

DOI: 10.5846/stxb201902200304

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

Li P, Wang D M, Ding C, Liu R S, Zhang P, Zhang L L. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine region. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1610-1620.

黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素

李 平¹, 王冬梅^{1,*}, 丁 聪¹, 刘若莎¹, 张 鹏¹, 张琳琳²

¹ 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

² 沃德兰特(北京)生态环境技术研究院有限公司, 北京 100101

摘要: 为了研究黄土高寒区典型植被在不同坡位下土壤入渗性能差异及其影响因素, 采用恒定水头法测定了不同植被类型的土壤入渗过程, 并分析了土壤孔隙状况、机械组成、水稳性团聚体等与渗透速率的相关性。结果表明: (1) 初渗速率和稳渗速率均表现为青海云杉>祁连圆柏>华北落叶松>荒草地, 且差异性显著; 同一植被类型的土壤入渗速率沿坡面向下逐渐增大, 但差异性不显著; (2) 对不同植被类型的土壤入渗过程模拟发现 Horton 模型拟合效果最好, 决定系数均在 0.8 以上, 通用经验模型拟合精度较差, 决定系数在 0.614—0.982 之间; (3) 土壤入渗性能与孔隙状况、水稳性团聚体质量分数、有机质含量均有极显著相关性; >0.25 mm 团聚体质量分数是影响稳渗速率的主要决策因素; 总孔隙度是影响初渗速率的最主要的决策因素, 而毛管孔隙度是主要的限制因子。为高寒地区土壤入渗模拟以及植被配置等提供了科学依据。

关键词: 土壤入渗; 坡位; 植被类型; 入渗模型; 通径分析; 黄土高寒区

Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine region

LI Ping¹, WANG Dongmei^{1,*}, DING Cong¹, LIU Ruosha¹, ZHANG Peng¹, ZHANG Linlin²

¹ School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Water&Land ECO-environment Technology Institute of Beijing Co. Ltd, Beijing 100101, China

Abstract: In order to study the difference of soil infiltration performance and its influencing factors in different slopes of typical vegetation in Loess Alpine region, the infiltration process of different vegetation types was measured by constant head method. Soil porosity, soil particle-size distribution, organic matter and water-stable aggregates were also analyzed. The results showed that: (1) there were significant differences in infiltration rates among different vegetation types. The initial and stable infiltration rates changed in the order of *Picea crassifolia* > *Sabina przewalskii* > *Larix principis-rupprechtii* > barren grassland. The soil infiltration rate increased with the increase of soil porosity, aggregate content and the decrease of bulk density along the slope. (2) The fitting effect of Horton was the best on different slope positions and vegetation types, and the general accuracy for the lower slope is better than that for the upper slope, while the general empirical model and Kostiakov model are poor in fitting effect. (3) Soil infiltration capability was significantly correlated with soil porosity, organic matter and water-stable aggregates, among which the main factors affecting the stable infiltration rate were bulk density, > 0.25 mm aggregate, and total porosity. The main factors affecting the initial permeability rate were > 0.25 mm aggregate, total porosity and capillary porosity. Path analysis shows that total porosity is the main decision variable affecting the initial infiltration rate, while capillary porosity is a limiting factor; >0.25 mm water-stable aggregate mass fraction is the main decision factor affecting the steady infiltration rate. This paper provides a scientific basis for soil infiltration simulation

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2017YFC0504604-04)

收稿日期: 2019-02-20; 网络出版日期: 2019-12-17

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

and vegetation allocation in Loess Alpine region.

Key Words: soil infiltration; slope position; vegetation type; infiltration model; path analysis; Loess Alpine region

入渗性能是土壤的主要物理性质,对土壤调节径流、涵养水源能力有重要作用,也是评价土壤侵蚀的重要指标,研究土壤入渗能力对防治水土流失、改造及恢复植被有重要意义^[1]。研究发现土壤容重、孔隙状况、颗粒组成、水稳性团聚体及有机质含量等都与土壤入渗能力密切相关^[2-6]。土壤理化性质是导致不同研究区域土壤渗透性能存在差异的主要因素之一,但不同研究区主导因子不同,如在青藏高原地区^[5]容重、有机质、 $< 0.1\text{ mm}$ 的微粒是影响土壤入渗的主要因素,而在岩溶坡地^[2]则为毛管孔隙度和黏粒含量。同样,不同土地利用类型的土壤入渗性能差异也与其土壤理化性质的差异具有很大相关性。一般来说林地丰富的根系活动导致其孔隙状况优于草地、容重显著低于草地从而具有良好的土壤渗透性^[2,7-8],但风沙地^[3]由于土质疏松、结构松散,荒草地入渗速率较大,林地对土壤的改良作用强于草地,使得土壤质地变好、非毛管孔隙度减少、蓄水能力增强,入渗速率较草地小,丁康等^[9]发现长武塬边坡地的侧柏林地由于土壤黏粒含量低不利于形成团聚体且土壤密度较草地大,入渗性能较差;灌木林地地表植被较林地丰富,土质疏松,入渗性能优于林地^[10];与阔叶林相比,针叶林有机质含量高、孔隙较多,入渗能力较强^[11];梯田旱地土壤黏粒含量较高,有机质和孔隙度较低,入渗能力较灌木林地差^[12]。此外学者对退耕年限^[13-14]及演替进程^[15]影响下土壤渗透性能的研究发现:随种植年限的增加土壤理化性质得到改善,入渗性能逐渐提高;随演替进展土壤饱和导水率显著提高,植被演替到顶级群落土壤饱和导水率最高。可见不同研究区甚至同一研究区不同研究对象的土壤入渗特征及影响因素存在差异,但以上研究主要集中在比较不同植被类型、退耕年限、土壤类型的土壤渗透特征,对同一植被不同坡位下的研究缺乏。不同地形部位土壤微气候的变化会导致土壤条件产生差异,从而影响植被的恢复进程与生长状况^[16]。坡位是重要的地形因子,对林地有机质、氮等养分及水热状况的分布有着重要影响^[17],植被的多样性、生物量等存在差异,从而导致不同坡位土壤容重、机械组成等性质发生变化,进而影响土壤的入渗特性。黄土高寒区位于青藏高原与黄土高原交界地带,生态环境脆弱,是植被重建与生态退耕的重点区域。该地区太阳辐射强烈,不同坡位水热条件差异明显,导致植被生长也存在明显差异,土壤水分是限制该区域植物生长和恢复的主要因子。为减轻水土流失、保护和改善生态环境,该地区 2000 年开始大规模实行退耕还林工程,水土流失得到极大改善,但在实施过程中不考虑土壤水分条件,在坡面由上至下多配置相同植被,可能会导致植被生长不良,无法充分发挥对环境的改善作用。研究典型植被类型在不同坡位下的土壤入渗特征及其主要影响因子可以更好地了解当前植被分布的合理性,为验证典型植被拦蓄降雨、涵养水分能力提供数据支撑,为后续植被恢复与调整做出指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于青海省大通县桥头镇安门滩小流域,地处黄土高原西部向青藏高原的过渡带,海拔高程 2448—2562 m。属高原大陆性气候,降水少蒸发大,多年平均降水量 506.5 mm,且主要集中在 6—9 月份,多年平均蒸发量 1762.8 mm,最大蒸发量出现在 4—6 月,属于典型的黄土高寒区小流域。主要树种为 2000 年退耕后种植的青海云杉(*Picea crassifolia*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、中国沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等,主要草本植物有密生苔草(*Carex crebra*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等。土壤类型为黄土母质上发育的山地棕褐土和栗钙土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与土样采集

