

# 白龙江上游不同演替阶段森林土壤入渗和持水特征

张金武,王立\*

(甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**土壤入渗和持水性能对森林生态水文有着重要影响。为了解白龙江上游不同演替阶段森林土壤入渗特征和持水性能,在室内采用双环刀法对该地区土壤进行研究,测量土壤容重、孔隙度、持水量、渗透速率、根系含量等指标。结果表明:1)不同演替阶段森林土壤的容重、持水量、孔隙度的变化比较明显,并随着土层深度的增加土壤容重与持水量、孔隙度呈反比关系;2)土壤入渗速率在不同土层上各有差异,但总体有初渗速率 $>$ 平均渗透速率 $>$ 稳定入渗速率的趋势。在0~10 cm土层灌丛的渗透性能好,10~40 cm红桦林渗透性能优于其他林分;3)Kostiakov模型对不同植被类型不同土层的土壤入渗拟合的精度相对较高,尤其是对灌丛的拟合,是描述本研究区灌丛地土壤入渗特征最好的模型;4)植物粗根与土壤入渗呈负相关关系,与毛管持水量呈正相关关系,细根和中根与土壤入渗呈正相关关系,中根与毛管持水量呈负相关关系。

**关键词:**土壤入渗;持水性能;入渗模型

中图分类号:S714.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)04-0041-07

## Characteristics of Forest Soil Infiltration and Water Holding Capacity in Different Succession Stages in the Upper Reaches of the Bailong River

ZHANG Jin-wu, WANG Li\*

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** Soil infiltration and water holding capacity have important effects on forest ecology and hydrology. In order to understand the characteristics of forest soil infiltration and water holding performance at different stages of succession in the upper reaches of the Bailong River, a double-ring tool method was used to study the soil in this area, and the indexes such as soil bulk density, porosity, water holding capacity, infiltration rate and root content were measured. The results showed that 1) the changes of bulk density, water holding capacity and porosity of forest soil in different stages of succession were more obvious, and the relationship between soil bulk density and water holding capacity and porosity was inversely proportional with the increase of soil depth. 2) Soil infiltration rate varied in different soil layers, but the overall trend was that the initial infiltration rate $>$ average infiltration rate $>$ stabilize the infiltration rate. The permeability of 0—10 cm shrub soil layer was good, and the permeability of 10—40 cm red birch soil layer was better than other stands. 3) Kostiakov model had relatively high accuracy in soil infiltration fitting of different vegetation types and different soil layers, especially for shrub, which was the best model to describe soil infiltration characteristics of the shrub land in this study area. 4) There was a negative correlation between the crude root and soil infiltration, and a positive correlation between the capillary water holding capacity, between the fine root and the medium root and the capillary water holding capacity.

收稿日期:2020-07-27 修回日期:2020-09-04

基金项目:国家自然科学基金(31800352);甘肃省高等学校科研项目(2017A-032);甘肃农业大学专项基金(GSAU-RCZX201708, GSAU-STS-1734, GAU-XKJS-2018-097)。

作者简介:张金武。研究方向:林业。E-mail:329258127.com

\*通信作者:王立,副教授。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:wangli@gsau.edu.cn

**Key words:** soil infiltration; water performance; infiltration model

土壤水分入渗是降雨、地表水转化成土壤水的重要过程,也是大气降水入渗补给浅层地下水的唯一途径<sup>[1]</sup>,它不仅反映土壤抗侵蚀能力,还可以作为森林涵养水源和调节水分的重要指标,也是影响地表径流的重要因素<sup>[2]</sup>。目前国内外学者对土壤入渗做了大量研究,并对入渗和土壤的理化性质进行分析,但对甘肃省白龙江流域不同演替阶段土壤渗透的研究较少。因此,通过对该区域土壤性质进行研究,对了解该区域土壤持水性能、土壤渗透特征、及渗透与根系分布的关系有极为重要的意义。

