

DOI: 10.20103/j.stxb.202311232563

吴姝瑾, 王光如, 于鸿莹, 申展, 张扬, 施建敏. 淡竹菹根和鞭根细根寿命特征. 生态学报, 2024, 44(19): 8575-8583.

Wu S J, Wang G R, Yu H Y, Shen Z, Zhang Y, Shi J M. The fine root lifespan of culm and rhizome roots of *Phyllostachys glauca*. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8575-8583.

淡竹菹根和鞭根细根寿命特征

吴姝瑾^{1,2}, 王光如³, 于鸿莹^{1,2,*}, 申展², 张扬², 施建敏^{1,2}

1 江西农业大学 江西乡土树种良种选育与高效利用江西省重点实验室, 南昌 330045

2 江西农业大学林学院, 南昌 330045

3 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

摘要: 植物细根寿命是影响细根周转的重要因素, 在陆地生态系统碳和养分循环中扮演着重要角色。但是, 目前对竹类植物根寿命的直接观测资料和研究仍显不足, 尤其缺乏关于竹类植物菹根和鞭根两种类型根寿命特征的研究。利用根箱对淡竹 (*Phyllostachys glauca*) 菹根和鞭根细根生长动态开展研究, 结果表明: (1) 淡竹菹根和鞭根细根寿命间没有显著差异, 但是根序对根寿命有显著影响。1 级根寿命显著低于 2 级根寿命, 2 级根寿命显著低于 3 级根寿命。(2) 菹根和鞭根的出生和死亡具有不同的季节模式。鞭根新根出生集中于 7、8、9 月, 在 7 月达到峰值, 死亡高峰发生在春季 (3—5 月)。菹根新根发生没有单一峰值, 在 3 月、7 月、11 月各有一次新根发生的小高峰, 死亡高峰发生在夏季 (6—8 月)。(3) 淡竹菹根和鞭根的细根寿命与出生时间的关系不同。菹根夏季出生的细根中值寿命最长, 春季出生的细根中值寿命最短。鞭根春季出生的细根中值寿命最长, 冬季 (12—2 月) 出生的细根中值寿命最短。发现淡竹菹根和鞭根的细根具有不同的生长规律, 其寿命与根序级别、出生时期密切相关, 研究结果可为竹林生产和管理提供理论依据。

关键词: 淡竹; 菹根; 鞭根; 细根寿命; 细根生长; 死亡

The fine root lifespan of culm and rhizome roots of *Phyllostachys glauca*

WU Shujin^{1,2}, WANG Guangru³, YU Hongying^{1,2,*}, SHEN Zhan², ZHANG Yang², SHI Jianmin^{1,2}

1 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Improved Variety Breeding and Efficient Utilization of Native Tree Species, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

3 Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: The lifespan of botanical fine roots is one of the determining variables of fine root turnover and is vital to terrestrial carbon and nutrient cycle. However, there is no sufficient data and research that has been directly observed or conducted on the lifespan of bamboo fine roots, particularly in the characteristics of *Phyllostachys glauca* culm and rhizome roots. In this study, rhizoboxes were used to study the fine root growth dynamics of the culm and rhizome roots of *Phyllostachys glauca*. The results indicate that: (1) Fine root lifespans of culm and rhizome roots had no significant difference. Root lifespans increased as the root order rose. The lifespans of the first-order roots were significantly lower than those of second-order roots, and the lifespans of second-order roots were significantly lower than those of third-order roots. (2) The birth and death of culm and rhizome roots had different seasonal patterns. The birth of rhizome roots was concentrated in July, August, and September. Rhizome roots' birth peaked in July and death peaked in spring (from March to May). For the culm roots, there was no single peak in the birth but small peaks in March, July, and November. Culm roots' death peaked in summer (from June to August). (3) The relations between the fine root lifespan and birth date of

基金项目: 国家自然科学基金 (32060380); 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划 (领军人才) 项目 (20225BCJ22006); 江西省重点研发计划项目 (20232BBF60022); 江西省研究生创新专项 (YC2021-S362)

收稿日期: 2023-11-23; **网络出版日期:** 2024-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hyyu@jxau.edu.cn

culm and rhizome roots differed. Culm roots born in summer had the longest median lifespans while those born in spring had the shortest. Rhizome roots born in spring had the longest median lifespans while those born in winter (from December to February) had the shortest. Our findings indicated that fine roots of culm and rhizome roots had different growth patterns, and their lifespan was closely related to root order and birth date. The study could provide a theoretical basis for bamboo forest production and management.

Key Words: *Phyllostachys glauca*; culm root; rhizome root; fine root lifespan; fine root growth; mortality

细根作为植物吸收养分和水分的关键部位,对植物生长和发育都至关重要,其周转过程是土壤碳和养分循环的重要环节^[1-3]。细根寿命是细根从出生到死亡的时间,是细根的重要生理生态学特性^[4-7]。细根寿命决定了植物向土壤分配的碳和养分数量,并且与细根周转的速度密切相关,寿命越短,细根周转越快,消耗的碳越多^[4-5]。因此,细根寿命是理解土壤碳分配格局与过程的关键,开展细根寿命研究对精准估算陆地生态系统固碳潜力具有重要意义。

