

DOI: 10.5846/stxb201609301981

冯志培, 杨果果, 郭二辉, 崔秋芳, 裴丙, 杨喜田. 空气断根对侧柏实生苗生物量分配和根系生长的影响. 生态学报, 2017, 37(23): 7854-7861.

Feng Z P, Yang G G, Guo E H, Cui Q F, Pei B, Yang X T. Effect of air root pruning on biomass allocation and root growth in *Platycladus orientalis* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7854-7861.

## 空气断根对侧柏实生苗生物量分配和根系生长的影响

冯志培, 杨果果, 郭二辉, 崔秋芳, 裴丙, 杨喜田\*

河南农业大学林学院, 郑州 450002

**摘要:**为探求林木幼苗生物量分配和根系生长对空气断根的反应,以侧柏(*Platycladus Orientalis*)实生苗为材料,设置空气断根(T)和不断根(CK)处理,研究了空气断根 10、30 d 和 50 d 后对侧柏生物量、根系形态特征及吸收面积的影响。结果表明:(1) T 处理的侧柏幼苗地上生物量、根生物量、总生物量、根长、根表面积、根体积及根尖数在断根 10、30 d 和 50 d 后均大于 CK,且显著扩大了根系总吸收面积和活跃吸收面积。(2)空气断根显著影响了侧柏实生苗的生物量分配格局,其根冠比在整个试验阶段呈先增大后减小的趋势,而 CK 逐渐减小。(3)两种处理的侧柏幼苗根系直径集中在 0—0.5 mm。与 CK 相比,T 处理侧柏随空气断根时间延长,单株根系直径在 0—0.5 mm 的根数量急剧增多,占总根尖数的 79%,根平均长度、根表面积、根体积和根尖数显著增大。(4)生物量参数和根形态参数之间关系密切。根生物量与地上生物量及总生物量呈显著正相关( $P < 0.05$ )。除根系平均直径外,根生物量、地上生物量和总生物量分别与根长、根表面积、根体积、根尖数呈显著正相关,根冠比与地上生物量呈负相关。因此,空气断根有效改善了侧柏幼苗的根系形态特征,提高了吸收面积,显著促进侧柏实生苗在生长早期快速发育。

**关键词:**侧柏实生苗;空气断根;生物量分配;根系生长

## Effect of air root pruning on biomass allocation and root growth in *Platycladus orientalis* seedlings

FENG Zhipei, YANG Guoguo, GUO Erhui, CUI Qiufang, PEI Bing, YANG Xitian\*

College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

**Abstract:** Plant roots are important organs that function in the uptake of water and nutrients from the surrounding soil, and the physiological and morphological traits of roots affect shoot growth. Therefore, the present study assessed the effect of air root pruning for 10, 30, or 50 d on the biomass allocation, root morphology, and root absorption area of juvenile-stage *Platycladus orientalis* seedlings, with intact plants used as controls. The results indicated that (1) root biomass, aboveground biomass, total biomass, root length, root surface area, root volume, and root tip number all increased with air root pruning time. In addition, the total and active absorption areas of the roots significantly increased. (2) Air root pruning significantly affected the biomass allocation pattern of *P. orientalis* seedlings, and the root:shoot ratio initially increased but then decreased, whereas it only decreased in the control. (3) The diameters of most of the *P. orientalis* roots were  $\leq 0.5$  mm. Furthermore, air root pruning improved the length, surface area, volume, and tip number of  $\leq 0.5$  mm roots, when compared to the control, and the roots of this diameter range accounted for 79% of the total root tip number. (4) The biomass and root characteristics of the *P. orientalis* seedlings were closely related. In addition to the average root diameter, the aboveground, root, and total biomasses of the pruned seedlings were positively correlated to root length, surface area, volume, and tip number. However, the root:shoot ratio and aboveground biomass were negatively correlated. Consequently,

基金项目:国家自然科学基金项目(31570613, 41401206);河南省科技创新杰出人才项目(154200510019)

收稿日期:2016-09-30; 网络出版日期:2017-08-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xitianyang@aliyun.com

air root pruning technology could be used to dramatically promote the growth and survival of *P. orientalis* seedlings by improving their root morphology and enhancing the absorption area of their roots during early growing stages.

**Key Words:** *Platycladus orientalis* seedling; air root pruning; biomass allocation; root growth

植被恢复过程中,营造具有与天然林形态和功能相近的植物群落十分重要,而苗木个体是植物群落的基础。如何获得高质量的苗木个体,提高其在恢复植被群落中的竞争力,是亟待解决的植被恢复理论和技术问题。为此,人们开发了多种育苗技术,如播种育苗、无性繁殖育苗和容器育苗等,其中容器育苗应用最为广泛,但它导致苗木根系沿容器壁或容器底部盘旋生长<sup>[1]</sup>。一些研究者对冬青栎(*Quercus ilex* L.)、胭脂虫栎(*Quercus coccifera* L.)<sup>[2]</sup>、欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)<sup>[3]</sup>、美国黑松(*Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia* Engelm.)<sup>[4]</sup>等研究后证实,这类苗木根系分布不均匀<sup>[5-8]</sup>,移栽后成活率极低、稳定性差<sup>[9-10]</sup>,达不到植被恢复的目的<sup>[11-13]</sup>。

