

陈雨,刘瑞芬,刘德富.不同生长阶段佛甲草根系对蛭石基质水力特性及水分运移的影响[J].中国环境科学,2023,43(12):6393-6405.

Chen Y, Liu R F, Liu D F. Effects of *Sedum lineare Thunb* roots at different growth stages on hydraulic properties and water flow migration of vermiculite substrate [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6393-6405.

不同生长阶段佛甲草根系对蛭石基质水力特性及水分运移的影响

陈雨,刘瑞芬*,刘德富 (湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北工业大学河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室,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:为了定量揭示绿色屋顶景天属植物根系不同生长阶段对人工基质水力特性及水分运移的影响,将佛甲草培养于14cm厚的蛭石基质中,培养至30、60和90d后,进行根系特征测定及根系根长频率分布函数评价;并基于根系根长频率分布函数和蒸渗试验数据预测含植物根系的蛭石基质水力特性,以此分析根系生长对水力特性的影响;最后采用HYDRUS-1D模拟分析武汉市典型丰水年降雨条件下佛甲草—蛭石基质水分运移规律.结果发现,三种根系根长频率分布函数中,由对数正态分布函数所预测的佛甲草根系表面积和根系体积误差均小于20%,适用于佛甲草根系特征的量化.含植物根系蛭石基质水力特性参数 θ_r 、 n_1 、 w 和 K_s 相较于不含植物根系情形均增加、 α_2 和 n_2 均减少;在根系生长阶段 θ_r 一直增大、 θ_s 、 α_2 和 w 一直减小.当考虑佛甲草根系四季(春、夏、秋、冬)生长状态时,含植物根系蛭石基质蒸发量相较于不含植物根系情形分别减少4.46%、2.94%、8.91%和7.56%,截流率分别减少1.64%、1.22%、7.10%和7.06%.

关键词: 绿色屋顶; 植物生长; 根系分布函数; 水力特性; 水分运移; 影响因素

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)12-6393-13

Effects of *Sedum lineare Thunb* roots at different growth stages on hydraulic properties and water flow migration of vermiculite substrate. CHEN Yu, LIU Rui-fen*, LIU De-fu (Key Laboratory of Health Intelligent Perception and Ecological Restoration of River and Lake, Ministry of Education, Hubei Key Laboratory of Ecological Remediation of River-lakes and Algae Utilization, Department of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6393~6405

Abstract: The study aims to reveal the effect of *sedum* plant roots at different growth stages on hydraulic properties and water flow migration of artificial substrate for green roofs. *Sedum lineare Thunb* was cultured in the 14cm-depth vermiculite substrate, and thereafter, plant root characteristics were measured and root length frequency distribution functions were evaluated at 30d, 60d and 90d. Based on root length frequency distribution functions and obtained lysimeter data, hydraulic characteristics of vermiculite substrate containing plant roots were predicted, and the effect of root growth on substrate hydraulic characteristics were analyzed. Finally, water flow migration of *Sedum lineare Thunb*-Vermiculite substrate under the rainfall condition of a typical hydrological year in Wuhan was simulated by HYDRUS-1D model. The results showed that among three root length frequency distribution functions, errors of predicted root surface area and root volume from the lognormal distribution function were both less than 20%, indicating the function was suitable for the *sedum* root quantification. The results also showed that the hydraulic characteristic parameters θ_r 、 n_1 、 w and K_s of vermiculite containing plant roots were increased, while α_2 and n_2 were reduced, when compared with parameters from vermiculite without plant roots. During the whole plant root growth stage, θ_r increased continuously but θ_s , α_2 and w decreased continuously. Compared with data from the simulation scenario of vermiculite without plant roots, evapotranspiration of vermiculite substrate with *Sedum lineare Thunb* roots from four seasons (spring, summer, autumn and winter) were reduced by 4.46%, 2.94%, 8.91% and 7.56% respectively, and rainfall volume reduction rates were also reduced by 1.64%, 1.22%, 7.10% and 7.06% respectively.

Key words: green roofs; plant growth; root distribution functions; hydraulic properties; water flow migration; influencing factors

为应对快速城镇化引起的降雨径流增加、面源污染加剧等负面效应,我国全面推进海绵城市建设^[1],并强调进行低影响开发(LID).LID 技术主要包括绿色屋顶、生物滞留、可渗透/漏路面铺装系统等

措施^[2].近些年,绿色屋顶作为源头控制措施引起广

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51909081)

* 责任作者, 副教授, ruifen1986@aliyun.com

泛关注^[3],其剖面结构包括植物层、基质层、排水层、防水阻根层和建筑屋层面等.其中植物层是绿色屋顶发挥多种生态效益的保证,如削减屋顶径流、缓解热岛效应、净化空气等,基质层则是主要的水流、溶质运移的场所,为植物生长提供水分及养分^[4].现有研究表明^[5],景天属植物是绿色屋顶的优势种,通常能忍受极端环境(如抗寒、抗旱、耐热、耐瘠薄),其成活率高、覆盖度稳定、且几乎不需要任何维护.对于基质层而言,由无机骨料和有机质按一定配比混合而成的轻质人工基质相较于自然土壤,则更适宜作为绿色屋顶的种植基质^[4].如邓陈宁等^[4]研究发现人工基质相较于田园土,具有荷载较轻、持水能力强、通气性好等优点;张彦婷^[6]研究具有不同基质层的绿色屋顶的雨水滞蓄效果,发现由轻质材料混合而成的人工基质相较于田园土可以有效延缓产流时间.

Beecham 等^[7]对不同植被覆盖类型(多裂鹅河菊、黄花合头菊、圆棒玉和无植物)的四种绿色屋顶进行 5 次降雨径流监测,发现无植物绿色屋顶的截流率为 31%~65%,而有植物的绿色屋顶截流率为 52%~92%,相应截流率增强.而有无植物绿色屋顶截流率的差别可能是由于绿色屋顶所在气候带^[8]、降雨强度^[9]、植物种类^[7]及植物根系特征有关^[10].相关 LID 研究表明^[10-11],由植物根系所引起的人工基质水文性能改变尤为重要,因此在研究绿色屋顶人工基质水力特性及水分运移时,不应忽略植物根系形态特征的影响.但在绿色屋顶领域,有关植物根系形态特征、景天属植物根系模型等方面一直缺乏系统的实验与研究,目前,根系特征研究及根系分布模型理论和研究成果多集中在农林学领域的草本植物上.如肖宏彬等^[12-13]基于香根草根系分布形态数据和根系拉拔试验,提出了能够反映根系直径和长度生长变化的根系形态分布模型,并利用 Weibull 概率分布函数^[14]构建了描述根系抗拉力分布情况的函数;陈能等^[15]通过测量香根草的根系数量、长度、直径和分枝角度等获得分形参数 a 和 q ,并基于 FracRoot 模型^[16]建立香根草根系形态分布模型,该模型可通过母段顶部直径预测整株香根草根系总长和总干重等;潘天辉等^[17]采用 Page 和 Gerwitz 提出的指数分布函数模型^[18]对白羊草、等根系进行拟合,进而发现选择小叶杨和白羊草作为护坡植物配

置具有较好的固土能力和抗剪能力.

已有绿色屋顶研究表明^[19-22],绿色屋顶中植物与人工基质存在相互作用机制,如适宜的人工基质厚度、配比等,可促进植物生长和相关生理性能;景天属植物佛甲草根系会改变蛭石人工基质的水力特性参数^[23].而相关土壤学研究也表明^[24-26],含植物根系的土壤水力特性和水分运移会随着植物根系生长发生动态变化.例如,一年生植物玉米表现出季节性生长,当根系快速生长时,土壤的饱和导水率(K_s)会降低,而会后随着根系腐烂而增加^[24].谭学进等^[25]研究了近 40 年植被恢复对土壤物理性质的影响,发现随着植被的恢复年限增加,土壤孔隙度、 $>0.25\text{mm}$ 团聚体含量、持水性和入渗性能等均增大.鲁建荣等^[26]采用土壤水分运移数值模型分析根系生长引起的水文效应,发现植物根系生长会改变土壤水分特征曲线(SWRC)、土壤进气值等,同时改善土壤蓄水能力、增加蒸散发量和累积地下水向上补给通量.由植物根系生长引起的人工基质水力特性改变是研究植物—人工基质相互作用的重要组成部分,但目前有关景天属植物根系生长会如何改变人工基质的水力特性,进而影响人工基质的水分运移过程等还不得而知.

