

doi:10.11920/xnmdzk.2025.05.005

基于废弃胶原的退化草地保水材料合成与性能研究

李雪^{1,2},覃倩玲^{1,2},张喜悦^{1,2},王陈耀^{1,2},宗子博^{1,2},陈华林^{1,2},汪辉^{1,2},周青平^{1,2},姜德云³

(1.青藏高原污染控制化学与环境功能材料国家民委重点实验室,西南民族大学化学与环境学院,四川成都610041;
2.化学基础国家民委重点实验室,西南民族大学化学与环境学院,四川成都610041;浙江盛汇化工有限公司,浙江江山324100)

摘要:以水解皮革废弃物提取的胶原蛋白为原料,通过与丙烯酸和丙烯酰胺接枝,成功制备了一种新型胶原基水凝胶(Col-g-PAAM)。借助傅里叶变换红外光谱、X射线衍射和扫描电子显微镜等技术对水凝胶的结构和形貌进行了表征,证实了水凝胶的成功合成。吸水保水实验表明,胶原蛋白的引入显著提升了水凝胶的吸水性和保水性能,其吸水倍率高达604 g/g,吸盐水能力为44 g/g。此外,Col-g-PAAM水凝胶对青稞的发芽率、发芽势和株高具有显著的促进作用,尤其在水凝胶含量为0.03%时,植物生长表现最佳。作为一种环保型材料,胶原基水凝胶在改善土壤水分管理和促进植物生长方面展现出巨大潜力,为皮革废弃物的有效利用提供了新途径。

关键词:胶原;皮革废弃物;吸水保水;土壤改良与植物生长

中图分类号:X171.4;TB34;TS529.5

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2025)05-0509-08

Synthesis and performance study of water-retaining materials for degraded grasslands based on discarded collagen

LI Xue^{1,2}, QIN Qianling^{1,2}, ZHANG Xiyue^{1,2}, WANG Chenyao^{1,2},
ZONG Zibo^{1,2}, CHEN Hualin^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, ZHOU Qingping^{1,2}, JIANG Deyun³

(1.Key Laboratory of Pollution Control Chemistry and Environmental Functional Materials for Qinghai-Tibet Plateau of the National Ethnic Affairs Commission, School of Chemistry and Environment, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 2.Key Laboratory of General Chemistry of the National Ethnic Affairs Commission, School of Chemistry and Environment, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 3.Zhejiang Shenghui Chemical Co., LTD, Jiangshan 324100, China)

Abstract: A novel collagen-based hydrogel (Col-g-PAAM) was successfully prepared from collagen extracted from hydrolyzed leather waste by grafting with acrylic acid and acrylamide. The structure and morphology of the hydrogel were characterized with the help of Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and scanning electron microscopy, which confirmed the successful synthesis of the hydrogel. The water absorption and retention experiments showed that the introduction of collagen significantly enhanced the water absorption and retention properties of the hydrogel, with a water absorption multiplicity as high as 604 g/g and a saline water absorption capacity of 44 g/g. In addition, the Col-g-PAAM hydrogel had a significant promotion effect on the germination rate, germination potential, and plant height of barley, and the best performance of the plant growth was especially observed at a hydrogel content of 0.03%. As an environmentally friendly material, collagen-based hydrogel showed great potential in improving soil moisture management and promoting plant growth, providing a new way for the effective utilization of leather waste.

Keywords: collagen; leather waste; water absorption and retention; soil improvement and plant growth

收稿日期:2025-04-18

作者简介:李雪(2000-),女,研究方向:环境友好型功能高分子材料.E-mail:3520328248@qq.com

通信作者:陈华林(1972-),男,研究员,研究方向:功能高分子材料及皮革化工材料研究.E-mail:aofly@163.com

基金项目:西南民族大学2024年研究生创新型科研项目(YCZD2024018)

青藏高原作为世界上海拔最高的地理单元,其草原面积占总面积的 60%,但近年来因人为和自然因素导致草地退化严重^[1].20 世纪 90 年代,退化草地面积占可利用草地的 32.69%^[2-3].为应对草地退化,全球采取了多种修复措施,如封栏禁牧、补种草种等^[4].封栏禁牧^[5-6]被认为是一种恢复方法,是指在一定区域内禁止放牧牛、羊等草食动物,以保护生态环境、促进植被恢复的一种管理措施.但长期封栏禁牧可能导致草地覆盖度和生产力下降^[7].植被重建^[8]是重度退化草地恢复的重要手段,能快速提高植被覆盖度和生产力^[9].然而,青藏高原极端气候和土壤沙化等因素导致人工草地生长缓慢,需适当使用土壤改良剂等措施以营造适宜植物生长的环境^[10-12].

水凝胶是一种新兴化学节水材料,具有高吸水和保水能力,应用于土壤水肥保持和污染治理中.它在干旱条件下能够减少水分胁迫对细胞膜的破坏,改善土壤物理性质,提高土壤持水能力和微生物活性^[13-14].其应用可改善土壤结构,增强植物抗逆性,对牧草生产和土地沙化治理具有广阔前景^[15],尤其在青藏高原退化草地植被重建中,有望缓解草地退化趋势.传统的保水材料主要由石油乙烯基单体制成,难以被微生物和酶分解,导致环境污染.为减轻环境影响,环保材料如多糖类材料被广泛研究^[16].Zhu^[17]等人合成的高吸水性树脂在蒸馏水和盐溶液中表现出良好吸液能力,促进植物生长.Tanan^[18]等制备的木薯淀粉-g-聚丙烯酸水凝胶具有优异吸液能力和生物降解率,适用于草地退化修复.然而多糖材料因分子量大和羟基产生的氢键,水溶性和反应性有限,制约了其吸水性能,高生产成本也限制了保水剂的发展.因此,制备低成本、高吸水性、生物降解性好的保水材料仍是挑战^[19].

