

DOI: 10.5846/stxb202007161867

王金悦, 邓羽松, 李典云, 黄智刚, 杨钙仁, 蒋代华, 王玲. 连栽桉树人工林土壤大孔隙特征及其对饱和导水率的影响. 生态学报, 2021, 41(19): 7689-7699.

Wang J Y, Deng Y S, Li D Y, Huang Z G, Yang G R, Jiang D H, Wang L. Characteristics of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity of successive *Eucalyptus* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7689-7699.

连栽桉树人工林土壤大孔隙特征及其对饱和导水率的影响

王金悦¹, 邓羽松^{1,*}, 李典云², 黄智刚³, 杨钙仁¹, 蒋代华³, 王 玲⁴

1 广西大学林学院, 南宁 530004

2 广西国有黄冕林场, 柳州 545600

3 广西大学农学院, 南宁 530004

4 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要:速生人工林多代连栽容易导致土地水源涵养能力下降。土壤大孔隙以优先流的形式补充地下水, 是定量研究土壤水分运动的重要指标。以连栽 1—4 代桉树人工纯林为研究对象(记录为 I、II、III、IV), 采用水分穿透曲线法, 绘制水分穿透曲线, 结合 Poiseuille 方程计算出大孔隙数量、半径及饱和导水率等指标, 对土壤大孔隙特征及其对饱和导水率的影响进行研究。结果表明: (1) 桉树人工林土壤的出流速率总体表现先匀速增加后趋于稳定, 稳定出流速率总体表现为 I>II>III>IV。(2) 大孔隙半径范围在 0.3—1.5 mm, 主要集中于 0.4—0.6 mm, 随土层深度增加显著减小 ($P<0.05$)。大孔隙数量范围在 3.56×10^4 — 4.81×10^5 个/ m^2 。随着连栽代次的增加, 大孔隙孔径范围变小, 同一孔径范围的大孔隙数量减少。土壤容重与大孔隙特征呈极显著负相关关系; 有机质含量与大孔隙特征呈极显著正相关关系。(3) 各样地土壤饱和导水率范围在 0.41—4.50 mm/min, 并随着连栽代次增加而降低。将大孔隙的总数量、平均体积与土壤饱和导水率进行线性拟合, 拟合方程为: $y=ax+b$, ($R^2>0.66$)。综上, 随着桉树人工林连栽代次的增加, 土壤大孔隙孔径范围缩小、同等半径的大孔隙数量减少, 饱和导水率降低, 土壤入渗及导水性减弱, 容易造成水土流失。

关键词:桉树人工林; 土壤大孔隙; 水分穿透曲线; 当量孔径; 饱和导水率

Characteristics of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity of successive *Eucalyptus* plantation

WANG Jinyue¹, DENG Yusong^{1,*}, LI Dianyun², HUANG Zhigang³, YANG Gairen¹, JIANG Daihua³, WANG Ling⁴

1 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

2 Guangxi State-owned Huangmian Forest Farm, Liuzhou 545600, China

3 College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China

4 College of resources and environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: The multiple generations of fast-growing plantation forests have led to decrease in the water holding capacity of the forest land. Soil macropores replenish groundwater in the form of preferential flow and are an important factor in the quantitative study of soil water movement. A water breakthrough experiment was conducted on the soil taking successive planted 1—4 generations of *Eucalyptus* plantations as the research object, and the water breakthrough curve was drawn. The

基金项目:中央引导地方科技发展专项(桂科 ZY20198007); 广西科技重大专项(AA17204078-4); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD17195098)

收稿日期:2020-07-16; **网络出版日期:**2021-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

number of macropores, radius and saturated hydraulic conductivity were calculated with the combination of Poiseuille equation. The characteristics of soil macropore and the effect on the saturated hydraulic conductivity were investigated. The results show the following: (1) the effluent rate of *Eucalyptus* plantation soils in general showed a uniform increase and then stabilized. The steady effluent rate showed $I>II>III>IV$ and decreasing with the increase of soil depth. (2) The macropore radius ranged from 0.3 to 1.5 mm, mainly concentrated in 0.4—0.6 mm, which significantly decreased with the deepening of the soil layer ($p<0.05$). The macropore amount ranged from 3.56×10^4 to $4.81\times10^5/\text{m}^2$. With the increase of successive planting generations, the macropore pore size range became smaller and the amount of macropores in the same pore size range decreased. This was the result of the combined effect of soil physical and chemical properties. Soil bulk density ranged from 1.15 to 1.45 g/cm^3 and presented a highly significant negative correlation with macropore characteristics. Saturated water content and total porosity were all significantly and positively correlated with macropore characteristics. The organic matter content ranged from 5.43 to 32.33 g/kg and showed a highly significant positive correlation with the macropore characteristics. (3) The saturated hydraulic conductivity of soil in *Eucalyptus* plantations ranged from 0.41 to 4.50 mm/min , which decreased with increasing successive planting generations. This showed significant correlation with the basic characteristics of macropore. The total amount and mean volume of macropores showed a significantly positive correlation with the saturated hydraulic conductivity of the soil. The fitting equation was $y=ax+b$, ($R^2>0.66$), accounting for 66% and 79% of the variability in the saturated hydraulic conductivity, respectively. As a conclusion, with the increase of successive planting generations of *Eucalyptus* plantations, the pore size of soil macropores decreased, the amount of macropores of the same radius decreased, and the saturation hydraulic conductivity decreased. The infiltration and water conductivity of the soil under the *Eucalyptus* plantations are weakened, which is prone to soil erosion.

Key Words: *Eucalyptus* plantation; soil macropores; the water breakthrough curve; equivalent radii; saturated hydraulic conductivity

桉树是世界三大人工林树种之一,具有生长快、适应性强、轮伐周期短和病虫害少的特点^[1-2]。目前,世界上已有 100 多个国家或地区引种栽培,我国桉树人工林的种植面积超过 450 万 hm^2 ,轮伐周期为 6—8 a^[3]。桉树的经济价值较高,广西以桉树木材为主的商品材产量占全国总产量的三分之一,促进了造纸等相关产业的发展^[4]。短周期多代连栽是速生桉树人工林普遍采取的经营方式^[5]。经营 1—3 代基本可以保持桉树人工林生产力,但地力逐渐退化,生物多样性减少;经营 5 代后,生产力、地力与生物多样性明显退化^[6]。相关学者^[7-9]对多地人工林土壤的容重、通气度、入渗及持水性能等指标进行了综合分析,均认为桉树人工林土壤的水源涵养能力显著低于其它人工林,将直接或间接影响土壤蓄水抗旱、保肥性能和耕作质量。在实际经营过程中,桉树的连栽措施对土壤理化性质的影响更为显著,多代连栽会加速林地水土流失,导致林地退化,生产力下降。目前,桉树连栽导致的“第 n 代效应”引起了国内外学者的广泛关注,Zhou 等^[10]、温远光等^[11]、刘红英等^[12]从养分含量、植物功能群组成、生物活性等方面研究了土壤肥力及生物多样性的变化。但是对连栽桉树土壤物理性质的定量分析及其影响导水性能的内在机制还鲜有报道,而大孔隙特征、饱和导水率等性质的变化是导致土壤退化的重要因素,影响桉树根系的伸展、呼吸、吸收养分和水分的能力^[13]。

