

[文章编号] 1003—4684(2021)05-0073-08

# 不同骨料对粗放型绿色屋顶人工基质理化性质的影响

陈璇, 周明来, 叶建军, 刘瑛, 刘瑞芬

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 轻质骨料是粗放型绿色屋顶基质层的主要成分, 为研究分析其配比、级配及类型对基质理化性质的影响, 采用三种常见轻质骨料蛭石 3~5 mm、珍珠岩 3~6 mm、珍珠岩 4~8 mm, 每种骨料按照 90 %、85 %、80 % 的添加率分别与一种有机质鸡粪进行充分混合, 共得到九组基质种类并测定各组基质的颗粒粒径分布、干密度、比重、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率、有机质总量、碱解氮含量、速效磷含量。结果表明: 随着蛭石添加率的增加, 蛭石组的有机质总量、碱解氮及速效磷含量显著减小。当蛭石添加率达到 90 % 时, 蛭石组比重显著降低。随着珍珠岩添加率的增加, 珍珠岩组的干密度、最大持水量、饱和载荷、有机质总量、碱解氮及速效磷含量减小而孔隙度、渗透率增大。当珍珠岩添加率为 90 %、85 % 时, 骨料级配对最大持水量有显著影响, 珍珠岩 3~6 mm 组的最大持水量高于珍珠岩 4~8 mm 组的, 最大持水量与该组粒径为 0.5~1 mm 颗粒的质量分数呈正相关。在骨料添加率相同时, 珍珠岩组的干密度、饱和载荷、有机质总量、碱解氮及速效磷含量低于蛭石组, 但其孔隙度高于蛭石组。按照德国 FLL 规范, 添加率为 90 % 的蛭石 3~5 mm 组、添加率为 90 % 的珍珠岩 3~6 mm 组和添加率为 90 % 珍珠岩 4~8 mm 组具备潜在的应用价值。

**[关键词]** 粗放型绿色屋顶; 人工基质; 理化性质; 蛭石; 珍珠岩

**[中图分类号]** X5      **[文献标识码]** A

随着我国城市化进程加快, 城市绿化利用面积不断减少, 使得城市雨洪管理、热岛效应等生态环境问题日益突出。屋顶是城市的第五个立体平面, 绿色屋顶可简单定义为“置于人工建筑物上方的植被覆盖面”, 该技术的出现为增加城市绿化面积、改善生态环境提供了潜在机遇。现代绿色屋顶结构通常包括植被层、基质层、过滤层、排水层、根阻层和防水层<sup>[1]</sup>。其中植被层、基质层无疑是最为重要的部分: 植物层保证绿色屋顶发挥多种生态效益, 如拦截及蒸腾雨水径流、固碳释氧等; 基质层则是主要的水流/溶质运动的场所, 并为植物生长提供必要的水、空气和营养物质。按照基质厚度划分, 绿色屋顶可分为粗放型和精细型, 其中粗放型绿色屋顶的基质层较薄、施工简单、造价较低、维护量小<sup>[2]</sup>。其基质层种植材料大致可分为田园土、改良土和人工基质(以下简称基质)<sup>[3]</sup>。基质通常由 80 %~90 % 的轻质骨料和 10 %~20 % 的有机质组成, 相较于田园土和改良土, 具有重量轻、理化性质稳定的特点, 在为植物生长提供水分、养分的同时不影响屋面排水,

是绿色屋顶基质层的首选<sup>[4]</sup>。不同国家所研发的基质组分繁多, 轻质骨料包括膨化页岩、珍珠岩、陶粒、蛭石、浮石、火山岩、蒙脱石等, 有机质包括腐殖质、泥炭、锯木屑、椰壳、家禽粪便等<sup>[5]</sup>。在我国, 王啸宇<sup>[6]</sup>等对比了珍珠岩、沸石、陶粒、稻壳炭、蛭石、鸡粪的物理性质, 从轻质和保水特性方面考虑, 以期筛选出适用于绿色屋顶的基质组分。潘颖<sup>[7]</sup>等通过对蛭石、珍珠岩、石英砂、炉灰渣的物理、化学性质进行测定, 分析比较其养分含量及持水性上的差异, 为基质组分的选用及管理提供理论依据。大多数学者<sup>[8]</sup>通过对比单一基质组分的理化性质进行筛选, 但如何选择适宜配比, 并使之混合后仍能满足绿色屋顶设计标准, 作为基质主要成分的轻质骨料, 其添加率、级配及类型是如何影响基质理化性质, 在我国绿色屋顶研究中尚不多见。

本文采用四种基质组分, 包括三种常见轻质骨料蛭石 3~5 mm、珍珠岩 3~6 mm、珍珠岩 4~8 mm 和一种有机质鸡粪。每种骨料按照 90 %、85 %、80 % 的添加率与有机质鸡粪进行充分混合, 共

[收稿日期] 2020—11—13

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金(51909081); 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金([2017]KJ08)

[第一作者] 陈璇(1995—), 女, 湖北武汉人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为低影响开发技术及水文数值模拟  
[通信作者] 刘瑞芬(1986—), 女, 湖北天门人, 工学博士, 湖北工业大学副教授, 研究方向为低影响开发技术及水文数值模拟

