

# 施用沼液对杨树人工林细根形态特征的影响

王润松<sup>1</sup>, 徐涵湄<sup>1</sup>, 曹国华<sup>2</sup>, 沈彩芹<sup>2</sup>, 阮宏华<sup>1\*</sup>

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;

2. 江苏省东台市林场, 江苏 东台 224200)

**摘要:**【目的】研究施用沼液对杨树人工林细根形态特征的影响, 以期科学利用沼液、优化杨树人工林施肥技术、促进杨树人工林可持续经营提供理论依据。【方法】2018年10月, 在4种长期施用沼液(施用量0、125、250和375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)的杨树人工林野外实验样地, 采用连续土钻法钻取不同土壤深度(0~20、≥20~40和≥40~60 cm)土芯样品; 在实验室分拣出杨树活细根, 经清洗、分级、扫描、烘干、称量, 比较不同处理下不同土层1~5级细根平均直径、平均长度和比根长。【结果】随着沼液施用量的增加, 杨树人工林各级细根平均直径和长度呈下降趋势, 而比根长呈上升趋势。但不同土层的不同根序细根形态特征对沼液的响应不同; 随着土层的加深和细根根序的增加, 细根平均直径、平均长度和比根长的变化幅度多呈现减小趋势。【结论】长期施用沼液可降低杨树人工林细根平均直径和平均长度, 提高杨树人工林细根比根长, 在土壤表层和低级细根上表现尤为明显。

**关键词:** 沼液; 杨树人工林; 细根; 形态特征

**中图分类号:** S718.5

**文献标志码:** A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

**文章编号:** 1000-2006(2021)05-0119-06



## Effects of applying biogas slurry on the morphological characteristics of fine roots of poplar plantations

WANG Runsong<sup>1</sup>, XU Hanmei<sup>1</sup>, CAO Guohua<sup>2</sup>, SHEN Caiqin<sup>2</sup>, RUAN Honghua<sup>1\*</sup>

(1. College of Biology and the Environment, Co-Innovation Center for the Sustainable

Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Dongtai City Forest Farm of Jiangsu Province, Dongtai 224200, China)

**Abstract:** 【Objective】The aims of this research are to study the effect of biogas slurry on the morphological characteristics of the fine roots of poplar plantations, and to provide a theoretical basis for the scientific use of biogas slurry, optimization of fertilization techniques for poplar plantations, and promotion of sustainable management of poplar plantations. 【Method】In October 2018, four biogas slurry application levels (0, 125, 250 and 375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) of poplar plantations were used to drill core samples at different soil depths (0-20, ≥20-40 and ≥40-60 cm) by continuous soil drilling. In the laboratory, the living fine roots of poplar were sorted, cleaned, graded, scanned, dried and weighed, and the average diameter, average length and specific root length of 1-5 grade fine roots in different soil layers were compared under different treatments. 【Result】With the increase of biogas slurry application amount, the average diameter and length of fine roots of poplar plantation at all levels showed a decreasing trend, while the specific root length showed an increasing trend. However, different root layers fine root morphological characteristics of different soil layers respond differently to the biogas: with the deepening of soil layer and the increase of fine root order, the variation amplitude of average diameter, average root length and specific root length of fine roots decreased. 【Conclusion】The long-term application of biogas slurry reduced the average diameter and length and increased the specific root length of fine roots in poplar plantations, especially in the topsoil and lower order of fine roots.

收稿日期 Received: 2020-06-28

修回日期 Accepted: 2020-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0600204); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者: 王润松(runsong\_wang@163.com), ORCID(0000-9370-5664)。\* 通信作者: 阮宏华(hhRuan@njfu.edu.cn), 教授, ORCID(0000-0002-6075-474X)。

引文格式: 王润松, 徐涵湄, 曹国华, 等. 施用沼液对杨树人工林细根形态特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 119-124. WANG R S, XU H M, CAO G H, et al. Effects of applying biogas slurry on the morphological characteristics of fine roots of poplar plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(5): 119-124. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202006052.