土壤大孔隙是土壤中可优先传导地表降水或灌溉水的物理孔隙,是评价土壤基本性质的重要指标之一^[14]。大孔隙的形成主要是由土壤质地、植物根系、土壤动物运动、土壤干湿交替和冻融作用以及耕作等因素综合作用的结果^[15]。大孔隙可以使水分以优先流的形式快速运移和补给地下水,是深层土壤水分可能来源的唯一通道^[16]。大孔隙流的发生可以减少地表径流,促进水资源交换及补给,是森林发挥涵养水源功能的关键^[17]。大孔隙数量仅占土壤孔隙的 0.32%,却能够传导 90% 的土壤水流通量,具有重要的生态水文学意义^[18]。国内外学者对土壤大孔隙特征及其对土壤导水性能的影响做了大量研究,研究方法主要包括水分穿透曲线法、染色示踪法、土壤切片、CT 扫描和 X 线断层摄像术等^[19]。其中,水分穿透曲线法原理是将大孔隙

近似为管状,根据 Poiseuille 方程分析土壤中水分流通量的变化计算出不同孔径范围的大孔隙数量^[17,20]。Kluitenberg 等^[21]用水分穿透曲线法验证了溶质输送过程对不同溶质施加方法或溶质边界条件的敏感性;陈凤琴等^[22]用水分穿透曲线法并建立 Poiseuille 方程得出,土壤饱和入渗性能与大孔隙半径和数量在很大程度上相关;刘目兴等^[17]通过三峡库区原状土柱的水分穿透实验说明,土壤饱和导水率与大孔隙密度、面积比均呈显著的相关关系等。目前对于土壤大孔隙的研究多为各地区不同土地利用方式的对比研究,土壤性质对大孔隙特征的作用机制、大孔隙特征对饱和导水率的影响机制尚不明确。

桉树营林导致土壤保水保肥性能降低,多次轮伐后土壤截留降水及吸收养分性能退化明显^[6]。大孔隙是传导优先流和溶质优先运移的唯一途径,对连栽桉树土壤大孔隙特征定量研究,探究其影响饱和导水率的内在机制是揭示土壤侵蚀的重要环节,对人工林水源涵养具有重要意义。本研究选取亚热带桉树人工纯林为研究对象,测定土壤基本性质,并采用水分穿透曲线法对大孔隙的数量、半径及导水能力进行量化分析,研究其对水分运移的影响,从而为研究大孔隙水分运移机理提供理论基础,为亚热带地区人工林水文研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在广西壮族自治区柳州市鹿寨县(108°28′—110°12′E, 24°14′—24°50′N),样地位置如图 1 所示。研究区海拔约 300 m,为低山丘陵地貌,属亚热带季风气候。年平均气温 19℃左右,夏季最高气温 38℃,冬季最低气温 0℃。雨量充沛,年均降雨量约 1800 mm,主要集中在 4—8 月。日照充足,年平均日照量约 1600 小时,无霜期长达 320 天以上。土壤以砂页岩发育的红壤为主,pH 值范围为 4.8—5.2,土层厚度 50—70 cm,表土层厚度 20—25 cm^[23]。

1.2 样地设置与样品采集

研究区内多年生连栽 1—4 代桉树人工林中选择成土母质相同、坡向坡度基本一致、栽种前茬林分均为马尾松林、营林措施等基本一致的林地(记录为 I、II、III、IV)。植株密度约为 1500 株/hm²,平均胸径 15.75 cm,树高 19.78 m,郁闭度约为 0.7。在每个林地中随机设置 3 个 20 m×20 m 的标准样地。为消除边界效应,样

方间距离约 800 m。分别在每个标准地内沿对角线随机布设样点,除去表土的凋落物层,挖取土壤剖面(宽度为 50 cm,深度为 100 cm),土壤剖面分为 5 层,按 20 cm 间隔分层取样。剔除土样中植物根系、石块等,利用 100 cm³的环刀采集原状土,收集 1—2 kg 散土,重复 3 次。将采集的样品放入方形铝盒中,做好标签,减少震动以保持土样的原状,带回实验室进行相关指标的测定。

1.3 基本原理

本文根据 Radulovich 等^[24]学者提出的方法,将土壤由田间持水量到饱和含水量过程中导水的孔隙界定为大孔隙。土壤大孔隙水势一般不超过 5 kPa,当其达到田间持水量后,土壤基质(固体)的吸附力和毛管力较低,即土壤水势几乎为 0,此时供水强度是影响土壤水分入渗速率的主导因素。由于土壤中水分运移速度较慢,处于层流范围,假设大孔隙近似为管状,利用 Poiseuille 方程建立流量与土壤孔径之间的关系:

$$Q = \pi r^4 \Delta p / (8 \eta \tau L) \quad (1)$$

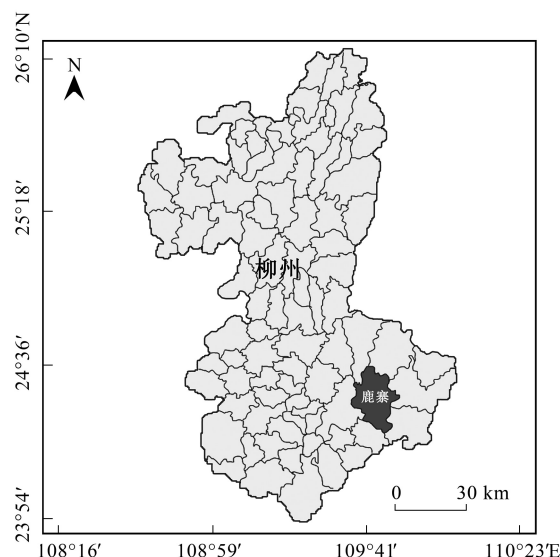


图 1 实验样地位置

Fig.1 Location of the experimental sites

待水流达到稳定状态,公式可简化为:

$$Q = \pi \tau r^2 L / t \quad (2)$$

根据土壤学基本原理,在田间持水量与饱和含水量之间,饱和土柱入渗时首先通过半径最大的大孔隙排水,然后参与排水的大孔隙半径逐渐减小,即土壤最大孔隙半径是第 1 次排水的半径,最小孔隙半径是水流达到稳定时的半径。当水流量达到稳定状态时,土壤大孔隙均持续排水。因此,联合(1)、(2)两式即可算出土壤大孔隙的当量孔径:

$$r = \tau L [8\eta / (t\Delta p)]^{1/2} \quad (3)$$

式中, Q 为单位出流量(cm^3/s); r 为孔隙半径(cm); Δp 为水头压强(pa); η 为水的粘滞系数($\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$); τ 为实际水流路径的弯曲系数,本研究取值为 1.2; L 为土柱长度(cm); t 为从首次加水开始计时的时间(s)