目前用于研究绿色屋顶水分运移的方法有实验测量法和数值模拟法^[27-29].实验测量法可采用染色示踪法和溶质穿透法,其中染色示踪法通过染色剂可以直接显示水流所经过的路径,具有直观、易操作且成本低等优点^[27],溶质穿透法通过在实验柱体表面模拟降雨、柱体底部记录出流时间、出流体积和出流浓度可间接判断柱体内水分运移^[30].而数值模拟法则是研究绿色屋顶水分运移的有效手段,由美国农业部盐土实验室所开发的 HYDRUS-1D 软件可以模拟水、热及溶质在非饱和多孔介质中的运动,因此得以广泛应用^[31].Liu 等^[28]基于室内柱体实验数据,使用 Hydrus-1D 软件对绿色屋人工基质水分运移过程进行数值模拟,发现具有双孔特性的人工基质中存在优先流现象,但该研究未考虑植物种植、忽略了根系对人工基质所带来的影响.Chen 等^[30]通过溶质穿透实验监测多种景天属植物—人工基质组合下的出流体积和浓度,并使用 Hydrus-1D 对景天属植物—人工基质组合中的优先流现象进行水分运移模拟;Hiltner 等^[29]采用 HYDRUS-1D 模拟

绿色屋顶在大降雨事件中的水文表现,发现种植景天属植物的绿色屋顶能延长径流持续时间,但这些研究均未考虑由景天属植物根系生长所带来的动态性的人工基质水力特性及水分运移的改变.

本文以景天属植物佛甲草及蛭石基质作为研究对象,量化佛甲草根系生长周期内的根系形态特征并确定适宜的根系根长频率分布函数,进而研究植物根系影响下的蛭石基质水力特性变化过程,最终分析武汉市典型水平年绿色屋顶佛甲草动态生长下蛭石基质的水分运移规律,有助于海绵城市建设中绿色屋顶植物-人工基质的设计、建设及应用.

1 材料与方法

1.1 材料与试验方法

1.1.1 植物和人工基质 选取景天属植物中佛甲草(*Sedum lineare Thunb*)作为试验植物,因其抗旱及抗寒性好、成活率高和覆盖度稳定而广泛运用于国内外绿色屋顶研究中^[32-33].佛甲草为多年生肉质草本,茎高 10~20cm,3 叶轮生,少有 4 叶轮或对生的,黄绿色,叶线形,先端钝尖,基部无柄,有短距,花黄色,花期为 5~6 月.

依据国内外已建的绿色屋顶研究现状^[33-35],选取蛭石基质作为人工基质,蛭石基质由 3~6mm 蛭石与鸡粪按照 9:1 的体积比充分混合而成.测得蛭石基质的物理性质(表 1),如干密度、孔隙率、最大持水量和饱和密度等^[36].

表 1 蛭石基质基本物理性质
Table 1 Physical properties of vermiculite substrates

人工基质	干密度 (g/cm ³)	孔隙率(%)	最大持水量 (%)	饱和密度 (kg/m ³)
蛭石基质	0.321	81.69	57.89	1422.60
3~6mm 蛭石	0.316	79.13	58.45	1483.56
鸡粪	0.820	62.99	68.80	1403.38

采用底部打孔的、直径为 15cm 的圆形有机玻璃容器装载 14cm 厚的蛭石基质,于 9 月到 11 月进行为期 90d 的植物培养.选取形态相同的健康佛甲草茎段,用扦插方式以 2cm×2cm 间距种植于蛭石基质中,并在室内靠窗位置进行常温培养.在 0~30d 内,每隔 3d 浇约 190mL 的水,共浇水 10 次;在 30~60d 内,每隔 3d 或者 6d 浇约 190mL 的水,共浇水 7 次;

在 60~90d 内,浇水频次与浇水量与 30~60d 内相同.待佛甲草生长到 30, 60 和 90d 时,即形成了含植物根系的 3 种蛭石基质处理,同时设置不含植物根系的 14cm 纯蛭石基质作为空白对照,共形成 4 个处理.

1.1.2 根系特征测定 使用德国 PMT-RTP-A3 根系平板扫描仪对植物生长至 30, 60 和 90d 时进行根系扫描(像素设置为 800dpi),再通过 Root Analysis 软件进行数据分析.取样时,首先将种植的佛甲草茎叶用剪刀剪去,将含根系的蛭石基质从种植容器中倒出后,用蒸馏水进行冲洗,将佛甲草根系从蛭石基质中分离.分离时,将根系放置于 100 目筛上方,防止脱落的根系被水冲走.接着,用毛刷和镊子小心去除根系表面的杂物,再将根系浸泡于装有蒸馏水的烧杯中,防止干枯.扫描时,将根系从烧杯中取出置于扫描仪根盘内,使用毛刷和镊子拨动根系,尽量减少根系间的交叉和重叠,使之呈现自然舒展状态,再进行根系扫描.将扫描后的图像保存,使用 Root Analysis 软件进行分析,获得佛甲草在 30, 60 和 90d 时的根系半径(r ,cm)、根长(L ,cm)、根表面积(S_r ,cm²)、根体积(V_r ,cm³)等根系特征参数后,再由根长、根表面积和根体积与种植蛭石基质体积之比分别得到根长密度(RLD,mm/cm³)、根表面积密度(RSD,mm²/cm³)、根体积密度(RVD,mm³/cm³).

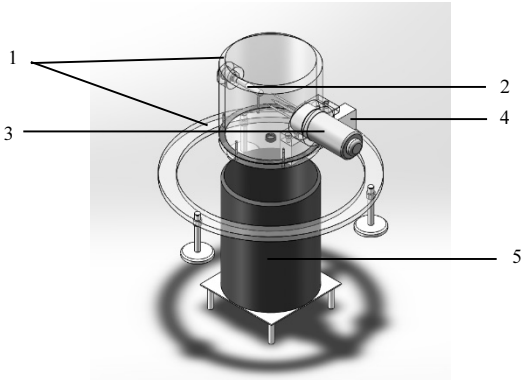


图 1 微型蒸渗仪装置
Fig.1 The miniature lysimeter device
1-筒体及支架 2-水势传感器 3-含水量传感器 4-高精度称重传感器
5-渗漏传感器

1.1.3 蒸渗试验 在进行植物培养的同时,开展蒸渗试验,试验所采用的装置为微型蒸渗仪(图 1),其由筒体及支架、水势传感器、含水量传感器、高精度称重传感器、渗漏传感器和数据采集系统组成.筒体

为底部打孔、直径为 15cm 的圆形有机玻璃体,水势传感器的测量范围为-80~20kPa(精度:±2%),含水量传感器的测量范围为 0~100%(精度:±2%),两传感器分别放置于筒体中间高度处的左右两侧,以此测量该处的基质势(ϕ , kPa)和含水量(θ , cm³/cm³).筒体下方、与支架相连的为高精度称重传感器,其称重范围为 0~50kg(精度:0.01g),该传感器通过实时测量干期筒体的重量减少,再根据筒体的底表面积(176.6cm²)可转化为相应蒸发量(cm).渗漏传感器(精度:0.01g)通过橡皮软管与筒体底部打孔处相连,由两个体积量为 6.28mL 的小漏斗交替计量渗漏量,同样根据筒体的底表面积转化为渗漏量(cm).

蒸渗试验采用两台微型蒸渗仪,一台筒体中未种植物、仅装载 14cm 厚的蛭石基质,作为空白对照;另一台筒体中装载 14cm 厚的蛭石基质并种植植物.佛甲草培养方式按照 2.1.1 节中进行,同样于 9 月到 11 月进行为期 90d 的室内培养,分为 3 个生长阶段,分别为 0~30d、30~60d、60~90d,相应 3 个阶段的日光照时间约为 12.33, 11.43, 10.39h;月平均气温约为 25.48, 17.94, 11.33℃.蒸渗试验开始前,采用去离子水对两台蒸渗仪中筒体进行匀速淋滤,使筒体内蛭石基质含水量达到最大持水量(即筒体底部出流达

匀速).

1.2 分析方法

1.2.1 根系根长频率分布函数 选择草本植物中常用的 3 种根系根长频率分布函数(表 2),考察其应用于佛甲草根系数据的适用性.3 种分布函数包括指数分布函数、正态分布函数和对数正态分布函数,其参数分别为指数分布参数 λ 、正态分布参数 μ_n 和 σ_n 、对数正态分布参数 μ_{ln} 和 σ_{ln} . $F(r)$ 为累积频率分布函数, $f(r)$ 为 $F(r)$ 的密度函数.根据 2.1.2 中实测佛甲草在 30, 60 和 90d 时的根长数据,将根系半径分为 0~0.01cm、0.01~0.02cm、0.02~0.03cm、0.03~0.04cm、0.04~0.05cm、0.05~0.1cm 和 ≥0.1cm 七个等级,通过计算每个根系半径等级的总根长与所有根系总根长的占比,将根长直方图转换为累积频率分布图,并采用 MATLAB 对 3 个分布函数进行拟合,相应拟合程度用均方根误差(RMSE_r)来表示(式 1):

$$RMSE_r = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (F(r_i) - y_i)^2}{n - p} \right]^{0.5}$$

(1)

式中: $F(r_i)$ 是半径等级 r_i 处的拟合的累积频率, y_i 是实测的累积频率, n 是半径等级个数, p 是分布函数的参数个数.