得到九组基质种类。参照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》<sup>[9]</sup>和国际上最为系统且成熟的德国 FLL 规范<sup>[10]</sup>,测定各组基质的理化性质,包括颗粒粒径分布、干密度、比重、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率、有机质总量、碱解氮含量、速效磷含量,以分析骨料的添加率、级配和类型对粗放型绿色屋顶基质理化性质的影响,并筛选出符合 FLL 标准的适宜基质,为粗放型绿色屋顶基质的选配提供一定理论依据及技术参考,有助于绿色屋顶技术在我国推广与应用。

1 试验

1.1 试验材料

试验中用到的三种骨料分别为蛭石 3~5 mm、珍珠岩 3~6 mm、珍珠岩 4~8 mm,有机质为鸡粪(图 1)。蛭石是一种主要是金云母或黑云母经热液蚀变或风化形成的层状硅酸盐矿物,通气、排水效果

好、密度低,有一定的保肥能力和吸附重金属能力<sup>[11]</sup>。珍珠岩是一种酸性火山玻璃质熔岩,具有无数不规则的密闭气孔,蜂窝状结构很发达,孔隙率高、密度低<sup>[12]</sup>。鸡粪富含植物生长所需的各种营养元素,肥源广,经高温发酵烘干后,无毒无臭,便于贮存、销售、运输。四种基质组分的基本特性见表 1。

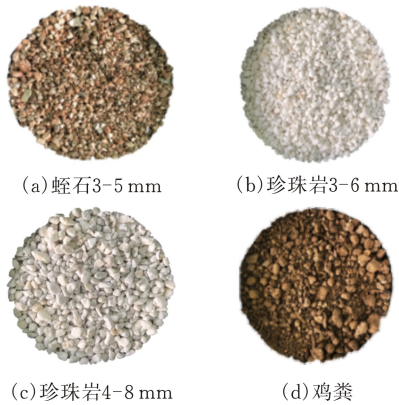


图 1 试验使用骨料及有机质

表 1 试验使用骨料及有机质基本特性

名称	简介	特点	来源
蛭石 3~5 mm	黄褐色,片层状结构,颗粒级配为 3~5 mm	具有良好的热稳定性、热膨胀性、吸水性	灵寿县矿产品经销部
珍珠岩 3~6 mm	灰白色,蜂窝状结构,颗粒级配为 3~6 mm	密度低、化学稳定性好,具有良好透气性	河南信阳矿业材料厂
珍珠岩 4~8 mm	灰白色,蜂窝状结构,颗粒级配为 4~8 mm	密度低、化学稳定性好,具有良好透气性	河南信阳矿业材料厂
鸡粪	黑棕色,农场收集的新鲜鸡粪经过烘干处理	质地松软,富含有机质	本地花木市场

1.2 试验方案

将 1.1 中的每种骨料按照 90%、85%、80% 的添加率与有机质充分混合,共得到九组基质种类。测定指标包括粒径级配曲线、干密度、比重、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率、有机质总量、碱解氮含量、速效磷含量,其中有机质总量、碱解氮含量、速效磷含量由湖北省武汉市农业科学院植保土肥所测定。

粒径级配曲线由筛分法<sup>[9]</sup>测得,每组重复两次试验。比重由比重瓶法<sup>[9]</sup>测得,每组重复两次试验。孔隙度由计算法<sup>[13]</sup>求得,每组重复两次试验,记样品干密度为  $\rho_d$  和样品比重为  $\rho_s$ ,由孔隙度(%) =  $1 - \rho_d / \rho_s$  求得。干密度、最大持水量、饱和载荷、渗透率由 FLL 规范中的方法测得,每组重复三次试验。具体步骤如下:取充分混匀后样品 1 L,放置于容器筒(图 2a)中,使用 7 mm 厚的圆形钢板覆盖样品后,用重 4.5 kg 且落高为 45 cm 的击实锤(图 2b)对样品进行六次冲击,得到压实样品并测量样品高度 h,根据容器筒底面积 S 算出压实后样品体积 V。接着将筒内样品浸没于水中达 24 h 后,取出筒称

重,记质量为  $M_0$ ;接着将其静置,排水达 2 h 后,再次称重,记质量为  $M_1$ ,确定样品体积  $V_1$ ;排水结束后,在样品顶部放置金属环针(两针长度分别为 4.5 cm 和 3.5 cm,图 2c),不断加水通过样品,当水自由流出容器底部后,测得水位从 4.5 cm 下降到 3.5 cm 时的时间差  $t$ ;最后将筒内样品放入 105℃ 烘箱中烘干至恒重,记烘干后样品质量为  $M$ ,容器筒质量为  $m$ 。由干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) =  $M/V$ 、最大持水量(%) =  $100(M_1 - M - m) / \rho_w V_1$ 、饱和载荷( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) =  $(M_0 - m) / S$ 、渗透率<sup>[14]</sup>( $\text{cm}/\text{s}$ ) =  $h / (ht + 0.4t)$ ,求得各项指标。



