

非充分灌溉对屋顶绿化大叶黄杨生长及水碳通量的影响

王材源¹, 杨培岭^{1*}, 李云开¹, 任树梅¹, 路璐², 赵鲁³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 哈尔滨市水利规划设计研究院有限公司, 哈尔滨 150076;
3. 水利部淮河水利委员会沂沭河水利管理局郯城河道管理局, 临沂 276004)

摘要:北京市绿地大面积发展, 加剧了水资源和可用于绿化的土地资源短缺的紧张局面, 为此, 实施屋顶绿化对缓解北京市资源与能源紧缺的严重局面有重要意义。该文以典型的屋顶绿化植物大叶黄杨为研究对象, 采用盆栽试验, 研究在充分灌溉(CK)(90%~100%FC)、低度水分胁迫(LWS)(75%~85%FC)、中度水分胁迫(MWS)(65%~75%FC)、高度水分胁迫(SWS)(50%~60%FC)4种不同土壤水分控制水平下, 大叶黄杨的生理响应、景观功能及生态服务功能。研究发现, 大叶黄杨的光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用效率在水分胁迫的三个处理中 LWS>MWS>SWS, LWS处理与CK处理相比, 光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用效率仅相差1.55%、3.3%、4.13%、7.1%, 叶面积大7.8%, 叶绿素含量高3.1%; 在生态服务功能方面, 固碳释氧与降温增湿量在不同水分条件下相差并不明显。低度水分胁迫(LWS)(75%~85%FC)刺激了大叶黄杨的生长, 有效地调节了同化物在叶片生长及叶绿素上的分配, 同时在生态环境上发挥了巨大作用, 是一种切实可行的节水灌溉模式。

关键词:灌溉, 蒸腾, 生态, 屋顶绿化, 景观功能, 灌水模式, 大叶黄杨

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.10.023

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-10-0145-06

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 Caiyuan, Yang Peiling, Li Yunkai, 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 (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 145-150. (in Chinese with English abstract)

0 引言

世界经济与城市的发展, 促使二氧化碳排放量在逐年增加, 而二氧化碳排放量的增加直接导致了气候变暖^[1]。针对这一严重问题, 迫使全球性实施节能减排, 走低碳经济道路、发展低碳城市。绿地是城市生态系统中具有重要的自净能力, 在城市生态中既是城市生态系统的初级生产者, 也是生态平行的调控者, 一定数量和质量的绿地, 不仅是美化城市景观和市容的需要, 更是减轻和净化城市环境污染功能有效手段^[2-6]。随着全球性节能减排的实施, 促使城市绿地大面积的发展, 直接导致了用水量的增加、土地绿化面积的扩大和能源的消耗。然而, 对于水资源、土地资源、能源紧缺的北京市来说, 绿地的快速发展加剧了北京市资源与能源严重紧缺的紧张局面。屋顶绿化及绿化植物节水研究, 不仅节约了绿化植物大量的水量消耗, 减缓了由于缺乏地表水而大量开采

地下水的紧张局面, 减少了地下水开采的能量消耗。同时, 很大程度上缓解了北京市缺乏可用于绿地土地资源的严重问题。

北京市自然条件比较恶劣, 干旱少雨, 蒸发量大, 造成土地水分亏缺。绿地植物自身具有一定的抗旱性能, 前人也对不同水分胁迫条件下绿地植物的抗旱性能做了较多的研究, 但主要集中在植物的生长特性方面^[7-10], 研究方法主要参照农作物研究方式进行^[11-14]。对于农作物灌溉方式的研究, 所追求的目标是作物的产量、果实的品质等。而对于绿地植物, 产量和品质并不是所要达到的根本目标, 而是在城市绿化中所发挥的景观功能及生态服务功能。针对这一情况, 我们就必须转变对绿地植物灌溉研究的思路。需要寻求水分胁迫条件下综合考虑基于水分-景观-生态关系的一种灌溉模式, 制定合理的土壤水控制水平, 为城市绿化的建设及灌溉管理提供理论依据。

