

# 根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响

祁子寒<sup>1</sup>, 王云琦<sup>1,2</sup>, 王玉杰<sup>1,2</sup>, 李 通<sup>1,2</sup>, 王余靖<sup>1,2</sup>, 何相昌<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站,北京 100083;

2.北京林业大学水土保持学院重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083)

**摘要:** 根系的存在对土壤大孔隙的产生及渗透特性有着重要影响,为研究浅表层土体中根系生物量与土壤大孔隙特征之间的数值关系,在缙云山针阔混交林中选取杉木单株植物根际土体为研究对象,进行染色示踪试验及根系生物量测量,取样后在室内采用自制定水头装置进行水分穿透试验和渗透试验。结果表明:(1)不同土壤剖面 and 不同土层深度的土壤染色面积不同,距离树木主干位置越远的剖面染色面积越大,而距离主干位置越近的剖面染色面积越小,且随着土层深度的增加整体上每个剖面上染色面积比均下降;(2)4 个剖面整体表现出随土层深度的增加根系数量减少的趋势,根系直径主要集中在 0.2~10 mm,且 0.2~1 mm 径级的根系较多;(3)染色区较未染色区具有更大的稳定出流速率,4 个剖面染色区的出流速率分别为未染色区的 1.97,1.81,1.77,1.70 倍,且随着土层深度的增加大孔隙数量减少,大孔隙的半径分布范围在 0.3~1.7 mm;(4)大孔隙度和根系生物量与渗透系数呈正相关关系,大孔隙度决定了渗透系数 94.5% 的变异,根系生物量决定了渗透系数 87.4% 的变异。

**关键词:** 土壤大孔隙; 水分穿透曲线; 根系生物量; 渗透特性

**中图分类号:** S152.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2021)05-0094-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.014

## Effect of Root System on Macropores Distribution and Saturated Permeability of Surface Soil

QI Zihan<sup>1</sup>, WANG Yunqi<sup>1,2</sup>, WANG Yujie<sup>1,2</sup>, LI Tong<sup>1,2</sup>, WANG Yujing<sup>1,2</sup>, HE Xiangchang<sup>1,2</sup>

(1. Three-gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and

Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Jinyun Forest Ecosystem

Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** Root system plays an important role in the formation and permeability of soil macropores. Aiming to clarify the numerical relationship between root biomass distribution and soil macropores characteristics, a naturally grown Chinese fir in JinYun mountain was selected as research object. The macropore area and root distribution characteristics on 4 dye tracing treated soil profiles in field were observed, and then a series of water penetration tests were conducted using self-designed constant head device for soil sampling in dyed and undyed zone in Lab. Results showed that: (1) The dyed area of soil was different for different soil profiles and different soil depths. The farther away from the trunk of the tree, the larger the dyed area, while the closer to the trunk, the smaller the dyed area, and the overall depth increased. The dyed area ratio of each section above all decreased. (2) The four soil profiles mainly showed a trend of decreasing root coefficient with the increasing soil depths. The root diameter mainly concentrated between 0.2~10 and 0.2~1 mm diameter. (3) The dyed area had a greater stable outflow rate than the undyed area. The outflow rate of the dyed area in the four sections was 1.97, 1.81, 1.77 and 1.70 times those of the undyed area, respectively. As the depth of the soil layer increased, the number of macropores decreased, and the radius of the macropores ranged from 0.3 to 1.7 mm; (4) The macroporosity and root biomass were positively correlated with the permeability coefficient, and the macroporosity contributed 94.5% of variation in the permeability coefficients, while root biomass contributed 87.4%.

**收稿日期:** 2021-04-14

**资助项目:** 国家自然科学基金项目(31971726)

**第一作者:** 祁子寒(1996—),男,硕士,主要从事水土保持工程研究。E-mail: qizihanyx@163.com

**通信作者:** 王云琦(1979—),女,教授,博士生导师,主要从事水土保持工程研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

**Keywords:** soil macropore; water breakthrough curve; root biomass; permeability characteristics

土壤大孔隙是土壤中水分和化学物质快速运移的通道,它的存在对土壤优先流和溶质优先迁移的产生有着重要影响<sup>[1-3]</sup>。土壤大孔隙的存在导致土壤水分的入渗速率增强<sup>[4]</sup>,对防治水土流失具有重要作用,因此了解土壤大孔隙的数量及分布特征对浅表层土体生态安全具有重要意义。植被根系、土壤动物活动等是导致土壤大孔隙产生的主要因素<sup>[5]</sup>,植物根系对浅表层土体的土壤大孔隙特性具有改良和水土保持作用<sup>[6]</sup>,地下生物活动对土壤孔隙产生影响,尤其是根系的存在可能会导致土壤渗透性的改变<sup>[7-9]</sup>,这一现象对土力学分析及坡面水文分析至关重要。

根系的存在对土壤大孔隙和土壤渗透性有着重要意义,Murielle 等<sup>[10]</sup>总结了下坡的植物根系可以对表层土体的水分分布以及孔隙水压力的集中和消散产生影响,能够更有效地输送多余水分,根分枝可以集中或消散水流。在根系和土壤大孔隙的研究方面,主要以染色示踪试验和水分穿透试验为主<sup>[11]</sup>,徐宗恒等<sup>[12]</sup>通过野外染色示踪试验得出斜坡土体中优先流特征与植被根系分布有密切关系的结论,张英虎等<sup>[13]</sup>利用野外染色示踪与室内分析相结合的方法,定量分析根长密度和根系生物量在优先流区和基质流区的变化发现,土壤染色面积百分比和根系含量存在一定的联系,随着根系含量的增加,染色面积百分比总体表现为增加的趋势;在土壤大孔隙和饱和渗透性方面,陈风琴等<sup>[14]</sup>研究发现,土壤饱和入渗性能在很大程度上依赖于能导水的大孔隙的大小和数量,黄娟等<sup>[15]</sup>通过分析不同土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响发现,土壤大孔隙平均体积与稳定出流速率、土壤大孔隙平均半径与饱和导水率均呈极显著相关关系,分别决定了稳定出流速率 79.92% 和饱和导水率 36.45% 的变异,罗建杰等<sup>[16]</sup>通过野外试验和数值模拟研究大孔隙的存在对降雨入渗斜坡土体的影响。

