

辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 幼苗对土壤干旱的生理生态适应性研究

王海珍^{1,2} 梁宗锁^{*} 韩蕊莲¹ 韩路²

(1 中国科学院水利部水土保持研究所 西北农林科技大学生命学院, 杨凌 712100)

(2 塔里木大学植物科技学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要 用盆栽方法人工模拟土壤干旱条件, 研究辽东栎天然萌生幼苗对土壤干旱的生理生态反应。结果表明: 随土壤含水量的减少, 辽东栎幼苗的耗水量明显下降, 耗水高峰期提前, 在重度干旱下耗水峰形由单峰变为双峰。在干旱胁迫前期辽东栎叶水势变化较平缓, 后期则急剧下降, 尤其在严重干旱下, 水势变化趋势呈/M0形, 叶片含水量较稳定, 对土壤水分含量变化不敏感。在中度干旱下辽东栎叶片的持水力有所增加。辽东栎属低蒸腾速率树种, 平均仅为 $2.98 \text{ Lg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同生长季节蒸腾速率日进程不同, 8月份的蒸腾速率日进程在适宜水分下是双峰曲线, 在中度干旱下是单峰曲线, 重度干旱下蒸腾速率一直维持在较低水平, 呈波状起伏; 9月份的蒸腾速率下降近50%, 仍有明显的单峰(适宜水分下)和双峰(中度干旱下)。对蒸腾速率与环境因子的简单相关分析表明: 在适宜水分和轻度干旱下, 光照强度对辽东栎幼苗蒸腾速率影响最大, 在重度干旱下, 大气温度对辽东栎的蒸腾速率影响较大。随土壤含水量减少, 辽东栎幼苗的蒸腾速率在中度干旱时上升, 重度干旱时急剧下降, 光合速率、瞬时水分利用效率、羧化效率均下降; 地上部生长受抑, 根冠比加大, WUE_1 下降, 而 WUE_2 在中度干旱下升高, 在重度干旱下下降。其幼苗不耐高温强光, 高温强光对其光合和蒸腾有抑制作用, 特别是在土壤严重干旱下表现更明显。

关键词 辽东栎; 土壤干旱; 生理生态; 适应性

Study on adaptability of physiological ecology of *Quercus liaotungensis* seedlings under soil drought

WANG HaiZhen^{1,2} LIANG ZongSuo^{*} HAN RuiLian² HAN Lu²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, College of Life Science of Northwest Sci&Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100)

(2. Institute of Plants Science and Technology of Tarim University, Alar, Xinjiang 843300)

Abstract Using *Quercus liaotungensis* as experiment material and pot culture experiments simulating different soil drought, its physiological ecology response under soil drought were studied. The results showed that its consumption water was obvious descended and ahead of peak of consumption water with soil water decreasing. Peak feature of consumption water changed from single to double under severe soil drought. Its leaf potential changed slowly early stress and descended rapidly later. Especially, model of leaf potential was /M0 under severe stress. Leafwater content wasn't sensible to soilwater content. Water holding ability had slightly increased under media drought. It was a low transpiration tree and average transpiration rate $2.98 \text{ Lg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Diurnal change of transpiration rate was different in different season. Diurnal change of transpiration rate was double peak curve under normal water and single

基金项目: 国家自然科学基金(90302005); 中国科学院西部之光人才基金项目; 知识创新项目(KZCX01-6)

第一作者简介: 王海珍(1971), 女, 汉族, 硕士, 讲师, 主要研究植物水分生理生态研究。

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail Liangzs19@163.net

© 1994-2010, China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期: 2004-08-20

peak curve under media drought and maintained low level or up and down change under severe drought in August Transpiration rate decreased 50% in September and had obvious single and double peak. Simple correlation of transpiration rate and environmental factors was analyzed to show that photosynthetic radiation had significant effected on transpiration rate under normal and media drought and air temperature had obvious effected on transpiration rate under severe drought Transpiration rate ascended under media drought and rapidly descended under severe drought and photosynthesis rate, WUE, carboxylation efficiency decreased with soilwater decreasing Root/Shoot increased and growth of shoot and WUE₁ decreased WUE₂ ascended under media drought and descended under severe drought Its seeding had weak resistance to high temperature and intensive radiation which decreased photosynthesis rate and transpiration rate and physiological activity had significant decreased under severe drought especially.

