

# 氢在农业中的研发进展

杨海燕<sup>1,2\*</sup>, 张秋雨<sup>1,2</sup>, 凌翔<sup>1,2</sup>, 刘亚倩<sup>1,2,3</sup>, 潘琪芳<sup>3</sup>, 韩京龙<sup>5</sup>, 丁文江<sup>1,2,4\*</sup>

- 上海市氢科学重点实验室&上海交通大学氢科学中心, 上海 200240
- 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240
- 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240
- 上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240
- 烟台大学环境与材料工程学院, 烟台 264005

**摘要** 氢由于其抗氧化、生长因子调节、酶活性调节等多种生物学效应以及使用的安全性、环保性,使其在农业生产上的应用前景十分广阔。综述了氢在农业中的研究进展,从氢促进植物生根发芽、调节农产品产量/品质、增强植物抗逆性、延长农产品保鲜期以及提升养殖存活率和产品品质等方面盘点了氢的使用方法,并分析了氢对植物的生物学效应机制。展望了氢在农业中的发展趋势,指出氢农业未来应围绕核心技术研发、应用范围扩大、环保与可持续发展等展开研究。

**关键词** 氢; 氢化镁; 农业; 抗氧化作用

近年来,环境污染、土壤生态破坏以及食品安全问题愈发严重,发展绿色、可持续的农业模式越来越受到全球关注。2007年,Ohsawa等<sup>[1]</sup>研究发现氢气( $H_2$ )可选择性地中和过氧亚硝基阴离子( $ONOO^-$ )和羟自由基( $\cdot OH$ ),清除过量的活性氧(reactive oxygen species, ROS),进而可以缓解由脑缺血引起的氧化损伤。自此,相关氢的生物效应研

究渐渐被人们关注。氢的应用形态也已不再局限于氢气,还有液态用氢和固态用氢。氢由于其抗氧化、生长因子调节、酶活性调节等生物学效应以及使用的安全性、环保性,使其在农业生产上的应用前景十分广阔<sup>[2-6]</sup>。近年来关于氢在农业中的应用及机理研究越发活跃<sup>[7-19]</sup>。本文综述氢在农业中的研发进展。

收稿日期:2024-01-10;修回日期:2024-03-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52371195);上海交通大学氢科学中心双一流项目

作者简介:杨海燕,工程师,研究方向为氢科学、氢生物,电子信箱: yanghaiyan@sjtu.edu.cn;丁文江(通信作者),教授,中国工程院院士,研究方向为氢科学、轻合金,电子信箱: wjding@sjtu.edu.cn

引用格式:杨海燕,张秋雨,凌翔,等.氢在农业中的研发进展[J].科技导报,2024,42(15):22-39;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.00065

## 1 氢用于农业的发展现状

近年来,氢应用于农业的作用和机理,以及氢农业相关技术越来越受到国内外学者的关注。作者在 Web of Science、中国知网及万方等中英文文献及专利数据库以“氢(hydrogen)/富氢水(hydrogen-rich water)”为关键词,“农业(Agriculture)/植物科学(Plant Sciences)/食品科技(Food Science Technology)”为研究方向,调研近些年的文献与专利,结果如图1所示。总体来看,氢用于农业的研

究呈现明显上升趋势(图1(a)和(c))。从成果归属国来看,虽然氢农业最早在日本兴起,但目前90%以上的成果来自中国,说明中国在氢农业领域已处于领先地位,这与中国长期氢能发展战略以及农业大国的国情有密切关系,也与近年来中国对绿色农业的重视程度有关(图1(b))。从授权专利来看,重点申请保护的技术主要聚焦在氢农产品开发、农业供氢技术以及农产品保鲜技术3个方面,分别占比65.8%、28.8%和5.4%(图1(d))。

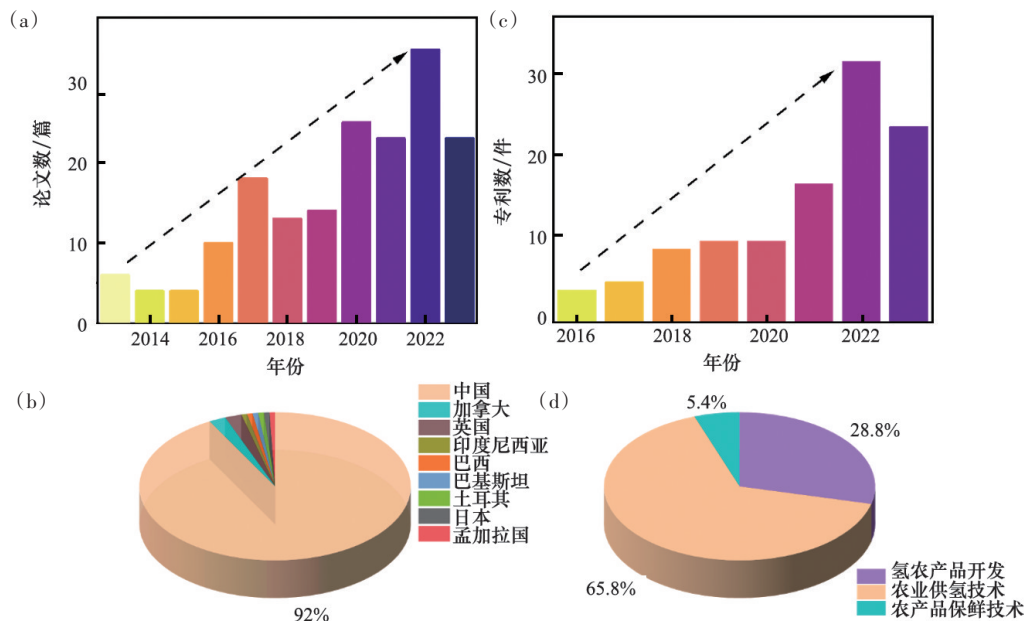


图1 氢农业发表论文篇数(a)与各国统计比例(b);氢农业相关专利数(c)与技术方向比例(d)

## 2 氢在农业中的应用形态

氢在农业中的应用形态依照氢的存在形式可分为气态用氢、液态用氢和固态用氢3种。

农业中氢气可用于熏蒸育种、农产品保鲜、土壤修复、提供抗氧化气氛等,其使用方法包括直接应用高压气瓶供氢或电解水供氢等。南京农业大学沈文彪教授团队<sup>[20]</sup>翻耕后在土地表面覆膜并注入氢气进行熏蒸,可显著提高烟草种子的发芽势和发芽率,并且育种所得烟草种子再种植后千粒重增加。但是,由于氢气质量小,极易扩散与挥发,无法保障其使用浓度;此外,氢气使用需采用包/覆膜等

操作防止其逃逸,增加了实施的复杂性。

液态用氢的常见应用形式为富氢水(hydrogen-rich water, HRW)和氢纳米气泡水(hydrogen nanobubble water, HNW)。研究者将氢气溶解于水制备成富氢水,但是氢在水中的溶解度低,水溶解氢的理论容量为1.6 mg/L。液态用氢这种形态通常采用将氢气直接压入到纯水或者电解水制氢这2种方法制备。秦秀军等<sup>[21]</sup>利用0.1~0.4 MPa的H<sub>2</sub>通入水中,研究结果表明通气时间4 h时氢浓度可达到~0.5 mg/L,而通气压强对氢浓度无明显影响。水电解制氢的原理是利用电流通过水溶液,在催化剂的作用下通过电解将水分子分解成氧气和氢气,

其产氢量与电解时间、电解槽结构形式、水质等多因素有关<sup>[22]</sup>。但是,如何存储HRW是其应用的一大难题,HRW的浓度会随着放置时间的延长有较大幅度下降,建议放置时间不超过48 h<sup>[6]</sup>。目前一般“现制现用”以减少氢气浓度下降。近年来,氢纳米气泡水技术受到广泛关注。此技术由于产生的氢气泡具有粒径小、相对比表面积大、带有表面电荷等特点,增加氢的溶解度和稳定性。氢纳米气泡水具有独特的纳米特性和抗氧化特性,是液态用氢的一项新技术<sup>[23-24]</sup>。

固态用氢基于固态储氢材料(solid hydrogen-storage materials, SHSM)的水解反应产氢来供氢。目前用于农业水解产氢的SHSM主要包括镁(Mg)、氢化镁(MgH<sub>2</sub>)和氨硼烷(NH<sub>3</sub>BH<sub>3</sub>, AB)等<sup>[7,14,25-28]</sup>,其水解放氢反应式如式(1)~(3)。镁供氢可利用金属镁棒和水反应产生氢气,氢气浓度与使用次数、反应时间和容器密闭性密切相关<sup>[8]</sup>,但镁棒易被氧化。MgH<sub>2</sub>的水解产氢密度是纯Mg的2倍,*w*(100 g物质中氢质量)高达15.2,但MgH<sub>2</sub>易潮解。另外,采用固态用氢由于水解反应产物除了氢还有储氢

载体,需要关注载体如Mg<sup>2+</sup>带来的生物学效应。

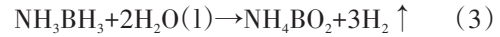
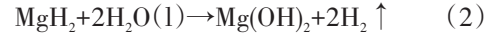


表1比较了气态用氢、液态用氢、固态用氢3种用氢形式的优缺点。从供氢浓度来看,气态用氢常温常压下的密度为89 mg/L;而液态用氢的理论容量为1.6 mg/L;固态用氢中,MgH<sub>2</sub>的体积储氢密度为110 g/L,理论水解供氢密度为220 g/L,NH<sub>3</sub>BH<sub>3</sub>体积储氢密度为145 g/L,理论供氢密度为145 g/L。因此,固态储氢材料可实现高浓度供氢。从应用便捷度来看,气态用氢因易逃逸而需包覆薄膜等;液态用氢需“现制现用”,仪器依赖度高;而固态储氢材料可直接施用于土壤/基质/营养液中,具有使用便捷的优势<sup>[7]</sup>。此外,通过包覆技术对固态储氢材料进行包覆处理,可实现可控缓释和长效供氢<sup>[29]</sup>,可研发种植业用“氢肥料”和养殖业用“氢饲料”,使得“氢”成“料”成为可能,为氢农业的发展提供极具潜力的一种用氢形式。

