

■ 灌溉技术与装备 ■

文章编号: 1672-3317(2022)06-0055-09

蓄雨屋顶超纤渗灌系统土壤含水率分布特征

王志强^{1,2,3}, 黄思宇^{2,4}, 潘昶江^{2,4}, 张清涛^{1,2,3*}

(1.中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2.中山大学 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州 510275; 3.广东省海洋土木工程重点实验室, 广东 珠海 519082; 4.中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要:【目的】灌溉难是城市绿色屋顶发展的一个重要限制因素。为了克服屋顶灌溉难题, 本文提出了一种新型的自动节水渗灌技术, 即超细纤维毛细芯渗灌(超纤渗灌)。【方法】通过屋顶试验研究了该渗灌系统的土壤含水率分布特征, 并评估了方向盘式超纤渗灌、环状超纤渗灌、直芯超纤渗灌的灌水均匀度。【结果】土壤含水率按照方向盘式超纤渗灌、环状超纤渗灌、直芯超纤渗灌方式递减, 且 3 种超纤渗灌的平均土壤含水率比无渗灌高出 46.7%。环状超纤渗灌与方向盘式超纤渗灌的克里斯琴森均匀系数 CU_C 相差不大。方向盘式超纤渗灌平台以及环状超纤渗灌平台土壤含水率高于 5% 的时间大于 95%。供水半径为 25、20、15、10 cm 和 5 cm 处, 环状超纤渗灌比直芯超纤渗灌 CU_C 分别高 1.6%、4.2%、4.8%、4.3% 和 9.3%。【结论】超纤渗灌供水能力良好, 具备自动灌溉、提高以及稳定土壤含水率的能力, 将会缓解屋顶植被缺水干旱现象并促进绿色屋顶的健康运行。

关键词: 超纤渗灌; 土壤含水率; 供水均匀度; 克里斯琴森均匀系数; 屋顶灌溉

中图分类号: S27

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2020027

OSID:



王志强, 黄思宇, 潘昶江, 等. 蓄雨屋顶超纤渗灌系统土壤含水率分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 55-63.

WANG Zhiqiang, HUANG Siyu, PAN Changjiang, et al. The Efficacy of Microfiber Capillary Wicking Irrigation System for Improving Soil Water Distribution in Green Roofs[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 55-63.

0 引言

【研究意义】绿色屋顶是低影响开发的重要措施, 对雨水径流控制管理^[1]、城市水质改善^[2]、节能降噪、缓解城市热岛效应^[3]均至关重要。水分是影响屋顶植物生长的主要环境因素, 仅依靠土壤蓄存雨水无法满足植物正常生长需求^[4-5], 即使在华南地区的绿色屋顶植物也会遭受严重的水分胁迫以及死亡风险^[6]。因此, 在有限的水资源条件下, 实现节水灌溉技术与屋顶绿化的有机结合, 是推广屋顶绿化的重要保证条件。

【研究进展】屋顶绿化现有的灌溉方式大致分为传统灌溉与智能灌溉, 传统灌溉方式主要有喷灌、滴灌、渗灌^[7]。Sun 等^[3]开发了一套智能灌溉模块, 发现智能灌溉绿色屋顶可以提高屋顶热性能、增强绿色屋顶蒸散发, 但灌溉成本很高。在欧洲国家, 屋顶滴灌应用很广泛^[8-9], 但成本较高且滴头易堵塞。喷灌

虽然可以改善屋顶小气候但受风影响很大且容易造成屋顶积水, 进而应用受限^[10]。国外的绿色屋顶也流行垫管灌溉^[11], 即将土工织物缠绕在管道上, 连接一个垫子, 将其埋在植物根部, 类似于芯吸。渗灌已经被应用于屋顶绿化中, 但渗灌技术目前主要受限于渗灌管的堵塞问题^[12]。谭圣林等^[13]研究发现, 目前渗灌也容易在根区形成点源局部灌溉, 造成土壤含水率分布不均匀。超细纤维毛细芯(超纤, Microfiber Capillary Wicking, MCW)渗灌技术利用超纤连接水源和土壤层, 受到土壤—植物耦合诱导, 借助毛细管力克服重力和土壤水势梯度缓慢而持续的浸润土壤, 实现生产函数高利用率自动调节供水^[14-17]。超纤渗灌不耗能、解决渗灌管道堵塞问题、减少土壤无效蒸发、不会导致土壤硬化, 具有广阔的应用前景。孙伊博等^[18]在宁夏田间葡萄试验发现超纤渗灌比沟灌能更有效地降低水分胁迫, 从而增加产量、含糖量、糖酸比和花色苷量。

【切入点】在屋顶绿化中, 传统灌溉方式大多耗时费力、能耗大、不能按需灌水。其智能灌溉方式虽然避免人工管理, 实现精准、精量、及时灌溉, 但技术复杂、普及困难、首次投入成本高。蓄雨屋顶超纤

收稿日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31470707, 31270748); 深圳市科技研发资金基础研究项目(JCYJ20150331160617771); 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室开放基金项目(武汉大学)(2020-05)

作者简介: 王志强, 男, 硕士研究生, 研究方向为水资源高效利用。

E-mail: wangzhq63@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 张清涛, 男, 副教授, 研究方向为水资源高效利用。

E-mail: zhangqt6@mail.sysu.edu.cn

渗灌不失为一种简单、性价比高、能够存储替代灌溉源(如雨水或灰色水)进行自动调控供水的优选灌溉方式。但目前尚不清楚蓄雨屋顶超纤渗灌的土壤含水率分布特征、灌水均匀度及其灌溉能力。

【拟解决的问题】灌水均匀度是检测和评判灌溉系统设计好坏的重要依据,也是进行系统管理的基础,还可作为诊断系统设施完好与否的重要参考^[19-20]。为了有效评估灌水均匀度,需要采用合适的灌溉评估指标。常用的指标有克里斯琴森均匀系数(CU_C)、分布均匀系数(D_U)、赫尔曼—海因均匀系数(CU_H)以及灌溉变异系数(C_V)。因此本研究基于对蓄雨屋顶3种不同结构(方向盘式、环状、直芯)超纤渗灌均匀性的研究,通过土壤含水率分布情况评估超纤渗灌的灌溉能力,为超纤渗灌在屋顶绿化的设计和运行推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验布置