Key words *Quercus liaotungensis* soil drought physiology and ecology, adaptability

植物对水分条件的长期适应,是多种植物对水分条件所表现的不同要求的生态学基础^[1]。树木对水分的需求及其对水分条件的要求和适应,是水分关系上的重要特性。辽东栎(*Quercus liaotungensis*)属于落叶栎类中的一种,又称为辽东柞、柴树、小叶青冈。喜光树种,耐寒,喜凉爽气候,耐干旱瘠薄,多生于向阳干燥山坡,多成大面积次生纯林或杂木林或与油松(*Pinus tabulaeformis*)、赤松(*Pinus densiflora* Sieb et Zucc)、白桦(*Betula papyphylla*)、黑桦(*Betula dahurica* Pall)或其它落叶阔叶树(如槭树、榛等)混生,属于分布较为广泛的树种之一。在陕西省的秦岭北坡各地及宜君县乔山玉华林区,生于海拔 1 350~ 2 300 m 的山坡,常与油松、华山松、桦、槭、等混生,稀成纯林。其垂直分布的上缘往往是桦木的下缘,垂直分布在栎属中是最高的,生长中庸。在太白山的生长情况,高和直径生长以 5~ 20 年生长最快^[2,3]。辽东栎是我国暖温带落叶林的重要优势树种之一,以天然下种或人工植苗更新,以萌芽更新为主。但长期利用萌条更新会出现生长退化现象,林木生长不良,大多呈灌丛状^[3,4]。辽东栎下种更新,在自然状态下不易成功,其原因主要是种子易遭兽害和病害,另一重要原因是辽东栎林天然下种苗因受光照强度过大而不易存活^[5]。许多学者对其种群的年龄结构、生物量及能量转化^[6-8]以及叶的光合作用和生长发育^[9]、幼苗生长与光的关系^[5]等做了研究,但对其幼苗成活与否与其它因素是否有关的研究还未见报道。本试验拟用盆栽的方法人工模拟土壤干旱条件,研究辽东栎天然萌生幼苗对土壤干旱的生理生态学反应,旨在为干旱半干旱区辽东栎林的更新或选用辽东栎幼苗造林提供一定的参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选用陕西省安塞县安塞水土保持试验站提供的辽东栎(*Quercus liaotungensis*)天然萌生幼苗,平均株高、地径分别为 52.4 cm, 0.82 cm,文中用 D 表示。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

选择大小基本一致的苗木于 2002 年 3 月 27 日植入高 27 cm,上口径 35 cm,下口径 22 cm 的塑料桶中,桶中均装过筛原状土 14 kg 土壤为垆土,含水量 10.7%,田间持水量 26%。在桶栽条件下设置 3 个水分处理:适宜水分(70%~75%田间持水量)、中度干旱(50%~55%田间持水量)、重度干旱(40%~45%田间持水量),土壤含水量分别为 18.2%~19.5%、13%~14.3%、10.4%~11.7%,分别用 1、2、3 表示。各处理重复 3 次,每桶 3 株。盆栽桶放置于中国科学院水土保持研究所的可移动防雨棚下,晴天正常照光(夏季高温季节午间适当遮阴,避免灼伤叶片)。栽植苗木后正常浇水使之正常萌芽,生长 2 个月左右开始按试验设计进行水分处理,不浇水待土壤水分自然消耗至设定标准后,用称重法控制土壤含水量在设定范围内,并补充其水分消耗,准确记录加水量。

1.2.2 测定指标

从水分处理开始用称重法控制土壤水分含量,并根据两次重量之差计算日耗水量,最终耗水量为累积总耗水量与盆栽前与实验结束时土壤含水量差值,并计算在不同水分条件下的日、旬、月耗水量;在 8、9 月晴朗天气用 LI 1600 稳态气孔计测定叶片蒸腾速率(T_r),同时记录气温、湿度和光合

