

网络出版时间:2020-08-28 17:14 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.02.006
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200828.1431.001.html

3 个杨树品种移栽后生长特性比较

刘春鹏^{1,2},姚昱浓³,滑磊⁴,徐振华^{1,2},李向军^{1,2},王法⁵

(1 河北省林业和草原科学研究院,河北 石家庄 050061;2 河北省林木良种技术创新中心,河北 石家庄 050061;

3 华中农业大学园艺林学学院,湖北 武汉 430070;4 河北省英烈纪念馆管理处,河北 石家庄 050000;

5 晋冀鲁豫烈士陵园管理处,河北 邯郸 056001)

【摘要】【目的】比较 3 个杨树品种移栽后的生长特性,揭示一些杨树品种移栽造林后生长缓慢的原因。【方法】以欧美 107 杨(*Populus×euramericana* ‘74/76’)、小美早杨(*Populus popularis* Hsü(1-0))和毛白杨 1316(*Populus tomentosa* ‘1316’)3 个杨树品种为对象,2017 年在观测全植株历经 1 个生长季后的地径、树高基础上,于 2017-08-01 和 2017-09-14 分别测定根、茎、叶生物量和叶面积,并于 2017-08-30 测定净光合速率和叶绿素含量(SPAD 值),比较其相对生长速率(RGR)、净同化速率(NAR)、比叶面积(LSA)等指标。【结果】1)移栽 1 个生长季后,3 个杨树品种地径、树高和生物量(包括茎、叶及植物整体)均表现为欧美 107 杨显著高于小美早杨和毛白杨 1316。2)欧美 107 杨相对生长速率显著高于小美早杨和毛白杨 1316,欧美 107 杨和毛白杨 1316 的平均叶面积均显著高于小美早杨;三者净同化速率间差异显著,表现为小美早杨>欧美 107 杨>毛白杨 1316;小美早杨和毛白杨 1316 的同化产物向茎的分配比例显著低于欧美 107 杨。3)欧美 107 杨和毛白杨 1316 的总叶面积、单叶面积和比叶面积均显著大于小美早杨;三者叶片数量差异显著,表现为小美早杨>欧美 107 杨>毛白杨 1316;欧美 107 杨和小美早杨的净光合速率和 SPAD 值均显著高于毛白杨 1316。【结论】不同杨树品种生长特性取决于自身遗传特性,且移栽后生长缓慢的机制存在一定差别。

【关键词】 杨树;缓苗期;生长特性;净同化速率;净光合速率

【中图分类号】 S792.11

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2021)02-0038-07

Growth characteristics comparison of three poplar varieties after transplant

LIU Chunpeng^{1,2}, YAO Yunong³, HUA Lei⁴, XU Zhenhua^{1,2},
LI Xiangjun^{1,2}, WANG Fa⁵

(1 Hebei Academy of Forestry and Grassland Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

2 Hebei Technical Innovation Center for Forest Improved Variety, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

3 College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

4 Hebei Martyrs Memorial Garden Management Office, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;

5 Shanxi-Hebei-Shandong-Henan Martyrs Memorial Garden Management Office, Handan, Hebei 056001, China)

Abstract: 【Objective】The growth characteristics of three poplar varieties were compared to reveal the reasons for low growth of some poplar varieties after transplant. 【Method】After observing the growth of ground diameter and height of *Populus×euramericana* ‘74/76’, *Populus popularis* Hsü(1-0) and *Populus tomentosa* ‘1316’ whole plants for one season in 2017, root, stem, leaf biomass and leaf area were measured

【收稿日期】 2019-12-19

【基金项目】 河北省林业科学技术研究项目“毛白杨缓苗期形成机理及缩短缓苗期关键技术”(1602477);河北省林业和草原科学研究院重点研究项目“环保型毛白杨优良种质资源收集、保存及利用研究”(ZXZD2018001)