根系作为苗木最重要的器官,其形态变化在吸收水分、转化和储藏养分过程中起决定性作用<sup>[9, 14]</sup>。针对容器苗根系盘旋和定植后生长困难的问题,许多研究者利用空气断根技术<sup>[10, 13, 15]</sup>,使苗木根系接近自然生长的特征,培育了高质量苗木。大量关于空气断根与根系关系的研究主要集中在容器类型<sup>[7, 14, 16-17]</sup>、基质配比<sup>[13, 18]</sup>及断根效果<sup>[18-20]</sup>等。目前,Amoroso 和 Chapman 等发现,植物地上、地下生物量对空气断根响应受树种、生长季节等因素影响<sup>[7, 9]</sup>,但 Aghai 对落叶松(*Larix occidentalis* Nutt.)的研究却表明空气断根只增加了苗木根系的木质化和栓化<sup>[21]</sup>,对根生物量并没有影响。植物生物量是评价苗木质量优劣最直观的指标,可直接反映苗木生长的好坏程度<sup>[22]</sup>。因此,围绕空气断根与林木生物量分配和根系生长互作特征的关系的研究十分必要。

侧柏(*Platycladus Orientalis*)是我国北方生态环境脆弱区植被恢复和重建常用的造林树种,其良好的耐旱、抗逆性使其在植被生态恢复中发挥了重要作用。苗木质量是造林成功与否的关键,如何通过改善侧柏根系生长特性和生物量分配格局,提高苗木质量,对实现种植目的尤为重要。因此,本研究以侧柏实生苗为试材,通过比较分析空气断根和不断根侧柏实生苗地上、根生物量及分配和根系形态生理特征,以明确侧柏实生苗生物量和根系生长对空气断根的响应特征,为改善根系质量,提高恢复植被群落质量并促进其在植被恢复过程中更好地发挥生理生态功能提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于郑州市河南农业大学林业试验站(113°42'E, 34°43'N)。该区属于暖温带大陆性气候,年平均气温 14.2℃,最热月(7月)最高温度 43℃,最冷月(1月)最低温度 -17.9℃。全年日照时数大约为 2400 h,平均降水量为 623.3 mm,无霜期 220 d,≥10℃积温 4717℃。

### 1.2 试验材料及设计

试验材料侧柏种子于 2014 年来源于河南省济源市林业局,发芽率为 90%,千粒重(24±2.82)g,带回实验室冰箱 4℃保存。2015 年 3 月 27 号将侧柏种子取出,用 40℃温水浸泡 24 h,置阴凉通风处沙藏 14 d,每天翻动 2 次,保持湿润,露白后于 2015 年 4 月 15 号在种基盘<sup>[23]</sup>(经过改良的固体块状土壤基质,中央留有贯通孔)和普通营养钵进行播种,容器体积 10 cm×10 cm×10 cm(上口径×底×高),每穴 4 粒,上覆 2 cm 基质,轻轻压实。统一放置在离地面 20 cm 的悬空金属网上(图 1),间距 5 cm。待发芽后定苗 1 株,定期浇水和拔草,同时,为避免其他化学物质对试验结果产生影响,试验过程中均不施肥和喷施农药。栽培基质按草炭:蛭石:沙子:壤土=1:1:1:1 混合均匀,栽培基质 pH 为 8.3,有机质含量为 1.94%,N、P、K 含量分别为 93.27、54.77 mg/kg 和 134.91 mg/kg。根据前期试验结果<sup>[24]</sup>,利用种基盘培育侧柏幼苗,育苗 30 d 可实现空气断根的效果。因

此,本试验定义种基盘育苗第 30 d 为空气断根 0 d。

试验采用随机区组设计,设置空气断根处理(T)和不断根处理(对照,CK),于空气断根后 10、30 d 和 50 d 采样,每次采样分别对两个处理各取 50 株(T 处理 50 株,CK 50 株,共 100 株),同时,保证每次采样选取长势基本一致的植株(生长情况见表 1)。迅速将苗木地上部分和根分离,分别编号,用低温冷藏箱带回实验室,每次测定分别选用每种处理 20 株测定生物量,20 株测定根系形态指标,其余 10 株测定根系活跃面积。

### 1.3 形态和生理指标测定

(1) 生物量 采用烘干法测定。用蒸馏水洗干净根系,将各部分装入提前做好标记的信封内,把植株地上部分在 105℃ 杀青后置于 85℃ 下烘干至恒量;根放入烘箱,在 68℃ 下烘干 48 h 至恒量,用分析天平称量(精确到 0.0001 g)。