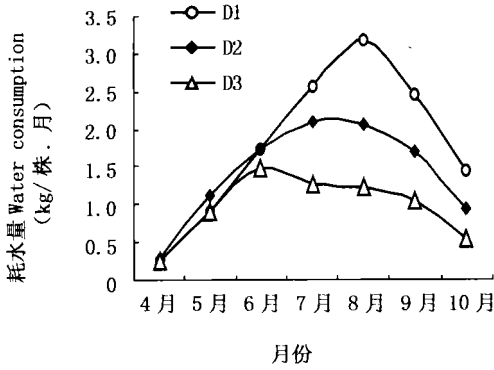


图 1 土壤干旱下辽东栎幼苗耗水量月变化影响

Fig 1 Effects of water monthly consumption of *Quercus liaotungensis* under soil drought

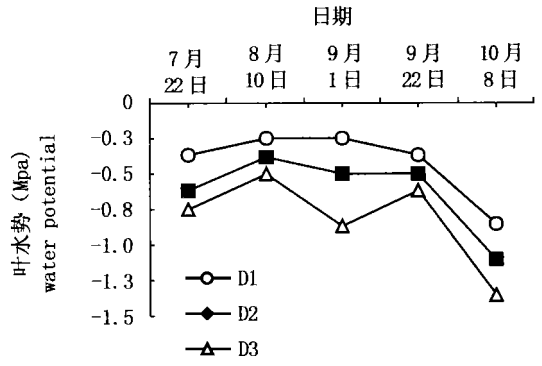


图 2 土壤干旱对辽东栎幼苗叶水势影响

Fig 2 Effects of water potential of *Quercus liaotungensis* under soil drought

有效辐射等气象因子,从早上 7:00~19:00(9月份为 8:00~18:00)每 2 h 测定一次,3 次重复;光合速率 (Pn)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci)、羧化效率 (CE = Pn / Ci)用 CD) 301 型便携式 CO₂ 气体分析仪于 8 月,9 月各择一晴天测定,3 次重复;定期于早上 9:00~10:00 采用功能叶用小液流法测定叶水势;烘干称重法测叶片含水量;自然干燥法测离体叶片持水力;试验结束统一测定各项生长指标。用新鞘干重的增量与耗水量之比计算整体水分利用效率 (WUE₁),用总干物质增量与耗水量之比计算整体水分利用效率 (WUE₂)。

1.2.3 数据分析

对所得数据用 Excel 和 SAS 6.12 软件进行统计分析并作图。

2 结果与分析

2.1 土壤干旱对辽东栎幼苗水分生理特性的影响

2.1.1 土壤干旱对辽东栎幼苗耗水规律的影响

不同树种的耗水量强烈地受到土壤水分含量的影响,并且与植物体内各种水分生理过程相互联系相互影响。

由图 1 可见,在不同土壤干旱条件下,辽东栎幼苗的耗水规律有所改变。在水分处理期间,随土壤含水量的减少幼苗耗水量明显下降,耗水高峰期提前,在重度干旱下耗水峰形由单峰变为双峰。干旱下耗水量的降低与叶面积减少、气孔蒸腾降低等有关。这是苗木对土壤水分亏缺的适应性反应,有利于其经济利用水分,在缺水环境下生存。

2.1.2 土壤干旱对辽东栎幼苗叶水势及叶片含水量的影响

应了植物组织的水分状况,是衡量植物抗旱的一个重要生理指标^[10]。叶片含水量也是研究植物水分关系的重要指标。不同土壤水分条件下植物叶片含水量的高低可以反映其在水分胁迫下叶片持水能力强弱。从图 2、3 可以看出,辽东栎在干旱胁迫前期水势变化较平缓,后期则急剧下降,尤其在严重干旱下,水势变化趋势呈 M 形。水势如此剧烈的变化说明树种叶水势的变化除受土壤水分含量直接影响外,还受自身调节能力的影响。由此可见,土壤干旱胁迫对树木叶水势的影响很大,树种对自身的叶水势具有一定的调节能力,以适应不同程度的土壤水分亏缺。随土壤水分含量减少,辽东栎在中度及重度干旱下叶片含水量差异不大,并与适宜水分下的接近,说明辽东栎叶片含水量对土壤水分含量变化不敏感。

