

# 农业中的分子氢

格蕾丝·祖尔菲卡尔, 费萨尔·汉考克, 约翰·拉塞尔

隶属机构: 英国布里斯托尔应用科学研究所

**摘要:** H<sub>2</sub> 气体, 通常以 H<sub>2</sub> 饱和水的形式存在, 可以在改善植物生长和生产力的许多方面发挥有用的作用, 包括抗逆性和提高收获后的耐久性。因此, 分子氢输送系统应被视为农业实践中的一种有价值的补充。农业和粮食安全都受到植物压力的影响, 无论是直接来自人类影响还是气候变化。不断增加的人口和不断增加的食品消费意味着需要寻找对农业有用和环境友好的战略, 以确保未来的粮食安全。分子氢 (H<sub>2</sub>) 研究因其在植物中的多方面和多样化作用而在植物和农业科学中获得了发展势头。H<sub>2</sub> 应用可以减轻一系列压力, 包括盐度、重金属和干旱。因此, 了解内源性或外源性 H<sub>2</sub> 如何增强生长和对多种植物胁迫的耐受性将增强我们对 H<sub>2</sub> 如何对未来农业和园艺有用的理解。在这篇综述中, 重点介绍了 H<sub>2</sub> 在农业中的最新进展和未来影响, 重点关注 H<sub>2</sub> 如何影响植物细胞功能以及如何将其应用于提高植物性能。尽管 H<sub>2</sub> 在植物中的确切分子作用仍然难以捉摸, 但这种安全且易于应用的处理应该在农业实践中具有未来。

**关键词:** 非生物胁迫; 重金属; 富氢水; 氧化胁迫; 盐度

## Molecular Hydrogen in Agriculture

Grace Zulfiqar, Faisal Hancock, John Russell

Affiliation: Institute of Applied Science, Bristol, UK

**Abstract:** H<sub>2</sub> gas, usually in the form of H<sub>2</sub>-saturated water, could play a useful role in improving many aspects of plant growth and productivity, including resistance to stress tolerance and improved post-harvest durability. Therefore, molecular hydrogen delivery systems should be considered as a valuable addition within agricultural practice. Agriculture and food security are both impacted by plant stresses, whether that is directly from human impact or through climate change. A continuously increasing human population and rising food consumption means that there is need to search for agriculturally useful and environment friendly strategies to ensure future food security. Molecular hydrogen (H<sub>2</sub>) research has gained momentum in plant and agricultural science owing to its multifaceted and diverse roles in plants. H<sub>2</sub> application can mitigate against a range of stresses, including salinity, heavy metals and drought. Therefore, knowing how endogenous, or exogenously applied, H<sub>2</sub> enhances the growth and tolerance against numerous plant stresses will enhance our understanding of how H<sub>2</sub> may be useful for future to agriculture and horticulture. In this review, recent progress and future implication of H<sub>2</sub> in agriculture is highlighted, focusing on how H<sub>2</sub> impacts on plant cell function and how it can be applied for better plant performance. Although the exact molecular action of H<sub>2</sub> in plants remains elusive, this safe and easy to apply treatment should have a future in agricultural practice.

**Keywords:** Abiotic stresses, heavy metals, hydrogen rich water, oxidative stress, salinity

### 引言:

植物通常在次优条件下生长, 植物胁迫对全球农业产生重大不利影响。因此, 未来的粮食安全将取决于更好的植物生长和更高的生产力, 尤其是随着人口的增长和对粮食需求的增加。事实表明, 气候变化驱动的非生物胁迫导致粮食生产力下降, 危及粮食安全的未来, 全

球范围内每年损失的农产品成本估计超过 1700 亿美元。一个挑战是开发简单且廉价的解决方案, 以减轻植物压力并导致更好的农业产出, 提高植物生长和生产力。氢是最丰富、最轻的化学元素, 约占宇宙质量的 75%。在标准压力和温度下, 氢气 (H<sub>2</sub>) 极易燃烧, 无色、无味、无臭。原子氢 (H) 在地球大气中很少见, 氢更典型地

