

# 立地条件和树龄对刺槐叶形态及生理特性的影响

李俊辉<sup>1,3</sup>, 李秧秧<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:**立地条件和树龄是影响黄土高原刺槐“小老树”形成的主要因素。为此,该文研究了不同立地条件下(水分条件好的沟谷台地和水分条件相对差的阶坡坡地)刺槐叶形态和生理特性随树龄的变化,目的在于揭示“小老树”形成的生理机制。结果表明:坡地刺槐具有小的叶面积,高的比叶质量和叶厚度,低的比叶水力导度、净光合速率和气孔导度,而水分利用效率和 N、P 养分含量均较高。随树龄增加,刺槐的叶形态和生理特性表现出干旱生境中的特点,叶水分关系的恶化和分配到光合器官中的 N 含量比例的减少是随树龄增加净光合速率降低的重要原因。立地条件和树龄对大多数叶形态和生理特性表现出显著的交互作用,表明干旱与树龄增加相互作用导致的光合面积的减少、叶片结构和建造成本的上升及净光合速率的下降是黄土高原“小老树”形成的重要原因。

**关键词:**立地条件; 树龄; 刺槐; 叶形态与生理特性

中图分类号: Q945.79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0176-06

## Effects of Site and Tree Age on Leaf Morpho-physiological Traits of Black Locust

LI Jun-hui<sup>1,3</sup>, LI Yang-yang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Site and tree age are the major factors resulting in the development of small dwarf tree on the Loess Plateau. Thus, this paper studied changes of leaf morpho-physiological traits of black locust (*Robinia pseudoacacia*) with dynamic of tree age under two sites (gully tableland with sufficient water supply and inter-gully slopeland with limited water supply) in order to examine the physiological mechanism of formation of small dwarf tree. The results indicated that black locust growing on the slopeland had smaller leaf area, higher specific leaf mass and leaf thickness, lower whole-tree hydraulic conductance, decreased net photosynthetic rate and stomatal conductance, increased water use efficiency and N, P nutrient content. Changes of leaf morpho-physiological traits of black locust with tree age showed the same trend as in drought habitat. Worse leaf water status and decreased proportion of N in photosynthetic organ contributed to the decrease of photosynthetic rate in old-aged trees. Site and tree age showed significant interaction for most leaf traits, indicating decreased photosynthetic area, raised leaf construction cost and lower net photosynthetic rate were major reasons responsible for forming small dwarf tree on the Loess Plateau.

**Key words:** site; tree age; *Robinia pseudoacacia*; leaf morpho-physiological traits

植被措施是防治黄土高原水土流失,改善其生态环境的一条重要途径。黄土高原自 20 世纪 50 年代开始大规模造林以来,森林覆盖率已由原来的 3% 提高到 8%,生态环境得到了一定的改善。但由于不合理的植被建设,相当一部分人工林生长极不正常,个体矮

小、生长缓慢、过早老化、病虫害严重、难以成材,故人们谓之“小老树”,这些小老树的形成直接影响了其在改善生态环境、防风固沙和保持水土等方面效益的发挥<sup>[1-3]</sup>。探索这些“小老树”的形成机制对于防止其形成和改造现有“小老树”有重要的理论和实践指导价值。

收稿日期: 2012-03-28

修回日期: 2012-04-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(3107054); 国家林业局公益行业科研专项(200904056)

作者简介: 李俊辉(1987—),男,山西沁源人,在读硕士,主要从事植物水分生理生态方面研究。E-mail: lijh1987@163.com

通信作者: 李秧秧(1968—),女,陕西咸阳人,博士,研究员,主要从事植物水分与养分生理生态方面的研究工作。E-mail: yyli@ms.iswc.ac.cn

水分是黄土高原树木生长和生存的主要限制因子,亦是形成“小老树”的主导因素。“小老树”多生长在水分条件差的峁顶、峁坡及沟坡中上部,而在水分条件好的沟谷平缓地上树木生长相对良好<sup>[1-3]</sup>。以往对“小老树”形成机制的探讨主要集中在土壤水分的影响及其调控上<sup>[4]</sup>,而极少考虑植物本身的特性。植物叶的形态与生理特性对环境变化极为敏感,且与整株植物的生理性质密切相关,因而在一定程度上有助于解释“小老树”的形成机理,同时也为将叶水平的测定结果放大到整株树木乃至林分水平,从而实现森林生态系统碳通量的定量化研究所必须<sup>[5]</sup>。

