

阴生型地被植物耗水性与最大光化学效率对干旱胁迫的响应

张鹏翀, 应求是, 莫亚鹰

(杭州植物园, 浙江 杭州 310013)

摘要: 为筛选出节水耐旱型的优良林下地被植物, 试验选取了赤车 *Pellionia radicans*, 点腺过路黄 *Lysimachia hemsleyana*, 伏地卷柏 *Selaginella nipponica*, 翠云草 *Selaginella uncinata*, 江南卷柏 *Selaginella moellendorffii*, 轮叶景天 *Sedum chauveaudii*, 沿阶草 *Ophiopogon bodinieri* 和江南景天 *Sedum kiangnanense* 等 8 种阴生型地被植物, 分析了干旱胁迫对其耗水和最大光化学效率 (F_v/F_m) 的影响。采用连续干旱的方法, 测定不同干旱胁迫下各植物的日耗水规律; 采用人为控制土壤相对含水量的方法, 利用 Li-6400XT 便携式光合仪测定不同干旱胁迫对各植物 F_v/F_m 的影响。结果表明: 各植物的日耗水变化均呈“单峰型”, 峰值都出现在 10:00-14:00, 各植物高峰时期每小时的耗水量和白天的耗水总量差异显著; 随着干旱胁迫的加剧, 耗水量不断下降, 而且峰值越来越不明显, 各种类之间的差异不显著; 江南卷柏、翠云草和伏地卷柏的 F_v/F_m 在不同的干旱胁迫下出现显著的下降, 形态特征变化明显。8 种阴生型地被植物均为较理想的节水耐旱型林下地被植物, 其中沿阶草最优, 而伏地卷柏、翠云草和江南卷柏的耐旱能力稍差; 此 8 种阴生型地被在栽培和养护过程中满足其高峰时段的耗水需求, 即可以达到生长和景观的需求, 在园林中进行合理地配置和应用。图 3 参 21

关键词: 植物学; 干旱胁迫; 地被植物; 耗水特性; 最大光化学效率

中图分类号: S718.3; Q945.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)04-0499-06

Water consumption and maximal photochemical efficiency for shade tolerant, ground cover plants during drought stress

ZHANG Pengchong, YING Qiushi, MO Yaying

(Hangzhou Botanical Garden, Hangzhou 310013, Zhejiang, China)

Abstract: To select drought-resistant and water-saving plants, water consumption and maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) of eight shade tolerant, ground cover plants (*Pellionia radicans*, *Lysimachia hemsleyana*, *Selaginella nipponica*, *Selaginella uncinata*, *Selaginella moellendorffii*, *Sedum chauveaudii*, *Ophiopogon bodinieri*) experiencing drought stress were analyzed. The persistent drought method was used to find diurnal water consumption regularity, and F_v/F_m was determined with manual control of different relative water contents using an Li-6400XT (Split-plot design with treatments of 100%, 80%, 60%, 40% and 3 replications). Results showed that with normal water content levels (100%), the diurnal variation for water consumption was a single-peak type between 10:00 and 14:00 with the peak and total water consumption varying among the eight plants ($F=8.459, P=0.05$). As water stress increased, water consumption decreased until there was no difference which were all under $0.5 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. The F_v/F_m of *Selaginella moellendorffii*, *Selaginella uncinata*, and *Selaginella nipponica* decreased dramatically at 80%, 60%, 40% by 61.6%, 22.6%, 48.5% respectively, and morphological characteristics deteriorated. Of the eight plant types, *Ophiopogon bodinieri* had the most ideal characteristics; whereas *S. moellendorffii*, *S. uncinata*, and *S. nipponica* were less fit as drought-resistant and water-saving types. Nevertheless, as long as peak water consumption was maintained, these plants could be used in gardens. [Ch, 3 fig. 21 ref.]

