

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017011702

宋玉飞, 李海梅, 孙晓丹, 等. 屋顶绿化条件下四种草坪草耗水特性及土壤水分阈值[J]. 环境化学, 2017, 36(9): 2069-2076.

SONG Yufei, LI Haimei, SUN Xiaodan, et al. The photosynthetic characteristic and soil moisture thresholds of four kinds of turf-grass under the condition of roof greening [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(9): 2069-2076.

屋顶绿化条件下四种草坪草耗水特性及土壤水分阈值*

宋玉飞 李海梅** 孙晓丹 郭霄 周游

(青岛农业大学, 园林与林学院, 青岛, 266109)

摘要 本文以4种草坪草——高羊茅、黑麦草、狗牙根、中华结缕草为试验材料,在屋顶环境下应用小型蒸散仪和便携式光合测定系统,对4种草坪草不同土壤水分梯度下的光合生理参数的光响应进程进行测定.结果表明,暖季型草坪草的光合速率和水分利用效率均高于冷季型草坪草;4种草坪草在屋顶环境下最佳土壤水分阈值为:高羊茅 71.50%—87.50%、黑麦草 59.70%—70.30%、狗牙根 56.00%—82.60%、中华结缕草 71.50%—89.00%.制定了适宜的灌水方案,在草坪草生长季内,黑麦草、高羊茅两种冷季型草坪草分别需补充灌水次数为33次和37次,每次19.29 mm和16.64 mm;狗牙根和中华结缕草两种暖季型草坪草分别需补充灌溉25次和27次,每次20.75 mm和18.20 mm.本研究以期为今后草坪草的节水灌溉与水分的量化管理提供参考依据.

关键词 屋顶绿化, 草坪草, 水分胁迫, 耗水特性, 土壤水分阈值.

The photosynthetic characteristic and soil moisture thresholds of four kinds of turf-grass under the condition of roof greening

SONG Yufei LI Haimei** SUN Xiaodan GUO Xiao ZHOU You

(College of Landscape Architecture and Forestry, Qingdao Agriculture University, Qingdao, 266109, China)

Abstract: Four types of turf-grass—*Festuca elata*, *Lolium perenne*, *Cynodon dactylon*, *Zoysia sinica* were selected as the test materials to measure the light response process of photosynthetic physiological parameters under different soil water content conditions using the small evapotranspiration instrument and portable photosynthetic measurement system in the roof environment. The result showed that the photosynthesis rate and water use efficiency of warm-season turf-grass were both higher than the cool-season turf-grass. The optimal soil moisture thresholds of the four turf-grass under the condition of roof were as follows: *Festuca elata* was 71.50%—87.50%, *Lolium perenne* was 59.70%—70.30%, *Cynodon dactylon* was 56.00%—82.60%, and *Zoysia sinica* 71.50%—89.00%. Suitable irrigation scheme was made as follow: in the growing season, *Lolium perenne* and *Festuca elata* which were cool-season turf-grass need supplementary irrigation 33 times and 37 times respectively and 19.29 mm and 16.64 mm each time; two warm-season turf-grass—*Cynodon dactylon* and *Zoysia sinica* need supplementary irrigation 25 times and 27 times respectively and 20.75 mm and 18.20 mm each time. The study is expected to provide reference basis for the

2017年1月17日收稿(Received: January 17, 2017).

* 山东省青年基金(BS2012NY005), 研究生创新立项(760-1425)和青岛市科技局项目(13-1-4-165-jch)资助.

Supported by Youth Fund of Shandong Province(BS2012NY005), Postgraduate Technology Innovation Project(760-1425) and Qingdao Technology Bureau Project(13-1-4-165-jch).

* ** 通讯联系人, Tel: 13553079024, E-mail: lihaimei75@163.com

Corresponding author, Tel: 13553079024, E-mail: lihaimei75@163.com

water saving irrigation of turf-grass and quantitative management of water resources in the future.

Keywords: roof greening, turf-grass, water stress, photosynthetic characteristic, soil moisture thresholds.