根寿命受多种因素影响,包括内源因素(如根系直径、出生时期、根系深度、氮浓度等)和环境因素(如温度、水分、养分有效性、微生物活性以及竞争等)^[8-10]。以往关于根寿命的研究认为,根径和根序是影响根寿命的关键因素^[11-13]。然而,根径分类选择随意性大,相比而言,根序更能够作为根的一个基本结构特征,与根寿命之间的关系也更密切^[13]。Wang 等人^[11]的研究证明,根寿命随着根序的增加而显著增加。根系的生长与地上部分生长具有一定联系,且影响根寿命的因素大多具有明显的季节性,所以不同季节出生的细根间寿命差异较大^[9,11,14-15]。此外,不同物种和功能细根寿命的季节模式也存在差异^[9,16-17]。

竹类植物是森林生态系统的重要组成部分^[18-19],其种类多、适应性强、分布广,在亚洲、非洲、美洲均有自然分布,是当前效益较高的生物能源、绿化和固碳植物^[20-21]。淡竹(*Phyllostachys glauca*)作为克隆植物(在自然条件下,具有自发地产生遗传结构相同并具有潜在独立性新单元或个体的能力或习性的植物),地下根系分为两种:生于竹分株秆基节的菹根和生于竹分株间相连的匍匐茎的鞭根^[22-25]。前人通常将菹根和鞭根作为结构和功能一致的统一体进行研究。然而近年来的研究表明,淡竹的菹根和鞭根具有不同的根系形态和解剖结构,并且两者的功能也有所差异,菹根以支撑固定和养分储存为主要功能,而鞭根则主要进行资源获取和养分吸收^[26]。然而,目前关于竹类植物细根寿命的研究仍然缺乏,竹类植物菹根和鞭根细根寿命特征及其影响因素也不明确。

淡竹是禾本科刚竹属植物,分布在长江流域和黄河流域各地,其笋可食用,竹材制成的竹篾是竹编制工艺的重要原料,笋材两用且生长旺盛,是我国优良的经济竹种^[27-29]。本研究以淡竹(*Phyllostachys glauca*)为研究对象,探讨其菹根和鞭根的细根寿命特征,旨在明确:(1)淡竹不同根系类型(菹根和鞭根)及不同根序细根寿命间是否存在差异;(2)淡竹菹根和鞭根的细根是否有不同的生长规律;(3)淡竹菹根和鞭根细根寿命与出生时间的关系是否一致。本研究有助于深入理解竹类植物细根寿命所驱动的生长策略,并为竹类植物资源管理与利用提供参考。

1 研究地概况及研究方法

1.1 研究地自然概况

本研究地点位于江西省江西农业大学竹类植物种质园(28°46'N,115°49'E),为中亚热带湿润季风气候。年平均气温为 17.5 °C,极端最高气温为 40.6 °C,极端最低气温为-15.2 °C,年降水量为 1700 mm,无霜期为 270 d,全年日照时数为 1972 h,年平均相对湿度 80%左右。地势平坦,土壤类型为黏重红壤,土层约为 1 m,土壤为酸性。

1.2 研究方法

1.2.1 根箱安装

于江西农业大学竹类植物种质园中开展实验。利用根箱(42 cm 长×40 cm 宽×30 cm 高)进行细根观测。

根箱由 1 个顶盖、2 面不透明侧板和 2 面观测窗组成,其中顶盖和侧板由不锈钢板制成,观测窗由 5 mm 厚的透明玻璃板制成。随机选取长势健康的淡竹,在距离其菹根或鞭根生长方向 30—40 cm 左右选择地势平坦且根系生长良好的位置安装根箱。本研究共安设 4 个根箱,共 8 面根窗,其中 4 面用于观测鞭根,4 面用于观测菹根。根箱于 2020 年 12 月 6 日安装完毕,观测于根箱安置 2 个月后即 2021 年 2 月 9 日开始。

1.2.2 图像数据采集

于 2021 年 2 月 9 日至 2022 年 11 月 8 日进行观测,为了确保准确的记录根系寿命和生长动态,本研究采用高分辨率数字相机在平行于根窗的固定位置定期拍摄照片,为期 630 d。观测和拍照频率根据根系生长情况调整,生长旺盛时期(4—9 月)3—5 d 观测一次,生长缓慢时期(10—3 月)7—9 d 观测一次。

1.3 数据处理及统计分析

1.3.1 根系寿命数据提取

根据所拍摄图像对根的死活和根序进行判别:将白色和褐色的细根判定为活根,黑色、皮层脱落或表皮褶皱的细根判定为死根^[5]。另外,没有出现死亡形态但突然从图像中消失的白色和褐色细根,也判定为死根^[5]。采用 Strahler's 溪流分类法^[30]对淡竹菹根和鞭根的根系分枝进行根序分级^[31]:没有独立侧根的末端细根为一级根,有一组明显可见的独立侧根的细根为二级根,着生二级根的细根为三级根,依此类推^[13]。将出生状态被观测到但观测结束时还未死亡或由于其他因素导致根死亡状态无法观测的根定义为删失细根^[32],根系的存活时间为细根第一次在影像中出现时间到细根死亡或消失时间。

1.3.2 数据分析

基于 SPSS 21.0 (SPSS, Chicago, USA) 软件,采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)探究不同根系类型 and 不同根序间淡竹细根寿命的差异,用 Duncan 分析方法进行多重比较($\alpha = 0.05$)。基于统计软件 Origin 2023b 中 Kaplan-Meier 法进行生存分析,并获得细根的累计存活率、中值寿命(即存活率达到 50%时所用的时间)以及平均寿命^[5],使用对数秩检验(log-rank test)比较不同根系类型、不同根序、不同出生季节的根系生存曲线差异。采用 Tukey 法分析不同出生月份根寿命间的差异($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 根系类型和根序对根寿命的影响