收稿日期: 2012-08-14; 修回日期: 2012-10-25

基金项目: 杭州市西湖风景名胜区管委会科技项目(2009-005)

作者简介: 张鹏翀, 工程师, 从事园林植物生理生态研究。E-mail: zhang-pengchong@163.com。通信作者: 应求是, 高级工程师, 从事园林植物资源与配置研究, E-mail: yingqiushi@163.com

Key words: botany; drought stress; ground cover plants; water consumption; maximal photochemical efficiency

随着中国城市化进程的高速发展,各地正在努力构建乔灌草结构的植物群落,实现城市生物多样性,使城市生态向着良性方向发展^[1]。地被植物的合理应用,不仅营造出更加丰富多彩的园林景观,而且有效改善了城市的生态系统,提高了城市的生态效益,已经成为城市园林绿化不可或缺的基础组成部分^[2-4]。然而,城市水资源短缺与城市绿地用水量不断增加的矛盾日益凸显,干旱缺水已成为城市生态建设最为重要的制约因子^[5]。筛选出节水抗旱的地被植物,努力发展节水型的低碳园林,成为解决问题的有效途径^[6-8]。近年来,有关水分对园林植物耗水及光合特性的影响已有了大量的研究^[9-13],但主要只侧重于其中一个方面,而将耗水和光合两方面结合起来进行耐旱植物筛选的研究较少。本研究选择了8种耐阴型地被植物,用盆栽的方法对其在不同干旱胁迫下的耗水和光系统Ⅱ的最大光化学效率进行了研究,筛选出耐旱性强、耗水量少的耐阴型地被植物,为城市绿化地被植物的选择提供科学的参考和依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养

分别选取了赤车 *Pellionia radicans*, 点腺过路黄 *Lysimachia hemsleyana*, 伏地卷柏 *Selaginella nipponica*, 翠云草 *Selaginella uncinata*, 江南卷柏 *Selaginella moellendorfii*, 轮叶景天 *Sedum chauveaudii*, 沿阶草 *Ophiopogon bodinieri* 和江南景天 *Sedum kiangnanense* 等8种阴生型优良地被植物为试验材料,选用大小均一、完整健康的植株,于2011年3月份用园土于8 cm × 10 cm的蛋壳盆中进行扦插繁殖,放置在杭州植物园引种圃地的遮阳棚中培养,定期浇水,除杂草。10月初,待植株萌发生长到一定生物量后进行试验。生物量的测定采取称量的方法,栽植前使得盆和土的质量一致,待植物生长至将盆内面积覆盖满时,进行称量,选择质量均一的6盆作为试验材料。

1.2 处理方法

耗水试验采取连续干旱的方法。叶绿素荧光试验采用双因素的随机区组设计,重复6次·处理⁻¹,对照(ck)土壤相对含水量(RWC)为100%(占土壤最大持水量的百分数),轻度胁迫的土壤相对含水量为80%,中度胁迫的土壤相对含水量为60%,重度胁迫的土壤相对含水量为40%。每天下午6:00通过称量、补水来控制含水量,干旱胁迫30 d后进行试验。土壤最大持水量的测定参照威尔科克斯法^[14]。

1.3 植物耗水的测定

试验开始前充分浇水,用塑料薄膜封盆处理,并将其放入遮阳防雨棚下,开始连续干旱处理。选择晴朗天气测定,测定时间为8:00-18:00,遮阳棚内平均最低气温18℃,平均最高气温23℃,平均相对湿度65%,隔2 h称量1次,重复测定8次。计算各植物的耗水量日变化,由于景天科植物的叶面积难以精确测定,耗水量以干物质质量所消耗的水分每小时来计算。干旱胁迫程度依据土壤相对含水量确定。

1.4 植物最大光化学效率的测定

采用Li-6400XT型便携式光合仪(Li-COR,美国)的荧光叶室测定各植物的最大光化学效率(F_v/F_m)。测量和耗水测定在同天进行,测定前将植物材料进行30 min的充分暗适应。叶绿素荧光测定的参数设置为:测量光光强为1,调制为0.25 kHz,滤光为1,增益为10;饱和和脉冲光为矩形,持续时间为0.8 s,光强为6 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,调制为20 kHz,滤光为50。计算光系统Ⅱ(PSII)的 F_v/F_m 。

1.5 数据统计分析

试验数据用Excel进行表格、图表处理,运用SPSS 16.0统计软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 8种地被植物的耗水特性

2.1.1 水分充足条件下8种地被植物的耗水规律 从图1中可知:在土壤水分条件充足、天气晴朗的条件下,8种植物的耗水量日变化均呈“单峰型”,峰值出现在10:00-14:00时,其中点腺过路黄、伏地卷柏、翠云草、江南卷柏、轮叶景天、沿阶草和江南景天等的峰值出现在10:00-12:00,而赤车出现在12:00-14:00;高峰时段耗水量每小时为江南景天>轮叶景天>翠云草>伏地卷柏>江南卷柏>赤车>点

