

# 降雨变化对不同核桃树种蒸腾耗水及光合特性的影响

詹瑾<sup>1</sup>, 种培芳<sup>1</sup>, 谢惠敏<sup>1</sup>, 王博<sup>1</sup>, 周鹏飞<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 陇南市经济林研究院, 甘肃 陇南 746000)

**摘要:** 通过探讨核桃(*Juglans regia*)响应降雨变化时的蒸腾耗水及光合特性,为核桃生产中合理栽植及水分管理提供理论参考。通过人工控制灌水量(-50%, -25%, CK, +25%, +50%),采用盆栽苗木称重法和 Li-6400 便携式光合仪测定核桃品种香玲、清香和辽核 1 号在不同水分条件下蒸腾耗水及光合指标,并采用隶属函数法对指标进行分析。结果表明:(1)香玲、清香和辽核 1 号 3 种苗木的耗水量和耗水速率在不同水分条件下不同品种间存在显著差异( $P < 0.05$ )。夜间耗水量差异较明显,辽核 1 号在各降雨条件下夜间耗水量所占比例最大,耗水速率较小,具有良好的保水力。(2)清香和辽核 1 号在不同降雨条件下净光合速率(photosynthetic rate,  $P_n$ )的变化主要是由气孔因素限制;香玲在水分较匮乏和较湿润环境中, $P_n$ 的变化主要由非气孔限制因素引起。(3)辽核 1 号水分利用效率(water use efficiency, WUE)处于较高水平;香玲灌水量增加 50%,水分利用效率较低;清香灌水量减少 50%,水分利用效率骤然上升。(4)结合隶属函数结果分析,香玲不适于水分条件较湿润的环境,清香则在水分较匮乏时依然生长,辽核 1 号则在不同降雨条件下具有较高适应性。

**关键词:** 经济林树种核桃;降雨变化;蒸腾耗水;光合

中图分类号:S664.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2018)06-0186-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.027

## Effect of Rainfall Change on Transpiration Water Consumption and Photosynthetic Characteristics of Different Walnut Species

ZHAN Jin<sup>1</sup>, CHONG Peifang<sup>1</sup>, XIE Huimin<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, ZHOU Pengfei<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2. Longnan Economic Forest Research Institute, Longnan, Gansu 746000)

**Abstract:** In order to provide theoretical basis for the reasonable planting and water management of walnut production, this study analyzed the water consumption and photosynthetic characteristics of transpiration of walnut response to rainfall change. Through the artificial rainfall simulation environment (-50%, -25%, CK, +25%, +50%), pot seedling weighing method and a Li-6400 portable photosynthesis system measuring method were adopted to study transpiration of water consumption and photosynthetic characteristics of Xiangling, Qingxiang, and Liaohel seedling under different rainfall conditions, and use the membership function method to analyze the indicators. Results showed that: (1) The water consumption and water consumption rate of Xiangling, Qingxiang and Liaohel seedlings showed significant difference under different rainfall conditions ( $P < 0.05$ ), and the difference of water consumption at night was also obvious. The seedlings of Liaohel showed the largest water consumption at night in each rainfall condition, small water consumption rate, and good water holding capacity. (2) Under different rainfall conditions, the change of net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of Qingxiang and Liaohel seedlings was mainly limited by stomatal factors. Under water scarcity and extreme humidity, the change of net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of Xiangling seedlings was mainly limited by non-stomatal factors. (3) The water use efficiency (WUE) of Liaohel seedlings was at a higher level; the WUE of Xiangling seedlings was low in the rainfall increased by 50%; the WUE of Qingxiang seedlings increased sharply in the rainfall reduced by 50%. (4) Combining with the ranking of subordinate function

收稿日期:2018-06-08

资助项目:秦巴山区核桃产业发展关键技术集成与示范(2015GA860002);不同品种核桃对早春低温伤害的抵抗能力研究(2016A-028)

第一作者:詹瑾(1993—),女,在读硕士研究生,主要从事植物逆境生理生态研究。E-mail:1250626183@qq.com

通信作者:种培芳(1977—),女,教授,主要从事园林植物及荒漠植物生理生态研究。E-mail:Zhongpf@gsau.edu.cn

results, Xiangling seedling was suitable for the water conditions that are relatively moist, Qingxiang seedling could grow in the extreme environment lack of water, and Liaohel seedling was with high adaptability in different rainfall conditions.