近年来屋顶绿化建设越来越受到人们的关注和重视.我国关于建设标准园林城市的相关文件指出人均屋顶绿化面积要求达到 0.5 m^2 以上,这就意味着绿化灌溉的用水量将急剧增加,对水资源匮乏的北方城市而言问题尤为严重.屋顶绿化是未来城市绿化发展的趋势,是在有限的土地面积上迅速提高城市绿化率的有效途径.屋顶绿化中草坪草的应用越来越广泛,如何进行屋顶绿化草坪的节水灌溉,提升草坪草的水分利用效率,制定科学合理的草坪草灌溉制度,实现草坪草水分的量化管理是目前亟待解决的重要问题.

水分亏缺是影响植物光合作用的重要因素,近年来国内外学者在农作物和造林树种的抗旱生理学特性研究方面取得了重要进展^[1-2],主要集中在不同水分梯度下植物光合速率、蒸腾速率、水分利用效率等光合作用参数的变化特征与响应机理方面.王克勤等^[3]研究表明,光饱和点随着土壤含水量的增加而增大,植物对光能的利用效率提高.朱万泽等^[4]研究表明,光合作用对叶片水分亏缺的反应十分敏感,在水分胁迫程度较低时,植物的光合速率变化幅度较小;当胁迫力度继续增加时,叶片组织、细胞间水势持续下降,光合速率也开始大幅度降低.同时,有学者探究土壤水分与植物蒸腾速率之间的关系发现,当土壤含水量较高时,植物的蒸腾速率较高,这时的蒸腾速率主要受植物本身生物学特性和气象因子的影响;当土壤含水量处于较低水平时,植物地下根系部分水分补给相对减少,蒸腾速率降低,此时蒸腾速率主要受土壤含水量的影响^[5-8].

植物水分利用效率指的是植物在吸收单位水量后产生的同化物质的量,它实质上反映了植物消耗水分与其产生干物质之间的关系,是判断植物生长适宜程度的重要生理生态指标^[9-12].大量研究表明,植物的水分利用效率并非在水分充足时最高,而是在适度的水分胁迫范围内,当气孔导度适度减小, T_r (蒸腾速率)与 P_n (光合速率)均下降,但由于蒸腾作用对水分胁迫的反应比光合作用更敏感, T_r 的下降速度大于 P_n 的下降速度,所以适度的水分亏缺反而提高了植物的水分利用效率^[13-17].王材源等^[18]研究大叶黄杨在屋顶绿化条件下,其光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用效率在水分胁迫的3个处理中表现为低度水分胁迫 (75%—85% FC) > 中度水分胁迫 (65%—75% FC) > 高度水分胁迫 (50%—60% FC) (FC:田间持水量).因此可以看出,植物的蒸腾耗水以及光合生理过程都与土壤水分有密切的关系,在适当的土壤水分范围内,植物的光合生理活动最佳,而不同植物种类的最适土壤水分阈值不同,如张淑勇等^[19]研究发现黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值为 33.8%—71.7%,赵叶萌等^[20]探究冬小麦节水高产的土壤水分阈值为 55.7%—86.2%.

近年来,随着人们对城市环境的要求不断提高,城市绿化建设备受关注,屋顶绿化作为一种新型绿化形式也越来越受到人们的重视.而关于屋顶绿化植物的光合和水分利用效率研究较少,主要集中在植物选择和植物的抗逆性方面,如汤聪等^[21]研究表明,佛甲草、中华景天等8种植物在抗旱性研究中综合评分较高,可作为草坪式屋顶绿化植物;张斌^[22]从7种景天植物中筛选出佛甲草、银纹垂盆草等4个适合南方高湿气候的屋顶绿化品种;衡静等^[23]通过测定净光合速率等生理生态指标,比较了5种屋顶绿化植物的适应性.针对屋顶绿化草坪草土壤水分阈值及灌溉制度的研究目前还比较缺乏.草坪草具有浅根系、抗性强、重量轻等优良特点,是目前屋顶绿化的主要应用材料,但受屋顶条件的限制,如何科学有效地减少草坪的灌溉量又能保证草坪正常的生长与美观,成为当前草坪研究的热点问题.

