

文章编号: 1001-1498(2008)06-0803-05

土壤水分对金银花叶片气体交换参数及水分利用效率的影响

夏江宝¹, 张淑勇², 张光灿³, 周泽福^{2*}, 陈安强³

(1. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州学院, 山东 滨州 256603; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3. 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018)

摘要:利用 CRAS-2型便携式光合作仪,测定了不同土壤水分条件下3年生金银花叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)及水分利用效率(WUE)等生理参数的光响应过程,阐明其气体交换参数及水分利用效率对土壤水分和光合有效辐射的响应规律,探讨了金银花正常生长发育所需的土壤水分和光照条件。结果表明:金银花叶片的 P_n 、 T_r 及WUE对土壤水分和光合有效辐射的变化具有明显的阈值响应;金银花叶片正常生长(同时具有较高 P_n 和WUE)的适宜土壤质量含水量(W_m)为121~206 g·kg⁻¹,适宜的光合有效辐射为600~1 600 μmol·m⁻²·s⁻¹; W_m 为172 g·kg⁻¹左右为“最佳高产高效水”,最佳光合有效辐射为800~1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹。以光合生理参数为指标对金银花土壤水分有效性及生产力进行分级与评价,确定 W_m 在62 g·kg⁻¹以下为“无效水”, W_m 在234 g·kg⁻¹以上和62~90 g·kg⁻¹阈值内属于“低产低效水”;在121~145 g·kg⁻¹阈值内为“中产中效水”;在172~206 g·kg⁻¹阈值内为“高产高效水”。

关键词:金银花;土壤水分;光合速率;蒸腾速率;水分利用效率

中图分类号: S793

文献标识码: A

Effects of Soil Moisture on the Gas-exchange Parameters and Water Use Efficiency of *Lonicera japonica* Thunb

XIA Jiang-bao¹, ZHANG Shu-yong², ZHANG Guang-can³, ZHOU Ze-fu², CHEN An-qiang³

(1. The Key Laboratory for Ecological Environment of Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, Shandong, China;

2. Research Institute of Forestry, CAF, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

3. Forestry College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China)

Abstract: Little is known about the optimum soil moisture and light intensities for the growth of *Lonicera japonica* Thunb. Using CRAS-2 portable photosynthesis system, the light responses of photosynthetic and physiological parameters of three years old leaves, such as net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) were thus measured under different soil moisture conditions. The results showed that P_n , T_r and WUE of leaves have critical response to the levels of soil moisture and the variation of photosynthetic active radiation (PAR). In order to maintain the plant growing normally and having higher P_n and WUE synchronously, the fitting mass water content (W_m) was about 121—206 g·kg⁻¹, and the fitting PAR was in the range of 600—1 600 μmol·m⁻²·s⁻¹.

收稿日期: 2007-11-06

基金项目: 国家“十一五”科技攻关课题“京津风沙源区南部退化植被修复技术与沙区产业开发技术研究与试验示范”(2006BAD26B0601)、国家“十一五”科技攻关子课题“黄土高原丘陵沟壑半干旱区水土保持抗旱造林及径流林业技术试验示范”(2006BAD03A1205)、国家自然科学基金(30872003)和滨州学院博士基金项目(2007Y08)

作者简介: 夏江宝(1978—),男,山东潍坊人,讲师,博士,主要研究方向:植被恢复与生态重建。E-mail: xiajb@163.com

*通讯作者: 研究员,博士生导师。

s^{-1} . The “optimal high productivity and high efficiency water” of W_m was about $172 g \cdot kg^{-1}$, and the optimal PAR was in the range of $800—1\ 000 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Based on photosynthetic physiological parameters, the soil water availability and productivity of *Lonicera japonica* were classified and evaluated. The results showed that on *Lonicera japonica* woodland, the W_m less than $62 g \cdot kg^{-1}$ belonged to “Non-available water”; in the range of $62 \sim 90 g \cdot kg^{-1}$ and more than $234 g \cdot kg^{-1}$, “Low productivity and low efficiency water”; $121—145 g \cdot kg^{-1}$, “Middle productivity and middle efficiency water”; $172—206 g \cdot kg^{-1}$, “High productivity and high efficiency water”.