研究区位于青海省东部安门滩小流域,2000 年进行退耕还林,行间距为 3 m×2 m。2018 年 7 月至 8 月,

在流域内选取青海云杉林、华北落叶松林、祁连圆柏林 3 种典型植被类型设置样地进行调查,并选择荒草地作为对照(表 1)。按照样地海拔高度进行坡位分类,样地实际海拔与坡顶海拔之比为小于 1/3 的定义为下坡位,1/3—2/3 的为中坡位,大于 2/3 则为上坡位。针对每一种典型植被类型在不同坡位分别布设 2 个 10 m×10 m 的样地进行每木检尺,确保同一坡位各样地保持在同一海拔高度上。

每个样地沿任一对角线的三等分点处挖取 2 个 60 cm 深的土壤剖面,用环刀在垂直方向上每隔 20 cm 分层采集原状土样,每层 3 个重复,共 360 个样品。同时,每个土壤剖面分层用“四分法”取扰动土 500 g 左右装入布袋带回室内自然风干,共 120 袋。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of experimental sample plots

植被类型 Vegetation type	坡度 Slope/(°)	树高 Height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	林龄 Stand age/a	草本盖度 Coverage/%	林下植被 Undergrowth vegetation
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	10—18	4.65	5.52	20	83	早熟禾、鼠掌老鹳草、白莲蒿、披碱草、刺儿菜、飞蓬、风毛菊、黑麦草、飞廉等
祁连圆柏 <i>Sabina przewalskii</i>	15—20	3.48	5.44	20	70	白莲蒿、早熟禾、冷蒿、老鹳草、飞蓬、狗娃花、刺儿菜、风毛菊等
华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	13—19	6.26	9.75	20	40	白莲蒿、飞蓬、刺儿菜、老鹳草、乳白香青、委陵菜等
荒草地 Grassland	20	—	—	—	87	早熟禾、白莲蒿、鼠掌老鹳草、苜蓿、草木樨、刺儿菜、披碱草、乳白香青等

1.2.2 土壤理化性质测定

室内用定水头法测定^[8]土壤渗透速率;环刀法和烘干法测定土壤容重、土壤含水量、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度;利用 Mater Sizer 2000 激光颗粒分析仪测定土壤机械组成,并按国际制分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002—0.02 mm)、砂粒(0.02—2 mm);湿筛法测定>3 mm、3—2 mm、2—1 mm、1—0.5 mm、0.5—0.25 mm、0.25—0.1 mm、<0.1 mm 各粒级的水稳性团聚体含量;重铬酸钾稀释加热法测定有机质含量。

1.3 数据分析

选取 Kostiakov 方程、Horton 方程、通用经验方程 3 种常用的模型,在 SPSS 18.0 中对不同植被类型的土壤入渗过程进行拟合,模型表达及参数意义见前人研究^[4,12,18]。在 SPSS 中进行 ANOVA 方差分析、Duncan 多重比较、Person 相关分析,并利用多元回归、通径分析提取主导因子。在 Origin 8.5 中作图。

2 结果与讨论

2.1 不同植被类型土壤入渗特征

由图 1 可知,青海云杉林地、华北落叶松林地、祁连圆柏林地、荒草地 60 cm 土层内稳渗速率均值分别为 3.59、2.04、3.01、1.45 mm/min,存在显著差异性,林地均显著高于荒草地($P<0.01$)。说明相较荒草地,林地具有显著改善土壤结构,增加入渗的能力。通过比较 3 种与荒草地的基本理化性质发现(表 2),林地容重小于荒草地,孔隙状况优于荒草地,这是因为林地发达的根系、丰富的地表植被和枯枝落叶增加了土壤孔隙,提高了有机质含量,促进了团聚体的形成,对土壤的改善作用较荒草地显著,从而提高了土壤的渗透性能^[18]。这与姚淑霞等^[19]研究结果相同,而徐学选等^[9]在黄土高原研究发现退耕年限较短草地表层的饱和导水率大于林地。可能是由于研究区内人类活动剧烈,频繁放牧,导致荒草地被践踏、结构变紧密,入渗能力降低。

流域内不同坡位光照水分的再分配不均,制约植被的生长,也影响土壤理化性质的变化。由图 2 可知,同

一坡位 3 种林地渗透速率不存在显著差异性 ($P>0.05$),但仍存在上坡位和下坡位青海云杉>祁连圆柏>华北落叶松,中坡位青海云杉>华北落叶松>祁连圆柏。这是由于上坡位、下坡位林地总孔隙度、毛管孔隙度表现为:青海云杉>祁连圆柏>华北落叶松,容重表现为:华北落叶松>青海云杉>祁连圆柏;中坡位 3 种林地的土壤孔隙度不存在显著差异 ($P>0.05$),但华北落叶松林地总孔隙度、毛管孔隙度较小,容重显著大于青海云杉林地、祁连圆柏林地,这是由于华北落叶松为落叶树种,林下枯落物丰富,但地表植被缺乏,根系分布较少,导致土壤中孔隙较少,导水性能较差,加之林地内人类游憩活动频繁,践踏导致土壤容重较大。