基于此, 本文采用盆栽试验, 以大叶黄杨为研究对象, 研究在不同土壤水分胁迫下, 基于综合考虑水分-景观-生态的非充分灌溉模式及生理响应, 为屋顶绿化植物非充分灌溉管理提供理论依据。对北京市低碳经济发展和低碳城市建设, 缓解水资源、土地资源、能源的严重紧缺有重大意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为北京市典型的绿化灌木大叶黄杨

收稿日期: 2011-08-08 修订日期: 2011-04-22

项目基金: 国家科技支撑计划(2007BAD88B09-06)

作者简介: 王材源(1986-), 中国农业大学博士生, 辽宁省大石桥人, 主要从事农业节水灌溉方面的研究。北京市海淀区清华东路17号 中国农业大学(东校区)水利与土木工程学院, 100083。

Email: wangcaiyan555@163.com

※通信作者: 杨培岭, (1958-), 内蒙古呼和浩特人, 教授, 主要从事灌溉排水理论与新技术方面的研究。北京市海淀区清华东路17号 中国农业大学(东校区)水利与土木工程学院, 100083。

Email: yangpeiling@126.com

(*Euonymus japonicus* Thunb), 试验地位于中国农业大学水利与土木工程学院 (39°56'N, 116°17'E)。属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温为 12.8℃, 年有效积温 4 500℃, 无霜期 189 d, 年降水量 450~650 mm, 其中 7~9 月份的月降水量占全年的 70%以上, 年蒸发量为 1 835.8 mm。2009 年 3 月将大叶黄杨移植到花盆中, 试验盆高 26.5 cm, 上口直径为 35 cm。每个盆底各开有 3 个小孔以便维持土壤的通透性和防止盆底积水。试验土壤取自中国农业大学试验地, 经风干后过筛, 按照体积质量 1.35 g/cm³ 进行装盆, 每盆装到距离盆上沿 5 cm 左右, 以便灌水, 防止溢出。每盆土质量 15.47 kg。试验苗木取自北京郊区的苗圃, 取苗时为了使试验方便, 选择彼此之间大小相差不大的苗木 (株高 40~50cm, 冠幅 30~40cm)。由于试验期间采用称重法控制土壤水分, 为了使试验准确, 栽培时将苗木根上的土尽量洗掉。为保证苗木的成活率, 栽培后的一个月所有苗木进行充分灌水, 同时施加生根粉, 以便根的快速生长。

1.2 试验设计

试验进行充分灌溉、低度水分胁迫、中度水分胁迫、高度水分胁迫 4 个处理, 每个处理 6 个重复。土壤水分处理控制土壤水分占田间持水量 (FC) 的百分比, 设置充分供水 (CK) (90%~100%FC)、低度水分胁迫 (LWS) (75%~85%FC)、中度水分胁迫 (MWS) (65%~75%FC)、高度水分胁迫 (SWS) (50%~60%FC) 4 个水平。

试验期间, 根据气候温度的变化利用电子天平定时进行监测, 每个处理当土壤水分达到事先设置的下限或接近于下限时进行灌溉达到上限, 使每个处理的土壤水分维持在各处理的上下限之间变化。灌水时, 为了保持精确利用 400 和 100 mL 的烧杯量取水进行灌水。灌水前, 在每个盆底放上小托盘, 防止灌水过快, 水量从土壤与盆的缝隙中渗出流失。并将渗出的水缓慢的倒回盆中, 以保证每个处理相应的土壤水分。

1.3 观测指标与测定方法

叶面积采用离体法进行 5 次测量, 每次测量间隔时间为 30 d。从生长良好的叶片中随机选取 30 片叶子, 贴于方格纸上, 利用 MRS-2400U2 扫描仪扫描成图片, 用 AutoCAD 软件中的测量工具测定扫描叶的叶面积, 然后计算总叶面积。叶片生长量采用离体称重法, 按不同处理将其整株的叶片分上、中、下剪下, 用精度在 0.01 g 的天平进行称质量测量。

利用 CI-340 光合测定系统对叶片的光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (Tr)、气孔导度 (g_s) 进行测量。在两次灌水之间选择典型的晴天, 从上午 08:00~18:00 每隔 2 h 测定一次。测量时, 按不同的方位分上、中、下 3 层选取生长完整且相对一致的 6 片叶子。水分利用效率为光合速率与蒸腾速率的比值。

