

断根对杨树切口处细根序级结构与形态特征的影响*

井大炜¹ 王明友^{2**} 马海林³ 杜振宇³ 刘方春³ 董玉峰³

¹德州学院资源环境与规划学院 德州 253023

²德州学院生态与园林建筑学院 德州 253023

³山东省林业科学研究院 济南 250014

摘要 为探讨断根对欧美I-107杨切口处细根序级结构和形态特征的作用效果,通过大田试验,研究4-2(4倍胸径两侧)、6-2(6倍胸径两侧)、8-2(8倍胸径两侧)、10-2(10倍胸径两侧)和12-2(12倍胸径两侧)等不同断根处理对杨树切口处1-5级根的分支比例、直径、根长和比根长的影响。结果表明,同对照(未断根)相比,各断根处理的细根不同序级分支比例均呈升高的趋势,其中8-2处理的各分支比例均显著高于其他处理。随着根序的升高,各处理的细根直径和根长逐渐增大,而比根长却减小。在断根处理中,8-2处理1-2级根的直径和根长最小、比根长最大,而3-5级根的直径和根长最大、比根长最小,并均与其他处理差异达显著水平;4-2、6-2、10-2和12-2处理1-2级根之间的直径、根长和比根长均无显著性差异;而4-2和12-2处理3-5级根的直径和根长显著小于6-2和10-2处理,比根长则显著高于6-2和10-2处理。此外,8-2处理的材积平均增长率显著高于其他处理。综上,断根强度对杨树切口处不同根序细根的分支结构和形态特征具有显著的影响,其中8-2处理更利于切口处细根的萌发,并能显著增强根系的吸收能力与运输功能,进而有助于促进林木的生长;本研究结果可为杨树人工林的高产栽培提供技术参考。(图2 表1 参29)

关键词 欧美I-107杨;断根;细根;根序;形态特征

CLC S792.110.5

Effect of root pruning on the architecture and morphological characteristics of different fine root orders in the incision of poplar trees*

JING Dawei¹, WANG Mingyou^{2**}, MA Hailin³, DU Zhenyu³, LIU Fangchun³ & DONG Yufeng³

¹ College of Resource, Environment and Planning, Dezhou University, Dezhou 253023, China

² College of Ecology and Landscape Architecture, Dezhou University, Dezhou 253023, China

³ Shandong Academy of Forestry, Jinan 250014, China

Abstract This study investigated the effects of root pruning on the architecture and morphological characteristics of different fine root orders in the incision of *Populus euramericana* 'Neva.' A field experiment was designed and performed. The root systems of five-year-old poplars were manually pruned with a sharp spade at four (4-2), six (6-2), eight (8-2), ten (10-2), and twelve (12-2) times the diameter at breast height (DBH) respectively, along both inter-row sides, to investigate the effects of different root pruning treatments on branching ratios, diameter, length, and specific root length of the first five root orders in poplar incision. The results showed that in comparison with the unpruned control (CK), each root pruning treatment caused an increase in the branching ratios of fine root orders, which were highest in roots under the 8-2 treatment. With the increase of root order, root diameter and length increased gradually, while the specific root length decreased. The root diameter and length of the first two orders of 8-2 treated roots were the lowest, and the specific root length was the highest in the same group. However, a reverse trend was observed from the third to fifth root orders; all of which showed statistically significant differences in characteristics compared with the other treatments. There was no significant difference in root diameter, length, or specific root length among the treatments of 4-2, 6-2, 10-2, and 12-2. Root diameter and length from the third to fifth root orders under the 4-2 and 12-2 treatments were significantly lower than those of roots under the 6-2 and 10-2 treatments, whereas the specific root lengths were notably higher. Additionally, the average increase in the volume of 8-2 treated roots was significantly higher than the volume of roots under other treatments. To sum up, pruning intensity significantly affects the architecture and morphological characteristics of different branch orders of fine roots during the incision of *P. euramericana* 'Neva.' Root pruning at a

收稿日期 Received: 2018-07-10 接受日期 Accepted: 2018-07-24

*国家自然科学基金项目(31500513)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31500513)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: nwmy_sddz@163.com)

distance of eight times the DBH along both inter-row sides is more beneficial to the germination of fine roots in the incision and can significantly enhance the absorption ability and transport function of root systems, thus promoting the growth of *P. euramericana* 'Neva'. This study provides technical reference for the high-yield cultivation in poplar plantations.

