

复合吸湿凝胶制备优化及其在干旱-半干旱地区的生态修复应用

谭思祺, 周建伟, 弓永峰, 李冉, 冯海波

Optimization of composite atmospheric hygroscopic gel preparation and its application in ecological restoration in arid-semi-arid regions

TAN Siqi, ZHOU Jianwei, GONG Yongfeng, LI Ran, and FENG Haibo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究

An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials

喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 李明, 李伟, 宋泽卓 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 174-181

长江经济带江苏段废弃露天矿山分布与生态修复遥感调查研究

Distribution and ecological restoration of abandoned open-pit mines in Jiangsu section of the Yangtze River Economic Belt

李丽, 杨金中, 陈栋, 于航, 邢宇, 汪洁 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 183-190

半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14

旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位-水量”双控技术

Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas

刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 刘少玉, 聂振龙 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 42-51

基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面积关系研究

A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW

郭云彤, 周妍, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 32-41

保定平原区地下水生态水位阈值的探讨

Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area

靳博文, 王文科, 段磊, 马稚桐, 王一, 黄鑫慧 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 166-175



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502049

谭思祺, 周建伟, 弓永峰, 等. 复合吸湿凝胶制备优化及其在干旱-半干旱地区的生态修复应用 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 39-49.

TAN Siqi, ZHOU Jianwei, GONG Yongfeng, et al. Optimization of composite atmospheric hygroscopic gel preparation and its application in ecological restoration in arid-semi-arid regions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 39-49.

复合吸湿凝胶制备优化及其在干旱-半干旱地区的生态修复应用

谭思祺¹, 周建伟², 弓永峰³, 李冉², 冯海波⁴

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078; 3. 宁夏回族自治区自然资源厅/国土资源调查监测院, 宁夏银川 750002; 4. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078)

摘要: 水资源匮乏是限制干旱-半干旱地区生态修复效果的主要原因, 吸附式空气取水技术在解决生态修复植物需水问题方面展现出极大潜力, 但目前该领域应用研究相对较少。通过将异丙基丙烯酰胺(N-isopropylacrylamide, NIPAM)和丙烯酰胺(acrylamide, AM)共聚成新型复合凝胶并负载吸湿盐, 测试凝胶配比对其吸水与释水性能的影响以及在不同温度和光照条件下的性能及野外产水表现。结果表明: 当 NIPAM : AM 质量比为 1 : 1.5 时复合凝胶的吸附与释水性能达到平衡, 综合产水量最高, 溶胀率达到 24.7 g/g 的同时可实现 75.3% 的释水, 比聚-异丙基丙烯酰胺凝胶的产水量增加了 31.3%; 在温度 20 °C, 相对湿度 50% 条件下, 复合凝胶负载的吸湿盐 CaCl₂ : LiCl 摩尔比为 1 : 7 时, 吸湿量最高, 为负载纯 LiCl 凝胶的 1.14 倍, 且在相对湿度 30% ~ 100% 条件下均可吸湿。将以上优化后的复合吸湿凝胶应用于干旱-半干旱地区矿山生态修复工程中, 夏季日均产水量约为 0.74 g/g, 当用量在 14.1 ~ 17.6 g 时可弥补基于彭曼公式计算的植物生态需水量缺口, 验证了应用的可行性。

关键词: 生态修复; 空气取水技术; 复合吸附剂; 水凝胶; 生态需水量

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0039-11

Optimization of composite atmospheric hygroscopic gel preparation and its application in ecological restoration in arid-semi-arid regions

TAN Siqi¹, ZHOU Jianwei², GONG Yongfeng³, LI Ran², FENG Haibo⁴

(1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
2. School of Environment, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430078, China;
3. Department of Natural Resources of Ningxia Hui Autonomous Region / Land Resources Survey and Monitoring Institute, Yinchuan, Ningxia 750002, China; 4. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430078, China)

收稿日期: 2025-02-18; 修订日期: 2025-05-08

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BEG02051); 宁夏回族自治区矿山地质环境监测与生态修复创新团队项目(2022BSB03106)

第一作者: 谭思祺(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山地质环境生态修复研究。E-mail: tansiqit47@cug.edu.cn

通讯作者: 冯海波(1990—), 女, 博士, 副教授, 主要从事矿山地质环境生态修复研究。E-mail: haibo_feng@cug.edu.cn

Abstract: Water scarcity in arid and semi-arid regions is a critical constraint on the effectiveness of ecological restoration efforts. Adsorptive atmospheric water harvesting (AWH) technologies have emerged as promising tools to alleviate plant water stress in such environments; however, their application in ecological restoration remains underexplored. This study co-polymerized NIPAM and AM to form a new composite gel and loaded it with hygroscopic salts to test the effects of gel ratios on the water absorption and release properties, as well as the performance under different temperature, humidity and light conditions, and water production in the field. The results show that the composite gel with NIPAM : AM mass ratio of 1 : 1.5 had the optimal balance between water adsorption and water release, with the dissolution rate reached 24.7 g/g, while 75.3% of water release could be realized, which was 31.3% more than the water production of the PNIPAM gel. Under the condition of temperature 20 °C and relative humidity (RH) 50%, the composite gel loaded with hygroscopic salt CaCl₂ : LiCl molar ratio of 1 : 7 has the highest hygroscopicity, which is 1.14 times that of the loaded pure LiCl gel, and can be hygroscopic under the condition of 30%–100% RH. The above optimized composite hygroscopic gel was applied to the ecological restoration project of mines in arid-semi-arid areas. The average daily water yield in summer was about 0.74 g/g, which could make up for the shortfall of the ecological water demand of plants based on Penman's formula when the dosage was in the range of 14.1–17.6 g. The results confirm the feasibility of the application.

