

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.020

环境友好型保水材料对土壤水分特征的影响及评价

侯美娟, 蔚阿龙, 丛日春*

(中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 探究环境友好型保水材料对土壤水分特征的影响。[方法] 选用岩棉、生物炭和炭棉 3 种环境友好型保水材料与聚丙烯酸钠盐型、丙烯酰胺-丙烯酸钾聚合型、聚丙烯酸钾盐型 3 种传统保水材料及 CK 对比研究。以沙土为基质, 按不同质量比与各种保水材料均匀混合, 通过控水试验, 分别测定保水材料土壤水分动态曲线和水分特征曲线, 分析保水材料对土壤水分特性的影响并进行评价。[结果] 环境友好型保水材料均能降低土壤密度, 增加土壤孔隙度和持水量。其中 10% 炭棉对各持水参数都有显著影响。自然干旱条件下, 与 CK 相比, 各保水材料均能有效抑制土壤水分蒸发。在 40 d 时间内, 10% 炭棉在整个失水过程中保持水分的最好, 干旱胁迫 40 d 后, 10% 炭棉比 CK 组含水量高 3.37%。6 种保水材料均能提高土壤有效水含量, 由多到少排序为 $T_3 > N > H > T_2 > S_3 > S_2 > D_3 > K > D_2 > S_1 > T_1 > D_1 > CK$, 其中 10% 炭棉处理的土壤有效含水量最高。[结论] 通过主成分分析和隶属函数法综合评价得出, 环境友好型保水材料中 10% 炭棉保水效果最好。

关键词: 环境友好型保水材料; 土壤水分特征曲线; 土壤水分有效性; 综合评价

中图分类号: S152.7; S156.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0177-10

中国干旱半干旱区总面积为 455 万 km^2 , 占国土总面积的 47%^[1]。高效利用水资源成为干旱半干旱区农林业可持续发展的重要途径^[2]。保水材料具有操作简便、节水效果明显等优点, 成为人们高度关注的节水技术之一^[3-4]。传统土壤保水材料是一种有机高分子聚合物^[5], 主要分为聚丙烯酸钠盐型、聚丙烯酸钾盐型和丙烯酰胺-丙烯酸钾交联共聚物型。传统保水材料可以反复吸收释放水分, 改变土壤颗粒间的孔隙率和土壤微结构特征, 吸水后体积膨胀与土壤颗粒作用形成土壤团聚物, 使土壤水分蓄积在保水材料混和层及其附近的土壤中^[6-7]。但传统保水材料工艺复杂、吸水保肥耐盐性能差、难降解且施入到土壤中易造成土壤的二次污染^[8-9], 在用量过大时一定程度上会造成土壤板结^[10], 以及存在土壤含水量极低时, 由于水吸力过高, 不能将水分供给植物吸收利用的问题^[11]。而环境友好型保

水材料是由天然矿物盐、生物秸秆和岩棉等材料高温熔融后通过高速离心或高压气体喷吹成纤维, 再经过特殊工艺处理后压制、固化而成的矿质材料。具有稳定性高、多孔结构独特、比表面积大、低耗能、无污染、可降解、高利用等优点^[12-15]。环境友好型保水材料具有良好的透储水功能, 可以作为“海绵体”, 吸收降雨带来的大量雨水, 迅速减少地表径流, 不仅可以为植物补充水分, 还可以作为植物生长的基质, 在海绵城市建设、森林生态修复、荒漠化防治中取得良好效果^[16-18]。

第 24 届冬季奥林匹克运动会于 2022 年 2 月在我国北京市和河北省张家口市联合举行, 冬奥廊道沿线植被景观成为我国生态文明建设成果展示窗口。但冬奥廊道沿线区域内存在山地土层瘠薄、水分条件差、造林成活率低等突出问题。为举办绿色奥运, 既要解决干旱缺水、植物成活率低的难题,

收稿日期: 2021-12-24 修回日期: 2022-02-17

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(冬奥廊道沿线植被景观优化及生态功能提升技术集成创新与应用示范)(2019YFF0303200)

* 通讯作者: 丛日春, 博士, 研究员, 主要研究方向: 水土保持。E-mail: congriichun888@163.com

又要保证绿色环保。开展环境友好型保水材料的研究成为当务之急。为了探究保水材料在恶劣土壤环境中的保水特性,本文选用土粒分散、结构差、吸附能力弱、保水性差的沙土^[19]作为基质,对比传统保水材料,探究环境友好型保水材料对土壤持水能力的影响。以期改善土壤水分状况、合理施用保水材料提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 4—7 月在中国林业科学研究

院科研温室(昼夜温度 25/18 ℃)进行,供试土壤为沙土,取自于河南新乡,粒径为 0.15~1.0 mm,碱解氮 25.30 mg·kg⁻¹,有效磷 5.63 mg·kg⁻¹,有效钾 95.30 mg·kg⁻¹,有机质 3.31 g·kg⁻¹,pH 为 8.12。选取 6 种保水材料进行试验,其中,环境友好型保水材料选用岩棉、生物炭和生物炭棉,其成分天然无污染、可降解,不会对土壤环境造成危害。由于环境友好型保水材料形态特征不同,相关研究较少,因此依据厂家提供的经验用量设置保水材料配比,基本情况见表 1。

