DOI: 10.5846/stxb201811092438

童冉,陈庆标,周本智,唐永强,安艳飞,葛晓改,曹永慧,杨振亚.毛竹和雷竹地下系统结构及生物力学性质.生态学报,2020,40(7):2242-2251. Tong R, Chen Q B, Zhou B Z, Tang Y Q, An Y F, Ge X G, Cao Y H, Yang Z Y.Structure and biomechanical properties of underground system of Moso bamboo and Lei bamboo.Acta Ecologica Sinica,2020,40(7):2242-2251.

毛竹和雷竹地下系统结构及生物力学性质

童 冉^{1,2},陈庆标³,周本智^{1,2,*},唐永强³,安艳飞^{1,2},葛晓改^{1,2},曹永慧^{1,2},杨振亚^{1,2} 1中国林业科学研究院亚热带林业研究所,杭州 311400 2 钱江源森林生态系统国家定位观测研究站,杭州 311400

3 浙江建德新安江林场, 建德 311600

摘要:利用植物稳定山体边坡是一种环保、经济、可持续的生物工程措施,符合生态文明建设新理念。以亚热带典型散生竹种毛 竹和雷竹地下系统结构为研究对象,描述毛竹和雷竹根系在土壤中的空间分布状况,探究影响毛竹和雷竹地下系统生物力学性 质的因素。结果表明:随着土层的深入,3 个径级的毛竹和雷竹根系长度和体积所占比重均表现出逐渐减少的趋势,0—40 cm 土层中集中了 80%以上的根系。毛竹和雷竹径级 D≤1 mm 根系占全部根系长度的比重均为最大,大小依次为雷竹鞭根 (83.62%)>雷竹竹根(80.46%)>毛竹鞭根(75.70%)>毛竹竹根(70.45%),毛竹径级 D≥2mm 根系体积所占比重最大,分别为竹 根 78.73%和鞭根 70.23%,雷竹径级 D≥2mm(43.60%)和 D=1—2mm(39.76%)竹根体积比例相当,径级 D=1—2mm 鞭根体积 为最大(50.78%);毛竹和雷竹不同生长阶段竹鞭抗拉强度和弹性模量之间均存在显著差异,中龄竹鞭抗拉强度显著高于幼龄 和老龄,而中龄竹鞭的弹性模量显著低于幼龄和老龄,说明生长阶段是影响竹鞭抗拉强度和弹性模量的因素;饱和含水率条件 下,毛竹和雷竹根系抗拉强度与直径呈负幂函数关系,12%含水率条件下,毛竹鞭根和雷竹竹根抗拉强度和直径仍然呈负幂函 数关系,毛竹竹根和雷竹鞭根抗拉强度和直径关系不显著。毛竹和雷竹地下系统抗剪切强度与干物质量均呈幂函数关系,毛竹 抗剪切强度增加趋势高于雷竹。

关键词:毛竹; 雷竹; 地下系统; 生物力学性质

Structure and biomechanical properties of underground system of Moso bamboo and Lei bamboo

TONG Ran^{1, 2}, CHEN Qingbiao³, ZHOU Benzhi^{1, 2, *}, TANG Yongqiang³, AN Yanfei^{1, 2}, GE Xiaogai^{1, 2}, CAO Yonghui^{1, 2}, YANG Zhenya^{1, 2}

1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

2 Qianjiangyuan Forest Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Hangzhou 311400, China

3 Zhejiang Jiande Xin' anjiang Forest Center, Jiande 311600, China

Abstract: Slope stabilization by vegetation is an environment-friendly, cost-effective, and sustainable biological engineering measure, which fits in with the new concept of ecological civilization construction. We took the underground system of Moso bamboo and Lei bamboo, which were typical scattered bamboo in subtropical zone of China, as study objects to describe the spatial distribution condition of root systems and to explore the factors affecting the biomechanical properties of underground system. The results showed that the proportion of length and volume for three diameter classes presented the trend of gradual decline with the depth of the soil. More than 80% of roots concentrated in the 0—40 cm soil layer. The proportion of length

基金项目:国家自然科学基金项目(31670607, 30840064);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(CAFYBB2017ZX002-2);国家 重点研发计划子课题(2016YFD0600202-4)