当前研究中涉及根系和大孔隙、大孔隙和土壤渗透特性的研究较多,普遍结论认为,根系具有促进渗透的作用,但对其机理的解释存在模糊性,可参考的数据支撑较少。因此,本研究在保证土样结构完整、根系数量及分布已知的前提下,在常规水分穿透试验的基础上进一步测定了饱和导水率,以缙云山林地 1 株标准木为对象,拟通过自然剖面上根系与大孔隙空间特点及对应土样的饱和导水率的观测结果来厘清根系数量、根系直径对土体导水率的影响机制,旨在探讨浅表层土体中根系生物量与土壤大孔隙特征之间的数值关系,并分析根系数量与饱和渗透性的相关关系,为今后含根系土体土水特征及其他水力特性的

研究提供理论依据。

## 1 研究区概况

试验于 2020 年 9 月 7 日至 9 月 15 日在重庆市北碚区缙云山自然保护区(29°41'N,106°17'E)进行,土地总面积为 7 600 hm<sup>2</sup>,海拔 200.0~952.2 m。岩层为三迭纪须家河组厚层砂岩,土壤类型主要为黄壤及水稻土,土壤干密度为 1.71 g/cm<sup>3</sup>,含水率为 21%,黏聚力为 9 kPa。缙云山具有亚热带季风湿润性气候特征,年平均气温 13.6 ℃,年平均相对湿度 87%,年平均降水量 1 611.8 mm,地带性植被类型为常绿阔叶林。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选择与染色示踪试验

综合考虑缙云山自然保护区的地形、地貌和植被类型及与周围植被的距离关系和场地的平整度等因子。本试验选择杉木的下坡向区域作为试验样地,试验开始前,去除样地表层的枯枝落叶层,平整表面。顺着坡向沿 110 cm×110 cm 的正方形区域 4 边开挖 30 cm 的深槽,将 1 个长宽均为 110 cm,高 50 cm,厚 5 mm 的铁框垂直埋入土中 30 cm,并将距铁框壁内 5 cm 的土壤捣实,防止染料沿铁框内壁缝隙下渗。用 4 g/L 的亮蓝溶液 40 L 均匀喷洒于铁框内 100 cm×100 cm 的土壤表面,溶液喷洒完毕后,用塑料膜覆盖于铁框上以减少蒸发和夜间自然降雨的影响。待渗透 24 h 后,开始沿距林木 210 cm 的一侧挖掘土体观测剖面,水平方向上,共挖掘 4 个土壤剖面(图 1),剖面间距 25 cm;竖直方向上,以每 10 cm 为 1 层挖掘土壤剖面,0—10 cm 为第 1 层,10—20 cm 为第 2 层,20—30 cm 为第 3 层。定义剖面中染色的区域为染色区,未染色或染色极少的区域为未染色区。

### 2.2 剖面根系调查与土样采集

在水平方向开挖剖面时,调查 4 个剖面的根系数量及根系直径,采用 30 cm×50 cm 的网格尺垂直放在每个土壤剖面上对该剖面的根系数量进行测量<sup>[17]</sup>,同时采用精度为 0.01 mm 的电子游标卡尺测量根系直径,并用 500 万像素相机拍摄。在挖掘每层土壤的垂直剖面 and 水平剖面时,采用 100 cm<sup>3</sup>(Φ50.46 mm×50.00 mm)的取土环刀采集土样,不同水平距离剖面的每个土层各采集染色区和未染色区的土样各 1 个,共采集 24 个土样。

### 2.3 水分穿透曲线的测定

将采集的土样放入清水中浸泡 12 h 使之饱和,然后再放置 12 h,使其达到田间持水量。采用定水头装置进行水分穿透试验,控制水头高度为 4 cm 左右,将烧杯放置在精度为 0.01 g 的电子天平上收集

出流量,试验前放置好烧杯,用 232 转接口将天平连接电脑,使用 XCOM V2.2 软件间隔 5 s 记录流量值,直至流量达到稳定。

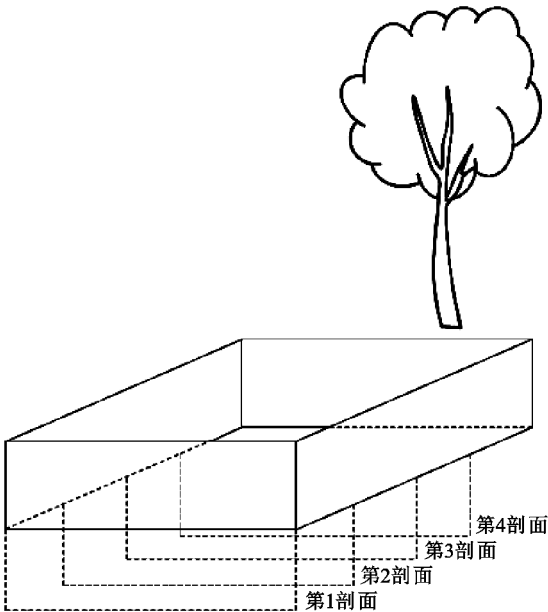


图 1 林木与剖面位置示意

本文采用田间持水量到饱和含水量之间的土壤孔隙作为大孔隙的标准,当土壤达到田间持水量之后,其基质势接近于 0,此时供水强度控制着水分的入渗速率,试验中水分运动较慢,处于层流的范围,在假设土壤孔隙是圆形的条件下,可根据水分穿透曲线理论<sup>[18]</sup>,利用 Poiseuille 方程建立流量和孔径之间的关系为:

