

# 乌兰布和沙漠东北缘小胡杨叶功能性状特征

黄雅茹<sup>1,2,3,4</sup>, 马迎宾<sup>1,3</sup>, 张景波<sup>1,2,4\*</sup>, 赵英铭<sup>1,3</sup>, 郝需婷<sup>1,2</sup>, 韩春霞<sup>1,2</sup>,  
菅凯敏<sup>5</sup>, 马海峰<sup>6</sup>

1. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 磴口 015200
2. 国家林业和草原局防沙治沙工程技术研究中心, 磴口 015200
3. 乌兰布和沙漠综合治理国家长期科研基地, 磴口 015200
4. 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 磴口 015200
5. 巴彦淖尔市林业和草原事业发展中心, 巴彦淖尔 015000
6. 巴彦淖尔市沙漠综合治理中心, 巴彦淖尔 015000

**摘要** 通过研究不同栽植年限幼龄小胡杨的叶片性状, 筛选出适合评价不同林龄适应性的指标。结果表明, 小胡杨的叶形以披针形和卵形为主。小胡杨的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度均随林龄的增加而增大, 且不同林龄之间的差异显著( $P < 0.05$ )。小胡杨各项叶片性状之间均具有极显著的相关性( $P < 0.01$ )。净光合速率、气孔导度可以作为评价不同林龄小胡杨叶性状的主要因子, 评价结果的可靠性随林龄增加而增加。

**关键词** 小胡杨; 叶性状; 光合特征; 乌兰布和沙漠

在全球气候变化背景下, 植物对环境变化的响应和适应策略成为了生态学研究热点问题之一<sup>[1]</sup>。叶片功能性状可以反映植物对环境气候变化的适应策略, 包括叶片结构型性状(比叶面积、叶面

积、叶干物质含量等)和叶片生理性状(光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率等), 是植物生长发育需求对环境变化适应的结果<sup>[2-3]</sup>。比叶面积和叶干物质含量反映植物获取环境资源的能力, 叶

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-09-26

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2021ZY0058); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2021MA005); 国家自然科学基金项目(32001374); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2023QN03008)

作者简介: 黄雅茹, 工程师, 研究方向为荒漠化防治, 电子信箱: hu\_angyaru@126.com; 张景波(通信作者), 高级工程师, 研究方向为荒漠化防治, 电子信箱: nmzhangjb@126.com

引用格式: 黄雅茹, 马迎宾, 张景波, 等. 乌兰布和沙漠东北缘小胡杨叶功能性状特征[J]. 科技导报, 2023, 41(18): 92-100; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.18.012

面积决定植物吸收太阳辐射的能力,均与植物光合作用的效率相关。光合特性反映植物的碳同化能力<sup>[4]</sup>。净光合速率、气孔导度和蒸腾速率是叶片光合特性的主要体现,综合反映植物物质生产、水分消耗及生长发育的关系<sup>[5-9]</sup>。研究表明叶结构性状直接影响生理性状<sup>[10-12]</sup>,光合特性对植物个体的生存和发育极其重要<sup>[13-14]</sup>。前人对植物叶生理性状(光合蒸腾速率)及环境因子之间的关联性进行了研究,表明光合蒸腾速率日变化呈先增加后降低的趋势,提高了水分利用效率,使植物能够安全地度过极其炎热干燥的夏季<sup>[15-16]</sup>。植物生理生态功能可以通过叶面积、叶干重、比叶面积的可塑性(形态和结构)进行调控,进而对植物的光合能力、营养物质的吸收能力产生一定的影响<sup>[17-20]</sup>。