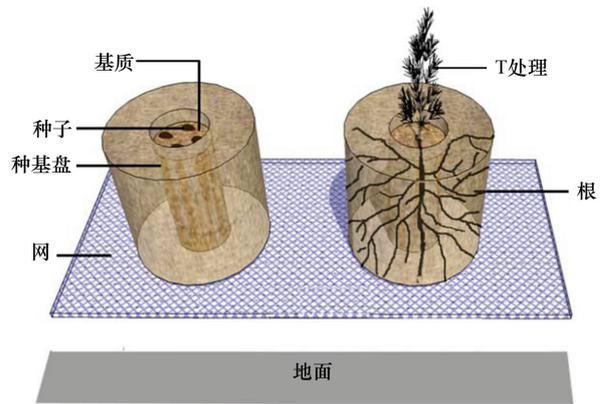


图 1 空气断根侧柏苗的培育

Fig.1 The culture of air root pruning in *P. orientalis* seedlings

表 1 不同处理侧柏实生苗不同时期苗高和地径

Table 1 Height and ground diameter at different time with *P. orientalis* seedlings under different treatments

时间 Time/d	处理 Treatment	苗高 Height/mm	地径 Ground diameter/mm
10	T	41.41±1.86	0.73±0.14
	CK	39.32±1.23	0.68±0.19
30	T	54.92±2.47	0.84±0.04
	CK	51.71±1.89	0.88±0.05
50	T	75.82±3.44	0.95±0.03
	CK	67.58±1.16	0.98±0.04

T:空气断根处理 Air root pruning treatment; CK:对照 Control

(2) 形态指标 使用 EPSON PERFECTION V700 Photo 扫描仪结合 WINRHIZO PRO 2007 根系分析系统(专业版)采集整株根总长、根表面积、根体积、根平均直径和根尖数数据,并根据根系扫描图像的结果将根系划分为 3 个径级:0—0.5,0.5—1 mm 和 1—1.5 mm,分别记录根长、根表面积、根体积和根尖数。

(3) 生理指标 两种处理 3 个时间段分别采取整株根系,用排水法测定根系体积后,用吸水纸小心吸干根系表面水分,采用甲烯蓝吸法<sup>[25]</sup>测定总吸收面积和活跃吸收面积。

### 1.4 数据处理

数据采用 SPSS 21.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 软件对不同处理侧柏生物量、根系形态特征及吸收面积进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和相关性分析,用 Excel 2013 软件制图。

## 2 结果分析

### 2.1 空气断根对侧柏幼苗生物量分配的影响

T 处理侧柏苗的不同器官生物量变化规律一致,均高于 CK。T 处理 10、30 d 和 50 d 的侧柏单株根生物量分别比 CK 显著增加 0.0043、0.0062 g 和 0.0133 g ( $P < 0.05$ ); 10 d 和 50 d 的单株地上生物量比 CK 显著增加 0.0135 g 和 0.0393 g ( $P < 0.05$ ), 30 d 比 CK 高 0.0097 g, 但差异不显著; 10、30 d 和 50 d 侧柏总生物量也明显高于 CK ( $P < 0.05$ ), 分别是 CK 的 1.26、0.33 倍和 0.45 倍。T 处理 10 d 侧柏的根生物量占总生物量 25.52%, 低于 CK 的 27.06%, 而 30 d 的 29.66% 高于 CK 的 26.57%, 50 d 的为 23.80% 和 CK 的 23.08% 无差异; 同样, T 处理 10 d 侧柏地上生物量所占比例比 CK 增加 1.6%, 30 d 的则比 CK 低 3%, 50 d 的与 CK 基本一致, 为 76%。T

处理侧柏实生苗根冠比呈先增大后减小的趋势,而 CK 根冠比逐渐减小。空气断根 10 d 侧柏根冠比比 CK 的减小 0.06,30 d 最大且比 CK 增加了 0.06,50 d 和 CK 的基本一致(图 2)。

## 2.2 空气断根对侧柏实生苗根系形态的影响

T 处理 10、30 d 和 50 d 侧柏实生苗整株根总长、根表面积和根尖数均比 CK 大,以 50 d 最大,分别是 CK 的 1.28、1.08 倍和 1.05 倍;10 d 和 30 d 侧柏根体积比 CK 略高,50 d 基本相同;10 d 和 30 d 侧柏根体积比 CK 略低,50 d 基本与 CK 一致。方差分析表明, T 处理 10、30 d 和 50 d 侧柏根总长分别比 CK 显著增加了 6.16、10.47 cm 和 15.98 cm ( $P < 0.05$ ); 10 d 和 30 d 根表面积均显著高于 CK, 分别增加了 30% 和 34% ( $P < 0.05$ ), 50 d 的虽比 CK 略高 0.6  $\text{cm}^2$ , 但差异不显著; 30 d 根体积比 CK 显著高 0.01  $\text{cm}^3$  ( $P < 0.05$ ), 10 d 和 50 d 的差异不显著; 10、30 d 和 50 d 根直径与 CK 没有显著差异; 10 d 根尖数比 CK 显著多 31 个 ( $P < 0.05$ ), 30 d 和 50 d 分别比 CK 多 7 和 6 个, 但差异不显著(表 2)。