不同演替阶段土壤的理化性质和植物根系含量有明显差异,对土壤的入渗和持水性能就有不同程度的影响<sup>[3-4]</sup>。土壤质地会影响累计入渗量和初始含水率之间的关系,土壤结构不同必定会导致土壤储水能力和入渗特性有所差异。大量研究表明,植被根系可以对土壤输入有机质等营养物质,可以促进土壤的入渗性能,改善土壤环境,使其蓄水保墒能力增强。姚淑霞等<sup>[5]</sup>对科尔沁不同沙地土壤饱和和导水率比较研究中得出,不同植被类型的初始入渗率、稳定入渗率、累计入渗量与土壤的含水率、土壤容重、孔隙度等有关;阿茹·苏里坦等<sup>[6]</sup>对天山林区不同群落土壤入渗特征的研究得出,天然冷杉林的土壤入渗速率快慢与错综复杂的根系分布使得土壤松动有关;赵景波等<sup>[7]</sup>对青海湖边土壤入渗的研究表明,草本植物根系发育越深土壤的稳定入渗速率就越大;刘春利<sup>[8]</sup>等指出,不同演替阶段的土壤类型对土壤容重、持水等性质有不同的影响,对改变土壤中水分的分布规律也有所不同。因此可以看出,不同地理环境中影响土壤入渗和持水的主要限制因子也不同。本研究以白龙江沙区林场为研究区域,以研究区内红桦林、冷杉林、灌丛 3 种林分为研究对象,测定了土壤物理性状的一些指标,并对 3 种林分水分入渗和持水性能进行了测定和分析,研究红桦林、冷杉林、灌丛的土壤容重、持水量、孔隙度、渗透速率等指标的差异性,以期对白龙江流域土壤渗透、持水等方面的研究提供理论依据。

白龙江林区沙滩林场是长江上游与黄河中游重要的水源涵养林和我国西北的绿色屏障,更是甘肃

的绿色宝库,但该区由于人为和地质灾害等因素的影响,导致其土壤结构复杂多样。现阶段对白龙江土壤入渗特征的研究还非常不充足。白龙江林区沙滩林场不同演替阶段的土壤入渗主要受哪些因素的影响,植物根系和土壤入渗之间存在什么样的关系,哪种模型能够更好的模拟该区的土壤渗透过程。这些问题都亟待解决,因此本研究采用双环刀法,对白龙江上游土壤进行分析,探讨土壤容重、含水率、孔隙度、根系等之间的关系,并对比 3 种模型的模拟效果进行比较,以期精确评估白龙江上游不同林分水源涵养功能提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于甘肃省白龙江插岗梁省级自然保护区管理局沙滩保护站(102°02′—104°22′E, 33°34′—33°46′N)。该地地势起伏大,高差悬殊,平均坡度为 30°~35°,具有典型高山地形特征,属于高山内陆型气候,年均气温 4.3℃,极端高温 29.1℃,无霜期 100 d。年均降水量 1 023.1 mm,年蒸发量 918.8 mm,林地经营总面积 3.1 万 hm<sup>2</sup>,活力木总蓄积量 207.8 万 m<sup>3</sup>,森林覆盖率为 74.6%<sup>[9]</sup>,植被类型是以岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、青扦(*Picea wilsonii*)等为主的乔木林,灌木主要有勾儿茶(*Berchemia sinica*)、悬钩子(*Rubus palmatus*)、箭竹(*Sinarundinaria nitida*)等。林下土壤类型以棕灰色灰化土、棕色森林土、褐色森林土为主。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

2019 年 8 月,在研究区选择红桦林、冷杉林、灌丛为研究对象,对其林下土壤进行水分入渗特征和持水性能的研究。各样地的基本情况见表 1。

### 2.2 土壤理化性质及其性能测定

在不同演替阶段的森林中选择适合的样地,取 0~10、10~20、20~40 cm 3 层土样,每层使用 100 cm<sup>3</sup> 环刀取 2 份原状土样,1 份做土壤渗透试验,1 份做土壤物理性质的研究。为避免植物根系对环刀取土的影响,在每个取样点挖 60 cm 深的土壤剖面,

表 1 样地特征

Table 1 The characters of sample plots

样地类型	经度	纬度	海拔/m	坡度/(°)	郁闭度
灌丛	104°10′11.7″	33°41′47.91″	2 354	12	65
红桦林	104°10′25.48″	33°41′25.48″	2 434	35	100
冷杉林	104°17.14′15″	33°37.41′40″	2 298	54	70

