鼠进行高压(8 个大气压)、高浓度(97.5%)氢气吸入治疗,发现肿瘤显著缩小并首次公开报道了氢气具有生物学效应,但由于试验条件(高压高浓度氢气)存在安全隐患而并未受到人们的过多关注^[1]。直至 2007 年,一项研究引起国内外生物医学领域对氢医

学的广泛关注,即日本医科大学学者 Ohsawa 等证实,在常压下吸入小剂量(2%~4%)氢气可有效治疗大鼠缺血性脑卒中,氢气还可以选择性中和过氧亚硝基阴离子和羟自由基,清除过量的活性氧毒性自由基,进而缓解由脑缺血引起的氧化损伤,首次揭示出氢气的选择性抗氧化作用机制^[2]。自此,氢气的生物学作用被陆续发现。目前认为氢气具有抗氧化^[2]、抗炎^[3]、抗凋亡^[4]等生物学作用,同时具有极高的生物安全性,且早在 2014 年 GB 31633—2014《食品安全国家标准 食品添加剂 氢气》已将 H₂ 列为食品添加剂。在氢生物学研究中,最常见的氢干预方式主要包括口服/饮用/浇灌富氢水、注射富氢生理盐水、直接吸氢等,其中口服富氢水和注射富氢生理盐水(氢浓度约为 0.8 mmol/mL)方式安全、方便,在基础和临床医学研究中被广泛使用。而综合考虑氢气的安全性、制备及田间推广等因素,富氢水(hydrogen-rich water, HRW)则是氢气在现代农业生产中应用的最主要形式。因此,本研究对富氢水在作物、园艺、畜禽及水产等农业方向的研究与应用展开综述。

收稿日期:2023-07-13

基金项目:广东省佛山市博士后科研经费(编号:KIMA-QT2022001); 中国农业科学院科技创新工程(编号:CAAS-ZDRW202006); 云南省基础研究计划(编号:202101AU070147); 云南省地方本科高校基础研究联合专项(202101BA070001-210); 云南省教育厅科学研究基金(编号:2023J1037); 云南省曲靖市科学技术局·曲靖师范学院科技创新联合专项(编号:KJLH20 22YB06)。

作者简介:胡 伟(1990—),男,安徽灵璧人,博士,助理研究员,主要从事动物遗传育种研究,E-mail:huwei@caas.cn;共同第一作者:李正田(1990—),男,四川达州人,博士,讲师,主要从事牲畜产品质量与安全研究,E-mail:252637849@qq.com。

通信作者:唐中林,博士,研究员,主要从事动物遗传育种研究。

E-mail:tangzhonglin@caas.cn。

1 氢气的生物学效应基础

氢生物学作为新兴的交叉学科,近年来发展迅速,但有关氢气生物学效应的作用机制并无定论。目前氢生物学效应的分子机制可归纳为以下 4 种理论或假说。第一,直接中和清除假说。作为氢气最初且最被认可的生物学效应机制,是氢气可选择性中和清除过氧亚硝基阴离子和羟自由基等过量的活性氧,进而缓解氧化损伤^[2]。越来越多的研究结果表明,氢气与羟自由基等活性氧直接反应的效率很低,而氢分子在众多氧化应激和炎症相关疾病中展现出广谱、安全 and 有效的抗炎/抗癌/抗衰老等生物学效应。选择性清除假说理论已不能完全支撑现有的研究结果。第二,线粒体电子流稳态假说。Ishibashi 等认为,氢气可能是线粒体电子流的整流器,将泛素酮转化为泛素醇,从而抑制过多的电子泄漏和活性氧的产生;此外,Ishibashi 等发现氢分子可以抑制线粒体复合体 I 中超氧化物的生成以降低线粒体膜电位^[5-6]。第三,生物酶靶点假说。Wang 等认为,氢气可增强乙酰胆碱酯酶活性,酶分子可能是氢气的潜在作用靶点^[7]。马雪梅等认为,真核生物线粒体中氢气活性与复合体 I 密切相关,激活发生在完全氧化的泛素结合位点附近,H₂ 在缺氧条件下能显著提高线粒体复合体 I 的活性^[8-9]。仪杨等认为,氢气可使辣根过氧化物酶(HRP)内源性氨基酸荧光强度增强,色氨酸到血红素中心的距离缩短,荧光量子产率升高,从而促进辣根过氧化物酶活性升高^[10]。近日,上海交通大学氢科学中心研究团队发现铁卟啉(血红素)可作为氢分子的生物学作用靶点,游离态和蛋白限域态的铁卟啉通过催化加氢的方式,选择性中和高毒性羟基自由基·OH,从而介导氢分子抗氧化、抗炎和抗衰老。在乏氧微环境中(如肿瘤乏氧区),铁卟啉通过催化加氢的方式将 CO₂ 还原为 CO,然后原位介导 CO 信号通路,最终实现抗癌和免疫调节等治疗作用^[11]。第四,信号分子传导假说。即氢气通过作用于相关信号分子以发挥功能。Chen 等认为,富氢生理盐水可以通过 PI3K/AKT/GSK3-β 信号通路抑制 CMEC 凋亡减少心肺旁路(CPB)术诱导的脑损伤^[12]。在新生儿缺氧-缺血性脑损伤吸氢研究中,发现氢气通过激活 MAPK 信号通路促进小胶质细胞 M2 极化和补体介导的突触丧失恢复了缺氧-缺血后的行为缺陷;类似的研究结果表明,氢气可促进血红素

氧酶-1 的表达,进而通过 MAPK/HO-1/PGC-1-α 途径在 H₂ 介导的保护中起重要作用^[13-14]。在阿尔茨海默症大鼠模型中,富氢生理盐水可通过抑制 JNK 和 NF-κB 通路的激活来减少氧化应激和炎症反应^[15]。

目前,氢气已在相关动物试验和临床试验中广泛研究与应用。Song 等认为,氢气在炎症、心血管系统疾病^[16-17]、代谢性疾病^[18-21]和肿瘤^[22]等多种疾病中表现出广谱、安全且有效的积极作用。同时,氢气研究已经延伸到动植物农业生产中,尤其在园艺和粮食等农作物上有较广泛的研究与应用,逐步形成现代氢农业雏形。

2 氢气在粮食、园艺作物中的研究与应用

氢气在细菌、藻类及高等植物机体内的代谢已被广泛报道^[23-25]。虽然高等植物中 H₂ 的产生仍不清楚,但对其物理及生物调节作用的了解越来越多,且氢气在粮食、园艺等作物中的研究越来越受到关注。H₂ 逐渐被认为是一个完整的信号分子,在粮食、园艺等植物的环境适应与生长发育中可发挥控制基因表达和信号转导等调节作用,介导多种胁迫反应^[26-28],包括冷胁迫^[29]、金属应力^[26,30-32]、紫外线应力^[33-34]、高强度光照胁迫^[35]和盐胁迫^[36-37]。因此,深入探究 H₂ 在植物不同生长发育阶段及不同组织器官中如何发挥作用,以及如何提高机体耐受性以保护机体的能力等,将对氢气更好地应用于现代作物绿色生产具有重要的理论和实践意义。

