

# 桉树人工林取代长周期人工林对土壤入渗特性的影响

于婧睿<sup>1,2</sup>, 杨钙仁<sup>1,2</sup>, 田雪<sup>1,2</sup>, 王廖丹<sup>1</sup>, 覃志伟<sup>1</sup>

(1. 广西大学 林学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 生态工程研究所, 南宁 530004)

**摘要:** 广西桉树人工林的前茬主要为轮伐周期较长的松杉类人工林, 为探讨上述植被变化对林地土壤水分下渗的影响, 采用单环法研究了8年生(06-EU), 5年生(09-EU), 4年生(10-EU)和1年生(13-EU)等第一代桉树(*Eucalyptus urophylla* E. *grandis*)人工林及其对照林21年生针阔混交(93-CM), 第三代2年生桉树(12-EU3), 18年生杉木(*Cunninghamia lanceolata*, 96-CL)和马尾松(*Pinus massoniana*, 96-PM)等人工林的土壤水分下渗特征, 并采用BEST-intercept方法对土壤入渗特征参数进行估算。结果表明:(1) 针阔混交和马尾松人工林改为桉树人工林后, 土壤(0—20 cm)容重分别降低13.5%和18.3%, 孔隙度分别增加10.1%和14.8%, 但土壤颗粒组成的变化不显著;(2) 针阔混交林改为桉树人工林后, 土壤初始入渗速率和前600 s下渗量分别降低38.2%和25.3%, 而杉木人工林、马尾松人工林则分别升高23.9%, 148.1%和32.7%, 97.2%;(3) 连栽代次的增加对桉树林土壤基本物理性质影响不显著, 但会降低土壤水分下渗性能, 第三代桉树林的初始入渗速率和前600 s下渗量比第一代减少39.9%和32.4%。容重较大的林地造林和抚育过程中的松土活动导致了土壤大孔隙增加, 这是土壤水分下渗速率变化的主要成因。

**关键词:** 土壤水分入渗; 单环; 桉树人工林; 长周期人工林

中图分类号: S714; S152.7<sup>+2</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0011-05

## Effects of Eucalyptus Plantation Replacing Long Rotation Plantation on Soil Infiltration

YU Jingrui<sup>1,2</sup>, YANG Gairen<sup>1,2</sup>, TIAN Xue<sup>1,2</sup>, WANG Liaodan<sup>1</sup>, TAN Zhiwei<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Eco-engineering Institute, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The previous stand types of eucalyptus plantation in Guangxi are mostly Coniferopsida long rotation plantation such as *Pinus massoniana* and *Chinese fir*. In order to ascertain the effect of vegetation changes on forest soil infiltration, infiltration of soils under deferent ages (8, 5, 4 and 1 years, abbreviation for 06-EU, 09-EU, 10-EU and 13-EU, respectively) first generation eucalyptus (*Eucalyptus urophylla* E. *grandis*) plantations were measured using single ring. Their control forest (21 a conifer- broadleaf mixed forest, 93-CM, 2 a third generation eucalyptus, 12-EU3, 18 a *Cunninghamia lanceolata*, 96-CL, 18 a *Pinus massoniana*, 96-PM) were investigated at the same time. The soil infiltration parameters were calculated using BEST-intercept method. The study indicated that, compare with the previous stands (93-CM and 96-PM), the soil bulk densities of 06-EU and 13-EU significantly decreased by 13.5% and 18.3%, respectively, and porosities increased by 10.1% and 14.8%, but the change of soil particle-size distribution was not significant. The initial infiltration rate and 600 s cumulative infiltration of 06-EU were 39.9% and 25.3% lower than those of 93-CM; compare with the pre-stands(96-CL and 96-PM), the initial infiltration rate and 600 s cumulative infiltration of 10-EU and 13-EU increased by 23.9%, 148.1% and 32.7%, 97.2%, respectively; there was no significant different of soil physical property between the first with third generation eucalyptus plantations; the initial infiltration rate and 600 s cumulative infiltration of 12-EU3 were 39.9% and 32.4% lower than that of 10-EU. The research results indicate that afforestation eucalyptus on long rotation plantation land will increase soil macropore rates, which induces the changes of soil infiltration.