**Keywords:** biogas slurry; poplar plantation; fine root; morphological characteristics

近年来,随着规模化畜禽养殖业的迅猛发展,畜禽粪便带来的环境问题也日益突出<sup>[1]</sup>。由于沼气等厌氧发酵工程能够对畜禽粪便等农林废弃物进行无害化、资源化利用,因此得到了快速的发展<sup>[2]</sup>,但如何妥善处置沼液等发酵残留物成为限制厌氧发酵技术发展的瓶颈性问题<sup>[3]</sup>。农田回用是沼液利用普遍采用的方式<sup>[4]</sup>。一方面,沼液含有丰富的N、P、K等植物生长所需营养元素<sup>[5]</sup>和大量腐殖酸等有机活性物质<sup>[6]</sup>,能显著提高土壤肥力<sup>[7-8]</sup>,促进植物生长<sup>[8-10]</sup>,提高果实产量和品质<sup>[10]</sup>,且效果优于单施无机肥<sup>[9]</sup>;另一方面,施用沼液能减少化肥使用量,降低生产成本<sup>[2]</sup>,具有经济和生态双重效益。但是受到农户意愿和农田面积的限制,沼液回田利用具有一定的局限性<sup>[4]</sup>。近年来,沼液在林业生产中的应用研究逐渐引起关注<sup>[11-12]</sup>。这不仅为沼液无害化、资源化处理提供了新思路,也有助于提高人工林生产力和土壤肥力,实现可持续发展。

细根是林木吸收水分和养分的重要器官<sup>[13]</sup>。直径、根长、比根长是研究细根形态、判断细根功能的最常用参数<sup>[14]</sup>。研究发现,细根呼吸和直径呈较强的相关关系,细根越细代谢越活跃<sup>[15]</sup>。细根根长对于细根有效获取养分和水分具有直接影响<sup>[16]</sup>。比根长指细根单位质量的根长,一般认为,比根长较大的根系,其养分与水分吸收效率相对较高<sup>[17]</sup>。施肥是常见的营林措施,将直接影响细根对土壤资源的吸收策略<sup>[9-10]</sup>。植物通过其根系形态可塑性获得竞争优势<sup>[18]</sup>,以更有效地获取养分。目前,关于对林木细根的施肥研究主要侧重施用化肥<sup>[15-17]</sup>,而对施用有机肥的研究鲜有报道。

杨树是世界中纬度平原地区栽培面积最大的速生用材树种之一<sup>[19]</sup>。中国杨树人工林面积达840多万hm<sup>2</sup>,居世界第一<sup>[20]</sup>。苏北是全国最大的杨树人工林种植集中区<sup>[21]</sup>。因此,本研究选取苏北典型杨树人工林作为试验样地,开展施加沼液肥效试验,旨在揭示不同沼液施用量处理对细根平均直径、平均长度和比根长的影响,以期优化杨树施肥技术、促进杨树人工林可持续经营提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江苏省盐城市境内的东台国有林

场(120°49'E, 32°52'N)。该研究区地貌属泥沙淤积平原地貌,气候属亚热带和暖温带的过渡区,年均气温14.6℃,年均降雨量1050mm,无霜期225d。研究区土壤类型为脱盐草甸土,土壤质地为砂质壤土。

### 1.2 样地设置及施肥试验

试验样地设立于2012年9月,根据经营条件和立地条件基本一致的原则,在东台国有林场选择10年生杨树(*Populus deltoides* cv.35)人工林进行样地布置。样地约126000m<sup>2</sup>,株行距5m×6m。采用随机区组设置样方,每个样方大小10m×12m,有9棵树。样方之间设立10m宽的缓冲带,重复之间设立30m左右空间间隔。林下植被主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、枸杞(*Lycium chinense*)等灌木和车前子(*Plantago asiatica*)等草本植物。

由于沼液中氮素以铵态氮为主,因此根据沼液铵态氮含量和样地土壤有效氮含量设置4种沼液施用水平,所施沼液中铵态氮含量分别为土壤有效氮含量的0、1、2、3倍<sup>[22]</sup>,对应沼液量分别为0(CK)、125(L)、250(M)、375(H)m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。每个施用水平设3个重复,共计12个样方。供试沼液由江苏省中粮集团提供,原料主要为猪粪。沼液每年除冬季外每季度(5、8、10月)施1次,施用方式为用泵进行地表均匀喷灌。供试沼液的pH为8.17,DOC、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P的质量浓度分别为425.32、528.99、316.74、1.81、62.22和22.63mg/L。

### 1.3 样品采集及指标测定

2018年10月(生长季末期),采用连续土钻法,在每个样方内随机选取3个取样点,去除凋落物层,使用内径为5cm的根钻由上至下分3层(分别为0~20cm、≥20~40cm、≥40~60cm)钻取土芯样品,同一样方内3个样点采集的土样混合均匀后装入塑料袋内做好标签带回实验室。