观察剖面结构,尽量避开粗根系的部分进行取土,并在该取样点附近挖 $20 \times 20$  cm,深40 cm的土块根,对0~10、10~20、20~40 cm不同深度的土块进行分层,将分层后的土块根带回室内洗去泥沙,并拭干水分,将其装信封袋置于 $85^\circ\text{C}$ 的烘干箱内烘至恒重,计算各层植物粗根( $>5$  mm)、中根( $5$  mm $\geq$ 中根 $>2$  mm)、细根( $\leq 2$  mm)的干质量比。在室内采用烘干法测定土壤含水率,环刀法测定土壤容重、孔隙度、毛管持水量等指标,每层取3个重复求均值并进行记录。

此次试验用双环刀法对土壤入渗速率进行测定。将采回的土样浸泡在水中12 h,注意水面不能超过土柱,到测定时间后取掉上盖,在上面反套1个空环刀,用胶带固定,防止漏水,之后将环刀放在漏斗上,在漏斗下面接1个空的锥形瓶。准备开始试验,在上面的空环刀中加水,保持水面比环刀口低1 mm。当第1滴水滴到锥形瓶时开始计时,前3 min内,每1 min换1次锥形瓶,并倒入量筒内记录下渗水的体积,此后隔5 min换1次锥形瓶。整个试验的时间序列为1、2、3、5、10、15、20、30、40、60 min,分别记录时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、..... $t_n$ 。在试验过程中要不断地向环刀内加水,使环刀内的水一直保持在5 cm的高度。当3次更换锥形瓶入渗的水量基本相同时认为达到稳定状态,停止本轮试验。渗透速率处理方法:初渗速率=最初入渗时间段内渗透总量/入渗时间;稳渗速率=单位时间内渗透量趋于稳定时的渗透速率;平均渗透速率=达到稳定时的渗透总量/达到稳渗时的时间。

### 2.3 土壤水分入渗模型

由于林地的水分运动是非饱和水分运动,所以想要严密的揭示林地土壤水分的运动特征是比较困难的,因此需要依据模型来描述当地的土壤水分入渗特征,但是土壤水分入渗的模型比较多,例如Green-Ampt方程、Philip方程、Kostiakov经验公式、Horton公式、方正三通用经验公式及蒋定生经验公式等,本试验选择概念比较明确,使用方便的Philip方程、Kostiakov经验公式、Horton公式来模拟白龙江沙滩林场的土壤水分入渗过程。入渗模型分别是:

Kostiakov入渗模型<sup>[10]</sup>

$$I_{(t)} = at^{-b} \quad (1)$$

式中, $I_{(t)}$ 为入渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $t$ 为入渗时间, min;  $a$ 和 $b$ 为模型的参数。

Horton入渗模型<sup>[11]</sup>

$$I_{(t)} = I_f + (I_i - I_f)e^{-at} \quad (2)$$

式中, $I_{(t)}$ 为入渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $I_i$ 为初始入渗速

率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $I_f$ 为稳定入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $B$ 为模型的参数。

Philip入渗模型<sup>[12]</sup>

$$I_{(t)} = A + Bt^{-0.5} \quad (3)$$

式中, $I_{(t)}$ 为入渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $t$ 为入渗时间, min;  $A$ 为稳定入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $B$ 为模型的参数。

## 2.4 数据处理

数据统计采用Excel进行,利用Spss和Origin2018软件进行数据拟合、分析、检验并绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤容重和持水性能特征

从表2可以看出,随着土层深度的增加,土壤容重有增大趋势,并且灌丛的容重最大,红桦林次之,冷杉林最小。3种林分的毛管孔隙基本都大于非毛管孔隙,随着土层深度的增加,毛管孔隙度呈递减趋势,但灌丛毛管孔隙度在10~20 cm时最大,可能与该区域土壤本身的特殊性有关。总体来说,随着土层深度的增加土壤容重与土壤孔隙度呈负相关关系,即土壤容重越小时,土壤孔隙度越大,在红桦林中关系最为明显。持水量有最大持水量 $>$ 毛管持水量 $>$ 最小持水量的关系,随着土层深度的增加持水量有减小的趋势,灌丛在10~20 cm时持水量最大。从图2可以看出,土壤容重、最大持水量、最小持水量、毛管孔隙度、毛管持水量在灌丛、红桦林、冷杉林中的差异性均显著( $P < 0.05$ ),其中土壤容重灌丛最大,红桦林次之,冷杉林最小,最大持水量、最小持水量、毛管孔隙度、毛管持水量冷杉林最大,红桦林次之,灌丛最小;非毛管孔隙度在灌丛和红桦林、冷杉林中差异性不显著,冷杉林与红桦林差异性显著( $P < 0.05$ )。