表 2 三种根系根长频率分布函数
Table 2 Three root length frequency distribution functions

分布函数	参数个数 p	$F(r)$ 累积频率分布函数	$f(r)$ 密度函数
指数分布	1	$1 - e^{-\lambda r}$	$\lambda e^{-\lambda r}$, 其中 $r > 0, \lambda \in (0, \infty)$
正态分布	2	$\frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(r) - \mu_n}{\sigma_n \sqrt{2}} \right) \right]$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \cdot e^{-\frac{(r-\mu_n)^2}{2\sigma_n^2}}$, 其中 $\sigma_n > 0, \mu_n \in (-\infty, +\infty)$
对数正态分布	2	$\frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(r) - \mu_{ln}}{\sigma_{ln} \sqrt{2}} \right) \right]$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot r \sigma_{ln}} \cdot e^{-\frac{(\ln(r) - \mu_{ln})^2}{2\sigma_{ln}^2}}$

根据拟合的根系根长频率分布函数,利用其 n 阶矩 M_n 推求根系表面积和根系体积, M_n 表示为:

$$M_n = \int_0^\infty r^n f(r) dr$$

(2)

则根系表面积 A^a (cm²/cm)表示为:

$$A^a = 2\pi M_1$$

(3)

根系体积 V^a (cm³/cm)表示为:

$$V^a = \pi M_2$$

(4)

对于使用的三种分布函数(表 2),一阶矩和二阶矩均可求,例如对数正态分布函数表达根系的表面积和体积分别为:

$$A^a = 2\pi e^{\mu_{ln} + \sigma_{ln}^2 / 2}$$

(5)

$$V^a = \pi e^{2(\mu_{ln} + \sigma_{ln}^2 / 2)}$$

(6)

由分布函数所推求的根系表面积(和根系体积)与实测根系表面积(和根系体积)之间的误差 $\varepsilon(X)$ 表示为:

$$\varepsilon(X) = 100 \frac{X^a - X^m}{X^m}$$

(7)

则 $\varepsilon_{ln}(X)$ 表示对数正态分布函数推求值同实测值之间的误差.式中, X 为根系表面积 A 或者根系体积 V , A^a 代表和 V^a 分别代表分布函数推求的根系表面

积(和根系体积), A^m 和 V^m 分别代表实测根系表面积(和根系体积)。

1.2.2 不含植物根系纯蛭石基质水力特性反演 本文利用 HYDRUS-1D 软件中反演模块, 结合 2.1.3 节蒸渗试验空白对照中所获得的基质势和含水量数据, 求得不含植物根系纯蛭石基质的水力特性。HYDRUS-1D 由美国农业部盐渍土实验室开发, 可以用于模拟一维非饱和和多孔介质中的水、热及溶质的运动, 在土壤水资源评价、水分运移、水蒸发渗漏等方面得到广泛应用^[31]。其水流控制方程采用修改过的 Richards 方程(式(8)):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \cos \varphi \right) \right] - S \quad (8)$$

式中: θ 为体积含水量, cm^3/cm^3 ; t 为时间, min; z 为垂直方向深度, cm; $K(h)$ 为导水率数据; h 为基质势的等效水头, cm (10cm 水头 $\approx$ 1kPa); φ 为水流方向与垂直方向夹角, 取 $\varphi=0$, 则 $\cos \varphi=1$; S 为根系吸水项, 在不含植物根系蛭石基质中忽略不计。利用式(8), 以蒸渗试验中的基质势和含水量数据作为目标函数, 即可对不含植物根系纯蛭石基质水力特性进行求解。

蛭石基质的水力特性包括水分特征数据($\theta(h)$)和导水率数据($K(h)$), 其中水分特征数据是反映蛭石基质孔隙中含水量随基质势变化的关系, 通过该数据可以进行蛭石基质含水量与基质势之间的换算, 也能间接反映蛭石基质中孔隙的分布^[37], 在水分运移模拟研究中尤为重要^[38], 导水率数据是反映蛭石基质孔隙中水通量随基质势变化的关系, 可以衡量水在蛭石基质中移动的难易程度^[39]。已有研究证明蛭石基质具有双孔结构^[23-40], 故水分特征数据和导水率数据可用 Durner-Mualem 双孔模型^[41-42], 具体见式(9)~(12):

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = w \left[1 + (\alpha_1 |h|)^{n_1} \right]^{-m_1} + \quad (9)$$

$$(1-w) \left[1 + (\alpha_2 |h|)^{n_2} \right]^{-m_2}$$

$$K(S_e) = K_s \left[w S_{e_1} + (1-w) S_{e_2} \right]^l$$

$$\left(\frac{w \alpha_1 \left[1 - (1 - S_{e_1}^{\frac{1}{m_1}})^{m_1} \right] + (1-w) \alpha_2 \left[1 - (1 - S_{e_2}^{\frac{1}{m_2}})^{m_2} \right]}{[w \alpha_1 + (1-w) \alpha_2]^2} \right)^2 \quad (10)$$

$$S_{e_1} = \left[1 + (\alpha_1 h)^{n_1} \right]^{-m_1} \quad (11)$$

$$S_{e_2} = \left[1 + (\alpha_2 h)^{n_2} \right]^{-m_2} \quad (12)$$

式中: θ_r 为残余含水量, cm^3/cm^3 ; θ_s 为饱和含水量,

cm^3/cm^3 ; K_s 为饱和导水率, cm/d ; l 为反映土壤孔隙连续性的参数, 无量纲, 通常取值为 0.5; α_1 、 α_2 为吸力参数, 无量纲; n_1 、 n_2 为曲线形状参数, 无量纲; $m_1=1-1/n_1$, $m_2=1-1/n_2$, 无量纲; 下标 1 和 2 分别代表大孔系统(即聚集体间孔)和小孔系统(即聚集体内孔); w 为权重系数。

在 HYDRUS-1D 反演模块中, 根据蒸渗试验空白对照中的实际情况进行相关设置, 考虑到不含植物根系蛭石基质水力特性在试验阶段相对稳定, 故选取空白对照第一次浇水后 72h 内的情况进行模拟。蛭石基质厚度设为 14cm, 并每隔 1mm 对蛭石基质层进行空间网格划分, 模拟时间设为 72h, 时间步长设为默认值, 用以保证水量平衡及迭代收敛。水力特性参数模型选取 Durner-Mualem 双孔模型, 并以沙土水力特性参数值作为反演参数初始值。模型的上边界设定为大气边界, 给定相应的浇水量, 下边界条件设定为自由排水边界, 初始含水量设置为浇水后蛭石基质能达到的最大持水量。

1.2.3 含植物根系的蛭石基质水力特性预测及验证 基于 2.2.1 节根系根长频率分布模型和 2.2.2 节反演所得不含植物根系纯蛭石基质水力特性参数, 利用 Scanlan 提出的毛细管模型理论^[43], 可预测含植物根系的蛭石基质水力特性。毛细管模型将含植物根系蛭石基质孔隙分为不含植物根系孔隙和含植物根系孔隙两个区域, 相应的毛细管概念模型见图 2。

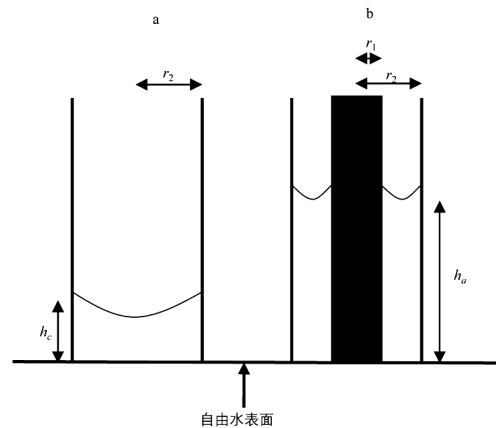


图 2 毛细管概念模型

Fig.2 Capillary conceptual model

a 是空心圆柱体, b 是同心圆柱体。 r_r 和 r_p 分别为根系和孔隙的半径, h_c 和 h_a 分别为空心圆柱体和同心圆柱体内的毛细管水上升高度

在空心圆柱体中, $h_c(\text{cm})$ 与 $r_p(\text{cm})$ 的关系有^[43]:

$$h_c = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho_w g r_p} \approx \frac{0.147}{r_p} \quad (13)$$