2.1.3 土壤干旱对辽东栎幼苗离体叶片持水力的影响

同一树种生长在不同土壤水分条件下,离体叶

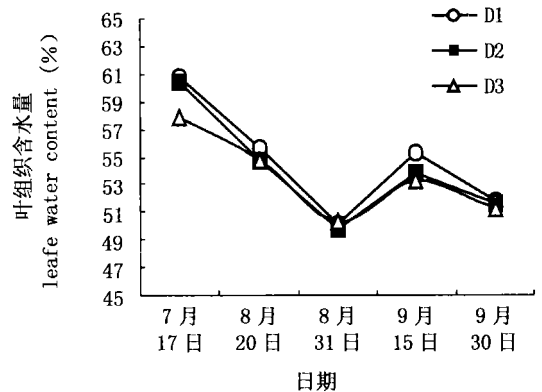


图 3 土壤干旱对辽东栎幼苗叶含水量影响

Fig 3 Effects of leaf water content of *Quercus liaotungensis* under soil drought

植物叶水势代表植物水分运动的能量水平,反

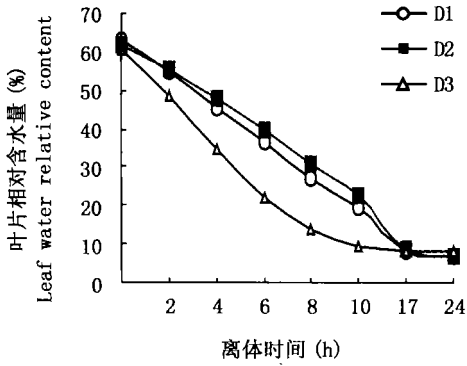


图 4 土壤干旱对辽东栎幼苗离体叶片持水力影响

Fig 4 Effects of water holding ability of leaf of *Quercus liaotungensis* under soil drought

片持水力有不同的变化。由图 4 比较来看, 重度干旱下生长的辽东栎叶片离体后失水很快, 中度干旱下的最慢, 说明在中度干旱下辽东栎叶片的持水力有所增加, 但重度干旱下由于叶片水分亏缺严重, 造成细胞损伤持水力下降。

2.2 土壤干旱对辽东栎幼苗叶片蒸腾速率日进程的影响

蒸腾是植物体内水分以气体状态向外散失的过程, 蒸腾作用的强弱是反映植物水分代谢的一个重要指标, 是植物水分代谢极其重要的一个环节。不同土壤水分对植物的蒸腾有较大的影响^[11, 12]。由图 5 可见, 辽东栎幼苗 8 月 24 日蒸腾速率日进程, 在适宜水分下是双峰曲线, 中度干旱下是单峰曲线, 重度干旱下则一直维持在较低水平, 呈波状起伏, 说明其气孔的调节功能已经紊乱, 严重的干旱已经影响到正常的蒸腾作用。从图 6 可以看出, 9 月 17 日蒸腾速率日进程与 8 月 24 日的明显不同。9 月份的蒸腾速率大大降低, 下降了近 50%。对比 8 月份的蒸腾速率日进程图, 可以发现辽东栎仍有明显的单峰 (适宜水分下) 和双峰 (中度干旱下), 但不同于 8 月。分析原因可以认为树木在不同生长季节蒸腾速率日进程是不同的, 除受土壤水分、光照强度、大气湿度、气温等环境因子的综合作用, 还与树种本身的生长节律、蒸腾特性有关。蒸腾速率日进程变化受控于光照强度、相对湿度及气温的日变化, 其中光照强度在 3 个环境因子中占主导地位^[13]。从两个月蒸腾速率日平均值来看, 辽东栎属低蒸腾树种, 平均仅为 $2.98 \text{ L g}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。对蒸腾速率和光照强度、气温及相对湿度的简单相关分析表明, 在适宜水分和

