

氢气在农业上的应用研究进展

宋韵琼

(上海市闵行区农业技术服务中心,上海 201199)

摘要 氢气(Hydrogen, H₂)是一种信号分子,一定浓度的富氢水(Hydrogen-rich water, HRW)不仅对植物种子萌发和幼苗生长具有促进作用,还能增强植物的抗逆性。本文综述了H₂在农业上的应用及其相关研究,对推动H₂在农业上的应用具有一定的指导意义。

关键词 氢气;富氢水;抗氧化;农业生产;应用

中图分类号 S216.2;Q945.78 **文献标识码** A **文章编号** 1007-5739(2019)11-0042-02

氢气(H₂)是一种无色无味、分子量最小、无毒无害、比热大、密度小的双原子气体,具有可燃性,在整个宇宙中的质量约占90%^[1];但是H₂在地球大气成分中的比重不足1%,且氢原子主要存在于有机物质和水中^[2]。目前,H₂在农业上的应用主要有2种形式,一种是将采用水电解法制得的H₂直接通入水中,配制不同浓度的富氢水(Hydrogen-rich water, HRW)溶液;另一种是含氢化合物的分解,常用的是将MgH₂溶于水产生H₂,目前这种产品已经商品化,可以很方便地应用于科研和生产中。随着研究的广泛开展,H₂不仅在医学方面受到重视,还有更多的研究学者关注其在植物研究中的作用,以期揭示H₂在植物体内的作用效应和机理,使H₂在农业生产中发挥切实的作用。

1 氢气在农业上的应用

1.1 调节植物的生长发育

国内的几个研究小组率先将H₂应用于农作物的生长发育过程中,发现H₂对植物的生理功能具有重要的调节作用。已经在24种高等植物的种子中发现了能够产生H₂的细菌,冬黑麦(*Secale cereale*)种子在H₂条件下的萌发速度明显快于在氩气条件下的萌发速度,类似的研究结果也在其他一些高等植物种子中被证实^[3]。此外,还有研究发现,某些微型水藻在光合作用下能够产生H₂^[4]。

有研究发现,H₂对水稻(*Oryza sativa*)^[5-6]、苜蓿(*Medicago sativa*)、绿豆(*Vigna radiata*)^[6]和拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)^[7]的种子萌发具有重要作用,H₂处理不仅有利于种子萌发和茎根的伸长;而且能够促进幼苗根系的生长,参与调控植物不定根^[8-9]和侧根^[10]的发生,可以促进黄瓜(*Cucumis sativus*)^[11-12]、万寿菊(*Tagetes erecta*)^[13]和猪笼草(*Nepenthes spp.*)^[14]不定根的发生。Xu等^[9]研究表明,50%的HRW显著增加了黄瓜的根系长度。现有的研究表明,HRW处理促进了大白菜^[15]、玉米(*Zea mays*)^[16]和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)^[17]的生长。HRW处理显著增加了大白菜的鲜重^[15]、玉米的株高^[16]以及紫花苜蓿地上和地下部分的鲜重^[17]。宋韵琼等^[18]研究表明,与不施用HRW的对照相比,50%的HRW浸泡种球和浇灌植株都显著增加了小苍兰(*Freesia refracta*)的花茎长度,这可能与花茎基部生长素的积累有关^[19]。赵银萍等^[20]研究发现,氢处理土壤对于黄瓜苗期生长有显著的促进作用。

一定浓度的HRW处理可显著增强植物对盐害^[5,7]、除草

剂^[21]以及重金属^[22]的抗性。有研究结果表明,HRW可以提高常见蔬菜小白菜对重金属镉的耐受力,减缓蔬菜中重金属的积累。Chen等^[23]研究发现,将紫花苜蓿的幼苗暴露在铝毒的环境中,经50%HRW预处理能够显著减轻铝毒症状。此外,Cui等^[22]也发现,H₂能减轻紫花苜蓿生长环境中镉毒的毒害作用。