胶原蛋白由三条多肽链缠绕成三螺旋构型,其结构由氨基酸序列决定^[20].水解胶原蛋白是通过水解过程打断氢键和肽键,产生更小分子,保留了生物相容性和可降解性^[21].其分子含多种官能团,如羧基-COOH、氨基-NH₂等,使其易于交联和化学修饰,具有高溶解性,便于加工.在此前的研究中水解胶原蛋白也由于具有良好的生物相容性和生物降解性以及良好的保水性能而被广泛应用于医用医药材料、穿戴设备、农业保水材料等的制备^[22].制革业废弃物的资源

化利用是科研领域的重要研究方向.利用废弃皮革提取胶原蛋白,可脱除铬并处理大分子链为短肽蛋白质,应用于造纸、饲料等,实现资源回收、减少环境危害,具有广阔发展前景^[23].

因此,本文利用从皮革废料中提取的胶原蛋白作为主要原料之一制备水凝胶,用于青藏高原退化草地的植物种植.这可解决废弃皮革的资源浪费和环境污染问题,降低草地治理成本,带来良好的经济效益.同时,胶原蛋白的可生物降解性能避免二次污染,具有经济和环境可持续性的双重价值.

1 实验部分

1.1 水凝胶的合成

首先,将盛有丙烯酸的烧杯放入冰水浴中,缓慢滴入预先准备好的氢氧化钠溶液进行中和反应,确保反应彻底并使混合物充分冷却.随后,依次加入胶原水解物溶液、引发剂和交联剂,搅拌至完全溶解并混合均匀.将此混合物置于 60 °C 的恒温烘箱中反应 4 小时.反应结束后,取出产物,剪碎,并用乙醇清洗以去除未反应的单体,随后放入 80 °C 烘箱中烘至恒重.将烘干的样品粉碎,并通过 60 目筛网筛分,得到白色或淡黄色的高吸水性水凝胶粉末.使用相同的方法制备聚丙烯酸丙烯酰胺水凝胶.将丙烯酸钠与丙烯酰胺共聚的水凝胶命名为 PAAM,而胶原与丙烯酸、丙烯酰胺共聚的产物命名为 Col-g-PAAM.

1.2 水凝胶吸水性能测试

1.2.1 在纯水、盐溶液中吸水倍率

称取一定质量(W_0)完全干燥的高吸水水凝胶,放入烧杯中,加入足量蒸馏水或 0.9 wt% NaCl 溶液,在室温下静置至吸水饱和,用 100 目尼龙滤网过滤出多余液体,用吸水纸吸收多余水分.并称其重量(W_e),重复实验三次,水凝胶的平衡吸(盐)水倍率 Q_{eq} 可通过公式(1)计算:

$$Q_{eq} = \frac{w_e - w_0}{w_0} \quad (1)$$

式中: Q_{eq} —水凝胶的平衡吸(盐)水倍率,g/g; W_e —吸水饱和后水凝胶重量,g; W_0 —干燥状态下水凝胶重量,g.

1.2.2 在蒸馏水、0.9 wt% NaCl 溶液中吸水动力学模型拟合

在烧杯中加入一定量完全干燥的水凝胶,加入足

量蒸馏水或 0.9 wt% NaCl 溶液,用滤网封住烧杯口。每隔一定时间将烧杯中水滤掉,称重并记录该时刻水凝胶吸水质量,通过公式(1)计算出该时刻吸水倍率,以吸水倍率对时间作图,可以得到水凝胶吸水速率曲线图。

为了研究水凝胶吸水动力学,对水凝胶吸水、吸盐水速率数据用公式(2)准一阶动力学模型和公式(3)准二阶动力学方程,进行拟合分析。

$$k_w t = -\ln\left(1 - \frac{Q_t}{Q_{eq}}\right) \quad (2)$$

式中: Q_{eq} —水凝胶的平衡吸(盐)水倍率, g/g; Q_t —t 时候水凝胶吸水倍率, g/g; k_w —吸水速率和吸水能力的比例常数。

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_s Q_{eq}^2} + \frac{t}{Q_{eq}} \quad (3)$$

式中: k_s —恒定溶胀率, g/(min·g)。

1.3 水凝胶保水性能测试

保水性是指水凝胶吸水溶胀之后,保持水分不使其析出或蒸发的能力。由于物质失水的速度受很多因素的影响,因此物质的保水能力也分为很多种,如在一定温度下的保水性。本实验探究了水凝胶在自然条件和 40 °C 下的保水性。将干燥水凝胶吸水至饱和,滤去多余水分后,放入表面皿中,在自然环境和 40 °C 烘箱内定期称重以计算保水率。实验重复三次,通过作图反映保水能力。则水凝胶的保水率 W_h 可通过公式

(4) 计算:

$$w_h = \frac{w_t}{w_e} \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_h —水凝胶的保水率, %; W_e —吸水饱和后水凝胶重量, g; W_t —t 时候水凝胶重量, g。

