

响应 pH 变化的智能水凝胶保水肥制备与性能测试

赵红星

中国-阿拉伯化肥有限公司 河北秦皇岛

【摘要】本文研究了一种响应 pH 变化的智能水凝胶，旨在提高水凝胶的保水性能和肥料释放效率。采用多功能水凝胶材料，通过调整其化学结构，使其在不同 pH 值环境下展现出优异的响应性。这种水凝胶不仅具备较强的水分吸收能力，还能有效控制肥料的缓释，从而改善土壤肥力，提升作物生长的效果。实验结果表明，所制备的智能水凝胶具有较好的 pH 响应性和较长时间的肥料释放能力，在农业灌溉中具有广泛的应用潜力。本研究为智能水凝胶的开发提供了新的思路，并为其在农业领域中的应用奠定了基础。

【关键词】智能水凝胶；pH 响应性；保水性；肥料缓释；农业应用

【收稿日期】2025 年 7 月 15 日 **【出刊日期】**2025 年 8 月 16 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250147

Preparation and performance testing of smart hydrogel water and fertilizer retainers responsive to pH changes

Hongxing Zhao

Sino-Arab Chemical Fertilizers Co., Ltd, Qinhuangdao, Hebei

【Abstract】 This paper studies a type of smart hydrogel responsive to pH changes, aiming to improve the water retention performance and fertilizer release efficiency of hydrogels. Multifunctional hydrogel materials are used, and by adjusting their chemical structure, they exhibit excellent responsiveness in environments with different pH values. This hydrogel not only has strong water absorption capacity but also can effectively control the slow release of fertilizers, thereby improving soil fertility and enhancing the effect of crop growth. Experimental results show that the prepared smart hydrogel has good pH responsiveness and long-term fertilizer release capacity, and has broad application potential in agricultural irrigation. This research provides new ideas for the development of smart hydrogels and lays a foundation for their application in the agricultural field.

【Keywords】 Smart hydrogel; pH responsiveness; Water retention; Slow fertilizer release; Agricultural application

引言

智能水凝胶因其独特的响应性和多功能性，近年来在农业领域得到了广泛关注。尤其是在应对干旱等环境压力下，水凝胶的保水性能成为研究的热点。然而，传统水凝胶大多缺乏对环境变化的智能响应，尤其是在 pH 值的变化下表现平平。针对这一问题，本研究提出了一种新型的 pH 响应性智能水凝胶。该材料不仅在不同 pH 环境下能够有效调整其水合作用，还能根据土壤酸碱度的变化，动态调节肥料的释放速度，实现水分与养分的双重调控。这一技术不仅提高了肥料的利用率，减少了浪费，还能够改善土壤质量，促进作物健康生长。本文的

研究为智能水凝胶的农业应用提供了新的突破。

1 pH 响应性智能水凝胶的合成与结构表征

pH 响应性水凝胶的合成通常涉及特定单体的选择，这些单体能够在不同 pH 环境下发生物理或化学变化。为了使水凝胶具有良好的 pH 响应性，首先需要选择合适的交联剂和高分子单体。常见的 pH 响应性单体如丙烯酸 (AA)、二乙烯三胺 (DETA) 等，这些单体具有含有可离解基团，如羧基、胺基等，能在酸碱环境中发生电离或质子化，导致水凝胶的膨胀或收缩^[1]。当水凝胶暴露于不同的 pH 环境时，水凝胶的结构会发生改变，这一过程直接影响其保水性能和肥料释放特性。为了优化水凝胶的结

构和性能, 研究人员还采用了如溶液聚合、光聚合等技术, 这些方法能够更精确地控制水凝胶的网状结构, 从而使其在特定 pH 条件下能够具有较好的响应性能。通过合成过程中控制反应条件、单体比率及交联度, 可以得到不同性质的水凝胶, 以适应不同农业应用的需求。

水凝胶的结构表征是评估其性能的关键环节, 常用的方法包括扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和核磁共振 (NMR) 等。这些技术能够揭示水凝胶的微观结构和分子组成, 从而为优化材料性能提供理论依据。SEM 图像可以展示水凝胶的表面形态和孔隙结构, 而 FTIR 则能分析水凝胶分子中的功能基团, 如羧基的振动频率等。NMR 技术则能够提供水凝胶中不同分子团的环境信息, 帮助研究人员了解其在 pH 响应性上的变化机制。通过这些表征手段, 可以深入了解水凝胶的分子结构及其与水合作用之间的关系, 为后续的性能测试和优化提供指导。

