

浙江安吉三种典型林分类型下土壤入渗特征及其影响因素^①

郭 峰¹, 杨思思², 张 林³, 邱朝伟², 魏侃俐⁴, 郭衍瑞³, 赵天衡³, 范长江³, 齐 实^{3*}

(1 安吉交通投资发展集团有限公司,浙江湖州 313300;2 安吉县水利局,浙江湖州 313000;3 北京林业大学水土保持学院,北京 100083;

4 上海市农业发展促进中心,上海 201403)

摘要:本研究利用表置式双环测定仪测定了浙江安吉3种典型林分类型(毛竹纯林、毛竹-杉木混交林、杉木纯林)的入渗性能,并分析了土壤性质和根系特征对土壤入渗速率的影响。结果表明:①初始入渗速率(947.7~1220.5 mm/h)、第1阶段入渗速率(612.6~751.6 mm/h)、第2阶段入渗速率(479.0~591.3 mm/h)、第3阶段入渗速率(352.9~433.4 mm/h)、稳定入渗速率(272.0~369.0 mm/h)、平均入渗速率(373.1~498.2 mm/h)均随着毛竹入侵程度的增加而增加,除初始入渗速率外,其他入渗速率总体上表现为毛竹纯林>毛竹-杉木混交林>杉木纯林。②初始入渗速率、第1阶段入渗速率和平均入渗速率主要受0~10 cm土层黏粒含量以及10~20 cm土层细根(<2 mm)生物量和土壤容重的影响;第2阶段、第3阶段和稳定入渗速率主要受0~10 cm土层非毛管孔隙度和细根(<2 mm)生物量以及10~20 cm土层细根根长密度影响。③细根(<2 mm)生物量和根长密度可通过影响土壤非毛管孔隙、容重和黏粒含量间接影响土壤入渗速率。④Kostiakov模型是描述不同林分类型下土壤入渗过程的最佳模型。

关键词:林分类型;土壤入渗;根系特征;土壤性质;毛竹

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Soil Infiltration Characteristics and Influential Factors Under Three Typical Forest Stand Types in Anji County of Zhejiang Province

GUO Feng¹, YANG Sisi², ZHANG Lin³, QIU Zhaowei², WEI Kanli⁴, GUO Yanrui³, ZHAO Tianheng³, FAN Changjiang³, QI Shi^{3*}

(1 Anji Transportation Investment and Development Group Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang 313300, China; 2 Anji County Water Resources Bureau, Huzhou, Zhejiang 313000, China; 3 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4 Shanghai Agricultural Development Promotion Center, Shanghai 201403, China)

Abstract: In this study, the infiltration capacities under three typical forest stand types (moso-bamboo forest, moso-bamboo-fir mixed forest, and fir Forest) in Anji County of Zhejiang Province were measured using a table-top double-ring infiltrometer, and the influence of soil properties and root characteristics on soil infiltration rate was analyzed. The results showed that, 1) the initial (947.7–1220.5 mm/h), the 1st stage (612.6–751.6 mm/h), the 2nd stage (479.0–591.3 mm/h), the 3rd stage (352.9–433.4 mm/h), the stabilized (272.0–369.0 mm/h), and the average (373.1–498.2 mm/h) infiltration rates increased with intensified degree of bamboo invasion. Except for the initial infiltration rate, the others generally reflected the following pattern: severe invasion (moso-bamboo forest) > moderate invasion (moso-bamboo-fir mixed forest) > no invasion (fir forest). 2) Initial, 1st stage and average infiltration rates were mainly influenced by clay contents in 0–10 cm layer, fine root biomass (<2 mm) and soil bulk density in 10–20 cm layer; 2nd stage, 3rd stage and stable infiltration rates were mainly influenced by non-capillary tube porosity, fine root biomass (<2 mm) in 0–10 cm layer and fine root long density in 10–20 cm layer. 3) Fine root biomass (<2 mm) and root length density may indirectly affect soil infiltration rate by influencing soil non-capillary porosity, bulk density and clay content. 4) The Kostiakov model was the best model to describe soil infiltration process in three typical forest stand types.

Key words: Forest stand types; Soil infiltration; Root characteristics; Soil properties; Moso bamboo

①基金项目: 国家自然科学基金项目(32271964)资助。

* 通信作者(qishi@bjfu.edu.cn)

作者简介: 郭峰(1987—),男,浙江安吉人,硕士,主要从事水土保持研究工作。E-mail: 262407260@qq.com

土壤入渗是土壤物质能量关键影响因素之一,能直接反映土壤涵养水源的能力^[1-3]。植物入侵会改变林分类型,进而造成林分结构、根系特性以及土壤性质的改变,这会影响森林的土壤入渗能力和水流过程^[4]。因此,研究不同林分类型下的土壤入渗特征对评估区域生态水文功能具有重要意义。

