

林 兵,武胜利,葛欢欢,等. 灌溉量对不同林龄胡杨光合特性和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(3):125-132.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.022

灌溉量对不同林龄胡杨光合特性和水分利用效率的影响

林 兵,武胜利,葛欢欢,吕 婷,李京龙

(新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆乌鲁木齐 830054)

摘要:采用野外试验,研究了灌溉量对不同林龄胡杨光合特性和水分利用效率的影响。结果表明:(1)11年、15年和20年林龄胡杨全天净光合速率的均值在50 kg/(株·次)灌溉处理下最大。11年林龄胡杨的全天蒸腾速率值、气孔导度值和胞间CO₂浓度的均值均在45 kg/(株·次)灌溉处理下最大。15年和20年胡杨全天蒸腾速率值、气孔导度值和胞间CO₂浓度的均值在50 kg/(株·次)灌溉处理下最大。(2)随着灌溉量的增加,4种水分处理下的瞬时水分利用效率均值有一定的波动。(3)11年林龄胡杨全天光响应参数和CO₂响应参数的均值在45 kg/(株·次)灌溉量下达到最大,15年和20年林龄胡杨全天光响应参数和CO₂响应参数的均值在50 kg/(株·次)灌溉量下达到最大。综上所述,11年林龄胡杨生长适宜灌溉量为45 kg/(株·次),15年和20年林龄胡杨生长适宜灌溉量为50 kg/(株·次)。

关键词:灌溉;胡杨;光合特性;光响应参数

中图分类号: S727.2;S792.110.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)03-0125-08

胡杨别称梧桐、胡桐、并叶杨,是一种古老的树种。塔里木河流域的胡杨林规模大、跨度长,基本上沿着塔里木河的流向繁衍蔓延,成为塔里木河无处不在的象征。正如不少研究者所指出,塔克拉玛干大沙漠中的胡杨大都分布在各内陆河流的两岸,或沙漠内部湖泊的周围^[1]。塔里木盆地的胡杨林

凭借其高大群集的优势,长期与风沙灾害抗衡,阻挡了风沙侵袭,保护了盆地一些地区的生态平衡,保护了盆地边缘的块块绿洲。事实告诫我们,这里胡杨林的兴衰与盆地边缘绿洲的存亡息息相关。水是影响植物生长和生存最重要的因子,在干旱区植被生长对水的依赖性极大,尤其是塔里木河下游河道断流30年,加之气候干燥、降水量稀少,导致无任何地表径流。而干旱主要损伤植物的生理代谢和光合作用^[2-3],导致植物生长受阻。水分胁迫下光合效率显著降低,生长受抑^[4]。土壤水分是如何影响胡杨的生长与生理生态过程及其生理机制,已经成为当前迫切需要解决的问题。目前,国内外学者针对胡杨幼苗光合、水分与抗逆生理及生态适应

收稿日期:2020-08-19

资助项目:新疆维吾尔自治区林业厅科技支撑专项(编号:HY-2.3)。

作者简介:林 兵(1993—),男,江西新余人,硕士研究生,主要从事干旱区资源和环境研究。E-mail:1446523961@qq.com。

通信作者:武胜利,博士,教授,主要从事干旱区资源和环境研究。E-mail:wushengli77@126.com。

和品质的影响[J]. 分子植物育种,2019,17(24):8309-8314.

[11] 邓辉茗,龙聪颖,蔡仕珍,等. 不同水分胁迫对绵毛水苏幼苗形态和生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2018,38(6):1099-1108.

[12] He J, Li H, Luo J, et al. A transcriptomic network underlies microstructural and physiological responses to cadmium in *Populus × canescens*[J]. Plant Physiology, 2013, 162(1):424-439.

[13] He J, Qin J, Long L, et al. Net cadmium flux and accumulation reveal tissue-specific oxidative stress and detoxification in *Populus × canescens*[J]. Physiologia Plantarum, 2011, 143(1):50-63.

[14] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12):909-930.

[15] Asada K. Ascorbate peroxidase: a hydrogen peroxide scavenging

enzyme in plants[J]. Physiological Plant, 1992, 85(2):235-241.

[16] 杨宝铭,吕德国,秦嗣军,等. 淹水对“寒富”苹果保护酶系和根系活力的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(3):291-294.

[17] 彭克勤,夏石头,李阳生. 涝害对早中稻生理特性及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2001,27(3):173-176.

[18] 夏石头,彭克勤,曾 可. 水稻涝害生理及其与水稻生产的关系[J]. 植物生理学通讯,2000,36(6):581-588.

[19] 王 娟. 淹水对牡丹生理特性的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3341-3347.

[20] 陈玉明,史梦琪,张 琮,等. 耐淹砧木对猕猴桃枝叶生长及淹水胁迫的生理影响[J]. 湖北农业科学,2018,57(8):77-80,95.