**Keywords:** economic forest tree species walnut; simulated rainfall; transpiration of water consumption; photosynthesis

近半个世纪以来,由人类活动引起的温室气体排放而导致的气候变暖已受到人们的广泛关注。迄今为止,全球平均地面温度已上升( $0.74 \pm 0.18$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,这不仅改变了全球的大气循环和水循环,还导致全球和区域性的降雨格局也发生变化,如降雨总量、降雨时间分布发生变化、降雨时间间隔延长、单次降雨量增大为特征的降雨事件增加等,且这种趋势会变得越来越普遍<sup>[1]</sup>。为适应气候条件的变化,植物需改变自身形态与生理响应机制从而进行生长。因此,降雨变化与植物的关系便成为人们备受关注的研究热点,目前许多学者从模拟降雨对群落结构<sup>[2]</sup>、光合特性及生物量<sup>[3-4]</sup>、生理生长<sup>[5]</sup>等方面进行了研究。

核桃(*Juglans regia*)又称胡桃、羌桃,为胡桃科胡桃属植物的统称,是我国重要的生态与经济林树种。近年来,科研工作者分别从核桃的栽植管理<sup>[6]</sup>、抗寒性<sup>[7]</sup>、花芽分化机制<sup>[8]</sup>及不同核桃品种光合特性的差异<sup>[9-10]</sup>等方面进行了研究。而对核桃在不同水分环境下蒸腾及光合方面的研究较少。有研究<sup>[11]</sup>表明,水分对植物的生长、蒸腾、光合及有机物的运输等过程具有明显的影响,从而影响植物对水资源的利用效率。那么,随着水分条件的变化,核桃在响应水分变化时蒸腾及光合上会有什么变化?为了探明该问题,本研究通过人工控制灌水量,对 3 种核桃苗木进行盆栽试验,对其蒸腾耗水及光合指标进行测定,以其为核桃生产中合理栽植及水分管理提供理论参照。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点与材料

试验地设在陇南市经济林研究院成县试验基地,材料为该试验基地已培育好的 3 年生核桃嫁接苗木。选育广泛种植的 3 个品种:香玲、清香和辽核 1 号。

### 1.2 试验设计与测定指标

1.2.1 试验设计 根据选取核桃苗木种源成县生长季(4—8 月)每月平均降水(1987—2016 年近 30 年的月平均降水量为基准)设置降雨。根据成县气象局资料显示,1987—2016 年的年平均降水主要集中在 4—8 月,总降水量为 403.00 mm,月均降水量为 80.60 mm,占年降水量的 66.37%;资料还显示,该地区 1987—2016 年生长旺盛期(4—8 月)内最丰年的降水量为 617.50 mm,比平均水平 403.00mm 高出约 50%,最欠年的降水量为 192.80 mm,比平均水平

403.00 mm 低约 50%。因而设定试验期间降水量增减 50%的处理,并在中间设置增减 25%处理的 2 个梯度,这样降水控制试验共设置 5 个梯度:降水量减少 50%(土壤含水量 12.02%)、减少 25%(土壤含水量 17.73%)、CK(土壤含水量 20.02%)、增加 25%(土壤含水量 23.02%)和增加 50%(土壤含水量 26.00%)。对照指以成县近 30 年核桃生长旺盛期(4—8 月)每月的降水量为基准,换算为各处理每月的总灌水量,分 10 次灌水,每隔 3 天浇 1 次水,在控水试验结束后用烘干法测定控水梯度相对应的土壤含水量。

2017 年 3 月初,挑选生长势基本一致、苗高 30~35 cm、无病虫害的 3 年生核桃苗木香玲、清香和辽核 1 号各 25 株,每个树种下设有 5 个降水量梯度,每个梯度设定 5 次重复。阴天时,将其分别移栽到规格为上内径 58 cm,高 40 cm,下内径 45 cm 的圆形花盆中,同时在花盆中装入该试验基地无杂质土壤 25 kg,在自然状态下缓苗 30 天。

从 2017 年 4 月 13 日至 8 月 27 日进行控水。持续 3 个晴天,依据灌水量于 2017 年 4 月 13 日晚 20:00 通过量筒对苗木进行人工灌水。同时用保鲜膜覆盖盆栽土壤,用塑料袋将花盆从底部至土壤上表面完全套住,花盆底部放置托盘,防止水分通过土壤表面蒸发,植物的蒸腾作用是水分散发的唯一途径。控水试验结束后连续 4 天早 8:00 及晚 20:00 称重记录盆栽苗木重量,雨天及时遮盖防雨布。

