文章编号:1000-7601(2025)05-0272-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.27

黑土@PAM 保水剂对青藏高原“黑土滩”青稞生长和草原固沙性能的影响

李 榕,马 哲,丁宇儒,杨馥键,刘国正,马健琦

(甘肃民族师范学院化学与生命科学学院, 甘肃 合作 747000)

摘 要:为探寻适合青藏高原旱地青稞生长的适宜保水剂,并能有效治理其东部边缘“黑土滩”草原退化的现象,采用“黑土滩”的黑土(BC)、丙烯酰胺(AM)、N,N′-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)和过硫酸铵(APS)为原料,制备出吸水率 414.3%、保水率 383.8%的黑土@PAM 保水剂,并设计三因素三水平正交试验选择黑土@PAM 保水剂最佳优化组合;运用 FT-IR 和 SEM 对其微观结构进行表征和机理分析,同时研究了黑土@PAM 保水剂的反复吸水性能、抗盐性、pH 响应性、固沙性能及其在干旱胁迫下对青稞多酚氧化酶(PPO)活性和土壤持水性能的影响。结果表明,黑土@PAM 保水剂在经过 6 次反复吸水后,吸水率依然达 338.5%,适用于 pH 值为 6.0~9.0 的土壤环境;添加保水剂 35 d 后土壤湿度从 40.3%降至 34.1%,PPO 活性从 2.23 mg·g^{-1}升高至 2.31 mg·g^{-1},叶片出现褐变情况较少;在种植了梭罗草的土壤中施加黑土@PAM,土壤风蚀模数显著降低,说明其具有较好的固沙性能。

关键词:保水剂;合成工艺;固沙性能;青稞;青藏高原

中图分类号:S812.6; S512.9 **文献标志码**:A

Effects of black soil-@PAM water-retaining agent on the growth of highland barley and sand-fixing performance of grassland in “Black Soil Beach” of the Qinghai-Tibet Plateau

LI Rong, MA Zhe, DING Yuru, YANG Fujian, LIU Guozheng, MA Jianqi

(*College of Chemistry and Life Science, Gansu Normal College for Nationalities, Hezuo, Gansu* 747000, *China*)

Abstract: In order to find suitable water-retaining agents for the growth of highland barley or the Qinghai-Tibet Plateau and effectively control the degradation of the “black soil beach” grassland on its eastern margin, a black soil-based polyacrylamide water-retaining agent (BC@PAM) was prepared using black soil (BC), acrylamide (AM), N,N′-methylene bisacrylamide (MBA), and ammonium persulfate (APS). The BC@PAM had the water absorption rate of 414.3% and the water retention rate of 383.8%. A three-factor and three-level orthogonal test was designed to select the best synthesis conditions of BC@PAM. The microstructure of BC@PAM was characterized by FT-IR and SEM. The repeated water absorption performance, salt resistance, pH responsiveness, and sand-fixing performance of BC@PAM were evaluated. The effects of BC@PAM on the activity of PPO of highland barley and soil water retention under drought stress were analyzed. The results showed that the water retention rate of BC@PAM was as high as 338.5% after 6 times of repeated water absorption, and it was suitable for soil with the pH value of 6.0~9.0. The moisture of the soil with BC@PAM decreased from 40.3% to 34.1% after 35 days, the PPO activity in barley increased from 2.23 mg·g^{-1} to 2.31 mg·g^{-1}, and leaf browning was less frequent. After the application of BC@PAM, the wind erosion modulus of the soil planted with thoreau was significantly reduced, and it indicated that the soil had better sand-fixing performance.

Keywords: water-retaining agent; synthetic process; sand-fixing performance; highland barley; Qinghai-Tibet Plateau

收稿日期:2024-10-23 **修回日期**:2024-12-26

基金项目:甘肃省青年科技基金(25JRRP001);甘肃省高等教育教学改革研究重点项目(GJJGA134);甘肃省高等学校创新基金(2021B-302);2024 年甘肃民族师范学院校长科研基金(2024XZCX-19);2024 年甘肃民族师范学院教学成果培育项目(NO.17)

作者简介:李榕(1990-),女,甘肃卓尼人,副教授,主要从事土壤改性与修复及环境友好高分子材料研究。E-mail:Lirong1212r@163.com

防御并治理土壤沙漠化、提高水资源的利用率是干旱缺水地区实现农作物高产的重要途径之一[1],也是践行“绿水青山就是金山银山”理念的重要举措。保水剂是一类具有三维网络结构的新型高分子聚合物,因其具有良好的吸水保水效果,并且能反复吸水释放水,施入土壤后既可直接为植物根系提供水分,也可通过改善根际土壤结构间接提供植物生长发育所需的水分[2],被广泛应用于农林抗旱、土壤沙漠化治理等领域[3]。

