

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.011

王之君,陈蒋,王志伟,等.椰糠型生态保育基质的水力—入渗特性及配比寻优[J].水土保持学报,2024,38(1):387-395.

WANG Zhijun, CHEN Jiang, WANG Zhiwei, et al. Hydraulic-infiltration characteristics and proportion optimization of coconut coir-type ecological conservation substrate[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):387-395.

椰糠型生态保育基质的水力—入渗特性及配比寻优

王之君^{1,2}, 陈蒋¹, 王志伟¹, 赵晨希¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学白银新材料研究院, 甘肃 白银 730900)

摘要: [目的] 荒漠戈壁因降水量少、蒸发量大等环境因素胁迫, 植被稀疏, 水土流失严重。探索适宜的土壤改良方法, 以提升其保水性、持水性, 对于荒漠化防治及戈壁生态农业发展十分重要。[方法] 以无椰糠基质组别 T0(风沙土: 有机肥: 人造泥炭=7: 3: 1) 为对照, 对理化性质较好的 3 组配比椰糠型生态保育基质(风沙土: 椰糠: 有机肥: 人造泥炭=3.5: 3.5: 3: 1 或 3: 4: 3: 1 或 2: 5: 3: 1, 依次为 T1、T2、T3) 进行水力—入渗特性试验; 利用离心机法测定基质水分与吸力的关系, 探究该基质的水力特性; 再通过室内定水头土柱入渗试验分析基质的入渗特征; 并以测定的各项指标为基础, 结合坐标综合评定法进行配比寻优。[结果] T1、T2、T3 组别较之 T0 组别, 田间持水量分别增加 10.22%, 12.13%, 14.99%, 全有效水含量分别增加 8.10%, 8.81%, 12.83%; 在吸力水头的对数值 $P_f=1.8\sim 3.8$ 阶段(基质吸力对数值), 各组别比水容量均值大小为 $T3>T2>T1>T0$; 根据灰色关联分析, 入渗能力大小为 $T3>T2>T0>T1$ 。[结论] 适宜比例椰糠混掺改变基质的有效水含量和孔隙分布比, 显著提升基质的保水持水能力。从理化性质、水力及入渗特性角度综合来看, T3 配比最优。

关键词: 椰糠型生态保育基质; 水力特性; 坐标综合评定法; 灰色关联分析; 配比寻优; 土壤改良

中图分类号: S152.9; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0387-09

Hydraulic-infiltration Characteristics and Proportion Optimization of Coconut Coir-type Ecological Conservation Substrate

WANG Zhijun^{1,2}, CHEN Jiang¹, WANG Zhiwei¹, ZHAO Chenxi¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Baiyin New Materials Research Institute, Lanzhou University of Technology, Baiyin, Gansu 730900, China)

Abstract: [Objective] Stressed by harsh environmental factors such as scarce precipitation and large evaporation, the desert Gobi is characterized as sparse vegetation and severe soil and water losses. Therefore, exploring suitable soil improvement methods to improve soil water retention and water holding capacity is very important for the development of Gobi ecological agriculture. [Methods] The hydraulic-infiltration characteristics of the 3 groups of coconut coir-type ecological conservation substrates with better physicochemical properties (aeolian soil: coconut coir: organic fertilizer: artificial peat = 3.5: 3: 3: 1 or 3: 4: 3: 1 or 2: 5: 3: 1, i.e., T1, T2, T3) were tested compared to the control substrate with no coconut coir (aeolian soil: organic fertilizer: artificial peat = 7: 3: 1, T0). The relationship between matrix water and suction was determined by the centrifuge method, and then the hydraulic characteristics were explored. Then, the infiltration characteristics of the substrates were analyzed by the indoor infiltration test of the soil column with constant water head; and, based on the measured indicators, the proportion optimization was carried out by the coordinate comprehensive evaluation method. [Results] Compared with the T0 group, the field water retention capacity of the T1, T2 and T3 groups increased by 10.22%, 12.13%

收稿日期: 2023-05-08

修回日期: 2023-06-06

录用日期: 2023-07-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2023-10-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(42167043); 甘肃省重点研发计划项目(20YF8ND141); 内蒙古自治区科技成果转化专项(2021CG0046);

阿拉善盟科技计划项目(AMYY2021-19)

第一作者: 王之君(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治、土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: wzj1159@163.com

通信作者: 王之君(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治、土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: wzj1159@163.com

and 14.99%, and the total effective water content increased by 8.10%, 8.81% and 12.83%, respectively. In the stage of $P_f = 1.8 \sim 3.8$ (logarithmic matrix suction), the average specific water capacity of each group showed a law of $T3 > T2 > T1 > T0$, and according to the gray correlation analysis (RGA) method, the infiltration capacity was ranked as $T3 > T2 > T0 > T1$. [Conclusion] The results showed that a suitable proportion of coconut coir mixing changes the effective water content and pore distribution ratio, which can significantly improve the water retention capacity of the substrate. From the perspective of physicochemical properties, hydraulic and infiltration characteristics, the T3 ratio is optimal.

Keywords: coconut coir-type ecological conservation substrate; hydraulic characteristics; coordinate comprehensive evaluation; grey correlation analysis (GRA); proportion optimization; soil improvement

Received: 2023-05-08

Revised: 2023-06-06

Accepted: 2023-07-10

Online(www.cnki.net): 2023-10-17

西北干旱区荒漠戈壁降水稀少,蒸发量大,植被稀疏,水土流失严重,改善土壤保水保肥能力,是长期需要解决的关键问题。新时代生态文明思想下,基于废弃物资源化利用理念,探索荒漠生态修复新路径^[1],助力戈壁生态农业与高效节水^[2],具有重要的科学意义和实践指导价值。