式中: γ 为水和空气间的表面张力, $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{cm})$; θ 为湿润角; ρ_w 为水的密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, cm/s^2 . 在同心圆柱体中, 相关的吸力 h_a 、水通量 q_a 和孔隙体积 w_a 与内圆和外圆的半径比 $\beta (\beta = r_r/r_p)$, 其中 $0 \leq r_r \leq r_p$ 有如下 δ 比值关系:

$$\delta_h = \frac{h_a(r_r, r_p)}{h_a(r_r = 0, r_p)} = \frac{1}{1 - \beta} \quad (14)$$

$$\delta_h = \frac{q_a(r_r, r_p)}{q_a(r_r = 0, r_p)} = 1 + \beta^2 - \frac{1 - \beta^2}{\ln\left(\frac{1}{\beta}\right)} \quad (15)$$

$$\delta_w = \frac{w_a(r_r, r_p)}{w_a(r_r = 0, r_p)} = 1 - \beta^2 \quad (16)$$

在不含植物根系孔隙区域(用 P 代表), 根据文献[44], 将 Dunner-Mualem 双孔模型式(9)中 h 替换式(13)的 $0.147/r_p$, 可得到不含植物根系孔隙区域的累积频率分布函数 F^P :

$$F^P = w \left[1 + \left(\alpha_1 \left| \frac{0.147}{r_p} \right| \right)^{n_1} \right]^{-m_1} + (1 - w) \left[1 + \left(\alpha_2 \left| \frac{0.147}{r_p} \right| \right)^{n_2} \right]^{-m_2} \quad (17)$$

每个孔隙半径等级 i 中, 有:

$$n_i^P = N^P f_i^P \quad (18)$$

$$v_i^P = \frac{n_i^P L \pi (r_i^P)^2}{\phi} \quad (19)$$

式中: n_i^P 为不含植物根系区域等级 i 下孔隙数量; N^P 为该区域总孔隙数量; f_i^P 为等级 i 下孔隙频率密度函数; v_i^P 为等级 i 下孔隙体积, cm^3/cm^3 ; L 为蛭石基质厚度, cm ; r_i^P 为等级 i 下所对应的孔隙半径; ϕ 为蛭石基质体积, cm^3 . 而每个等级 i 中水分特征数据 θ_i^P 和导水率数据 K_i^P 可表示为:

$$\theta_i^P = C \frac{v_i^P}{V^P} \quad (20)$$

$$K_i^P = \tau^P \frac{\rho_w g}{8\eta} C \frac{v_i^P}{V^P} (r_i^P)^2 \quad (21)$$

式中: C 为补偿系数; V^P 为不含植物根系区域总孔隙体积, cm^3/cm^3 ; τ^P 为孔隙连通性参数, 无量纲; η 为水的动力黏度, $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$.

在含植物根系孔隙区域(用 R 代表), 由 2.2.1 节根系根长频率分布函数(以对数正态分布函数为例), 可得到含根系蛭石基质孔隙累积频率分布函数 F^R :

$$F^R = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(r_i) - \mu_{\ln}}{\sigma_{\ln} \sqrt{2}} \right) \right] \quad (22)$$

每个孔隙半径等级 i 中, 有:

$$n_i^R = f_i^R \frac{D\phi}{L} \quad (23)$$

$$v_i^R = \frac{n_i^R L \pi r_i^2}{\phi} \quad (24)$$

式中: n_i^R 为含植物根系区域等级 i 下孔隙数量; f_i^R 为等级 i 下孔隙频率密度函数; D 为根长密度, cm/cm^3 ; v_i^R 为等级 i 下孔隙体积, cm^3/cm^3 ; r_i^R 为等级 i 下所对应的孔隙半径; 而每个等级 i 中水分特征数据 θ_i^R 和导水率数据 K_i^R 可表示为:

$$\theta_i^R = v_i^R \delta_w \quad (25)$$

$$K_i^R = \tau^R \frac{\rho_w g}{8\eta} (r_i^R)^2 v_i^R \delta_q \quad (26)$$

那么, 含植物根系蛭石孔隙基质的水分特征数据 $\theta(h)$ 和导水率数据 $K(h)$ 可表示为:

$$\theta(h) = \theta_r + \sum_{i=1}^j \theta_i^P + \sum_{i=1}^j \theta_i^R \quad (27)$$

$$K(h) = \sum_{i=1}^j K_i^P + \sum_{i=1}^j K_i^R \quad (28)$$

式中: θ_r 为 2.2.2 节中反演求得的残余含水量, cm^3/cm^3 ; j 为实测根系范围所对应的等级个数, $i \leq j \leq n$ (n 是根系半径等级个数, 见 2.2.2 节).

根据式(27)和式(28)所预测的含植物根系蛭石基质在 30、60 和 90d 时水分特征数据和导水率数据, 并计算得到相应阶段的 Dunner-Mualem 双孔模型(式 9、式 10)的水力特性参数. 选择蒸渗试验中第 3 个生长阶段(60~90d)内的累积蒸发量和第 5 次浇水产生的渗漏量对上述预测的水力特性参数进行验证. 在 HYDRUS-1D 软件中选择水分运移模块分别进行蒸发模拟和渗漏模拟, 模拟中蛭石基质厚度、空间网格划分、时间步长设置和上、下边界条件设置与 2.2.2 节中反演部分相同; 水力特性参数设置为 90d 时所对应的蛭石基质参数; 初始含水量根据模拟开始时所对应的实测含水量进行设置. 蒸发模拟时长设置为 30d, 渗漏模拟时长为第 5 次浇水渗漏开始至结束, 即 30min. 模拟所获得的蒸渗量与实测值之

间的误差用模拟效率系数 ENS(式 29)及均方根误差 RMSE_m(式(30))进行量化:

$$ENS=1-\frac{\sum_{i=1}^k(X_i-x_i)^2}{\sum_{i=1}^k(X_i-X_{av})^2} \quad (29)$$

$$RMSE_m=\left[\frac{\sum_{i=1}^k(X_i-x_i)^2}{k}\right]^{0.5} \quad (30)$$

式中: X_i 为实测值; x_i 为模拟值; X_{av} 为实测平均值, k 为实测数据个数。

1.2.4 武汉市典型丰水年绿色屋顶水分运移模拟 根据 2.2.3 节所得 30, 60 和 90d 的蛭石基质水力特性参数, 利用 HYDRUS-1D 中水分运移模块模拟武汉市气候条件下佛甲草—蛭石基质的蒸发量和渗漏量, 以此研究典型水文年降雨条件下绿色屋顶的水分运移规律。本文选取武汉市 1992~2021 年的降雨量数据进行排频计算, 可得到武汉市多年平均降雨量为 1470.7mm, 结合丰、平、枯水年的频率划分标准^[45]可以确定武汉市 2016 年为丰水年(降雨量为 1736.3mm、 $P=20\%$), 同时将该年按照佛甲草一年内的生长周期划分为春(3~5 月)、夏(7~9 月)、秋(9~11 月)、冬(12~2 月)四季^[46], 在 HYDRUS-1D 软件中代入不同的水力特性参数进行模拟。为了进行对比, 在 HYDRUS-1D 软件中同步模拟相同气候条件下的不含植物根系蛭石基质的蒸发量和渗漏量。

在 HYDRUS-1D 软件中, 蒸发计算式为:

$$-K\left(\frac{\partial h(z,t)}{\partial z}+1\right)=E_a(t), \quad z=L \quad (31)$$

$$-h_A \leq h(L,t) \leq 0 \quad (32)$$

$$E_a(t) \leq E_p \quad (33)$$

式中: $E_a(t)$ 为蛭石基质表面实际蒸发速率, cm/d; L 为蛭石基质厚度, cm; h_A 为蛭石基质上表层最小水头 (cm), 该值等于空气水头, 可利用开尔文公式计算得到^[47]; E_p 为蛭石基质潜在蒸发速率, cm/d。水流控制方程同样采用修改过的 Richards 方程(式 8), 给定降雨量、气温和水力特性参数, 即可对含/不含植物根系蛭石基质渗漏量进行计算。式 8 中, 根系吸水项 $S(z,t)$ 由基于负压的 Feddes 模型描述(式 34):

$$S(z,t)=\alpha(h)r(z)T_p \quad (34)$$

式中: $\alpha(h)$ 为水分胁迫响应函数, 为水头的无量纲函数 ($0 \leq \alpha \leq 1$); $r(z)$ 为根系分布函数; T_p 为潜在蒸腾速率, cm/d。