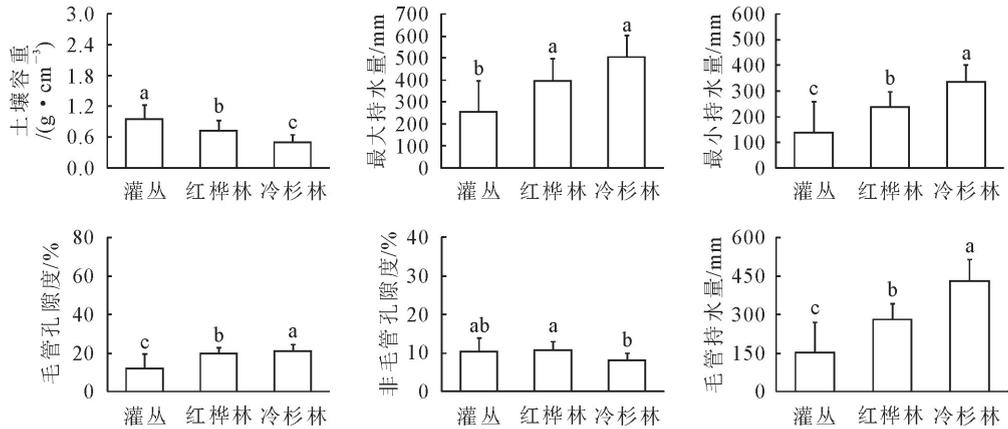
### 3.2 土壤渗透特征

由表3可以看出,不同演替阶段土壤初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量都有较大的差异性。随着土层深度的增加,灌丛和红桦林初渗速率有减小趋势,冷杉林有增大趋势;在0~10 cm土层上灌丛的初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率、渗透总量均最大,冷杉林最小,在10~40 cm土层上红桦林的初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率均最大,冷杉林最小。从平均入渗速率可以看出,灌丛在0~10 cm土层上的平均渗透速率高于其他土层,红桦林在10~20 cm土层的平均渗透速率最快。灌丛渗透总量在0~10 cm土层最大,20~40 cm土层最小,红桦林和冷杉林在10~20 cm时最大。总体来说,在浅层土壤0~10 cm灌丛的渗透性能更好,在10~40 cm红桦林的渗透性能更好。

表 2 土壤密度特征统计

Table 2 Soil density characteristics statistics

样地类型	土壤深度/cm	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	最大持水量/mm	最小持水量/mm	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	毛管持水量/mm
灌丛	0~10	0.80	284.89	156.30	9.53	9.29	171.11
	10~20	0.91	341.80	200.16	19.30	12.91	213.22
	20~40	1.15	135.11	58.60	7.52	8.86	67.43
红桦林	0~10	0.50	518.32	295.32	21.59	10.99	348.44
	10~20	0.77	345.75	202.98	19.77	11.18	259.31
	20~40	0.91	324.75	214.34	17.57	9.94	235.25
冷杉林	0~10	0.42	580.18	397.35	21.73	9.72	505.21
	10~20	0.53	473.07	323.67	20.84	7.52	404.22
	20~40	0.58	462.43	291.99	20.22	6.89	373.47



注:字母表示差异显著性( $P < 0.05$ )。

图 1 不同演替阶段森林土壤容重和持水性能分析

Fig. 1 Analysis of forest soil bulk density and water holding performance in different succession stages

