

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202103014



浇灌方式对盘装佛甲草养护 耗水量及基质温度的影响

韩菁菁, 冉茂宇

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 用盘装佛甲草设计制作 8 个浇灌试样,在福建省厦门市的夏季典型气候下,对比实测不同浇灌方式对试样水分蒸发量、浇灌耗水量及基质温度的影响。结论表明:在盘装佛甲草每日间歇裸浇 1 次的情况下,浇灌时间点对其日水分蒸发量影响不大,但对其逐时水分蒸发量有时序影响;在吸液材料持续浇灌情况下,吸液材料和吸液方式对盘装佛甲草的日水分蒸发量和逐时水分蒸发量均影响不大;与每日裸浇 1 次的间歇浇灌相比,在夏季连续高温下,利用吸液材料持续灌溉至少可节约用水 18% 且可显著降低基质温度均值和振幅值。此外,在持续高温条件下,盘装佛甲草 3 d 不浇灌,其日水分蒸发量将显著降低,6 d 不浇灌,其日水分蒸发量将接近于零。

关键词: 屋面绿化; 佛甲草; 浇灌方式; 蒸发降温; 水量消耗

中图分类号: S 688.4; TU 985.124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)04-0473-08

Effects of Irrigation Methods on Water Consumption and Substrate Temperature of Palletized *Sedum lineare* Thunb

HAN Jingjing, RAN Maoyu

(School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian)

Abstract: 8 irrigation samples of palletized *Sedum lineare* Thunb were carried out, and the effects of different irrigation methods on the water evaporation, water consumption and substrate temperature of the samples were measured and compared under the typical summer climate in Xiamen City. The results show that: under the condition of intermittent bare irrigation once a day for palletized *Sedum lineare* Thunb, the time point of irrigation has little effect on its daily water evaporation, but has a time sequence effect on its hourly water evaporation. Under the condition of continuous irrigation with water suction material, the material and method for water suction has little influence on the daily and hourly water evaporation; comparing with the intermittent irrigation with bare irrigation once a day, on the continuous high temperature days in summer, continuous irrigation with suction material can save 18% of water consumption at least per day in summer and significantly reduce the mean value and amplitude value of substrate temperature; for 3 days without irrigation, its daily water evaporation decreases significantly; for 6 days without irrigation, its daily water evaporation is close to zero.

Keywords: roof greening; *Sedum lineare* Thunb; watering method; evaporative cooling; water consumption

收稿日期: 2021-03-13

通信作者: 冉茂宇(1967-),男,博士,教授,主要从事建筑室内外物理环境、建筑节能与建筑热工的研究。E-mail: ran-maoyu@yahoo.com.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678254)

佛甲草(*Sedum lineare* Thunb)因其抗气候性较强、管理方便、绿期长、覆盖率高等优点,成为屋面绿化和蒸发降温的良好选材^[1-4].然而,佛甲草常规浇灌养护和蒸发降温要消耗大量水资源,且其基质温度会影响屋面降温效果.如何在保持佛甲草生长正常条件下减少其水量消耗而又不影响其降温隔热效果,是值得研究的重要课题.前人对佛甲草养护做了不少研究工作.蔡静指出,高温会导致佛甲草草层稀疏甚至失去绿化作用^[5].赵定国^[6-7]发现,利用无纺布种植佛甲草时,布料越薄的越有助于佛甲草根的生长;佛甲草喜水但不耐涝,淹在水里被太阳一晒就会死亡.卢珊珊等^[8]研究表明,佛甲草在各种基质厚度下长势都较佳,但透风性差,在夏季高温高湿环境下易腐烂.陈倩等^[9]通过对比 6 类藓类植物和佛甲草、假俭草的吸水率和保水性实验,表明佛甲草在 8 种试样中具有最低的失水量.苏怡柠等^[10]的研究表明,在越夏养护佛甲草时,若气温在 25~35℃之间且连续 3 日晴天,则应及时进行灌溉.