分析结果表明:菹根一级根平均寿命为(229±16) d,二级根平均寿命为(310±16) d,三级根平均寿命为(413±21) d;鞭根一级根平均寿命为(217±13) d,二级根平均寿命为(306±11) d,三级根平均寿命为(417±14) d(表 1)。菹根、鞭根的中值寿命分别为 303 d、294 d;一级根、二级根和三级根的中值寿命分别为 205 d、335 d 和 407 d(图 1)。菹根与鞭根的细根寿命没有显著差异,但不同根序间的根寿命差异显著($P < 0.05$)(表 1)。菹根和鞭根的细根寿命随根序增加而增加:一级根寿命<二级根寿命<三级根寿命。

表 1 淡竹菹根和鞭根的细根寿命

Table 1 The fine root lifespan of *Phyllostachys glauca* culm and rhizome roots

根系类型 Type	根序 Root order	平均寿命/d Mean lifespan	95%置信区间		观测细根数 Number observed	删失细根数 Number censored
			LCL	UCL		
菹根 Culm roots	一级	229±16 ^{Ab}	197	261	63	31
菹根 Culm roots	二级	310±16 ^{Aab}	278	342	57	24
菹根 Culm roots	三级	413±21 ^{Aa}	344	481	4	0
鞭根 Rhizome roots	一级	217±13 ^{Ac}	190	244	35	12
鞭根 Rhizome roots	二级	306±11 ^{Ab}	285	327	78	1
鞭根 Rhizome roots	三级	417±14 ^{Aa}	388	447	14	0

LCL 置信区间下限 Lower Confidence Limit; UCL 置信区间上限 Upper Confidence Limit; LCL 和 UCL 分别代表细根平均寿命 95%置信区间的下限和上限;不同大写字母代表相同根序不同类型细根平均寿命间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母代表同一类型不同根序细根平均寿命间差异显著($P < 0.05$);表中数据为均值±标准误

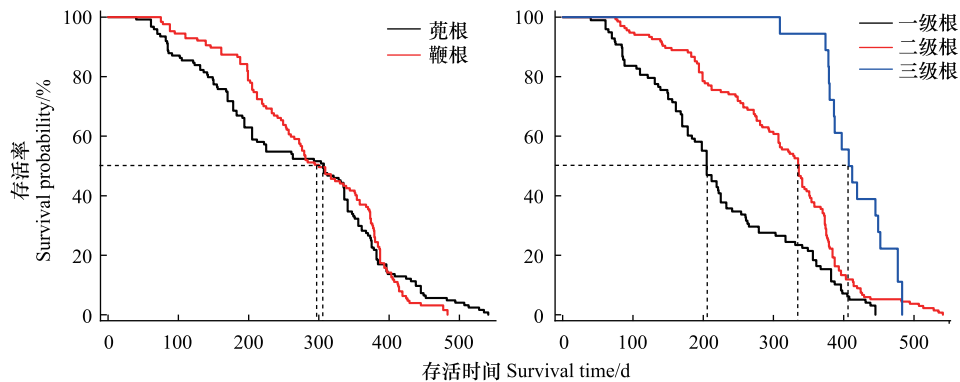


图1 淡竹细根的生 存曲线

Fig.1 Survival curves of *Phyllostachys glauca* fine roots

图为不区分根序的菹根和鞭根存活曲线和不区分菹根和鞭根的不同根序根系存活曲线

2.2 菹根和鞭根出生与死亡规律

菹根和鞭根新根出生都存在高峰月份。菹根新根出生的高峰月份为3月、7月、11月(图2),各月新根出生数量均不超过全年的20%,其中1月新根出生频率最低,没有新根出生;3月新根出生数量占比最高,为全年新根出生数量的16.67%。鞭根新根出生的高峰月份为7月、8月、9月(图2),其中7月鞭根新根出生数量占全年新根出生数量的35.43%。菹根和鞭根夏季(6—8月)新根出生数量占比均高于冬季(12—2月),菹根夏季出生的新根数在全年占比为38.90%,冬季出生的新根数在全年占比为6.11%,鞭根夏季出生的新根数在全年占比为70.86%,冬季出生的新根数在全年占比为0.79%。

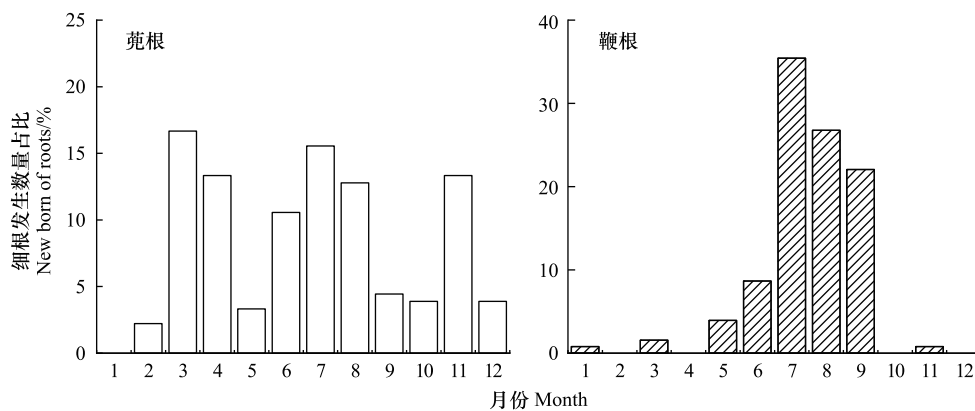


图2 淡竹菹根和鞭根细根发生数量在全年中的占比

Fig.2 Proportion of fine root birth number of culm roots and rhizome roots of *Phyllostachys glauca* in the whole year