$$Q=\pi r^4\Delta P/(8\eta\tau L)\tag{1}$$

对于稳态水流有:

$$Q=\pi r^2L/t\tag{2}$$

公式(1)、(2)联合求解可计算得出大孔隙的当量孔径( $r$ )为:

$$r=\tau L(8\eta/(t\Delta P))^{1/2}\tag{3}$$

式中: $Q$  为单位流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ ); $r$  为孔隙半径( $\text{cm}$ ); $\tau$  为水流实际路径的弯曲系数,一般取 1.2; $L$  为土柱长度( $\text{cm}$ ); $\eta$  为水的黏滞系数( $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$ ); $\Delta P$  为压力水头( $\text{cm}$ ); $t$  为从初次加水开始记时的时间( $\text{s}$ )。

根据大孔隙首先排水原理,从初次加水到初始出流时间即可确定大孔隙半径范围最大值,依据水分穿透曲线稳定的时间可确定大孔隙半径范围的最小值,从而得出大孔隙半径范围。

通过对任意 2 个时间段内水分出流的流量进行观测,可利用孔隙半径的计算公式,按照 0.1~0.5 mm 半径间隔划分不同孔径范围分级,形成 1 个孔隙范围,计算值取其平均值。

当间隔排水量为  $Q_e$  时,根据公式:

$$Q_e=nAv=n\pi r^2\tau L/t\tag{4}$$

式中: $A$  为孔隙面积( $\text{cm}^2$ ); $v$  为流速( $\text{cm}/\text{s}$ )。

得出计算相应大孔隙数量( $n$ )的公式为:

$$n=Q_e t/(\pi r^2\tau L)\tag{5}$$

2.4 定水头条件下土壤渗透系数的测定

根据达西定律:

$$K_s=\frac{L}{L+H}\times q\tag{6}$$

式中: $L$  为土层深度( $\text{cm}$ ); $H$  为压力水头( $\text{cm}$ ); $q$  为水流通量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )。

2.5 数据处理

采用 Photoshop CS6 软件对拍摄的照片进行镜头校正、裁剪,通过调整灰度、对比度,将染色区调整为黑色,未染色区调整为白色,调整阈值后得到垂直剖面的染色图像,并应用 Image pro Plus 软件计算出染色区和未染色区的面积比<sup>[19]</sup>;采用 SPSS 25 软件对染色面积比与根系生物量、渗透系数与大孔隙度的关系进行方差分析。

3 结果与分析

3.1 不同土壤剖面染色面积变化规律

处理后的染色图像面积有从第 1 剖面向第 4 剖面递减的趋势(图 2),第 1 剖面染色土体面积约占土体剖面总面积的 48%,第 2 剖面染色土体面积约占土体剖面总面积的 27%,第 3 剖面染色土体面积约占土体剖面总面积的 26%,第 4 剖面染色土体面积约占土体剖面总面积的 20%。说明距离树木主干位置越远的剖面染色面积越大,而距离主干位置越近的剖面染色面积越小。

由图 3 可知,染色面积在 0—10 cm 土层深度范围内较高,染色面积比达到 0.23 以上,随着土层深度的增加,整体上每个剖面上染色面积比均下降,且下降的程度相对较均匀,由于存在水分的侧向入渗,染色面积比并不是随着土层深度的增加单调递减的,局部位染色面积比会突然增大。在 10—30 cm 土层染色面积比随土层深度的增加呈现下降的趋势,且从第 1 剖面到第 4 剖面下降趋势逐渐增大。

3.2 不同土壤剖面根系分布特征

由图 4 可知,4 个剖面整体表现出随土层深度的增加,根系数量减少的趋势。调查发现,4 个剖面上根系的直径主要集中在 0.2~10 mm,其中,0.2~0.5,0.5~0.8,0.8~1 mm 径级的根系分别集中在 0—10 cm 的土层深度,3 个土层的根系数量均值为 52。通过方差分析得出同一剖面不同土层深度的根系数量存在显著差异( $P<0.05$ ),而不同剖面同一土层深度的根系数量差异不显著( $P>0.05$ )。

3.3 土壤水分穿透曲线

随着水分穿透试验的进行,出流速率呈现出快速增大、发生较大波动并逐渐达到稳定的现象。由图 5 可

知,不同剖面的土壤水分穿透曲线表现出各自的特征,其中 0—10 cm 土层深度的水分穿透速率最大,4 个剖面染色区的出流速率分别为未染色区的 1.97,1.81,1.77,1.70 倍,并从第 1 剖面到第 4 剖面提高程度有减小的趋