以双原子分子 ( $H_2$ ) 的形式存在, 它是电化学中性和非极性的, 以前被认为是一种相对生理惰性的分子。多年前报道了植物组织中的  $H_2$  排放。最近, 人们发现  $H_2$  在生物医学领域发挥着至关重要的作用, 它被描述为具有抗凋亡和抗氧化作用。此外,  $H_2$  在包括细菌、绿藻和高等植物在内的不同生物体中的代谢也已被广泛报道。尽管高等植物中氢气的产生仍不清楚, 但对其物理和生物调节作用的了解越来越多, 氢气最近在植物和动物研究中引起了关注。 $H_2$  正在被公认为是一个完整的信号分子, 它可能在广泛的适应性和发育反应中发挥重要作用。在植物中, 已知  $H_2$  在控制基因表达和信号转导中具有调节作用, 介导多种胁迫反应的管理, 包括冷胁迫、金属胁迫、紫外线胁迫、强光胁迫和盐度胁迫。因此, 更深入地了解  $H_2$  如何在细胞中发挥作用, 以及它如何导致更好的压力耐受性对于其未来的使用非常重要。

### 一、植物中氢气的生物生成

植物细胞可以通过不同的方式暴露于  $H_2$ , 或者通过内源性生产或通过外源性应用。 $H_2$  的内源性生产通过氢化酶 [FeFe]-氢化酶或固氮酶的活性发生。金属蛋白复合物具有通过催化正向和反向反应产生或去除氢气的潜力。植物激素如生长素、脱落酸、茉莉酸和乙烯的存在可以增强植物内源性氢气的产生。为了说明, 豆科植物根瘤菌作为固氮酶固氮酶的专性副产物, 在生物固氮过程中有助于根瘤内产生氢气。在这个  $H_2$  产生过程中,  $H_2$  从根瘤中出来, 导致  $H_2$  在根部表面周围升高 (Porte 等人, 2020 年)。根际  $H_2$  的增加对随后的植物生长产生有益影响, 导致植物生物量增加 15-48%, 这种现象称为氢肥效应。此外, 当植物暴露于干旱和盐胁迫等非生物胁迫条件时,  $H_2$  的产生也会增加, 这表明这种特殊的气体递质可能在胁迫信号传导中很重要。

### 二、 $H_2$ 输送到工厂

尽管据报道, 对经济上重要的作物进行氢气处理对产量和质量都有有益的影响, 但氢气是一种气体, 因此不易管理。作为气体,  $H_2$  比空气轻, 因此在现场条件下, 以气体形式应用是不切实际的。此外,  $H_2$  具有高度爆炸性, 因此由于安全和储存问题, 不适合在任何显著浓度下使用。更实用的方法是使用饱和形式的  $H_2$ , 例如富氢水 (HRW)。正如 Wu 等人使用的那样, 这可用于将  $H_2$  直接施加到植物上。简而言之, HRW 是通过在氢气或氢氧发生器产生氢气后将氢气泵入/鼓泡到蒸馏水 (或浇水介质) 中来制备的。随后, 可以稀释该 HRW 以达到治疗所需的浓度。其他生产 HRW 的方法包括在水中混合镁基片剂, 尽管这些方法会在介质中留下副产品。然后可以将 HRW 以喷雾形式或作为土壤浸液施用于农作物。如果植物或植物细胞在水培或培养基中生长,  $H_2$

可以直接通入培养基中。但是, 需要牢记的是,  $H_2$  不易溶解, 很容易扩散到大气中, 在这种情况下,  $H_2$  将从工厂环境中流失, 如果在实验室条件下通风受限, 可能会达到可燃水平例如。 $H_2$  可用作收获后储存的处理方法。在这里, 新鲜农产品可以很容易地用 HRW 浸泡、喷洒或喷雾。此外, 在储存条件下, 也可以使用气体形式的  $H_2$ 。同样, 在使用气态的大规模 HRW 或  $H_2$  时, 必须采取安全措施。HRW 应用已被证明可通过减少叶气孔大小和通过提高 ROS 清除抗氧化剂 (如抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)) 来减少氧化损伤, 从而提高切花玫瑰和百合花的瓶插寿命和质量 and 过氧化物酶 (POD), 同时减少丙二醛 (MDA) 和电解质泄漏。