表 3 各土层土壤入渗速率对比分析

Table 3 Comparative analysis of soil infiltration rate of different soil layers

样地类型	土壤深度/cm	初渗速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	稳渗速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	平均渗透速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	渗透总量/(mm·min <sup>-1</sup> )
灌丛	0~10	6.83±3.81	4.48±2.35	5.59±2.09	359.07±168.61
	10~20	3.56±1.29	1.86±0.63	2.41±0.80	149.47±50.94
	20~40	3.02±1.22	1.65±0.89	2.18±1.23	132.23±56.19
红桦林	0~10	5.55±2.10	3.76±1.50	3.98±1.60	301.21±120.05
	10~20	6.42±3.74	5.51±2.12	5.36±2.16	440.57±129.88
	20~40	4.95±2.90	4.18±2.57	4.54±2.81	334.13±85.74
冷杉林	0~10	2.21±1.11	1.77±0.59	2.23±0.83	141.91±67.12
	10~20	2.79±1.23	2.47±1.67	2.47±1.07	197.68±73.76
	20~40	2.97±1.30	2.33±0.79	2.48±1.06	186.41±71.98

### 3.3 土壤入渗过程模拟

土壤入渗是一个随时间递减的过程,土壤的初始入渗速率很大,而土壤的稳渗速率较小,不同演替阶段森林土壤不同土层的入渗衰减特性用不同方程模拟的效果也各不相同。因此,采用 Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型对各土层的土壤水分入渗过程进行模拟。

由表 4 可以看出,Kostiakov 方程拟合的参数  $a$

值介于 2.21~6.83,其中灌丛 0~10 cm 土层的  $a$  值最大,这与灌丛在 0~10 cm 土壤初始入渗速率最大的规律是一致的。冷杉林 0~40 cm 土层内  $a$  值均小于其他林种各层土壤,说明冷杉林中土壤的结构条件差于其他 2 个林地。 $b$  值介于 0.06~0.24,灌丛在 0~40 cm 土层内  $b$  值较大,说明灌丛地土壤入渗速率随时间递减速率较快。Philip 方程中  $B$  值在 0.33~2.70,它一定程度上可以反映初始入渗速

率的大小, B 值最大值出现在灌丛 0~10 cm 土层上, 这与实测灌丛 0~10 cm 土层初始入渗速率最大的结果相一致。

不同演替阶段森林土壤不同土层的入渗过程拟合效果可以用回归方程的判定系数  $R^2$  表示,  $R^2$  越大, 则拟合的效果越好。从表 4 的拟合结果可以看出, Kostiakov 模型的判定系数在 0.26~0.86, 冷杉林 0~10 cm 土层的判定系数最小; 在 Horton 模型中, 判定系数在 0.22~0.77, 判定系数总体较小, 拟合效果较差; Philip 模型判定系数在 0.23~0.68, 适宜性也较差。总体来看, Kostiakov 模型拟合的效果较好, 尤其对灌丛的模拟最好, 能较好地模拟该区

域的水分入渗特征。

### 3.4 根系生物量与土壤渗透、持水性能的关系

植物根系与土壤之间能够形成较大的孔隙, 使得微生物活动更加活跃, 土壤孔隙不被堵塞, 进而对土壤渗透产生重要影响。从表 5 可以看出, 粗根与土壤入渗速率、容重、非毛管孔隙度呈负相关关系, 并且均未达到显著水平, 细根和中根与土壤入渗速率呈正相关关系, 其中细根含量与容重、非毛管孔隙度、排水能力呈负相关关系, 总根量与土壤入渗速率呈正相关, 与容重、非毛管孔隙度呈负相关关系。其中粗根、中根、细根占比为 24.23%、32.25%、43.52%。

表 4 入渗模型中参数的回归分析结果

Table 4 Regression analysis results of parameters in the infiltration model

样地类型	土层深度/cm	考斯加可夫方程 $I_{(t)} = at^{-b}$			霍顿方程 $I_{(t)} = I_f + (I_i - I_f)e^{-ct}$				菲利普方程 $I_{(t)} = A + Bt^{-0.5}$		
		a	b	$R^2$	$I_f$	$I_i - I_f$	c	$R^2$	A	B	$R^2$
灌丛	0~10	6.83	0.15	0.81	4.48	2.35	0.15	0.73	4.48	2.70	0.67
	10~20	3.56	0.24	0.86	1.86	1.70	0.19	0.77	1.86	1.78	0.68
	20~40	3.02	0.23	0.70	1.65	1.37	0.18	0.58	1.65	1.64	0.60
红桦林	0~10	5.55	0.15	0.57	3.76	1.79	0.34	0.57	3.76	1.42	0.45
	10~20	6.42	0.06	0.41	5.51	0.91	0.28	0.42	5.51	0.93	0.35
	20~40	4.95	0.06	0.86	4.18	0.77	0.15	0.75	4.18	0.89	0.71
冷杉林	0~10	2.21	0.07	0.26	1.77	0.44	0.10	0.22	1.77	0.47	0.23
	10~20	2.79	0.13	0.31	2.47	0.32	0.22	0.40	2.47	0.33	0.32
	20~40	2.97	0.08	0.45	2.33	0.64	0.17	0.39	2.33	0.78	0.42