菹根和鞭根的死亡有不同的季节模式(图3)。菹根夏季细根死亡数量在全年占比中高达51.20%,其中菹根6月的死亡数量最高,为全年的22.40%。鞭根各个月份的死亡数量变化幅度比菹根小,死亡高峰发生在春季(3—5月),其中4月死亡数量占比最高,为15.53%。

2.3 淡竹菹根和鞭根的出生时间与寿命间关系

不同季节出生的细根其寿命也不同(图4)。菹根不同季节出生的细根中值寿命分别为:春季194 d、夏季341 d、秋季(9—11月)205 d、冬季336 d。鞭根不同季节出生的细根中值寿命分别为:春季429 d、夏季344 d、秋季205 d、冬季202 d。夏秋两季出生的菹根和鞭根的中值寿命相近,而冬季出生的菹根中值寿命高于鞭根,春季出生的鞭根中值寿命高于菹根。

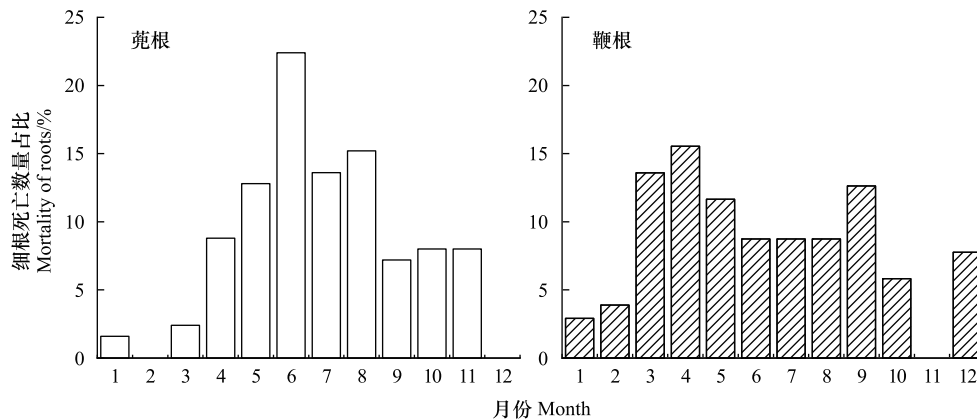


图3 淡竹菹根和鞭根细根死亡数量在全年中的占比

Fig.3 Proportion of fine root death number of culm roots and rhizome roots of *Phyllostachys glauca* in the whole year

菹根不同月份出生的一级根寿命间存在差异,4月出生的根寿命最长,6月出生的根寿命最短;4月出生的根寿命与3月、6月、11月的均有显著差异($P<0.05$)。菹根二级根在8月出生时寿命最长,2月出生时寿命最短;2月出生的根寿命显著低于3月、6月和7月($P<0.05$)(图5)。鞭根一级根6月根寿命显著低于其他各月($P<0.05$),二级根寿命在5月出生时平均寿命最长,3月出生的根寿命显著低于5、6、7、8月,其他各月出生的根寿命间均无显著性差异($P<0.05$)(图5)。

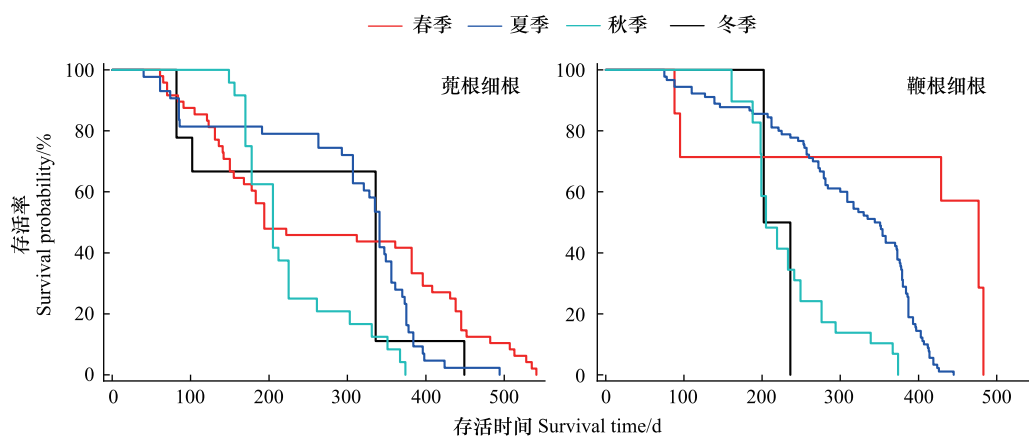


图4 淡竹不同出生季节菹根和鞭根细根的生存曲线

Fig.4 Survival curves of culm and rhizome roots of *Phyllostachys glauca* in different birth seasons