荒漠戈壁土壤含沙量较大,多为风沙土,其透气性较好,有利于作物生长,但水分、养分流失严重^[3],导致其生态经济效益难以充分发挥。DUNSFORD等^[4]将工业废弃物与荒漠化土壤进行混合,使其保水保肥能力有了较大提升。通过多组材料复混而成的基质,不仅能起到废物利用和环境修复的效果,还可以促进产业发展,增加经济效益。而就荒漠戈壁的特殊性而言,保水持水能力的提升十分重要。戎泽等^[5]以椰糠作为保水材料,加强所施用的基质土壤整体的持水能力,并结合水分特征曲线对其进行了有效水含量的分析。椰糠拥有良好的通气和保水性能,清洁且环保,其总孔隙度高于 90%^[6],本身就属于较好的基质类型。椰糠复混,可使基质结构发生改变,直接影响其持水性以及对植物水分的供应。此外,刘德军等^[7]通过相关压缩工艺,利用农业废弃物,制备了成型效果较好且营养丰富的绿化固体基质,对生态环境起到保护作用。含有大量有机物的基质还田,能够有效改良土壤环境,实现资源可持续循环利用及生态效益的最大化^[8]。

王兵等^[9]研究发现,不同结构土壤的持水性不同,水分特征曲线低吸段的持水能力有明显差异;了解不同结构土壤或基质的水分特性曲线,就高效节水而言,具有重要的现实意义^[10]。荒漠戈壁土壤贫瘠,保水性差,植物难以存活,用复配基质改良土壤,其入渗特性可表征基质由点到面的水文效应^[11],也是土壤环境修复的研究重点之一。WANG等^[12]利用粉煤灰、煤矸石、土壤等材料复混,通过水分入渗,探索

其水文特征发现,混合基质与土壤具有一定的相似性。李彦需等^[13]通过室内试验和数值模拟,研究了不同蚯蚓粪施加方式及施加量对土壤水分入渗的影响,进而反映了整个土体的水力特性,发现了不同配比基质的持水特征。

基质和土壤一样,是一种高度复杂化的多孔非饱和和介质。基于保育增生技术理念^[1],本文研发一种椰糠型生态保育基质,针对不同配比的保育基质开展水力与入渗等方面的试验与分析,探究其保水持水性、水分有效性、供排水能力等;再结合灰色关联分析法判定入渗性能,最后依据相关参数,采用坐标综合评定法判定基质配比优劣,为发展废弃物资源利用、高效节水及生态环境修复技术理论体系提供科学借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2021 年 10 月至 2022 年 5 月在兰州理工大学能源与动力工程学院水工试大厅进行。所用基质分别为 T0 对照(风沙土:有机肥:人造泥炭=7:3:1)、T1、T2、T3(风沙土:椰糠:有机肥:人造泥炭=3.5:3.5:3:1 或 3:4:3:1 或 2:5:3:1)组别粉碎过筛制备的样品。风沙土于 2021 年 7 月取自黄河上游中卫河段典型荒漠化区域(104°58′39″E,37°26′29″N),取土深度 0—30 cm,椰糠由工厂提供,粒径 0~15 mm,容重 0.07 g/cm³;人造泥炭由本地加工厂购置,粒径 2~5 mm,容重 0.06 g/cm³,有机肥为干净且不需要发酵腐熟的环保有机肥,粒径 2~4 mm。

T1、T2、T3 组别是通过成型效果、渗水率以及抗跌碎性能筛选出的理化性质较好的基质组别。基质的相关物理性质指标见图 1。此外,T0、T1、T2、T3 组别的基质总氮分别为 0.91,1.02,1.38,1.47 g/cm³,水解氮分别为 112.00,130.67,145.00,139.00 mg/

kg,总磷分别为 1.93,2.01,2.21,2.57 g/kg,有效磷分别为 78.75,124.67,132.17,132.50 mg/kg,有效钾分别为 221.81,312.96,354.76,364.31 mg/kg,有机质含量分别为 16.17%,44.13%,48.28%,56.31%,pH 分别为 6.75,6.34,6.17,6.03,电导率分别为 1.70,2.29,2.55,2.81 mS/cm。

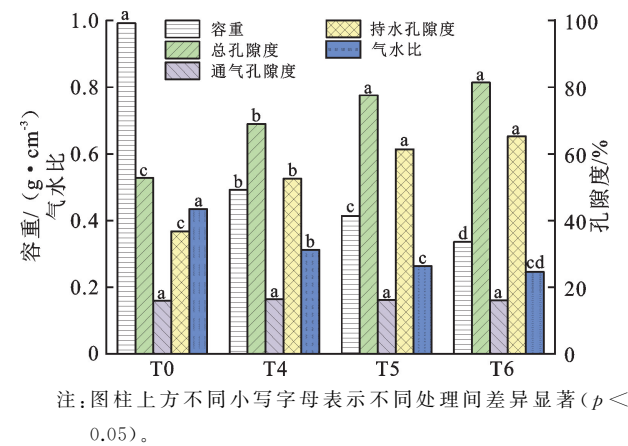


图 1 4 组基质的物理性质

Fig. 1 Physical properties of 4 groups of substrates

1.2 试验方法及原理

1.2.1 水分特征曲线的测定与拟合 基质水分特征曲线测定采用离心机法^[14](CR21G II 型离心机)。每次离心结束后,计算体积含水率,各处理 3 次重复,结果取其平均值。采用的土水特征曲线拟合模型为应用最为广泛的 Van Genuchten 模型^[15]。

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{(1+|\alpha h|^n)^m} & h<0 \\ \theta_s & h\geq 0\end{cases}\tag{1}$$

式中: $\theta(h)$ 为体积含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和体积含水率(cm^3/cm^3); θ_r 为残余体积含水率(cm^3/cm^3); h 为水吸力(cm); α 为进气值的倒数(cm^{-1}); m 和 n 为形状系数。