佛甲草用于建筑外表绿化具有隔热降温作用.陈祥等^[11]探讨了佛甲草绿墙的隔热效果,表明佛甲草的水分蒸腾散热所起的隔热作用大于其遮挡太阳辐射所起的隔热作用.Feng 等^[12]在广州对佛甲草屋面的得热和散热进行研究,表明在其得热中太阳辐射占 99.1%,而在其散热中植物土壤的蒸发蒸腾占 58.4%,只有 1.2%通过植物和土壤储存或转移到下面的房间.邓小飞等^[13]的研究表明,佛甲草屋面的降温增湿效果在一日之中 12:00—15:00 最显著.王璋元等^[14]的报道表明,无论有无太阳辐射,在土壤基质含湿量相同的条件下,佛甲草种植模块的隔热性能和热稳定性都要优于厚度相同的轻型种植土模块.刘宏成等^[15]的实验表明,当土壤基质厚度超过 200 mm 时,土壤底部温度趋于稳定.彭跃暖等^[16]研究了蓄水层设置和植物选择对绿色屋顶水分蒸发量的影响,表明蓄水层能增加植被屋面的水分蒸发量,土壤含水量与日水分蒸发量呈正相关;与实铺地景竹草相比,佛甲草实验槽在 24 h 内蒸发水量波动较大,中午前后出现低谷.彭明熙等^[17]研究小叶景天、佛甲草、落地生根 3 种景天科植物的降温增湿效果,发现佛甲草对太阳辐射的吸收最弱.

综上,虽然前人对佛甲草养殖及维系进行了一些研究,也报道了其用于建筑外表绿化的降温隔热机制及效果,但关于佛甲草浇灌养护并未有具体的相关论述,也未涉及佛甲草基质温度与其水分蒸发量及浇灌用水量的探究.本文设计并制作了 8 种浇灌试样,在福建省厦门市的夏季典型气候条件下,对比实测了不同浇灌方式对试样水分蒸发量、浇灌用水量及基质温度的影响.

1 实测试样制作

从市面上购买多盘养殖好的佛甲草,从中选取株高、密度和长势相近的 8 盘,其土壤基质厚度约 35 mm,基质上层株高 100 mm 左右.种植盘为壁厚 2 mm 的黑色塑料盘,上部开口外缘为 490 mm(长)×290 mm(宽),底盘外缘为 456 mm(长)×256 mm(宽),底部四角有直径 15 mm,高 20 mm 的支撑脚,盘内开有 6 排×12 列,直径 10 mm 的排水孔,孔距纵向 36 mm,横向 35 mm.

佛甲草种植盘外尺寸及测温套管布置,如图 1 所示.首先用电烙铁沿底盘上表侧向打一个直径 5

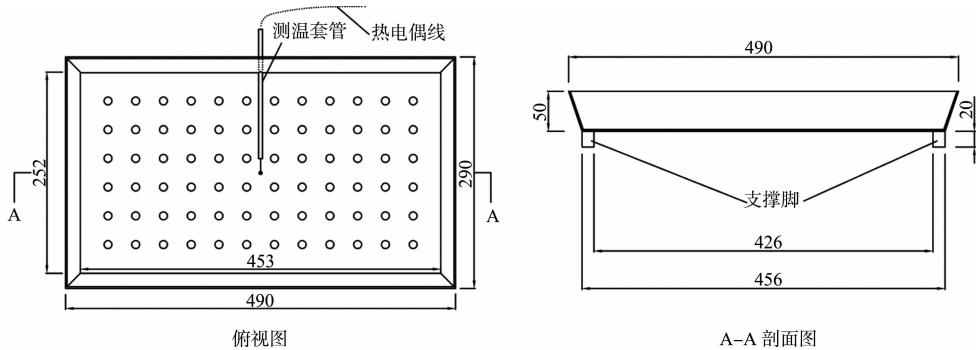


图 1 佛甲草种植盘外尺寸及测温套管布置(单位:mm)

Fig.1 Outer dimensions and arrangement of thermowells of palletized *Sedum lineare* Thunb (unit: mm)

mm 的孔,插入直径为 5 mm 的塑料测温套管,用于后续热电偶探头插入测量基质底部中心温度.测温套管插入端固定在底盘中心附近,另一端外露一定长度.

然后,将带土壤基质的佛甲草放入 4 个带测温套管的种植盘中形成 4 个测试样本,分别编号为 C1,

B1,B2,B3. 其中,C1 用于不浇灌测试,B1,B2,B3 分别用于每日早、中、晚裸浇 1 次的测试. C1,B1,B2,B3 试样纵向剖面相同,如图 2 所示.