乌兰布和沙漠东北缘绿洲防护林是河套灌区防风固沙的重要屏障,其中新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis* Bge.)、旱柳和毛白杨(*Populus tomentosa*)等是农田防护林的主要造林树种,目前防护林体系中的部分乔木林有一定衰退趋势,因此在防护林的更新过程中选择合适的树种增加林分多样性至关重要<sup>[21]</sup>,小胡杨为该区域防护林树种提供了更多选择。小胡杨(*Populus simonii* × *P. euphratica*)是胡杨(*Populus euphratica*)和小叶杨(*Populus simonii*)有性杂交选育出的优良品种,生长迅速且易繁殖,具有耐盐碱性,具备双亲融合性状<sup>[22]</sup>。目前,有关小胡杨的研究主要集中在硬枝扦插技术、育种、引种、无菌培养及幼苗抗旱性<sup>[22-24]</sup>等方面,本研究以乌兰布和沙漠东北缘农田防护林内不同林龄的幼龄小胡杨为对象,测定其光合生理特性和叶片发育的结构性状,分析不同林龄小胡杨的叶片性状特征,阐明不同栽植年限间的差异及影响因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北缘,地理坐标为N39°40'~41°00',E106°00'~107°20',属中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第一实验场灌溉绿洲范围。该区域气候干燥,降水少,多年平均降水量140.3 mm,蒸发量2000 mm,是典型的中温带半干旱大陆性气候。年日照时长3229.9 h。常年年均气温6.8℃,昼夜温差大,风沙季从11月至翌年5月,西北风和西风是主风向。土壤类型主要以风沙土为主。绿洲农田防护林体系主要乔木树种是新疆杨等<sup>[25]</sup>,防风固沙灌木林树种主要为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等,绿洲外围天然植被主要是唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)沙包和油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛等。

### 1.2 试验材料

以乌兰布和沙漠东北部绿洲内当年栽植(1 a)、栽植第2年(2 a)和栽植第3年(3 a)的小胡杨为研究对象,1 a和3 a小胡杨为2行1带,2 a小胡杨3行1带,南北走向,株行距均为2 m×1.5 m(图1)。小胡杨树苗为3年生的扦插苗,栽植时树高2.5 m,胸径3~4 cm。小胡杨林地土壤含水量一般在7%~10%之间,土壤为改良土壤,施有机粪肥,立地条件一致。小胡杨生长现状如表1所示。

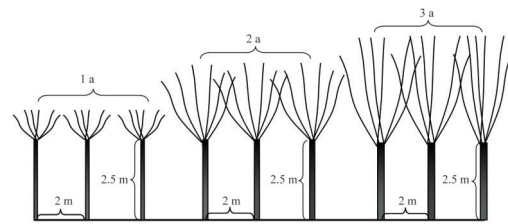


图1 不同栽植年限小胡杨特征

表1 不同栽植年限小胡杨生长指标

林龄	株高/m	胸径/cm	冠幅/cm	
			东西	南北
1 a	3.65±0.46 C	4.22±0.37 C	171.40±24.47 B	170.00±17.59 C
2 a	5.21±0.44 B	6.19±0.70 B	247.52±41.67 A	253.48±30.12 B
3 a	6.54±0.78 A	7.07±0.61 A	250.54±25.96 A	270.92±27.61 A

注:数值为平均值±标准差,同列不同大写字母表示不同栽植年限间差异显著( $P<0.05$ )。

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 叶片性状测定

选择1 a、2 a和3 a小胡杨各5株,分上、中、下3层采集小胡杨叶片,每株采集30片。采用CI-202型叶面积仪测定叶面积(LA)、叶长宽比(R)。叶片吸水至饱和称重,为饱和鲜重( $m_1$ ),采用烘箱80℃下烘干48 h,其重量为叶干重( $m_2$ )。比叶面积(SLA)采用式(1)计算,叶干物质含量(LDMC)采用式(2)算。

$$SLA = \frac{\text{叶面积}(LA)}{\text{叶干重}(m_2)} \quad (1)$$

$$LDMC = \frac{\text{叶干重}(m_2)}{\text{叶饱和鲜重}(m_1)} \quad (2)$$

#### 1.3.2 叶片气体交换参数

1 a、2 a、3 a小胡杨各选择3株标准株,在每株冠层阳面各选择6片叶片。选择晴朗无云的天气,利用Li-6400xt便携式光合仪(USA),测定不同栽植年限的小胡杨叶片气体交换参数:净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )。光合有效辐射、空气温度均在14:00达到最大值,日均值分别为1034.56  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和34.35℃。空气相对湿度早晨和傍晚较高,日均值为32.46%(图2)。