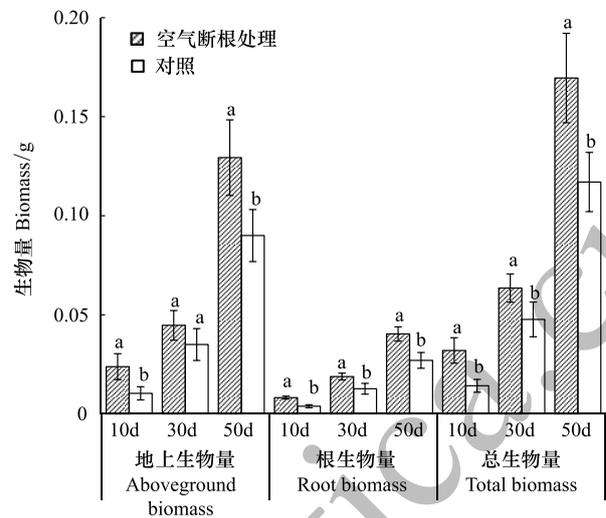


图 2 空气断根对侧柏实生苗生物量分配的影响(平均值 $\pm$ 标准误,  $n=6$ )

Fig.2 Effects of air-pruning on biomass allocation of *P. orientalis* seedlings (mean $\pm$ SE,  $n=6$ )

图中不同小写字母表示同一时间不同处理之间差异显著性 ( $P < 0.05$ )

表 2 空气断根对侧柏根系形态的影响(平均值 $\pm$ 标准误,  $n=6$ )

Table 2 Effects of air-pruning on root morphology of *P. orientalis* seedlings (mean $\pm$ SE,  $n=6$ )

时间/d Time	处理 Treatment	根总长/cm Total root length	根表面积/ $\text{cm}^2$ Root surface area	根体积/ $\text{cm}^3$ Root volume	根平均直径/mm Root average diameter	根尖数 Root tip number
10	T	22.72 $\pm$ 1.26a	2.20 $\pm$ 0.03a	0.017 $\pm$ 0.001a	0.31 $\pm$ 0.02a	57 $\pm$ 6a
	CK	16.56 $\pm$ 1.50b	1.70 $\pm$ 0.1b	0.014 $\pm$ 0.002a	0.33 $\pm$ 0.02a	26 $\pm$ 3b
30	T	43.54 $\pm$ 1.77a	4.68 $\pm$ 0.92a	0.04 $\pm$ 0.002a	0.34 $\pm$ 0.07a	76 $\pm$ 9a
	CK	33.08 $\pm$ 0.82b	3.50 $\pm$ 0.19b	0.03 $\pm$ 0.003b	0.34 $\pm$ 0.02a	68 $\pm$ 6a
50	T	72.12 $\pm$ 2.73a	7.52 $\pm$ 0.89a	0.06 $\pm$ 0.008a	0.35 $\pm$ 0.08a	115 $\pm$ 9a
	CK	56.13 $\pm$ 1.97b	6.91 $\pm$ 0.24a	0.058 $\pm$ 0.004a	0.39 $\pm$ 0.02a	109 $\pm$ 8a

## 2.3 生物量和根系的相关性分析

对空气断根的侧柏幼苗生物量和根系指标进行相关性分析,根生物量和地上生物量、总生物量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 根冠比和地上生物量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。除根系直径外,根长、根表面积、根体积、根尖数均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 说明根系形态参数的增加,在一定程度上可以促进侧柏幼苗生物量的增大(表 3)。