Keywords *Populus euramericana* 'Neva'; root pruning; fine root; root order; morphological characteristics

杨树是一种重要的人工用材树种。在中国,以欧美杨(*Populus euramericana*)为代表的杨树速生丰产林是典型的工业用材林种之一^[1-2]。当杨树林分达到郁闭状态后,其地下根系便交缠在一起致使杨树变为“小老树”,并对根系生长有显著抑制效应^[3-4]。此时期的杨树根系逐渐衰老,根毛快速脱落,导致根系的吸收能力大幅度下降^[5]。断根是通过调控根系生长来改变植物生殖生长与营养生长、地上部与地下部过程的一种栽培方法^[6]。研究表明,断根可达到控冠的效果,使之适应果树矮化密植栽培的要求,这在梨树^[7]、苹果树^[8]、桃树^[9]等果树上已得到很好应用。同时对冬枣断根的研究表明^[10],断根能明显刺激切口处萌发出大量细根。课题组前期针对杨树郁闭林分已开展了断根的初步研究^[6],发现适度采用断根措施对杨树郁闭林分根际土壤理化性状与微生物活性具有显著的改善效应。可见,目前许多研究者关于断根已开展了大量的探索研究工作,但针对杨树切口处不同根序细根形态特征的研究尚未见报道。

林木细根是植物摄取养分与水分的重要渠道^[11-13]。多年来,大多数学者均简单地把根系分成细根(直径<2 mm)与粗根(直径>2 mm)两部分,并主观认为直径<2 mm根具有完全一致的生理功能。而近期的研究则发现此部分根系是由不同的分枝等级(即根序)所构成,且不同根序细根表现出显著的生理功能差异^[14-15]。比如,1级根与4-5级根的氮含量和寿命差异显著^[16-17]。这说明以往借助直径大小来区分细根与粗根的方法忽略了根系结构与功能的内部联系^[18]。同时,细根形态特征与功能特性紧密相关^[14]。根的分支或分支比是一个重要的结构参数,分支比既可以调控根的结构,还能指示分支密度与在不同序级间分支的分割^[15];根长是根系生长发育的主要特征之一^[17],而细根比和根长表征单位生物量上的细根长度,可作为环境变化的指示器^[15]。可见,探究不同根序细根的形态特征对于理解与掌握根系结构与功能的内在关系具有重要的理论指导意义^[16]。为此,本研究以郁闭的5年生欧美I-107杨为研究对象,开展树干不同距离处器械断根措施对杨树人工林切口处细根序级结构与形态特征及生长的影响研究,旨在明确不同根序细根促进林木生长的内在机理,以期为林木根系地下管理提供理论基础,也为杨树人工林的高产栽培提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验地点设置在山东省德州市二屯镇李庄村,地处北纬36°24'、东经115°45',年均降雨量与年均气温分别为547.5 mm与12.9℃。供试土壤为潮土,土壤碱解氮、速效磷与速效钾含量分别为34.72、14.31与86.08 mg/kg,有机质含量为11.23 g/kg。所用化肥为农林常用的尿素、过磷酸钙与硫酸钾,肥料用量为常规施肥量。杨树为郁闭的5年生I-107欧美杨,株行距

4 m×3 m,南北行向,林木生长均匀,平均树高与胸径分别为12.78±0.39 m与12.31±0.32 cm。

1.2 试验设计

试验于2015年4月13日进行,采用随机区组设计,每个小区30棵树(6棵/行×5行),重复3次,即每个处理包括90棵树。考虑到杨树根系水平分布状况并结合前期的研究^[3-4,6],本试验共设6个处理,分别为未断根处理(CK)、4倍胸径两侧断根(4-2)、6倍胸径两侧断根(6-2)、8倍胸径两侧断根(8-2)、10倍胸径两侧断根(10-2)和12倍胸径两侧断根(12-2);各断根处理分别在距树干基部4倍、6倍、8倍、10倍与12倍胸径处的东西方向垂直地面向下切断侧根与须根,其中12倍胸径断根采用粗铁丝标记,以便识别和采集根系。每个断根处理的开沟宽度与深度分别为100 cm与40 cm,并将挖出来的土回填夯实;同时,断根时切口要平滑,以利于伤口愈合与须根的生长。日常管理同大田常规措施保持一致。

1.3 根系采样与分级

2016年11月9日,在每个小区,去掉东西两侧的保护行和南北两端的边缘树,选取中间的12棵树作为样树,进行细根和根际土采集,重复3次。参照Guo等的完整土块法^[16]用铁铲挖取每棵样树切口处萌发出的根系(即在每棵样树相应的切口处挖取30 cm×30 cm×30 cm大小的土体,且不同处理挖取的相对位置保持一致),并放置在湿纱布中以保持其活性。依据Pregitzer等的分级方法^[18],将根系分为1-5级细根;然后计算出细根数量和各分支水平分支比例,分支比例=低级根数量/高级根数量^[15]。剩余的根系依据相同的方法进行分级处理,不同等级的根经处理后分别放入对应的玻璃皿中,冷藏保存^[15]。