通过(3)式可计算出任意时段土壤大孔隙半径,按照 0.1—0.4 的间隔划分相应的孔径范围(假设有出流时间 $t_1 < t_2$,将 t_1 、 t_2 代入(3),求得对应的当量孔径 r_1 、 r_2 ,此时 r_1 — r_2 即为相应的孔径范围)。假设大孔隙的孔隙面积为 $S(\text{cm}^2)$,水流速率为 $v(\text{cm}/\text{s})$,则大孔隙单位流量与大孔隙数量(n)的关系为:

$$Q = nSv = n\pi r^2 \tau L / t \quad (4)$$

将公式变形,大孔隙数量(n)的计算式为:

$$n = Qt / (\pi r^2 \tau L) \quad (5)$$

求出大孔隙半径范围后,利用中值半径转化得到大孔隙面积,乘以大孔隙数量可以得到大孔隙的总面积,从而得到大孔隙面积比(土壤大孔隙总断面面积与土柱总过水断面面积的比值);大孔隙面积乘以土柱长度可以得到大孔隙体积。

1.4 试验方法

1.4.1 土壤基本性质的测定

土壤容重、饱和含水量、总孔隙度采用环刀法测定;机械组成采用吸管法测定;有机质采用重铬酸钾外加热法测定^[25];pH 值用 pH 计测定。

1.4.2 水分穿透曲线的测定

将采集的土样静置在去离子水中 12 h 充分饱和,再放置于粗砂上 12 h,使其达到田间持水量^[17,24]。在环刀边缘接触土壤样品的部分涂抹薄层($<0.5 \text{ mm}$)凡士林,以防止水分通过土壤与环刀壁之间的孔隙流出。在原状土环刀上放置一个相同规格的空环刀,空环刀内放置一张滤纸,防止水分冲刷使土壤团聚体的结构性孔隙受到破坏。用马氏瓶测定土壤大孔隙特征,控制水头高 2 cm,从加水开始计时,当土柱下部有水流出时,每隔 5 s 收集并测定出水流量,直至水流达到稳定。根据出水流量与时间制作水分穿透曲线,计算大孔隙的相关指标。计算出土壤的饱和导水率(K_t)后,根据公式换算为 10℃ 的饱和导水率(K_{10})。

$$K_t = 10Q_n L / [t_n A (H + L)] \quad (6)$$

$$K_{10} = K_t / (0.7 + 0.03t^\circ) \quad (7)$$

式中, K_t 为 $t^\circ\text{C}$ 时的饱和导水率(mm/min); Q_n 为 n 次出水量(cm^3); t_n 为每次渗透间隔的时间(s); A 为土柱横截面积(cm^2); H 为水层厚度(cm); K_{10} 为 10℃ 时的土壤饱和导水率(mm/min); t° 为测定时水的温度($^\circ\text{C}$)。

1.5 数据分析处理

使用 SPSS 19.0、Origin 2018 及 Excel 2017 进行数据分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同代次桉树人工林土壤基本性质

桉树人工林土壤基本性质如图 2 所示。总体来看,土壤基本性质随着桉树连栽变化明显。土壤容重随连栽代次增加而增加,第 I 代林 0—20 cm 土层容重为 $1.15 \text{ g}/\text{cm}^3$,连栽 4 代后增加了 14.8%。饱和含水量、总孔隙度均随着连栽代次的增加而减少,第 I 代林 0—40 cm 土层与其它代次差异显著($P < 0.05$)。土壤粘粒、粉

粒、砂粒的含量分别在 22.02%—28.52%、37.07%—48.96%、24.80%—37.17%,在不同代次、土层之间较为稳定。土壤有机质含量范围在 5.43—32.33 g/kg,随着桉树连栽呈下降的趋势。第 I 代林 0—20 cm 土层的有机质含量是第 IV 代林的 1.63 倍,0—60 cm 土层与第 IV 代差异显著 ($P<0.05$)。表层土壤的 pH 值呈增加趋势,但差异值仅在 0.03—0.29。