土壤入渗性能受植物根系和土壤性质等多因素综合影响^[5-6]。其中,土壤性质是影响入渗渗透能力的关键因素,主要包括土壤容重、土壤非毛管孔隙、连通性、分形维数以及土壤有机碳和全氮等^[7-8]。土壤有机碳诱导的根土复杂性对土壤入渗和水分运动有显著影响,土壤有机碳的提升能促进土壤水流运动^[9]。此外,土壤质地是影响土壤渗透能力的内在因素,相比于黏粒土壤,砂粒土壤的渗透性能较高^[10-11]。另有研究表明,植物根系特性对土壤入渗有显著影响,一方面,植物根系可以通过改变土壤孔隙大小、分布、渗透性来直接或间接影响土壤入渗能力^[12];另一方面,根系分泌物通过改变团聚体稳定性以及微生物活性,进而改变土壤空间结构特征,影响土壤渗透性能^[13]。不同林分类型下的根系生物量、根长密度、根表面积密度和根体积密度具有差异性,这造成了土壤渗透能力的空间异质性^[14-15]。不同直径的根系对土壤入渗能力的影响仍存在较大的争议。Wang 等人^[16]研究表明,细根生物量对土壤入渗具有促进作用;而 Lu 等人^[3]认为细根对土壤渗透能力具有抑制作用。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)广泛分布在我国南方山区,依靠其地下发达的根系系统,不断入侵周边森

林群落,最终形成不同的林分类型。在我国亚热带地区,毛竹入侵针叶林现象分布广泛,主要入侵的针叶林为杉木林,并逐步形成毛竹-杉木混交林和毛竹纯林^[17]。现有的研究主要探讨了毛竹入侵杉木林后土壤养分和微生物群落多样性的变化特征^[18],针对毛竹入侵杉木林后土壤入渗特征及其主要影响因素仍不清楚。基于此,本研究以浙江安吉县 3 种典型林分类型(毛竹纯林、毛竹-杉木混交林、杉木纯林)为研究对象,测定其土壤性质、根系特性以及土壤入渗特征,分析土壤入渗的影响机制,为毛竹林的抚育经营管理、可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省湖州市安吉县水土保持示范园(30°36'30.3"N, 119°35'1.455"E),属于亚热带季风气候,年均降水量 1 400 mm,主要集中在 5—8 月,年均气温 16.6 °C。土壤主要为黄壤,土层厚度为 50~70 cm。经过毛竹林的入侵,现有主要林分类型包括杉木林、毛竹林、毛竹-杉木混交林。

1.2 样地设置

以研究区 3 种典型林分类型(完全入侵的毛竹纯林、中度入侵的毛竹-杉木混交林、未入侵的杉木纯林)为研究对象,在保证立地条件基本一致的情况下,在每种林分类型上随机布设 3 个 20 m × 20 m 的样地,并在每个样地内随机布设 5 个 1 m × 1 m 的样方作为土壤入渗测量点,3 种典型林分类型下的样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of three plots tested

林分类型	毛竹-杉木混交比	海拔(m)	坡度	坡向	林分密度(株/hm ²)	土壤类型	土层厚度(cm)
毛竹纯林	9 : 1	73	8°	西	2 100	黄壤	58
毛竹-杉木混交林	5 : 5	75	9°	西南	1 350	黄壤	57
杉木纯林	1 : 9	76	9°	西南	925	黄壤	56

1.3 土壤入渗速率测定

在选定的样点上使用橡胶锤将内环直径 30 cm、外环直径 60 cm 的表置式双环式入渗测定仪插入土壤表面下 3 cm,将 4 g/L 的亮蓝溶液和清水分别同时快速地倒入内环和外环,保证内环和外环水位高度始终保持 4 cm。记录内环水头高度每下降 0.5 cm 所用的时间,持续记录连续下降至少 4 次且每 0.5 cm 下降时间不变时,认为土壤入渗已经达到稳定入渗阶段^[5]。

1.4 土壤样品和根系采集测定

在双环入渗试验完成后,采用环刀采集土壤样

品,用于测定土壤容重、土壤总孔隙度、土壤非毛管孔隙度。此外,在双环入渗测点开挖一处水平剖面,采集各土层土样,用于测定土壤初始含水量、土壤化学性质和土壤质地等基本性质。将采集的土壤样品用清水在 2 mm 土筛内洗脱出所有根系,洗出的根系平摊放在阴凉通风处自然风干,风干后人工按照 1 mm 径级分类裁剪拆解,包括 <2 mm 和 >2 mm,并分类称重得到不同径级的生物量。随后使用 WinRHIZO-pro 根系扫描分析系统将不同径级的根系进行扫描和测量,从而计算根系生物量和根长密度参数。

1.5 指标计算

1.5.1 土壤入渗速率计算 土壤入渗速率是土壤水分单位时间内的下渗速度, 土壤入渗速率计算公式如下^[19]:

$$IR_i = \frac{\Delta I}{\Delta t} \times 600 \quad (1)$$

式中: IR_i 为土壤入渗速率(mm/h); ΔI 为内环在 Δt 时段(min)内入渗的水头高度(cm); 600 为转换系数。

1.5.2 入渗阶段划分 为了对土壤入渗特征更细致地分析描述, 通过入渗曲线的变化率划分入渗阶段, 即对土壤入渗曲线的变化率进行分析, 并划分几个不同的阶段, 用该阶段的平均入渗率表示该阶段的入渗特征, 土壤入渗速率的变化率是基于入渗时间的导数计算的。

$$DI_i = -a\beta t^{-(\beta+1)} \quad (2)$$

式中: DI_i 表示土壤入渗率的变化率($\text{mm}/(\text{h}\cdot\text{min})$); i 表示毛竹纯林、毛竹-杉木混交林或杉木纯林; a , β 为拟合的参数; t 为时间。