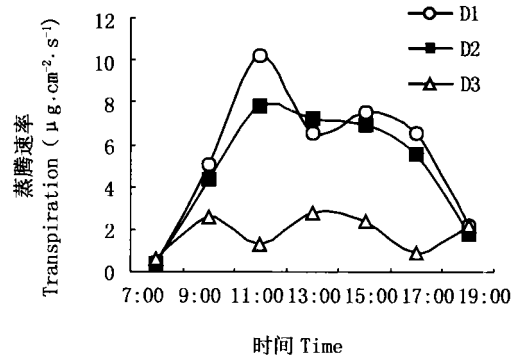


图 5 8 月 24 日蒸腾速率日进程

最大, 而在重度干旱胁迫下, 气温对辽东栎的蒸腾速率影响较大。

2.3 土壤干旱对辽东栎叶片光合特性及叶片水分利用率的影响

水分是植物进行光合作用的原料之一, 土壤水分含量的多少会直接或间接地影响树木生长和正常代谢活动, 树木的生长状况与其光合效率、水分利用率有着密切的关系。羧化效率的大小表明叶肉因素对 P_n 的影响程度^[14, 15]。由表 1 可见, 在生长中期的 8 月, 随土壤含水量减少, 辽东栎幼苗的光合速率下降, 蒸腾速率在中度干旱时上升, 重度干旱时急剧下降, 瞬时水分利用效率、羧化效率均下降。表明土壤水分亏缺降低其光合、蒸腾作用; 生长后期, 瞬时水分利用效率及羧化效率也随土壤水分含量的减少而降低。由于气温降低, 蒸腾和光合速率都比生长中期高温强光下的有所升高, 水分利用率变化不大, 羧化效率有所提高, 这与辽东栎中生植物的特性有关。其幼苗不耐高温强光, 高温强光对其光合和蒸腾有抑制作用, 特别是在土壤严重水分亏缺时表现更明显。

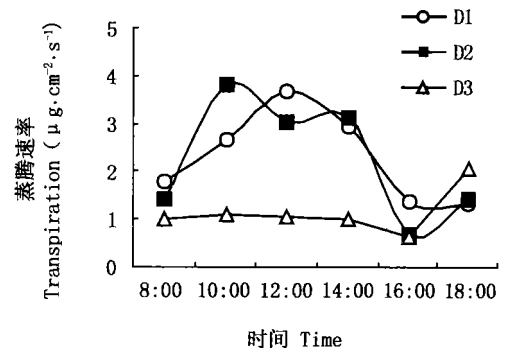


图 6 9 月 17 日蒸腾速率日进程

Fig 6 Daily changes of transpiration rate on September 17

表 1 土壤水分状况对辽东栎幼苗光合、蒸腾速率、羧化效率及瞬时 WUE 的影响

Table 1 Effects of soil moisture status on photosynthetic rate, transpiration rate, carboxylation rate and leaf water use efficiency of *Quercus liaotungensis*

处理 Treatment	光合速率 (P_n) Photosynthetic rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 (T_r) Transpiration rate ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 (G_s) Stomata conductance ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 (C_i) CO_2 density in gap of cells ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	瞬时水分利用率 (WUE) Water utilization efficiency ($\text{Lmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	羧化效率 (CE) Carboxylation rate
8月 D1	6.67	0.96	50.67	192.00	6.92	0.035
D2	5.70	1.07	60.00	319.33	5.34	0.018
D3	2.05	0.49	23.50	189.00	4.18	0.011
9月 D1	9.67	1.53	142.67	271.33	6.33	0.036
D2	8.73	1.68	148.50	283.25	5.20	0.031
D3	5.87	1.21	109.67	215.00	4.86	0.027