1.4 根系样品的形态测定

先用数字化扫描仪Espon scanner对分级处理好的根系进行扫描(各序级均3次重复),扫描完成后运用Win RHIZO (Pro 2005c)根系图像软件来分析图像的形态指标,各级细根扫描后的数量、直径与长度等参数通过图片分析可直接获得,扫描完成后称量所有根系不同级别的湿重并记录,然后将所有样品放入65℃烘箱48 h烘至恒重,计算出各个序级的干重^[14]。测定出平均根长和平均比根长数据,计算公式为:平均根长=总长度/细根数量;平均比根长=总长度(m)/干重(g)^[14]。平均每个处理1-5级根分别测定3 600个、1 800个、500个、200个和100个。

1.5 材积生长率的计算

在2015年4月13日与2016年11月9日分别测定所有试验林木的胸径 d 与树高 h ,用公式 $V = 3.14d^2hf/4$ ($f = 0.42$) 计算材积;采用普雷斯勒公式^[6]计算材积平均生长率:

$$P_V = \frac{(V_1 - V_2) \times 200}{(V_2 + V_1) \times n} \times 100\%$$

其中, P_V 表示材积生长率, V_1 、 V_2 分别为间隔 n 年前与 n 年后测

得的总材积 (m^3), n 为两次测定的间隔年数。

1.6 数据分析

采用SPSS 23.0统计软件进行数据统计, 利用双因素方差分析法 (Two-way ANOVA) 与最小显著差异法 (LSD) 比较不同处理组数据的差异, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 分支比例

从表1可见, 断根使杨树切口处细根的不同序级分支结构呈现出一定的规律。不同断根处理的各分支比例变化范围为2.05-4.92, 数据表现出先降低后升高再降低的变化趋势, 且1、2级之间的比例均达到最大值。通常分支比例决定着不同序级独立根的数量, 本研究中, 各序级根数占总数量的比例均是1级根所占比例最大 (60%-80%), 其次是2级根 (10%-20%)。方差分析表明, 不同断根强度的各分支比例较CK均显著升高 (4-2处理的4、5级间的比例除外)。在各个断根处理中, 8-2处理的各分支比例均最大, 并显著高于其他处理; 其次为10-2处理; 而6-2与12-2处理之间的各分支比例均无显著性差异, 但均明显高于4-2处理。以上分析可知, 不同断根措施对杨树切口处细根的分支比例具有显著的影响, 其中8-2处理较其他处理能明显提高切口处细根的分支比例。

表1 断根对杨树切口处细根各分支水平分支比例的影响
Table 1 Effects of root pruning on the branching ratios of each level in the incision of poplar

处理 Treatment	分支水平 Branching level				平均值 Average
	1-2	2-3	3-4	4-5	
CK	2.51 ± 0.12e	2.17 ± 0.35e	2.41 ± 0.19e	2.05 ± 0.23c	2.29 ± 0.41c
4-2	2.76 ± 0.29d	2.25 ± 0.19d	2.61 ± 0.46d	2.07 ± 0.51c	2.42 ± 0.37c
6-2	3.18 ± 0.15c	2.57 ± 0.21c	2.99 ± 0.17c	2.37 ± 0.45b	2.78 ± 0.52b
8-2	4.92 ± 0.63a	3.27 ± 0.10a	3.76 ± 0.25a	2.91 ± 0.37a	3.72 ± 0.16a
10-2	3.57 ± 0.22b	2.96 ± 0.16b	3.30 ± 0.67b	2.43 ± 0.76b	3.07 ± 0.33b
12-2	3.11 ± 0.18c	2.58 ± 0.27c	3.03 ± 0.56c	2.32 ± 0.39b	2.76 ± 0.69b

数据为平均值 ± 标准差, 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Data are average value ± standard deviations. Column values followed by different letters are significantly different among the treatments ($P < 0.05$).