表 1 保水材料的基本情况

Table 1 Basic information of water-retaining material

类型 Type	种类 Kind	生产厂家 Manufacture factory	主要组成成分 Main components	形态 Form	价格 Price
传统保水材料 Traditional water-retaining materials	钠盐型	金誉化工有限公司	聚丙烯酸钠盐	颗粒状 d=1 mm	32.00 元·kg ⁻¹
	钾盐型	任丘市辉达化工有限公司	聚丙烯酸钾盐	颗粒状 d=2 mm	23.00 元·kg ⁻¹
	聚合型	胜利油田长安控股集团有限公司	丙烯酰胺-丙烯酸钾交联共聚物	颗粒状 d=3 mm	28.00 元·kg ⁻¹
环境友好型保水材料 Environment-friendly water-retaining materials	岩棉	天津沃佰艾斯科技有限公司	岩棉、天然矿物盐	不规则棉絮状	2.00 元/块
	生物炭	浙江华腾生物有限公司	稻壳炭、猪粪渣、米糠	稻壳状颗粒 d=5 mm	1.80 元·kg ⁻¹
	生物炭棉	浙江华腾生物有限公司	植物纤维、生物炭、聚氨酯	棉块颗粒 d=5 mm	30.00 元·kg ⁻¹

1.2 试验设计

1.2.1 保水材料对土壤持水特性的影响 取沙土 5 kg,将不同种类的保水材料与沙土按比例均匀混

合(表 2),以沙土作为对照(CK),共 13 个处理,每个处理设 3 个重复。测定各土样水分特性指标。

表 2 保水材料用量

Table 2 The amount of water-retaining material

类型 Type	传统保水材料 The traditional water-retaining materials			环境友好型保水材料 The environment-friendly water-retaining materials								
	钠盐型	钾盐型	聚合型	岩棉			生物炭			生物炭棉		
质量比 Weight ratio/%	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	1	1	5	10	1	5	10
编号 No.	N	K	H	D ₁	D ₂	D ₃	S ₁	S ₂	S ₃	T ₁	T ₂	T ₃

1.2.2 保水材料对土壤水分保持的影响 取沙土 5 kg,保水材料和沙土按比例混合配置土样(表 2),试验开始将土壤灌溉饱和,然后不再浇水,使其自然干旱(环境相对湿度 15%~25%),观察添加不同保水材料后土壤含水量随时间的变化。

1.2.3 保水材料对土壤水分特征曲线的影响 以 5 kg 沙土作为对照(CK),取 5 个直径 20 cm,

高 20 cm 的塑料桶,按质量比加入各种保水材料于土壤中(表 2),每个处理设置 10 个水分梯度,即土壤质量含水量 θ_m 分别为 2%、4%、6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%。每个处理设 3 个重复。

1.3 测定指标与方法

土壤水分特性采用环刀法^[20-22]测定各处理土

样密度、饱和含水率、毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度。

土壤水分保持曲线采用称量法(最小感量为0.01 g的电子秤),于每天下午17:00称量盆土质量,记录数据。

土壤水分特征曲线采用德国Ecomatik公司生产的DL90土壤水势监测系统,将其安插到每个土样中,密封放置,待仪器稳定后读取土壤水势值,制作土壤水分特征曲线。

1.4 保水效果评价

应用主成分分析^[23]和隶属函数法^[24]对各保水材料进行评价。公式如下:

$$\text{综合指标值: } CI(m) = \sum_{j=1}^n [B_j \times prin(m)_j],$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中, $CI(m)$ 为综合指标值, B_j 为单项指标相对值进行规范化标准化的值, $prin(m)_j$ 为综合指标的系数。

$$\text{隶属函数值: } \mu(x_j) = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

$$(j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $\mu(x_j)$ 为某个处理第 j 个指标的隶属函数值,且 $\mu(x_j) \in [0, 1]$, x_j 表示第 j 个综合指标, x_{\min} 表示第 j 个综合指标的最小值, x_{\max} 表示第 j 个综合指标的最大值。

$$\text{权重: } W_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j, (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中, W_j 值表示第 j 个综合指标的相对重要程度即权重, p_j 为第 j 个综合指标的贡献率。

$$\text{综合评价值: } D = \sum_{j=1}^n [\mu(x_j) \cdot W_j], (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

式中, D 值为综合评价值。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 Origin 2018 进行图表制作,采用 SPSS 19.0 进行差异显著性检验和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同保水材料对土壤持水特性的影响