腺过路黄>沿阶草，分别为 2.04, 1.61, 1.57, 1.56, 1.09, 0.88, 0.77 和 0.38 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。经方差分析得出：江南景天与赤车、点腺过路黄和沿阶草，以及伏地卷柏、翠云草和轮叶景天与沿阶草达到显著差异水平外($F=8.459, P=0.05$)，其他种类均无显著差异；赤车、点腺过路黄、伏地卷柏、翠云草、江南卷柏、轮叶景天、沿阶草和江南景天等高峰期耗水量每小时占白天耗水总量的比例分别为 27.1%, 26.7%, 49.2%, 40.1%, 36.0%, 38.4%, 36.0%和 37.6%。

2.1.2 轻度干旱胁迫下 8 种地被植物的耗水规律 在轻度干旱胁迫条件下(图 1)，各植物的日耗水量均有所下降，但耗水的日变化仍都为“单峰型”，而点腺过路黄、伏地卷柏、翠云草、轮叶景天和江南景天等的耗水高峰由水分充足条件下的 10:00–12:00 推迟至 12:00–14:00，其他种类的耗水高峰没有变化。除江南景天外，高峰时段每小时耗水量较水分充分时都显著下降，赤车、点腺过路黄、伏地卷柏、翠云草、江南卷柏、轮叶景天、沿阶草和江南景天分别为 0.68, 0.72, 0.84, 1.00, 0.85, 1.15, 0.24 和 1.81 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。方差分析表明：除江南景天与江南卷柏、伏地卷柏、点腺过路黄、赤车和沿阶草等有显著差异外($F=6.024, P=0.05$)，其他种类均无显著差异。此时，各植物高峰时段每小时的耗水量较水分充分时分别下降了 22.7%, 6.5%, 46.2%, 36.3%, 22.0%, 28.6%, 36.8%和 11.3%，高峰时段每小时耗水量占白天耗水总量的比例分别为 31.5%, 28.0%, 31.4%, 35.1%, 41.4%, 38.4%, 43.5%和 62.7%。

2.1.3 中度干旱胁迫下 8 种地被植物的耗水规律 在中度干旱胁迫条件下(图 1)，各植物的日耗水量继续下降，耗水的日变化都仍为“单峰型”，除轮叶景天和江南景天的耗水高峰恢复到 10:00–12:00，沿阶草的耗水高峰推迟至 14:00–16:00 外，其他种类的耗水高峰时段与轻度干旱胁迫条件下的相同。各植物高峰时段的耗水量每小时较水分充足条件下均显著下降，赤车、点腺过路黄、伏地卷柏、翠云草、江南卷柏、轮叶景天、沿阶草和江南景天分别为 0.67, 0.45, 0.71, 0.67, 0.67, 0.64, 0.17, 和 0.62 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。方差分析表明：除沿阶草与其他种类有显著差异外($F=3.191, P=0.05$)，其他种类均无显著差异。此时，各植物高峰时段的每小时耗水量较水分充分时分别下降了 23.9%, 41.6%, 54.5%, 57.3%, 38.5%, 60.2%, 55.3%和 69.6%，高峰时段的耗水量每小时占白天耗水总量的比例分别为 28.6%, 37.7%, 41.3%, 45.8%, 35.4%, 36.8%, 37.8%和 39.7%。