机制等方面开展了广泛研究^[5-11]。而关于不同灌溉量对幼龄林胡杨光合生理的影响及光合生理参数与灌溉量的关系尚未见报道。本试验以塔里木河下游幼龄林胡杨为材料,采用人工控制试验灌溉胡杨,研究不同灌溉量下胡杨的光合特征及水分利用效率,探讨其光合特性对土壤水分梯度的响应规律,试图阐明胡杨适应干旱荒漠环境生长适宜的水分条件,以期对塔里木河下游荒漠区胡杨林的水分管理与种群恢复保护、更新复壮及改善日趋恶化的生态环境提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

塔里木河下游段系指从尉犁县的恰拉至若羌县的台特玛湖,位于新疆东南部的塔克拉玛干沙漠和库鲁克两大沙漠之间,是我国最干旱的一隅。本区属大陆性暖温带、极端干旱沙漠性气候,具有以下特点:降水稀少、蒸发强烈、温差大、多风沙和浮尘天气、日照时间长、光热资源丰富。自大西海子水库以下的 320 km 河道从 20 世纪 70 年代开始干涸断流,由于缺乏地表径流供给,地下水位大幅度下降,英苏以下地下水埋深大都下降到 8~12 m,致使主要依靠地下水维系生存的天然植被大面积衰败^[12]。胡杨林面积已由 20 世纪 50 年代的 5.3 亿 hm^2 减少到 20 世纪 90 年代的 0.67 亿 hm^2 ^[13-14],土壤盐渍化程度加剧,沙漠化土地面积迅速增长,生态环境十分脆弱。

1.2 试验设置

试验对象为塔里木河下游不同林龄(11 年、15 年、20 年)胡杨各 3 株(立地条件一致、生长良好、无病虫害侵染的植株),于 2018 年 6 月进行试验研究。样地位于塔里木河下游,每个处理的样地大小为 3 m × 3 m,每个处理 3 个重复。

6 月 11 日对样地进行水分处理,试验设计包括 4 个灌溉梯度,灌溉量分别为无灌溉量(W_0)、40 kg/(株·次)(W_1)、45 kg/(株·次)(W_2)和 50 kg/(株·次)(W_3)。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤含水量的测定 土壤含水量按照烘干法进行测定,每个试验样地分别取 3 个不同位置的土样,置于烘箱中 105 °C 下烘干 24 h,待冷却后称土样的干质量,计算土壤含水率。土壤含水率测定 3 次,测定时间分别为灌溉后 2、10、20 d。测定层次

为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层。

1.3.2 光合速率的测定 选择晴朗无云的天气,使用 Li-6400 便携式光合仪,进行光合日动态测试。时间为 08:00—20:00,根据研究区日出日落起止时间进行适当调整,间隔 2 h。测定指标包括光合生理参数净光合速率 [P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、蒸腾速率 [T_r , $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、胞间 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、气孔导度 [G_s , $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 以及环境因子参数相对湿度 (RH , %)、光合有效辐射 [PAR , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、气温 (T_a , °C)、大气 CO_2 浓度 (C_a , $\mu\text{mol}/\text{mol}$) 等生理指标。每个指标重复 3 次,每次读取 3 个测量数据,数据处理时取其平均值作为该时刻的实测值。

1.3.3 光响应曲线的测定 选择晴朗无云天气的 11:00—12:00,使用配置红蓝光源的 Li-6400 便携式光合仪,选用 Light-Curve Auto 程序设定,选取与光合特性日变化同一样株进行,流量设定为 500 $\mu\text{mol}/\text{s}$,通过 CO_2 注入系统将 CO_2 浓度保持在 500 $\mu\text{mol}/\text{s}$,光合有效辐射值 (PAR) 依次设定为 2 800、2 500、2 200、2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 共 16 个梯度,即从 2 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 至 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 逐渐递减的顺序测定光合-光响应曲线。采用非直角双曲线模型进行参数拟合分析。

非直角双曲线模型计算公式为

$$P_n = \frac{\alpha PAR + P_{\max} - \sqrt{(\alpha PAR + P_{\max})^2 - 4\theta\alpha PAR P_{\max}}}{2\theta} - R_d$$

式中: P_n 为净光合速率, PAR 为光合有效辐射, θ 为非直角双曲线的曲率, α 为初始量子效率, P_{\max} 为最大净光合速率, R_d 为暗呼吸速率。

1.3.4 CO_2 响应测定 从试验植株中选取 3 张生长健壮的成熟叶片并做好标记,使用配置红蓝光源的 Li-6400 便携式光合仪,选用 Light-Curve Auto 程序设定,选取与光合特性日变化相同的样株进行,流量设定为 500 $\mu\text{mol}/\text{s}$,在饱和光强 [1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 下测定 CO_2 响应过程。为了尽量减少外界光照波动所造成的影响,选择在完全晴朗天气的 09:00—11:30 测定,每张叶片重复 3 次,取平均值进行分析。测定时的大气温度为 25~27 °C,相对湿度为 (60 ± 4) %。光合测定仪的流速设定为 200 $\mu\text{mol}/\text{s}$,通过安装高压浓缩 CO_2 小钢瓶,控制调节叶室的 CO_2 浓度为 0~2 000 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。设

定浓度梯度为 400、300、200、100、50、400、400、600、800、1 000、1 200、1 600、1 800、2 000 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。每个 CO_2 浓度下控制测定时间为 180 s, 数据稳定后记录。仪器自动记录净光合速率、胞间 CO_2 浓度等光合生理参数。

1.3.5 瞬时水分利用效率的测定 瞬时水分利用效率 ($WUE, \mu\text{mol}/\text{mmol}$) 的计算公式为 $WUE = P_n/T_r$ 。

1.4 数据分析

试验采集的所有数据均采用 Microsoft Excel 2016、OriginPro 25 进行数据计算处理和绘图。

分别以 PAR 为横轴、 P_n 为纵轴, 绘制光合作用的光响应曲线 ($P_n - PAR$ 曲线)。由曲线计算光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP)、最大净光合速率 (P_{max}) 及表观量子效率 (AQY)。