表1 氢的3种使用形式及其优缺点

形态	方法	优点	缺点
气态用氢	高压气瓶供应	操作简单	安全性低
	电解水技术	取用方便	氢气易挥发
液态用氢	压力注入法	简单方便	不易保存
	电解水技术	方法成熟	氢气易逃逸
	纳米气泡技术	氢溶解度较高	依赖专用设备
固态用氢	金属镁棒水解	安全性高、价格低	易氧化
	氢化镁水解	高储氢量、缓释供氢、使用便捷	易潮解
	氨硼烷水解	高储氢量、易保存	价格较高

### 3 氢在农业中的研究进展

氢对于各类植物的生长、抗环境胁迫等具有重要影响;基于氢的抗氧化、抗炎和抗细胞凋亡生理作用,氢对养殖业也具有积极作用。本节将从种植业和养殖业2个方面对氢的研究进展展开综述。

#### 3.1 氢在种植业的研究进展

氢对植物种子萌发、生长发育、增产提质、抗逆能力、农产品保鲜具有显著的影响,如图2所示。

本节将从表观性状、内源激素、蛋白活性、基因表达等方面进行详细综述。

##### 3.1.1 氢对种子萌发的影响

种子萌发是植物生命周期最脆弱的阶段,是幼苗后续生长的关键阶段,种子品质和生长环境都明显影响种子的萌发。研究表明氢对大麦、水稻等禾谷类植物,以及蔬菜、草药等种子萌发均具有促进作用<sup>[30-35]</sup>。

在禾谷类植物中,陈茹猛等<sup>[36]</sup>研究固态MgH<sub>2</sub>

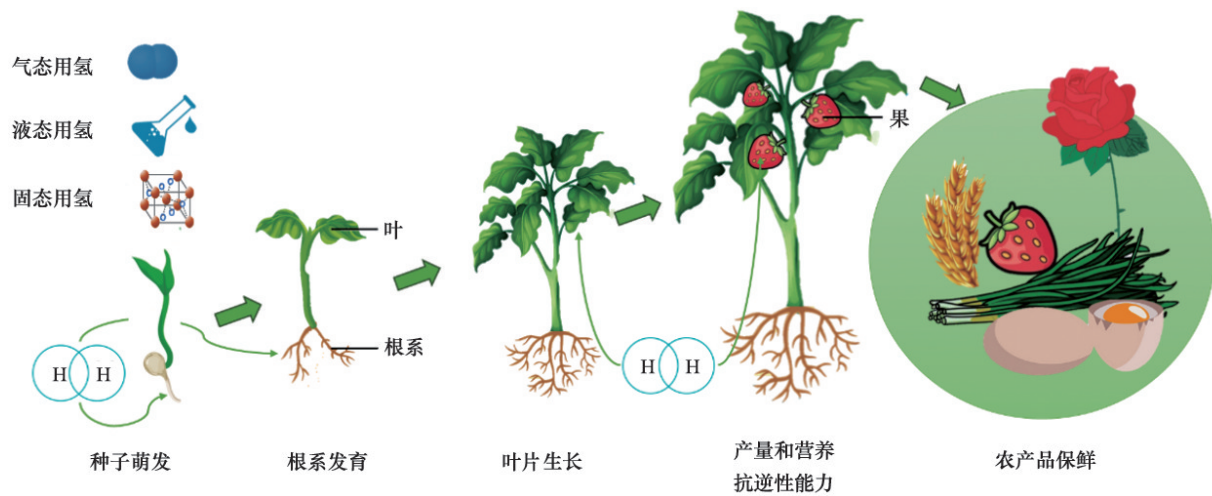


图2 氢应用于种植业的作用

对水稻种子萌发的影响。研究表明,  $MgH_2$  可通过提高萌发水稻种子  $H_2O_2$  含量, 维持  $H_2O_2$  稳态, 从而上调  $\alpha$ -淀粉酶基因 *OsAmy 1A* 和 *OsAmy 3D* 的表达, 提高总淀粉酶和  $\alpha$ -淀粉酶的活性, 促进淀粉降解, 进而促进种子萌发、胚根和胚芽的生长, 其中  $0.02 \text{ mg/mL } MgH_2$  的作用最为明显。而 Guan 等<sup>[35]</sup> 的研究表明 HRW 可以通过促进蛋白质、脂类降解来提升黑麦种子萌发所需的营养物质和能量, 从而促进发芽。此外, HRW 处理下黑麦萌发的最佳温度范围为  $10\sim 15^\circ\text{C}$ 。Xu 等<sup>[37]</sup> 研究表明, 在 Al 胁迫下氢可调控水稻赤霉素/脱落酸的动态平衡, 调控赤霉素合成基因 *GA20ox1* 和 *GA20ox2* 以及脱落酸分解代谢基因 *ABA8ox1* 和 *ABA8ox2* 的表达, 减轻 Al 对禾谷类种子萌发的抑制。

在蔬菜和中药植物中, 研究者们也发现氢可显著促进种子萌发。李嘉伟等<sup>[33]</sup> 研究表明 HRW 浸种可提升蔬菜种子的发芽势和发芽率, 但不同蔬菜适宜的 HRW 浓度有差异。其中, 冬瓜种子在  $0.25 \text{ mmol/L}$  HRW 浸种下发芽最优, 发芽势和发芽率分别为  $92.3\%$  和  $98.7\%$ 。过高浓度的 HRW 不利于种子发芽, 叶菜萌发试验表明 HRW 浓度超过  $0.4 \text{ mmol/L}$  抑制种子发芽。Huang 等<sup>[38-39]</sup> 研究了氢可能通过促进海藻糖 (Trehalose, Tre) 的合成来促进黄瓜种子萌发。氢可通过调控海藻糖含量来提高水溶性碳水化合物、葡萄糖和蔗糖的含量。HRW 和

Tre 可显著上调海藻唑啉 (Tre 抑制剂) 抑制的淀粉相关基因 *AMY* 和 *BMY* 表达水平, 表明 Tre 可能在氢诱导的种子萌发中起关键作用。在中药植物中, 丁芳芳等<sup>[31]</sup> 采用饱和 HRW 稀释制得不同浓度 HRW, 研究表明 HRW 浸种时间和浓度是影响当归种子发芽的关键影响指数,  $10\%$  HRW 即可显著提升当归种子发芽势和发芽率。

综上所述, HRW 和 SHSM 都可显著促进种子萌发, 氢可通过调控营养物质降解、植物内源激素等促进种子萌发。

### 3.1.2 氢对植物生长发育的作用

#### 3.1.2.1 氢对根系发育的影响

植物根系发育对于植物接触土壤环境、吸收水分和养分有着重要的作用, 研究表明氢可促进植物根系发育, 包括对植物的侧根和不定根的发育均具有显著的积极作用。

李嘉伟等<sup>[33,40]</sup> 探究 HRW 灌溉对苦瓜、冬瓜、黄瓜、番茄和菜心 5 种蔬菜种子的根系发育影响, 并对根长度、直径、体积和表面积作统计。结果表明, HRW 对冬瓜、黄瓜、番茄和菜心的根系发育具有促进作用, 但对苦瓜种子根系生长影响甚微。HRW 对黄瓜根鲜重提升达到  $100 \text{ g}$  物质中氢质量为  $28.6$ 。Hou 等<sup>[19]</sup> 研究发现 HRW 处理显著提升百合鳞茎生长发育, 与对照相比,  $1\%$ 、 $10\%$ 、 $50\%$  和  $100\%$  HRW 处理的根数量分别增加了  $23.57\%$ 、 $73.61\%$ 、 $47.13\%$  和

285%, 而鳞片数量分别增加了 7.18%、21.46%、46.52% 和 53.59%。Zeng 等<sup>[41]</sup> 研究结果证实氢对中药材五指毛桃 (*Ficus hirta Vahl*) 的根系发育也具有积极作用。此外, 氢对大麦、水稻、玉米等禾谷类植物的根系发育也具有显著促进作用<sup>[13,32,35,42]</sup>。

Wang 等<sup>[43]</sup> 研究纳米释氢材料氮硼烷@SiO<sub>2</sub> (AB@hSMN) 对番茄、水稻、萝卜、黄瓜等侧根发育的影响。侧根密度和长度研究结果表明, AB@hSMN 比 50% HRW 更能促进侧根生长, 这可归因于 AB@hSMN 的缓释氢作用。Liu 等<sup>[13]</sup> 通过基因组学研究表明氢上调 *CrHYD1* 基因表达诱导产生内源 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 其作为下游信号分子调节生长素和细胞周期基因表达来促进侧根发育。

此外, 研究发现氢对植物不定根的发育也起到积极影响<sup>[17,44-48]</sup>。Zhu 等<sup>[48-50]</sup> 深入研究氢对黄瓜不定根发育的作用机制。研究结果显示, HRW 可上调 NO 合成酶和硝酸还原酶的基因表达, 从而提升植物体内 NO 含量, 通过 NO 途径介导调节不定根发育。Huang 等<sup>[44]</sup> 的研究结果表明, 乙烯是氢调节黄瓜不定根的下流信号分子。Zhu 等<sup>[47]</sup> 的研究结果则表明, 氢通过增加相对含水量、代谢成分和生根相关酶(如过氧化物酶、多酚氧化酶和吡啶乙酸氧化酶)活性, 同时保持细胞膜的完整性, 可促进万寿菊不定根的发育。而 Huang 等<sup>[44]</sup> 通过蛋白组学研究表明, 氢可调节光合作用蛋白、氧代谢蛋白、氨基酸代谢蛋白、应激反应蛋白等相关基因表达, 从而显著促进植物的根系发育。

综上, 氢可通过调节内源 NO、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、乙烯水平以及各类酶活性等促进农作物的根系生长。一些中草药的根系通常具有独特的药用价值, 氢应用于中药材栽培具有重要的经济价值, 将是未来的重要研究方向之一。