目前,保水剂按照原料可分为腐植酸类保水剂[4]、淀粉类保水剂、纤维素类保水剂、有机无机复合类保水剂及聚合物类保水剂等。以高岭土为原料制备的复合保水剂既能提高保水剂的耐盐性,也可提高玉米的水分利用率[5];丙烯酸盐改性膨润土制备的聚合矿物复合保水剂可起到疏松土壤的功效[6];增加膨润土能有效提高保水剂的吸水保水率和重复吸水性能,并延长其使用寿命[7];基于凹凸棒石的保水剂可使小麦的穗数、穗粒数以及千粒重显著提升[8]。加入适量膨润土、生物炭、稀土和凹凸棒石制备的复合保水剂能缓解盐胁迫对冬小麦的不利影响,提高小麦产量[9]。研究发现,将保水剂、腐植酸和沸石等环境材料优化配比后,不仅使玉米增产,还可以提高作物氮磷肥的利用率[10]。保水剂可提高旱地玉米产量[11],也能在干旱胁迫下有效提高扶芳藤植物的株高、新芽数量及抗旱性[12],聚天冬氨酸保水剂可提高塔里木盆地胡杨幼苗根际土壤含水量[13]。因此,制备吸水量较高、保水性能较好、生物降解性能较优、降解产物对植物生长发育有促进作用、低成本的绿色环保土壤保水剂可以有效节约水资源、促进植物生长发育、保土保肥[14]、改善土壤结构、预防土壤沙漠化[15],解决了传统灌溉严重浪费水资源的问题,也是生产中的“微型水库”,有利于农业实现可持续发展。

天然高分子材料因其具有安全良好的性能,被广泛应用于植树造林、农药载体、土壤修复、保湿保鲜等领域[16]。黑土是一种资源广泛、无毒无害、降解性较好、廉价易得的绿色环保天然高分子,近年来受到了广泛的关注和利用。目前针对黑土的研究主要集中在东北地区[17-18],对青藏高原东部边缘甘南黑土滩草原黑土的研究非常少,仅限于其生态现状和草原退化原因等方面[19-21],对甘南黑土滩草原黑土的改性、循环利用方面尚属空白,青藏高原东部边缘“黑土滩”草原不断退化及自我修复的问题至今没有解决[22]。青藏高原地区水资源分布不均匀,合理调控及节约水资源是修复草原退化的重要途径[23]。由于不同种类的保水剂对土壤环境、植物种类等的适应性不一致,且目前适宜高原旱地青稞生长和治理青藏高原东部边缘“黑土滩”草原退化现象的保水剂类型尚不明确。聚丙烯酰胺(PAM)因其结构和性质的独特性,广泛应用于农林业、工业、医药业等,被称为“百业助剂”[24]。因此,本研究就地取材,以甘南分布面积较大的黑土(主要成分:碳酸盐黑钙土和高山草甸土)、丙烯酸盐、N,N′-亚甲基双丙烯酰胺、过硫酸铵为原料,制备出一种性能良好的黑土基高分子保水剂,有望在提高黑土吸水保水性能的同时,改善黑土的土壤结构,预防土壤沙漠化,为青藏高原“黑土滩”草原生态系统和农林业可持续发展提供新思路。

1　材料与方法

1.1　采样地概况

采样区位于甘肃省甘南藏族自治州合作市当周草原(102°54′E,39°59′N),其地处青藏高原的东部边缘,海拔 3 110 m,属高原大陆气候,气候多变,年降水量 558 mm,降水主要集中在 7—9 月,年均蒸发量较大。低温干旱是当地主要的气象灾害,草原退化是当地主要的生态问题。

1.2　试验地土壤理化指标及重金属测定

试验地土壤类型为碳酸盐黑钙土和高山草甸土。依据《土壤农业化学分析方法》[25]测定该试验地 0~25 cm 土层土壤基本理化性质为:pH 值 6.28,有机质 68.52 g·kg^{-1},全氮 5.68 g·kg^{-1},全磷 1.15 g·kg^{-1},全钾 16.80 g·kg^{-1},可溶性氮 498.33 mg·kg^{-1},有效磷 42.71 mg·kg^{-1},速效钾 37.50 mg·kg^{-1};Cu、Ni、Pb、Cd、Hg、As 含量分别为 24.58、29.56、21.02、0.83、0.04、8.49 mg·kg^{-1},除 Cd 之外,其他重金属含量均低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中的农用地污染筛选值标准[26],但 Cd 含量为 0.83 mg·kg^{-1},大于 pH≤6.5 时 0.3 mg·kg^{-1}的 Cd 筛选值,这是由于距取样区 100 m 处的一块试验田所施肥料中含有一定量的 Cd 杂质,导致附近区域土壤 Cd 含量较高。

1.3　试验材料

试验所用土壤在取样过程中,设置 5 个采样区域,每个采样区域相隔 50 m,每个区域采用 5 点取

样法,采集深度为0~5、5~10、10~15、15~20、15~20 cm,共计25个样品。每个采样点的取土量相同,将采集的黑土混合均匀,去除土壤中的石块、枯叶等杂质,风干后将其研磨过100目筛备用。

试验材料为青稞(*Hordeum vulgare* L.)幼苗和梭罗草(*Pontederia cordata* L.)幼苗,青稞品种为'北青4号',梭罗草是青藏高原特有的多年生草本植物,具有较高的饲用价值和生态价值,由本单位化学与生命科学学院植物学实验室提供。

1.4 黑土@PAM制备试验设计

在250 mL三口烧瓶内加入一定量处理好的黑土(BC),氮气保护下加入25 mL蒸馏水,搅拌40 min使其分散,待分散均匀后加入一定量的丙烯酰胺(AM)继续搅拌20 min;升温至50℃,再加入一定量的N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA);常温下搅拌20 min,再加入一定量的过硫酸铵(APS),升温至70℃后搅拌60 min,最后得到粘稠状固体。将其用蒸馏水洗涤数次,再用乙醇浸泡,去除未反应的单体。使用真空干燥箱在50℃下恒温干燥12 h即得黑土@PAM,将其研磨后过100目筛子,保留备用。