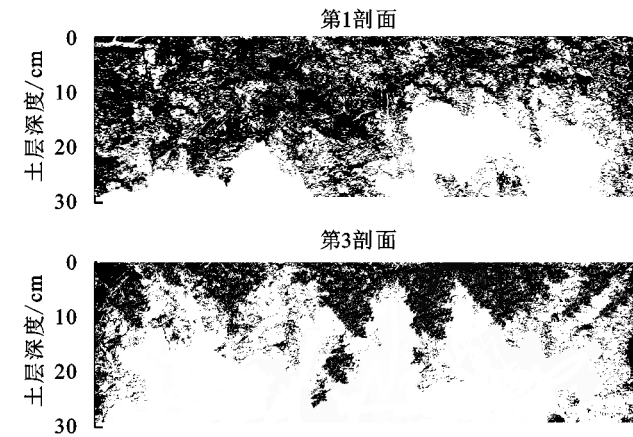


图 2 不同土壤剖面染色图像

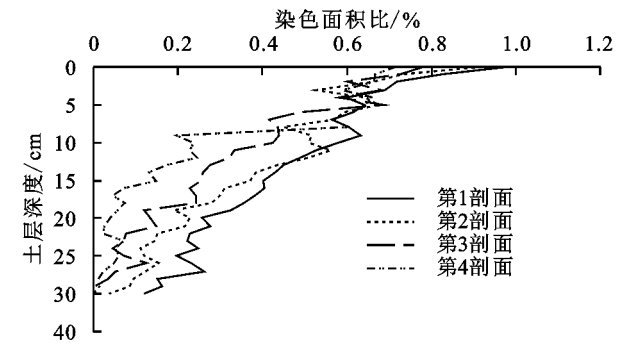


图 3 土壤剖面染色面积比变化

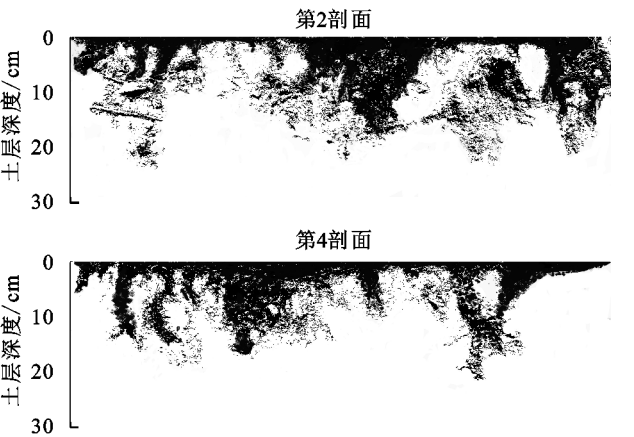
由表 1 可知,4 个剖面大孔隙半径分布范围为 0.3~1.7 mm,主要集中在 0.3~1.2 mm,其孔隙半径均值为 0.72 mm,且孔隙半径>1.4 mm 的仅占极少部分,而<1.2 mm 的小孔隙数量较多。第 1 剖面的大孔隙数量最多,同一半径范围的大孔隙数量从第 1 剖面到第 4 剖面有减少的趋势,同一土壤剖面不同土层深度的大孔隙数量不同,随着土层深度的增加,土壤大孔隙数量表现出下降的趋势。在同一土壤剖面的同一土层、同一半径范围,染色区的大孔隙数量为未染色区的 1.77 倍以上,这种现象说明,土壤剖面中的染色区域可能存在更多的植物根系。

方差分析(表 1)表明,第 1 剖面与第 4 剖面之间的大孔隙度差异显著( $P<0.05$ ),其余剖面之间差异不显著;0—10 cm 土层与 20—30 cm 土层之间的大孔隙度差异显著( $P<0.05$ ),染色区与未染色区之间的大孔隙度差异显著( $P<0.05$ )。渗透系数  $k$  的范围在 0.000 020 1~0.000 145 0,且染色区的渗透系数比未染色区增加了 1.34 倍以上。

3.4 根系、土壤大孔隙和饱和渗透系数之间的关系

将 4 个剖面的根系生物量进行整合分析染色面积比与根系生物量的线性相关关系(图 6),根系生物

量,且 4 个剖面染色区和未染色区的稳定出流速率均随着土层深度的增加而减小,说明距离树木较远的土壤剖面比距离树木较近的土壤剖面具有更多的大孔隙数量,随着土层深度的增加大孔隙数量减少。



量较多的区域,其土壤大孔隙数量越多,根据大孔隙优先排水原理,通过的染色溶液越多,土体的染色面积越大,两者之间呈正相关关系。

渗透系数  $k$  是描述土体渗透性强弱的定量指标,土壤大孔隙的孔径和数量是影响土壤入渗性能的重要因素。根据达西定律计算样品的渗透系数,为了分析土壤大孔隙度与渗透系数、根系生物量与渗透系数之间的关系,建立散点图,拟合图的趋势线, $R^2$  表示拟合程度,可以反映大孔隙和根系对渗透系数的影响程度。由图 7 可知,随着大孔隙度的提高,土壤渗透系数有变大的趋势,二者呈极显著的相关关系,决定了渗透系数 94.5% 的变异;由图 8 可知,根系生物量与渗透系数呈显著相关关系,决定了渗透系数 87.4% 的变异。

4 讨论

本研究主要为浅表层土中根系生物量与土壤大孔隙的数值关系及根系对饱和渗透性的影响,区别于前人分别研究根系与土壤大孔隙、大孔隙与饱和渗透性的关系,本研究在保证土样结构完整、根系数量及分布一致的前提下,在常规水分穿透试验的基础上进一步测定了饱和导水率,并分析了三者在数值上的空间差异和彼此相关性。本研究结果中,代表距离主干不同距离的 4 个剖面的染色面积比总体上随土层深度的增加呈下降趋势,在 12 cm 深度下降为 30%~50%,这与徐宗恒等<sup>[12]</sup>的结论相似,但结果相比较小(30%~50%),一方面这与研究区土质的差异有关,缙云山为浅表层黄壤,下伏砂质泥岩层,且稍有植物根系贯穿;另一方面,本研究以单株植物的剖面为对象,所挖掘剖面为根系集中分布的株下土壤,且几乎没有动物活动通道,大孔隙影响因素较少。