【作者简介】 刘春鹏(1984—),男,河北文安人,高级工程师,硕士,主要从事植物生理研究。E-mail:lcp-1984@163.com

【通信作者】 李向军(1968—),男,河北沧州人,正高级工程师,博士,主要从事植物生理研究。E-mail:872929914@qq.com

on August 1 and September 14, and net assimilation rate and SPAD value were measured on August 30. Then relative growth rate (RGR), net assimilation rate (NAR) and specific leaf area (SLA) were calculated and compared to analyze growth and physiological indexes. 【Result】 (1) One growth season after transplanting, ground diameter, height and biomass (including stem and branch, leaf and total) of *Populus×euramericana* '74/76' were significantly higher than those of *Populus popularis* Hsü(1-0) and *Populus tomentosa* '1316'. (2) The relative growth rate of *Populus×euramericana* '74/76' was significantly higher than that of *Populus popularis* Hsü(1-0) and *Populus tomentosa* '1316'. Mean leaf areas of *Populus×euramericana* '74/76' and *Populus tomentosa* '1316' were significantly higher than that of *Populus popularis* Hsü(1-0). Their net assimilation rates were significantly different with the decreasing order of *Populus popularis* Hsü(1-0) > *Populus×euramericana* '74/76' > *Populus tomentosa* '1316'. The allocation ratios to stem of *Populus popularis* Hsü(1-0) and *Populus tomentosa* '1316' were significantly lower than that of *Populus×euramericana* '74/76'. (3) The total leaf area, single leaf area and specific leaf area of *Populus×euramericana* '74/76' and *Populus tomentosa* '1316' were significantly greater than those of *Populus popularis* Hsü(1-0). The leaf numbers were significantly different with decreasing order of *Populus popularis* Hsü(1-0) > *Populus×euramericana* '74/76' > *Populus tomentosa* '1316'. The net photosynthetic rate and chlorophyll content (SPAD) of *Populus×euramericana* '74/76' and *Populus popularis* Hsü(1-0) were significantly higher than those of *Populus tomentosa* '1316'. 【Conclude】 The growth characteristics of different poplar varieties were determined by their genetic characters, and their slow growth mechanisms were different.

Key words: poplar; revival-time; growth characteristics; net assimilation rate; net photosynthetic rate

近年来,我国北方主要造林树种杨树因“飞絮”污染问题而备受质疑^[1-3],一些地区甚至明令禁止栽植杨树。然而,我国是世界第一木材资源消费大国,每年消耗木材量超过6亿m³,国内木材产量严重不足^[4],尚有超过50%的木材需求来源于国外。而杨树具有生长迅速、适应性强等优点,被广泛用于营建人工用材林,其木材产量占国内木材总量的18.14%,是我国国产木材的主要来源之一^[5-6]。在环境保护与木材需求的双重要求下,发展短周期的杨树人工林,并在开花前将其采伐,既能避免产生“飞絮”污染,又能满足我国大量的木材需求,是杨树产业发展的必然趋势^[7]。

对于营建短周期杨树人工林而言,促进杨树前期快速生长尤为重要。然而,植物移栽后普遍存在缓苗过程^[8-10],杨树也不例外,且以毛白杨的缓苗现象最为突出^[11]。毛白杨是我国特有的乡土树种,与其他杨树品种相比,具有材质优良的巨大优势^[12-13];20世纪90年代前一直占据着杨树生产的主导地位,之后逐渐被国外引进的欧美杨系列等所取代^[14]。究其原因,主要是由于毛白杨造林后前期生长较慢,且缓苗期较长。因而解决毛白杨等杨树品种移栽后生长缓慢的问题,不仅能够增加短周期杨树人工林的木材产量,而且有助于杨树人工林材质

优良品种的选择。

关于杨树品种移栽后早期缓苗的研究,目前主要集中在栽植后大水大肥管理、打头控侧等促进杨树移栽后生长的技术措施上^[11,15],而有关其移栽后生长缓慢的机制研究等尚未见报道。本研究以欧美107杨、小美早杨和毛白杨1316为试验对象,调查特定生长期各器官生物量及叶面积,比较3个杨树品种的同化产物生产、生物量分配、同化速度、净光合速率等,从生理生态学方面解释3个杨树品种移栽后的生长差异,以期揭示一些杨树品种移栽后生长缓慢的成因提供理论支撑,并为促进移栽后快速生长的相关研究提供思路。

1 试验区概况

试验在河北省林业和草原科学研究院(114°28'E,38°08'N)进行。试验地位于河北省石家庄市新华区,在石家庄市区西北部,西接太行山,北临滹沱河。气候为暖温带大陆性季风气候,四季分明,降水分布不均,多集中于夏季,年均降水量552.8mm。年均气温12.9℃,7月份最高,月均26.5℃左右;1月份最低,月均-2.9℃左右;极端最高和最低气温分别为41.5和-19.3℃,年无霜期200d左右。试验地地势平坦,土壤肥力均匀,土质为沙壤土,pH