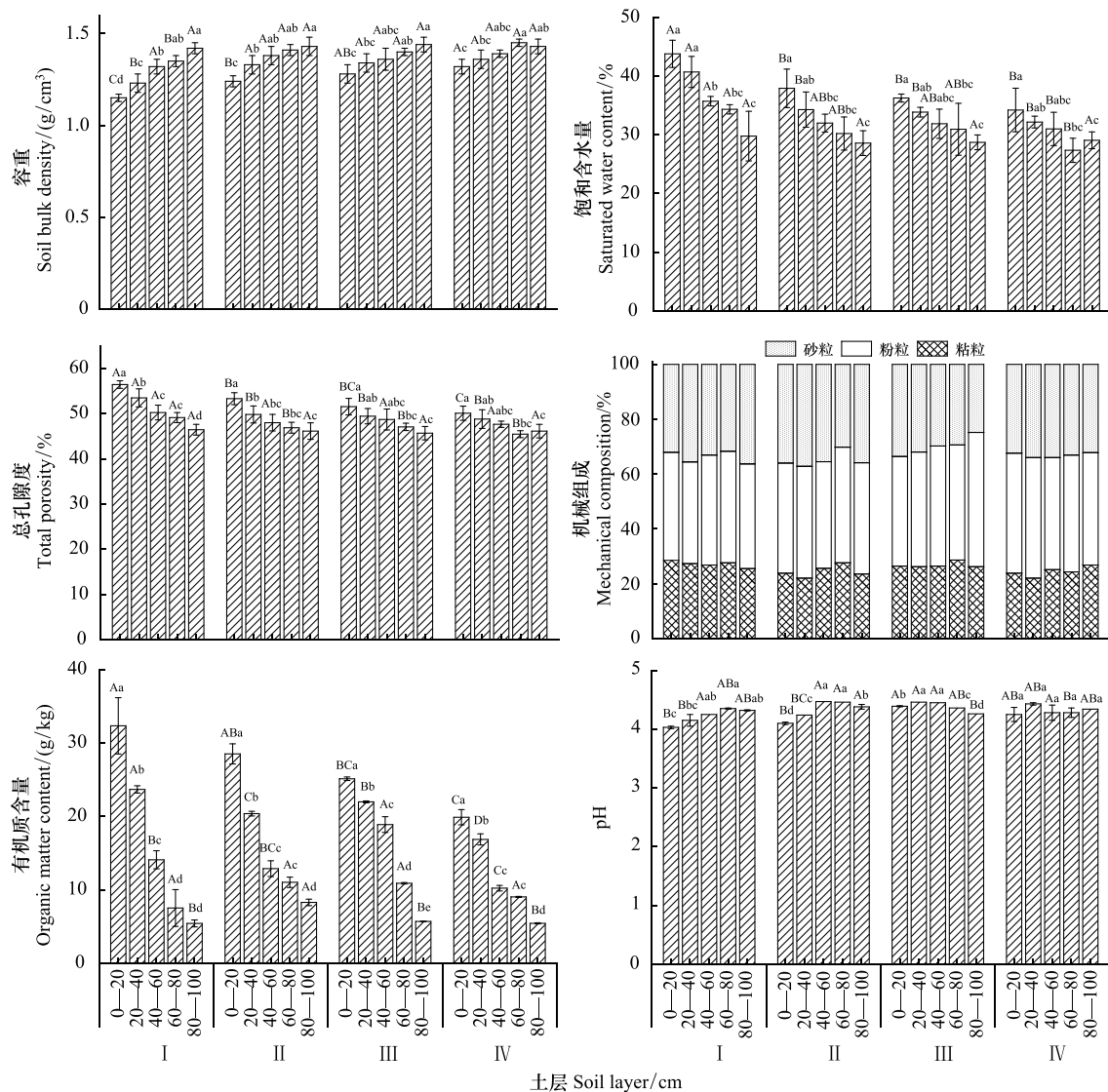


图 2 桉树人工林土壤基本性质

Fig.2 Basic properties of *Eucalyptus* plantation soil

不同大写字母表示相同土层不同代次间差异显著;不同小写字母表示同一代次不同土层间差异显著, $P<0.05$

2.2 不同代次桉树人工林土壤水分穿透曲线

对采集的土样进行水分穿透试验,根据出流时间与速率得到桉树土壤的水分穿透曲线(图 3)。大孔隙的出流速率总体上表现为先匀速增加,至从第 1 滴水流出后 30—55 s 增加速率降低,55—70 s 达到稳定,这说明在水分运移初期大孔隙对土壤导水有更加积极的影响。

桉树土壤的出流速率总体表现为 $I > II > III > IV$ 。从不同层次来看,0—60 cm 土层的稳定出流速率在第 II—III 代间差异较大,说明桉树连栽 2 代内土壤大孔隙的相关性质不会发生明显变化,而第 III 代连栽之后性质变化明显。60—100 cm 土层各连栽代次变化规律与整体变化规律有所差异,分别表现为 $I > II > IV > III$ 、 $I > IV > II > III$,但出流速率仅相差 0.01—0.03 mL/s。由此可知,0—60 cm 是大孔隙性质发生明显退化的主要土

层。从初始出流时间来看,各样地各土层的出流时间范围在 5—50 s,与连栽代次呈正相关。在 0—20 cm 土层,各样地出流时间在 5.3—14.5 s,其余随土层增加延迟 2.5—15 s。

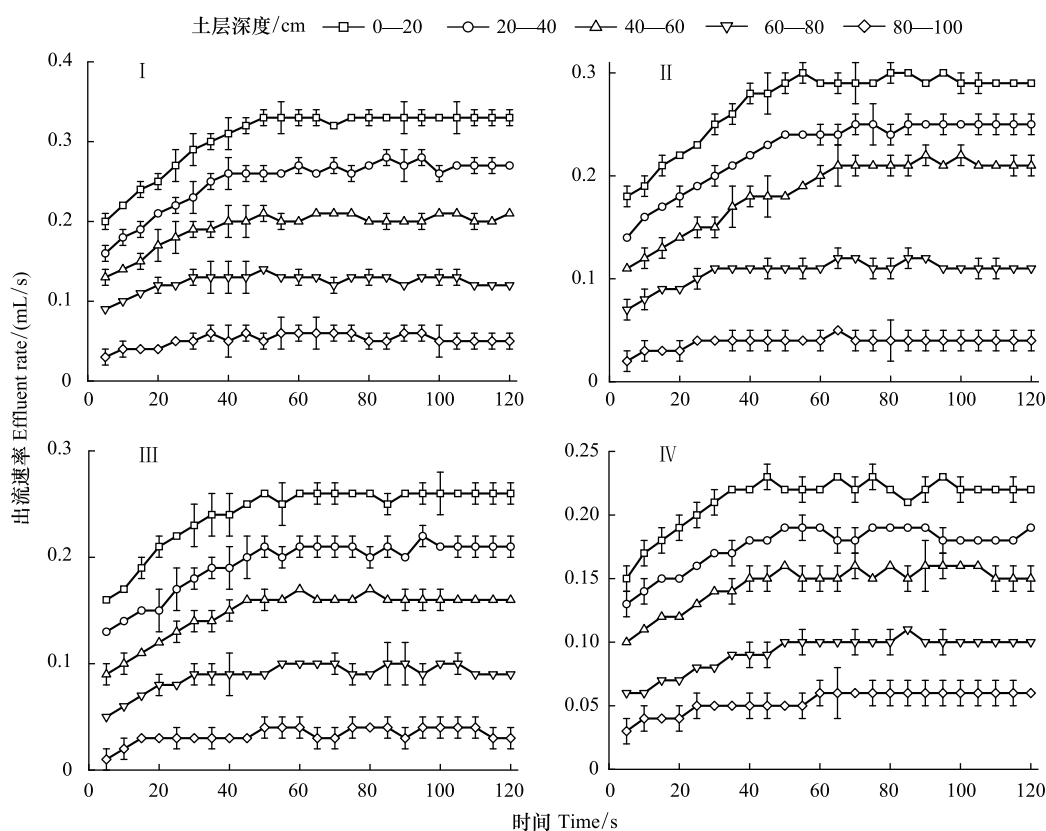


图3 不同连栽代次桉树林土壤水分穿透曲线

Fig.3 The water breakthrough curve of successive *Eucalyptus* plantation

2.3 不同代次桉树人工林土壤大孔隙特征

2.3.1 大孔隙分布特征

桉树人工林土壤大孔隙平均半径及总数量见表1;具体当量孔径与数量见表2。不同连栽代次桉树土壤大孔隙半径范围在 0.3—1.5 mm,随连栽代次及土层深度的增加而减小,主要集中在 0.4—0.6 mm。第 I 代林加权平均半径显著大于 II—IV 代林 ($P < 0.05$)。大孔隙最大半径出现在第 I 代林 0—20 cm 土层 (1.5 mm);最小半径出现在第 IV 代林 60—80 cm 土层 (0.3 mm)。随着连栽代次及土层深度的增加,大孔隙半径逐渐减小,孔径范围缩小。在 0—40 cm 土层,各样地大孔隙半径范围差异明显,其中 0—20 cm 土层第 I—IV 代桉树土壤孔隙半径分别为 0.5—1.5 mm、0.4—1.2 mm、0.5—0.9 mm、0.5—0.9 mm,大于其它土层。在 40—100 cm 土层中,虽然各样地中大孔隙半径范围相近,但同等半径范围的大孔隙数量均随连栽代次的增加而减少。