**Keywords:** soil infiltration; single ring; Eucalyptus plantation; long rotation plantation

水分入渗是森林土壤重要的水文功能,在补充土壤水分<sup>[1]</sup>的同时,调节降雨分配,减轻水土流失。植被类型和土壤容重、初始含水量、有机质含量、孔隙度、土壤质地、团聚体含量等<sup>[2-5]</sup>是影响土壤入渗特性的主要因素。土壤渗透能力主要取决于非毛管孔隙状况<sup>[6]</sup>,可以通过对土壤孔隙度等结构的分析,结合土壤入渗的观测来探讨森林的蓄水能力。以往的研究一般采用双环法<sup>[3,7]</sup>,野外人工降雨法<sup>[8]</sup>,渗透筒法<sup>[6,9]</sup>等方法观测土壤入渗,植被(或土地利用)类型主要有天然林<sup>[3]</sup>,高山灌丛<sup>[7]</sup>,荒地<sup>[10]</sup>,农田<sup>[11]</sup>,果园<sup>[5]</sup>及长周期人工林地<sup>[12]</sup>等,而有关短周期桉树人工林的研究鲜有报道。广西是我国桉树人工林主要种植省份,目前种植面积达 205 万  $\text{hm}^2$ ,占全国总面积的 50%,其造林地主要来自经营周期较长的人工林如马尾松林、杉木林、针阔混交林等以及天然次生林<sup>[13]</sup>。桉树人工林的轮伐周期短,造林、抚育、采伐等对林地土壤干扰频繁而强烈,可能对森林的雨水再分配造成显著影响。已有研究发现,轮伐周期较长的人工林改造为桉树林后,土壤蓄水能力的变化主要表现为 20—40 cm 土层土壤的水分库容和剩余蓄水空间增加<sup>[14]</sup>;采用人工模拟降雨的研究<sup>[15]</sup>发现,混交成熟林改造为桉树人工林后,林地坡面径流产生时间延后、径流量减少,但上述两个研究的结果与其他有关长周期人工林改植为桉树人工林后土壤水文物理性质的变化<sup>[16-17]</sup>存在一些不一致。土壤入渗性能与降雨量、降雨强度、地形、植被状况和土壤物理性质等因子密切相关,在降雨与地形条件一定情况下,植被变化及其对土壤物理性质的改变决定了土壤渗透能力。由于林地一般不平整,双环法在林地土壤入渗研究中受到限制,单环入渗仪制作简单、经济,轻便易操作、耗时少,且不扰动表土,无水压表层土入渗,可准确测定初始入渗过程<sup>[18]</sup>。本研究应用单环入渗法对林地土壤入渗特征进行测定,用马尔文激光粒度仪测定土壤粒度,采用 BEST-intercept 方法<sup>[19]</sup>估算土壤下渗特征参数,探讨长周期人工林改植为短周期桉树林后土壤入渗性能的变化规律,为今后全面了解桉树种植对区域生态水文的影响提供科学支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试验设计

研究区设置在广西壮族自治区南宁市北部的高峰林场界牌分场和东升分场(108°38′19″—108°41′96″E, 22°97′34″—22°99′16″N),属南亚热带季风气候,年均气温 21.6℃,年均降水量 1 320 mm,降水天数为 104.7 d,且多集中于 5—9 月(占年降水量的 79.8%),平均相对

湿度 79%。试验区为丘陵地形,坡度为 10°~35°,成土母岩以砂岩为主,石英岩次之,土壤类型为赤红壤,土层厚度 40 cm 以上,pH 值 4.5~5.0<sup>[13]</sup>。

根据桉树人工林营林前林分类型的不同,在高峰林场研究区内分别选择坡度、土壤类型等基本相同或相近的 1 a 生(13-EU),4 a 生(10-EU),5 a 生桉树(09-EU)和 8 a 生(06-EU)等第一代尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* E. *grandis*)林作为研究样地,同时分别在上述桉树林同一坡面的另一侧选择其前茬林,分别为 18 a 生马尾松(*Pinus Massoniana*, 96-PM),杉木(*Cunninghamia Lanceolata*, 96-CL),2 a 生巨尾桉(第三代萌芽林,12-EU3)以及 21 a 生杉木—米老排(*Myilaria laosensis* Hamamelidaceae)混交林(93-CM)作为各第一代桉树林的对照样地,在上述各组样地(桉树及其对照林)选择海拔(分别为 221~242 m,218~239 m,218~238 m 和 185~204 m),坡度(分别为 21.5°,21.5°,20.4°,19.4°)基本相当、坡面长度为 100 m 宽度为 50 m 的林地作为水分入渗试验以及土壤采集样方。上述不同组别样地间的最大直线距离为 965 m,最小距离为 67 m。09-EU 和 12-EU 在营桉树林前均为杉木林。所有第一代桉树林均为植苗林,种植坑规格为 50 cm×40 cm×50 cm,桉树品种为“广林 9 号”无性系组培苗,苗高 15~20 cm,造林密度为 1 650 株/ $\text{hm}^2$ 。造林时穴施有机复混肥 400 g,造林后当年追肥 2 次,第 1 次在 5 月,每株施尿素 50 g;第 2 次在 9 月,每株施复合肥 150 g,并用除草剂(草甘膦)除草抚育;萌芽林的抚育与植苗林相同。