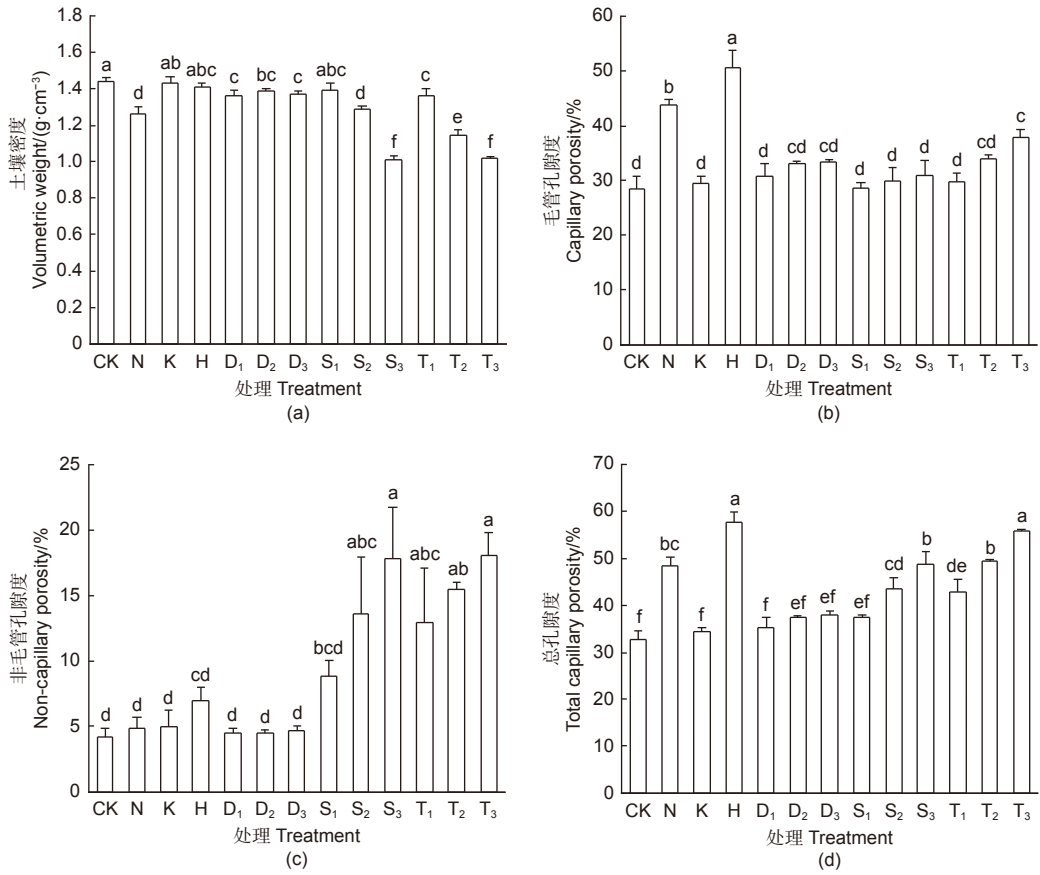
2.1.1 土壤密度、孔隙度 土壤持水性能与土壤

密度、总孔隙度、毛管孔隙度等有关^[25]。不同保水材料对土壤密度的影响见图1(a)。在土壤中添加不同保水材料,均使土壤密度降低,其中 S_3 效果最显著, T_3 次之,分别降低了29.94%、29.43%。 K 、 H 、 S_1 的降低效果不显著 ($p < 0.05$); 各处理土壤孔隙度的结果见图1(b)(c)(d)。可知,在土壤中添加6种保水材料均有利于提高孔隙体积比。 N 、 H 、 S_2 、 S_3 、 T_1 、 T_2 、 T_3 土壤总孔隙度的影响显著 ($p < 0.05$); N 、 H 、 T_3 对土壤毛管孔隙度影响显著,相比于CK分别增加了15.12%、22.18%、9.25%; S_2 、 S_3 、 T_1 、 T_2 、 T_3 使土壤非毛管孔隙度显著增加 ($p < 0.05$),相比于CK分别增加了9.38%、13.61%、8.73%、11.24%、13.85%。说明环境友好型保水材料在用量增加时不会造成土壤板结,可以提高土壤总孔隙度,改善土壤结构,有利于土壤蓄持更多水分。

2.1.2 土壤持水量 不同保水材料对土壤饱和含水率的影响见图2(a)。添加6种保水材料都使土壤饱和含水率增加,其中 T_3 最为显著,与对照相比增加了29.58%。不同保水材料对土壤毛管持水量的影响见图2(b)。 N 、 H 、 S_3 、 T_2 、 T_3 显著增加土壤毛管持水量,与CK相比分别增加了16.20%、14.82%、10.56%、9.80%、17.36%。不同保水材料对土壤田间持水量的影响见图2(c)。可知, N 、 H 、 S_3 、 T_2 、 T_3 显著增加田间持水量 ($p < 0.05$),分别比CK增加了12.46%、10.63%、7.03%、7.51%、12.96%。其中, T_3 对各持水量的增加最为显著。环境友好型保水材料的种类及用量对土壤饱和含水率、毛管持水量、田间持水量和土壤孔隙度的影响规律基本一致。

2.2 不同保水材料对土壤水分保持的影响

自然干旱条件下,通过土壤持水量随时间的变化可以看出保水材料抑制蒸发、保持水分的能力。不同保水材料处理的土壤水分动态曲线如图3,保水材料施入土壤后,土壤水分蒸发受到抑制,水分保持能力提高,并且随着保水材料量的增加,抑制蒸发能力增强。各处理土壤含水量变化趋势一致,且前20 d土壤含水量下降较快,后20 d含水量差异进一步减小。在40 d时,CK组土壤含水量趋于0,经保水材料处理的土壤含水量均高于CK组。其中 T_3 处理的含水量最高,比CK组含水量增加3.37%。



注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)，下同。

Notes: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level between populations. The same as below.