采用德国生产的 SPAD-502 叶绿素仪, 选择典型的晴天在上午 10:00 从冠层顶部选择生长良好的 5 片叶片进行测量。

1.4 灌木景观功能表征方法

作为城市的绿化植物, 其景观功能显得尤为重要。

而绿化植物的景观功能主要体现在叶片的大小、叶片的稀疏程度及叶片的色泽度。

叶片的叶面积反映了叶片的大小, 叶片总的叶面积计算方法如式 (1)

叶片总叶面积

$$S_1 = S_2 \times W_1 / W_2 \quad (1)$$

式中, S_1 为总叶面积, cm²; S_2 为扫描叶面积, cm²; W_1 为总叶鲜质量, g; W_2 为扫描叶鲜质量, g。

叶面积指数体现了叶片生长的稀疏程度, 叶面积指数获得方法如下:

叶面积指数为

$$LAI = S_1 / \pi r^2 \quad (2)$$

式中, LAI 为叶面积指数; S_1 为总叶面积, cm²; r 为平均树冠半径, cm。

叶片的色泽度本文通过叶绿素含量的多少来表达, 对于常绿的绿化物种其叶绿素含量越高, 所达到的欣赏效果越好。本文利用德国生产的 SPAD-502 叶绿素仪测定叶片叶绿素含量。

1.5 灌木生态服务功能表征方法

1) 固氮释氧量

在植物的光合作用日变化曲线中, 其同化量是净光合速率曲线和时间横轴围合的面积。

以此为基础, 设净同化量为 P , 各种植物在测定当日的净同化量计算公式为

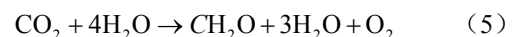
$$P = \sum_{i=1}^j [(P_{i+1} + P_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600 \div 1000] \quad (3)$$

其中, P 为测定日的同化总量, mmol/(m²·d), P_i 指测点的瞬时光合速率, P_{i+1} 为下一测点的瞬时光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; t_i 为初测点的瞬时时间, t_{i+1} 为下一点的测定时间, h, j 为测定次数, 3 600 指每小时为 3 600 s, 1 000 指 1 mmol 为 1 000 μmol 。

用测定的同化总量换算为测定日固定 CO₂ 量为

$$W_{\text{CO}_2} = 44P / 1000 \quad (4)$$

式中 44 为 CO₂ 的摩尔质量, g/mol; W_{CO_2} 为单位面积的叶片固定 CO₂ 的质量, g/(m²·d), 根据光合作用的反应方程



可测定出该测定日树木释放氧气的质量为

$$W_{\text{O}_2} = 32P / 1000 \quad (6)$$

W_{O_2} 为测定日树木释放氧气质量, g/(m²·d)。

2) 降温增湿量

降温增湿则是在蒸腾速率测定的基础上进行, 各种植物在测定当日的计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^j [(e_{i+1} + e_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600 \div 1000] \quad (7)$$

其中, E 为测定日的蒸腾总量, mmol/(m²·s); e_i 为初测点的瞬时蒸腾作用速率; e_{i+1} 为下一测点的瞬时蒸腾作用速率, $\mu\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; t_i 为下一测点的时间, h; j 为测试次数。

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = 18E \quad (8)$$

式中，18 为水的摩尔质量，g/mol。

设每平方米叶片在一天中因蒸腾作用散失水分而吸收的热量为 Q ，则

$$Q = W_{H_2O} \times L \quad (9)$$

式中， Q 为单位面积每日吸收的热量，kJ/(m²·d)。L 为蒸发耗热系数 ($L=2495-2.38T$ ， T 为测定日的温度)。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分控制水平对大叶黄杨光合特性的影响

为了定量的研究不同供水对大叶黄杨主茎叶和分枝叶光合速率、蒸腾速率及气孔导度的差异。试验期间，在不同时间对不同方位叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度进行了测量。试验结果表明 (表 1)，9 月份，不同土壤水分