## 2.4 空气断根对侧柏不同根径根长、根表面积、根体积和根尖数的影响

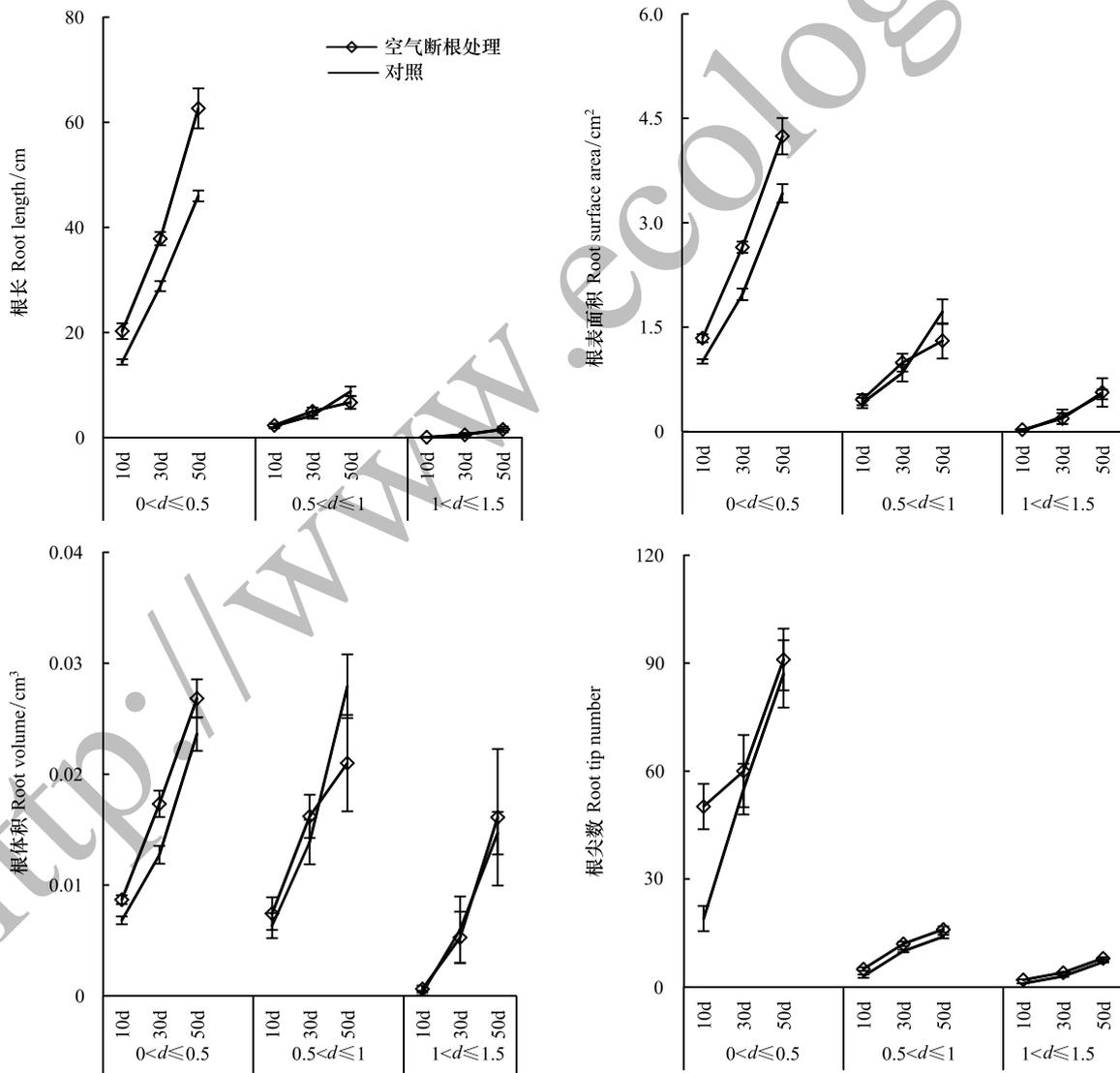
按常用的根系径级划分标准,两种处理侧柏实生苗根系直径主要集中在 0—0.5, 0.5—1 mm 和 1—1.5 mm 的 3 个径级区间,并且随根系径级增加,各级根系的根长、根表面积、根体积和根尖数均减小,但 T 处理侧柏的根系变化趋势更明显。3 种径级中,从单株根系看,0—0.5 mm 的根系数量最多,根平均长度最大,10—50 d 的变化范围为 20.26—62.65 cm, 分别占根总长的 89.18%、86.92% 和 86.87%, 且比同时期 CK 的显著增加 5.87、9.03 cm 和 16.67 cm ( $P < 0.05$ ); 根表面积分别占根总表面积的 61%、56.63% 和 56.44%, 是 CK 的 0.33、0.34 倍和 0.24 倍 ( $P < 0.05$ ); 10 d 和 30 d 根体积比 CK 显著增加了 0.0019  $\text{cm}^3$  和 0.0046  $\text{cm}^3$  ( $P < 0.05$ ); 10 d 根尖数大约占整株根尖数的 96%, 显著大于 CK 31 个, 30 d 和 50 d 则变化不明显(图 3)。0.5—1 mm 和 1—1.5 mm 两个径级的根平均长度、根表面积、根体积和根尖数与 CK 相比,在 3 个测定时期均无显著差异。

表 3 生物量和根系形态的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of biomass and root morphology

参数 Parameter	总生物量 Total biomass	根生物量 Root biomass	地上生物量 Aboveground biomass	根冠比 Root to shoot ratio	根长 Root length	根表面积 Root surface area	根体积 Root volume	根直径 Root average diameter	根尖数 Root tip number
总生物量 Total biomass	1								
根生物量 Root biomass	0.983 **	1							
地上生物量 Aboveground biomass	0.999 **	0.972 **	1						
根冠比 Root to shoot ratio	-0.455	-0.308	-0.495 *						
根长 Root length	0.925 **	0.951 **	0.912 **	-0.261	1				
根表面积 Root surface area	0.911 **	0.944 **	0.896 **	-0.236	0.976 **	1			
根体积 Root volume	0.846 **	0.884 **	0.829 **	-0.192	0.899 **	0.973 **	1		
根直径 Root average diameter	-0.096	-0.080	-0.100	0.025	-0.146	0.054	0.260	1	
根尖数 Root tip number	0.666 **	0.664 **	0.662 **	-0.222	0.777 **	0.727 **	0.632 **	-0.307	1