1.2.2 蒸腾耗水特性测定 试验采用盆栽苗木称重法测定蒸腾耗水量。每株苗木早晚 8:00 称重记录(8:00—20:00 测定结果为白天值,20:00 至次日 8:00 测定结果为夜晚值)。采用透明方格纸法测定单株叶面积。每株苗木用坐标纸比对将差不多大小叶片分为一级,记录每级叶片数,找出各级代表叶片,并计算出叶面积,单株叶面积= $\sum$ (分级叶片数 $\times$ 叶面积)。耗水速率=每个时间段的耗水量/(单株叶面积 $\times$ 时间)。

1.2.3 光合特性测定 控水试验结束后用 Li-6400 便携式光合仪对核桃苗木叶片光合指标测定。在典型晴天于 8:30—11:30 在自然叶室下测定苗木叶片蒸腾速率(leaf transpiration rate,  $T_r$ )、胞间二氧化碳浓度(intercellular carbon dioxide concentration,  $C_i$ )、气孔导度(stomatal conductance,  $C_o$ )和净光合速率(net photosynthetic rate,  $P_n$ ),瞬时水分利用效

率(WUE)=净光合速率 $P_n$ /蒸腾速率 $T_r$ 。每株苗木测定3片功能叶,每个参数读取3次数据,取均值为测定值。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 对数据进行方差分析和多重比较,Origin 8.0 软件进行作图。采用隶属函数法对苗木适应水分变化能力进行分析,即采用 Fuzzy 数学中隶属函数方法对苗木各指标得到的隶属函数值进行累加,求平均值用以评价其适应性。隶属函数值的计算方法为<sup>[12-13]</sup>:

某指标与适应性呈现出正相关关系,用公式: $X(u) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ,某指标与适应性呈现出负相关关系,用公式: $X(u) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中: $X(u)$ 为适应性隶属函数值; $X$ 为某指标的测定值; $X_{\max}$ 为测定中最大值; $X_{\min}$ 为测定中最小值。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨变化对核桃苗木蒸腾耗水特性的影响

2.1.1 蒸腾耗水量比较 由图1可知,香玲、清香和辽核1号全天蒸腾耗水量均随着灌水量的增加而增加,且在不同水分条件下有显著差异( $p < 0.05$ )。灌水量为-25%和+25%时,香玲波动最大,较CK的变化分别为减少了39.39%和增加了50.81%。灌水量为+50%时,辽核1号波动最大,较CK的增幅为90.67%。3种苗木的耗水量主要集中在白天,白天占全天耗水量的60.90%~81.11%,晚上占全天耗水量的22.71%~53.56%。相比香玲和清香,辽核1号在各控水梯度内均保持着较高的耗水量。

2.1.2 蒸腾耗水速率比较 由图2可见,香玲、清香和辽核1号全天及白天耗水速率均随着灌水量的增加而增加,且在不同水分条件下差异显著( $p < 0.05$ )。灌水量为-50%和+25%时,清香的全天及白天耗水速

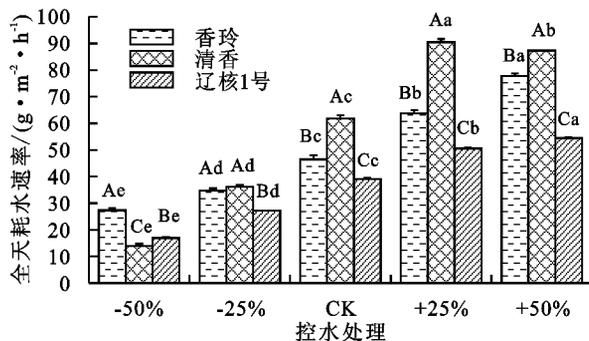
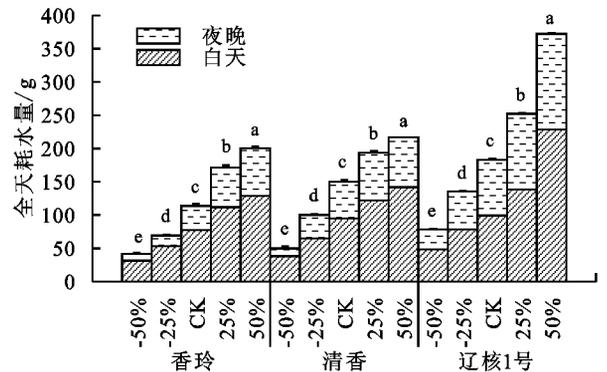