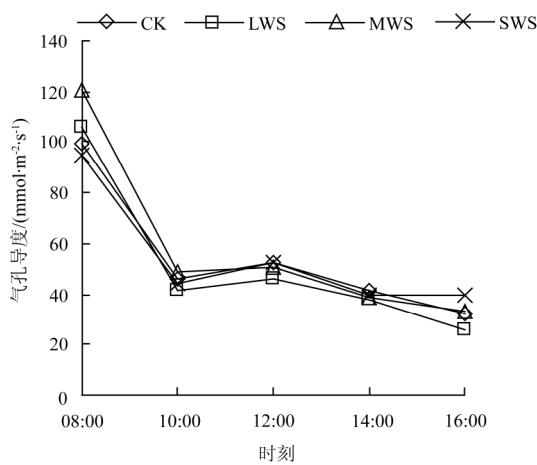
的叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度均有差异，但并不是随着水分的增加或减少，而呈现出一定的规律。其中 9 月份土壤水分在 (75%~85%Fc) (LWS)，光合特性要好于其他水分胁迫处理，与充分灌溉处理 (CK) 接近，3 个水分胁迫处理光合速率大小关系为 LWS>MWS>SWS。经计算，LWS 处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率比 MWS 分别高 13.8%、9.3%、24.5%、1.38%。说明大叶黄杨由于自身生理调节，在不同时间对于水分的需求及适应能力不同。从全天的光合特性变化来看 (图 1)，蒸腾速率随着太阳辐射、温度、湿度等气候因素的变化呈现出单峰曲线变化，光合速率在充分供水时呈现单峰曲线变化，受水分胁迫处理的光合速率在中午出现了“午休”的现象；各处理的气孔导度在早上均达到最大。

表 1 不同水分处理对光合特性的影响

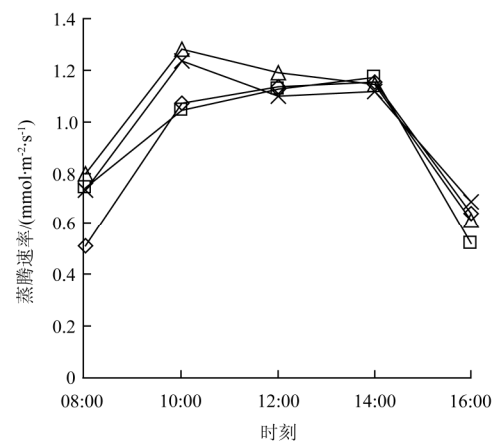
Table 1 Photosynthetic characteristics of *E.japonicus* under different water treatments

处理	光合特性			
	光合速率 Pn/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Gs/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	水分利用效率 WUE/($\mu\text{mol}\cdot(\text{mmol})^{-1}$)
CK	4.51±1.28a	0.91±0.40a	34.36±15.64ab	5.53±1.98a
LWS	4.44±1.40ab	0.94±0.37a	35.78±16.26a	5.14±1.84ab
MWS	3.90±0.97bc	0.86±0.38ab	28.74±9.30bc	5.07±1.99ab
SWS	3.40±1.33c	0.75±0.33b	26.63±12.49c	4.89±1.91b

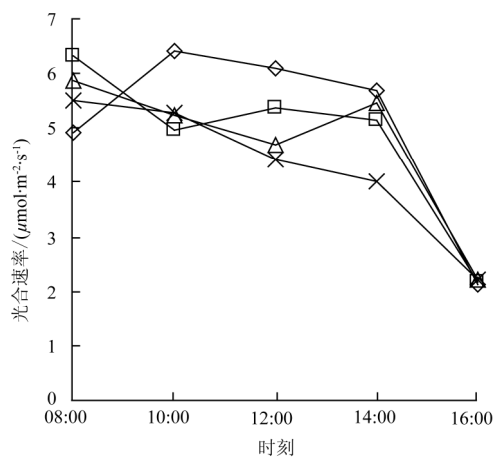
注：表中数值为各处理平均值±标准误差，a,b,c 表示同一测定时期内相同项目在 $P_{0.05}$ 水平上的差异显著性。CK 为对照处理，LWS 为低度水分处理；MWS 为中度水分胁迫，SWS 为高度水分胁迫。



a. 气孔导度



c. 蒸腾速率



b. 光合速率

图 1 不同时段光合速率、蒸腾速率、气孔导度的变化过程
Fig. 1 Changes of photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance at different period