1.5.3 土壤入渗模型

1) Philip 模型。

$$f(t) = st^{-\frac{1}{2}} + c \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为土壤入渗率(mm/h); s 为反映土壤水吸力的参数; c 为稳定入渗率 (mm/h); t 为入渗时间(h)。

2) Horton 模型。

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中: f_c 为稳定入渗率 (mm/h); f_0 为初始入渗率 (mm/h); t 为入渗时间 (h); k 为拟合参数。

3) Kostiakov 模型。

$$f(t) = at^\beta \quad (5)$$

式中: α 和 β 都是拟合的参数。

1.6 数据统计分析

使用单因素方差(ANOVA)分析不同林分之间土壤基本理化性质、各阶段土壤入渗速率的差异性, 采用多元逐步回归和结构方程模型研究影响土壤入渗速率的主导因子。

2 结果与分析

2.1 三种典型林分类型土壤基本理化性质

3 种典型林分类型土壤基本理化性质见表 2。在 0~40 cm 土层内, 毛竹纯林的土壤容重随着土层深度的增加而增加, 土壤 pH 随土层深度的增加变化不显著, 而其他土壤理化性质总体上随着土层的增加而降低。相比于杉木纯林, 毛竹纯林 0~30 cm 土层土壤容重较低, 而非毛管孔隙度、总孔隙度、全氮和有机碳含量较高。

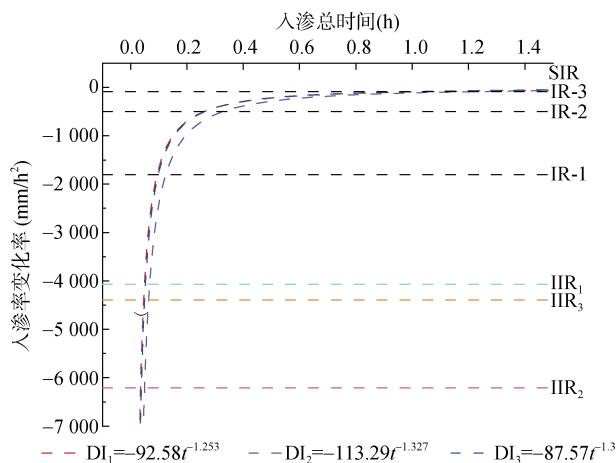
表 2 土壤基本理化性质
Table 2 Soil basic physiochemical properties

土层深度(cm)	林分类型	容重(g/cm^3)	总孔隙度(%)	非毛管孔隙度(%)	有机碳(g/kg)	pH	全氮(g/kg)
0~10	毛竹纯林	1.11 ± 0.08 a	49.11 ± 3.47 a	10.47 ± 2.02 a	29.02 ± 4.05 a	4.91 ± 0.37 a	2.46 ± 0.28 a
	毛竹-杉木混交林	1.19 ± 0.03 a	42.82 ± 4.71 b	8.72 ± 0.99 ab	22.54 ± 2.03 a	4.44 ± 0.46 ab	1.71 ± 0.31 a
	杉木纯林	1.20 ± 0.05 a	48.12 ± 3.26 ab	7.34 ± 0.83 b	28.22 ± 15.21 a	4.28 ± 0.10 b	1.64 ± 0.78 a
10~20	毛竹纯林	1.28 ± 0.06 b	42.43 ± 2.15 a	7.43 ± 1.03 a	17.70 ± 3.40 a	4.78 ± 0.10 a	1.32 ± 0.32 a
	毛竹-杉木混交林	1.41 ± 0.06 b	44.04 ± 5.54 a	6.38 ± 0.09 b	13.77 ± 3.35 a	4.75 ± 0.18 a	0.91 ± 0.21 a
	杉木纯林	1.46 ± 0.02 a	44.79 ± 2.09 a	5.90 ± 0.06 c	12.79 ± 0.60 b	4.96 ± 0.23 a	0.84 ± 0.04 b
20~30	毛竹纯林	1.27 ± 0.01 b	39.89 ± 4.10 a	5.82 ± 1.87 b	11.19 ± 1.32 a	5.17 ± 0.27 a	0.90 ± 0.25 a
	毛竹-杉木混交林	1.33 ± 0.02 b	39.63 ± 2.84 a	7.27 ± 0.80 a	11.08 ± 1.76 a	5.20 ± 0.18 a	0.77 ± 0.19 b
	杉木纯林	1.47 ± 0.10 a	44.19 ± 3.27 a	6.66 ± 0.11 b	8.42 ± 4.51 a	5.20 ± 0.10 a	0.62 ± 0.21 b
30~40	毛竹纯林	1.45 ± 0.01 a	39.69 ± 2.92 a	5.26 ± 0.48 a	7.65 ± 0.74 a	5.49 ± 0.18 a	0.57 ± 0.07 a
	毛竹-杉木混交林	1.37 ± 0.03 a	42.14 ± 3.29 a	4.56 ± 0.71 b	7.35 ± 1.55 a	5.43 ± 0.34 a	0.53 ± 0.09 ab
	杉木纯林	1.39 ± 0.02 a	36.46 ± 2.71 b	5.43 ± 0.43 a	6.68 ± 1.12 a	5.24 ± 0.30 a	0.48 ± 0.07 b
40~50	毛竹纯林	1.33 ± 0.06 b	40.40 ± 1.32 a	5.86 ± 0.45 a	4.40 ± 1.01 b	5.06 ± 0.06 a	0.28 ± 0.06 b
	毛竹-杉木混交林	1.47 ± 0.07 a	38.70 ± 2.01 a	5.66 ± 1.08 a	6.39 ± 1.53 a	5.26 ± 0.06 a	0.46 ± 0.07 a
	杉木纯林	1.47 ± 0.01 a	38.29 ± 0.88 a	5.74 ± 0.53 a	8.52 ± 1.61 a	5.38 ± 0.10 a	0.59 ± 0.06 a