图 1 不同保水材料对土壤密度、孔隙度的影响

Fig. 1 Effect of different water-retaining materials on soil volumetric weight capillary

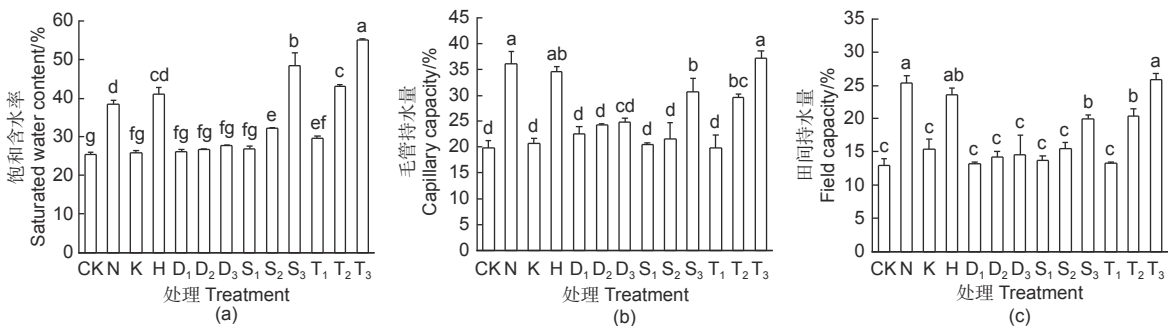


图 2 不同保水材料对土壤持水量的影响

Fig. 2 Effect of different water-retaining materials on soil water holding

土壤含水量与时间的关系拟合参数见表 3。以 40 d 为区间得到积分值，CK 为例 (图 4)。由各保水材料数学模型得出 40 d 内土壤累计含水量，排序为 $T_3 > D_3 > H > N > S_3 > D_2 > D_1 > S_2 > T_2 > T_1 > K > S_1 > CK$ 。分析得出添加保水材料均可以提升土壤保持水分的能力，其中 T_3 持续含水量最多，长时间内保持较多水分。说明环境友好型保水材料不仅改变

了水分充足时土壤持水能力，也改变了整个失水过程中土壤的持水能力。

2.3 不同保水材料对土壤水分有效性的影响

2.3.1 土壤水分特征曲线 土壤含水量并不能充分说明土壤水分的有效性，而土壤水势可以反映土壤对水分的吸纳能力及土壤水分对植物的供给状况，是进行水分调控常用的参考指标。试验得出土

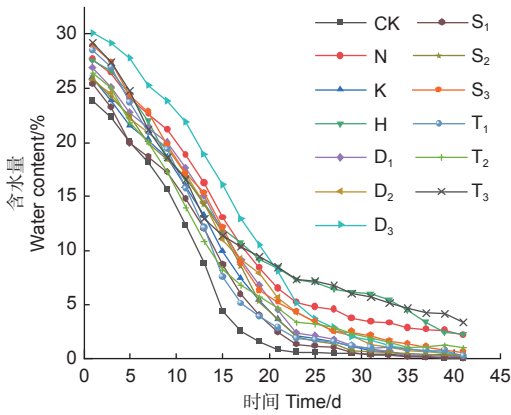


图 3 各试验组土壤水分动态曲线

Fig. 3 Soil moisture dynamic curve of each experiment group

壤水分特征曲线如图 5, 土壤含水量与土壤水吸力关系拟合后符合数学模型 $Y=AX^{-B}$, 各处理相关系数 R^2 均大于 0.9, 该模型能较好地反映本试验土壤含水量与水吸力之间的关系。各处理模型拟合参数见表 4。从图 5 可以看出, 随着土壤含水量的增加, 土壤水吸力降低。在含水量为 2%~4% 时, D_1 、 D_2 、 D_3 保水材料的水吸力相比 CK 显著降低。水分从低吸力处流向高吸力处, 说明含水量极低时, 在添加 D_1 、 D_2 、 D_3 保水材料的土壤中, 植物根系从土壤中吸取水分所消耗的能量少, 土壤水分更容易被植物吸收利用, 这在一定程度上增加了土壤水分的有效性。而当土壤含水量大于 12%

时, 图中各试验组的土壤水吸力趋近于 0 kPa。这说明土壤水分逐渐达到饱和, 不再吸水。此时土壤毛管孔隙多, 大孔隙水更容易释放, 能有效地被植物根系吸收利用。

2.3.2 土壤有效含水量 土壤萎蔫含水量相当于 1500 kPa 吸力下所对应的土壤含水量^[26], 代入表 4 各保水材料的数学模型得到此时的土壤含水量为萎蔫含水量 (表 5)。萎蔫含水量是土壤有效水的下限, 土壤田间持水量是土壤有效水的上限, 因此土壤有效含水量等于田间持水量与萎蔫含水量的差值。分析发现, 各保水材料处理均可以增加土壤有效水含量, 由多到少排序为 $T_3>N>H>T_2>S_3>S_2>D_3>K>D_2>S_1>T_1>D_1>CK$ 。环境友好型保水材料 T_3 处理的有效含水量最多, 为 24.88%, 其次是 N 和 H, 此 3 种保水材料分别比 CK 增加了 12.98%、12.49%、10.64% 的有效水含量。