图2 3种苗木不同控水时期耗水速率

### 2.2 降雨变化对核桃苗木光合特性的影响

2.2.1 净光合速率( $P_n$ )比较 由图3可知,香玲、清香和辽核1号 $P_n$ 均随着灌水量的增加而增加,且在不同水分条件下不同品种间存在显著差异( $p < 0.05$ )。灌水

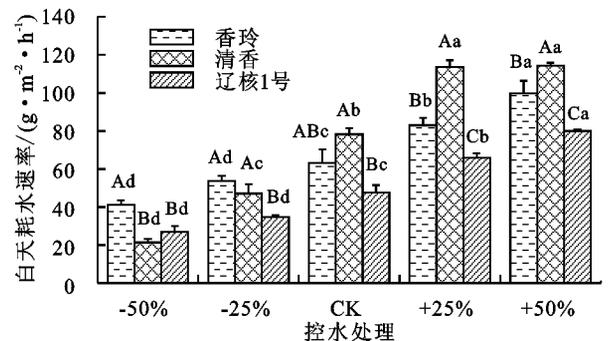
率波动最大,较CK分别降低77.42%,72.67%和增加46.60%,45.30%。灌水量为+50%时,辽核1号的白天耗水速率波动最大,较CK增长68.18%。灌水量为+25%和+50%时,清香白天耗水速率分别为(113.66±3.60),(114.28±1.55)g/(m<sup>2</sup>·h),无显著差异( $p > 0.05$ )。灌水量为-25%和-50%时,香玲和辽核1号的白天耗水速率分别为(41.06±2.56),(53.81±2.57)g/(m<sup>2</sup>·h)和(27.05±2.85),(34.81±0.73)g/(m<sup>2</sup>·h),无显著差异( $p > 0.05$ )。



注:图中不同字母表示各处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图1 3种苗木不同控水时期全天耗水量

从图2还可看出,同一水分条件下香玲、清香和辽核1号全天及白天耗水速率均有显著差异( $p < 0.05$ )。灌水量为-50%时,3种苗木的全天耗水速率均有显著差异( $p < 0.05$ ),清香和辽核1号的白天耗水速率无显著差异( $p > 0.05$ ),并且此时香玲全天及白天耗水速率是清香的1.96,1.92倍;灌水量为-25%时,香玲和清香全天及白天耗水速率无显著差异( $p > 0.05$ );灌水量为CK时,3种苗木全天耗水速率有显著差异( $p < 0.05$ ),清香和辽核1号的白天耗水速率存在显著差异( $p < 0.05$ );灌水量为+25%和+50%,3种苗木的全天及白天耗水速率均有显著差异( $p < 0.05$ );辽核1号的全天及白天耗水速率在不同水分条件下均低于香玲和清香。



量为+25%时,清香的 $P_n$ 波动最大,较CK的增幅为54.56%;灌水量为-50%时,辽核1号 $P_n$ 降幅最小,香玲和清香相近。在同一水分条件下,辽核1号的 $P_n$ 与香玲和清香均有显著差异( $p < 0.05$ ),并且辽核1号在各

控水梯度都保持着较高的  $P_n$ 。

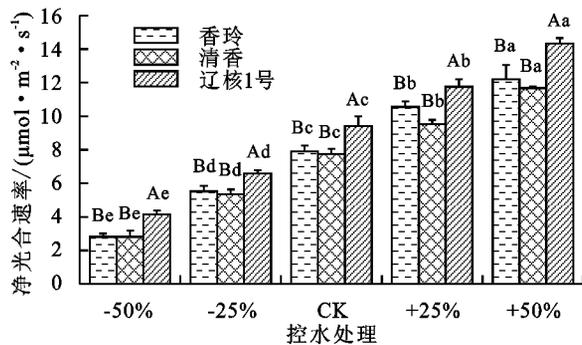


图 3 3 种苗木不同控水时期净光合速率

2.2.2 胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ )、气孔导度 ( $C_o$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ) 比较 由图 4 可知,香玲、清香和辽核 1 号在不同水分条件下  $C_i$ 、 $C_o$  和  $T_r$  均有显著差异 ( $p < 0.05$ )。清香和辽核 1 号  $C_i$  均随着灌水量的增加而增加;香玲的  $C_i$  除在灌水量为  $-50\%$  时比  $-25\%$  增长了  $13.62\%$  外,仍随着灌水量的增加而增加;灌水量为  $+50\%$  时,香玲的  $C_o$  比灌水量为  $-25\%$  时降低了  $32.22\%$ ,与变化趋势相反;灌水量为  $+25\%$  和  $+50\%$  时,香玲的  $T_r$  波动最大,较 CK 的增幅分别为  $59.19\%$  和  $83.79\%$ 。