2.1 氢气在作物生长发育方面的研究及应用

2.1.1 氢气在种子萌发中的研究 种子萌发是作物生长发育的重要环节,极易受外部环境因素的影响^[38]。早在 1964 年,Renwick 等就发现经氢气处理的黑麦(*Secale cereale*)种子发芽率相较于氮气和氩气处理有明显提高,即氢气对种子萌发具有促进作用^[39]。Guan 等利用富氢水处理黑大麦(*Hordeum distichum* L.)发现,其可以改变发芽黑大麦中植物化学物质(如鸟苷的离子强度)的分布,增加游离香草酸、香豆酸、芥子酸、共轭芥子酸与钙、铁的含量以及羟基自由基的清除率,但同时会降低蛋白质、脂肪、淀粉和膳食纤维的含量,有效提高其发芽效率及生长速度^[40]。此外,Xu 等认为,在盐胁迫条件下,水稻种子经过富氢水处理后,α/β-淀粉酶活性的激活导致还原糖和总可溶性糖的加速形成,可以

明显改善种子萌发^[41]。此外,富氢水处理可致使抗氧化酶(SOD、CAT、APX)活性升高和氧化应激标志物(硫代巴比妥酸反应物质)含量降低。李嘉炜等以苦瓜、冬瓜、黄瓜、番茄、菜心等5种瓜果蔬菜种子为材料,用不同浓度富氢水进行处理,比较种子发芽情况和幼苗生物量、叶面积、根系等壮苗相关指标,发现富氢水对青菜、番茄、黄瓜、冬瓜种子发芽及幼苗生长均有促进效果,且不同蔬菜适宜的富氢水浓度有一定差异,以0.25~0.35 mmol/L为宜^[42]。

2.1.2 氢气在作物根系发育中的研究 根系作为作物重要的营养摄入器官,决定植株整体的生长发育情况。Cao等认为,氢气可以促进拟南芥侧根的生长^[43]。赵银萍等认为,氢处理的土壤可以明显促进黄瓜幼苗的生长与发育^[44];Lin等认为,使用50%饱和富氢水可以促进黄瓜外植体不定根的发育^[45]。Hou等研究富氢水对兰州百合鳞片扦插中鳞茎和不定根形成的影响,发现与蒸馏水处理(CON)相比,不同浓度的富氢水处理均可显著促进小鳞茎和不定根的生长,其中100%富氢水处理效果最好,进一步研究还发现富氢水通过增加母鳞片中共供物质淀粉及蔗糖的含量从而促进小鳞茎的生长^[46]。最近,Wu等发现富氢水处理的绿豆幼苗可以提高机体内吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA₃)的水平,从而导致下胚轴和根长增加^[37]。在黄瓜外植体中,Zhu等发现不定根相关的靶基因响应富氢水而上调表达^[47]。此外,氢水处理还可上调A型细胞周期蛋白(CycA)、B型细胞周期蛋白(CycB)、细胞周期蛋白依赖性激酶A(CDKA)、细胞周期蛋白依赖性激酶B(CDKB)等细胞周期相关基因的表达。

2.1.3 氢气在作物茎叶花等器官发育中的研究 在花卉园艺作物中,宋韵琼等认为,经不同浓度富氢水浸泡处理的小苍兰种球及浇灌植株,均可在不同程度上增加小苍兰的叶片长度、宽度,同时小苍兰的花茎长度、花朵直径和小花数等花器官性状均有显著的提升^[48]。在瓜果园艺作物中,富氢水预处理会改变热胁迫黄瓜叶片的光合气体交换、叶绿素荧光参数值和抗氧化活性,提高黄瓜幼苗的耐热性。Chen等用50%、100%富氢水预处理3周龄黄瓜幼苗7d,分析热胁迫对黄瓜幼苗光合作用、叶绿素含量、叶绿素荧光参数、电解质渗漏、脂质过氧化和抗氧化活性的影响,发现富氢水预处理可以显著减轻热胁迫应力对上述参数的影响;此外,经过3d的处理后,富氢水预处理还会显著提高抗氧化酶的

活性,促进渗透保护剂的高水平积累,并上调黄瓜叶片中HSP70的表达^[49]。相似的研究结果显示,用50%富氢水浇灌黄瓜,可以明显提高黄瓜幼苗的株高、茎粗、叶面积等,也能提高黄瓜叶片的光合效率^[50]。但是,在水稻中的研究结果恰恰相反,富氢水浇灌处理普通水稻、转基因水稻及野生水稻的试验结果显示,各类型水稻的花粉半径、千粒重均没有增加,反而显著降低^[51]。

2.2 氢气在农产品品质与贮藏保鲜方面的研究

氢水处理可显著提升产量与品质。宋韵琼等以华青青1号青梗菜作为试验材料,以普通水作为对照,分析50%氢水喷施、10%氢水浸种、10%氢水浸种+50%氢水喷施对其产量与品质的影响,发现综合考虑青菜的形态学、生物量和品质等指标,氢水处理青梗菜可显著提升其产量与品质,且最佳施用处理是10%氢水浸种+50%氢水喷施^[52]。

氢气作为一种安全、无污染的保鲜剂,在作物的产后保鲜领域具有较大的应用潜力。Hu等使用不同浓度的富氢水抑制猕猴桃(*Actinidia chinensis*)的腐烂,发现80%的富氢水处理可显著降低猕猴桃腐烂的发生率,同时可以保持果实硬度,说明可通过富氢水处理来调节猕猴桃果实的抗氧化防御,以延缓果实贮藏过程中的成熟和衰老^[53]。Hu等则认为,H₂可通过抑制乙烯合成酶的活性以减少乙烯的合成,从而延缓猕猴桃果实的衰败^[54]。Chen等在真姬菇保鲜的研究中发现,使用25%的富氢水处理可增强其抗氧化能力,提升其采后品质,同时延长货架期,是一种新的简便保鲜方式^[55]。与瓜果蔬菜保鲜类似,鲜花保鲜也是生产实践及消费环节中的一个重要课题。Ren等在百合和月季的瓶插过程中分别使用0.5%、1%的富氢水处理,发现富氢水通过提高活性氧(ROS)清除抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)及过氧化物酶(POD)等抗氧化剂的含量以增加百合和月季的瓶插寿命和最大花径,此外还可以减少丙二醛(MDA)和电解质渗漏,减小叶片气孔大小,减少氧化损伤,从而改善切花月季和百合的瓶插寿命和品质^[56]。Li等在香石竹切花保鲜研究中发现,富氢水(10%)处理可显著减缓瓶插后期切花鲜质量下降和花瓣萎蔫的速度,延长香石竹切花的盛花期,减缓衰败进程以延长瓶插寿命^[57]。此外,H₂还有助于番茄^[58]、各类鲜切花^[59-60]等的采后贮存与保鲜。