分别以 C_i 为横轴、 P_n 为纵轴, 绘制光合作用的

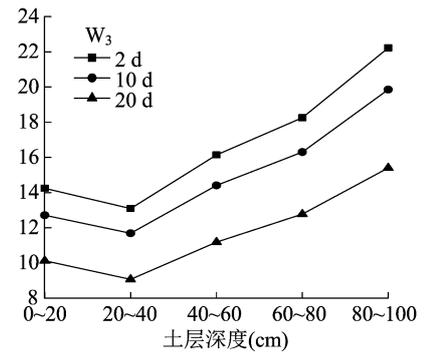
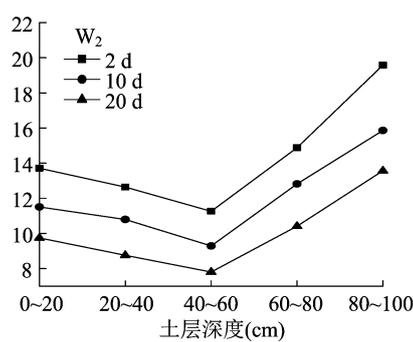
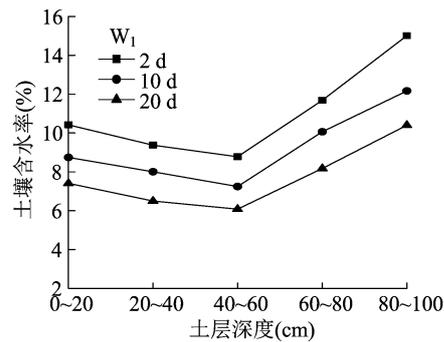


图1 灌溉量对胡杨样地土壤含水量的影响

2.2 灌溉量对胡杨光合特性的影响

2.2.1 净光合速率和蒸腾速率 从图 2 可以看出, 不同林龄的日净光合速率有明显差异。同一林龄的胡杨全天每一时段日净光合速率上也有差异。20 年林龄的胡杨整体日净光合速率高于其他林龄的胡杨。11 年林龄的胡杨整体日净光合速率低于其他林龄的胡杨。

W_0 处理下, 11 年林龄胡杨 P_n 变化呈现“单峰曲线”, 15 年和 20 年林龄的胡杨 P_n 日变化均呈现“双峰”曲线。其中 15 年、11 年树龄的胡杨均在 10:00 出现最大值。20 年树龄的胡杨在 08:00 出现最大值。

在 W_1 灌溉量下, 不同林龄胡杨叶片光合速率均比 W_0 高, 11 年、15 年、20 年林龄的胡杨分别高出 W_0 处理 8.7%、7.7%、5.1%。 W_2 灌溉量下, P_n 日变化均表现为明显的“双峰”曲线, 11 年、15 年、20 年林龄的胡杨分别高出 W_0 处理 6.89%、4.48%、4.77%。 W_3 灌溉量下, P_n 日变化表现为明显的“双

CO_2 响应曲线 ($P_n - C_i$ 曲线)。根据实测数据点的走势估计 CO_2 饱和点 (CSP, $\mu\text{mol}/\text{mol}$) 和 P_{max} [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], 同时利用传统的线性回归法求得羧化效率 [$CE, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 和光呼吸效率 [$R_p, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

2 结果与分析

2.1 灌溉量对样地土壤含水量的影响

从图 1 可以看出, 灌溉 2、10、20 d 后, 胡杨样地内的土壤含水量总体呈现 $W_3 > W_2 > W_1$, 且随着胡杨生长, 土壤含水量表现为减小的趋势; 在 0 ~ 40 cm 的土层内, 虽然灌溉增加了土壤含水量, 但是在 W_3 和 W_2 灌溉条件下的土壤含水量差异不大, 说明在 W_2 灌溉条件下不仅可以增加土壤含水量, 还能节约水资源。

峰”曲线。 W_3 灌溉量处理下的 P_n 全天值明显高于其他 3 个处理。11 年、15 年、20 年林龄的胡杨分别比 W_2 水分处理高 7.17%、13.04%、1.15%。说明灌溉量的多少对胡杨净光合速率的影响比较明显。同时也说明了 11 年林龄的胡杨比 20 年林龄的胡杨对水分的敏感度稍强。净光合速率日均值不同灌溉量下表现为 $W_3 > W_2 > W_1 > W_0$ 。不同林龄下表现为 20 年 > 15 年 > 11 年。

不同灌溉量下的胡杨蒸腾速率呈现“单峰”或“双峰”2 种规律: 不同灌溉量下胡杨蒸腾速率最大值不同, 出现的时间比较接近。观测期间 12:00 前蒸腾强烈, 高净光合速率的获得伴随着更多水分的散失。灌溉量的多少对不同林龄胡杨蒸腾速率的变化影响不同: 05:00—21:00 期间, 11 年林龄胡杨的蒸腾速率平均为 $W_2 > W_3 > W_1 > W_0$, 15 年林龄胡杨的蒸腾速率平均为 $W_3 > W_2 > W_1 > W_0$, 20 年林龄胡杨的蒸腾速率平均为 $W_3 > W_2 > W_1 > W_0$ 。05:00—21:00 期间平均下来, 11 年林龄胡杨的蒸腾