初步研究表明:成年小叶杨“小老树”叶光合能力显著低于对照,且叶片形状亦发生了适应性变化,如叶面积减小、叶片变厚等<sup>[6]</sup>,但其它“小老树”形成过程中叶形态和生理特性的变化并不清楚。Tanaka-Oda等发现黄土高原外来树种河北杨和刺槐的长期水分利用效率和氮含量随树木高度增加而下降<sup>[7]</sup>,暗示水分和养分的限制是黄土高原“小老树”形成的重要原因。但很多研究表明:植物长期水分利用效率随树高或树龄增加均呈现增加的趋势<sup>[8-9]</sup>,且氮含量也存在减少、不变和增加三种不同的研究结论<sup>[5]</sup>,与Tanaka-Oda等的研究结果<sup>[7]</sup>明显不同。为此本研究选择黄土高原“小老树”的典型树种——刺槐,研究其在“小老树”形成过程中叶形态和生理特性的变化,以揭示“小老树”形成的一些机理。

## 1 材料与方法

试验在位于陕北黄土高原榆林市米脂县城北 20 km 的高西沟流域进行(37°51'N, 110°11'E),该流域位于黄土高原丘陵沟壑区,属温带半干旱半湿润森林草原带。当地多年平均气温 8.4℃,极端气温最低和最高分别为 -26℃ 和 36.6℃,年平均日照时数为 2 761 h,无霜期平均 162 d,多年平均降雨量 451.6 mm,多年平均蒸发量为 2 000~2 500 mm<sup>[10]</sup>。实验于 2011 年 7 月中旬树木旺盛生长期进行。

### 1.1 材料

以人工栽植的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为研究对象,设置两块样地,沟谷纯刺槐林地和峁坡纯刺槐林地。7 月上旬刺槐沟谷台地和峁坡坡地 2 m 土层平均含水量分别为 7.8% 和 4.5%。实验前 2 天发生 13.4 mm 降雨,导致 1 m 以上土壤含水量明显增加,但沟谷台地土壤水分仍显著高于峁坡坡地(图 1)。沟谷刺槐林地相对平坦,坡度仅为 6°,林下分布有少量榆树(*Ulmus pumila*)、椿树(*Ailanthus altissima*)、枣树(*Zizyphus jujuba*)及臭蒿(*Artemisia annua*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等草本植物,刺槐密度为 1 400 株/hm<sup>2</sup>;峁

坡地刺槐林位于西南坡,接近峁顶,坡度 22°,林下有针茅(*Stipa capillata*),苦菜(*Sonchus oleraceus*)等草本植物分布,刺槐密度为 1 200 株/hm<sup>2</sup>。在每块样地上进行树龄调查,然后标记相近树龄范围的植株,从中随机选择低龄、中龄和高龄的样株各 3 棵,调查其生长情况(表 1),然后采集样株顶端向阳的健康生长的叶片供测定使用。

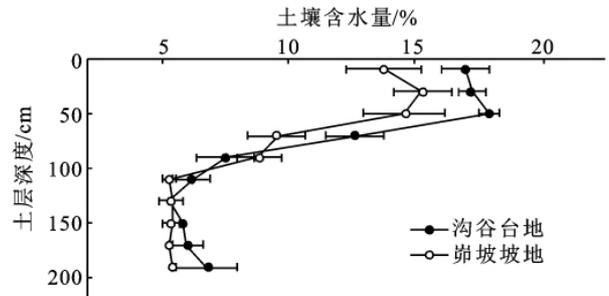


图 1 沟谷台地和峁坡坡地的土壤含水量剖面分布

表 1 样株生长状况

立地	树龄/a	树高/m	胸径/cm
沟谷台地	2~3	2.88±0.31	2.8±0.1
	7~9	6.30±0.23	7.6±0.6
	23~25	8.93±0.72	18.9±1.5
峁坡坡地	2~3	2.33±0.20	3.0±0.2
	7~9	5.87±0.26	11.5±0.2
	23~25	6.40±0.06	17.9±0.6

### 1.2 测定项目及方法

(1) 叶面积(LA)、叶厚度(LT)、比叶质量(LMA)。样品先用扫描仪(台湾明基 5520 型扫描仪)扫描,后用根系分析软件 DT—Scan(英国 Delta—T 公司)计算叶面积。然后将 20 片叶叠加作为一个整体样品,用 0.02 mm 游标卡尺测量该样品的平均厚度,进而求得单一叶片的厚度(LT)。然后将样品置于 75℃ 下烘干 48 h 后称其烘干质量,烘干质量与叶面积之比即为比叶质量。