2.2 不同土壤水分控制水平对大叶黄杨景观功能与生态服务功能的影响及关系

2.2.1 不同土壤控制水平对景观功能的影响及关系

大叶黄杨作为北京市典型的绿化植物，对美化城市起到了不可替代的作用。本文采用叶面积、叶面积指数、叶片生长量及叶绿素 4 个参数评价大叶黄杨在不同土壤水分控制水平下景观功能的发挥。

叶绿素含量的多少反映出叶片的色泽度，本研究利用德国生产的 SPAD-502 叶绿素测定仪，按照不同的叶位，在植物的中、上部进行测量。各参数的测量结果见表 2。

表2 不同水分处理景观功能参数

Table 2 Landscape function parameters of *E.japonicus* under different water treatments

处理	景观参数				
	总叶面积/cm ²	叶面积指数	叶片质量/g		叶绿素含量(SPAD值)
			上部	中部	
CK	951.84±73.64b	0.24	53.18	109.78	67.6±3.6b
LWS	1026.14±71.85a	0.44	73.04	127.92	75.4±5.4a
MWS	898.17±36.16bc	0.43	48.08	123.53	68.0±2.9b
SWS	841.96±79.32c	0.28	46.68	45.03	65.2±2.4b

注：表中数值为各处理平均值±标准误差，a,b,c表示同一测定时期内相同项目在 $P_{0.05}$ 水平上的差异显著性。CK为对照处理，LWS为低度水分处理，MWS为中度水分胁迫，SWS为高度水分胁迫。SPAD为SPAD-502叶绿素仪所测的叶绿素浓度值。

从表2中可以看出，叶面积、叶面积指数及叶片生长量的各项指标在不同土壤水分控制水平下表现出不同的差异。SWS处理叶面积、叶面积指数及叶片生长量要小于其他处理，说明土壤水分在(50%~60%Fc)时无法正常提供大叶黄杨正常生长所需要的水分，使得大叶黄杨的生长受到了抑制，表现出叶片生长稀疏、总叶面积较小的特征。而土壤水分在75%~85%Fc时其叶片生长量、总叶面积达到最大，说明该土壤水分对于大叶黄杨叶片的生长最为适宜，叶片生长表现出叶茂的特征。并且大叶黄杨作为绿化观赏植物，其中、上部的叶片数量和质量及叶面积的大小对观赏起到较为重要的作用，叶片小、叶片稀疏严重影响了大叶黄杨景观功能的发挥。LWS与SWS处理相比较，LWS处理中、上部的叶片积累量分别大184.1%、56.5%。在叶片色泽度方面，不同土壤水分控制水平下大叶黄杨叶片叶绿素含量随着土壤水分的含量的增加呈现出先升高后下降的趋势变化。其中土壤水分控制在(75%~85%FC)，叶绿素含量达到最大。

研究发现叶片叶绿素含量高，叶片呈现出亮绿色。因此，从绿化植物的景观功能角度看，绿色植物的叶绿素含量越高，所达到的观赏效果越好，其景观功能也就最佳。从水分-景观关系上看，大叶黄杨叶片的颜色和叶面积的大小与土壤中的含水量存在着密切的关系。叶绿素含量、叶面积随着灌水量的增加呈现出先上升后下降的变化趋势。说明过多或过少的土壤水分对大叶黄杨的生长都是不利的，影响了大叶黄杨自身的景观功能得到充分的发挥。

2.2.2 不同土壤水分控制水平对生态效应的影响及关系

不同水分处理大叶黄杨单株尺度全天生态效应量如表3，对所得数据进行方差分析可看出各处理之间差异性并不显著。说明不同的土壤水分对大叶黄杨的固碳释氧及降温增湿能力的影响较小，在土壤水分亏缺的情况下并没有对大叶黄杨生态效应的发挥产生明显的负面影响。