采用三因素三水平正交试验[10]设计黑土@PAM(BC@PAM)的最佳合成条件,设置m_{BC}:m_{AM}(X)、MBA的质量分数w_{MBA}(Y)、APS的质量分数w_{APS}(Z)3个因素,参照高分子合成中溶液聚合机理和农用保水剂的制备条件,如表1所示,设置m_{BC}:m_{AM}为X_1(5∶1)、X_2(5∶2)、X_3(5∶3)3个水平,设置w_{MBA}为Y_1(1.5%)、Y_2(2.0%)、Y_3(2.5%)3个水平,设置w_{APS}为Z_1(0.8%)、Z_2(1.2%)、Z_3(1.6%)3个水平。

表1 三因素三水平试验设计

Table 1 Three factor three-level experimental design

水平 Level	因素 Factor		
	m_{BC}∶m_{AM}(X)	w_{MBA}/%(Y)	w_{APS}/%(Z)
1	5∶1(X_1)	1.5(Y_1)	0.8(Z_1)
2	5∶2(X_2)	2.0(Y_2)	1.2(Z_2)
3	5∶3(X_3)	2.5(Y_3)	1.6(Z_3)

1.5 黑土@PAM保水剂的表征

采用FT-IR(FTS 3000,美国DigiLAB Merlin)、SEM(ULTRA PLUS,法国Zeiss公司)等方法,对BC@PAM保水剂的结构进行表征与分析。

1.6 黑土@PAM保水剂的性能测试

1.6.1 黑土@PAM保水剂的性能测试 反复吸水性能是衡量农用保水剂功效的重要指标,将未改性的BC和BC@PAM分别进行6次反复吸水试验。称取m_0(g)没有经过改性的BC和BC@PAM分别置于250 mL锥形瓶内,浸泡在足量的去离子水中,室温下浸泡24 h后过滤多余水分,称重记为m_1(g);将浸泡后的复合物放在户外自然风干,称重记为m_2(g);分别采用公式(1)和公式(2)计算BC和BC@PAM的吸水率和保水率。

$$吸水率(\%)=\frac{m_1-m_0}{m_0}\times 100\% \quad (1)$$

$$保水率(\%)=\frac{m_2-m_0}{m_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中,m_0为浸泡前BC或BC@PAM的质量(g);m_1为浸泡后BC或BC@PAM的质量(g);m_2为自然风干后BC或BC@PAM的质量(g)。

1.6.2 黑土@PAM保水剂的抗盐性能测试 在实际应用过程中,土壤中所含的盐类物质对保水剂的吸水率有较大影响,称取质量为0.1 g的BC@PAM保水剂和PAM保水剂,分别放置在0.90%的NaCl溶液中,测定不同时间的吸水率。

1.6.3 pH值对黑土@PAM保水剂吸水率的影响 在农业生产中,pH值对农用保水剂的化学结构有较大影响,从而影响保水剂的吸水率,因此,土壤pH值对保水剂的应用效果至关重要。将相同质量的BC@PAM保水剂和PAM保水剂分别放置在pH值为4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0、11.0和12.0的缓冲溶液中,测定吸水率。

1.6.4 干旱胁迫下黑土@PAM保水剂对青稞生长的影响 将青稞种子种在温室中,待其发芽并正常生长1个月后,选择60株长势、株高基本一致的幼苗分别栽植在2个容积相同的花盆中,每个花盆栽植30株,同时在花盆中放入质量为1.0 kg相同湿度的"黑土滩"草原黑土。其中一份中埋入0.05%的BC@PAM保水剂,另外一份为空白试样,待青稞幼苗生长正常后移入温室,将土壤湿度调整为相同,然后进行干旱胁迫试验,试验过程中不浇水,每隔5 d用湿度计测量2份土壤的湿度,测定多酚氧化酶(PPO)活性。测量时,将湿度计的探头插入土壤中,入土深度为3 cm,10 min后读取湿度值,连续观察35 d,并做好记录。

1.6.5 黑土@PAM保水剂的固沙性能 风蚀模数是衡量固沙性能的重要指标,也是表征草地是否发生退化的参数。通过计算风蚀模数对BC@PAM保水剂的固沙性能进行研究,将一定量浸泡后的保水剂与"黑土滩"草原黑土混合(保水剂质量约占土壤质量的0.1%),称质量后均匀平铺在盒子中,选择生

长状况良好的 50 株梭罗草移植在盒子中,在实验室利用自制小型风洞试验设备进行风蚀试验,该风洞为直流式吹风洞,由风机、集风罩、试验箱和风速仪组成,风洞全长 100 cm,试验段长 30 cm、宽 25 cm、高 30 cm,设置风速为 2~8 m·s^{-1},对应 2~8 级风,风蚀时间为 10 min,风蚀后称质量并记录,计算黑土@ PAM 保水剂的风蚀模数。

$$EM = \frac{M_1 - M_2}{St} \quad (3)$$

式中,EM 为风蚀模数(g·m^{-2}·min^{-1});M_1为风蚀前 BC@ PAM 和黑土混合的质量(g);M_2为风蚀后 BC@ PAM 和黑土混合的质量(g);S 为 BC@ PAM 和黑土混合的表面积(m^2);t 为风蚀时间(min)。

2　结果与分析

2.1　黑土@ PAM 保水剂的合成工艺

采用三因素三水平正交试验来选择 BC@ PAM 的最佳合成工艺。BC 和 AM 的质量比、交联剂用量以及引发剂用量对保水剂的吸水性和保水性影响较大,因此对以上条件进行了考察,结果如表 2 和表 3 所示,三因素对 BC@ PAM 保水剂的合成工艺的影响顺序为:$X>Z>Y$。综合考虑 BC@ PAM 保水剂的吸水率和保水率,选择最佳合成工艺组合为$X_2Y_2Z_3$。