### 3.1.2.2 氢对植物叶片发育的影响

叶片是植物进行光合作用、制造养料、进行气体交换和水分蒸腾的重要器官。叶片性状是影响感官、营养和整体价值的关键因素。国内外研究者们发现, 氢对叶片的鲜重、叶面积等表现性状有重要影响。同时, 氢可调控叶绿素含量、气孔导度、光化学电子传递速率等, 从而影响叶片的光合作用和

蒸腾作用。

李嘉炜等<sup>[33,40]</sup> 发现 0.3~0.4 mmol/L 的 HRW 会促进叶片生长, 可使番茄叶鲜重达到 100 g 物质中氢质量提升 50。同时对菜心、番茄、黄瓜、冬瓜、苦瓜 5 种蔬菜进行对比研究, 结果表明叶鲜重和叶面积都随 HRW 浓度的增加呈现先增加后降低的趋势, HRW 浓度在 0.25~0.35 mmol/L 时效果最佳。宋韵琼等<sup>[51]</sup> 对 HRW 的施用方式进行对比研究, 相较于单独浸种或喷施, 10% HRW 浸种+50% HRW 喷施对青菜总叶数、最大叶长×叶宽、鲜重的促进作用最明显: 总叶数提升 18.75%, 最大叶长×叶宽提升 46.71%, 鲜重增加达 79.74%。此外, 氢对禾谷类植物水稻、花卉类小苍兰以及草莓等水果叶片的生长发育也具有积极效用<sup>[9,52-53]</sup>。刘丰娇等<sup>[9,54]</sup> 的研究表明, 氢处理可提高叶绿素含量, 并且增加气孔导度, 提升光化学效率, 从而影响到叶片的光合作用, 增加叶片的干重。但值得注意的是, 氢对不同植物的光合作用调控机制有差异。研究结果显示, 对于黄瓜和玉米, 氢改善光合作用的机制是提高光系统 II 的光化学效率, 而草莓对应的机制则是提高光系统 I 的光化学效率<sup>[9,54-55]</sup>。

### 3.1.2.3 氢对农产品产量的影响

产量是农产品生产的重要评价指标。研究结果显示氢对提高蔬菜、禾谷类植物、中药材等的产量都具有显著的促进作用<sup>[30,51,56-59]</sup>。

杨瑞怡等<sup>[58]</sup> 通过测定不同浓度 HRW 处理的叶菜产量发现, 0.8 mg/L 和 0.4 mg/L HRW 处理均能提高小白菜、苋菜、芥菜、木耳菜产量, 且 0.8 mg/L HRW 处理的增产效果更加明显。在 0.8 mg/L 氢浓度下, 不同叶菜产量的影响效果排序为: 木耳菜>芥菜>苋菜>小白菜, 其中木耳菜产量提高 12.62%, 小白菜产量提高 9.47%。赵懿颖等<sup>[30]</sup> 研究发现, 50% HRW 处理可以明显提升番茄的坐果能力, 达到 53.49%, 而产量则增加~1 倍。而李湘妮等<sup>[11]</sup> 探究 HRW 处理高盐胁迫下岩棉培樱桃番茄的产量, 其单果重和产量分别增加了 19.2% 和 6.02%。Cheng 等<sup>[56]</sup> 以氢纳米气泡水施用水稻, 氢显著提高糙米/粗米和白米的长度、宽度、厚度和千粒重, 如图 3 所示。转录谱分析结果显示, 高产相关的代表

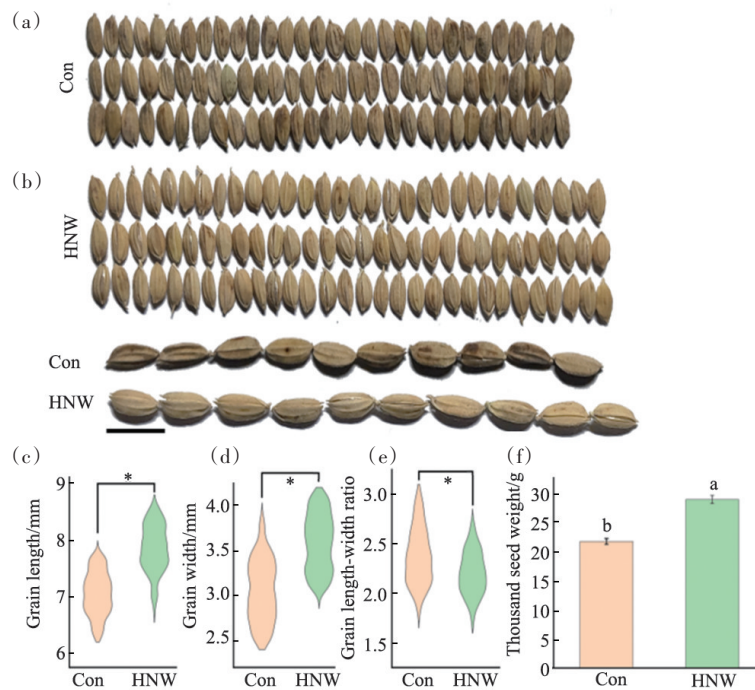


图3 H<sub>2</sub>提高糙米/粗米和白米的30粒(a)与10粒对比(b);长度(c)、宽度(d)、厚度(e)和千粒重(f)

性基因细胞增殖——异源三聚体G蛋白β亚基因(*RGB1*)、粒宽基因(*GS5*)、粒长宽基因(*SMG1*)和粒重基因(*GW8*)上调表达,与表型结果相符。

#### 3.1.2.4 氢对农产品营养品质的影响

近年来,大量研究关注氢对农产品营养品质的作用,本节将分别综述氢对禾谷类、蔬果类、中药材类作物产品营养品质的生理作用。

水稻作为禾谷类主要作物,是当今世界最重要的粮食作物之一,科学家深入研究氢对水稻生长发育的影响规律及作用机制,探究氢对稻米营养品质的影响。Cheng等<sup>[56]</sup>发现HRW灌溉降低蛋白质和直链淀粉含量,但总淀粉含量无明显变化。同时,部分矿质元素P、K、Mg、Fe含量提升。更重要的是,白米Cd积累量显著降低,达到对照组的52%。这一现象与Cd进入植株的转运基因的差异表达有关,包括下调巨噬细胞蛋白(*Nramp5*)、重金属转运ATP酶(*HMA2*和*HMA3*)和铁调节转运蛋白(*IRT1*)的基因表达。此研究结果显示,氢可作为提高稻米品质的高效媒介。此外,Zhu等<sup>[60]</sup>研究表明,HRW处理生长的发芽糙米后硫胺素、K、P、Mn和Fe等营

养物质含量增加,且麸皮层中不溶性膳食纤维含量降低,可溶性膳食纤维水平提高,极大地提高了糙米的口感和风味。杨丽等<sup>[34]</sup>也利用HRW对糙米再加工为发芽糙米,发现氢能提高糙米发芽率,并且营养物质黄酮的含量明显增加。此外,Guan等<sup>[35]</sup>研究HRW对黑麦营养物质的生理作用。研究表明,HRW处理黑麦种子后,主成分与对照组存在显著差别,部分多酚营养成分(包括游离香草酸、香豆酸、辛酸;共轭香草酸、丁香酸和辛酸)浓度提高,并且Ca、Fe等矿物质含量提升。

蔬菜中含有丰富的有益人体健康的物质,如多酚、抗坏血酸和维生素等。氢对蔬菜生长发育和品质也有重要影响。宋韵琼等<sup>[51]</sup>以华耘青1号青梗菜作为试验对象,对比分析HRW对青梗菜的可溶性糖、纤维素和维生素C(vitamin C,VC)含量的影响。研究表明,HRW处理后的青梗菜鲜重、干重显著增加,并且青梗菜的可溶性糖/蛋白和VC含量升高,而纤维素含量降低。本课题组生菜种植研究结果也表明,MgH<sub>2</sub>可显著促进生菜种子萌发和生长,并且显著提升生菜体内可溶性糖、可溶性蛋白、VC等

营养物质的含量<sup>[61]</sup>。花青苷是一种重要的多酚类化合物,是植物颜色的来源,并保护植物应对外来的生物和非生物胁迫。尤其,花青苷可作为抗氧化剂保护人体对抗心血管疾病、癌症和其他慢性疾病。Zhang等<sup>[62]</sup>研究发现,在紫外光下,氢可通过提高花青苷合成酶含量来促进花青苷的合成,并提升植物自由基消除能力。而Xie等<sup>[63]</sup>研究表明,紫花苜蓿中的40种黄酮化合物,HRW处理可提升其中22种黄酮化合物的含量,其中异黄酮和黄烷酮类(isoflavone/flavanone)的提升效果最明显。

水果是中国继粮食、蔬菜之后的第3大农业种植产业。研究结果表明氢可显著提升水果的营养和感官品质<sup>[11,23]</sup>。李湘妮等<sup>[11]</sup>的研究结果表明HRW灌溉处理的樱桃番茄果实蛋白质含量提高25.81%,VC、总糖含量、糖酸比也明显高于对照组,而硝酸盐含量下降2.48%,说明生长期氢处理可明显提高樱桃番茄果实的营养品质。挥发性有机组分、有机酸和糖类是影响水果香气、风味的主要成分。Li等<sup>[23]</sup>研究表明采前HNW处理草莓(*Fragaria×ananassa* Duch.)显著提升了其感官品质,这归因于氢处理提高了酯类、酸类和可溶性糖等风味相关化学物质的含量。进一步的转录组学分析结果表明,氢可一定程度上调香气相关基因,包括*FaL-OX*、*FaADH*、*FaAAT*、*FaQR*、*FaOMT*和*FaNES1*<sup>[23]</sup>。