1.2 改善土壤环境

目前有大量关于根瘤固氮放氢的研究。Dong等^[24]提出的“氢肥理论”认为,豆科作物中某些根瘤菌在固氮的同时释放H₂,H₂可以帮助促生细菌调节根际环境,从而促进豆科植物的生长。Mclearn等^[25]证实了土壤中吸收H₂的大部分是细菌。Irvine等^[26]也发现,H₂处理土壤可增加春小麦(*Triticum aestivum*)的干重。王瑾等^[27]研究发现,H₂有利于土壤中细菌种群的繁殖与扩增,从而改善植物根系环境,促进作物对土壤养分的吸收,有利于作物营养生长和开花。刘慧芬等^[28]研究发现,采用电解水产生的微量H₂处理植物根际土壤后,土壤中的过氧化氢酶、脲酶的活性都有不同程度的增加。微量的H₂可以直接或间接地为植物生长提供营养来源和保护其免受根际不良环境侵害,在继续用H₂处理一段时间后发现,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)根系土壤中的微生物种群有明显变化,且微生物的代谢强度增加,即便在贫瘠的土壤中依然有助于刺槐的生长。

2 氢气的重要生理功能

2.1 H₂与植物激素的互作

H₂可通过调节植物激素参与植物的生长发育调控。在绿豆和水稻的种子萌发试验中发现,H₂可以参与激素的调控,影响相关基因的表达。Zeng等^[6]研究发现,在HRW处理的水稻幼苗中,吲哚乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA)、赤霉素(Gibberellin, GAs)等与生长相关的激素的受体基因和编码植物信号传导途径的关键基因在水稻幼苗体内比未经过HRW处理的对照组上调;同时,H₂能够通过调控激素信号通路的输出而影响水稻体内各激素的表达水平。宋韵琼等^[19]研究发现,不同浓度的HRW浸泡小苍兰种球和浇灌植株均显著促进了小苍兰的营养生长、开花以及种球膨大;通过对IAA、ZR、GA₃和ABA的测定发现,用HRW处理的小苍兰花茎伸长期花茎基部的IAA、ZR和GA₃含量明显增多,ABA的含量明显减少。此外,研究发现,H₂熏蒸可以延缓猕猴桃(*Actinidia chinensis*)的衰老,这可能与H₂处理后乙烯释放量降低、乙烯合成相关酶活性下降有关^[29]。最近的研究显示,H₂可以抑制铝胁迫下水稻种子萌发过程中ABA的

作者简介 宋韵琼(1989-),女,黑龙江虎林人,硕士,助理农艺师,从事农业推广(园艺)方面的工作。

收稿日期 2019-02-21

合成,同时可以提高 GA 含量^[30]。植物激素(脱落酸和生长素等)可诱导植物内源 H₂ 的产生,如 ABA 处理拟南芥可以迅速提高 H₂ 的释放量^[31]。

2.2 增强植物的抗氧化能力

H₂ 在植物体内的功能与它的抗氧化性能力有关。有研究表明,与未经过 HRW 处理的对照组相比,经过 HRW 处理的高产和低产萝卜(*Raphanus sativus*)苗中都发现,HRW 可以有效缓解在试验中因紫外线诱导引起的萝卜苗体内过氧化氢和超氧阴离子的积累,显著增强超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX)的活性^[21]。近期研究发现,将 HRW 应用在切花保鲜上可以延长香石竹(*Dianthus caryophyllus*)、小苍兰切花的盛花期。有研究发现,在小苍兰进入萎蔫期时,HRW 处理后切花的丙二醛含量明显低于对照,同时 SOD、过氧化氢酶(CAT)和 APX 的活性显著增强,有效减轻了切花瓶插后期过氧化损伤,延长了切花的保鲜期,减缓了衰老进程^[21]。

在水果保鲜方面的研究发现,80%的 HRW 在降低猕猴桃腐烂率以及保持水果硬度 2 个方面的效果最显著。80%的 HRW 能够有效抑制果胶的溶解,降低细胞壁降解酶的活性,而且能够显著降低猕猴桃采后的呼吸强度,抑制脂质过氧化,提高 SOD 活性。有关研究者认为,HRW 延长猕猴桃的保鲜期主要是通过调控机体内的抗氧化程序来实现的^[22]。随着这些研究的深入,学者们开始广泛地关注如何利用 H₂ 提高植物的抗氧化能力,调控植物的生长发育。