超纤渗灌试验设置在广州市中山大学校园屋顶(23.092°N, 113.301°E, 100.7 kPa; 高程 10 m),位置开阔,屋面搭建小型气象站。屋顶平均温度在19.2~25.3℃之间变化;最冷月份为1月,月平均最低温度为15.6℃,7月平均温度为32.8℃;年降雨量大约为1700 mm,年降雨时间超过165 d,集中降雨时间是4—9月,占全年降雨量的80%,雨热同期,降雨季节分布不均;年平均相对湿度为75.6%~79.3%。

超纤渗灌试验时间为2017年5月27日—8月29日。试验屋顶布置了4个150 cm×150 cm×50 cm的有机玻璃蓄雨平台,标号为A(方向盘式超纤渗灌平台)、B(环状超纤渗灌平台)、C(直芯超纤渗灌平台)、D(无渗灌平台)。如图1所示,4个有机玻璃蓄雨平台自上而下按植物层、15 cm 土壤层、5 cm 过滤层、10 cm 蓄雨层的垂直结构铺设^[21]。土壤层土壤基质按

园土配比,即腐殖质:河沙:草木灰:蛭石=4:3:2:1,土壤体积质量约为0.96 g/cm³,土壤pH值略小于7,田间持水率约为28%(体积含水率)。所有的蓄雨平台过滤层由1层5 cm厚的固定多孔板固定,上面铺设2层土工布,防止土壤掉入蓄水层中;另外,10 cm蓄雨层常常蓄雨不满,有几厘米的空气层,所以土壤毛细作用也无法直接从蓄水层中吸水。为了使蓄雨层支撑起挡水板以上的质量,本试验中使用陶粒填满蓄雨层。陶粒疏松多孔,具有水分吸收率大、密度小、抗压性强等特点。陶粒可以将水分吸收储存在多孔结构内,同时当蓄雨层的水干涸之后,缓慢释放出体内储存的水分供超纤渗灌使用,缩短了植被遭受干旱的时间。为了防止土壤层饱和,试验平台在过滤层上边界处设置了6个15 cm高度(直径5 mm)的排水口,因此蓄雨层能够正常蓄水。

在标号为A、B、C的有机玻璃蓄雨平台内依次分别放置土壤埋深8 cm的3个外径为16 cm的方向盘式超细纤维毛细芯(方向盘式超纤, steering wheel Microfiber Capillary Wicking, swMCW)、3个外径为16 cm的环状超细纤维毛细芯(环状超纤, cyclic annular Microfiber Capillary Wicking, caMCW)以及3个超细纤维毛细直芯(直芯超纤, straight Microfiber Capillary Wicking, sMCW),平台D内设置空白对照,不放置毛细芯(无渗灌, None)。超纤的中心间距均为50 cm。使用ML3-HH2便携式土壤水分仪(Delta-T, 英国)圆柱式防水探头分别记录距离供水轴心5、10、15、20 cm以及25 cm处的土壤含水率;以环状超纤渗灌为例,每一供水半径处实测3个数据,每个平台内测量3组(图2)。ML3-HH2便携式土壤水分仪测量范围为0~100%(体积含水率),测量精度为±1%。

试验过程中,除了刚布置完蓄雨平台时往蓄雨层补充过水分以外,其余时间只通过蓄积的雨水作为渗灌水源。

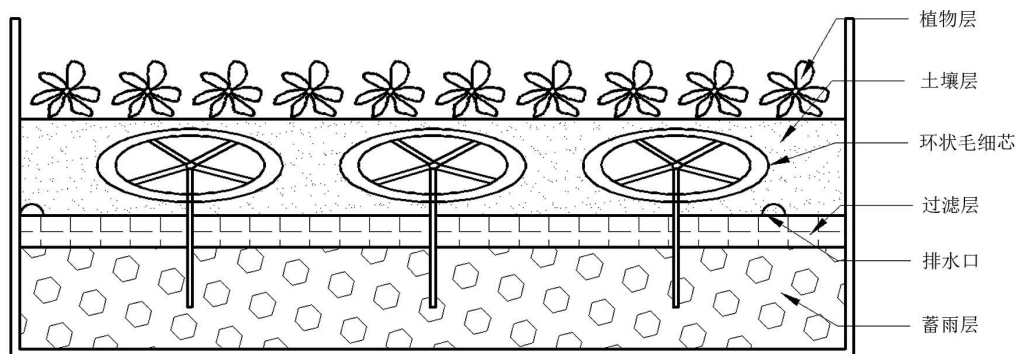


图1 有机玻璃蓄雨平台内超纤渗灌系统垂直结构剖面示意图

Fig.1 The vertical structure schematic profile of microfiber capillary wicking infiltrating irrigation in plexiglass water storage platform

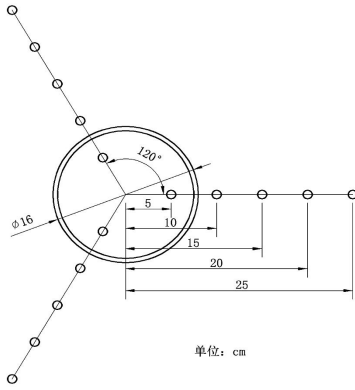


图 2 环状超纤渗灌系统水分供水半径测点布局

Fig.2 The different water supply radius test site layout in cyclic annular microfiber capillary wicking infiltrating irrigation system

1.2 灌溉均匀度基本公式

克里斯琴森均匀系数(CU_C)、分布均匀系数(D_U)、赫尔曼—海因均匀系数(CU_H)以及灌溉变异系数(C_V)是用来确定灌溉系统均匀性的常用指标。

1) 土壤含水率横向移动的均匀系数采用克里斯琴森均匀系数(CU_C)^[22]进行计算,该系数描述的是测点土壤含水率与平均土壤含水率偏差的绝对值之和与总土壤含水率的比值,可以较好地表征整个系统水量分布与平均值偏差的情况。 CU_C 计算见式(1)。

$$CU_C = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \bar{\theta}|}{\sum_{i=1}^n \theta_i} \right), \quad (1)$$