\* 表示在 0.05 显著性水平下显著相关; \*\* 表示在 0.01 显著性水平下相关

图 3 空气断根对不同根径根长、根表面积、根体积和根尖数的影响(平均值±标准误,  $n=6$ )Fig.3 Effects of air pruning on root length, root surface area, root volume and root tip number of different diameters (mean  $\pm$  SE,  $n=6$ )

d 代表根系直径

## 2.5 空气断根对侧柏实生苗根系总吸收面积和活跃吸收面积的影响

T 处理侧柏实生苗根系总吸收面积和活跃吸收面积随发育进程均呈上升趋势,在 50 d 最大,为 3.52 m<sup>2</sup>和 1.81 m<sup>2</sup>。从单株根系总吸收面积看,T 处理侧柏苗的单株根系总吸收面积与 CK 相比,10 d 差异不显著,30 d 和 50 d 分别比 CK 显著增加 0.38 m<sup>2</sup>和 0.60 m<sup>2</sup>( $P < 0.05$ );活跃吸收面积在整个试验期间均显著高于 CK( $P < 0.05$ ),依次是 CK 的 1.25、1.39 倍和 1.16 倍,占根系总吸收面积的比例为 41.1%、49.1%和 51.7%(图 4)。

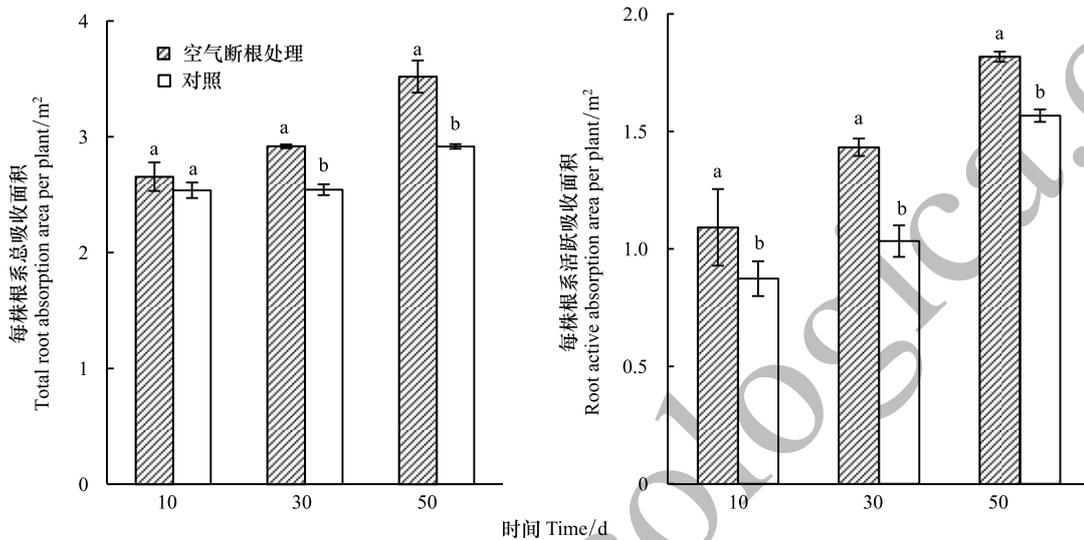


图 4 不同处理下侧柏实生苗根系总吸收面积和活跃吸收面积动态变化(平均值±标准误,  $n = 6$ )

Fig.4 Dynamics of total root absorption area and root active absorption area of *P. orientalis* seedlings under different treatment conditions (mean ± SE,  $n = 6$ )

## 3 结论与讨论

本研究表明,空气断根增加了侧柏实生苗的地上生物量、地下生物量、总生物量、根总长、根表面积、根体积、根尖数、根系总吸收面积和根系活跃吸收面积,根系直径与 CK 相比变化不明显。除此之外,空气断根显著增加了根系直径在 0—0.5 mm 的侧柏根系平均长度、表面积、体积和根尖数,表明空气断根可以直接影响侧柏实生苗侧根数量和吸收面积特征,这与杨喜田、周志春等分别对侧根发达的浅根树种侧柏、红豆杉(*Ormosia hosiei*)研究结果一致<sup>[13, 15, 23]</sup>。

植物生物量是植物在生长发育过程中能量积累的一种特征,植物可以通过生物量分配的模式来适应环境<sup>[26-27]</sup>,改变各组织生物量的分配格局,它和根系的生长特征共同作用会影响苗木的生长速率和移栽后的存活率<sup>[28]</sup>。空气断根显著影响了侧柏的生物量分配格局,T 处理使侧柏根生物量显著高于 CK,这可能是由于侧柏根系最先感受到这一信号,通过主动调整其形态结构,增加 0—0.5 mm 的根系所占比例,增大根表面积,使根系与土壤溶液的接触面积增大,根吸收面积增大,扩大根系吸收水分和养分的空间<sup>[15, 29]</sup>,有效促进侧柏幼苗根系生长,这与井大炜等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。地上生物量也显著高于 CK(30 d 除外),间接表明空气断根促进根系生长的同时,也促进了地上部的生长,可能通过影响幼苗的固碳水平<sup>[30]</sup>,向根系分配更多的物质促进根系生长发育;地上部和根生物量的分配体现出显著差异,这可能是 T 处理改变了侧柏幼苗的生物量分配策略,保证总生物量不断积累,移栽后可有效适应环境变化<sup>[31-32]</sup>。Jacobs 等<sup>[33]</sup>、尹大川等<sup>[22]</sup>研究证实,根生物量较大的苗木,移栽后更易生长和成活,本研究 T 处理使侧柏根生物量大于 CK,间接表明植被恢复中利用空气断根处理的侧柏可能比 CK 更易成活,生长优势更明显<sup>[7, 33-34]</sup>。