(2) 叶水势及水力导度。用压力室(美国 PMS 公司)在黎明前和正午时测定叶水势,整树水力导度用如下公式计算: $K_s = E / (\psi_{pd} - \psi_{md})$ ,其中,  $E$  为用光合仪测定的蒸腾速率,  $\psi_{pd}$  和  $\psi_{md}$  分别为黎明前和正午时的叶水势。

(3) 光合气体交换参数。采用离体测定的方法。在晴天上午 10:00—12:00 用修枝剪取离体树枝,迅速浸入水中,在水下剪去末端 3 cm 以阻止空气进入,然后用 LI—6400 光合仪(美国 LI—Cor 公司)测定叶净光合速率( $P_n$ )和气孔导度( $G_s$ )等光合参数。测定时光源为仪器自带光源,光强设定为 1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $\text{CO}_2$  浓度约为 385 mg/kg,温度为 26~30℃,湿度为 45%左右,测定在 10 min 内完成。潜在水分利用率( $\text{WUE}_i$ )为净光合速率与气孔导度之比。

(4) 叶片碳同位素组成 ( $\delta^{13}C$ )。叶片烘干粉碎后过 0.1 mm 筛,然后取处理好的大约 3 mg 样品封入真空的石英管,并加入氧化铜和银箔,在 800~850℃下燃烧至少 4 h,燃烧产生的  $CO_2$  经结晶纯化后,用 MAT-251 型质谱仪测定叶片的  $^{13}C/^{12}C$ ,并以 PDB(Pee Dee Belemnite)为标准计算叶片  $\delta^{13}C$ ,分析精度为  $\pm 0.2\%$ 。

(5) 氮、磷含量。样品粉碎过筛后,全 N 采用全自动凯氏定氮仪测定,全 P 量采用钼黄比色法测定。单位质量基础上的 N 和 P 含量分别用  $N_m$  和  $P_m$  表示。

1.3 统计分析

用二因素方差分析来检验生境、树龄和其交互作用的影响大小,树龄的效应达到显著后,用单因素方差分析进行同一生境下不同树龄叶形态和生理特性的比较,LSD 法进行多重比较。对所有叶形态和生

理特性数据进行正态分布检验(Shapiro—Wilk 检验),发现均服从正态分布,故直接用 Pearson 相关分析来分析它们之间的相关关系。所有统计分析均用 SPSS 11.5 进行。

2 结果与分析

2.1 立地条件和树龄对刺槐叶形态特性的影响

立地条件和树龄对叶形态特性有极显著的影响,随干旱程度和树龄增加,刺槐的叶面积 LA 显著下降,比叶质量 LMA 和叶厚度 LT 则显著增加(图 2)。立地条件和树龄与刺槐的叶形态特性均表现出显著的交互作用(图 2)。刺槐的 LA 与 LMA、LT 之间均呈显著负相关,但 LMA 与 LT 无相关性。由于 LMA 为叶密度和叶厚度的乘积,暗示不同处理刺槐 LMA 变化原因主要与叶密度有关。

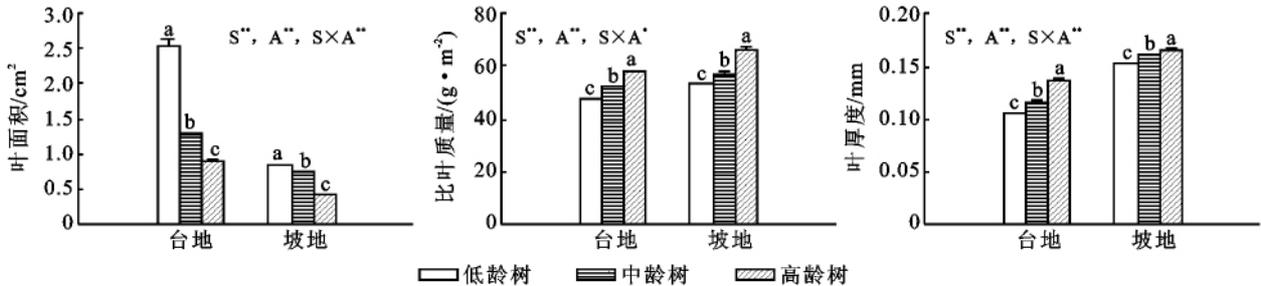


图 2 两种立地条件刺槐和小叶杨叶形态特性随树龄的变化

(S:立地;A:树龄;S×A:立地与树龄的交互作用。\* $P < 0.05$ ,\*\* $P < 0.01$ ,ns; $P > 0.05$ 。不同小写字母表示同一立地下不同树龄间差异显著,下同。)