图 2 FLL 试验器材

1.3 数据分析

将以上所有重复试验结果取平均值,为确保数据质量,检查重复试验结果的标准偏差均低于

14%。试验统计分析使用 SPSS 26.0 软件完成,采用单因素 ANOVA(用于三者间的比较)、t 检验(用于两者间的比较)来分析骨料添加率、级配及类型对基质理化性质的影响<sup>[15]</sup>。

## 2 结果和讨论

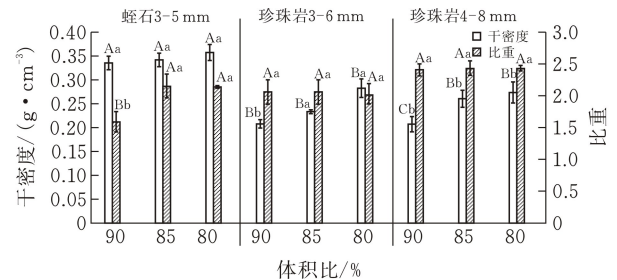
### 2.1 结果

试验使用骨料及有机质的理化性质如表 2 所示。与三种骨料相比,鸡粪质地松软、易于压实,孔隙结构不如骨料丰富,利于持水的细小颗粒较多,其干密度、比重、最大持水量最高而孔隙度最低;由 1.2 中饱和载荷计算式可知,饱和载荷与干密度、比重、

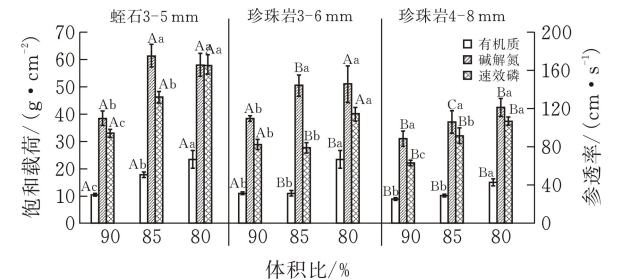
最大持水率均有关,且一般应与这几个指标的数值呈正相关,由于鸡粪这几项指标数值均为最大,因此其饱和载荷最高。鸡粪的渗透率为 0.204 cm/s,而三种骨料的渗透率相当,均大于 0.9 cm/s,这是由于骨料的孔隙通道发达,有利于排水<sup>[6]</sup>。测定可知,鸡粪富含植物生长所需有机质及氮、磷,骨料中有机质总量及氮磷元素含量较低。由以上四种组分所组成的 9 种基质的相关理化性质见图 3(大写字母代表骨料添加率相同、骨料类型不同时,指标之间有显著性差异;小写字母代表骨料类型相同、骨料添加率不同时,指标之间有显著性差异。),各组基质的粒径分布见图 4。

表 2 试验使用骨料及有机质的理化性质

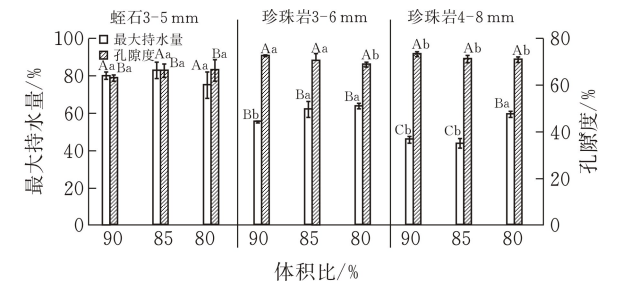
	蛭石 3~5mm	珍珠岩 3~6mm	珍珠岩 4~8mm	鸡粪
干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.278(±0.0040)	0.172(±0.0078)	0.135(±0.0010)	0.819(±0.0232)
比重	1.46(±0.011)	2.01(±0.152)	2.09(±0.095)	2.22(±0.147)
孔隙度/%	81.00(±0.001)	91.06(±0.008)	92.99(±0.011)	62.99(±0.024)
最大持水量/%	70.21(±5.33)	49.34(±4.03)	44.66(±0.93)	73.49(±0.79)
饱和载荷/(kg·m <sup>-2</sup> )	53.43(±0.29)	28.77(±0.75)	23.11(±3.09)	72.7(±1.02)
渗透率/(cm·s <sup>-1</sup> )	>0.9	>0.9	>0.9	0.204(±0.0005)
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.09(±0.62)	1.49(±0.01)	0.39(±0.03)	59.45(±7.59)
碱解氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.14(±0.10)	2.23(±0.00)	1.3(±0.13)	233.76(±15.93)
速效磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.59(±0.06)	1.8(±0.09)	0.66(±0.07)	326.12(±4.48)