值为 7.5,富含有机质^[16-17]。

2 材料与方法

2.1 试验材料

毛白杨 1316(*Populus tomentosa* ‘1316’)、欧美 107 杨(*Populus × euramericana* ‘74/76’)、小美早杨(*Populus popularis* Hsü(1-0))3 个杨树品种均用 2 年根 1 年干苗木。其中,毛白杨 1316 为“一条鞭”嫁接苗,扦插成活接芽(毛白杨 1316)生长至 30 cm 高时,采用高培土方法培育其自生根,次年剪掉砧木萌生根,保留接芽萌生根并平茬,生长 1 年后待用。欧美 107 杨和小美早杨为扦插苗,培育前与毛白杨 1316 处理一致,培育其新生枝条自生根,次年剪掉扦插原枝条萌生根,保留新枝条萌生根并平茬,生长 1 年后待用。3 个品种杨树苗均于 2017 年 3 月进行栽植,采用每品种 3 重复的随机区组设计,每小区 40 株;栽植后,对根基部进行截干处理。

2.2 测定指标及方法

在调查 1 个生长季后的杨树植株地径、树高等指标的基础上,分别于 2017-08-01 和 2017-09-14,每个品种各选 3 株生长中等的植株进行取样。采用完全取样方式,分根、茎和叶分别进行收获,测定鲜质量(称重法)和叶面积(用北京雅欣理仪科技有限公司生产的 Yaxin-1241 叶面积仪)后,于 105 °C 烘箱中烘干 72 h,称取干物质量。此外,在 2017-08-30 上午 09:00—11:00,使用 LI-6400XT 便携式光合测量系统(美国 LI-COR 公司),在光强 1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ LED 人工光源照射下,对 3 个杨树品种相同生长部位叶片(树干 1.5 m)的净光合速率进行测定,并利用 SPAD-502 Plus 便携式叶绿素测定仪(日本柯尼卡美能达)测定同一叶片的叶绿素含量(SPAD 值)。

2.3 数据处理

根据植物生长解析方法^[18-19],计算相对生长速率(RGR)、净同化速率(NAR)、比叶面积(LSA)以及各部分(根、茎和叶)同化产物分配比例(P)等指标。各指标计算公式为:

$$\text{RGR} = (\ln W_2 - \ln W_{1 \text{ mean}}) / T;$$

$$\text{NAR} = (W_2 - W_{1 \text{ mean}}) \cdot (\ln A_2 - \ln A_{1 \text{ mean}}) / (A_2 - A_{1 \text{ mean}}) T;$$

$$\text{LSA} = A_2 / L_2;$$

$$P = (G_2 - G_1) / (W_2 - W_1) \times 100\%。$$

式中: W_2 为第 2 次取样时的整株生物量(g), $W_{1 \text{ mean}}$ 为第 1 次取样整株生物量的平均值(g), W_1 为第 1

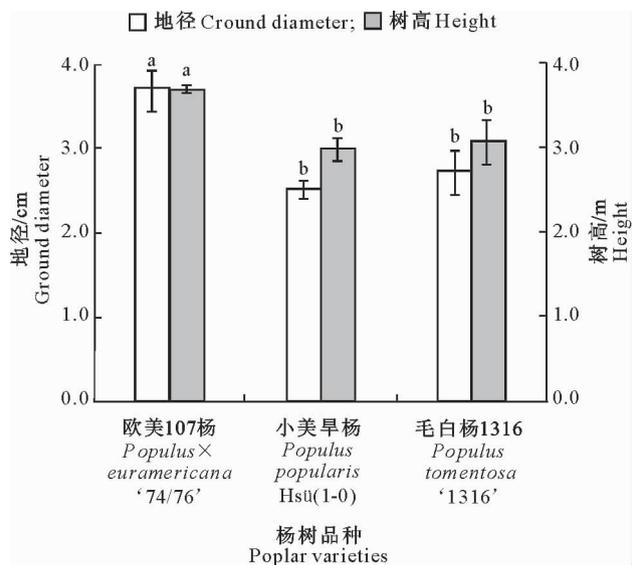
次取样时的整株生物量(g), T 为 2 次取样的间隔时间(d), A_2 为第 2 次取样时的总叶面积(m^2), $A_{1 \text{ mean}}$ 为第 1 次取样总叶面积平均值(m^2), L_2 为第 2 次取样时的叶片总生物量(g), G_1 为第 1 次取样时的各部分生物量(g), G_2 为第 2 次取样各部分生物量(g)。

将获取的数据利用 EXCEL 2003 进行整理、计算和制图。利用 SPSS 13.0 对 3 个杨树品种的各指标进行单因素方差分析,当差异达显著水平时,采用 LSD 法进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 3 个杨树品种的地径、树高及生物量比较

3 个杨树品种 1 个生长季后地径和树高的生长情况见图 1。由图 1 可见,3 个杨树品种的地径和树高表现出一定差异,欧美 107 杨的地径和树高均显著高于小美早杨和毛白杨 1316,毛白杨 1316 的地径和树高稍高于小美早杨,但二者差异不显著。