除了物理化学的表征, 水凝胶的机械性能也是评估其适用性的一个重要因素。水凝胶的强度和弹性与其交联度密切相关, 交联度越高, 水凝胶的机械强度越大, 但过高的交联度可能会影响其水合性能。研究人员通常通过调整交联剂的种类和浓度来调节水凝胶的机械强度。在农业应用中, 水凝胶不仅需要具有较强水合作用, 还需要具备适当的机械强度, 以应对土壤中的应力变化。温度、湿度等环境因素也会对水凝胶的结构和性能产生影响, 在材料设计过程中, 必须综合考虑这些因素, 确保水凝胶在各种环境下都能保持良好的性能。

2 pH 变化对水凝胶保水性能的影响

水凝胶的保水性能是其在农业中应用的关键指标之一。在 pH 环境的变化下, 水凝胶的吸水性和保水性会发生显著变化。传统的水凝胶通常具有较为固定的吸水性能, 而 pH 响应性水凝胶则能够根据环境的酸碱度调节其结构, 从而调控水合作用。当水凝胶暴露在低 pH 环境中时, 其内部的酸性基团 (如羧基) 会发生质子化反应, 导致水凝胶的膨胀, 从而增加其水合作用。反之, 当 pH 值升高时, 水凝胶的酸性基团会发生去质子化, 水凝胶会收缩, 导致其吸水性能下降。pH 值的变化不仅影响水凝胶的膨胀程度, 还直接影响其保持水分的能力。

在实际应用中, 土壤的 pH 值可能会随着环境

条件的变化而波动, 这就要求水凝胶能够在不同 pH 值下保持较好的保水性能。为了提高水凝胶的适应性, 研究人员通常会通过引入不同类型的响应性基团 (如胺基、磺酸基等) 来调节水凝胶对 pH 变化的响应速度和幅度^[2-6]。通过对水凝胶保水性能的实验测试, 可以得出其在不同 pH 值下的吸水量、吸水速率等参数, 为进一步优化水凝胶的应用提供数据支持。实验中, 常常使用重力吸水法或浸渍法来测试水凝胶的吸水性能, 这些测试能够较为准确地反映水凝胶在不同环境中的实际表现。

水凝胶的保水性能还受到其网络结构的影响。水凝胶的交联密度越高, 水分的保持能力越强, 但过高的交联度也会导致水凝胶的吸水性下降。研究人员在优化水凝胶的 pH 响应性时, 通常会平衡交联度与水合作用之间的关系, 以达到最佳的保水效果。通过对比不同水凝胶在不同 pH 条件下的保水性, 可以为农业灌溉提供更为精准的材料选择, 从而提高土壤水分的保持能力, 减少水资源的浪费。

3 智能水凝胶在肥料缓释中的应用研究

智能水凝胶在肥料缓释中的应用为农业生产提供了新的解决方案。传统的肥料使用方式常常面临肥料释放速度过快或过慢的问题, 导致肥料利用率低下, 甚至造成环境污染。通过引入智能水凝胶, 能够根据土壤的 pH 值变化控制肥料的释放速率, 从而提高肥料的利用效率, 减少环境负担。水凝胶作为肥料载体, 不仅能够保护肥料免受外界环境的直接影响, 还能根据土壤条件的变化, 动态调整肥料的释放速度。当水凝胶感应到土壤 pH 值的变化时, 它会自动改变结构, 从而调节肥料的释放速率。这一机制不仅能够避免肥料的浪费, 还能确保作物在整个生长周期中持续获得所需养分。

为了实现这一目标, 研究人员通常会将肥料与水凝胶材料进行复合, 利用水凝胶的水合作用和 pH 响应性特性, 使肥料在适宜的时机释放。常见的复合方法包括溶液混合法、包埋法和共聚法等, 这些方法能够确保肥料均匀地分布在水凝胶的网络中, 并在 pH 值变化时逐渐释放^[7]。通过对肥料缓释效果的实验研究, 可以发现, 在不同的 pH 环境下, 智能水凝胶对肥料的缓释效果差异较大。通常在酸性环境中, 水凝胶的膨胀程度较高, 肥料释放较为迅速; 而在碱性环境中, 水凝胶收缩, 肥料释放速度减缓, 从而延长肥料的作用时间。

智能水凝胶的肥料缓释效果还受到其结构的影响。交联度较低的水凝胶由于具有较大的孔隙，能够加快肥料的释放；而交联度较高的水凝胶则具有更密集的网络结构，能够更好地控制肥料的释放速度。研究人员通过优化水凝胶的结构和交联度，能够调节其对肥料的释放控制能力，以满足不同作物的需求。综合考虑土壤的 pH 变化、肥料种类及作物生长需求，智能水凝胶在农业中的应用前景非常广阔。