3 种林地在不同坡位间的土壤渗透速率不存在显著差异 ($P>0.05$),但仍表现出青海云杉林地、祁连圆柏林地初渗速率和稳渗速率及华北落叶松林地稳渗速率上坡位<中坡位<下坡位。这是由于研究区下坡位土壤水分条件较好,植被生长旺盛,有机质与水稳性团聚体质量分数较高,土壤结构良好,入渗能力较强(表 2)。吴钦孝等^[20]在黄土丘陵区发现由于降雨侵蚀产生的泥沙细颗粒沿坡面逐渐沉积,堵塞土壤孔隙,导致森林及荒坡草灌小流域沿坡面向下土壤的渗透速率减小;纳磊等^[21-22]在晋西黄土区研究发现由于不同坡位土壤水分条件的差异,导致下坡位植被生长较上坡位茂盛,同一植被类型均表现为下坡位土壤入渗速率较上坡位高。后者与本研究的结果一致,可能是由于研究区大规模进行退耕还林,人工整地使坡度减缓,泥沙颗粒沿坡面的沉积较弱,且研究区海拔较高,辐射强烈使得下坡位水分条件较中、上坡位好,植被生长茂盛,根系穿插导致土壤孔隙状况良好,所以下坡位入渗速率较大。

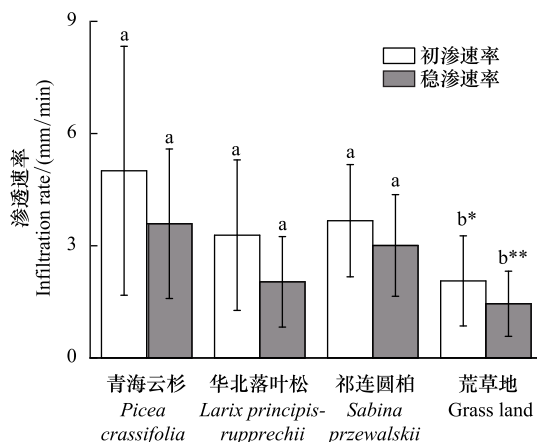


图 1 不同植被类型土壤入渗特征

Fig.1 Soil infiltration characteristics of different vegetation types

不同小写字母表示不同植被类型渗透性能差异显著 ($P<0.05$);

* 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)

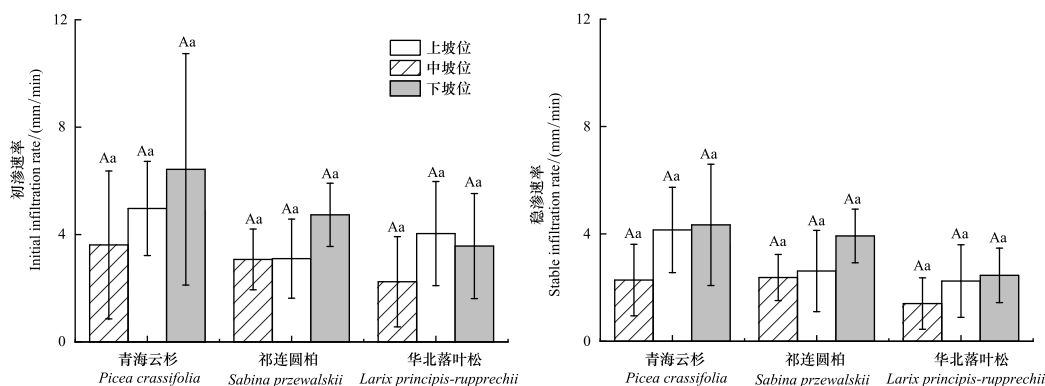


图 2 不同坡位土壤入渗特征

Fig.2 Soil infiltration characteristics at different slope positions

不同小写字母表示相同植被类型下不同坡位间渗透速率差异显著 ($P<0.05$);大写字母则表示相同坡位不同植被类型间渗透速率差异显著 ($P<0.05$)

2.2 不同植被类型土壤入渗过程模拟

图 3 表明土壤入渗速率随时间推移逐渐减小,最终趋于稳定。除荒草地外,青海云杉林地、华北落叶松林地、祁连圆柏林地在入渗前期入渗速率有明显的降低过程。除青海云杉林地中坡位和华北落叶松林地上坡位的土壤入渗速率在 40 min 左右达到稳定外,其他土壤的入渗速率均在 15 min 左右即达到稳定。各林地下坡

表 2 不同植被类型土壤物理化学性质比较
Table 2 Comparison of soil physical and chemical properties of different vegetation types