如上所述,  $H_2$  气和 HRW 的使用相对容易, 但并非没有问题。如果要广泛使用氢气, 未来农业中的氢气将需要寻找更先进的解决方案。固体储氢材料的开发进展可能为改善氢气的产生和储存提供了途径。在考虑安全性、固态存储、便携和大氢含量的可持续氢气供应。氢化镁 ( $MgH_2$ ) 也是一种很有前途的低成本、大量可用的供体, 显示出在农业中用作  $H_2$  源材料的潜力。将氢气输送到农业的另一种潜在方法是使用纳米技术, 通过将氮硼烷 (AB) 封装到中空介孔二氧化硅纳米颗粒 (hMSN) 中, 使用纳米胶囊 (AB@hMSN) 等放氢纳米材料提供持续输送氢气的机会。此外, 负载氢纳米材料的使用具有增加在液体 (如水) 中的停留时间的优点。然而, 在采用任何新技术之前, 必须考虑将副产品释放到环境中。在这方面, 未来的研究应侧重于基于纳米材料的氢释放的使用及其对作物的影响。

### 三、生理效应: $H_2$ 对根系发育的影响

发展良好的根系以吸收水分和养分, 并在其位置将植物接地, 对于植物的最佳生长和生产力至关重要。已发现  $H_2$  对根系生长有影响。研究表明,  $H_2$  诱导的根系发育与其对植物激素内源水平的影响有关。在最近的一项研究中, Wu 等人。据报道, HRW 处理的绿豆幼苗提高了吲哚乙酸 (IAA) 和赤霉素 ( $GA_3$ ) 的内源水平, 导致下胚轴和根长增加。相关基因的上调证明了内源性植物激素水平的增加。报告显示, HRW 种子处理可以诱导植物激素信号通路以响应环境压力。在黄瓜外植体中, Zhu 等人。还证明了不定根相关的靶基因响应富氢水 (HRW) 而上调。此外, 发现 HRW 处理上调细胞周期相关基因的表达, 包括 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) 和细胞周期蛋白依赖性激酶 B (CDKB)。不定生根。与其他公认的气体递质如 NO 类似,  $H_2$  的内源性调节功能可以通过氢基产品/化合物的外源性处理来模

拟。H<sub>2</sub> 与其他气体信号的相互作用，如一氧化氮 (NO) 和硫化氢 (H<sub>2</sub>S)，理解起来很重要，因为它们可能共同作用或相互对抗。最近有报道称，NO 参与了 H<sub>2</sub> 诱导的根形成。这些气体分子的结合有效地调节了质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶和 14-3-3 蛋白的基因表达，它们对于正常的生长、发育和对压力的反应是不可或缺的。据报道，H<sub>2</sub> 通过与植物中的 NO 和 hemeoxygenase-1/一氧化碳途径相互作用，在根形成中发挥作用。另一项关于不定生根的研究将 H<sub>2</sub> 描述为通过 CO 途径调节与生长素信号传导和根发育相关的靶基因，例如 CsDNAJ-1、CsCPDK1/5、CsCDC6、CsAUX228-like 和 CsAUX22D-like。这些结果证实 H<sub>2</sub> 通过增加 NO 的含量以及 NO 合酶样酶和硝酸还原酶的活性来促进生根。H<sub>2</sub> 还显示通过 NO 途径激活细胞周期并上调细胞周期相关基因和生根相关基因。因此，H<sub>2</sub> 很可能通过与内源植物信号分子及其相关下游靶基因的相互作用在根形成中发挥重要作用。