表 2 土壤干旱对辽东栎幼苗生长状况的影响

Table 2 The effects of growth status of *Quercus liaotungensis* under soil drought

处理 Treatment	株高增量 (cm) Addition of height	地径增量 (cm) Addition of basal diameter	新梢总长 (cm) Length of shoots	叶面积 (cm^2) Area of leaves	比叶重 ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$) Special leaf mass	根冠比 Root to shoots
D1	7.22	0.22	91.60	842.85	6.19	1.095
D2	6.00	0.17	85.43	542.26	5.62	1.141
D3	5.13	0.10	38.90	390.43	5.47	1.353

表 3 土壤干旱下辽东栎幼苗耗水量、干物质分配及整体水分利用率

Table 3 The water consumption, dry matter allocation and water use efficiency of *Quercus liaotungensis* under soil drought

处理 Treatment	单株耗水量 (kg) Water consumption	单株枝叶干重 (g) Dry weight of leaves and shoots	根干重 (g) Dry weight of roots	总干物质 (g) Total dry weight	整体水分利用率 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) WUE_1	整体水分利用率 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) WUE_2
D1	12.50	7.19	7.77	14.96	0.58	1.20
D2	9.93	5.53	7.85	13.38	0.56	1.35
D3	6.72	2.75	3.79	6.54	0.41	0.97

2.4 土壤干旱对辽东栎生长、干物质分配及整体水分利用效率的影响

土壤干旱对植物的影响是全面而深刻的。从地上部枝叶、地下部根系的生长,到有机同化物的分配以及水分利用效率等各个方面都会受到水分亏缺的影响。不同树种随土壤水分含量的减少,其高生长及增粗生长因叶面积的减少而减慢,同化物即干物质在根、茎、叶中的分配也会改变。这是树木适应土壤水分亏缺做出的生态学反应。由表 2、3 可以看出,辽东栎幼苗的高生长、加粗生长及新梢生长量、叶面积、比叶重均随土壤水分含量减少

而降低,根冠比加大; WUE_1 随土壤水分减少总是下降的,而 WUE_2 在中度干旱下升高,在重度干旱下是下降的。分析原因是辽东栎幼苗在不同水分条件下,其同化的有机物质向各器官的分配比例不同,使得用不同部分计算的不同层次的整体 WUE 变化趋势不同。辽东栎属大根系树种,其根系干物质所占比例超过总干物质的一半以上,且随土壤水分含量的减少根冠比增大明显,说明有更多的有机物质分配到了根系,有利于壮大根系,提高吸水能力,以抵御干旱或减少干旱可能造成的伤害,增强抗旱性。更多的有机物向根系转运,会限制地上

部,特别是叶片的生长,叶片数目减少,叶面积减小,不利于整体的生长。所以, WUE_1 总是下降的。看来植物抗旱性的提高是以牺牲部分生物学产量为代价的,对植物的生存有利,但对生长或多或少都有影响。

3 讨论

土壤水分对树木生长、蒸腾作用、光合作用等生理代谢各个方面的影响非常广泛。随土壤水分含量减少,辽东栎幼苗的生长明显受到抑制,叶片数、单叶面积、总叶面积、比叶重、光合速率均下降;蒸腾速率在中度干旱下上升,在重度干旱下下降。叶片含水量较稳定,变化幅度不大,说明辽东栎幼苗叶片含水量对土壤含水量变化不敏感;在干旱胁迫前期叶水势变化较平缓,后期急剧下降,尤其在严重干旱下,水势变化趋势呈/M形。水势如此剧烈的变化说明树种叶水势的变化除受土壤水分含量直接影响外,还受其自身调节能力的影响。树木对自身的叶水势具有一定的调节能力,以保持叶片组织含水量的相对稳定,各项生理代谢活动能较正常地进行,从而对干旱表现出一定的适应性。