(a) 各组基质的干密度、比重



(d) 各组基质的有机质、碱解氮、速效磷含量



(b) 各组基质的最大持水量、孔隙度

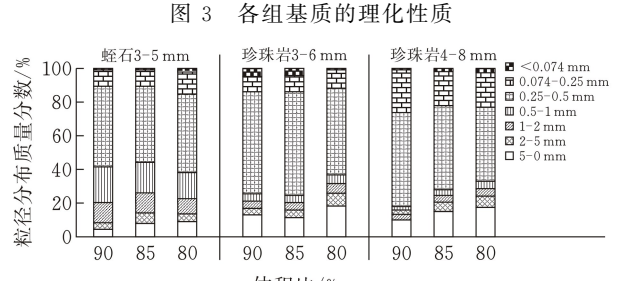
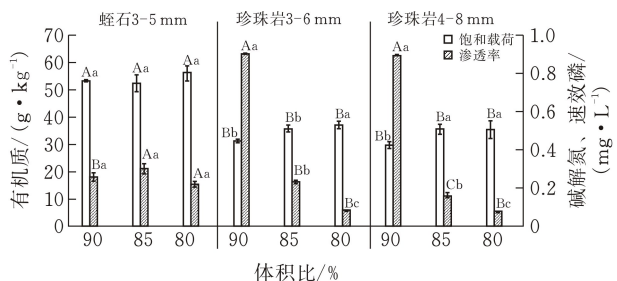


图 4 各组基质的粒径分布



(c) 各组基质的渗透率、饱和载荷

### 2.2 讨论

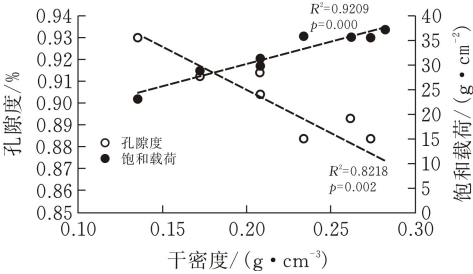
2.2.1 骨料添加率的影响 蛭石的添加率对蛭石组基质(以下简称为蛭石组)的干密度、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率无显著影响。李耀龙等<sup>[16]</sup>研究也表明,虽然随着蛭石添加率的降低总体上蛭石组呈现出干密度增大、持水量减小的趋势,但统计分析结果表明该变化趋势是不明显的,即指标的变化并无明显规律。如图 3 所示,当蛭石的添加



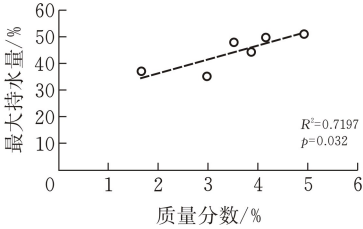
率为90%时,比重、有机质含量会显著减小。蛭石添加率为90%时相应比重为1.59,明显小于蛭石添加率为85%和80%的相应比重2.15和2.14。如表2所示,蛭石比重(1.46)低于鸡粪比重(2.22),这与物质的化学成分、结构构造有关,组成元素的原子量越大、结构构造越紧密,比重越大<sup>[17]</sup>。因此当蛭石的添加率增加、鸡粪的添加率减少时,蛭石组比重会显著减小,更接近于蛭石比重。此外,蛭石的添加率对蛭石组的有机质总量、碱解氮及速效磷含量有显著影响。由表2可知,检测后可知,相较于蛭石,鸡粪富含有机质及氮、磷元素,因此随着蛭石添加率的增加,鸡粪的添加率减少,蛭石组的有机质总量、碱解氮及速效磷含量显著减小。

珍珠岩的添加率对珍珠岩组基质(以下简称为珍珠岩组)的干密度、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率有显著影响,而对比重无显著影响。随着珍珠岩的添加率的增加,珍珠岩组的干密度、最大持水量、饱和载荷减小而孔隙度、渗透率增大。由于试验所用鸡粪的干密度约为珍珠岩的4~6倍(表2),混合基质中珍珠岩添加率的增加(即鸡粪比例的减少)导致珍珠岩组的干密度减小。此外,由孔隙度计算式可知孔隙度受比重和干密度的共同影响,而试验中所用珍珠岩(2.01~2.09)比重与鸡粪比重(2.22)相当,统计分析也发现骨料添加率对珍珠岩组比重无显著影响,则珍珠岩组的孔隙度与干密度呈负相关( $R^2=0.8218$ ,图5),珍珠岩添加率的增加使得珍珠岩组的孔隙度增大。关于持水能力,人们普遍认为与组分粒径大小有关:细颗粒会增大持水能力,而粗颗粒会增大通气排水量<sup>[18]</sup>。Abad等<sup>[19]</sup>认为粒径在0.125~1 mm的细颗粒可显著影响椰糠与泥炭的物理性质;Guber等<sup>[20]</sup>认为颗粒粒径<0.25 mm、<0.5 mm和<1 mm是保水特性改变的重要分组参数;Graceson等<sup>[21]</sup>认为粒径小于1 mm的细颗粒会显著影响绿色屋顶基质的持水量;Noguera等<sup>[22]</sup>发现将粒径为0.5 mm时,椰糠的持水量有显著改变。本文通过对珍珠岩组的最大持水量及其颗粒粒径分布的质量分数做相关性分析,发现珍珠岩组最大持水量与粒径为0.5~1 mm颗粒的质量分数呈正相关( $R^2=0.7197$ ,图5)。随着珍珠岩添加率的增加,粒径为0.5~1 mm颗粒的质量分数减小,最终导致最大持水量的减小。由饱和载荷计算式,可推断其值与干密度、比重、孔隙结构均有关,通过分析表3珍珠岩组数据,可知珍珠岩组的饱和载荷与干密度呈正相关( $R^2=0.9209$ ,图5)。而渗透率可反映基质中孔隙构成,如孔隙的大小、多少以及连通情况等,与颗粒成分、颗粒形状、排列状