中药材是中华之瑰宝,氢对中药材品质提升也有积极作用。党参是中国常用的补益药材,多糖物质含量高,对免疫系统具有调节作用。利用HRW栽培党参,多糖含量最高可达36.45%(对照组为28.33%)<sup>[64]</sup>。Zeng等<sup>[41]</sup>利用代谢组学和转录组学揭示氢显著提升五指毛桃药用品质的生理机制,发现氢可调控五指毛桃主要药用活性成分的生物合成、次生代谢和相关基因表达,包括苯丙烷类化合物、佛手酚、橙皮苷、苯丙呋喃等。

综上所述,氢对农产品营养物质的提升效应具有广谱性。对禾谷类、蔬果类、中药材等植物的生长发育均具有积极作用,并可显著促进糖类、蛋白质、多酚、有机酸等营养物质的生成。但是,因不同植物的营养物质差异性,氢对不同植物生长和营养品质的影响规律和生理机制尚不完善、清晰,还需

要进一步探究。

### 3.1.3 氢提高植物抗逆性的影响

植物生长过程中会受到不利环境的影响,国内外学者广泛开展氢对植物逆境适应性的研究,包括干旱<sup>[10,32,65]</sup>、高土壤盐分<sup>[42,66-73]</sup>、重金属污染<sup>[55,74-82]</sup>、药/病害<sup>[83-86]</sup>、过温<sup>[57,87-95]</sup>等。

氢可通过调节Na<sup>+</sup>转运、光合作用、渗透平衡、抗氧化等作用,明显提升植物的抗盐性能力。在水稻植株中,HRW处理对于物质含量、相对含水量、叶绿素含量、电解率外渗(EL)及抗氧化酶活性都具有显著影响<sup>[66,69,73]</sup>。研究表明,HRW处理显著增加盐胁迫条件下细胞的持水能力,提高叶片的叶绿素含量,降低EL值。同时,盐胁迫下,HRW处理显著降低ROS含量和脂质过氧化损伤,增加细胞膜稳定性,提升过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbic peroxidase, APX)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、单氢抗坏血酸还原酶(monodehydroascorbate reductase, MR)等抗氧化酶活性,并调控其基因表达水平<sup>[66,68,73]</sup>。而Yu等<sup>[70]</sup>的研究表明HRW能显著提升黄瓜在盐胁迫下的根系活力。机理分析结果表明,H<sub>2</sub>通过促进*SOS2*和*NHX1*基因表达提升Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup>的逆向转运,降低Na<sup>+</sup>的细胞毒性。田婧芸等<sup>[42]</sup>在玉米的抗盐性研究中发现HRW处理能提高质子膜H<sup>+</sup>-ATPase和Ca<sup>2+</sup>-ATPase、液泡膜H<sup>+</sup>-ATPase和H<sup>+</sup>-PPase的活性,H<sup>+</sup>跨膜梯度变大,增加细胞质中的Na<sup>+</sup>向液泡转运速率,降低过量Na<sup>+</sup>对细胞器的伤害。

氢对植物抗干旱作用主要表现在渗透调节、抗氧化损伤和叶片气孔调节等3方面。宋瑞娇等<sup>[32]</sup>研究发现不同浓度HRW均能显著提高大麦种子中可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸的含量,调节渗透平衡,抑制细胞脱水/死亡。其中,25%和50%HRW提升效果最佳,可溶性糖含量分别可达对照组的1.36与1.31倍。Xie等<sup>[96]</sup>发现外源施加HRW可减少气孔开度而协助抵抗干旱。这归因于氢可增加NO含量,NO介导K<sup>+</sup>通过*GORK*通道从细胞质向细胞外释放,降低气孔开度。Song等<sup>[97]</sup>研究表明,HRW除了能提高还原性糖含量、显著降低膜损

伤和提升抗氧化酶活性外,氢还可不同程度地提高抗坏血酸盐(ascorbate, AsA)和谷胱甘肽(glutathione, GSH)含量,通过调节AsA-GSH循环重建氧化还原平衡减轻干旱诱导的损害。最新日本大阪大学/孟加拉拉杰沙希大学联合研究表明,干旱胁迫下氢不仅可以降低氧化损伤,还可触发小麦耐旱型*Dreb1*基因表达上调,比对照组提升90%<sup>[12]</sup>。

氢可缓解Cd、Cu、Al、Hg对植物生长的抑制作用,并有效降低Cd元素在植物中的富集。Cui等<sup>[74-75]</sup>研究结果表明,HRW处理可通过重建GSH稳态而有效减少紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对Cd、Hg的吸收,抑制ROS的产生,减轻Cd、Hg诱导的氧化应激。Cd污染的紫花苜蓿幼苗SOD、POD和APX活性分别降低了36.1、24.3和28.3%;相比较,HRW处理后,SOD、POD和APX的活性显著提升,分别增加了60.2%、25.1%和25.5%。并且,HRW可同时提高GSH、高型谷胱甘肽和AsA水平,增加幼苗对重金属毒害的防御能力。Wu等<sup>[98]</sup>和Ren等<sup>[99]</sup>的研究结果也表明,氢可通过调控GSH稳态来增强油菜/灵芝抗Cd毒害能力。此外,HRW可通过抑制白菜中主要的镉转运蛋白*BcIRT1*、*BcZIP2*的基

因表达来有效地降低白菜对Cd吸收的功能<sup>[80-81]</sup>,其中*BcIRT1*蛋白由*BcRbohD*基因调控。并且,HRW还可影响Cd胁迫下Zn<sup>2+</sup>和Cd<sup>2+</sup>之间的竞争力。添加Zn<sup>2+</sup>时,37% HRW预处理显著降低了Cd<sup>2+</sup>的流速。这表明HRW处理后,更多的Zn<sup>2+</sup>被转运蛋白吸收,从而降低了对Cd<sup>2+</sup>的吸收。近年来,He等<sup>[71]</sup>尝试用固态储氢材料MgH<sub>2</sub>来研究氢对Cu的胁迫作用,研究表明MgH<sub>2</sub>可以通过增强苜蓿幼苗根系内源NO信号来增加非蛋白硫醇含量以及重建植物氧化还原平衡,显著降低幼苗根细胞壁中Cu的积累,增强苜蓿Cu的耐受性(图4)。MgH<sub>2</sub>的最佳施用浓度为0.4 mmol/L。

药害和病毒/菌也是影响植物生长发育的重要因素。已有的研究表明,氢可提升植物的抗病/药害能力。水稻条纹病毒(rice stripe virus, RSV)是水稻中最具破坏性的植物病毒之一,会造成严重的田间生产损失。Shao等<sup>[84]</sup>的研究表明,氢可通过调控水杨酸信号来增强植物对RSV感染的抗性。Gu等<sup>[4]</sup>研究HRW对于减轻双草醚对水稻药害的影响机制。75% HRW处理后,与双草醚处理组对照,籼稻的植株高度和鲜重分别提升12%和22%,说明

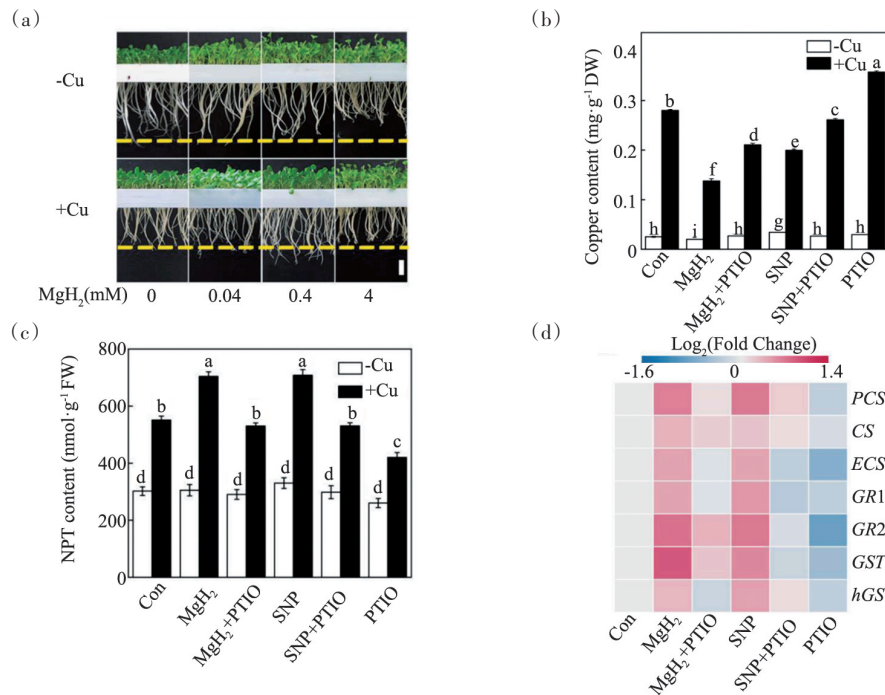


图4 MgH<sub>2</sub>浓度对根系发育的影响(a)以及铜含量(b)对比(PTIO为NO抑制剂,SNP为NO供剂);非蛋白巯基化合物(NPT)对比图(c)以及相关的基因表达(d)

HRW 能有效降低双草醚的药害影响。这主要是由于氢不仅能提高抗氧化酶(包括 CAT、SOD、POD)的活性,有效降低 ROS 含量,而且还可减轻双草醚对乙酰乳酸酯的抑制作用,加速双草醚降解。Wang 等<sup>[85]</sup>的研究则显示,氢可促进白菜、黄瓜、萝卜、苜蓿、水稻和油菜植物中的百菌清降解,说明氢对植物体内农药的降解也具有广谱性。

综上所述,氢可显著提升植物抗逆性。氢提升植物抗逆性主要体现在提升抗氧化酶活性、降低活性氧 ROS 含量、调节植物内源激素水平和保持细胞结构等,如图 5 所示。目前针对氢调控植物抗逆性机理,虽然国内外学者已做了大量研究工作,但是针对不同植物、不同生长阶段/过程的抗逆性调控机制研究还有待深入。