2.3 诱导相关基因和蛋白的表达

H₂ 生物学效应的分子机制涉及对基因与蛋白表达、miRNA 和蛋白翻译后修饰的调控等,但至今没有发现 H₂ 作用的直接靶标。Xie 等^[23]研究发现, H₂ 上调锌指转录因子 ZAT10/12 的表达来增强拟南芥的耐盐性。Zeng 等^[6]研究发现,HRW 处理显著上调了水稻氢化酶基因 *OsHydA1*、*OsFhdB* 和 *OsHypB* 的表达。另外,还发现,HRW 处理显著增加了水稻干旱和盐胁迫条件下抗氧化相关基因 *OsFeSOD*、*OsMnSOD*、*OsCuZnSOD*、*OsCAT-A*、*OsCAT-B*、*OsAPX* 和 *OsGPX* 的转录水平。Cui 等^[22]研究发现, H₂ 通过提高苜蓿幼苗过氧化物酶(POD)和 APX 的活性以及相应的基因表达(*POD*, *APX1/2* 和 *GR1/2*)来缓解镉胁迫诱导的氧化伤害。Xu 等^[30]研究结果表明, H₂ 可以促进铝胁迫下水稻种子的萌发,与其参与调控 miRNA (miR528, miR160a, miR398a 和 miR159a) 表达有关。Chen 等^[32]研究发现, H₂ 通过上调 HSP70 的表达,减轻高温对黄瓜幼苗生长的不利影响。

这些研究结果对 H₂ 在农业生产上的应用奠定了重要的理论基础。但是, H₂ 作用的确切机制尚不清楚。相关研究的深入和生物学分析技术的发展,将有助于进一步解析植物 H₂ 作用的分子调控机制。

3 结语

近年来,NO、CO 和 H₂S 等小分子气体在生物体中的功能正在引起广泛的关注,原因主要是其可以在一些植物的某些特定发育阶段发挥作用。但是这些气体尽管施用剂量小,仍然有一定的毒副作用。也有大量的生物制剂和化学物质等应用在农业生产实际中,尤其是一些激素类物质的应用,

可能会对环境产生一定的危害。与 NO 和 H₂S 不同的是, H₂ 安全、无毒,无污染。对 H₂ 的研究掀起了新一轮健康革命,“氢农业”的发展也已初具规模。随着 H₂ 作用生物学机制的进一步深入研究, H₂ 在农业上将具有更广泛的应用前景,有望在提高作物的抗逆性、作物的高产和优质等方面发挥重大的作用。

4 参考文献

- [1] 林贤丰,赵晨晨,金可可.氢气生物学机制的研究进展[J].温州医学院学报,2014,44(5):384-387.
- [2] CHRISTOPHER K, DIMITRIOS R. A review on exergy comparison of hydrogen production methods from renewable energy sources[J]. Energy and Environmental Science, 2012, 5(5): 640-651.
- [3] TORRES V, BALLESTEROS A, FERNÁNDEZ V M. Expression of hydrogenase activity in barley (*Hordeum vulgare* L.) after anaerobic stress[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1986, 245(1): 174-178.
- [4] ESQUÍVEL M G, AMARO H M, PINTO T S, et al. Efficient H₂ production via *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Trends in biotechnology, 2011, 29(12): 595-600.
- [5] XU S, ZHU S, JIANG Y, et al. Hydrogen-rich water alleviates salt stress in rice during seed germination[J]. Plant and Soil, 2013, 370(1-2): 47-57.
- [6] ZENG J, ZHANG M, SUN X. Molecular hydrogen is involved in phytohormone signaling and stress responses in plants[J]. PLoS ONE, 2013, 8(8): 71038.
- [7] XIE Y, MAO Y, LAI D, et al. H₂ enhances *Arabidopsis* salt tolerance by manipulating ZAT10/12-mediated antioxidant defence and controlling sodium exclusion[J]. PLoS ONE, 2012, 7(11): 49800.
- [8] ZHU Y, LIAO W. A positive role for hydrogen gas in adventitious root development[J]. Plant Signaling & Behavior, 2016, 11(6): 1187359.
- [9] LI C, GONG T Y, BIAN B T, et al. Roles of hydrogen gas in plants: A review[J]. Functional Plant Biology, 2018, 45(8): 783-792.
- [10] CAO Z, DUAN X, 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.
- [11] ZHU Y, LIAO W, NIU L, 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.
- [12] LIN Y, 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.
- [13] ZHU Y, LIAO W. 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.
- [14] 汪艳平,卫辰.富氢水处理对猪笼草扦插生根的影响[J].现代农业科技, 2016(14): 136-137.
- [15] WU Q, SU N, CAI J, 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.
- [16] ZHANG X, ZHAO X, WANG Z, 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.
- [17] DAI C, CUI W, PAN J, 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.
- [18] 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.
- [19] 宋韵琼,李朝阳,谢平林,等.富氢水施用时期和施用方法对小苍兰开花的影响及其生理机制[J].上海交通大学学报(农业科学版), 2017, 35(3): 10-16.
- [20] 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.