况、细料含量均有关<sup>[23]</sup>。珍珠岩添加率的减少、鸡粪的增多使得基质中的细小颗粒增多,阻塞原有珍珠岩孔隙结构、降低其连通度,最终导致珍珠岩组基质渗透率下降。与蛭石组类似,检测后可知,相较于珍珠岩,鸡粪富含有机质及氮、磷元素,随着珍珠岩添加率的增加,鸡粪的添加率减少,珍珠岩组的有机质总量、碱解氮及速效磷含量显著减小。



(a)珍珠岩组的孔隙度、饱和载荷与干密度的相关性拟合曲线



(b)珍珠岩组最大持水量与粒径为0.5~1 mm颗粒质量分数的相关性拟合曲线

图5 珍珠岩组的相关性拟合曲线

**2.2.2 骨料级配的影响** 通过对比分析骨料添加率相同的珍珠岩3~6 mm组和珍珠岩4~8 mm组的各项指标,发现骨料级配对基质的干密度、比重、孔隙度、饱和载荷、渗透率无显著影响。对于最大持水量而言,当珍珠岩骨料添加率为85%、90%时,骨料级配对最大持水量有显著影响,珍珠岩3~6 mm组的最大持水量高于珍珠岩4~8 mm组的。由2.2.1分析可知,珍珠岩组最大持水量与粒径为0.5~1 mm颗粒的质量分数有正相关关系。如图4所示,当珍珠岩骨料添加率相同时,珍珠岩3~6 mm组粒径为0.5~1 mm颗粒的质量分数高于珍珠岩4~8 mm组相应的值,导致前者的最大持水量高于后者。对于有机质总量而言,当珍珠岩骨料添加率相同时,骨料级配对有机质总量有显著影响,珍珠岩3~6 mm组的有机质总量高于珍珠岩4~8 mm组的。对于碱解氮、速效磷而言,当珍珠岩骨料添加率为90%时,骨料级配对这两项指标有显著影响,珍珠岩3~6 mm组的碱解氮、速效磷含量高于珍珠岩4~8 mm组的。这是由于珍珠岩3~6 mm的有机质总量、碱解氮及速效磷含量均高于珍珠岩4~8 mm。

**2.2.3 骨料类型的影响** 骨料类型对基质的干密

度、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率有显著影响,对比珍珠岩组,蛭石组的干密度、最大持水量、饱和载荷更高,孔隙度更小,渗透率的波动性更小。一般来说,混合基质的物理性质是其各组分相应物理性质的折中<sup>[24]</sup>。由于基质中骨料所占比例远高于有机质,基质物理性质主要由其中骨料的物理性质所决定。与珍珠岩相比,蛭石的干密度高而孔隙度低(见表 2),因此当骨料添加率相同时,与珍珠岩组相比,蛭石组的干密度高而孔隙度低,这与王啸宇<sup>[6]</sup>等、潘颖<sup>[7]</sup>等的研究结果一致。如表 2 所示,蛭石的最大持水量高于珍珠岩的,这可能是由于二者持水机理的不同。蛭石为层状硅酸盐矿物,结构层往往带负电并具有较高的层电荷密度,结构层的高电荷允许水分子进入层空间,层空间水化倾向强烈,这种层结构及层间水化反应都有利于蛭石的持水<sup>[25]</sup>。而珍珠岩是一种酸性火山玻璃质熔岩,具有无数不规则的密闭气孔,蜂窝状结构发达,主要靠孔隙吸持水分<sup>[26]</sup>。图 3 数据也表明,当骨料添加率相同时,蛭石组的最大持水量高于珍珠岩组。饱和载荷与干密度、比重、孔隙结构等有关,而最大持水率能够一定程度反映孔隙结构。将表 2 中四种组分及表 3 中九种基质的数据汇总做相关性分析,发现饱和载荷与干密度、最大持水率呈正相关,相关指数  $R^2$  分别为 0.7510、0.7651(图 6)。由于蛭石的干密度、最大持水量均高于珍珠岩,因此蛭石的饱和载荷更高(表 2),同样的,当骨料添加率相同时,蛭石组的饱和载荷高于珍珠岩组(图 3)。表 3 中,蛭石组渗透率范围为 0.22~0.30 cm/s,相比于珍珠岩组的渗透率范围 0.07~0.91 cm/s,其变化波动较小。由 2.2.1 分析可知,蛭石组渗透率受骨料添加率影响不显著,这可能是由于蛭石质地较软,吸水后颗粒骨架膨胀,与鸡粪混合时,形成的团聚体结构较稳定,连通度改变不大,因此渗透率变化波动小;而珍珠岩质地较硬,吸水后颗粒骨架稳定,与鸡粪混合后基质孔隙连通度变化随骨料添加率而改变,因此渗透率变异性更大,说明即便添加率范围一致,不同骨料对渗透率的调节能力有异,相对于蛭石,珍珠岩对于渗透率的调节范围更广。