图柱上标不同小写字母表示品种间差异显著($P < 0.05$),下图同
Different small letters indicate significant difference between varieties at the $P < 0.05$ level, the same below

图 1 3 个杨树品种 1 个生长季后的地径和树高
Fig. 1 Ground diameter and height of three poplar varieties after one growing season

3 个杨树品种的生物量如表 1 所示。从表 1 可以看出,与地径、树高生长趋势相似,3 个杨树品种的叶片、茎干生物量以及总生物量间也呈现出一定差异,且以欧美 107 杨最高,而小美早杨与毛白杨 1316 差异不显著;3 个杨树品种根系生物量间差异均不显著。

表 1 3个杨树品种的生物量

Table 1 Biomass of three poplar varieties

杨树品种 Poplar varieties	生物量/g Biomass			
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	总计 Total
欧美 107 杨 <i>Populus×euramericana</i> '74/76'	108.7±6.9 a	211.8±34.9 a	128.6±38.5 a	449.0±3.3 a
小美早杨 <i>Populus popularis</i> Hsü(1-0)	77.2±5.9 b	173.7±10.4 b	117.6±20.7 a	368.4±16.2 b
毛白杨 1316 <i>Populus tomentosa</i> '1316'	94.7±17.6 b	145.4±44.3 b	117.2±13.0 a	357.3±49.7 b

注:同列数据后标不同小写字母表示品种间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different small letters indicate significant difference between varieties at the $P<0.05$ level. The same below.

3.2 3个杨树品种生长速率及生物量分配的比较

3个杨树品种阶段性生长情况及同化产物的分配情况见表2和图2。从表2可知,2017-08-01—2017-09-14,小美早杨和毛白杨1316的相对生长速率均较低,二间之间无显著差异,且均显著低于欧美

107杨。欧美107杨平均叶面积与毛白杨1316无显著差异,但均显著大于小美早杨。净同化速率以小美早杨最高,欧美107杨次之,毛白杨1316最低,三者之间均存在显著差异。

表 2 3个杨树品种阶段性生长的比较

Table 2 Comparison of stage growth of three poplar varieties

杨树品种 Poplar varieties	相对生长速率/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Relative growth rate	平均叶面积/ m^2 Average leaf area	净同化速率/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) Net assimilation rate
欧美 107 杨 <i>Populus×euramericana</i> '74/76'	16.4±0.2 a	0.80±0.08 a	6.58±0.72 b
小美早杨 <i>Populus popularis</i> Hsü(1-0)	13.9±1.0 b	0.46±0.01 b	8.41±0.61 a
毛白杨 1316 <i>Populus tomentosa</i> '1316'	12.6±1.2 b	0.72±0.10 a	5.11±0.82 c

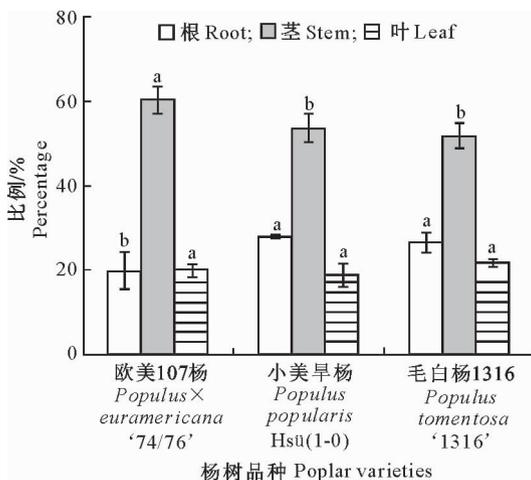


图 2 3个杨树品种同化产物的阶段性分配规律

Fig. 2 Comparison of stage assimilation allocation of three poplar varieties

由图2可知,3个杨树品种向叶片分配的同化产物比例无显著差异,而向茎和根分配的同化产物比例在3个杨树品种间存在差异。相对于欧美107杨而言,小美早杨和毛白杨1316同化产物向茎的分配比例显著降低,而向根系的分配比例显著升高。

3.3 3个杨树品种叶片生长和光合特性的比较

由表3可知,毛白杨1316总叶面积、单叶面积和比叶面积与欧美107杨无显著差异,但均显著大于小美早杨;叶片数量则以小美早杨最高,显著高于另外2个品种。

图3显示,欧美107杨和小美早杨净光合速率及叶绿素含量(SPAD值)均显著高于毛白杨1316,说明欧美107杨和小美早杨单位叶面积的同化能力均显著高于毛白杨1316。