1.4 水凝胶对植物生长趋势影响

使用过筛和除杂后的沙子,将处理过的土壤填满种植盆至 10 cm 高,每盆加 150 mL 水保持湿润。均匀播下 20 粒植物种子,覆盖 3 cm 厚的土壤。空白组浇 100 mL 水,对照组分别用 PAAM、Col-g-PAAM 水凝胶与 100 mL 水混合浇灌,添加水凝胶的量分别为所浇水含量的 0.03%、0.15%、0.3%、0.5%。记录植物生长情况,以胚芽长度的一半为发芽标准,每日测量发芽数和幼苗高度,种植结束后测试植株湿重。根据公式(5)计算植物的发芽率。

$$\text{发芽率}(\%) = \frac{\text{总发芽数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (5)$$

2 结果与讨论

胶原水凝胶的合成及使用示意图如图 1 所示,在过硫酸钾作为引发剂的作用下,活性自由基首先与胶原水解产物的分子链发生转移,进而触发丙烯酸、丙烯酰胺单体的聚合反应。当这种水凝胶应用于植物生长过程中,它会在夜间低温时吸收空气中的水分;而在白天高温且水分不足的条件下,水凝胶则释放水分,以支持植物的生长。

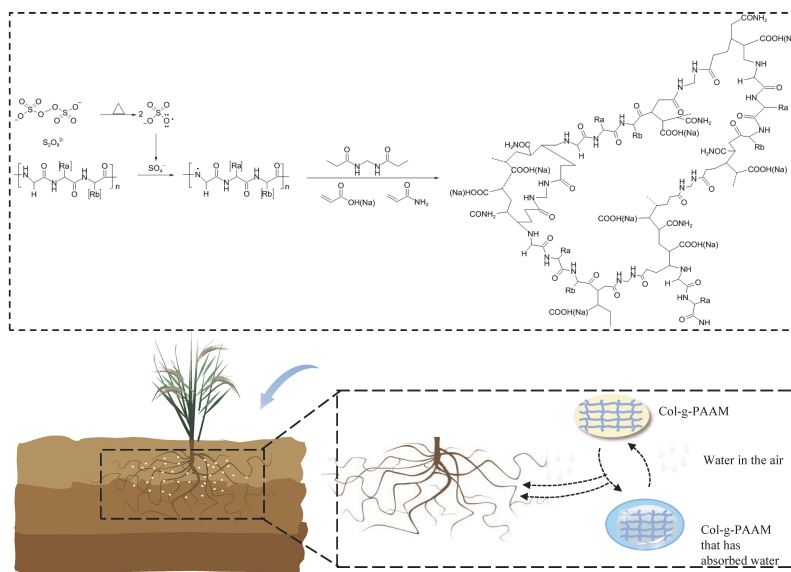


图 1 Col-g-PAAM 水凝胶的合成示意及使用示意图

Fig.1 Schematic synthesis and use of Col-g-PAAM hydrogel

2.1 水凝胶表征

图 2(a)展示了胶原粉末(图中名为 Col)、PAAM 和 Col-g-PAAM 的红外光谱图.胶原粉末的主要吸收峰包括 $1\ 662\ \text{cm}^{-1}$ 的酰胺 C=O 伸缩振动峰和 $1\ 546\ \text{cm}^{-1}$ 的 N-H 弯曲振动峰.PAAM 在 $1\ 058\ \text{cm}^{-1}$ 处显示出 C-OH 伸缩振动峰.通过比较三种材料的红外光谱,可以发现 Col-g-PAAM 的 C=O 伸缩振动峰相对于胶原和 PAAM 有所移动,同时 C-OH 伸缩振动峰从 $1\ 058\ \text{cm}^{-1}$ 移动到 $1\ 040\ \text{cm}^{-1}$,这表明胶原与丙烯酸丙烯酰胺之间发生了接枝聚合反应.图 2(b)分别为三种物质的 XRD 谱图,可以看到,水解胶原粉末、PAAM、Col-g-PAAM 在 $10\sim 50^\circ$ 的范围并没有明显特征峰的出现,说明这胶原粉末与两种水凝胶均是非晶态体系,水凝胶材料主要以无定形结构存在,这种结构有助于提高其吸水性能^[24].

图 2(c)代表了 Col、PAAM、Col-PAAM 的玻璃化转变温度 (T_g) 图,实验测得胶原本身的 T_g 为 $58.43\ ^\circ\text{C}$,而 PAAM 的 T_g 则在 $107.85\ ^\circ\text{C}$ 左右.当胶原