细根分级:实验室内将取回的土芯样放在土壤套筛上,用自来水浸泡、漂洗、过筛,根据外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度分拣出杨树活细根。对结构完整的根系,将根系最末端的没有分支的根划分为1级根,1级根着生的根段为2级根,依次类推至5级根,而结构不完整根系的细根根序等级依据完整根系的1~5级根的长度和直径的范围来划分<sup>[23]</sup>。将每一根段用镊子分离出1~5

级根。

指标测定:使用Epson数字化扫描仪对分级后各级细根进行扫描,保存扫描图片。再按照细根分级标记顺序,用滤纸包好,在65℃下烘干48h至质量恒定,然后用电子天平( $\pm 0.000\ 1\text{ g}$ )称质量。将分好的根样于80℃烘箱中烘48h至质量恒定后用电子天平( $\pm 0.000\ 1\text{ g}$ )称量。最后,采用根系分析软件WinRHIZO(Pro 2005c, Regent instruments Inc, Canada)分析扫描图片,结合生物量数据,得出细根平均直径、平均根长、比根长(比根长=根总长度/生物量)指标数据。细根生物量 $=m \times 10^4 / [\pi \times (d/2)^2]$ 。式中: $m$ 为细根质量,g; $d$ 为土钻内径,cm<sup>[24]</sup>。

#### 1.4 数据分析

使用SPSS 19.0和Origin 8.5统计分析程序进行数据分析和图表处理。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)法对不同处理下不同径级的差异性做方差分析,同时采用最小显著差法(LSD)进行多重比较(显著性水平设为0.05)。

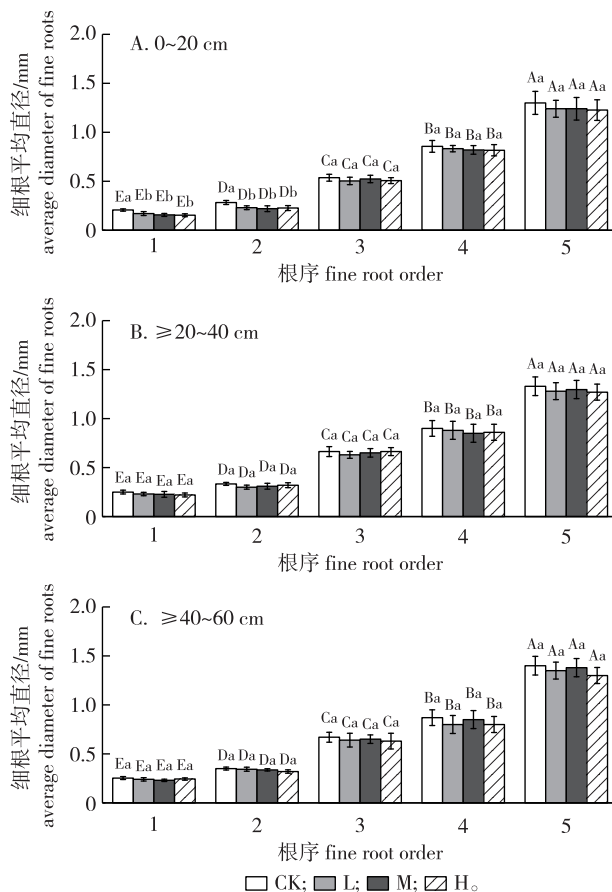
## 2 结果与分析

### 2.1 沼液施用量对不同土层细根平均直径的影响

不同沼液施用量处理下各级细根平均直径均随着根序增加呈现递增趋势,且差异显著( $P < 0.05$ )(图1)。

由图1可见,各土层1~5级细根平均直径均随沼液量的增加呈下降趋势。对于0~20 cm土层,与对照(CK)相比125 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>低量沼液处理(L)下1~5级细根平均直径降幅分别为17.7%、18.8%、6.2%、2.7%、4.6%;250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>中量沼液处理(M)下1~5级细根平均直径降幅分别为24.2%、22.3%、2.5%、4.3%、4.6%;375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>高量沼液处理(H)下1~5级细根平均直径降幅分别为25.8%、20.0%、5.6%、4.7%、5.6%。方差分析表明,与CK相比,低、中和高量沼液处理均显著降低了0~20 cm土层的1、2级根平均直径( $P < 0.05$ )。

对于 $\geq 20\sim 40$  cm土层,与对照(CK)相比低量沼液处理(L)下1~5级细根平均直径降幅分别为8.0%、10.0%、5.0%、2.2%、3.8%;中量沼液处理(M)下1~5级细根平均直径降幅分别为9.3%、7.0%、2.0%、5.6%、2.5%;高量沼液处理(H)下1~5级细根平均直径降幅分别为12.0%、4.0%、1.0%、4.4%、4.5%。方差分析表明,与CK相比,低、中和高量沼液处理对1~5级细根平均直径均



不同小写字母代表处理间差异显著,不同大写字母代表同一土层不同根序间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。Different lowercase letters represented significant differences among treatments, and different uppercase letters represented significant differences among different root orders in the same soil layer. The same below.