表 5 根系生物量与土壤渗透、持水性能相关分析

Table 5 Correlation analysis of root biomass with soil permeability and water holding capacity

土壤性质	粗根	中根	细根	总根量
容重	-0.414	0.043	-0.133	-0.223
毛管孔隙度	0.472	0.525	0.306	0.201
非毛管孔隙度	-0.050	-0.088	-0.189	-0.102
最大持水量	0.448	-0.128	0.138	0.137
最小持水量	0.487	-0.077	0.207	0.172
毛管持水量	0.487	-0.102	0.153	0.126
含水率	0.531	0.064	0.238	0.371
排水能力	0.170	-0.189	-0.054	0.018
初渗速率	-0.392	0.224	0.309	0.142
平均速率	-0.407	0.264	0.328	0.136
稳定速率	-0.441	0.241	0.285	0.089

## 4 结论与讨论

由于受多种因素影响, 白龙江林区沙滩林场土壤性质差异比较大, 不同演替阶段的土壤容重、孔隙度、持水量关系比较复杂。土壤容重作为评价土壤质量的重要指标, 可以反应出土壤的紧实度、通气性等性质, 密度越小土壤越疏松, 通气性越好, 微生物活动比较活跃。孔隙度是土壤水分、养分、微生物、

空气等的储存库和活动的主要场所, 孔隙度的大小对土壤持水能力、土壤透气性、土壤微生物活动和植物根系生长所遇到的阻力有直接影响<sup>[13]</sup>, 毛管孔隙中的水分可以直接提供给植物根系吸收或土壤蒸腾, 毛管孔隙度越大土壤有效水的贮存容量就越大, 可供植物根系利用的有效水分的比例就越大<sup>[14]</sup>, 非毛管孔隙可以为土壤水分、养分提供通道和储存空间<sup>[15]</sup>, 也决定土壤渗透性能<sup>[16]</sup>。可以看出 3 种林分土壤容重随着土层深度的增加有增大趋势, 且灌丛土壤容重最大, 这可能与灌丛下草本植物根系的分布有关, 灌丛下面的草本植物有 13 种, 明显多于冷杉林和红桦林, 而草本植物的根系大多分布在 0~10 cm 的范围内, 植物根系的生长对土壤紧实度有重要影响, 使得该区域土壤容重大, 通气性差, 毛管孔隙度小, 但在 10~20 cm 处灌丛持水量、孔隙度都大于其他土层。持水量与孔隙度随着土壤深度的增加有减小趋势, 与土壤容重呈反比关系, 总体来说随着土层深度的增加土壤容重和孔隙度呈负相关关系, 即土壤容重越大孔隙度越小。渗透是土壤中的水分由表面向土壤中渗入的过程, 土壤渗透性能决定着地表径流的调节和转换能力, 渗透性能好的土壤不易形成地表径流, 抑制土壤冲刷和养分流

失<sup>[17]</sup>,但影响此过程的因素有很多,如林分、土壤的物理性质、枯落物等都对土壤渗透有较大影响。通过对红桦林、冷杉林、灌丛的不同深度土层进行土壤入渗研究,发现在较浅土层灌丛的土壤渗透速率优于其他林分,其渗透速率为  $5.59 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,在灌丛地有 13 种草本植物,植物覆盖密度较大,这对雨水有很好的缓冲减压作用,不会导致土壤空隙在短时间被堵塞。这与 Li 等<sup>[18]</sup>得出植被覆盖对土壤入渗具有积极的促进作用,与李坤等<sup>[19]</sup>得出草地土壤入渗与覆盖率存在指数关系的结果极为相似,说明草本植物对土壤的改良和对雨水的缓冲对土壤水分入渗有积极作用。在较深土层红桦林的入渗速率较快,可能与乔灌木根系的分布有关,但总体入渗速率具有初渗速率 > 平均入渗速率 > 稳定入渗速率的特征,这符合土壤水分入渗是在分子力、毛管力和重力的综合作用下在土壤中运动的物理性质<sup>[6]</sup>,土壤渗透性能的好坏是衡量水源涵养林涵养水源的重要标志。