2.3 氢气在作物适应性方面的研究

环境胁迫是影响作物生长发育的重要因素。这些针对作物的胁迫主要可以分为 2 类。一种是非生物胁迫,如盐害、干旱、重金属污染以及极端天气等;另一种是生物胁迫,如细菌等病害。当各类胁迫因子接近或达到机体耐受的极限阈值时便会产生相应的胁迫反应,严重影响作物的生长发育。目前的研究结果表明, H_2 能够提升有机体对多种胁迫因子的适应性,从而缓解各类胁迫对机体带来的不利损伤。

2.3.1 氢气对作物干旱胁迫的影响 Xie 等在对拟南芥的干旱胁迫试验中发现,富氢水可以有效促进细胞内 H_2 的产生,从而使得气孔的孔径减小,并增强耐旱性^[61]。Jin 等在苜蓿幼苗的干旱胁迫试验中发现,富氢水处理的苜蓿幼苗在应对缺水反应时幼苗的脱落酸水平增加,促使幼苗迅速产生大量的过氧化氢,同时关闭气孔,并表现出对干旱反应强耐受性,相反抑制或清除过氧化氢则降低富氢水诱导的抗旱性^[62]。Chen 等发现,在黄瓜的干旱胁迫试验中,富氢水处理可提高相对含水量、减少脂质过氧化和过氧化氢的含量,从而提升机体抗氧化能力以应对干旱胁迫^[63]。富氢水也可在种子的萌发阶段增强干旱适应性。宋瑞娇等对大麦种子分别施加 25%、50% 富氢水处理均可明显改善干旱胁迫下的大麦种子萌发,进一步试验发现富氢水主要通过提升渗透调节能力和抗氧化能力的途径来增强大麦种子对干旱胁迫的耐受能力^[64]。

2.3.2 氢气对作物盐胁迫的影响 盐胁迫对作物生长发育的影响主要体现在机体外部形态和机体内部的生理生化特征等方面。据估计,全世界约有 4 500 万 hm^2 的生产性灌溉土地受到盐胁迫的影响,特别是在沿海地区^[65-66]。Munns 等认为,盐度通过引起细胞渗透和离子平衡的不平衡对作物生产力产生负面影响,其主要不利影响包括增加渗透压、特定离子毒性、养分获取和体内平衡/缺乏、增加细胞膨胀损失以及压力诱导增加的活性氧引起的氧化应激^[65,67]。氢在提高耐盐性方面的作用已经在许多作物中被报道,包括拟南芥^[36]、大麦^[68]、水稻^[41,69]等。在拟南芥抗盐试验中, H_2 作为一种新型细胞保护调节因子,参与了 ZAT10/12 转录因子介导的抗氧化防御和离子平衡的维持^[36]。盐胁迫下大麦的外源富氢水处理研究结果表明, H_2 增加了 Na^+ 从根部排出的速率,其机制是由根表皮中盐

过度敏感的 SOS1 样 Na^+/H^+ 交换剂介导。此外, H_2 通过防止 NaCl 诱导的膜去极化和降低 K^+ 流出通道对活性氧的敏感性来增强根部 K^+ 的保留^[68]。Zeng 等在水稻盐胁迫试验中发现,富氢水可提高超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化酶的总同工酶或相应的转录物活性,同时促进 Na^+ 的外排,从而提高水稻对盐胁迫的抵抗^[69]。

2.3.3 氢气对作物高低温胁迫的影响 温度是影响作物机体的重要环境因素,环境温度过高或过低均会对机体造成负面的不利影响。温度过高会使植物细胞膜受损,温度过低则会导致膜僵化,所有膜过程的紊乱也可能导致活性氧(ROS)的积累,过多的 ROS 会引发氧化损伤,从而导致蛋白质降解、脂质过氧化等^[29,70]。Xu 等在水稻抗寒试验中发现,氢气可通过参与 miR319 和 miR398 介导的氧化还原平衡过程以缓解水稻冷胁迫^[29]。刘丰娇在黄瓜寒冷胁迫试验中发现低温状态下的黄瓜幼苗经 100% 富氢水处理后,其日增株高、叶面积、鲜重、干物质质量和根系生长量均显著高于对照组,表明氢气可以通过增强抗氧化系统活性和调节渗透能力以减缓失水速度^[71]。

2.3.4 氢气对作物光照胁迫的影响 光照作为作物机体光合作用的重要能量来源是其正常生长发育必不可少的。在露天条件下,植物暴露在直接过量的紫外线辐射下,会影响植物的活力和防御反应。紫外线照射会引发基本细胞过程的改变,包括 ROS 的产生、DNA 修复机制以及对细胞结构的破坏^[72-74]。植物利用包括各种抗氧化蛋白和多肽以及渗透保护剂等天然防御系统,以抵消由于非生物胁迫造成的 ROS 负面影响^[75-76]。Xie 等认为,施加氢气可以通过调节植物机体的抗氧化防御系统来诱导对紫外线胁迫的耐受^[33,35]。富氢水已被证明可通过操纵紫花苜蓿中的黄酮类代谢以耐受 UV-B 诱导的氧化损伤^[33]。Zhang 等在对玉米幼苗施加光胁迫的试验中发现,富氢水处理的植株可保持高水平的抗氧化剂活性,包括 SOD、CAT、APX 和 GR,对光胁迫表现出极大的耐受性^[35]。Su 等在紫外光照射的萝卜试验中发现,富氢水可以重建氧化还原稳态,同时提高花青素的合成量^[77];Zhang 等也发现,在 UV-A 照射下,氢气可通过钙离子信号通路促进萝卜芽中花青素的生物合成^[34]。

