

干旱胁迫下新型复合水凝胶对烟草生理特性的影响

刘玲玲¹, 张瑛², 刘云飞², 李军正¹, 常剑波¹, 韦凤杰³,
杨晓朋², 姬小明^{2*}, 李洪臣¹, 杨建新^{1*}

(1.河南省烟草公司三门峡市公司, 河南 三门峡 472000; 2.河南农业大学 烟草学院,
国家烟草栽培生理生化研究基地, 烟草行业烟草栽培重点实验室, 郑州 450046;
3.中国烟草总公司河南省公司, 郑州 450000)

摘要:【目的】探究新型复合水凝胶对干旱胁迫下烟苗生理特性的影响。【方法】通过盆栽试验, 设计了水凝胶添加量和水凝胶种类2个试验因素, 其中水凝胶添加量分别为土壤干质量的0.1%、0.5%、0.9%, 水凝胶分别为商用水凝胶HS、新型复合水凝胶HM(聚乙烯醇-丙烯酸-分子筛水凝胶)和HB(聚乙烯醇-丙烯酸-生物炭水凝胶), 以不添加水凝胶为对照(CK), 研究新型复合水凝胶对干旱胁迫下烟草生物量积累、根系发育、光合系统及氧化应激的影响。【结果】在同一水凝胶添加量下, 与HS处理相比, HM、HB处理均有效提高干旱胁迫下烟草鲜质量、干质量及总含水率。与CK相比, HM、HB处理最大可使鲜质量分别提高153.91%、126.34%。且在同一水凝胶添加量下, 与HS处理相比, HM、HB处理烟草的总根长、总根表面积、平均根径、根尖数和根体积显著增加, 烟草的根系活力、烟草光合参数、SPAD值提高, 叶片气孔状态改善; 烟草SOD(超氧化物歧化酶)、POD(过氧化物酶)和CAT(过氧化氢酶)活性及可溶性蛋白量提高, MDA(丙二醛)量显著降低, 烟草抗逆性增强。【结论】添加量为土壤干质量0.9%的HM、HB水凝胶可以有效减轻干旱胁迫对烟草的影响, 提高烟草抗旱能力。

关键词: 复合水凝胶; 分子筛; 生物炭; 干旱; 烟草

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023122

OSID:



刘玲玲, 张瑛, 刘云飞, 等. 干旱胁迫下新型复合水凝胶对烟草生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 15-22.

LIU Lingling, ZHANG Ying, LIU Yunfei, et al. Effects of Novel Composite Hydrogels on Physiological Properties of Tobacco under Drought Stress[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 15-22.

0 引言

【研究意义】干旱胁迫是严重限制作物生长和产量的主要非生物胁迫之一, 也是制约我国农业生产的主要因素^[1]。在植物生长过程中, 干旱胁迫直接影响叶片光合速率和气体交换, 同时减少根系生物量的积累, 使植物生长受阻^[2]。干旱胁迫会诱导细胞内活性氧(ROS)过度积累, 导致膜脂过氧化、酶功能障碍、叶绿素降低等, 影响植物生长代谢^[3]。烟草是一种重要的经济作物, 干旱胁迫会导致烟草根系吸水能力下降, 无法高效吸收利用营养元素, 导致代谢减弱, 进而影响烟草生长发育^[4], 降低烟草生产力。因此, 缓

解干旱胁迫给烟草带来的不利影响, 发展烟草栽培抗旱保水技术对烟叶的优质稳产具有重要意义。

【研究进展】近年来, 水凝胶在污水处理^[5]、农业保水保肥^[6]、医用敷料^[7]等领域中均有广泛应用。水凝胶作为一种土壤保水剂, 可以缓解干旱胁迫对烟草的毒害作用^[8]。如陈芳泉等^[9]采用的改性淀粉高分子吸水材料保水剂在中度干旱条件下, 可改善不同烤烟品种农艺性状, 提高根系活力与叶片抗氧化酶活性, 增强烟草对干旱的抗逆性。白岗栓等^[10]研究表明, 施用水凝胶可有效协调半干旱地区烟叶化学成分, 提高烤烟产量和质量。然而传统水凝胶的吸水保水性较差, 缓解干旱胁迫对植物毒害的效果并不理想, 而在传统水凝胶基础上制备出的复合水凝胶具有更强的机械性能、更复杂的空间网络结构和更丰富的亲水基团(-OH、-COOH、-NH₂等), 使其具备更优异的吸水保水性能^[11]。Su等^[12]利用传统水凝胶材料丙烯酰胺复合海藻酸盐、蒙脱土和Ca²⁺制备的互穿纳米复合水凝胶(PMACa), 具有较强且可逆的pH值依赖性溶胀行为, 在碱性介质中溶胀行为可增加9倍, 能够作为农业使用的优异保水材料, 并且海藻酸盐对土壤改良也有积极作用。Niu等^[13]制得的复合腐殖酸(HA)

收稿日期: 2023-03-25 修回日期: 2023-06-07 网络出版日期: 2023-10-17

基金项目: 河南省烟草公司三门峡市公司项目(2022411200200004x); 国家级大学生创新创业项目(202210466046)

作者简介: 刘玲玲(1990-), 女, 助理农艺师, 主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail: 929429639@qq.com

张瑛(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事烟草化学品质研究。

E-mail: 3061038286@qq.com

通信作者: 杨建新(1969-), 男, 助理农艺师, 学士, 主要从事烟叶生产研究。E-mail: 147865250@qq.com

姬小明(1972-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事烟草化学质量评价研究。E-mail: xiaomingji@henau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND协议

凝胶肥料在缓慢释放腐殖酸的同时还有着很强的保水能力,可调节土壤水肥状况,提高土壤的吸附与交换能力,平衡土壤酸碱度。

【切入点】复合水凝胶相较于传统水凝胶具有更强吸水保水性能。然而复合水凝胶的研究多集中在制备和性能测试上,针对复合水凝胶缓解干旱胁迫对烟草毒害的机理研究较少。且有关生物炭、分子筛复合水凝胶对烟草抗旱生理调节机制影响的研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】鉴于此,本试验旨在探究不同自制复合水凝胶用量对干旱条件下烟苗生理特性的影响,为复合水凝胶在烟叶生产中的应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