注: 表中同列数据小写字母不同表示同一土层不同林分类型下差异显著($P < 0.05$)。

2.2 三种典型林分类型下土壤入渗特征

3 种典型林分类型下土壤入渗速率变化率见图 1 所示, 总体上毛竹纯林和杉木纯林的入渗速率变化趋势相同, 毛竹-杉木混交林入渗变化率相对更低。根据图 1 中入渗速率的变化率确定各阶段的持续时间。各阶段(IIR、IR-1、IR-2、IR-3、SIR)的土壤入渗率为各时期平均土壤入渗率。



(DI₁、DI₂、DI₃ 分别代表毛竹纯林、毛竹-杉木混交林、杉木纯林的入渗率变化率; IIR₁、IIR₂、IIR₃ 分别代表毛竹纯林、毛竹-杉木混交林、杉木纯林的初始入渗阶段; IR-1、IR-2、IR-3 分别代表表第 1、2、3 阶段入渗率; SIR 代表稳定入渗率)

图 1 三种不同林分类型下土壤入渗率的变化率及入渗阶段

Fig. 1 Change rates and infiltration stages of soil infiltration rates under three forest stand types

3 个林分类型的初始入渗率均值为 947.7 ~ 1 220.5 mm/h, 毛竹-杉木混交林显著大于杉木纯林(图 2A); 稳定入渗率均值为 272.0 ~ 369.0 mm/h, 表现为毛竹纯林>毛竹-杉木混交林 >杉木纯林(图 2B); 平均入渗速率均值为 373.1 ~ 498.2 mm/h, 表现为毛竹-杉木混交林>毛竹纯林>杉木纯林(图 2C); IR-1 阶段、IR-2 阶段、IR-3 阶段入渗速率均表现为杉木纯林最小, 且与其他两个林分类型间差异显著。毛竹纯林的 IR-1 阶段入渗速率为 717.8 mm/h(图 2D), IR-2 阶段入渗速率为 591.3 mm/h(图 2E), IR-3 阶段入渗速率为 433.4 mm/h(图 2F)。毛竹-杉木混交林的 IR-1 阶段入渗速率为 751.6 mm/h(图 2D), IR-2 阶段入渗速率为 575.0 mm/h(图 2E), IR-3 阶段入渗速率为 426.6 mm/h(图 2F)。杉木纯林的 IR-1 阶段入渗速率为 612.6 mm/h(图 2D), IR-2 阶段入渗速率为 479.0 mm/h(图 2E), IR-3 阶段入渗速率为 352.9 mm/h(图 2F)。

2.3 土壤入渗速率影响因素

将所有影响因子与 6 个人渗速率指标作多元回

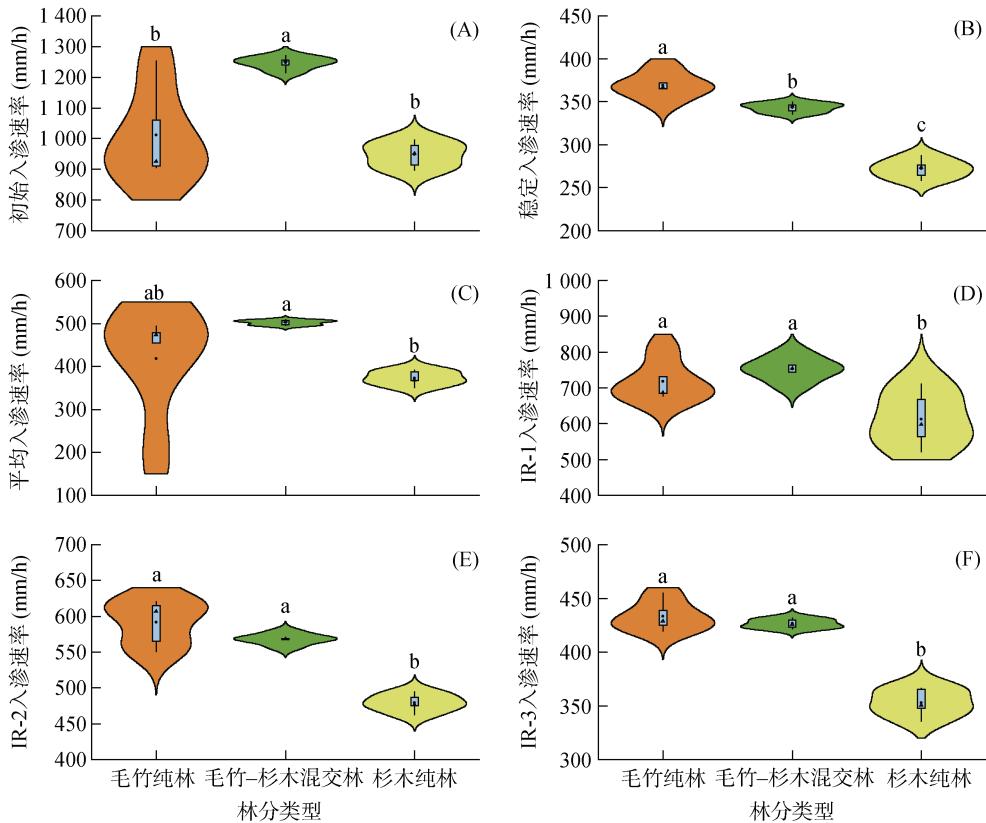
归分析(表 3), 结果表明, 影响稳定入渗速率的主要因素为 0 ~ 10 cm 土层的细根(<2 mm)生物量和非毛管孔隙度; 影响初始入渗的主要因素为 0 ~ 10 cm 土层的黏粒含量、10 ~ 20 cm 土层的非毛管孔隙度; 影响平均入渗速率的主要因素为 10 ~ 20 cm 土层的土壤容重和细根(<2 mm)生物量; 影响第 1 阶段入渗速率的影响因素为 10 ~ 20 cm 土层的细根生物量、土壤容重和根表面积(>2 mm); 影响第 2 阶段和第 3 阶段入渗速率的主要因素均为 10 ~ 20 cm 土层的土壤容重、细根生物量和根长密度。综上, 细根(<2 mm)特征对土壤入渗速率起决定作用。