Keywords: ecological restoration; air water extraction technology; composite adsorbent; hydrogel; ecological water demand

干旱-半干旱地区生态系统较为脆弱,对环境因素的变化十分敏感^[1],在全球气候变暖与高强度人类活动的叠加效应下,当地的生态环境问题日益突出,原有的天然植被群落和土壤结构遭受了严重破坏并产生了诸多生态环境问题^[2]。生态修复作为改善生态环境的重要手段,通过地形改造^[3-4]、植被种植^[5]、土壤改良^[6-7]、水土保持^[8]等人工措施,能够有效促进生态系统的结构和功能恢复。但在干旱-半干旱地区,修复植物的生长存活受制于水资源短缺,直接影响了生态修复成效^[9]。虽然人工的管护手段可保证前期效果,但存在水资源消耗量大、后期管护困难、修复成本高等问题^[9-10],同时在自然状态下的死亡率较高,最终导致修复工程失败。

大气集水技术可通过获取空气中的水分产生清洁水,受地理位置和地形条件限制较小,在补充植物生存需水方面具有巨大的潜力^[11-12]。主要研究方向为取代传统淡水开采或生产方式,向缺乏淡水资源的地区提供生产生活所用的水^[13]。但在生态修复领域则因野外的地形及环境温湿度条件复杂且制水成本较高而难以实施^[14],目前相关研究较少。

现有的大气集水技术可依据原理分为:被动式聚雾取水法^[15]及主动制冷结露法^[16]和吸附法^[17],其中吸附法由于其气候适应性广,能耗低的优点被重点研究。其原理为:空气与吸湿材料接触时,吸湿剂吸附储存空气中的水汽,后利用光热释放水,最后通过冷

凝转变成液滴,实现水的收集^[18-19]。为实现更高效率的产水,开发高性能吸附材料是吸附法研究的重点^[20]。典型的吸附材料主要包括多孔材料类^[21]、吸湿盐类^[22]、金属-有机框架材料类^[23]及复合材料类^[11,22]等。复合吸湿材料通过材料特性互补避免盐的液解现象出现,提升吸附容积的同时使材料能够长期维持较高吸附速率^[24-25],但在苛刻的环境条件下取水性能受限。同时在传统的吸附取水方式里,水分子要先后经历吸附、蒸发以及冷凝3个环节,并且会伴随3次相态的转变^[26],使得整个过程中的能量损耗较大。温敏性材料在释水过程中无需经历蒸发和冷凝过程直接生成液态水^[27-28]。本文创新性地将温敏性材料与吸湿盐结合制备新型吸湿凝胶,提升其吸湿性能的同时降低释水过程的能量损耗,从而提升制水效率;将吸附取水法与干旱-半干旱地生态修复工程结合,使其可以利用吸附循环为干旱-半干旱地区生态修复植物持续提供水分补给,促进生态环境持续恢复逐渐与周边环境融合。研究分为3个阶段。

1 试验方法

1.1 试验材料

聚-异丙基丙烯酰胺 (poly-N-isopropylacrylamide, PNIPAM)具有热响应性,在低于其临界温度时分子呈螺旋结构,具有亲水性;而当超过临界温度,分子形态变为小球状并变为疏水性,结构收缩且释放其中的水

分子^[29-30]。而由于其内部含有疏水的异丙基(烷基)基团导致 PNIPAM 凝胶的溶胀率较低^[31], 因此选用具有亲水基的丙烯酰胺单体^[32]和异丙基丙烯酰胺共聚, 提升复合凝胶的溶胀率, 再加入吸湿盐和吸光导热物质, 合成复合凝胶。

异丙基丙烯酰胺(NIPAM, 98%)、丙烯酰胺(AM, 98%)、引发剂过硫酸铵(APS, 98%)、交联剂 N,N-亚甲基双丙烯酰胺(MBA, 99%)、催化剂 N,N,N',N'-四甲基乙二胺(TEMED, 99%)、氯化钙(CaCl₂, 99%)、氯化锂(LiCl, 99%)和纳米碳粉(99.5%, 30 nm)均购自上海麦克林生化科技有限公司, 试验过程均使用超纯水。

1.2 复合大气吸湿凝胶制备

通过共聚反应合成复合凝胶。将总重 0.5 g 的 AM 和 NIPAM 分散在 5 mL 水中超声 10 min 溶解, 加入纳米碳粉 0.2 g, 搅拌和超声 20 min, 使其分散均匀得到混合悬浮液。迅速加入 32 mg MBA、25 mg APS 和 10 μL TEMED 后超声 20 min, 再静置 12 h 得到复合凝胶。将复合凝胶经过超纯水多次浸泡和冲洗以清除残留的未反应单体, 放入足量的超纯水中, 48 h 使其充分溶胀, 取出冷冻后定形, 再使用真空冷冻干燥箱处理 24 h, 再转移浸泡吸湿盐溶液 48 h, 取出后用鼓风机干燥箱 80 °C 干燥 24 h, 得到复合吸湿凝胶(图 1)。

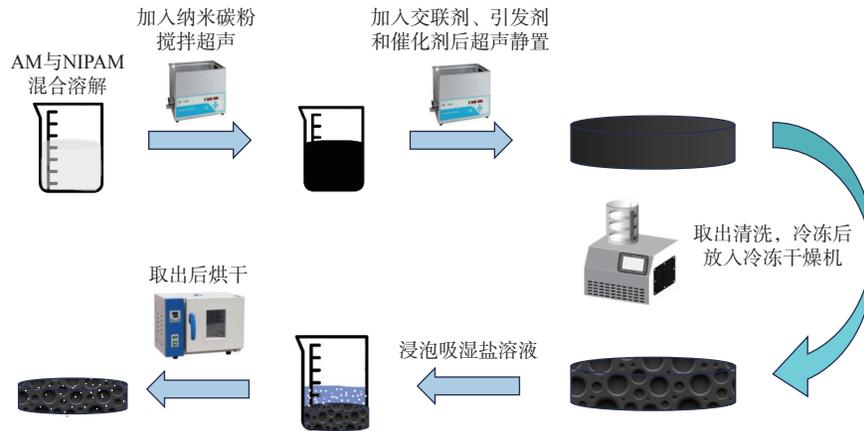


图 1 复合吸湿凝胶制备流程图

Fig. 1 Preparation process of composite hygroscopic gel

1.3 凝胶性能测试

在生态修复过程中, 复合大气吸湿凝胶本身的亲水、吸附及释水性能及吸湿循环性能是决定凝胶能否在工程中实际产水的关键。

(1) 亲水性测试

材料的亲疏水性可通过接触角测试评估。液滴落在凝胶表面时, 将固-液界面的切线与气-液界面的切线间的夹角称为接触角。本文通过接触角测量仪(KRUSS, DSA100S)测试。取一块冷冻干燥后的凝胶, 将其切成平整薄片黏到载玻片上, 再将载玻片放于仪器的样品台上。记录 5 μL 去离子水滴落在凝胶表面的过程中不同时间的接触角, 测量结果由“椭圆切线法”校正。