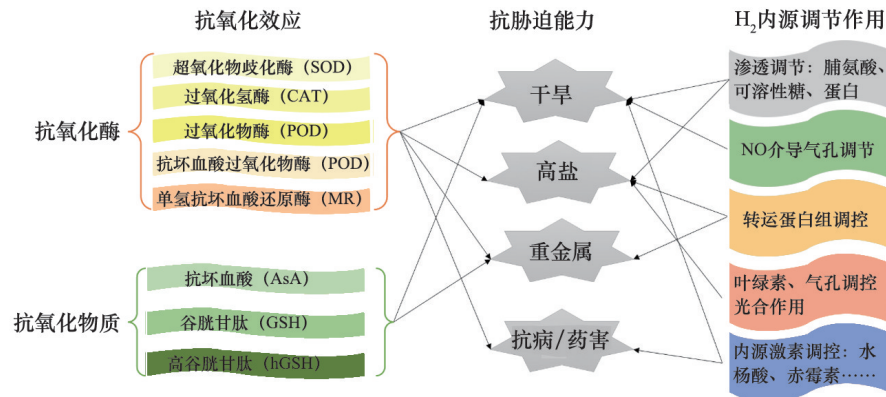


图 5 氢对提升植物抗逆性的调控机制

### 3.1.4 氢对农产品保鲜的作用

氢的抗氧化作用可明显减弱农产品的氧化胁迫<sup>[4,100-102]</sup>,国内外学者们对氢在农产品保鲜中的生理作用开展了广泛的研究,包括花卉、蔬果、鸡蛋、海产品等。

鲜切花保鲜研究显示,氢对香石竹、康乃馨、小苍兰、百合、玫瑰都具有显著的保鲜效用。蔡敏等<sup>[103]</sup>研究 HRW 对香石竹切花的保鲜作用,研究结果表明 10% HRW 即可延长切花的寿命。甘肃农业大学廖伟彪教授研究团队<sup>[104-105]</sup>的研究结果表明,通过 1% HRW 处理,花瓣的丙二醛含量及相对

电导率相对于对照组显著降低。氢可通过缓解叶绿素的分解和细胞膜的损伤,降低气孔大小和氧化损伤,维持水分平衡和膜稳定性,提高切花百合的瓶插寿命和品质。而宋韵琼等<sup>[106]</sup>发现,HRW 处理小苍兰切花,其盛花期和萎蔫期 SOD 活性显著增加,而萎蔫期 CAT 和 APX 显著增加,HRW 处理提高了细胞的抗氧化能力,从而延长小苍兰切花的瓶插寿命。此外,南京农业大学的沈文飙团队和上海交通大学氢科学中心研究团队联合开发 MgH<sub>2</sub> 作为固态氢源促进切花保鲜(图 6)<sup>[112,27-28]</sup>,研究结果表明 NO 和 H<sub>2</sub>S 是 H<sub>2</sub> 的下游信号分子。氢调控部分消除

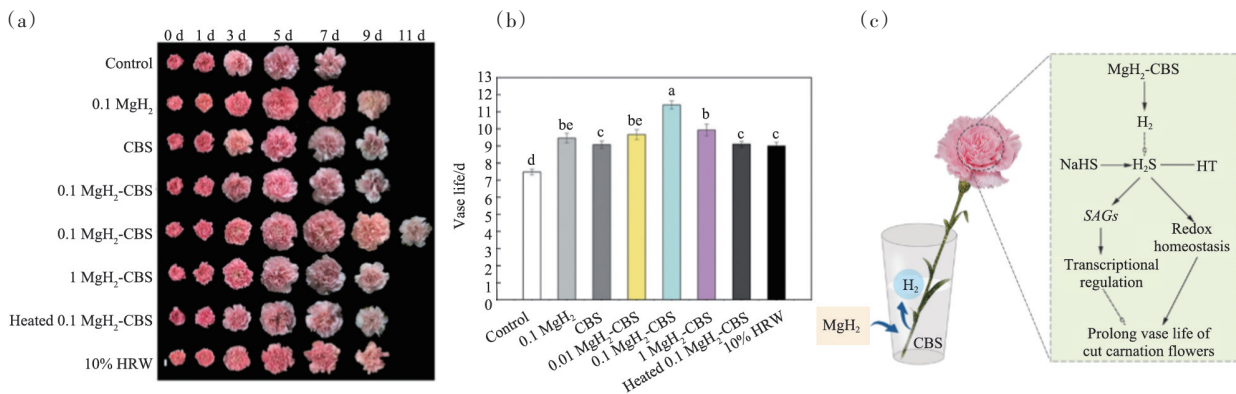


图 6 不同处理下的康乃馨花瓶期照片(CBS:柠檬酸)(a)和对比(b);MgH<sub>2</sub>提升康乃馨的机理示意(c)

衰老相关基因 *DcbGal* 和 *DcGST1* 的转录, 延长玫瑰和康乃馨的瓶插寿命。

在蔬果保鲜研究中, 发现氢对小白菜、黄花菜、番茄、猕猴桃、小葱、秋葵以及菱角等均具有明显保鲜效果<sup>[57,87,89,107-112]</sup>。Dong 等<sup>[110]</sup>研究氢对秋葵保鲜期的影响, 研究表明, 在贮藏前期, HRW 处理通过上调果胶、半纤维素和纤维素的生物合成基因, 维持细胞壁的生物合成; 在贮藏末期, 氢下调 *AePME*、*AeGAL* 和 *AeCX* 等多种细胞壁降解基因抑制细胞壁的分解, 从而有效提升秋葵的贮藏期。Zhao 等<sup>[108]</sup>研究发现氢可增强抗氧化性来减轻木质素化, 从而增强猕猴桃的耐冷性。在菱角的保鲜中, Li 等<sup>[109]</sup>观测 4℃ 储存条件下菱角的颜色变化, 研究表明 HRW 可以明显延缓菱角的发黄。9 d 时, HRW 处理组开始变黄, 而对照组已经明显变黄; 进一步研究表明 HRW 处理降低  $H_2O_2$  和脂氧化酶含量, 提升 SOD 含量。Wang 等<sup>[113]</sup>研究氢气含量为 0.5% 和 3%  $H_2$ -Air 混合气对农产品鸡蛋储存效果的影响。25 天货架期后, 对照组鸡蛋蛋黄完全散开, 而 3%  $H_2$ -Air 混合气处理组只有 20% 的鸡蛋蛋黄散开, 说明  $H_2$  可大大延长鸡蛋的货架期。对其蛋壳进行结构分析, 发现氢可延缓蛋壳表面裂纹的形成, 从而防止鸡蛋中微生物的生长, 起到延长鸡蛋保质期的作用。Wang 等<sup>[113]</sup>还分析氢保鲜鸡蛋的经济性, 采用  $H_2$ -Air 混合气保存鸡蛋成本仅增加 0.00074%~0.0028%, 经济效益显著。

此外, 氢对虾干、黄油等加工产品的保鲜也具有明显效果。土耳其厄德尔大学氢气生物学研究中心研究 HRW 和固态 Mg 供氢对黄油的保鲜作用<sup>[114-115]</sup>。研究结果表明, 氢可有效降低黄油中的生物胺和酸度值, 利于黄油的保存。而在海产品虾干的保存研究中发现<sup>[116]</sup>, 氢可缓解虾干感官品质的变化和脂质氧化, 其作用可能与调节嘌呤代谢有关。

总的来说, 氢可通过降低氧化损伤程度, 维持细胞壁完整性以及降低有害物质的积累来促进鲜切花/蔬果/加工产品的保鲜, 对农产品的保鲜作用具有广谱性。从便捷性和长效性来看, 采用固态储氢材料长效缓释  $H_2$  来开发保鲜剂, 是一个具有应用发展潜力的领域。

### 3.1.5 氢对植物生物学效应机制

经过大量文献调研分析, 氢对植物生物学效应机制可总结为两大理论方向, 分别为抗氧化机制和生理因子调节机制, 下文分别进行论述。

#### 3.1.5.1 抗氧化机制

植物体内累积超量活性氧会造成过氧化作用, 造成细胞损伤, 甚至导致细胞死亡<sup>[73]</sup>。氢的抗氧化生理机制对于植物对抗环境胁迫、植物保鲜具有非常重要的作用, 其生理作用机制具体如下。

1) 氢上调抗氧化酶基因 (*OsFeSOD*、*OsMnSOD*、*OsCu/ZnSOD*、*OsCAT-A*、*OsCATB*、*OsAPX* 和 *OsGPX* 等) 表达<sup>[37,117-118]</sup>, 提升抗氧化酶 (SOD、POD、CAT、APX 等) 活性, 清除植株体内的 ROS 含量, 包括  $O_2^{\cdot-}$ 、 $\cdot OH$  等, 提高细胞的抗氧化能力, 提升植物遭受过温、干旱、盐、重金属、药害等胁迫的抗逆能力。

2) 氢可调控脱氢抗坏血酸还原酶、单脱氢抗坏血酸还原酶和谷胱甘肽还原酶的活性来提升谷胱甘肽/氧化谷胱甘肽和抗坏血酸盐/脱氢抗坏血酸的抗氧化物质比例<sup>[74-75,98-99]</sup>, 重建氧化-还原平衡从而对抗氧化伤害。

3) 氢的抗氧化作用可减轻膜脂质过氧化伤害, 降低丙二醛积累量, 维持根尖细胞及细胞核的完整性<sup>[69,82]</sup>。

#### 3.1.5.2 生理因子调节机制

受植物物种、生长阶段和环境影响, 氢对各种植物的根系、萌发、营养的控制生理因子 (包括酶活性、激素、基因调控等) 既有共性也具有差异性。

1) 在植物萌发过程中, 氢调控 NO 合成酶/硝酸还原酶的基因表达和酶活性来诱导 NO 信号分子, 以及调控乙烯/ $H_2O_2$  等信号分子水平, 促进根系发育<sup>[44,48-50]</sup>; 同时上调淀粉酶 *AMY* 和 *BMV* 基因表达, 提高  $\alpha$ - $\beta$ -淀粉酶活性促进淀粉的降解, 为种子萌发提供营养物质<sup>[38-39]</sup>。