HB(聚乙烯醇-丙烯酸-生物炭水凝胶)、HM(聚乙烯醇-丙烯酸-分子筛水凝胶)由河南农业大学烟草学院烟草化学实验室提供,制备方法:配制5%的聚乙烯醇溶液(polyvinyl alcohol, PVA),取1.0 g PVA加入20 mL去离子水,95 °C搅拌至PVA完全溶解。取9 mL丙烯酸(acrylic acid, AA)加入45 mL去离子水以5 mol/L的KOH调pH值至7~8之间,得AA溶液。将引发剂过硫酸铵和交联剂N,N'-亚甲基双丙烯酰胺溶解在AA溶液中,与PVA溶液、适量过0.15 mm孔径筛的花生壳生物炭(B)或4A分子筛(M)混合,超声振荡使生物炭或分子筛均匀分散在反应体系中,在60 °C条件下,转速为400 r/min搅拌6 h,制得HB或HM复合水凝胶,干燥粉碎备用。HS为丙烯酸盐型商用保水剂,购自山东唯信农业科技有限公司。

供试土壤为黄壤土,取自河南农业大学许昌科教园区,土壤pH值为7.3,有机质量为22.12 g/kg,碱解氮量为76.6 mg/kg,有效磷量为11.70 mg/kg,速效钾量为111.70 mg/kg,水溶性氯质量分数为24.80 mg/kg,田间质量持水率为20.30%,使用前风干、过筛,每盆装200 g土壤,塑料盆规格为7 cm×7 cm(直径×高度),底部有小孔。供试烟草品种为中烟100。

1.2 试验设计

试验于2021年8—10月在河南农业大学烟草学院国家烟草栽培生理生化研究基地人工气候室进行。盆栽试验设置10个处理,具体试验设计方案见表1。将不同材料与200 g土壤混合均匀,倒入塑料盆中,从出现第4片真叶的烟苗中筛选出长势均匀的烟苗移栽到塑料盆中,每个塑料盆中1株烟苗,每个处理均移栽20株烟苗。所有盆栽均置于光照培养架上,光照强度200 μmol/(m²·s),光温25 °C,每天光照

12 h。返苗7 d后,将盆栽浸入3 cm水层中静置8 h,确保每个盆栽吸水后土壤达到饱和状态,此后不再浇水待其自然干旱,干旱后第10天对烟草幼苗进行取样检测。

表1 试验设计

Table 1 Test design

处理	土壤质量/(g·盆 ⁻¹)	保水剂类别	水凝胶添加量/%
CK	200	-	-
HS1	200		0.1
HS2	200	HS	0.5
HS3	200		0.9
HB1	200		0.1
HB2	200	HB	0.5
HB3	200		0.9
HM1	200		0.1
HM2	200	HM	0.5
HM3	200		0.9

注 表中水凝胶添加量为占土壤干质量的比例。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 水凝胶持水和保肥性能测试

采用土柱淋溶法,淋溶柱为高50 cm、直径110 mm的PVC管,土壤取自河南农业大学花坛,碱解氮量为176.6 mg/kg,速效钾量为211.7 mg/kg,速效磷量为61.7 mg/kg,土壤填装量为30 cm,预留20 cm灌水层,PVC管底部用收纳盒接收渗漏液。将称量好的过筛干土和干水凝胶充分混合,然后倒入淋溶柱中,上层用少量蛭石防止加水时土壤被水扰动。淋溶后取样测定各处理的土壤最大持水率,参照文献[14]测定各处理的土壤养分量。

1.3.2 土壤含水率测定

土壤含水率采取烘干称质量法^[15]测定。

1.3.3 根系指标测定

根系洗净后取根系末端的白嫩根作为测定材料,采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力。用EPSON Perfectio V800 Photo根系扫描仪(日本EPSON公司)扫描烟草根系获得根系图片,利用根系分析软件WinRHIZO对烟草幼苗根系图片进行分析获得烟草幼苗根系总根长、根体积、平均根直径、根表面积。

1.3.4 烟草含水率测定

分离烟株地上部和根系直接称质量法测定根系鲜质量,后置于电热恒温鼓风干燥箱中,105 °C杀青15 min,60 °C烘干至恒质量测定干质量。烟草含水率采用烘干称质量法测定。

1.3.5 叶片电导率的测定

取0.1 g鲜活烟叶样品,用去离子水冲洗后吸干表面水分,放入洁净玻璃试管中加入10 mL蒸馏水室温浸泡12 h。采用电导率仪(DDS-307型)测定提取

液电导率 R_1 ，沸水浴加热 30 min 后冷却，摇匀后测定提取液电导率 R_2 ，得到相对电导率($R_1/R_2 \times 100\%$)。

1.3.6 光合指标及 SPAD 值测定

选择第 3 片真叶(从上往下数)用 LI-6400 型便携式光合作用分析仪(美国 Li-COR 公司生产)在 09:00—11:00 测定净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 摩尔分数(C_i)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)。

SPAD 值测定:使用 SPAD-502Plus 叶绿素仪(日本柯尼卡美能达公司)测定第 3 片真叶(从上往下数)的叶基部、叶中部和叶尖部 SPAD 值取平均值。

1.3.7 叶片气孔拍照

选择第 3 片真叶(从上往下数)在 09:00—11:00 用 NP 900 型偏光显微镜(中国 Nexcope 公司生产)观察叶片表皮气孔开合状态并拍照。

1.3.8 抗氧化酶活性及丙二醛测定

植物叶片的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性、过氧化物酶(oxidase, POD)活性和过氧化氢酶(catalase, CAT)活性采用索莱宝试剂盒相应指标说明书方法测定;可溶性蛋白量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[16]测定;采用硫代巴比妥酸(TBA)法检测丙二醛(MDA)量。

1.3.9 过氧化氢、超氧阴离子及死细胞检测

检测前采取不同处理的第 4 片真叶(从上往下数)清理干净备用,参考 3,3'-二氨基联苯胺法(DAB)^[17],对烟草叶片的过氧化氢(H_2O_2)积累情况进行检测,烟叶放入 DAB 染液浸染 24 h 后用 95%乙醇浸泡脱去叶绿素;采用硝基氮蓝四唑法(NBT)^[18]对叶片进行染色原位检测烟苗叶片超氧阴离子(O_2^-),NBT 溶液浸泡 5 h 后用 95%乙醇充分脱去叶绿素;参照 Islam