Key words: *Lonicera japonica* Thunb.; soil moisture; photosynthetic rate; transpiration rate; water use efficiency

植物光合作用与水分代谢及其生理生态机理是节水农林业生产的重要理论基础,在最大限度减少用水的条件下,如何调控土壤水分和光照强度才能形成植物产量和水分利用效率的最佳组合是生物节水高效研究中的关键和热点问题^[1-3]。近年来对光合生产及水分利用效率的研究主要集中在农作物和经济林领域,对其水分胁迫下气体交换特性研究较多,而对植物正常生长所表现的光合生理指标适宜的水分和光照条件研究尚不多见^[4-7]。藤本植物金银花的变种秧花 (*Lonicera japonica* Thunb. var.) 生性强健,是具有较高经济价值的药用植物,市场发展潜力巨大。为提高土地生产力,近年来在很多农耕地上进行规模化种植,但季节性降水分配不均、水资源短缺、水分利用效率不高成为其应用推广的主要制约因素。目前有关金银花的研究,多集中在植培技术及药用价值的开发利用等方面^[8-9],而涉及金银花气体交换参数及水分利用效率适宜水分和光照条件范围确定的研究报道较少。为此,本试验通过对金银花光合效率参数与土壤水分和光强的关系及金银花生理需水规律等理论问题进行研究,试图阐明金银花光合作用、蒸腾作用、水分利用效率对土壤干旱与强光胁迫的响应规律,以其确定维持金银花较高光合速率和水分利用效率的适宜土壤水分及光照强度范围,为金银花规模化栽培管理和干旱瘠薄山地的荒山绿化提供科学依据和理论基础。

1 试验地概况

试验地位于山东农业大学林学生态实验站,地处泰安市东南部 ($116^{\circ}02' \sim 117^{\circ}59' E$, $35^{\circ}38' \sim 36^{\circ}33' N$),属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明。多年平均降水量 $741.8 mm$,多集中在 7—9 月。年平均气温 $12.9^{\circ}C$,无霜期 $202 d$,10 年积温为 $2\ 350 \sim 4\ 777^{\circ}C$ 。土壤类型主要以褐土、棕壤为主。

2 材料与方法

2.1 试验设计

2006 年 3 月,选用同一系的 3 年生金银花苗进行盆植 (盆钵直径 $30 cm$ 、深 $40 cm$),供试土壤为金银花试验田土。用环刀法测得盆植土壤的田间持水量为 28.3% ,土壤密度为 $1.17 g \cdot cm^{-3}$,pH 值为 $6.5 \sim 7.5$,肥力中等,有机质含量为 $11.2 g \cdot kg^{-1}$,有效 N、有效 P、有效 K 含量分别为 40.23 、 11.20 、 $70.15 mg \cdot kg^{-1}$ 。采用田间条件下人为给水和自然耗水相结合的方法,获取盆植土壤不同的水分梯度。选取生长健壮一致的 8 株盆植苗,试验观测 2 d 前 (7 月 12 日) 浇水,使土壤水分饱和,利用美国产 M D X 型土壤水分探头监测土壤含水量的变化。2 d 后获得初期水分梯度,质量含水量 (W_m) 为 $234 g \cdot kg^{-1}$,相对含水量 (W_r) 为 82.7% ,进行第 1 次生理参数的测定。以后通过自然耗水,每隔 $1 \sim 2 d$ 获取 1 个水分梯度 (表 1),共获得 7 个水分梯度,分别进行生理参数光响应过程的测定。

2.2 光响应过程测定

从试验植株中部选 6 片生长健壮的成熟叶片,用 CRAS-2 型光合作用系统测定不同土壤水分下生理参数的光响应过程,为尽量减少外界光照波动所造成的影响,在晴朗天气的 $9:00 \sim 10:00$ 进行测定。每个水分梯度测定 1 d,共测定 7 d (与土壤水分测定同日进行)。测定时,大气 CO_2 浓度为 $360 \pm 5 \mu mol \cdot mol^{-1}$,利用人工光源将光合有效辐射控制在 $2\ 000$ 、 $1\ 800$ 、 $1\ 600$ 、 $1\ 400$ 、 $1\ 200$ 、 $1\ 000$ 、 800 、 600 、 400 、 200 、 150 、 100 、 50 、 $20 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 等共 14 个梯度。每个梯度下控制测定时间为 $110 s$ 。仪器自动记录净光合速率 (P_n ; $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)、光合有效辐射 (PAR; $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)、蒸腾速率 (T_r ; $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 等生理参数。叶片水分利用效率 (WUE ; $\mu mol \cdot mmol^{-1}$) 为叶片净光合速率 (P_n) 与蒸腾速率 (T_r) 的比值,即 $WUE = P_n / T_r$ 。