(2) 溶胀率测试

凝胶的吸水容量通过溶胀率测试评估。溶胀率通过称重法计算。取一块烘干至恒重的凝胶称重得质量 M_0 。在去离子水中浸泡至溶胀平衡后进行过滤称重得到质量 M 。根据式(1)得到溶胀率(C):

$$C = M/M_0 \quad (1)$$

(3) 释水率测试

凝胶能够释放水的比例通过释水率评估。利用称重法取一块烘干至恒重的复合凝胶称重得质量 M_0 。放入人工气候箱中达到吸附平衡后称重得到质量为 M_1 。将其置于光照度 15×10^4 LUX、温度 25 °C 人工气候箱中, 12 h 后称重得到质量 M_2 。根据式(2)得到释水率(R):

$$R = (M_1 - M_2)/(M_1 - M_0) \quad (2)$$

(4) 载盐量测试

凝胶负载吸湿盐的能力通过载盐量评估, 利用称重法计算。取一块真空冷冻干燥后的凝胶称重得质量 M_0 。在吸湿盐溶液中浸泡达到质量平衡后, 过滤彻底烘干进行称重, 得质量 M 。根据式(3)得到载盐量(S):

$$S = (M - M_0)/M_0 \quad (3)$$

(5) 吸湿速率测试

通过吸湿速率表现凝胶吸附水汽的能力。利用

人工气候箱制造恒温恒湿密闭环境,控制不同温湿度。取一块烘干后的凝胶称重得质量 M_0 ,置于箱中开始吸附过程,并使用电子天平间隔固定时长称重记录凝胶的质量 M 变化。根据式(4)得到吸湿速率(W):

$$W = (M - M_0) / (M_0 \cdot t) \quad (4)$$

(6) 循环性能测试

通过对凝胶进行多次吸附-释放的循环试验,测试复合吸湿凝胶的吸水性能、释水性能变化及材料损耗,探究复合吸湿凝胶的循环性能。

2 结果与分析

2.1 凝胶配比的影响

本节将 AM 与 NIPAM 按比例混合共聚反应制得复合凝胶,质量比如表 1 所示,复合凝胶的溶胀率和释水比例如图 2 所示。

表 1 复合凝胶内的质量比例
Table 1 Mass ratio within the composite gel

序号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
NIPAM 占比/%	100	66.7	60	50	40	33.3	0
AM 占比/%	0	33.3	40	50	60	66.7	100

随着 AM 比例的增长,复合凝胶的溶胀率逐渐上升,而释水比例则下降。表明通过和具有亲水酰胺基团的 AM 共聚后,含有较多 AM 形成的凝胶网络能与更多的水结合^[33-34],通过减小释水比例极大地提升了亲水性和溶胀率,复合凝胶在冷冻干燥后可产生更多孔隙负载吸湿盐。当 NIPAM 与 AM 质量比为 1:1.5 时,溶胀率达到 24.72 g/g 的同时,释水比例达到 75.3%,此时综合产水量最高约为 18.6 g/g,比 PNIPAM 的平均产水量 14.4 g/g 增加了 31.3%。后文复合凝胶均采用此比例。

图 3、图 4 为复合凝胶与 PNIPAM 凝胶的动态接触角测试图像,1 s 后复合凝胶的接触角为 95.3°,而 PNIPAM 的接触角为 120.4°;10 s 后复合凝胶的接触角为 39.3°,PNIPAM 的接触角为 82.1°。10 s 时复合凝胶剩余的液滴体积更小,证明复合凝胶亲水性更强。

利用 SEM 对复合凝胶的形貌和微观结构进行表征,其内部形貌结构见图 5。放大倍数为 500 倍,观察可知复合凝胶内部显示出多孔结构,孔径范围在 5~20 μm 之间,这种结构不仅有利于吸湿盐的负载和水分子的快速扩散,还显著增加了材料的比表面积,为复合吸湿凝胶实现高效吸湿性奠定了结构基础。

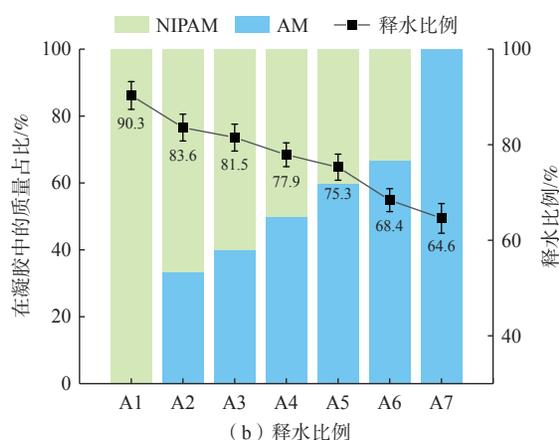
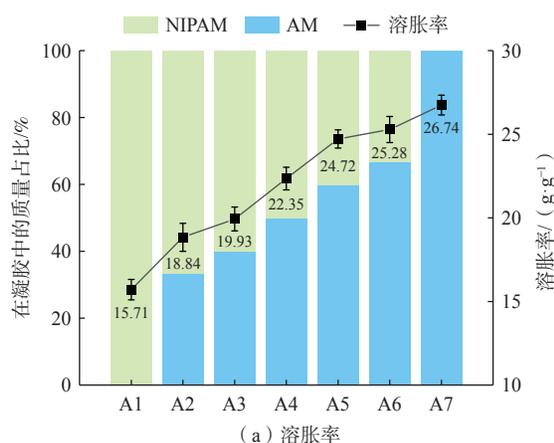


图 2 不同比例凝胶的溶胀率和释水比例

Fig. 2 Dissolution rates and water release ratio of different proportions of gels



图 3 复合凝胶的动态接触角

Fig. 3 Dynamic contact angle of composite gels



图 4 纯 PNIPAM 凝胶的动态接触角

Fig. 4 Dynamic contact angle of pure PNIPAM gel

2.2 吸湿盐组分的影响

2.2.1 吸湿盐浓度

通过浸渍负载将大量的吸湿盐分散于复合凝胶的孔道中,凝胶内的羰基氧(C=O)与钙离子和锂离子发生配位作用将其固定,可大幅提升凝胶的吸湿性能^[35]。本节将冷冻干燥后的凝胶分别浸泡 3~5 mol/L 的 LiCl 溶液,测试凝胶浸泡不同浓度盐溶液后的载盐量及相

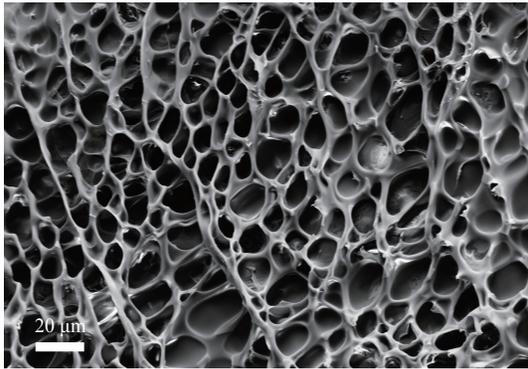


图 5 复合凝胶的 SEM 图

Fig. 5 SEM image of the composite gel

对湿度 50%、温度 20 °C 下的平衡吸附量, 结果如图 6 所示。凝胶的载盐量及吸附量随着盐溶液浓度的上升而增加, 当溶液浓度为 4.5 mol/L 时载盐量与吸附量达到最大。但由于负载盐的过程中过高的盐溶液浓度会抑制水及盐离子向凝胶内迁移扩散, 在超过 4.5 mol/L 后吸湿量虽有上涨但载盐量出现下降。当浓度从 3.5 mol/L 提升至 4.0 mol/L 时, 载盐量和吸附量分别提升了 12% 和 16%, 而 4.0 mol/L 提升至 4.5 mol/L 时载盐量增长仅有 4.3%。综合经济性考虑, 后续盐溶液浓度均采用 4 mol/L。