2.1.4 重度干旱胁迫下 8 种地被植物的耗水规律 在重度干旱胁迫条件下(图 1)，各植物的日耗水量继

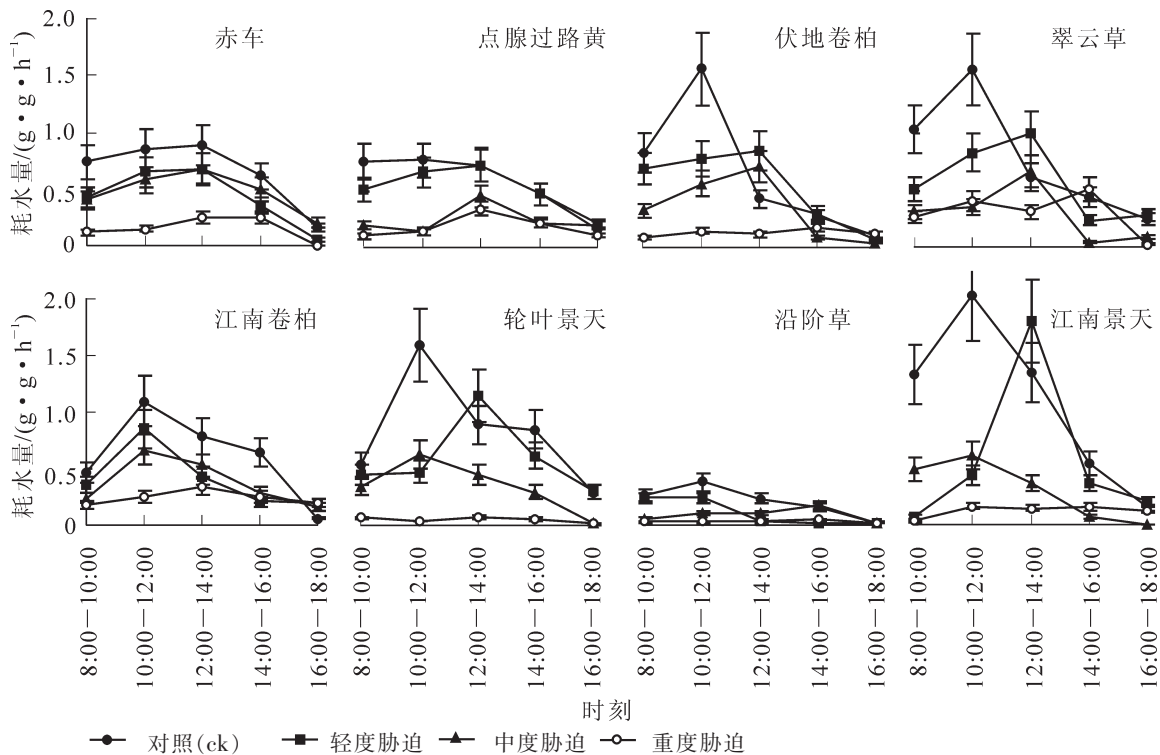


图 1 不同水分条件下 8 种地被植物的耗水规律

Figure 1 Diurnal variation of water consumption under different water stresses

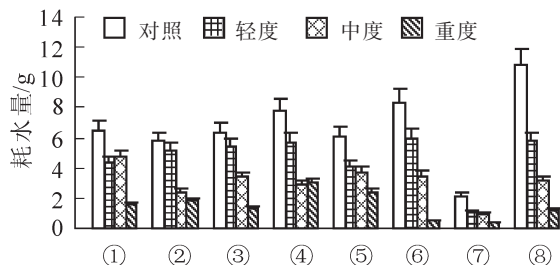
续下降,且白天耗水量的波动较小,无显著的耗水高峰时期,各时段的耗水量比较均一,都在 $0.5\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下。可见当植物受到重度干旱胁迫的蒸腾耗水受气象因子的影响较小,主要是植物内在特性所决定。

2.2 不同干旱胁迫下8种地被植物白天总耗水量的变化

8种地被植物白天总的耗水量各不相同(图2)。在水分充足条件下,除沿阶草(2.14 g)外,其他种类白天总的耗水量为5.76~10.84 g,从大到小依次为江南景天10.84 g,轮叶景天8.38 g,翠云草7.84 g,赤车6.50 g,伏地卷柏6.33 g,江南卷柏6.10 g,点腺过路黄5.76 g和沿阶草2.14 g。除赤车外,与水分充足条件下高峰时期的耗水量顺序一致,表明高峰时段耗水量为潜在的高耗水量;在轻度干旱胁迫下,8种地被植物白天总的耗水量都有所下降,顺序也发生了变化,从大到小依次为轮叶景天6.00 g,江南景天5.78 g,翠云草5.72 g,伏地卷柏5.37 g,点腺过路黄5.14 g,赤车4.31 g,江南卷柏4.11 g和沿阶草1.12 g,较水分充足时分别下降了28.4%,46.7%,27.0%,15.2%,10.8%,33.7%,32.6%和47.7%,其中江南景天的下降幅度最大,而点腺过路黄下降得最少;中度水分胁迫下,除赤车外其他种类的白天总耗水量继续下降,从大到小依次为赤车、江南卷柏、轮叶景天、伏地卷柏、江南景天、翠云草、点腺过路黄和沿阶草,较水分充足时分别下降了27.4%,38.4%,58.8%,46.0%,71.3%,62.6%,58.7%和57.9%,其中江南景天下降得最多,赤车下降得最少;重度干旱胁迫条件下,除翠云草外,其他种类白天总的耗水量继续下降,并维持在较低的水平(0.33~2.41 g),从大到小依次为翠云草、江南卷柏、点腺过路黄、赤车、伏地卷柏、江南景天、轮叶景天和沿阶草,较水分充足时分别下降了61.4%,60.5%,68.9%,76.3%,79.9%,88.6%,94.3%和84.6%,其中轮叶景天下降最多,而江南卷柏下降最少。