2.2 平均直径

由图1A可见, 不同处理下细根平均直径均随根序增加而增大。其中, 1级根的直径最小 (0.18-0.33 mm), 5级根直径最大 (0.56-0.96 mm)。同时, 各处理前2级根序的直径均显著小于后3级。同CK相比, 不同断根处理1-5级根的直径均明显减小。在断根处理中, 8-2处理1-2级根的直径最小, 而3-5级根的直径最大, 并均与其他处理呈显著性差异; 其他断根处理1-2级根的直径无显著性差异, 而4-2和12-2处理的3-5级根直径较小, 且两者之间差异不显著, 但显著小于6-2、10-2处理。由此可见, 不同断根措施对杨树切口处1-5级细根平均直径的作用效果差异显著, 其中8-2处理相比其他断根能使1-2级根变细, 而使3-5级根变粗。

2.3 平均根长

由图1B可见, 各个处理的细根平均根长均随根序增加而增大。其中, 1级根的平均根长最短 (6.9-12.6 mm), 5级根的

平均根长最长 (69.2-121.5 mm), 且1-5级根根长之间的差异均达显著水平。CK的不同根序细根的平均根长均为最长, 并与其他处理之间呈显著性差异。在各个断根处理中, 8-2处理的1-2级根的平均根长显著小于其他断根处理, 而3-5级根的平均根长则明显大于其他断根处理。同时可见, 4-2、6-2、10-2和12-2处理之间1-2级根的平均根长均无显著性差异, 而4-2与12-2处理之间的3-5级根平均根长差异不显著, 但显著小于6-2和10-2处理。同时从图1C可知, 各个处理前3级根的累积根长与前5级根总根长的比例均大于80%。由此可知, 断根对杨树切口处萌发出的各级根序细根平均根长具有一定影响, 且在不同断根处理中, 8-2处理更利于促使切口处3-5级根的生长。

2.4 平均比根长

从图1D可见, 不同处理的细根平均比根长均随根序的增加而减小。其中, 1级根的比根长最高 (57.16-126.35 m/g), 5级根比根长最低 (4.93-12.89 m/g)。与CK相比, 各个断根处理均显著增加了不同根序细根的比根长。在断根处理中, 8-2处理的1-2级根比根长最高, 并显著高于其他断根处理, 而3-5级根比根长则明显低于其他断根处理; 4-2、6-2、10-2和12-2处理之间的1-2级根比根长均无显著性差异; 4-2与12-2处理的3-5级根比根长之间差异不显著, 但显著高于6-2和10-2处理。综上, 不同断根措施较对照均显著增加了切口处1-5级根的平均比根长, 且呈现出截然不同的作用效果, 其中8-2处理中1-2级根比根长显著增加, 而3-5级根比根长显著减小。

2.5 材积平均生长率

从图2可知, 不同处理材积平均生长率的变化趋势为8-2 > 10-2 ≈ 12-2 ≈ CK > 6-2 > 4-2, 其中8-2处理的材积平均生长率为59.37%, 分别较CK、4-2、6-2、10-2和12-2处理显著高出43.82%、86.93%、62.57%、41.63%和42.41%; 依次是10-2、12-2与CK处理, 三者之间均无显著性差异; 而6-2处理较CK显著降低11.53%, 4-2处理相比CK显著降低23.06%。综上, 8-2处理对杨树郁闭林材积生长的增产效应最显著。

3 讨论

3.1 断根与细根结构

植物相对生长理论^[19-20]假设整个根系中分支比例是固定不变的, 而本研究结果表明, 断根使杨树切口处1-5级根分支比例的变化范围为2.05-4.92。这与Fahey和Hughes^[21]针对美国北方阔叶林树种以及熊德成等^[15]关于细柄阿丁枫 (*Altingia gracilipes*)、沉水樟 (*Cinnamomum micranthum*) 和米槠 (*Castanopsis carlesii*) 的研究结果基本一致。这说明植物相对生长理论并非适合于所有树种, 特别是低级根可能会受到根际生物体的直接影响, 有关研究还发现可能是因为它们与菌根密切相连而具有独特的解剖特点^[22-23]。本试验中1、2级根在细根总数量上占据了明显优势, 前人的研究也得出了类似的结果^[14, 24]。而低级根在根系数量上呈现出的绝对优势, 与它们自身的结构与功能均有一定关联^[25]。本试验还得出, 对照的各分支比例均最低, 这可能与对照未断根, 从而在相应位置的细根数和分叉较少有关。在不同断根强度中, 8-2处理的各分支比例均最高, 主要是由于该措施能促使切口处萌发大量新根, 且不同根序的细根数量均显著多于其他处理^[6]。