2.3.5 氢气对作物重金属胁迫的影响 重金属污染一直是农作物生产中的一个难题。重金属离子

可在土壤中不断累积并传递至作物机体,从而严重影响人类健康。 H_2 可以通过减少植物体内金属离子积累来缓解重金属胁迫带来的影响,金属镉是较常见的土壤重金属污染之一。Cui 等对紫花苜蓿进行研究,发现富氢水处理可以通过显著降低由镉引起的硫代巴比妥酸活性物质(TBARS)的含量,并抑制镉中毒症状,同时可以改善根系伸长和幼苗生长情况等^[78]。而白菜的镉中毒研究结果表明,富氢水处理可提高白菜镉的耐受并减少吸收,这与抗氧化防御能力的增强有关,且与钙离子信号通路有关^[79-80]。黄瓜在镉胁迫下,富氢水处理可促进不定根的形成,并减少有害化合物的含量,如过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子自由基($O_2^- \cdot$)、硫代巴比妥酸反应物质(TBARS)等。此外,与胁迫相关的生物标志物活性降低,即抗坏血酸、谷胱甘肽(GSH)、脂氧合酶活性、相对电导率、抗坏血酸/二十二碳六烯酸(DHA)的值和 GSH/氧化谷胱甘肽(GSSG)的值下降。同时,镉胁迫下有益生物分子 GSSG 和 DHA 含量增加,表明 H_2 具有通过减少氧化损伤来诱导镉胁迫下不定根形成的能力^[81]。除了金属镉之外,金属汞同样会对动植物和人体造成损害。Cui 等在紫花苜蓿汞离子胁迫试验中发现,富氢水处理可通过避免氧化应激和重建氧化还原稳态以减轻苜蓿幼苗的汞毒性及汞离子的累积^[82]。金属铝则是酸性土壤区作物生长的重要限制因子,铝中毒可抑制根的伸长,并持续影响植物的生长发育。Chen 等认为,在苜蓿铝中毒时通过富氢水处理可以减少一氧化氮的产出,从而缓解铝中毒造成的根系生长缓慢的问题^[83]。Xu 等在水稻铝胁迫试验中发现,氢气处理可以通过增加水稻的抗氧化防御机制、减少铝的累积以及增强柠檬酸盐外流来缓解铝中毒症状^[84]。

3 氢在畜禽水产养殖中的应用

以肉、蛋、奶、鱼等为主要产出的畜牧水产养殖业是我国农业生产的重要组成部分。以影响消费者物价指数 CPI 较大的猪(肉)为例,我国是全球最大的生猪养殖和猪肉消费国,生猪出栏量和猪肉产量均约占世界总量的 50%。据国家统计局数据显示,2021 年我国生猪出栏 67 128 万头、猪肉产量 5.296 万 t,猪肉消费量在畜禽肉类(猪肉、牛肉、羊肉、禽肉)消费结构中的占比再度逼近 60%。生猪养殖产值超过 1.5 万亿元,已是农业生产中的重要

支柱性产业。然而,我国养猪业乃至畜牧水产养殖业也同样面临一些挑战,如优良品种缺乏、饲料资源短缺、疫病突出等,急需探索多维度、绿色健康、可持续的高质量发展之路。氢气作为一种还原性的惰性气体,在自然界中无处不在。氢气已被证明对生命机体具有抗氧化、抗炎、抗凋亡等生物学作用,对有机体具有很好的保护效果。氢气溶于水得到的富氢水是目前氢农业应用的最主要形式。当前,富氢水已在粮食作物、瓜果蔬菜、园艺作物等植物中验证了其在产量、品质和抗逆等方面具有积极的影响。而在畜禽、水产等动物方面的研究仅有少量报道。因此,在越来越重视绿色、安全、健康的现代农业生产中,积极探索富氢水在养殖业中的应用,对于拓展绿色健康养殖生产工艺和新途径等具有重要意义。

3.1 富氢水在养鸡生产中的研究进展

在蛋鸡生产中,热应激对蛋鸡机体健康与产蛋性能具有较大的负面影响,如何应对热应激则是蛋鸡生产中的一个重要课题。陆灿强以白来航蛋鸡为试验对象,探讨饮用碱性富氢电解水对夏季高温环境下蛋鸡生产性能与蛋品质的作用及其对 H_2O_2 诱导的蛋鸡原代肝细胞的抗凋亡作用,发现饮用富氢电解水可提高热应激状态下的蛋鸡产蛋率($P = 0.073$)和蛋壳厚度($P = 0.067$),并显著提高血浆 T-AOC($P < 0.05$)、降低 MDA 含量($P < 0.05$),可提高空肠绒毛高度、空肠 V/C($P < 0.05$);但饮用富氢电解水对常温环境下的蛋鸡生产性能和蛋品质无明显改变^[85]。Zhang 等评价氢气帮助蛋鸡对抗热应激的效果,同样发现热应激会影响蛋鸡的各种生产性能、肠道黏膜形态、血浆酶活性和抗氧化酶活性^[86]。相比饮用自来水,饮用氢气水可提高空肠绒毛长度、绒毛长度/隐窝深度和抗氧化活性,降低丙二醛,并显著提高蛋鸡生产性能和蛋品质。在肉鸡养殖过程中,热应激同样是影响生产效率的重要因素之一。Azad 等将富氢水应用于慢性热应激(连续 5 d 暴露于 34 ℃)状态下的肉鸡,发现饮用富氢水可显著减少肉鸡体内的各类活性氧自由基和丙二醛,缓和肉鸡骨骼肌氧化损伤,以减小热应激对生产性能带来的负面影响^[87]。

3.2 富氢水在养猪生产中的研究进展

在养猪生产中,为应对日益突出的饲料资源紧缺问题,如果能将陈化粮等其他替代原料有效地作为饲料原料,可有效缓解人猪争粮问题。但是陈化

粮存在毒素、抗营养因子、适口性等一系列问题。如果氢气能够跟陈化粮等原料联合使用,解决陈化粮的相关问题,将会是一个较好的应用方案。南京农业大学相关团队在这方面进行了系列探索。张青等以杜长大三元杂猪为试验对象,探究富氢气对食镰刀菌污染日粮饲喂下的猪只内脏损伤情况,发现对照组(污染日粮)的肝细胞出现较严重的空泡变性,血管变粗且扩张,而试验组(污染日粮+富氢气饲养)损伤情况不明显,表明富氢气对霉菌毒素造成的肝脾等内脏的病理学损伤有显著的缓解作用,同时降低血液中丙氨酸转移酶(ALT)、天冬氨酸转移酶(AST)活性和总胆红素、直接胆红素、中性粒细胞、嗜酸性粒细胞、血红蛋白和超敏 C 反应蛋白含量,对肝脾和血液毒性起到保护作用^[88]。陈亚等分析富氢气对霉变玉米引起的断奶仔猪卵巢机能障碍和肠道损伤的影响,发现霉变玉米中的呕吐毒素与玉米赤霉烯酮可通过影响一氧化氮/一氧化氮合酶水平,介导仔猪卵巢组织抗氧化水平降低,促使线粒体功能降低,富氢气通过提高抗氧化水平有效缓解呕吐毒素与玉米赤霉烯酮对仔猪卵巢造成的危害;而氢气灌胃可通过提高体内氢气水平,有效降低因采食镰刀菌毒素污染玉米而产生的高水平氧化标记物,从而缓解断奶仔猪的生长抑制;也可以降低回肠食糜中的大肠杆菌数以及增加双歧杆菌数量,同时增加结肠食糜中氢气利用菌数;可在一定程度上缓解由镰刀菌毒素造成的仔猪肠道上皮形态损伤^[89-90]。综上,在绿色健康养猪生产中,富氢气在生猪养殖中具有重要的应用价值和广阔前景。