#### 四、生理效应：H<sub>2</sub> 对叶片气孔的影响

水分的吸收和蒸腾对植物的生长和生存至关重要，但与此同时，气候变化正在导致植物可用性的不确定性增加，干旱地区的扩大导致某些地区的农业产量下降。另一方面，其他地区将面临更大的粮食风险，这是与气候有关的重大灾难。氢处理可以减轻干旱胁迫，而氢也可以从被淹的土壤中释放出来，因此，了解 H<sub>2</sub> 在控制植物蒸腾流中的作用很重要。气孔是存在于地上植物表面的小孔，尤其是在调节气体交换率和蒸腾率方面起着至关重要的作用的叶子，对植物的生长和生存至关重要。研究表明，H<sub>2</sub> 可能通过与植物激素的相互作用在调节气孔孔径中发挥关键作用。例如，在干旱胁迫条件下生长的拟南芥中，HRW 的应用增强了内源 H<sub>2</sub> 的产生，同时减少了气孔孔径，从而导致了耐旱性。张等人。测试了莱茵衣藻氢化酶基因 (GrHYD1) 在拟南芥中用于 H<sub>2</sub> 生物合成的基因渗入，并证明增加的 H<sub>2</sub> 导致在渗透胁迫下气孔关闭，从而导致渗透胁迫耐受性。从这些例子中可以看出，H<sub>2</sub> 在维持气孔关闭方面具有关键作用，特别是在干旱/渗透胁迫条件下，尽管其所涉及的机制和途径尚未完全描述。干旱是影响全球农业生产力的主要非生物胁迫/挑战。干旱胁迫对生理和生化机制产生负面影响，最终导致植物生长减少和农业生产力下降。陈等人。据报道，在干旱胁迫条件下，一氧化碳和氢气 (HRW 作为来源) 协调地改善了生长，特别是在根形成期间，以及其他重要性状，如叶绿素含量、相对含水量和叶绿素荧光特性。此外，这些化合物共同增加了 SOD、POD、CAT、APX、蛋白质、水溶性碳水化合物和脯氨酸含量 (也是一种抗氧化剂) 的活性。这些因素减轻了干旱引起的氧化应激，过氧化氢 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、硫代巴比妥

酸反应物质 (TBARS) 和超氧自由基 (O<sub>2</sub> ·-) 水平的降低就是证明。此外，外源 H<sub>2</sub> (HRW) 可以有效地调节气孔孔径，从而提高干旱胁迫耐受性，如上所述还表明，在干旱胁迫条件下，H<sub>2</sub> 通过影响基于脱落酸 (ABA) 的机制。因此，有证据表明，基于 H<sub>2</sub> 的处理是未来增强耐旱性的有用辅助手段。

#### 五、生理效应：H<sub>2</sub> 对收获前后衰老的影响

由于人口不断向城市地区转移，食品生产地和随后的消费地之间的距离将显著增加，这一因素在考虑食品的国际分配时变得越来越重要。在到达消费者之前，新鲜园艺商品供应链的收获后损失估计在 13% 至 38% 之间。切花在国际市场上的高市场价值迫使全球花卉作物产量大幅增加，特别是在发展中国家，通过全球贸易和工业创造了数十亿美元的经济收入。因此，最大限度地减少储存和运输过程中的收获后损失，同时保持质量标准，对于追求财务成功的行业来说是一个巨大的挑战。因此，如果要提高园艺和花卉产品的采后寿命并因此减少采后损失，则需要在该领域进行进一步的研究。对园艺行业特别重要的研究将 H<sub>2</sub> 的应用描述为提高“多种”作物的收获后寿命。据报道，H<sub>2</sub> 应用可提高许多商品的收获后寿命，包括水果、蔬菜和花卉作物。例如，胡等人。表明收获前对黄花菜花的 HRW 处理不仅提高了萌芽花的日产量，而且减少了由升高的 ROS 水平和膜氧化引起的冷害。同时，经 HRW 处理的黄花菜芽在储存条件下产生的褐变较少。用 HRW 处理还改善了观赏性和美学性状，并增强了瓶插玫瑰 (*Rosa hybrid*) 和切花百合 (*Lilium spp.*) 的花。在这里，H<sub>2</sub> 保持膜稳定性和水平衡，同时增强抗氧化活性并减少氧化损伤和气孔大小。通常观察到 H<sub>2</sub> 含量在衰老过程中会降低，因此在衰老过程中提高内源性 H<sub>2</sub> 水平可能会减少农产品的变质。为了说明，Su 等人。证明通过应用外源性 HRW 改变内源性 H<sub>2</sub>，可以通过增强内源性抗氧化潜力来保持氧化还原稳态，从而延长桔梗切花的瓶插寿命。此外，据报道，H<sub>2</sub> 通过抑制内源性乙烯生物合成和减轻衰老过程中的乙烯信号转导来改善花瓶质量并延长切花玫瑰的寿命。