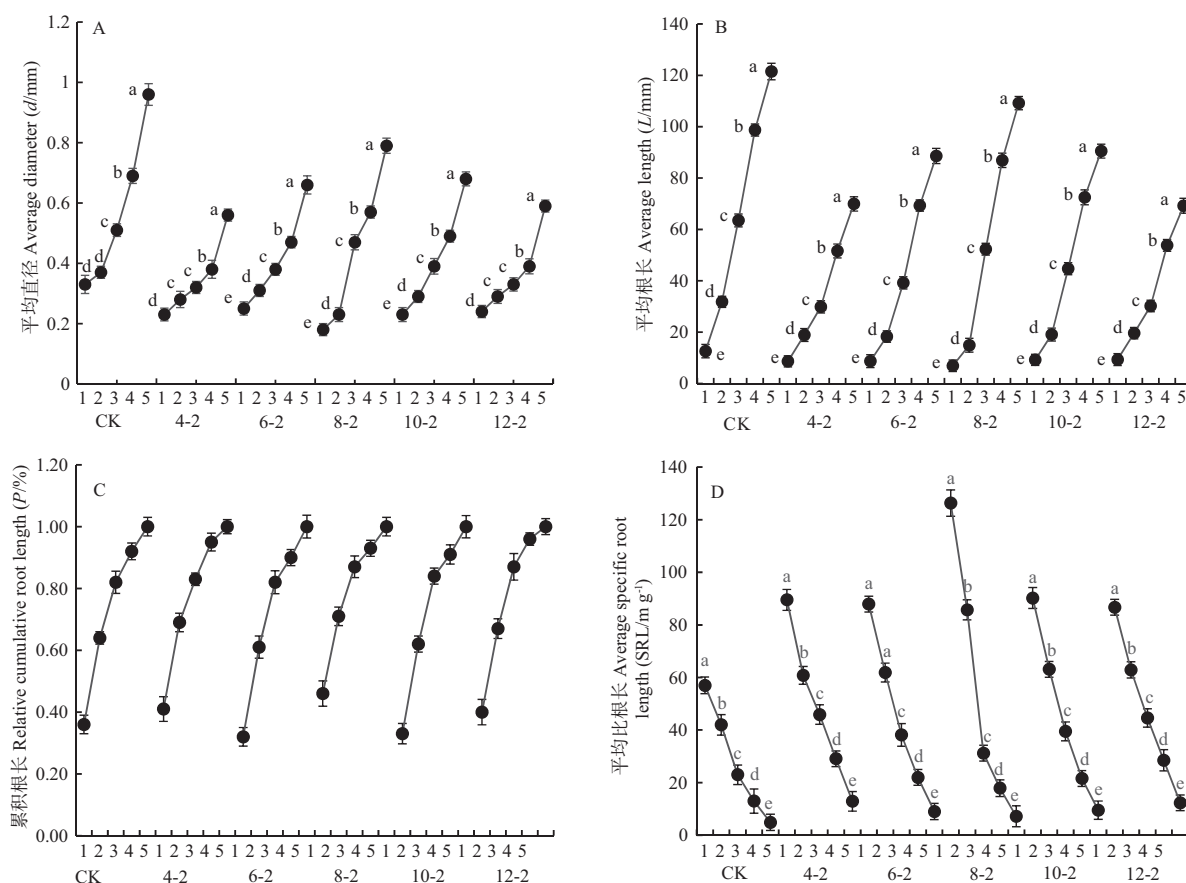


图1 断根对杨树切口处1-5级根平均直径 (A)、平均根长 (B)、累积根长 (C) 和平均比根长 (D) 的影响。数据为平均值 ± 标准差; 小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 Effects of root pruning on the average diameter (A), average length (B), relative cumulative root length (C), and specific root length (D) of the first five order roots in the incision of poplar. Data are average value ± standard deviations. Different small letters show significantly different among the treatments ($P < 0.05$).

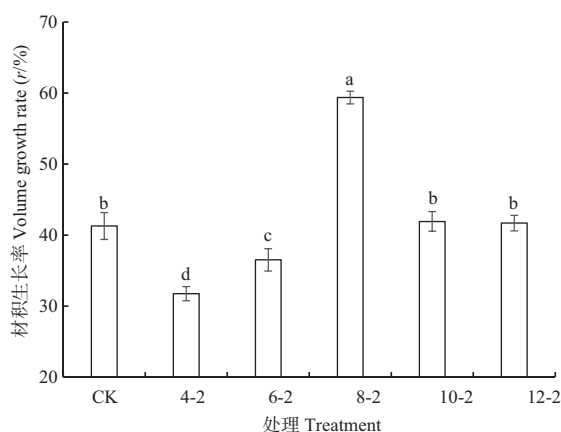


图2 断根对杨树材积生长率的影响。

Fig. 2 Effect of root pruning on volume growth rate of poplar.