此外,还有一些以小鼠等模式动物为试验对象的氢气干预研究,对畜牧生产中氢气的应用具有重要的借鉴价值。李卫霞等分析氢气对高脂高糖饲料喂养大鼠主要脏器和肝损伤的调节作用,发现与高脂高糖饲料+ddH₂O 组相比,高脂高糖饲料+氢气组大鼠血清谷草转氨酶 GOT 和谷丙转氨酶 GPT 的活性分别降低 44.10%、27.04%,血清超氧化物歧化酶 SOD、谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px、过氧化氢酶 CAT 的活性分别提高 45.07%、61.11%、89.94%,表明氢气可降低高脂高糖饮食对大鼠免疫系统造成的潜在损伤,并通过提高机体抗氧化作用对高脂高糖饮食造成的大鼠肝损伤起一定的保护作用^[91]。张小晓等分析富氢气对高氧环境下小鼠肠道屏障和菌群的影响,发现高氧小鼠肠屏障功能

受到氧化应激损伤,并影响肠道菌群组成;而富氢气可减轻高氧肠损伤,其机制与上调抗氧化酶过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性、降低氧化应激产物丙二醛水平、保持肠道机械屏障完整和肠道有益菌富集有关^[92]。在生猪等畜禽养殖过程中,出现陈化粮、霉变粮等饲料原料问题不可避免,其实质是受黄曲霉毒素的影响。因此,如何在养殖过程中减轻不良饲料原料带来的负面影响也是一个重要课题。扈红蕾等采用单次灌胃黄曲霉毒素 B₁(2.0 mg/kg)建立大鼠急性 AFB₁ 肝损伤模型,并给予富氢气灌胃干预,发现富氢气干预可使 AFB₁ 引起的急性肝损伤显著减轻,血清谷丙转氨酶、谷草转氨酶活性和总胆红素含量降低,肝组织中丙二醛含量降低,还原型谷胱甘肽含量升高,肝组织 ERK、JNK、p38 MAPK 磷酸化水平显著下调,即富氢气可减轻 AFB₁ 肝损伤^[93]。其机制可能与富氢气减轻 AFB₁ 引起的氧化应激、抑制 MAPK 信号转导通路的激活有关。

3.3 富氢气在水产养殖中的研究进展

在渔业水产领域,目前仅有个别研究报道了氢气在水产养殖中的应用。胡振宇以斑马鱼为模式试验动物,建立嗜水气单胞菌感染斑马鱼模型,探究氢气对嗜水气单胞菌感染斑马鱼后的保护效果,并初步探索其保护机理,为氢气用于嗜水气单胞菌感染的防治提供理论和试验依据,其使用富氢气(浓度为 0.6 mmol/L)处理受嗜水气单胞菌感染的斑马鱼,统计分析细菌感染后斑马鱼的存活率,发现 1%、4% 富氢气均能起到提高斑马鱼存活率的作用,其中 1% 富氢气组效果最佳,能将斑马鱼存活率由 51.7% 提升至 72.5%,同时,通过细菌学检测富氢气处理后斑马鱼体内嗜水气单胞菌的生长情况,发现富氢气处理组菌落总数随时间增长速度在各时间段(6、12、24、48 h)低于未处理组。该研究还通过荧光定量 PCR 检测用富氢气处理后斑马鱼脾脏、肾脏和肝脏中免疫调节因子表达量的变化,进一步探究富氢气在抗嗜水气单胞菌感染斑马鱼中的作用机制。结果表明,在感染 6、12、24 h 后,能够显著降低 3 种组织中促炎细胞因子 NF-KB、IL-1β 及 IL-6 的表达,并显著上调 3 种组织中抗炎细胞因子 IL-10 的表达。同时,通过荧光定量 PCR 检测富氢气处理后斑马鱼脾脏、肾脏和肝脏中抗氧化相关因子的表达变化,发现在感染后 6、12、24 h,富氢气能够显著提高 3 种组织中抗氧化因子 SOD1、CAT 及 POD 的表达^[94]。

4 总结与展望

氢气是自然界最小、最简单的分子,穿透性极强,容易穿透生物膜而进入细胞、细胞核和线粒体,极易被动植物体所吸收和利用。随着科学技术的发展和人们认知水平的提高,逐步形成了研究氢气生物学效应和分子机理的“氢气生物学”。按照实际应用范围的不同,氢气生物学也可以划分为氢医学和氢农学^[95]。作为生物活性分子和广谱的抗氧化保护剂,氢气在现代农业领域中有着巨大的潜力。目前,国内外许多科研院所在氢农业方面进行了大量研究,且初步发现氢气具有很好的应用效果。如在作物与畜禽水产中可调控动植物机体的生长发育、增强机体对病原或毒素抗性逆境耐受性、提高产量与品质、延长产后贮藏与保鲜时间等。另外,氢气对生物和环境的安全性非常高,几乎不会给生物机体和外部环境造成任何潜在危害。

综上,氢在现代农业生产中具有较广泛的应用前景。然而,目前氢气要在现代农业生产实践中普及应用与推广,还存在以下一些问题与挑战:第一,氢农业需要更扎实的氢生物学基础理论支撑。现有研究表明,在实验室条件下,氢气在作物和畜牧水产中均具有一定的积极效果,但其背后的生物学作用机制并不清楚。目前,氢气在生物机体内选择性抗氧化是被广泛认可的作用机制。此外,学者们又先后提出生物酶假说、信号传导假说等,并没有形成系统的理论基础。第二,氢气应用于现代农业生产的基础参数仍不明确。有研究发现,氢气在畜禽养殖中可改善生物(病原)或非生物(不良环境等)侵袭状态下的生产发育、但对处于正常内外环境下的机体无明显改善效果;还有学者认为,氢气对植物生长发育的调节作用存在浓度依赖现象。浓度过高或过低不仅可能没有作用,还可能抑制生长的情况。不同动植物种类、不同生长发育时期、不同给氢方式的最适宜浓度均需要进一步探索,这对于普及氢在大田上的应用具有重要意义。第三,明确以富氢水供氢时的作用机制。富氢水是现代农业生产中最具竞争力的供氢方式,但相关研究表明富氢水或富氢生理盐水的产生生理作用可能来源于低氧环境,因此要弄清富氢水供氢时的相关作用机制。第四,氢农业应用需要配套储氢供氢方式等相应的技术解决方案。首先,现行制氢方法常使用氢棒、纯氢通入水中等方式制富氢