表3 不同水分条件下大叶黄杨生态效应量

Table 3 Ecological effect of *E.japonicus* under different water treatments

处 理	生态效应参数			
	固碳量/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	释氧量/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	增湿量/(mg·(m ² ·s) ⁻¹)	吸热量/(J·(m ² ·d) ⁻¹)
CK	6.51±0.83a	4.36±1.49a	549.68±150.65a	1240.24±89.14a
LWS	5.99±2.04a	4.74±0.60a	545.15±121.76a	1254.19±300.33a
MWS	5.89±1.74a	4.28±1.27a	514.58±123.22a	1339.74±367.19a
SWS	5.52±1.36a	4.02±0.99a	508.86±36.58a	1328.68±296.76a

注：表中数值为各处理平均值±标准误差，a,b,c表示同一测定时期内相同项目在 $P_{0.05}$ 水平上的差异显著性。CK为对照处理，LWS为低度水分处理，MWS为中度水分胁迫，SWS为高度水分胁迫。

3 讨 论

绿地作为生态系统的调控者，在美化城市景观的同时，还具有净化城市环境的功效^[15]。实施全球性的节能减排，促进了城市绿地的快速发展。绿地的大面积发展加剧了水资源、土地资源和能源严重紧缺的局面。本文研究不同土壤水分胁迫下，屋顶绿化植物的水分-景观、水分-生态关系及土壤水分的合理控制水平。对缓解北京市资源和能源紧缺的严重局面，建设低碳城市、保护生态环境有重大意义。

研究结果表明，土壤水分控制在田间持水量的(75%~85%FC)为最优。这一结论可通过景观功能和生态服务功能二方面来解释：在景观功能方面，本研究以

叶面积、叶片生长量和叶绿素含量作为衡量大叶黄杨发挥景观功能的标准。因为叶面积反映了植物叶片的大小，叶片生长量体现植物叶片生长的稀疏程度、叶绿素含量反映了绿色植物叶片的色泽度。通过对大叶黄杨叶面积、叶片生长量和叶绿素的测定，分析了在不同土壤控制水平下大叶黄杨的景观功能。研究发现，大叶黄杨在高度受胁迫(SWS)的条件下，其叶片生长量、叶面积和叶片叶绿素含量受到抑制作用。说明高度土壤水分胁迫的土壤含水量，已经远远不能满足大叶黄杨自身生长所需的水分，超过了其自身的承受能力，叶片生长收到抑制，叶片颜色呈现黄绿色。土壤水分在(75%~85%Fc)时，大叶黄杨的生长却要好于其他处理，这说明大叶黄杨在适度水分胁迫下，迫于生长，通过自身的生理调节，使

得与其土壤水分得到了适应性的调整, 极其充分的合成营养物质用于自身的生长, 叶片生长量、叶面积和叶绿素含量都达到了最佳, 使作为城市典型绿化灌木树种大叶黄杨的景观功能得到了充分发挥。在生态效应方面, 本研究以大叶黄杨的固碳释氧、降温增湿效果作为衡量标准。通过对大叶黄杨的固碳释氧量与降温增湿量进行分析, 结果发现在不同土壤水分控制水平下, 固碳释氧量与降温增湿量虽然随着水量的增加而表现为递增的趋势, 但并没有明显的差异。这一现象说明了在水分亏缺的情况下通过自身的调节, 将土壤中吸收的养分, 更多的分配到了光合作用机理上, 从而更好的维持了自身吸收 CO_2 的能力。