此外, 4-2处理的各分支比例均显著低于其他断根处理, 这主要是由于4-2处理的断根距离树干最近, 断根强度最大, 对树体本身造成了较大伤害, 从而使切口处的恢复明显滞后, 导致萌发出的新根数量较少。

3.2 断根与细根形态

直径、根长与比根长是表征林木细根形态与功能的重要

指标^[17, 26]。本研究表明, 各断根处理使杨树人工林切口处萌发出细根的平均直径与根长分别随根序的升高而增粗与增长, 但比根长则随着根序的增加而减小, 且1级根平均直径最小、根长最短、比根长最高, 5级根则相反。这与王祖华等^[17]针对杉木人工林以及蔡倩颖和王迪海^[27]关于陕北枣树‘七月鲜’细根形态的研究结果相一致。本研究参照Pregitzer等的分级方法^[18]表明, 对照的不同根序细根比根长最低, 并显著低于各断根处理; 而在不同断根处理中, 8-2处理的1-2级根的直径最小、单个根长最短、比根长最高, 而3-5级根直径最大、单个根长最长、比根长最低。这可能与8-2处理更利于刺激切口处新根的萌发有关, 使1-2级根数量较多且较细; 同时由于该断根措施对林木根际微域环境有一定的改善效应, 可以明显促使根系分泌物的增多^[6]和微生物活性的提升^[3, 6]; 且有助于增强土壤的供肥性^[6], 从而更利于根系的快速生长, 使得3-5级根变得较粗。有研究^[27-28]表明, 低级根(1-2级)主要承担土壤养分与水分的吸收, 而高级根(3-5级)主要担负运输与储藏的功能。1-2级根直径越小, 其吸收能力越强; 3-5级根直径越大, 木质化结构越完整, 运输功能则越强^[29]。说明8-2处理能显著增强根系的吸收能力与运输功能, 进而有利于促进林木的生长。本试验还发现, 4-2和12-2处理3-5级根的

直径、根长显著小于6-2和10-2处理, 而比根长显著高于6-2和10-2处理, 这可能与4-2处理的断根对杨树自身造成的伤害最大, 明显延长了切口处的恢复时间, 导致萌发新根的时间较晚有关; 而12-2处理的断根距离树干最远, 断根强度较弱, 导致断根对切口处的刺激作用很有限, 从而使萌发出新根的时间明显滞后。以上分析可见, 根系形态与根序之间有着紧密的内在联系。

此外, 8-2处理相比对照可以显著促进杨树材积的生长, 并对材积平均生长率的增幅最大。究其原因可能与细根序级结构和形态特征的改善有密切的关联, 8-2处理可以显著增强根系的吸收能力与运输功能, 进而明显提升土壤的供肥性^[6], 有利于林木的生长。由此可知, 不同根序细根的分枝结构与形态特征是促使杨树增产的内在因素, 也进一步验证了断根强度的选择具有决定性作用。同时, 杨树切口处不同根序细根的化学计量特征亦与材积生长有一定联系, 这有待于后期进一步研究。

4 结论

8-2 (8倍胸径两侧) 处理的各分支比例显著高于其他处理, 且1-2级根的直径和根长最小、比根长最大, 而3-5级根的直径和根长最大、比根长最小; 4-2 (4倍胸径两侧)、6-2 (6倍胸径两侧)、10-2 (10倍胸径两侧) 和12-2 (12倍胸径两侧) 处理1-2级根之间的直径、根长和比根长均无显著性差异, 但4-2和12-2处理3-5级根的直径和根长明显小于6-2和10-2处理, 比根长则显著高于6-2和10-2处理。同时, 8-2处理的材积平均生长率显著高于其他处理。综合分析认为, 8倍胸径两侧的断根措施更利于杨树切口处细根的萌发, 并能显著增强根系的吸收能力与运输功能, 进而有助于促进林木的生长。此外, 关于杨树切口处不同根序细根的解剖结构与化学计量特征有待进一步研究。

参考文献 [References]