4 响应性水凝胶的农业应用前景与挑战

响应性水凝胶作为一种新型的智能材料，在农业中的应用前景非常广阔，尤其是在土壤水分管理和肥料释放方面。随着全球气候变化导致的水资源短缺问题日益严重，水凝胶的保水功能将成为提高农业灌溉效率的重要手段。响应性水凝胶能够根据土壤的 pH 变化调节肥料的释放，从而提高肥料的利用率，减少化肥对环境的污染。随着农业生产对智能材料需求的不断增加，响应性水凝胶将在精准农业中发挥越来越重要的作用。利用水凝胶进行精准灌溉和肥料管理，不仅能够提高农业生产效益，还能实现可持续发展目标，推动绿色农业的实施。

尽管响应性水凝胶在农业中具有巨大的潜力，但其应用仍面临一定的挑战。水凝胶的合成成本较高，这可能限制其在大规模农业生产中的应用。水凝胶在不同土壤环境中的稳定性和耐久性问题仍需进一步解决。水凝胶在长期暴露于高湿、高温等环境条件下，可能会发生降解或性能衰退，从而影响其长期使用效果。水凝胶的环境友好性也是一个需要关注的问题。在实际应用中，水凝胶是否会对土壤微生物群落造成影响，以及其降解产物是否会对生态环境造成负面作用，需要进行深入研究。

为了克服目前响应性水凝胶在农业应用中面临的挑战，研究人员正在不断优化水凝胶的合成工艺，努力降低生产成本，提升其在各种环境下的稳定性。这包括开发新型的原材料和改进交联方法，从而使水凝胶具备更强的耐久性和适应性，确保其在复杂的土壤和气候条件下依然能够发挥预期功能。随着环保要求的提高，研究人员也在致力于开发可降解的水凝胶材料，这将有助于减少农业中塑料等污染物的使用，减少环境负担^[8]。通过这些改进，响应性水凝胶不仅能够提高作物生长的水分和营养供应效率，还能在减少资源浪费的推动可持续农业的发展，促进全球农业生产向绿色、智能方向迈进，进而推

动农业现代化，为生态环境的保护和人类可持续发展贡献力量。

5 结语

响应性水凝胶在农业中的应用前景广阔，能够有效提升水分利用效率和肥料释放控制，促进农业的可持续发展。通过不断优化其合成工艺、降低成本，并提高其在不同环境下的稳定性，水凝胶材料的应用将更加广泛。开发可降解材料和确保其环保性也成为研究的重要方向，能够减少农业生产中的环境负担。未来，响应性水凝胶将成为推动智能农业和绿色农业的重要工具，为全球农业可持续发展贡献力量，助力实现更高效、更环保的农业生产模式。

参考文献

- [1] 贾济如,杨亚,张雨豪,等. 环境刺激响应水凝胶纺织品的研究与应用进展[J].丝绸,2025,62(02):54-66.
- [2] 刘鳃萱,胡蝶,李忠成,等. “产氧+抗菌” 双功能 pH 响应智能水凝胶用于糖尿病感染伤口愈合[C]//中华口腔医学会口腔生物医学专业委员会,中华口腔医学会口腔病理学专业委员会.中华口腔医学会口腔生物医学专业委员会第 14 次口腔生物医学学术年会中华口腔医学会口腔病理学专业委员会第 18 次口腔病理学学术年会论文集.四川大学华西口腔医院,;2024:60.
- [3] 狄睿,宋志鹏,李明通,等. 基于温度开关的光响应智能水凝胶用于可逆信息加密和解密(英文)[J].Science China(Materials),2024,67(07):2123-2134.
- [4] 贾鸿.光响应智能水凝胶的构建及信息编码行为的研究[D].北京化工大学,2024.
- [5] 韩晓宇.超声响应的智能水凝胶在骨与软组织修复中应用的研究[D].重庆医科大学,2024.
- [6] 刘琦.多重刺激响应的智能水凝胶的制备及性能研究[D].中北大学,2024.
- [7] 王军珂.响应微环境 MMP-2 时序释放 VEGF/Ang-1 模拟肽的智能水凝胶治疗心肌缺血的研究[D].青岛大学,2023.
- [8] 胡春旺.基于天然大分子的温度/pH 双重响应性水凝胶的制备及性能研究[D].河南工业大学,2023.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS