

园林废弃物覆盖垫的持水性能及抗压效果研究

李啸冲¹, 孙向阳¹, 李素艳¹, 曲炳鹏^{1,2}, 贡炳辉¹, 王心语¹, 熊凯毅¹, 郑燚¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 天津绿茵景观生态建设股份有限公司, 天津 300384)

摘要: 为探究园林废弃物制成的覆盖垫是否适用于覆盖城市裸露土壤, 采取室内试验方法, 对不同施胶量(胶黏剂添加质量分别占园林废弃物质量的20%, 25%, 30%, 35%和40%)不同粒径(小粒径0~1 cm, 大粒径1~3 cm)10种覆盖垫的抗压性能、透水性能和持水性能进行测试, 以期选出合适施胶量合适粒径的覆盖垫。结果表明: 随着施胶量的增加, 不同覆盖垫的抗压性均显著增强, 且泡水前优于泡水后。小粒径覆盖垫在施胶量不高于30%时透水能力相对较好, 施胶量高于30%时的透水能力显著变差, 渗透系数为1.09~9.35 cm/s。大粒径覆盖垫的透水能力基本不受施胶量的影响, 透水性能良好, 渗透系数整体为0.25~0.33 cm/s。覆盖垫的持水量与浸泡时间呈显著对数关系: $Q = a \ln(t) + b$, $R^2 > 0.95$; 覆盖垫吸水速率与浸泡时间呈显著幂函数关系: $V = kt^n$, $R^2 > 0.99$ 。最大持水量(率)和有效拦蓄量(率)均随施胶量的增加呈现先增大后减小的趋势, 小粒径覆盖垫的有效拦蓄量为120.78~142.21 t/hm², 有效拦蓄率为93%~113%; 大粒径覆盖垫的有效拦蓄量为71.71~83.35 t/hm², 有效拦蓄率为54%~65%。综上, 该结果可为城市裸土覆盖提供理论依据和实践支持。

关键词: 园林废弃物; 覆盖垫; 施胶量; 粒径; 应用性能

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0134-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.022

Study on Water Holding Capacity and Compressive Resistance of Garden Waste Cover Mats

LI Xiaochong¹, SUN Xiangyang¹, LI Suyan¹, QU Bingpeng^{1,2},

YUN Binghui¹, WANG Xinyu¹, XIONG Kaiyi¹, ZHENG Yi¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Tianjin Green Landscape Ecological Construction Co., Ltd., Tianjin 300384)

Abstract: In order to explore whether cover mats are suitable for covering urban bare soil and the appropriate amount of glue and the particle size for the cover mats, the compressive resistance, water permeability, and water holding capacity of 10 different cover mats with different glue dosages (glue content accounts for 20%, 25%, 30%, 35% and 40% of the garden waste) and different particle sizes (small particle size 0~1 cm and large particle size 1~3 cm) were analyzed in laboratory experiments. The results showed that the compressive resistance of different cover mats significantly increases with the increment of the glue dosage, and the compressive resistance of cover mats before soaking was better than that after soaking. The cover mat with small particle size had relatively good water permeability when the amount of glue was lower than 30%, and the water permeability significantly decreased when the amount of glue was higher than 30%, and the permeability coefficient was between 1.09 and 9.35 cm/s. The water permeability of cover mats with large particle size was basically unaffected by the amount of glue applied. The water permeability was good, and the permeability coefficient was generally between 0.25 and 0.33 cm/s. The water holding capacity of the cover mats had a significant logarithmic relationship with the soaking time, $Q = a \ln(t) + b$, $R^2 > 0.95$. The water absorption rate of the cover mats showed a significant power function relationship with the soaking time, $V = kt^n$, $R^2 > 0.99$. The maximum water holding capacity (rate) and effective storage capacity (rate) both increased firstly and then decreased with the increment of glue dosage. The effective storage capacity of the small particle size cover mat was between 120.78~142.21 t/hm², and the effective storage rate was between 93% and 113%. The effective storage capacity of the large particle size cover mat was between

收稿日期: 2018-09-01

资助项目: 北京市科技计划项目“北京市绿地林地土壤质量提升关键技术研究” (Z161100001116061)

第一作者: 李啸冲(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤资源与环境研究。E-mail: xiaochongbjfu@163.com

通信作者: 孙向阳(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤生态研究。E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn

71.71~83.35 t/hm², and the effective storage rate was between 54% and 65%. In summary, the results can provide theoretical basis and practical support for urban bare soil coverage.

Keywords: garden waste; cover mat; glue dosage; particle size; application performance

城市中的裸露土地,不仅会形成扬尘,而且在一定程度上也会引起水土流失,严重影响城市的空气质量,采取必要的措施覆盖地表对恢复空气质量具有重要的意义^[1-3]。在城市林业建设中,地表覆盖物主要分为无机和有机覆盖物^[4]。目前市面常见的无机地表覆盖物主要有鹅卵石和陶粒等。总体来说,无机覆盖物价格较为低廉,材料较难腐烂,温度稳定性差,使土壤的呼吸性变差,不利于林木生长。有机地表覆盖物主要有树皮、松针和木片等园林废弃物,具有易于降解、防止水土流失、抑制杂草生长、改善土壤营养状况和美化环境等优点^[5-7]。但整体性较差,易被风吹和雨水冲刷,难于清理,也不利于防火^[3,8]。脲醛树脂胶黏剂在纤维板和木材加工中用量较大,是木材行业中理想的胶黏剂选择^[9],且具有优良的胶接性能,较好的耐湿性能,成本低廉,原料充足,其组分内存在的铵态氮溶解在土壤中,可为植物生长提供营养物质等^[10-11]优点。将园林废弃物与胶黏剂混合制成覆盖垫,并应用于城市裸露土壤,不仅促进园林植物生长,而且可以有效用于生态系统改良^[12-15]。用覆盖垫改善城市裸土问题是国内园林废弃物资源化利用的新方向,但国内有关覆盖垫的研究较少。本研究以园林废弃物为原料,脲醛树脂为胶黏剂,制备新型的覆盖垫产品,并且探究合适的覆盖垫施胶配比及粒径大小,旨在开发一种成本低、性能优良、取材于自然的低碳及循环的产品,为城市裸土的水土保持及园林废弃物的发展提供理论依据与实践支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试覆盖垫原料为毛白杨(筛分得到0~1,1~3 cm 2种粒径,含水率≤15%),由北京市香山公园管理处提供;供试胶黏剂为脲醛树脂(DY-533型),由济宁宏明化学试剂有限公司提供;人造板万能力学试验机(WDW-SOD型),由济南试金集团有限公司提供。

1.2 试验方法

试验于2017年10月在北京林业大学土壤学实验室内进行。称取100 g的园林废弃物(小粒径0~1 cm,大粒径1~3 cm)与脲醛树脂胶黏剂按不同配比(胶黏剂添加质量分别占园林废弃物质量的20%,25%,30%,35%和40%)进行均匀混合,将混匀的材料放入10 cm×10 cm×5 cm(长×宽×高)的正方形塑料模具中,使用重物在20 000 Pa的压力条件下压实10 min,之后放置在干燥通风处自然干燥48 h,环

境温度保持在正常室温(20℃)条件下,使其风干并黏结成型,从模具中取出,制得覆盖垫样品。覆盖垫共10种处理,每种设3次重复。

1.3 覆盖垫性能测试

1.3.1 抗压强度测试 参照GBT 25993—2010透水砖标准^[16]的研究方法,将幅面为10 cm×10 cm的试件放置在试验机压板的中心位置,然后将垫压板(外径26 cm,厚度4 cm)放在试样的上表面中心对称位置。启动试验机,均匀施加载荷直至试样被破坏,记录试样破坏时的载荷。每组测量3次,取平均值。

1.3.2 透水性能测试 参照椰丝覆盖垫的透水性^[17]测定方法。由于椰丝纤维的吸水能力比园林废弃物强,因此试验过程中减少了渗透用水,即在10 cm×10 cm×5 cm(长×宽×高)的透明无盖塑料盒上,分别覆盖不同的覆盖垫样品,将20 mL水均匀倒在其表面上并开始计时,记录水分通过覆盖垫所需要的时间,计算渗透系数。

1.3.3 持水性能测试 参照枯落物持水性能^[18-19]测试方法,将覆盖垫完全浸入水中并定时测定其重量变化。分别在浸泡时间为0.25,0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h后测定覆盖垫吸水后的重量,每次取出后静置5 min,直至覆盖垫不滴水为止,迅速称湿重并进行记录,计算覆盖垫在不同浸水时间的持水量和吸水速率,每个覆盖垫重复3次。

$$Rh_{\max} = (G_{24} - G_0) / G_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{sv} = 0.85 Rh_{\max} \quad (2)$$

$$Wh_{\max} = G_{24} - G_0 \quad (3)$$

$$W_{sv} = R_{sv} \times G_0 \quad (4)$$

式中: $Rh_{\max}$ 为覆盖垫的最大持水率(%); R_{sv} 为覆盖垫的有效拦蓄率(%); $Wh_{\max}$ 为覆盖垫最大持水量(t/hm²); W_{sv} 为覆盖垫有效拦蓄量(t/hm²);0.85为覆盖垫有效拦蓄系数。

1.4 数据处理

采用SPSS 20.0和Excel 2013软件对试验数据进行统计分析,LSD法进行方差分析和显著性检验。

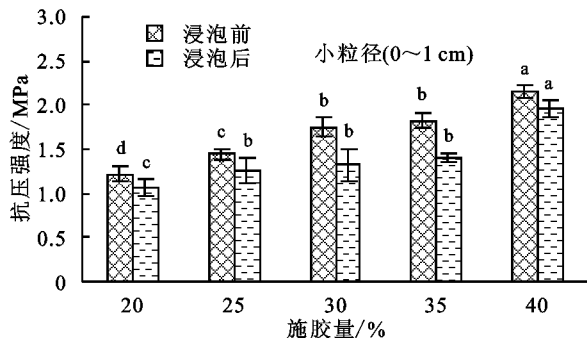
2 结果与分析

2.1 覆盖垫的抗压强度

由图1可知,对于2种不同粒径的覆盖垫来说,施胶量显著影响覆盖垫的抗压强度,施胶量增加,抗压强度显著提高。泡水前小粒径覆盖垫的抗压强度为1.21~2.14 MPa,泡水后为1.05~1.96 MPa。泡水前大粒径覆盖垫的抗压强度为1.43~2.46 MPa,泡水后为

1.00~2.18 MPa。2 种粒径的覆盖垫在施胶量为 40% 时抗压强度最好。整体来看,泡水后覆盖垫的抗压强度显著不如泡水前。大粒径覆盖垫泡水前后的抗压能力随施胶量的增加而增强,但泡水后的抗压能力明显下降。

在其他条件固定不变的情况下,随着施胶量的增加,相同体积内的园林废弃物原料增加,内部结合更紧密,覆盖垫的密实度增加,使其接受外界破坏力的能力增强。覆盖垫的内部胶黏剂水化产物生成量增

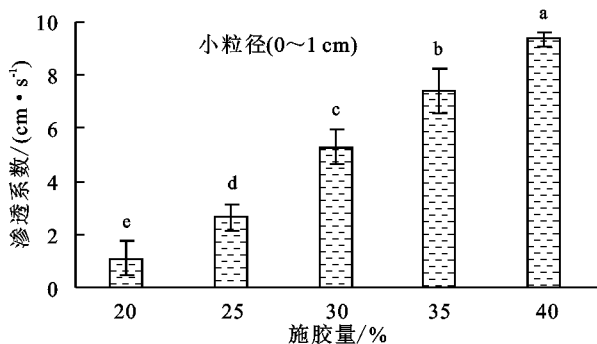


注:不同字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

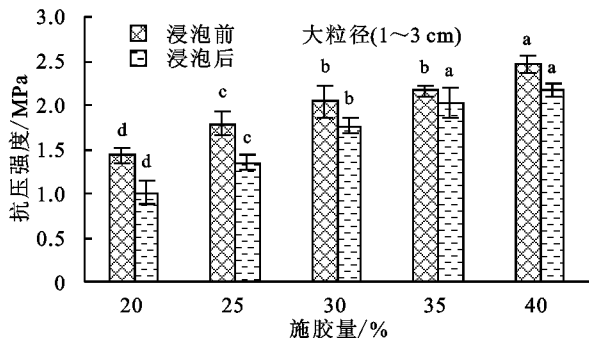
图 1 覆盖垫抗压强度变化

2.2 覆盖垫的透水性能

由图 2 可知,2 种粒径的覆盖垫透水能力差异较大。小粒径覆盖垫随着施胶量的增加,渗透系数不断增大,为 1.09~9.35 cm/s。施胶量低于 30% 时,渗透系数相对较小。当施胶量高于 35% 时,透水系数的涨幅相对较大,且高于其他低施胶量的处理。大粒径覆盖垫施胶量在 20%, 25%, 30%, 35% 时,渗透系数随着施胶量的增加而增大,但在施胶量为 40% 时渗透系数减小,较施胶量为 30% 时低,渗透系数整体为 0.25~0.33 cm/s。施胶量在 35% 时渗透系数最



大,结晶更完整,形成更高强度的网格结构,使得覆盖垫内部结合强度增大,从而抗压能力增强^[20]。随着施胶量的增加,使相同体积内施胶量增加,园林废弃物原料之间的胶合点数量增多,胶合面积增大,内部胶合更加紧密,覆盖垫的抗压强度提高。而泡水后覆盖垫的抗压强度不如泡水前,是由于经过泡水后的脲醛树脂胶黏剂胶合强度变差,加大胶黏剂与园林废弃物扩散与渗透的难度。



大,为 0.35 cm/s。随着施胶量的增加,大粒径覆盖垫的渗透系数并没有明显差异。总体来看,小粒径覆盖垫的渗透系数随着施胶量的增加而增大,大粒径覆盖垫的渗透系数与施胶量没有明显的相关性。

随着施胶量的增加,大小粒径覆盖垫的渗透系数存在显著差异。小粒径覆盖垫渗透系数变大,是因为施胶量的增加使园林废弃物之间的孔隙变小,因此持水孔隙变多,持水性更好;大粒径覆盖垫存在较多的孔隙,水分因自身重力的作用更容易从孔隙中流出,因此渗透系数较小,覆盖垫的持水性较弱,但是透水性能较好。

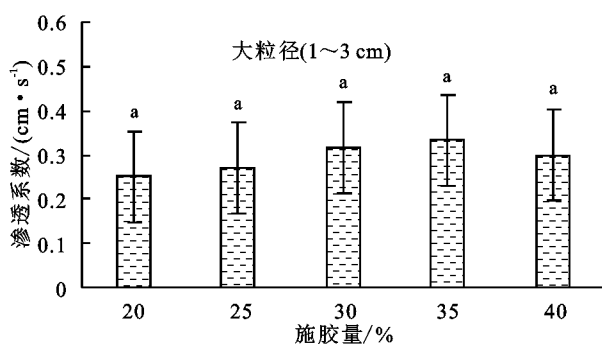


图 2 覆盖垫透水能力变化

2.3 覆盖垫的持水性能及拦蓄量

2.3.1 覆盖垫持水量与浸泡时间的关系分析 对于不同粒径不同施胶量的覆盖垫持水量与浸泡时间的数据进行回归拟合分析发现,持水量与浸泡时间存在的关系为:

$$Q = a \ln(t) + b \quad (5)$$

式中:Q 为覆盖垫持水量(g/kg);t 为覆盖垫浸水时间(h);a 为方程回归系数;b 为常数。

由分析拟合得到覆盖垫的持水量(Q)与浸泡时间(t)的回归方程见表 1。通过对覆盖垫的持水量与浸泡时间的相关性进行拟合,可以得出小粒径覆盖垫的相关系数为 0.95~0.98,大粒径覆盖垫的相关系数为 0.97~0.99,拟合程度较好。说明覆盖垫持水量与浸泡时间呈现显著的对数函数关系,与吴迪等^[21]对北京九龙山林分枯落物持水性能的研究结果一致。

由图 3 可知,2 种粒径的覆盖垫持水量随浸泡时

间变化的趋势相似。随着浸泡时间的增加,小粒径和大粒径覆盖垫的持水量均逐渐增加,但增速逐渐减慢直至趋于平稳。即 0~2 h 覆盖垫的持水率增长速度最快;2~4 h 随着时间延长持水量的增长速度减缓;4~24 h 后持水量不再变化,趋于最大持水量,此时的吸水能力趋近饱和。总体来看,小粒径比大粒径覆盖垫的持水量大,且上升趋势更明显。张建利等^[22]研究得出,枯落物浸水 0~0.5 h 内枯落物总持水量迅速增加,由于覆盖垫由园林废弃物构成,较枯落物来说持水能力差,与王安宁等^[23]研究得出河北地区的枯落物 4~24 h 随着时间延长持水率增长速度减缓,24 h 后持水率不再变化,枯落物吸水能力趋近饱和的结果相同。可知整个浸