表 3 3个杨树品种叶片生长指标的比较

Table 3 Comparison of leaf growth of three poplar varieties

杨树品种 Poplar variety	总叶面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{株}^{-1}$) Total leaf area	叶片数量/ (枚·株 $^{-1}$) Leaf number	单叶面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{枚}^{-1}$) Single leaf area	比叶面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) Specific leaf area
欧美 107 杨 <i>Populus×euramericana</i> '74/76'	0.94±0.17 a	86.0±2.8 b	0.011 0±0.002 3 a	0.008 7±0.001 1 a
小美早杨 <i>Populus popularis</i> Hsü(1-0)	0.51±0.02 b	108.0±12.7 a	0.004 8±0.000 8 b	0.006 7±0.000 2 b
毛白杨 1316 <i>Populus tomentosa</i> '1316'	0.84±0.19 a	57.0±4.4 c	0.014 6±0.002 3 a	0.008 8±0.000 5 a

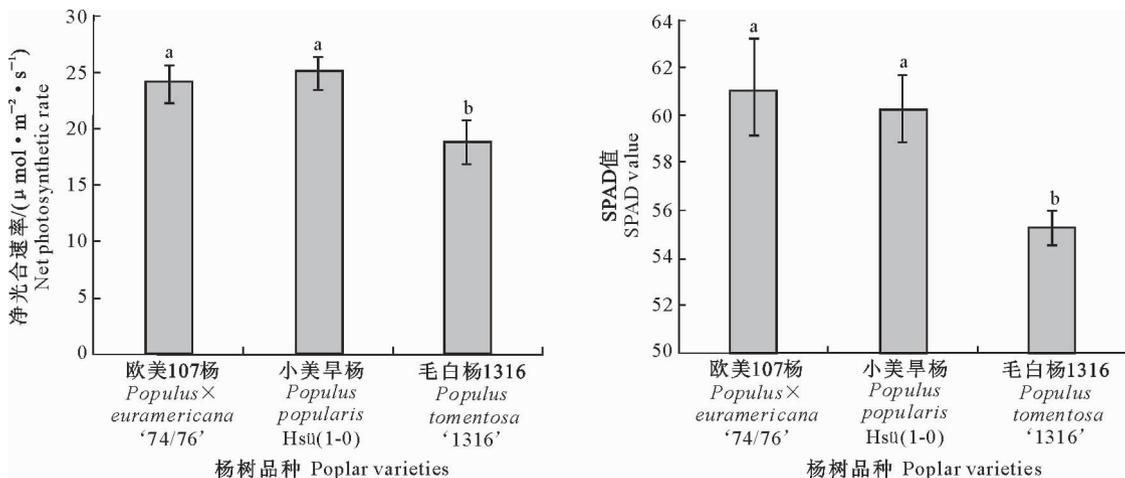


图 3 3个杨树品种净光合速率和 SPAD 值的比较

Fig. 3 Comparison of net photosynthetic rate and SPAD value of three poplar varieties

4 讨 论

胸径(地径)、树高和生物量均是评价林木生长的重要指标,一般容易受到林分密度^[20]、水肥条件^[21]等外界环境因素的影响。本研究所选3个杨树品种栽植在同一试验地中,栽植密度、水肥管理等外界因素均保持一致,因此其地径、树高和生物量(叶、茎以及总生物量)间的差异取决于各自的品种特性。本研究发现,欧美107杨的地径、树高和生物量(叶、茎以及总生物量)的增长均显著大于小美早杨和毛白杨1316,这说明在外界环境条件一致的情况下,杨树品种间地径、树高以及生物量存在一定的正相关。这与黄秦军等^[6]对‘渤丰1号’杨和‘渤丰2号’杨的研究结果相一致。

本研究中,在相同生长期,3个杨树品种的地径、树高生长表现出一定差异,这主要是同化产物生产和分配造成的。与欧美107杨相比,毛白杨1316和小美早杨的相对生长速率较低;另外,其同化产物向茎分配的比例显著降低,而向根分配的比例显著升高。同化产物的分配主要体现为植物生物量的分配,而植物生物量的分配与其生长时期^[22]、年龄^[23]、水肥管理^[21,24]、环境胁迫^[25]等多种因素有关,但根本上仍取决于植物自身的遗传特性^[26]。本试验所选的3个杨树品种是我国北方地区普遍栽植的品种,分别代表不同的杨树派别,其遗传特性具有较大差异。

相对生长速率表示植物整体同化产物生产的效率,净同化速率表示光合器官生产物质的效率,二者均是评价植物同化生产效率的重要指标^[27]。苟攀峰等^[18]认为,相对生长速率取决于净同化速率和叶面积。本研究发现,相较欧美107杨,小美早杨和毛白杨1316的相对生长速率均较低,这可能主要是因