根据最优分配理论和功能平衡假说,植物在一定环境条件下能使生长最受限的那部分资源获得增加的组织或器官,得到最优先配置和增加<sup>[35-37]</sup>。10—50 d,侧柏实生苗根冠比经空气断根后呈先增大后减小的趋

势,表明 10—30 d 空气断根对侧柏幼苗根系的作用大于地上部,而 30—50 d 对根系的影响则小于地上部,原因可能是空气断根初期侧柏实生苗主根生长被抑制<sup>[38]</sup>,侧根数量增多,根系进入快速生长阶段,光合产物向根系分配增多,同时,根系活跃面积增大,生理活性增强,吸附在根表面的水分、养分和微量元素更多地转运到细胞内部<sup>[13, 39]</sup>,进一步促进根系生长,最终根冠比增大;30—50 d 根系生长趋于稳定阶段,侧柏实生苗将较多光合产物分配到地上部,根冠比减小,这可在一定程度上减缓水分压力,并被认为是苗木移栽到干旱区时的一种优势<sup>[40]</sup>,尤其对根冠比小,生物量大的松柏类<sup>[41]</sup>。

本研究中,经空气断根的侧柏苗根系形态和生物量等参数与 CK 相比均表现出显著差异,反映了这类侧柏幼苗可通过多方面调节而促进其在生长早期快速发育。同时,空气断根后侧柏实生苗根系与其地上部分生长是否协调,可直观地反映侧柏幼苗的生长状况。因此,侧柏对空气断根的这些适应机制,可有助于幼苗移栽后表现出更大的优势,成为植被恢复时理想的材料。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Biran I, Eliassaf A. The effect of container shape on the development of roots and canopy of woody plants. *Scientia Horticulturae*, 1980, 12(2): 183-193.
- [ 2 ] Tsakalidimi M, Zagas T, Tsitsoni T, Ganatsas P. Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterranean evergreen oak species raised in different container types. *Plant and Soil*, 2005, 278(1-2): 85-93.
- [ 3 ] Nilsson U, Luoronen J, Kolström T, Örlander G, Puttonen P. Reforestation with planting in northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, 25(4): 283-294.
- [ 4 ] Campbell D B, Kiiskila S, Philip L J, Zwiazek J J, Jones M D. Effects of forest floor planting and stock type on growth and root emergence of *Pinus contorta* seedlings in a cold northern cutblock. *New Forests*, 2006, 32(2): 145-162.
- [ 5 ] 袁冬明, 林磊, 严春风, 吴颖, 曹立光, 刘青华, 周志春. 3 种造林树种轻基质网袋容器苗造林效果分析. *东北林业大学学报*, 2012, 40(3): 19-23.
- [ 6 ] 王良桂, 李霞, 杨秀莲. 控根栽培下桂花根系的动态生长与垂直分布特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(4): 43-46.
- [ 7 ] Amoroso G, Frangi P, Piatti R. Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. *HortScience*, 2010, 45(12): 1824-1829.
- [ 8 ] Jelic G, Topić V, Butorac L, Đurđević Z, Jazbec A, Oršanić M. Container size and soil preparation effects on afforestation success of one year old stone pine (*Pinus pinea* L.) Seedlings in Croatian Mediterranean area. *Sumarski List*, 2014, 138(9-10): 463-474.
- [ 9 ] Chapman K A, Colombo S J. Early root morphology of jack pine seedlings grown in different types of container. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2006, 21(5): 372-379.
- [ 10 ] Junior M D, Trazzi P A, Higá A R, Seitz R A. Effect of container size and planting method on growth of a nine-years-old *Pinus taeda* stand. *Scientia Forestalis*, 2013, 41(97): 7-14.
- [ 11 ] Burdett A N. Understanding root growth capacity: theoretical considerations in assessing planting stock quality by means of root growth tests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(8): 768-775.
- [ 12 ] 杨喜田, 霍利娜, 赵宁, 朱红梅, 段玉玲. 种基盘苗与营养钵苗根系生长和形态的差异. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 48-51, 57-57.
- [ 13 ] 周志春, 刘青华, 胡根长, 刘荣松, 陈杏来, 冯建国. 3 种珍贵用材树种轻基质网袋容器育苗方案优选. *林业科学*, 2011, 47(10): 172-178.
- [ 14 ] Gilman E F, Harchick C, Paz M. Effect of container type on root form and growth of red maple. *Journal of Environmental Horticulture*, 2010, 28(1): 1-7.
- [ 15 ] 杨喜田, 佐铺直行, 杨臻, 曾玲玲, 朱璞玲. 不同育苗方式对移栽后侧柏和白榆幼苗根系生长的影响. *生态学报*, 2010, 30(1): 86-92.
- [ 16 ] Mariotti B, Maltoni A, Jacobs D F, Tani J. Container effects on growth and biomass allocation in *Quercus robur* and *Juglans regia* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2015, 30(5): 401-415.
- [ 17 ] Sayer S, Sung M A, Haywood S J S, James D. Longleaf pine root system development and seedling quality in response to copper root pruning and cavity size. *Southern Journal of Applied Forestry*, 2011, 35(1): 5-11.
- [ 18 ] 徐慧洁, 段少文, 杨静慧, 刘艳军, 李双跃, 李建科. 基质和多孔凹凸型诱根钵对 2 种植物生长的影响. *中国农学通报*, 2013, 29(25): 55-60.
- [ 19 ] 刘永安, 陈小勇, 王友芳, 马钰洪, 马伍卡. 攀西地区台湾相思适宜育苗容器和基质. *东北林业大学学报*, 2012, 40(10): 98-102.
- [ 20 ] Marler T E, Willis D. Chemical or air root-pruning containers improve *Carambola*, *Longan*, and *mango* seedling root morphology and initial root