图1 沼液施用量对不同土层不同根序细根平均直径的影响

Fig.1 Effects of different amount of biogas slurry on average diameter of fine roots in different soil layers

无显著影响( $P > 0.05$ )。

对于 $\geq 40\sim 60$  cm土层,与对照相比,低量沼液处理(L)下1~5级细根平均直径降幅分别为5.3%、1.9%、4.4%、8.0%、3.6%;中量沼液处理(M)下1~5级细根平均直径降幅分别为9.2%、3.8%、3.0%、2.3%、1.4%;高量沼液处理(H)下1~5级细根平均直径降幅分别为3.9%、8.6%、6.0%、8.0%、7.1%。方差分析表明,与CK相比,低、中和高量沼液处理对1~5级细根平均直径均无显著影响( $P > 0.05$ )。

### 2.2 沼液施用量对不同土层细根平均长度的影响

不同沼液施用量处理下各土层细根平均长度随着根序增加均呈现递增趋势且差异显著( $P < 0.05$ )(图2)。

随着沼液量的增加,各级细根平均长度均随沼液量的增加呈下降趋势。对于0~20 cm土层,低

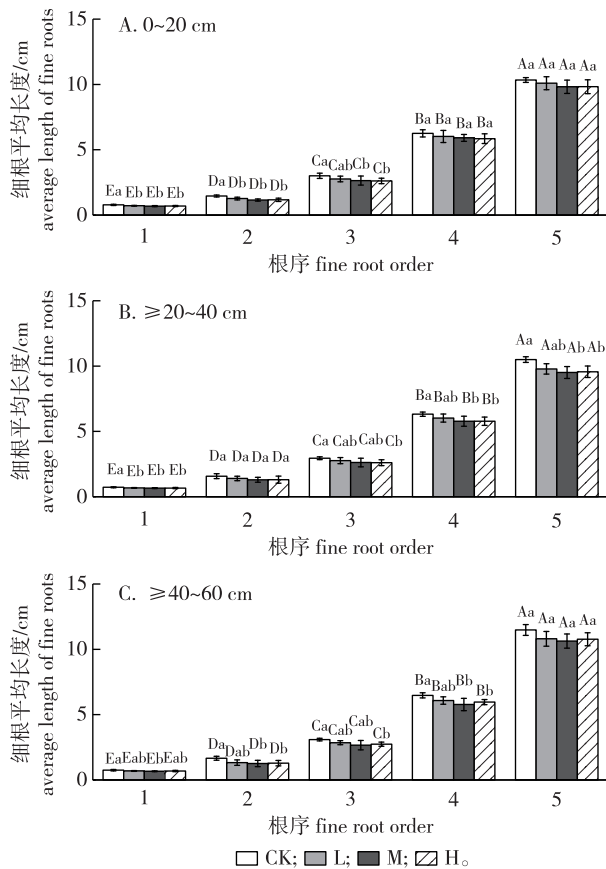


图2 沼液施用量对不同土层不同根序细根平均长度的影响

Fig.2 Effects of different amount of biogas slurry on average length of fine roots in different soil layers

量沼液处理(L)下1~5级细根平均长度与对照相比降幅分别为8.5%、13.4%、8.1%、3.8%、2.4%;中量沼液处理(M)下1~5级细根平均长度降幅分别为12.3%、21.2%、12.1%、5.5%、5.0%;高量沼液处理(H)下1~5级细根平均长度降幅分别为11.5%、20.3%、13.1%、6.5%、5.0%。方差分析表明,与CK相比,低量沼液处理显著降低了1、2级根平均长度( $P<0.05$ ),中、高量沼液处理显著降低了0~20 cm土层的1~3级根平均长度( $P<0.05$ )。

对于≥20~40 cm土层,与CK相比,低量沼液处理下1~5级细根平均长度降幅分别为6.5%、11.0%、6.3%、4.7%、6.8%;中量沼液处理下1~5级细根平均长度降幅分别为8.8%、17.6%、11.2%、8.6%、9.4%;高量沼液处理下1~5级细根平均长度降幅为8.8%、17.0%、11.6%、8.5%、8.9%。方差分析表明,与CK相比,低量沼液处理显著降低了1级根平均长度( $P<0.05$ ),中量沼液处理显著降低了1、4和5级根平均长度( $P<0.05$ ),高量沼液处理显著降低了1、3、4和5级根平均长度( $P<0.05$ )。