为小美早杨的叶面积较小,而毛白杨1316的净同化速率较低所致。这与苟攀峰等^[18]的观点一致,同时也说明不同杨树品种间相对生长速率存在一定差异,且差异机制并不完全相同。

叶片是植物同化作用的主要场所,直接影响植株有机物质的合成和积累^[28]。植物的总叶面积由叶片数量和单叶面积所决定,单叶面积、单株叶片数量越大,其总叶面积就越大,同化产物积累量就越多,植物生长量也就越大^[29]。本研究中,与欧美107杨相比,小美早杨叶片数量虽然较多,但其单叶面积小,最终导致其总叶面积较低。这与麻雪艳等^[30]关于干旱条件下玉米总叶面积的研究结论相一致。

净光合速率能够较好地解释净同化速率的变化。有研究表明,净光合速率与净同化速率呈正相关^[18],这与本研究结果一致。本研究中,毛白杨1316的净光合速率显著低于欧美107杨和小美早杨,导致其净同化速率最低。叶绿素含量在一定程度上决定着光合速率的变化^[31-32],叶绿素含量(SPAD值)越高,其光合速率越大,二者呈正相关关系^[33]。本研究发现,与欧美107杨和小美早杨相比,毛白杨1316的SPAD值最低,与其净光合速率的表现一致,这验证了张雪悦等^[33]的观点,也说明叶绿素含量较低可能是造成毛白杨1316净光合速率较低的原因之一。

5 结 论

1) 移栽1个生长季后,3个供试杨树品种的地径、树高、叶片、茎干以及总生物量均表现为欧美107杨显著高于小美早杨和毛白杨1316,而小美早杨与毛白杨1316差异不显著。

2) 欧美107杨的相对生长速率显著高于小美早

杨和毛白杨 1316, 欧美 107 杨和毛白杨 1316 的平均叶面积均显著高于小美早杨; 三者净同化速率均存在显著差异, 表现为小美早杨 > 欧美 107 杨 > 毛白杨 1316。就同化产物分配而言, 小美早杨和毛白杨 1316 同化产物向根系的分配比例显著高于欧美 107 杨, 向茎的分配比例则显著低于欧美 107 杨。

3) 小美早杨的总叶面积、单叶面积和比叶面积均显著小于欧美 107 杨和毛白杨 1316, 而后两者间差异不显著。但小美早杨的叶片数量最多, 显著高于欧美 107 杨和毛白杨 1316。欧美 107 杨和小美早杨的净光合速率及叶绿素含量 (SPAD 值) 均显著高于毛白杨 1316。

综上所述, 相较欧美 107 杨, 毛白杨 1316 生长缓慢的主要原因可能是其净光合速率较低, 从而导致净同化速率和相对生长速率较低, 而叶绿素含量较低可能是造成其净光合速率不高的原因之一。小美早杨生长缓慢的原因可能是由于单叶面积较小, 进而导致总叶面积较小, 因此, 虽然其具有较高的净光合速率和净同化速率, 但相对生长速率无法提高。另外, 同化产物向茎的分配比例较低, 也可能是导致小美早杨和毛白杨 1316 生长缓慢的一个原因。

[参考文献]