### 1.2 测试项目和计算方法

(1) 下渗速率。于 2014 年 7—8 月,采用单环入渗法测定土壤入渗速率。在各样地上、中、下 3 个部位分别寻找相对较平的地方,将 PVC 单环(内径 15.4 cm,高 10 cm)垂直平稳打入土中 1 cm,保持 PVC 环横断面水平。在单环附近用环刀取土样称重后带回实验室测定土壤初始含水量和土壤容重。用定量瓶取定量水(相当于单环 10 mm 水柱),将水快速注入单环中,同时秒表开始计时,水在单环表面消失后立即加入第 2 瓶水(相同容积),同时记录时间,重复此步骤直到连续注入 3 次的时间基本相等时,视为达到稳定状态,停止试验。重复 5 次。

(2) 土壤含水量与饱和含水量。在下渗试验的同时,在样方内的上、中、下 3 个部位,用 100  $\text{cm}^3$  环刀随机采集表层土壤(0—20 cm),带回实验室测定林地土壤含水量(烘干法)和饱和含水量(NY/T1121.22—2010)。重复 5 次。

(3) 土壤粒径。在各样方内,采集 0—20 cm 土层土样各 300 g,带回实验室风干 48 h 后去除石子和植物根系,全部过 2 mm 筛后,四分法取 20 g 土样,用马尔文激光粒度仪,对土壤粒径进行分级(1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm,0.15~0.25 mm,0.106~0.15 mm,0.053~0.106 mm,0.002~0.053 mm,0~0.002 mm)。

(4) 入渗特征参数计算。采用 Lassabatere 等<sup>[19]</sup>基于 Beerkan 方法改进的 BEST-intercept 方法,利用粒径分析等土壤质地参数,通过田间零压头单环入渗试验所得的相关尺度参数,结合解析公式<sup>[18]</sup>,拟合出水力特征曲线,估算入渗特征参数  $K_s$  (饱和导水率)和  $\alpha$  (水保持参数)。为方便比较,初始入渗速率为前 10 mm 入渗水的平均入渗速率(mm/min),同时,由于土壤存在空间异质性,稳定入渗速率存在差异,一般在入渗速率小于 2 mm/min 时变化幅度比较小,而前 600 s 是入渗的较快阶段,该阶段的人渗总量一般占到达前总入渗量的 50% 以上,因此,本研究统一以 2 mm/min 为稳定入渗的临界点进行统计分析,并比较前 600 s 的入渗特征。

$$I_i = \frac{10}{t_i} \quad (1)$$

$$S_i = \frac{C}{t_2} \quad (2)$$

式中: $I_i$  为初始入渗速率(mm/min); $t_1$  为前 10 mm 的入渗耗时(min); $S_i$  为稳渗前平均入渗速率(mm/min); $t_2$  为到达稳渗耗时(min); $C$  为到达稳渗前总入渗量(mm)。

### 1.3 数据处理及分析

试验数据用 Excel 2013 处理数据,用 SPSS 20.0 进行差异显著性分析和相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林分的土壤基本物理性质

表 1 结果显示,3 种轮伐周期较长的人工林改为短周期桉树人工林后,林地土壤质地、容重和孔隙度变化各异。其中,马尾松人工林改为桉树人工林后,土壤质地发生显著变化,其砂粒含量减少 63.7%,粉砂和黏土含量则分别增加 11.5% 和 52.7%;而针阔混交人工林(93-CMD)和杉木人工林改为桉树人工林后,其土壤质地变化均不显著。针阔混交人工林和马尾松人工林改为桉树人工林后,林地土壤容重和孔隙度变化显著,容重分别降低 13.5% 和 18.3%,孔隙度分别增加 10.1% 和 14.8%,而杉木人工林改为桉树人工林后,土壤容重和孔隙度的变化均不显著。前茬为杉木人