2.4 保水材料效果评价

应用主成分分析法和隶属函数法对保水材料进行效果评价。利用各指标的相对值将逆向指标正向化。对各指标进行主成分分析后 (表 6), 提取了 2 个主成分, 利用主成分分析结果中成分矩阵以及成分特征值计算各综合指标系数, 第一主成分贡献率是 64.067%, 第二主成分贡献率是 20.907%, 累计贡献率 84.974%。可见 2 个主成分包含了 12 个处理 10 个指标 84.974% 的数据信息。特征

表 3 土壤水分保持曲线拟合参数、累计含水量

Table 3 Soil moisture retention curve fitting parameters, accumulated water content

处理 Treatment	截距L Nodal increment L	参数A Parameters A	参数B Parameters B	数学模型 Mathematical model	相关系数 R^2 Correlation coefficient R^2	40 d 累计含水量 Accumulated water content for 40 days
CK	27.482	-1.812	0.029	$Y= 27.482-1.812X + 0.029X^2$	0.968	239.340
N	31.355	-1.539	0.020	$Y= 31.355-1.539X + 0.020X^2$	0.984	428.712
K	29.418	-1.646	0.023	$Y= 29.418-1.646X + 0.023X^2$	0.985	320.803
H	29.661	-1.354	0.018	$Y= 29.856-1.393X + 0.019X^2$	0.985	450.840
D_1	30.725	-1.635	0.022	$Y= 30.725-1.635X + 0.022X^2$	0.981	351.249
D_2	29.222	-1.464	0.018	$Y= 29.222-1.464X + 0.018X^2$	0.988	361.309
D_3	35.058	-1.651	0.019	$Y= 35.058-1.654X + 0.019X^2$	0.979	453.575
S_1	28.417	-1.682	0.025	$Y= 28.417-1.682X + 0.025X^2$	0.985	287.038
S_2	29.825	-1.644	0.023	$Y= 29.825-1.644X + 0.023X^2$	0.980	330.060
S_3	32.445	-1.739	0.024	$Y= 32.445-1.739X + 0.024X^2$	0.990	384.808
T_1	32.323	-1.985	0.030	$Y= 32.323-1.985X + 0.030X^2$	0.980	322.054
T_2	29.152	-1.665	0.024	$Y= 29.152-1.665X + 0.024X^2$	0.990	328.660
T_3	30.703	-1.510	0.022	$Y= 30.703-1.510X + 0.022X^2$	0.986	454.237

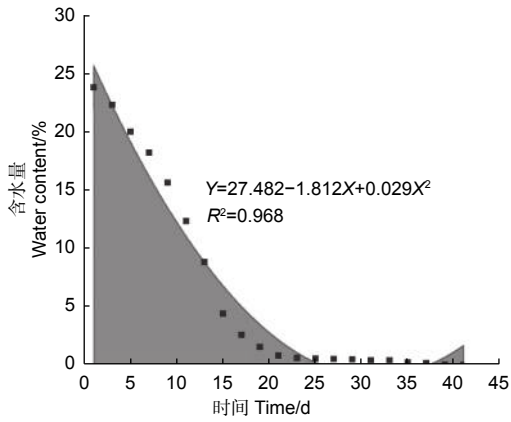


图 4 CK 组 40 d 累计含水量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the 40-day accumulative water content in the CK group

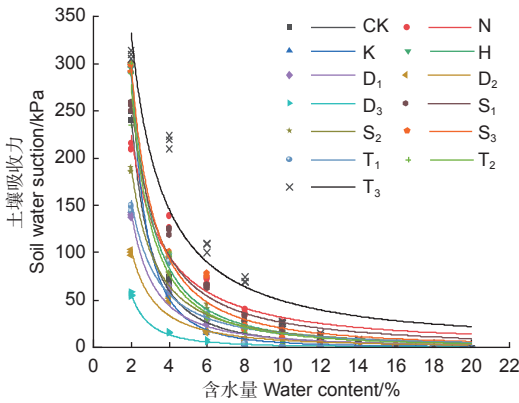


图 5 各试验组土壤含水量与水吸力关系拟合曲线

Fig. 5 Soil water content and suction curves of each experiment group

值能够反映出各指标在各个主成分的荷载^[27]，第一主成分特征值为 6.407，有效含水量和毛管持水量在第一主成分上的荷载较高，毛管孔隙度和土壤密度在第二主成分上的荷载较高。说明保水材料的主要表征为有效含水量、毛管持水量、毛管孔隙度和土壤密度。

利用公式 (1)、(2)、(3) 计算得出综合指标值、隶属函数值和权重，2 个综合指标的权重分别为 0.75 和 0.25。利用公式 (4) 计算得出各保水材料的保水能力综合评价值 D (表 7)。由 D 值可以看出各处理保水材料效果排序： $H>T_3>N>S_3>T_2>D_3>D_2>S_2>D_1>T_1>K>S_1$ 。可以看出 T_3 效果仅次于 H ，在环境友好型保水材料中效果最好。