1.2.2 当量孔径和比水容量的确定 土壤中的孔隙根据其大小和功能,可分为非活性孔隙、毛细孔隙和通气孔隙,主要以 0.002,0.06 mm 来界定。据茹林公式^[16],土壤当量孔径(d ,mm)和水吸力(S ,Pa)的关系为:

$$d=300/S\tag{2}$$

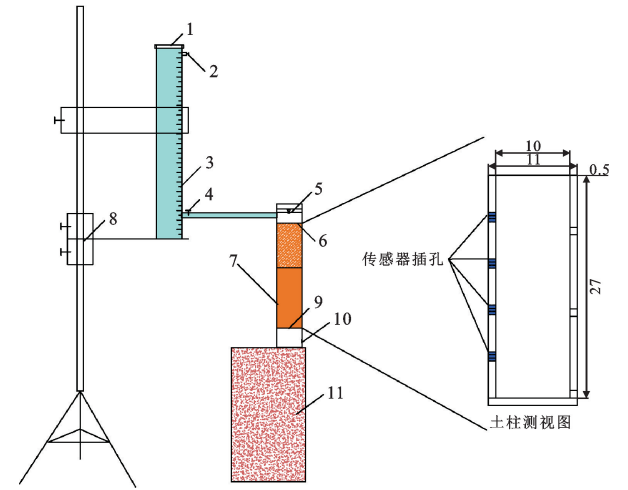
比水容量能够反映土壤等复杂介质在单位吸力下所引起的含水量变化。计算公式为:

$$C(h)=-\frac{d\theta}{dh}=\frac{anm(\theta_s-\theta_r)|\alpha h|^{n-1}}{[1+|\alpha h|^n]^{m+1}}\tag{3}$$

式中: $C(h)$ 为比水容量(cm^3/cm^4)。

1.2.3 入渗能力的确定 渗参数测定采用一维垂直定水头法^[17]。试验采用马氏瓶供水,并设置水头保持在土面 2.5 cm 处。土柱为内径 10 cm,外径 11 cm,高 35 cm 的透明圆柱体,底部设有小孔,保证水

分自由排出(图 2)。土柱分 2 层装填,下层为纯土壤,上层为基质层,分别高 15,12 cm;底部与顶部用快速过水滤纸封住,防止土样泄露与浮动等损失。试验土壤与空气接触面积较小,在室内不考虑蒸发作用。试验开始后的前 30 min,分别在 1,2,3,5,7,9,12,15,18,22,26,30 min 时记录马氏瓶刻度值,30 min 后,每 5 min 记录 1 次,全长 125 min。连续 3 次水位差一致则为稳渗状态。整理入渗数据,计算出初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、累积入渗量、稳渗用时的平均值,以便使用灰色关联分析法^[17]分析入渗性能。此外,试验通过 PC-2SQ 土壤墒情监测仪结合 TDR-3 型传感器进行入渗试验过程中的实时水分监测,设置 4 组探头,分别位于土面垂直向下 6,12,18,24 cm 处,每 1 min 记录 1 次数据,并自动上传于计算机。



注:1 为注水口;2 为排气阀;3 为标尺;4 为阀门;5 为定水头;6 为基质层;7 为纯土层;8 为支架;9 为透水滤纸;10 为出水口;11 为工作台,图中数据单位为 cm。

图 2 入渗试验装置示意

Fig. 2 Diagram of the infiltration test device

1.2.4 坐标综合评定 坐标综合评定法^[18]运用多维空间理论分析,通过简单而精确的计算,便可对多因素类别进行评估,测量原始值和最优值之间的距离。评价步骤为:

- (1)将所有指标列成原始数据矩阵,以 (A_{ij}) 表示;
- (2)将矩阵中每个指标数值与该列数值中最大数值,或者最小数值进行比较,无量纲化并得到比值,即 $a_{ij}=A_{ij}/A_{\max}$ (或 $A_{\min}/A_{ij}$),由此计算出矩阵坐标 (a_{ij}) ;
- (3)按公式(4)计算第 i 个数据点到标准点的距离 P_i ;这里将每一类数据的 P_i 直接求出。

$$P_i=\sqrt{(1-a_{ij})^2}\tag{4}$$

式中: i 为不同指标; j 为不同评价类型。

(4)以矩阵中各数据点到标准点间距离的和进行排序比较,最小值为优。

本文使用该方法,结合测基质的理化、水力及入渗特性等重要指标,在该范围内选择相对最优值进行计算,尽管不能完全代表试验与理论计算得出的绝对数值,但却可以相对地评价本文研究对象中各组基质的优劣性。

1.3 数据处理

所有的试验数据采用 Excel 2016、SPSS 21.0 软件统计分析,模型求解采用 Matlab R2018b 软件,绘图分析采用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 保育基质的水分特征曲线分析

由表 1 可知,VG 模型拟合良好, R^2 都在 0.99 以上,可较好地表征基质土壤水吸力与含水量的关系。T1、T2、T3 组别的 θ_r 与 θ_s 数值均比 T0 的大; α 值比 T0 低,且随椰糠占比增加而减小, n 的值整体比 T0 高。此外,由于进气吸力越小,土壤持水能力越差,越容易排水^[19],T1、T2、T3 组别随着椰糠的加入,不仅使得基质整体的持水能力变强且随椰糠占比增加而增加,还使其排水能力降低,并与椰糠占比呈反比关系。

表 1 VG 模型拟合参数

Table 1 VG model fitting parameters

组别	$\theta_r /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\alpha /$ (cm^{-1})	n	R^2
T0	0.079 99	0.560 32	0.068 08	1.342 46	0.995 2
T1	0.106 67	0.672 46	0.040 62	1.415 89	0.996 4
T2	0.115 74	0.689 74	0.039 93	1.408 21	0.997 4
T3	0.094 90	0.718 31	0.035 96	1.396 45	0.993 8

由图 3a 可知,各组基质的水分特征曲线变化规律基本一致;T1、T2、T3 组别较之 T0,曲线整体明显上移,且随着椰糠占比越大,上移越多。将水分特征曲线横坐标转为指数计数,转变成 P_f 图(P_f 为吸力水头的对数值)以便分析(图 3b)。

由图 3b 可知, $P_f < 1.8$ 的低吸力阶段,饱和介质中大孔隙主要受重力影响而排水;在 $P_f = 1.2 \sim 3.0$ 阶段,各组基质的含水率迅速下降,随着吸力的不断增强,其含水率变化也逐渐进入残留区^[20];在 $P_f = 3.0 \sim 3.8$ 阶段,由于基质各种材料颗粒表面吸附力使等量的水分释放消耗的能量更多^[21],各组基质的含水率下降速度有所减缓,且趋于稳定;在 $P_f > 3.8$ 的强吸力阶段,基质所滞留的水分受吸附作用的影响越来越大,则各组基质在相同吸力下的含水量变化也变得更小。