2.2　黑土@ PAM 保水剂结构表征

2.2.1　FT-IR 分析　BC 和 BC@ PAM 的红外谱图如图 1 所示,在 BC 的 FT-IR 中看到,Si-O-Si 的伸缩振动引起的吸收峰出现在 1 041 cm^{-1}处,Si-O-Si 的弯曲振动引起的吸收峰出现在 542 cm^{-1}和 480 cm^{-1}处,-CH_3的伸缩振动引起的吸收峰出现在 1 459 cm^{-1}处,由于在 801 cm^{-1}处出现了石英的特征吸收峰,所以 BC 的 FT-IR 中有较多的无定型氧化硅。BC@ PAM 的 FT-IR 中保持了黑土的基本结构,在 1 700 cm^{-1}以上以及 1 000 cm^{-1}以下 BC@ PAM 与 BC 吸收峰相近,且酰胺-C=O 键的特征吸收峰出现在 3 458 cm^{-1}处,-NH_2的特征吸收峰出现在 3 183 cm^{-1}处,在 1 651 cm^{-1}处出现-NH_2的变形振动吸收峰,-C=O 的伸缩振动吸收峰出现在 1 692 cm^{-1}处,以上数据说明 BC 与 AM 成功复合。

2.2.2　SEM 分析　为研究 BC@ PAM 及其原料 BC 的表面形态,利用扫描电镜对改性前后 BC 的表面形态进行了 SEM 分析,结果如图 2 所示。由图 2 看出,BC 表面凹凸不平,有层状结构,层与层之间结合并不紧密,在高倍镜下可看到层状之间具有各种大小不同的空隙和孔洞(图 2B),这说明 BC 具有一定吸水保水性。经功能性单体 AM 进行改性得到的 BC@ PAM

表 2　BC@ PAM 合成因素水平表

Table 2　BC@ PAM synthesis factor level table

序号 No.	$m_{BC}:m_{AM}$	w_{MBA}/%	w_{APS}/%	吸水率/% Water absorption rate	保水率/% Water retention rate
1	X_1	Y_1	Z_1	363.9	342.5
2	X_1	Y_2	Z_2	357.5	348.8
3	X_1	Y_3	Z_3	371.6	354.1
4	X_2	Y_1	Z_2	363.5	344.7
5	X_2	Y_2	Z_3	414.3	383.8
6	X_2	Y_3	Z_1	402.9	379.0
7	X_3	Y_1	Z_3	376.4	362.6
8	X_3	Y_2	Z_1	389.5	371.8
9	X_3	Y_3	Z_2	362.7	347.4

表 3　三因素对 BC@ PAM 合成工艺的影响

Table 3　Effects of three factors on synthesis of BC@ PAM

指标 Index	吸水率/% Water absorption rate			保水率/% Water retention rate		
	X	Y	Z	X	Y	Z
K_1	1093.0	1103.8	1156.3	1045.4	1049.8	1093.3
K_2	1180.7	1161.3	1083.7	1107.5	1104.4	1040.9
K_3	1128.6	1137.2	1162.3	1081.8	1080.5	1100.5
k_1	364.3	367.9	385.4	348.5	349.9	364.4
k_2	393.6	387.1	361.2	369.2	368.1	347.0
k_3	376.2	379.1	387.4	360.6	360.2	366.8
极差 Range	29.3	19.2	26.2	20.7	18.2	19.8
主次序 Order	$X>Z>Y$			$X>Z>Y$		
优水平 Optimal level	X_2	Y_2	Z_3	X_2	Y_2	Z_3
优组合 Optimal treatment	$X_2Y_2Z_3$			$X_2Y_2Z_3$		

注:K_1、K_2和 K_3表示水平号分别为 1、2 和 3 时,对应这一列的试验结果之和,k_1、k_2和 k_3表示因素取水平号分别为 1、2 和 3 时,对应这一列的试验结果的算术平均值。

Note: K_1, K_2 and K_3represent the sum of results of 1, 2, and 3 level, respectively. k_1, k_2 and k_3 represent the average value of 1, 2, and 3 level, respectively.