水,可应用于实验室使用量较少的情况,但对于大田生产,缺乏适用于田间大规模的专用制氢设备。研制性价比高、操作简单的专用制氢设备以满足供氢需要是氢气在农业生产中广泛应用的关键。其次,在供氢方式上,氢化镁也是一种前景较好的、低成本、大量可获得的供体,显示出作为农业氢气来源材料的潜力。另一种潜在的农业氢气输送方法是使用纳米技术,通过使用释氢纳米材料如纳米胶囊,将氨基硼烷包裹到中空的介孔二氧化硅纳米颗粒中,从而持续输送氢气。最后,在氢农业推广应用时,成本是生产中永恒的话题,还应考虑投入产出比,应最大化地降低供氢成本、开发高附加值农业及农产品。

2022 年 3 月,国家发展和改革委员会和国家能源局联合正式发布《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》,明确提出氢的能源属性是未来国家能源体系的组成部分,充分发挥氢能清洁低碳等特点,推动多元化使用和绿色低碳转型。同时,明确氢能是战略性新兴产业的重点方向,是构建绿色低碳产业体系、打造产业转型升级的新增长点。近年来全国各地均在大力推动氢能产业发展,氢农业被认为是低碳社会的新兴且有前景的领域,氢农业或将成为“乡村振兴”战略的重要支撑。虽然目前氢农业尚处于起步阶段,生产成本较高,然而氢气正在被其他很多行业采用,特别是在能源领域的广泛研究,这非常有利于氢气在未来农业上的应用推广,“现代氢农业时代”正在快步走入寻常百姓家。如今氢气已经日益成为一种绿色农业新概念。将氢应用到作物生产、畜禽水产养殖等更广阔的现代农业范畴中,将全方位保障我国粮食安全,为我国现代农业的快速腾飞插上翅膀,实现科技兴农、强农、富农。

参考文献:

- [1] Dole M, Wilson F R, Fife W P. Hyperbaric hydrogen therapy: a possible treatment for cancer[J]. Science, 1975, 190(4210): 152 - 154.
- [2] Ohsawa I, Ishikawa M, Takahashi K, et al. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals[J]. Nature Medicine, 2007, 13: 688 - 694.
- [3] Yang Y, Zhu Y P, Xi X W. Anti-inflammatory and antitumor action of hydrogen via reactive oxygen species[J]. Oncology Letters, 2018, 16(3): 2771 - 2776.
- [4] Cai J M, Kang Z M, Liu W W, et al. Hydrogen therapy reduces apoptosis in neonatal hypoxia-ischemia rat model[J]. Neuroscience

- Letters,2008,441(2):167–172.
- [5] Ishibashi T. Therapeutic efficacy of molecular hydrogen: a new mechanistic insight [J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2019, 25(9):946–955.
 - [6] Ishihara G, Kawamoto K, Komori N, et al. Molecular hydrogen suppresses superoxide generation in the mitochondrial complex I and reduced mitochondrial membrane potential [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2020, 522(4):965–970.
 - [7] Wang T T, Zhao L, Liu M Y, et al. Oral intake of hydrogen – rich water ameliorated chlorpyrifos – induced neurotoxicity in rats [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2014, 280(1):169–176.
 - [8] 马雪梅, 张 鑫, 谢 飞, 等. 氢气生物学作用的生物酶基础 [J]. *生物技术进展*, 2020, 10(1):15–22.
 - [9] Zhang X, Zhang Z, Wei Y N, et al. Mitochondria in higher plants possess H₂ evolving activity which is closely related to complex I [J/OL]. *ArXiv*. (2020–07–07) [2022–10–15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.02132>.
 - [10] 仪 杨, 张晓康, 郭博远, 等. 氢气对辣根过氧化物酶活性的影响及其作用机制的研究 [J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2020, 36(7):811–819.
 - [11] Jin Z K, Zhao P H, Gong W J, et al. Fe – porphyrin: a redox – related biosensor of hydrogen molecule [J]. *Nano Research*, 2023, 16(2):2020–2025.
 - [12] Chen K Y, Wang N, Diao Y G, et al. Hydrogen – rich saline attenuates brain injury induced by cardiopulmonary bypass and inhibits microvascular endothelial cell apoptosis via the PI3K/akt/GSK3 β signaling pathway in rats [J]. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 2017, 43(4):1634–1647.
 - [13] Chu X L, Cao L L, Yu Z Y, et al. Hydrogen – rich saline promotes microglia M2 polarization and complement – mediated synapse loss to restore behavioral deficits following hypoxia – ischemic in neonatal mice via AMPK activation [J]. *Journal of Neuroinflammation*, 2019, 16(1):104.
 - [14] Wang P P, Zhao M Y, Chen Z H, et al. Hydrogen gas attenuates hypoxic – ischemic brain injury via regulation of the MAPK/HO – 1/PGC – 1 α pathway in neonatal rats [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, 2020:6978784.
 - [15] Wang C, Li J, Liu Q, et al. Hydrogen – rich saline reduces oxidative stress and inflammation by inhibit of JNK and NF – κ B activation in a rat model of amyloid – β – induced Alzheimer's disease [J]. *Neuroscience Letters*, 2011, 491(2):127–132.
 - [16] Song G H, Tian H, Liu J, et al. H₂ inhibits TNF – α – induced lectin – like oxidized LDL receptor – 1 expression by inhibiting nuclear factor κ B activation in endothelial cells [J]. *Biotechnology Letters*, 2011, 33(9):1715–1722.
 - [17] Zheng H, Yu Y S. Chronic hydrogen – rich saline treatment attenuates vascular dysfunction in spontaneous hypertensive rats [J]. *Biochemical Pharmacology*, 2012, 83(9):1269–1277.
 - [18] Kajiyama S, Hasegawa G, Asano M, et al. Supplementation of hydrogen – rich water improves lipid and glucose metabolism in patients with type 2 diabetes or impaired glucose tolerance [J]. *Nutrition Research*, 2008, 28(3):137–143.
 - [19] Nakao A, Toyoda Y, Sharma P, et al. Effectiveness of hydrogen rich water on antioxidant status of subjects with potential metabolic syndrome: an open label pilot study [J]. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 2010, 46(2):140–149.
 - [20] Song G H, Li M, Sang H, et al. Hydrogen – rich water decreases serum LDL – cholesterol levels and improves HDL function in patients with potential metabolic syndrome [J]. *Journal of Lipid Research*, 2013, 54(7):1884–1893.
 - [21] Xun Z M, Zhao Q H, Zhang Y, et al. Effects of long – term hydrogen intervention on the physiological function of rats [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10:18509.
 - [22] Runtuwene J, Amitani H, Amitani M, et al. Hydrogen – water enhances 5 – fluorouracil – induced inhibition of colon cancer [J]. *PeerJ*, 2015, 3:e859.
 - [23] Melis A, Happe T. Hydrogen production green algae as a source of energy [J]. *Plant Physiology*, 2001, 127(3):740–748.
 - [24] Bothe H, Schmitz O, Yates M G, et al. Nitrogen fixation and hydrogen metabolism in cyanobacteria [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2010, 74(4):529–551.
 - [25] Russell G, Zulfiqar F, Hancock J T. Hydrogenases and the role of molecular hydrogen in plants [J]. *Plants*, 2020, 9(9):1136.
 - [26] Cui W T, Yao P, Pan J C, et al. Transcriptome analysis reveals insight into molecular hydrogen – induced cadmium tolerance in alfalfa: the prominent role of sulfur and (homo) glutathione metabolism [J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1):58.
 - [27] Wang C L, Fang H, Gong T Y, et al. Hydrogen gas alleviates postharvest senescence of cut rose ‘Movie star’ by antagonizing ethylene [J]. *Plant Molecular Biology*, 2020, 102(3):271–285.
 - [28] Wang Y Q, Liu Y H, Wang S, et al. Hydrogen agronomy: research progress and prospects [J]. *Journal of Zhejiang University (Science B)*, 2020, 21(11):841–855.
 - [29] Xu S, Jiang Y L, Cui W T, et al. Hydrogen enhances adaptation of rice seedlings to cold stress via the reestablishment of redox homeostasis mediated by miRNA expression [J]. *Plant and Soil*, 2017, 414(1):53–67.
 - [30] Zhao X Q, Chen Q H, Wang Y M, et al. Hydrogen – rich water induces aluminum tolerance in maize seedlings by enhancing antioxidant capacities and nutrient homeostasis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 144:369–379.
 - [31] Wu X, Zhu Z B, Chen J H, et al. Transcriptome analysis revealed pivotal transporters involved in the reduction of cadmium accumulation in pak choi (*Brassica chinensis* L.) by exogenous hydrogen – rich water [J]. *Chemosphere*, 2019, 216:684–697.
 - [32] Fan W H, Zhang Y, Liu S, et al. Alleviation of copper toxicity in *Daphnia magna* by hydrogen nanobubble water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389:122155.
 - [33] Xie Y J, Zhang W, Duan X L, et al. Hydrogen – rich water – alleviated ultraviolet – B – triggered oxidative damage is partially associated with the manipulation of the metabolism of (iso) flavonoids and antioxidant defence in *Medicago sativa* [J].