2.2 立地条件和树龄对刺槐叶生理特性的影响

2.2.1 叶水分关系 刺槐沟谷台地黎明前和正午时的叶水势显著高于卯坡坡地,前者的整树水力导度亦高于后者。随树龄增加,刺槐黎明前和正午时叶水势均显著下降,整树水力导度也呈现相同的趋势。水分

生境和树龄的交互作用与刺槐的叶水势和整树水力导度均达到显著水平(图 3)。刺槐的黎明前叶水势、正午时叶水势和整树水力导度相互之间存在显著的正相关关系(表 2)。

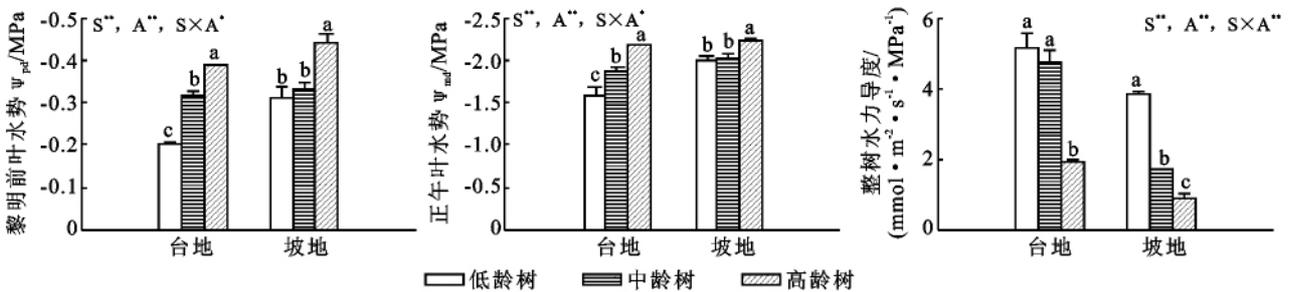


图 3 两种立地条件下刺槐叶水分关系随树龄的变化

2.2.2 叶光合作用和长期 WUE 刺槐卯坡坡地的净光合速率  $P_n$  和气孔导度  $G_s$  显著低于沟谷台地,但潜在水分利用效率  $WUE_i$  则高于沟谷台地;碳同位素组成也表明土壤水分差的坡地的长期 WUE 要高于水分相对好的沟谷台地。随树龄增加,刺槐的  $P_n$  和  $G_s$  显著下降, $WUE_i$  显著增加,碳同位素组成表征的长期 WUE 也随树龄增加而增加。立地和树龄的

交互作用与刺槐的光合参数( $P_n, G_s, WUE_i$ )及叶碳同位素组成  $\delta^{13}C$  均达到显著水平(图 4)。

生长在水分相对好的台地上的中龄刺槐的  $P_n$  和  $G_s$  相比于幼龄树种稍有下降,二者  $WUE_i$  相同,高龄刺槐的  $P_n, G_s$  显著下降, $WUE_i$  显著增加,但三个树龄  $\delta^{13}C$  表征的长期 WUE 并无明显差异;生长在水分差的坡地上的中龄刺槐的  $P_n$  和  $G_s$  显著下降, $WUE_i$

和  $\delta^{13}\text{C}$  表征的长期 WUE 明显增加。刺槐的  $P_n$  和  $G_s$  之间均呈极显著正相关,  $\text{WUE}_i$  和  $P_n$  及  $G_s$  之间

均呈显著负相关,  $\delta^{13}\text{C}$  与  $P_n$  和  $G_s$  之间呈显著负相关, 而  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\text{WUE}_i$  之间无显著相关性(表 2)。