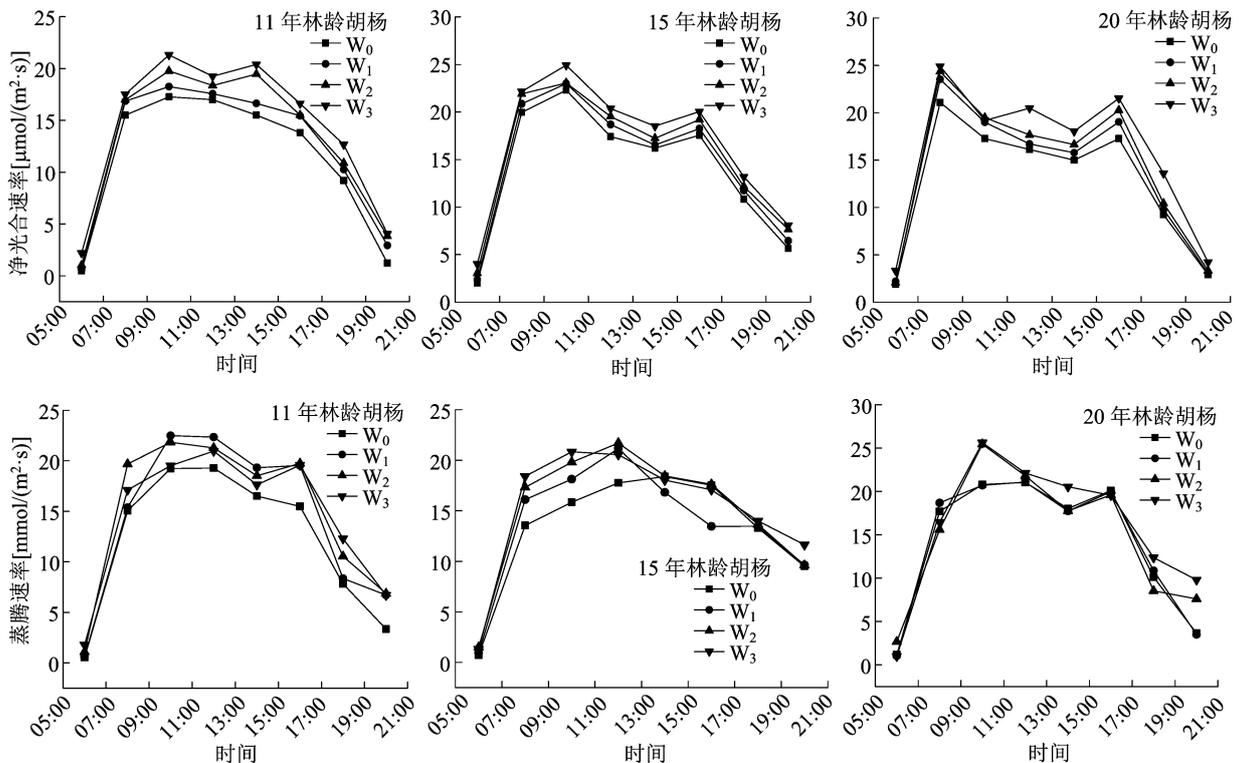


图2 灌溉量对胡杨净光合速率、蒸腾速率的影响

速率在 45 kg/(株·次)灌溉处理下最大,15 年和 20 年胡杨的蒸腾速率均在 50 kg/(株·次)灌溉处理下最大。

2.2.2 气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i) 由图 3 可知,灌溉前,在不同林龄胡杨生长阶段,15 年林龄的胡杨气孔导度值最高,全天平均为 0.46 mol/($m^2 \cdot s$)。各林龄胡杨的气孔导度值在全天不同时刻多数呈双峰曲线变化,11 年、15 年和 20 年胡杨一部分灌溉处理气孔导度的低谷值均出现在 12:00 附近。这种变化可能与大气温度有关,因为气孔导度值最低时,气温最高,大气温度是影响气孔导度关闭的主要原因。 W_1 灌溉处理下,不同林龄胡杨的气孔导度曲线变化趋势不相同,且均比灌溉前高;15 年林龄胡杨的气孔导度增加值最大(16.43%);20 年林龄胡杨的气孔导度变化波动大;11 年林龄胡杨的气孔导度变化趋势平缓。 W_2 灌溉处理下,不同林龄胡杨的气孔导度曲线均呈波动性变化;与 W_1 灌溉相比,11 年林龄胡杨的气孔导度值提高,15 年林龄胡杨的气孔导度值无明显变化,20 年林龄胡杨的气孔导度值变化微小。 W_3 灌溉处理下,不同林龄胡杨的气孔导度曲线变化趋势不同,呈波动性变化,15 年林龄胡杨的气孔导度值最大。同一林龄不同水分处理下,胡杨的气孔导度值变化

各不相同。05:00—21:00 平均,11 年林龄胡杨的气孔导度值在 45 kg/(株·次)灌溉处理下最大,15 年和 20 年胡杨的气孔导度值均在 50 kg/(株·次)灌溉处理下最大。

2.3 灌溉量对胡杨的瞬时水分利用效率影响

本试验通过测定 4 个灌溉量处理下的 11 年、15 年、20 年林龄的胡杨在水分胁迫期间的净光合速率和蒸腾速率,计算出胡杨的瞬时水分利用效率。由图 4 可知,同一林龄的胡杨在不同水分处理下的水分利用效率也是不同的,11 年林龄胡杨的水分利用效率在 W_3 灌溉处理下增幅最大;15 年林龄的胡杨在 W_2 灌溉处理下增幅最大;20 年林龄的胡杨水分利用效率值在 3 种水分处理下变化均不大。说明同一水分处理对不同林龄的胡杨水分利用效率不同。在不同灌溉量下,11 年林龄胡杨的水分利用效率在 18:00 时达到 1 个峰值(W_3 灌溉处理除外),原因是在此时段光合速率达到 1 个峰值而蒸腾速率没下降,因此水分利用效率出现 1 个峰值。15 年和 20 年林龄胡杨在 06:00 时均出现 1 个峰值,因为这时蒸腾速率较低,而光合速率却是持续上升,导致水分利用效率出现了峰值。总体而言,胡杨水分利用效率表现为 15 年林龄 > 20 年林龄 > 11 年林龄;灌溉量的多少与胡杨水分利用效率表现关系不明显。