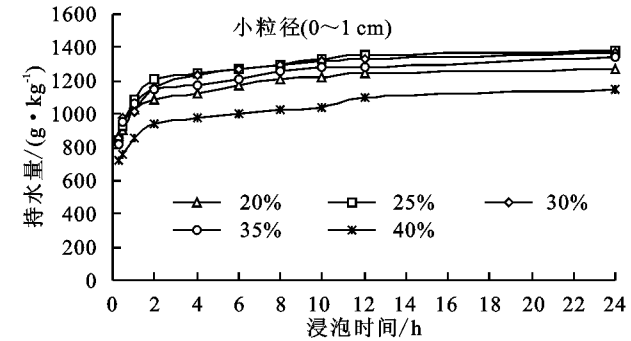


图 3 覆盖垫持水量与浸泡时间的关系

2.3.2 覆盖垫吸水速率与浸泡时间的关系分析 对于不同粒径不同施胶量的覆盖垫吸水速率与浸泡时间的数据进行回归拟合分析发现,吸水速率与浸泡时间存在的关系为:

$$V=kt^n \tag{6}$$

式中: V 为覆盖垫的吸水速率($\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$); t 为覆盖垫的吸水时间(h); k 为方程回归系数; n 为指数。

将不同的覆盖垫在不同浸泡时间的持水量除以浸泡时间,即为不同覆盖垫的吸水速率。由表 2 可知,大小粒径覆盖垫的相关系数均可达到 0.99,拟合程度较好,呈显著幂函数关系。说明覆盖垫适用于降水的截留和水分的储存,与张峰等^[24]对北京西山主要造林树种持水性能的研究结果一致。

表 2 覆盖垫吸水速率与浸泡时间拟合分析

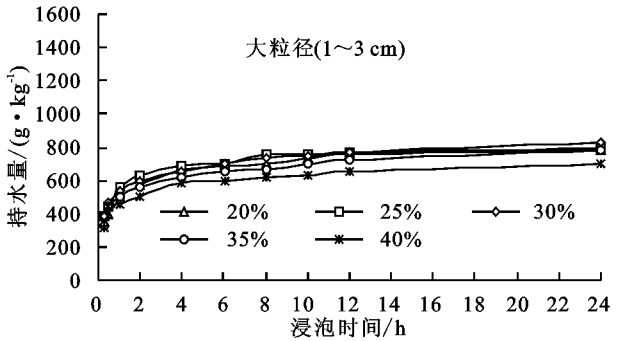
粒径	施胶量/%	吸水速率与浸泡时间关系式	R^2
小粒径(0~1 cm)	20	$V=991.77t^{-0.911}$	0.9998
	25	$V=1036.01t^{-0.891}$	0.9989
	30	$V=1033.30t^{-0.895}$	0.9994
	35	$V=1013.30t^{-0.899}$	0.9992
	40	$V=836.37t^{-0.898}$	0.9997
大粒径(1~3 cm)	20	$V=480.80t^{-0.818}$	0.9983
	25	$V=521.61t^{-0.837}$	0.9976
	30	$V=516.48t^{-0.835}$	0.9991
	35	$V=470.14t^{-0.823}$	0.9976
	40	$V=447.79t^{-0.846}$	0.9976

2 种粒径覆盖垫的吸水速率与浸泡时间具有一致的

泡过程中,30%和 35%施胶量覆盖垫的持水量整体优于其他施胶量的覆盖垫。

表 1 覆盖垫持水量与浸泡时间拟合分析

粒径	施胶量/%	持水量与浸泡时间关系式	R^2
小粒径(0~1 cm)	20	$Q=94.67\ln(t)+998.84$	0.9844
	25	$Q=120.97\ln(t)+1050.00$	0.9547
	30	$Q=116.16\ln(t)+1044.60$	0.9758
	35	$Q=108.80\ln(t)+1024.70$	0.9637
	40	$Q=93.07\ln(t)+845.86$	0.9817
大粒径(1~3 cm)	20	$Q=100.83\ln(t)+496.56$	0.9877
	25	$Q=95.11\ln(t)+537.02$	0.9706
	30	$Q=97.00\ln(t)+529.48$	0.9971
	35	$Q=94.91\ln(t)+485.28$	0.9884
	40	$Q=77.02\ln(t)+458.86$	0.9748