2) 在植物生长过程中, 氢显著提高叶绿素含量和叶面积, 增加光合产物的积累, 通过提升核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶活性提升碳同化能力, 增加光能的吸收和利用, 促进植株生长<sup>[9,54]</sup>。同时, 氢提升氮代谢相关酶的活性, 促进植物根系从土壤吸收和利用  $NO_3^-$ -N 和  $NH_4^+$ -N 等氮素<sup>[54]</sup>。

3) 在多种复杂环境中,氢可调控内源植物激素合成和分解基因表达,调节赤霉素、吲哚乙酸、脱落酸、生长素、水杨酸等的平衡来促进植物的生长和抗逆性<sup>[117,119]</sup>。并且,氢可调控游离脯氨酸、丙二醛含量来维持细胞膜的完整性<sup>[16]</sup>。多项研究表明氢直接/间接影响冷耐受 *miR319* 转录及其靶向 *PCF5* 和 *PCF8* 基因表达、耐 Al 胁迫 *OsSTAR1*、*OsS-TAR2* 和 *OsFRDL4* 基因表达、抗干旱 *Dreb1* 基因表达等,从而提升植物的抗胁迫能力<sup>[12,37,92]</sup>。

4) 氢可调控氢化酶 *OsHydA1*、*OsFhdB* 和 *OsHypB* 基因表达,提升植物体内源  $H_2$  的产生<sup>[120]</sup>,进而影响植物激素,提升植物的抗逆性。

### 3.2 氢在养殖业中的研究进展

由于抗氧化、抗炎症、抗细胞凋亡等生物学效应,氢也被科学家尝试应用于养殖业<sup>[121-122]</sup>。

南京农业大学姚文和郑卫江课题组系统研究了氢对仔猪的生长发育、肝脾卵巢、肠道等器官的影响,以及氢对霉变饲料胁迫与病菌感染的缓解作用<sup>[121,123-127]</sup>。研究表明,HRW 可以在一定程度上缓解镰刀菌毒素对断奶仔猪的血液以及肝脏、脾脏等器官产生的不利影响。并且,研究发现 HRW 能降低结肠和盲肠消化道腹泻率。对山羊喂食含镁氢的饲料,研究发现镁/氢会影响山羊瘤胃的发酵途径和微生物群<sup>[128-129]</sup>。 $Mg^{2+}$  浓度过高 ( $>5.5$  mmol/L) 会抑制瘤胃发酵,并且氢浓度升高会促进丙酸盐产生而改变发酵途径,增加瘤胃的甲烷生成。微生物群落分析表明氢浓度升高减少真菌数量,增加甲烷菌数量,一定程度上改变微生物群。以上研究结果提示,氢以及载氢的镁均具有显著的生物学效应,在采用镁或者  $MgH_2$  产氢材料供氢时,不仅要关注氢的浓度,还需要特别关注  $Mg^{2+}$  带来的生物学效应。

Zhang 等<sup>[122]</sup>研究氢缓解蛋鸡热应激的生理作用及调控机理。研究结果表明氢通过提高空肠绒毛长度、隐窝深度和抗氧化活性,缓解蛋鸡长期慢性热应激的副作用,且显著提高产蛋能力。此项研究表明氢是一种潜在缓解蛋鸡热应激的媒介。

佛山鲲鹏现代农业研究院近年来研究氢对水产养殖的作用<sup>[130-131]</sup>,结果表明鱼池中通入 0.6~1 mg/L 氢气养殖,与常规养殖方式相比,加州鲈鱼和

乌鳢仔鱼的体重增加 5%~15%,成活率提高 5%~10%,表明氢用于水产养殖业也具有较好的前景。

基于氢的抗氧化作用和生长因子调节作用,氢应用于畜牧禽养殖和水产品养殖业具有发展前景。但目前氢应用于养殖业尚处于起步阶段,其关键高效氢供体、标准、表观性状、生理作用、胁迫应激和调控机制都尚需开展系统而深入的研究。氢应用于养殖业是未来极具发展潜力的方向之一。气态用氢或者液态用氢应用于畜牧业和水产品养殖适用性不强,特别是对江河湖海大面积养殖,实际操作困难,通过固态产氢材料作为饲料添加剂进行缓释产氢,经济性和可操作性大大提升,但同时需要注意产氢材料带来附加的生物学效应。

## 4 结论

氢由于具有抗氧化、调节生理因子等生物学效应,对于促进植物种子萌发、植物生长发育、植物抗逆性、农产品保鲜以及增强养殖业产品产量和品质等方面具有积极作用。“氢农业”是极具发展潜力的绿色、环保、可持续的新型农业方向。图 7 总结了氢农业的研究现状及未来发展趋势。

从氢的应用形态看,气态用氢、液态用氢、固态用氢 3 种方式均有研究。目前电解水制备 HRW 是利用氢的常用方法,但是氢气易从水中逃逸,不易保存,且浓度难控制,尤其是应用于畜牧业和水产品养殖业中的操作性相对较低。高密度储氢材料具有操作性强、可控缓释氢的显著优势,是未来氢农业发展的重点方向之一。但是,储氢材料可能存在易潮解/分解等保存问题。如  $MgH_2$  储氢材料极易潮解放氢,此外还需要关注储氢载体如  $Mg^{2+}$  带来的生物学效应。未来,基于动/植物生长规律,针对不同生长期、不同地域的气候、土壤性质和应用场景等,气、液、固态用氢的优劣势将形成互补,构成“三氢齐放”的发展局面。

从氢的应用推广看,氢对于禾谷类植物、蔬菜瓜果、花卉、中药材的种子萌发、增产提质、产品保鲜以及畜禽养殖都具有广谱性。但目前的研究尚处于实验室试验、小规模种植/养殖生产、小范围农

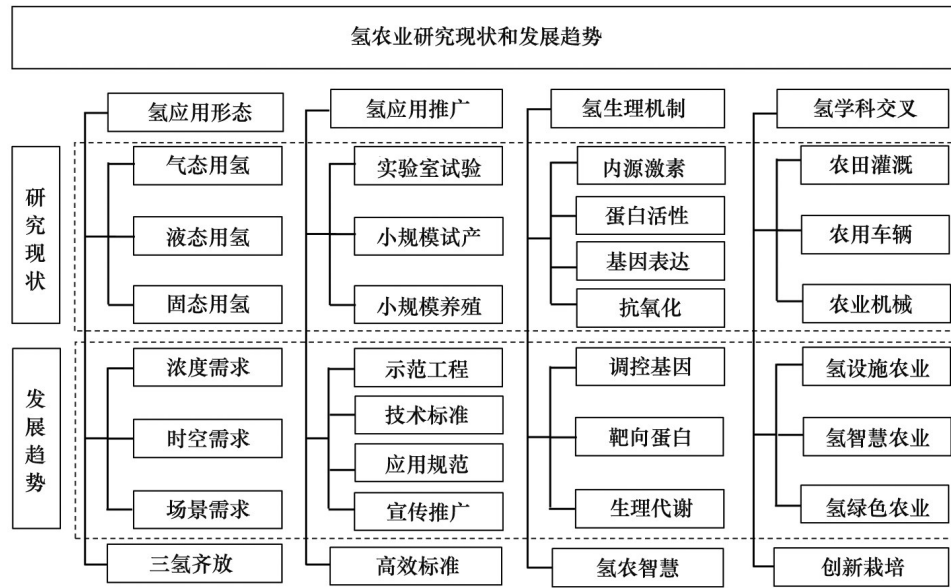


图7 氢农业的研究现状及发展趋势

业示范的阶段。未来,氢农业应用推广应建立氢农业的规模化示范工程,加强对氢农业的技术标准和种植/养殖生产的规范研究,打造高效标准的氢农业生产模式。同时,加强氢农业的市场宣传和推广,提高公众对氢农业的认知度和接受度也是未来工作重点之一。

从氢的生理机制看,氢可调节植物的抗氧化能力、内源激素/信号分子分泌、酶/蛋白合成和基因表达,但目前的研究尚不够深入系统。未来应结合代谢组学、蛋白质组学和基因表达分析等先进生物鉴定和分析技术,针对不同环境、物种与生长阶段进行深入系统研究,完善关键基因表达—靶向蛋白作用—生理代谢变化等氢对生物的调控机理,建立完备的氢生物应用机制体系——“氢农智慧”,为氢农业发展提供理论指导。

随着氢能源技术的不断进步,多学科交叉的深度融合,氢在农业领域的应用也将不断深入和扩大。目前,氢在农业中的应用主要在农田灌溉、农用车辆、农业机械等方面的研究。未来,可将氢应用于温室种植、设施农业等领域,建立氢设施农业;结合大数据和人工智能精准供氢/水/肥,提高农业生产效率和品质,打造氢智慧农业。并且,氢农业具有减少化学农药和化肥使用、降低温室气体排放的特点,将成为推动可持续农业发展的重要力量,