等^[19]描述的台盼蓝染色法测定死亡细胞,稍作修改,用配置好的台盼蓝染液浸泡烟叶 6 h,然后将叶子在沸腾的乙醇中脱色 20 min 去除叶绿素。最后将上述处理的叶片用 Epson Perfection V800 Photo 扫描仪(日本 EPSON 公司生产)扫描拍照。

1.4 数据处理

运用 Graphpad8.3 进行制图,使用 DPS 7.0 软件对数据进行单因素方差分析,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 各处理持水和保肥性能测试

由表 2 可知,添加水凝胶均显著增加土壤最大持水率($P < 0.05$),与 CK 相比,HS1、HB1、HM1、HS2、HB2、HM2、HS3、HB3、HM3 处理的土壤最大持水率分别增加了 1.46%、5.33%、5.69%、5.85%、7.61%、8.84%、9.30%、12.26%、12.49%。除 HS1 处理的速效磷量高于 CK 且不显著外,其他处理的碱解氮量、速效钾量、速效磷量均显著高于 CK。在相同水凝胶添加量下,与 HS 处理相比,HB、HM 处理的碱解氮量、速效钾量、速效磷量均增加。水凝胶添加量相同时,与 HS 处理相比,HB 处理 3 个水凝胶添加量下的土壤最大持水率分别提高 10.50%、4.27%、6.62%,HM 处理 3 个水凝胶添加量下的土壤最大持水率分别增加 11.47%、6.37%、7.13%。总体而言,与 CK 和 HS 处理相比,HB、HM 处理的土壤最大持水率提高,土壤中碱解氮、速效钾、速效磷量的流失减缓,且具有良好的保肥性能,可有效减少土壤养分流失。

表 2 各处理的土壤最大持水率和养分量

Table 2 Soil water holding capacity and nutrient content of different treatments

处理	土壤最大持水率/%	碱解氮量/(mg·kg ⁻¹)	碱解氮流失量/%	速效钾量/(mg·kg ⁻¹)	速效钾流失量/%	速效磷量/(mg·kg ⁻¹)	速效磷流失量/%
CK	35.41±0.42h	83.16±1.44g	52.91	106.24±4.48d	49.81	41.56±1.33f	32.65
HS1	36.87±0.22g	115.71±1.53f	34.48	147.66±3.74c	30.25	43.25±0.97ef	29.90
HB1	40.74±0.22f	117.61±1.01ef	33.40	146.74±1.29c	30.69	44.1±0.976e	28.43
HM1	41.10±0.09ef	119.16±1.51de	32.53	148.30±2.51c	29.94	44.25±0.80e	28.28
HS2	41.26±0.40e	120.35±1.85de	31.85	151.32±2.34c	28.53	48.56±0.84cd	21.30
HB2	43.02±0.20d	122.17±3.01d	30.82	156.40±1.52b	26.12	50.58±1.40c	18.03
HM2	43.89±0.28c	127.79±1.64c	27.64	159.51±2.19b	24.65	50.61±0.26c	17.98
HS3	44.71±0.35b	134.64±1.92b	23.76	160.73±3.08b	24.07	52.91±1.28b	14.25
HB3	47.67±0.18a	136.49±1.54ab	22.71	161.40±2.58ab	23.76	55.80±1.61a	9.56
HM3	47.90±0.24a	137.94±1.66a	21.89	165.88±2.16a	21.65	56.09±1.50a	9.09

注 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 干旱胁迫下各处理土壤含水率

由图 1 可知,与 CK 相比,随着商用保水剂和自制水凝胶用量的增加,各处理烟草土壤含水率显著提高($P < 0.05$),土壤含水率表现为 HM 处理>HB 处理>HS 处理>CK。相同水凝胶添加量下,土壤含水率表现为 HM 处理>HB 处理>HS 处理,且土壤含水率

随 HB、HM 水凝胶添加量的增加而增加,其中 HB3、HM3 处理土壤含水率显著高于其他处理。与 CK 相比,HB3、HM3 处理土壤含水率分别增加 137.51%、138.59%。与 HS 处理相比,HB3、HM3 处理土壤含水率分别增加 7.55%、8.07%。整体来看,增加 HB、HM 处理水凝胶添加量有利于增强土壤的保水效果,

提高干旱胁迫下土壤含水率。

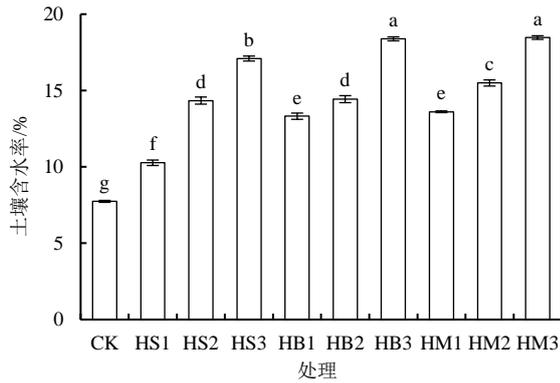


图1 干旱胁迫下各处理烟草土壤含水率

Fig.1 Soil water content of tobacco planting of different treatments under drought stress