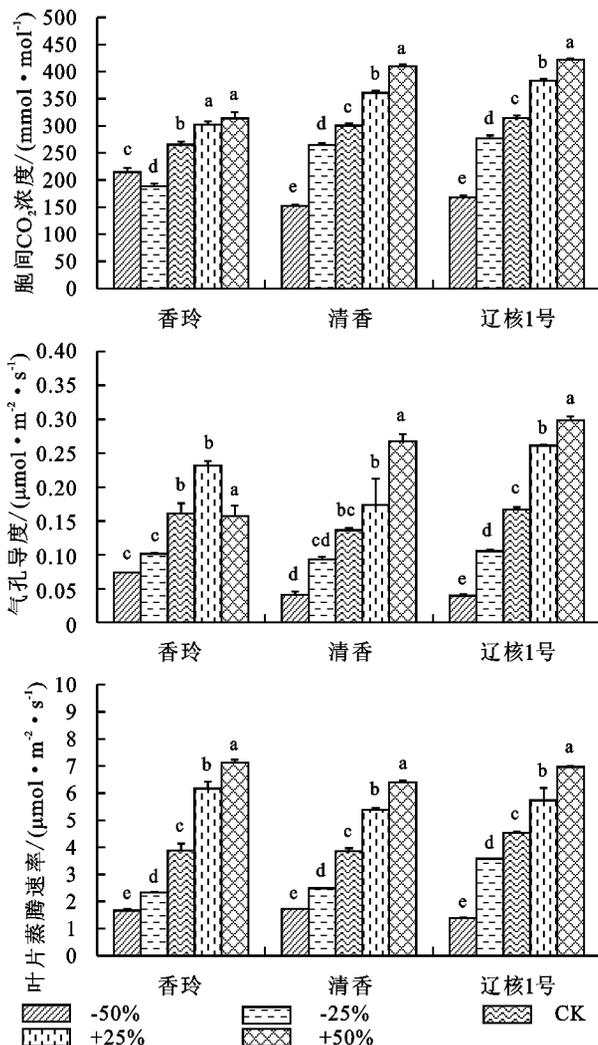


图 4 3 种苗木不同控水时期胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$ 、气孔导度  $C_o$  和叶片蒸腾速率  $T_r$

2.2.3 水分利用效率 (WUE) 比较 由图 5 可知,香玲、清香和辽核 1 号的 WUE 在不同水分条件下及同一水分条件下不同品种间存在显著差异 ( $p < 0.05$ ),且随着灌水量的增加而增加。灌水量为  $+50\%$  时,香玲的 WUE 比灌水量为  $+25\%$  时降低了  $15.60\%$ ;灌水量为  $-50\%$  时,清香的 WUE 比灌水量为  $-25\%$  时增加了  $37.19\%$ 。辽核 1 号在各控水梯度内都保持着较高的 WUE,灌水量为 CK 和  $+25\%$  时,辽核 1 号的 WUE 与香玲、清香均有显著差异 ( $p < 0.05$ ),与此同时香玲和清香间无显著差异 ( $p > 0.05$ )。

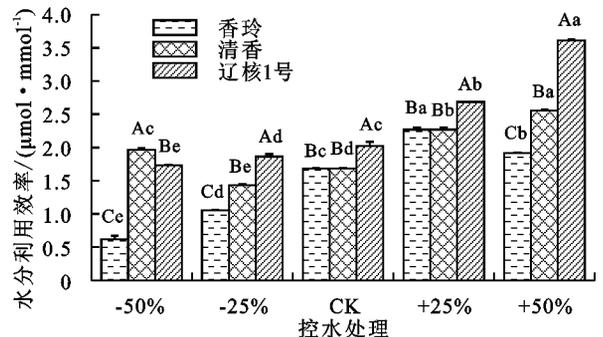


图 5 3 种苗木不同控水时期水分利用效率 WUE

### 2.3 3 种苗木对水分变化适应能力综合评价

方差分析结果 (表 1) 表明,香玲、清香和辽核 1 号 3 种苗木在不同水分条件下不同品种间的净光合速率 ( $P_n$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ )、气孔导度 ( $C_o$ )、叶片蒸腾速率 ( $T_r$ )、全天及白天耗水速率、全天及白天耗水量均存在显著差异 ( $p < 0.05$ ),因此选择这几种指标作为其对不同水分条件适应性的综合评价。如表 1 所示,灌水量为  $-50\%$  时,隶属函数值排名为清香  $>$  辽核 1 号  $>$  香玲;灌水量为  $-25\%$  和 CK 时,隶属函数值排名为辽核 1 号  $>$  清香  $>$  香玲;灌水量为  $+25\%$  和  $+50\%$  时,隶属函数值排名为辽核 1 号  $>$  香玲  $>$  清香。