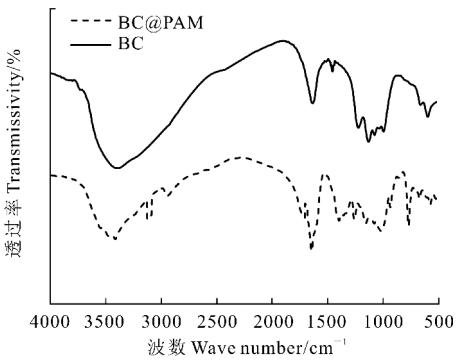


图 1　BC 和 BC@ PAM 的 IR 图谱

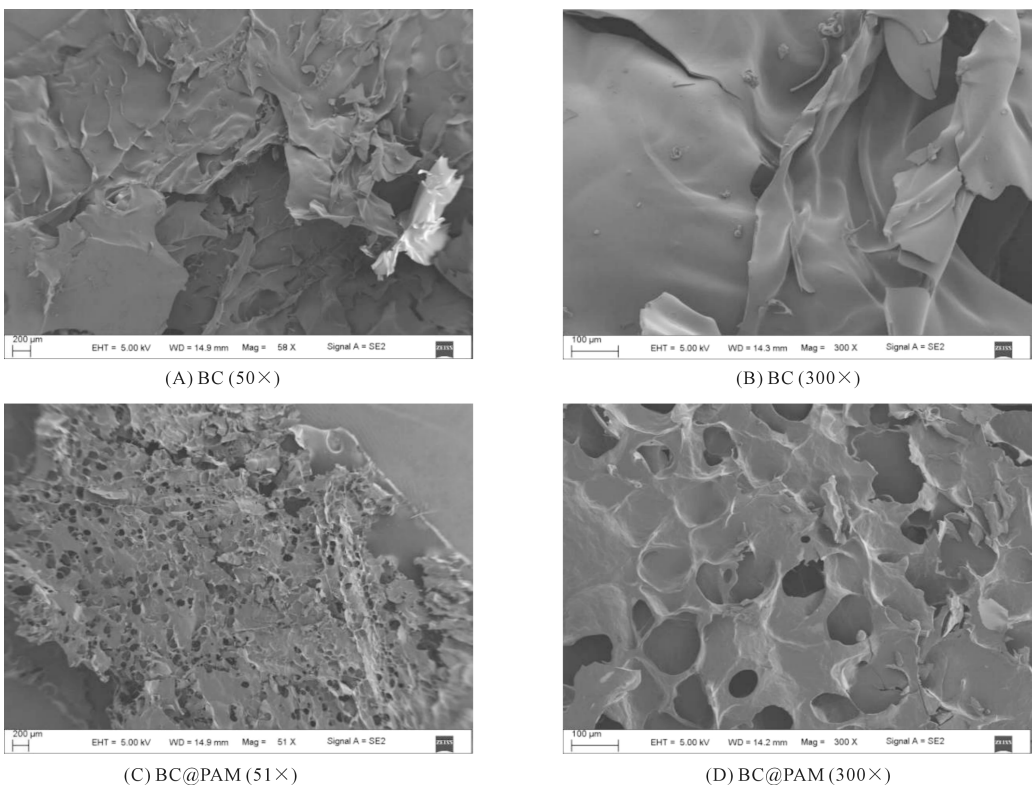
Fig.1　IR spectra of BC and BC@ PAM

表面形貌发生了改变,表面形成多孔状聚合物,孔径大小不同,使得比表面积增大。在高倍数下观察,可以看到疏松的层与层之间都有多孔结构,可以提高吸水性和保水性(图 2D)。

2.3 黑土@ PAM 保水剂的性能测试

2.3.1 黑土@ PAM 保水剂的吸水性能和反复吸水性能 BC@ PAM 保水剂的吸水性能测试结果如图 3 所示,BC@ PAM 的吸水率比聚丙烯酰胺聚合物(PAM)的吸水率高,两种保水剂在 40 min 后吸水率达到最高值,此时保水剂的溶胀性能达到平衡,BC@ PAM 保水剂的吸水率达到 414.3%,PAM 的吸水率达到 344.0%,说明黑土的加入可以明显增大保水剂的吸水率,这是由于黑土的多孔结构可以增大体积和比表面积,加强吸水性能。

反复吸水性能是衡量农用保水剂功效的重要指标,将 BC@ PAM 和 PAM 复合物分别进行 6 次反复吸水试验,如图 4 所示,BC@ PAM 在经过 6 次反复吸水之后吸水率从 425.6%下降到 338.5%,达到初始吸水率的 79.5%,符合 NY886-2022 标准要求(≥70%)[27],且每次吸水率均大于 300%;PAM 在经过 6 次反复吸水之后吸水率也会下降,从 354.1%下降到 175.0%,只能达到初始吸水率的 49.4%,说明 BC@ PAM 具有更好的反复吸水性能,黑土加入可增加 PAM 的使用寿命,并能达到 NY/T 886-2022 标准[27]要求。



(A) BC (50×) (B) BC (300×)

(C) BC@PAM (51×) (D) BC@PAM (300×)

图 2 BC 和 BC@ PAM 的 SEM 分析

Fig.2 SEM analysis of BC and BC@ PAM

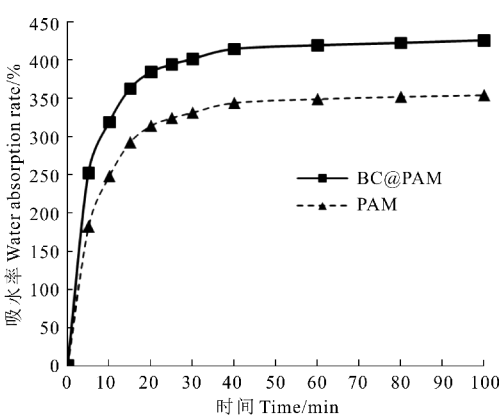


图 3 BC@ PAM 和 PAM 的吸水性能

Fig.3 Water absorption capability of BC@ PAM and PAM

2.3.2 黑土@ PAM 保水剂的抗盐性能测试 在实际应用过程中,土壤中所含盐类物质对农用保水剂的吸水率有较大影响,将相同质量的 BC@ PAM 保水剂和 PAM 分别放置在 0.9% NaCl 溶液溶液中,结果如图 5 所示。随着时间的增加,两种保水剂在 0.9% NaCl 溶液中的吸水率逐渐升高,40 min 后吸

水率达到最高,BC@ PAM 保水剂达到 352.3%,PAM 保水剂达到 298.7%,相较去离子水中的吸水率均有所下降,这是由于盐溶液中阳离子电荷数增多而引起的,与 Donnan 平衡理论一致。BC@ PAM 保水剂在 0.9% NaCl 溶液中的吸水率依然超过 300%,符合 NY/T 886-2022 标准[27]要求,说明 BC@ PAM 保水剂具有较好的抗盐性。