收稿日期:2018-11-09; 网络出版日期:2019-12-26

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: benzhi_zhou@126.com

http://www.ecologica.cn

for $D \le 1$ mm diameter class of root system was the highest. The order of proportion was Lei bamboo rhizome root (83.62%), Lei bamboo basal root (80.46%), Moso bamboo rhizome root (75.70%), and Moso bamboo basal root (70.45%). The proportion of volume for $D \ge 2$ mm diameter class of Moso bamboo was the biggest with the rhizome root and basal root being 78.73% and 70.23%, respectively. The proportion of volume for $D \ge 2$ mm diameter class for Lei bamboo rhizome root was similar. The volume for D = 1—2 mm diameter class was the biggest (50.78%). There were significant differences between the rhizome growth stages of tensile strength and modulus strength for both Moso bamboo and Lei bamboo. The tensile strength of middle-aged rhizome was significant lower than that of young and old aged rhizome, while the modulus strength of middle-aged rhizome was significant lower than that of young and old aged rhizome. It showed that the growth stage was a factor influencing the biomechanical properties of Moso bamboo and Lei bamboo. The relationship between tensile strength and diameter of Moso bamboo basal root systems were both in negative power function with 12% moisture content. However, the relationship between tensile strength and diameter of Moso bamboo basal root and Lei bamboo rhizome root were still in negative power function with 12% moisture content. However, the relationship between tensile strength and diameter of Moso bamboo and Lei bamboo were both in power function, and the increasing trend of shear strength for Moso bamboo basal root were significant any more. The relationship between shear strength and diameter of Moso bamboo and Lei bamboo.

Key Words: Moso bamboo; Lei bamboo; underground system; biomechanical properties

近年来,我国南方山地和丘陵等生态脆弱地区频繁遭受土壤侵蚀、山体滑坡和泥石流等自然灾害的侵袭, 山体边坡的稳定加固成为生态脆弱区生态环境恢复和重建的首要任务。利用植物对土壤稳定加固被认为是 一种对环境友好且低能减排的生物工程措施,植物地下庞大的根系系统能够通过机械和水文加固来提高土壤 的抗剪切强度,力学性能更强的根土复合体结构对山地边坡稳定性具有显著的提升作用^[1-3]。

植物根系生物力学性质容易受到根系直径^[4]、生长阶段^[3, 5]、水分状况^[4, 6]、腐烂程度^[7]以及拓扑结构^[8] 等特性的显著影响。大量研究表明,根系直径对根系拉伸性能影响很大,具体表现在直径与抗拉强度之间遵 循负幂函数关系,即随着直径的增大,抗拉强度迅速减小后趋于平缓。但 Boldrin 等^[3]认为木本植物生长初期 阶段根系直径与抗拉强度之间往往不遵循负幂函数关系,且受植物科属差异的显著影响。同时,Boldrin 等^[3] 还明确提出根系水分状况对根系抗拉强度和弹性模量等特性影响很大,需要在试验过程中严格控制。Yang 等^[4]围绕根系水分状况对根系力学性质影响展开了更为具体的研究,发现根系水分的轻微损失可以提高抗 拉强度,但水分损失过大易导致根系伸长能力减弱,进而丧失根系直径和抗拉强度之间的负幂函数关系。除 此之外,根系化学成分对力学性质的影响也成为近年来研究的热点,Zhang 等^[9]认为随着直径的增加,纤维素 含量增加,木质素含量下降,根系抗拉强度呈现下降趋势,这也是在山体边坡稳定中细根作用强于粗根的重要 原因。

毛竹(*Phyllostachys pubescencens*)和雷竹(*Phyllostachys praecox*)同属禾本科竹亚科刚竹属散生竹种,是我国南方优良的笋材两用竹种,为竹农带来极佳的经济效益。此外,毛竹和雷竹在山地、丘陵等生态脆弱区的广泛栽植起到了固定边坡,含蓄水源,防止泥石流、山体滑坡等自然灾害发生的作用,对生态脆弱区的生态环境恢复和重建具有不可替代的重要意义,这主要得益于散生竹种特有的地下横茎结构竹鞭与根系共同组成的发达地下系统,兼具横向和纵向的生物力学特性^[10-12]。目前,有关毛竹和雷竹研究多集中于栽培培育^[13]、生态效益评价^[14-15]等方面,而涉及毛竹和雷竹地下系统结构及生物力学性质的研究鲜有报道。本文以毛竹和雷竹地下系统为研究对象,描述不同径级根系长度和体积在不同土层分布状况,分析归纳影响地下系统生物力学性质的因素,以期为评价毛竹和雷竹控制土壤侵蚀、稳定山体边坡的能力提供依据,也为生态公益林政策推行提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 试验林概况

试验地点设在浙江钱江源森林生态系统国家定位观测研究站庙山坞自然保护区,位于浙江省杭州市富阳 区境内,地理位置为30°03′—30°06′N,119°56′—120°02′E。属浙西低山丘陵区天目山系余脉,山体主脉呈东 西走向,由主脉延伸的多条南北向支脉为本区主体,峡谷相间,谷向朝南,濒临富春江。气候属中亚热带季风 气候,季风显著,四季分明,降水充沛,温暖湿润。区内气候温和,夏季炎热,冬少严寒;年平均气温16.1℃,极 端最高气温40.2℃,极端最低-14.4℃;年平均降水量1441.9 mm。选取的毛竹和雷竹试验林分的立地条件均 为缓坡地,土壤为砂质壤土,土层厚度为1 m 左右,腐殖质2—4 cm,石砾含量15%左右。林分密度、年龄、胸 径、竹高等基本情况见表1。