- [1] 王建红, 车少臣, 邵金丽, 等. 北京杨柳飞絮治理现状、问题与展望 [J]. 北京园林, 2011, 27(1): 48-50.
Wang J H, Che S C, Shao J L, et al. The resent situation, problems and prospect of flying-batt of poplar and willow in Beijing [J]. Landscape Architecture in Beijing, 2011, 27(1): 48-50.
- [2] 苏雪辉, 李喜林, 薛毅, 等. 杨树过敏因素: 花粉与飞絮量的研究 [J]. 林业科技通讯, 2016(2): 6-10.
Su X H, Li X L, Xue Y, et al. A study on sensitization factors: pollen and flying quantity of poplar [J]. Forest Science and Technology, 2016(2): 6-10.
- [3] 刘望舒, 韩林芝, 朱嵘, 等. 杨树雄性不育品种花粉发育过程的细胞学观察 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 43(1): 198-203.
Liu W S, Han L Z, Zhu S, et al. Cytological observation on pollen development of the male sterile poplar variety [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(1): 198-203.
- [4] 刘莹. 我国进口北美木材现状与发展趋势研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
Liu Y. The research on current situation and trend in development of China import timber from North American [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [5] 白玉娥, 乌日罕, 代金玲, 等. 杨树组织培养研究进展 [J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(3): 466-470.
Bai Y E, Wu R H, Dai J L, et al. Research progress on tissue culture of poplar [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(3): 466-470.
- [6] 黄秦军, 苏晓华, 王胜东, 等. 杨树新品种‘渤丰 1 号’杨和‘渤丰 2 号’杨的综合评价 [J]. 林业科学, 2014, 50(5): 75-81.
Huang Q J, Su X H, Wang S D, et al. Integrative evaluation of *Populus × euramericana* cl. ‘Bofeng 1’ and *Populus × euramericana* cl. ‘Bofeng 2’ [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(5): 75-81.
- [7] 康向阳. 请不要对杨树求全责备 [J]. 博览群书, 2019(6): 31-33.
Kang X Y. Please don't demand perfection in poplar [J]. Chinese Book Review Monthly, 2019(6): 31-33.
- [8] 艾吉尔·阿不拉, 李丕军, 王文月. 4 个造林树种缓苗期生理生化特性分析 [J]. 广东农业科学, 2017, 44(3): 80-86.
Aijier A B L, Li P J, Wang W Y. Analysis on physiological and biochemical characteristics of four afforestation trees species during recovering stage [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2017, 44(3): 80-86.
- [9] 李丕军, 李宏, 努尔妮萨. 白榆生长季造林缓苗期生理特性研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2011, 35(1): 139-141.
Li P J, Li H, Nurnisa. Physiological and characteristics of *Ulmus spumila* afforestation on recovering stage [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 35(1): 139-141.
- [10] 刘春洋, 史田, 史国安, 等. 不同移栽时期对‘凤丹’牡丹植株生长效应及其综合评价 [J]. 林业科学, 2019, 55(8): 54-62.
Liu C Y, Shi T, Shi G A, et al. Effects of different transplanting periods on growth of tree peony ‘Fengdan’ seedlings and the comprehensive evaluation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(8): 54-62.
- [11] 朱永涛. 浅析毛白杨栽植后生长障碍及管护技术 [J]. 现代农村科技, 2017(4): 47.
Zhu Y T. Brief analysis of the impediment in growth and management technique of *Populus tomentosa* after plantation [J]. Modern Rural Acience and Technology, 2017(4): 47.
- [12] Xi B Y, Bloomberg M, Watt M, et al. Modeling growth response to soil water availability simulated by HYD RUS for a mature triploid *Populus tomentosa* plantation located on the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 243-254.
- [13] 朱嘉磊, 薄慧娟, 李璇, 等. 不同毛白杨无性系林分蓄积量的长期水氮耦合效应 [J]. 林业科学, 2019, 55(5): 27-35.
Zhu J L, Bo H J, Li X, et al. Long term water-nitrogen coupling effect on stand volume of different clones of *Populus tomentosa* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(5): 27-35.
- [14] 苏晓华, 丁昌俊, 马常耕. 我国杨树育种的研究进展及对策 [J]. 林业科学研究, 2010, 23(1): 31-37.
Su X H, Ding C J, Ma C G. Research progress and strategies of poplar breeding in China [J]. Forest Research, 2010, 23(1): 31-37.
- [15] 张廷桢, 叶宏谋. 毛白杨缓苗期及其解除方法的调查 [J]. 陕西林业科技, 1989(3): 43-44.