式中： θ_i 为第*i*个测点的土壤含水率(%)； $\bar{\theta}$ 为实测测点的平均土壤含水率(%)；*n*为测点数。

2) 赫尔曼—海因修正公式(CU_H)^[23]计算不同供水半径处均匀系数见式(2)。

$$CU_H = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \bar{\theta}_p| r_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i r_i} \right), \quad (2)$$

$$\bar{\theta}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (3)$$

式中：*i*为测点标识变量,通常从距离供水轴心最近的测点(*i*=1)开始,到距离供水轴心最远的测点(*i*=*n*)结束； θ_i 是第*i*个测点记录下的土壤含水率(%)； r_i 为第*i*个测点距离供水轴心的半径(cm)； $\bar{\theta}_p$ 为所有记录土壤含水率的加权平均值(%)，其计算见式(3)。

3) 与 CU_C 相比,分布均匀系数(D_U)^[24]强调了土壤含水率中的较小量,有利于获取保证植物获得必要的最小灌溉量。分布均匀系数的计算见式(4)。

$$D_U = \frac{\bar{\theta}_{lq}}{\bar{\theta}}, \quad (4)$$

式中： $\bar{\theta}_{lq}$ 为大小排列的实测土壤含水率低值的*n*/4个(*j*)测点数的平均土壤含水率(%)。

4) 变异系数(C_V)定义为标准差与平均值之比,见式(5)^[25]。

$$C_V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1}}}{\bar{\theta}}. \quad (5)$$

1.3 灌水器参数及特性

采用 HYPROP 2 (METER, 美国) 测量了试验园土与超细纤维材料的土壤水分特征曲线, 在 MATLAB 软件中利用 van Genuchten (VG) 模型进行曲线拟合, 超细纤维材料与试验园土的土壤水分特征曲线相交于点 (4.16 kPa, 0.30), 如图 3 所示。此外, 利用同种超纤设置方向盘式、环状、直芯的超纤渗吸对照试验 (表 1), 采用黑色墨水示踪, 用标尺和天平分别测量吸水高度和吸水量, 并记录渗吸时间。

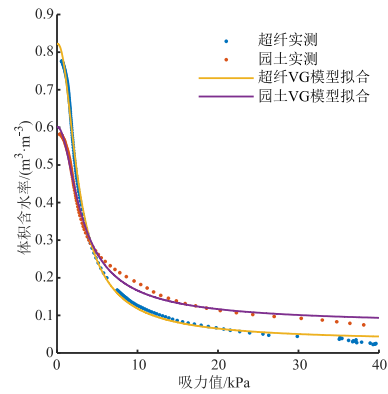


图 3 超细纤维与试验园土的土壤水分特征曲线

Fig.3 Soil-water characteristic curve of microfiber and experimental garden soil

本试验中所用的超纤最小吸水垂直高度为 31.5 cm (大于蓄水层底端到基质层顶端的高度 30 cm), 表明在蓄雨层自由水耗尽之前超纤完全湿润且吸力最大不超过 3 kPa; 且由于试验过程中园土的土壤体积分含水率很难达到 30% (对应吸力 4.16 kPa), 所以超纤的水分能够运移到园土, 完全满足试验的要求。

表 1 灌水器参数

Table 1 Parameters of seepage irrigation emitters			
参数	方向盘式超纤	环状超纤	直芯超纤
平均入渗速率/(mm·min ⁻¹)	0.61	0.55	0.54
吸水高度/cm	35.0	32.0	31.5
最大渗吸量/mL	50	35	25

2 结果与分析

2.1 超纤渗灌下的土壤含水率分布

2.1.1 土壤含水率随时间变化趋势

在初始蓄雨层蓄水量相同的条件下, 开始进行蓄雨平台裸土渗灌试验。由图 4 可知, 无渗灌平台 D 内土壤含水率变化幅度最大, 日平均土壤含水率极差为 13.8%, 受降雨影响波动最大; 而环状超纤渗灌平

台 B 变化幅度最为平缓, 日平均土壤含水率极差为 9.7%, 说明超纤渗灌有利于保持土壤含水率的稳定。就土壤含水率大小而言, 方向盘式超纤渗灌平台 A 的土壤湿度最大, 日平均土壤含水率最大值为 24.1%, 无渗灌日平均土壤含水率最小。试验期间内, 方向盘式超纤渗灌分别比环状超纤渗灌、直芯超纤渗灌以及无渗灌日平均土壤含水率高 10%、32%和 68%。超纤渗灌平台内平均土壤含水率高于 5%的时间占总时间的 97.8%, 而无渗灌平台内仅占总时间的 2/3。