表 1 七竹、笛竹瓜短桥方基本情况						
Table 1 Basic situation of the experimental stand of Moso bamboo and Lei bamboo						
竹种 Bamboo species	林分密度 Stand density/(株/hm ²)	林分年龄 Stand age/a	平均胸径 Average DBH/cm	平均竹高 Average height/m		
毛竹 Phyllostachys pubescencens	2980—4480	1—6	9.41	10.32		
雷竹 Phyllostachys praecox	19400—22400	1—4	3.05	5.21		

DBH: Diameter at Breast Height

1.2 样地选取和样品采集

于庙山坞自然保护区毛竹林内设立 10 m×10 m 的样地 1 块,在样地中选取有代表性的毛竹 3 株,分别以 毛竹基部竹秆为中心,在其周围挖取 1 m×2 m 的小样方。从土壤开始,每 20 cm 向下挖取所有的土壤和竹鞭、 根系,直到无竹鞭和根为止。从挖出的土壤中小心分拣出竹根、竹鞭、鞭根,用清水冲洗干净,风干,编号后带 回实验室进行数量指标的测定。

同样于庙山坞自然保护区雷竹林内设立1块10m×10m样地,选取3株代表性雷竹,以雷竹基部竹秆为中心,在其周围挖取0.5m×1m小样方。随后的样品采集方法与毛竹相同。

1.3 竹根、鞭根划分及竹鞭年龄的鉴定

竹根指直接着生在竹蔸上的细根,而鞭根指除了竹根以外的着生在竹鞭上的细根。竹鞭年龄主要根据竹 鞭色泽、质地以及鞭根多少来判定^[16]。年龄较小的为幼龄鞭,颜色较浅,呈浅黄色,有光泽。年龄较大的为老 龄鞭,颜色较深,呈深黄色或褐色,较暗,且着生鞭根较少,位于二者之间的为中龄鞭。

1.4 根系结构组成指标测量

于实验室内按照根系径级测定各径级长度、体积,在地下 0—60 cm 土层范围内,按照土壤垂直深度测定 根系长度、体积、干物质量等指标。具体方法为采用加拿大 Regent 公司(Regent Instruments Inc.)的 STD1600+ 双光源专用扫描仪,以透射光源对毛竹和雷竹竹根系样品进行扫描,扫描分辨率 400 ppi。采用根系图像分析 软件 WinRHIZO Pro 2005b 对图像进行分析,获取竹根长度、体积等指标。将各竹种根系样品置于 105℃的烘 箱中,烘至恒重,记录各样品的干质量,并计算含水率。

1.5 竹鞭和根系的生物力学测定

1.5.1 根系抗拉强度测定

设置饱和和 12% 两个含水率梯度,具体操作如下:将取得的根系分别分成两部分,一部分风干后放入高低交变湿热试验机(GZ-ESPEC),将温度调整到 20℃,相对湿度调整到 65%,待根系含水率达到 12% 后,拿出测定其他指标。另外一部分将其放入水中浸泡 48 h,使其含水率达到饱和。

用游标卡尺将不同含水率的根系样品按径级分为 D<1 mm、D=1—2 mm、D>2 mm 3 个部分,采用电子式 人造板试验机(MWD-10B)分别测量各径级及不同含水率根系样品的最大拉力,同时用游标卡尺量取断裂处

直径,每样品重复16—24次。计算根系抗拉强度[17]:

 $P = 4F/(\pi \times D2)$

式中,P为抗拉强度(Mpa);F为最大拉力(N);D为根系直径(mm)。

1.5.2 竹鞭抗拉强度测定

将毛竹、雷竹竹鞭按老、中、幼龄鞭分开,每种类型竹鞭分别制备长约 12—15 cm、宽约 4—8 mm、厚约 2— 5 mm 的长方体试件,每种试件做 12—16 个,将做好的试件编号风干,然后采用电子式人造板试验机(MWD-10B)分别测量各试件的抗拉强度,同时用游标卡尺量取断裂处直径。计算竹鞭抗拉强度,公式如根系。

1.5.3 竹鞭弹性模量测定

与测量竹鞭抗拉强度试件相同的试件每种制备 12 个,编号风干,放入高低交变湿热试验机(GZ-ESPEC),将温度调整到 20℃,相对湿度调整到 65%,待试件含水率达到 12%后,用电子式人造板试验机 (MWD-50)分别测量各试件的弹性模量。

1.6 地下系统抗剪切能力测定

采用现场十字剪切仪(Eijkeelkamp-VANE TESTER H-60)按 10 cm 一层,测量 0—60 cm 土层中裸地无根 土壤和竹林林地土壤的抗剪切强度(每层重复 10 次),2 个样地立地条件相同,裸地上无植物。利用毛竹和雷 竹林地土壤抗剪切强度减去裸地土壤抗剪切强度。推算出根系的存在导致土体增大的抗剪切强度^[17]。用土 钻将对应有根土壤测量的各层土壤全部取出,仔细挑出各层根系,洗净,风干,编号带回实验室,以备测量干质 量及其他指标。