可与生态农业、有机农业等相结合,构建氢绿色农业,进一步推动农业的绿色发展。

综上所述,氢农业未来发展方向将围绕核心技术研发、应用范围扩大、生理机制完善、环保与可持续发展等方面展开。氢农业的发展有望助力中国农业的绿色可持续发展。

## 参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] Wang R Y, Yang X J, Chen X F, et al. A critical review for hydrogen application in agriculture: Recent advances and perspectives[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2024, 54(3): 222-238.
- [3] Li L N, Lou W, Kong L S, et al. Hydrogen commonly applicable from medicine to agriculture: From molecular mechanisms to the field[J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2021, 27(5): 747-759.
- [4] Gu T, Wang Y X, Cao J J, et al. Hydrogen-rich water pretreatment alleviates the phytotoxicity of bispyribac-sodium to rice by increasing the activity of antioxidant enzymes and enhancing herbicide degradation[J]. *Agronomy-Basel*, 2022, 12(11): 2821-2833.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 张毅华, 陆铎, 赵海懿, 等. 氯化镁调控的绿豆渗透耐性与一氧化氮介导的脯氨酸代谢有关[J]. 植物生理学报, 2023, 59(10): 1964–1974.
- [8] 宋雯佩, 窦婧晗, 郑艳梅, 等. 富氢水3种制备方法的比较研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2023, 36(4): 26–31.
- [9] 潘妮, 程雪, 沈文飏, 等. 富氢水对草莓生长发育及光合作用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(2): 278–286.
- [10] 闫梅, 姚彦东, 牟开萍, 等. 脱落酸通过提高抗氧化酶活性与基因表达参与富氢水增强番茄幼苗抗旱性[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(9): 1901–1910.
- [11] 李湘妮, 张晶, 刘诗华, 等. 富氢水岩棉培对樱桃番茄耐盐性及产量品质的影响[J]. 农业科技通讯, 2022(12): 154–158.
- [12] Islam M A, Shorna M N A, Islam S, et al. Hydrogen-rich water: A key player in boosting wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling growth and drought resilience[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 22521.
- [13] Liu F J, Wang Y Q, Zhang G H, et al. Molecular hydrogen positively influences lateral root formation by regulating hydrogen peroxide signaling[J]. Plant Science, 2022, 325: 111500.
- [14] Cheng P F, Feng L Y, Zhang S Y, et al. Ammonia borane positively regulates cold tolerance in *Brassica napus* via hydrogen sulfide signaling[J]. BMC Plant Biology, 2022, 22(1): 585.
- [15] 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.
- [16] Su J C, Zhang Y H, Nie Y, et al. Hydrogen-induced osmotic tolerance is associated with nitric oxide-mediated proline accumulation and reestablishment of redox balance in alfalfa seedlings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 147: 249–260.
- [17] Li C X, Huang D J, Wang C L, et al. NO is involved in H<sub>2</sub>-induced adventitious rooting in cucumber by regulating the expression and interaction of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase and 14-3-3[J]. Planta, 2020, 252(1): 9.
- [18] Liu X J, Fang H, Huang P P, et al. Effects of hydrogen-rich water on postharvest physiology in scales of Lanzhou lily during storage[J]. Horticulturae, 2023, 9(2): 156.
- [19] 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.
- [20] 沈文飏, 王曰桥, 程鹏飞, 等. 一种基于氢气的农作物种子质量改良方法: CN112913372A[P]. 2021–06–08.
- [21] 秦秀军, 安全, 张伟, 等. 富氢水制备及保存方法的初步研究[J]. 癌变·畸变·突变, 2013, 25(6): 457–460.
- [22] 刘彦洋, 黄国庆, 孙世操, 等. 富氢水的制备、保存及溶氢浓度检测研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49(24): 81.
- [23] Li L N, Wang J, Jiang K, et al. Preharvest application of hydrogen nanobubble water enhances strawberry flavor and consumer preferences[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131953.
- [24] 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.
- [25] Zhao G, Cheng P F, Zhang T, et al. Hydrogen-rich water prepared by ammonia borane can enhance rapeseed (*Brassica napus* L.) seedlings tolerance against salinity, drought or cadmium[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 224: 112640.
- [26] Wang Y Q, Jin S S, Liu Z Y, et al. H<sub>2</sub> supplied via ammonia borane stimulates lateral root branching via phyto-melatonin signaling[J]. Plant Physiology, 2024, 194(2): 884–901.
- [27] Li L N, Liu Y H, Wang S, et al. Magnesium hydride-mediated sustainable hydrogen supply prolongs the vase life of cut carnation flowers via hydrogen sulfide[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 595376.
- [28] Li Y, Li L N, Wang S, et al. Magnesium hydride acts as a convenient hydrogen supply to prolong the vase life of cut roses by modulating nitric oxide synthesis[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 177: 111526.
- [29] Wang P, Wu J, Yang H Y, et al. Intelligent microneedle patch with prolonged local release of hydrogen and magnesium ions for diabetic wound healing[J]. Bioactive Ma-

- terials, 2023, 24: 463–476.
- [30] 赵懿颖, 徐靖敏, 李芳, 等. 富氢水处理对番茄生长发育和产量的影响[J]. 农业与技术, 2022, 42(22): 6–9.
- [31] 丁芳芳, 程茜菲. 富氢水对当归种子发芽的影响[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(4): 63–65.
- [32] 宋瑞娇, 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.
- [33] 李嘉炜, 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.
- [34] 杨丽, 肖斌, 肖登荣, 等. 富氢水发芽糙米加工工艺及其品质研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 145–153.
- [35] 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.
- [36] 陈茹猛, 陈文奕, 陈惠萍. GA受抑下氢供体对萌发水稻种子淀粉降解的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(23): 7868–7875.
- [37] 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.
- [38] Huang P P, Li C X, Che P P, et al. Hydrogen gas enhanced seed germination by increasing trehalose biosynthesis in cucumber[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(6): 3908–3922.
- [39] Huang P P, Li C X, Liu H W, et al. Hydrogen gas improves seed germination in cucumber by regulating sugar and starch metabolisms[J]. Horticulturae, 2021, 7(11): 456.
- [40] 李嘉炜, 陈潇, 张晶, 等. 富氢水在蔬菜育苗中的应用技术研究[J]. 种子科技, 2022, 40(15): 5–8.
- [41] Zeng J Q, Yu H. Integrated metabolomic and transcriptomic analyses to understand the effects of hydrogen water on the roots of *Ficus hirta* vahl[J]. Plants, 2022, 11(5): 602.
- [42] 田婧芸, 杨利艳, 王创云, 等. 外源氢气对玉米幼苗耐盐性的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2018, 41(6): 23–30.
- [43] Wang Y Q, Lv P X, Kong L S, et al. Nanomaterial-mediated sustainable hydrogen supply induces lateral root formation via nitrate reductase-dependent nitric oxide [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 405: 126905.
- [44] Huang D J, Bian B T, Zhang M L, et al. The role and proteomic analysis of ethylene in hydrogen gas-induced adventitious rooting development in cucumber (*Cucumis sativus* L.) explants[J]. Peer J, 2020, 8: e8896.
- [45] 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.
- [46] Zhao Z X, Li C X, Liu H W, et al. The involvement of glucose in hydrogen gas-mediated adventitious rooting in cucumber[J]. Plants, 2021, 10(9): 1937.
- [47] Zhu Y C, Liao W B. The metabolic constituent and rooting-related enzymes responses of marigold explants to hydrogen gas during adventitious root development[J]. Theoretical and Experimental Plant Physiology, 2017, 29(2): 77–85.
- [48] Zhu Y C, Liao W B, Wang M, et al. Nitric oxide is required for hydrogen gas-induced adventitious root formation in cucumber[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 195: 50–58.
- [49] 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.
- [50] Zhu Y C, Liao W B. A positive role for hydrogen gas in adventitious root development[J]. Plant Signaling & Behavior, 2016, 11(6): e1187359.
- [51] 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.
- [52] Jiang Y, Ye Q Y, Ma L, et al. Regulation of growth and physiological properties of fragrant rice seedlings by hydrogen-rich water (HRW) under nitrogen-deficient conditions[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(4): 2221–2231.
- [53] 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.
- [54] 刘丰娇, 张晓伟, 李福德, 等. 黄瓜富氢水浸种对低温下幼苗光合碳同化及氮代谢的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(2): 287–300.
- [55] 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 homeosta-

- sis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 144: 369–379.
- [56] Cheng P F, Wang J, Zhao Z S, et al. Molecular hydrogen increases quantitative and qualitative traits of rice grain in field trials[J]. *Plants*, 2021, 10(11): 2331.
- [57] Hu H L, Li P X, Shen W B. Preharvest application of hydrogen-rich water not only affects daylily bud yield but also contributes to the alleviation of bud browning [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 287: 110267.
- [58] 杨瑞怡, 李强, 李湘妮, 等. 富氢气浇灌在网室叶菜栽培中的应用试验[J]. *农业工程技术*, 2019, 39(35): 29.
- [59] 丁芳芳, 王飞娟. 富氢气浇灌对当归生长性能的影响 [J]. *陕西农业科学*, 2019, 65(4): 54–56.
- [60] Zhu C, Yang L, Nie P, et al. Effects of hydrogen-rich water on the nutritional properties, volatile profile and texture of germinated brown rice[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57 (12): 7666–7680.
- [61] 梁木华, 韦一, 陈家琦, 等. 不同形态镁肥对生菜生长发育及品质的影响[J/OL]. *中国土壤与肥料*, 1–14 [2024-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20240624.1148.002.html>.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 李晓花, 杨雯雯. 富氢气处理对党参多糖的影响[J]. *中外企业家*, 2020(15): 249.
- [65] Yan M, Yao Y, Mou K P, et al. The involvement of abscisic acid in hydrogen gas-enhanced drought resistance in tomato seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292(12): 110631.
- [66] Fu X M, Ma L, Gui R F, et al. Differential response of fragrant rice cultivars to salinity and hydrogen rich water in relation to growth and antioxidative defense mechanisms[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2021, 23(11): 1203–1211.
- [67] Su J C, Yang X H, Shao Y D, et al. Molecular hydrogen-induced salinity tolerance requires melatonin signalling in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(2): 476–490.
- [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] 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.
- [70] Yu Y, Zhang H N, Xing H Y, et al. Regulation of growth and salt resistance in cucumber seedlings by hydrogen-rich water[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(1): 134–153.
- [71] Zhang J B, Huang A W, Du H M. Transcriptome analysis reveals the effects of hydrogen gas on NaCl stress in purslane roots[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 319: 112142.
- [72] 田婧芸. 富氢气对盐胁迫下玉米根系的影响[D]. 临汾: 山西师范大学, 2019.
- [73] 张韦钰, 王春勇, 杜红梅. 富氢气对草地早熟禾耐盐性的影响以及与抗氧化酶活性的关系[J]. *草地学报*, 2021, 29(7): 1436–1445.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] Dai C, Cui W T, Pan J C, et al. Proteomic analysis provides insights into the molecular bases of hydrogen gas-induced cadmium resistance in *Medicago sativa*[J]. *Journal of Proteomics*, 2017, 152: 109–120.
- [77] He J J, Cheng P F, Wang J, et al. Magnesium hydride confers copper tolerance in alfalfa via regulating nitric oxide signaling[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 231: 113197.
- [78] Ma L, Kong L L, Gui R F, et al. Application of hydrogen-rich water modulates physio-biochemical functions