本文研究了屋顶条件下不同水分处理后4种草坪草的净光合作用效率、光合水分利用效率的光响应特点,确定了屋顶绿化草坪草适宜的灌水方案,以期避免盲目灌溉,提高草坪的水分利用效率,为节水草坪草的选择和水资源的量化管理提供科学依据与技术支持.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 试验区域概况

试验地点选择在青岛市城阳区 ($120^{\circ}12' \text{ E}$, $36^{\circ}20' \text{ N}$) 青岛农业大学生物楼顶楼 (4层), 顶面平整,

有较小坡度方便排水,结构简单.春季温暖,夏季湿热,降水较为充沛,冬季气温较低,气候比较干燥,气候类型属暖温带季风气候.年平均日照时数 2550.7 h,年均温 12.4 ℃,无霜期为 203 d.年降水量 700 mm 左右,年蒸发量在 1612.0 mm 左右,相对湿度为 73%,风速为 $3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.2 试验材料

试验材料选择 4 种典型的草坪草,其中 2 种冷季型草坪草:高羊茅(*Festuca elata*)和黑麦草(*Lolium perenne*),2 种暖季型草坪草:狗牙根(*Cynodon dactylon*)和中华结缕草(*Zoysia sinica*).采用盆栽种植结合屋顶种植的方法进行试验,分 4 个种植小区,每个小区长 5 m,宽 3 m,种植基质为按 1:1 比例混合的园土和草炭土,花盆规格为内径 30.0 cm,高 25.0 cm(底部有透水孔),每种草坪草播种 9 盆.冷季型草坪草 3 月中旬播种,暖季型草坪草 4 月播种,种植环境相同.土壤容重为 $0.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

1.3 试验方法

(1) 土壤水分梯度的获得

土壤含水量用土壤湿度计测得,环刀法校正;土壤水分梯度通过自然耗散与人为控制的方法获得.在试验观测前 1 d 浇透水,使土壤水分饱和,得到田间持水量(FC)为 51.19%,利用土壤湿度计监测土壤含水量的变化(早、中、晚各测定 1 次,取其平均值,测定时间为 8:00、14:00、18:00),1 d 后获得第一个水分梯度,以后每隔 1 d 获得 1 个土壤水分梯度,每种草坪草共获得 4 个水分梯度,直至草坪草叶片出现萎蔫卷曲时停止.

(2) 草坪草蒸散量的测定

利用蒸散仪法测量 4 种草坪草在限制灌水条件下的蒸散量,测定前一天将草坪草浇透水,使土壤水分饱和,每天晚 18:00 时称重,两日花盆重量之差即为草坪草日蒸散量,直到草坪草叶片出现萎蔫前每次测定值的累加量,即为其最小蒸散量.

(3) 光响应曲线和水分利用效率曲线的测定

选择晴朗的天气,利用便携式光合作用测定系统(美国 LI-COR LI-6400)在每一个土壤水分梯度下,对每种草坪草的光合作用参数的光响应进行测定,测定时间为上午 9:00—11:00.设置光照辐射强度分别为 1400、1200、1000、800、500、300、150、100、50、20、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 共 11 个梯度,每个梯度设置测定时间为 60—120 s.自动记录净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)等生理参数.叶片水分利用效率(WUE, $\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)为 P_n 与 T_r 的比值,即 $\text{WUE} = P_n/T_r$.

(4) 灌溉定额的计算

灌溉定额指单位灌溉面积上一次灌水的灌水量.灌溉定额的计算公式为:

$$H = Rh \times (W_{\text{上}} - W_{\text{下}}) \times Sd$$

式中, H 为灌溉定额(mm)即为补灌量, Rh 为计划湿润湿度(mm), $W_{\text{上}}$ 为土壤相对含水量上限(%), $W_{\text{下}}$ 为土壤相对含水量下限(%), Sd 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel、SPSS21.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 等软件进行处理.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 不同水分梯度下草坪草净光合效率的光响应

4 种草坪草在不同水分梯度下净光合速率的光响应曲线如图 1 所示,在光照强度大于 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,两种暖季型草坪草的净光合效率总体上高于两种冷季型草坪草.黑麦草不同土壤水分条件下的饱和点不同.在土壤相对含水量(RWC)为 59.70%—70.30% 时黑麦草 P_n 表现出较高水平,低光照强度下, P_n 随光照强度的增加迅速上升,在 PAR 达到 1000—1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时曲线开始趋于平缓, P_n 达到饱和,净光合速率与其他水平相比差异显著,表明黑麦草在此土壤水分范围时对光能利用效率比较高,光合速率较强. RWC 在 33.40% 时, P_n 一直处于较低的水平,当光照强度达到 $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右时净光合速率不再增加,达到饱和,说明在土壤水分较低时,黑麦草光合作用能力