1.7 数据处理

所有数据均通过 Excel 2003 软件进行初步整理,用 Origin 9.0 软件绘制条形堆积图、箱线图和拟合曲线,用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 根系径级组成及分布

根据实验室观察和测量结果,将植物根系径级分为 3 类: $D \le 1 \text{ mm}$, D = 1 - 2 mm 和 $D \ge 2 \text{ mm}$ 。从图 1 和 图 2 的条形堆积图中可以看出:随着土层的深入,毛竹和雷竹 3 个径级的根系长度和体积所占比重均呈现逐 渐减少的趋势,相较于鞭根,竹根的减少趋势较为缓慢。径级 $D \le 1 \text{ mm}$ 根系占全部根系长度的比重均为最 大,大小依次为雷竹鞭根(83.62%)>雷竹竹根(80.46%)>毛竹鞭根(75.70%)>毛竹竹根(70.45%)。毛竹竹 根和鞭根径级 D = 1 - 2 mm 长度所占比重略大于径级 $D \ge 2 \text{ mm}$,雷竹根系 D = 1 - 2 mm 径级长度比例远大于 径级 $D \ge 2 \text{ mm}$ 。由于雷竹根系相对较浅,竹根径级 D = 1 - 2 mm 径级 $D \ge 2 \text{ mm}$ (43.61%)体积所 占相当,而鞭根径级 D = 1 - 2 mm 体积比例最大,为 50.78%,这与雷竹径级 $D \ge 2 \text{ mm}$ 根系数量较少有关。从 长度和体积两个指标看,毛竹、雷竹根系在 0-40 cm 土层范围内分布均达到 80%以上,符合禾本科植物根系 浅、浅土层生物量占比高的特点^[18]。

2.2 不同年龄竹鞭的抗拉强度和弹性模量

毛竹、雷竹竹鞭直径相差不大,通过制作相同规格试件进行抗拉强度和弹性模量的测定,以竹鞭年龄为变量,分析竹鞭年龄对毛竹和雷竹竹种内和竹种间的差异。为更为直观的表现趋势变化,绘制箱线图。从图 3 中可以看出,毛竹和雷竹竹鞭抗拉强度表现出相似的变化趋势,即中龄和老龄显著高于幼龄,相差范围约为 14—26 MPa;毛竹各年龄段竹鞭抗拉强度均显著高于雷竹对应年龄段竹鞭,幼龄、中龄、老龄阶段竹鞭分别相 差约 17、27、19 MPa,说明毛竹竹鞭抗拉强度强于雷竹,且中生命活动最为旺盛的中龄最为明显。如图 3 所示,毛竹和雷竹竹鞭弹性模量随年龄的变化表现出与抗拉强度相反的变化趋势,即中龄低于幼龄和老龄,且在 毛竹竹鞭各年龄段都差异显著,而在雷竹竹鞭幼龄和老龄差异不显著。雷竹各年龄段竹鞭弹性模量均分别高 于毛竹,幼龄、中龄、老龄阶段竹鞭分别相差约 9000、6700、13000 MPa,说明雷竹竹鞭弹性模量优于毛竹,且随





图 1 毛竹、雷竹不同径级长度及其在各土层中的比例

Fig.1 Proportion of different diameter class length and its presence in every soil layer for Moso bamboo and Lei bamboo MZ: 毛竹竹根 Moso bamboo basal root; MB: 毛竹鞭根 Moso bamboo rhizome root; LZ: 雷竹竹根 Lei bamboo basal root; LB: 雷竹鞭根 Lei bamboo rhizome root



图 2 毛竹、雷竹不同径级体积及其在各土层中的比例



着竹龄龄的增加,两者之间的差异呈现先减小后增大的趋势。

不同含水率下根系的抗拉强度 2.3

如图 4 和表 2 所示,在饱和含水率条件下,毛竹和雷竹的两种不同根系(竹根和鞭根)抗拉强度和直径之 间均呈负幂函数关系,R²范围为0.659—0.735,拟合效果较好。从抗拉强度随直径的变化趋势可以看出,抗拉 强度在径级 D≤1 mm 直径范围内减小迅速,在径级 D=1-2 mm 直径范围内减小趋势放缓,在 D≥2 mm 直径 范围变化不大。依据根系负幂函数指数特性,雷竹竹根(-0.608)减小最为缓慢,雷竹鞭根(-0.406)最为快 速,毛竹竹根(-0.488)与鞭根(-0.469)减小趋势相差不大,介于雷竹两种根系之间。毛竹鞭根在径级<1 mm 细根范围相同径级处的抗拉强度都明显高于雷竹鞭根;毛竹和雷竹竹根抗拉强度在径级 D=0.5—3 mm 范围 内的相同径级处相差不大,而在径级 D=0-0.5 mm 范围内,雷竹要明显大于毛竹,说明不同竹种的相同类型 根系抗拉强度在根系特定径级范围内差异明显。毛竹竹根与鞭根抗拉强度随着根系直径增大表现出的减小 趋势,以及抗拉强度数值变化范围都比较相近,说明毛竹不同类型根系抗拉强度与根系直径的关系相差不大。 在根系径级 D=0-2 mm 范围内的相同径级处, 雷竹竹根的抗拉强度要明显高于鞭根, 且径级越小, 两者的差