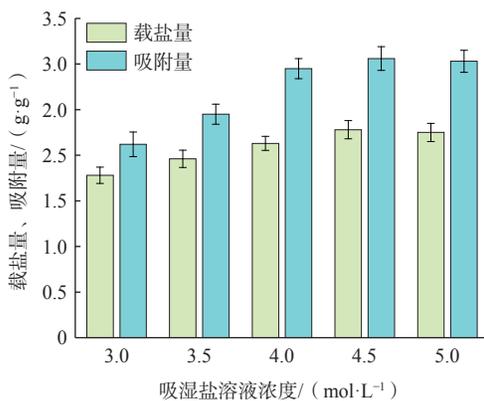


图 6 复合凝胶浸泡不同浓度吸湿盐溶液后的载盐量及吸附量

Fig. 6 Salt loading and adsorption of composite gels after immersion in hygroscopic salt solutions of different concentrations

2.2.2 吸湿盐比例

当 2 种盐具有相同或相似的离子、电荷以及晶格能时, 在混合后可能会在盐的晶格中引入缺陷, 使得原本较为有序的晶格结构变得不稳定, 从而降低晶体的纯度并改变盐的溶解性、腐蚀性等理化性质^[25, 35-36]。在复合吸湿凝胶中负载 2 种氯盐, 在增强吸湿能力的同时有助于防止吸湿盐的泄漏。

本节将 CaCl₂ 与 LiCl 按不同摩尔比(表 2)混合溶

解为 4 mol/L 的吸湿盐溶液。浸渍冷冻干燥后制成凝胶。测试复合吸湿凝胶的吸附速率及平衡吸附量, 探究二元盐的配比对复合吸湿水凝胶空气取水性能的影响, 结果如图 7—8 所示。

表 2 吸湿盐的比例

Table 2 Ratio of hygroscopic salt

序号	S1	S2	S3	S4
CaCl ₂ : LiCl(摩尔比)	1 : 4	1 : 7	1 : 9	0 : 1

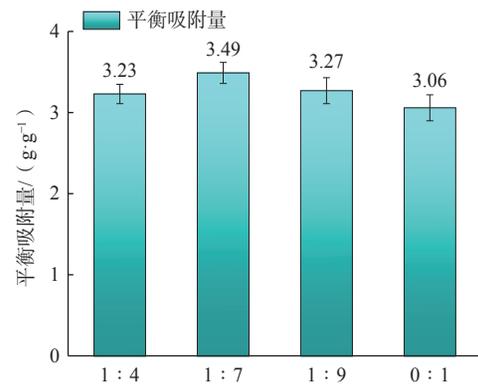


图 7 不同比例吸湿盐凝胶的平衡吸附量

Fig. 7 Equilibrium adsorption of different ratios of hygroscopic salt gels

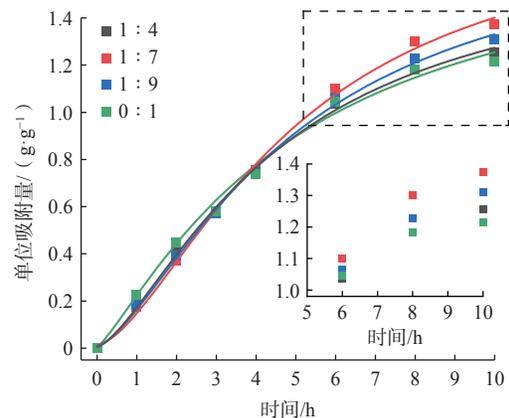


图 8 不同比例吸湿盐凝胶的吸附速率

Fig. 8 Adsorption rates of different ratios of hygroscopic salt gels

从图 7 中可以看出, 在相对湿度 50%, 温度 20 °C 下, 各负载二元吸湿盐的凝胶平衡吸附量均高于负载纯 LiCl 的凝胶。S2 平衡吸附量最高达 3.49 g/g, 比纯 LiCl 的平衡吸附量高 14%。凝胶吸附速率随时间增长而减小, 各个凝胶前 4 h 的吸附量相近, 相差幅度在 5% 以内, S2 有些微领先; 当吸附 6 h 后, 除 S2 以外的其余凝胶的吸附速率下降幅度较大, 吸附量逐渐拉开差距, S2 与最低的 S4 相比吸附量相差 0.08 g/g, S2 的吸湿盐比例更适合吸附水合氯化锂表面的液滴, 能充

分发挥 LiCl 的吸湿性能。

2.3 凝胶循环性能

在循环试验中复合吸湿凝胶展现出良好的吸附性能和释水性能, 每个循环中的吸水及释水质量相近, 吸附性能在第 10 次循环略微降低但质量仍可以达到 98.8%; 释水性能在 10 次循环中存在波动, 但波动较小, 第 10 次循环中有 74.4% 的水释放。吸附性能与释水性能无明显下降, 表明其物理性质稳定, 具有较高的重复使用性。

2.4 环境因素的影响

将筛选优化后的复合吸湿凝胶放置在人工气候箱内, 控制温度、相对湿度及光强的改变, 对吸附及释水过程进行监测。

2.4.1 温度和湿度对吸附过程的影响

将凝胶分别放置在 5~20 °C、30%~90% 及过饱和湿度条件下, 测量其 6 h 吸附量并利用 3D smoother 绘图。其结果如图 9 所示, 可以看出温度相同时, 高相对湿度下的凝胶吸附速率显著超过低湿度; 气温为 5 °C 时, 相对湿度 30%~90% 及过饱和条件下的吸附量分别为 0.55, 0.98, 1.59, 2.54, 4.68 g/g, 最大相差可达 8.5 倍; 而保持相对湿度相同时, 温度的影响则较小, 5~20 °C 差距均在 7% 以内。原因是相对湿度为空气实际水汽含量与该温度饱和水汽含量的比值, 而饱和水汽含量即空气在水蒸气饱和状态下的最大持水能力, 随空气温度的上升呈加速上升, 20 °C 以下增速较缓, 因而实际水汽含量差距较小, 环境相对湿度对凝胶的吸附速率起主要影响作用。