2.3 干旱胁迫对8种地被植物 F_v/F_m 的影响

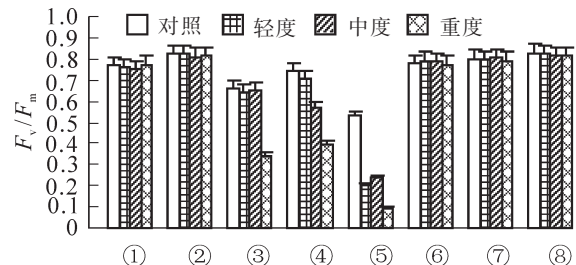
由于景天科植物所特有的景甜酸代谢途径(CAM)^[15],以及光系统II(PS II)最大光化学效率(F_v/F_m)的降低是光合作用受到抑制时的显著特征(图3),因而被视为强光、干旱抑制发生的判断标准,因此,试验选取了这个参数来反映干旱胁迫对植物光合的影响。从图3中可知:在试验所设置的水分梯度中,干旱胁迫对赤车、点腺过路黄、轮叶景天、沿阶草和江南景天等的光合特性没有显著的影响;江南卷柏在土壤相对含水量80%时出现了显著的降低,随后在40%时又出现了显著的下降低,分别较对照下降了61.6%和81.9%;翠云草在60%和40%时都出现了显著的下降低,较对照分别下降了22.6%和46.8%;伏地卷柏在40%时出现了显著的下降低,较对照下降了48.5%。从水分胁迫对8种地被植物光合特性的影响来看,其耐旱的顺序为赤车、点腺过路黄、轮叶景天、沿阶草、江南景天>伏地卷柏>翠云草>江南卷柏。



①赤车*Pellionia radicans*; ②点腺过路黄*Lysimachia hemsleyana*; ③伏地卷柏*Selaginella nipponica*; ④翠云草*Selaginella uncinata*; ⑤江南卷柏*Selaginella moellendorffii*; ⑥轮叶景天*Sedum chauveaudii*; ⑦沿阶草*Ophiopogon bodinieri*; ⑧江南景天*Sedum kiangnanense*

图2 不同水分条件下8种地被植物白天耗水总量的变化

Figure 2 Total water consumption under different water stresses



①赤车*Pellionia radicans*; ②点腺过路黄*Lysimachia hemsleyana*; ③伏地卷柏*Selaginella nipponica*; ④翠云草*Selaginella uncinata*; ⑤江南卷柏*Selaginella moellendorffii*; ⑥轮叶景天*Sedum chauveaudii*; ⑦沿阶草*Ophiopogon bodinieri*; ⑧江南景天*Sedum kiangnanense*

图3 水分胁迫对8种地被植物植物 F_v/F_m 的影响

Figure 3 Influence on F_v/F_m under different water stresses

3 讨论

在连续干旱胁迫条件下,8种阴生型地被植物的耗水量日变化都呈递减的趋势,除重度干旱胁迫下耗水高峰期不明显外,其他条件下均呈“单峰型”曲线,耗水高峰期都为10:00~14:00(中度干旱胁迫下

的沿阶草除外)。水分充足条件下,各种植物高峰时期每小时的耗水量差异明显,说明此时耗水特性与植物自身的生理特性紧密相关,但随着干旱胁迫程度的增加,各种类之间的差异不断减少,至重度干旱胁迫时各种类的耗水量比较接近,种类之间的差异不再显著,耗水量不再随着环境因子的变化而变化,说明此时各种植物对蒸腾耗水的主动调控能力已经丧失,耗水量主要由植物内在的特性所决定。轻度干旱胁迫下,点腺过路黄、伏地卷柏、翠云草、轮叶景天和江南景天等的耗水高峰由10:00–12:00推迟至12:00–14:00,表明此时植物已通过气孔来调节蒸腾耗水,缓解干旱胁迫的影响,提高水分利用效率^[16-17];中度干旱胁迫时,轮叶景天和江南景天的耗水高峰又恢复到10:00–12:00,说明此时植物已丧失了气孔的调节能力,而沿阶草的耗水高峰推迟至14:00–16:00,说明通过气孔的调节来进一步缓解干旱对其的影响;赤车和江南卷柏在整个过程中都未出现耗水高峰期的变化,在重度干旱胁迫前都维持较高的耗水量,表明其气孔的调节能力较差。各干旱胁迫条件下,高峰时段每小时耗水量占白天耗水总量比率的规律不明显。