- and early growth of fragrant rice under Cd and Pb stress [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(41): 58558–58569.
- [79] Su N N, Wu Q, Chen H, et al. Hydrogen gas alleviates toxic effects of cadmium in *Brassica campestris* seedlings through up-regulation of the antioxidant capacities: Possible involvement of nitric oxide[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 45–55.
- [80] Wu X, Su N N, Yue X M, et al. IRT1 and ZIP2 were involved in exogenous hydrogen-rich water-reduced cadmium accumulation in *Brassica chinensis* and *Arabidopsis thaliana*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407: 124599.
- [81] 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.
- [82] 田婧芸, 张慧洁, 陕嘉楠, 等. 富氢水处理对铜胁迫下小麦幼苗生长及其细胞结构的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(2): 193–198.
- [83] 卢慧, 伍冰倩, 王伊帆, 等. 富氢水处理对采后番茄果实灰霉病抗性的影响[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(2): 64–68.
- [84] Shao Y D, Lin F, Wang Y Q, et al. Molecular hydrogen confers resistance to rice stripe virus[J]. *Microbiology Spectrum*, 2023, 11(2): e0441722.
- [85] Wang Y Q, Zhang T, Wang J, et al. Regulation of chlorothalonil degradation by molecular hydrogen[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Pt A): 127291.
- [86] Zhang T, Wang Y Q, Zhao Z S, et al. Degradation of carbendazim by molecular hydrogen on leaf models[J]. *Plants*, 2022, 11(5): 621.
- [87] An R H, Luo S F, Zhou H S, et al. Effects of hydrogen-rich water combined with vacuum precooling on the senescence and antioxidant capacity of pakchoi (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110469.
- [88] 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.
- [89] Liu S, Zha Z P, Chen S Q, et al. Hydrogen-rich water alleviates chilling injury-induced lignification of kiwifruit by inhibiting peroxidase activity and improving antioxidant system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(5): 2675–2680.
- [90] 王怡玫, 司雨, 张晶, 等. 富氢水处理对高温高盐胁迫下水果黄瓜产量和品质的影响[J]. *现代农业科技*, 2024(8): 23–26.
- [91] Wang X, An Z H, Liao J M, et al. The role and mechanism of hydrogen-rich water in the *Cucumis sativus* response to chilling stress[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(7): 6702.
- [92] 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.
- [93] 李湘妮, 刘诗华, 张晶, 等. 富氢水对长季节基质栽培彩椒抗逆性和品质的影响[J]. *蔬菜*, 2022(12): 18–22.
- [94] 刘丰娇, 蔡冰冰, 孙胜楠, 等. 富氢水浸种增强黄瓜幼苗耐冷性的作用及其生理机制[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(5): 881–889.
- [95] Liu Y X, Pan J J, Ni S, et al. Transcriptome and metabolomics combined analysis revealed the defense mechanism involved in hydrogen-rich water-regulated cold stress response of *Tetrastigma hemsleyanum*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 889726.
- [96] 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.
- [97] Song R J, Zhang X C, Feng C J, et al. Exogenous hydrogen promotes germination and seedling establishment of barley under drought stress by mediating the ASA-GSH cycle and sugar metabolism[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(5): 2749–2762.
- [98] Wu Q, Su N N, Chen Q, et al. Cadmium-induced hydrogen accumulation is involved in cadmium tolerance in *Brassica campestris* by reestablishment of reduced glutathione homeostasis[J]. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0139956.
- [99] Ren A, Liu R, Miao Z G, et al. Hydrogen-rich water regulates effects of ROS balance on morphology, growth and secondary metabolism via glutathione peroxidase in

- Ganoderma lucidum*[J]. *Environmental Microbiology*, 2017, 19(2): 566–583.
- [100] 陈革豫, 丁芳芳. 富氢水的应用研究进展[J]. *陕西农业科学*, 2020, 66(7): 86–89.
- [101] 董长勇, 于皎雪, 于伟厚, 等. 富氢水在国内外应用的研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(9): 218–223.
- [102] Hancock J T, Russell G, Stratakos A C. Molecular hydrogen: The postharvest use in fruits, vegetables and the floriculture industry[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20): 10448.
- [103] 蔡敏, 杜红梅. 富氢水预处理对香石竹切花瓶插寿命的影响[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2015, 33(6): 41–45.
- [104] 任鹏举, 李雪萍, 徐晓婷, 等. 氢气对切花百合瓶插寿命和品质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(1): 103–108.
- [105] 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.
- [106] 宋韵琼, 丛峰松, 李朝阳, 等. 富氢水预处理对小苍兰切花瓶插寿命及其抗氧化系统的影响[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2018, 36(1): 1–6.
- [107] 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.
- [108] Zhao X M, Meng X M, Li W X, et al. Effect of hydrogen-rich water and slightly acidic electrolyzed water treatments on storage and preservation of fresh-cut kiwifruit[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(6): 5203–5210.
- [109] Li F J, Hu Y, Shan Y X, et al. Hydrogen-rich water maintains the color quality of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 183: 111743.
- [110] Dong W Q, Shi L Y, Li S S, et al. Hydrogen-rich water delays fruit softening and prolongs shelf life of postharvest okras[J]. *Food Chemistry*, 2023, 399: 133997.
- [111] Sun Y N, Qiu W Y, Fang X Q, et al. Hydrogen-rich water treatment of fresh-cut kiwifruit with slightly acidic electrolytic water: Influence on antioxidant metabolism and cell wall stability[J]. *Foods*, 2023, 12(2): 426.
- [112] Jiang K, Kuang Y, Feng L Y, et al. Molecular hydrogen maintains the storage quality of Chinese chive through improving antioxidant capacity[J]. *Plants*, 2021, 10(6): 1095.
- [113] Wang Y Q, Wang J J, Kuang Y, et al. Packaging with hydrogen gas modified atmosphere can extend chicken egg storage[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(3): 976–983.
- [114] Ceylan M M, Bulut M, Alwazeer D, et al. Evaluation of the impact of hydrogen-rich water on the quality attribute notes of butter[J]. *The Journal of Dairy Research*, 2022, 89(4): 431–439.
- [115] Bulut M, Çelebi Sezer Y, Ceylan M M, et al. Hydrogen-rich water can reduce the formation of biogenic amines in butter[J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132613.
- [116] Jiang K, Zhang Y Y, Cai C X, et al. Hydrogen-based modified atmosphere packaging delays the deterioration of dried shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) during accelerated storage[J]. *Food Control*, 2023, 152: 109897.
- [117] 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.
- [118] Wu M Z, Xie X D, Wang Z, et al. Hydrogen-rich water alleviates programmed cell death induced by GA in wheat aleurone layers by modulation of reactive oxygen species metabolism[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 163: 317–326.
- [119] 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.
- [120] Liu F, Li J, Liu Y. Molecular hydrogen can take part in phytohormone signal pathways in wild rice[J]. *Biologia Plantarum*, 2016, 60(2): 311–319.
- [121] 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.
- [122] 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.

- [123] 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.
- [124] 张青. 乳果糖和富氢水对采食镰刀菌污染日粮仔猪生长性能、肝脾功能和抗氧化性能的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [125] Zheng W J, Ji X, Zhang Q, et al. Hydrogen-rich water and lactulose protect against growth suppression and oxidative stress in female piglets fed *Fusarium* toxins contaminated diets[J]. *Toxins*, 2018, 10(6): 228.
- [126] Zheng W J, Ji X, Zhang Q, et al. Intestinal microbiota ecological response to oral administrations of hydrogen-rich water and lactulose in female piglets fed a *Fusarium* toxin-contaminated diet[J]. *Toxins*, 2018, 10(6): 246.
- [127] 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.
- [128] Wang M, Wang R, Zhang X M, et al. Molecular hydrogen generated by elemental magnesium supplementation alters rumen fermentation and microbiota in goats [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2017, 118(6): 401-410.
- [129] Wang R, Si H B, Wang M, et al. Effects of elemental magnesium and magnesium oxide on hydrogen, methane and volatile fatty acids production in *in vitro* rumen batch cultures[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 252: 74-82.
- [130] 王勇生, 唐中林, 胡俊茹, 等. 一种提高加州鲈仔鱼生产性能的养殖方法: CN116616222A[P]. 2023-08-22.
- [131] 王勇生, 张君红, 胡俊茹, 等. 一种提高乌鳢仔鱼生产性能的养殖方法: CN116724926A[P]. 2023-09-12.

## Research progress and future prospects of hydrogen in agriculture

YANG Haiyan<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Qiuyu<sup>1,2</sup>, LING Xiang<sup>1,2</sup>, LIU Yaqian<sup>1,2,3</sup>, PAN Qifang<sup>3</sup>, HAN Jinglong<sup>5</sup>, DING Wenjiang<sup>1,2,4\*</sup>

1. Shanghai Key Laboratory of Hydrogen Science & Center of Hydrogen Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
3. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
4. National Engineering Research Center of Light Alloys Net Forming & State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
5. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China

**Abstract** Hydrogen has shown broad prospects in agricultural production due to its conducive biological effects, such as antioxidation, regulation of growth factors and enzyme activities, as well as its high safety in practical applications and environmental protection. In this paper we review the research progress of hydrogen utilization in agriculture and summarize hydrogen application methods. We also pinpoint the physiological and biochemical impact of hydrogen on promoting plant rooting and sprouting, regulating yield/quality of agricultural products, improving plant stress resistance, extending the shelf life of agricultural product, and enhancing the survival rate of animal breeding and the quality of resultant products. In addition, we also prospect the development of hydrogen in agriculture. In the future, hydrogen agriculture will focus on the research and development of key technologies, expansion of its application scopes, environmental protection and sustainable development, and market promotion. Hydrogen agriculture is expected to significantly contribute to the sustainable development of China's agriculture.

**Keywords** hydrogen; magnesium hydride; agriculture; antioxidant effect ●



(责任编辑 赵庆圆)