本研究又通过对不同叶位光合作用的测定分析发现, 各处理的气孔导度在早上均达到最大, 可认为: 由于植物自身的生理调节, 夜晚时, 植物的各项生理活动都比较弱, 在经过一夜的“休眠”后, 为了补充自身体内所需的营养物质, 与外界进行交换, 其交换的通道为叶片气孔, 所以在早上时气孔的张开程度比较大。陈家宙和张永强分别对花生和冬小麦气孔导度的研究也得出了相似的结论^[16-17], 同时本研究也进一步证明了植物在早上气孔导度异常变大。水分胁迫 3 个处理, 光合速率从早上开始出现了下降趋势, 并且在中午时也持续的低谷, 但其下降趋势有所缓冲, 出现这种现象可以这样解释: 严重水分亏缺导致光合速率显著下降的原因可能是非气孔因素所致, 因为严重水分亏缺处理的叶片有比较高的细胞间隙 CO_2 浓度, 造成其呼吸系统受阻, 从而导致植物生理活性下降, 阻碍了光合产物的运输和分配, 并最终表现为非气孔限制的光合速率下降。在中午时, 太阳辐射较强, 当叶片捕获的激发能超过碳同化的利用能力时, 过剩光能被耗散, 造成光能利用效率较低, 使光合速率下降^[18]。从另一个角度讲, 一定温度范围内, 随着温度的升高, 光合速率增大, 温度与光合速率呈正相关, 光合作用关键酶-Rubisco 的最适活化温度在 $25\sim 30^\circ\text{C}$, 其活性的高低直接影响光合速率的大小^[19], 当叶片温度过高时会影响机体内的某些相关酶的活性, 不利于其光合作用的进行, 同时, 光照和温度影响土壤水分供给状况, 对控制叶片气体交换也起着重要的作用^[20]。这也就说明了为什么光合作用在下午时又出现了升高的现象。

由于本课题是涉及到植物的生理并且是四季常绿树种, 不可能在短时间内研究的非常深入, 建议进行对典型的绿化树种进行长期的观测, 更深入的了解城市绿化植物的景观服务功能及生态效应。本研究还有一不足之处在于, 对生态效应的研究只选择了晴天进行测量, 建议根据不同的气候条件(晴天、阴天、阴雨天)对城市绿化植物的生态效应进行观测。

4 结 论

1) 在大叶黄杨生长、生理调控方面, 土壤水分控制在 $75\%\sim 85\%$ 田间持水量(FC)时土壤水分诱导了大叶黄杨叶片的保护机制, 在不明显降低光合速率的条件下,

减少植株的奢侈蒸腾耗水, 提高水分利用效率。

2) 从景观功能来看, 土壤水分控制在 $(75\%\sim 85\%\text{FC})$ 刺激了大叶黄杨的生长, 叶面积较大、叶片生长茂盛、叶绿素含量较高, 所发挥的景观功能效果越好。

3) 在生态效益方面, 不同土壤控制水平对大叶黄杨的生态效应影响并不明显, 各处理之间并没有呈现出明显差异。

本研究基于综合考虑农业节水、景观功能、生态效益 3 方面, 初步认为将土壤水分控制在 $(75\%\sim 85\%\text{FC})$ 为大叶黄杨的最优灌水模式。

[参 考 文 献]

- [1] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, et al. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide sine[J]. *Nature*, 1995, 375(2): 660—670.
- [2] Jian-feng Li, Onyx WH Wai, Li Y S, et al. Effect of green roof on ambient CO_2 concentration[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(9): 2644—2651.
- [3] Yang J, Yu Q, Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 7266—72730.
- [4] Fujii S, Cha H, Kagi N, et al. Effect on air pollutant removal by plant absorption and adsorption[J]. *Building and Environment*, 2005, 40(1): 105—112.
- [5] Yang J, McBride J, Zhou JX, et al. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction[J]. *Urban Forest and Urban Greening*, 2005, 3(3): 65—78.
- [6] Jim CY, Chen WY. Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou(China)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 88(1): 665—673.
- [7] Djekoun A, Planchon C. Water status effect on dinitrogen fixation and photosynthesis in soybean[J]. *Agron.J*, 1991, 83(2): 316—322.
- [8] Heckathorn S A, DeLucia E H, Zielinski R E. The contribution of drought-related decreases in foliar nitrogen concentration to decreases in photosynthetic capacity during and after drought in prairie grasses[J]. *Physiol.Plant*, 1997, 101(3): 173—782.
- [9] Widodo W, Vu J C V, Boote K J, et al. Elevated growth CO_2 delays drought saress and accelerates recovery of rice leaf photosynthesis[J]. *Environ Exp Bot*, 2003, 49(8): 259—272.
- [10] Subramanian V B, Maheswari M. Stomatal conductance, photosynthesis and transpiration in green gran during, and after relief of water stress[J]. *Ind J Exp Biol*, 1990, 28(1): 542—544.
- [11] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 72—76.
Xu Junzeng, Peng Shizhang, Wei Zheng, et al. Characteristic of rice leaf photosynthetic light response curve with different water and nitrogen regulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(2): 72—76. (in Chinese with English abstract)