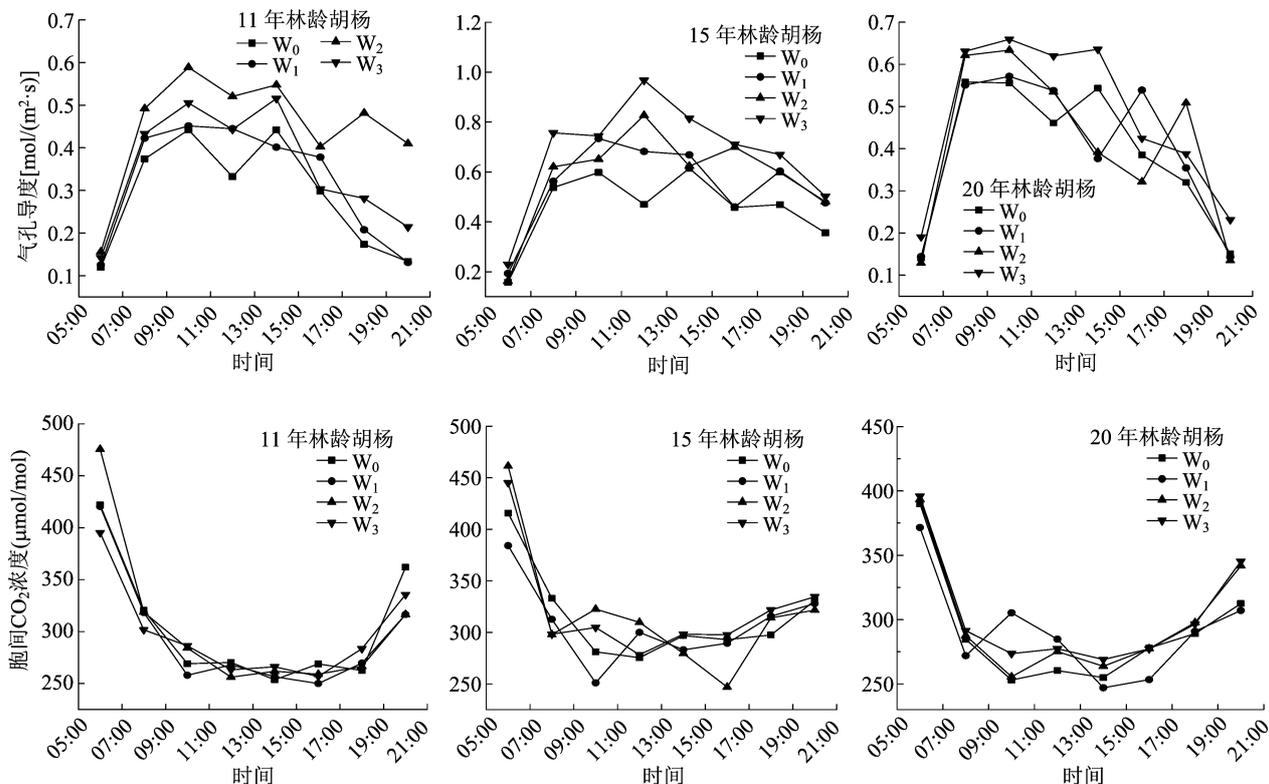
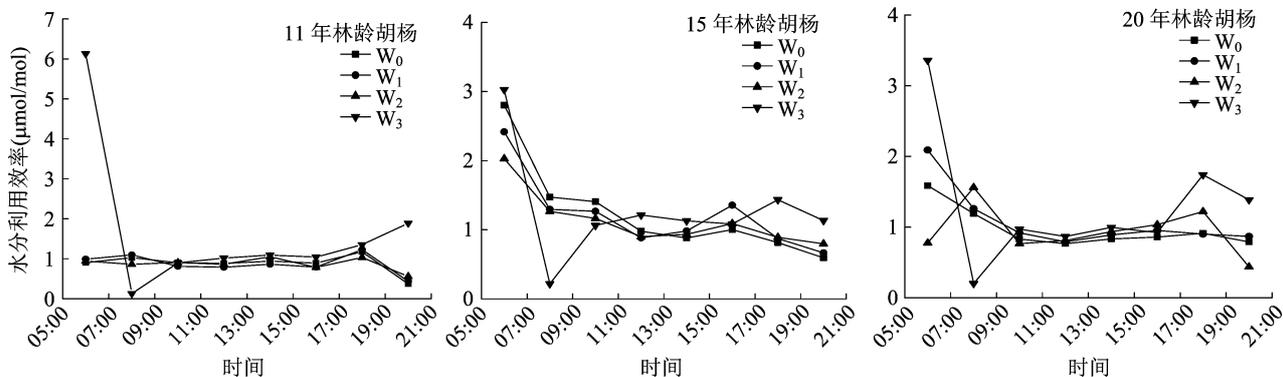
图3 灌溉量对胡杨气孔导度、胞间 CO₂ 浓度的影响