3 讨论

3.1 淡竹不同类型与根序细根寿命间的差异

根系分枝形成的根序是根系结构的重要特征,侧根附着在主根的两侧,从距离主根根尖一段距离的地方生长出来,最终形成复杂的根系结构^[33]。依照根系所在位置进行分级,根径、根长、分枝数量会因为根级的增加而减小^[34],根寿命也会因为根序不同有所差异^[35]。Guo 等^[36]对长叶松(*Pinus palustris*)研究发现,根序对根系寿命影响最大,一级根平均寿命(296—392 d)显著低于二级根平均寿命(404—668 d)。祝令晓等^[8]对多个品种的棉花进行细根寿命观测,发现棉花的主侧根寿命均高于次级侧根寿命,即根序级别低的细根寿命更短。本研究发现,淡竹菹根一级根平均寿命为229 d、鞭根为217 d,而菹根和鞭根三级根的平均寿命分别为413 d和417 d,分别是一级根寿命的1.80倍和1.92倍。一级根寿命显著低于二级根寿命,二级根寿命显著低

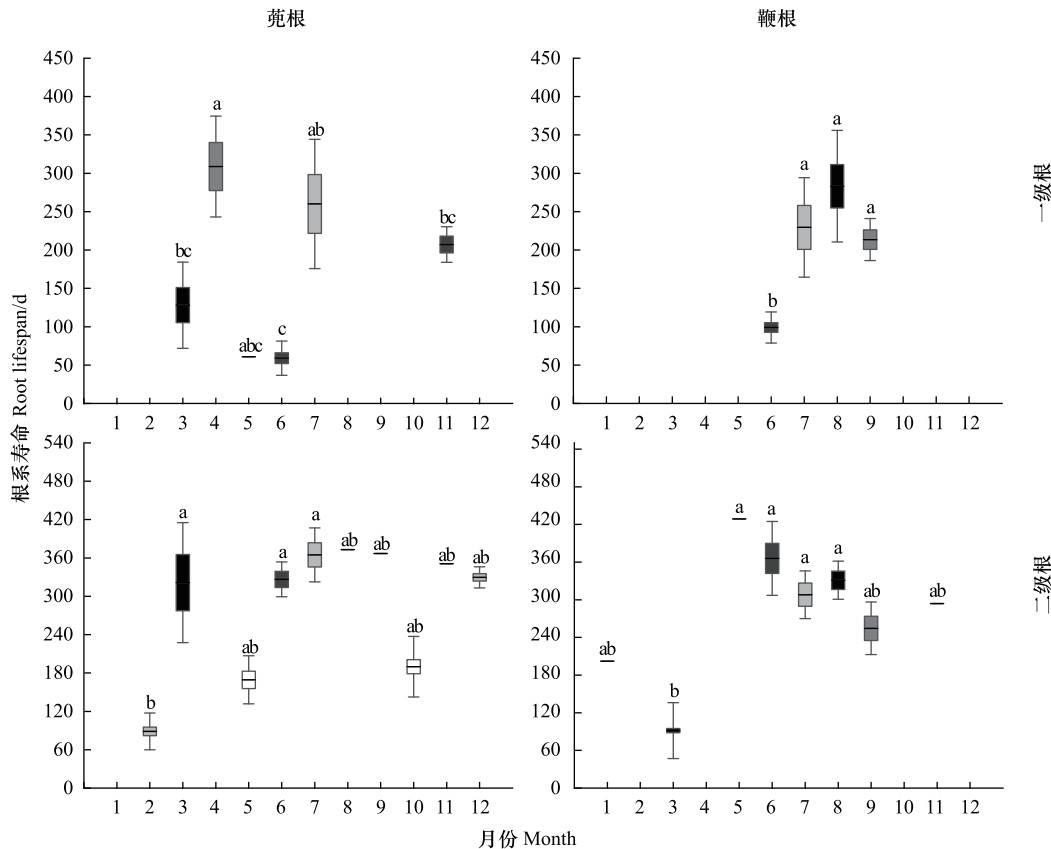


图5 出生时期对淡竹细根寿命的影响

Fig.5 Effects of birth date on root lifespan of *Phyllostachys glauca*

不同小写字母代表不同出生时期细根寿命间差异显著 ($P < 0.05$)

于三级根寿命,与前人结果相一致。这可能是由于低级根皮层占比较大^[13],木质化程度低^[37],直径更小,且低级根细胞组织的氮浓度和呼吸速率更高^[30],周转速度更快,其寿命也更短。王光如等^[26]对淡竹菟根和鞭根的形态结构和功能进行了研究,发现末端侧根比主根的皮肤木质化程度更低,中柱比例小、皮层比例大,因此末端侧根更具备资源获取的功能。Liu 等人^[38]对 12 种植物进行的研究证实,专用于资源吸收的末端低级根寿命比高级根寿命更短,根寿命在 1 到 4 个月。另外,本研究中淡竹菟根和鞭根细根寿命没有显著差异。淡竹菟根和鞭根虽然主要功能不同,但是它们着生于同一竹株,地上部分所处环境相同,生长的土壤理化性质也相同,这可能是导致它们寿命没有显著差异的原因。