土壤环境因子 Soil environmental variables	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>			祁连圆柏 <i>Sabina przewalskii</i>			华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>			荒草地 Grassland
	下坡位	中坡位	上坡位	下坡位	中坡位	上坡位	下坡位	中坡位	上坡位	
	Lower slope	Middle slope	Upper slope	Lower slope	Middle slope	Upper slope	Lower slope	Middle slope	Upper slope	
粘粒 Clay/%	23.42ab	21.55bc	22.57bc	21.93bc	19.46c	23.79ab	21.46bc	26.25a	20.49bc	23.58ab
粉粒 Silt/%	33.16ab	29.56bcd	30.18 bc	30.33bc	25.83d	32.38ab	33.51ab	35.54a	27.64cd	31.96ab
砂粒 Sand/%	43.43cd	48.89abc	47.25bc	47.74bc	54.72a	43.82cd	45.03c	38.22d	51.87ab	44.46cd
总孔隙度 Total porosity/%	52.91ab	52.84ab	51.29abc	51.85abc	53.57a	51.51abc	51.71abc	46.82abc	45.20c	46.21bc
容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	1.20b	1.23b	1.24ab	1.18b	1.20b	1.22b	1.22b	1.33ab	1.39a	1.39a
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	4.49b	4.29b	4.81b	2.45b	5.06b	3.52c	4.43b	7.90a	3.83b	3.00b
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	48.31ab	48.55ab	46.48abc	49.40a	48.51ab	47.99e	47.28ab	38.92d	41.37cd	43.21bcd
水稳性团聚体	8.88cd	14.74bcd	9.49cd	11.77cd	14.20bcd	9.30cd	24.69ab	32.25a	17.65bc	5.04d
Water-stable aggregates/%	15.06c	21.40bc	15.80c	19.70bc	20.60bc	15.37c	32.14ab	38.36a	23.89bc	11.59c
>3 mm	28.71bc	33.44bc	27.36bc	35.63ab	32.11bc	25.97bc	48.27a	49.54a	36.40ab	20.52c
>2 mm	49.65bc	49.35c	40.02cd	51.19bc	44.95cd	40.01cd	67.65a	62.71ab	49.59bc	34.08d
>1 mm	70.85bcd	68.53cd	57.10efg	65.54cde	63.30def	54.97fg	80.89a	77.79ab	73.52abc	52.32g
>0.5 mm	82.27ab	79.69ab	70.62cd	76.20bc	76.10bc	66.90d	87.35a	86.18a	84.41a	66.50d
>0.25 mm	17.73cd	20.31cd	29.38ab	23.80bc	23.90bc	33.10a	12.65d	13.82d	15.59d	33.50a
>0.1 mm	25.80ab	18.90ab	13.40b	22.90ab	19.40ab	13.90ab	38.40a	30.40ab	20.50ab	14.60b
有机质 Organic matter/(g/kg)	26.58a	20.24ab	19.76ab	19.05ab	13.30b	20.89ab	19.79ab	20.93ab	19.77ab	17.50b
土壤含水量 Water content/%										

位土壤的稳渗速率明显高于上坡位和中坡位。将不同林地上、中、下坡位的土壤入渗速率(y)随时间(t)的变化过程选取不同模型进行拟合,结果如表 3 所示:青海云杉林地中 Horton 模型拟合 R^2 最大介于 0.862—0.918,通用经验模型(R^2 介于 0.614—0.839)拟合效果最差,3 种模型对入渗性能最好的下坡位入渗过程的模拟拟合程度最好。华北落叶松林地中,Horton 模型(0.827—0.910)拟合程度最好,与 Kostiakov 模型(0.853—0.899)拟程度的差异不大,通用经验模型(0.702—0.785)拟合效果最差。对于祁连圆柏林地,3 种模型拟合程度为 Horton 模型(0.895—0.930)>Kostiakov 模型(0.883—0.984)>通用经验模型(0.756—0.982)。对荒草地入渗过程模拟效果是 Kostiakov 模型(0.938)>Horton 模型(0.938)>通用经验模型(0.830)。