- 1 Wu Y, Wang WJ, Wang Q, Zhong ZL, Pei ZX, Wang HM, Yao YL. Impact of poplar shelterbelt plantations on surface soil properties in northeastern China [J]. *Can J For Res*, 2018, **48**: 559-567
- 2 王文波, 马雪松, 董玉峰, 王华田, 王延平, 伊文慧. 杨树人工林连作与轮作土壤酚酸降解细菌群落特征及酚酸降解代谢规律[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22** (5): 815-822 [Wang WB, Ma XS, Dong YF, Wang HT, Wang YP, Yi WH. Community characteristics and degradation metabolism regulation of soil phenolic acid degrading bacteria in poplar plantations under continuous cropping and crop rotation [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (5): 815-822]
- 3 Du ZY, Xing SJ, Ma BY, Liu FC, Ma HL, Wang QH. Effects of root pruning on the growth and rhizosphere soil characteristics of short-rotation closed-canopy poplar [J]. *For Syst*, 2012, **21**: 236-246
- 4 井大炜. 不同栽培措施对欧美I-107杨的增长效应及作用机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013 [Jing DW. Studies on growth promotion and relevant mechanism of different cultivation measures on poplar clone 107 (*Populus euramericana* cv. 'Neva') [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013]
- 5 李夏. 根剪措施对欧美I-107杨根际土壤生物学特征的短期影响[J]. *水土保持通报*, 2014, **34** (5): 202-207 [Li X. Short-term effects of root pruning on biological characteristics in rhizosphere soil of poplar clone 107 [J]. *Bull Soil Water Con*, 2014, **34** (5): 202-207]
- 6 Jing DW, Liu FC, Wang MY, Ma HL, Du ZY, Ma BY, Dong YF. Effects of root pruning on the physicochemical properties and microbial activities of poplar rhizosphere soil [J]. *PloS ONE*, 2017, **12** (11): e0187685
- 7 Wang YF, Bertelsen MG, Petersen KK, Andersen MN, Liu FL. Effect of root pruning and irrigation regimes on leaf water relations and xylem ABA and ionic concentrations in pear trees [J]. *Agric Water Manage*, 2014, **135**: 84-89.
- 8 吴海芹. 限根栽培对苹果幼树生长发育及相关生理机制影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017 [Wu HQ. Effects of root restriction on development and related physiological mechanisms of young apple trees [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017]
- 9 Pokharel R, Marahatt SP, Handoo ZA, Chitwood DJ. Nematode community structures in different deciduous tree fruits and grape in Colorado, USA and impact of organic peach and apple production practices [J]. *Eur J Soil Biol*, 2015, **67**: 59-68
- 10 Yang SJ, Du XY, Yu Y, Zhang ZL, Sun XY, Xing SJ. Effects of root pruning on physico-chemical characteristics and biological properties of winter jujube rhizosphere soil [J]. *Plant Soil Environ*, 2011, **57**: 493-498
- 11 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[J]. *应用生态学报*, 2016, **27** (4): 1046-1052 [Jing DW, Xing SJ, Liu FC, Ma HL, Du ZY, Ma BY, Yu XD, Zhu YP. Effects of gel made by super absorbent polymers and urea on fine root growth and nitrogen use efficiency of *Platycladus orientalis* bareroot seedlings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27** (4): 1046-1052]
- 12 苏瑾, 王迪海. 黄土区不同林龄刺槐人工林细根的衰老生理特征[J]. *生态学报*, 2016, **36** (14): 4423-4429 [Su J, Wang DH. Physiological characteristics and senescence of fine roots in *Robinia pseudoacacia* plantations of different forest ages in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (14): 4423-4429]
- 13 井大炜, 王明友, 张红, 李士平. 蚯蚓粪配施尿素对豇豆根系特征与根际土壤腐殖质的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, **48** (1): 212-219 [Jing DW, Wang MY, Zhang H, Li SP. Effects of vermicompost co-applied with urea on root characteristics and humus in rhizosphere soil of cowpea [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2017, **48** (1): 212-219]
- 14 师伟, 王政权, 刘金梁, 谷加存, 郭大立. 帽儿山天然次生林20个阔叶树种细根形态[J]. *植物生态学报*, 2008, **32** (6): 1217-1226 [Shi W, Wang ZQ, Liu JL, Gu JC, Guo DL. Fine root morphology of twenty hardwood species in Maoershan natural secondary forest in northeastern China [J]. *J Plant Ecol*, 2008, **32** (6): 1217-1226]
- 15 熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 卢正立, 陈光水, 杨玉盛. 亚热带6种树种细根序级结构和形态特征[J]. *生态学报*, 2012, **32** (6): 1888-1897 [Xiong DC, Huang JX, Yang ZJ, Lu ZL, Chen GS, Yang YS. Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (6): 1888-1897]
- 16 Guo DL, Mitchell RJ, Hendricks JJ. Fine root branch orders respond