从不同主干距离以及垂直深度 2 个空间维度上

来看的 4 个剖面上,根系含量、染色面积,计算所得的当量孔径、渗透特性均表现出一定的空间一致性,即

根系分布较多的局部土壤基质中含有相对较多的大孔隙,土壤优先流区的根系生物量大于基质流区<sup>[13]</sup>。

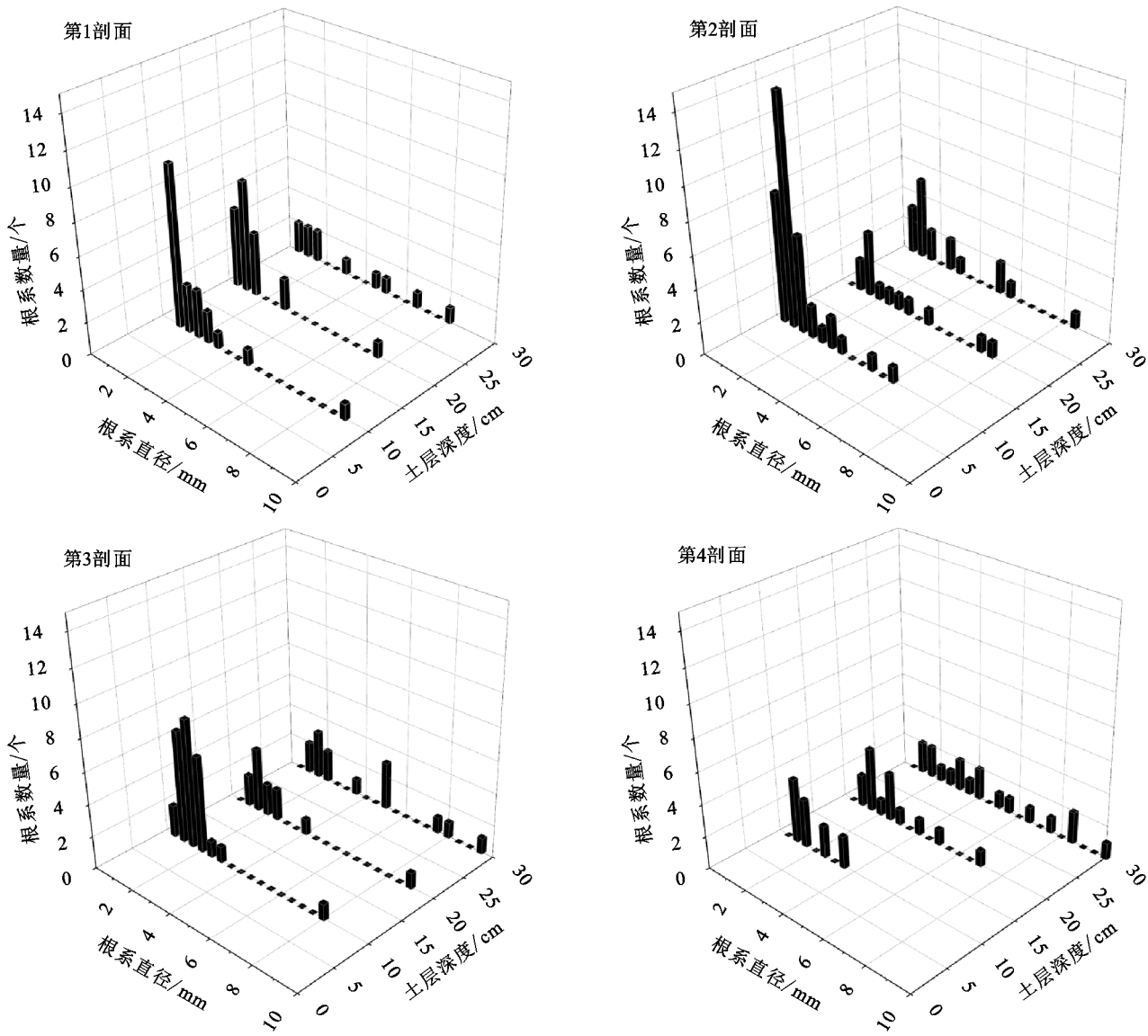


图 4 不同剖面 0—30 cm 土层深度的根系数量和直径

根据非饱和渗流理论,土的吸湿过程为基质吸力逐渐降低,非饱和渗透速率逐渐加快的过程,其相关性通常采用非线性模型如  $V-G$  来描述<sup>[20]</sup>,根据毛细理论<sup>[21]</sup>,较大孔隙的土壤基质往往具有更小的进气压力值(毛细理论公式为: $u_a-u_w=2T_s\cos\alpha/r$ )。在水分垂直渗透过程中,水流量与孔径的 4 次方成正比(公式(1))。可见,由于植物根系而造成的额外大孔隙是造成染色区域水分穿透速率和饱和渗透率较大的原因。根系集中分布区域较大的染色面积和相关性分析结果,分别从直观图像和数值分析的角度呈现了 Murielle 等<sup>[10]</sup> 总结的根系促进了土壤局部区域水分渗透的客观事实,比较分析数据证明,根系导致的大孔隙增量占到相应染色区饱和渗透系数差异 87.4%。