接着,将剩下 4 个带测温套管的种植盘编号为 A1,A2,A3,A4,用于吸液浇灌试样制作. 其中,A1,A2,A3 用于管式吸液芯制作,以对比不同吸水材料造成的影响;而 A4 用于片状吸液芯制作,以对比吸液方式导致的影响,如图 3 所示. 利用外径 10 mm 的薄壁塑料管切成高 100 mm 管段共 72 根,A1,A2,A3 各用 24 根,分别用于吸液材料——无纺布、速干布、三明治网布的管式吸液芯制作. 将三种布料剪切成 175 mm(长)×50 mm(宽)的片状,每两片穿过一根管段,下端外露 10 mm,上端穿过种植盘排水孔铺展在底盘上表面,形成 6 排×4 列的管式吸液芯阵列,如图 3A1~A3 编号所示. 用电烙铁沿 A4 底盘中心横向开 4 条 100 mm 长的缝隙,将 8 片 236 mm(长)×100 mm(宽)速干布两两穿过同一缝隙,上部留出 126 mm×100 mm 铺展在底盘上表面,如图 3 中 A4 编号所示.

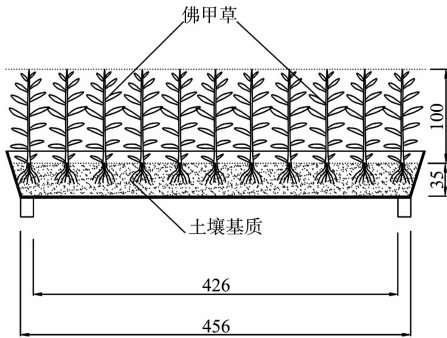


图 2 不浇灌和裸浇试样剖面

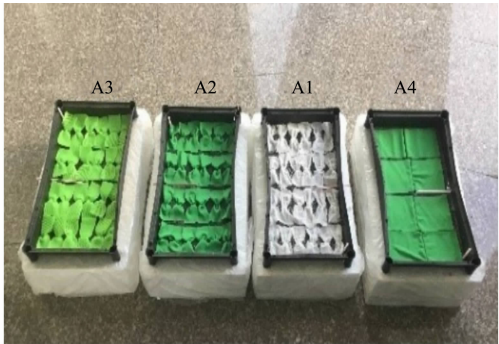
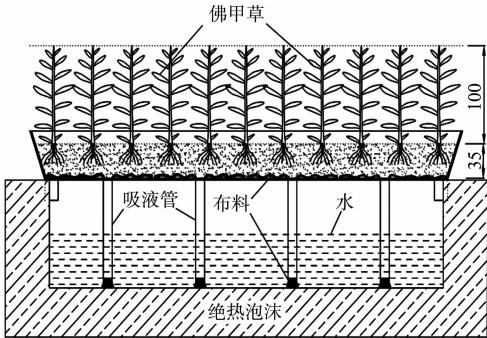


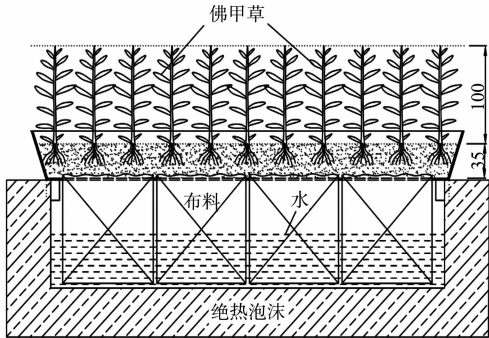
图 3 吸液芯布料在种植盘中铺展

Fig. 2 Sample profile without irrigation or with bare irrigation Fig. 3 Spread wick cloth in planting tray

最后,用 50 mm 厚的白色泡沫制作 4 个内尺寸为 445 mm(长)×245 mm(宽)×110 mm(高)的储水盒,并在储水盒内壁贴附防水薄膜,注入初始水量. 将带有吸液布料的 A1,A2,A3,A4 种植盘支撑脚卡放在储水盒上(图 3),再把带土壤基质的佛甲草放入种植盘中,形成管式和片状吸液浇灌试样. 管式和片状的吸液浇灌试样剖面,如图 4 所示. 上述制作的 8 个试样对应的 8 种浇灌方式,如表 1 所示.



(a) 管式



(b) 片状

图 4 吸液芯浇灌试样剖面图

Fig. 4 Profile of wick pouring sample

表 1 各试样对应的浇灌方式

Tab. 1 Watering method corresponding to each sample

编号	浇灌时间	浇灌方法	控制措施	储水盒	吸液材料	淋水时间点
A1	持续	管式吸液	自动	有	无纺布	无
A2	持续	管式吸液	自动	有	速干布	无
A3	持续	管式吸液	自动	有	三明治网布	无
A4	持续	片状吸液	自动	有	速干布	无
B1	间歇	裸露淋水	人工	无	无	每日 8:00
B2	间歇	裸露淋水	人工	无	无	每日 13:00
B3	间歇	裸露淋水	人工	无	无	每日 19:00
C1	不浇灌	无	无	无	无	无

2 实测内容与方法

测试时间为 2020 年 7 月 5 日 0:00—14 日 24:00,地点选在华侨大学厦门校区建筑实验楼的屋顶;屋顶周围无遮挡,日照和通风均良好.各试样现场测试布置,如图 5 所示.图 5 中:盘装佛甲草的短边朝向南北,相互之间几乎无遮挡.