- Functional Plant Biology, 2015, 42(12): 1141–1157.
- [34] Zhang X Y, Wei J Y, Huang Y F, et al. Increased cytosolic calcium contributes to hydrogen – rich water – promoted anthocyanin biosynthesis under UV – a irradiation in radish sprouts hypocotyls [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1020.
- [35] Zhang X N, Zhao X Q, Wang Z Q, et al. Protective effects of hydrogen – rich water on the photosynthetic apparatus of maize seedlings (*Zea mays* L.) as a result of an increase in antioxidant enzyme activities under high light stress [J]. Plant Growth Regulation, 2015, 77(1): 43–56.
- [36] Xie Y J, Mao Y, Lai D W, et al. H₂ enhances *Arabidopsis* salt tolerance by manipulating ZAT10/12 – mediated antioxidant defence and controlling sodium exclusion [J]. PLoS One, 2012, 7(11): e49800.
- [37] Wu Q, Su N N, Huang X, et al. Hydrogen – rich water promotes elongation of hypocotyls and roots in plants through mediating the level of endogenous gibberellin and auxin [J]. Functional Plant Biology, 2020, 47(9): 771–778.
- [38] 张 晶, 李湘妮, 李 强, 等. 富氢水在广东佛山农业生产上的应用及展望[J]. 农业工程技术, 2019, 39(23): 91–93.
- [39] Renwick G M, Giumarro C, Siegel S M. Hydrogen metabolism in higher plants[J]. Plant Physiology, 1964, 39(3): 303–306.
- [40] Guan Q, Ding X W, Jiang R, et al. Effects of hydrogen – rich water on the nutrient composition and antioxidative characteristics of sprouted black barley[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125095.
- [41] Xu S, Zhu S S, Jiang Y L, et al. Hydrogen – rich water alleviates salt stress in rice during seed germination [J]. Plant and Soil, 2013, 370(1): 47–57.
- [42] 李嘉伟, 张白鸽, 陈 潇, 等. 富氢水对蔬菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 长江蔬菜, 2022(8): 10–14.
- [43] Cao Z Y, Duan X L, Yao P, et al. Hydrogen gas is involved in auxin – induced lateral root formation by modulating nitric oxide synthesis[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(10): 2084.
- [44] 赵银萍, 梁振荣, 付洪冰. 氢处理土对黄瓜苗期生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 138–139.
- [45] Lin Y T, Zhang W, Qi F, et al. Hydrogen – rich water regulates cucumber adventitious root development in a heme oxygenase – 1/ carbon monoxide – dependent manner [J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(2): 1–8.
- [46] Hou X M, Qi N N, Wang C L, et al. Hydrogen – rich water promotes the formation of bulblets in *Lilium davidii* var. *unicolor* through regulating sucrose and starch metabolism [J]. Planta, 2021, 254(5): 106.
- [47] Zhu Y C, Liao W B, Niu L J, et al. Nitric oxide is involved in hydrogen gas – induced cell cycle activation during adventitious root formation in cucumber[J]. BMC Plant Biology, 2016, 16(1): 146.
- [48] 宋韵琼, 沙米拉 · 太来提, 杜红梅. 富氢水处理对小苍兰生长发育的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2016, 34(3): 55–61, 96.
- [49] Chen Q H, Zhao X Q, Lei D K, et al. Hydrogen – rich water pretreatment alters photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant activities in heat – stressed cucumber leaves[J]. Plant Growth Regulation, 2017, 83(1): 69–82.
- [50] 张海那. 富氢水调控黄瓜幼苗生长发育和耐盐性的初步研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [51] Liu F, Jiang W X, Han W J, et al. Effects of hydrogen – rich water on fitness parameters of rice plants[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(5): 2033–2039.
- [52] 宋韵琼, 张 峻, 张俊波, 等. 富氢水处理对青菜产量和品质的影响[J]. 现代农业科技, 2022(8): 49–54.
- [53] Hu H L, Li P X, Wang Y N, et al. Hydrogen – rich water delays postharvest ripening and senescence of kiwifruit [J]. Food Chemistry, 2014, 156: 100–109.
- [54] Hu H L, Zhao S P, Li P X, et al. Hydrogen gas prolongs the shelf life of kiwifruit by decreasing ethylene biosynthesis[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 135: 123–130.
- [55] Chen H, Zhang J J, Hao H B, et al. Hydrogen – rich water increases postharvest quality by enhancing antioxidant capacity in *Hypsizygus marmoreus* [J]. AMB Express, 2017, 7(1): 221.
- [56] Ren P J, Jin X, Liao W B, et al. Effect of hydrogen – rich water on vase life and quality in cut lily and rose flowers[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2017, 58(6): 576–584.
- [57] Li L N, Yin Q L, Zhang T, et al. Hydrogen nanobubble water delays petal senescence and prolongs the vase life of cut carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) flowers [J]. Plants, 2021, 10(8): 1662.
- [58] Zhang Y H, Zhao G, Cheng P F, et al. Nitrite accumulation during storage of tomato fruit as prevented by hydrogen gas [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 1425–1438.
- [59] Huo J Q, Huang D J, Zhang J, et al. Comparative proteomic analysis during the involvement of nitric oxide in hydrogen gas – improved postharvest freshness in cut lilies [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(12): 3955.
- [60] Su J C, Nie Y, Zhao G, et al. Endogenous hydrogen gas delays petal senescence and extends the vase life of lisianthus cut flowers[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 147: 148–155.
- [61] Xie Y J, Mao Y, Zhang W, et al. Reactive oxygen species – dependent nitric oxide production contributes to hydrogen – promoted stomatal closure in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2014, 165(2): 759–773.
- [62] Jin Q J, Zhu K K, Cui W T, et al. Hydrogen – modulated stomatal sensitivity to abscisic acid and drought tolerance via the regulation of apoplastic pH in *Medicago sativa* [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(2): 565–573.
- [63] Chen Y, Wang M, Hu L L, et al. Carbon monoxide is involved in hydrogen gas – induced adventitious root development in cucumber under simulated drought stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 128.
- [64] 宋瑞娟, 冯彩军, 齐军仓. 富氢水对干旱胁迫下大麦种子萌发的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(1): 79–85.
- [65] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651–681.