最近，李等人使用氢化镁 (MgH<sub>2</sub>) 作为花瓶溶液中的 H<sub>2</sub> 源，评估其在延长切花康乃馨花瓶寿命方面的作用。观察到 H<sub>2</sub> 诱导的 H<sub>2</sub>S 增加，同时通过 H<sub>2</sub>S 信号传导延长切花的寿命，重新建立氧化还原稳态并减少代表性衰老相关基因 (包括 DcbGal 和 DcGST1) 的转录本。蛋白质组学研究表明，HRW 和 NO (来自硝普钠) 的应用提高了切花百合的采后新鲜度，可能是通过 AtpA 蛋白和 ATP 酶的活性，以及通过调节光合作用，并描述了 NO 信号在 H<sub>2</sub> 中的积极作用 - 在切花收获后诱导增强。除了花，H<sub>2</sub> 处理水果也可能是有益的。据

报道, H<sub>2</sub> 可以对猕猴桃的采后保存产生重大影响。在这里, H<sub>2</sub> 处理通过限制呼吸强度、降低腐烂的发生率、降低脂质过氧化水平和增强 SOD 活性来延缓成熟和衰老。此外, H<sub>2</sub> 处理通过限制内源性乙烯(一种已知有助于成熟过程的气态植物激素)来延长猕猴桃的采后寿命。在番茄中, 在收获后处理过程中, H<sub>2</sub> 不仅可以减少衰老和延长收获后的寿命, 而且还可以降低亚硝酸盐的含量, 亚硝酸盐是一种对人体健康有害的物质。在食用菌 *Hypsizygus marmoreus* 中, 在收获后以 HRW 的形式施用 H<sub>2</sub> 通过降低氧化应激来提高质量, 表现为相对电解质泄漏率和 MDA 含量以及抗超氧自由基(O<sub>2</sub>·-)活性的降低。H<sub>2</sub> 的应用通过诱导其基因表达水平协同增强了包括 SOD、CAT、APX 和谷胱甘肽还原酶(GR)在内的抗氧化剂的活性。总之, 这些报告表明, H<sub>2</sub> 能够通过增强抗氧化活性和抑制乙烯生物合成基因来减少内源性乙烯的产生并延长花卉和园艺作物的寿命和保质期。然而, 需要进一步研究以确定对植物的单个物种和基因型有效的 H<sub>2</sub> 特定处理方案, 特别是因为植物毒性反应在单个园艺商品之间存在很大差异。作者建议将 HRW 作为花瓶溶液进行花卉长寿处理, 而对于水果和蔬菜, 不同时间间隔的熏蒸可能是有益的。除分子氢外, 其他重要的信号分子如硫化氢(H<sub>2</sub>S)已被提议作为园艺中的收获后处理, 尽管在使用时需要考虑毒性, 这似乎不是 H<sub>2</sub> 的问题。