(下转第 45 页)

田时机和程度。分蘖末期(6月底至7月初)应排水落干烤田,烤田一般为10d左右,至地面有裂纹进地不陷脚为止;重盐碱地酌情烤田,以免返盐返碱。烤田结束后适合小水灌溉。烤田能控制无效分蘖,巩固有效分蘖,减少养分消耗,使主茎和有效蘖获得更多的养分供应;烤田可使氮素代谢下降,控制营养生长速度,抑制节间生长,缩短第一、第二节间,增厚秆壁,提高抗倒伏能力。

3.3 孕穗拔节期

孕穗拔节期是指10%稻株孕穗拔节至80%稻株孕穗拔节这一段时期。对于东北品种而言,通常孕穗拔节期处于6月底至7月初,在30d左右;而对于生育期170d以上的品种,通常孕穗拔节处于7月初。在水稻生育过程中,孕穗拔节期属于需水临界期,此时水稻植株生长量会出现激增情况,同时稻株根茎会达到一个高峰,相应稻株叶片开始生长发育,实现全生育期中最高的群体叶面指数,生长重心开始向穗部转移。在这一情况下,水稻对于水肥反应以及环境变化会较为敏感,稻田不可缺少水分,通常需要保持3cm左右的水层;否则,就会导致颖花分化少而退化多,穗小,产量出现下降。此期需要时刻关注天气变化,根据天气来进行适当灌溉,时刻保持土壤水分充足^[4]。通常情况下,这一时期正值雨季,水量不会存在缺乏情况;同时植株繁盛,地面不会受到阳光直射,土壤能够保持充足水分。因此,应该坚持小雨不排,大雨排干,调气促根保叶,及时清除杂草,保持土壤氧气量充足,防止发生纹枯病、稻瘟病。

在穗分化时期,第一苞原基分化(抽穗前30d)之前应该施用穗肥,以促进一、二次枝梗实现分化(促花肥);在花粉母细胞形成期(抽穗前15~20d)前施肥,可以保证粒数增加,同时也可避免出现颖花败育的情况。若是延迟此次施肥,则花粉充实期无法取得预期效果。巧施穗肥,叶色偏淡,落黄较早的要早施;叶色浓绿的要少施或不施肥,防止后期倒伏和贪青晚熟。要适量施用钾肥,促早熟,壮茎秆,提高水稻茎秆的抗倒伏能力。穗肥以施促花肥为主,氮、磷、钾肥平衡搭配,一般施尿素60~90 kg/hm²、二铵30~45 kg/hm²、硫酸钾45~75 kg/hm²。施促花肥时,要降低尿素的使用量,防止贪青晚熟。中期对水的要求是浅水勤灌,达到以水调肥、以水调

(上接第43页)