工林的第 1 代(09-EU)和第 3 代(12-EU3)桉树人工林间的土壤质地、容重和孔隙度差异均不显著。

表 1 各样地基本土壤物理性质

样地	砂粒/ %	粉砂/ %	黏土/ %	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙 度/%
06-EU	22.9a	68.7e	8.4bcd	0.95b	64.1a
93-CM	21.8a	70.4de	7.8d	1.11a	58.2b
09-EU	17.5ab	73.6cd	8.9bc	1.18a	55.3b
12-EU3	20.9a	70.1de	9.0bc	1.16a	56.0b
10-EU	10.5b	80.2ab	9.3bc	1.14a	57.6b
96-CL	14.2b	76.3bc	9.5ab	1.19a	55.1b
13-EU	7.0bc	81.7a	11.3a	0.98b	63.7a
96-PM	19.3a	73.3cd	7.4d	1.20a	55.5b

注:样地编号前两位阿拉伯数字(XX)表示种植年份(20XX 或 19XX);EU 为表示桉树,EU 后的阿拉伯数字为代次;PM 为马尾松,CL 为杉木,CM 表示杉木一米老排混交林;数据后不同字母表示同列数据间差异显著( $p < 0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $p > 0.05$ ),下同。

### 2.2 不同林分的土壤入渗特征

表 2 为基于室内测试和 BEST-intercept 方法计算所的土壤入渗特征参数。结果显示,由针阔混交林、杉木林和马尾松林改植为桉树人工林后,土壤初始含水量发生显著变化,分别增加 13.2%,31.3%,17.5%;饱和含水量分别增加了 8.3%,2.1%,8.7%,但与前茬林地相比,差异不显著;前茬为杉木人工林的第 1 代和第 3 代桉树人工林间的初始含水量、饱和含水量差异均不显著。所有桉树人工林地土壤的孔隙度与饱和含水量比值与其前茬林地(对照林)相比,均没有发生显著变化。土壤容重较大的杉木人工林、马尾松人工林转为桉树人工林后的第 4 年和第 2 年,其土壤饱和导水率分别增加 4.7 倍和 1.5 倍,而容重较小的针阔混交林转为桉树林后的第 8 年,则差异不显著;前茬为杉木人工林的第 1 代和第 3 代桉树人工林间,其土壤饱和导水率差异不显著。植被变化引起的土壤水保持参数变化各异,其中,针阔混交林转为桉树人工林后差异不显著,杉木林转为桉树林后增加 9.2 倍,马尾松林转为桉树林后则减小 79.2%,第三代桉树人工林比第一代高 138.1%。

由表 3 可知,混交林改植为桉树林后,林地土壤入渗速率显著减小,初始入渗速率、600 s 时入渗速率和稳渗前平均入渗速率分别下降 38.2%,37.9% 和 24.1%,前 600 s 和稳渗前入渗累积量分别减少 25.3% 和 8.2%。而杉木人工林改为桉树人工林后,其初始入渗速率和前 600 s 入渗累积量分别升高 23.9% 和 32.7%,而 600 s 时入渗速率和稳渗前平均入渗速率差异不显著。马尾松林改植为桉树林后,土壤入渗速率和入渗量显著提高,土壤初始入渗速率、600 s 时入渗速率、稳渗前平均入渗速率分别增大 148.1%,48.6% 和

42.9%,前 600 s 和稳渗前入渗累积量分别增加 97.2% 和 87.3%,到达稳渗耗时增加 30.1%。随着代次增加,桉树人工林土壤入渗速率和入渗量显著减小,与第一代相比,第三代桉树人工林的初始入渗速率、600 s 时入渗速率、稳渗前平均入渗速率分别降低 39.9%,34.1%和

20.0%,前 600 s 和稳渗前入渗累积量分别减少 32.4% 和 45.2%,到达稳渗耗时缩短 27.6%。3 种轮伐周期较长的人工林中,针阔混交林的土壤入渗能力最强,马尾松林最弱,前者的初始入渗速率和稳渗前入渗累积量分别是后者的 3.3 倍和 2.1 倍。

表 2 各样地土壤入渗特征参数

样地	初始含水量/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水量/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙度与饱和 含水量比	$K_s$ / ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$\alpha$ / ( $\times 10^2 \text{mm}^{-1}$ )
06-EU	0.43ab(0.030)	0.52a(0.095)	1.24a	6.0a	0.41b
93-CM	0.38cd(0.033)	0.48a(0.087)	1.21a	4.2ab	0.48b
09-EU	0.37d(0.042)	0.43b(0.061)	1.29a	5.4ab	0.21c
12-EU3	0.35d(0.103)	0.47ab(0.050)	1.21a	7.8a	0.50b
10-EU	0.42ab(0.076)	0.49a(0.071)	1.17ab	10.2a	1.53a
96-CL	0.32d(0.107)	0.48a(0.076)	1.13b	1.8b	0.15c
13-EU	0.47a(0.057)	0.50a(0.106)	1.26a	9.0a	0.11c
96-PM	0.40bc(0.056)	0.46ab(0.087)	1.18ab	3.6b	0.53b