2.3 干旱胁迫下各处理烟草根系发育指标

由表3可知,与CK相比,随着商用保水剂和自

表3 干旱胁迫下各处理烟草根系发育指标

Table 3 Root development index of different treatment under drought stress

处理	根系活力/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	总根长/cm	总根表面积/ cm^2	根体积/ cm^3	平均根直径/mm
CK	92.27 \pm 1.54h	352.82 \pm 2.44g	112.17 \pm 2.85f	2.13 \pm 0.02j	0.77 \pm 0.01i
HS1	96.28 \pm 1.08g	368.26 \pm 1.83f	141.38 \pm 3.13e	2.84 \pm 0.03i	0.83 \pm 0.01h
HB1	97.65 \pm 1.46g	375.64 \pm 4.27ef	142.53 \pm 1.32e	2.93 \pm 0.04h	0.89 \pm 0.03g
HM1	99.17 \pm 0.98g	382.14 \pm 5.35e	145.35 \pm 2.92e	4.61 \pm 0.02g	0.93 \pm 0.02f
HS2	121.98 \pm 1.08f	434.92 \pm 3.70d	186.56 \pm 1.53d	4.18 \pm 0.04f	0.96 \pm 0.01f
HB2	126.15 \pm 1.42e	431.58 \pm 5.80d	194.54 \pm 2.44c	4.33 \pm 0.04e	1.02 \pm 0.02e
HM2	134.02 \pm 1.47d	436.19 \pm 5.96d	206.91 \pm 3.28b	5.80 \pm 0.03d	1.13 \pm 0.02d
HS3	140.38 \pm 1.32c	564.62 \pm 7.01c	220.92 \pm 1.19a	6.29 \pm 0.03c	1.33 \pm 0.02c
HB3	147.20 \pm 1.25b	583.15 \pm 5.06b	224.56 \pm 2.62a	6.90 \pm 0.04b	1.37 \pm 0.02b
HM3	153.19 \pm 1.86a	679.02 \pm 3.60a	225.43 \pm 3.46a	7.39 \pm 0.03a	1.43 \pm 0.01a

2.4 各处理烟草根部生物积累量及含水率

由表4可知,与CK相比,随着HS、HB、HM处理水凝胶添加量的增加,各处理的烟草鲜质量、干质量和含水率均显著提高($P<0.05$)。与CK相比,HS处理的鲜质量、干质量和含水率分别提高15.64%~120.99%、0~52.38%、0.89%~2.81%,HB处理的鲜质量、干质量和含水率分别提高17.70%~126.34%、4.76%~52.38%、0.65%~2.96%,HM处理的鲜质量、干质量和含水率分别提高17.28%~153.91%、4.76%~61.91%、0.61%~3.17%。在0.9%水凝胶添加量下,与HS处理相比,HB、HM处理鲜质量、干质量和含水率均提高,其中含水率分别提高0.01%、0.40%。整体而言,干旱胁迫会影响烟草生长发育,而自制水凝胶的施用能促进干旱胁迫下烟草生物量的积累,提高烟草含水率,其中HM3处理效果最好。

2.5 各处理烟草叶片电导率

由图2可知,与CK相比,随着HS、HB、HM处理水凝胶添加量的增加,各处理烟草叶片电导率

制水凝胶添加量的增加,各处理烟草根系活力、烟草总根长、总根表面积、根体积、平均根直径显著提高($P<0.05$),表现为HM处理>HB处理>HS处理>CK。在相同水凝胶添加量下,与HS处理相比,HB、HM处理的烟草总根长、总根表面积、根体积、平均根直径均提高。相同水凝胶添加量下,与HS处理相比,HB处理3个水凝胶添加量下的烟草根系活力分别提高1.42%、3.42%、4.86%,HM处理3个水凝胶添加量下的烟草根系活力分别提高3.00%、9.87%、9.13%。整体来看,水凝胶添加量较少时自制水凝胶与商用保水剂对高干旱胁迫下烟草根系活力的影响差别不大,水凝胶添加量较多时以HM处理提高干旱胁迫下烟草根系活力效果较好,且商用保水剂和自制水凝胶均能促进干旱胁迫下烟草根系发育,以HM3处理效果最好。

较CK均显著降低($P<0.05$)。与CK相比,HS、HB、HM处理叶片电导率分别降低16.77%~62.15%、20.65%~68.95%、33.27%~72.20%。其中,HM3、HB3、HM2处理较CK分别降低72.20%、68.95%、68.81%。同时0.9%水凝胶添加量下,HB、HM处理叶片电导率较HS处理分别降低17.90%、26.54%。

表4 干旱胁迫下各处理烟草根部生物积累量和含水率

Table 4 Biomass accumulation and water content of different treatments under drought stress

处理	鲜质量/(g·株 ⁻¹)	干质量/(g·株 ⁻¹)	含水率/%
CK	2.43 \pm 0.03g	0.21 \pm 0.01d	91.50 \pm 0.29c
HS1	2.81 \pm 0.02f	0.21 \pm 0.01d	92.40 \pm 0.35b
HB1	2.86 \pm 0.02f	0.22 \pm 0.01d	92.18 \pm 0.22b
HM1	2.85 \pm 0.02f	0.22 \pm 0.01d	92.15 \pm 0.50b
HS2	4.64 \pm 0.02e	0.28 \pm 0.01c	94.03 \pm 0.12a
HB2	4.85 \pm 0.02d	0.28 \pm 0.01c	94.16 \pm 0.23a
HM2	4.80 \pm 0.03d	0.27 \pm 0.01c	94.30 \pm 0.16a
HS3	5.37 \pm 0.02c	0.32 \pm 0.01b	94.11 \pm 0.10a
HB3	5.50 \pm 0.01b	0.32 \pm 0.01ab	94.12 \pm 0.08a
HM3	6.17 \pm 0.05a	0.34 \pm 0.02a	94.49 \pm 0.34a

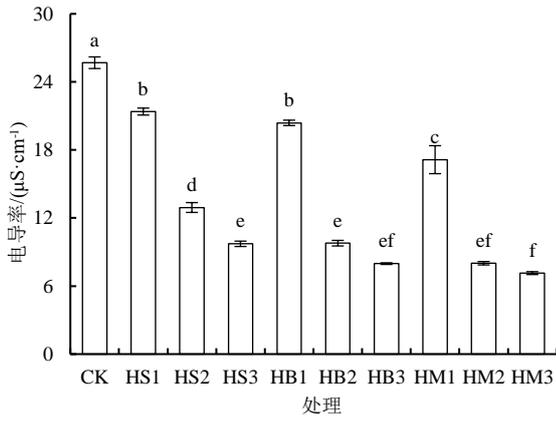


图2 干旱胁迫下各处理烟草叶片电导率

Fig.2 Tobacco leaf conductivity of different treatments under drought stress

表5 干旱胁迫下各处理烟草光合作用参数

Table 5 Tobacco photosynthetic parameters of different treatments under drought stress