较低。

通过对不同土壤水分条件下高羊茅 P_n 的光响应进程测定发现,各水分条件下的光响应曲线变化趋势相似, P_n 均随着 PAR 的增强而逐渐升高,最终达到饱和后趋于平稳.不同土壤水分条件下高羊茅的 P_n 饱和点不同,在 RWC 为 71.50%—87.50% 时 P_n 最高,表现出较高的光能利用潜力,在 RWC 低于 71.50% 时, P_n 下降的幅度较大,并随着土壤水分的降低而降低.上述结果表明,有利于高羊茅光合作用的土壤相对含水量为 71.50%—87.50%.

狗牙根在 RWC 为 56.00%—82.60% 时 P_n 值较高,其中在 RWC 为 82.60% 时,其光合作用产出最高,所以最有利于光合产出的土壤水分范围为 56.00%—82.60%.其次是 RWC 为 98.40% 时,说明随着土壤水分的升高,光合作用下降,狗牙根对光能的利用减弱,说明过高的土壤水分不利于狗牙根对光能的利用.在 RWC 为 28.90% 时,狗牙根的光合作用最低,说明土壤水分过低时,能被植物吸收利用的水分较少,影响了植株体内有机物质的合成.

中华结缕草的净光合效率均处在较高水平,当光照强度达到 800—1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时基本达到饱和,净光合速率不再随着光照强度的增加而增加.在 RWC 为 53.00%—89.00% 时,其净光合速率较高,且之间差异不大.在 RWC 为 71.50% 时 P_n 达到最高值,而在 RWC 为 31.00% 时, P_n 值最低.

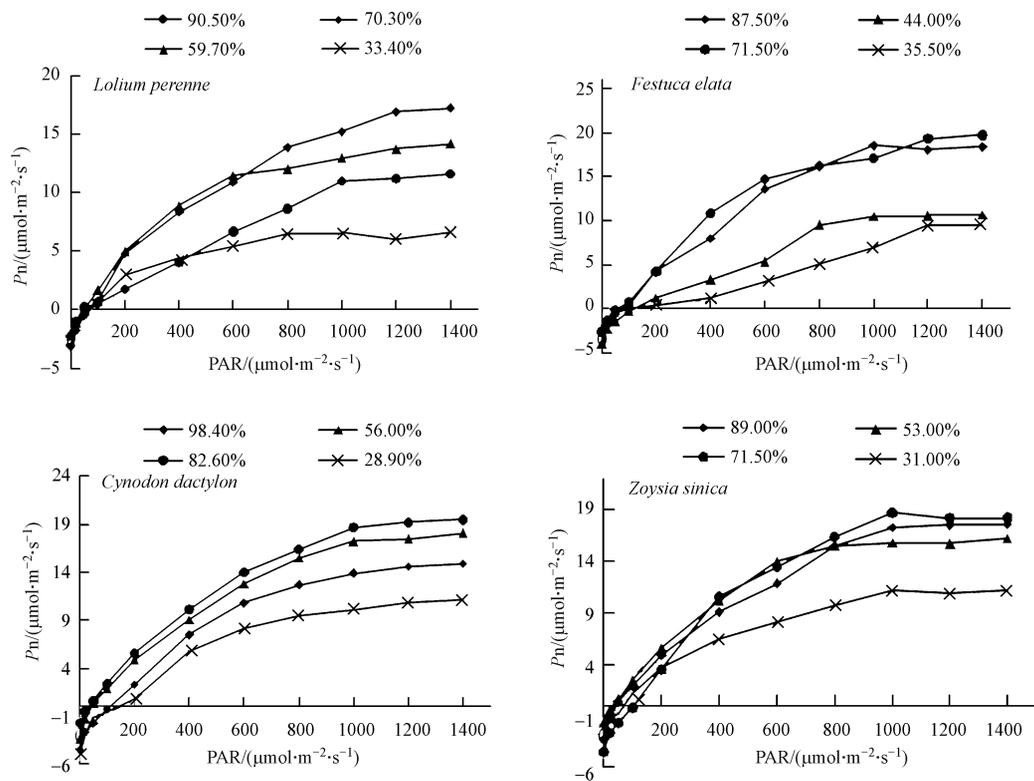


图1 不同土壤水分条件下4种草坪草叶片净光合速率的光响应曲线

Fig.1 Light response curves of the P_n of the four types of turf-grass under different soil water content conditions