实验测试内容包括室外气象参数(空气温度、相对湿度、风速和水平太阳辐射),以及各试样水分蒸发量及土壤基质的底部温度.室外气象参数测试采用 PH-1 移动气象站,每隔 5 min 记录 1 次;土壤基质的底部温度测试采用铜-康铜热电偶和 JTRG-II 热工巡检仪每隔 1 h 记录 1 次;水分蒸发量测试采用 ACS-C 电子秤每日 8:00—22:00 间隔 1 h 称量 1 次.各仪器测试范围和精度,如表 2 所示.表 2 中: t_{OA} 为室外空气温度; RH 为室外相对湿度; v_o 为室外风速; I_o 为室外水平太阳辐射; t_{SB} 为基质底部温度; W 为水分蒸发量.

为了避免热电偶线对称量的影响,每次称量前将热电偶探头从测温套管中抽出,再对试样进行称量.对于试样 B1,B2,B3,每次人工浇灌前后都称量 1 次,以便获得浇灌前和浇灌后 1 h 内的水分蒸发量.为了获得人工裸浇佛甲草 1 次的耗水量,随机选取 5 名人员,让他们按自己的习惯分别对另外 5 盘长势相似、生长状况良好的佛甲草每日裸浇 1 次,共 3 次,要求每次浇透后停止浇灌并进行耗水量记录.

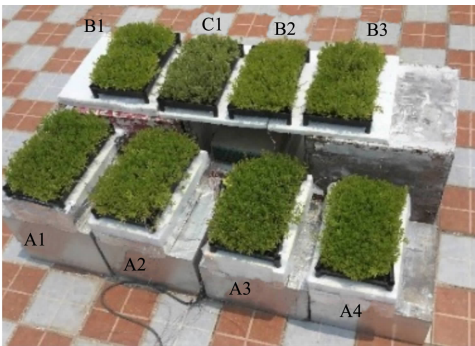


图 5 各试样现场测试布置图
Fig. 5 On-site test layout of each sample

表 2 各仪器测试范围及精度

Tab. 2 Test range and accuracy of each instrument			
仪器型号名称	测试参数	测试范围	仪器精度
PH-1 移动气象站	$t_{OA}/^{\circ}\text{C}$	$-40\sim 80$	± 0.1
PH-1 移动气象站	$RH/\%$	$0\sim 100$	± 0.1
PH-1 移动气象站	$v_o/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$0\sim 70$	± 0.3
PH-1 移动气象站	$I_o/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$0\sim 2\,000$	$<5\%$
JTRG-II 热工巡检仪	$t_{SB}/^{\circ}\text{C}$	$-200\sim +300$	± 0.001
ACS-C 电子秤	W/kg	$0\sim 15$	± 0.001

3 测试结果与分析

3.1 室外气象参数测试结果与分析

在实测期间,室外空气温度(t_{OA})、相对湿度(RH)、室外风速(v_o)和水平太阳辐射累计值(I)随着时间变化,如图 6,7 所示.从图 6,7 可知,除 8 日和 9 日两阴天外,其余均为高温晴天.统计可得,测试期内室外空气温度平均值 33.0°C ,最高值 38.5°C ,水平太阳辐射最大值为 $1\,244\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,表现为厦门市典型的夏季天气.

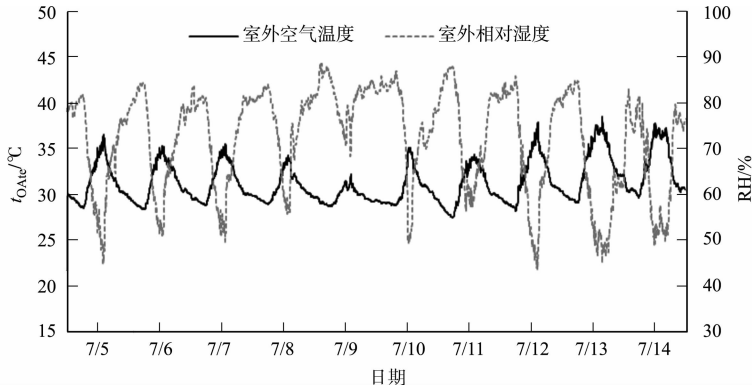


图 6 室外空气温度和相对湿度随着时间变化
Fig. 6 Outdoor air temperature and relative humidity variation with time