桉树土壤大孔隙数量如表1、2所示,单位面积中大孔隙数量范围在 3.56×10^4 — 4.81×10^5 个,第 II 代 0—20 cm 土层最多,第 III 代 80—100 cm 土层最少。除第 IV 代林外,其余样地大孔隙总数量差异显著 ($P < 0.05$)。随着土层的加深,同等孔径范围的大孔隙数量减少。0—40 cm 土层大孔隙总数量差异显著 ($P < 0.05$),表现为 II > III > IV > I。大半径的大孔隙数量少,较小半径的大孔隙数量多。第 I 代林半径为 1.1—1.5 mm 的大孔隙仅有 3297 个,占总数量的 0.30%;集中在 0.4—0.6 cm 的大孔隙有 5.26×10^5 个,占总量的 48.26%。第 II 代林中半径为 0.9—1.2 cm 的大孔隙数量为 5740 个,占总量的 0.40%;集中在 0.4—0.6 mm 的大孔隙数量为 1.25×10^6 个,占大孔隙数量的 85.90%;第 III、IV 代林中大孔隙径级差异不显著,最大孔径均不超过 1.0 mm,半径范围分别主要分布在 0.4—0.6 mm、0.3—0.6 mm。在同一土层,同孔径的大孔隙数量总体表现为随着桉树连栽代

次的增加而减少。

表 1 不同连栽代次桉树土壤大孔隙特征

Table 1 The characteristic of soil macropores of successive <i>Eucalyptus</i> plantation						
样地编号 Sample plot number	土层 Soil layers /cm	平均半径 Mean radius/mm	总数量 Total quantity /(10 ⁵ 个/m ²)	面积比 Area ratio/%	平均体积 Mean volume /(cm ³ /cm ³)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(mm/min)
I	0—20	0.64Aa	2.91±0.01Da	38.50±0.06Ba	0.12±0.00Aa	4.50±0.11Aa
	20—40	0.62Ab	2.16±0.01Db	27.31±0.11Cb	0.09±0.00Bb	3.55±0.03Ab
	40—60	0.52Ac	3.44±0.00Ac	29.75±0.04Ab	0.10±0.00Bab	2.87±0.07Ac
	60—80	0.48Ad	1.69±0.16Bd	12.52±1.01Bc	0.07±0.01Ac	1.77±0.18Ad
	80—100	0.47Ae	0.70±0.09Ae	4.97±0.62Ad	0.03±0.00ABd	0.82±0.00Ae
II	0—20	0.53Ba	4.81±0.14Aa	45.20±1.42Aa	0.13±0.00Aa	4.09±0.07ABa
	20—40	0.52Bb	4.04±0.02Ab	36.23±0.12Ab	0.11±0.00Ab	3.28±0.03Bb
	40—60	0.49Cc	3.67±0.18Ac	28.02±1.61Ac	0.13±0.00Aa	2.87±0.04Ac
	60—80	0.48Bd	1.51±0.05BCd	10.98±0.31BCd	0.06±0.00ABc	1.50±0.04ABd
	80—100	0.45Be	0.48±0.07Bce	3.08±0.42Bce	0.03±0.00ABd	0.55±0.00ABe
III	0—20	0.53Ca	4.15±0.08Ba	37.64±0.91Ba	0.11±0.00Aa	3.55±0.02BCa
	20—40	0.53Ba	3.36±0.18Bb	30.33±1.61Bb	0.09±0.01Bb	2.87±0.00Cb
	40—60	0.49Bb	2.69±0.09Bc	20.89±0.82Bc	0.09±0.00Bb	2.18±0.04Bc
	60—80	0.48ABc	1.20±0.08Cd	8.84±0.57Cd	0.05±0.00Bc	1.23±0.03Bd
	80—100	0.45Bd	0.36±0.00Ce	2.26±0.00Be	0.02±0.00Bd	0.41±0.00Be
IV	0—20	0.53BCa	3.63±0.14Ca	33.47±1.34Ba	0.10±0.00Ba	3.14±0.00Ca
	20—40	0.50Cb	3.01±0.06Cb	23.91±0.46Db	0.10±0.00Ba	2.59±0.00Db
	40—60	0.48Dc	2.31±0.02Cc	16.75±0.15Cc	0.09±0.00Ba	2.18±0.03Bc
	60—80	0.39Cd	3.35±0.28Aa	15.92±1.21Ac	0.08±0.01Ab	1.36±0.07ABd
	80—100	0.45Be	0.64±0.06ABd	4.08±0.38ABd	0.04±0.00Ac	0.68±0.00Ae

大孔隙平均半径与平均体积为大孔隙数量的平均加权结果

表 2 不同连栽代次桉树土壤大孔隙当量孔径及数量

Table 2 Equivalent radii and quantity of soil macropores of successive <i>Eucalyptus</i> plantation									
样地编号 Sample plot number	土层/cm Soil layers	大孔隙半径范围(mm)及数量(个/m ²) Macropore radius range(mm)and amounts per m ²							
		半径	数量/10 ³	半径	数量/10 ⁴	半径	数量/10 ⁴	半径	数量/10 ⁵
		Radius	Amounts	Radius	Amounts	Radius	Amounts	Radius	Amounts
I	0—20	1.5—1.1	3.30±0.16	1.1—0.8	2.75±0.11	0.8—0.6	9.63±0.23	0.6—0.5	1.64±0.04
	20—40	1.2—1.0	4.64±0.28	1.0—0.8	1.07±0.03	0.8—0.6	7.66±0.31	0.6—0.5	1.24±0.03
	40—60					0.8—0.6	5.70±0.4	0.6—0.4	2.87±0.04
	60—80							0.6—0.4	1.69±0.16
	80—100							0.6—0.4	0.70±0.09
II	0—20	1.2—0.9	5.74±0.16	0.9—0.8	1.29±0.05	0.8—0.6	8.31±0.20	0.6—0.4	3.80±0.11
	20—40			1.0—0.8	0.77±0.01	0.8—0.6	6.56±0.08	0.6—0.4	3.31±0.03
	40—60					0.7—0.6	2.97±0.21	0.6—0.4	3.37±0.16
	60—80							0.6—0.4	1.51±0.05
	80—100							0.5—0.4	0.48±0.07
III	0—20			0.9—0.8	1.06±0.01	0.8—0.6	7.34±0.12	0.6—0.4	3.31±0.07
	20—40			0.9—0.8	1.02±0.01	0.8—0.6	5.19±0.33	0.6—0.4	2.74±0.15
	40—60					0.7—0.6	2.32±0.18	0.6—0.4	2.45±0.07
	60—80							0.6—0.4	1.20±0.08
	80—100							0.5—0.4	0.36±0.00
IV	0—20			0.9—0.8	1.10±0.06	0.8—0.6	6.27±0.39	0.6—0.4	2.89±0.10
	20—40					0.7—0.6	3.07±0.14	0.6—0.4	2.70±0.04
	40—60							0.6—0.4	2.31±0.02
	60—80							0.5—0.3	3.35±0.28
	80—100							0.5—0.4	0.64±0.06