2.2 不同水分梯度下水分利用效率的光响应

图2显示了不同土壤水分条件下4种草坪草水分利用效率的光响应曲线变化趋势.结果表明,两种暖季型草坪草的水分利用效率(在 $\text{PAR} > 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时)较两种冷季型草坪草高.不同土壤水分梯度下的黑麦草的水分利用效率在低光强下 ($\text{PAR} < 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 上升较快,之后随着光照强度的增强,WUE 上升缓慢,后逐渐趋于稳定.不同的土壤水分梯度下,WUE 值明显不同,当 RWC 为 70.30% 时,WUE 值达到最高水平,土壤水分继续升高,WUE 表现为下降的趋势.有利于黑麦草水分利用的 RWC 在 59.70%—70.30% 范围内,土壤水分高于或低于该范围时,WUE 明显降低,在 RWC 为 33.40% 时,WUE 处于最低水平.

高羊茅的水分利用效率光响应曲线变化与黑麦草相似,不同的土壤水分梯度下,WUE 值不同,在一

定范围内,土壤水分升高,WUE 值升高,当 PAR 为 71.50%时,WUE 值达到最高水平,但土壤水分继续升高,WUE 表现为下降的趋势.土壤水分过低时,WUE 明显降低,在 RWC 为 35.50%时,WUE 处于较低水平.

狗牙根在 RWC 为 56.00%—82.60%时,WUE 保持在较高较平稳的状态,当 RWC 继续升高至 98.40%时,WUE 呈现出下降的趋势,而低水分条件下,狗牙根的 WUE 最低,因此,维持较高 WUE 的 RWC 为 56.00%—82.60%.

中华结缕草的 WUE 光响应变化与狗牙根的相似,在 RWC 为 71.50%时,WUE 值最高,RWC 为 31.00%—53.00%时,WUE 较低,得到中华结缕草适宜的土壤水分范围为 71.50%—89.00%.