3.2 淡竹菟根和鞭根生长规律的差异

植物的根系生长大多存在季节模式,猕猴桃 (*Actinidia deliciosa*) 的新根生长旺季在夏末^[39],山毛榉 (*Fagus sylvatica*) 的根系生长旺季在 5 至 7 月^[40],樟子松 (*Pinus sylvestris*) 7 至 9 月根系生长最为旺盛^[41],核桃 (*Juglans hindsii*) 在 5 至 6 月根系生长更加旺盛且其细根生长遵循单峰曲线^[14]。绿竹林细根生长也表现出季节性,细根生物量最大值出现在春季^[42]。周本智^[43-44]研究表明,毛竹菟根和鞭根生长动态存在差异:鞭根新根的发生时间集中在 7 到 10 月份,菟根在 3 月下旬至 6 月均有发生。本研究发现鞭根新根出生的高峰月份为 7 月、8 月、9 月,在 7 月达到峰值,生长规律类似于单峰曲线。菟根新根出生的高峰月份为 3 月、7 月、11 月。并且菟根和鞭根夏季新根发生数量占比均高于冬季,菟根夏季出生的新根数在全年占比为 38.90%,冬季出生的新根数在全年占比为 6.11%,鞭根夏季出生的新根数在全年占比为 70.86%,冬季出生的新根数在全年占比为 0.79%,与前人研究结果相一致。

菟根和鞭根新根出生规律的差异主要表现为:鞭根新根出生时间更加集中,主要在夏季。菟根虽然夏季

新根出生数量在全年占比较高,但却不集中于一个时期,而是分别在3月、7月、11月出现三个小高峰。初春和盛夏均为竹林生长发育的关键时期,也是根系周转的关键时期,此时新根数量的增加可能是植物地上地下部分对光合产物竞争的结果^[45-46]。因为生长季植物倾向于将更多养分用于地上部分生长,植物根系在养分有限的环境下,往往会有较高的周转以获取更多养分,所以新生细根增加^[47]。另外,植物对不同功能细根的碳投入有所差异^[48],秋冬季植物会降低具有吸收功能根的碳投入,倾向于构建以运输和储存为主要功能的根,从而增强抗性、储备养分和能量以御寒冬^[49]。所以,菟根和鞭根不同的新根发生规律可能与这两类根系的功能差异有关^[26];菟根更倾向于对土壤锚固起到支持竹子地上部分的作用,而鞭根则是主要进行养分吸收的根系,因此其新根发生的季节模式也不同。

3.3 淡竹菟根和鞭根细根寿命与出生时间的关系

土壤温度、水文情况、地上部分的生长等因素都会影响竹类植物的生长及其根寿命^[20]。本研究发现淡竹细根寿命与其出生时期有关,菟根夏季出生的根寿命最长,其次为冬季;鞭根春季出生的根寿命最长,其次为夏季。研究表明,降水和温度的季节变异会导致土壤环境和碳有效性的变化,进而影响根系的出生和死亡^[50]。在北方、温带以及亚热带,根系生长与月平均降水量、月平均温度均存在正相关关系^[51]。Eissenstat 等认为^[4],根寿命与降水等资源的供应关系密切,在雨水充足条件下根系的寿命会比干旱条件下更长。江西省处于亚热带季风湿润气候区,冬暖夏热,雨季多集中于4—6月,且由于台风的影响,7—8月有明显降水。所以,春季和夏季出生的细根寿命也会更长。

另外,菟根和鞭根细根出生时间与寿命间的关系存在差异:菟根夏季出生的根寿命最长,而鞭根春季出生的根寿命最长。根系寿命与植物的碳分配策略密切相关^[11,52]。前人研究也表明,毛竹细根的含碳量是衡量其周转速率和根寿命的重要指标^[53]。相较于鞭根,菟根的抗拉强度、弹性模量、组织密度、根长密度、根系深度、主根基径和中柱比例更大,细胞木质化程度也更高^[26],因此构建菟根需要更多的碳。夏季植物叶片生长基本完成,更多的碳可以分配到地下结构中,能够为新根提供较为充足的碳,所以构建的菟根寿命较长^[54]。而春季植物地上部分生长需要更多的碳,所以淡竹更倾向于构建寿命较长且主要承担吸收功能的鞭根,从而用最少的碳将根系的吸收功能最大化。

4 结论

细根的生长动态与植物的资源获取密切相关,本研究利用根箱对淡竹两种类型根系生长情况进行研究,从菟根和鞭根细根的发生和死亡、出生时期与根寿命等多个角度出发,探究淡竹细根的生长动态发育规律,主要研究结果如下:

(1)淡竹菟根和鞭根的细根寿命没有显著差异,但根序对根寿命有显著影响:1级根寿命显著低于2级根寿命,2级根寿命显著低于3级根寿命。

(2)淡竹的菟根和鞭根在生长动态上有明显的差异:鞭根新根发生数量在7月达到峰值,生长规律类似于单峰曲线。菟根新根发生没有明显的峰值,而是每隔三个月有一次新根发生的小高峰。菟根死亡高峰发生在夏季,其中6月的死亡数量最高,占比22.40%。鞭根各月死亡数量变化幅度较菟根小,死亡高峰发生在春季,其中4月死亡数量占比最高,为15.53%。

(3)不同月份、季节出生的细根寿命有所差异:菟根夏季出生的根寿命最长,春季出生的根寿命最短;鞭根春季出生的根寿命最长,冬季出生的根寿命最短。菟根1级根4月出生的根寿命最长,6月出生根寿命最短,2级根2月出生的根寿命最短,显著低于3月、6月和7月。鞭根1级根6月根寿命显著低于其他各月,2级根寿命3月出生的根寿最短,显著低于5、6、7、8月。