处理	SPAD 值	净光合速率 Pn ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 摩尔分数 Ci ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	气孔导度 Gs ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	33.5±0.29f	1.71±0.01f	292.33±4.07a	0.16±0.01i	0.52±0.01i
HS1	34.7±0.37e	1.83±0.01f	280.49±3.50b	0.19±0.01h	0.57±0.01h
HB1	34.97±0.33de	2.37±0.02e	278.69±3.82b	0.22±0.01g	0.83±0.01g
HM1	34.97±0.33de	2.49±0.02e	274.71±4.59bc	0.24±0.01f	0.86±0.01f
HS2	35.77±0.25cd	3.62±0.03d	269.79±2.64c	0.34±0.01e	1.53±0.02e
HB2	36.33±0.45c	3.75±0.03d	259.34±3.29d	0.35±0.01e	1.59±0.01d
HM2	36.60±0.29c	4.15±0.03c	248.06±4.63e	0.36±0.01d	1.85±0.03c
HS3	37.97±0.62b	5.30±0.04b	241.01±2.22ef	0.41±0.01c	2.15±0.01b
HB3	38.43±0.39b	5.38±0.02b	235.22±2.88fg	0.45±0.01b	2.14±0.02b
HM3	39.73±0.65a	5.71±0.06a	231.52±4.75g	0.47±0.01a	2.35±0.02a

烟草幼苗置于日光照射 10 min 后观察气孔形态。由图 3 可知，CK 的烟草叶片气孔基本处于完全闭合状态，HS3、HB3、HM2、HM3 处理的烟草叶片气孔基本处于完全张开状态，其他处理的烟草叶片气孔处于半张开半闭合状态。说明烟草在受到干旱胁迫时会主动关闭气孔，从而减少水分流失。而 HS3、HB3、HM2、HM3 处理的土壤含水率较高，烟草可以从土壤中吸收水分，受到的干旱胁迫程度较低，气孔正常张开维持生理活动。

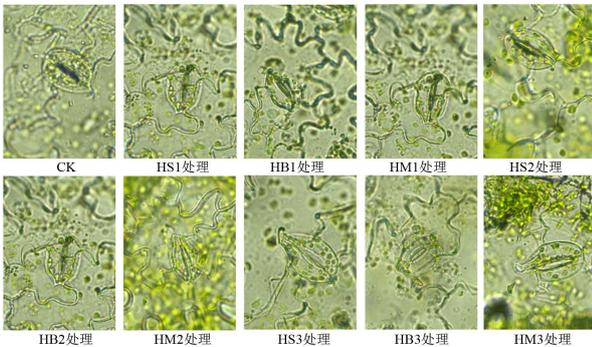


图3 干旱胁迫下各处理对烟草气孔开闭的影响

Fig.3 Tobacco stomatal opening and closing state of different treatments under drought stress

2.7 干旱胁迫下各处理烟草叶片抗氧化酶活性和 MDA 量

由表 6 可知，各处理叶片的 SOD、POD、CAT

2.6 干旱胁迫下各处理烟草光合特性

由表 5 可知，与 CK 相比，随着 HS、HB、HM 添加量的增加，各处理的 SPAD 值显著提高 ($P<0.05$)。与 CK 相比，HS、HB、HM 处理的 SPAD 值可提高 3.58%~13.33%、4.38%~14.73%、4.38%~18.61%。且随着 HS、HB、HM 添加量的增加，净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr) 呈增加趋势，胞间 CO_2 摩尔分数 (Ci) 呈降低趋势，干旱胁迫下烟草光合作用明显增强，其中 HM3 处理的 Pn 、 Gs 、 Tr 均高于其他处理， Ci 低于其他处理。总体而言，添加 HS、HB、HM 水凝胶可改善干旱胁迫对烟草幼苗叶绿素的影响，自制水凝胶的施用可有效缓解光合作用指数和光合色素量下降，其中，以 HM3 处理效果最好。

活性均与 CK 差异显著。随着商用保水剂和 2 种自制水凝胶添加量的增加，烟草叶片的 SOD、POD、CAT 活性均呈增加趋势，烟草叶片的 MDA 量呈降低趋势。与 CK 相比，HS 处理的 SOD、POD、CAT 活性分别提高 0.78%~94.01%、5.37%~101.95%、42.70%~88.64%，HB 处理的 SOD、POD、CAT 活性分别提高 5.06%~100.72%、0.30%~99.93%、21.89%~102.48%，HM 处理的 SOD、POD、CAT 活性分别提高 5.76%~130.00%、12.15%~121.40%、21.27%~133.50%。与 CK 相比，HS、HB、HM 处理的可溶性蛋白量分别降低 34.19%~74.20%、33.57%~83.48%、34.28%~85.95%。与 CK 相比，HM3 处理烟草叶片的 SOD、POD、CAT 活性最大可提高 130.00%、121.40%、36.8%，MDA 量最大可降低 85.95%。添加 HS、HB、HM 处理均可提高干旱胁迫下烟草叶片抗氧化酶活性，降低 MDA 量，提高烟草幼苗抗逆性。

由图 4 可知，与 CK 相比，其他处理的烟草可溶性蛋白量均显著增加。水凝胶添加量为 0.1% 时，HM、HB 处理可溶性蛋白量显著高于 HS 处理；水凝胶添加量为 0.5%、0.9% 时，HM 处理显著高于 HB、HS 处理。与 CK 相比，HS、HB、HM 处理可溶性蛋白量分别提高 6.02%~54.62%、9.05%~56.46%、10.54%~62.66%。水凝胶添加量相同时，3 种水凝胶均以 HM 提高干旱

胁迫下烟草可溶性蛋白量效果较好。

表 6 干旱胁迫下各处理烟草叶片抗氧化酶活性和 MDA 量
Table 6 Activity of antioxidant enzymes and MDA content in tobacco leaves of different treatments under drought stress