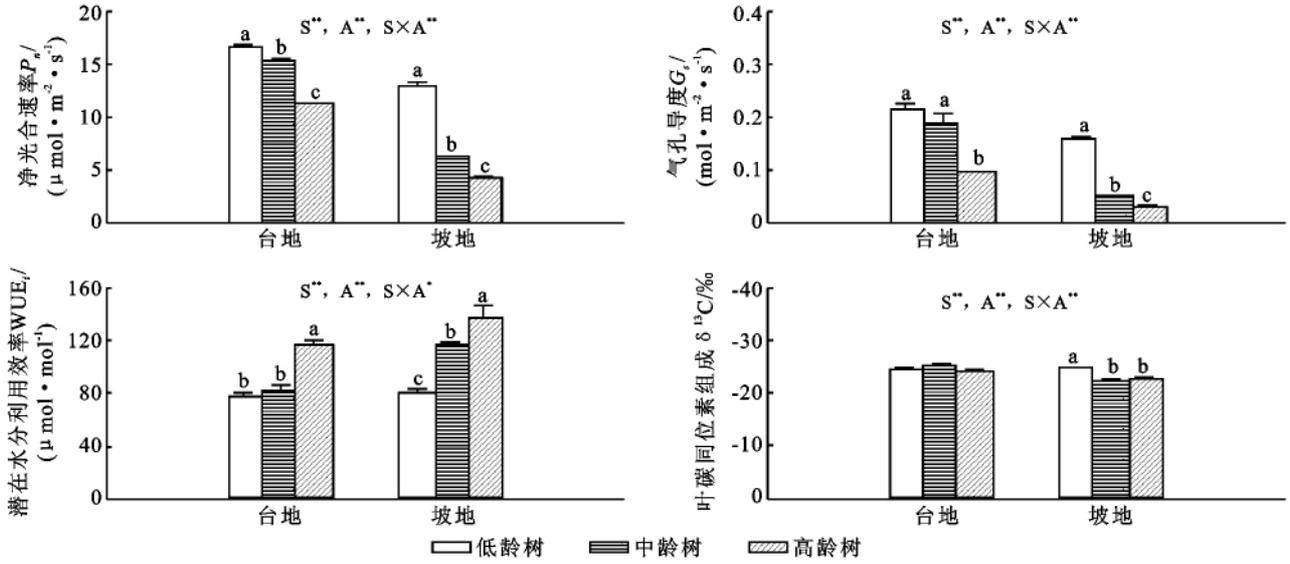


图 4 两种立地条件下刺槐叶光合特性及碳同位素组成随树龄的变化

2.2.3 叶片养分含量 坡地刺槐的 N、P 养分含量均高于台地。随树龄增加, 叶片中 N、P 含量明显增加, 刺槐高龄树的 N 含量比幼龄增加了 46.8%, P 含量增加了 49.7%。立地和树龄的交互作用对刺槐的

N 含量的影响达到显著水平, 但对 P 含量影响并不显著(图 5)。

刺槐不同处理下叶的 N 和 P 含量之间无显著相关性(表 2), 可能与刺槐的固氮特性有关。

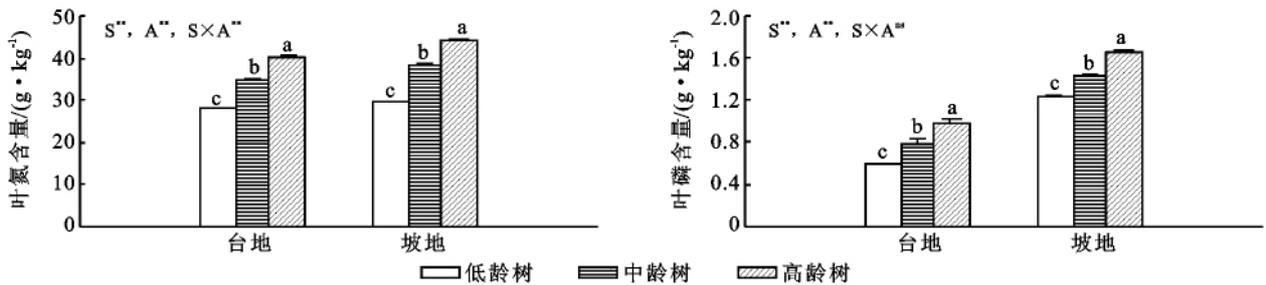


图 5 两种立地条件下刺槐叶 N、P 含量随树龄的变化

表 2 刺槐叶片形态和生理特性之间的相关关系 (n=6)