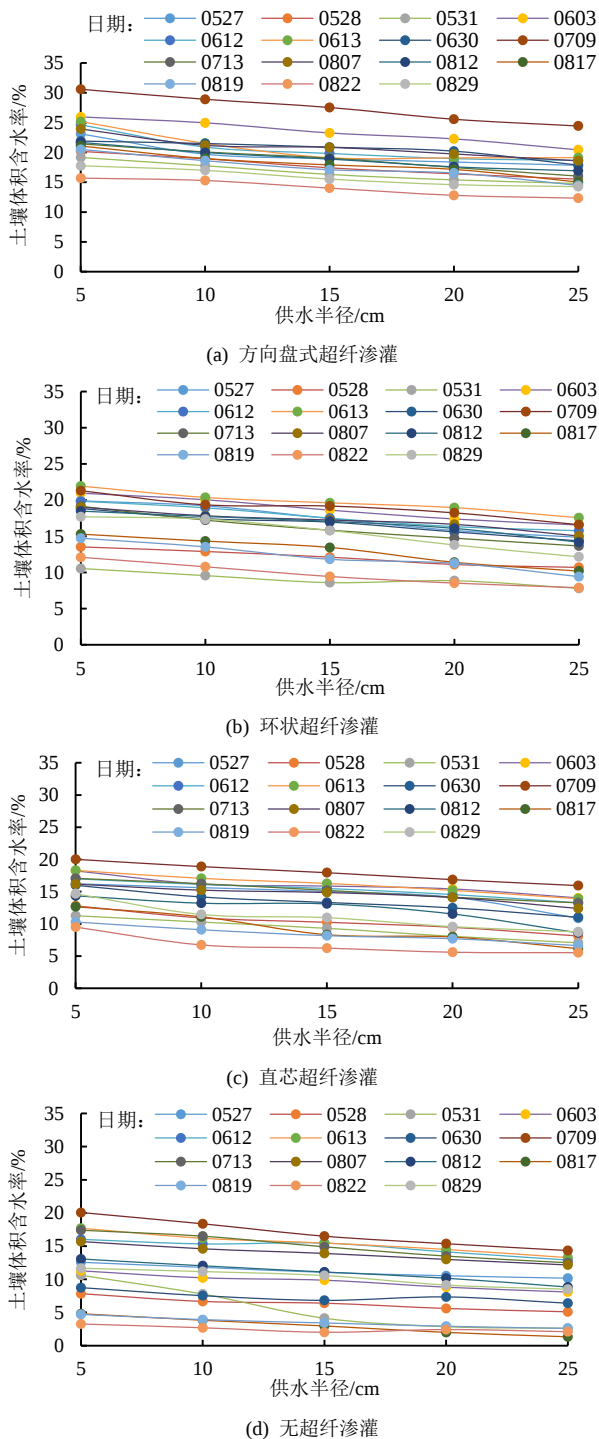


图 4 不同供水半径处日均土壤含水率分布

Fig.4 Daily soil moisture content distribution in different water supply radius

从 2017 年 5 月 26—28 日, 连续 3 d 无雨, 观测发现方向盘式超纤渗灌平台内土壤含水率下降速度最慢, 而无渗灌平台内土壤含水率下降最快, 相对于 27 日下降了 66.2%。环状超纤渗灌平台和方向盘式超纤渗灌平台内的土壤含水率下降幅度介于 35%~38%之间, 二者变化几乎一致 (图 4); 直芯超纤渗灌平台下降幅度达 45%。可见环状超纤渗灌的供水能力强于直芯超纤渗灌。直芯超纤渗灌在供水半径为 10 cm 处向外径向递减率不变, 方向盘式和环状超纤渗灌在供水 25 cm 处趋向稳定, 据此可以估计直芯超纤渗灌供水影响半径为 10 cm, 而外径为 16 cm 的方向盘式和环状超纤渗灌供水影响半径约为 25 cm (图 4)。

由图 5 可知, 2017 年 7 月的土壤体积含水率比其他月份高, 是由于 7 月降水最多。方向盘式超纤渗灌平台内土壤含水率最高, 并且明显比环状超纤渗灌高, 这是由于虽然二者的外径相等、周长相同, 但方向盘式超纤吸水扩散能力强于环状超纤。方向盘式超纤渗灌平台 2017 年 5—8 月每月平均土壤体积含水率分别达到 18.0%、21.3%、23.1%、17.5%, 比环状超纤渗灌平台、直芯超纤渗灌平台以及无渗灌平台增长 17.3%~31.2%、39.6%~69.4%、44.9%~138.5%。此外, 各月之间环状超纤渗灌平台的土壤体积含水率变化最为平缓, 而无渗灌平台各月之间水分变化最为剧烈, 由此可见, 超纤渗灌能够起到稳定土壤水分的作用。

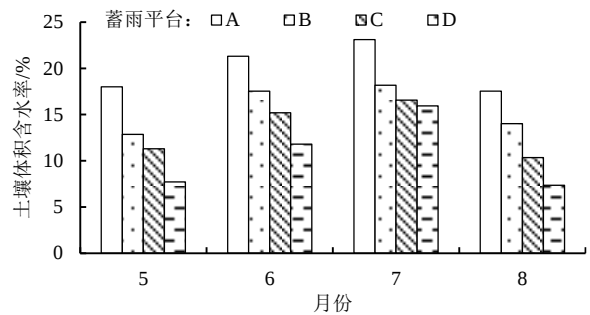


图 5 渗灌系统不同供水半径平均土壤体积含水率的影响

Fig.5 The impact of infiltrating system on mean soil moisture content in different water supply radius

有无渗灌平台土壤含水率下降率均在 8 月达到最大值, 而 7 月土壤含水率下降率达到最小值 (图 6), 一个重要原因是 7 月的降水量高于 8 月; 其中, 方向盘式超纤渗灌平台与环状超纤渗灌平台土壤含水率下降率相差较近, 方向盘式超纤渗灌平台月平均土壤含水率下降率最小, 而无渗灌平台的月平均土壤含水率下降率最大。这主要是因为 8 月的太阳辐射和气温都是试验阶段较高的, 尤其是气温达到了各月最高, 因此土壤蒸发耗水多; 而超纤渗灌会从下方蓄雨层吸取水分, 补给上方土壤层, 所以土壤含水率下降率会比无渗灌小。此外, 一定的灌溉能够增加土壤蒸发^[26]。

超纤渗灌不断吸蓄雨层的雨水至土壤层，在夏季高温及强太阳辐射作用下，蒸发导致表层土壤水分较快散失，表面土壤含水率就会出现较大的降幅。比较 5 月与 8 月的土壤含水率下降率可知，5 月与 8 月降水量相近，渗灌补给也相似，太阳辐射越强，气温越高，土壤含水率下降率越大。这也说明了，在土壤含水率相对较高的情况下，能量项成为控制土壤蒸发的主要因素^[27]。

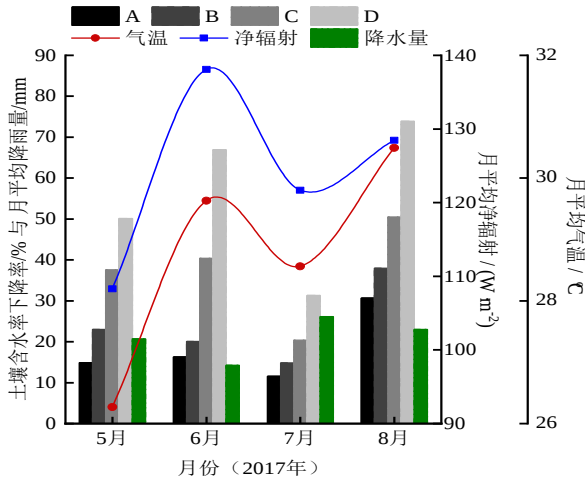


图 6 2017 年各蓄雨平台土壤含水率下降率与
各月平均降雨量、净辐射、气温

Fig.6 The decreasing rate of soil moisture content and the
mean monthly precipitation, net radiation and air
temperature in different water storage platform

2.1.2 土壤含水率水平径向分布特征

图 4 给出了不同处理土壤体积含水率随供水半径变化的水平径向分布趋势。随着供水半径减小，土壤含水率增大，这说明在超纤渗灌条件下，土壤含水率与供水半径呈负相关关系。