2.3 数据处理及分析方法

绘制光合作用的光响应曲线,采用非直角双曲线模型和二次多项式曲线进行模拟^[10]。

$$P_n = \frac{\phi PAR + A_{max} - \sqrt{(\phi PAR + A_{max})^2 - 4\phi PAR K A_{max}}}{2K} - R_d \text{ (非直角双曲线模型)} \quad (1)$$

$$P_n = aPAR^2 + bPAR + c \text{ (二次多项式曲线模型, } a, b, c \text{ 为参数)} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: P_n 为净光合速率, PAR 为光合有效辐射, A_{max} 为最大净光合速率, ϕ 、 K 、 R_d 分别为表观量子效率、光响应曲线曲角、暗呼吸速率;并对 $P_n - PAR$ 曲线的初始部分($PAR < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)进行线性回归,结合光响应曲线可求得表观量子效率(ϕ ; $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、光补偿点(LCP ; $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、光饱和点(LSP ; $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)等参数(表 1)。利用统计分析软件(SPSS, EXCEL)分析不同土壤水分下的光响应模拟过程,做聚类分析、方差分析。

3 结果与分析

3.1 光合速率对土壤水分的响应

对不同土壤水分下金银花叶片 P_n 的光响应值进行曲线模拟(图 1),可知模拟值与实测值的变化趋势基本一致,模拟方程的 R^2 均大于 0.98,说明模型可较准确地反应叶片 P_n 的光响应规律,其模拟曲线为二次多项式和 非直角双曲线 2 种模型。在土壤水分 W_m 为 121~206 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内,其 P_n 光响应曲线为二次多项式型,维持较高 P_n 的光合有效辐射为 600~1 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 W_m 为 234 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和低于 90 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其 P_n 的光响应曲线为非直角双曲线型, P_n 随着 PAR 的增强变化较小,一直维持在较低水平。由图 1 可知,在 $W_m < 206 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, P_n 随着 W_m 的增大而增大;此后随着 W_m 的增大, P_n 在减小,超过

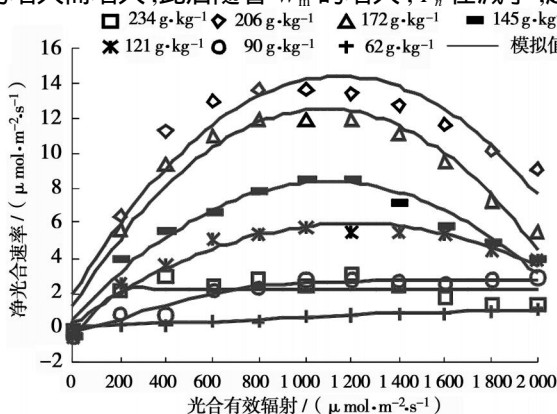


图 1 不同水分条件下光合速率模拟值与实测值光响应

206 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 达到 234 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其 P_n 值明显降低。因此 W_m 为 206 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可作为 P_n 变化的转折点。分析表明:有利于金银花叶片光合作用的适宜土壤水分范围在 121 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} < W_m < 206 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中较高 P_n 水分范围在 172 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} < W_m < 206 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,此水分范围内适宜的光强为 600~1 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; P_n 最大值出现在 W_m 为 206 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,对应光强为 1 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