本研究发现,不同的根系径级对土壤大孔隙的影

响不同,细根系(根系直径  $d<1\text{ mm}$ )比粗根系(根系直径  $d>1\text{ mm}$ )对土壤大孔隙的产生具有更高的贡献度,这与张英虎等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。水分穿透试验表明,根系的存在使染色区的大孔隙数量比未染色区增加了 1.77 倍以上,染色区的渗透系数比未染色区增加了 1.34 倍以上,这一结论可以在孙龙等<sup>[11]</sup>、吕国顺<sup>[22]</sup>的研究中得到佐证。对于单株植物而言,浅层土的细根对土壤大孔隙影响较大,尤其是其外环土壤。

本研究的不足之处在于:试验采用剖面法进行,虽然尽可能保证了土样结构完整、根系数量及分布一致,但只能观测根系数量和直径对土壤大孔隙和土壤渗透性的影响,不能观测根系构型对其影响<sup>[23]</sup>;试验采用横向取样,忽略了土壤渗透水平和铅直方向的影响<sup>[24]</sup>。鉴于此,未来可在三维角度分析根系、土壤大

孔隙和土壤渗透性之间的关系,进行含根系土体土水

特征及其他水力特性的研究。

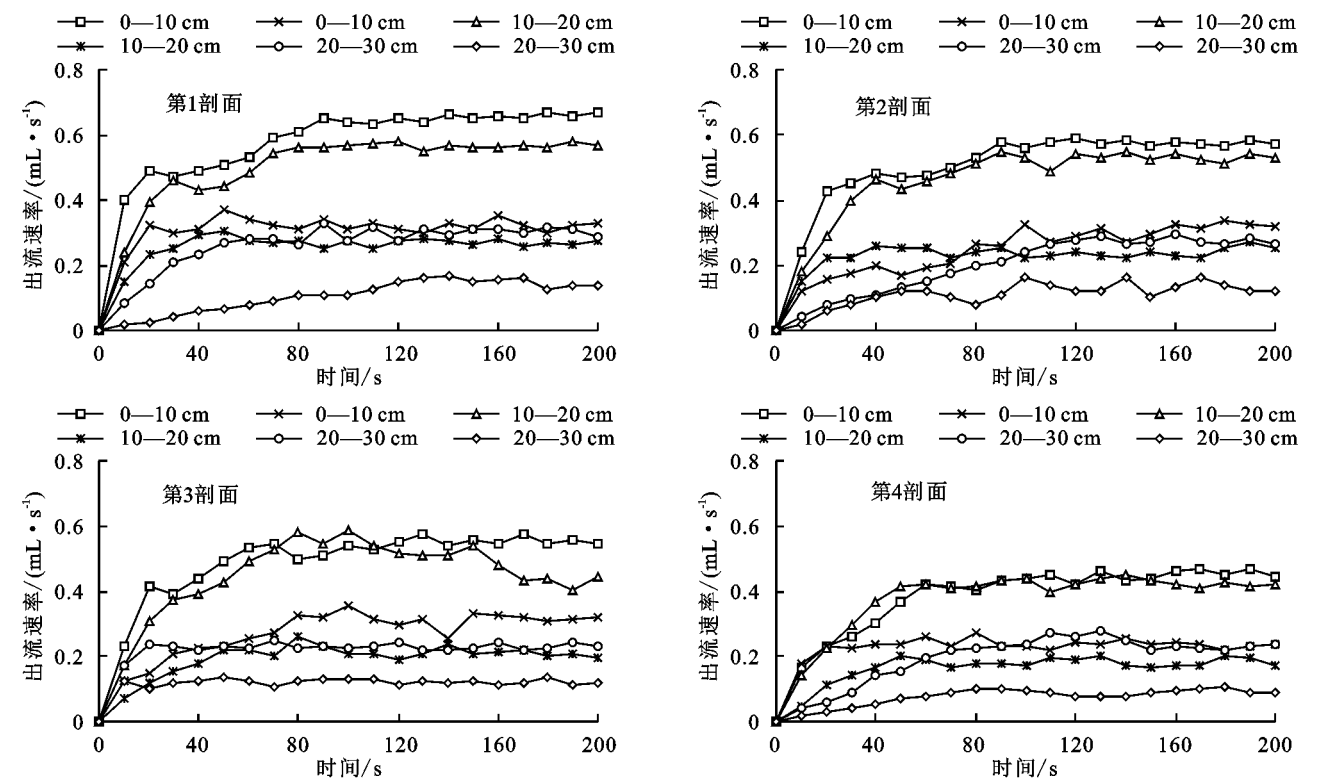


图 5 不同剖面土壤水分穿透曲线

表 1 不同剖面染色区和未染色区土壤大孔隙数量

| 样地     | 土层<br>深度/cm | 区域 | 不同半径范围的大孔隙数量/(10 <sup>3</sup> 个·m <sup>-2</sup> ) |            |            |            |            | 大孔隙度/% | 渗透系数/<br>(10 <sup>-5</sup> mm·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------------|----|---------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|--------|-------------------------------------------------|
|        |             |    | 1.4~1.7 mm                                        | 1.2~1.4 mm | 1.0~1.2 mm | 0.7~1.0 mm | 0.3~0.7 mm |        |                                                 |
| 第 1 剖面 | 0—10        | DA | 2                                                 | 3          | 4.95       | 10.50      | 36.40      | 6.80   | 14.50                                           |
|        |             | BA | 1                                                 | 1          | 2.54       | 5.44       | 18.70      | 3.50   | 7.40                                            |
|        | 10—20       | DA | 2                                                 | 3          | 5.28       | 11.20      | 38.90      | 7.26   | 0.90                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 1          | 1.60       | 3.41       | 11.70      | 2.20   | 4.71                                            |
|        | 20—30       | DA | 1                                                 | 1          | 2.16       | 4.61       | 15.90      | 2.97   | 6.37                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 1          | 1.63       | 3.48       | 12.00      | 2.24   | 3.36                                            |
| 第 2 剖面 | 0—10        | DA | 1                                                 | 2          | 4.89       | 1.04       | 36.00      | 6.72   | 12.50                                           |
|        |             | BA | 0                                                 | 1          | 1.76       | 3.76       | 12.90      | 2.42   | 6.05                                            |
|        | 10—20       | DA | 1                                                 | 2          | 4.11       | 8.78       | 30.30      | 5.65   | 6.42                                            |
|        |             | BA | 1                                                 | 1          | 2.43       | 5.20       | 17.90      | 3.34   | 6.28                                            |