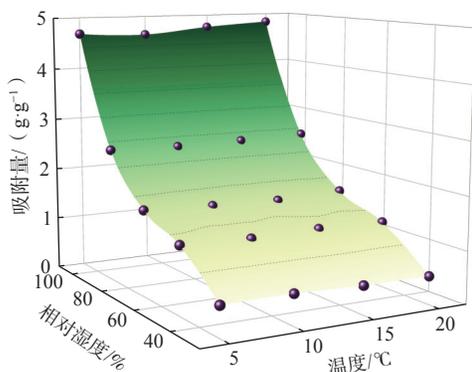


图 9 复合吸湿凝胶在不同环境条件下的 6 h 吸附量

Fig. 9 Equilibrium adsorption of composite hygroscopic gels under different environmental conditions

复合吸湿凝胶在不同相对湿度中的吸附速率见图 10。各湿度中的凝胶吸附速率具有迅速升高再逐渐下降的规律。相对湿度 90% 中的凝胶直到 4 h 凝胶

吸附速率才开始降低, 且仍能保持较高水平; 而相对湿度 30% 和 50% 的凝胶在 2 h 时凝胶吸附速率停止增长。

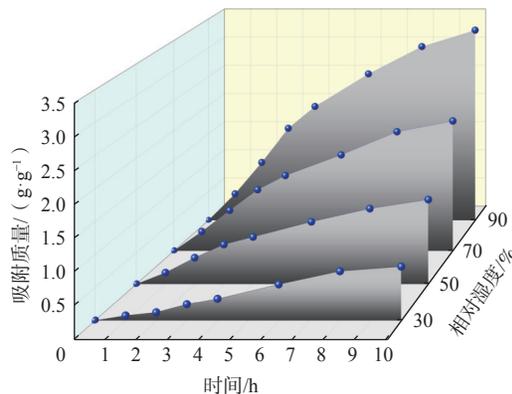


图 10 复合吸湿凝胶在不同湿度下的吸附速率

Fig. 10 Adsorption rate of composite hygroscopic gel under different humidity conditions

2.4.2 光强和温度对释水过程的影响

吸附至平衡的复合吸湿凝胶在相对湿度 50%、温度 25 °C、光强 15×10^4 LUX 下的温度变化及含水率变化见图 11。由图可以看出, 凝胶释水过程分为 2 个阶段: 第一阶段凝胶在光照后, 温度迅速上升至 30.4 °C 左右, 伴随分子结构变化凝胶体积收缩, 大量液滴渗出带走热量, 温度上升缓慢; 第二阶段当凝胶中的剩余水量降低后水难以释放, 由于无法挥发热量, 凝胶的温度进一步上升至 35 °C, 过程中伴随有较少的水释放。

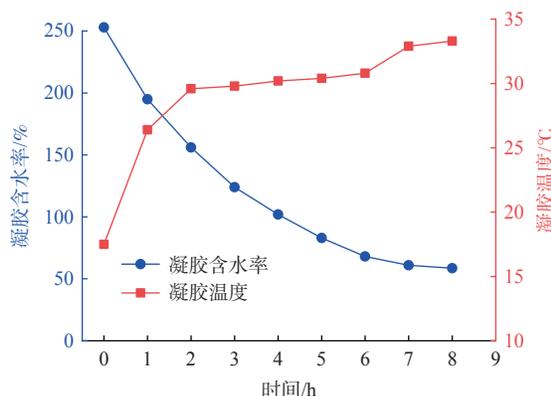


图 11 凝胶温度和含水率在 25 °C、光强 15×10^4 LUX、相对湿度 50% 条件下的变化

Fig. 11 Gel temperature and water content with light intensity of 15×10^4 LUX, 25 °C and RH of 50%

设置人工气候箱温度为 20, 25, 30, 35 °C, 光强为 9×10^4 , 12×10^4 , 15×10^4 LUX 进行释水试验, 放入达到吸附平衡的复合吸湿凝胶 20 g, 间隔 30 min 称重, 记录不

同光照和温度条件下凝胶达到平衡质量的时长和释水比例(表 3)。

表 3 不同温度和光强下的释水比例

Table 3 Percentage of water release at different temperatures and light intensities

光强/(10^4 LUX)	释水比例/%			
	35 °C	30 °C	25 °C	20 °C
9	68.4	63.8	46.7	41.5
12	71.0	68.6	61.4	56.1
15	71.3	70.9	66.3	57.2

光强和气温共同决定凝胶释水温度的时长及释水比例, 当光照强度为 15×10^4 LUX 时, 各温度下凝胶的释水时长均小于 6 h, 说明其能够使凝胶快速升温至临界温度后大量释水, 释水时间随环境温度的升高而减少(图 12)。当光照强度为 9×10^4 LUX 时, 凝胶在 20 °C 及 25 °C 的释水比例不足 50%, 这是由于环境温度较低且光照强度低, 在升温过程中光照产生热量的速度小于散失给环境的温度, 凝胶到达某一温度后无法进一步释水。

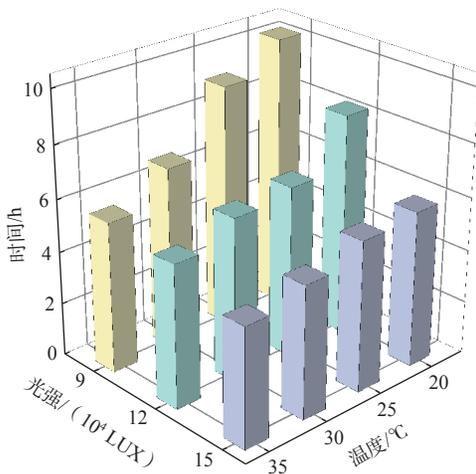


图 12 凝胶在不同温度和光强下释水的时长

Fig. 12 Duration of water release from gels at different temperatures and light intensities

同温度下, 受越大光强照射凝胶的释水速率越高且释水比例越大, 其原因为较大的光照能在单位面积提供更高的热量, 凝胶能够在更短时间内达到临界温度, 且环境温度越低, 光强的作用越明显。

3 工程实例验证

依托宁夏矿山边坡地境再造生态修复技术研发项目, 在宁夏回族自治区青铜峡卡子庙矿区选取了一处修复边坡(图 13), 于 2024 年 8 月进行野外产水试

验。当地气候为典型的中温带大陆性气候, 年降水量约为 175.8 mm, 年蒸发量高达 1 946.1 mm, 显示出强烈的干旱特征。夏季炎热, 最高气温可达 35 °C 以上。边坡采用间隔 1 m 的梅花状植生孔, 深度 1 m, 与水平夹角为 45°, 朝向为南偏东(图 14)。