2.3.2 大孔隙面积比与平均体积

土壤大孔隙面积比与平均体积是综合反映土壤中水分运动的重要指标(表1)^[20]。除第Ⅰ代20—60 cm土层及第Ⅳ代40—60 cm土层外,其余样地之间均有显著差异($P<0.05$)。大孔隙面积比在第Ⅱ代0—20 cm土层最大,为45.2%;在第Ⅲ代80—100 cm土层最小,为2.26%。大孔隙面积随着土层的增加而减小。0—20 cm土层的大孔隙面积均值为38.7%,80—100 cm土层均不超过5%。除第Ⅳ代林外,各样地40—80 cm土层的大孔隙面积均有明显下降。大孔隙面积比整体表现为随着连栽代次的增加而减少,总面积比大小表现为:Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ>Ⅳ。

单位体积土壤的大孔隙加权平均体积范围在0.02—0.13 cm³,第Ⅱ代0—20 cm土层最大,第Ⅲ代80—100 cm土层最小,与大孔隙面积比分析结果一致。各样地0—60 cm土层大孔隙体积与60—80 cm土层有显著差异($P<0.05$)。总体来看,各土层大孔隙平均体积随着土层深度的增加呈减小趋势。随着连栽代次的增加,0—60 cm土层大孔隙平均体积呈先增加后减小的趋势,与半径、面积比呈现的规律不同。各样地大孔隙的总体积从大到小的顺序为:Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ>Ⅳ,与大孔隙总面积比的排序一致。

2.3.3 土壤基本性质对大孔隙特征的影响

对桉树土壤大孔隙特征与基本性质进行相关分析(表3)。结果表明土壤容重与大孔隙平均半径、总数量、面积比、平均体积呈极显著负相关关系;总孔隙度与大孔隙特征呈极显著正相关关系;饱和含水量与大孔隙总数量呈显著正相关关系;与其余大孔隙特征呈极显著正相关关系。这说明土壤结构越紧实,通气透水能力下降,不利于大孔隙的形成。土壤粒径组成未对土壤大孔隙特征造成显著影响。土壤有机质含量与大孔隙特征呈极显著正相关关系,说明有机质对大孔隙的形成有促进作用。桉树连栽后,土壤容重逐渐增加,有机质含量逐渐减小,土壤大孔隙的半径减小、数量减少。

表3 土壤基本性质与大孔隙特征相关性分析

Table 3 Correlation analysis between basic properties of soil and macropore characteristics

指标 Items	容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity/%	饱和含水量 Saturated water content/%	粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%	pH	有机质 Organic matter content/ (g/kg)
平均半径 Mean radius/mm	-0.933 **	0.929 **	0.950 **	0.247	-0.431	0.212	-0.524 *	0.831 **
总数量 Total quantity/(10 ⁵ 个/m ²)	-0.566 **	0.573 **	0.503 *	-0.350	-0.193	0.399	-0.196	0.721 **
面积比 Area ratio/%	-0.818 **	0.822 **	0.769 **	-0.20	-0.299	0.393	-0.396	0.902 **
平均体积 Mean volume/(cm ³ /cm ³)	-0.701 **	0.708 **	0.658 **	-0.196	-0.327	0.415	-0.250	0.775 **

* 在0.05水平(双侧)上显著相关;** 在0.01水平(双侧)上极显著相关

2.4 大孔隙特征对饱和导水率的影响

土壤截留降水、保持水土能力是多种因素共同作用的结果,饱和导水率是其中重要的物理指标^[26]。将土壤大孔隙总数量、平均体积与饱和导水率进行线性拟合(图4),可以看出,大孔隙的数量、体积与饱和导水率之间均呈显著的正相关关系。拟合方程均为 $y=ax+b$,其中 y 为饱和导水率(mm/min); x 为大孔隙数量(10⁵个/m²)及平均体积(cm³/cm³), $R^2>0.66$ 。半径>0.03 mm的大孔隙数量决定了饱和导水率66%的变异;大孔隙体积占土体体积的2%—13%,决定了饱和导水率79%的变异。这说明大孔隙的数量与体积对土壤水分的运移与分布有着重要的影响,大孔隙的数量越多、体积越大,土壤的饱和导水率就越大,土壤的入渗性能越强,水土流失越低。根据表2可知,同一代林各土层中相同孔径范围的大孔隙数量及平均体积随着连栽代次的增加而减小,饱和导水率整体表现为Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅳ,第Ⅰ代与第Ⅲ代之间有显著差异,不同土层间饱和导水率有显著差异($P<0.05$)。

3 讨论

桉树是典型的速生树种,速生人工纯林经营会造成凋落物的分解较慢,养分归还速率低的现象,易造成土

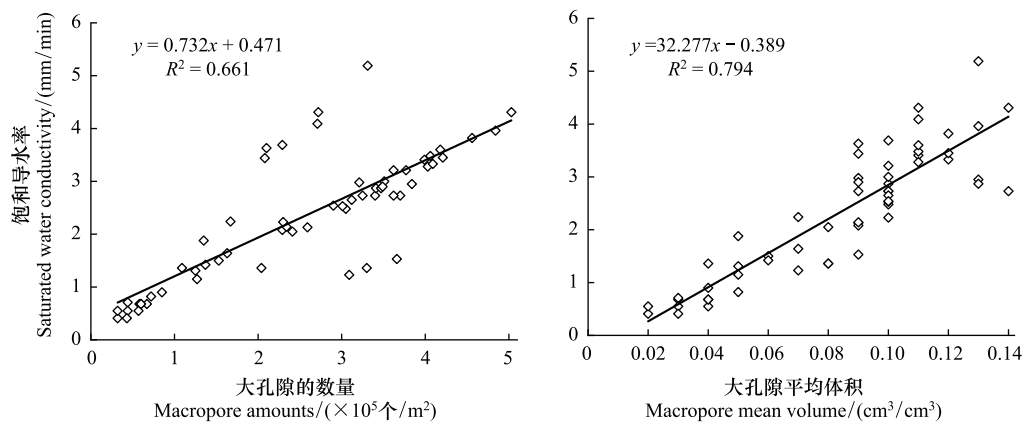


图4 土壤大孔隙数量、平均体积与饱和导水率的相关关系

Fig.4 Correlation analysis between the number and mean volume of soil macropores and saturated hydraulic conductivity