图4 灌溉量对胡杨的瞬时水分利用效率的影响

2.4 灌溉量对胡杨光合作用-光响应参数的影响

光合作用光响应拟合参数具有特定的生理学意义。其中,最大净光合速率可衡量叶片光合能力强弱的程度。表观量子效率(AQE)是在弱光阶段的光响应曲线的斜率,光合作用光能转化效率的指标之一,弱光阶段的曲线斜率越大,表明植物吸收和转换光能的色素蛋白复合体可能较多,利用弱光的能力强。而植物光饱和点表征了植物利用光的能力(值越大,代表利用强光能力越强),而光补偿点表征了植物利用弱光的能力(值越小,代表利用弱光的能力越强),两者差距范围越大,可认为植物适应性越强^[15]。通过利用非直角双曲线修正模型

拟合可以得出光饱和点和光补偿点。在不同灌溉量下不同林龄胡杨的光响应参数与灌溉前相比均有一定程度的增加或减少。由表1可知,11 年林龄胡杨的最大净光合速率在 W₂ 灌溉量下达到最大值,比灌溉前提高 44.00%。15 和 20 年林龄胡杨的最大净光合速率均在 W₃ 灌溉量下达到最大值,均比灌溉前提高 20.19% 和 29.60%。说明随着灌水量的增加,胡杨叶片的光利用能力增强。11 年林龄的胡杨光饱和点、光补偿点在 W₂ 灌溉量下达到最大,15 年和 20 年林龄的胡杨光饱和点、光补偿点均在 W₃ 灌溉量下达到最大,说明灌溉量的多少与胡杨光饱和点和光补偿点的变化关系明显。综上所述,11

表 1 不同灌溉量下林龄胡杨光合速率光响应曲线的特征参数

水分处理	林龄	最大净光合速率 [P_{max} , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	表观量子效率 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	光饱和点 [LSP, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	光补偿点 [LCP, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	暗呼吸速率 [R_d , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	决定系数 (r^2)
W ₀	11 年	21.41	0.04	642.94	36.39	1.28	0.999 6
	15 年	25.86	0.05	643.99	81.79	3.76	0.998 8
	20 年	28.01	0.06	693.81	75.44	3.42	0.982 5
W ₁	11 年	21.49	0.04	717.52	105.22	3.69	0.988 8
	15 年	27.31	0.05	655.34	60.5	1.67	0.999 5
	20 年	29.75	0.05	686.31	66.71	3.02	0.998 5
W ₂	11 年	30.83	0.03	1 150.20	105.20	3.10	0.996 5
	15 年	27.83	0.05	675.66	34.31	4.08	0.999 6
	20 年	32.98	0.05	796.39	67.86	3.26	0.999 8
W ₃	11 年	25.57	0.05	583.98	65.40	3.22	0.999 7
	15 年	31.08	0.05	724.64	85.2	2.83	0.999 9
	20 年	36.30	0.04	942.91	96.81	4.15	0.998 2

年林龄的胡杨的光响应参数在 45 kg/(株·次)灌溉量下达到最大,15 年和 20 年林龄胡杨在 50 kg/(株·次)灌溉量下达到最大。

2.5 灌溉量对胡杨光合作用对 CO₂ 响应参数的影响

利用直角双曲线修正模型拟合不同林龄胡杨光合作用对胞间 CO₂ 响应曲线并计算出相应的特征参数(图 5、表 2)。由图 5 可知,在不同灌溉量下不同林龄胡杨的光合能力均是逐渐增加的。11 年、15 年和 20 年林龄胡杨的饱和胞间 CO₂ 浓度、CO₂ 补偿点和光呼吸速率均在 W₂ 灌溉处理下最高。3 种林龄胡杨饱和胞间 CO₂ 浓度均值为 1 572.99 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。表明塔里木荒漠干旱环境下,幼龄林胡杨均能在较高的大气 CO₂ 浓度下维持较高的光合速率,保持较高的光合活性。当 C_i 低于 50 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时,3 个林龄不同灌溉量下的光合产物积累均为负值,表明胡杨属于典型的 C₃ 植物,这一结果与前人研究结果^[16]一致。综上所述,灌溉后的光响应参数均大于灌溉前的,且 11 年林龄胡杨的 CO₂ 响应参数在 45 kg/(株·次)灌溉量下达到最大,15 年和 20 年林龄胡杨的 CO₂ 响应参数在 50 kg/(株·次)灌溉量下达到最大。说明灌溉量多少对植物光合作用对胞间 CO₂ 浓度响应的影响较大。