## 3 讨论

植物耗水是光合、蒸腾作用的综合反映,是评价植物生长适应性和研究环境水分变化特征的重要指标<sup>[14]</sup>。土壤水分由树木根系吸收后经树干运输到树冠,99.8% 以上以蒸腾的形式从叶表面消耗到空气中<sup>[15]</sup>,不同树种的蒸腾量反映其耗水能力,并且蒸腾强度的大小在一定程度上反映了植物调节水分损失及适应环境变化的能力,不仅受自身生物学特点 (气孔构造、叶片形态和组织结构等) 的影响,还受各种生态因子 (光合有效辐射、大气温度、叶面温度、 $\text{CO}_2$  浓度、空气相对湿度和土壤含水量等) 的制约<sup>[16]</sup>。有研究<sup>[17]</sup>表明,在相同的水分状况下,不同树种有不同的蒸腾耗水量;在不同的水势梯度下,同种苗木的蒸腾速率 ( $T_r$ )、耗水量及耗水速率随干旱胁迫程度的增加而减少。本研究表明,香玲、清香和辽核 1 号 3 种

苗木在不同水分条件下蒸腾耗水量及耗水速率均有显著差异 ( $p < 0.05$ ), 且存在种间差异。3 种苗木的叶片蒸腾速率 ( $T_r$ )、全天耗水量均随着灌水量的增加而增加。这是因为蒸腾作用是植物减少水分散失而形成的一种重要代谢机制, 对阔叶树而言, 在受到干旱胁迫时, 会通过关闭气孔及叶片的萎蔫、变黄和落叶来减少蒸腾<sup>[18]</sup>。本研究中, 清香和辽核 1 号均

通过调节气孔来控制蒸腾耗水量, 清香和辽核 1 号的气孔导度 ( $C_o$ ) 均随着灌水量的增加而增加。香玲、清香和辽核 1 号 3 种苗木的耗水量主要集中在白天, 占全天耗水量的比例为 60%~81%, 与尾巨桉等大部分树种的研究结果<sup>[19]</sup>类似。光对气孔运动的调节起着重要作用, 主要集中在保卫细胞光照后进行的光合作用<sup>[20]</sup>, 因此将白天耗水规律作为主要研究内容。

表 1 3 种苗木不同控水时期适应性生理指标隶属函数值及综合评价

控水处理	苗木种类	净光合速率	气孔导度	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度	蒸腾速率	水分利用效率	全天耗水速率	全天耗水量	白天耗水速率	白天耗水量	平均值	排名
-50%	香玲	0.78	0.63	0.54	0.56	0.39	0.36	0.36	0.45	0.45	0.50	3
	清香	0.39	0.80	0.52	0.57	0.46	0.61	0.61	0.67	0.67	0.59	1
	辽核 1 号	0.55	0.42	0.48	0.63	0.54	0.60	0.60	0.40	0.40	0.51	2
-25%	香玲	0.50	0.50	0.40	0.37	0.39	0.56	0.56	0.40	0.40	0.45	3
	清香	0.51	0.23	0.25	0.53	0.49	0.50	0.50	0.57	0.57	0.46	2
	辽核 1 号	0.57	0.53	0.48	0.44	0.61	0.50	0.50	0.47	0.47	0.51	1
CK	香玲	0.60	0.43	0.37	0.47	0.46	0.39	0.39	0.44	0.44	0.44	3
	清香	0.41	0.46	0.51	0.60	0.46	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	2
	辽核 1 号	0.49	0.55	0.50	0.52	0.59	0.37	0.37	0.62	0.63	0.52	1
25%	香玲	0.35	0.39	0.57	0.58	0.42	0.42	0.42	0.40	0.40	0.44	2
	清香	0.30	0.27	0.38	0.39	0.42	0.50	0.50	0.50	0.50	0.42	3
	辽核 1 号	0.51	0.64	0.52	0.59	0.46	0.53	0.53	0.40	0.40	0.51	1
50%	香玲	0.42	0.60	0.45	0.34	0.45	0.43	0.43	0.63	0.63	0.49	2
	清香	0.42	0.45	0.44	0.49	0.42	0.00	0.00	0.50	0.50	0.36	3
	辽核 1 号	0.52	0.34	0.54	0.62	0.63	0.50	0.50	0.50	0.50	0.52	1