根系特征和土壤性质对土壤入渗影响的最优结构方程模型见图 3。根系生物量和根长密度主要通过直接和间接作用影响土壤入渗速率, 而土壤容重、非毛管孔隙度和黏粒含量主要通过直接作用影响土壤入渗速率。10 ~ 20 cm 土层的细根生物量对平均入渗速率和第 1 阶段入渗速率的直接效应为 0.34 和 0.53, 10 ~ 20 cm 土层的土壤容重和 0 ~ 10 cm 土层土壤黏粒对第 1 阶段入渗速率的直接效应分别为 -0.27 和 0.34。0 ~ 10 cm 土层的细根生物量对稳定入渗速率和第 2 阶段入渗速率的直接影响系数为 0.25 和 -0.18; 土壤非毛管孔隙度对稳定入渗速率和第 2、3 阶段入渗速率的直接影响系数分别为 0.49、0.29 和 0.43, 10 ~ 20 cm 土层的根长密度对第 2 和第 3 阶段入渗速率的直接影响效应为 0.88 和 0.68。

2.4 土壤入渗模型拟合

对 3 种林分类型下的土壤入渗速率进行模型拟合, 拟合结果见表 4。不同林分类型下 Horton 模型的决定系数(R^2)为 0.691 ~ 0.747, Kostiakov 模型 R^2 为 0.874 ~ 0.906, Philip 模型 R^2 为 0.832 ~ 0.888。经验模型 Kostiakov 拟合效果相对最好, Horton 模型的效果相对较差。

在 3 个不同林分类型中各选择 2 个样点作为模型验证点, 将实测值和模型的计算值进行对比, 拟合正比例函数, 其斜率越接近 1, 说明实测值与模型计算值总体上越接近, 结合模型决定系数(R^2)说明模型拟合的优度。如图 4 所示, 整体上 Kostiakov 模型的正比例系数更接近 1, 在 3 个林分类型中范围为 0.901 ~ 1.000, 且正比例函数拟合的决定系数 R^2 都在 0.97 以上; Philip 模型的系数范围是 0.888 ~ 0.977, 验证效果仅次于 Kostiakov 模型; 而 Horton 模型的系数范围为 0.826 ~ 0.902, 验证系数较差。这与模型拟合的决定系数规律相同, 说明模型拟合效果的合理性, 验证了 Kostiakov 模型可以较好地模拟不同林分类型下的土壤入渗特征。



(图中方框大小表示数值范围; 上下边表示误差棒; 圆点表示均值; 三角形表示中位数。小写字母不同表示不同林分类型间差异达 $P<0.05$ 显著水平)

图 2 三种不同林分类型下土壤入渗特征
Fig. 2 Infiltration characteristics under three forest stand types

表 3 土壤入渗指标的多元回归模型
Table 3 Multiple regression models for soil infiltration indicators

指标	回归模型	R^2	P
SIR	$y=0.648RBD1_{0-10}+0.41NCP_{0-10}+0.173$	0.882 5	$P<0.001$
IIR	$y=0.765clay_{0-10}+0.416NCP_{10-20}-0.005$	0.544 7	$P<0.05$
AIR	$y=0.464 RBD1_{10-20}-0.759 BD_{10-20}+0.877$	0.730 4	$P<0.05$
IR-1	$y=0.372RSAD2_{10-20}-0.131RBD1_{10-20}-0.504BD_{10-20}+0.814$	0.511 0	$P<0.05$
IR-2	$y=0.274RBD1_{10-20}+0.246RLD1_{10-20}-0.572BD_{10-20}+0.663$	0.715 0	$P<0.001$
IR-3	$y=0.364RBD1_{10-20}+0.16RLD1_{10-20}-0.579BD_{10-20}+0.702$	0.812 0	$P<0.001$