图 13 修复边坡遥感图

Fig. 13 Remote sensing image restoration for slope



图 14 植生孔试验照片

Fig. 14 Photos of the plant growth hole experiment

在培养皿内装入 50 g 含水率 20% 的泥炭土放置在植生孔中, 分别放入纱网包裹的 5 g 复合吸湿凝胶、5 g 聚丙烯酰胺凝胶及空白对照。在每天的日出前 6:30、中午 13:00 及傍晚 19:30 对培养皿内的土壤和凝胶进行称重, 监测质量变化并计算含水率, 土壤含水率变化如图 15。

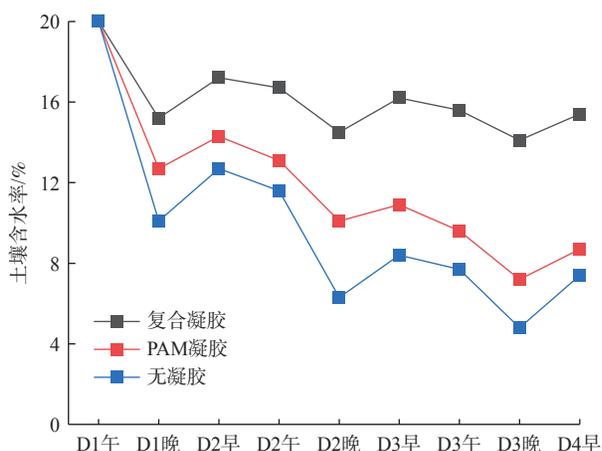


图 15 培养皿内土壤含水率变化

Fig. 15 Changes in soil water content in Petri dishes

第 1 日下午各组土壤的含水率大幅下降, 未放置凝胶的土壤下降至 9.8%, 放置复合凝胶的土壤含水率减少量明显小于其他 2 组; 夜间随着气温的下降, 空气达到饱和湿度后生成凝结水使土壤和凝胶的质量增加, 复合凝胶从空气中直接吸附水汽增重 4.14 g 的同时其土壤增重 1.21 g, 放入 PAM 凝胶的土壤增重 1.40 g, 空白对照组的土壤增重 1.56 g。复合凝胶质量大幅增长的同时, 土壤吸附水分质量相近, 证明凝胶对土壤获水的影响较小。

第 2 日上午由于阳光直射时间较短, 空白组土壤水质量减少了 1.69 g, 复合吸湿凝胶质量减少 1.27 g, 由于凝胶释水的补给土壤水的减少量为 0.75 g; 下午气温和光强进一步上升, 在强烈的阳光照射下土壤中水分大量蒸发, 未放置凝胶的土壤质量减少 2.93 g 土壤含水率下降为 6.3%, 复合凝胶减少质量 2.65 g, 土壤水质量仅减少 1.14 g, 相较空白组水分流失量减少了 61.1%。

第 3 日早晨土壤和凝胶的含水率有所回升但无法达到第 1 日同时间的土壤含水率, 后续土壤含水率及凝胶质量变化规律与第 2 日相同, 数天后裸土的含水率最终下降至 4.09%, 而放有复合凝胶的土壤含水率为 13.87%。经计算每日吸附释水循环中凝胶生成 3.68 g 水, 每克凝胶平均可释放 0.74 g 水, 放置复合吸湿凝胶的土壤水平均每日比自然状态下少流失 2.84 g, 释放水中的 77.1% 补给了土壤。

通过温湿度动态监测仪记录植生孔内的温湿度, 其变化如图 16 所示。

植物通过根系吸收的水分, 其中绝大部分会随着蒸腾作用而散失掉, 仅有少量用于自身的生长代谢过程^[37], 因此可通过计算植物的蒸腾耗水量推算岩质边

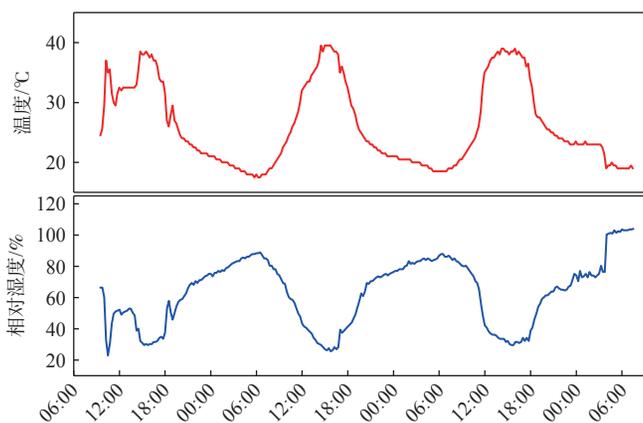


图 16 植生孔内温湿度变化图

Fig. 16 Temperature and humidity changes in the planting hole

坡植物生态需水量^[38-39]。本文利用改进的彭曼公式法计算植物潜在蒸散量^[40-41]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u(ea - ed)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (5)$$

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (6)$$

式中: ET_0 ——参考植物的潜在蒸发蒸腾量/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$);
 Δ ——温度与饱和水汽压关系曲线在某一温度 T 处的切线斜率/($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$);
 R_n ——植物表面的净辐射/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);
 G ——土壤热通量/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);
 γ ——湿度表常数/($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$);
 T ——每日平均气温/°C;
 u ——2 m 高处风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
 ed, ea ——实际水汽压以及相应温度下的饱和水汽压/kPa;
 ET_c ——植物生态需水量;
 K_c ——植物系数。

根据当地气象站数据、相关研究报告及现场测量获取的当月数据计算, 该边坡的潜在蒸发蒸腾量约为 6.18 ~ 7.50 mm/d, 植物系数采用复绿植物沙地柏及枸杞取 0.42^[41], 最终计算得到生态需水量约为 2.59 ~ 3.15 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。当地夏季日平均降水量约为 1.26 kg/m^2 , 凝结水量约为 33 g/m^2 ^[42], 植生孔面积约为 75 cm^2 , 不考虑其他水分补给, 需水量缺口约为 8 ~ 10 g。当每个植生孔内凝胶用量为 14.1 ~ 17.6 g 时, 凝胶对土壤补给的水量可弥补修复植物的需水量满足最低的生态需水量。当保证生态修复植物的存活后, 植物的树荫遮盖土壤, 进一步减少水分流失, 促进修复的进行。最终实现长久的复绿。

4 结论与展望

(1) 当凝胶中 NIPAM 和 AM 质量比例为 1 : 1.5 时, 溶胀率达到 24.72 g/g 同时释水率为 75.3%, 综合产水量最大; 浸泡的吸湿盐溶液最佳浓度为 4 mol/L, CaCl₂ : LiCl 摩尔比为 1 : 7, 可实现最高的载盐量及吸附量。