骨料类型对骨料添加率为 90% 基质的比重有显著影响,由 2.2.1 分析可知,当蛭石添加率到达 90% 时,蛭石组比重会显著降低,更接近于蛭石比重。而当珍珠岩添加率在 80%~90% 之间变动时,珍珠岩组比重无显著变化。这是由于试验中所使用的珍珠岩比重(2.01~2.09)与鸡粪比重(2.22)相近,两者之间的体积百分比变动不影响混合后基质比重,其改变与骨料添加率无关。因此骨料类型仅对

添加率为 90% 基质的比重有显著影响,蛭石组的比重低于珍珠岩组的。此外,骨料类型对基质组的有机质总量、碱解氮含量、速效磷含量有显著影响。检测可知,蛭石的有机质含量高于珍珠岩,因此蛭石组的有机质总量高于珍珠岩组。蛭石、珍珠岩的碱解氮及速效磷含量相当。由于蛭石的干密度高于蛭石,骨料添加率相同时,取出蛭石的质量更高,进而表现为蛭石组的碱解氮及速效磷含量高于珍珠岩组。

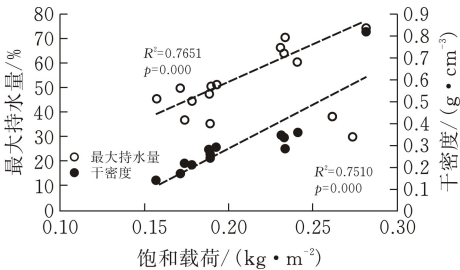


图 6 基质的饱和载荷与最大持水量、干密度的相关性拟合曲线

2.2.4 粗放型绿色屋顶人工基质的筛选 根据 FLL 规范<sup>[10]</sup>,粗放型绿色屋顶基质中粒径小于 0.063 mm 颗粒的含量不应超过总质量分数的 7%,粒径小于 4 mm 颗粒的含量应高于总质量分数的 25%,最大粒径应限制为 10~12 mm。因为过多的细颗粒会降低基质的渗透率,增加重量,而适宜比例的细颗粒则有助于保水、保肥,促进植物生长。在满足粒径分布的前提下,低干密度、高持水能力、高孔隙率和高渗透率是粗放型绿色屋顶人工基质理想的物理性质<sup>[27]</sup>。低干密度对降低屋顶载荷有重要意义,特别是老旧屋顶承载能力有限,一般考虑应小于 0.8 g/cm<sup>3</sup>。此外,本试验还测得了饱和载荷,与干密度不同,饱和的重量考虑了降雨和排水因素,其值一般不超过 100 kg/m<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。高持水能力既可以延长植物在干旱期的存活率又能减少屋顶径流,但此值过高会导致植物烂根,FLL 规定其范围为 20%~65%。高孔隙度有利于植物根系之间的气体交换以维持植物正常生长,FLL 规定其值应大于 10%<sup>[28]</sup>。高渗透率可以防止积水的产生,避免积水增加屋顶载荷、淹没植物、破坏基质结构,FLL 规定其值应大于 0.1 cm/s。有机质及氮、磷元素用于维持植物生长,其含量需要设定在与绿化类型和建筑形式相适应的水平,并考虑到如果它们渗出可能会造成污染<sup>[29]</sup>,针对粗放型绿色屋顶,FLL 规定有机质的含量应小于基质总质量的 4%,碱解氮含量应小于 80 mg/L,速效磷含量应小于 200 mg/L。

Berndtsson 等<sup>[30]</sup>在瑞典马尔默和隆德的研究表明,绿色屋顶可以降低氨氮和总氮,但同时也是硝

酸盐、总磷和磷酸盐的释放源。因此,基质的化学指标在满足 FLL 规范的同时,也应考虑日后运行过程中带来的污染问题。

本试验中,添加率为 90%的蛭石 3~5 mm 组、添加率为 90%的珍珠岩 3~6mm 组和添加率为 90%珍珠岩 4~8 mm 组符合 FLL 规范关于粗放型绿色屋顶人工基质物理性质的各项要求,具备潜在应用价值。当骨料为珍珠岩时,珍珠岩 4~8 mm 组的氮磷含量低于珍珠岩 3~6 mm 组,应当优先考虑使用。

3 结 论

将三种骨料蛭石 3~5 mm、珍珠岩 3~6 mm、珍珠岩 4~8 mm 按照 90%、85%、80%的添加率分别与一种有机质鸡粪混合,共得到九组基质种类,测试各组基质的理化性质及分析骨料的添加率、级配以及类型对粗放型绿色屋顶人工基质理化性质的影响,得出以下结论。

1)蛭石添加率的改变对蛭石组的干密度、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率无显著影响,当蛭石的添加率达到 90%时,蛭石组比重显著减小。随着蛭石添加率的增加,鸡粪的添加率减少,蛭石组的有机质总量、碱解氮及速效磷含量显著减小。珍珠岩添加率的改变对珍珠岩组的比重无显著影响,但添加率的增加会使得珍珠岩组的干密度、最大持水量、饱和载荷、有机质总量、碱解氮及速效磷含量显著减小而孔隙度、渗透率增加。