2.2 保育基质的有效水含量分析

土壤的水分常数可以通过水分特征曲线获得^[21-22]。通常将 $P_f = 1.80$ 时的土壤含水率作为田间持水量, $P_f = 4.18$ 时的含水量一般为萎蔫系数,而 $P_f = 3.80$ 时为暂时萎蔫系数。因此, $P_f = 1.80 \sim 4.18$ 所对应的含水量差值为全有效水含量,而 $P_f = 1.80 \sim 3.80$ 为速效水含量, $P_f = 3.80 \sim 4.18$ 为迟效水含量, $P_f > 4.18$ 则为无效水含量。各组基质的水分参数经计算见表 2。T1、T2、T3 组别较之 T0,田间持水量分别增加 10.22%,12.13%,14.99%,平均增加 12.45%;萎蔫系数分别增加 2.12%,3.32%,2.16%。椰糠的混掺使得 3 组基质的水力特性均发生改变,有效地将重力水部分转换成毛管水,较大程度地增加有效水含量,且与椰糠占比呈正相关关系。T1、T2、T3 组别的全有效水含量,分别增加 8.10%,8.81%,12.83%。有效水的绝对含量,即速效水在全有效水中的占比(侧面反映基质的供水强度),T0 为 93.51%,T1、T2、T3 组别平均增加 1.04%;T1、T2、T3 的迟效水占比较之 T0 变低,这表明 3 组基质的速效水增长高于迟效水的。综上可知,3 组基质的持水、供水能力均高于 T0,这为植物生长提供更多的水分。

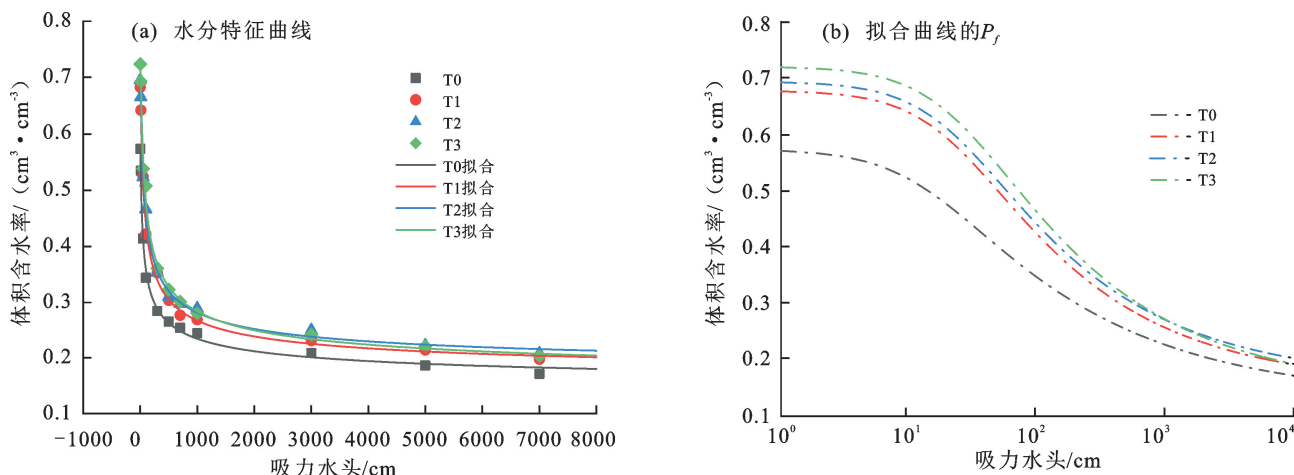


图 3 4 组基质的水分特征曲线

Fig. 3 Water characteristic curves of the 4 groups of substrates

表 2 不同基质的水分参数

组别	田间持水量	全有效水	速效水	迟效水	萎蔫系数
T0	36.283d	23.807c	22.261c	1.546d	12.476c
T1	46.507c	31.910b	30.206b	1.704c	14.597b
T2	48.413b	32.621b	30.899b	1.788b	15.792a
T3	51.277a	36.639a	34.531a	2.066a	14.638b

注:同列不同小写字母表示不同处理间 0.05 水平差异显著。
下同。

2.3 保育基质的孔隙分布及比水容量分析

由表 3 可知,T1、T2、T3 基质的通气孔隙较之 T0,差异不显著,只有少许增加。毛管孔隙与非活性孔隙较之 T0 明显增加,T1、T2、T3 的毛管孔隙分别增加 8.35%,8.89%,12.38%,平均增加 9.87%,其中 T1、T2 无显著性差异;非活性孔隙分别增加 2.57%,3.94%,3.46%,平均增加 3.33%。综上可知,椰糠的加入有效改善了基质的孔隙结构,加强其持水能力。

表 3 4 组基质的当量孔径分布比

当量孔径/mm	T0	T1	T2	T3
≥0.060	17.521a	17.958a	17.778a	17.634a
0.002~0.060	22.417c	30.770b	31.310b	34.797a
<0.002	15.767c	18.341b	19.709a	19.231ab

由图 4 可知,基质的比水容量变化是随水吸力增加而先升后降的。土壤的释水性,在不同阶段表现不同^[23]。在 $P_f<1.8$ 阶段,T0 的比水容量均值最大,这说明其具有较高水平的释水性,在重力作用下,大孔隙容易流失水分;在 $P_f=1.0\sim1.8$ 阶段,T0 与 T1、T2、T3 组别曲线相交,且在之后保持最低,这代表 3 组基质在椰糠的作用下减少了重力水。随着水吸力增大,其供水、释水转向中小孔隙,蓄水孔隙体积变少,供水量减少,此时基质内部颗粒的吸附作用和孔隙毛管作用较强,比水容量也因此变低。在 $P_f=1.80\sim3.80$ 阶段,水分释出对作物影响最大;据计算可知,此阶段的比水容量均值大小为 $T3>T2>T1>T0$,这说明 T3 组别的基质在以速效水为主的该阶段水分更容易释放,而植物获得相同水分所需要的能量变少,灌溉的水量需求也更少。