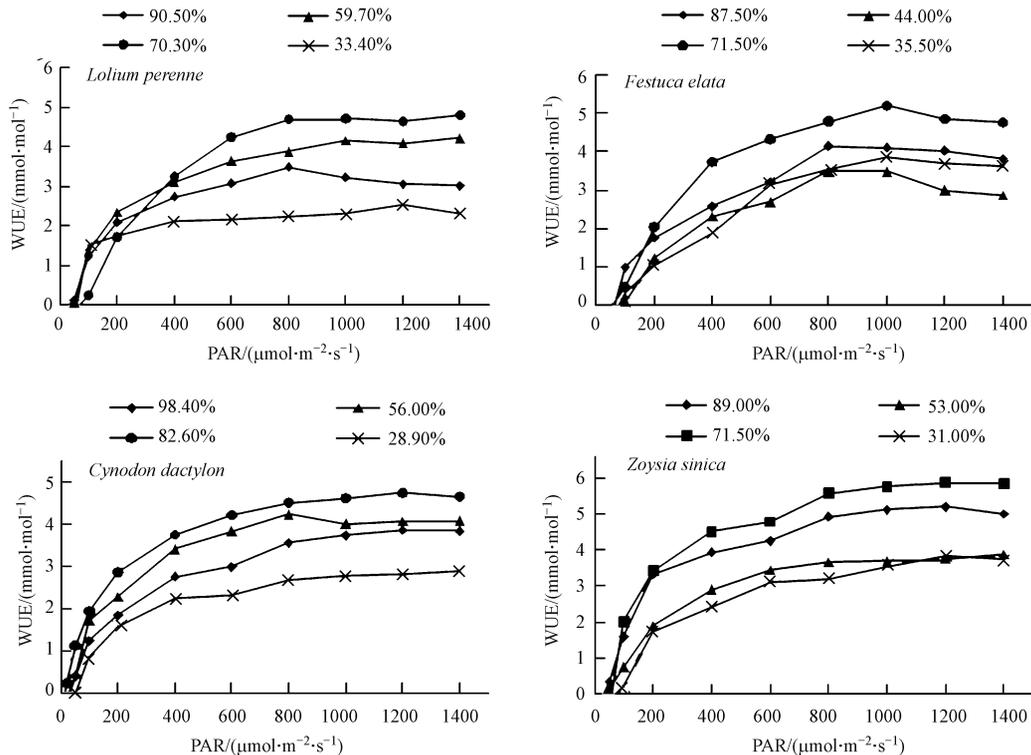


图 2 不同土壤水分条件下 4 种草坪草水分利用效率的光响应曲线

Fig.2 Light response curves of WUE of the four types of turf-grass under different soil moisture conditions

试验表明,暖季型草坪草的光合速率和水分利用效率均高于冷季型草坪草.草坪草的光合速率主要受其自身的生理特性影响,暖季型草坪草多为 C4 植物,C4 植物固定 CO_2 的能力强,其光合速率较高,4 种草坪草在土壤水分最低时 P_n 值总体较低,说明在水分亏缺时,草坪草的光合作用主要受土壤水分的限制.当土壤水分过高时,4 种草坪草的光合速率和水分利用效率均有不同程度的下降,说明草坪草具有其各自适宜的土壤水分阈值.

2.3 草坪草土壤水分阈值及灌溉制度的制定

通过对 4 种草坪草不同土壤水分梯度下 P_n 、WUE 光响应曲线的综合分析,得出 4 种草坪草同时具有较高光合效率和较高的水分利用的土壤水分阈值,黑麦草 RWC 为 59.70%—70.30%,高羊茅为 71.50%—87.50%,狗牙根为 56.00%—82.60%,中华结缕草为 71.50%—89.00%.由此可以看出,黑麦草和狗牙根在 600%左右的土壤水分时即表现出“高产高效”^[24-25],而高羊茅和中华结缕草需在 71.50%以上的土壤水分时才能最大发挥其产效,因此,在园林绿化中,黑麦草和狗牙根对土壤水分要求相对较低,对环境的抗逆性更强.郎莹等^[26]研究得到春季连翘光合作用较适宜的土壤水分为 $51.84\% \leq \text{土壤相对含量}(\text{SRWC}) \leq 58.96\%$.裴斌等^[27]研究表明,维持沙棘具有较高 WUE 和 P_n 的土壤水分阈值 RWC 在 58.60%—70.50%之间,与之相比,应用在屋顶绿化中的几种草本植物的最佳水分阈值相对较高,推测这与屋顶特殊的生态环境有关,说明利用草坪草适宜的土壤水分阈值可以达到有效节水的目的.

草坪草根系主要分布在 0—40 cm 深的表层土内^[28-29],由于屋顶绿化的土壤基质较浅,所以冷季型

韩燕^[30]探究了青岛市地面上应用的 3 种混播草坪草的耗水特性,其灌水总量在 540—684 mm 之间;蒋庭菲等^[31]研究表明,草坪草的灌水周期为 5 d,每次灌水量 33mm 较为适宜;许正刚^[32]研究表明,结缕草和狗牙根的灌溉制度分别为:灌水定额为 11 mm/次和 11 mm/次;灌水次数为 70 次和 65 次;灌溉定额为 770 mm 和 715 mm.与之相比,本实验得出屋顶环境下的 4 种草坪草总的需水量并不高,说明依据适宜的土壤水分阈值进行合理的灌溉可以有效起到节水的作用.

3 结论 (Conclusion)

(1) 在屋顶环境下,不同的草坪草其最佳的土壤水分阈值不同,结果表明,暖季型草坪草的光合速率和水分利用效率均高于冷季型草坪草.4 种草坪草在屋顶绿化时最佳土壤水分阈值为:高羊茅 71.50%—87.50%、黑麦草 59.70%—70.30%、狗牙根 56.00%—82.60%、中华结缕草 71.50%—89.00%.