在 HYDRUS-1D 水分运移模块中, 降雨和气温输入数据为武汉市 2016 年逐日降雨量和逐日平均气温值, 模拟时长根据四季划分天数进行, 由佛甲草生长习性可知, 其在春季开始生长, 夏季达到最旺盛状态, 而后秋季缓慢生长, 冬季则处于休眠状态, 因此含植物根系蛭石基质相应水力特性参数设置如下: 春季为 60d 所对应的蛭石基质参数、夏季为 90d 所对应的蛭石基质参数、秋季和冬季则为 30d 所对应的蛭石基质参数; 不含植物根系蛭石基质的水力特性参数设置为 2.2.2 节的反演结果。蛭石基质厚度、空间网格划分、时间步长设置和上、下边界条件设置与 2.2.2 节中模拟设置一致。

2 结果与讨论

2.1 景天属植物根系根长频率分布函数评价

由图 3 可知, 随着根系生长, 根长密度、根表面积密度和根体积密度均表现为 90d 时值明显大于 30d、60d 的对应值。以根长密度为例(图 3a), 具体表现为 90d 的值比 60d 的值高 5.74mm/cm³, 而后者仅比 30d 的值高 1.72mm/cm³。这可能是植物根系生长过程中会通过调节根长、根表面积和根体积来增加与基质的接触面积, 以此获得更多的 000000 水分来促进自身的生长发育^[48]。

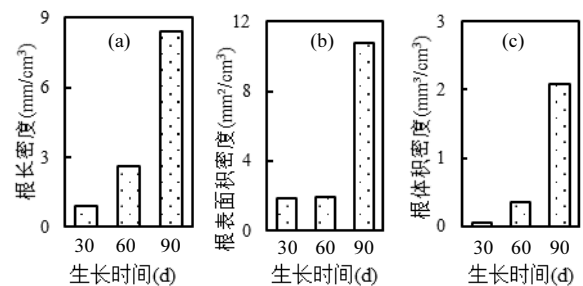


图 3 佛甲草根系特征

Fig.3 Root characteristics of *Sedum lineare* Thunb

(a). 根长密度 (b). 根表面积密度 (c). 根体积密度

如图 4 所示, 在 30, 60, 90d 时根径等级范围分别为 0~0.03, 0~0.1, 0~0.2cm, 对于 3 个生长时间均有 0.01~0.02cm 根径等级下的根长值最大, 分别占总根长的 74.09%、41.68%、30.60%。

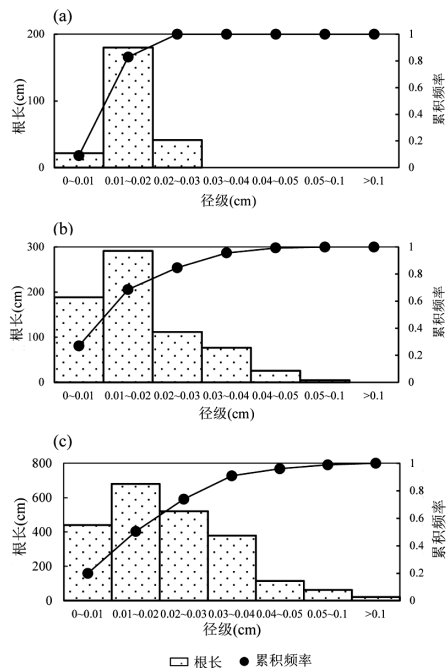


图4 佛甲草根系根长直方图及根长累积频率分布
Fig.4 Histogram and frequency distribution of root length accumulation of *Sedum linear Thunb*
(a).30d (b).60d (c).90d

由表3可知,指数分布函数、正态分布函数和对数正态分布函数的 $RMSE_r$ 值分别为 0.027~0.138、0.032~0.049、0.009~0.047,可以使用上述3个拟合的根系根长频率分布函数进行根表面积和根体积的推求。

表3 三种根长累积频率分布拟合参数值和误差值 $RMSE_r$
Table 3 Parameter values and error values for three root length cumulative frequency distribution fits

分布函数	参数值和误差值		
	30d	60d	90d
指数分布	$\lambda=86.53$	$\lambda=75.33$	$\lambda=57.30$
	$RMSE_r=0.138$	$RMSE_r=0.027$	$RMSE_r=0.048$
正态分布	$\mu_n=0.0119$	$\mu_n=0.0114$	$\mu_n=0.0181$
	$\sigma_n=0.0043$	$\sigma_n=0.0115$	$\sigma_n=0.0140$
	$RMSE_r=0.032$	$RMSE_r=0.035$	$RMSE_r=0.049$
对数正态分布	$\mu_{ln}=-4.658$	$\mu_{ln}=-4.669$	$\mu_{ln}=-4.339$
	$\sigma_{ln}=0.4694$	$\sigma_{ln}=0.9153$	$\sigma_{ln}=0.8962$
	$RMSE_r=0.009$	$RMSE_r=0.024$	$RMSE_r=0.047$

由表4可知,由指数分布函数、正态分布函数和对数正态分布函数所产生的根表面积误差范围分别为 17.82%~65.47%、20.05%~35.26%、13.55%~18.88%;根体积误差范围分别为-52.88%~52.61%、19.45%~17.94%、-6.44%~14.79%。可以发现,随着根系生长,由指数分布函数和正态分布函数推求的误差值越大,这可能是植物根系生长带来根长及根径

等级范围增加,进而导致误差增大。三个函数中,由对数正态分布函数所推求的根表面积和根体积的误差值最小,均在 20%以内,表明其计算结果更可靠,最适用于景天属植物根系特征的量化。这与 Scanlan 等^[49]的研究一致,该研究使用瑞利分布函数、威布尔分布函数和对数正态分布函数等 6 种频率分布函数推求 96 种植物根系表面积和根体积,同样发现采用对数正态分布函数计算的误差值最小。该研究还发现,由对数正态分布函数计算产生的误差值可随着根径等级划分数增多而降低,当根径等级划分数为 15 时,误差可降低至 10%以内。

表4 根表面积和根体积同实测值之间的误差值 $\varepsilon(\%)$
Table 4 Error ε between root surface area and root volume and measured value($\%$)

分布函数	根系特征	时间		
		30d	60d	90d
指数分布	A	17.82	21.43	65.47
	V	-52.88	29.28	52.61
正态分布	A	20.05	27.29	35.26
	V	19.45	13.64	17.94
对数正态分布	A	13.55	17.31	18.88
	V	14.79	-6.44	11.97

2.2 根系生长对蛭石基质水力特性的影响

对图5中30,60,90d时的水分特征数据和导水率数据进行拟合(式9、式10),相应的 Durner-Mualem 双孔模型参数值见表5。由表可知,不含植物根系纯蛭石基质参数值为: θ_r 为 $0.006\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 、 θ_s 为 $0.669\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 、 α_1 为 0.1553、 α_2 为 0.0068、 n_1 为 1.518、 n_2 为 2.698、 w 为 0.408、 K_s 为 143.7cm/d 。含植物根系蛭石基质 θ_r 相较于不含植物根系情形均有所增加,且在根系生长阶段一直增大,于 90d 时达最大值 $0.020\text{cm}^3/\text{cm}^3$;而 θ_s 则增加或减少,在根系生长阶段一直减小,于 90d 时达最小值 $0.653\text{cm}^3/\text{cm}^3$; α_1 或增加或减少,在根系生长阶段先减小后增大,60d 时有最小值 0.1152; α_2 均减少,且在根系生长阶段一直减小,于 90d 时达最小值 0.0041。 n 值大小可以反映蛭石基质孔隙分布的均匀性, n 值增加,表明蛭石基质孔隙分布趋于均质化。表5数据说明,含植物根系蛭石基质 n_1 相较于不含植物根系情形(1.518)均有所增加,在根系生长阶段先增大后减小; n_2 均减少,在根系生长阶段先减小后增大,以上结果表明含植物根系后,蛭石基质中大孔孔隙分布趋于均匀、小孔孔隙分

布的不均匀性增加.含植物根系蛭石基质 w 相较于不含植物根系情形(0.408)均有所增加,即含植物根系后蛭石基质中大孔区域增加;在根系生长阶段 w 一直减小,于 90d 时达最小值 0.509.含植物根系蛭石基质 K_s 相较于不含植物根系情形(143.7cm/d)均有所增加,这可能是含植物根系后,根系会通过占据、创造蛭石基质孔隙等方式增大蛭石基质内大孔隙,

导致 K_s 增加;在根系生长阶段 K_s 先减小后增大,60d 时有最小值 268.0cm/d,这可能是因为该生长阶段下根系通过形成团聚体、堵塞孔隙和颗粒重组等方式减小蛭石基质内大孔隙,导致 K_s 相较于 30d 时降低^[50];而 90d 时 K_s 相较于 60d 时增大,这可能是 90d 时生长形成了更大径级的粗根以至于蛭石基质中大孔隙增大,进而导致 K_s 增加.