- [12] 申孝军, 孙景生, 刘祖贵, 等. 灌水控制下限对冬小麦产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 58—65.
Shen Xiaojun, Sun Jingsheng, Liu Zugui, et al. Effects of low irrigation limits on yield and quality of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 58—65. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴忠东, 王全九. 阶段性缺水对冬小麦耗水特性和叶面积指数的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 63—68.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effects of stage water shortage on water consumption and leaf area index of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 63—68. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐洪伟, 周晓馥. 玉米毛状根再生植株对水分胁迫的响应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 80—84
Xu Hongwei, Zhou Xiaofu. Responses of maize regenerative plants from hairy root cultures water stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 80—84. (in Chinese with English abstract)
- [15] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2006, 4(5): 115—23.
- [16] 陈家宙, 吕国安, 何圆球. 土壤水分状况对花生和早稻叶片气孔交换的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 105—110.
Chen Jiazhou, Lü Guoan, He Yuanqiu. Effects of soil water status on gas exchange of peanut and early rice leaves[J]. Chin J Appl Ecol, 2005, 16(1): 105—110
- [17] 张永强, 姜杰. 水分胁迫对冬小麦叶片水分生理生态过程的影响[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 57—61.
Zhang Yongqiang, Jiang Jie. Effects of leaf water physiological ecology process of winter wheat on soil water stress condition[J]. Arid Zone Res, 2001, 18(1): 57—61.
- [18] Muller P, Li X P, Niyogit K K. Non-photochemical quenching A response to excess light energy[J]. Plant Physiology, 2001, 125(18): 1558—1566.
- [19] Salvucci M E, Portis A R, Ogren W L. Light and CO₂ response of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activation in Arabidopsis leaves. Plant Physiol, 1986, 80(2): 655—659.
- [20] Yang C, Yang L. Plasticity of clonal modules of *Leymus chinensis* in response to different environment[J]. Chin J Appl Ecol, 1998, 9(3): 265—268.

Effects of deficit irrigation on growth, water and carbon fluxes of *Euonymus japonicas* for green roof

Wang Caiyuan¹, Yang Peiling^{1*}, Li Yunkai¹, Ren Shumei¹, Lu Lu², Zhao Lu

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Harbin Water Conservancy Planning and Design and Research Institute Company Limited, Harbin 150076, China; 3. Tancheng River Channel Management Bureau of Yishu River Water Management Bureau, Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources, P.R.C., Linyi 276000, China)

Abstract: To solve the contradiction between the development of large areas of urban Greenland and scarcity of land and water resources for Greenland in Beijing, the implementation of green-roof vegetation is important. In this paper, the typical green-roof plant (*E.japonicus*) as the research object, the physiological response, landscape function and ecological serves function of *E.japonicus* were analyzed with the pot experiments in 4 different treatments of full irrigation (CK) (90%-100%FC), low water stress (LWS) (75%-85%FC), moderate water stress (MWS) (65%-75%FC), and serious water stress (SWS) (50%-60%FC) treatments. The results showed that the photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and water use efficiency of *E.japonicus* was LWS>MWS>SWS respectively in three treatments of water stress. The difference of the photosynthetic rate, transpiration rate, leaf area, stomatal conductance, chlorophyll content and water use efficiency between CK and LWS was around 5%. In terms of ecological serves function there is no big differences for carbon fixation and oxygen release, and cooling and humidity of *E.japonicus* under different soil moisture levels. The LWS(75%-85%FC) stimulated the growth of *E.japonicus*, and effectively regulated the distribution of the assimilation. Therefore, LWS (75%-85%FC) is the optimal water-saving irrigation model.

Key word: irrigation, evaporation, ecology, green-roof, landscape function, irrigation mode, *E.japonicus*