2.4 保育基质的入渗性能分析

由图 5 可知,各组别的初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗用时等数据均达到显著水平($p<0.05$)。其中,初始入渗速率为 7.58~19.37 mm/min,大小排序为 $T3(19.37\text{ mm/min})>$

$T1(12.60\text{ mm/min})>T0(7.58\text{ mm/min})$;稳定入渗速率在 0.53~0.91 mm/min 内,大小排序为 $T0(0.91\text{ mm/min})>T3(0.77\text{ mm/min})>T2(0.68\text{ mm/min})>T1(0.53\text{ mm/min})$;平均入渗速率为 1.90~3.14 mm/min,大小排序为 $T3(3.14\text{ mm/min})>T2(2.60\text{ mm/min})>T0(2.27\text{ mm/min})>T1(1.90\text{ mm/min})$;稳渗用时为 45~60 min,大小排序为 $T1(60\text{ min})>T0(55\text{ min})>T2(50\text{ min})>T3(45\text{ min})$ 。由图 5 可知,总累积入渗量为 141.35~185.98 mm,大小排序为 $T0(185.98\text{ mm})>T3(184.15\text{ mm})>T2(163.43\text{ mm})>T1(141.35\text{ mm})$;到达稳渗时的累积入渗量为 114.05~141.3 mm,大小排序为 $T3(141.30\text{ mm})>T2(129.88\text{ mm})>T0(124.63\text{ mm})>T1(114.00\text{ mm})$ 。

综上,通过对 T1、T2、T3 组别和 T0 对照分析,3 组加入椰糠的基质的初始入渗速率显著增加,且与椰糠含量呈正相关关系;稳定入渗速率随着椰糠的加入而变小,即与椰糠占比负相关,也说明在该局部配比范围内,椰糠改变基质内部的基质势能与持水能力;总累积入渗量 T0 最大,T3 次之,T0 组别更易发生深层渗漏,持水能力相对较弱;稳定入渗用时,T1 最长,T3 最短,稳渗时的累积入渗量,T3 最大,T1 最少;平均入渗速率,T1 最小,T3 最大。

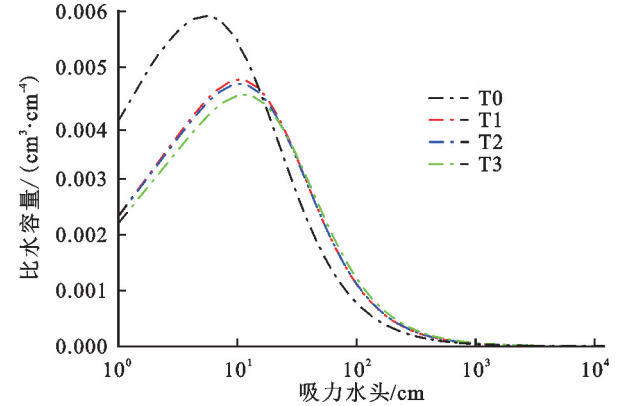


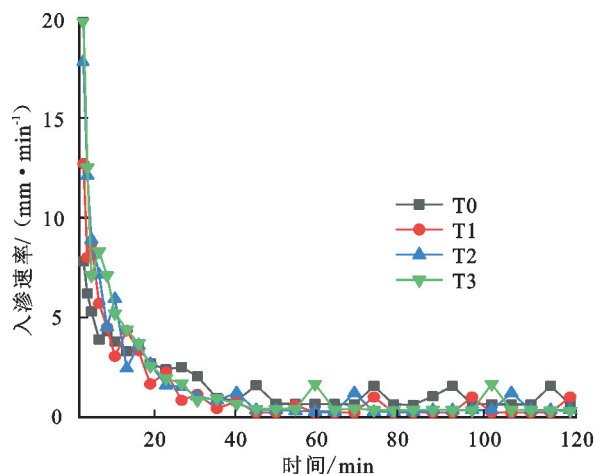
图 4 比水容量曲线

Fig. 4 Specific water capacity curve

灰色关联分析通常用于评估样本量较小时变量之间的关联程度。将初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、稳渗用时和累积入渗量(稳渗时)等参数无量纲化。参考最大值化方法,将各参数最优值作为参照值,各组均与最优值做除法,得到这些参数的标准化值(表 4)。

灰关联系数衡量每个参数值和最优值之间的相关程度,系数越接近 1 表示参数性能更好。表 5 为各组基质的入渗性能参数的灰关联系数与灰关联度。灰色关联分析结果显示,4 组基质入渗性能大小排序为 $T3>T2>T0>T1$ (其中 T2、T0 入渗能力相近)。

T3 的初始、平均入渗速率以及累积入渗量(稳渗时)等方面相对最大,在未达到稳渗状态前,该配比的基



质更能排清土表积水。T1 稳渗用时最久,说明其对于减少水分入渗速率的效果更为明显。

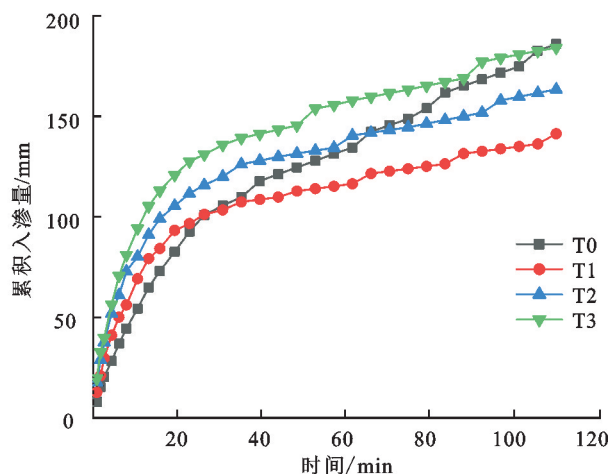


图 5 4 组基质的入渗速率及累积入渗量

Fig. 5 Infiltration rate and cumulative infiltration of 4 group of substrates

表 4 参数标准化

Table 4 Parameter standardization

参数	T0	T1	T2	T3
初始入渗速率	0.39	0.65	0.91	1.00
稳定入渗速率	1.00	0.57	0.75	0.84
稳定入渗时间	0.92	1.00	0.83	0.75
平均入渗速率	0.72	0.61	0.83	1.00
累积入渗量	0.88	0.81	0.92	1.00