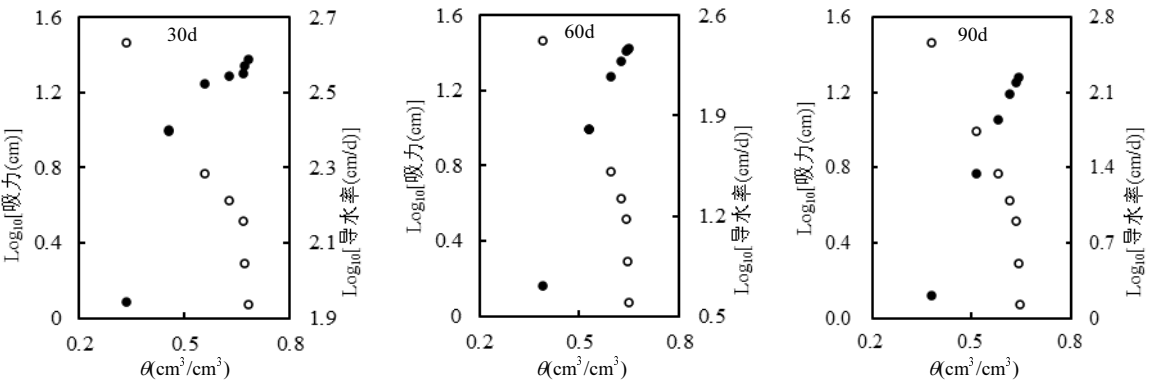


图 5 含植物根系蛭石基质水力特性数据
Fig.5 Hydraulic propertie dates of vermiculite substrate containing plant root
○ 吸力 ● 导水率

表 5 蛭石基质 Durner-Mualem 双孔模型水力特性参数值
Table 5 Hydraulic propertie parameters of vermiculite substrates Durner-Mualem model

组别/时间	$\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	α_1	α_2	n_1	n_2	w	$K_s(\text{cm/d})$
无	0.006	0.669	0.1553	0.0068	1.518	2.698	0.408	143.7
30d	0.009	0.686	0.2089	0.0116	2.256	2.369	0.532	379.4
60d	0.012	0.659	0.1152	0.0045	2.549	1.653	0.523	268.0
90d	0.020	0.653	0.1237	0.0041	2.001	2.332	0.509	336.7

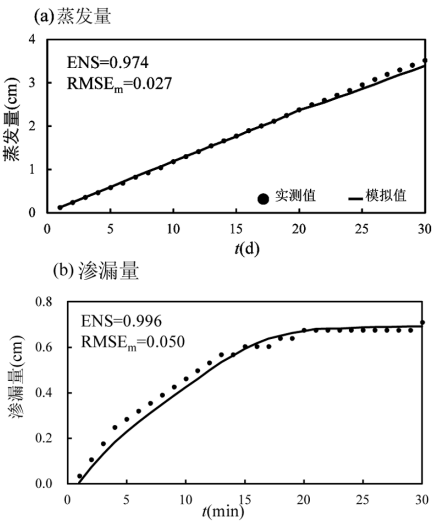


图 6 含植物根系蛭石基质水力特性参数的模拟验证
Fig.6 Simulation and verification of hydraulic propertie parameters of vermiculite substrates containing plant roots
● 实测值 — 模拟值

对所求的含植物根系蛭石基质水力特性参数值在 HYDRUS-1D 中进行模拟验证,结果如图 6 所示.其中累积蒸发量 ENS 为 0.996、RMSE_m 为 0.050;第 5 次浇水产生的渗漏量 ENS 为 0.974、RMSE_m 为 0.027.相关 ENS 值均大于 0.8、RMSE_m 值均小于 0.05,该结果表明所求的含植物根系蛭石基质水力特性参数结果可靠.

2.3 武汉市典型丰水年绿色屋顶水分运移规律分析

使用 HYDRUS-1D 模拟武汉市典型丰水年中绿色屋顶含/不含植物根系蛭石基质于四个季节的蒸发量和渗漏量.对于蒸发量而言,如图 7 所示,不含植物根系蛭石基质春、夏、秋、冬四季蒸发量范围分别为 0.126~0.160, 0.218~0.258, 0.071~0.116, 0.053~0.090cm/d;季节内蒸发量平均值分别为 0.144, 0.236, 0.092, 0.070cm/d;季节内蒸发量分别为 13.267,

21.781, 8.364, 6.150cm;一年内蒸发总量为 49.762cm. 含植物根系蛭石基质春、夏、秋、冬四季蒸发量范围分别为 0.121~0.160, 0.214~0.250, 0.061~0.113, 0.045~0.084cm/d;季节内蒸发量平均值分别为 0.138, 0.230, 0.084, 0.063cm/d;季节内蒸发量分别为 12.676, 21.141, 7.619 和 5.685cm;一年内蒸发总量为 47.121cm.对比发现,四个季节中含植物根系蛭石基质蒸发量相较于不含植物根系情形,分别减少了 4.46%、2.94%、8.91%和 7.56%.现有文献表明,土壤蒸发量随种植植物的叶面面积^[51-53]和生物量^[54]的增加而减少,这可能是植物茎叶生长减小了蛭石基质表面与大气接触面积,降低了蛭石基质热通量,阻碍了蛭石基质水分蒸发,导致含植物根系蛭石基质蒸发量更小.

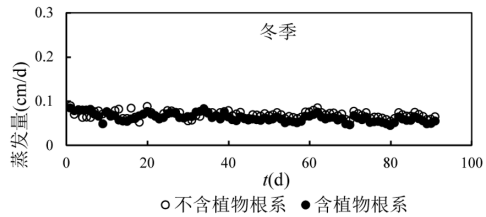
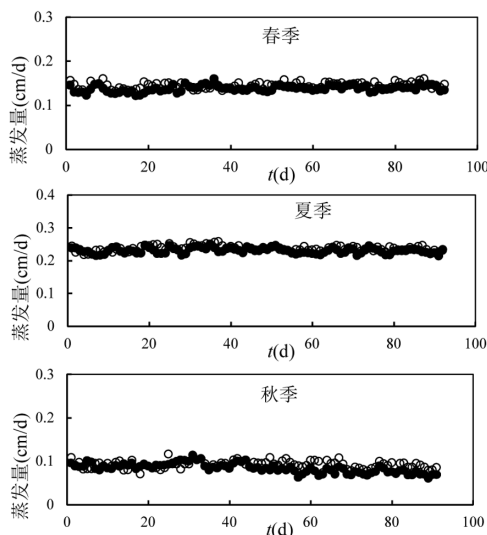


图7 武汉市典型丰水年蒸发量模拟结果

Fig.7 Simulation results of annual evaporation of typical wet years in Wuhan

如图 8、表 6 所示,不含植物根系蛭石基质单日最大渗漏量为 18.517cm;春、夏、秋、冬四季渗漏量分别为 35.168, 79.219, 8.149, 7.875cm;一年内渗漏总量为 130.411cm.含植物根系蛭石基质单日最大渗漏量为 18.990cm;春、夏、秋、冬四季渗漏量分别为 35.926, 80.421, 9.282 和 8.799cm;一年内渗漏总量为 134.428cm.武汉市典型丰水年降雨量为 173.63cm,其中春季和夏季降雨量(46.29, 98.30cm)明显多于秋季和冬季降雨量(15.96, 13.08cm),单日最大降雨量出现在夏季 7 月 5 日,为 19.059cm,该降雨条件下产生了蛭石基质单日最大渗漏量.对比发现,含植物根系蛭石基质单日最大渗漏量相较于不含植物根系情形增大 2.6%,可能是因为植物根系生长改变了蛭石基质原有孔隙结构,使蛭石基质内水分运移路径发生改变^[27],导致含植物根系蛭石基质渗漏量更大.截流率为降雨量和渗漏量之差与降雨量之比,可以反映蛭石基质对雨水的截流能力^[55].