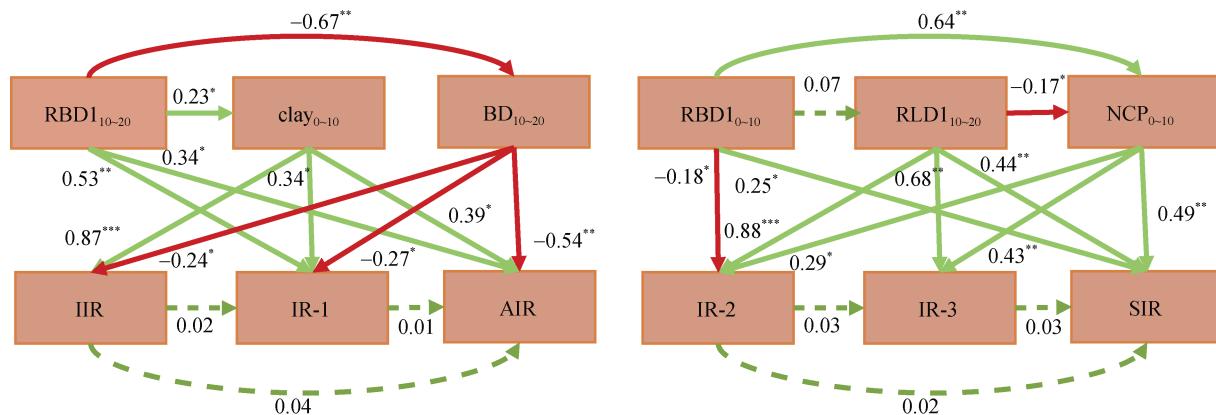
注: 下标数值范围表示土层深度, cm; RBD1 为 <2 mm 根径的生物量密度; RLD1 为 <2 mm 根径的根长密度; RSAD2 为根径 >2 mm 的根表面积; clay 为土壤黏粒含量; BD 为土壤容重; NCP 为非毛管孔隙度; TN 为土壤氮含量; IIR 为初始入渗率; IR-1 为第一阶段入渗率; IR-2 为第二阶段入渗率; IR-3 为第三阶段入渗率; AIR 为平均入渗率; SIR 为稳定入渗率。下同。

3 讨论

3.1 典型林分类型根系特征与土壤性质

毛竹依靠其自身发达的根系系统, 不断影响着周边森林群落结构与功能, 最终形成毛竹-杉木混交林和毛竹纯林^[20]。本研究表明, 不同林分类型细根生物量和根长密度具有显著差异($P<0.05$), 细根(<2 mm)相比粗根(>2 mm)特性在不同林分类型下差异更明显, 说明细根特征受林分类型的影响较大。细根生物

量和根长密度总体上表现为毛竹纯林>毛竹-杉木混交林>杉木纯林, 尤其是根长密度的差异性较大, 这与蔡春菊等^[21]的研究结论基本一致。在土壤性质中, 毛竹入侵提高了土壤的非毛管孔隙度和总孔隙度, 降低了土壤容重。杉木纯林的土壤容重显著($P<0.05$)大于毛竹纯林和毛竹-杉木混交林。宋庆妮等^[22]人的研究表明, 毛竹扩张使得表层土壤容重显著减小, 这主要是因为竹鞭强大的扩张能力, 增加了土壤孔隙度和连通性, 从而降低了土壤容重。对于土壤有机碳和全



(***、**、*分别表示影响达 $P<0.001$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 显著水平；绿色实线表示正影响，红色实线表示负影响，虚线表示影响不显著)

图 3 土壤入渗性能影响因素的结构方程模型

Fig. 3 Structural equation models of influencing factors of soil infiltration capacity

表 4 三种林分类型下土壤入渗模型
Table 4 Soil infiltration models under three forest stand types

林分类型	Kostiakov 模型		Philip 模型		Horton 模型	
	方程	R^2	方程	R^2	方程	R^2
毛竹纯林	$y = 365.913t^{-0.253}$	0.906	$y = 82.04t^{-0.5} + 334.962$	0.888	$y = 369.1 + 544.69e^{-4.886t}$	0.696
毛竹-杉木混交林	$y = 346.465t^{-0.327}$	0.874	$y = 120.918t^{-0.5} + 287.216$	0.832	$y = 340.52 + 906.21e^{-6.397t}$	0.691
杉木纯林	$y = 291.898t^{-0.3}$	0.897	$y = 91.929t^{-0.5} + 237.547$	0.858	$y = 272.97 + 648.39e^{-5.55t}$	0.747