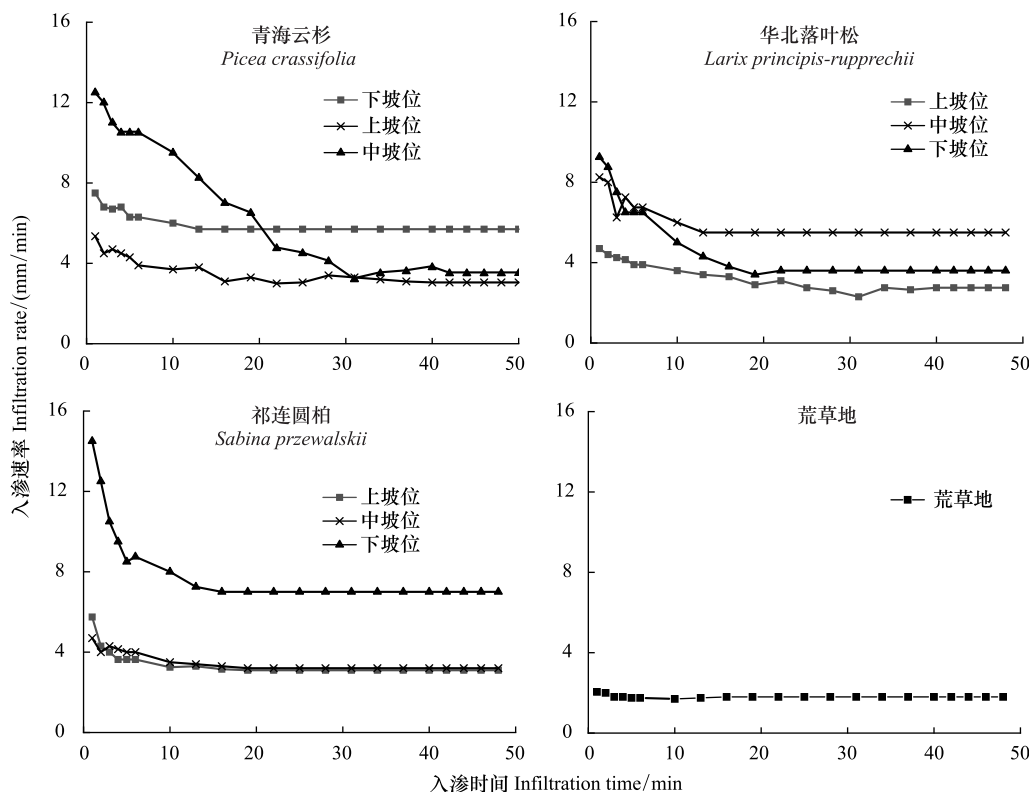


图 3 坡面入渗速率随时间变化

Fig.3 The variation of infiltration rate with time on the slope-surface

表 3 入渗模型模拟结果

Table 3 Results of infiltration model parameters fitting

植被类型 Vegetation types	坡位 Slope position	样本数量 Sample number	Kostiakov 模型 Kostiakov model	R^2	Horton 模型 Horton model	R^2	通用经验模型 General experienced model	R^2
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	上坡位	8	$y = 16.383 t^{-0.349}$	0.727	$y = 3.500 + 9.000 e^{-0.064t}$	0.862	$y = 3.500 + 12.740 t^{-0.556}$	0.614
	中坡位	8	$y = 6.523 t^{-0.093}$	0.931	$y = 3.050 + 2.300 e^{-0.124t}$	0.907	$y = 3.050 + 2.618 t^{-0.700}$	0.821
	下坡位	8	$y = 7.483 t^{-0.100}$	0.988	$y = 5.700 + 1.800 e^{-0.187t}$	0.918	$y = 5.700 + 1.931 t^{-0.775}$	0.839
华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechii</i>	上坡位	8	$y = 5.140 t^{-0.178}$	0.894	$y = 2.750 + 1.950 e^{-0.096t}$	0.910	$y = 2.750 + 2.480 t^{-0.649}$	0.702
	中坡位	8	$y = 8.403 t^{-0.145}$	0.853	$y = 5.500 + 2.750 e^{-0.161t}$	0.827	$y = 5.500 + 3.058 t^{-0.702}$	0.764
	下坡位	8	$y = 4.905 t^{-0.117}$	0.899	$y = 3.600 + 1.150 e^{-0.181t}$	0.844	$y = 3.600 + 1.360 t^{-0.770}$	0.785
祁连圆柏 <i>Sabina przewalskii</i>	上坡位	8	$y = 4.769 t^{-0.130}$	0.887	$y = 3.200 + 1.500 e^{-0.144t}$	0.895	$y = 3.200 + 1.629 t^{-0.660}$	0.756
	中坡位	8	$y = 5.138 t^{-0.182}$	0.883	$y = 3.100 + 2.650 e^{-0.303t}$	0.905	$y = 3.100 + 2.671 t^{-1.114}$	0.982
	下坡位	8	$y = 10.529 t^{-0.151}$	0.984	$y = 7.250 + 3.250 e^{-0.240t}$	0.930	$y = 7.250 + 3.575 t^{-0.937}$	0.903
荒草地 Grassland		8	$y = 2.058 t^{-0.052}$	0.938	$y = 1.800 + 0.250 e^{-0.203t}$	0.888	$y = 1.800 + 0.281 t^{-0.837}$	0.830

y 表示土壤入渗速率(mm/min), t 表示自开始渗水后第 t min (min)

综上所述, Horton 模型对不同植被类型的土壤入渗过程模拟的拟合精度均在 0.8 以上; Kostiakov 模型除青海云杉林地上坡位拟合精度稍差(0.727), 其他部位均大于 0.85, 但在 t 趋向 0 和趋向正无穷时, 稳渗速率趋向无穷大和 0, 不符合实际情况; 通用经验模型拟合精度较差, 决定系数在 0.614—0.982 之间。这与刘目兴等^[1]在三峡库区研究结果一致。对比不同林地模型的模拟效果发现, 对祁连圆柏林地的拟合程度最高。刘洁等^[23]在元谋干热河谷研究发现通用经验方程最适于描述该流域的土壤入渗过程, 闫东峰等^[18]发现 Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型均适合丹江口水库地区, 李志等^[24]在武功山研究则发现通用经验模型更适合草甸土壤。说明不同研究区域、不同研究对象模型的适应性不同。

2.3 土壤水分入渗的影响因素

2.3.1 土壤理化性质对入渗的影响

本研究选取与土壤结构密切相关的 16 个因子(表 4)与土壤初渗速率、稳渗速率进行相关分析可以发现:

稳渗速率、初渗速率均与土壤容重呈极显著负相关关系($P<0.01$), 与总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度呈极显著正相关关系($P<0.01$)。容重是土壤的基本物理性质, 它的大小间接反映了土壤的紧实程度、透气透水能力^[25]。容重越大土壤越紧实, 则孔隙度随之减少, 土壤透气透水能力下降, 入渗速率减小^[12]。土壤孔隙度、容重与土壤入渗能力对应较好, 土壤容重小、孔隙度大的土壤入渗能力较强, 由表 1 可知坡面向下林地土壤总孔隙、毛管孔隙度增大, 容重减小, 土壤渗透性能增强。

稳渗速率、初渗速率与 $>3\text{ mm}$ 、 $>1\text{ mm}$ 、 $>2\text{ mm}$ 、 $>0.5\text{ mm}$ 、 $>0.25\text{ mm}$ 、 $>0.1\text{ mm}$ 水稳性团聚体呈极显著正相关关系($P<0.01$), 与 $<0.1\text{ mm}$ 团聚体呈极显著负相关关系($P<0.01$), 其中与 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体相关性最高, 表明入渗速率受 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的影响最大。土壤团聚体是反映土壤结构优劣的主要指标之一, 良好的团聚结构对保持土壤水分、肥力有着重要作用进而促进植物生长根系发育。土壤团聚结构越好, 其孔隙越多、持水性、通透性越好^[9]。二者还与有机质呈极显著正相关关系($P<0.01$), 相关系数较高(0.665、0.663)。土壤有机质对促进团粒结构的形成、维持土壤结构稳定有着重要作用, 有机质含量越多, 土壤团粒结构就越多, 从而具有良好的透气透水能力, 促进土壤入渗^[6]。

稳渗速率、初渗速率与土壤机械组成、土壤含水量均没有显著相关性($P>0.05$)。与高婵婵等人研究结果相同^[8]。

表 4 土壤入渗性能与影响因子相关性分析

Table 4 Correlative analysis between influencing factors and soil water infiltration capacity