表 5 入渗性能综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of infiltration ability

指标	参数	T0	T1	T2	T3
灰关联系数	初始入渗速率	0.33	0.47	0.77	1.00
	稳定入渗速率	1.00	0.42	0.55	0.66
	稳定入渗时间	0.79	1.00	0.65	0.55
	平均入渗速率	0.52	0.44	0.64	1.00
	累积入渗量	0.72	0.61	0.79	1.00
灰关联度		0.67	0.59	0.68	0.84

2.5 各组保育基质的综合评价

本文采用容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度、总氮、总磷、有效磷、有效钾、有机质含量、电导率、各类当量孔径分布比、速效水、有效段比水容量均值、萎蔫系数、初始入渗速率、稳定入渗速率、稳渗用时、累积入渗量、平均入渗速率等指标进行基质配比综合评价,旨在结合理化性质、水力及入渗性能等方面的重要参数指标对多组配比进行评定寻优。由表 6 可知,理化特性大小排序为 $T3 > T2 > T1 > T0$,水力—入渗特性大小排序为 $T3 > T2 > T1 > T0$,综合评定结果为 $T3 > T2 > T1 > T0$,即 T3 组别的基质最优。

3 讨论

探索基质的优劣可以从理化性质、水力特性、作物生长等指标来反映。其中,水力特性方面的重要参数有

水分特征曲线、孔径分布、比水容量等。这些参数能反映基质的保水持水能力、水分的有效性等,其差异是基质的结构、理化性质等多重因素共同作用的结果^[21]。

表 6 坐标综合评定结果

Table 6 Coordinate comprehensive evaluation results

组别	理化特性		水力—入渗特性		评价结果	
	P_i	排序	P_i	排序	P_i	排序
T0	3.603 7	4	2.471 6	4	6.075 3	4
T1	2.071 5	3	2.107 6	3	4.179 1	3
T2	1.118 7	2	1.545 6	2	2.664 3	2
T3	0.396 7	1	0.751 1	1	1.147 9	1

椰糠的混掺使得基质的水分特征曲线参数发生改变,对 θ_r 与 θ_s 等参数有增大效果。此外,在 T1、T2、T3 组别中, θ_s 随椰糠占比增加而增大, θ_r 未发现明显规律,这或许是由于基质的质地、结构复杂多变有关,与非活性孔隙占比、萎蔫系数等参数值变化相似,都有着一定的波动;同时与椰糠的高含量、小颗粒与大颗粒的孔隙充填程度及制备工艺等有着直接的关系。本文所述基质所含大部分颗粒是拥有很大比表面积与电荷密度的多孔有机物,其能增强对水分的吸附力,并在颗粒之间形成较厚的水膜,使得孔隙中更多的重力水转换成了毛管水及束缚水,从而提升了基质整体的持水能力。比水容量能够衡量土壤自身持水量及对植物提供水分的强弱。本文研究发现,适宜椰糠的加入能够降低基质整体重力排水阶段的比水容量,增加有效水阶段的比水容量,这对作物生长及土壤水分调控产生积极影响。这与戎泽等^[5]的研究结果相似,一定量的椰糠能增强混合基质土壤整体的持水能力。研究对象(T1、T2、T3)随着椰糠的加入导致各孔隙分布变化,并降低基质整体的大孔径占比,增大有效孔隙的占比,这与基质制备工艺及椰糠

与其他材料的基础特性有关,直接影响了基质孔隙结构。在研究基质特性过程中发现,该新型基质对节水灌溉、作物生长及水分调控具有积极作用,这与很多改良土壤的研究^[24]一样,达到优质化的要求。

由于不同配比基质的大小颗粒间隙充填程度不同及下渗路径复杂化,使得水分下渗速度与路线存在不同程度的波动,导致各配比入渗特征的差异^[17]。试验设置的 4 组探头 1,2,3,4 分别位于土面垂直向下 6,12,18,24 cm 处。由图 6 可知,在水分入渗的初期,水分重力与吸力的共同作用下,开始在基质中运动,因土体含水率很小,基质势小,其含水率便迅速升

高。随着基质含水率逐渐升高,相应的基质势能也同样升高,导致对水分的吸收减弱,因此含水率上升逐渐变缓。当土体含水量趋于饱和时,基质势能接近于 0,到达含水率稳定阶段^[25],由于基质试验条件和额外水分的淤积、排出等原因,在稳定阶段存在一定程度的波动。对比前面入渗试验观测结果,探头所测达到饱和含水率的时间,都大于稳渗用时,根据试验现象以及基质特性来看,应是由于基质本身具有的较强吸水性和持留水能力造成的。通过含水率监测可以更明显发现,加入椰糠不仅增大基质的导水能力,还阻碍水分的深层下渗。