- differentially to carbon source sink manipulations in a longleaf pine forest [J]. *Oecologia*, 2004, **140**: 450-457
- 17 王艳, 钟全林, 徐朝斌, 张中瑞, 程栋梁. 短期氮磷配施对刨花楠细根形态及其土壤微生物的影响[J]. 生态学报, 2018, **38** (7): 2271-2278 [Wang Y, Zhong QL, Xu CB, Zhang ZR, Cheng DL. Effect of adding a combination of nitrogen and phosphorus on fine root morphology and soil microbes of *Machilus pauhoi* seedling [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (7): 2271-2278]
 - 18 Pregitzer KS, DeForest JL, Burton AJ, Allen MF, Ruess RW, Hendrick RL. Fine root architecture of nine north American trees [J]. *Ecol Monogr*, 2002, **72**: 293-309
 - 19 West GB, Brown JH, Enquist BJ. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems [J]. *Nature*, 1999, **400** (6745): 664-667
 - 20 Fitter AH. Morphometric analysis of root systems: application of the technique and influence of soil fertility on root system development in two herbaceous species [J]. *Plant Cell Environ*, 1982, **5** (4): 313-322
 - 21 Fahey TJ, Hughes J W. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH [J]. *J Ecol*, 1994, **82** (3): 533-548
 - 22 尤健健, 张文辉, 邓磊, 余碧云, 李罡, 何婷, 樊蓉蓉. 间伐对黄龙山油松中龄林细根空间分布和形态特征的影响[J]. 生态学报, 2017, **37** (9): 3065-3073 [You JJ, Zhang WH, Deng L, Yu BY, Li G, He T, Fan RR. Effects of thinning intensity on fine root biomass and morphological characteristics of middle-aged *Pinus tabulaeformis* plantations in the Huanglong Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (9): 3065-3073]
 - 23 王文娜, 王燕, 王韶仲, 王政权, 谷加存. 氮有效性增加对细根解剖、形态特征和菌根侵染的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27** (4): 1294-1302 [Wang WN, Wang Y, Wang SZ, Wang ZQ, Gu JC. Effects of elevated N availability on anatomy, morphology and mycorrhizal colonization of fine roots: A review [J]. *Chin J Applied Ecol*, 2016, **27** (4): 1294-1302]
 - 24 单立山, 李毅, 张正中, 种培芳, 王洋, 苏铭, 王珊. 2种典型荒漠植物细根序级结构及功能特征分析[J]. 草地学报, 2017, **25** (5): 1014-1019
 - [Shan LS, Li Y, Zhang ZZ, Zhong PF, Wang Y, Su M, Wang S. Analysis of architecture and functions of fine roots of two dominant desert plants among different branch orders in arid and semi-arid areas in northwest, China [J]. *Acta Agric Sin*, 2017, **25** (5): 1014-1019]
 - 25 陈冠陶, 郑军, 彭天驰, 李顺, 邱细容, 陈雨琴, 马豪宇, 涂利华. 扁刺栲不同根序细根形态和化学特征及其对短期氮添加的响应[J]. 应用生态学报, 2017, **28** (11): 3461-3468 [Chen GT, Zheng J, Peng TC, Li S, Qiu XR, Chen YQ, Ma HY. Fine root morphology and chemistry characteristics in different branch orders of *Castanopsis platyacantha* and their responses to nitrogen addition [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28** (11): 3461-3468]
 - 26 朱婉芮, 汪其同, 刘梦玲, 高明宇, 董玉峰, 王华田, 王延平. 连作杨树人工林细根寿命的代际差异及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, **38** (1): 226-235 [Zhu WR, Wang QT, Liu ML, Gao MY, Dong YF, Wang HT, Wang YP. The difference in fine root lifespan between successive rotations of poplar plantation and the dominant causal factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (1): 226-235]
 - 27 蔡倩颖, 王迪海. 陕北枣树‘七月鲜’细根形态的季节变化[J]. 西北林学院学报, 2017, **32** (3): 30-34 [Cai QY, Wang DH. Seasonal variations of the fine root morphology of “Qiyuexian” jujube in northern Shaanxi [J]. *JNW For Univ*, 2017, **32** (3): 30-34]
 - 28 汪其同, 高明宇, 刘梦玲, 王华田, 王延平, 董玉峰. 杨树根际土碳氮磷生态化学计量特征与根序的相关性[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24** (1): 119-124 [Wang QT, Gao MY, Liu ML, Wang HT, Wang YP, Dong YF. Correlation between ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus, and the root order in the rhizosphere soils of poplar plantations [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, **24** (1): 119-124]
 - 29 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, **28** (3): 120-125 [Fu YL, Zhang XC, Wang JG. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang River [J]. *Trans CSAE*, 2012, **28** (3): 120-125]