刺槐	LA	LMA	LT	$\psi_{pd}$	$\psi_{md}$	$K_s$	$P_n$	$G_s$	$\text{WUE}_i$	$\delta^{13}\text{C}$	$N_m$	$P_m$
LA	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LMA	-0.822*	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LT	-0.881*	0.808	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$\psi_{pd}$	0.892*	-0.936**	-0.719	1	—	—	—	—	—	—	—	—
$\psi_{md}$	0.969**	-0.929**	-0.891*	0.952**	1	—	—	—	—	—	—	—
$K_s$	0.805	-0.930**	-0.853*	0.850*	0.891*	1	—	—	—	—	—	—
$P_n$	0.787	-0.916*	-0.896*	0.779	0.858*	0.958**	1	—	—	—	—	—
$G_s$	0.809	-0.922**	-0.864*	0.831*	0.881*	0.993**	0.979**	1	—	—	—	—
$\text{WUE}_i$	-0.703	0.939**	0.726	-0.848*	-0.825*	-0.971**	-0.924**	-0.963**	1	—	—	—
$\delta^{13}\text{C}$	-0.829*	0.905*	0.830*	-0.826*	-0.865*	-0.891*	-0.956**	-0.931**	0.878	1	—	—
$N_m$	-0.730	0.909*	0.595	-0.914*	-0.819*	-0.880*	-0.821*	-0.879*	0.940**	0.869*	1	—
$P_m$	-0.860*	0.862*	0.981**	-0.746	-0.891*	-0.858*	-0.933**	-0.880*	0.765	0.892*	0.652	1

2.3 两种树种叶形态和生理特性之间的关系

叶形态参数与生理特性之间的关系表现为: 刺槐叶片的 LMA 与所有生理参数之间( $\psi_{pd}$ ,  $\psi_{md}$ ,  $K_s$ ,  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $\text{WUE}_i$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $N_m$  和  $P_m$ ) 的相关性均达到显著水平, 但 LA 仅与  $\psi_{pd}$ ,  $\psi_{md}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $P_m$  之间有显著相关关系, LT

与  $\psi_{md}$ ,  $K_s$ ,  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $P_m$  之间有显著相关关系, 表明刺槐的 LMA 与叶生理特性关系密切。

叶生理特性之间的关系为: 刺槐的  $\psi_{md}$ ,  $K_s$  与  $P_n$  呈显著正相关, 所有水分关系参数( $\psi_{pd}$ ,  $\psi_{md}$ ,  $K_s$ ) 均与  $G_s$  呈显著正相关, 但与  $\text{WUE}_i$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  和  $N_m$  呈显著负

相关,表明刺槐叶的水分状况直接影响其光合作用和 WUE。刺槐叶  $N_m$  和光合参数  $P_n, G_s$  之间呈显著负相关,但与  $WUE_i$  和  $\delta^{13}C$  之间呈显著正相关;刺槐的  $P_m$  和  $P_n, G_s$  呈显著负相关,与  $\delta^{13}C$  呈显著正相关,意味着养分含量的提高对光合参数具有一定的负效应,但对  $WUE_i$  提高具有一定的正效应。

### 3 讨论

#### 3.1 水分生境对叶形态与生理特性的影响

长期干旱会限制植物的生长进而使叶结构发生相应改变,刺槐长期干旱时叶面积减小,比叶质量和叶片厚度增加,这与前人的初步研究结果一致<sup>[6]</sup>。叶面积减小有助于降低蒸腾面积,避免细胞水势和膨压的严重降低;比叶质量的增加减少了叶片的水分散失,增加了单位面积的呼吸速率,从而降低了单位面积的净碳获得量;叶厚度的增加表明单位面积积累的光合生物量增加和抗旱性的增加,这些形态结构的改变可能导致叶片的结构建造成本上升,光合能力降低。从生理角度分析,干旱导致刺槐水分关系恶化,其净光合速率和气孔导度降低,  $WUE_i$  和碳同位素技术表征的长期 WUE 均增加,植物更偏向保守性水分利用方式<sup>[11-13]</sup>。干旱下叶片 N 含量明显增加,增加的氮含量不仅有助于植物光合器官在干旱区高光强下得到饱和,而且有利于更多的氮分配到光合器官中,使叶片在气孔导度较低时就能达到一定的光合速率,从而提高其  $WUE_i$ <sup>[13]</sup>。N 与 P 作为植物最重要的限制元素,共同参与植物体内的生理生化过程,因而导致干旱时二者同步增加。