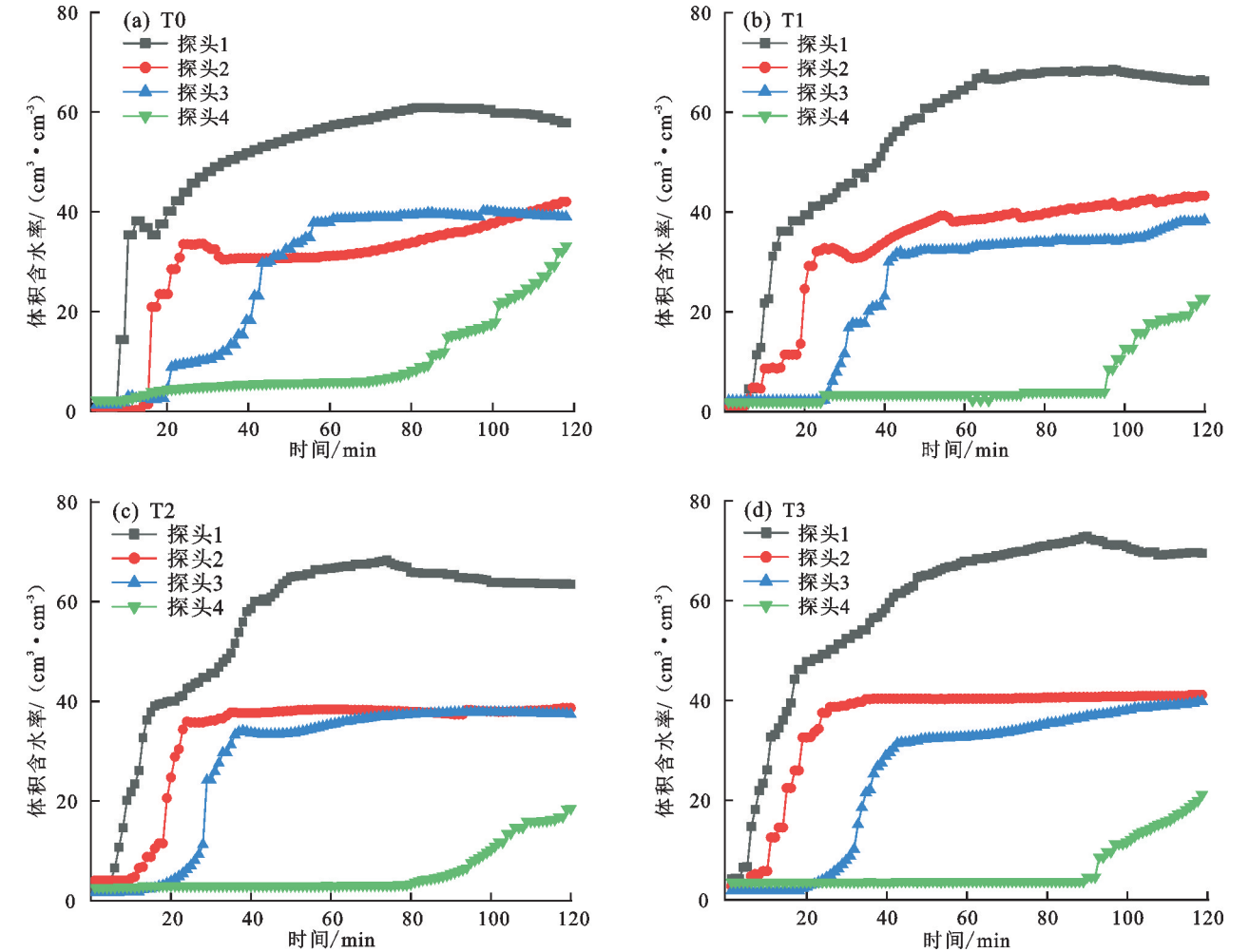


图 6 土柱各观测点的含水率随时间的变化

Fig. 6 Variation of water content of each observation point in the soil column with time

本研究中,基质达到最高有效水含量及最高毛管孔隙比所对应的椰糠含量也最高,既提高废弃物利用率,也为植物生长提供良好的环境。但考虑到本文小尺度试验与野外实际条件的诸多差异,如土壤结构非均质性、植物根系、灌溉模式因素的综合影响^[26],目前的研究结果尚不足以直接外推至野外应用。

下一步拟将本文遴选出的最优基质配方(T3)应用于团队近年来引入并持续发展的保育砖技术^[1,27-28],

制作为模块化生态保育基质,主体为空心圆柱体,将作物栽种于空心圆柱内,并填充土壤(图 7),经由栽培试验,进一步验证其适用性。该模块化基质的内壁可起到限制侧根发育、引导根系向下延伸的作用,同时保障植物幼苗阶段的营养需求,从而抵抗荒漠戈壁恶劣环境的影响。与此同时,可降解的保育基质,可为沙地补充营养物质,进而达到由点及面土壤改良与生态修复的效果。

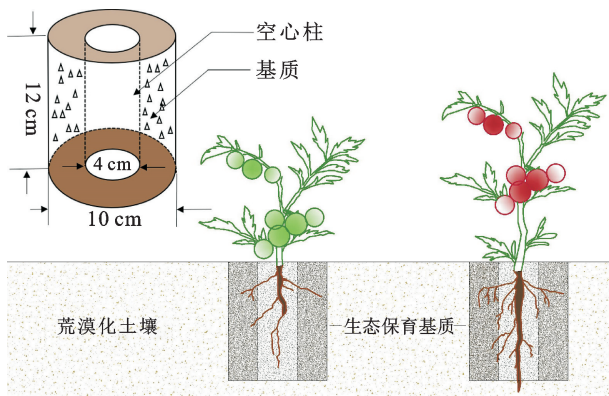


图 7 基质形态及栽培示意

Fig. 7 Diagram of substrate type and cultivation

4 结论

(1) 适宜比例的椰糠对于研究对象有着显著的影响。椰糠型基质的水分特征曲线规律无显著变化, 保水、持水能力显著提升, 且随椰糠占比增加而增大, 同时, 椰糠的加入减小其排水能力。

(2) 椰糠型基质中的有效水显著增加; 在对于植物生长有利的速效水范围内, 供水能力最强的是 T3 (其中风沙土: 椰糠 = 2: 5)。此外, 椰糠的加入改变基质的入渗性能。根据灰色关联分析, T3 配比的入渗性能最优。

(3) 结合坐标综合评定法, 从理化、水力以及入渗等方面进行基质配比寻优, 寻得养分充足、保水性强的优质生态保育基质配比 T3 (风沙土: 椰糠: 有机肥: 人造泥炭 = 2: 5: 3: 1)。

参考文献:

- [1] 山寺喜成. 自然生态环境修复的理念与实践技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
YOSHINARI Y. Idea theory and practical techniques for restoration of natural ecological environment [M]. Beijing: China Architecture and Industry Press, 2014.
- [2] 朱淑娟, 孙涛, 王方琳, 等. 甘肃河西地区发展戈壁农业的现实依据和实现途径[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(6): 240-243, 246.
ZHU S J, SUN T, WANG F L, et al. The realistic basis and way of developing Gobi agriculture in Hexi area of Gansu Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(6): 240-243, 246.
- [3] 孙书伟. 退化林地整治路径探讨: 以定边县盐场堡镇周台子村项目为例[J]. 南方农机, 2021, 52(10): 83-85.
SUN S W. Discussion on the ways of land rehabilitation to renovate degraded forest land: Take the Zhoutaizi village project in Yanchangbao Town, Dingbian County as an example[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 83-85.
- [4] DUNSFORD S J, FREE A J, DAVY A J. Acidifying