处理	SOD 活性/ (U·g ⁻¹)	POD 活性/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	CAT 活性/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	MDA 量/ (μmol·g ⁻¹)
CK	136.77±1.09g	257.69±1.60f	15.76±0.07g	11.32±0.10a
HS1	137.84±1.71g	271.53±1.51e	22.49±0.38e	7.45±0.10b
HB1	143.69±1.69f	265.38±3.00b	19.21±0.27f	7.52±0.07b
HM1	144.65±2.23f	289.01±3.19d	19.11±0.28f	7.44±0.07b
HS2	146.06±2.53f	292.32±3.27d	19.65±0.12f	5.29±0.06c
HB2	153.91±2.20e	288.15±4.51e	23.56±0.16e	5.31±0.07c
HM2	254.86±2.38d	310.64±3.00c	26.30±0.69d	3.35±0.03d
HS3	265.35±3.55c	520.40±4.98b	29.73±1.06c	2.92±0.02e
HB3	274.53±2.85b	515.19±3.92d	31.91±1.10b	1.87±0.01f
HM3	314.58±2.29a	570.53±4.75a	36.80±1.07a	1.59±0.02g

由图 5 可知, 干旱胁迫后, CK 和 HS1 处理的烟草叶片 O₂ 积累较多, 叶片局部多处被染成蓝色。HB1、HM1、HS3 处理的 O₂ 积累略低于 CK 和 HS1 处理, 其他处理 O₂ 积累量较小, 只有一小部分叶片被染成蓝色。DAB 染色结果表明, 干旱胁迫后, CK、HS1、HS2 处理的烟草叶片 H₂O₂ 积累明显, HS3、HM3 处理的 H₂O₂ 积累明显低于 CK, 其他处理 H₂O₂ 积累比 CK 少。台盼蓝染色结果表明, CK、HS1、HB1、HM1 处理的烟草叶片染色面积较大, 其他处理的烟草叶片染色面积较小, 说明 CK、HS1、HB1、HM1 处理的烟草细胞受干旱胁迫较严重, 死亡细胞数最多。综上所述, HS3、HM3 处理能有效缓解烟草干旱胁迫状况。

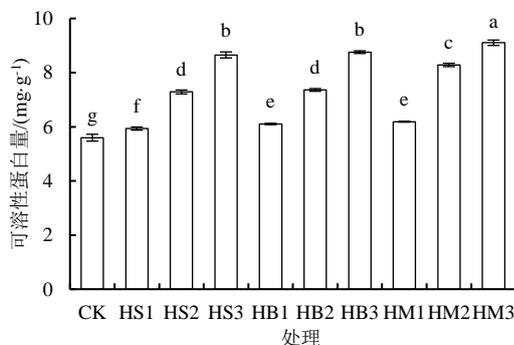


图 4 干旱胁迫下各处理烟草可溶性蛋白量
Fig.4 Tobacco soluble protein of different treatments under drought stress

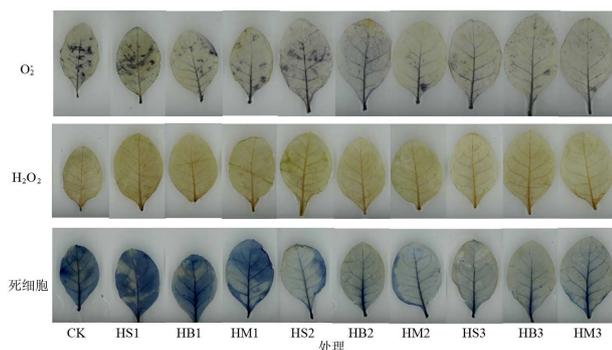


图 5 干旱胁迫下各处理烟草叶片 O₂、H₂O₂ 和死细胞量
Fig.5 Tobacco leaf O₂, H₂O₂ and cell survival of different treatments under drought stress

3 讨论

复合水凝胶在制备过程中添加有机物或无机物, 可增强水凝胶力学性能、亲水基团和空间网络结构, 同时, 由于添加的有机物或无机物本身所固有特性 (如较高的比面积和大量的官能团), 也可以使复合水凝胶呈现出更好的性能^[20-21]。如添加碳基材料 (石墨、氧化石墨烯、石墨烯、碳纳米管等) 可以有效提高水凝胶的活性位点、重复利用性、热稳定性和吸水溶胀能力^[22-23]。本研究表明, 土壤含水率随着 2 种自制复合水凝胶和商用水凝胶添加量的增加而增加, 且各处理均显著高于 CK, 相同水凝胶添加量下, HM 处理>HB 处理>HS 处理。这与 Xiong 等^[24]研究的复合水凝胶对土壤含水率的作用结果一致。

植物为应对干旱胁迫会关闭气孔, 降低蒸腾作用, 减少 CO₂ 的吸收, 降低植物叶绿素量, 同时在干旱胁迫下, 植物细胞膜遭到破坏, 膜通透性增大, 使得细胞内的电解质外渗, 导致叶片细胞电导率增大, 进而影响植物光合作用。2 种自制复合水凝胶和商用水凝胶的施用均能减轻干旱胁迫程度, 提高干旱胁迫下光合色素量和光合作用参数 *Pn*、*Tr*、*Gs*, 降低 *Ci*, 缓解植物细胞组织受损伤程度, 降低细胞电导率。相同水凝胶添加量下, 烟草 *SPAD* 值、净光合速率 (*Pn*)、气孔导度 (*Gs*) 和蒸腾速率 (*Tr*) 等光合作用参数表现为 HM 处理>HB 处理>HS 处理, 且各处理显著高于 CK, 这与宋彬^[25]研究木质素水凝胶的作用结果一致。同时随着 2 种自制复合水凝胶和商用水凝胶添加量的增加, 干旱胁迫下烟草的根系活力提高, 促进烟草根系生长发育, 并显著增加烟草生物量积累, 提高烟草抗旱能力。

SOD、POD、CAT 是重要的抗氧化酶, 抗氧化酶能清除植株逆境胁迫下产生的活性氧, 减轻植物的氧化损伤^[26]。干旱胁迫会打破烟草细胞内活性氧动态平衡, 导致活性氧过度积累, 引起膜脂过氧化损伤。2 种自制复合水凝胶和商用保水剂的施用均提高了叶片 SOD、POD、CAT 活性, 降低干旱胁迫下烟草叶片中 H₂O₂、O₂ 和膜脂过氧化产物 MDA 量。2 种自制复合水凝胶和商用水凝胶的施用均可缓解干旱胁迫对烟草叶片氧化损伤作用, 减轻活性氧对细胞膜的损害, 保护膜结构的完整性, 且相同水凝胶添加量下, 抗氧化酶活表现为 HM 处理>HB 处理>HS 处理。这与董成武等^[27]探究新型水凝胶对干旱胁迫下小麦幼苗影响的结果一致。