在对该地区不同演替阶段土壤入渗进行模拟研究的过程中,Kostiakov 模型对灌丛、红桦林、冷杉林水分入渗的模拟都比 Philip 模型和 Horton 模型好,尤其对灌丛土壤入渗的模拟最佳, $R^2$  为 0.79。这与刘芝芹等<sup>[20]</sup>对金沙江流域森林土壤入渗特征的研究中得出的 Kostiakov 模型拟合的效果比 Philip 模型和 Horton 模型拟合的效果好有部分一致,与吕刚等<sup>[21]</sup>对辽西北风沙地不同植物群落土壤入渗特性的研究得出的 Horton 模型能够较好的模拟当地的土壤水分入渗特征,也与徐勤学等<sup>[22]</sup>在喀斯特地区的研究结果不一致。这可能与选择区域的土壤类型不同有关,其渗透性也受很多因素的影响,例如土壤的石砾含量、枯落物、母岩等。因此,要以局部模拟对整个区域土壤入渗特征进行描述不能一概而论,应该分植被类型和土壤性质才能更好地了解土壤入渗的特征。

森林由于演替阶段不同,其土壤的理化性质也有所差异,植物根系可以改变土壤的物理结构和化学成分,对优化和改良土壤有着不可替代的作用,土壤容重反映着土壤的紧实程度,对土壤入渗具有较大的影响,并且土壤容重越大,土壤的孔隙越小,通气性就越差,土壤的入渗能力也就降低。土壤结构以及腐殖质的多少决定着毛管孔隙度的大小,尤其是非毛管孔隙对入渗的影响较大,这些性质的变化与根系有密不可分的关系。本研究得出,粗根系与土壤容重、非毛管孔隙度呈负相关关系,即粗根系含量越多,容重和非毛管孔隙度越小,导致其渗透速率也越小。有的学者认为,土壤渗透性取决于非毛管

空隙的质和量的结论相一致<sup>[23]</sup>,细根和中根含量与毛管孔隙度和渗透速率呈正相关关系,与排水能力呈负相关关系,这与阿茹·苏里坦等<sup>[6]</sup>对天山林区不同群落土壤入渗特征的研究得出,天然冷杉林的土壤入渗速率快与错综复杂的根系分布使得土壤松动有关的结果有部分一致。

## 参考文献:

- [1] 李志军,赵海清,冯恩民,等. 北极夏季海冰表面积雪层内水分含量的时空分布[J]. 水科学进展,2007(1):24-28.  
LI Z J,ZHAO H Q,FENG E M,*et al.* Time-space distribution of water content in the snow on Arctic sea ice surface in summer[J]. Advances in Water Science,2007(1):24-28. (in Chinese)
- [2] 张治伟,朱章雄,王燕,等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 农业工程学报,2010,26(6):71-76.  
ZNGHA Z W,ZHU Z X,WANG Y,*et al.* Soil infiltration capacity and its influencing factors of different land use types in Karst slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(6):71-76. (in Chinese)
- [3] 霍小鹏,李贤伟,张健,等. 川西亚高山暗针叶林土壤渗透性能研究[J]. 水土保持研究,2009,16(3):192-195.  
HUO X P,LI X W,ZHANG J,*et al.* Soil permeability capability of subalpine coniferous forests in Western Sichuan, China [J]. Research of Soil and Water Conservation,2009,16(3):192-195. (in Chinese)
- [4] 刘道平,陈三雄,张金池,等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报,2007,18(3):493-498.  
LIU D P,CHEN S X,ZHANG J C,*et al.* Soil infiltration characteristics under main vegetation types in Anji county of Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(3):493-498. (in Chinese)
- [5] 姚淑霞,赵传成,张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究[J]. 土壤学报,2013,50(3):469-477.  
YAO S X,ZHAO C C,ZHANG T H. A comparison of soil saturated hydraulic conductivity(kfs) in different horqin sand land [J]. Acta Pedologica Sinica,2013,50(3):469-477. (in Chinese)
- [6] 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.  
Aru S L T,CHANG S L,ZHANG Y T. Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(24):9111-9118. (in Chinese)
- [7] 赵景波,陈颖,曹军骥,等. 青海湖西北部土壤入渗规律研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2011,39(3):90-96.  
ZHAO J B,CHEN Y,CAO J J,*et al.* Study on the soil infiltration rule in the northwest of Qinghai lake [J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition,2011,39(3):90-96. (in Chinese)
- [8] 刘春利,邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响[J]. 应用生态学报,2008