本研究中, 3 种苗木夜间占全天耗水量的比例为 22.71%~53.56%, 与周平等<sup>[21]</sup>的研究结论中不同树种白天耗水量差异大、夜晚耗水量差异小存在异议。这是因为随着灌水量的增加, 周边空气湿度增大, 在植物—大气界面, 水分运动方向与蒸腾作用耗水的方向相反, 即植物叶片有倒吸水现象<sup>[18]</sup>。清香和辽核 1 号的全天耗水速率均随着灌水量的增加而增加。清香在灌水量为 +50% 时, 其全天耗水速率比灌水量为 +25% 时降低了 7.54%, 这是由于单株蒸腾耗水速率的大小取决于 2 个因素, 即蒸腾耗水量和单株叶面积, 在蒸腾耗水量随着灌水量的增加而增加的情况下, 耗水速率的降低是由不同苗木不同水分条件下叶面积的差异性造成。

干旱条件下, 植物蒸腾下降主要是由于气孔关闭<sup>[22]</sup>, 而光合速率既受气孔又受非气孔影响<sup>[23]</sup>。有研究<sup>[24]</sup>表明, 沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 苗木在土壤含水量为 38.9%~70.5% 时, 随着干旱加重, 其  $P_n$ 、 $C_o$ 、 $C_i$  明显下降, 而气孔限制值 ( $L_s$ ) 上升, 即  $P_n$  的下降主要是由气孔限制造成的; 当  $RWC < 38.9%$  时, 干旱胁迫持续加剧  $P_n$  和  $L_s$  都下降, 而  $C_i$  显著上升, 即  $P_n$  下降的主要原因已经转为非气孔因素的限制。本研究中, 清香  $P_n$ 、 $C_o$ 、 $C_i$ 、 $T_r$  均随灌水量的增加而递增, 即  $P_n$  的下降主要由气孔限制造成。这是

因为当  $C_o$  增大, 植物蒸腾作用上升, 由蒸腾作用所产生的蒸腾拉力加强, 对土壤水分的消耗增大, 且蒸腾作用的加大, 有助于植物光合作用。当土壤水分条件不足和蒸腾过强时, 植物体内水分收支不平衡而使保卫细胞膨压降低, 气孔开度减小或关闭,  $C_i$  减少; 当土壤水分过多时, 引起表皮细胞过度充水膨胀, 挤压体积较小的保卫细胞迫使气孔关闭<sup>[20]</sup>。香玲在灌水量为 -50% 时, 耗水量及耗水速率均大于清香和辽核 1 号, 同时  $P_n$  降低,  $C_o$  降低,  $C_i$  上升; 在灌水量为 +50% 时,  $P_n$  上升,  $C_i$  上升,  $C_o$  骤然降低。这说明香玲在水分较匮乏和较潮湿条件下,  $P_n$  的变化是由非气孔限制因素引起。这与吴俊文等<sup>[17]</sup>的研究结论一致, 即检验气孔是否是光合速率下降的原因, 既要看法合气孔限制值的大小, 又需要看  $C_i$ 。

关于植物水分利用效率 (WUE) 的研究较多关注于叶片上的水分利用效率, 其揭示了植物体内的耗水机制, 可以更好地为植被合理用水、供水提供科学依据<sup>[25]</sup>, 有利于山区经济林的恢复和保育。本研究中香玲、清香和辽核 1 号的 WUE 随着灌水量的变化发生了不同程度的变化, 说明 3 种苗木可以调节 WUE 来适应水分变化, 同时品种的不同表征说明其在水分利用效率 WUE 调节上的种间差异。灌水量为 +50% 时, 香玲的 WUE 比灌水量为 +25% 降低了 15.60%, 说明其水分利

用效率较低,不适于在水分条件较湿润的地区生长;灌水量为-50%时,清香的 WUE 比灌水量为-25%时增加了 37.19%,说明其水分利用效率高,适应水分条件较干旱环境,这与欧洲云杉无性系 WUE 在轻度和中度干旱胁迫下有所上升<sup>[26]</sup>表现出类似的适应机制。结合隶属函数结果分析,香玲不适于水分条件较湿润的环境,清香则在水分较匮乏时依然生长,辽核 1 号则在不同降雨条件下具有较高适应性。

本研究结果表明,在部分处理下,一些蒸腾与光合指标种间差异不显著,这可能是由试验时间造成本文的局限性,仅用 1 年的试验时间,无法全面体现年际间的气候及核桃生长变异。尽管降雨处理梯度较大,但部分指标的差异可能不足以达到显著差异水平,在应用这一结论时应充分考虑这种影响,也需要在未来继续深入研究。

