

DOI: 10.5846/stxb201810072160

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.生态学报,2019,39(24):9111-9118.

Aru SULTAN, 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. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9111-9118.

天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟

阿茹·苏里坦¹, 常顺利^{1,*}, 张毓涛²

1 新疆大学资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

2 新疆林科院森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063

摘要: 土壤入渗特性是影响森林生态水文过程的一个重要环节。为了比较不同群落类型土壤水分入渗特性的差异,在天山中段北坡林区利用环刀法测定天然林、人工林、林窗草地、草地、林缘灌木林、山前灌木林六种群落类型的森林土壤入渗过程,对比分析有机质含量、毛管孔隙度、容重、含水率等土壤理化性质对入渗过程的影响,用三种常用模型进行入渗过程模拟,分析比较这些模型在天山林区的适宜性。结果表明:(1)六种主要群落类型前 60 min 土壤初始入渗率介于 2.63—9.00 mm/min 之间,稳定入渗率介于 0.85—5.12 mm/min 之间,不同群落类型土壤平均入渗率从大到小的排序为:天然林>林缘灌木>林窗草地>草地>人工林>山前灌木;(2)六种群落类型土壤入渗性能均具有初渗速率>平均入渗速率>稳定入渗速率的相同趋势;(3)Kostiakov 模型对试验六种群落类型土壤入渗过程的拟合精度比较高,适用于描述本研究区域水源涵养林地土壤入渗特征;(4)土壤有机质含量与土壤入渗速率呈正相关,且与初始入渗率达到显著水平;土壤的含水率、土壤毛管孔隙度和土壤容重与土壤入渗能力呈现显著的负相关。通过观测与模拟不同群落类型的土壤水分运动过程,本文为天山林区生态水文长期定位观测提供有益借鉴。

关键词: 土壤入渗;入渗模型;稳定入渗率;云杉森林;天山

Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains, China

Aru SULTAN¹, CHANG Shunli^{1,*}, ZHANG Yutao²

1 Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China

Abstract: Soil infiltration characteristic is an important link that affects forest ecological hydrological processes. To compare differences in soil-water infiltration characteristics of different community types, the double cutting ring method was used to analyse natural forests, Artificial forest, gap grasslands, grasslands, forest edge shrubs, and piedmont shrubs on the northern slope of the Tianshan Mountains. The effects of soil physical and chemical properties, such as organic matter content, capillary porosity, bulk density, and water content, on the infiltration process were compared and analysed. Thress common models were used to simulate the infiltration process, and the suitability of these models in the area was analysed and compared. The results were as follows: (1) The initial infiltration rate of the soil in the first 60 min in the six main community types was 2.63—9.00 mm/min, and the stable infiltration rate was 0.85—5.12 mm/min. The average soil infiltration rate of the different community types ranged from high to low as follows: natural forest > forest edge shrub > gap

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1503187);“十二五”农村领域国家科技计划课题(2015BAD07B03-03)

收稿日期: 2018-10-07; **网络出版日期:** 2019-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecocsl@163.com

grassland > grassland > artificial forest > piedmont shrub. (2) The soil infiltration performance of the six community types showed the same trend: initial infiltration rate > average infiltration rate > stable infiltration rate. (3) The Kostiakov model had a high fitting precision for the soil infiltration process of the six community types and was suitable for describing the soil infiltration characteristics of the water conservation forests in this study area. (4) The soil organic matter content was positively correlated with the soil infiltration rate and reached a significant level with initial infiltration rate; the soil-water content, soil capillary porosity, and soil bulk density were significantly negatively correlated with soil infiltration capacity. Observation and simulation of the soil-water movement process of different community types can provide a useful reference for the long-term observation of ecological hydrology in the forest areas of Tianshan.

Key Words: soil infiltration; infiltration model; stable infiltration rate; spruce forest; Tianshan Mountains

土壤水分入渗是降水、地表水、土壤水与地下水之间互相转化过程的重要一环^[1],也是大气降水入渗补给浅层地下水的唯一途径^[2]。土壤入渗性能是土壤重要的物理性质,反映了土壤涵养水源和抗侵蚀的能力,是影响土壤侵蚀与地表径流的重要因素^[3]。林区土壤的质地、容重、含水率、土壤孔隙度、盐分含量等理化性质受到群落类型变化等因素的影响,进而对水分入渗过程产生不同程度的影响^[4-5]。土壤的水分入渗贯穿森林生态系统水分循环的整个环节,对森林植被的水文生态构成直接影响^[6]。