2)珍珠岩的骨料级配对珍珠岩组的干密度、比重、孔隙度、饱和载荷、渗透率无显著影响。而对于最大持水量而言,当珍珠岩添加率为 90%、85%时,珍珠岩 3~6 mm 组的最大持水量大于珍珠岩 4~8 mm 组的,这是由于相同骨料添加率下,前者粒径为 0.5~1 mm 颗粒的质量分数高于后者的相应值。对于有机质总量而言,当珍珠岩骨料添加率相同时,骨料级配有对有机质总量有显著影响,珍珠岩 3~6 mm 组的有机质总量高于珍珠岩 4~8 mm 组的。对于碱解氮、速效磷而言,当珍珠岩骨料添加率为 90%时,骨料级配对这两项指标有显著影响,珍珠岩 3~6 mm 组的碱解氮、速效磷含量高于珍珠岩 4~8 mm 组的。

3)骨料类型对基质的干密度、孔隙度、最大持水量、饱和载荷、渗透率有显著影响,当骨料添加率相同时,对比珍珠岩组,蛭石组的干密度、最大持水量、饱和载荷更高,孔隙度更小,当骨料添加率在 90~80 % 之间变动时,对比珍珠岩组,蛭石组的渗透率的波动性更小。当骨料添加率为 90 % 时,骨料类型

对基质比重有显著影响,蛭石组的比重低于珍珠岩组的。此外,骨料类型对基质组的有机质、碱解氮、速效磷有显著影响。由骨料添加率相同时,蛭石组的有机质总量、碱解氮及速效磷含量均高于珍珠岩组的。

4)根据 FLL 规范,添加率为 90%的蛭石 3~5 mm 组、添加率为 90%的珍珠岩 3~6 mm 组和添加率为 90%珍珠岩 4~8 mm 组符合粗放型绿色屋顶人工基质物理性质的要求,可用于进一步研究。

粗放型绿色屋顶的设计与研究中,植物的选择对于绿色屋顶的运行也是至关重要的,因此,笔者未来的研究将会围绕粗放型绿色屋顶植物的筛选以及受植物根系影响基质层的水分迁移运动而展开,为粗放型绿色屋顶人工基质-植物优化设计提供理论依据及技术参考。

[ 参 考 文 献 ]

[1] VIJAYARAGHAVAN K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,57:740-752.

[2] HASHEMI S S G, MAHMUD H B, Ashraf M A. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,52:669-679.

[3] 邓陈宁,李家科,李怀恩. 城市雨洪管理中绿色屋顶研究与应用进展[J]. 环境科学与技术, 2018,41(3): 141-150.

[4] XIAO M, LIN Y, HAN J, et al. A review of green roof research and development in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,40:633-648.

[5] JENNETT T S, ZHENG Y. Component characterization and predictive modeling for green roof substrates optimized to adsorb P and improve runoff quality: A review[J]. Environmental Pollution, 2018, 237: 988-999.

[6] 王啸宇,郑思俊,张青萍,等. 屋顶绿化适用栽培基质材料保水特性比较研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(5):257-262.

[7] 潘颖,李孝良. 几种无土栽培基质理化性质比较[J]. 安徽农学通报, 2007(5):55-56.

[8] 张华,李茂,曹金露,等. 常用屋顶绿化基质材料的保水性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2015,37(1):67-72.

[9] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.

[10] FLL. Duideline s for the Planning , Construction and Execution of green-roof sites[M]. Germany Troisdorf: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V, 2002.



[11] 李铭怡,邵艳艳,彭逗逗,等. 屋顶绿化轻型种植基质的水肥保持效应研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019,41(4):95-101.

[12] 孙敏奥,岩松. 几种固形物料的物理、化学性状及其栽培基质化评价[J]. 华北农学报, 2004(1):102-106.

[13] 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, 2002.

[14] FASSMAN E A, SIMCOCK R, E. VOYDE. Extensive green roofs for stormwater mitigation, part 1: design and construction [R]. Auckland Regional Council: Auckland, 2009.

[15] LIU R, FASSMAN-BECK E. Effect of composition on basic properties of engineered media for living roofs and bioretention[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016,21(6):6016002.

[16] 李耀龙,季延海,于平彬,等. 基于不同基质理化特性的无土栽培混合基质筛选[J]. 北方园艺, 2016(8):36-40.

[17] 朱雄飞,阮宏宏. 珍珠岩的显微比重测定[J]. 华东地质学院学报, 1984(1):72-79.

[18] GRACESON A, HARE M, HALL N, et al.Characterising the mineral components of green roof growing media:1st national green roof student conference[C]. Sheffield,UK : Sheffield University,2011.

[19] ABAD M, FORNES F, CARRION C, et al. Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat[J]. HortScience, 2005,40(7):2138-2144.

[20] GUBER A K, RAWLS W J, SHEIN E V, et al. Effect of soil aggregate size distribution on water retention [J]. Soil Science, 2003,168(4):223-233.