## 六、结论

由于非生物胁迫, 植物通常表现出迟缓的生长反应。这种压力只会因人类活动的增加和气候变化而加剧。因此, 使用简单且安全的缓解措施对未来的可持续粮食安全具有重要意义。以 HRW 形式应用 H<sub>2</sub> 已被认为是一种有益的农业补救措施。但是, 有一些警告需要成为未来研究的重点。H<sub>2</sub> 处理并不总是很容易使用, HRW 是最明显和最简单的, 但是 H<sub>2</sub> 从液相中损失到大气中会限制这种处理的寿命, 需要定期给药。使用气态 H<sub>2</sub> 既危险(由于可燃性)又受时间限制, 因为它很容易从地面大气中逸出。由于分子氢研究的现代性, 大多数与 H<sub>2</sub> 干预对非生物胁迫引起的作物负面影响相关的研究都是基于实验室的, 尚未完成产量评估, 特别是在这些胁迫严重程度更高的田间条件下流行。因此, 在未来的研究中, 还应考虑分别在收获前和收获后阶段对工业中氢气应用的可行性进行成本效益分析, 无论是作物还是生产。农业和园艺的 H<sub>2</sub> 研究处于起步阶段, 目前生产成本相对较高。例如, 绿色氢气生产(通过电解)的范围在每公斤 1.25 美元到 10.90 美元之间, 具体取决于所使用的生成方法。然而, H<sub>2</sub> 可能会变得具有成本效益, 因为它被其他行业采用, 例如在运输和能源行业。在农业和园

艺中, 可以评估各种可能性以降低 H<sub>2</sub> 应用的劳动力成本。在这方面, 通过滴灌等灌溉系统应用氢气可以降低劳动力成本并确保均匀应用。因此, 基于 H<sub>2</sub> 的非生物胁迫缓解和收获后效益的未来进展完全依赖于农业规模的 H<sub>2</sub> 生产和 H<sub>2</sub> 输送的成本效益技术, 这在未来可能更具吸引力。总之, H<sub>2</sub> 处理在农业的许多阶段都是有益的, 从种子萌发、根系生长、收获后储存。当前和越来越多的研究文献支持 H<sub>2</sub> 对植物具有积极影响并且似乎没有有害生物影响的证据。H<sub>2</sub> 治疗的未来工作以及对 H<sub>2</sub> 如何在生理系统中相互作用的分子基础的全面了解至关重要, 如果要利用这种天然有效的化合物在商业基础上提高食品生产, 则需要进一步的研究投资。

## 参考文献:

- [1]Chandler SF, Brugliera F (2011) Genetic modification in foriculture. *Biotechnol Lett* 33:207 - 214.
- [2]Chen M, Cui W, Zhu K, Xie Y, Zhang C, Shen W (2014) Hydrogenrich water alleviates aluminum-induced inhibition of root elongation in alfalfa via decreasing nitric oxide production. *J Hazard Mater* 267:40 - 47.
- [3]Dong Z, Wu L, Kettlewell B, Caldwell CD, Layzell DB (2003) Hydrogen fertilization of soils— is this a benefit of legumes in rotation? *Plant Cell Environ* 26:1875 - 1879.
- [4]Duan Y, Wang GB, Fawole OA, Verboven P et al (2020) Postharvest precooling of fruit and vegetables: a review. *Trends Food Sci Technol* 100:278 - 291.
- [5]Gupta KJ, Kolbert Z, Durner J, Lindermayr C et al (2020) Regulating the regulator: nitric oxide control of post-translational modifications. *New Phytol* 227:1319 - 1325.
- [6]Hadley D (2009) Land use and the coastal zone. *Land Use Pol* 26:S198 - S203.
- [7]Jin Q, Zhu K, Cui W, Li L, Shen W (2016) Hydrogen-modulated stomatal sensitivity to abscisic acid and drought tolerance via the regulation of apoplastic pH in *Medicago sativa*. *J Plant Growth Regul* 35:565 - 573.
- [8]Kumar R, Banerjee R (2021) Regulation of the redox metabolome and thiol proteome by hydrogen sulfide. *Crit Rev Biochem Mol Biol* 56:221 - 235.
- [9]Li J, Yang L, Jin D, Nezames CD, Terzaghi W, Deng XW (2013) UVB-induced photomorphogenesis in *Arabidopsis*. *Protein. Cell* 4:485 - 492.
- [10]Munns R, Tester M (2008) Mechanism of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol* 59:651 - 681.
- [11]Ohsawa I, Ishikawa M, Takahashi K et al (2007) Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nat Med* 13:688 - 694.