3 讨论

3.1 保水材料对土壤水分特征的影响

多项研究表明，聚丙烯酸盐型等传统保水材料可以改变土壤颗粒间的孔隙率和土壤微结构特征^[6]，吸水后与土壤颗粒作用形成土壤团聚物，使土壤含水率提高^[28-29]，与本研究结果一致。含 0.25% 聚丙烯酸盐类保水材料的土壤既能满足植物生长需要，又能节省成本，应用效果较好^[30]。因此，本研究沿用此用量与环境友好型保水材料进行比较，得出传统保水材料中丙烯酰胺-丙烯酸钾聚合型保水材料在土壤中效果较好，聚丙烯酸钾盐型

表 4 各试验组模型拟合参数

Table 4 Model fitting parameters of each experiment group

处理 Treatment	参数A Parameters A	参数B Parameters B	数学模型 Mathematical model	相关系数 R^2 Correlation coefficient R^2
CK	996.491	2.056	$Y=996.491X^{-2.056}$	0.994
N	519.575	1.216	$Y=519.575X^{-1.216}$	0.931
K	1719.551	2.53	$Y=1719.551X^{-2.530}$	0.998
H	1034.423	1.808	$Y=1034.423X^{-1.808}$	0.997
D_1	457.311	1.681	$Y=457.311X^{-1.681}$	0.969
D_2	313.079	1.605	$Y=313.079X^{-1.605}$	0.955
D_3	234.424	2.066	$Y=234.424X^{-2.066}$	0.991
S_1	708.109	1.434	$Y=708.109X^{-1.434}$	0.971
S_2	554.043	1.542	$Y=554.043X^{-1.542}$	0.981
S_3	942.330	1.659	$Y=942.330X^{-1.659}$	0.981
T_1	425.846	1.454	$Y=425.846X^{-1.454}$	0.903
T_2	994.722	1.839	$Y=994.722X^{-1.839}$	0.976
T_3	752.721	1.181	$Y=752.721X^{-1.181}$	0.903

表5 各处理土壤水分有效性

Table 5 Soil water availability of each treatment

处理 Treatment	田间持水量/% Field capacity	萎蔫含水量/% Wilting water content	有效水含量/% Effective water content
CK	12.93	1.03	11.90
N	25.39	1.00	24.39
K	15.37	1.03	14.34
H	23.56	1.02	22.54
D ₁	13.15	0.99	12.16
D ₂	14.26	0.98	13.28
D ₃	14.59	0.97	13.62
S ₁	13.69	1.02	12.67
S ₂	15.46	1.00	14.46
S ₃	19.96	1.02	18.94
T ₁	13.23	0.99	12.24
T ₂	20.44	1.02	19.42
T ₃	25.89	1.01	24.88

效果最差。与杨浩等^[31]在保水剂对黄绵土水分特征影响研究中结果不一致, 原因可能是保水材料上离子与不同类型土壤中离子结合对保水材料的吸水及土壤的保水产生不同影响。

3.2 土壤水分特征曲线

通过土壤水分特征曲线来描述土壤基本水力特

性^[32]。本研究得出, 随着土壤含水量的减少, 土壤水吸力升高, 在低吸力阶段, 添加各保水材料土壤含水量差异明显, 高吸力阶段土壤含水量差异不明显, 其变化规律与 Zeng 等人^[33]研究结果一致。本研究土壤水分特征曲线符合数学模型 $Y=AX^{-B}$, 与赵雪晴等^[34]研究中 Gardner 模型存在差异, 其多采用离心机法测定土壤水分特征曲线, 而本研究通过水势仪实测得到土壤水分特征曲线, 因此, 可能是因为试验方法和土壤质地的不同所导致数学模型及水吸力范围的不同。

3.3 土壤水吸力

本研究发现, 在土壤含水量极低时, 岩棉的水吸力最小, 最易被植物吸收利用。为了利用岩棉这一特性, 应进一步探究如何提高岩棉保持水分的能力。本研究中环境友好型保水材料对于土壤有效含水量的影响结果显示, 土壤有效含水量与环境友好型保水材料的用量成正比。这与宋海燕等^[11]研究中传统保水材料用量超过 0.3% 后, 增加保水材料只能增加土壤无效水含量的结果不一致, 说明, 传统保水材料不能像环境友好型材料一样, 可以通过增加用量提升土壤有效水含量。

3.4 环境友好型保水材料环保性和经济性

在林业生态工程建设中, 林木栽植间距较大,

表6 各指标主成分的特征向量、贡献率及综合指标系数

Table 6 Characteristic vector, contribution rate and comprehensive index coefficient of principal components of each index