- (11):2400-2407.
- LIU C L, SHAO M A. Soil hydraulic properties and their influences on soil water content under different land uses in Liudaogou watershed of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008(11):2400-2407. (in Chinese)
- [9] 冯宜明, 陈学龙, 齐瑞, 等. 甘肃亚高山云杉人工林下植物种群生态位特征[J]. 草业科学, 2018, 35(4):807-815.
- FENG Y M, CHEN X L, QI R, *et al.* Niche characteristics of the primary understory populations of a *Picea asperata* plantation in the subalpine region of Gansu Province[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(4):807-815. (in Chinese)
- [10] KOSTIAKOV A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [C]. Transactions of 6th Committee Internation Society of Soil Science. Russiam; Society of Soil Science, 1932:17-21.
- [11] HORTON R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1940, 5(3):399-417.
- [12] PHILIP J R. The theory of infiltration:4. sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Sci. , 1957, 84(3):257-264.
- [13] 孙艳红, 张洪江, 杜士才, 等. 四面山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5):109-112.
- SUN Y H, ZHANG H J, DU S C, *et al.* Soil Characteristics and water conservation function of different forest types in Simian mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5):109-112. (in Chinese)
- [14] 陈孙华. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤水文特征[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2):48-52.
- CHEN S H. Soil Hydrological properties in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(2):48-52. (in Chinese)
- [15] 王飞, 杨永红, 齐瑞, 等. 白龙江上游不同海拔梯度灌丛土壤渗透性能分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(6):96-100, 124.
- WANG F, YANG Y H, QI R, *et al.* Study on soil permeability of different altitude gradient in the upper analysis of Bailong river[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(6):96-100, 124. (in Chinese)
- [16] 牛云, 刘贤德, 张虎, 等. 祁连山水源涵养林土壤渗透功能的分析与评价[J]. 西北林学院学报, 2001, 15(Supp. 1):35-38.
- NIU Y, LIU X D, ZHANG H, *et al.* Analysis and evaluation on permeability function of soil of water of resource conservation forest in Qilian Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2001, 15(Supp. 1):35-38. (in Chinese)
- [17] 李海防, 王金叶, 刘兴伟, 等. 广西猫儿山主要林型水源涵养功能研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1):50-53.
- LI H F, WANG J Y, LIU X W, *et al.* Evaluation on water conservation function of typical forest ecosystems in maier mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1):50-53. (in Chinese)
- [18] LI B, GAO J, WANG X, *et al.* Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation in Yanchi Ningxia 'Maowusu desert' China[J]. Int. J. Sediment Res. , 2016, 31(4):311-323.
- [19] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄丘区自然草地对坡面土壤入渗的影响机制[J]. 人民黄河, 2017, 39(6):82-85.
- LI K, YAO W Y, XIAO P Q, *et al.* Effects of vegetation on slope soil infiltration in the Loess Hilly region[J]. Yellow River, 2017, 39(6):82-85. (in Chinese)
- [20] 刘芝芹, 郎南军, 彭明俊, 等. 金沙江流域典型森林土壤水分入渗特征试验研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2):43-47.
- LIU Z Q, LANG N J, PENG M J, *et al.* Infiltration characteristics of different forest soils in Jingsha river basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(2):43-47. (in Chinese)
- [21] 吕刚, 翟景轩, 李叶鑫, 等. 辽西北风沙地不同植物群落土壤入渗特性[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4):133-139.
- LÜ G, ZHAI J X, LI Y X, *et al.* Soil infiltration characteristics of different plant community in sandy land of Northwestern Liaoning[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4):133-139. (in Chinese)
- [22] 徐勤学, 李春茂, 陈洪松, 等. 喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8):124-131.
- [23] 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[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2):1-5.