不同群落类型土壤有机质含量或肥力等土壤理化性质有差异,对入渗性能就具有不同程度的影响^[7-8]。土壤累积入渗量与初始含水量之间的关系会受到土壤质地的影响^[9],不同的土壤结构必定导致土壤储水能力及入渗特性存在差异。关于初始含水率对入渗过程的影响,大多是假定在含水率分布均匀的前提下研究其对入渗速率的影响^[10]。对入渗过程的定量描述与模拟迄今还没得到统一和普遍适用,目前主流的土壤入渗模型有物理模型 Green-Ampt 模型和 Phillip 模型、经验模型 Kostiakov 模型和 Horton 模型^[3]。因植被、土壤类型存在差异,不同区域适宜的拟合模型也不尽相同;而合适的土壤入渗模型则是实现水源护林保水功能的重要手段。环刀法是室内监测土壤入渗速率的常用实验方法,同径流—入流—产流法和双环法相比较,更为简便,同时更易监控和观测渗水后各阶段的入渗特征及土壤结构的变化^[11]。

天山中山带的雪岭云杉森林是我国干旱区重要的水源涵养林区,干旱区由于土壤发育过程受风沙、放牧及河水泛滥淤积等多重因素的影响,导致其土壤复杂多样^[12]。现阶段对天山林区土壤入渗特性的了解还非常不充分。天山林区不同群落类型的土壤入渗特性是否存在差异,而其中哪些因素影响天山林区土壤入渗过程,哪种模型能够较好的模拟该区土壤入渗过程?这些基础问题都尚未得到回答和解决。本文采用环刀法,分析天山中段北坡林区各群落类型土壤水分入渗性能的变化规律,探讨土壤容重、含水率、土壤有机质等基础因素对土壤入渗过程的影响,对三种模型模拟结果进行对比分析,以期能够回答上述问题。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本试验选择了中国森林生态系统研究网络(CFERN)天山森林生态系统定位站研究站(87°07'—87°28'E, 43°14'—43°26'N)为试验站点。地处天山北坡乌鲁木齐县板房沟林场,海拔 1800—2800 m,具有温带大陆性气候特征,年平均气温为 2—3℃,年总辐射量达 $5.85 \times 10^5 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{a}$,年降水量 400—600 mm,最大积雪深度为 65 cm^[13],该区植被类型以天山云杉(*Picea Schrenkiana*)纯林为主的温带针叶林,林缘、林窗及林下的乔木主要有密叶杨(*Populus talassica*)和天山花楸(*Sorbus tianschanica*)、天山桦(*Betula tianschanica*)等,灌木主要有栒子(*Cotoneaster melanocarpus*)、小檗(*Berberis heteropoda*)、蔷薇(*Rosa spinosissima*)、绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、方枝柏(*Juniperus pseudosabina*)、锦鸡儿(*Caragana leucophloea*)和忍冬(*Lonicera hispidula*)等,林下土壤类型为山地灰褐色森林土^[14]。试验六种群落类型样地基础信息如表 1 所示。

表 1 森林样地特征					
Table 1 Summary of experimental forest plot characteristics					
群落类型 Community type	坡向 Aspect	坡度 Slope	海拔 Altitude/m	平均郁闭度 Average canopy density	干扰历史 Disturbance history
人工林 Artificial forest	半阳坡	5°	1960	0.7	人为干扰
山前灌木林 Piedmont shrub	阳坡	18°	1958	0.4	采伐干扰
林缘灌木林 Forest edge shrub	阳坡	20°	1944	0.4	采伐干扰
草地 Grassland	半阳坡	14°	1950	—	人为践踏干扰
林窗草地 Gap grassland	阳坡	17°	1958	—	林冠空隙干扰
天然林 Natural forest	阳坡	20°	1958	0.5	1950 年前有较为频繁的火灾干扰

1.2 取样与入渗监测方法

在试验区内,依据群落类型的不同,设立天然林、人工林、林窗草地、草地、林缘灌木林、山前灌木林六种森林土壤类型样地,每种群落类型下布设两个样地,共计 12 块试验样地。其中,天然林和人工林均为云杉林。每个样地随机选取 3 个土壤剖面进行取样调查,以 0—20、20—40、40—60 cm 分三层取土样,每层使用环刀(100 cm³)取原状土样,带回实验室作为土壤理化性质的测定与分析。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,重铬酸钾法测定土壤有机质含量^[15],统计数据时每层取 3 个重复样的均值。样地基本理化性质见表 2。