土壤环境因子 Soil environmental variables		样本数量 Sample number	初渗速率 Initial infiltration rate	稳渗速率 Stable infiltration rate
容重 Soil bulk density		60	-0.696 **	-0.778 **
总孔隙度 Total porosity		60	0.761 **	0.784 **
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity		60	0.764 **	0.721 **
毛管孔隙度 Capillary porosity		60	0.544 **	0.591 **
有机质 Organic matter		60	0.663 **	0.665 **
水稳性团聚体 Water-stable aggregates	$>3\text{ mm}$	60	0.538 **	0.534 **
	$>2\text{ mm}$	60	0.670 **	0.655 **
	$>1\text{ mm}$	60	0.662 **	0.659 **
	$>0.5\text{ mm}$	60	0.716 **	0.681 **
	$>0.25\text{ mm}$	60	0.765 **	0.771 **
	$>0.1\text{ mm}$	60	0.476 **	0.452 **
	$<0.1\text{ mm}$	60	-0.476 **	-0.452 **
机械组成 Mechanical composition	粘粒 Clay ($<0.002\text{ mm}$)	60	0.144	0.045
	粉粒 Silt ($0.002\text{—}0.02\text{ mm}$)	60	0.117	0.031
	砂粒 Sand ($0.02\text{—}0.2\text{ mm}$)	60	-0.136	-0.039
土壤含水量 Water content		60	0.083	0.046

2.3.2 影响土壤入渗性能主导因素筛选

在 SPSS 中对以上 16 个与土壤入渗性能密切相关的因子进行主成分分析,结果如表 5 所示。表 5 表明,16 个因子可概括为 4 个独立的主成分,累计贡献率 82.959%,可用来解释对土壤入渗性能的影响。第 1 个主成分因子主要由水稳性团聚体决定,贡献率为 45.219%,>2 mm、>1 mm、>0.5 mm、>0.25 mm 的水稳性团聚体有较高载荷,该类土壤有机质、水稳性团聚体含量高,同时有较高的非毛管孔隙度和总孔隙度;第 2 个主成分因子主要由土壤机械组成决定,方差贡献率为 18.599%,粘粒、粉粒含量高,砂粒含量极低(-0.966),三者载荷均较高;第 3 个主成分因子主要由土壤孔隙状况决定,总孔隙度、毛管孔隙度、容重在第 3 主成分上载荷较高;第 4 个主成分因子主要由土壤含水量决定,载荷量为 0.940。

表 5 土壤水分入渗能力的 PCA 分析
Table 5 PCA analysis of soil infiltration capacity

主成分 Principal component	1	2	3	4
总孔隙 Total porosity	0.700	-0.119	0.650	-0.107
容重 Soil bulk density	-0.489	0.239	-0.610	0.071
非毛管孔隙 Non-capillary porosity	0.770	0.167	0.268	-0.217
毛管孔隙 Capillary porosity	0.474	-0.287	0.694	-0.015
有机质 Organic matter	0.814	-0.026	0.083	0.231
粘粒 Clay (<0.002mm)	-0.075	0.905	0.260	-0.052
粉粒 Silt (0.002—0.02 mm)	-0.021	0.919	0.187	0.121
砂粒 Sand (0.02—0.2 mm)	0.047	-0.966	-0.231	-0.049
土壤含水量 Water content	0.016	-0.168	0.184	0.940
水稳性团聚体 >3 mm	0.824	-0.100	-0.139	-0.131
Water-stable aggregates >2 mm	0.907	-0.040	-0.095	-0.060
>1 mm	0.909	-0.060	-0.150	0.018
>0.5 mm	0.926	0.051	-0.178	0.069
>0.25 mm	0.889	0.134	-0.080	0.123
>0.1 mm	0.721	0.257	-0.488	0.038
<0.1 mm	-0.721	-0.257	0.488	-0.038
特征值 Characteristic value	7.235	2.976	1.999	1.064
贡献率 Contribution rate/%	45.219	18.599	12.492	6.648
累计贡献率 Cumulative/%	45.219	63.818	76.310	82.959

选择由主成分分析中载荷较高的 11 个因子共 60 组数据作为自变量分别和因变量稳渗速率(Y_1)、初渗速率(Y_2)进行多元逐步回归,筛选出主要影响因子,经检验二者符合正态分布。结果显示:

$$Y_1 = -3.391 - 4.767X_1 + 7.890X_2 + 13.693X_3, R^2 = 0.818, P < 0.001$$

$$Y_2 = -18.393 + 10.196X_2 + 69.626X_3 - 42.721X_4, R^2 = 0.781, P < 0.001$$

式中, X_1 :容重, X_2 :>0.25 mm 团聚体, X_3 :总孔隙度, X_4 :毛管孔隙度

可知,影响稳渗速率的主要因子为容重、>0.25 mm 团聚体、总孔隙度,影响初渗速率的主要因子为>0.25 mm 团聚体、总孔隙度、毛管孔隙度。为了判断已筛选的因子分别对稳渗速率和初渗速率的影响程度,进一步进行通径分析。

由表 6 可知,初渗速率与相关因子的直接通径系数绝对值大小为>0.25 mm 团聚体质量分数<毛管孔隙度<总孔隙度,总孔隙度的直接通径系数最大,为 0.939,对初渗速率产生的直接正效应最强,说明总孔隙度越大,初渗速率越大;同时通过毛管孔隙度、>0.25 mm 团聚体间接对初渗速率产生的负效应最弱(-0.178)。>0.25 mm 团聚体对初渗速率的直接正效应最弱(0.404),其通过总孔隙度和毛管孔隙度对初渗速率的间接正效应较强(0.361)。毛管孔隙度对初渗速率有着极显著的负向作用,可见土壤毛管孔隙度越多,初渗速率有减

小趋势;但毛管孔隙度与初渗速率呈极显著正相关关系(0.544),这是毛管孔隙度对初渗速率直接效应(-0.446)受到总孔隙度间接正效应(0.846)综合影响,导致毛管孔隙度对初渗速率的直接效应不能通过二者的相关系数大小显示出来。通过计算决策系数可知,毛管孔隙度决策系数绝对值最大,且是负值,说明是初渗速率的主要限制因子。(Durbin Watson 2.213, 剩余通径系数=0.468)

表 6 土壤主要物理因子对土壤初渗速率的通径系数

Table 6 Path coefficient between initial infiltration rate and main soil physical factors

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				决策系数 Decision coefficient
			X_2	X_3	X_4	合计 Total	
X_2	0.765 **	0.404 **		0.518	-0.157	0.361	0.455
X_3	0.761 **	0.939 **	0.223		-0.401	-0.178	0.547
X_4	0.544 **	-0.446 **	0.143	0.846		0.989	-0.684