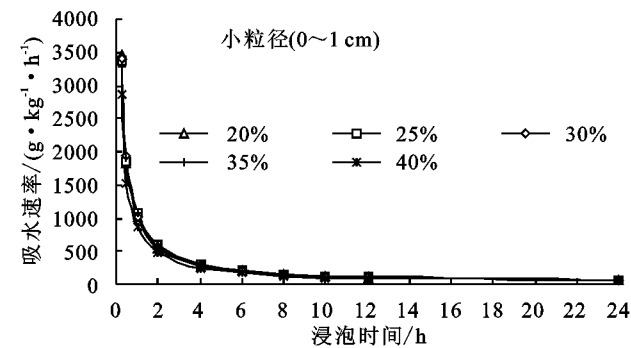


变化趋势,均为幂函数关系,且两者相关性较高(图 4)。起始阶段,覆盖垫浸入水中表面水势差大,吸水速率快。随着浸水时间的增加,覆盖垫含水量逐渐升高,其表面与周围的水势差逐渐减小,吸水速率逐渐减慢,直到水势差减小为 0 时,吸水停止。在 0~2 h 随着覆盖垫吸水量的增加,吸水速率迅速下降;当到 6 h 时,覆盖垫的吸水速率趋于平稳,持水量接近于饱和状态,这与唐禾等^[25]得出的枯落物吸水速率与浸泡时间的关系类似。

由表 3 可知,5 种不同施胶量小粒径覆盖垫的最大持水量在施胶量 35%,为 175.00 t/hm^2 ,相当于 17.50 mm 水深。大粒径覆盖垫在 30%时最大,为 105.54 t/hm^2 ,相当于 10.55 mm 水深。小粒径覆盖垫的最大持水量为 148.99~175.00 t/hm^2 ,最大持水率为 115%~137%。最大持水量的排序为:35%>30%>25%>40%>20%。其中,随着施胶量的增加,最大持水量先逐渐增加后逐渐减小,在施胶量达到 35%时的最大持水量为最高。大粒径覆盖垫最大持水量为 93.97~105.54 t/hm^2 ,最大持水率为 70%~83%。最大持水量的排序为:30%>35%>25%>20%>40%。这说明施胶量对覆盖垫的持水能力产生影响,30%~35%的施胶量的最大持水量和拦蓄能力较好。

覆盖垫的有效拦蓄量是用来估算对降雨的实际拦截量。就覆盖垫的拦蓄能力来看,2 种粒径覆盖垫的有效拦蓄量的变化均与最大持水率的变化相似,即

先增大后减小。对于小粒径覆盖垫来说,有效拦蓄量为 120.78~142.21 t/hm²,有效含蓄率为 93%~113%,在 35%时达到最大值,有效拦蓄量的排序为:35%>30%>25%>40%>20%。大粒径覆盖垫的



有效拦蓄量为 71.71~83.35 t/hm²,有效含蓄率为 54%~65%,在 30%时达到最大值,最大持水量的排序为:30%>35%>25%>40%>20%;小粒径覆盖垫的拦蓄能力均高于大粒径覆盖垫。

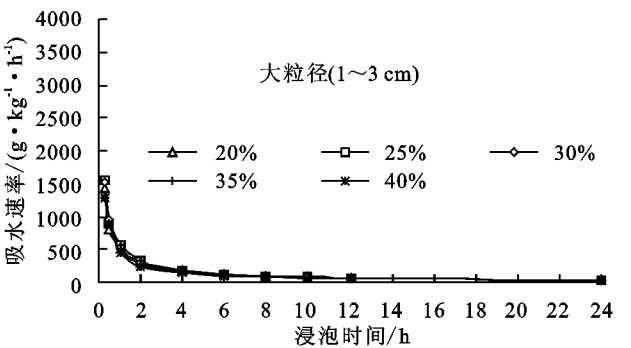


图 4 覆盖垫吸水速率与浸泡时间的关系

施胶量为 20%时,由于胶黏剂较少,覆盖垫的力学性能相对较差,因此最大持水量和有效拦蓄量相对较低。当施胶量增加后,力学性能显著增加,最大持水量和有效拦蓄量显著增加。当施胶量为 40%时,最大持水量和有效拦蓄量呈下降趋势,由于施胶量的增多导致覆盖垫的通气孔隙减少,从而使得持水量变少。2 种粒径的覆盖垫在 30%和 35%的持水量和拦蓄能力达到最大,是由于在低施胶量的情况下随着施胶量的增加,增加覆盖垫的持水孔隙。当施胶量达到一定程度时,随着施胶量的增加,胶黏剂会逐渐堵塞持水孔隙,从而降低覆盖垫的持水能力,这与曲炳鹏等^[26]研究的生态覆盖垫持水能力结果相同。采用枯落物持水性能测试方法在一定程度上反映覆盖垫的持水性能,但是由于覆盖垫内含胶黏剂及组成覆盖垫内的园林废弃物与枯落物构造等不同的原因,能否在特定的情况和降水情况下真实反映覆盖垫的持水性能还有待进一步讨论。从覆盖垫的拦蓄能力来看,随着施胶量的增加,覆盖垫的持水性能变得更好。覆盖垫有效含蓄量越高,持水量越大,水源涵养的功能就越强,这与魏雅丽等^[27]的研究结果相似。