- [21] JIN Q, ZHU K, CUI W, et al. Hydrogen gas acts as a novel bioactive molecule in enhancing plant tolerance to paraquat-induced oxidative stress via the modulation of heme oxygenase-1 signalling system[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2013, 36(5): 956-969.
- [22] CUI W, GAO C, FANG P, et al. Alleviation of cadmium toxicity in *Medicago sativa* by hydrogen-rich water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 260: 715-724.
- [23] CHEN M, CUI W, ZHU 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.
- [24] DONG Z, LAYZELL D, FINAN T, et al. Why do legume nodules evolve hydrogen gas? [M]. *Proceedings of the nitrogen fixation: Global perspectives Proceedings of the 13th International Congress on Nitrogen Fixation*, Hamilton, Ontario, Canada, 2-7 July 2001, CABI Publishing, 2002: 331-335.
- [25] MCLEARN N, DONG Z. Microbial nature of the hydrogen-oxidizing agent in hydrogen-treated soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(6): 465-469.
- [26] IRVINE P, SMITH M, DONG Z. Hydrogen fertilizer: Bacteria or fungi[J].

气、以水调温的目的。

3.4 抽穗开花期

抽穗开花期一般在7月底至8月初,生育期170d以上的品种在8月15—20日。水稻抽穗开花期有着相对较强的光合作用,需水量达到最高值。若是水量不足,则光合作用降低,无法完成正常新陈代谢,出现发育不良情况,颖花退化和不孕几率大幅度提升。基于这一情况,必须精准把握土壤中水与氧的关系,维持根系健康,保证枝叶正常发育,从根本上提升水稻结实率。水层管理重点是以水调肥、以水调气、以水调温、以气养根、以根养叶、以叶壮籽,籽粒饱满,活棵成熟,增加产量。抽穗期间稻田水层应为3~5cm深,高温干旱时要加深水层。齐穗后要看天、看地,并根据水稻长相适当补充营养,一般采取根外追肥的方法。以喷施磷、钾肥和微量元素为主,以0.5%~1.0%的浓度进行叶面喷肥。

3.5 灌浆期

水稻灌浆期间需要足够的养分,养分过多贪青晚熟,养分过少水稻早衰。在正式步入黄熟时期之后,必须保证稻田合理的干湿交替,借此也可以促进籽粒发育、青秆、绿叶、黄粒、活秆成熟。这一时期的最佳管水方案为干干湿湿、以湿为主,这一方法不仅能够保持田间水、氧平衡,避免出现病害,保持根叶健康,还可以实现以水调气、以气养根、以根保叶、以叶壮籽的目的。土壤盐碱较重的田块前期适当增加灌水深度,应充分利用雨水,高处保水,洼处勤排水。

3.6 成熟期

俗话说:“宁割九成稻,不收十成谷”。一般抽穗后40~50d,水稻进入完熟期(米粒坚硬,含水量20%左右),成熟率达95%以上即可适时收割。收割过早或过晚都会影响稻米品质。有水稻田应在收割前10d排水。

4 参考文献

- [1] 梁青,刘峰,陈伟雄,等.优质稻品种五源占的选育过程及机插秧高产栽培技术[J].*现代农业科技*,2018(24):21-22.
- [2] 余为仆,杨洪勇,谢磊,等.麦后水稻机插秧精确量栽培技术研究[J].*湖北农业科学*,2018,57(22):14-17.
- [3] 潘巧红,李秋红.杂交水稻机械化穴直播栽培技术[J].*现代农业科技*,2018(11):30.
- [4] 于广星,侯守贵,代贵金,等.辽宁水稻优质丰产节水节肥栽培技术模式[J].*辽宁农业科学*,2018(3):58-62.
- [5] Acta Horticulturae, 2004, 631: 239-242.
- [27] 王瑾.豆科作物根瘤与土壤 ACC 脱氨酶基因及其表达研究[D].西安:陕西师范大学,2013.
- [28] 刘慧芬,王卫卫,曹桂林,等.氢气对刺槐根际土壤微生物种群和土壤酶活性的影响[J].*应用与环境生物学报*,2010,16(4):515-518.
- [29] HU H, ZHAO S, LI P, et al. Hydrogen gas prolongs the shelf life of kiwifruit by decreasing ethylene biosynthesis[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 135: 123-130.
- [30] XU D, 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.
- [31] JIN Q, ZHU K, CUI W, 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.
- [32] CHEN Q, ZHAO X, LEI D, 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.