#### 3.2 树龄对叶形态与生理特性的影响

随树龄增加,刺槐叶片的形态结构发生了明显的改变,其叶面积减小,比叶质量和叶厚度明显增加,此现象在其它树木上也可见相似报道<sup>[5]</sup>。这些形态特性的改变与旱生环境中植物叶片形态特征改变一致,表明随树高增加,叶片结构建造成本上升,干物质生产能力下降。随树龄增加,叶片净光合速率显著下降,这在很多针叶树种均有报道,在阔叶树种上不同研究者的结果差异较大<sup>[5]</sup>。我们的研究与在温带落叶树种 *Acer platanoides* 及 *Fraxinus excelsior*<sup>[14]</sup>, *Prunus serotina* 上<sup>[15]</sup>的结果一致,即树龄增加引起光合速率显著降低。随树龄增加,无论在何种立地条件下,刺槐黎明前和正午时的叶水势及整树水力导度均随树龄增加而降低,整树水力导度和光合速率之间呈显著正相关,表明高龄树种生长受到了水力限制。同时,叶潜在 WUE 随树龄增加而增加,叶片趋向于保守性水分利用策略。大量碳同位素技术的测定结果亦

证明了这点<sup>[8]</sup>,这与 Tanaka-Oda 等在河北杨和刺槐上发现随树高增加其长期 WUE 下降的结果明显不同<sup>[7]</sup>,可能与他们的研究中并未区分立地条件有关。

随树龄增加的树木叶  $P_n$  降低的原因也可能与养分特性有关。关于叶氮含量随树高及树龄的变化并无一致的结论<sup>[16-20]</sup>,本研究结果表明:随树龄增加,叶片中氮含量明显增加,与 Nabeshima 等对日本的一种落叶树种 *Acer mono* 的研究结论<sup>[20]</sup>一致。本研究中刺槐叶氮含量和比叶质量呈显著正相关,但与净光合速率呈显著负相关,表明大量的 N 投入到防御和结构建造中,而少数比例的 N 投入到光合器官中,从而导致净光合速率明显降低。有证据表明树龄增加降低了 N 分配到光合器官中的比例<sup>[19,21]</sup>。本研究中随树龄增加,刺槐叶片 P 含量显著增加,P 含量与净光合速率在刺槐上呈显著负相关,表明 P 分配到光合器官中的比例也可能降低了刺槐的净光合速率。

#### 3.3 “小老树”形成的生理机制探讨

对本研究测定的除叶 P 含量外的所有叶形态和生理参数,水分生境和树龄的交互作用均达到极显著相关,这种交互作用是形成小老树的重要原因。干旱胁迫加剧了高龄刺槐光合面积的减少、叶片中结构建造成本的上升及净光合速率的下降,从而导致树木生产力的严重降低。叶水分关系、光合气体交换及碳同位素技术表明:干旱生境中的刺槐在在中龄时整树水力导度、气体交换已显著下降,长期 WUE 显著增加,是否表明刺槐“小老树”的形成在 7~9 a 时已形成,尚需对整树水平的生长和水分利用进行研究方可回答这一问题。

#### 参考文献:

- [1] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,等.黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究. I:小老树的分布及其生长特点[J]. 水土保持学报,1991,5(1):64-72.
- [2] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,等.黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究. II:土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系[J]. 水土保持学报,1991,5(2):75-83.
- [3] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,等.黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究. III:小老树的成因及其改造途径[J]. 水土保持学报,1991,5(4):80-86.
- [4] 王力,邵明安,王全九,等.黄土区土壤干化研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(5):27-32.
- [5] Steppe K, Niinemets Ü, Teskey R O. Tree size-and age-related changes in leaf physiology and their influence on carbon gain[C]//Meinzer F C, Lachenbruch B, Dawson T E. Size-and age-related changes in tree structure and Function. Springer-verlag,2011:235-253.
- [6] 韩蕊莲,侯庆春.小叶杨“小老树”生长季内水分特征及光合能力[J]. 西北林学院学报,1996,11(3):36-40.