X_2 : >0.25 mm 团聚体 >0.25 mm aggregate; X_3 : 总孔隙度 Total porosity; X_4 : 毛管孔隙度 Capillary porosity

由表 7 可知, >0.25 mm 团聚体质量分数与总孔隙度对稳渗速率表现出极显著的正向作用,说明二者对稳渗速率的增大有明显的促进作用。容重对稳渗速率具有极显著的负向作用,表明随着容重增大稳渗速率有减小趋势。>0.25 mm 团聚体的直接通径系数最大,为 0.460,对稳渗速率产生的直接正效应最强,同时通过容重、总孔隙度间接对稳渗速率产生的正效应最弱(0.315);总孔隙度对稳渗速率的直接正效应最弱(0.271),但其通过容重、>0.25 mm 团聚体对稳渗速率的间接正效应最强(0.518)。容重对稳渗速率的直接负效应较弱(-0.323),通过>0.25 mm 团聚体、总孔隙度间接对稳渗速率产生的负效应较强。由决策系数可知,>0.25 mm 团聚体单独作用排序第 1,容重排序第 2,总孔隙度排序第 3,所以>0.25 mm 水稳性团聚体是影响稳渗速率的主要决策因子。沿坡面向下,容重减小降低了土壤紧实度,提高总孔隙度和>0.25 mm 水稳性团聚体含量,进而提高了土壤的稳渗速率^[15];总孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体含量沿坡面向下逐渐增大,土壤容重减小孔隙性提高,进而促进土壤入渗。(Durbin Watson 1.767, 剩余通径系数=0.426)

表 7 土壤主要物理因子对土壤稳渗速率的通径系数

Table 7 Path coefficient between stable infiltration rate and main soil physical factors

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				决策系数 Decision coefficient
			X_2	X_3	X_4	合计 Total	
X_1	-0.778 **	-0.323 **		-0.237	-0.221	-0.458	0.398
X_2	0.771 **	0.460 **	0.166		0.149	0.315	0.498
X_3	0.784 **	0.271 **	0.264	0.254		0.518	0.351

X_1 : 容重 Soil bulk density

通径分析发现土壤物理因子与初渗速率、稳渗速率的剩余通径系数较大,均在 0.4 以上,说明存在重要因素未考虑,如作物根系分布、根长密度、土壤生物等。研究表明根系作为植物的重要功能器官,它的构型及生长状况反映了植被对环境的适应及对土壤的固持,改良了土壤的紧实度,强化了土壤的抗侵蚀能力,是水土流失防治的关键^[26]。根系一方面在土壤中的穿插、分割等作用增加了土壤中的大孔隙,改善土壤渗透性能;另一方面根系的代谢还会产生有机化合物胶结土壤颗粒,促进团聚体的形成,进而影响土壤的渗透性能^[27]。王国彬等^[28]研究发现土壤有效孔隙度和根长密度是影响表层土壤稳定入渗的主要因子;王意锐等^[29]发现土壤的渗透指标均随根长密度的减少而变小;闫东锋等^[18]研究发现土壤的入渗速率与根长密度、根体积密度及根系生物量均存在显著或极显著的相关关系,相关系数均在 0.85 以上,且数量多、密度大的 0.5—1 mm、1—2 mm 径级的根系改善土壤入渗性能的作用最强;徐少君等^[30]发现根系的根长密度、根表面积密度越大,土壤抵抗水蚀的能力越强,且径级越小的根系与土壤抗水蚀增强系数的相关性越大;王鑫皓等^[31]研究发现倾斜

根、垂直根影响土壤水分的纵向运动,数量越多土壤稳渗速率越大,水平根系能阻止水分下渗,数量越多稳渗速率越小。除根系在土壤中的缠绕串联改善土壤理化性质外,土壤动物在土中的筑穴、挖掘、促进有机物分解等活动也进一步改善了土壤理化性质,增强土壤通透性,进而影响土壤中水分入渗^[29]。王意锐等^[32]发现在毛竹林中土壤动物的数量会随着土壤密度的增大而减少,土壤动物的优势类群与土壤的有机质含量、pH、全N含量具有正相关关系。土壤入渗特征与多数大中型节肢动物、小型节肢动物的密度存在正相关关系,这些动物的减少不利于土壤水分入渗^[29]。毛竹林的长期覆盖会限制土壤动物活动,恶化土壤性质,减弱土壤入渗,最终导致林地退化^[29]。微生物是土壤动物的食物来源,它们的生物量及活性会因动物取食而提高^[33]。土壤微生物作为土壤生态系统重要的组分之一,参与众多土壤过程,土壤酶活性作为生物催化剂,具有重要作用。研究发现土壤渗透特性指标与细菌、放线菌含量和蛋白酶、脲酶活性极显著或显著相关,初渗速率、平均渗透速率与多酚氧化酶活性显著相关,说明土壤生物因子能够改善土壤环境,加速土壤风化和养分循环,最终提高土壤渗透性能^[34]。因试验时间关系未对以上因子进行详细调查,将在后续研究中进行完善。

3 结论

(1)不同植被类型的入渗速率存在显著差异,初渗速率和稳渗速率均表现为青海云杉>祁连圆柏>华北落叶松>荒草地;同一坡位三种植被类型渗透速率不存在显著差异性,但仍表现出上坡位和下坡位青海云杉>祁连圆柏>华北落叶松,中坡位青海云杉>华北落叶松>祁连圆柏;同一植被类型在不同坡位的土壤入渗不存在显著差异,青海云杉林地、祁连圆柏林地土壤渗透性能及华北落叶松林地稳渗速率均表现为上坡位最差、下坡位最好,华北落叶松林地初渗速率在中坡位最大、下坡位最小。

(2)对不同坡位的3种林地及荒草地的入渗过程进行模拟,拟合精度最高的是Horton模型,均在0.8以上;Kostiakov模型除在青海云杉林地上坡位拟合精度稍差(0.727),其他部位均大于0.85;通用经验模型拟合精度总体较差,决定系数在0.614—0.982之间,但对青海云杉林地和祁连圆柏林地的中、下坡位及荒草地的拟合精度较高。