与 PAAM 结合形成共聚物时,其 T_g 降至约 $84.72\ ^\circ\text{C}$,按照 Fox 方程 $1/T_g = W_A/T_{gA} + W_B/T_{gB}$,PAAM 理论 T_g 为 $112.03\ ^\circ\text{C}$,而 Col-g-PAAM 理论 T_g 为 $80.65\ ^\circ\text{C}$,与实验所测得温度非常接近,也能证明胶原与聚丙烯酸丙烯酰胺之间发生了接枝反应.这一变化可能是因为胶原具有较低的 T_g ,其较好的亲水性和柔韧性,这些特性使得胶原被引入到 PAAM 中,可以降低共聚物的整体玻璃化转变温度.图 2(d)为胶原粉末、PAAM、Col-g-PAAM 的 TGA 图,由图可知,胶原粉末的质量损失分为两个阶段:第一阶段在 $50\ ^\circ\text{C}$ 至 $150\ ^\circ\text{C}$,损失 6.1% ,主要是水分蒸发;第二阶段在 $150\ ^\circ\text{C}$ 至 $500\ ^\circ\text{C}$,损失 68.4% ,由胶原分子链断裂导致.PAAM 和 Col-g-PAAM 的 TGA 曲线相似,第一阶段在 $40\ ^\circ\text{C}$ 至 $350\ ^\circ\text{C}$,失水 14% ,第二阶段在 $300\ ^\circ\text{C}$ 至 $500\ ^\circ\text{C}$,失重 $41\%\sim 43\%$,涉及羧基脱水和分子链断裂.从图中可以看出胶原的加入导致 Col-g-PAAM 热稳定相对于 PAAM 来说略有降低,证明胶原与聚丙烯酸丙烯酰胺成功接枝.

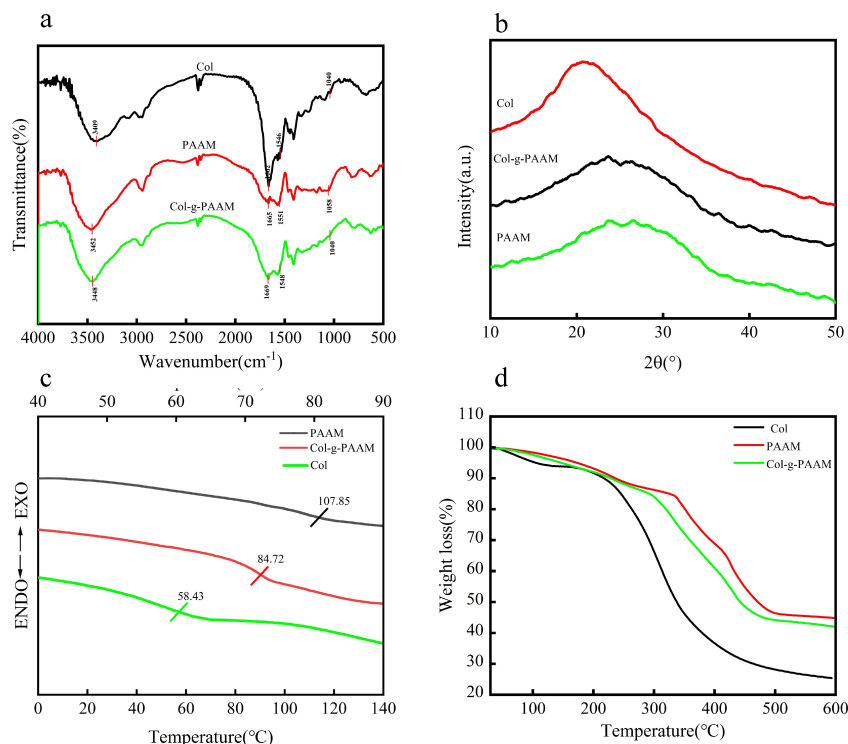


图 2 (a)、(b)、(c)、(d)分别为胶原粉末、PAAM、Col-g-PAAM 的 FT-IR、XRD、DSC、TGA 图.

Fig.2 (a), (b), (c), and (d) FT-IR, XRD, DSC, and TGA images of collagen powder, PAAM, and Col-g-PAAM, respectively.

PAAM、Col-g-PAAM 的 SEM 图如图 3 所示,可以看到 PAAM 和 Col-g-PAAM 表面都存在大量孔洞,水凝胶的表面形貌对其吸水速率有重要影响,因此常制

成多孔结构以提高吸水速率^[25],而 Col-g-PAAM 表面更为粗糙,证明有接枝位点的产生,这表明 PAAM 成功接枝到胶原分子链上.

2.2 水凝胶吸水性能测试

图 4(a) 为水凝胶在蒸馏水中吸水速率图, 图 4 (b) 为水凝胶在 0.9 wt% NaCl 生理盐水中吸水速率图, 从中可以看出胶原的加入使得水凝胶在蒸馏水环境中, 吸水倍率从 83 g/g 跃升至 603 g/g, 这主要归因于胶原的亲水基团(如羟基、羧基)与凝胶网络形成协同

氢键网络, 极大提升了自由水的捕获与保留能力; 而在 0.9 wt% NaCl 生理盐水中, 吸水倍率由 20 g/g 提高至 44 g/g, 尽管提升幅度小于纯水环境, 但仍验证了胶原改性通过多孔结构的电荷屏蔽效应缓解了盐离子对水分子结合的干扰, 从而优化了对离子渗透压的抗性。