(2) 根据草坪草的蒸散量、最佳土壤水分阈值和年均降雨量制定了较为合理的灌溉制度,在屋顶绿化中,黑麦草、高羊茅在生长季内分别需补充灌水 33、37 次,每次 19.29 mm、16.64 mm,补充灌溉量分别为 610.46 mm 和 601.26 mm;狗牙根和中华结缕草在生长季内需补充灌溉 25、27 次,每次 20.75 mm、18.20 mm,补充灌溉量分别为 506.66 mm 和 485.16 mm.在实际应用中,可以根据草坪草最适的土壤水分阈值,实现节水灌溉.

参考文献 (References)

- [1] ZHANG S Y, XIA J B, ZHOU Z F, et al. Photosynthesis responses to various soil moisture in leaves of *Wisteria sinensis*[J]. Journal of Forestry Research, 2007, 18(3): 217-220.
- [2] FAROOQA M, WAHID A, KOBAYASHI N, et al. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management [J]. Sustainable Agriculture, 2009(23), 153-188.
- [3] 王克勤,王斌瑞. 土壤水分对金矮生苹果光合速率的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 206-214.
WANG K Q, WANG B R. The effect of soil moisture upon net photosynthetic rate of the goldspur apple tree [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(2): 206-214(in Chinese).
- [4] 朱万泽,王金锡,薛建辉. 台湾桤木引种的光合生理特性研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2012-2019.
ZHU W Z, WANG J X, XUE J H. Study on the photosynthetic characteristics of introduced *Alnus formosana*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(11): 2012-2019(in Chinese).
- [5] TOGNETTI R, ANDRIA R, MORELLI G, et al. Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees[J]. Plant and Soil, 2004, 263(1): 249-264.
- [6] LIMA A L S, DAMATTA F M, PINHEIRO H A, et al. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora*, under water deficit conditions[J]. Environmental & Experimental Botany, 2002, 47(3): 239-247.
- [7] PINHEIRO H A, DAMATTA F M, CHAVES A R M, et al. Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora*, subjected to long-term drought[J]. Plant Science, 2005, 167(6): 1307-1314.
- [8] HUANG L, PENG Y K, LI H L, et al. Effects of soil moisture regimes on growth and photosynthesis of the riparian plant *Bolboschoenus planiculmis*[J]. Forest Science and Practice, 2013, 15(2): 105-113.
- [9] 张岁岐,山仑. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5.
ZHANG S Q, SHAN L. Research progress on water use efficiency of plant [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 1-5 (in Chinese).
- [10] ZHANG G C, XIA J B, SHAO H B, et al. Grading woodland soil water productivity and soil bioavailability in the semi-arid loess plateau of china[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40(2): 148-153.
- [11] XIA J B, ZHANG G C, WANG R R, et al. Effect of soil water availability on photosynthesis in *Ziziphus jujuba* var. spinosus in a sand habitat formed from seashells: Comparison of four models[J]. Photosynthetica, 2014, 52(2): 253-261.
- [12] LANG Y, WANG M, ZHANG G C, et al. Experimental and simulated light response of photosynthesis in leaves of three species under different soil water conditions[J]. Photosynthetica, 2013, 51(3): 370-378.
- [13] BELILIN C, THMINE S, SCHROEDER J I. Water balance and the regulation of stomatal movements[J]. Springer Netherlands, 2009, 15(7): 761-772.
- [14] MIELKE M S, OLIVA M A, BARROS N F, et al. Leaf gas exchange in a clonal eucalypt plantation as related to soil moisture, leaf water potential and microclimate variables[J]. Trees, 2000(14): 263-270.
- [15] SINGH S K, RAJA R K. Regulation of photosynthesis, fluorescence, stomatal conductance and water-use efficiency of cowpea (*Vigna*