0

毛竹竹根



图 3 毛竹、雷竹不同年龄段竹鞭抗拉强度和弹性模量箱线图及方差分析

Fig.3 Box diagram and variance analysis of tensile strength and elastic modulus for Moso bamboo and Lei bamboo rhizome of different ages

不同小写字母表示不同年龄段竹种内差异显著(P < 0.05);大写字母表示不同年龄段竹种间差异显著(P < 0.05)

值越大,最大可以达到 25 MPa 之多,雷竹不同类型根系抗拉强度与根系直径的关系相差很大,说明同一竹种 不同类型根系抗拉强度与直径的关系受竹种类型影响显著。

如图 5 和表 2 所示,在 12%含水率条件下,毛竹鞭根和雷竹竹根抗拉强度与根系直径仍存在显著的负幂 函数关系,*R*²分别为 0.665 和 0.698, 拟合效果较好,失水并未影响毛竹鞭根和雷竹竹根抗拉强度与直径关系, 但相较于饱和含水率条件,毛竹鞭根抗拉强度数值变化范围明显缩小,雷竹竹根抗拉强度数值变化范围相差 不大。毛竹竹根和雷竹鞭根抗拉强度与根系直径的关系不再显著,负幂函数关系的曲线拟合效果差,毛竹竹 根抗拉强度在径级 *D*=0.5—1.5 mm 根系径级范围内数值突降,雷竹鞭根在径级 *D*=0.5—1 mm 根系径级范围 内数值小,说明根系失水对不同径级毛竹和雷竹根系生物力学性质造成不同程度的影响,改变了抗拉强度与 根系直径的关系。

表 2 饱和、12%含水率条件下,毛竹、雷竹不同类型根系抗拉强度与直径曲线拟合方程

Table 2	Under the condition of	f saturated and	12% moisture	content, t	the Curve fitting	equation o	of tensile strength	and	diameter o	of different
types of 1	roots for Moso bamboo	and Lei bambo	0							

含水率条件 Water content condition	根系类型(缩写) Root type (Abbreviation)	直径区间 Diameter interval	样本数 Sample number	平均抗拉强度 Average tensile strength	抗拉强度、直径拟合曲线方程 $[R^2]/$ Fitting curve equation $[R^2, P]$
饱和含水率	毛竹竹根 (MZ)	0.42—4.12	33	34.57±12.63	$Y = 37.631 X^{-0.488} [0.735, P < 0.01]$
Saturated moisture content	毛竹鞭根 (MB)	0.31-3.79	33	38.20 ± 14.60	$Y = 38.711 X^{-0.469} [0.680, P < 0.01]$
	雷竹竹根 (LZ)	0.48-2.98	30	35.45±13.98	$Y = 38.984 X^{-0.608} [0.659, P < 0.01]$
	雷竹鞭根 (LB)	0.39—3.15	34	28.72±7.87	$Y = 31.140 X^{-0406} [0.692, P < 0.01]$
12%含水率	毛竹竹根 (MZ)	0.42-4.61	43	32.59 ± 10.15	$Y = 35.007 X^{-0.141} [0.066, P > 0.05]$
12% moisture content	毛竹鞭根 (MB)	0.31-3.30	35	35.02±14.21	$Y = 36.234 X^{-0.437} [0.665, P < 0.01]$
	雷竹竹根 (LZ)	0.24—3.01	30	31.92±2.96	$Y = 32.741 X^{-0.215} [0.698, P < 0.01]$
	雷竹鞭根 (LB)	0.30-2.80	37	33.48±6.14	$Y = 32.056X^{-0.154} [0.276, P > 0.05]$

2.4 地下系统抗剪切强度

植物地下系统与土体的复合体相较于素土体,具有更强的抗剪切强度^[19]。从图 6 可以看出,外界土壤条件一致的前提下,在地下 0—60 cm 的土层范围内,毛竹和雷竹地下系统抗剪切强度与干物质量之间遵循幂函



图 4 饱和含水率条件下,毛竹、雷竹不同类型根系抗拉强度与直径的关系

Fig.4 Under the condition of saturated moisture content, the relationship between tensile strength and diameter of different types of roots for Moso bamboo and Lei bamboo

数关系($y = \alpha x^{\beta}$),关系式分别为 $y = 5.687 x^{0.790} (R^2 = 0.757, P < 0.01)$ 和 $y = 9.620 x^{0.361} (R^2 = 0.632, P < 0.01)$ 。毛竹 幂函数指数较高,系数较低,说明毛竹地下系统抗剪切强度随着干物质量增加而快速增加,只是初始值较低。 雷竹幂指数函数较小,说明雷竹地下系统抗剪切强度随着干物质量增加而缓慢增加,而由于系数较高,在 0— 1.8 kg 变化范围内略高于毛竹。综合来看,由于毛竹地下系统根系庞大,干物质量更大,所以毛竹的抗剪切强 度要优于雷竹。