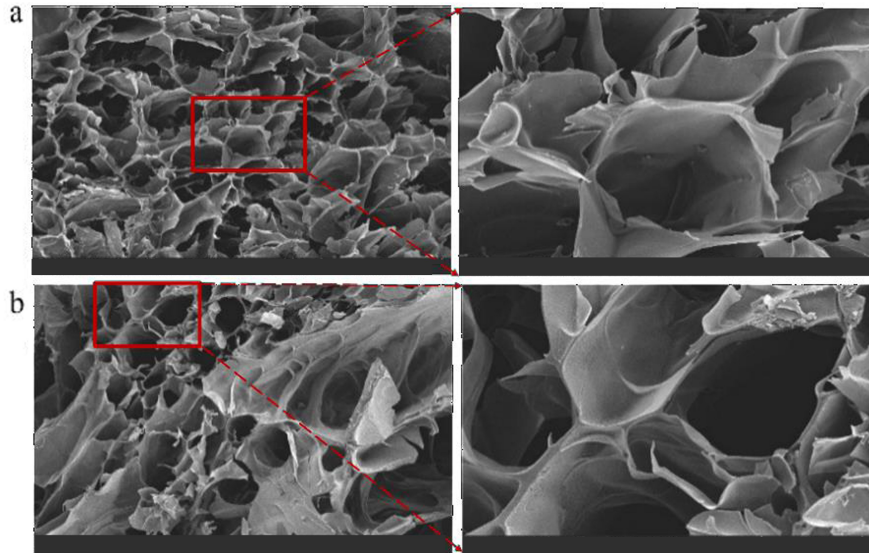


图 3 (a) PAAM、(b) Col-g-PAAM 的 SEM 图

Fig.3 SEM image of hydrogel

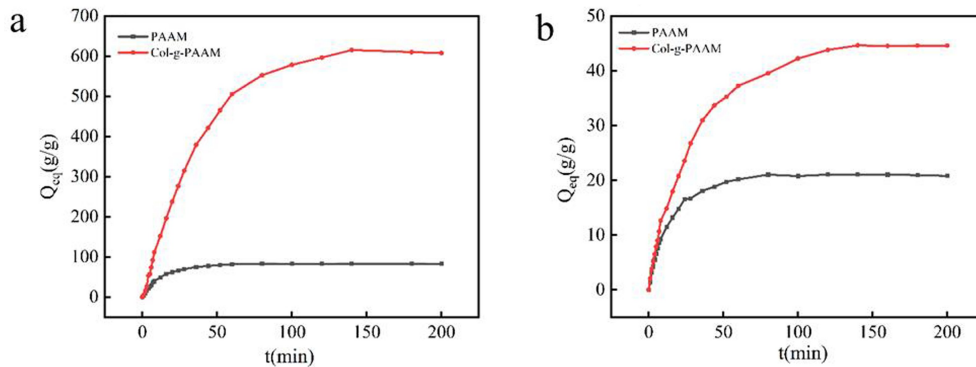


图 4 PAAM、Col-g-PAAM 在 (a) 蒸馏水中、(b) 0.9 wt% NaCl 溶液中的吸水速率

Fig.4 Water absorption rate of PAAM, Col-g-PAAM

为了探究胶原引入对水凝胶吸水动力学的影响, 对水凝胶在蒸馏水中吸水速率数据以及在 0.9 wt% NaCl 溶液中吸水速率数据进行动力学拟合. 准一阶动力学方程拟合结果如图 5(a)、(b) 所示. 在水凝胶体系中, 水分子扩散初期的动力学行为可通过一阶动力学方程拟合, 而拟合所得到的曲线斜率可以代表水分子在水凝胶内部的扩散速率, 即 K_w 越大, 吸水速率越大. 从结果可知, 胶原的加入使得水凝胶吸水速率减缓, 这也与水凝胶 SEM 表征的结果相呼应, 正因为有

接枝位点的产生, 使得水凝胶的孔隙结构变得更为粗糙, 从而使得水凝胶的吸水速率减缓. 而水凝胶的准二阶动力学拟合结果如图 5(c)、(d) 所示. 准二阶动力学方程拟合所得到的曲线斜率可代表水凝胶吸水倍率的倒数, 即 K_s 越大, 材料的吸水倍率越小. 从结果可知, 胶原的引入可以增加水凝胶的吸水倍率, 推测是由于胶原引入了更多的亲水性的官能团如羧基、氨基, 使得水凝胶吸水倍率增加。