#### 1.4 数据处理

数据整理使用Excel 2016,采用SPSS 17.0进行数据分析,采用Origin 8.5软件进行绘图。

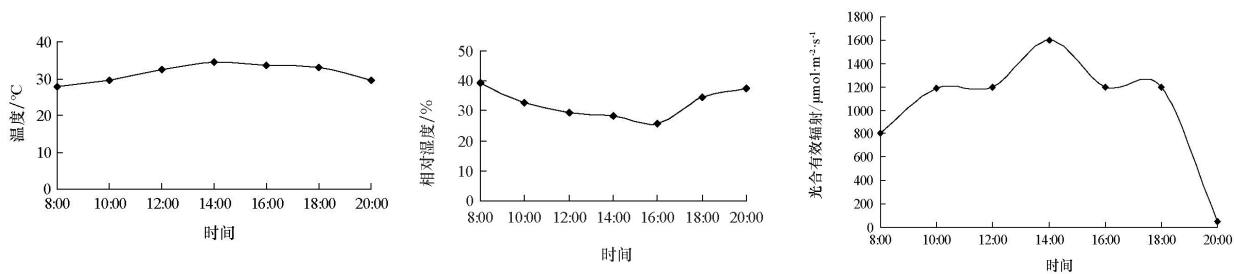


图2 主要气象因子日变化特征

## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽植年限幼龄小胡杨叶片性状特征

小胡杨叶性状随着林龄而变化(表2),叶面积和叶干重随栽植年限增加而增大,各年限之间差异均显著( $P<0.05$ )。小胡杨叶面积和叶干重的变异系数较大( $>30\%$ ),离散程度较高。1 a小胡杨的比叶面积和叶干物质含量显著低于2 a和3 a( $P<0.05$ ),2 a和3 a差异不显著( $P>0.05$ )。1 a小胡杨比叶面积和叶干物质含量的变异系数均高于2 a和3 a;叶干物质含量的变异系数较小( $<12.67\%$ ),表明其离散程度较小,是一种相对更稳定的叶性状表达指标。小胡杨的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度均随林龄的增加而增大,且不同

林龄之间差异显著( $P<0.05$ )。1 a、2 a、3 a净光合速率分别为( $10.33\pm 0.45$ )  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、( $12.48\pm 0.44$ )  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和( $13.52\pm 0.44$ )  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;3 a和2 a小胡杨干物质合成量显著高于1 a。

不同栽植年限小胡杨的叶长宽比之间的差异不显著( $P>0.05$ ),但是其变异系数随栽植年限的增加呈减小的趋势。对小胡杨的叶长宽比进行相对频率统计(图3),其值均在0.5~5.0范围内,根据叶形划分,小胡杨的叶形有条形(叶长/叶宽 $\geq 4$ )、披针形( $2\leq$ 叶长/叶宽 $<4$ )、卵形( $1<$ 叶长/叶宽 $\leq 2$ )和阔卵形(叶长/叶宽 $\leq 1$ ),其中以披针形和卵形为主。2 a和3 a小胡杨的叶长宽比相对频率的高斯模型曲线较窄,1 a小胡杨相对平缓,表明2 a叶长宽比(1.5~3.5)和3 a叶长宽比(1.5~3.0)相对集中。

表2 不同栽植年限小胡杨叶性状变化

林龄	叶性状				
	叶长宽比	叶面积/cm <sup>2</sup>	叶干重/g	比叶面积/(cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	叶干物质含量/(mg·g <sup>-1</sup> )
1 a	2.33±0.07 A	5.31±0.25 A	0.07±0.003 A	77.77±2.14 A	329.77±3.57 A
变异系数/%	33.72	55.25	49.33	32.24	12.67
2 a	2.39±0.06 A	12.81±0.38 B	0.13±0.004B	97.20±1.12 B	345.15±2.52 B
变异系数/%	28.93	35.11	37.18	13.61	8.61
3 a	2.31±0.05 A	14.07±0.43 C	0.15±0.004 C	96.39±1.19 B	347.77±2.57 B
变异系数/%	22.98	35.56	34.35	14.55	8.66

林龄	净光合速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	气孔导度/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	胞间CO <sub>2</sub> 浓度/( $\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
1 a	10.33±0.45 A	3.11±0.13 A	0.16±0.01 A	249.47±3.93 A
变异系数/%	79.11	74.66	95.87	28.85
2 a	12.48±0.44 B	4.48±0.12 B	0.22±0.01 B	266.35±2.46 B
变异系数/%	62.31	49.05	66.9	16.4
3 a	13.52±0.44 B	5.11±0.14 C	0.26±0.01 C	281.55±1.98 C
变异系数/%	59.92	51.4	62.07	12.88