不同渗灌条件下，各月的土壤含水率与供水半径线性拟合后得到的拟合度 R^2 介于 0.92~0.99 之间，表现出强相关性，斜率均小于 0，各月的灌溉斜率均小于 0，这意味着各渗灌平台的径向土壤含水率均有下降趋势，随着供水半径增加，土壤含水率会减少，渗灌平台中各月的径向土壤含水率符合递减函数规律。其中，方向盘式与环状超纤渗灌平台径向土壤含水率下降趋势较大。

试验期间，环状超纤渗灌平台中，供水半径 25、20、15、10 cm 处比 5 cm 处的日均土壤含水率分别减少了 25%、18%、12%及 6%，这与方向盘式超纤渗灌径向日平均土壤含水率变化相差不大，说明相同直径大小的超纤渗灌方式供水范围相近，超纤渗灌供水影响范围与超纤自身环绕半径有关。

根据平均土壤含水率的水平分布结合试验园土的土壤水分特征曲线估算出平均土壤吸力的水平分

布（图 7），可以发现平均土壤吸力均随着供水半径的增大而增大，其受水分胁迫也越严重。相比无渗灌，超纤渗灌可以显著降低土壤吸力，且土壤吸力随供水半径增大的趋势按照直芯超纤渗灌、环状超纤渗灌、方向盘式超纤渗灌也越来越平缓。

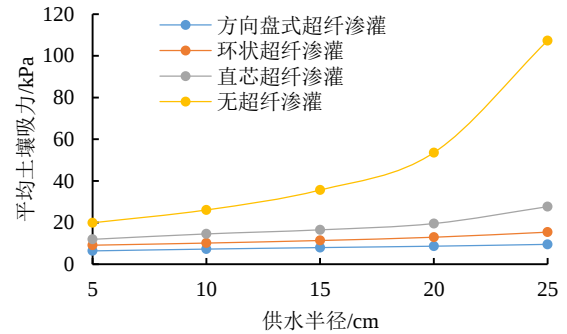


图 7 不同供水半径处平均土壤吸力分布

Fig.7 Average soil suction distribution at
different water supply radius

2.1.3 超纤渗灌下土壤含水率变化的物理过程概化

超纤渗灌的实际水分运移通量 q 取决于蒸散速率 et 与超纤对土壤的时刻水分供给能力 $q_{\max}(t)$ ，而超纤与土壤的吸力大小决定了其运移方向，当土壤吸力大于超纤吸力时，水分从超纤向土壤运移。 $q_{\max}(t)$ 与供水条件和毛细芯特性有关。当 $et \leq q_{\max}(t)$ 时，土壤水分维持稳定 ($\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$, $q = et$)，供水影响半径不变；当

$et > q_{\max}(t)$ 时，土壤水分不断减小 ($\frac{\partial \theta}{\partial t} < 0$, $q = q_{\max}(t)$)，供水影响半径逐渐减小。

试验开始时，蓄雨层中充满自由水。一方面，由于蓄雨层底部到土壤层顶部为 30 cm (<超纤最小吸水高度 31.5 cm)，在毛细管力的作用下，蓄雨层自由水耗尽之前超纤完全湿润且吸力最大不超过 3 kPa，且无水分补给情况下园土的土壤体积含水率很难达到 30% (对应吸力 4.16 kPa)，因此，水分在水势梯度的作用下开始从超纤往最远端土壤迁移，土壤水分开始增大，土壤吸力开始减小；另一方面，植物蒸腾与土壤蒸发消耗土壤水分使得土壤水势变低 (土壤吸力增大)，且土壤吸力随供水半径的增大而增大，直至 $q = et$ ，此时超纤与附近土壤的水分梯度与土壤水分均维持稳定。随着时间的不断推进，蓄水层中的水位不断下降直至自由水耗尽，陶粒开始缓慢释放水分，超纤的湿润锋面位置下降，由于超纤的土壤水分特征曲线比园土要更陡 (图 3)，因此，超纤的土壤吸力增加得更快，水势梯度不断减小， $q_{\max}(t)$ 也不断减小。当 $et > q_{\max}(t)$ 后土壤水分开始不断减小 (图 4)，供水影响半径也随之减小，直到超纤与土壤的吸力相等，此后水分通量始终为 0，与无渗灌一致。

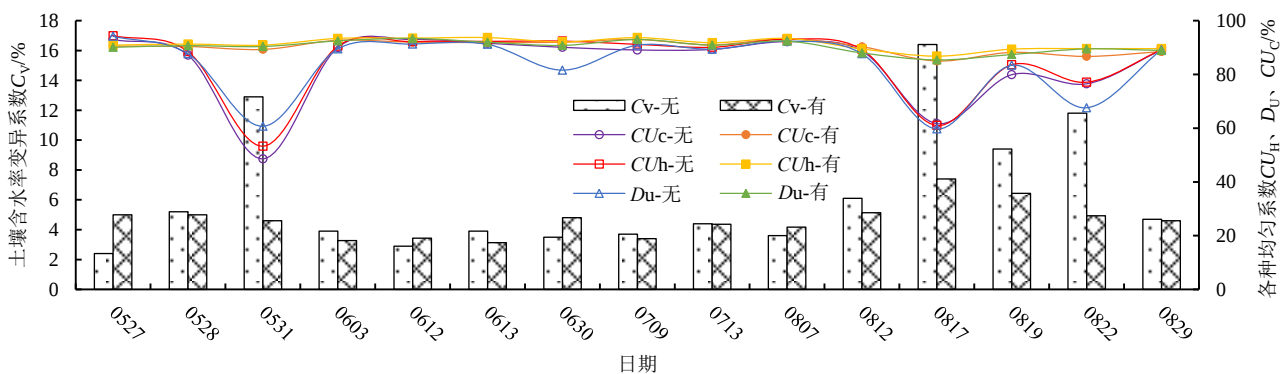
由表 1 可知, 方向盘式、环状、直芯超纤的 3 个基本参数 (平均入渗速率, 吸水高度, 最大渗吸量) 依次减小, 因此在相同条件下 $q_{\max}(t)$ 依次减小, 同时段内土壤含水率和供水影响半径也依次越小 (图 4), 进而土壤体积含水率分布以及灌水均匀性也不尽相同。长期作用下, 土壤含水率的差异更为显著 (图 5)。