2.3.3　pH 值对黑土@ PAM 保水剂吸水率的影响　pH值对 BC@ PAM 保水剂和 PAM 聚合物吸水率的影响结果如图 6 所示,在不同的 pH 值下,增加天然高分子材料黑土的保水剂,其吸水能力均显著增加。当 pH<6.0 时吸水率较低,pH 值为 6.0~9.0 时吸水率较高,而 pH>9.0 时吸水率较低;当 pH 值较小时,H^+浓度较大,-COOH 的电离受到抑制,更多-COO^-以-COOH 的形式存在,使高分子链上的电荷分布发生变化,排斥力变小,保水剂网络结构的渗透压变小,保水率降低;当 pH 值较大时,H^+浓度减小,过强的碱性会导致高分子链过度水解,破坏保水剂的网络结构,保水率会降低。因此,BC@ PAM 保水剂适用于 pH 值为 6.0~9.0 的环境,试验基地土壤的 pH 值为 6.28,该保水剂适合在该地区使用。

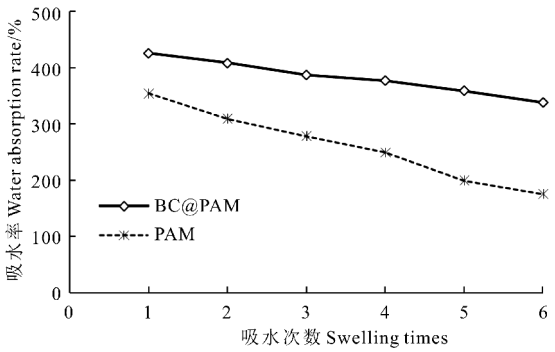


图 4　BC@ PAM 和 PAM 的反复吸水性能

Fig.4　Repeated water absorption capability of BC@ PAM and PAM

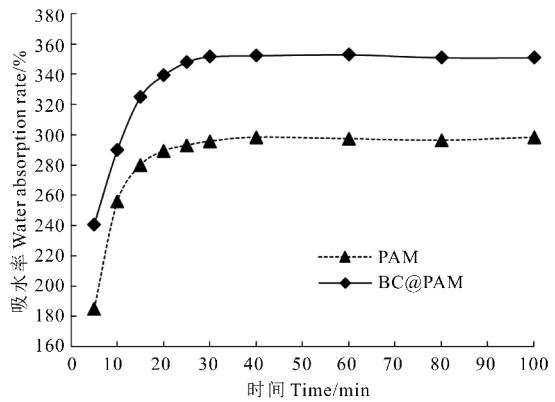


图 5　BC@ PAM 和 PAM 的抗盐性能

Fig.5　Salt resistance of BC@ PAM and PAM

2.3.4　干旱胁迫下黑土@ PAM 保水剂对青稞生长的影响　对青稞幼苗的干旱胁迫试验结果如表 4 所示。不加保水剂的样品土壤湿度降低较快,35 d 后从 40.5%降到 8.6%;PPO 活性升高,青稞的叶子也会逐渐变黄,发生褐变,直至干枯。添加保水剂的样品土壤湿度 35 d 后从 40.3%降到 34.1%,降幅较小,PPO 活性提高 0.08 mg·g^{-1},说明施加保水剂后土壤保湿效果较好,PPO 活性较为稳定。

2.3.5　黑土@ PAM 保水剂的固沙性能　为研究 BC@ PAM 保水剂对“黑土滩”草原土壤的固沙性能,将 3.0 g 干燥的 BC@ PAM 保水剂浸泡后的与 1.0 kg “黑土滩”草原黑土混合,混合后将其均匀平铺在一定面积的盒子中,选择生长状况良好的梭罗草移植至盒子中,在实验室进行风蚀试验,设置风速为 2~8

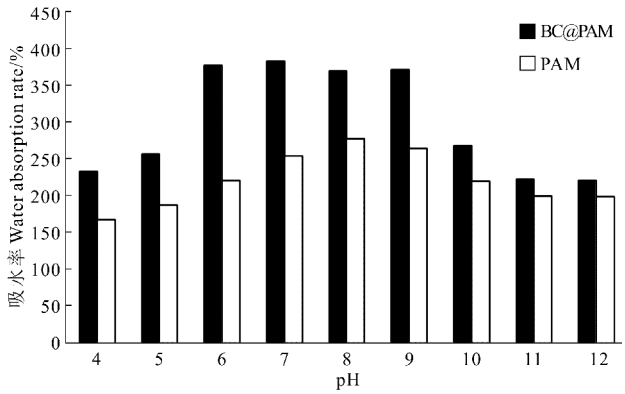


图 6　pH 值对 BC@ PAM 和 PAM 吸水率的影响

Fig.6　Effects of pH value on water absorption rate of BC@ PAM and PAM

表 4　BC@ PAM 对青稞生长过程中持水性能的影响

Table 4　Effects of BC@ PAM on the water-holding properties of highland barley during the growth process

处理后天数 Days after treatment /d	不加保水剂 Without water-retaining agent		添加保水剂 Add water-retaining agent	
	土壤湿度/% Soil moisture content	PPO /(mg·g^{-1})	土壤湿度/% Soil moisture content	PPO /(mg·g^{-1})
1	40.5	2.37	40.3	2.23
5	30.8	2.18	43.5	2.10
10	18.2	3.84	42.8	2.49
15	15.0	4.02	40.6	2.33
20	12.5	4.89	35.5	2.15
25	14.1	4.86	38.4	2.11
30	12.8	-	35.0	2.24
35	8.6	-	34.1	2.31

注:“-”表示无法检出。

Note: “-” indicates unable to detect.