注:数值为平均值±标准差,同列不同大写字母表示不同栽植年限间差异显著( $P<0.05$ )。

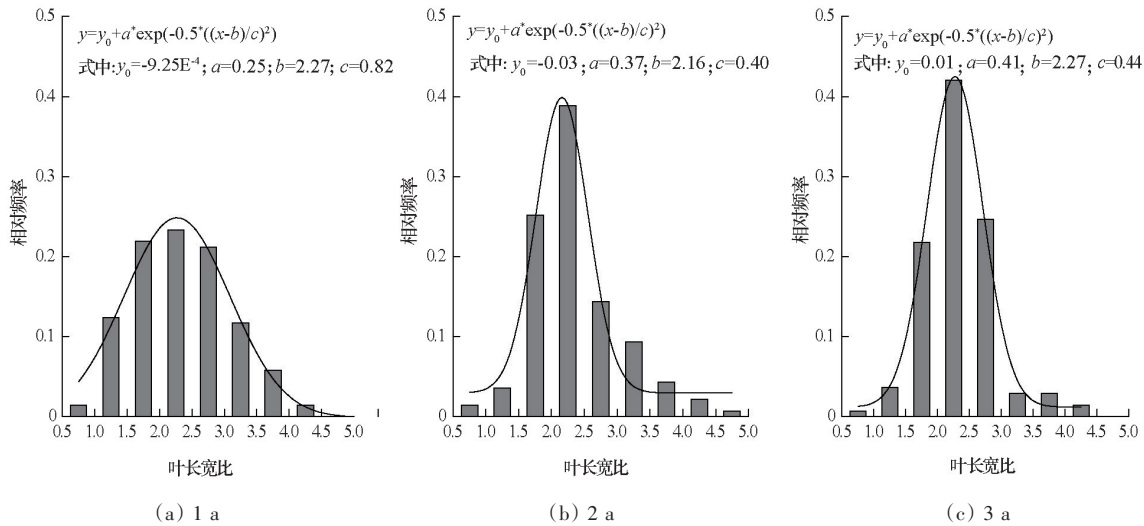


图3 叶长宽比的相对频率分布

### 2.2 小胡杨净光合速率与叶片性状的相关性

将小胡杨的净光和速率与其他叶性状和光合特性做相关分析(表3),结果显示小胡杨的净光合速率与叶干重、叶面积、叶干物质含量、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度、蒸腾速率均具有极显著的正相关关系( $P<0.01$ ),与比叶面积呈极显著的负相关关系( $P<0.01$ ),各项叶片性状相互之间均具有极显著的相

关性( $P<0.01$ )。

### 2.3 不同栽植年限幼龄小胡杨叶片性状评价

对小胡杨各叶性状指标进行主成分分析,从方差解释表(表4)可看出,9个公共因子中的前3个特征值较大(>1),3个公共因子对样本方差的贡献和为72.199%,因此选取3个公共因子进行主成分分析,分别为F1、F2和F3。

表3 小胡杨净光合速率与叶片性状的相关系数

	净光合速率	叶面积	叶干重	比叶面积	叶干物质含量	蒸腾速率	气孔导度	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度
净光合速率	1.000	—	—	—	—	—	—	—
叶面积	0.770**	1.000	—	—	—	—	—	—
叶干重	0.694**	0.931**	1.000	—	—	—	—	—
比叶面积	-0.741**	-0.898**	-0.848**	1.000	—	—	—	—
叶干物质含量	0.677**	0.897**	0.898**	-0.784**	1.000	—	—	—
蒸腾速率	0.841**	0.848**	0.759**	-0.830**	0.721**	1.000	—	—
气孔导度	0.613**	0.868**	0.778**	-0.778**	0.737**	0.754**	1.000	—
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度	0.561**	0.885**	0.864**	-0.791**	0.807**	0.623**	0.860**	1.000

注: \*\*表示在0.01水平(双侧)上显著相关。\*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

表4 总方差解释变异量

主成分	初始特征值			平方载荷的提取和		
	总和	方差比率/%	累计方差比率/%	总和	方差比率/%	累计方差比率/%
1	3.912	43.465	43.465	3.912	43.465	43.465
2	1.365	15.162	58.627	1.365	15.162	58.627
3	1.222	13.572	72.199	1.222	13.572	72.199
4	0.966	10.733	82.932	—	—	—
5	0.524	5.827	88.759	—	—	—
6	0.456	5.065	93.824	—	—	—
7	0.427	4.744	98.568	—	—	—
8	0.116	1.284	99.852	—	—	—
9	0.013	0.148	100.000	—	—	—

由旋转后的因子载荷矩阵(表5)可以看出,公共因子  $F_1$  在  $X_1$ (净光合速率)、 $X_2$ (气孔导度)、 $X_3$ (胞间 CO<sub>2</sub> 浓度)、 $X_4$ (蒸腾速率)和  $X_9$ (叶干物质含量)上的载荷值较大,反映了叶片物质合成能力的