(2) 吸附过程中空气相对湿度是影响吸附量和速率主要因素, 相同温度高湿度下饱和和吸附量及吸附速率远大于低湿度, 而同湿度下温度的影响作用较小; 释水过程中, 光强和气温共同影响凝胶完成释水的时长和释水比例。

(3) 植生孔内的温湿度变化及光照条件满足凝胶的运用工况。放有复合凝胶的土壤含水率保持水平明显高于裸土及 PAM 凝胶, 每次吸附释水循环中每克凝胶平均可释放 0.74 g 的水, 选取适宜用量后可填补修复植物的生态需水量缺口, 保障生态修复工程的持续效果, 并促进长期的自然复绿。

尽管本研究中制备的复合吸湿凝胶展现出了良好的产水效果, 然而目前凝胶仍存在诸多有待改进之处。若要实现实际应用, 还需在规模化制备与成本降低和释水条件优化方向开展更为深入地研究工作。

参考文献 (References) :

- [1] 阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 等. 西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 20 - 30. [YIN Xiaowei, WU Yiping, ZHAO Wenzhi, et al. Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 20 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [2] CHEN Xiaodong, ZHAO Tongqian, NIE Xiaojun, et al. Soil substrate characteristics for planting hole greening technology for high, steep, rocky slope vegetation in semi-arid areas[J]. Land, 2024, 13(3): 287.
- [3] 陈晓东, 聂小军, 张永慧, 等. 中国高陡岩质边坡植被重建技术现状与展望 [J]. 环境科学与技术, 2024, 47(增刊 1): 70 - 78. [CHEN Xiaodong, NIE Xiaojun, ZHANG Yonghui, et al. Study status and prospect of revegetation technology for high and steep rocky slopes in China[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(Sup1): 70 - 78. (in Chinese with English abstract)]
- [4] WANG Zhongqiang, WU Lianghuan, LIU Tingting. Revegetation of steep rocky slopes: Planting climbing vegetation species in artificially drilled holes[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(7): 1079 - 1084.
- [5] 何丽. 露天矿山高陡岩质边坡生态修复实践 [J]. 中国金属通报, 2023(9): 116 - 118. [HE Li. Practical ecological restoration of high and steep rock slopes in open-pit mines[J]. China Metal Bulletin, 2023(9): 116 - 118. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘伟, 尹勤瑞, 刘祥宏. 煤矿区生态自然修复及其人工促进模式探讨 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 110 - 124. [LIU Wei, YIN Qinrui, LIU Xianghong. Ecological natural restoration and its artificial promotion mode in coal mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 110 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 等. 基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 174 - 181. [YU Yongxiang, HAO Shefeng, JIANG Bo, et al. An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 174 - 181. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 赵欣, 王佟, 李聪聪, 等. 露天矿区生态地质层修复中地形重塑层的构建技术及应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 113 - 122. [ZHAO Xin, WANG Tong, LI Congcong, et al. Construction and restoration technology of terrain remodeling layer in the restoration of ecological geological layer in open-pit mining areas[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 113 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨阳, 赵金召, 张兆长, 等. 矿山高陡岩质边坡复绿中节水灌溉技术现状与发展趋势 [J]. 资源环境与工程, 2022, 36(2): 239 - 243. [YANG Yang, ZHAO Jinzhao, ZHANG Zhaochang, et al. Present situation and development trend of water-saving irrigation technology in greening of high-steep rock slope in mines[J]. Resources Environment & Engineering, 2022, 36(2): 239 - 243. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵金召, 李予红, 孙闪闪, 等. 毛细水在矿山高陡岩质边坡生态修复绿化养护中的应用研究 [J]. 节水灌溉, 2022(1): 80 - 84. [ZHAO Jinzhao, LI Yuhong, SUN Shanshan, et al. Application of capillary water in ecological restoration and greening maintenance of high and steep rock slope in mines[J]. Water Saving Irrigation, 2022(1): 80 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ZHUANG Shendong, QI Heshan, WANG Xueyang, et al. Advances in solar-driven hygroscopic water harvesting[J]. Global Challenges, 2021, 5(1): 2000085.

- [12] 李吉焱, 邢郭宇, 景艳菊, 等. 太阳能驱动大气集水: 进展与展望 [J]. 精细化工, 2023, 40(6): 1214 – 1224. [LI Jiyan, XING Guoyu, JING Yanju, et al. Solar-driven atmospheric water harvesting: Progress and prospect[J]. Fine Chemicals, 2023, 40(6): 1214 – 1224. (in Chinese with English abstract)]
- [13] SHI Wen, GUAN Weixin, LEI Chuxin, et al. Sorbents for atmospheric water harvesting: From design principles to applications[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(43): e202211267.
- [14] 张东明, 张建, 苏方舟. 高陡岩质边坡生态环境修复治理分析 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(3): 157 – 159. [ZHANG Dongming, ZHANG Jian, SU Fangzhou. Analysis on ecological environment restoration and treatment of high and steep rock slope[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(3): 157 – 159. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘子贤, 尹智超, 张博. 太阳能空气取水/制水技术浅析 [J]. 太阳能, 2018(12): 68 – 70. [LIU Zixian, YIN Zhichao, ZHANG Bo. An analysis on solar water intake/water production technology[J]. *Solar Energy*, 2018(12): 68 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 赵惠忠, 雷敏, 黄天厚, 等. 太阳能吸附式空气取水研究进展 [J]. 应用化工, 2020, 49(2): 414 – 419. [ZHAO Huizhong, LEI Min, HUANG Tianhou, et al. A review on the development of water extraction from atmospheric air[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(2): 414 – 419. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李清慧, 潘晓春, 佐晓波, 等. 吸附/吸收式空气取水技术研究进展 [J]. 广东工业大学学报, 2024, 41(2): 1 – 10. [LI Qinghui, PAN Xiaochun, ZUO Xiaobo, et al. Research progress in adsorption/absorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2024, 41(2): 1 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 邓昊, 陈珍慧, 林越, 等. 太阳能吸附式空气取水材料与系统研究进展 [J]. 现代化工, 2023, 43(12): 36 – 41. [DENG Hao, CHEN Zhenhui, LIN Yue, et al. Research progress on solar energy-driven sorption based atmospheric water harvesting materials and system[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(12): 36 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [19] ABDULBAKEE MUHAMMED H, SHAHADAT M, TWEIB S A, et al. Harvesting of atmospheric water using polymer-based hybrid hydrogels[J]. *Chembioeng Reviews*, 2024, 11(2): 197 – 214.
- [20] SHEN Yifan, LI Qi, PEI Xiangjun, et al. Ecological restoration of engineering slopes in China-A review[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5354.
- [21] 霍香岩, 许嘉兴, 严泰森, 等. 吸附式空气取水物理吸附材料研究进展 [J]. 科学通报, 2023, 68(11): 1392 – 1405. [HUO Xiangyan, XU Jiaying, YAN Taisen, et al. Research status of physical sorbents for sorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(11): 1392 – 1405. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 姜海凤, 侯立安, 张林. 空气取水非常规技术及材料、装备研究进展 [J]. 高校化学工程学报, 2018, 32(1): 1 – 7. [JIANG Haifeng, HOU Lian, ZHANG Lin. Review on unconventional techniques, materials and equipment for water extraction from air[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2018, 32(1): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘金炜, 何阳, 赵华章. 吸附式空气取水技术原理和研究进展 [J]. 新兴科学与技术趋势, 2023, 2(4): 346 – 359. [LIU Jinwei, HE Yang, ZHAO Huazhang. Principle and research progress of sorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Emerging Science and Technology*, 2023, 2(4): 346 – 359. (in Chinese with English abstract)]
- [24] FENG An, AKTHER N, DUAN Xiaofei, et al. Recent development of atmospheric water harvesting materials: A review[J]. *ACS Materials Au*, 2022, 2(5): 576 – 595.
- [25] WANG Zhen, XU X K, YAN T, et al. Preparation and thermal properties of zeolite 13X/MgSO₄-LiCl binary-salt composite material for sorption heat storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122905.
- [26] 王胜楠, 陈康, 郑旭. 吸附式空气取水系统用吸湿材料研究进展 [J]. 化工进展, 2022, 41(7): 3636 – 3647. [WANG Shengnan, CHEN Kang, ZHENG Xu. Recent progress of moisture sorbent for adsorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(7): 3636 – 3647. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王子航, 梁瑞升, 邓超和, 等. 离子凝胶复合吸附剂的制备及空气取水性能 [J]. 化工进展, 2022, 41(增刊 1): 389 – 396. [WANG Zihang, LIANG Ruisheng, DENG Chaohe, et al. Preparation and atmosphere water harvesting performance of ionic gel composite adsorbent[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(Sup1): 389 – 396. (in Chinese with English abstract)]
- [28] WANG Xuejiao, YANG Dongzhi, ZHANG Ming, et al. Super-hygroscopic calcium chloride/graphene oxide/poly (N-isopropylacrylamide) gels for spontaneous harvesting