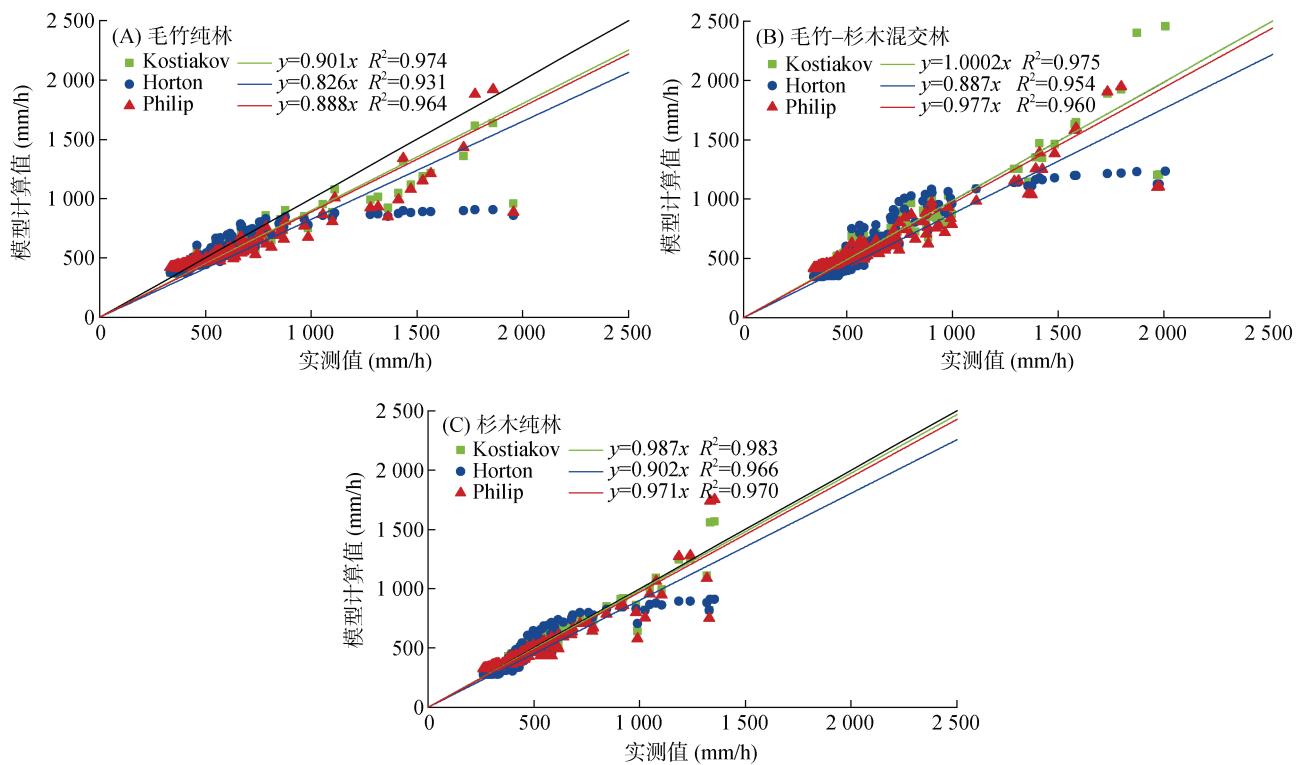


图 4 三种林分类型土壤入渗率实测值和模型计算值的对比
Fig. 4 Comparison of measured and calculated soil infiltration rates under three land use types

氮，不同林分类型下有机碳和全氮含量总体趋势表现为毛竹纯林>毛竹-杉木混交林>杉木纯林，这可能是因为毛竹入侵增加了 10~20 cm 土层的根系生物量，根系分

泌物促进了土壤微生物活动和有机碳的形成^[23-25]。

3.2 土壤性质和根系特性对土壤入渗性能的影响

土壤性质和根系特性是影响土壤入渗的关键因

素^[26]。本研究发现，细根生物量和根长密度对土壤入渗性能具有促进作用，毛竹细根网络复杂多样，特别是水平分布的细根，更能促进大孔隙的形成和提高土壤孔隙结构水平连通性，从而成为影响土壤水分侧向移动的关键因素^[27]。Huang 等人^[27]认为，根系水平分布特征促进了土壤入渗速率。细根的发展与群落立地质量有关，植物细根的分布和状况会对其吸收水分和养分具有决定性的影响，进而影响表层的土壤性质^[28]。由于毛竹的入侵对地下根系的影响，造成了土壤性质改变。本研究中黏土含量对初始入渗速率和平均入渗速率都有显著的积极作用，说明黏土含量对降雨初期和全过程都会有关键的作用，这可能是由于黏土有助于土壤大团聚体的形成，促进其稳定性，进而增加土壤的入渗速率。本研究还发现，非毛管孔隙度对土壤入渗性能有积极作用，特别是对稳定入渗率，这可能是因为土壤入渗达到稳定状态后，非毛管孔隙几乎是渗流的唯一路径^[29-30]。综上所述，不同林分类型下细根生物量密度以及根长密度存在差异，<2 mm 的根系特性增加了土壤非毛管孔隙度、降低了土壤容重和土壤黏粒含量，综合改变并提升了土壤的入渗性能。

4 结论

1) 3 种典型林分类型下细根生物量和根长密度具有显著差异，根系特性提高了土壤非毛管孔隙度和总孔隙度，降低了土壤容重和土壤黏粒含量。

2) 初始入渗速率、第 1 阶段入渗速率、第 2 阶段入渗速率、第 3 阶段入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率均随着毛竹入侵程度的增加而增大。

3) 0~10 cm 土层的黏粒含量和 10~20 cm 土层的细根生物量和土壤容重是影响初始入渗速率、第 1 阶段入渗速率和平均入渗速率的主要因素；0~10 cm 土层的非毛管孔隙度和细根生物量以及 10~20 cm 土层的细根长密度是影响第 2 阶段、第 3 阶段和稳定入渗速率的主要因素。

4) 根系特性不仅通过直接作用影响土壤入渗速率，还通过影响土壤非毛管孔隙度和土壤容重等性质间接作用于土壤入渗速率。本研究揭示了不同林分类型下的土壤入渗特征及其影响机制，研究结果可为森林生态水文功能的提升提供理论依据。

参考文献：

- [1] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105-2138.