|        | 20—30       | DA | 0                                                 | 1          | 1.14       | 2.44       | 8.42       | 1.57   | 9.71                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 0          | 0.78       | 1.67       | 5.76       | 1.07   | 2.69                                            |
| 第 3 剖面 | 0—10        | DA | 1                                                 | 2          | 4.26       | 9.11       | 31.40      | 5.86   | 12.60                                           |
|        |             | BA | 0                                                 | 1          | 1.69       | 3.62       | 12.50      | 2.33   | 5.83                                            |
|        | 10—20       | DA | 1                                                 | 1          | 2.80       | 5.99       | 20.60      | 3.85   | 7.24                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 0          | 1.07       | 2.30       | 7.93       | 1.48   | 4.04                                            |
|        | 20—30       | DA | 0                                                 | 1          | 1.56       | 3.34       | 11.50      | 2.15   | 6.18                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 0          | 0.76       | 1.62       | 5.60       | 1.04   | 3.14                                            |
| 第 4 剖面 | 0—10        | DA | 1                                                 | 3          | 4.40       | 9.48       | 32.40      | 6.05   | 5.58                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 0          | 1.75       | 3.74       | 12.90      | 2.40   | 4.16                                            |
|        | 10—20       | DA | 1                                                 | 1          | 4.20       | 8.99       | 31.00      | 5.78   | 7.40                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 1          | 1.17       | 2.51       | 8.65       | 1.61   | 4.04                                            |
|        | 20—30       | DA | 0                                                 | 2          | 1.73       | 3.71       | 12.80      | 2.39   | 8.48                                            |
|        |             | BA | 0                                                 | 1          | 0.68       | 1.46       | 5.03       | 0.94   | 2.02                                            |

注:DA 为染色区;BA 为未染色区。

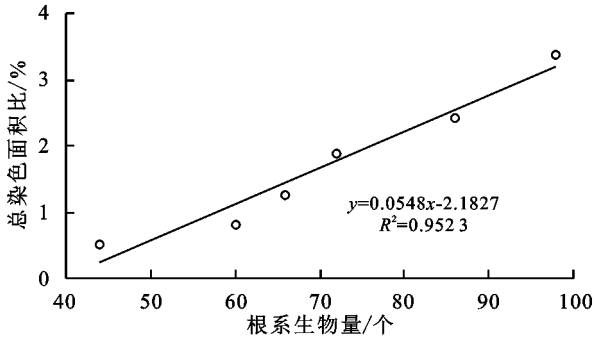


图 6 染色面积比与根系生物量的关系

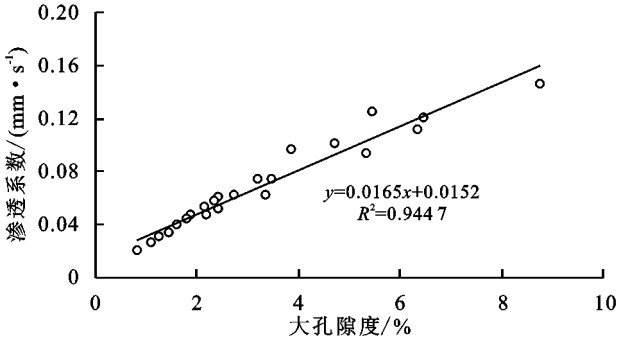


图 7 渗透系数与大孔隙度的关系

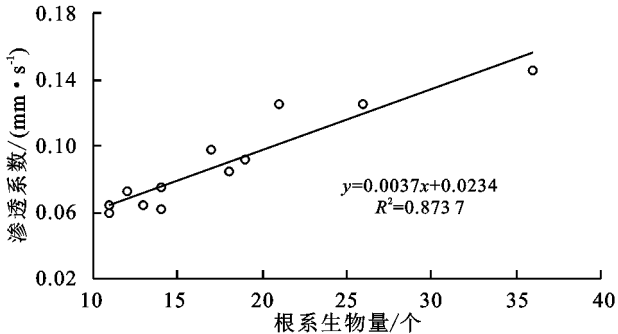


图 8 渗透系数与大孔隙度和根系生物量的关系

5 结论

(1)不同土层深度的染色面积和根系数量表现出明显差异,随着土层深度的增加,染色面积和根系数量均呈减少的趋势。

(2)染色区较未染色区具有更大的稳定出流速率,大孔隙使染色区的水分穿透速率较未染色区提高了 1.77 倍以上,大孔隙的半径分布范围为 0.3~1.7 mm,随着土层深度的增加大孔隙数量减少。

(3)根系、土壤大孔隙和饱和渗透系数的关系具有一致性,大孔隙度决定了渗透系数 94.5% 的变异,根系生物量决定了渗透系数 87.4% 的变异,对于单株植物而言,细根系(根系直径  $d < 1 \text{ mm}$ )较粗根系(根系直径  $d > 1 \text{ mm}$ )对土壤大孔隙影响更大,其中 0.2~1 mm 径级的根系对其影响最大。

参考文献:

[1] 吕刚,傅昕阳,李叶鑫,等.露天煤矿排土场不同复垦植被土壤大孔隙特征[J].煤炭学报,2018,43(2):529-539.