(3)土壤入渗性能与孔隙状况、水稳性团聚体质量分数、有机质含量均有极显著正相关性,与容重呈极显著负相关性。主成分分析结果表明影响因子可归为4个主成分,分别为水稳性团聚体因子、土壤机械组成因子、土壤孔隙状况因子、土壤水分因子,累计贡献率为82.959%。多元分析可知影响初渗速率的主要因子为>0.25 mm团聚体、总孔隙度、毛管孔隙度,影响稳渗速率的主要因子为容重、>0.25 mm团聚体、总孔隙度。通径分析可知,总孔隙度是影响初渗速率最主要的决策因素,而毛管孔隙度是主要的限制因子;>0.25 mm团聚体质量分数是影响稳渗速率的主要决策因素。二者的剩余通径系数较大(0.468、0.426),说明渗透速率的影响因子还有部分未考虑。

参考文献(References):

- [1] 刘目兴,杜文正,张海林. 三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 299-305.
- [2] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,李衍青,蓝芙宁. 岩溶坡地不同植被类型土壤水分入渗特征及其影响因素. 生态学杂志, 2016, 35(3): 597-604.
- [3] 吕刚,翟景轩,李叶鑫,王磊,王韞策. 辽西北风沙地不同植物群落土壤入渗特性. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 133-139.
- [4] 陈娟,陈林,宋乃平,李月飞,苏莹,杨东东. 荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征. 水土保持学报, 2018, 32(4): 18-23.
- [5] 朱美壮,王根绪,肖瑶,胡兆永,宋春林,黄克威. 青藏高原多年冻土区高寒草甸土壤水分入渗变化研究. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1316-1325.
- [6] 张治伟,朱章雄,王燕,傅瓦利,王志林. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素. 农业工程学报, 2010, 26(6): 71-76.
- [7] 刘宇,郭建斌,邓秀秀,刘泽彬. 秦岭火地塘林区3种土地利用类型的土壤潜在水源涵养功能评价. 北京林业大学学报, 2016, 38(3): 73-80.
- [8] 高婵婵,赵传燕,王超,王清涛,王方圆. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征. 水土保持学报, 2016, 30(1): 117-121, 126-126.
- [9] 丁康,徐学选,陈文媛, Kalhoro S A. 长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 44-51.

- [10] 霍家仪, 陈丽华, 及金楠, 瞿文斌. 晋西黄土区不同林地类型对土壤水分特性的影响. 山地学报, 2018, 36(3): 364-371.
- [11] 陈楚楚, 刘芝芹, 王克勤, 涂璟, 黄新会, 贺斌, 马建刚. 高原湿地碧塔海周边典型植被类型的土壤水分特征. 水土保持学报 2015, 29(6): 222-226, 232-232.
- [12] 徐勤学, 李春茂, 陈洪松, 付智勇, 吴攀, 王克林. 喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征. 农业工程学报, 2018, 34(8): 124-131.
- [13] 陈玉真, 王峰, 尤志明, 吴志丹, 江福英, 张文锦, 翁伯琦. 不同植茶年限茶园土壤的物理性状及渗透性能. 山地学报, 2016, 34(1): 38-45.
- [14] 陈文媛, 张少妮, 华瑞, 徐学选. 黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 62-69.
- [15] 彭舜磊, 由文辉, 沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响. 农业工程学报, 2010, 26(11): 78-84.
- [16] Zak D R, Hairston A, Grigal D F. Topographic influences on nitrogen cycling within an upland Pin Oak Ecosystem. Forest Science, 1991, 37(1): 45-53.
- [17] 冯雪瑾, 张志华, 杨喜田, 毕会涛, 桑玉强, 武应霞, 石岳峰. 太行山低山丘陵区人工林表层土壤有机碳和全氮分布特征. 应用生态学报, 2019, 30(2): 511-517.
- [18] 闫东锋, 王德彩, 杨喜田. 丹江口库区不同植被类型地表根系对土壤渗透性的影响. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 35-44.
- [19] 姚淑霞, 张铜会, 刘新平, 马赞花. 科尔沁地区不同类型沙地土壤饱和导水率特征分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 123-126.
- [20] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 1-5.
- [21] 纳磊, 张建军, 朱金兆, 董煌彪, 王鹏, 袁琳丽. 晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和导水率研究. 水土保持研究, 2008, 15(3): 69-73.
- [22] 袁建平, 雷廷武, 郭索彦, 蒋定生. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率空间变异性. 水利学报, 2001, (10): 88-92.
- [23] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 张健, 张良辉, 周义贵. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性. 生态学报, 2011, 31(8): 2331-2340.
- [24] 李志, 袁颖丹, 胡耀文, 孟文武, 张学玲, 郭晓敏, 张文元, 胡冬南, 牛德奎. 海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响. 生态学报, 2018, 38(2): 635-645.
- [25] 李卓, 吴普特, 冯浩, 赵西宁, 黄俊, 庄文化. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [26] 蔡鲁, 朱婉芮, 王华田, 张光灿, 刘霞, 杨吉华, 王延平. 鲁中南山地 6 个造林树种根系形态的比较. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 83-91.
- [27] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 雷斯越, 张晓萍. 不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系. 生态学报, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [28] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响. 水土保持学报, 2009, 23(3): 227-231.
- [29] 王意锟, 金爱武, 方升佐. 浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1431-1440.
- [30] 徐少君, 曾波, 类淑桐, 苏晓磊. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应. 土壤学报, 2011, 48(1): 160-167.
- [31] 王鑫皓, 王云琦, 马超, 王玉杰. 根系构型对土壤渗透性能的影响. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 73-82.
- [32] 王意锟, 金爱武, 朱强根, 张四海, 唐世刚. 毛竹林不同经营强度下土壤动物群落特征. 东北林业大学学报, 2015, 43(1): 100-102, 116-116.
- [33] McGonigle T P. The significance of grazing on fungi in nutrient cycling. Canadian Journal of Botany, 1995, 73(S1): 1370-1376.
- [34] 张昌顺, 范少辉, 管凤英, 刘广路, 翁玉榛. 闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子. 林业科学, 2009, 45(1): 36-42.