3 讨论

3.1 毛竹和雷竹根系空间分布特征

为了解毛竹和雷竹根系空间分布特征的异同,对根系空间结构特征进行研究,主要包括垂直分布特征和 不同径级根系分布特征两个方面。结果表明,在0-60 cm 土层,毛竹和雷竹根系含量随土层深度增加而逐渐 减少,这与刘国华等^[20]对同为竹亚科的四种地被竹,以及李谦等^[17]对绿竹(*Bambusa oldhami*)根系结构的研 究结果一致。植物根系的层次分布受到遗传特性和外界环境条件等综合影响^[21]。本研究发现 0-40 cm 土 层几乎包括了毛竹和雷竹 80%的根系,且由于雷竹竹根分布较浅,在40-60 cm 土层几无分布。在 0-20 cm 和 20-40 cm 土层内,相同竹种不同类型根系,以及不同竹种相同类型根系含量分布出现较大的差异。因此, 在相同外界环境条件下,物种的遗传特性对根系垂直分布特征起到决定性作用^[22]。

在植物根系功能研究中,通常将直径<2 mm 的根称为细根,细根是植物吸收水分和养分维持生长的主要器官,直径>2 mm 的根则被称为粗根,粗根主要起构架和支撑作用^[23]。本研究对不同径级根系分布特征进行分析,发现毛竹和雷竹 3 个径级根系长度和体积所占比重均随着土壤深入而逐渐减小,毛竹和雷竹 D<1 mm 根系长度所占比重均为最大,且大量研究表明,根系的固土作用与径级 D<1 mm 细根的密度有极显著正相关



图 5 12%含水率条件下,毛竹、雷竹不同类型根系抗拉强度与直径的关系

Fig.5 Under the condition of 12% moisture content, the relationship between tensile strength and diameter of different types of roots for Moso bamboo and Lei bamboo

关系^[24-26]。毛竹和雷竹 D>2 mm 的粗根根系长度随占 比重最小,毛竹竹根和鞭根 D>2 mm 的粗根体积所占比 重均为最大,雷竹竹根和鞭根 D>2 mm 的粗根体积比重 则不占明显优势,这可能毛竹体型比雷竹更为巨大,粗 根为根系提供了更强的抗冲性和抗蚀性^[27]。

3.2 生长阶段对毛竹和雷竹竹鞭生物力学特性的影响

诸多研究表明,林木性状在不同生长阶段表现出极 大地差异,包括物理性能和化学性质等方面^[28-29]。本 研究根据不同生长阶段竹鞭特性,将其划分为幼龄、中 龄、老龄3个年龄段,测定抗拉强度和弹性模量,以反映 竹鞭抵抗塑性变形和弹性变形的能力。结果发现,三个 年龄段毛竹和雷竹的抗拉强度和弹性模量分别表现出 相同的变化趋势,说明散生竹特有结构竹鞭在不同竹种 间存在共性。毛竹和雷竹竹种内不同年龄段抗拉强度 和弹性模量均存在显著差异,说明生长阶段是影响竹鞭





Fig. 6 Relationship between shear strength and dry mass of underground parts for Moso bamboo and Lei bamboo

生物力学性质的重要因素。通过对毛竹和雷竹竹种间抗拉强度和弹性模量方差分析发现,毛竹抵抗塑性变形的能力强于雷竹,但抵抗弹性变形的能力弱于雷竹,说明体型大的毛竹在抵抗强风等外力作用的能力更为突出,而体型小的雷竹在外力作用消失时更容易恢复原状。除此之外,不同竹种生物力学性质在相同的生长阶

段差异显著,这与 Boldrin 等^[3]和 Zhao 等^[30]的研究结论相一致。

3.3 毛竹和雷竹根系抗拉强度

根系抗拉强度对土壤抗剪切强度贡献很大^[31]。有研究表明,单根抗拉强度受根系直径和含水率的显著 影响^[4,6]。本研究通过设置饱和和12%两个含水率梯度,分析自然状态和极端干旱事件发生时出现的严重失 水状态下根系抗拉强度与直径之间相关关系。研究发现,饱和含水率条件下,毛竹和雷竹两者根系抗拉强度 均随着直径的增大而减小,呈现负幂函数关系,这与龙竹(Dendrocalamus giganteus)、料慈竹(Bambusa distegia)、香竹(Chiomonocalamus delicatus)、绿竹等几种丛生竹^[17,32],以及华北落叶松(Larix principisrupprechtii)^[33]、多花木兰(Magnolia multiflora)^[34]等木本植物的研究结果相一致。但田佳和刘耀辉^[35]在对早 熟禾(Poa annua)、无芒雀麦(Bromus inermis)、多年生黑麦草(Lolium perenne)和高羊茅(Festuca elata)4种草 本植物的研究发现单根抗拉强度与根系径级呈线性正相关关系,即随着根系直径的增大,抗拉强度也随之 增大。