3.2 逐日水分蒸发量测试结果与分析

各试样的日水分蒸发量统计,如表 3 所示.根据太阳辐射累计量(I)大小,可以将表 3 中数据按气候

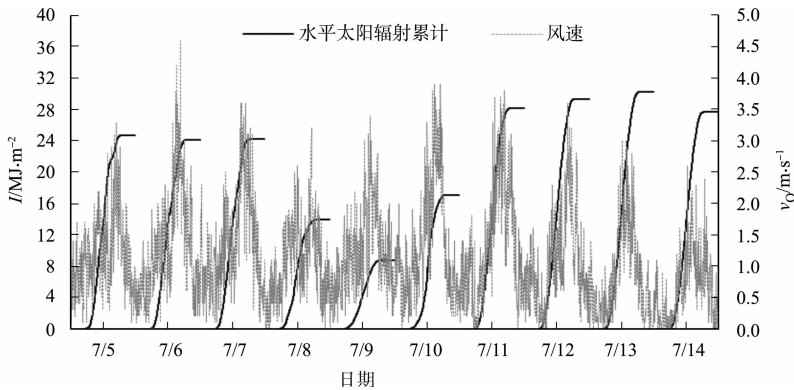


图 7 室外水平太阳辐射累计和风速随着时间变化

Fig. 7 Outdoor horizontal solar radiation accumulation and wind speed variation with time

分为四类,分别是7月11—14日为晴天类,7月5—7日为似晴天类,7月8—10日为似阴天类,7月9日为阴天类.

从表 3 可知:试样的日水分蒸发量与太阳辐射累计量总体上呈明显正相关. 对比 A1,A2,A3 试样在同一日的水分蒸发量,可以发现它们之间的差别并不大. 说明在管式吸液连续浇灌下,吸液材料对日水分蒸发量的影响不大;而对比 A1,A2,A3,A4 试样在同一日的水分蒸发量,发现 A4 总比 A1,A2,A3 日水分蒸发量稍大,这可能是由于片状布料吸液更易和铺展更均匀的原因. 对比 B1,B2,B3 在同一日的水分蒸发量,发现它们之间的差别也不大. 说明在间歇裸浇每日 1 次的情况下,浇灌时间点对日水分蒸发量影响不大.

表 3 各试样水分日蒸发量统计结果

Tab. 3 Statistic results of daily evaporation of each sample (kg)

日期	试样								I MJ·m ⁻²
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	C1	
7/5	0.920	0.874	0.936	1.074	0.973	0.865	0.994	0.693	25.017
7/6	0.937	0.914	0.993	1.048	1.033	0.941	1.034	0.287	23.852
7/7	0.997	0.963	1.020	1.078	1.105	0.957	1.078	0.118	24.023
7/8	0.721	0.725	0.686	0.752	0.790	0.678	0.748	0.054	13.919
7/9	0.515	0.514	0.494	0.519	0.540	0.495	0.547	0.026	8.723
7/10	0.769	0.772	0.776	0.814	0.839	0.761	0.830	0.038	17.096
7/11	1.080	1.033	1.061	1.108	1.165	1.017	1.135	0.036	28.158
7/12	1.163	1.097	1.147	1.219	1.229	1.034	1.199	0.037	29.342
7/13	1.147	1.017	1.128	1.219	1.121	0.892	1.025	0.021	30.272
7/14	1.067	1.002	1.051	1.142	1.094	0.947	1.080	0.014	27.643

从表 3 还可知:对比吸液浇灌 A 组、间歇裸浇 B 组和不浇灌 C1 试样水分蒸发量,发现 A 组和 B 组的日水分蒸发量差别也不大. 这说明利用吸液布料连续浇灌和人工每日间歇裸浇,对佛甲草日水分蒸发量影响不大,但 A 组和 B 组日水分蒸发量大于 C1 试样,且随着天数推移,差别增大. 观察 C1 试样日水分蒸发量随着时间的变化,发现在持续高温晴天下,3 d 不浇灌,其日水分蒸发量显著降低,6 d 不浇灌,其日水分蒸发量趋于零. 统计晴天类 A 组和 B 组日水分蒸发量均值,得到 A 组为 1.105 kg,B 组为 1.078 kg,二者基本相等,均值为 1.091 kg.