2.2 灌溉均匀系数

为研究超纤渗灌方式的灌水均匀度, 本研究分析的灌溉变异系数以 C_V (%) 表示, 按照 Solomon^[25] 分类; 克里斯琴森均匀系数 CU_C 与分布均匀系数 D_U 按照 Paulo 总结的分类^[28] 来计算分析。分别根据 CU_C 、 D_U 与 C_V 的值划分为“Excellent”(>90%、>84%、<3%)、“Good” (80%~90%、68%~84%、5%~7%)、“Average” (70%~80%、52%~68%、8%~10%)、“Poor” (60%~70%、36%~52%、11%~14%)、“Unacceptable” (<60%、<36%、>15%) 5 个等级。

方向盘式超纤渗灌、环状超纤渗灌、直芯超纤渗灌的日平均 CU_C 值分别介于 89.9%~94.4%、85.8%~93.9%、77.1%~92.9% 之间, 而无渗灌的 CU_C 值介于 48.6%~93% (图 8)。 CU_C 值达到“Excellent”级别的天数, 方向盘式、环状、直芯超纤渗灌以及无渗灌分别占总时间的 93%、60%、40% 和 40%; 达到“Good”级别的天数, 方向盘式与环状超纤渗灌均占 100%, 直芯超纤渗灌占 93.3%, 而无渗灌仅占 73.0%。由此可知, 方向盘与环状超纤渗灌土壤水分受天气影响较小, 渗灌均匀系数大, 能达到均匀渗灌的效果。相较而言, 直芯超纤渗灌均匀程度不如上述二者。

方向盘式超纤渗灌 CU_H 均达到“Excellent”级别,



注 “无”表示无渗灌处理; “有”表示方向盘式、环状、直芯超纤渗灌的均值, 即毛细芯渗灌

图 8 各蓄雨平台内土壤含水率均匀系数与变异系数的变化特征

Fig.8 Variation characteristics of soil moisture content uniformity coefficient and D_U in each water storage platform

由表 2 可知, 超纤渗灌径向灌溉均匀系数与供水半径呈正相关关系。所有超纤渗灌平台内, 供水半径 25 cm 处的 CU_C 值最大, 意味着此处的供水分布最均匀; 而越往供水轴心靠近, CU_C 值越小, 意味着越靠近供水轴心, 供水越不均匀。供水半径大于 25 cm 基本达到了外径为 16 cm 毛细芯渗灌的“无效距离”。

环状“Excellent”级别占 74%, 直芯所占份额不到一半, 而无渗灌有 20% 没有达到“Good”级别。由于 CU_H 描述整个超纤渗灌系统各点的渗灌水量与平均值的变差或离散程度, CU_H 越高, 灌溉均匀度越好。

方向盘式超纤渗灌和环状超纤渗灌的灌溉变异系数 C_V 分别最大为 5.3%、5.9%, 均控制在 6% 以内, 二者 C_V 值为“Good”级别, 直芯超纤渗灌 C_V 值突破了 10%, 这是因为直芯超纤渗灌供水范围较前二者的灌溉范围较小, 超过一定的供水半径, 各测点土壤含水率与平均土壤含水率偏差值越大, 所以直芯超纤渗灌 C_V 值比较大, 意味着直芯超纤渗灌供水影响范围较小。而无渗灌的平台内, 达到 20% 时间的 C_V 值处于“Poor”或“Poor”级别以下, 土壤水分空间分布不均 (图 8)。最重要的是, 灌溉变异系数的大小主要取决于渗灌装置的制造精度^[29], 这也能够清楚地反映方向盘式超纤渗灌最好, 其次是环状超纤渗灌。

方向盘式超纤渗灌和环状超纤渗灌分布均匀系数 D_U 均达到了 84% 以上, 说明二者都能提供均匀的土壤水分。此外, 所有超纤渗灌的平均 D_U 基本都达到了“Excellent”水平, 而无渗灌的 D_U 值有部分属于“Average”水平。除了 5 月 27 日以及 8 月 29 日, 在不同日期内, 渗灌处理的平均 D_U 相对无渗灌最大可以高出 48.9%, 这与 2.1.1 节分析相符合。随着供水半径的减小, D_U 也会下降。接受自然雨水的无渗灌平台, 某些时候由于水量的减少, 无法满足植物正常需水要求, 进而发生干旱现象, 这也说明对绿色屋顶进行渗灌的必要性。

上的分布均匀程度略差于结构更致密的方向盘式。另外，供水半径为 5 cm 和 10 cm 处的土壤含水率相对较大，而 CU_C 值较小，主要是因为供水枢轴处水分

渗出较快，而土壤孔隙相对松散，水分尚未能及时均匀扩散所致。

表 2 不同超纤渗灌系统的径向克里斯琴森均匀系数

Table 2 Radial Christiansen uniformity coefficient in different microfiber capillary wicking infiltrating irrigation systems

日期	克里斯琴森均匀系数 CU_C /%														
	供水半径大小/cm														
	方向盘式超纤渗灌					环状超纤渗灌					直芯超纤渗灌				
	25	20	15	10	5	25	20	15	10	5	25	20	15	10	5
0327	98.8	97.0	94.1	90.5	77.2	96.1	94.1	85.2	77.4	74.7	96.6	77.0	72.4	69.6	67.1
0328	97.9	94.6	89.1	82.0	76.9	98.8	96.4	88.3	82.9	79.1	93.1	85.8	79.3	74.3	63.5
0331	98.9	96.1	90.7	83.3	77.3	99.1	88.1	90.7	81.5	74.0	98.7	87.6	75.9	68.8	62.7
0603	99.6	91.8	87.8	81.8	78.7	99.4	95.2	89.0	82.6	79.0	98.7	91.0	88.4	86.8	77.0
0612	98.8	98.4	94.1	89.3	75.8	98.0	96.5	90.1	83.3	79.5	98.3	91.1	85.7	82.3	78.0
0613	99.4	99.2	99.7	88.9	76.0	97.3	92.7	89.5	86.3	80.1	99.0	91.4	85.4	81.4	76.0
0630	93.5	88.4	85.6	83.1	81.6	98.0	92.1	84.7	82.4	76.3	94.5	88.3	82.7	77.7	68.9
0709	98.5	95.6	88.7	84.5	79.9	97.5	91.0	86.6	85.8	77.9	98.6	94.5	88.9	84.4	79.6
0713	96.8	91.7	84.2	79.9	74.8	98.4	92.8	86.3	79.3	71.4	98.3	93.9	87.3	81.7	77.7
0807	99.6	94.2	89.2	87.7	77.7	97.9	90.3	87.2	84.3	79.0	92.8	87.9	83.3	81.3	76.6
0812	99.1	96.2	89.6	84.7	78.1	98.3	88.1	83.1	79.9	76.7	99.1	74.7	65.7	65.2	60.0
0817	97.5	87.6	83.9	79.2	71.3	98.6	89.3	75.7	71.1	66.6	89.4	77.4	74.0	55.5	48.6
0819	97.8	87.4	84.6	77.7	70.5	92.4	83.5	79.7	69.6	64.0	97.1	86.0	81.1	72.9	64.4
0822	98.2	96.3	88.0	80.7	78.6	99.2	92.6	83.6	73.2	65.3	94.4	97.2	88.8	82.2	58.2
0829	98.8	97.7	91.8	83.9	80.3	98.2	88.2	77.0	70.1	68.7	95.7	91.6	79.9	76.5	59.8