对于≥40~60 cm土层,与CK相比,低量沼液处理下1~5级细根平均长度降幅分别为8.0%、2.0%、7.8%、6.1%、5.9%;中量沼液处理下1~5级细根平均长度降幅分别为11.1%、24.0%、13.7%、10.8%、7.4%;高量沼液处理下1~5级细根平均长度降幅分别为8.9%、22.6%、11.2%、8.0%、6.2%。方差分析表明,与CK相比,低量沼液处理对1~5级细根平均直径均无显著影响( $P>0.05$ ),中量沼液处理显著降低了1、2和4级根平均长度( $P<0.05$ ),高量沼液处理显著降低了2~4级根平均长度( $P<0.05$ )。

### 2.3 沼液施用量对不同土层细根比根长的影响

不同沼液施用量处理下各土层细根比根长随着根序增加均呈现递减趋势且差异显著( $P<0.05$ ) (图3)。

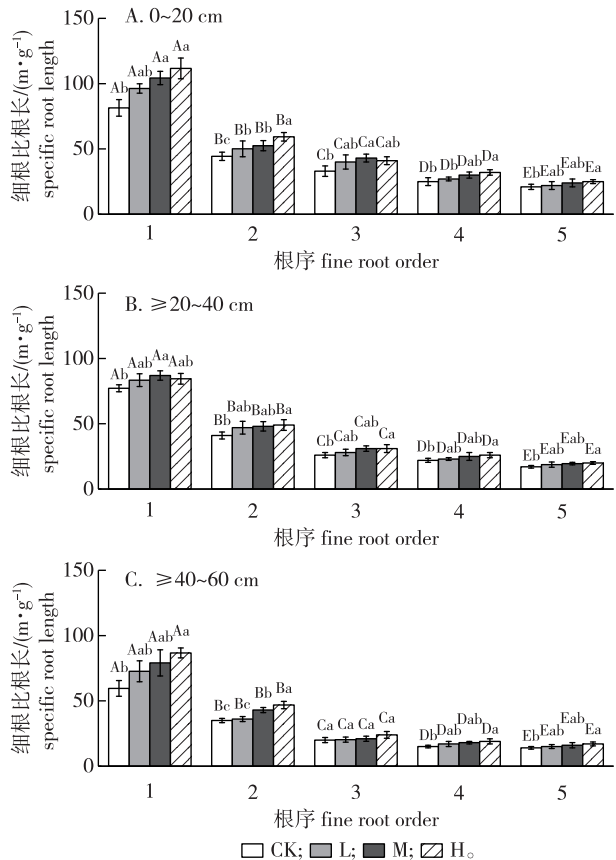


图3 沼液施用量对不同土层不同根序细根比根长的影响

Fig.3 Effects of different amount of biogas slurry on specific root length of fine roots in different soil layers

随着沼液量的增加,各级细根比根长均随沼液量的增加呈增加趋势。对于0~20 cm土层,与对照相比,低量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为18.2%、12.9%、21.2%、8.0%、4.8%;中量沼液处

理下1~5级细根比根长增幅分别为2.8%、18.3%、30.3%、20.0%、14.3%;高量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为37.1%、33.6%、24.2%、28.0%、19.0%。方差分析表明,与CK相比,低量沼液处理显著提高了2级根比根长( $P<0.05$ ),中量沼液处理显著提高了1~3级根比根长( $P<0.05$ ),高量沼液处理显著提高了1、2、4和5级根比根长( $P<0.05$ )。

对于 $\geq 20\sim 40$  cm土层,与对照相比,低量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为8.0%、14.6%、7.7%、4.5%、10.0%;中量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为12.7%、17.1%、19.2%、13.6%、14.7%;高量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为9.4%、19.5%、19.2%、18.2%、17.6%。方差分析表明,与CK相比,低量沼液处理对1~5级细根比根长均无显著影响( $P>0.05$ ),中量沼液处理显著提高了1级根比根长( $P<0.05$ ),高量沼液处理显著提高了2~5级根比根长( $P<0.05$ )。

对于 $\geq 40\sim 60$  cm土层,与对照相比,低量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为22.1%、3.2%、1.5%、13.3%、7.1%;中量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为32.9%、22.9%、5.0%、20.0%、14.3%;高量沼液处理下1~5级细根比根长增幅分别为45.7%、33.8%、20.0%、26.7%、21.4%。方差分析表明,与CK相比,低量沼液处理对1~5级细根比根长均无显著影响( $P>0.05$ ),中量沼液处理显著提高了2级根比根长( $P<0.05$ ),高量沼液处理显著提高了1、2、4和5级根比根长( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