3.3 逐时水分蒸发量测试结果与分析

由于吸液材料对管式吸液持续浇灌日水分蒸发量影响不大,间歇裸浇时间点对试样日水分蒸发量影响也不大,但可能对其逐时水分蒸发量有影响. 因此,选择 A2,A4,B1,B2,B3 试样为代表,以 7 月 13 日为例来进行体现和分析,逐时水分蒸发量和太阳辐射逐时累计量随着时间的变化,如图 8 所示. 图 8 中:W_h 为逐时水分蒸发量;I_h 为太阳辐射逐时累计量.

从图 8 可知:8:00 的水分蒸发量是前晚 22:00 之后水分蒸发量的累积,故数值较高. 从图 8 还可知:所有试样逐时水分蒸发量在上午随着时间推移成增加趋势,但在 12:00—13:00 时段出现低谷,而在

13:00—14:00 时段出现峰值,14:00 后呈下降趋势.究其原因,可能是与试样吸收太阳辐射量和蒸发滞后有关.

从图 8 还可知:在多数情况下,各试样逐时水分蒸发量随着太阳辐射累计量增大而增大.但是,由于佛甲草叶片均是向上倾斜生长且相互措置,随着太阳高度角增大,其对太阳辐射的反射和遮挡将增加,导致了进入佛甲草内部的太阳辐射量反而减少,由此造成 12:00—13:00 时段水分蒸发量出现低谷现象.观察 B1,B2,B3 的逐时水分蒸发量变化,发现 8:00 裸浇试样 B1 的变化规律与吸液持续浇灌 A1,A2 试样类同,但 13:00 裸浇试样 B2 在下午时段逐时水分蒸发量明显大于其他试样,而 19:00 裸浇试样 B3 在浇灌后至次日 8:00 逐时水分蒸发量明显高于其他试样.

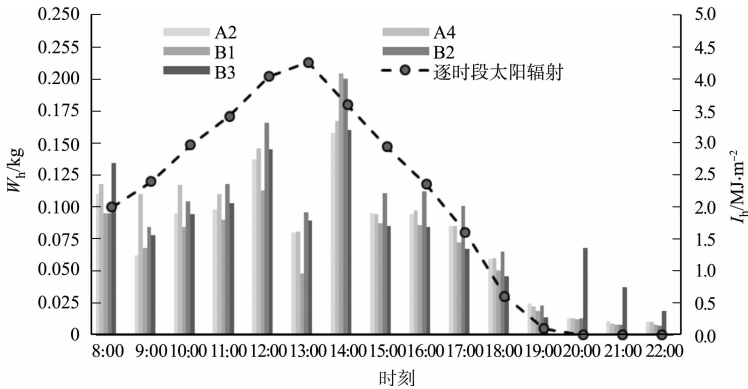


图 8 大晴天 7 月 13 日逐时蒸发水量随着时间变化
Fig. 8 Hourly evaporation variation with time on sunny July 13

3.4 裸浇耗水量测试结果与分析

一般人员裸浇耗水量的测试结果,如表 4 所示.由表 4 可知:裸浇 1 盘佛甲草平均每次需要耗水量为 1.320 kg.由于 A1,A2,A3,A4 吸液持续灌溉不存在过分浇水和水分流失的现象,故其水分蒸发量等于其养护耗水量.表 3 中似晴天、似阴天和阴天下,吸液浇灌试样日水分蒸发量均小于晴天条件下水分蒸发量.因此,对比表 3 和表 4 数据可知,相比于每日裸浇 1 次的间歇浇灌,吸液持续灌溉至少可节约浇灌用水 18%左右.吸液持续灌溉不存在过分浇水及基质和营养流失现象,是值得推荐和应用的节水浇灌方式.

表 4 裸浇实验耗水量统计
Tab. 4 Statistics of water consumption in bare irrigation experiment (kg)

编号	试样					平均值
	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	
裸浇 3 次总水耗量	4.165	4.432	3.780	3.530	3.890	—
平均每次水耗量	1.388	1.477	1.260	1.177	1.300	1.320

4 基质底部温度测试结果与分析

试样水分蒸发量是土壤基质和佛甲草叶片水分蒸发的总和.从前面日水分蒸发量和逐时水分蒸发量的分析可推知,吸液持续浇灌的试样的基质温度变化基本类同,但间歇裸浇时间点对间歇浇灌试样基质温度变化可能有影响.因此,选择 A2,A4,B1,B2,B3 试样为代表进行显示,并加入 C1 试样进行对比分析.6 个试样基质底部温度(t_{SB})随着时间的变化,如图 9 所示.表 5 为它们的日均温度和振幅值.表 5 中:数据单元格“/”前面的数值为日均温度,后面的数值为日振幅值.