[2] 魏虎伟,程金花,张洪江,等.四面山 2 种林地大孔隙特

征与优先流关系研究[J].水土保持学报,2014,28(4):263-268.

[3] Zhang Z B, Peng X, Zhou H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J].Soil and Tillage Research,2015,146:53-65.

[4] 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[J].生态学报,2005,25(3):507-512.

[5] Lamande M, Labouriau R, Holmstrup M, et al. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands[J].Geoderma,2011,162(3):319-326.

[6] Zhang J M, Xu Z M. Dye tracer infiltration technique to investigate macropore flow paths in Maka Mountain, Yunnan province, China[J].Journal of Central South University,2016,23(8):2101-2109.

[7] JØRgensen P R, Hoffmann M, Kistrup J P, et al. Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: Field, laboratory, and modeling analysis[J].Water Resources Research,2002,38(11):e1246.

[8] 李建兴,何丙辉,湛芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.

[9] 张家明,徐则民,马卡山.不同植被群落下非饱和带大孔隙流路径示踪试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(6):1922-1935.

[10] Murielle G, Sidle R C, Alexia S. The influence of plant root systems on subsurface flow; Implications for slope stability[J].Bioscience,2011,2011,61(11):869-879.

[11] 孙龙,张洪江,程金花,等.重庆江津区柑橘地土壤大孔隙特征[J].水土保持学报,2012,26(3):194-198.

[12] 徐宗恒,徐则民,官琦,等.不同植被发育斜坡土体优先流特征[J].山地学报,2012,30(5):521-527.

[13] 张英虎,牛健植,朱蔚利,等.森林生态系统林木根系对优先流的影响[J].生态学报,2015,35(6):1788-1797.

[14] 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[J].西南师范大学学报(自然科学版),2005,30(2):350-353.

[15] 黄娟,邓羽松,马占龙,等.桂东南花岗岩丘陵区不同土地利用方式土壤大孔隙特征[J].水土保持学报,2021,35(2):80-86.

[16] 罗建杰.植被发育斜坡降雨入渗的数值模拟[D].昆明:昆明理工大学,2014.

[17] 及金楠.林分根系空间分布与水平阶整地对土质坡面稳定性的影响[D].北京:北京林业大学,2011.

[18] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves[J]. Soil Science Society of America Journal,1989,53(2):556-559.

件下刺槐群落的土壤质量评价[J].干旱区研究,2016,33(3):476-485.

[4] 金晶炜,苏纪帅,白于,等.宁南山区土壤质量对人工植被恢复模式的响应[J].农业工程学报,2014,30(16):283-289.

[5] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.露天煤矿排土场复垦区不同植被类型土壤质量评价[J].生态环境学报,2019,28(4):850-856.

[6] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型土壤渗透性[J].东北林业大学学报,2013,41(3):57-62.

[7] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.

[8] 彭舜磊,梁亚红,陈昌东,等.伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测[J].水土保持研究,2013,20(4):29-33.

[9] 曾江敏,何丙辉,李天阳,等.喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤入渗特征[J].水土保持学报,2019,33(4):58-64.

[10] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(5):1610-1620.

[11] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, China[J].Journal of Soils and Sediments,2019,19(3):1456-1466.

[12] 陈家林,郭二辉,杨果果,等.太行山低山丘陵区不同水土保持林地土壤渗透性能及其影响因素研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(10):34-40.

[13] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(3):597-604.

[14] 崔艳红,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析[J].北京林业大学学报,2021,43(1):77-87.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[16] 王珊珊,毕华兴,刘俊,等.晋西黄土区不同密度刺槐林土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2020,34(5):231-237,243.

[17] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J].生态学报,2017,37(2):416-424.

[18] 葛楠楠,石芸,杨宪龙,等.黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J].应用生态学报,2017,28(5):1626-1632.

[19] Shao Q, Baumgartl T. Field evaluation of three modified infiltration models for the simulation of rainfall sequences[J].Soil Science,2016,181(2):45-56.

[20] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].生态学报,2019,39(24):9111-9118.

[21] 公博,师忱,何会宾,等.冀北山区 6 种人工林的林地水源涵养能力[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):165-170.

[22] Li X Y, Contreras S, Solé-Benet A, et al. Controls of infiltration-runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain[J].Catena,2011,86:98-109.

[23] 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.

[24] 王晓荣,胡文杰,庞宏东,等.湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J].中南林业科技大学学报,2020,40(11):156-166.

[25] 姚小萌,牛桢枫,党珍珍,等.黄土高原自然植被恢复对土壤质量的影响[J].地球环境学报,2015,6(4):238-247.

(上接第 100 页)

[19] 张家明,徐则民,李峰,等.植被发育斜坡土体大孔隙结构多尺度特征[J].山地学报,2019,37(5):717-727.

[20] van Genuchten M T A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J].Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.

[21] Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc,2004.

[22] 吕国顺.非饱和黄土渗透特性试验研究[D].兰州:兰州大学,2020.

[23] 王鑫皓,王云琦,马超,等.根系构型对土壤渗透性能的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):73-82.

[24] 梅雪梅.晋西黄土区坡地土壤水分时空分布及影响机制研究[D].北京:北京林业大学,2019.