- of atmospheric water and solar-driven water release[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(29): 33881 – 33891.
- [29] 黄健, 黄志明, 包永忠, 等. 温敏性水凝胶的溶胀模型和仿真 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, 40(11): 1918 – 1921. [HUANG Jian, HUANG Zhiming, BAO Yongzhong, et al. Modeling and simulation of swelling behavior of thermosensitive hydrogels[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(11): 1918 – 1921. (in Chinese with English abstract)]
- [30] GRAEBER G, DÍAZ-MARÍN C D, GAUGLER L C, et al. Extreme water uptake of hygroscopic hydrogels through maximized swelling-induced salt loading[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(12): e2211783.
- [31] 包淑红, 潘春跃, 刘丹平. N-异丙基丙烯酰胺-丙烯酸酰胺热敏凝胶的溶胀特性 [J]. *功能高分子学报*, 2004, 17(3): 447 – 451. [BAO Shuhong, PAN Chunyue, LIU Danping. Swelling properties of temperature sensitive P(NIPAm-Am) hydrogel[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2004, 17(3): 447 – 451. (in Chinese with English abstract)]
- [32] ZHOU Xingyi, ZHANG Panpan, ZHAO Fei, et al. Super moisture absorbent gels for sustainable agriculture via atmospheric water irrigation[J]. *ACS Materials Letters*, 2020, 2(11): 1419 – 1422.
- [33] 吴红, 张慧, 范黎, 等. 温敏型聚(N-异丙基丙烯酰胺/丙烯酸酰胺)纳米凝胶的制备及其性质研究 [J]. *解放军药化学学报*, 2007, 23(4): 245 – 249. [WU Hong, ZHANG Hui, FAN Li, et al. Synthesis and properties of temperature-sensitive poly (N-isopropylacrylamide/acrylamide) nanogel[J]. *Pharmaceutical Journal of Chinese People's Liberation Army*, 2007, 23(4): 245 – 249. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 张先正, 卓仁禧. 快速温度敏感聚(N-异丙基丙烯酰胺-co-丙烯酸酰胺)水凝胶的制备及性能研究 [J]. *高等学校化学学报*, 2000, 21(8): 1309 – 1311. [ZHANG Xianzheng, ZHUO Renxi. Synthesis and properties of fast responsive, temperature sensitive P(NIPA-co-AA) hydrogel[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2000, 21(8): 1309 – 1311. (in Chinese with English abstract)]
- [35] ZHAO Huizhong, WANG Zhaoyang, LI Qianwen, et al. Water sorption on composite material “zeolite 13X modified by LiCl and CaCl₂”[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 299: 110109.
- [36] ENTRZARI A, GE T S, WAMG R Z. Water adsorption on the coated aluminum sheets by composite materials (LiCl plus LiBr)/silica gel[J]. *Energy*, 2018, 160: 64 – 71.
- [37] 周丹, 沈彦俊, 陈亚宁, 等. 西北干旱区荒漠植被生态需水量估算 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 670 – 680. [ZHOU Dan, SHEN Yanjun, CHEN Yaning, et al. Estimation of ecological water requirement of desert vegetation in the arid region of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 670 – 680. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述 [J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6282 – 6291. [HU Guanglu, ZHAO Wenzhi. Reviews on calculating methods of vegetation ecological water requirement in arid and semiarid regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6282 – 6291. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述 [J]. *科学通报*, 2001, 46(22): 1851 – 1857. [ZHAO Wenzhi, CHENG Guodong. A review of several issues in the study of eco-hydrological processes in arid regions[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(22): 1851 – 1857. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 张杨, 冯文新, 董宏炳, 等. 高陡岩质边坡覆绿植物生态需水量计算 [J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(6): 23 – 28. [ZHANG Yang, FENG Wenxin, DONG Hongbing, et al. Calculation of ecological water demand of reforestation plants in high-steep rock slopes[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(6): 23 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 张阳阳, 陈喜, 高满, 等. 内陆干旱区典型旱生植物蒸腾耗水量模拟研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7751 – 7762. [ZHANG Yangyang, CHEN Xi, GAO Man, et al. Simulation of transpiration for typical xeromorphic plants in inland arid region of Northwestern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7751 – 7762. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 马稚桐, 王文科, 赵明, 等. 半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 7 – 14. [MA Zhitong, WANG Wenke, ZHAO Ming, et al. Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 7 – 14. (in Chinese with English abstract)]