从图 9 和表 5 可明显看出:A4 试样日均温度值一直保持最小,振幅值也基本保持最小.这是由于片状吸液材料吸水容易,且测温点落在吸液材料吸水正上方处更易被水浸湿的原因.A2 试样温度波动稍大于 A4 试样,但均低于 B 组和 C 组试样;在有太阳辐射时段,A2 试样温度均高于 A4 试样,除浇灌时间点处有短时高于被浇灌的试样外,其余时间都低于裸浇和不浇灌试样;在无太阳辐射时段,A2 试样温度都高于裸浇组试样.这是由于其测温点偏离吸液芯正上方且底部基质通风透气差和蓄热的原因.

B1,B2,B3 试样在裸浇时间点温度有短暂下降和迅速回升的现象. 这是由于裸浇时水温较低所致.

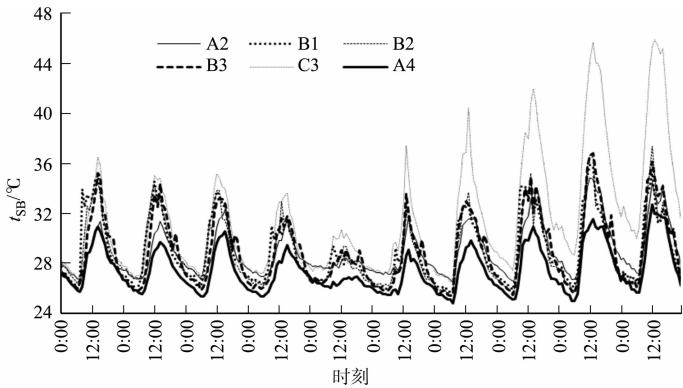


图 9 土壤基质底部温度随着时间的变化

Fig. 9 Temperature variation of soil substrate bottom with time

表 5 基质底部温度日均值和振幅值的统计结果

Tab. 5 Statistical results of daily average and amplitude values of substrate bottom temperature (°C)

日期	试样					
	A2	A4	B1	B2	B3	C1
7/5	28.32/2.98	27.89/3.01	29.72/5.27	29.53/5.00	29.23/5.96	30.03/6.44
7/6	28.47/2.84	27.30/2.39	29.20/5.34	29.56/4.79	28.99/5.34	30.06/4.98
7/7	28.43/3.43	27.33/3.20	29.21/4.52	29.13/4.75	28.93/4.25	30.07/5.06
7/8	28.45/3.05	27.03/2.38	28.46/3.04	28.24/4.70	28.37/3.38	29.51/4.10
7/9	27.82/0.52	26.43/0.48	27.55/1.79	27.35/2.02	27.56/1.53	28.64/2.01
7/10	28.33/3.36	26.56/2.48	27.89/4.41	27.70/4.30	27.91/5.65	29.61/7.81
7/11	28.87/2.72	27.04/2.76	28.68/3.98	28.50/5.19	28.79/4.10	31.10/9.34
7/12	29.53/4.35	27.58/3.34	29.70/4.58	29.26/5.93	29.65/5.26	33.44/8.51
7/13	30.25/4.59	28.35/3.14	29.91/5.98	29.72/6.97	30.22/6.60	36.02/9.69
7/14	30.18/4.27	28.60/4.06	29.61/5.56	29.55/7.80	30.07/6.08	36.87/9.06

观察 C1 试样基质底部温度的变化,发现其温度波动在所有天数内最大,6 d 之内温度波动与裸浇试样相差不大,但 6 d 之后随着天数的推移差别十分明显,且任意时刻其温度值都表现为最大. 这说明 C1 试样 6 d 之后水分蒸发消耗殆尽,与前述水分蒸发量测试相符. 因此,利用储水盒和吸液材料对盘装佛甲草进行吸水持续浇灌,不仅可以降低其土壤基质温度平均值,而且可降低温度振幅值,有利与基质温度稳定和屋面降温隔热.

5 结论

文中提出了吸液持续浇灌的构想,设计制作 8 种浇灌方式试样,考察吸液持续浇灌、间歇淋水浇灌、不浇灌对盘装佛甲草水分蒸发量、浇灌耗水量,以及土壤基质底部温度的影响. 通过分析,得出以下 4 点主要结论.