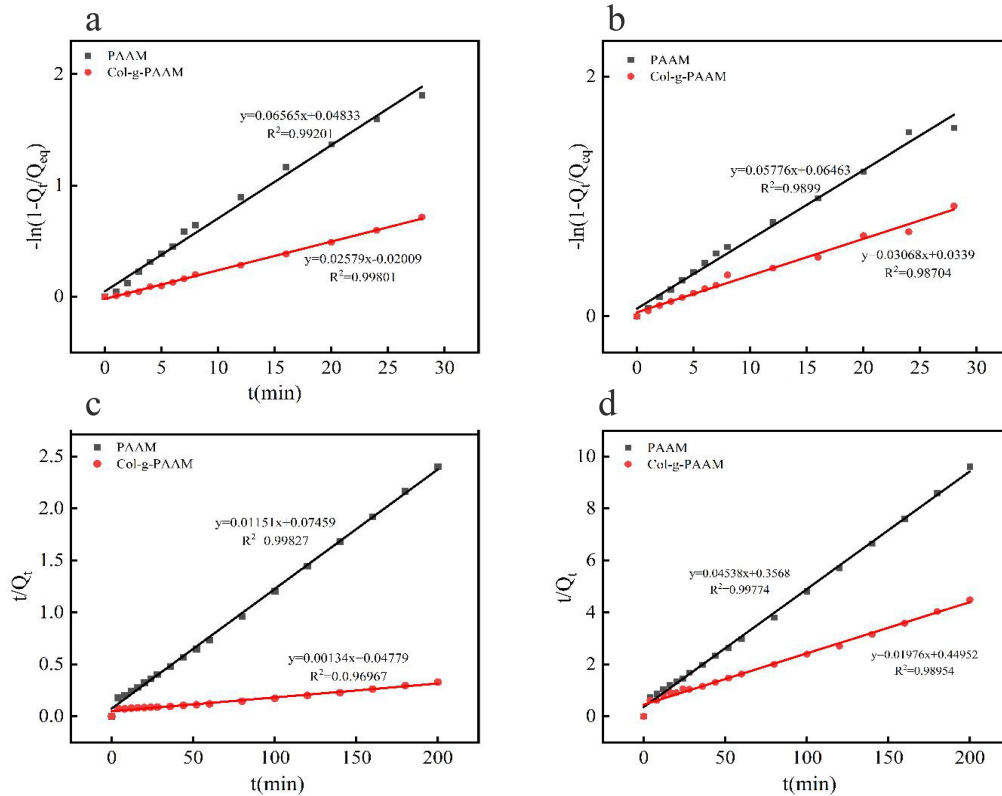


图 5 PAAM 与 Col-g-PAAM 在蒸馏水中的 (a) 准一级动力学拟合结果; (b) 准二级动力学拟合结果; PAAM 与 Col-g-PAAM 在 0.9 wt% NaCl 溶液中的 (c) 准一级动力学拟合结果; (d) 准二级动力学拟合结果

Fig.5 Results of quasi-primary kinetic fitting of PAAM with Col-g-PAAM in pure water and 0.9 wt% NaCl solution vs. quasi-secondary kinetic fitting

2.3 水凝胶保水性能测试

在实际生产应用中,水凝胶的保水性是衡量水凝胶使用价值的一个重要指标,图 6 是不同水凝胶在不同温度下对土壤的保水能力随时间变化情况.由图 6 (b)可看出,PAAM 水凝胶在 40 °C 处理 5 h 下水分已蒸发 88%,此时 Col-g-PAAM 水凝胶保持了 24% 的水分.由图 6(a)可知,PAAM 水凝胶吸水饱和后在自然条件下放置 72 h,PAAM 失水率达到 94%,而 Col-g-

PAAM 失水率为 85%.说明 Col-g-PAAM 水凝胶保水性相对于 PAAM 较好.这是由于水凝胶的保水性源于吸水基团与水分子形成的氢键,以及聚合物网络对水分蒸发的束缚作用.胶原的加入引入了新的亲水基团,增强了化学吸附作用,进一步提升了水凝胶的保水性能.而在干旱条件下,土壤持水量对作物生存至关重要.

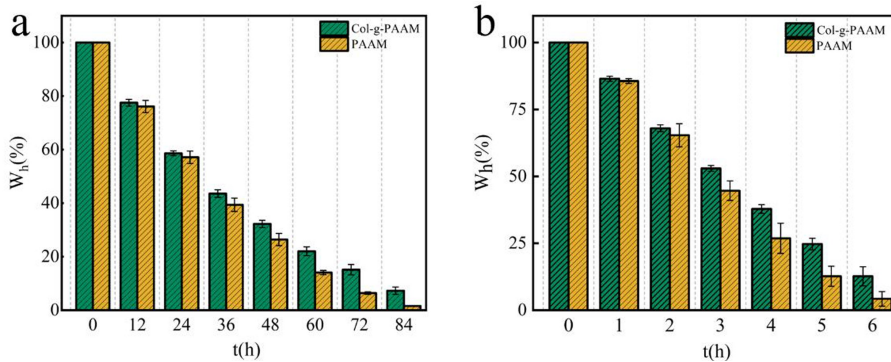


图 6 不同含量 PAAM、Col-g-PAAM 在 (a) 室温下、(b) 40 °C 的保水能力示意图

Fig.6 Schematic representation of water retention capacity of different contents of PAAM and Col-g-PAAM

2.4 水凝胶对青稞生长趋势影响

为了进一步探究胶原水凝胶对高原作物生长的影响,对不同水凝胶在种植青稞、紫花苜蓿时的发芽率、发芽势和株高方面的作用进行了研究.图 7(a) 的实验结果显示,水凝胶对青稞的发芽率有着显著的促进作用,添加了水凝胶土地里的青稞,其发芽率明显高于未添加水凝胶的空白组.而添加了 Col-g-PAAM 水凝胶组的发芽率又高于添加了 PAAM 水凝胶组.在水凝胶添加量为 0.03% 时,空白对照组的青稞发芽率仅为 43.3%,而 PAAM 组的发芽率达到了 61.7%,Col-g-PAAM 组更是高达 68.3%.这一现象表明,水凝胶能够有效吸水保水,改善土壤环境,为青稞种子的萌发提供有利条件.而胶原的引入,进一步增强了水凝胶的吸水保水性能并促进植物的生长.然而,实验结果也显示,随着水凝胶含量的增加,青稞的发芽率呈现出逐渐下降的趋势.这是由于过多的水凝胶形成了较

大的土壤团聚体,减少了土壤空间,阻碍了种子获得足够的氧气,导致萌发不完全^[26].