此外, 可溶性蛋白是重要的渗透调节物质和营养物质, 可溶性蛋白的积累能提高细胞保水能力, 对细胞的生命物质及生物膜起到保护作用, 因此经常用作

筛选抗性的指标之一。本研究表明, 干旱胁迫下施用 2 种自制复合水凝胶和商用水凝胶均显著增加可溶性蛋白量, 这与马彦茹等^[28]探究干旱胁迫条件下施用水凝胶对棉花植株生理生化的影响结果相似。

本研究表明, 2 种自制复合水凝胶的效果优于商用水凝胶, 一方面可能是因为 2 种水凝胶均为含有聚乙烯醇和丙烯酸的复合水凝胶, 具有聚乙烯醇和丙烯酸之间的协同氢键作用使此类型的水凝胶具有高吸水和高强度性^[29]; 另一方面可能是因为 HB 水凝胶为生物质炭基复合水凝胶, HM 为分子筛基复合水凝胶, 生物质炭、分子筛具有较大的比表面积和较高的孔隙度, 结合了水凝胶和生物质炭或分子筛的吸水保水能力, 使 HB、HM 具有较好的保墒蓄水能力^[30,31]。适宜水凝胶添加量下, HB、HM 水凝胶的添加量越大缓解干旱对烟草胁迫效果越明显, 本研究中以 HM3、HB3 处理效果较好。

4 结论

1) 当水凝胶添加量占土壤干质量 0.9% 时, 施用水凝胶能够显著提高土壤含水率, 缓解烟草干旱胁迫, 促进烤烟生长, 且 2 种自制复合水凝胶 HM、HB 较商用水凝胶效果更加显著。

2) 施用 HM 和 HB 后有效缓解了干旱胁迫对烟草的损害, 促进了烟草的生长代谢, 烟草根际活力、生物量、叶片含水率、可溶性蛋白量均得到显著提高, 并且增强了 SOD、POD、CAT 活性, 减少 MDA 量及 O₂⁻、H₂O₂ 的积累, 提高烟草幼苗抗逆性。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- 李彦彬, 卢争光, 李道西, 等. 连旱对夏玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 26-31, 39. LI Yanbin, LU Zhengguang, LI Daoxi, et al. Effect of prolonged drought on chlorophyll fluorescence, yield and water use efficiency of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 26-31, 39.
- SCHWEIGER R, MAIDEL A M, RENZIEHAUSEN T, et al. Effects of drought, subsequent waterlogging and redrying on growth, physiology and metabolism of wheat[J]. Physiologia Plantarum, 2023, 175(2): e13 874.
- JIAO S Z, ZENG F W, HUANG Y P, et al. Physiological, biochemical and molecular responses associated with drought tolerance in grafted grapevine[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 110.
- 王佩雯, 朱金峰, 许自成, 等. 烤烟成熟期灌水对烟叶品质影响的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S2): 32-34. WANG Peiwen, ZHU Jinfeng, XU Zicheng, et al. Advance of effect of irrigation in maturing stage on flue-cured tobacco quality[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S2): 32-34.
- ABBASI N, KHAN S A, LIU Z C, et al. Natural deep eutectic solvent (fructose-glycine) functionalized-celite/polyethylene glycol hydrogel nanocomposite for phosphate adsorption: Statistical analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 330: 117 206.
- ZHU J L, SUHAIMI F, LIM J Y, et al. A field study on using soybean waste-derived superabsorbent hydrogel to enhance growth of vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2022, 851: 158 141.
- WANG N, MA J, SONG W X, et al. An injectable hydrogel to disrupt neutrophil extracellular traps for treating rheumatoid arthritis[J]. Drug Delivery, 2023, 30(1): 2 173 332.
- 夏茂林, 李洪臣, 赵华新, 等. 不同粒径保水剂对土壤水分特性及干旱胁迫下烟苗生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(11): 14-21. XIA Maolin, LI Hongchen, ZHAO Huaxin, et al. Effect of water adsorption polymer size on soil water retention and growth of tobacco seedlings[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(11): 14-21.
- 陈芳泉, 邵惠芳, 王凯悦, 等. 保水剂对烤烟品种生长发育和生理特性的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(3): 31-38. CHEN Fangquan, SHAO Hui芳, WANG Kaiyue, et al. Effects of water retaining agent on growth and physiological characteristics of different flue-cured tobacco varieties[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(3): 31-38.
- 白岗桂, 耿伟, 何登峰. 保水剂施用量对秦巴山区土壤特性及烤烟生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(3): 343-354. BAI Gangshuan, GENG Wei, HE Dengfeng. Effects of super absorbent polymer with different application rates on soil characteristics and flue-cured tobacco growth in Qinba mountain area[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2019, 45(3): 343-354.
- ZHANG Y F, TIAN X Y, ZHANG Q Y, et al. Hydrochar-embedded carboxymethyl cellulose-g-poly (acrylic acid) hydrogel as stable soil water retention and nutrient release agent for plant growth[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2022, 7(2): 116-127.
- SU X, CHEN B Q. Tough, resilient and pH-sensitive interpenetrating polyacrylamide/alginate/montmorillonite nanocomposite hydrogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 197: 497-507.
- NIU Y H, KE R Y, YANG T, et al. pH-responsively water-retaining controlled-release fertilizer using humic acid hydrogel and nano-silica aqueous dispersion[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2020, 20(4): 2 286-2 291.
- 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- 窦金熙, 郭玉明, 王盛, 等. 土壤含水率测定方法研究[J]. 山西农业科学, 2017, 45(3): 482-485. DOU Jinxi, GUO Yuming, WANG Sheng, et al. Study on determination methods of moisture content in soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 482-485.
- 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. LI Hesheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- SHI J, FU X Z, PENG T, et al. Spermine pretreatment confers dehydration tolerance of citrus in vitro plants via modulation of antioxidative capacity and stomatal response[J]. Tree Physiology, 2010, 30(7): 914-922.
- LUO Y, WEI Y W, SUN S G, et al. Selenium modulates the level of auxin to alleviate the toxicity of cadmium in tobacco[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(15): 3 772.
- ISLAM S, BHOR S A, TANAKA K, et al. Impaired expression of chloroplast HSP90C chaperone activates plant defense responses with a possible link to a disease-symptom-like phenotype[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(22): 8 461.
- DOĞAROĞLU Z G, UYSAL Y, DEMİR A, et al. Synthesis, characterization and optimization of PVA/SA hydrogel functionalized with zeolite(clinoptilolite): Efficient and rapid color removal from complex textile effluents[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 295: 127 090.
- KUMAR A, ZO S M, KIM J H, et al. Enhanced physical, mechanical, and cytocompatibility behavior of polyelectrolyte complex hydrogels by reinforcing halloysite nanotubes and graphene oxide[J]. Composites Science and Technology, 2019, 175: 35-45.