注:括弧内数据为变异系数。

表 3 各样地土壤入渗速率及入渗量

样地	初始入渗速率/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	600 s 时入渗速率/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	前 600 s 入渗 累积量/mm	到达稳渗 耗时/min	稳渗前入渗 累积量/mm	稳渗前平均入渗 速率/( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
06-EU	48.7c	5.9b	117.8b	41.0a	181.4ab	4.4b
93-CM	76.8a	9.5a	157.8a	33.9b	197.5a	5.8a
09-EU	80.9a	8.2a	161.1a	41.6a	225.0a	5.4a
12-EU3	48.6c	5.4b	108.9bc	30.1bc	123.3c	4.1b
10-EU	56.9b	4.3bc	128.3b	32.4b	176.7b	5.5a
96-CL	43.8c	6.0b	96.7c	39.4ab	185.3ab	5.4a
13-EU	58.3b	5.2b	118.3b	35.0b	174.0b	5.0a
96-PM	23.5d	3.5c	60.0d	26.9c	92.9d	3.5c

### 3 讨论

土壤物理性质除受成土母岩和气候影响外<sup>[20]</sup>,还受植被的强烈影响<sup>[21-23]</sup>。本研究中,轮伐周期较长的针阔混交林和马尾松林改为短周期桉树人工林后,表层土壤容重显著减小,孔隙度显著增大,这可能与造林活动和抚育措施有关,造林前的挖坑回填以及造林后的追肥,会使表土松散,大孔隙增加,因此其总孔隙度增加,容重减小,这在以往研究中也得到证实<sup>[14,17]</sup>。上述差异也会受土壤原有性质和林龄影响,一般会随着林龄增加而逐渐减小,第一代桉树林(09-EU,5 a 林龄)因距离其造林和最近一次抚育有 3~5 a 的时间间隔,而第三代桉树林(13-EU)距离其最近一次抚育时间间隔较短(2 个月),因此两者的土壤颗粒组成、容重和孔隙度差异不显著。

土壤初始含水量受天气条件(降水、腾发)和土壤水文物理性质等因素影响。针阔混交林、杉木人工林和马尾松林转为桉树人工林后,土壤初始含水量显著升高,这是由于上述植被变化导致土壤容重显著降低,总孔隙度显著升高,饱和导水率增大(见表 2),雨

水和坡面径流更容易下渗,此外,由于桉树人工林冠层叶面积指数相对较小,冠幅窄,冠层截留量少<sup>[13-14]</sup>,因此,一般降雨条件下(如夏季降雨历时较短时),桉树人工林土壤得到雨水补充量大于针阔混交、杉木和马尾松林,桉树人工林土壤初始含水量高于后三者。

相比于植物根系和土壤有机物的变化,造林过程中人为的土壤扰动是巨大的,在土壤水文物理性质变化中起到支配作用。挖坑、回填等松土活动使表层土壤产生了较多的大孔隙,促进土壤水的快速流动,土壤导水率显著增加<sup>[24]</sup>,土壤潜在蓄水能力提高<sup>[25]</sup>。同时,上述松土活动对不同类型土壤的影响程度是有差异的,一般而言,越紧实的土壤,松土对其孔隙度和透水性的促进作用就越大。本研究中,样地土壤为赤红壤,杉木人工林和马尾松人工林土壤容重最大,表明其比较粘重,而针阔混交林因有机质含量高而较小,因此,上述森林在改造为桉树人工林的过程中,松土过程(如将部分下层土壤翻耕至表层)对前两者的影响较后者大,因此,由杉木人工林和马尾松人工林转为桉树人工林后,土壤初始入渗速率、入渗初期(前 600 s)或稳渗前入渗累积量显著增大。由于桉树第二代和第三代均为萌芽

林,营林中无需像第一代那样开挖种植坑,同时因采伐作业过程中的树木伐倒、工人踩踏等,加之在第一代林营造中形成的大孔隙会因土壤淋溶而逐渐减少,上述因素导致桉树林地随代次增加而越来越紧实,土壤初始入渗速率、稳渗速率和入渗量显著下降,这一现象在以往的室内试验中也得到证实<sup>[26]</sup>。