3.2 不同土壤水分下光响应曲线特征参数

叶片的最大净光合速率 A_{max} 及初始表观量子效率是表征植物光合能力的重要指标^[11]。随着土壤水分的增高, A_{max} 也随之增高,在 W_m 为 206 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均达到最高,此水分条件下金银花叶片光合同化潜力最大,对弱光的利用能力较强,强光下 P_n 更高;此后随着水分的增高,不同水分条件下, ϕ 值小于理论上的最大量子效率(0.08~0.125)较为合理(表 1),这表明土壤水分对金银花叶片的光能利用状况及光合生产潜力有一定的影响。随着 W_m ($W_m < 206 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的增加, LCP 有降低的趋势;在水分过高或者过低时 LCP 有增大趋势,从而降低了对弱光的利用率。各水分条件下金银花的 LSP 在 1 000~1 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明金银花具有一定的喜光特性。可见在不同的土壤水分条件下,金银花对光照强度表现出一定的适应性和可塑性,在适宜的水分条件下(121 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} < W_m < 206 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)对弱光与强光的利用能力都较高,具有较宽的光生态幅,使其耐荫性和喜光性都增强,其中维持金银花最高光能利用率的土壤水分(W_m)为 206 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 不同土壤水分下金银花叶片的光合生理参数

$W_m /$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\phi /$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	LCP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	A_{max}
234	0.015	57.79	1 200	3.04
206	0.037	22.97	1 200	14.94
172	0.032	28.27	1 035	12.01
145	0.026	38.04	1 192	9.03
121	0.018	47.34	1 188	5.88
90	0.008	86.22	1 000	3.34
62	0.005	142.98	1 200	1.50

注: W_m 、 LCP 、 LSP 、 A_{max} 分别为质量含水量、表观量子效率、光补偿点、光饱和点和最大净光合速率。

3.3 不同土壤水分对蒸腾速率的影响

图 2 表明, W_m 在 121~206 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,蒸腾速率的光响应曲线类似。随着 PAR ($PAR < 400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的增强, T_r 上升较快,达到 T_r 的光饱和点

(600~1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)之后,随着 PAR 的增加, T_r 维持一段较高值之后开始缓慢下降。在其他土壤水分条件下, T_r 对 PAR 的变化响应不太敏感,较强的 PAR 并不导致 T_r 的明显增加;但不同土壤水分条件下的 T_r 值差别较大,在 W_m 小于 $206 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, T_r 值随 W_m 提高而增加,其中维持较高 T_r 的 W_m 在 $121 \sim 206 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (W_m 为 $206 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, T_r 值维持在最高水平),超出此土壤水分范围后,无论 W_m 增加或降低, T_r 值均下降。表明 W_m 在 $121 \sim 206 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,金银花叶片蒸腾作用受土壤水分和光照强度协同影响,超出此水分范围,其蒸腾作用主要受土壤水分影响,受光照强度影响较小。

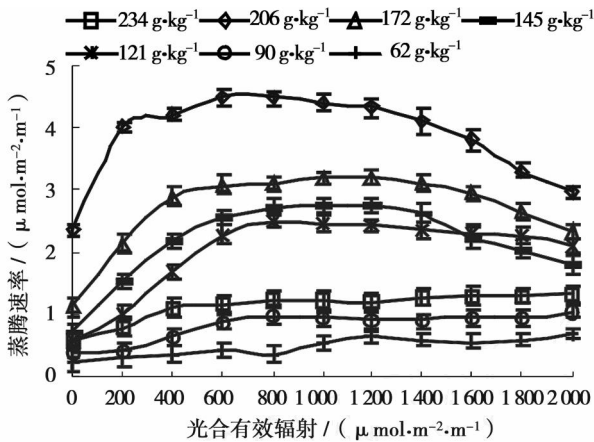


图 2 不同水分条件下蒸腾速率 (T_r) 的光响应

3.4 不同土壤水分对水分利用效率的影响

图 3 表明,各土壤水分条件下,水分利用效率的光响应曲线呈“旗型”变化。低光强 ($PAR < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 下, WUE 随着 PAR 增强响应敏感,上升较快,随后 WUE 缓慢上升,且 PAR 在 $600 \sim 1 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, WUE 一直维持较高值且变化不大;但不同土壤水分下的 WUE 差别明显,在 $W_m < 172 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随着土壤水分的增大 WUE 明显提高,此后随土壤水分的增加 WUE 反而下降。 W_m 为 $234 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其 WUE 均值仅为较高水分 (W_m 为 $206 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 0.4 倍,与较低土壤水