- [22] PENG L, SU Y T, YANG X P, et al. A liquid metal/carbon nanotubes complex enabling ultra-fast polymerization of super-robust, stretchable adhesive hydrogels for highly sensitive sensor[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 638: 313-323.
- [23] YI C Y, LUO Z S, LU Y T, et al. Nanoporous hydrogel for direct digital nucleic acid amplification in untreated complex matrices for single bacteria counting[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2021, 184: 113-119.
- [24] XIONG H R, PENG H, YE X E, et al. High salt tolerance hydrogel prepared of hydroxyethyl starch and its ability to increase soil water holding capacity and decrease water evaporation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 222: 105-127.
- [25] 宋彬. 木质素基水凝胶的合成及农业应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
SONG Bin. Synthesis and agricultural application of lignin-based hydrogel[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [26] 刘庆, 董元杰, 刘双, 等. 外源水杨酸(SA)对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生理生化特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 165-168, 174.
LIU Qing, DONG Yuanjie, LIU Shuang, et al. Effects of exogenous salicylic acid on the physiological and biochemical characteristics of cotton seedlings under salt stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 165-168, 174.
- [27] 董成武, 张叶子, 石岩. 新型复合保水剂对干旱胁迫下小麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 255-261.
DONG Chengwu, ZHANG Yezi, SHI Yan. Effects of new composite water-retaining agent on growth and physiological characteristics of wheat seedlings under drought stress[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 255-261.
- [28] 马彦茹, 吴湘琳, 葛春辉, 等. 干旱胁迫条件下施用保水剂对棉花植株生理生化的影响[J]. *新疆农业科学*, 2016, 53(2): 277-282.
MA Yanru, WU Xianglin, GE Chunhui, et al. Influence of water retention agent applied on physiological and biochemical index of cotton plant under drought condition[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53(2): 277-282.
- [29] 白晴文, 汪辉亮. 基于协同氢键作用的高强度聚乙烯醇-聚丙烯酸水凝胶[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(5): 561-565.
BAI Qingwen, WANG Huiliang. Tough polyvinyl alcohol-polyacrylic acid hydrogels based on cooperative hydrogen bonding[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(5): 561-565.
- [30] 程红胜, 沈玉君, 孟海波, 等. 生物炭基保水剂对土壤水分及油菜生长的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(2): 86-92.
CHENG Hongsheng, SHEN Yujun, MENG Haibo, et al. Effects of biochar-based super absorbent on soil moisture and rape growth[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(2): 86-92.
- [31] 徐啟斌, 牛香力, 陈婷婷, 等. 煤气化渣合成 4A 分子筛及其吸附性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(6): 2 251-2 261.
XU Qibin, NIU Xiangli, CHEN Tingting, et al. Preparation of 4A molecular sieve from coal gasification slag and its adsorption performance[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(6): 2 251-2 261.

Effects of Novel Composite Hydrogels on Physiological Properties of Tobacco under Drought Stress

LIU Lingling¹, ZHANG Ying², LIU Yunfei², LI Junzheng¹, CHANG Jianbo¹,
WEI Fengjie³, YANG Xiaopeng², JI Xiaoming^{2*}, LI Hongchen¹, YANG Jianxin^{1*}

(1. Sanmenxia City Company of Henan Provincial Tobacco Company, Sanmenxia 472000, China;

2. Tobacco College of Henan Agricultural University, National Research Base of Tobacco Cultivation Physiology and Biochemistry,

Key Laboratory of Tobacco Cultivation of Tobacco Industry, Zhengzhou 450046, China;

3. China Tobacco Croporation Henan Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of new composite hydrogel on the physiological characteristics of tobacco seedlings under drought stress, and to provide theoretical basis for alleviating the toxicity of drought stress to tobacco.

【Method】A total of 10 treatments including CK control and three different hydrogels added at 0.1%, 0.5% and 0.9% of soil dry mass: commercial hydrogel HS, new composite hydrogel HM (polyvinyl alcohol-acrylic acid-molecular sieve hydrogel) and HB (polyvinyl alcohol-acrylic acid-biochar hydrogel) were designed by pot experiment to study the effects of new composite hydrogels on tobacco under drought stress The effects of the new composite hydrogels on biomass accumulation, root development, photosynthetic system and oxidative stress of tobacco under drought stress were investigated.

【Result】Under the same dosage conditions, HM and HB treatments were effective in increasing the fresh mass, dry mass and total water content of tobacco under drought stress compared to HS treatment. Compared with CK, HM and HB treatments could increase the fresh mass by a maximum of 153.91% and 126.34%, respectively. Under the same dosage conditions, HM and HB treatments significantly increased the total root length, total root surface area, average root diameter, root tip number and root volume, and improved the root vigor of tobacco compared with HS treatments; photosynthetic parameters and SPAD values of tobacco increased significantly and improved leaf stomatal status; SOD (superoxide dismutase), POD (peroxidase) and CAT (catalase) activities and soluble protein amounts of tobacco increased and MDA (malondialdehyde) amounts decreased significantly, which enhanced the resistance of tobacco. **【Conclusion】**Adding 0.9% HM and HB hydrogels to soil dry weight can effectively reduce the impact of drought stress on tobacco and improve tobacco drought resistance.

Key words: composite hydrogel; molecular sieve; biochar; drought; tobacco

责任编辑: 白芳芳