- [7] Tanaka-Oda A, Kenzo T, Koretsune S, et al. Ontogenetic changes in water-use efficiency ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and leaf traits differ among tree species growing in a semiarid region of the Loess Plateau, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(5):953-957.
- [8] McDowell N G, Bond B J, Dickman L T, et al. Relationships between tree height and carbon isotope discrimination[C]// Meinzer F C, Lachenbruch B, Dawson T E. Size and age-related changes in tree structure and function. Springer-verlag, 2011:235-253.
- [9] 何春霞, 李吉跃, 郭明, 等. 4 种乔木叶片光合特性和水分利用效率随树高的变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(7):3008-3016.
- [10] 张红娟. 黄土高原丘陵沟壑区生态与经济互动发展模式研究:以陕北米脂高西沟为例[D]. 西安:陕西师范大学, 2007.
- [11] Lamont B B, Groom P K, Cowling R M. High leaf mass per area of related species assemblages may reflect low rainfall and carbon isotope discrimination rather than low phosphorus and nitrogen concentrations[J]. *Functional Ecology*, 2002, 16(3):403-412.
- [12] Wright I J, Reich P B, Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habits[J]. *Functional Ecology*, 2001, 15(4):423-434.
- [13] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, et al. Modulation of leaf economic traits and trait relationships by climate[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(5):411-421.
- [14] Abdul-Hamid H, Mencuccini M. Age- and size-related changes in physiological characteristics and chemical composition of *Acer pseudoplatanus* and *Fraxinus excelsior* trees[J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(1):27-38.
- [15] Fredericksen T S, Steiner K C, Skelly J M, et al. Diel and seasonal patterns of leaf gas exchange and xylem water potentials of different-sized *Prunus serotina* Ehrh. trees[J]. *Forest Science*, 1996, 42(3):359-365.
- [16] Niinemets U. Distribution patterns of foliar carbon and nitrogen as affected by tree dimensions and relative light conditions in the canopy of *Picea abies* [J]. *Trees*, 1997, 11(3):144-154.
- [17] Woodruff D R, Meinzer F C, Lachenbruch B, et al. Coordination of leaf structure and gas exchange along a height gradient in a tall conifer[J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(2):261-272.
- [18] Yoder B J, Ryan M G, Waring R H, et al. Evidence of reduced photosynthetic rates in old trees[J]. *Forest Science*, 1994, 40(3):513-527.
- [19] Niinemets Ü. Stomatal conductance alone does not explain the decline in foliar photosynthetic rates with increasing tree age and size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris*[J]. *Tree Physiology*, 2002, 22(8):515-535.
- [20] Nabeshima E, Hiura T. Size dependency of photosynthetic water- and nitrogen-use efficiency and hydraulic limitation in *Acer mono* [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(7):745-752.
- [21] Merilo E, Tulva I, Räm O, et al. Changes in needle nitrogen partitioning and photosynthesis during 80 years of tree ontogeny in *Picea abies*[J]. *Trees*, 2009, 23(5):951-958.

(上接第 175 页)

四翅滨藜在 3 a 的生长后成活率为零,除可能不适宜试验地立地条件外,还与其发芽率、后期管护等有一定关系,仍需进一步试验;客土、草炭、蛭石和珍珠岩基质体积比为 50:30:10:10 的 2 号种基盘配方的成活率远高于其余 3 个配方,说明这个比例的配方可以充分发挥其基质保水保肥性,疏松透气的性能,其改善植物局部生长环境的性能更强,应当推广使用。

#### 参考文献:

- [1] 刘金荣, 谢晓蓉. 重盐碱地的改造及建植草坪的研究[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(1):19-21.
- [2] 李光山, 朱金钢, 林瑛. 工程措施与灌溉措施相结合改造盐碱地调研分析[J]. *黑龙江水利科技*, 2003(3):47-48.
- [3] 杨喜田, 董惠英, 山寺喜成, 等. 播种造林种基盘基质的改良研究[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(4):87-91.
- [4] 景峰, 朱金兆, 张学培, 等. 滨海泥质盐碱地台田水盐动态对比研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(5):104-109.
- [5] 武应霞, 汪泽军, 林春阳. 不同树种采用种基盘造林时出苗情况初报[J]. *河南林业科技*, 2003, 23(3):3-4.
- [6] Sun D, Dickinson G R, Bragg A L. Direct seeding of *Atphitonia patriei* (Rhamnaceae) for gully revegetation in tropical northern Australia[J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, 73(1/3):249-257.
- [7] 景峰, 张学培, 郭汉清, 等. 山西省葛铺煤矿弃土弃渣径流泥沙研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(4):61-64.
- [8] 景峰, 朱金兆, 郑柏青, 等. 穴状衬膜基盘造林模式应用效果研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(3):398-407.
- [9] 王丹, 康跃虎, 万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2):83-87.
- [10] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3):30-35.
- [11] 安素艳, 王海山. 美国四翅滨藜在唐山市翔云岛林场盐碱地改造中的应用[J]. *河北林业科技*, 2006(4):52-53.
- [12] 邵崇斌. 概率论与数理统计[M]. 北京:中国林业出版社, 2004.