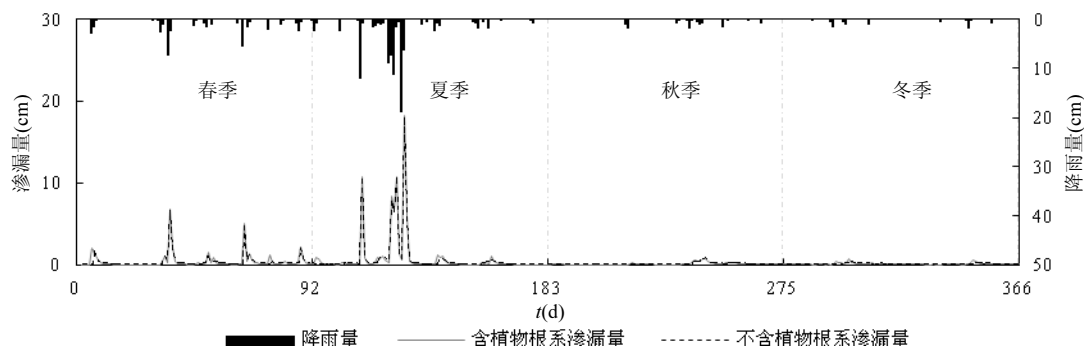


图8 武汉市典型丰水年渗漏量模拟结果

Fig.8 Simulation results of annual leakage of typical wet years in Wuhan

结果表明,不含植物根系蛭石基质四季截流率分别为 24.03%、19.41%、48.94%和 39.79%;含植物根系蛭石基质四季截流率分别为 22.39%、18.19%、

41.84%和 32.79%.含/不含植物根系蛭石基质均表现出春夏两季截流率低于秋冬两季截流率,这是由于春夏降雨量高于秋冬降雨量,而截流率会随着降雨

量增加而减少^[56],因此春夏截流率较低.对比发现,含植物根系蛭石基质四季的截流率相较于不含植物根系情形分别减少 1.64%、1.22%、7.10%、7.06%,即季节中降雨量越大,含/不含植物根系蛭石基质截流率差别越不明显.由表 6 可知,对于蒸发量而言,含/不含植物根系蛭石基质均表现为春夏季大于秋冬季,而对于截流率而言,含/不含植物根系蛭石基质则表现为春夏季小于秋冬季,即在春夏/秋冬季表现出蒸发量大时截流率小.

表 6 不同季节蛭石基质蒸发量和渗漏量结果分析

Table 6 Analysis of evaporation and leakage of vermiculite substrates in different seasons

组别	生长阶段	蒸发量(cm)	降雨量(cm)	渗漏量(cm)	截流率(%)
无植物组	春	13.267	46.29	35.168	24.03
	夏	21.781	98.30	79.219	19.41
	秋	8.364	15.96	8.149	48.94
	冬	6.150	13.08	7.875	39.79
植物组	春	12.676	46.29	35.926	22.39
	夏	21.141	98.30	80.421	18.19
	秋	7.619	15.96	9.282	41.84
	冬	5.685	13.08	8.799	32.79

3 结论

3.1 含佛甲草植物根系蛭石基质中,随着根系生长根系根长密度、根表面积密度和根体积密度均表现为 90d 值明显大于 30, 60d 时对应值,分别为 $8.39\text{mm}/\text{cm}^3$ 、 $10.74\text{mm}^2/\text{cm}^3$ 、 $2.09\text{mm}^3/\text{cm}^3$.在 30, 60, 90d 时均有 0.01~0.02cm 根径等级下的根长值最大,分别占总根长的 74.09%、41.68%、30.60%.由对数正态分布函数所推求的佛甲草根系在 30, 60, 90d 时的根表面积和根体积 ε 值均小于 20%,表明其适用于景天属植物佛甲草根系特征的量化.

3.2 含佛甲草植物根系蛭石基质中,其 Durner-Mualem 双孔模型水力特性参数值 θ_r 、 n_1 、 w 和 K_s 相较于不含植物根系情形均增加、 α_2 和 n_2 减少、 θ_s 和 α_1 则增加或减少;在根系生长阶段 θ_r 持续增大、 θ_s 、 α_2 和 w 持续减小、 α_1 、 n_2 和 K_s 则先减小后增大、 n_1 先增大后减小.在 HYDRUS-1D 中对上述参数值进行模拟验证的结果显示,ENS 值均大于 0.8, RMSE_m 值均小于 0.05,表明上述参数值结果可靠.

3.3 水分运移模拟结果表明,武汉市典型丰水年绿色屋顶含植物根系蛭石基质春、夏、秋、冬四季蒸

发量分别为 12.676, 21.141, 7.619 和 5.685cm,渗漏量分别为 35.926, 80.421, 9.282 和 8.799cm,截流率分别为 22.39%、18.19%、41.84%和 32.79%.相较于不含植物根系情形,含植物根系情形蒸发量分别减少 4.46%、2.94%、8.91%和 7.56%,截流率分别减少 1.64%、1.22%、7.10%、7.06%.

参考文献:

- [1] 赵银兵,蔡婷婷,孙然好,等.海绵城市研究进展综述:从水文过程到生态恢复 [J]. 生态学报, 2019,39(13):4638-4646.
Zhao Y B, Cai T T, Sun R H, et al. Review on sponge city research: from hydrological process to ecological restoration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(13):4638-4646.
- [2] 李家科,刘增超,黄宁俊,等.低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展 [J]. 干旱区研究, 2014,31(3):431-439.
Li J K, Liu Z C, Huang N J, et al. Advance in the study on bioretention technology for low-impact development [J]. Arid Zone Research, 2014,31(3):431-439.
- [3] 刘 爽.武汉地区绿色屋顶对雨水径流控制研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
Liu S. Research on rainfall runoff control of green roof in wuhan [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [4] 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.
Deng C L, Li J K, Li H E. Research advances in application of green roof to management of urban storm-water runoff [J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(3):141-150.
- [5] Kolb W, Schwarz T. Dachbegrünung intensiv und extensive [M]. Stuttgart:Eugen Ulmer, 1999.
- [6] 张彦婷.上海市拓展型屋顶绿化基层对雨水的滞蓄及净化作用研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2015.
Zhang Y T. Research on stormwater retention and purification by extensive green roof media in Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [7] Beecham S, Razzaghmanesh M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate [J]. Water Research, 2015,70(C):370-384.
- [8] Czemieli J, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. Ecological Engineering, 2008,30(2): 369-380.
- [9] VanWoert N D, Rowe D B, Andresen J D, et al. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. [J]. Journal of Environment Quality, 2005,34(3):1036-1044.
- [10] Zhang Z, Szota C, Fletcher T D, et al. Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention [J]. Science of the Total Environment, 2018,625:775-781.
- [11] Skorobogato V A, He J, Chu A, et al. The impact of media, plants and their interactions on bioretention performance: A review [J]. Science of the Total Environment, 2020,715:136918.
- [12] 肖宏彬,赵 亮,李珍玉,等.基于 Weibull 分布的根土复合体抗剪强度试验研究 [J]. 公路工程, 2014,39(5):1-5,20.