8种阴生型地被植物白天的耗水总量也随着干旱胁迫程度的增加而减少。水分充足条件下白天耗水总量的顺序与高峰时段的耗水量基本一致,说明高峰时段的耗水量为潜在的高耗水量,在栽培和养护过程中至少应保证其高峰时段的耗水需求。随着干旱胁迫的加剧,各植物白天的耗水总量及顺序不停地发生变化,表明各植物对干旱胁迫的响应以及调节能力不尽相同,这与植物本身的耐旱特性密切相关。从下降的幅度来看,干旱胁迫对江南景天和轮叶景天白天的耗水影响最大,而对江南卷柏的影响最小。

F_v/F_m 是PS II的最大光化学量子产量,它反映的是PS II反应中心均处于开放态时的量子产量,一般恒定为0.80~0.85。当植物体受到环境胁迫时, F_v/F_m 会出现显著变化,因此,它是研究植物光合作用和生理生化的一个使用最广的荧光参数^[18]。在本试验所设置的水分梯度中,江南卷柏、翠云草和伏地卷柏等出现了不同程度的下降,表明干旱胁迫对其光合作用产生了一定的抑制,这与其叶片枯黄、卷曲等形态特征的变化一致(数据未给出),可能与叶绿体结构的变化、叶绿素的分解、光合电子传递系统遭到破坏或光合作用关键酶活性降低有关^[19-21]。其他种类的 F_v/F_m 虽未出现显著下降,但是在土壤相对含水量为40%时形态特征都有影响,出现了不同程度的卷曲和枯萎。

从干旱胁迫后8种阴生型地被植物耗水和光合特性的变化来看,各植物耐旱的程度有所不同,其中沿阶草的日耗水量最少,耐旱程度较强,在土壤相对含水量40%时仍能保持较好的形态特性,为理想的林下地被植物,目前已在园林中得到了广泛的应用;江南景天和轮叶景天的日耗水量较大,但干旱胁迫后的调控能力很强,与景天科植物自身的较强耐旱特性一致;伏地卷柏、翠云草和江南卷柏等的耐旱能力稍差,需要保持较高的土壤相对含水量来保持其正常的形态特征。总之,此8种阴生型地被植物中沿阶草为最优的耐旱节水林下地被植物,而伏地卷柏、翠云草和江南卷柏等的耐旱能力较差;但只要满足其每日高峰时段的耗水需求,基本可以保持其正常的蒸腾和光合作用,并保持良好的形态特征,可以结合其各自的耐旱和形态学特征,在园林中进行合理地配置和应用。

参考文献:

- [1] 周道瑛,王雁,苏雪痕.北京城市隔离片林的建设及改造[J].北京林业大学学报,1998,20(1):25-31.
ZHOU Daoying, WANG Yan, SU Xuehen. Establishment and reformation of isolating greenbelts in Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 1998, 20(1): 25-31.
- [2] 傅徽楠,严玲璋,张连全,等.上海城市园林植物群落生态结构的研究[J].中国园林,2002,16(2):22-25.
FU Huinan, YAN Lingzhang, ZHANG Lianquan, et al. Study on ecological structure of the ornamental plants community in Shanghai [J]. *J Chin Landscape Arch*, 2002, 16(2): 22-25.
- [3] 李海梅,何兴元,陈玮,等.中国城市森林研究现状及发展趋势[J].生态学杂志,2004,23(2):55-59.
LI Haimei, HE Xingyuan, CHEN Wei, et al. Current situations and trend of investigations on urban forest in China [J]. *Chin J Ecol*, 2004, 23(2): 55-59.
- [4] 范亚民,何平,李建龙,等.城市不同植被配置类型空气负离子效应评价[J].生态学杂志,2005,24(8):883-886.
FAN Yamin, HE Ping, LI Jianlong, et al. Effect evaluation of air negative ions under different vegetation arrangements in Nanning City [J]. *Chin J Ecol*, 2005, 24(8): 883-886.