表 3 不同粒径覆盖垫持水能力指标

粒径	施胶量/ %	最大持水量/ (t·hm ⁻²)	最大 持水率/%	有效拦蓄量/ (t·hm ⁻²)	有效 拦蓄率/%
小粒径(0~1 cm)	20	148.99	127	120.78	103
	25	168.31	138	136.98	113
	30	173.31	137	140.98	111
	35	175.00	134	142.21	109
	40	155.77	115	125.62	93
大粒径(1~3 cm)	20	100.92	79	71.71	62
	25	101.99	79	76.43	63
	30	105.54	83	83.35	65
	35	102.93	78	80.93	62
	40	93.97	70	73.12	54

3 结论

(1)施胶量增加,覆盖垫的抗压强度显著增强。同

等施胶量,泡水后覆盖垫的抗压强度显著低于泡水前。

(2)小粒径覆盖垫在施胶量不高于 30%时透水能力相对较好,施胶量高于 30%时的透水能力显著变差。大粒径覆盖垫的透水能力基本不受施胶量的影响,透水能力良好。

(3)覆盖垫的持水量随着浸泡时间的增加而增加,拟合关系式为 $Q=a\ln(t)+b$,不同类型覆盖垫的吸水速率均随浸泡时间的延长而减小,呈现反“J”形,关系式为 $V=kt^n$ 。

(4)同等施胶量,小粒径覆盖垫的持水性能优于大粒径;且随着施胶量的增加,覆盖垫的持水性能变强。最大持水量(率)和有效拦蓄量(率)均随施胶量的增加呈先增大后减小的趋势。

综合可以得出,小粒径覆盖垫的持水性能优于大粒径覆盖垫。覆盖垫有较强的抗压性能和保水持水性能,在解决园林废弃物资源化利用问题的同时,也可以起到很好的固土和抑制扬尘等作用。覆盖垫可以充分发挥涵养水分和水土保持的作用,覆盖垫的抗压性能、持水性能等均与粒径及施胶量相关,可以通过人为措施加以改善和调节,使其更好地发挥涵养水分和水土保持的作用。

参考文献:

[1] 王成,鄧光发,彭镇华. 有机地表覆盖物在城市林业建设中的应用价值[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2213-2217.

[2] 王新民,王文娟,李杰,等. 我国城市扬尘污染及其控制对策研究[J]. 环境科学与技术,2014(增刊 2):588-592.

[3] 张晶,胡春玲,任庆. 城市扬尘污染现状及防治对策[J]. 环境保护科学,2008,34(2):4-6.

[4] 卜鹏图. 有机地表覆盖物在城市林业建设中的应用价值[J]. 科技创新与应用,2017(11):281.

[5] 王欣国. 有机覆盖物及其在美国城市园林中的应用概况[J]. 广东园林,2015(2):77-79.

[6] 冯兆东,张鹏,蔚东升. 园林废弃物的处理处置及资源化再利用[J]. 能源与节能,2014(5):110-111.