- unguiculata* [L.] Walp.) under drought[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology Biology B, 2011, 105(1): 40-50.
- [16] LIU J, ZHANG R, ZHANG G, et al. Effects of soil drought on photosynthetic traits and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* seedlings[J]. Journal of Forestry Research, 2016, 28(2): 255-263.
- [17] MANK S B, GIULIA V, AMILCARE P. Coupled carbon and water fluxes in CAM photosynthesis: Modeling quantification of water use efficiency and productivity[J]. Plant and Soil, 2014, 383(1-2): 111-138.
- [18] 王材源,杨培岭,李云开,等. 非充分灌溉对屋顶绿化大叶黄杨生长及水碳通量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 145-150.
WANG C Y, YANG P L, LI Y K, et al. Effects of deficit irrigation on growth, water and carbon fluxes of *Euonymus japonicas* for green roof [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 145-150(in Chinese).
- [19] 张淑勇,夏江宝,张光灿,等. 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2519-2528.
ZHANG S Y, XIA J B, ZHANG G C, et al. Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic productivity classification[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2519-2528(in Chinese).
- [20] 赵叶萌,李玉中,刘晓英,等. 冬小麦节水高产的土壤水分阈值及其动态[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 536-543.
ZHAO Y M, LI Y Z, LIU X Y, et al. Soil water threshold and its dynamics of winter wheat aiming water-saving and high yield[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(5): 536-543(in Chinese).
- [21] 汤聪,刘念,郭微,等. 广州地区8种草坪式屋顶绿化植物的抗旱性[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1867-1876.
TANG C, LIU N, GUO W, et al. The Drought tolerance of several lawn-style roof-green species in Guangzhou Area[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(10): 1867-1876(in Chinese).
- [22] 张斌. 不同相对湿度下几种屋顶绿化景天植物耐热性研究[J]. 北方园艺, 2016(7): 69-73.
ZHANG B. Study on the heat resistance of several roof greening *Sedum* plants growing in different relative humidity [J]. Northern Horticulture, 2016(7): 69-73(in Chinese).
- [23] 衡静,李鹏,杨秋生,等. 几种屋顶绿化植物对种植基质的适应性研究[J]. 河南农业科学, 2010,39(3): 83-85.
HENG J, LI P, YANG Q S, et al. Study on the adaptabilities of several roof greening plants to different matrixes[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2010,39(3): 83-85(in Chinese).
- [24] 张光灿,刘霞,贺康宁. 黄土半干旱区刺槐和侧柏林地土壤水分有效性及生产力分级研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 858-862.
ZHANG G C, LIU X, HE K N. Grading of *Robinia doacacia* and *Platycladus orientalis* woodland soil's water availability and productivity in semi-arid region of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 858-862(in Chinese).
- [25] CHEN Z Y, PENG Z S, YANG J, et al. A mathematical model for describing light-response curves in *Nicotiana tabacum* L. [J]. Photosynthetica, 2011(49): 467-471.
- [26] 郎莹,汪明. 春、夏季土壤水分对连翘光合作用的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 3043-3051.
LANG Y, WANG M. Effects of soil water on photosynthesis of *Forsythia suspense* (Thunb.) Vahl. in spring and summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 3043-3051(in Chinese).
- [27] 裴斌,张光灿,张淑勇,等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.
PEI B, ZHANG G C, ZHANG S Y, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1386-1396(in Chinese).
- [28] 韩烈保. 草坪全景丛书:草坪建植与管理手册[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
HAN L B. Lawn planting and management manual[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,1999(in Chinese).
- [29] 成文竞. 三种草坪草的根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 179-183.
CHENG W J. Root distribution characteristics of three turfgrasses and their impact on soil nutrient content[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(1): 179-183(in Chinese).
- [30] 韩燕. 3种草坪蒸腾耗水特性研究[D]. 青岛:青岛农业大学,2012.
HAN Y. Studies on transpiration characteristics of three turfgrasses[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2012(in Chinese).
- [31] 蒋庭菲,范兴科,侯红蕊,等. 几种城市绿地草坪草需水规律研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 88-91,110.
JIANG T F, FAN X K, HOU H R, et al. Study on water requirement regulation of turfgrass for the urban green land[J]. Research of soil and Water Conservation, 2013, 20(6): 88-91,110(in Chinese).
- [32] 许正刚. 深圳市五种绿地植物蒸散量及灌溉制度研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
XU Z G. The study on evapotranspiration and irrigation schedule of five greenland plants in Shenzhen [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010(in Chinese).