壤养分元素亏缺。研究表明,连栽对 4.5a 生桉树林分养分积累和循环有明显的负效应^[27]。因此多代纯林连栽后易导致土壤质量退化,即包括物理、化学等属性的全面退化,加速水土流失。桉树连栽后土壤容重增加,有机质含量降低,到第Ⅳ代退化明显。Banfield 等^[28]将智利蓝桉人工林与次生林进行比较,发现蓝桉比次生林容重增加了 22%,有机质含量下降了 20%,有更高的土壤侵蚀风险;本文指标与杨玉盛等^[29]测定杉木人工林连栽土壤指标相比,桉树人工林有机质含量下降更快。土壤基本性质对大孔隙特征及饱和导水率有显著影响。容重高的土壤紧实,大孔隙半径减小、数量变少,从而导致快速传导水分及养分的通道变少,饱和含水量及导水率也相应降低^[30-32]。由于土壤中腐殖质及微生物分解产物的存在,有机质可作为有机粘合剂长期影响土壤团聚体的形成与稳定,团聚体之间的结构性孔隙可改良土壤通气状况及透水性能^[8]。除此之外,有机质影响动物通道的空间分布,动物通道与根系通道可构成大孔隙空间网络系统^[31]。因此,桉树连栽 2 代内大孔隙分布较多、孔隙度较大、透水性较好,而多代连栽后由于土壤基本性质的综合作用使得大孔隙径级缩小、数量减少,透水性变差。

桉树土壤出流速率均表现为先匀速增加后趋于稳定,达到稳定出流速率。这与多位学者的研究结果一致^[33-34]。但与吕刚等^[35]对辽西地区半干旱森林土壤水分穿透曲线规律不同。吕刚等^[35]研究树种多为水土保持林的造林树种,有利于涵养水源;树种林龄较高、根系发达,土壤结构相对稳定,容重小,孔隙度高;凋落物层较厚,腐殖质较高、表层土壤活动频繁,有机质含量相对较高;动物活动通道也有利于促进大孔隙的形成。因此该地区的多个土层的出流速率在 70 s 内无变化。本研究中各样地的出流速率总体表现为 I > II > III > IV,经过连栽的桉树土壤的大孔隙在剖面上存在分化,表现为大孔隙的半径、数量随着连栽代次的增加从土壤的表层向深层依次递减。不同连栽代次桉树土壤稳定时间的大小排序为 I > III > II > IV。第 II 代稳定时间较慢,可能由于 40—80 cm 土层粘粒含量较多,导致土壤质地粘重、结构紧实,影响水分入渗时间及入渗量。

土壤大孔隙的半径范围和数量可以反映大孔隙在各层土壤中的分布情况^[36]。本研究中大孔隙半径范围在 0.3—1.5 mm,最小孔径与土壤学中水分能自由移动的孔径最小值一致,说明大孔隙中水分运动以重力水为主,是降雨后水分快速到达土壤深层的主要通道^[17]。半径范围与官琦等^[31]、石辉等^[15]学者研究结果类似,略小于 Vermeul 等^[37]、陈风琴等^[22]学者对大孔隙半径的定义。这说明连栽措施加速了土壤大孔隙孔径范围缩小及数量减少。随着土层的加深,大孔隙孔径范围及平均半径呈减小的趋势。第Ⅳ代林 60—80 cm 土层中出现了半径为 0.3 mm 的大孔隙,这是由于多代连栽后深层土壤植物根系及生物活动减少,容重变大,有机质含量变低(图 2)。本研究表明半径大的大孔隙数量少,孔径 > 0.8 mm 的大孔隙数量仅占总大孔隙数量的 2% 左右,研究结果与刘目兴等^[17]一致。但本研究中大孔隙半径小于相关研究,刘目兴等^[17]选择的温性落叶阔叶林棕壤与常绿落叶针阔混交林黄棕壤容重低于本研究,而有机质含量高,因此大孔隙半径大、数量多。各

样地孔径范围及同孔径的大孔隙数量均表现为 $I > II > III > IV$, 这与叶绍明等^[38]、骆晓等^[13]对连栽桉树土壤孔隙度及其它物理性质的研究结果相似。各样地中大孔隙面积比在 2.26%—45.2%, 比刘目兴等^[17]对三峡库区大孔隙的研究结果稍大, 这与林分组成相关, 其研究选择的林分包括是针叶林, 凋落物含量少于阔叶林, 不利于有机质形成; 弃耕草地受人为影响较大, 大孔隙数量大幅减少。土壤大孔隙面积比及平均体积均表现为 $II > I > III > IV$ 。其中第 I、II 代之间出现差异的原因是由于第 I、II 代林之间的大孔隙数量、半径的退化不明显, 第 II 代桉树人工林 0—40 cm 土层大孔隙略小于第 I 代林, 而数量却远大于第 I 代林。

本研究选取的桉树人工林土壤饱和导水率整体表现为 $I > II > III > IV$ 。饱和导水率分别与大孔隙的总数量、平均体积呈显著的正相关关系。大孔隙的总数量决定了饱和导水率 66% 的变异; 大孔隙的平均体积决定了饱和导水率 79% 的变异。这与多位学者的研究结果一致, 刘目兴等^[17]认为半径 > 1 mm 的大孔隙数量决定了土壤饱和导水率 85% 的变异; 吕刚等^[35]学者研究结果表明大孔隙的平均半径决定了 50% 饱和导水率的变异, 而陆斌等^[20]认为大孔隙率与饱和导水率呈幂函数关系, 决定了饱和导水率 84% 的变异, 这可能是因为大孔隙的数量、体积增加到一定程度时, 决定导水的主要因素转换为水流形态及大孔隙连通性。土壤大孔隙数量越多、平均体积越大, 则提供大孔隙流的通道越多。降雨后, 土壤截流能力变强, 短时间内更多的水分可渗透到土壤深层, 减弱了地表径流对表层土的冲刷, 泥沙迁移减少。随着桉树连栽代次的增加, 土壤中同一孔径的大孔隙数量、平均体积均减少。在大孔隙特征的综合影响下, 桉树人工林土壤饱和导水率减小, 说明桉树的连栽在一定程度上影响了土壤大孔隙分布特征, 从而影响了土壤的截留降水、持水导水能力, 容易加重水土流失。