$m \cdot s^{-1}$,对应2~8级风,风蚀时间为10 min,利用公式(3)计算风蚀模数,结果如图7所示。加入BC@PAM保水剂的土壤风蚀模数比加入PAM保水剂的土壤风蚀模数小,随着风速的增大,风蚀模数均逐渐增大,说明BC@PAM保水剂对"黑土滩"草原土壤具有较好的固沙性能。

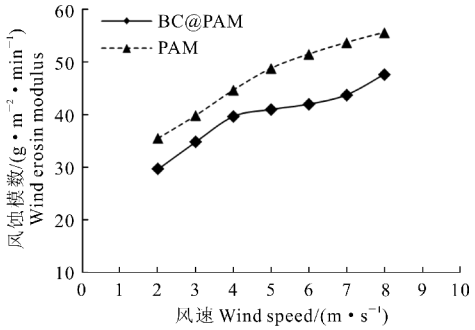


图7 BC@PAM对"黑土滩"草原土壤的风蚀模数影响

Fig.7 Effects of BC@PAM on the wind erosion modulus of sandy soil

3 讨论与结论

本文以"黑土滩"黑土(BC)、丙烯酰胺(AM)、N,N′-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)和过硫酸铵(APS)为原料,通过三因素三水平正交试验最佳优化组合,制备出吸水率高达414.3%、保水率高达383.8%的BC@PAM保水剂,用FT-IR和SEM对其微观结构进行表征和机理分析,说明保水剂成功合成。

保水剂的应用是干旱地区实现农作物高产的重要路径,由于甘肃省甘南地区降水分布极不均衡,在青稞生长生产过程中,干旱胁迫会对青稞幼苗造成一定影响,BC@PAM保水剂可有效缓解青稞生长前期的干旱胁迫,并且具有反复吸水-释放水的功效。本研究表明,BC@PAM保水剂在经过6次反复吸水之后,吸水率依然高达338.5%,达到原有吸水率的79.5%,达到NY/T 886-2022农林保水剂标准[27]。种植青稞幼苗后加保水剂的土壤35 d后湿度从40.3%降到34.1%,青稞的PPO活性从2.23 $mg \cdot g^{-1}$升高到2.31 $mg \cdot g^{-1}$,叶片出现褐变的情况较少,说明BC@PAM保水剂可为高原旱地青稞高产提供保障。本研究还发现,BC@PAM保水剂具有较好的抗盐性能,适用于pH值为6.0~9.0的土壤环境,说明此保水剂也可应用在其他盐碱土壤,有效改变土壤结构,实现农作物的高产。

针对青藏高原东部边缘"黑土滩"草原不断退化并且不能自我修复的问题,BC@PAM保水剂的应用也是实现草地可持续发展的重要路径。本研究通过对青藏高原特有品种梭罗草的风蚀试验发现,加入BC@PAM保水剂的土壤风蚀模数比加入PAM保水剂的土壤风蚀模数小,说明BC@PAM保水剂具有较好的固沙性能。

参 考 文 献:

[1] 郭东权, 饶良懿. 淀粉基保水剂的选择设计及其保水固沙性能[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(5): 1098-1108.
GUO D Q, RAO L Y. Synthesis and design of starch based superabsorbent polymer and its water-retaining and sand-fixing properties in sandy soil[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(5): 1098-1108.

[2] 黄占斌, 孙朋成, 钟建, 等. 高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 125-131.
HUANG Z B, SUN P C, ZHONG J, et al. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 125-131.

[3] 周萍, 方珂, 赵楠, 等. 保水剂施用量对西南紫色土水分和养分特征及烟叶品质的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 53-63.
ZHOU P, FANG K, ZHAO N, et al. Influence of the condition of different dosages of water retaining agent application on soil water content and soil nutrients and the indices of the flue-cured tobacco quality in purple soils of southwest of China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 53-63.

[4] 黄占斌, 冯俊义, 马浩冉, 等. 腐植酸在旱地农业土壤改良和水肥增效中的作用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 49-54.
HUANG Z B, FENG J Y, MA H R, et al. Effects of humic acid on soil improvement and water and fertilizer use efficiency in dryland agriculture[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 49-54.

[5] 黄帮裕, 樊小林, 杜建军, 等. 有机-无机复合保水剂的制备及应用效果研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(12): 243-247.
HUANG B Y, FAN X L, DU J J, et al. Preparation and application of organic-inorganic water retaining agent[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(12): 243-247.

[6] 李备, 韩占涛, 张发旺, 等. 丙烯酸-膨润土保水剂的制备及其保水效果研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(5): 289-292.
LI B, HAN Z T, ZHANG F W, et al. Study on preparation and water retaining effect of acrylic acid-bentonite water retaining agent[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(5): 289-292.

[7] 牛育华, 赵轩, 张昌辉, 等. KHA/CEL/AA-膨润土增强型保水剂的制备与性能研究[J]. 现代化工, 2021, 41(10): 123-128, 134.
NIU Y H, ZHAO X, ZHANG C H, et al. Preparation and properties of KHA/CEL/AA-bentonite reinforced water retaining agent[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(10): 123-128, 134.

[8] 王依惠, 张叶子, 王亚菲, 等. 凹凸棒石保水剂对小麦旗叶光合特性及衰老的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (4): 202-207.
WANG Y H, ZHANG Y Z, WANG Y F, et al. Effects of atapulgite water retaining agent on photosynthesis and senescence of flag leavesin wheat[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2020, (4): 202-207.