- [2] Zhu P Z, Zhang G H, Wang C S, et al. Variation in soil infiltration properties under different land use/cover in the black soil region of Northeast China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(2): 379-387.
- [3] Lu S G, Liu M X, Yi J, et al. Lateral partition patterns and controlling factors of soil infiltration at a steep, near-stream, and humid hillslope scale[J]. Catena, 2024, 239: 107917.
- [4] Liu C X, Zheng C Y, Wang L, et al. Moso bamboo invasion changes the assembly process and interactive relationship of soil microbial communities in a subtropical broadleaf forest[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 536: 120901.
- [5] 张晓茹, 刘志强, 焦钒栩, 等. 雨滴击溅下表土孔隙变化及其对入渗能力的影响[J]. 土壤, 2024, 56(3): 601-609.
- [6] 鲁建荣, 李云良, 谭志强, 等. 植物根系对土壤水力参数影响的定量研究综述[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 939-952.
- [7] 周宾, 胡树文. 不同种稻年限对苏打盐碱土孔隙和入渗性能的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 99-105.
- [8] Wang D, Chen J H, Tang Z Y, et al. Effects of soil physical properties on soil infiltration in forest ecosystems of southeast China[J]. Forests, 2024, 15(8): 1470.
- [9] Tang Z Y, Zhang W Q, Chen J H, et al. Contributions of soil organic carbon-induced root- and soil properties complexity to water flow in Eastern China[J]. Science of The Total Environment, 2024, 945: 174125.
- [10] Qiu D X, Xu R R, Wu C X, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltrability and preferential flow in hilly gully areas of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2023, 221: 106770.
- [11] Qiu D X, Xu R R, Gao P, et al. Effect of vegetation restoration type and topography on soil water storage and infiltration capacity in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2024, 241: 108079.
- [12] 朱美菲, 程金花. 永定河典型护岸植被土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1129-1137.
- [13] Wang P P, Liu Q, Zhou Z C, et al. Distinct variations of soil infiltrability of contrasting root types in a temperate mosaic-pattern grassland in northern China[J]. Catena, 2024, 243: 108174.
- [14] Shi X Q, Qin T L, Yan D H, et al. A meta-analysis on effects of root development on soil hydraulic properties[J]. Geoderma, 2021, 403: 115363.
- [15] Wang D, Niu J Z, Dai Z Y, et al. Forest restoration effects on soil preferential flow in the paleo-periglacial eastern Liaoning mountainous regions, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 467: 142974.
- [16] Wang B, Liu J, Li Z G, et al. The contributions of root morphological characteristics and soil property to soil infiltration in a reseeded desert steppe[J]. Catena, 2023, 225: 107020.
- [17] 彭辉, 陈焕伟, 李求洁, 等. 毛竹入侵杉木林对土壤真菌群落多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(2): 105-110.

- [18] 范少辉, 申景昕, 刘广路, 等. 毛竹向杉木林扩展对土壤养分含量及计量比的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(8): 1455–1462.
- [19] Zhang Y H, Niu J Z, Zhang M X, et al. Interaction between plant roots and soil water flow in response to preferential flow paths in northern China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(2): 648–663.
- [20] Sardar M F, Chen Z H, Tang C X, et al. Seasonal linkages between soil nitrogen mineralization and the microbial community in broadleaf forests with Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) invasion[J]. Science of The Total Environment, 2023, 899: 165557.
- [21] 蔡春菊, 范少辉, 刘希珍, 等. 毛竹向杉木林扩展过程中细根适应策略[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 967–972.
- [22] 宋庆妮, 杨清培, 刘骏, 等. 毛竹扩张对常绿阔叶林土壤氮素矿化及有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 338–344.
- [23] 吕衡, 张健, 伊奎鑫, 等. 不同经营措施对毛竹林土壤理化性质、酶活性和有机碳矿化特征的影响[J]. 竹子学报, 2022, 41(2): 34–40.
- [24] Wang P P, Su X M, Zhou Z C, et al. Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2023, 220: 106693.
- [25] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, et al. Soil infiltration properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125535.
- [26] Zhang W J, Zhu X A, Xiong X, et al. Changes in soil infiltration and water flow paths: Insights from subtropical forest succession sequence[J]. Catena, 2023, 221: 106748.
- [27] Huang Y, Xiong T, Zhao M Q, et al. Influence of soil properties and near-surface roots on soil infiltration process in short-rotation *Eucalyptus* plantations in southern subtropical China[J]. Catena, 2024, 234: 107606.
- [28] Robinson D A, Nemes A, Reinsch S, et al. Global meta-analysis of soil hydraulic properties on the same soils with differing land use[J]. Science of The Total Environment, 2022, 852: 158506.
- [29] Liu Y F, Zhang Z C, Liu Y, et al. Shrub encroachment enhances the infiltration capacity of alpine meadows by changing the community composition and soil conditions[J]. Catena, 2022, 213: 106222.
- [30] Dai Y J, Guo J Y, Li Y Q, et al. Soil physical and chemical properties affected by long-term grazing on the desert steppe of Inner Mongolia, China[J]. Catena, 2022, 211: 105996.