[21] GRACESON A, HARE M, MONAGHAN J, et al. The water retention capabilities of growing media for green roofs[J]. Ecological Engineering, 2013,61:328-334.

[22] NOGUERA P, ABAD M, PUCHADES R, et al. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003,34(3-4):593-605.

[23] 朱崇辉,刘俊民,王增红. 粗粒土的颗粒级配对渗透系数的影响规律研究[J]. 人民黄河, 2005(12):79-81.

[24] PAPADOPOULOS A P, BAR-TAL A, SILBER A, et al. Inorganic and synthetic organic components of soil-less culture and potting mixes [M] Soilless Culture. Amsterdam: Elsevier, 2008:505-543.

[25] 苏小丽,吴逍,陈情泽,等. 河北灵寿蛭石晶体化学特征与层间水化行为[J]. 矿物学报, 2019,39(6):673-680.

[26] 张乃于,闫双堆,任倩,等. 珍珠岩粒径对土壤水分运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(2):22-28.

[27] GRACESON A, HARE M, HALL N, et al. Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs[J]. Biosystems Engineering, 2014,124:1-7.

[28] VIJAYARAGHAVAN K, RAJA F D. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption[J]. Water Research, 2014,63:94-101.

[29] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydraulic and pollutant removal performance of stormwater filters under variable wetting and drying regimes[J]. Water science and technology, 2007,56(12):11-19.

[30] BERNDTSSON J C, BENGTTSSON L, JINNO K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs[J]. Ecological Engineering, 2009,35(3):369-380.

# Effect of Different Aggregates on Physical and Chemical Properties of Extensive Green Roof Artificial Substrate

CHEN Xuan , ZHOU Minglai , YE Jianjun , LIU Ying , LIU Ruifen

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China ;  
Key Laboratory of River and Lake Ecological Restoration and Algae  
Utilization of Hubei Province , Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Lightweight aggregate is the main component of the extensive green roof substrate layer. To study and analyze the influence of its ratio, gradation and type on the physical and chemical properties of the substrate,three common lightweight aggregate vermiculite 3~5 mm, perlite 3~6 mm, perlite 4~8 mm and an organic chicken manure were used. Each aggregate was thoroughly mixed with organic chicken manure according to the addition ratio of 90%, 85%, 80%, and finally nine groups of matrix species were obtained. The particle size distribution, dry density, specific gravity, porosity, maximum water holding capacity, saturation load , permeability of the substrates,total organic matter, content of alkaline hydrolysis nitrogen and content of available phosphorus in each group were measured. The results indicate that with the increase of the addition rate of vermiculite, the total organic matter, the content of alkaline hydrolysis nitrogen and the content of available phosphorus in the vermiculite group decreased significantly.

When the addition rate of vermiculite reached 90 % , the specific gravity of vermiculite group decreased obviously. As the addition rate of perlite decreases, the dry density, maximum water holding capacity, saturation load, total organic matter, content of alkaline hydrolysis nitrogen, and content of available phosphorus of the perlite group increase while the porosity and permeability decrease. When the addition rate of perlite is 85 % , 90 % , the maximum water holding capacity of aggregate grading has a significant effect. The maximum water holding capacity of the perlite 3~6 mm group is higher than that of the perlite 4~8 mm group. When the aggregate addition rate is the same, the perlite group has lower dry density, saturation load, total organic matter, content of alkaline hydrolysis nitrogen, and content of available phosphorus than the vermiculite group, but its porosity is higher than the vermiculite group. The perlite group has a wider adjustment range for permeability. According to the German FLL standard, the vermiculite 3~5 mm group with an aggregate addition ratio of 90 % , the perlite 3~6 mm group with an aggregate addition ratio of 90 % and the perlite 4~8 mm group with an aggregate addition ratio of 90 % have potential application value.

**Keywords:** extensive green roof; artificial substrate; physical and chemical properties; vermiculite; perlite

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 50 页)

## Research on the Difference of Blue OLED Devices Based on TADF Doping

FENG Junjie<sup>1</sup>, ZHANG Man<sup>1</sup>, WANG Haojie<sup>1</sup>, ZHOU Yuanming<sup>2</sup>

(1 School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;  
2 School of Science , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China )

**Abstract:** Red, green and blue are the basic colors in OLED research, and the photoelectric performance of blue OLED lags behind the other two colors. The method of using host-guest doped structure is considered to be one of the effective ways to improve the performance of blue OLED devices. Thermally activated delayed fluorescence (TADF) materials are used as the third-generation light-emitting materials, for their more advantages than the previous two-generation materials. It has the advantages of high efficiency, high brightness and no pollution, but the stability of this material is poor. The blue TADF luminescent material DMAC-DPS is used as the guest dopant, and mCP, PPF and DPEPO are used as the host material. The performance differences of the three types of host-guest structure devices is studied. The results show that the mCP structure device has the worst photoelectric performance and the longest current life. On the contrary, the DPEPO structure device has the best comprehensive performance.

**Keywords:** thermally activated delayed fluorescence; OLED; difference

[责任编辑: 张岩芳]