施肥能直接影响土壤资源有效性,而土壤养分直接影响细根生长和碳水化合物分配,从而影响树木细根生产和周转<sup>[25-26]</sup>。沼液作为一种液态肥,不仅能增加土壤养分,且能够短期内提高土壤含水量<sup>[27]</sup>。但在本试验中,沼液施用量较小,以最高施用量 $375\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 计,一次施用的水量仅为37.5 mm,而且水分一般通过蒸发、淋溶等途径损失大部分<sup>[27]</sup>。因此,在本试验中,养分是影响细根形态特征的最主要因素。

以往的研究中,增加土壤养分含量对不同土层不同根序细根形态特征影响不同。杨丽君<sup>[28]</sup>研究表明,施肥显著降低0~20 cm土层1、2级根平均直径( $P<0.05$ ),显著提高0~20 cm和 $\geq 20\sim 40$  cm土层1级根比根长( $P<0.05$ ),而对平均根长无显著影响( $P>0.05$ )。于立忠等<sup>[17]</sup>研究表明,施氮肥

显著降低了1、2级根的平均直径( $P<0.05$ ),施氮肥以及氮磷肥显著降低了表层土壤1级根的平均根长和比根长( $P<0.05$ )。黄复兴<sup>[15]</sup>研究表明,施氮肥显著增加了香樟幼苗1级根的平均直径、平均根长和比根长( $P<0.05$ )。林木特性和立地条件不同可能是造成研究结果存在较大差异的主要原因。

本试验结果表明,随着根序增加,细根平均直径和长度增大,而比根长减小。这与多数研究结果<sup>[15-16,18]</sup>相同,表明细根形态特征与根序之间存在普遍的规律性。随着沼液施用量的增加,杨树人工林各级细根平均直径和长度呈下降趋势,而比根长呈增加趋势。但不同土层不同根序细根形态指标对沼液的响应不同:低量沼液显著降低了0~20 cm土层1、2级细根平均直径和长度,显著增加了2级细根比根长;显著降低了 $\geq 20\sim 40$  cm土层1级细根平均长度。中量沼液显著降低了0~20 cm土层1~3级细根平均长度,显著增加了1~3级细根比根长;显著降低了 $\geq 20\sim 40$  cm土层1、4和5级细根平均长度,显著增加了1级细根比根长;显著降低了 $\geq 40\sim 60$  cm土层1、2和4级细根平均长度,显著增加了2级细根比根长。高量沼液显著降低了0~20 cm土层1~3级细根平均长度,显著增加了1、2、4和5级细根比根长;显著降低了 $\geq 20\sim 40$  cm土层1、3、4和5级细根平均长度,显著增加了2~5级细根比根长;显著降低了 $\geq 40\sim 60$  cm土层2~4级细根平均长度,显著增加了1、2、4和5级细根比根长。这可能由于有效养分增加导致细根获取养分资源的策略发生改变;当有效养分增多时,细根可能更趋向于变细、变短,以增强代谢能力,而比根长趋向于变大,以增加养分与水分吸收效率<sup>[16-18]</sup>。

从增(降)幅来看,0~20 cm土层细根各个形态特征指标的增(降)幅大于 $\geq 20\sim 40$  cm和 $\geq 40\sim 60$  cm土层。这是由于施肥加剧了土壤养分空间差异:一方面,土壤表层结构稳定性较好,有更多土壤胶体颗粒<sup>[8]</sup>,而沼液中速效养分以 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为主,易与土壤胶体发生离子交换反应被吸附<sup>[28]</sup>;另一方面,水分蒸发使得养分在土壤毛管作用下的向上迁移也是表层养分富集的重要原因<sup>[29]</sup>。所以,上层土壤细根各形态指标的变化幅度更大。另外,各根序形态特征指标的增(降)幅多表现为低级细根大于高级根。这是由于低级根是资源吸收的主体,而高级根是资源运输和贮存的主体<sup>[30]</sup>,所以对养分变化的响应也就更强烈。