- growth after transplanting. *Journal of Environmental Horticulture*, 1996, 14(2): 47-49.
- [21] Aghai M M, Pinto J R, Davis A S. Container volume and growing density influence western larch (*Larix occidentalis* Nutt.) seedling development during nursery culture and establishment. *New Forests*, 2014, 45(2): 199-213.
- [22] 尹大川, 杨立宾, 邓勋, Chet I, 宋瑞清. 绿木霉对樟子松苗木生长指标及生理生化指标的影响. *北京林业大学学报*, 2015, 37(1): 78-83.
- [23] 杨喜田, 董娜琳, 闫东锋, 佐舖宣行, 赵勇. 不同培育时间侧柏种基盘苗根系生长和分布. *生态学报*, 2011, 31(19): 5818-5823.
- [24] 冯志培, 赵佳宝, 孔玉华, 闫东锋, 杨喜田. 种基盘对侧柏幼苗根系形态和生理特性的影响. *西北林学院学报*, 2015, 30(3): 107-112.
- [25] 李合生. *植物生理生化实验原理和技术*. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [26] Van zandt P A, Tobler M A, Mouton E, Hasenstein K H, Mopper S. Positive and negative consequences of salinity stress for the growth and reproduction of the clonal plant, *Iris hexagona*. *Journal of Ecology*, 2003, 91(5): 837-846.
- [27] 赵春桥, 李继伟, 范希峰, 侯新村, 武菊英, 胡跃高, 刘吉利. 不同盐胁迫对柳枝稷生物量、品质和光合生理的影响. *生态学报*, 2015, 35(19): 6489-6495.
- [28] Pike C C, Warren J C, Montgomery R A. Allometry of early growth in selected and wild sources of white spruce, *Picea glauca* (Moench) Voss. *New Forests*, 2016, 47(1): 131-141.
- [29] 井大炜, 邢尚军, 刘方春, 马海林, 杜振宇, 马丙尧, 于学斗, 朱亚萍. 保水剂-尿素凝胶对侧柏裸根苗细根生长和氮素利用率的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1046-1052.
- [30] 马晓东, 朱成刚, 李卫红. 多枝桧柳幼苗根系形态及生物量对不同灌溉处理的响应. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1024-1032.
- [31] 吕晓敏, 王玉辉, 周广胜, 许振柱, 陈军, 谭丽萍, 刘涛. 温度与降水协同作用对短花针茅生物量及其分配的影响. *生态学报*, 2015, 35(3): 752-760.
- [32] 卓露, 管开云, 李文军, 段世民. 不同生境下细叶鸢尾表型可塑性及生物量分配差异性. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 618-623.
- [33] Jacobs D F, Salifu K F, Seifert J R. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. *New Forests*, 2005, 30(2-3): 235-251.
- [34] Marler T, Musser C. Chemical and air pruning of roots influence post-transplant root traits of the critically endangered *Serianthes nelsonii*. *Plant Root*, 2016, 10: 21-25.
- [35] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 100-111.
- [36] 陈懿, 尹鹏达, 陈伟, 潘文杰. 植物光合产物分配的机理模型的研究进展. *植物生理学报*, 2013, 49(5): 425-436.
- [37] Mccarthy M C, Enquist B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation. *Functional Ecology*, 2007, 21(4): 713-720.
- [38] 杨喜田, 薛帅征, 王向阳, 吴明作, 闫东峰. 侧柏种基盘苗和营养钵苗移栽后根系生长对不同水分亏缺的响应. *中国水土保持科学*, 2014, 12(2): 59-64.
- [39] 高青海, 贾双双, 郭远远. 秸秆集中深还田对设施连作土壤微生物区系和甜瓜根系生长的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1447-1452.
- [40] Villar-Salvador P, Planelles R, Enriquez E, Rubira J P. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships in the Mediterranean oak *Quercus ilex* L. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(2-3): 257-266.
- [41] Williams H M, South D B, Webb A. Effects of fall irrigation on morphology and root growth potential of loblolly pine seedlings growing in sand. *South African Forestry Journal*, 1988, 147(1): 1-5.