本研究可为理解淡竹的根系结构、功能和资源获取策略提供参考,为深入理解竹林地下生产力和生态过程提供数据支持。

致谢:梁宽对根箱设计提供的宝贵意见,武红燕和张振焯对根系生长观察和图像获取的帮助,胡姝珍、陈永镇、孟遂、王枕戈、祖星兰对样地布设的帮助,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Warren J M, Hanson P J, Iversen C M, Kumar J, Walker A P, Wulfschleger S D. Root structural and functional dynamics in terrestrial biosphere models—evaluation and recommendations. *New Phytologist*, 2015, 205(1): 59-78.
- [2] 孙佳慧, 史海兰, 陈科宇, 纪宝明, 张静. 植物细根功能性状的权衡关系研究进展. *植物生态学报*, 2023, 47(8): 1055-1070.
- [3] 胡琪娟, 王霖娇, 盛茂银. 植物细根生产和周转研究进展. *世界林业研究*, 2019, 32(2): 29-34.
- [4] Eissenstat D, Yanai R. The ecology of root lifespan. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27: 1-60.
- [5] 史建伟, 秦晴, 陈建文. 柠条人工林细根不同分枝根序寿命估计. *生态学报*, 2015, 35(12): 4045-4052.
- [6] 凌华, 袁一丁, 杨智杰, 黄锦学, 陈光水, 杨玉盛. 杉木人工林细根寿命的影响因素. *生态学报*, 2011, 31(4): 1130-1138.
- [7] 梅莉, 王政权, 程云环, 郭大立. 林木细根寿命及其影响因子研究进展. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 704-710.
- [8] Zhu L X, Liu L T, Sun H C, Zhang K, Zhang Y J, Li A C, Bai Z Y, Wang G Y, Liu X Q, Dong H Z, Li C D. Low nitrogen supply inhibits root growth but prolongs lateral root lifespan in cotton. *Industrial Crops and Products*, 2022, 189: 115733.
- [9] 于水强, 王静波, 郝倩葳, 王维枫, 王琪, 詹龙飞. 四种不同生活型树种细根寿命及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(9): 3040-3047.
- [10] Chen H Y H, Brassard B W. Intrinsic and extrinsic controls of fine root life span. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2013, 32(3): 151-161.
- [11] Wang Z K, Ding L B, Wang J S, Zuo X L, Yao S C, Feng J G. Effects of root diameter, branch order, root depth, season and warming on root longevity in an alpine meadow. *Ecological Research*, 2016, 31(5): 739-747.
- [12] Wu Y B, Deng Y C, Zhang J, Wu J, Tang Y H, Cao G M, Zhang F W, Cui X Y. Root size and soil environments determine root lifespan: evidence from an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Ecological Research*, 2013, 28(3): 493-501.
- [13] Guo D L, Xia M X, Wei X, Chang W J, Liu Y, Wang Z Q. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species. *New Phytologist*, 2008, 180(3): 673-683.
- [14] Contador M L, Comas L H, Metcalf S G, Stewart W L, Porris Gomez I, Negron C, Lampinen B D. Root growth dynamics linked to above-ground growth in walnut (*Juglans regia*). *Annals of Botany*, 2015, 116(1): 49-60.
- [15] Kern C C, Friend A L, Johnson J M F, Coleman M D. Fine root dynamics in a developing *Populus deltoides* plantation. *Tree Physiology*, 2004, 24(6): 651-660.
- [16] Gu J C, Yu S Q, Sun Y, Wang Z Q, Guo D L. Influence of root structure on root survivorship: an analysis of 18 tree species using a minirhizotron method. *Ecological Research*, 2011, 26(4): 755-762.
- [17] Weemstra M, Kiorapostolou N, van Ruijven J, Mommer L, de Vries J, Sterck F. The role of fine-root mass, specific root length and life span in tree performance: a whole-tree exploration. *Functional Ecology*, 2020, 34(3): 575-585.
- [18] 杨开良. 我国竹产业发展现状与对策. *经济林研究*, 2012, 30(2): 140-143.
- [19] 高志民. 竹类植物遗传育种研究进展. *世界竹藤通讯*, 2023, 21(1): 1-9.
- [20] 顾大彤, 陈双林, 郑炜曼, 毛仙琴. 竹子生态适应性研究综述. *竹子研究汇刊*, 2010, 29(1): 17-23.
- [21] 张云洁, 蔡昌杨, 冉取丙, 高鸿焯, 朱强. 竹子遗传改良技术研究进展. *世界林业研究*, 2021, 34(5): 26-31.
- [22] Zobel R W, Waisel Y. A plant root system architectural taxonomy: a framework for root nomenclature. *Plant Biosystems - an International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 2010, 144(2): 507-512.
- [23] 董鸣, 于飞海. 克隆植物生态学. 北京: 科学出版社, 2011: 5-7.
- [24] 董鸣, 于飞海. 克隆植物生态学学术语和概念. *植物生态学报*, 2007, 31(4): 689-694.
- [25] 萧江华. 中国竹林经营学. 北京: 科学出版社, 2010: 51-58.
- [26] Wang G R, Yu F, Wu H Y, Hu S Z, Wu S J, Pei N C, Shi J M, Lambers H. Roots originating from different shoot parts are functionally different in running bamboo, *Phyllostachys glauca*. *Functional Ecology*, 2023, 37(4): 1082-1094.
- [27] 林新春, 袁晓亮, 樊琳, 陈静, 王蔚, 胡超宗. 浙江淡竹资源与开发利用调查. *世界竹藤通讯*, 2005, 3(3): 36-38.
- [28] 王海霞, 彭九生, 曾庆南. 淡竹立竹生物量计算模型构建. *世界竹藤通讯*, 2014, 12(6): 6-10.
- [29] 范方礼, 冯火炬, 朱峰, 王海霞, 彭九生. 瑞昌市淡竹产业发展探讨. *现代农业科技*, 2012(14): 169-170, 179.
- [30] Pregitzer K S, DeForest J L, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293.
- [31] Freschet G T, Pagès L, Iversen C M, Comas L H, Rewald B, Roumet C, Klimešová J, Zadworny M, Poorter H, Postma J A, Adams T S, Bagniewska-Zadworna A, Bengough A G, Blancaflor E B, Brunner I, Cornelissen J H C, Garnier E, Gessler A, Hobbie S E, Meier I C, Mommer