总的来说,施用沼液对杨树人工林细根形态特征的垂直特征和径级分配影响明显,这是植物对环

境变化的一种适应策略<sup>[31]</sup>。而沼液通过影响土壤环境其他要素(如土壤动物、微生物)从而间接影响响根的效应,其机制还需进一步研究。

#### 参考文献(reference):

- [1] 张玲玲,李兆华,鲁敏,等.沼液利用途径分析[J].资源开发与市场,2011,27(3):260-262.ZHANG L L,LI Z H,LU M,et al. Analysis on utilization of biogas slurry[J].Resour Dev Mark, 2011,27(3):260-262. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8141.2011.03.019.
- [2] 林鸿雁,叶美锋,吴飞龙,等.沼液的综合利用现状综述[J].福建农业科技,2012(1):75-77.LIN H Y, YE M F, WU F L, et al. Current situation of comprehensive utilization to biogas slurry[J]. Fujian Agric Sci Technol, 2012(1):75-77. DOI: 10.13651/j.cnki.fjnykj.2012.01.003.
- [3] 曹汝坤,陈灏,赵玉柱.沼液资源化利用现状与新技术展望[J].中国沼气,2015,33(2):42-50.CAO R K, CHEN H, ZHAO Y Z. Resource utilization of biogas slurry: current status and future prospects[J]. China Biogas, 2015, 33(2):42-50. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1166.2015.02.008.
- [4] 叶小梅,常志州,钱玉婷,等.江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究[J].农业工程学报,2012,28(6):222-227. YE X M, CHANG Z Z, QIAN Y T, et al. Investigation on large and medium scale biogas plants and biological properties of digestate in Jiangsu Province[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2012, 28(6):222-227. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.036.
- [5] 李伟雯,曲英华,徐奕琳,等.不同发酵原料沼液的营养含量及变化[J].中国沼气,2012,30(3):17-20,24.LI Y W, QU Y H, XU Y L, et al. Change of nutrition contents of biogas slurry with different fermentation raw materials[J]. China Biogas, 2012, 30(3):17-20, 24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1166.2012.03.004.
- [6] ZHENG X B, FAN J B, CUI J, et al. Effects of biogas slurry application on peanut yield, soil nutrients, carbon storage, and microbial activity in an ultisol soil in southern China[J]. J Soils Sediments, 2016, 16(2):449-460. DOI: 10.1007/s11368-015-1254-8.
- [7] PETERS K, JENSEN L S. Biochemical characteristics of solid fractions from animal slurry separation and their effects on C and N mineralisation in soil[J]. Biol Fertil Soils, 2011, 47(4):447-455. DOI: 10.1007/s00374-011-0550-8.
- [8] 孙芹菊,凌玮,韩建刚,等.沼液施肥对滨海盐碱地土壤性状的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(5):91-98.SUN Q J, LING W, HAN J G, et al. Effects of biogas slurry application on the coastal saline-alkali soil properties[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2018, 42(5):91-98. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201706064.
- [9] 艾俊国,顾万荣,孔令中,等.沼液与化学肥料配施对寒地春玉米幼苗根系形态生理特征的影响[J].作物杂志,2013(3):56-62.AI J G, GU W R, KONG L Z, et al. The effects of biogas manure and chemical fertilizer on morphology and physiological characteristics of the cold spring maize seeding roots[J]. Crops, 2013(3):56-62. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2013.03.017.
- [10] 党祝庆.生化黄腐酸钾和有机肥对桃树根系生长和果实品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2015.DANG Z Q. Effects of biochemical fulvic acid potassium and organic fertilizer on root growth and fruit quality of peach trees[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015.
- [11] 葛之葳,张玲,卜丹蓉,等.杨树人工林沼液和生物炭混施对表层土壤活性有机碳的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(6):9-14.GE Z W, ZHANG L, BU D R, et al. Effects of biogas slurry and biochar application on active organic carbon in the topsoil of poplar plantation[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2016, 40(6):9-14.
- [12] 龙秋宁,王润松,徐涵涓,等.沼液与生物炭联合施用对杨树人工林土壤甲螨(*Oribatida*)密度的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(3):211-215. LONG Q N, WANG R S, XU H M, et al. Effects of biogas slurry and biochar on *Oribatida* density in a poplar plantation[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(3):211-215. DOI: 10.3969/j.issn.10002006.201904023.
- [13] MOU P, JONES R H, TAN Z Q, et al. Morphological and physiological plasticity of plant roots when nutrients are both spatially and temporally heterogeneous[J]. Plant Soil, 2013, 364(1/2):373-384. DOI: 10.1007/s11104-012-1336-y.