Yang 等^[4]研究发现根系含水量的轻微损失可以提高抗拉强度,但水分损失过大会降低根系抗拉强度。 本研究中,12%含水率条件下,根系失水对毛竹和雷竹不同类型根系影响不同,毛竹鞭根和雷竹竹根抗拉强度 与根系直径仍保持负幂函数关系,在相同根系径级变化范围内,相较饱和含水率条件,失水并未导致毛竹鞭根 抗拉强度数值范围的明显变化,但失水显著缩小了雷竹竹根抗拉强度数值范围。失水导致毛竹竹根和雷竹鞭 根抗拉强度与直径之间负幂函数关系不再显著,具体表现在毛竹竹根1.0—2.0 mm 径级根系抗拉强度出现大 幅减少,而雷竹径级 D>2.5 mm 鞭根的抗拉强度则明显减小,说明根系严重失水会对不同竹种、不同根系类型 以及不同根系径级等造成显著影响。

3.4 干物质量与地下系统抗剪切强度关系

土壤抗压强度大而抗剪切强度小,植被种植可以显著增大土壤抗剪切强度,增强山体边坡稳定性,植被根系对土壤的机械加固发挥着重要作用^[36]。通过设置立地条件相同的裸地和竹林林地,对地下系统抗剪切强度与根系含量之间的关系进行了研究,发现毛竹和雷竹地下系统抗剪切强度均随着干物质量的增加而增加, 说明根-土复合体显著增强了土壤的抗剪切强度,且遵循幂函数关系,这与李谦等^[17]对绿竹,田佳和刘耀辉^[33] 对华北边坡绿化植物研究发现的一次函数关系,以及李绍才等^[37]发现的根土复合体抗剪切强度与根系含量 呈指数函数关系略有不同。在干物质量 0—1.8 kg 范围内,由于雷竹系数(9.622)高于毛竹(5.687),雷竹抗剪 切强度在相同干物质量强于毛竹,但毛竹幂指数(0.790)远大于雷竹(0.361),说明毛竹抗剪切强度的增加趋 势更为明显。因此,在相同的外界自然环境条件下,相较于体型小的雷竹,毛竹庞大的地下系统将为土壤提供 更为强大的抗剪切强度。

4 结论

毛竹和雷竹根系含量和不同径级根系长度和体积所占比例随土层深入呈现逐渐减小的趋势,0—40 cm 土层中集中了 80%以上的根系。细根长度比例远高于粗根,而粗根体积比例多数高于细根,前者为土壤提供 优良的力学性能,而后者为植物了支撑和框架。生长阶段对毛竹和雷竹竹鞭生物力学性质影响显著,毛竹抵 抗塑性变化能力强于雷竹,而雷竹抵抗弹性变化能力优于毛竹。饱和含水率条件下,毛竹和雷竹抗拉强度和 根系直径之间呈负幂函数关系,12%含水率条件下,因竹种和根系类型差异,根系失水对根系抗拉强度与直径 的关系造成不同影响。毛竹和雷竹地下系统抗剪切强度均随着干物质量的增大而增大,毛竹的增大趋势远高 于雷竹。本文对亚热带地区广泛分布的毛竹和雷竹的地下系统结构及生物力学性质的进行了研究,以期为山 区土壤侵蚀和山体滑坡等的生物防治工程的实施提供科学数据支持。

参考文献(References):

^[1] Moscatelli M C, Romagnoli M, Cenfi S, Lagomarsino A, Di Tizio A, Spina S, Grego S. Wood-soil interactions in soil bioengineering slope stabilization works. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2009, 2(1): 187-191.