3 讨论

超纤渗灌可以显著提高土壤含水率，能有效缓解干旱季节或干旱地区屋顶绿化所面临的水分胁迫。此外，超纤不断吸渗蓄雨层的雨水至土壤层，在夏季高温及强太阳辐射作用下，蒸发导致表层土壤水分较快散失，提高其蒸散发量。这与极端干旱条件下，灌溉有益于绿色屋顶的研究一致^[5]，也进一步证实了以往研究报道的环状毛细芯渗灌减轻了植物由于重度水分胁迫所受到的伤害^[18,29]。

灌溉均匀度是衡量灌溉系统设计好坏的重要依据，也是进行系统管理的基础。毛细芯超纤渗灌灌水均匀度较高，方向盘式和环状均达到“Excellent”级别，但灌水均匀度随供水半径的增加而减小。王霞玲^[17]探究的毛细透排水带渗灌管的灌水均匀度试验，其 CU_C 值均在 0.8 以上，且随供水水头的增大而增加，随供水口的距离增加也减小，表明其具有一定供水范围。值得注意的是，现阶段的研究很多都是研究灌水系统本身的灌水均匀度^[17,23,30-31]，忽略了植被与土壤的相互作用，真正意义上的灌水均匀度应该是灌溉后土壤水分分布的灌水均匀度，本文所分析的灌

水均匀度便考虑到这一点。

本文主要是在二维平面上对蓄雨屋顶 3 种不同结构的超纤渗灌土壤含水率分布特征、灌水均匀度及其灌溉能力进行了分析，土壤含水率变化的物理过程仅仅简单概化，并未详细分析其水势梯度变化过程，以及尚未展开具体毛细芯-土壤-植被-大气连续体的三维时空模拟和物理过程研究。此外，本文也并未探究不同土壤类型、毛细芯材料，不同毛细芯埋深对土壤含水率的分布与灌水均匀度的影响。

4 结论

超纤渗灌能实现绿色屋顶自动灌溉且供水能力良好，并能显著提高土壤含水率和灌水均匀度。日平均土壤含水率为方向盘式超纤渗灌>环状超纤渗灌>直芯超纤渗灌>无渗灌，但环状超纤渗灌的日平均土壤含水率变化最为平缓。超纤渗灌具有较好的供水均匀分布特征，其 CU_C 值随供水半径的增大而增大。超纤渗灌也存在一定的供水半径，其供水能力与供水半径呈负相关关系，超过供水半径后供水能力显著下降。3 种不同结构的超纤渗灌中，方向盘式超纤渗灌的灌水均匀度和供水能力最优。

参考文献:

- [1] CZEMIEL B J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351-360.
- [2] FIORETTI R, PALLA A, LANZA L G, et al. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(8): 1 890-1 904.
- [3] SUN T, BOU-ZEID E, NI G H. To irrigate or not to irrigate: Analysis of green roof performance via a vertically-resolved hygrothermal model[J]. *Building and Environment*, 2014, 73: 127-137.
- [4] NAGASE A, DUNNETT N. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(4): 318-327.
- [5] DU P Z, ARNDT S K, FARRELL C. Is plant survival on green roofs related to their drought response, water use or climate of origin?[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 25-32.
- [6] QIN H P, PENG Y N, TANG Q L, et al. A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 399-408.
- [7] 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.
- [8] CHO Y Y, CHOI K Y, LEE Y B. Effects of irrigation methods on the growth, water holding capacity of substrate and nutrient uptake of lettuce, chicory and endive grown in an extensive green roof system[J]. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 2010, 51(4): 348-354.
- [9] ROWE D B, KOLP M R, GREER S E, et al. Comparison of irrigation efficiency and plant health of overhead, drip, and sub-irrigation for extensive green roofs[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 306-313.
- [10] 盛伟. 屋顶花园节水灌溉探索[J]. *现代园艺*, 2014(3): 46-48.
SHENG Wei. Exploration of water-saving irrigation in roof garden[J]. *Xiandai Horticulture*, 2014(3): 46-48.
- [11] ZIENOWICZ R J, RI P, JUPITER J B, et al. A microsurgical suction mat[J]. *The Journal of Hand Surgery*, 1994, 19(3): 519-520.
- [12] 王雅楠, 巨关升, 刘俊祥, 等. 北京地区节水型屋顶绿化植物配置及养护[J]. *农业科技与信息(现代园林)*, 2014, 11(3): 7-11.
WANG Ya'nan, JU Guansheng, LIU Junxiang, et al. Plant configuration and maintenance of the roof greening in Beijing[J]. *Modern Landscape Architecture*, 2014, 11(3): 7-11.
- [13] 谭圣林, 张清涛, 邱国玉, 等. 渗灌技术助力水资源节约[J]. *高科技与产业化*, 2014(5): 66-69.
TAN Shenglin, ZHANG Qingtao, QIU Guoyu, et al. Infiltration irrigation technology helps save water resources[J]. *High-Technology & Industrialization*, 2014(5): 66-69.
- [14] 左宇, 李绍才. 毛细束自适应灌溉初探[J]. *节水灌溉*, 2005(5): 48-49.
ZUO Yu, LI Shaocai. Preliminary study on capillary bundle adaptive irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2005(5): 48-49.
- [15] 潘昶江. 毛细芯渗灌对蓄雨屋顶绿化及温度的影响研究[D]. 广州: 中山大学, 2018.
PAN Changjiang. Study on the influence of capillary infiltration irrigation on greening and temperature of rain storage roof[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2018.
- [16] 程定谱. 毛细芯渗灌蓄雨屋顶的绿化与热环境效应研究[D]. 广州: 中山大学, 2019.
CHENG Dingpu. Study on greening and thermal environment effect of capillary infiltration irrigation roof[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2019.
- [17] 王霞玲. 一种新型灌水器渗灌管出水均匀度试验——毛细透排水带[J]. *节水灌溉*, 2018(3): 39-41, 45.
WANG Xialing. A new type of emitters test on the uniformity of water outflow from the infiltration irrigation pipe capillary drainage belt[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(3): 39-41, 45.
- [18] 孙伊博, 张清涛, 王垚, 等. 旱区“环状毛细芯渗灌”对葡萄生长发育和果实品质的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 1-8.
SUN Yibo, ZHANG Qingtao, WANG Yao, et al. Influence research on infiltration irrigation by annular capillary wicking to growing development and fruit quality of grape in arid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 1-8.
- [19] 宰松梅, 仵峰, 温季, 等. 大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 51-57.
ZAI Songmei, WU Feng, WEN Ji, et al. Evaluation method of soil water distribution uniformity under conditions of field subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 51-57.
- [20] AL-GAADI K A, HASSABALLA A A, TOLA E, et al. Impacts of center pivot irrigation system uniformity on growth of potato crop and residual soil nitrogen[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(1): 126-131.
- [21] SHAFIQUE M, KIM R, RAFIQ M. Green roof benefits, opportunities and challenges - A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 757-773.
- [22] Christiansen J E. Irrigation by sprinkling[R]. Bulletin 670, California Agricultural Experiment Station, University of California, Berkeley, California, 1942: 123.
- [23] 赵伟霞, 李久生, 杨汝苗, 等. 田间试验评估圆形喷灌机变量灌溉系统水量分布特性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 53-62.
ZHAO Weixia, LI Jiusheng, YANG Rumiao, et al. Field evaluation of water distribution characteristics of variable rate center pivot irrigation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 53-62.
- [24] BURT C M, CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, et al. Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(6): 423-442.
- [25] SOLOMON K. Manufacturing variation of trickle emitters[J]. *Transactions of the ASAE*, 1979, 22(5): 1 034-1 038.
- [26] 孙景生. 控制性交替隔沟灌溉的节水机理与作物需水量估算方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
SUN Jingsheng. Study on water-saving mechanism and calculating methods of crop water requirement in controlled alternative furrow irrigation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2002.
- [27] 屈小娜. 基于原位观测的水面与裸土蒸发的互补关系研究: 以关中盆地为例[D]. 西安: 长安大学, 2018.
QU Xiaona. Research on complementary relationship between water surface and unsaturated soil evaporation based on in situ observation—A case study in Guanzhong Basin[D]. Xi'an: Changan University, 2018.
- [28] MARTINS P E S, DA SILVA E R, RUIZ J G C L, et al. Uniformity of precipitation and radial profile of the super 10 sprinkler at different operating pressures[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2014, 6(11): 951-960.
- [29] 陈郁, 张清涛, 袁利兵, 等. 不同灌溉方式对旱区葡萄脯氨酸及渗透胁迫相关基因的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(11): 9-16.
CHEN Yu, ZHANG Qingtao, YUAN Libing, et al. The Effects of Irrigation Methods on Proline- and Osmotic Stress-related Genes of Grape (*Vitis vinifera* L.cv. Moldova) in Arid Regions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(11): 9-16.
- [30] 李连豪, 李光永, 乔晓东, 等. 中心轴式喷灌机非设计工况对均匀性的影响评估[J]. *农业机械学报*, 2015(12): 62-66, 116.
LI Lianhao, LI Guangyong, QIAO Xiaodong, et al. Assessment of influence of off-design conditions on uniformity of sprinkler irrigation

of center-pivot irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015(12):62-66, 116.
[31] 王金毅, 杨路华, 苟万里, 等. 薄壁微喷带组合均匀度及铺设间距试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 72-77, 83.

WANG Jinyi, YANG Luhua, GOU Wanli, et al. Experimental study on uniformity of combination and the paving spacing for thin wall micro spray belt[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 72-77, 83.

The Efficacy of Microfiber Capillary Wicking Irrigation System for Improving Soil Water Distribution in Green Roofs

WANG Zhiqiang^{1,2,3}, HUANG Siyu^{2,4}, PAN Changjiang^{2,4}, ZHANG Qingtao^{1,2,3*}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Guangdong University Key Laboratory of Water Circulation and Water Safety in South China, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Civil Engineering, Zhuhai 519082, China;
4. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: 【Objective】Green roof has been increasingly used in new buildings not only as a compensation to the lost habitat in urbanization but also as a strategy to mitigate urban flooding. One issue in green roof maintenance is irrigation, which is expensive and difficult to manage. This paper studied the efficacy of microfiber capillary wick as an irrigation system for green roofs. 【Method】Four plexiglass platforms were set up on a roof. From the top to the bottom, each consisted of a planting layer, a substrate layer, a water storage layer and a base layer to prevent exfiltration. Microfiber capillary wick (MCW) in different patterns - steering wheel (MCWI), spiral annular rings (MCWII) and straight capillary (MCWIII) - were placed in the plexiglass platforms for irrigation; irrigation without wick was taken as the control. In each platform, we measured the change in soil moisture content from 25 May to 30 August 2017. We also calculated the change in irrigation uniformity coefficient (UC) of each system. 【Result】Based on the mean SMC, the systems are ranked in the order: MCWII < MCWI < MCWIII. The average SMC in the three treatments was 46.7% higher than that in the control. Using MCW can keep the soil water content more than 5% during 97.8% of the experimental period, compared to 2/3 in the control. The Christiansen irrigation uniformity coefficient (CU_C) of MCWI and MCWIII was approximately the same, while the CU_C of MCWII at radius of 25 cm, 20 cm, 15 cm, 10 cm, and 5 cm was 1.6%, 4.2%, 4.8%, 4.3% and 9.3% higher than that of MCWI, respectively. Daily irrigation variable coefficient (C_v) of MCWI and MCW II was approximately 6%, while the C_v of MCWIII was more than 10%. 【Conclusion】MCWII worked best by increasing SMC and relieving drought stress. The results presented in this work have wide implications for developing water-saving irrigation technologies for green roofs.
Key words: microfiber capillary wicking irrigation; soil moisture content; Christiansen uniformity coefficient; water supply uniformity; greening roof

责任编辑：赵宇龙