- [7] Zhang L, Sun X Y, Tian Y, et al. Effects of brown sugar and calcium superphosphate on secondary fermentation of green waste[J]. *Bioresources Technology*, 2013, 131(3):68-75.
- [8] 周艳平, 王星. 园林有机覆盖物:以摩奇(Mulch)为例[J]. *园林*, 2013(12):38-41.
- [9] 高伟. Uron降低脲醛树脂游离甲醛含量及胶合板甲醛释放量研究[D]. 北京:北京林业大学, 2007.
- [10] 顾继友. 胶黏剂与涂料[M]. 北京:中国林业出版社, 2012:48-49.
- [11] 姚娟. 固沙用热解油脲醛树脂合成工艺与性能研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [12] 负炳辉, 李素艳, 曲炳鹏, 等. 不同覆盖材料对城市树穴土壤理化性质的影响[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(6):34-39.
- [13] 于丹丹, 贾黎明, 贾忠奎, 等. 生态垫及保水剂对废弃砂石坑立地造林的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(6):99-104.
- [14] 苏宏斌, 郭晓荣, 辛永清, 等. 兰州北山植被退化区生态垫造林技术试验研究[J]. *林业实用技术*, 2012(9):21-23.
- [15] 杨志国, 孙保平, 丁国栋, 等. 应用生态垫治理流动沙地机理研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1):50-53.
- [16] 韩利平, 刘倩云, 虞宇翔, 等. 热解油脲醛树脂有机覆盖垫制备工艺研究[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(2):242-246.
- [17] 张峰, 赵阳, 张丽, 等. 椰丝生态复合片材制备及应用性能研究[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(28):146-149.
- [18] 韩路, 王海珍, 吕瑞恒, 等. 塔里木河上游不同森林类型枯落物的持水特性[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1):96-101.
- [19] 袁秀锦, 王晓荣, 潘磊, 等. 三峡库区不同类型马尾松林枯落物层持水特性比较[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3):160-166.
- [20] 陈茂, 李新功, 潘亚鸽, 等. 无机杨木刨花板制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(4):939-946.
- [21] 吴迪, 辛学兵, 裴顺祥, 等. 北京九龙山8种林分的枯落物及土壤水源涵养功能[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(3):78-86.
- [22] 张建利, 王加国, 李苇洁, 等. 贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林枯落物储量及持水功能[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3):167-173.
- [23] 王安宁, 蔺鑫, 穆枫, 等. 冀北木兰围场沙荒坡地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(1):98-107.
- [24] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. *林业科学*, 2010, 46(10):6-14.
- [25] 唐禾, 陈永华, 张建国, 等. 抚育间伐对麻栎次生林枯落物持水性的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4):104-115.
- [26] 曲炳鹏, 孙向阳, 李素艳, 等. 园林废弃物生态覆盖垫的制备及其水分特性[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(10):1-9.
- [27] 魏雅丽, 贺玉晓, 金杰, 等. 元谋干热河谷典型植被枯落物持水能力研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(3):181-186.

(上接第133页)

- [11] Brown R A, Hunt W F. Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of under sized bioretention cells[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, 137(3):132-143.
- [12] 刘芳, 侯立柱. 土壤渗滤介质系统去除雨水径流污染物[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(12):4294-4298.
- [13] 李俊奇, 向璐璐, 毛坤, 等. 雨水花园蓄渗处置屋面径流案例分析[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(10):129-133.
- [14] 李龙飞, 秦小明, 周翠平, 等. 牡蛎壳的综合利用[J]. *北京农业*, 2014(27):134-136.
- [15] 赵娟, 李远文, 杨耐德, 等. 改性牡蛎壳对废水中磷吸附性能的研究[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(3):154-156.
- [16] Chen Y, Xu J, Lv Z, et al. Impacts of biochar and oyster shells waste on the immobilization of arsenic in highly contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217:646-653.
- [17] Awad Y M, Lee S S, Kim K H, et al. Carbon and nitrogen mineralization and enzyme activities in soil aggregate-size classes: Effects of biochar, oyster shells, and polymers[J]. *Chemosphere*, 2018, 198:40-48.
- [18] 栾忠庆. 青岛市雨水径流污染模拟及污染物总量计算[D]. 青岛:中国海洋大学, 2007.
- [19] 吴庆华, 朱国胜, 崔皓东, 等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20):118-127.
- [20] 王禄, 喻志平, 赵智杰. 人工快速渗滤系统氨氮去除机理[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(4):500-504.
- [21] Payne E G, Fletcher T D, Russell D G, et al. Temporary storage or permanent removal? The division of nitrogen between biotic assimilation and denitrification in stormwater biofiltration systems[J]. *PLoS One*, 2014, 9(3):e90890.
- [22] 马娟, 宋相蕊, 李璐. 碳源对反硝化过程 NO_2^- 积累及出水 pH 值的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(10):2556-2561.
- [23] Palmer E T, Poor C J, Hinman C, et al. Nitrate and phosphate removal through enhanced bioretention media: Mesocosm study[J]. *Water Environment Research A Research Publication of the Water Environment Federation*, 2013, 85(9):823.
- [24] Lefever G H, Paus K H, Natarajan P, et al. Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, 141(1):401-405.