4 结论

1—4 代桉树人工林土壤容重范围在 1.15—1.45 g/cm³, 随连栽代次的增加而增加; 有机质含量范围在 5.43—32.33 g/kg, 随连栽代次的增加而减少。各样地的水分穿透曲线总体上先匀速增加后趋于稳定, 稳定出流速率总体表现为 $I > II > III > IV$ 。土壤大孔隙半径范围在 0.3—1.5 mm, 平均半径为 0.39—0.64 mm, 半径范围在 0.4—0.6 mm 的大孔隙较多, > 1 mm 的较少。随着连栽代次的增加, 大孔隙平均半径、同一孔径范围的大孔隙数量、面积比、体积均呈减少趋势。土壤基本性质对大孔隙特征有较大影响, 土壤容重与大孔隙特征呈极显著负相关关系; 饱和含水量、总孔隙度及有机质含量与大孔隙特征呈极显著正相关关系。土壤饱和导水率范围在 0.41—4.50 mm/min, 大孔隙数量、平均体积与土壤饱和导水率呈显著正相关关系, 分别决定了饱和导水率 66% 和 79% 的变异。桉树人工林连栽初期, 土壤大孔隙特征发生变化, 饱和导水率降低; 连栽至第 IV 代, 大孔隙特征退化明显, 饱和导水率显著下降, 水土流失严重。

参考文献 (References):

- [1] Hubbard R M, Stape J, Ryan M G, Almeida A C. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(9): 1714-1721.
- [2] Engler B, Becker G, Hoffmann S. Process mechanization models for improved *Eucalyptus* plantation management in Southern China based on the analysis of currently applied semi-mechanized harvesting operations. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 87: 96-106.
- [3] Chen F L, Zheng H, Zhang K, Ouyang Z Y, Li H L, Wu B, Shi Q. Soil microbial community structure and function responses to successive planting of *Eucalyptus*. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(10): 2102-2111.
- [4] Zhu L Y, Wang X H, Chen F F, Li C H, Wu L C. Effects of the successive planting of *Eucalyptus urophylla* on soil bacterial and fungal community structure, diversity, microbial biomass, and enzyme activity. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(6): 636-646.
- [5] 李海星. 桂西南四种人工林水源涵养功能的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [6] Kaur N, Singh B, Gill R I S. Productivity and profitability of intercrops under four tree species throughout their rotation in North-Western India. *Indian Journal of Agronomy*, 2017, 62(2): 160-169.
- [7] Leite F P, Silva I R, Novais R F, de Barros N F, Neves J C L. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2010, 34(3): 821-831.

- [8] 林立文,邓羽松,王金悦,杨钙仁,蒋代华,王玲. 亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3647-3656.
- [9] 林立文, 邓羽松, 杨钙仁, 许振欣, 刘德杨, 魏国余, 黄智刚. 亚热带不同林分土壤颗粒分形与水分物理特征. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1141-1152.
- [10] Zhou X G, Zhu H G, Wen Y G, Goodale U M, Zhu Y L, Yu S F, Li C T, Li X Q. Intensive management and declines in soil nutrients lead to serious exotic plant invasion in *Eucalyptus* plantations under successive short-rotation regimes. Land Degradation & Development, 2020, 31(3): 297-310.
- [11] 温远光. 连栽桉树人工林植物多样性与生态系统功能关系的长期实验研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [12] 刘红英. 连栽桉树人工林土壤酶活性及其与土壤养分的关系[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [13] 骆晓. 青神县巨桉连栽对林木生长和土壤理化性质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [14] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [15] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响. 生态学报, 2005, 25(3): 507-512.
- [16] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势. 生态学报, 2006, 26(1): 231-243.
- [17] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 廖丽娟. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响. 生态学报, 2016, 36(11): 3189-3196.
- [18] 阮芯竹, 程金花, 张洪江, 杜士才, 李世友, 张福明, 陈晓冰. 重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素. 水土保持学报, 2015, 29(3): 68-74, 80-80.
- [19] 杨坤, 赵洋毅, 王克勤, 段旭, 韩姣姣, 李耀龙. 普洱茶种植对滇南红壤大孔隙的影响. 土壤, 2019, 51(3): 586-593.
- [20] 陆斌, 张胜利, 李侃, 马国栋. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1512-1519.
- [21] Kluitenberg G J, Horton R. Effect of solute application method on preferential transport of solutes in soil. Geoderma, 1990, 46(1/3): 283-297.
- [22] 陈凤琴, 石辉. 缙云山常绿阔叶林土壤大孔隙与入渗性能关系初探. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2005, 30(2): 350-353.
- [23] 胡荣辉. 施肥对黄冕林场桉树生长影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [24] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 556-559.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 266-289.
- [26] 黄婉霞, 邓羽松, 谢福倩, 杨钙仁, 蒋代华, 黄智刚. 花岗岩崩岗不同部位土壤饱和导水率特征及其影响因素. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2431-2440.
- [27] 余雪标, 白先权, 徐大平, 蔡景光. 不同连栽代次桉树人工林的养分循环. 热带作物学报, 1999(03): 60-66.
- [28] Banfield C C, Braun A C, Barra R, Castillo A, Vogt J. Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile. Catena, 2018, 161: 77-84.
- [29] 杨玉盛, 何宗明, 陈光水, 谢锦升, 俞新妥. 杉木多代连栽后土壤肥力变化. 土壤与环境, 2001, 10(1): 33-38.
- [30] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56.
- [31] 官琦, 徐则民, 田林. 植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺寸及其主要影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2888-2896.
- [32] 陈效民, 黄德安, 吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究. 土壤学报, 2006, 43(3): 509-512.
- [33] 田香姣, 程金花, 杜士才, 李乾坤, 张欣, 魏虎伟. 重庆四面山草地土壤大孔隙的数量和形态特征研究. 水土保持学报, 2014, 28(2): 292-296.
- [34] 王彬俨, 程金花, 张洪江, 孙龙, 张君玉, 马西军, 陆晓宇. 北京昌平区农地土壤大孔隙特征. 水土保持学报, 2012, 26(3): 189-193.
- [35] 吕刚, 王洪禄, 黄龙. 辽西半干旱区森林土壤大孔隙特征研究. 水土保持通报, 2012, 32(5): 176-181.
- [36] 吕刚, 傅昕阳, 李叶鑫, 王婷, 宋子岭. 露天煤矿排土场不同复垦植被土壤大孔隙特征. 煤炭学报, 2018, 43(2): 529-539.
- [37] Vermeul V R, Istok J D, Flint A L, Pikul Jr J L. An improved method for quantifying soil macroporosity. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3): 809-816.
- [38] 叶绍明, 温远光, 杨梅, 梁宏温. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析. 水土保持学报, 2010, 24(4): 246-250, 256-256.