大小;公共因子  $F_2$  在  $X_6$ (叶面积)和  $X_7$ (叶干重)上的载荷较大,反映了叶片大小;公共因子  $F_3$  在  $X_5$ (叶长宽比)和  $X_8$ (比叶面积)上的载荷较大,主要反映叶形态。

表5 旋转后的因子载荷矩阵

公共因子	净光合速率 $X_1$	气孔导度 $X_2$	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 $X_3$	蒸腾速率 $X_4$	叶长宽比 $X_5$	叶面积 $X_6$	叶干重 $X_7$	比叶面积 $X_8$	叶干物质 含量 $X_9$
$F_1$	0.584	0.851	0.771	0.787	-0.012	0.196	0.206	0.031	0.488
$F_2$	0.557	0.225	0.321	0.301	-0.280	0.946	0.918	0.364	-0.133
$F_3$	0.090	0.106	0.016	0.083	0.809	0.127	-0.120	0.795	-0.180

因子得分结果表明(表6),2 a 和 3 a 小胡杨在  $F_1$  上得分较高,表明 2 a 和 3 a 小胡杨的干物质合成能力均较高,光合生理特性可作为评价小胡杨叶性状的主要指标;3 个林龄在  $F_2$  上得分均较小,表明叶面积和叶干重不适宜作为不同林龄小胡杨主要的叶性状来进行评价;3 a 小胡杨在  $F_3$  上的得分

最高,表明叶长宽比和比叶面积可作为主要叶性状对其进行评价;综合得分及排名表明,随着林龄的增加,适宜采用光合生理特性、叶干物质含量、比叶面积等作为主要指标评价叶性状特征,且评价其叶性状的结果越可靠。

表6 不同林龄小胡杨在各公因子上的得分

林龄	F1	F2	F3	F
1 a	-1.315	-0.314	-1.306	-1.103
2 a	0.909	-0.259	0.174	0.526
3 a	1.317	-0.276	0.587	0.845

注: F1、F2和 F3是公共因子, F为综合因子。

### 3 讨论

不同栽植年限的小胡杨叶形以披针形为主, 和其父本胡杨的叶形的变化一致, 叶形在栽植2~3 a后逐渐趋于稳定, 且4种叶形能够在同一植株上分布<sup>[26]</sup>。小胡杨叶面积和叶干重随着栽植年限的增加呈增大的趋势, 变异系数较大; 2 a和3 a小胡杨的比叶面积、叶干物质含量差异不显著, 叶干物质含量变异系数最小, 与吕中跃等<sup>[27]</sup>研究黑木相思(*Acacia melanoxylon*)的叶片性状结果一致; 何斌等<sup>[28]</sup>研究发现, 不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)群落叶性状中变异系数较小的也是叶干物质含量, 因此叶干物质含量是更稳定的叶片性状。随着栽植年限的增加, 小胡杨的净光合速率等光合参数均增大, 高龄小叶杨(小胡杨母本)和尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)的净光合速率等随林龄的增加呈下降的趋势<sup>[29-30]</sup>, 但一些温带落叶树种的光合速率不随树龄发生变化<sup>[31]</sup>; 表明树种差异、树龄大小及环境条件变化均会影响光合生理特性, 因此处于同一环境下的不同栽植年限小胡杨的净光合速率差异主要受栽植年限的影响。

随着生境条件变化, 植物功能性状间的关系会体现植物的投资收益抉择, 各个性状间会表现出此升彼降的态势, 即性状间出现权衡现象<sup>[32]</sup>。大量对植物功能性状间相关性的研究发现, 不仅2个性状间存在相关性, 多个性状间也存在一定关联, 且性状并不是单独对生境变化做出响应, 各性状间会相互权衡、改变、影响, 最终形成最适合生境情况的性状组合<sup>[33]</sup>。小胡杨的净光合速率与其他气体交换参数及除叶长宽比以外的叶性状具有极显著的正相关性。其内涵分别为: 小胡杨比叶面积随林龄增