- Xiao H B, Zhao L, Li Z Y, et al. Experimental study on shear stress of root-soil composite based on weibull distribution [J]. Highway Engineering, 2014,39(5):1-5,20.
- [13] 肖宏彬,赵 亮,李珍玉,等.香根草根系的分布形态及抗拉强度试验研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014,34(3):6-10.
- Xiao H B, Zhao L, Li Z Y, et al. Experimental study on Vetiveria zizanioides root system distribution and tensile strength [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014,34(3):6-10.
- [14] Hemmer P C, Hansen A, Pradhan S. Rupture processes in fibre bundle models [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [15] 陈 能,肖宏彬,李珍玉,等.香根草根系形态分布模型研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015,35(12):87-94.
- Chen N, Xiao H B, Li Z Y, et al. Experimental study on morphology fractal model of vetiveria roots [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015,35(12):87-94.
- [16] 田耀华,岳 海,龙云锋,等.FracRoot 模型在橡胶树根系研究上的应用初探 [J]. 热带作物学报, 2012,33(1):33-36.
- Tian Y H, Yue H, Long Y F, et al. Application of the FracRoot Model in the root study of rubber tree species [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012,33(1):33-36.
- [17] 潘天辉,杜 峰,王 月.陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析 [J]. 水土保持研究, 2020,27(3):357-363,371.
- Pan T H, Du F, Wang Y. Analysis of root distributions and shear strengths of slope protection plants in the loess region of Northern Shaanxi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(3): 357-363,371.
- [18] Page E R, Gerwitz A. Mathematical models, based on diffusion equations, to describe root systems of isolated plants, row crops, and swards [J]. Plant & Soil, 1974,41(2):243-254.
- [19] Vijayaraghavan K, Joshi U M, Balasubramanian R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs [J]. Water Research, 2011, 46(4):1337-1345.
- [20] Harper G E, Limmer M A, Showalter W E, et al. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA [J]. Ecological Engineering, 2015,78:127-133.
- [21] Chenot J, Gaget E, Moirardeau C, et al. Substrate composition and depth affect soil moisture behavior and plant-soil relationship on mediterranean extensive green roofs [J]. Water, 2017,9(11):817-833.
- [22] Griffin W N, Cohan S M, Lea C J D, et al. Green roof substrate composition affects phedimus kamtschaticus growth and substrate water content under controlled environmental conditions [J]. HortScience, 2017,52(2):320-325.
- [23] 陈 雨,陈 璇,刘瑞芬.基于 HYDRUS-1D 模型的植物根系对人工基质水分特征曲线参数的影响 [J]. 环境科学学报, 2022,42(8): 325-336.
- Chen Y, Chen X, Liu R F. Effect of plant roots on water characteristic curve parameters of artificial substrate based on HYDRUS-1D model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(8):325-336.
- [24] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils [J]. Geoderma: An International Journal of Soil Science, 2008,145(1/3):295-302.
- [25] 谭学进,穆兴民,高 鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响 [J]. 中国环境科学, 2019,39(2):713-722.
- Tan X J, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the loess plateau [J]. China Environmental Science, 2019,39(2):713-722.
- [26] 鲁建荣,张 奇,李云良,等.鄱阳湖典型洲滩湿地植物根系对水分垂向通量的影响 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):2180-2189.
- Lu J R, Zhang Q, Li Y N, et al. Impact of typical plant roots on vertical soil water movement in Poyang Lake Wetland: a numerical study [J]. China Environmental Science, 2020,40(5):2180-2189.
- [27] 陈 璇.景天属植物根系对绿色屋顶人工基质优先流运移影响 [D]. 武汉:湖北工业大学, 2022.
- Chen X. Effect of Sedum roots on preferential flow transport of artificial substrates on green roofs [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2022.
- [28] Liu R, Fassman-Beck E. Hydrologic response of engineered media in living roofs and bioretention to large rainfalls: experiments and modeling [J]. Hydrological Processes, 2017,31(3):556-572.
- [29] Hiltner R N, Lawrence T M, Tollner E W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D [J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(3):288-293.
- [30] Chen X, Liu R F, Liu D F, et al. Analysis of preferential flow in artificial substrates with sedum roots for green roofs: Experiments and modeling [J]. Water, 2023,15(914):1-21.
- [31] Šimůnek J, Genuchten M T, Šejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes [J]. Vadose Zone Journal, 2008,2(7):587-600.
- [32] 段锦兰,付宝春,康红梅,等.景天属植物引种及繁殖技术研究 [J]. 山西农业科学, 2013,41(12):1344-1346.
- Duan J L, Fu B C, Kang H M, et al. Studies on Introduction and Propagation of Sedum Plants [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2013,41(12):1344-1346.
- [33] Liu R, Stanford R L, Deng Y, et al. The influence of extensive green roofs on rainwater runoff quality: a field-scale study in southwest China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(12): 12932-12941.
- [34] 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.
- [35] Vijayaraghavan K, Joshi U M. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs [J]. Environmental Pollution, 2014,194(7):121-129.
- [36] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准 [S].
- [37] 王愿斌,王佳铭,樊媛媛,等.土壤水分特征曲线模型模拟性能评价 [J]. 冰川冻土, 2019,41(6):1448-1455.
- Wang Y B, Wang J M, Fan Y Y, et al. [J]. Performance evaluation of 12models describing the soil water retention characteristics Journal of Glaciology and Geocryology, 2019,41(6):1448-1455.
- [38] 胡传旺,王 辉,刘 常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析 [J]. 水土保持学报, 2017,31(2):97-102.
- Hu C W, Wang H, Liu C, et al. Difference analysis of hydraulic characteristics of typical soils in South China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(2):97-102.
- [39] 胡钜鑫,虎胆·吐马尔白,穆丽德尔·托伙加,等.非饱和土壤导水率试

- 验计算与模拟分析 [J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2019,37(1): 105-111.
- Hu J X, Hudan T, Mulideer T, et al. Analysis about the measurement and the simulation of unsaturated soil hydraulic conductivity [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019,37(1):105-111.
- [40] Emmanuel T, Sebastien S, Fabien H, et al. Diffusion of water through the dual-porosity swelling clay mineral vermiculite [J]. Environmental Science Technology, 2018,52(4):1899-1907.
- [41] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976,12(3): 513-522.
- [42] Durner W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure [J]. Water Resources Research, 1994, 30(2):211-223.
- [43] Scanlan C, Hinz C. Insight into the processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties [A]//Gilkes R J, Prakongkep N. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world [C]. Brisbane: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2010:179-182.
- [44] Liu R, Fassman-Beck E. Pore structure and unsaturated hydraulic conductivity of engineered media for living roofs and bioretention based on water retention data [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018,23(3):4017065.
- [45] 徐宇程,朱首贤,张文静,等.长江大通站径流量的丰平枯水年划分探讨 [J]. 长江科学院院报, 2018,35(6):19-23.
- Xu Y C, Zhu S X, Zhang W J, et al. Classification of high /medium /low flow year of the Yangtze River according to runoff at Datong Station [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018,35(6):19-23.
- [46] 孙文超.DeST 典型年数据在天津地区建筑采光模拟中的适用性研究 [D]. 天津:天津大学, 2018.
- Sun W C. Applicability study on DeST typical meteorological year data for daylight simulation of buildings in Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [47] 任利东,黄明斌.砂性层状土柱蒸发过程实验与数值模拟 [J]. 土壤学报, 2014,51(6):1282-1289.
- Ren L D, Huang M B. Experiment and numerical simulation of soil evaporation from layered sandy soil columns [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014,51(6):1282-1289.
- [48] 燕 辉,刘广全,李红生.青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化 [J]. 应用生态学报, 2010,21(11):2763-2768.
- Yan H, Liu G Q, Li H S. Changes of root biomass, root surface area, and root length density in a Populus cathayana plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(11):2763-2768.
- [49] Scanlan C A, Hinz C. Using radius frequency distribution functions as a metric for quantifying root systems [J]. Plant and Soil, 2010, 332(1/2):475-493.
- [50] Lu J, Zhang Q, Werner A D, et al. Root-induced changes of soil hydraulic properties—A review [J]. Journal of Hydrology, 2020, 589:125203.
- [51] 艾鹏睿,马英杰,马 亮.干旱区滴灌枣棉间作模式下枣树棵间蒸发的变化规律 [J]. 生态学报, 2018,38(13):4761-4769.
- Ai P R, Ma Y J, Ma L. Study on evaporation variation of jujube trees under drip irrigation of jujube and cotton intercropping in an arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(13):4761-4769.
- [52] 吴友杰,杜太生.西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因子分析 [J]. 农业工程学报, 2020,36(12):110-116.
- Wu Y J, Du T S. Evaporation and its influencing factors in farmland soil in the arid region of Northwest China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(12):110-116.
- [53] 胡 岸,陈东辉,王亚钊,等.覆砂对滨海盐碱土水盐分布及蒸发特性的影响研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023,(8):217-221,228.
- Hu A, Chen D H, Wang Y Z, et al. Influence of sand covering on water-salt distribution and evaporation characteristics of coastal saline-alkaline soil [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023,(8): 217-221,228.
- [54] 刘志伟,李胜男,张寅生,等.青藏高原高寒草原土壤蒸发特征及其影响因素 [J]. 干旱区资源与环境, 2019,33(9):87-93.
- Liu Z W, Li S N, Zhang Y S, et al. Evaporation characteristics of alpine meadow in Tibetan Plateau and the influencing factors [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,33(9):87-93.
- [55] 李俊生,尹海伟,孔繁花,等.绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 [J]. 环境科学, 2019,40(4):1803-1810.
- Li J S, Yin H W, Kong F H, et al. Effects of a green roof on stormwater regulation and cost-benefit analysis [J]. Environmental Science, 2019,40(4):1803-1810.
- [56] 郑美芳,邓 云,刘瑞芬,等.绿色屋顶屋面径流量水质影响实验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2013,47(10):1846-1851.
- Zheng M F, Deng Y, Liu R F, et al. Influence of two green roofs on runoff quantity and quality [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013,47(10):1846-1851.

作者简介: 陈 雨(1997-),女,四川乐山人,湖北工业大学硕士研究生,主要从事低影响开发技术及水文数值模拟方向的研究.发表论文 1 篇.chenyu_o828@163.com.