- Zhang T Z, Ye H M. Investigation on revival-time and its removing method of *populus tomentosa* [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 1989(3): 43-44.
- [16] 徐振华, 高运茹, 钱金娥, 等. 覆盖物对屋顶绿化基质水分变化和植物生长的影响 [J]. 林业科技开发, 2014, 28(3): 59-62.
- Xu Z H, Gao Y R, Qian J E, et al. The coverings influences on substrate moisture holding and plant growth of the roof greening [J]. China Forestry Science and Technology, 2014, 28(3): 59-62.
- [17] 储博彦, 张全锋, 牛三义, 等. 金叶栉叶槭高接时间对成活率及新梢生长的影响 [J]. 浙江林业科技, 2018, 38(5): 87-91.
- Chu B Y, Zhang Q F, Niu S Y, et al. Effect of grafting in top time of *Acer negundo* 'Aurea' on survival rate and growth of new shoot [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2018, 38(5): 87-91.
- [18] 苟擎峰, 白 龙, 曲 波, 等. 不同氮添加对入侵植物瘤突苍耳和本地近缘植物苍耳及两者杂交种的生长影响 [J]. 草业学报, 2017, 26(5): 51-61.
- Xun Z F, Bai L, Qu B, et al. Effect of nitrogen treatments on growth of the invasive plant *Xanthium strumarium*, the native plant *Xanthium sibiricum*, and their reciprocal crosses [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(5): 51-61.
- [19] 全国明, 刘莹莹, 毛丹鹏, 等. 降雨量变化对入侵植物豚草植株生长的影响 [J]. 生态科学, 2018, 37(2): 138-146.
- Quan G M, Liu Y Y, Mao D J, et al. Effects of precipitation variation on plant growth of invasive *Ambrosia artemisiifolia* [J]. Ecological Science, 2018, 37(2): 138-146.
- [20] 刘春鹏, 刘泽勇, 李向军, 等. 不同造林密度欧美 107 杨用材林最佳采伐期的研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10): 9-14.
- Liu C P, Liu Z Y, Li X J, et al. A study on optimal felling period of timber forest of *Populus* × *euramericana* with different density planting [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(10): 9-14.
- [21] 段 伟, 王保平, 乔 杰, 等. 水肥控制对楸叶泡桐苗期生长和生物量及其分配的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 19-23, 39.
- Duan W, Wang B P, Qiao J, et al. The effects of water and fertilizer control on growth, biomass and distribution of *Paulownia catalpifolia* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(10): 19-23, 39.
- [22] 肖 遥, 陶 冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 929-940.
- Xiao Y, Tao Y, Zhang Y M. Biomass allocation and leaf stoichiometric characteristics in four desert herbaceous plants during different growth periods in the Gurbantünggüt Desert, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(9): 929-940.
- [23] 邱凤英, 肖复明, 伍艳芳, 等. 中幼龄阔柄生长及生物量分配特征研究 [J]. 湖北林业科技, 2019, 48(3): 12-15, 62.
- Qiu F Y, Xiao F M, Wu Y F, et al. Growth and biomass distribution of the middle-aged and young *Phoebe bournei* [J]. Hu-
bei Forestry Science and Technology, 2019, 48(3): 12-15, 62.
- [24] Cao J, Zhang B G, Luo S B, et al. Effect of different irrigation maximums on accumulation and distribution of material in Chinese kale [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 18(3): 629-632.
- [25] 李素慧, 赵雅洁, 王 丽, 等. 石漠化生境中两种不同光合类型植物的生长和生物量分配策略 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 106-111.
- Li S H, Zhao Y J, Wang L, et al. Growth and biomass distribution strategies of two photosynthetic plants in rocky desertification habitats [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2019, 36(4): 106-111.
- [26] 陶 冶, 张元明. 准噶尔荒漠 6 种类短命植物生物量分配与异速生长关系 [J]. 草业学报, 2014, 23(2): 38-48.
- Tao Y, Zhang Y M. Biomass allocation patterns and allometric relationships of six ephemeroïd species in Junggar Basin, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(2): 38-48.
- [27] 薛海霞, 李清河, 徐 军, 等. 沙埋对唐古特白刺幼苗生长和生物量分配的影响 [J]. 草业科学, 2016, 33(10): 2062-2070.
- Xue H X, Li Q H, Xu J, et al. Effects of sand burial on growth and biomass allocation of *Nitraria tangutorum* [J]. Pratacultural Science, 2016, 33(10): 2062-2070.
- [28] Aschan G, Pfanz H. Non-foliar photosynthesis—a strategy of additional carbon acquisition [J]. Flora, 2003, 198: 81-97.
- [29] 杨朗生, 杨 平, 刘芙蓉, 等. 不同地径砧木对山桐子嫁接苗成活及生长特性的影响 [J]. 经济林研究, 2017, 35(1): 97-102, 157.
- Yang L S, Yang P, Liu F R, et al. Effects of root stocks with different ground diameters on survival and growth of grafted *Idesia polycarpa* seedlings [J]. Nonwood Forest Research, 2017, 35(1): 97-102, 157.
- [30] 麻雪艳, 周广胜. 干旱对夏玉米苗期叶片权衡生长的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1758-1769.
- Ma X Y, Zhou G S. Effects of drought on the trade-off growth of leaf traits of summer maize in the seedling stage [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1758-1769.
- [31] Nikolaeva M K, Maevskaya S N, Shugaev A G, et al. Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity [J]. Russian Journal of Physiology, 2010, 57(1): 87-95.
- [32] Guendouz A, Guessoum S, Maamari K, et al. Predicting the efficiency of using the RGB (Red, Green and Blue) reflectance for estimating leaf chlorophyll content of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes under semi arid conditions [J]. American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture, 2012, 6(2): 102-106.
- [33] 张雪悦, 左师宇, 田礼欣, 等. 不同密度下越冬型黑麦产量形成的光合特性差异 [J]. 草业学报, 2019, 28(3): 131-141.
- Zhang X Y, Zuo S Y, Tian L X, et al. Effect of planting density on photosynthetic performance and yield of winter rye [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(3): 131-141.