很多研究认为,叶片的瞬时 WUE 并非在水分充足时最高,在适度的水分胁迫范围内,由于光合速率(P_n)随气孔导度(G_s)的适度减小而下降的速度滞后于蒸腾速率(T_r)的下降速度,即由于蒸腾作用对水分胁迫的响应比光合作用敏感,蒸腾作用超前于光合作用下降,使 WUE 有所提高^[16,17]。我们的试验结果与这一结论不符。原因可能是不同的植物对不同程度的水分亏缺敏感性不同,辽东栎幼苗在我们设置的中等程度的干旱处理下,其叶片的瞬时 WUE 就已经下降了。在干旱环境条件下,植物水分利用效率的大小决定了植物节水能力和水分生产力水平^[18]。本试验用地上部枝叶干重的增量与耗水量之比计算的整体水分利用效率 WUE_1 是下降的,而用总干物质增量与耗水量之比计算的整体水分利用效率 WUE_2 在中度干旱下有所升高的结果说明:影响 WUE 的因素很多,不同层次、不同器官水平的 WUE 随土壤水分含量变化的趋势是不同的。因为在不同水分条件下植物叶片制造的干物质向各器官分配的比例不同。所以在实际应用中比较不同植物水分利用效率大小时,一定要注意在同一水平进行比较,否则会得出片面的结论。 WUE 是植物抗旱性的一个方面,对于树木来说,因为是多年生植物,整体 WUE 较叶片 WUE

更具有应用价值,特别是 WUE_2 反映了整个植物对水分的利用效率,更能全面地反映植物的抗旱性。用总干物质增量与耗水量之比计算的整体水分利用效率 WUE_2 在中度干旱下有所升高,表明适度的水分亏缺有利于减少奢侈耗水,提高水分利用效率,增强植物的抗旱性。叶片水分利用效率(WUE)取决于瞬时 P_n 与 T_r 的比值,是水分利用效率的理论值,用时要慎重。

参 考 文 献

1. 东北林学院编. 森林生态. 北京: 中国林业出版社, 1981 25~ 37
2. 火树华. 树木学. 北京: 中国林业出版社, 1992
3. 中国树木志编委会. 中国主要树种造林技术. 北京: 中国林业出版社, 1982 10~ 13
4. 孙时轩. 造林学. 北京: 中国林业出版社, 1992 19~ 22
5. 贺顺钦, 王发其. 辽东栎苗木早期生长与光的关系. 林业科学研究, 2001, 14(6): 697~ 700
6. 孙书存, 陈灵芝. 辽东栎幼苗对干旱与模拟脱叶的生态反应初步研究. 生态学报, 2000, 20(5): 893~ 987
7. 方精云, 王效科, 刘国华, 等. 北京地区辽东栎呼吸量的测定. 生态学报, 1995, 15: 235~ 244
8. 陈灵芝. 温带森林生态系统结构与功能研究. 北京: 科学出版社, 1997. 22~ 26
9. 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶的生长及其光合作用. 生态学报, 2000, 20(2): 212~ 217
10. 黎裕. 作物抗旱鉴定方法与指标. 干旱地区农业研究. 1993, 11(1): 91~ 99
11. 葛滢, 常杰, 刘珂, 等. 杭州石笋亭蒸腾的生理生态学研究. 植物生态学报, 1999, 23(4): 320~ 326
12. 梁宗锁, 李敏, 王俊峰. 沙棘抗旱造林现状与改进意见. 沙棘, 1998 11(3): 8~ 13
13. 李洪建, 柴宝峰, 王孟本. 北京杨水分生理生态特性研究. 生态学报, 2000, 20(3): 417~ 422
14. 刘昌明, 王会肖著. 土壤(作物)大气界面水分过程与节水调控. 北京: 科学出版社, 1999. 30~ 37
15. 邹琦. 植物光合作用的气孔与非气孔限制. 作物抗旱生理生态研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1994. 155~ 163
16. 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70~ 76
17. 徐世昌. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响. 作物学报, 1995 2(3): 354~ 363
18. 贺康宁, 田阳, 史常青, 等. 黄土半干旱区集水造林条件下林木生长适宜的土壤水分环境. 林业科学, 2003, 39(1): 10~ 16