分 (W_m 为 $90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 WUE 基本相同。表明适度的水分下降在一定程度上有利于 WUE 的提高,维持较高 WUE 的土壤水分范围为 W_m 为 $121 \sim 206 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其适宜的光合有效辐射为 $600 \sim 1 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在 W_m 为 $172 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 WUE 达到最高,最适宜光强在 $800 \sim 1 000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

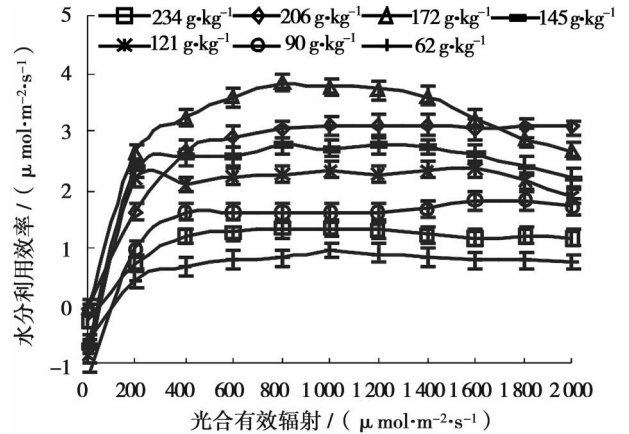


图 3 不同水分条件下水分利用效率光响应

3.5 土壤水分有效性及生产力分级与评价

依据 P_n 、 T_r 、 WUE 3 个光合生理指标,对 7 个土壤水分点进行聚类分析,当聚类数为 3 时,结果见表 2。依据类平均值大小,可划分 A 类: W_m 为 $172 \sim 206 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,为高光合速率、高蒸腾速率、高水分利用效率型;B 类: W_m 在 $121 \sim 145 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,为中等光合速率、中等蒸腾速率、中等水分利用效率型;C 类: W_m 在 $62 \sim 90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 W_m 为 $234 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,为低光合速率、低蒸腾速率、低水分利用效率型。方差分析表明,这 3 个水分段的划分,对 P_n 、 T_r 、 WUE 有较大的影响,差异性高度显著,说明土壤水分的不同,对金银花苗期的生理特性影响较大。依据土壤水分生产力分级含义及标准,用“产(光合速率)和“效(水分利用效率)的概念代替了以往研究中“效(根系吸水难易)的概念^[12],可确定出 A 类为高产高效水, B 类为中产中效水, C 类为低产低效水,其无效水范围应为 W_m 低于 $62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 2 土壤水分生产力分级及金银花光合生理参数类型间的差异

类群	$W_m / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	土壤水分生产力分级	光合参数		
			$P_n / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$T_r / (\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$WUE / (\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})$
A	206	高产高效水	9.54 ± 3.98 a	3.27 ± 0.87 a	2.81 ± 1.04 a
	172				
B	145	中产中效水	4.96 ± 2.35 b	2.08 ± 0.63 b	2.10 ± 0.97 b
	121				
C	234	低产低效水	1.46 ± 1.04 c	0.81 ± 0.34 c	1.01 ± 0.68 c
	90				
	62				

注: 同一列数据中字母不同者表示差异性显著 ($P < 0.01$)

4 结论与讨论

金银花叶片正常生长(同时具有较高的净光合速率(P_n)和水分利用效率(WUE)的适宜土壤水分(W_m)为 121~206 $g \cdot kg^{-1}$,在此范围内,既保证了金银花叶片具有较高 P_n ,限制 T_r 引起的大量耗水和维持较高的 WUE ,又防止了土壤水分过低造成的生长与发育不良。对金银花正常生长适宜水分的报道较少,其他相关研究表明,不同植物同时具有较高 P_n 和 WUE 所需的适宜土壤水分范围有所不同,小麦等农作物的为 60%~80%、金矮生苹果为 60%~71%^[13],五叶地锦为 45%~55%^[14]。可见维持金银花高光合生产潜力和高效生理用水的土壤水分下限值接近五叶地锦,低于小麦等农作物,土壤水分上限值与金矮生苹果接近,但低于小麦等农作物,表明金银花既具有较高的抗旱性和耐旱生产力,又具有一定的耐湿能力,是对土壤水分适应性较强的植物。