大, 叶片干物质构建叶片保卫结构等的比例下降<sup>[34-35]</sup>, 以此减少水分运输阻力, 增加叶面积, 增加光捕获面积, 进而获得更高的净光合速率<sup>[36]</sup>; 小胡杨的叶干物质含量随林龄增加, 表明其资源获取能力增强, 固持碳氮效率增加<sup>[27]</sup>; 小胡杨林带水分条件较好, 随林龄增加, 其气孔导度增大, 以致光合能力增强<sup>[37]</sup>; 林龄较大的小胡杨蒸腾速率保持较高的水平, 表明其增加了水分消耗, 具有更高的干物质合成能力<sup>[38]</sup>。以上结果表明, 这些叶性状指标是影响小胡杨光合作用的主要因子。

不同栽植年限小胡杨的叶性状特征体现了其对生境具有更好的适应性, 有助于小胡杨在各林龄段充分利用环境资源, 提高生态系统稳定性<sup>[38-39]</sup>。主成分分析表明, 光合参数、叶干物质含量、叶长宽比和比叶面积可作为评价不同栽植年限小胡杨叶性状变异性的主要指标。陈超君等<sup>[40]</sup>对广西石韦(*Pyrrosia lingua*)叶片性状进行分析表明, 叶片长、叶片周长、叶片面积、叶片干重等可作为主要指标; 莫燕华等<sup>[41]</sup>研究桂林岩溶石山櫟木(*Loropetalum chinense*)群落老龄林的25种主要植物的叶性状, 发现叶干质量(DW)、叶干物质含量、叶组织密度(LTD)是体现该区乔木适应生境的重要指标, 比叶面积、叶组织密度则是反映灌木适应生境的指标。研究结论不尽一致, 可能与树种、树龄及不同外界气候环境条件的差异等有关。小胡杨的叶性状变异性体现了其在干旱区适应性有独到的生存策略, 各林龄的小胡杨都具有较强的干物质积累能力, 随着生长发育的进行, 叶面积较大的叶片比例增加, 蒸腾作用增强, 干物质合成量增大, 与其父本胡杨叶片特性一致<sup>[42]</sup>, 表明小胡杨定植后3 a趋向“快速投资-收益型”策略。在育种和选择中, 杂交的主要目标是将不同品种的有利性状结合起来, 并获得杂种优势, 且生长性状与大多数叶片性状密切相关<sup>[43]</sup>。小胡杨作为杂交选育的品种, 叶片形态性状受强遗传控制, 因此叶片形态性状也可作为早期指标提高选择效率, 可为设计新的亲代和后代选择策略提供理论依据<sup>[44]</sup>, 因子分析结果显示, 小胡杨定植3 a更适宜利用叶性状评价其适应性。

## 4 结论

不同栽植年限小胡杨的叶性状之间存在变异性,其中叶干物质含量变异系数最小,是最稳定的叶片性状。小胡杨各项叶片性状相互之间均具有极显著的相关性( $P < 0.01$ )。净光合速率、气孔导度可作为主要指标评价不同栽植年限小胡杨的叶性状特征,且小胡杨定植3 a后更适宜评价叶性状,这为评价低龄小胡杨的适应性及其生存策略提供理论基础。