[9] 许允硕, 高昱, 陈双, 等. 复合保水剂对盐碱地冬小麦旗叶光合、衰老及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 38-49.
XU Y S, GAO Y, CHEN S, et al. Effects of compound water retaining

agent on photosynthesis, senescence and yield of flag leaf of winter wheat in saline-alkali land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2): 38-49.

[10] 智丹, 黄占斌, 田艳飞, 等. 环境材料对不同水肥条件下玉米氮磷利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 102-107, 135.
ZHI D, HUANG Z B, TIAN Y F, et al. Effects of environmental materials on NUE and PUE of maize under different water and fertilizer conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 102-107, 135.

[11] 刘礼, 孙东宝, 王庆锁. 不同保水剂对旱地春玉米生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 262-268.
LIU L, SUN D B, WANG Q S. Effects of different water-retention agents on yield and growth of dryland spring maize[J].Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 262-268.

[12] 周航, 杨柳青, 雍玉冰, 等. 干旱胁迫下保水剂对3 种扶芳藤生长和生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(9): 148-160.
ZHOU H, YANG L Q, YONG Y B, et al. Effects of water retaining agent on physiological characteristics of three *Euonymus* plants under drought stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(9): 148-160.

[13] 刘辰宇, 马蕊, 罗文静, 等. 保水剂用量对胡杨幼苗生长、光合特性和抗逆生理的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 36-44.
LIU C Y, MA R, LUO W J, et al. Effects of super absorbent polymer dosage on growth, photosynthetic characteristics and stress-resistance physiology of *Populus euphratica* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 36-44.

[14] 张玉斌, 景泉, 崔金虎, 等. 富钼专用保水剂对东北典型土壤保墒性能及大豆幼苗生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(1): 63-69.
ZHANG Y B, JING Q, CUI J H, et al. Effects of molybdenum-rich super absorbent polymers on soil water retention and soybean seedling growth in typical soils of northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(1): 63-69.

[15] YU J, SHI J G, MA X, et al. Superabsorbent polymer properties and concentration effects on water retention under drying conditions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 889.

[16] 李榕, 卢新生, 王亚玲, 等. 大豆分离蛋白基抗紫外性缓释农药载体的制备及应用[J]. 农药, 2023, 62(3): 177-180.
LI R, LU X S, WANG Y L, et al. Preparation and application of soybean protein isolate based anti-UV and sustained-release pesticide carrier[J]. Agrochemicals, 2023, 62(3): 177-180.

[17] 薛里, 张忠学, 齐智娟, 等. 节水灌溉下生物炭与有机肥添加对黑土区稻田净碳排放的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 382-390, 441.
XUE L, ZHANG Z X, QI Z J, et al. Effects of biochar and oganic fertilizer addition on net carbon emission of paddy field in black soil area under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 382-390, 441.

[18] 郝紫玉, 邵亚旭, 刘涛, 等. 东北农田黑土固碳微生物研究进展[J]. 微生物学通报, 2024, 51(6): 1873-1886.
HAO Z Y, SHAO Y X, LIU T, et al. Research advances of carbon-fixing microorganisms in the black soil of Northeast China[J]. Microbiology (Reading, England), 2024, 51(6): 1873-1886.

[19] 韩淑英. 甘南黑土滩草原生态现状及保护措施建议[J]. 山东畜牧兽医, 2024, 45(8): 68-71.
HAN S Y. Ecological status and protection measures of Gannan black soil flat grassland[J]. Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2024, 45(8): 68-71.

[20] 冯娅斯, 蒋文婷, 刘益宏, 等. 翻耕和植物残体覆盖对“黑土滩”型退化草地土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(11): 15-29.
FENG Y S, JIANG W T, LIU Y H, et al. Effects of plowing and plant residue mulching on soil nitrous oxide emissions in a black soil beach-type degraded grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(11): 15-29.

[21] 蔡宗程, 吕亮雨, 刘青青, 等. 青藏高原黑土滩退化草地修复措施与展望[J]. 北京农学院学报, 2024, 39(2): 115-120.
CAI Z C, LV L Y, LIU Q Q, et al. Restoration measures and prospects for degenerated grassland of black soil beach in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2024, 39(2): 115-120.

[22] ZHANG Q, LIU K S, SHAO X Q, et al. Microbes require a relatively long time to recover in natural succession restoration of degraded grassland ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107881.

[23] 赵锦梅, 王彦辉, 王紫, 等. 祁连山东段金强河河谷高寒草地土壤的水文特征[J]. 草业科学, 2020, 37(2): 256-265.
ZHAO J M, WANG Y H, WANG Z, et al. Soil hydrological characteristics of alpine grasslands in the Jinqiang River Valley in Eastern Qilian Mountains[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(2): 256-265.

[24] 尚成新, 伏露瑶, 范旭泽, 等. 聚丙烯酰胺树脂的反相悬浮聚合制备及吸水性能研究[J]. 化学研究与应用, 2024, 36(8): 1861-1867.
SHANG C X, FU L Y, FAN X Z, et al. Preparation and water absorption properties of polyacrylamide resin by inverse suspension polymerization[J]. Chemical Research and Application, 2024, 36(8): 1861-1867.

[25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 474-490.
LU R K. Analytical method of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 474-490.

[26] 生态环境部国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准: GB15618-2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018: 2-3.
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality — Riskcontrol standard for soil contamination of agricultural land[S]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2018: 2-3

[27] 中华人民共和国农业农村部. 农林保水剂: NY/T886-2022[S]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Agro-forestry absorbent polymer[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.