- [2] Baets S D, Poesen J, Reubens B, Wemans K, Baerdemaeker J D, Muys B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. Plant and Soil, 2008, 305(1-2): 207-226.
- [3] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Root biomechanical properties during establishment of woody perennials. Ecological Engineering, 2017, 109; 196-206.
- [4] Yang Y J, Chen L H, Li N, Zhang Q F. Effect of root moisture content and diameter on root tensile properties. PLoS One, 2016, 11 (3): e0151791.
- [5] 刘艳琦.5种植物两个生长时期根系生物力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [6] 格日乐, 斯琴, 刘俊宇. 6种防风植物枝条生物力学特性及影响因素. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1333-1339.
- [7] Ortiz R, Jamet A, Herrera P, Vindigni G, Pereira A. Influence of incipient decay caused by the brown-rot fungy Serpula lacrimans, on the mechanical properties of normal and parallel compression to the fiver in Pinus radiata D. Don. Informes de la Construcción, 2011, 63 (521): 69-74.
- [8] Mao Z, Wang Y, McCormack M L, Rowe N, Deng X B, Yang X D, Xia S W, Nespoulous J, Sidle R C, Guo D L, Stokes A. Mechanical traits of fine roots as a function of topology and anatomy. Annals of Botany, 2018, 122(7): 1103-1116.
- [9] Zhang C B, Chen L H, Jiang J. Why fine tree roots are stronger than thicker roots: the role of cellulose and lignin in relation to slope stability. Geomorphology, 2014, 206: 196-202.
- [10] Embaye K. Ecological Aspects and Resource Management of Bamboo Forests in Ethiopia[D]. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2003.
- [11] Stokes A, Lucas A, Jouneau L. Plant biomechanical strategies in response to frequent disturbance: uprooting of *Phyllostachys nidularia* (Poaceae) growing on landslide prone slopes in Sichuan, China. American Journal of Botany, 2007, 94(7): 1129-1136.
- [12] Lin D G, Huang B S, Lin S H. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability. Ecological Engineering, 2010, 36(8): 992-1006.
- [13] 高集美. 雷竹引种栽培试验与丰产培育技术. 福建林业科技, 2003, 30(S1): 69-70.
- [14] 李小天,杨麒麟,王兵,韩重阳. 滑坡区毛竹护坡的固土效果及经济效益研究. 人民长江, 2017, 48(19): 25-28.
- [15] 王玲,赵丽娅. 竹类植物的生态功能. 资源开发与市场, 2011, 27(4): 342-343, 362-362.
- [16] 周本智, 傅懋毅. 粗放经营毛竹林鞭系和根系结构研究. 林业科学研究, 2008, 21(2): 217-221.
- [17] 李谦,周本智,安艳飞,徐升华.绿竹根系分布及生物力学性质.应用生态学报,2014,25(5):1319-1326.
- [18] 袁雪红,高照良,张翔,杜捷,张小娟.护坡植物根系分布及抗拉力学特性.南水北调与水利科技,2016,14(5):117-123.
- [19] 吴鹏,谢朋成,宋文龙,曹军.基于根系形态的植物根系力学与固土护坡作用机理.东北林业大学学报,2014,42(5):139-142.
- [20] 刘国华.4种地被竹生态学特性及其固土功能研究[D].南京:南京林业大学,2008.
- [21] 胡建忠,郑佳丽,沈晶玉.退耕地人工植物群落根系生态位及其分布特征.生态学报,2005,25(3):481-490.
- [22] 王永吉,赵学春,来利明,朱林海,王健健,周继华,姜联合,马远见,赵春强,郑元润.三工河流域梭梭群落细根生长动态及周转.生态 与农村环境学报,2013,29(5):666-670.
- [23] John B, Pandey H N, Tripathi R S. Vertical distribution and seasonal changes of fine and coarse root mass in *Pinus kesiya* Royle Ex.Gordon forest of three different ages. Acta Oecologica, 2001, 22(5/6): 293-300.
- [24] 张金池,康立新,卢义山,冷书法,冯福生.苏北海堤林带树木根系固土功能研究.水土保持学报,1994,8(2):43-47,55-55.
- [25] 陈浩,余毅敏,唐旭栋,周之静,赵雅青.浦阳江下游江岸草本植物根系对土壤抗冲性的影响.水土保持研究,2017,24(2):60-63, 69-69.
- [26] Genet M, Stokes A, Salin F, Mickovski S B, Fourcaud T, Dumail J F, van Beek R. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 1-9.
- [27] 梁同江, 芦建国, 孔凡海. 高速公路生态边坡灌木根系垂直分布特征. 林业科技开发, 2011, 25(2): 62-65.
- [28] Wahab R, Mohamed A, Mustafa M T, Hassan A. Physical characteristics and anatomical properties of cultivated bamboo (*Bambusa vulgaris* Schrad.) culms. Journal of Biological Sciences, 2009, 9(7): 753-759.
- [29] Lin J X, He X Q, Hu Y X, Kuang T Y, Ceulemans R. Lignification and lignin heterogeneity for various age classes of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) stems. Physiologia Plantarum, 2002, 114(2): 296-302.
- [30] 赵春花,韩正晟,师尚礼,张锋伟.新育牧草茎秆收获期力学特性与显微结构.农业工程学报,2011,27(8):179-183.
- [31] de Baets S, Poesen J, Reubens B, Wemans K, de Baerdemaeker J, Muys B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. Plant and Soil, 2008, 305(1/2): 207-226.
- [32] 惠尚, 张云伟, 刘晶, 朱廷国. 丛生竹根系抗拉力学特性. 山地学报, 2013, 31(1): 65-70.
- [33] 李晓凤,陈丽华,王萍花.华北落叶松根系抗拉力学特性.中国水土保持科学,2012,10(1):82-87.
- [34] 万娟,肖衡林,何俊.多花木兰根系抗拉特性及边坡稳定性分析.华中科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):109-113.
- [35] 田佳,刘耀辉.华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究.中国水土保持,2007,(10):34-36.
- [36] Osman N, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability-Soil water and root profiles. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 90-95.
- [37] 李绍才,孙海龙,杨志荣,何磊,崔保山.坡面岩体-基质-根系互作的力学特性.岩石力学与工程学报,2005,24(12):2074-2081.