- [14] 蔡倩颖.陕北枣树细根形态季节动态研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.CAI Q Y. Studies on seasonal dynamic changes of jujube tree's fine root morphology in northern Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [15] 黄复兴.盆栽香樟细根对施肥的响应[D].雅安:四川农业大学,2014.HUANG F X. The potted *Cinnamomum camphora* (L.) Presl. seedlings fine roots response to fertilization[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014.
- [16] EISENSTAT D M. On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation: a field study using Citrus rootstocks[J]. New Phytol, 1991, 118(1):63-68. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1991.tb00565.x.
- [17] 于立忠,丁国泉,史建伟,等.施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长和比根长的影响[J].应用生态学报,2007,18(5):957-962. YU L Z, DING G Q, SHI J W, et al. Effects of fertilization on fine root diameter, root length and specific root length in *Larix kaempferi* plantation[J]. Chin J Appl Ecol, 2007, 18(5):957-962.
- [18] PREGITZER K S, HENDRICK R L, FOGEL R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen[J]. New Phytol, 1993, 125(3):575-580. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1993.tb03905.x.
- [19] 方升佐.中国杨树人工林培育技术研究进展[J].应用生态学报,2008,19(10):2308-2316. FANG S Z. Silviculture of poplar plantation in China: a review[J]. Chin J Appl Ecol, 2008, 19(10):2308-2316.
- [20] 胡觉,彭长清,甘世书,等.我国人工林变化动态及增长潜力分析[J].林业资源管理,2014(21):6-8. HU J, PENG C Q, GAN S S, et al. Analysis on the dynamic changes and growth potential of China's plantations[J]. Forest Resources Management, 2014(21):6-8.
- [21] 田子凡.苏北杨树产业碳库系统及碳价值评估[D].南京:南京林业大学,2017.TIAN Z F. Carbon pool of poplar industry in northern Jiangsu and the assessment of its carbon value[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [22] LAIRD D, FLEMING P, WANG B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4):436-442. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.05.012.
- [23] PREGITZER K S, DEFOREST J L, BURTON A J, et al. Fine root architecture of nine north American trees[J]. Ecol Monogr, 2002, 72(2):293-309. DOI: 10.1890/0012-9615(2002)072[0293:FRAONN]2.0.CO;2.
- [24] 闫美芳,王璐,郭楠,等.黄土高原杨树人工林的细根生物量与碳储量研究[J].中国农学通报,2015,31(35):146-151. YAN M F, WANG L, GUO N, et al. Study on fine root biomass and C stock in a poplar plantation in loess plateau[J]. Chin Agric Sci Bull, 2015, 31(35):146-151.
- [25] 肖义发,欧光龙,胥辉.林木细根生物量分布及其动态研究综述[J].林业调查规划,2013,38(1):34-38,57. XIAO Y F, OU G L, XU H. Tree fine root biomass distribution and its dynamic research[J]. For Invent Plan, 2013, 38(1):34-38, 57.
- [26] 英慧,殷有,于立忠,等.土壤水分、养分对树木细根生长动态及周转影响研究进展[J].西北林学院学报,2010,25(3):36-42. YING H, YIN Y, YU L Z, et al. Effects of soil moisture and soil nutrient on the dynamic and turnover of the tree fine roots: a review[J]. J Northwest For Univ, 2010, 25(3):36-42.
- [27] 赵倩.施用沼液和生物炭对杨树人工林土壤碳、氮及重金属含量的影响[D].南京:南京林业大学,2017.ZHAO Q. Effects of biogas slurry and biochar on soil carbon, nitrogen and heavy metal in a poplar plantation in a coastal area, China[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [28] 杨丽君.杨树幼龄林细根构型对施肥的响应[D].雅安:四川农业大学,2013.YANG L J. Effect of fertilization on fine root architecture of the plantation of *Populus × euramericana* cv. '74/76'[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [29] 杨潇.污水灌溉土壤养分迁移转化规律的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2006.YANG X. Study on the nutrient transport and transformation in soil with sewage irrigation[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2006.
- [30] 邓飞.模拟氮沉降对中亚热带常绿阔叶林细根生物量和生产量的影响研究[D].福州:福建师范大学,2016.DENG F. Effects of simulated nitrogen deposition on fine root biomass and production in a mid-subtropical evergreen broadleaf forest[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2016.
- [31] 谷加存,王东男,夏秀雪,等.功能划分方法在树木细根生物量研究中的应用:进展与评述[J].植物生态学报,2016,40(12):1344-1351. GU J C, WANG D N, XIA X X, et al. Applications of functional classification methods for tree fine root biomass estimation: Advancements and synthesis[J]. Chin J Plant Ecol, 2016, 40(12):1344-1351.

(责任编辑 李燕文)