- peat as an aid to the reconstruction of lowland heath on arable soil: A field experiment [J]. Journal of Applied Ecology, 1998, 35(5): 660-672.
- [5] 戎泽, 白波, 王洪伦, 等. 天然椰糠粉增强陕西娄土持水性能研究[J]. 应用化工, 2017, 46(5): 902-906, 915.
RONG Z, BAI B, WANG H L, et al. Enhanced performance of natural coconut powder for the water retention capacity of Shaanxi Lou soil [J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(5): 902-906, 915.
- [6] 汪飞, 罗学刚, 赵健. 松针和椰糠无土栽培基质理化性质比较研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(22): 164-169.
WANG F, LUO X G, ZHAO J. Comparison of physiochemical properties of pine needles and coconut coir [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(22): 164-169.
- [7] 刘德军, 王家鑫, 周艳吉, 等. 农业有机废弃物压制绿化基质砖成型机理与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 243-252.
LIU D J, WANG J X, ZHOU Y J, et al. Forming mechanism and experiment of greening substrate bricks pressed by using agricultural organic waste [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(12): 243-252.
- [8] 朱晓月, 方燕, 上官周平. 黄土风沙区土壤培肥机理与技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(7): 95-101.
ZHU X Y, FANG Y, SHANGGUAN Z P. Mechanism and technology of soil fertility cultivation in loess desert: A review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(7): 95-101.
- [9] 王兵, 魏文俊, 冷冷. 宁夏六盘山不同森林类型土壤贮水与入渗研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(3): 1-5.
WANG B, WEI W J, LENG L. The comparison research of soil water-holding and infiltration in different forest type in Liupan Mountains of Ningxia [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2006, 27(3): 1-5.
- [10] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1042-1049.
- [11] 周杨, 杨永刚. 不同重构方式下古交典型矿区土壤持水性差异研究[J]. 山西大学学报, 2022, 45(5): 1369-1376.
ZHOU Y, YANG Y G. Water-holding capacities of soil under different reconstruction patterns in Gujiao typical mining area, Shanxi [J]. Journal of Shanxi University, 2022, 45(5): 1369-1376.
- [12] WANG J M, LI X F, BAI Z K, et al. The effects of coal gangue and fly ash on the hydraulic properties and water content distribution in reconstructed soil profiles of coal-mined land with a high groundwater table [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(3): 687-697.

- [13] 李彦需,邵明安,王娇.蚯蚓粪施用方式及用量对土壤入渗的影响[J].土壤学报,2019,56(2):331-339.
LI Y P, SHAO M A, WANG J. Effects of pattern and amount of earthworm cast application on water infiltration in soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(2): 331-339.
- [14] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等.土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J].水利学报,2015,46(10):1181-1188.
XING X G, ZHAO W G, MA X Y, et al. Study on soil shrinkage characteristics during soil water characteristic curve measurement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1181-1188.
- [15] Van GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [16] 周薇,石磊,许明祥.微塑料对土壤持水性能的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):258-263.
ZHOU W, SHI L, XU M X. Influence of microplastics on soil water retention[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 258-263.
- [17] 王佳欢,杨新兵,刘彦林,等.采石废弃地弃渣与农田土混合土壤粒径特征及水文效应[J].水土保持学报,2022,36(3):338-344.
WANG J H, YANG X B, LIU Y L, et al. Experimental study on particle size characteristics and hydrological effect of mixed soil of quarrying waste residue and farmland soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 338-344.
- [18] 王正安,邸利,王彦辉,等.六盘山叠叠沟小流域4种植被土壤层水文调节功能的综合评价[J].干旱区资源与环境,2017,31(11):181-187.
WANG Z A, DI L, WANG Y H, et al. Comprehensive evaluation on the hydrological adjusting function of soils in four vegetation types in the small watershed of Diediegou, Liupan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(11): 181-187.
- [19] 汪怡珂,罗昔联,花东文,等.毛乌素沙地复配土壤水分特征曲线模型筛选研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(6):167-173.
WANG Y K, LUO X L, HUA D W, et al. Screening of water characteristic curve model based on different mass ratios of feldspathic sandstone and sand compound soil[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(6): 167-173.
- [20] ZHAI Q, RAHARDJO H. Quantification of uncertainties in soil-water characteristic curve associated with fitting parameters[J]. Engineering Geology, 2013, 163: 144-152.
- [21] 闫辰啸,洪明,秦佳豪,等.生物炭对和田风沙土水力特性的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):21-28.
YAN C X, HONG M, QIN J H, et al. Effects of biochar on hydraulic characteristics of aeolian sandy soil in Hetian[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 21-28.
- [22] PENG Z J, SMITH C, STOVIN V. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: e125273.
- [23] 于元芬,郭明先,孟飞,等.不同植被下黏质红壤水分特征曲线研究[J].节水灌溉,2020(9):69-74.
YU Y F, GUO M X, MENG F, et al. Water characteristic curves of the clayey red soil under different vegetation types [J]. Water Saving Irrigation, 2020(9): 69-74.
- [24] AJAYI A E, HORN R. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 164: 33-44.
- [25] 黄殿男,焦美怡,李琳,等.污泥掺混改良沙土的水分入渗及再分布规律[J].水土保持研究,2020,27(1):189-196.
HUANG D N, JIAO M Y, LI L, et al. Water infiltration and redistribution of improved sand by sludge mixing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 189-196.
- [26] 盛丰,方娴静,吴丹,等.灌溉水中悬浮固体对土壤水分入渗性能的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):98-106.
SHENG F, FANG X J, WU D, et al. Effects of suspended solids in irrigation water on soil water infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 98-106.
- [27] 赵文举,马锋,曹伟,等.水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J].农业工程学报,2022,38(2):95-101.
ZHAO W J, MA F, CAO W, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 95-101.
- [28] ZHAO W J, JI H, WANG Z J, et al. Resisting drought and promoting root ecological raising module and manufacturing method[P]. AU2020104391A4, 2021-03-18.