- 1) 吸液材料和吸液方式对吸液持续浇灌的日水分蒸发量和逐时水分蒸发量影响不大;间歇裸浇时间点间歇浇灌的日水分蒸发量影响不大,但对逐时水分蒸发量有序影响.
- 2) 吸液持续浇灌和每日 1 次淋水间歇浇灌,它们的日水分蒸发量和逐时水分蒸发量差别不大,都在 12:00—13:00 时段出现水分蒸发低谷,却在 13:00—14:00 时段出现水分蒸发高峰.
- 3) 在夏季连续高温下,吸液持续浇灌比每日淋水 1 次的间歇浇灌至少可节水 18%,且可显著降低基质温度均值和振幅值.
- 4) 在夏季持续高温条件下,盘装佛甲草 3 d 不浇灌,水分蒸发量会显著降低;而 6 d 不浇灌,其水分蒸发殆尽,基质温度平均值和振幅值会显著升高.

参考文献:

[1] 李春燕. 我国屋顶绿化研究进展[J]. 北京农业, 2015(29): 92-93. DOI:10.3969/J. ISSN. 1000-6966. 2015. 29. 050.

[2] 王璐珺,丁彦芬. 南京冬季室外自然低温对 4 种景天属植物生理的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):146-149. DOI:10.15889/J. ISSN.1002-1302.2017.22.039.

[3] 李翊华,魏金翠,姚桂红. 干旱胁迫下佛甲草生理生化指标的变化[J]. 农业开发与装备,2016(2):59-60. DOI:10.3969/J. ISSN.1673-9205.2016.02.057.

[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. DOI:10.1016/j.landurbplan.2010.07.005.

[5] 蔡静. 佛甲草研究进展简述[J]. 南方农业,2014,8(24):186,191. DOI:10.19415/J. CNKI.1673-890X.2014.24.092.

[6] 赵定国. 轻型屋顶佛甲草绿化技术草苗培育与养护应注意的问题(上)[N]. 中国花卉报,2019-08-08(W03). DOI:10.38297/n.cnki.nzghh.2019.000691.

[7] 赵定国. 轻型屋顶佛甲草绿化技术草苗培育与养护应注意的问题(下)[N]. 中国花卉报,2019-08-15(W03). DOI:10.38297/n.cnki.nzghh.2019.000711.

[8] 卢珊珊,张辉,吴菲,等. 北京地区植被屋面不同厚度下景天植物组合研究[J]. 中国农学通报,2018,34(16):57-64.

[9] 陈倩,车丽萍,娄玉霞. 6 种藓类植物保水性能的研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版),2019,48(5):521-525. DOI:10.3969 / J. ISSN.1000-5137.2019.05.009.

[10] 苏怡柠,骆天庆,金樑,等. 上海地区佛甲草轻型屋顶绿化的越夏景观维护研究[J]. 上海农业学报,2019,35(5):39-45. DOI:10.15955/J. ISSN.1000-3924.2019.05.08.

[11] 陈祥,张晓艳. 佛甲草墙面绿化的降温增湿效应研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(28):12163-12164,12173. DOI:10.3969/J. ISSN.0517-6611.2008.28.041.

[12] FENG Chi,MENG Qinglin,ZHANG Yufeng. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs[J]. Energy and Buildings,2010,42(6):959-965. DOI:10.1016/j.enbuild.2009.12.014.

[13] 邓小飞. 佛甲草绿化屋面的隔热和降温增湿效应研究:以广州市羊城创意产业园屋顶为例[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):279-282. DOI:10.3969/J. ISSN.1001-7461.2017.04.47.

[14] 王璋元,杨晚生. 佛甲草和轻型种植土屋面模块隔热性能对比研究[J]. 硅谷,2014(5):57-58. DOI:10.3969/j.issn.1671-7597.2014.05.057.

[15] 刘宏成,刘健璇,向俊米,等. 长沙地区简易种植屋面隔热性能研究[J]. 建筑节能,2016(1):37-39,44. DOI:10.3969/J. ISSN.1673-7237.2016.01.009.

[16] 彭跃暖,秦华鹏,王传胜,等. 蓄水层设置与植物选择对绿色屋顶蒸散发的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版),2017,53(4):758-764. DOI:10.13209/j.0479-8023.2017.078.

[17] 彭明熙,杨真静. 屋顶绿化对室外微气候的降温增湿效果[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2019,41(4):165-173. DOI:10.11835/J. ISSN.2096-6717.2019.085.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)