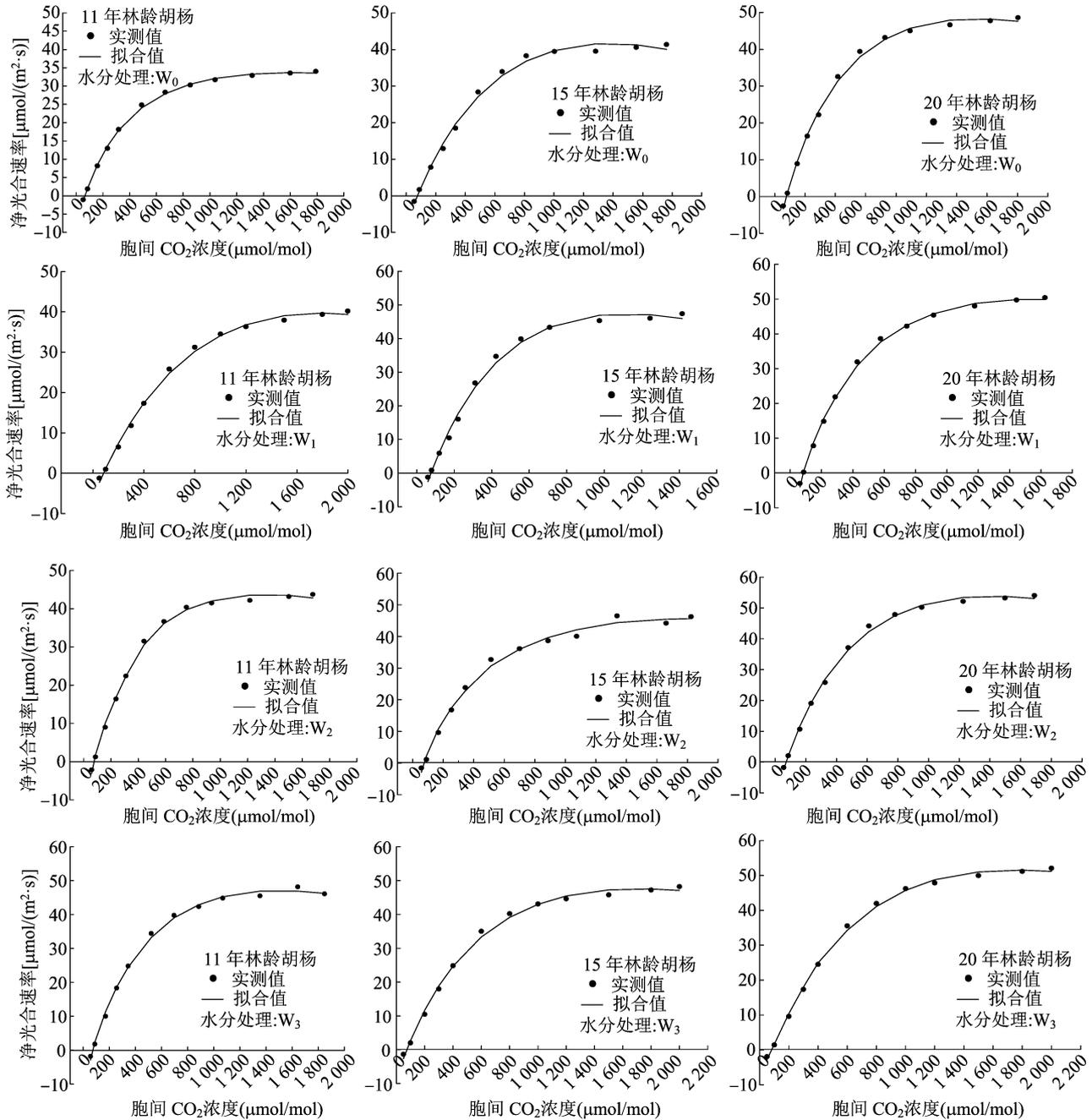
3 讨论与结论

从胡杨来说,目前学者们研究的胡杨一般以幼苗、1 年生、2 年生、3 年生居多。此外,针对灌溉定

额对胡杨光合特性的研究甚少。本研究通过野外试验研究了不同灌溉定额对幼龄林胡杨光合特性的影响,得出以下几个结论:从光合日变化情况看,灌溉后 3 个林龄胡杨的净光合速率均比灌溉前有所增加,这与徐颖等在研究水分对海棠净光合速率影响的结果^[17-19]一致。海棠复水后净光合速率均比干旱胁迫时显著提高。11 年林龄胡杨的蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度均在 W₂ 灌溉量下达到最大。15 年和 20 年林龄胡杨的蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度在 W₃ 灌溉量下达到最大。11 年林龄胡杨生长适宜灌溉量为 45 kg/(株·次),15 年和 20 年林龄胡杨生长适宜为 50 kg/(株·次)。

干旱胁迫下,植物水分利用效率越大,表明抗旱能力越大,因而对干旱胁迫的适应能力越强^[20-21]。从水分利用效率来看,在不同灌溉量处理下胡杨的光合水分利用效率从早晨的最低值逐渐上升到最大,后在下午又有所下降。随着灌水量的增加,4 个处理的水分利用效率均值有一定的波动。

11 年、15 年和 20 年林龄的胡杨随着灌溉量的增加,最大光合速率也随之增加。在光照强度低于 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下,光响应曲线的变化趋势呈直线上升,此时光强大小是光合作用的主要限制因素。当 PAR 达到 2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,增长速率逐渐缓慢,且不同林龄的胡杨的光响应趋势基本一致。这与梁娟等在研究不同土壤水分对七叶一枝花光和特性中的研究结果^[22]一致,植物在强光下都会受到不同程度的光抑制。11 年林龄的胡杨的光响应参数在 45 kg/(株·次)灌溉量下达到最大,15

图5 不同灌溉量对胡杨光合作用对胞间 CO_2 响应曲线的影响

年和20年林龄的胡杨在 $50 \text{ kg}/(\text{株} \cdot \text{次})$ 灌溉量下达到最大。

光合能力反映了植物叶片的光合电子传递和磷酸化的活性^[23],初始羧化效率反映了核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶的活性大小及含量多少^[24]。由表2可知,不同灌溉量的处理下20年林龄胡杨的光合能力和初始羧化效率均最高,说明20年林龄胡杨的光合电子传递和磷酸化活性、Rubisco活性及其对 CO_2 的同化能力与利用效率均高于其