(1)金银花叶片光合生理参数的光响应值表现出较高的可塑性,说明其对光强和水分的适应能力较强,对逆境具有较高的潜在适应能力,这对于金银花在干、湿环境及异质光环境中的生存和生长至关重要。

(2) W_m 在 121~206 $g \cdot kg^{-1}$ (W_r 在 42.8%~72.8%)的土壤水分范围内,光合速率的光响应模拟曲线应为二次多项式型,其他水分条件下为非直角双曲线模型,维持较高 P_n 和 T_r 的 W_m 为 121~206 $g \cdot kg^{-1}$,此水分范围内适宜的光合有效辐射为 600~1 800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,其中光合作用和蒸腾作用有效性最高的 W_m 均为 206 $g \cdot kg^{-1}$ 左右,对应光强分别为 1 200、800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 左右。

(3)金银花叶片正常生长(同时具有较高 P_n 和 WUE)的适宜土壤水分(W_m)为 121~206 $g \cdot kg^{-1}$ 之间,适宜光合有效辐射为 600~1 600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,在此范围内,既保证了金银花叶片具有较高 P_n 、

限制 T_r 引起的大量耗水和维持较高的 WUE ,又防止了土壤水分过低造成的生长与发育不良。 W_m 在 62 $g \cdot kg^{-1}$ 以下为“无效水”; W_m 在 234 $g \cdot kg^{-1}$ 以上和 62~90 $g \cdot kg^{-1}$ 阈值内属于“低产低效水”;在 121~145 $g \cdot kg^{-1}$ 阈值内为“中产中效水”;在 172~206 $g \cdot kg^{-1}$ 阈值内为“高产高效水”。

参考文献:

- [1] Joshua L A, Ann S E. Physiological variation among *Populus fraxinifolia* populations: short-and long-term relationships between $\delta^{13}C$ and water availability[J]. *Tree Physiol*, 2001, 21: 1149 - 1155
- [2] Angus J F, Van Herwaarden A F. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2): 290 - 298
- [3] 王会肖,刘昌明.作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究[J].*应用生态学报*,2003,14(10):1632-1636
- [4] 李良厚,李吉跃,付祥建,等.黑樱桃与山樱桃幼苗光合作用的比较研究[J].*林业科学研究*,2007,20(1):130-134
- [5] 金永焕,李敦求,姜好相.不同土壤水分对赤松光合作用与水分利用效率的影响研究[J].*中国生态农业学报*,2007,15(1):71-74
- [6] 张友焱,刘致远,周泽福,等.环境因子对毛乌素沙地紫穗槐光合、蒸腾速率的影响[J].*林业科学研究*,2006,19(4):463-466
- [7] 徐利霞,杨水平,姚小华,等.石漠化地区3个树种幼苗在水分胁迫下的光合特性与抗旱性关系[J].*林业科学研究*,2006,19(6):785-790
- [8] 仇键,谭晓风.蒙花1、2号的组织培养与快速繁殖[J].*中南林学院学报*,2005,25(4):53-56
- [9] 徐涛,潘见.金银花中绿原酸的分离纯化[J].*阜阳师范学院学报:自然科学版*,2005,22(1):8-10
- [10] Graham D F. Models of photosynthesis [J]. *Plant Physiology*, 2001, 125: 42 - 45
- [11] 蒋高明.植物暗呼吸作用对大气 CO_2 浓度升高的响应[J].*植物资源与环境*,1997,6(3):54-60
- [12] 周泽福,刘致远,张光灿.黄土丘陵区金矮生苹果园土壤水分有效性及生产力分级[J].*林业科学研究*,2005,18(1):10-15
- [13] 张光灿,刘霞,贺康宁,等.金矮生苹果叶片气态交换参数对土壤水分的响应[J].*植物生态学报*,2004,28(1):66-72
- [14] 张淑勇,张光灿,陈建,等.土壤水分对五叶爬山虎光合与蒸腾作用的影响[J].*中国水土保持科学*,2006,4(4):62-66