## 4 结论

(1) 轮伐周期较长的人工林改为短周期桉树人工林过程中的挖坑和回填、追肥等松土措施,致使林地土壤容重减小,总孔隙度增加,但土壤颗粒组成的变化不大。

(2) 造林活动对容重较大土壤的渗透性其显著的促进作用,杉木人工林、马尾松人工林转为桉树人工林后,土壤初始入渗速率和前期(前 600 s)入渗累积量显著升高,饱和导水率分别增加 4.7 倍和 1.5 倍;渗透性较好的针阔混交林改为桉树人工林后,土壤初始入渗速率和前期下渗量显著降低。

(3) 随着栽培代次增加,桉树人工林土壤初始入渗速率、稳渗速率和入渗量显著下降,桉树采伐作业、土壤淋溶等过程导致土壤大孔隙减少可能是其主要成因。

### 参考文献:

- [1] 刘霞,张光灿,李雪蕾.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2004,(18)6:1-5.
- [2] Li X, Feng G, Zhao C, et al. Characteristics of soil infiltration in the Tarim River floodplain[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(9):1-7.
- [3] 陈楚楚,黄新会,刘芝芹,等.滇西北高原湿地不同植被类型下的土壤入渗特性及其影响因素[J].水土保持通报,2016,36(2):82-87.
- [4] 刘芝芹,黄新会,王克勤.金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2014,28(2):57-63.
- [5] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):33-36.
- [6] 张永涛,杨吉华,夏江宝,等.石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J].水土保持学报,2002,16(4):123-126.
- [7] 赵维俊,刘贤德,张学龙,等.祁连山西水林区亚高山灌丛土壤入渗性能研究[J].水土保持学报,2015,29(2):106-110.
- [8] 冯绍元,丁跃元,姚彬.用人工降雨和数值模拟方法研究降雨入渗规律[J].水利学报,1998(11):17-20.
- [9] 董三孝.黄土丘陵区退耕坡地植被自然恢复过程及其对土壤入渗的影响[J].水土保持通报,2004,24(4):1-5.
- [10] 韩冰,吴钦孝,李秧秧,等.黄土丘陵区人工油松林地土

壤入渗特征的研究[J].防护林科技,2004(5):1-3.

- [11] 姚宝林,李光永,李发永.南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J].中国农业科学,2014,47(22):4453-4462.
- [12] 王丽红,辛颖,赵雨森,等.大兴安岭重度火烧迹地植被恢复过程中土壤入渗特征研究[J].水土保持学报,2014,28(4):13-17.
- [13] 杨钙仁,苏晓琳,蔡德所,等.针阔混交林转为桉树林对森林小气候的影响[J].水土保持研究,2013,20(5):129-134.
- [14] 杨钙仁,苏晓琳,蔡德所,等.植被变化对桉树人工林地蓄水功能的影响[J].中国水土保持,2012(3):18-21.
- [15] 苏晓琳.桉树造林对林地土壤水文功能和养分淋失的影响[D].南宁:广西大学,2014.
- [16] 李国平,张卫强,张卫华,等.桉树林和针阔混交林对土壤理化性质的影响比较[J].广东农业科学,2014,41(20):67-74.
- [17] 温远光,郑羨,李明臣,等.广西桉树林取代马尾松林对土壤理化性质的影响[J].北京林业大学学报,2009,31(6):145-148.
- [18] Xu X, Lewis C, Liu W, et al. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods[J]. Agricultural Water Management, 2012,107(8):34-41.
- [19] Lassabatère L, Angulojaramillo R, Ugalde J M, et al. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(2):521-532.
- [20] Kooijman A M, Jongejans J, Sevink J. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in NE Spain[J]. Catena, 2005,59(1):55-68.
- [21] 景宜然,邓湘雯,邓东华,等.湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J].水土保持学报,2016,30(1):189-195.
- [22] 唐国勇,高成杰,李昆.植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响[J].生态学报,2015,35(15):5157-5167.
- [23] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of Caragana microphylla Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China[J]. Applied Soil Ecology, 2008,40(1):78-85.
- [24] Watson K W, Luxmoore R J. Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(3):578-582.
- [25] 林琳,单博,卢倩倩,等.模拟机械压实黑土持水特征与孔隙分布[J].东北林业大学学报,2014(12):102-105.
- [26] 王纪杰,俞元春,陈容,等.不同栽培代次、林龄的桉树人工林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2011,25(2):78-83.