- [5] 沈国舫, 王礼先. 中国生态环境建设与水资源保护利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [6] 王玉涛. 北京城市优良抗旱节水植物材料的筛选与评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
WANG Yutao. *Selection and Evaluation on Superior plant materials for Drought Resistant and Water-Saving in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [7] 杨丽娟. 重庆市耐旱园林植物的调查筛选及应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
YANG Lijuan. *The Investigation, Choosing and Application Experiment of Drought Resistance Landscape Plants in Chongqing* [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [8] 包宝祥. 北京市城市绿地耐旱性地被植物的筛选[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
BAO Baoxiang. *Selection of the Ground Cover Plants with Drought Resistance in Urban Greenland in Beijing Area* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [9] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲, 等. 不同干旱土壤条件下杨树的耗水规律及水分利用效率研究[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(5): 630 – 636.
YANG Jianwei, LIANG Zongsuo, HAN Ruilian, *et al.* Water use efficiency and water consumption characteristics of poplar under soil drought condition [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, **28**(5): 630 – 636.
- [10] 宋丽华, 王世虹. 干旱胁迫对7种绿化树种苗木蒸腾耗水的影响[J]. 林业科技, 2009, **34**(4): 6 – 9.
SONG Lihua, WANG Shihong. Effect of drought stress on evaporation and water consumption in several tree species [J]. *For Sci Technol*, 2009, **34**(4): 6 – 9.
- [11] 李吉跃, 朱妍. 干旱胁迫对北京城市绿化树种耗水特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(1): 32 – 37.
LI Jiyue, ZHU Yan. Effect of drought stress on the characteristics of water consumption of greening tree species in Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(1): 32 – 37.
- [12] 李吉跃, 周平, 招礼军. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水的影响[J]. 生态学报, 2002, **22**(9): 1380 – 1386.
LI Jiyue, ZHOU Ping, ZHAO Lijun. Influence of drought stress on transpiring water-consumption of seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, **22**(9): 1380 – 1386.
- [13] 周自云, 梁宗锁, 刘启明, 等. 干旱胁迫下酸枣生长与耗水特性研究[J]. 西北林学院学报, 2010, **25**(4): 45 – 48.
ZHOU Ziyun, LIANG Zongsuo, LIU Qiming, *et al.* Growth and water consumption characteristics of wild jujube on different soil water contents [J]. *J Northwest For Univ*, 2010, **25**(4): 45 – 48.
- [14] 江培福, 雷廷武, 刘晓辉, 等. 用毛细吸渗原理快速测量土壤田间持水量的研究[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(7): 1 – 5.
JIANG Peifu, LEI Tingwu, LIU Xiaohui, *et al.* Principles and experimental verification of capillary suction method for fast measurement of field capacity [J]. *Trans CSAE*, 2006, **22**(7): 1 – 5.
- [15] OSMOND C B. Crassulacean acid metabolism: a curiosity in context [J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1978, **29**: 379 – 414.
- [16] 孙广玉, 邹琦, 程炳嵩, 等. 大豆光合速率和气孔导度对水分胁迫的响应[J]. 植物学报, 1991, **33**(1): 43 – 49.
SUN Guangyu, ZHOU Qi, CHENG Bingsong, *et al.* responses of photosynthetic rate and stomatal conductance to water stress in soybean leaves [J]. *Acta Bot Sin*, 1991, **33**(1): 43 – 49.
- [17] FARQUBAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1982, **33**: 317 – 345.
- [18] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, **16**(4): 444 – 448.
ZHANG Shouren. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. *Chin Bull Bot*, 1999, **16**(4): 444 – 448.
- [19] CHAITANYA K V, JUTUR P P, SUNDAR D, *et al.* Water stress effects on photosynthesis in different mulberry cultivars [J]. *Plant Growth Regul*, 2003, **40**(1): 75 – 80.
- [20] PARRY M A J, ANDRALOJC P J, KHAN S, *et al.* Rubisco activity: effects of drought stress [J]. *Annu Bot*, 2002, **89**: 833 – 839.
- [21] HUGH J E. Stomatal and non-stomatal restrictions to carbon assimilation in soybean (*Glycine max*) lines differing in water use efficiency [J]. *Environ Exp Bot*, 2002, **48**(3): 237 – 246.