指标 Index	主成分各指标特征向量和贡献百分比 Eigen vectors and percentages of accumulated contribution		各综合指标系数 Coefficients of comprehensive indexes	
	PC1	PC2	Y(1)	Y(2)
土壤密度 Volumetric weight	-0.707	0.574	-0.279	0.397
饱和含水率 Saturated water content	0.942	-0.307	0.372	-0.212
毛管持水量 Capillary capacity	0.962	0.215	0.380	0.149
田间持水量 Field capacity	0.97	0.119	0.383	0.082
非毛管孔隙度 Non-capillary	0.494	-0.803	0.195	-0.555
毛管孔隙度 Capillary	0.710	0.635	0.280	0.439
总孔隙度 Total capillary	0.94	-0.019	0.371	-0.013
40 d 累计含水量 Accumulated water content for 40 days	0.679	0.565	0.268	0.391
萎蔫含水量 Wilting water content	0.349	-0.473	0.138	-0.327
有效含水量 The available water content	0.970	0.121	0.383	0.084
特征值 Eigen values	6.407	2.091		
贡献率/% Contributive ratio	64.067	20.907		
累计贡献率/% Cumulative contributive ratio	64.067	84.974		

表 7 各处理综合指标值 $CI(m)$ 、隶属函数值 $\mu(x)$ 和综合评价值 D Table 7 The value of comprehensive index value $CI(m)$, subordinative function value $\mu(x)$ and integrated assessment value D of each treatment

处理 Treatment	$CI(1)$	$CI(2)$	μ_1	μ_2	D 值 D value	排序 Sequencing
N	2.524	1.886	0.711	0.931	0.765	3
K	-2.225	-0.346	0.028	0.404	0.120	11
H	3.003	2.180	0.780	1.000	0.834	1
D_1	-2.408	0.478	0.001	0.599	0.148	9
D_2	-2.025	1.110	0.056	0.748	0.227	7
D_3	-1.463	1.758	0.137	0.901	0.325	6
S_1	-2.417	-0.874	0.000	0.280	0.069	12
S_2	-1.094	-1.069	0.190	0.234	0.201	8
S_3	2.096	-2.061	0.650	0.000	0.490	4
T_1	-1.985	-0.689	0.062	0.323	0.126	10
T_2	1.464	-1.527	0.559	0.126	0.452	5
T_3	4.529	-0.846	1.000	0.286	0.824	2

密度较小,对于单株林木采用穴施的方法,在苗木栽植时将保水材料混施于根部附近土壤中。环境友好型保水材料 10% 的用量是合理的,不会对环境造成污染。虽然保水材料价格较高,但施用保水材料可以提高造林成活率,减少补植工作量或重造次数,造林成本相应降低。平均到每棵树的成本来看,环境友好型保水材料 10% 的用量在经济性上是可行的。但降低保水材料造林成本,研发价格低廉效果又好的产品以及保水材料的使用方法和用量都需要进一步探究。

4 结论

(1) 环境友好型保水材料可以提高土壤总孔隙度,降低土壤密度,改善土壤结构,有利于土壤蓄持更多水分。环境友好型保水材料的种类及用量对持水量和孔隙度的影响规律基本一致。10% 炭棉对各持水参数都有显著影响,增加土壤持水能力效果最好。

(2) 自然干旱条件下,环境友好型保水材料有利于抑制土壤水分蒸发,不仅改变了水分充足时土壤持水能力,也改变了整个失水过程中土壤的持水能力,通过比较,环境友好型保水材料 10% 炭棉在整个失水过程中保持水分效果最好。

(3) 环境友好型保水材料均能提高土壤有效水含量,由多到少排序为 $T_3 > N > H > T_2 > S_3 > S_2 > D_3 > K > D_2 > S_1 > T_1 > D_1 > CK$ 。其中 T_3 保持有效水含量最

多,为 24.88%。通过主成分分析和隶属函数法得出,环境友好型保水材料 10% 炭棉效果最好。

参考文献:

- [1] 刘洋. 聚丙烯酸钠保水剂的制备及其在草莓栽培上的应用[D]. 安徽: 安徽农业大学, 2017.
- [2] 张镭, 黄建平, 梁捷宁, 等. 气候变化对黄河流域的影响及应对措施[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 42-51.
- [3] Zhao W, Hu J, Cui Z, *et al.* Effects of superabsorbent polymers on the vertical infiltration of soil water with sand mulching[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(23): 1-6.
- [4] Abrisham E S, Jafari M, Tavili A, *et al.* Effects of a super absorbent polymer on soil properties and plant growth for use in land reclamation[J]. *Arid Land Research & Management*, 2018, 32(4): 407-420.
- [5] Banedjschafie S, Durner W. Water retention properties of a sandy soil with superabsorbent polymers as affected by aging and water quality[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(5): 798-806.
- [6] 李荣, 勉有明, 侯贤清, 等. 秸秆还田下保水剂用量对砂性土性状与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 260-271.
- [7] Bian X, Zeng L L, Li X Z, *et al.* Fabric changes induced by super-absorbent polymer on cement-lime stabilized excavated clayey soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(5): 1124-1135.
- [8] Cao Y, Wang B, Guo H, *et al.* The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 270-279.