## 4 结论

通过模拟降雨变化,对香玲、清香和辽核 1 号 3 种核桃苗木进行盆栽控水试验,研究发现 3 种苗木的蒸腾耗水和光合均受水分条件的调控,主要是随着灌水量的增加而增加,并且在不同水分条件下存在种间差异。结合本试验结果,建议在未来核桃栽植中,应结合降雨格局的变化趋势及当地水分条件,在水分较匮乏或较湿润地区栽植清香,水分条件相对湿润地区栽植香玲,辽核 1 号则可以广泛栽植,达到丰产优质的效果,促进经济增长。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change: The physical science basis, summary for policy makers, formally approved at the 10th Session of working group I of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva: IPCC,2007.
- [2] 张海芳,刘红梅,赵建宁,等. 模拟氮沉降和降雨变化对贝加尔针茅草原土壤细菌群落结构的影响[J]. 生态学报,2018,38(1):1-10.
- [3] 刘玉英,李卓琳,韩佳育,等. 模拟降雨量变化与 CO<sub>2</sub> 浓度升高对羊草光合特性和生物量的影响[J]. 草业学报,2015,24(11):128-136.
- [4] 种培芳,姬江丽,李毅,等. 红砂(*Reaumuria soongorica*)对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高及降水变化的光合生理响应[J]. 中国沙漠,2017,37(4):714-723.
- [5] 姬江莉,种培芳,李毅,等. 红砂对 CO<sub>2</sub> 浓度升高及降水变化的生理生长响应[J]. 西北植物学报,2017,37(5):923-932.
- [6] 张瑞,李永荣,彭方仁. 薄壳山核桃品种“马汉”的栽培适应性及其评价[J]. 经济林研究,2013,31(2):176-180.
- [7] 田景花,王红霞,高仪,等. 核桃属 4 树种展叶期抗寒性鉴定[J]. 园艺学报,2012,39(12):2439-2446.
- [8] 高英,董宁光,张志宏,等. 早实核桃雌花芽分化外部形态与内部结构关系的研究[J]. 林业科学研究,2010,23(2):241-245.
- [9] 宗建伟,杨雨华,杨凤岭,等. 4 个核桃品种光合特性的日变化[J]. 草业科学,2013,30(3):397-401.
- [10] 王博,种培芳,李毅,等. 2 种晚实核桃光合特性及产量变化[J]. 果树学报,2017,34(7):851-860.
- [11] 王华田. 林木耗水性研究述评[J]. 世界林业研究,2003,16(2):23-27.
- [12] 种培芳,苏世平,李毅. 4 个地理种群红砂的抗旱性综合评价[J]. 草业学报,2011,20(5):26-33.
- [13] 李娟,雷霞,王小利,等. 干旱胁迫对高羊茅航天诱变新品系生理特性的影响及综合评价[J]. 草业学报,2017,26(10):87-98.
- [14] Bakken T H, Killingtveit K, Engeland K, et al. Water consumption from hydropower plants: Review of published estimates and an assessment of the concept[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2013,17(10):3983-4000.
- [15] 胡红玲,张健,万雪琴,等. 巨桉与 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较[J]. 生态学报,2012,32(12):3873-3882.
- [16] 郭连生,刘亮. 9 种阔叶幼树的蒸腾速率、水势和环境因子关系的研究[J]. 生态学报,1992,12(1):47-52.
- [17] 吴俊文,刘珊,李吉跃,等. 干旱胁迫下广东石漠化地区造林树种光合和耗水特性[J]. 生态学报,2016,36(11):3429-3440.
- [18] 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.
- [19] 邱权,潘昕,李吉跃,等. 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率[J]. 生态学报,2014,34(6):1401-1410.
- [20] 李唯,毕玉蓉,刘伟,等. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2012:31-107.
- [21] 周平,李吉跃,招礼军. 北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5):50-55.
- [22] 黄颜梅,张健,罗承德. 树木抗旱性研究[J]. 四川农业大学学报,1997,15(1):52-57.
- [23] 姚庆群,谢贵水. 干旱胁迫下光合作用的气孔与非气孔限制[J]. 热带农业科学,2005,25(4):84-89.
- [24] 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.
- [25] 曹生奎,冯起,司建华,等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报,2009,29(7):3882-3892.
- [26] 林雯,何茜,苏艳,等. 干旱胁迫对欧洲云杉水分生理特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(6):69-77.