- [66] Hadley D. Land use and the coastal zone[J]. Land Use Policy, 2009, 26: S198 – S203.
- [67] Flowers T J. Improving crop salt tolerance [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(396): 307 – 319.
- [68] Wu Q, Su N N, Shabala L, et al. Understanding the mechanistic basis of ameliorating effects of hydrogen rich water on salinity tolerance in barley[J]. Environmental and Experimental Botany, 2020, 177: 104136.
- [69] Zeng J Q, Zhang M Y, Sun X J. Molecular hydrogen is involved in phytohormone signaling and stress responses in plants[J]. PLoS One, 2013, 8(8): e71038.
- [70] Ruelland E, Vaultier M N, Zachowski A, et al. Chapter 2 cold signalling and cold acclimation in plants[J]. Advances in Botanical Research, 2009, 49: 35 – 150.
- [71] 刘丰娇. 富氢水调控黄芩耐冷性的生理机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [72] Jenkins G I. Signal transduction in responses to UV – B radiation [J]. Annual Review of Plant Biology, 2009, 60: 407 – 431.
- [73] Hideg É, Jansen M A K, Strid Å. UV – B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates? [J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(2): 107 – 115.
- [74] Li J G, Yang L, Jin D, et al. UV – B – induced photomorphogenesis in *Arabidopsis* [J]. Protein & Cell, 2013, 4(7): 485 – 492.
- [75] Zulfqar F, Akram N A, Ashraf M. Osmoprotection in plants under abiotic stresses: new insights into a classical phenomenon [J]. Planta, 2019, 251(1): 3.
- [76] Zulfqar F, Ashraf M. Bioregulators: unlocking their potential role in regulation of the plant oxidative defense system[J]. Plant Molecular Biology, 2021, 105(1): 11 – 41.
- [77] Su N N, Wu Q, Liu Y Y, et al. Hydrogen – rich water reestablishes ROS homeostasis but exerts differential effects on anthocyanin synthesis in two varieties of radish sprouts under UV – a irradiation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(27): 6454 – 6462.
- [78] Cui W T, Gao C Y, Fang P, et al. Alleviation of cadmium toxicity in *Medicago sativa* by hydrogen – rich water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 715 – 724.
- [79] Wu Q, Su N N, Cai J T, et al. Hydrogen – rich water enhances cadmium tolerance in Chinese cabbage by reducing cadmium uptake and increasing antioxidant capacities[J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 175: 174 – 182.
- [80] Wu Q, Huang L P, Su N N, et al. Calcium – dependent hydrogen peroxide mediates hydrogen – rich water – reduced cadmium uptake in plant roots[J]. Plant Physiology, 2020, 183(3): 1331 – 1344.
- [81] Wang B, Bian B T, Wang C L, et al. Hydrogen gas promotes the adventitious rooting in cucumber under cadmium stress[J]. PLoS One, 2019, 14(2): e0212639.
- [82] Cui W T, Fang P, Zhu K K, et al. Hydrogen – rich water confers plant tolerance to mercury toxicity in alfalfa seedlings[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 105: 103 – 111.
- [83] Chen M, Cui W T, Zhu K K, et al. Hydrogen – rich water alleviates aluminum – induced inhibition of root elongation in alfalfa via decreasing nitric oxide production[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 267: 40 – 47.
- [84] Xu D K, Cao H, Fang W, et al. Linking hydrogen – enhanced rice aluminum tolerance with the reestablishment of GA/ABA balance and miRNA – modulated gene expression: a case study on germination [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 303 – 312.
- [85] 陆灿强. 碱性富氢电解水缓和蛋鸡慢性热应激的效应及机理研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
- [86] 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]. Journal of Applied Poultry Research, 2022, 31(2): 100244.
- [87] Azad M A K, Kikusato M, Zulkifli I, et al. Electrolysed reduced water decreases reactive oxygen species – induced oxidative damage to skeletal muscle and improves performance in broiler chickens exposed to medium – term chronic heat stress[J]. British Poultry Science, 2013, 54(4): 503 – 509.
- [88] 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.
- [89] 陈亚. 富氢水和乳果糖缓解霉变玉米引起的断奶仔猪卵巢机能障碍[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [90] 计徐. 乳果糖和富氢水对采食镰刀菌污染玉米断奶仔猪肠道损伤保护作用的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [91] 李卫霞, 陈剑华, 郭旭丽, 等. 氢水对高脂高糖饲料喂养大鼠主要脏器和肝损伤的调节作用[J]. 生命科学研究, 2021, 25(3): 202 – 208.
- [92] 张小晓, 庄苗, 陈苏衡, 等. 富氢水对高氧环境小鼠肠道屏障和菌群的影响[J]. 中国微生态学杂志, 2022, 34(4): 388 – 393, 399.
- [93] 扈红蕾, 高健, 郭文君, 等. 富氢水在黄曲霉毒素 B₁ 致大鼠肝损伤模型中的抗损伤作用[J]. 生理学报, 2019, 71(5): 725 – 731.
- [94] 胡振宇. 氢分子对感染嗜水气单胞菌斑马鱼的作用研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2017.
- [95] 沈文飏, 孙学军. 崭露头角的氢气生物学[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2019, 35(10): 1037 – 1050.