- [9] 古丽娜尔·巴合提别克,王 瑛,苏金娟,等.膨润土-甘草渣复合材料保肥效应研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2020,38(4):463-470.
- [10] 杨红善,刘瑞凤,张俊平,等.PAAM-atta复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响[J].水土保持学报,2005(3):38-41.
- [11] 宋海燕,汪有科,汪 星,等.保水剂用量对土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):33-36.
- [12] 张 瑞.生态岩棉用于海绵城市建设耐侵蚀及服役特性研究[D].西安:长安大学,2020.
- [13] Zhong H, Sun B P. Application of multi-indicator analysis on synthesis of super absorbent polymers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 13(29): 67-73.
- [14] Zhou Z L, Yang Z Z, Liu C P. Novel nanocomposite super absorbent polymers reinforced by clay nanosheets[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2016, 89(2): 324-329.
- [15] Li X, He J Z, Liu Y R, et al. Effects of super absorbent polymers on soil microbial properties and Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) growth[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 711-719.
- [16] 范 震,丁新惠,赵 丹,等.玉米秸秆基纤维素保水剂对土壤持水性能及冬小麦根系生长的影响[J].中国农学通报,2021,37(17):51-57.
- [17] 郭 娟,何国莹,江 波,等.新型无土固态基质-炭棉应用研究初探[J].林业科技通讯,2016(11):43-47.
- [18] 安 艳,姬 强,赵世翔,等.生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J].环境科学,2016,37(1):293-300.
- [19] 宋佳奇,索全义,赵炳全,等.有机型沙地调理剂对沙土理化性质的影响[J].土壤通报,2018,49(4):949-952.
- [20] 王 帅,王 楠.土壤肥料学[M].长春:吉林大学出版社,2017:153-154.
- [21] 王 琰,井大炜,付修勇,等.保水剂施用量对杨树苗土壤物理性状与微生物活性的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):53-58.
- [22] 冉艳玲,王益权,张润霞,等.保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):101-107.
- [23] 连 盈,卢 娟,胡成梅,等.低氮胁迫对谷子苗期性状的影响和耐低氮品种的筛选[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(4):523-534.
- [24] 刘光杨,周 炜,陈 磊,等.11个睡莲品种的耐阴性综合评价[J].植物资源与环境学报,2020,29(1):44-51.
- [25] Tang H K, Song C J. Process of pore pressure diffusion in saturated clay soil and impact of adsorbed water[J]. Geosciences Journal, 2016, 20(5): 649.
- [26] 王丽琴,李红丽,董 智,等.黄河三角洲盐碱地造林对土壤水分特性的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(1):38-45.
- [27] 杜培兵,张永福,白小东,等.主成分分析和隶属函数法对马铃薯品种抗旱性的评价[J].种子,2019,38(8):120-126.
- [28] Yi Z, Zhao C. Desert 'Soilization': An eco-mechanical solution to desertification[J]. Engineering, 2016, 2(3): 270-273.
- [29] Han Y G, Yang P L, Luo Y P, et al. Porosity change model for watered super absorbent polymer-treated soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1197-1205.
- [30] 白岗栓,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.
- [31] 杨 浩,王百田,岳征文,等.应用保水剂对黄绵土水分特征的影响研究[J].水土保持研究,2011,18(3):182-186.
- [32] 孙 琪.不同覆沙厚度及混掺秸秆条件下土壤水分运移规律研究[D].兰州:兰州理工大学,2021.
- [33] Zeng L L, Fan L J, Gao Q, et al. Effect of initial gravimetric water content and cyclic wetting-drying on soil-water characteristic curves of disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Transportation Safety and Environment, 2019, 1(3): 230-240.
- [34] 赵雪晴,王冬梅,张泽洲,等.干湿交替对添加保水剂的砂土持水性能的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):90-99.

Effects of Environment-Friendly Water-retaining Materials on Soil Moisture Characteristics of Soil and the Evaluation

HOU Mei-juan, WEI A-long, CONG Ri-chun

(Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To explore the influence of environment-friendly water-retaining materials on soil moisture characteristics. [Methods] Three environment-friendly water-retaining materials, porous fiber cotton, biochar and carbon cotton, were selected and compared with three traditional water-retaining materials, sodium polyacrylate, acrylamide-potassium acrylate and potassium polyacrylate. Sandy soil was taken as the matrix and mixed with various water-retaining materials at different mass ratios, and CK. By the method of water control experiment, the dynamic curves of soil moisture and soil water characteristic of each water-retaining material were measured, respectively. And the influence of water-retaining materials on soil water characteristics was analyzed. [Results] The environment-friendly water-retaining materials could reduce soil bulk density and increase soil porosity and water holding capacity. Among them, 10% carbon cotton in soil had a significant effect on the water holding parameters. Under the condition of natural drought, all water-retaining materials could restrain soil water evaporation more effectively than CK. During 40 days, 10% carbon cotton retained the most moisture throughout the water loss process. After 40 days of drought stress, the water content of 10% cotton was 3.37% higher than that of CK group. All of the six water-retaining materials could increase the soil effective water content. The soil effective water content in the material T₃ had the largest, followed by N, H, T₂, S₃, S₂, D₃, K, D₂, S₁, T₁, D₁, CK of which 10% cotton treated soil effective water content was the most. [Conclusion] Through the comprehensive evaluation of principal component analysis and membership function method, 10% carbon cotton has the best water retention effect among environment-friendly water retention materials.

Keywords: environment-friendly water-retaining material; soil water characteristic curve; soil water availability; comprehensive evaluation

(责任编辑: 崔 贝)