- L, Picon-Cochard C, Rose L, Ryser P, Scherer-Lorenzen M, Soudzilovskaia N A, Stokes A, Sun T, Valverde-Barrantes O J, Weemstra M, Weigelt A, Wurzbarger N, York L M, Batterman S A, de Moraes M G, Janeček Š, Lambers H, Salmon V, Tharayil N, McCormack M L. A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *New Phytologist*, 2021, 232(3): 973-1122.
- [32] Luke McCormack M, Adams T S, Smithwick E A H, Eissenstat D M. Predicting fine root lifespan from plant functional traits in temperate trees. *New Phytologist*, 2012, 195(4): 823-831.
- [33] Fitter A. Characteristics and functions of root systems. *Plant Roots*. Boca Raton: CRC Press, 2002: 15-32.
- [34] Pregitzer K S, Kubiske M E, Yu C K, Hendrick R L. Relationships among root branch order, carbon, and nitrogen in four temperate species. *Oecologia*, 1997, 111(3): 302-308.
- [35] Guo D L, Li H, Mitchell R J, Han W X, Hendricks J J, Fahey T J, Hendrick R L. Fine root heterogeneity by branch order: exploring the discrepancy in root turnover estimates between minirhizotron and carbon isotopic methods. *New Phytologist*, 2008, 177(2): 443-456.
- [36] Guo D L, Mitchell R J, Withington J M, Fan P P, Hendricks J J. Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: root branch order predominates. *Journal of Ecology*, 2008, 96(4): 737-745.
- [37] Wells C E, Eissenstat D M. Beyond the roots of young seedlings: the influence of age and order on fine root physiology. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2002, 21(4): 324-334.
- [38] Liu B, He J X, Zeng F J, Lei J Q, Arndt S K. Life span and structure of ephemeral root modules of different functional groups from a desert system. *New Phytologist*, 2016, 211(1): 103-112.
- [39] Buwalda J G, Hutton R C. Seasonal changes in root growth of kiwifruit. *Scientia Horticulturae*, 1988, 36(3/4): 251-260.
- [40] Zerva A, Halyvopoulos G, Radoglou K. Fine root biomass in a beech (*Fagus sylvatica*L.) stand on Paiko Mountain, NW Greece. *Plant Biosystems-an International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 2008, 142(2): 381-385.
- [41] Mattsson A. Seasonal variation in root growth capacity during cultivation of container grown *Pinus sylvestris* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1986, 1(1/2/3/4): 473-482.
- [42] 林益明, 林鹏, 杨志伟. 绿竹林细根周转的研究. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1998, 37(3): 429-435.
- [43] 周本智, 傅懋毅. 庙山坞自然保护区毛竹林细根生产和周转研究. *江西农业大学学报*, 2008, 30(2): 239-245.
- [44] 周本智. 基于小观察窗技术的竹林地下系统动态研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [45] Atkinson D. The distribution and effectiveness of the roots of tree crops. *Horticultural Reviews*, 1980: 424-490.
- [46] Yanai R, Eissenstat D. Root life span, efficiency, and turnover. *Plant Roots*. Boca Raton: CRC Press, 2002: 221-238.
- [47] 李洁, 潘攀, 王长庭, 胡雷, 陈科宇, 杨文高. 三江源区不同建植年限人工草地根系动态特征. *草业学报*, 2021, 30(3): 28-40.
- [48] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 何远洋, 田祥宇, 肖银龙. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2472-2478.
- [49] 刘金梁, 梅莉, 谷加存, 全先奎, 王政权. 内生法研究施氮肥对水曲柳和落叶松细根生物量和形态的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 1-6.
- [50] 王奕丹, 李亮, 刘琪璟, 马泽清. 亚热带 6 个典型树种吸收细根寿命与形态属性格局. *植物生态学报*, 2021, 45(4): 383-393.
- [51] Abramoff R Z, Finzi A C. Are above- and below-ground phenology in sync? *New Phytologist*, 2015, 205(3): 1054-1061.
- [52] 黄刚, 赵学勇, 黄迎新, 李玉霖, 苏延桂. 两种生境条件下差不嘎蒿细根寿命. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 755-763.
- [53] 黄爱梅, 方毅, 孙俊, 李锦隆, 胡丹丹, 钟全林, 程栋梁. 武夷山不同海拔毛竹细根功能性状. *生态学报*, 2023, 43(1): 398-407.
- [54] 于水强, 王政权, 史建伟, 全先奎, 梅莉, 孙玥, 贾淑霞, 于立忠. 水曲柳和落叶松细根寿命的估计. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 102-109.