### 参考文献(References)

- [1] Cho L, Wang X P, Wu X, et al. Relative effects of phylogeny, biological characters and environments on leaf traits in shrub biomes across central Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 3(6): 220–231.
- [2] 王常顺, 汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 206–216.
- [3] 靳莎, 闫淑君, 黄柳菁, 等. 植物叶功能性状间的权衡研究进展[J]. *四川林业科技*, 2019, 40(5): 96–103.
- [4] Wright I J, Westoby M, Reich P B. Convergence towards higher leaf mass per area in dry and nutrient-poor habitats has different consequences for leaf life span[J]. *Journal of Ecology*, 2002, 90(3): 534–543.
- [5] 鲍婧婷, 王进, 苏洁琼. 不同林龄柠条(*Caragana korshinskii*)的光合特性和水分利用特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 199–205.
- [6] Jin B, Wang L, Wang J, et al. The effect of experimental warming on leaf functional traits, leaf structure and leaf biochemistry in *Arabidopsis thaliana*[J]. *BMC Plant Biology*, 2011, 11(1): 35–42.
- [7] Fang X, Li Y, Nie J, et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.)[J]. *Field Crops Research*, 2018, 219: 160–168.
- [8] 包永志, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙地混生小叶锦鸡儿和人工杨树光合特性及其对气候的响应[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 420–429.
- [9] Joshi S C, Chandra S, Palni L M S. Differences in photosynthetic characteristics and accumulation of osmoprotectants in saplings of evergreen plants grown inside and outside a glasshouse during the winter season[J]. *Photosynthetic*, 2007, 45(4): 594–600.
- [10] Li X L, Hou X Y, Wu X H, et al. Plastic responses of stem and leaf functional traits in *Leymus chinensis* to long-term grazing in a meadow steppe[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(5): 440–451.
- [11] 赵夏纬, 王一峰, 马文梅. 高寒草地不同坡向披针叶黄华蒸腾速率与叶性状的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2494–2500.
- [12] Barbosa M, Chitwood D H, Azevedo A A, et al. Bundle sheath extensions affect leaf structural and physiological plasticity in response to irradiance[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42(5): 1575–1589.
- [13] Pierangelini M, Stojkovic S, Orr P T, et al. Photosynthetic characteristics of two *Cylindrospermopsis raciborskii* strains differing in their toxicity[J]. *Journal of Phycology*, 2014, 50(2): 292–302.
- [14] Jing Z, Chengzhang Z, Xueping L I, et al. The relationship between the net photosynthetic rate and leaf area and thickness of *Phragmites australis* in the grass lake wetlands of Jiayuguan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6084–6091.
- [15] 文军, 赵成章, 李群, 等. 黑河中游湿地胡杨蒸腾速率与叶性状的关联性分析[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 429–437.
- [16] 罗欢, 司建华, 赵春彦, 等. 荒漠河岸林胡杨光合参数变化特征及影响因子研究[J]. *高原气象*, 2020, 39(2): 393–401.
- [17] 陆晓民, 孙锦, 郭世荣, 等. 低氧胁迫下24-表油菜素内酯对黄瓜幼苗叶片光合特性及多胺含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 140–146.
- [18] 郭雯, 徐瑞晶, 漆良华, 等. 竹类植物光合特性与叶片功能性状研究[J]. *世界林业研究*, 2018, 31(4): 29–35.
- [19] Knight C A, Ackerly D D. Evolution and plasticity of photosynthetic thermal tolerance, specific leaf area and leaf size: Congeneric species from desert and coastal environments[J]. *New Phytologist*, 2003, 160(2): 337–347.
- [20] Li L, Feng S D, Wang J B, et al. Relationship between photosynthetic characteristics and leaf functional traits of 12 plant species of marshes in Sanjiang plain[J]. *Wetland Science*, 2010, 8(3): 225–232.
- [21] 马迎宾, 黄雅茹, 苏智, 等. 乌兰布和沙漠绿洲3种杨树叶片性状研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(8): 10–15.
- [22] 冯伟, 孟和, 杨文斌, 等. 小叶杨与胡杨杂交种(小×胡)幼苗抗旱性初步研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28