水凝胶对青稞的株高和湿重也产生了类似的影响.如图 7(b) 所示,在 0.03% 的水凝胶含量下,空白组的株高为 4.33 cm,而 Col-g-PAAM 组的株高则达到了 5.8 cm,呈现出与发芽率一致的趋势.从图 7(c) 可以看出,水凝胶对青稞的重量也具有显著的促进作用,Col-g-PAAM 水凝胶能够使得青稞株重最高达 0.34 g,而空白组青稞株重仅 0.19 g.综合这些实验结果,可以得出结论,适量的水凝胶,尤其是 Col-g-PAAM 水凝胶,能够显著促进青稞的生长.

对于紫花苜蓿,Col-g-PAAM 水凝胶同样表现出显著的促进作用.如图 7(d) (e) (f) 所示,在 0.03% 的水凝胶含量下,Col-g-PAAM 组的发芽率显著高于 PAAM 组.同时,水凝胶对紫花苜蓿的株高和湿重也有类似的促进效果.

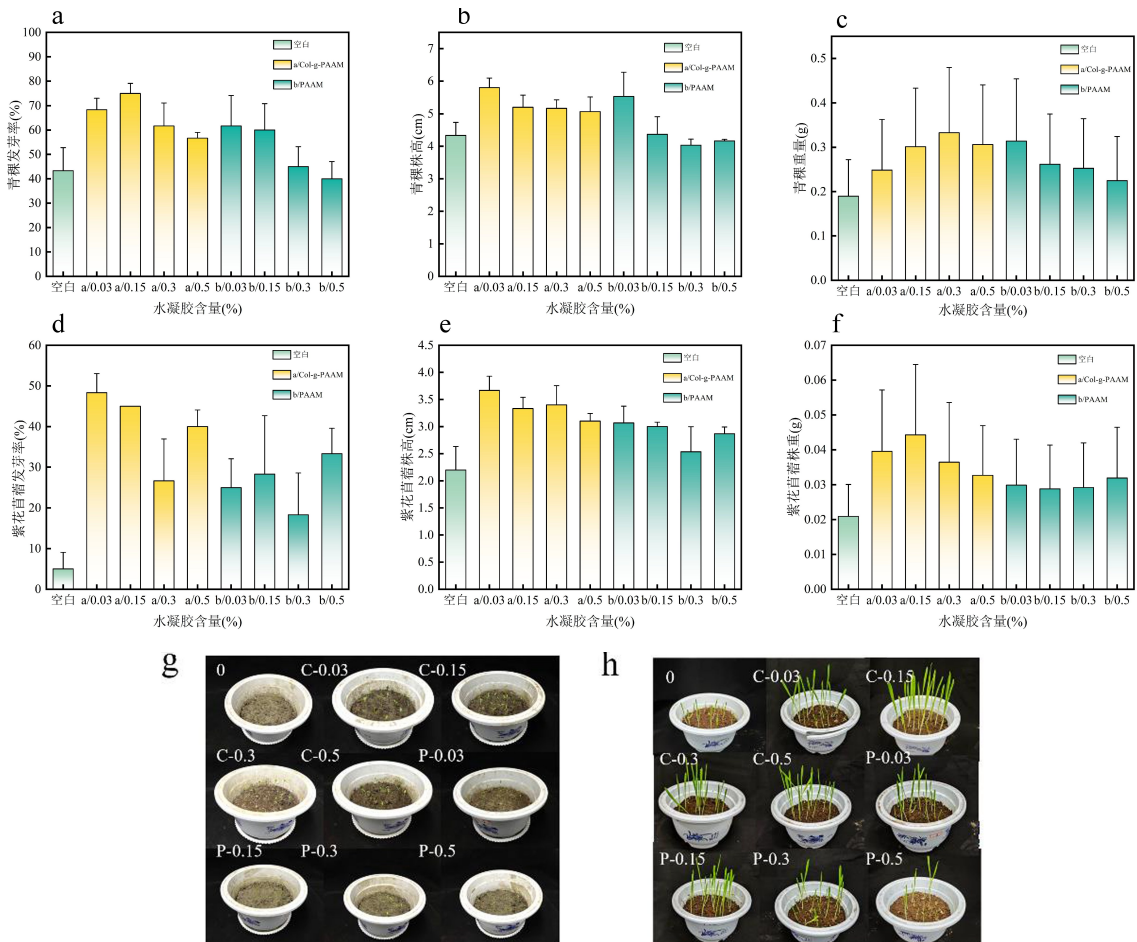


图 7 不同含量 PAAM、Col-g-PAAM 对青稞 (a) 发芽率、(b) 株高、(c) 湿重的影响; 不同含量 PAAM、Col-g-PAAM 对紫花苜蓿 (d) 发芽率、(e) 株高、(f) 湿重的影响.