他2种林龄。饱和胞间 CO_2 浓度反映了植物利用高 CO_2 浓度的能力; CO_2 补偿点反映植物光合作用与呼吸消耗相当时的 CO_2 浓度^[25]。由表2可知,3种林龄的胡杨在不同灌溉量的处理下饱和胞间 CO_2 浓度均有所增加,3个林龄胡杨饱和胞间 CO_2 浓度均值为 $1572.99 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。表明塔里木荒漠干旱环境下,幼龄林胡杨均能在较高的大气 CO_2 浓度下维持较高的光合速率、保持较高的光合活性。

表 2 不同灌溉量对胡杨光合作用对胞间 CO₂ 响应曲线参数估算(直角双曲线修正模型)

水分处理	林龄	初始羧化效率 [mol/(m ² ·s)]	光合能力 [μmol/(m ² ·s)]	饱和胞间 CO ₂ 浓度(μmol/mol)	CO ₂ 补偿点 (μmol/mol)	光呼吸速率 [μmol/(m ² ·s)]	决定系数 (R ²)
W ₀	11 年	0.078 4	39.68	1 785.59	82.77	6.09	0.997 2
	15 年	0.116 3	41.64	1 372.16	75.52	8.09	0.994 8
	20 年	0.201 9	48.27	1 327.36	77.84	13.64	0.997 6
W ₁	11 年	0.127 8	41.46	1 632.34	81.66	8.63	0.997 7
	15 年	0.194 7	47.39	1 709.35	74.07	8.67	0.994 6
	20 年	0.206 6	49.94	1 407.58	71.77	11.74	0.999 0
W ₂	11 年	0.115 9	45.65	1 833.48	112.08	12.35	0.997 7
	15 年	0.127 6	47.09	1 117.11	77.18	13.13	0.993 4
	20 年	0.181 9	51.53	1 427.59	85.03	14.95	0.998 3
W ₃	11 年	0.126 6	43.68	1 646.54	76.73	8.88	0.997 3
	15 年	0.128 1	47.59	2 044.80	76.24	8.84	0.996 6
	20 年	0.224 6	53.85	1 572.03	72.98	14.14	0.997 9

参考文献:

- [1] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 塔里木河下游胡杨生物量及其空间分布特征[J]. 西北植物学报, 2016, 36(11): 2314-2321.
- [2] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
- [3] Bai L P, Sui F G, Ge T D, et al. Effect of soil drought stress on leaf water status, membrane permeability and enzymatic antioxidant system of maize[J]. Pedosphere, 2006, 16(3): 326-332.
- [4] 裴 斌, 张光灿, 李志军, 等. 塔里木河上游胡杨与灰胡杨光合作用-光响应特性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(5): 30-35.
- [5] 黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等. 不同灌溉量对头状沙拐枣幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(12): 2500-2507.
- [6] 王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等. 土壤水分梯度对灰胡杨光合作用与抗逆性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 432-442.
- [7] 王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等. 胡杨异形叶光合作用对光强与 CO₂ 浓度的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1099-1109.
- [8] 美尔汗·黑扎特, 郝兴明. 塔里木河下游胡杨群落 CO₂ 通量特征与水分利用效率[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2048-2055.
- [9] 周朝彬, 宋于洋, 王炳举. 干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 5-9.
- [10] 司建华, 冯 起, 张小由. 极端干旱区胡杨水势及影响因素研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 505-510.
- [11] 常宗强, 冯 起, 苏永红, 等. 额济纳绿洲胡杨的光合特征及其对光强和 CO₂ 浓度的响应[J]. 干旱区地理, 2006, 29(4): 496-502.
- [12] 陈亚宁, 崔旺成, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 215-177.
- [13] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水埋深对植被的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 542-549.
- [14] 宋郁东, 樊自立, 雷治栋, 等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000.
- [15] 王振锡, 潘存德, 石鑫鑫. 胡杨年轮记录的塔里木河下游 54 年来区域水环境历史变迁[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 637-645.
- [16] Walker B, Steffen W. An overview of the implication of global change for natural and managed terrestrial ecosystem [J]. Conservation Ecology, 1997(1): 2-20.
- [17] 徐 颖, 张瑞雪, 曹 辉, 等. 干旱复水对海棠叶片光合蒸腾及水分利用效率的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(4): 514-524.
- [18] 钟小莉, 马晓东, 吕豪豪, 等. 干旱胁迫下氮素对胡杨幼苗生长及光合的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2777-2786.
- [19] 王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等. 胡杨异形叶光合系统 II 叶绿素荧光特性[J]. 西北植物学报, 2019, 39(10): 1795-1804.
- [20] 王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等. 干旱胁迫下胡杨光合响应过程模拟与模型比较[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2315-2324.
- [21] 王 勇, 赵成义, 王丹丹, 等. 塔里木河流域不同林龄胡杨与柽柳的水分利用策略研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 157-163.
- [22] 梁 娟, 郭泽宇, 叶 漪. 不同土壤水分条件对七叶一枝花光合特性及有效成分皂苷含量的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(1): 56-60.
- [23] Coste S, Roggy J C, Imbert P, et al. Leaf photosynthetic traits of 14 tropical rain forest species in relation to leaf nitrogen concentration and shade tolerance [J]. Tree Physiology, 2005, 25(9): 1127-1137.
- [24] 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727-740.
- [25] 张彦敏, 周广胜. 植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5907-5917.