- (7): 166–170.
- [23] 王方琳, 柴成武, 尉秋实, 等. 小叶杨×胡杨杂交种(小×胡杨)无菌培养体系初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11): 176–181.
- [24] Tang Q Y, Wang J, Liu M H, et al. Chromosome behavior of meiosis in pollen mother cell of *Populus simonii*×*P. euphratica*[J]. Acta Botanica Boreali–Occidentalia Sinica, 2010, 30(7): 1351–1358.
- [25] 黄雅茹, 马迎宾, 苏智, 等. 乌兰布和沙漠绿洲北抗杨家系 6 个无性系叶片性状研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 86–90, 103.
- [26] 黄文娟, 李志军, 杨赵平, 等. 胡杨异形叶结构型性状及其相互关系[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4636–4642.
- [27] 吕中跃, 裘珍飞, 曾炳山, 等. 黑木相思 14 个无性系叶片性状变异分析[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(4): 43–47.
- [28] 何斌, 李青, 冯图, 等. 不同林龄马尾松人工林针叶功能性状及其与土壤养分的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(2): 181–190.
- [29] 左力翔, 李秧秧, 陈佳村. 陕北沙地高龄小叶杨光合速率下降的水力限制[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1607–1614.
- [30] 袁颖红, 樊后保, 吴建平, 等. 不同年龄人工林尾巨桉(*Eucalyptus urophylla*×*E.grandis*)叶片光合特性及水分利用效率[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(1): 58–63.
- [31] Ogle K, Reynolds J F. Desert dogma revisited: coupling of stomatal conductance and photosynthesis in the desert shrub, *Larrea tridentata*[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 25(7): 909–921.
- [32] Peaucelle M, Bacour C, Ciais P, et al. Covariations between plant functional traits emerge from constraining parameterization of a terrestrial biosphere model[J]. Global Ecology and Biogeography, 2019, 28(9): 1351–1365.
- [33] Long J D, Jackson B G, Wilkinson A, et al. Relationships between plant traits, soil properties and carbon fluxes differ between monocultures and mixed communities in temperate grassland[J]. Journal of Ecology, 2019, 107(4): 1704–1719.
- [34] Feng K, Zhao C, Wang Y, et al. Effects of depth of root cutting on the photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of peanut[J]. Acta Agriculturae Boreali–Sinica, 2014, 29(2): 188–192.
- [35] Gong R, Gao Q. Research progress in the effects of leaf hydraulic characteristics on plant physiological functions [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(3): 300–308.
- [36] Tan Y, Zhu D Z, Wei H R, et al. Effects of phytoplasma infection on structure and function of sweet cherry leaves [J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(7): 1306–1312.
- [37] Zhao L M, Zheng D F, Feng N J, et al. Effects of plant growth regulators(PGRs) on photosynthetic characteristics and sugar accumulation in soybean leaves[J]. Soybean Science, 2008, 27(3): 442–441.
- [38] Zhang J L, Zhu J J, Cao K F. Seasonal variation in photosynthesis in six woody species with different leaf phenology in a valley savanna in southwestern China[J]. Trees, 2007, 21(6): 631–643.
- [39] Rose L, Rubarth M C, Hertel D, et al. Management alters interspecific leaf trait relationships and trait–based species rankings in permanent meadows[J]. Journal of Vegetation Science, 2013, 24(2): 239–250.
- [40] 陈超君, 尹小红, 李莉蓉, 等. 广西石韦叶片性状的变异度及主成分和聚类分析[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(11): 2745–2748.
- [41] 莫燕华, 马姜明, 苏静, 等. 桂林岩溶石山櫟木群落老龄林植物叶性状[J]. 广西植物, 2019, 39(8): 1059–1068.
- [42] 刘茂秀, 史军辉, 王新英, 等. 塔河中游不同生境天然胡杨林木的光合与蒸腾特性[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 9–15.
- [43] Marron N, Ceulemans R. Genetic variation of leaf traits related to productivity in a *Populus deltoides* × *Populus nigra* family[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(2): 390–400.
- [44] Goyal V K, Pandey S, Shukla R S, et al. Morphological characterization and genetic analysis in newly developed cytoplasmic lines of bread wheat[J]. AkiNik Publications, 2019, 7(1): 2262–2266.

## Characteristics of leaf functional traits of *Populus simonii* × *P. euphratica* on the northeastern edge of Ulanbuh Desert

HUANG Yaru<sup>1,2,3,4</sup>, MA Yingbin<sup>1,3</sup>, ZHANG Jingbo<sup>1,2,4\*</sup>, ZHAO Yingming<sup>1,3</sup>, HAO Xuting<sup>1,2</sup>, HAN Chunxia<sup>1,2</sup>, JIAN Kaimin<sup>5</sup>, MA Haifeng<sup>6</sup>

1. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China
2. Combat Desertification Engineering Technology Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Dengkou 015200, China
3. National Long-Term Scientific Research Base of comprehensive control in Ulan Buh Desert, National Forestry and Grassland Administration, Dengkou 015200, China
4. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, Dengkou 015200, China
5. Bayannur Forestry and Grassland Development Center, Bayannur 015000, China
6. Bayannur Desert Comprehensive Control Center, Bayannur 015000, China

**Abstract** The leaf traits of *Populus simonii* × *P. euphratica* with different planting years were investigated and the suitable indexes for the adaptability evaluation of different forest ages was screened, which shall provide the theoretical basis for evaluating the adaptability of *Populus simonii* × *P. euphratica* in desert oasis. The leaf shape of *Populus simonii* × *P. euphratica* is mainly lanceolate and oval; the net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and intercellular CO<sub>2</sub> concentration of *Populus simonii* × *P. euphratica* increase with the growth age, and there are significant differences between different forest ages ( $P < 0.05$ ), and the leaf traits of *Populus euphratica* have extremely significant correlations with each other ( $P < 0.01$ ), Net photosynthetic rate and stomatal conductance can be used as the main factors to evaluate leaf traits of *Populus euphratica* at different growth ages, the results of evaluating its leaf traits are more reliable with the increases of growth age.

**Keywords** *Populus simonii* × *P. euphratica*; leaf traits; photosynthetic characteristics; Ulanbuh desert ●



(责任编辑 徐丽娇)