Fig.7 Effect of different contents of PAAM and Col-g-PAAM on germination rate, plant height and wet weight of barley and alfalfa

3 结论

本研究利用皮革废弃物中的胶原蛋白,通过与丙烯酸和丙烯酰胺接枝,成功制备了胶原水凝胶(Col-g-PAAM)。通过 FT-IR、XRD、DSC、TGA 和 SEM 等技术确认了水凝胶的合成。实验表明,胶原的引入显著增强了水凝胶的吸水性和保水性能,吸水倍率高达 604 g/g,吸盐能力为 44 g/g。在 40 °C 条件下 5 小时后仍能保持 24% 的水分,自然条件下 72 小时后失水率为 85%。

在植物生长实验中,Col-g-PAAM 水凝胶对青稞和紫花苜蓿的发芽率、发芽势、株高和湿重均表现出显著促进作用。0.03% 的 Col-g-PAAM 含量下,青稞发芽率达到 68.3%,株高 5.8 cm,湿重 0.34 g,紫花苜蓿也表现出类似趋势。

本研究提供了一种环保的水凝胶制备方法,拓展了皮革废弃物的应用范围。尽管实验室结果良好,但水凝胶的实际田间应用效果仍需进一步研究,尤其是青藏高原盐碱地条件下的应用效果。未来工作将关注水凝胶在盐碱地条件下的应用效果及其对土壤生态的长期影响。

参考文献

- [1] ZHOU H K, YANG X Y, ZHOU C Y, et al. Alpine grassland degradation and its restoration in the Qinghai - Tibet plateau[J]. *Grasses*, 2023, 2(1): 31-46.
- [2] 刘永杰, 杨琴. 青藏高原退化草地修复研究进展及展望[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(10): 131-143.
- [3] LIU S B, ZAMANIAN K, SCHLEUSS P M, et al. Degradation of Tibetan grasslands: Consequences for carbon and nutrient cycles[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 93-104.
- [4] 贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 等. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 66-80.
- [5] WANG L, GAN Y T, WIESMEIER M, et al. Grazing exclusion—An effective approach for naturally restoring degraded grasslands in Northern China[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(12): 4439-4456.
- [6] CHENG J M, JING G H, WEI L, et al. Long-term grazing exclusion effects on vegetation characteristics, soil properties and bacterial communities in the semi-arid grasslands of China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 170-178.
- [7] JING Z B, CHENG J M, SU J S, et al. Changes in plant community composition and soil properties under 3-decade grazing exclusion in semi-arid grassland[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 171-178.
- [8] FENG R Z, LONG R J, SHANG Z H, et al. Establishment of *Elymus na-*
- [9] tans improves soil quality of a heavily degraded alpine meadow in Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1): 403-411.
- [10] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 等. 一种黑土山植被恢复, 利用和管护方法: CN111194666A[P]. 2020-05-26.
- [11] 李世雄, 马玉寿, 王彦龙, 等. 黑土坡植被的重建方法: CN201711213324.3[P]. 2020-07-28.
- [12] SHANG Z H, GIBB M J, LEIBER F, et al. The sustainable development of grassland-livestock systems on the Tibetan Plateau: Problems, strategies and prospects[J]. *The Rangeland Journal*, 2014, 36(3): 267.
- [13] 古琛, 贾志清, 杜波波, 等. 中国退化草地生态修复措施综述与展望[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1465-1475.
- [14] 王亚飞, 毕红梅. 保水剂的应用现状及发展前景[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2006, 18(5): 77-80.
- [15] 马焕成, 罗质斌, 陈义群, 等. 保水剂对土壤养分的保蓄作用[J]. *浙江林学院学报*, 2004, (04): 46-49.
- [16] 韩军, 薛焱, 胡宇, 等. 保水剂在牧草生产和草地沙化治理中的应用现状与前景[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(03): 158-164.
- [17] ZASLAVSKY D, ROZENBERG L V. Method for stabilization of soil aggregates: US4303438[P]. 1981-12-01.
- [18] ZHU Z W, SAWUT A, SIMAYI R, et al. Preparation of hypromellose-graft-polyacrylic acid superabsorbent resin by ultraviolet polymerization and its slow-release performance[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(6): 3128-3138.
- [19] TANAN W, PANICHPAKDEE J, SAENG SUWAN S. Novel biodegradable hydrogel based on natural polymers: Synthesis, characterization, swelling/reswelling and biodegradability[J]. *European Polymer Journal*, 2019, 112: 678-687.
- [20] LIU Y, WANG J P, CHEN H Y, et al. Environmentally friendly hydrogel: A review of classification, preparation and application in agriculture[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 846: 157303.
- [21] BRODSKY B, RAMSHAW J A M. The collagen triple-helix structure[J]. *Matrix Biology*, 1997, 15(8-9): 545-554.
- [22] NOOR N Q I M, RAZALI R S, ISMAIL N K, et al. Application of green technology in gelatin extraction: A review [J]. *Processes*, 2021, 9(12): 2227.
- [23] CARVALHO I C, MANSUR H S. Engineered 3D-scaffolds of photocrosslinked chitosan-gelatin hydrogel hybrids for chronic wound dressings and regeneration[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 78: 690-705.
- [24] 汪晓鹏. 制革固体废物提取胶原蛋白的研究和应用进展[J]. *西部皮革*, 2018, 40(5): 54-56.
- [25] 吴银秋, 傅涛, 高洪鑫, 等. PAM/CS/GO 水凝胶的制备及其吸湿行为[J]. *功能高分子学报*, 2021, 34(4): 394-400.
- [26] OMIDIAN H, HASHEMI S A, SAMMES P G, et al. Modified acrylic-based superabsorbent polymers (dependence on particle size and salinity)[J]. *Polymer*, 1999, 40(7): 1753-1761.
- [27] GALEŞ D C, TRINCĂ L C, CAZACU A, et al. Effects of a hydrogel on the cambic chernozem soil's hydrophysic indicators and plant morphophysiological parameters[J]. *Geoderma*, 2016, 267: 102-111.

(责任编辑:肖丽,殷锋,付强,张阳,和力新;英文编辑:周序林,郑玉才)