表 2 试验区土壤理化性质							
Table 2 Basic physical and chemical properties of the soil in the study area							
群落类型 Community type	土层 Soil depth/cm	容重 Bulk density/(g/cm ³)	毛管持水量 Capillary water-storage capacity/%	土壤含水率 Soil moisture/%	最大持水量 Maximum water-storage capacity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	有机质含量 Organic matter content/(g/kg)
人工林 Artificial forest	0—20	0.78	31.78	12.76	42.60	24.84	30.35
	20—40	0.81	31.45	12.69	41.47	25.40	21.11
	40—60	0.93	28.50	11.33	38.48	26.61	19.35
山前灌木林 Piedmont shrub	0—20	0.78	37.64	13.76	46.49	29.51	45.73
	20—40	0.78	34.21	11.04	45.02	26.44	27.27
	40—60	0.85	33.18	12.52	43.43	28.00	26.11
林缘灌木林 Forest edge shrub	0—20	0.67	34.83	11.79	43.46	23.58	27.42
	20—40	0.81	35.86	10.85	47.03	28.93	17.60
	40—60	0.84	29.55	11.06	39.59	24.49	16.62
草地 Grassland	0—20	0.65	39.45	11.88	52.01	25.58	54.21
	20—40	0.69	38.78	12.08	52.05	26.79	35.18
	40—60	0.79	35.60	11.68	45.97	28.41	13.20
林窗草地 Gap grassland	0—20	0.55	36.03	20.93	51.19	21.01	43.10
	20—40	0.93	31.14	19.41	40.81	28.53	32.98
	40—60	0.98	25.51	18.91	35.73	24.78	15.83
天然林 Natural forest	0—20	0.66	41.03	17.09	57.10	26.78	125.78
	20—40	0.76	35.95	13.49	49.41	27.12	88.84
	40—60	0.77	31.59	14.48	45.46	24.36	50.14

此次试验采用环刀法测定土壤的水分入渗速率。用环刀(高 5.1 cm,体积 100 cm³)分别取 0—20、20—40、40—60 cm 三层的自然状态土样至室内。尽快取掉上下盖,在环刀上方反套一个空环刀,严防接口处漏水,之后将粘合的环刀放到玻璃漏斗上,漏斗下方放置一个空烧杯。实验开始之前向上部的空环刀加水,保持

水面比上部的环刀口低 1 mm,即水层厚度保持在 5 cm。自水分穿透下部环刀,土壤开始向外滴出第一滴水的时刻开始试验计时,前 5 min 内,每分钟更换一次烧杯,并用量筒测量下渗水的体积。此后每隔 5 min 更换一次烧杯。即整个试验过程中的时间序列为:1 min、2 min、3 min、4 min、5 min、10 min、15 min、20 min……,分别记录时间 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_n 。试验过程中要及时向上部环刀内加水,使上部的环刀水面一直保持在 5 cm 高度。试验进行到连续 3 次更换的烧杯内水量相同时,可以视为达到稳定状态,并停止本轮试验。每个样地,土壤入渗过程重复测定三次。

入渗性能是用来描述土壤入渗快慢的土壤物理特征参数,通常使用初始渗透速率、平均渗透速率、稳定渗透速率和渗透总量 4 个入渗指标进行分析评价。其中初始渗透速率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间,本试验取前 3 min 的平均入渗率作为初始渗透速率;平均渗透速率=达到稳渗时的渗透总量/达到稳渗所用时间;稳定入渗速率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率;渗透总量是一定时间内的累计入渗总量。

1.3 入渗模型

林地坡面土壤水分入渗通常属于非饱和水分运动,所以,即便是在最简单边界条件下,严密解析土壤水分运动基本方程十分困难。所以,依据模型是否具有明确的物理意义,将其分为两类,一类是经验模型如 Kostiakov 模型,另一类物理模型有 Horton 方程和 Philip 入渗方程。入渗模型分别是:

(1) Kostiakov 入渗模型^[16]

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

式中: $I(t)$ 为入渗率,mm/min; t 为入渗时间,min; a 和 b 为模型的参数。

(2) Horton 入渗模型^[17]

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

式中: $I(t)$ 为入渗率,mm/min; I_i 为初始入渗率,mm/min; I_f 为稳定入渗率,mm/min; c 为模型的参数。

(3) Philip 模型^[18]

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

式中, $I(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); A 为稳定入渗率(mm/min); B 为模型的参数。

1.4 数据分析方法

采用 SPSS 19.0 和 Origin 9.0 进行土壤入渗过程模拟与作图。

2 结果分析

2.1 土壤入渗过程与特征

不同群落类型土壤入渗特征指标如表 3 所示,不同群落类型的土壤入渗指标大小均具一定差异。其中,天然林、人工林、林窗草地、草地、林缘灌木林、山前灌木林的初始渗透速率分别为 9.00、2.63、3.96、3.58、5.41、2.67mm/min;而稳定入渗速率分别为 5.12、2.19、1.95、1.40、1.70、0.85mm/min;平均入渗速率分别为 6.50、

表 3 不同群落类型土壤入渗特征指标

Table 3 The characteristic indices of soil infiltration of different community type

群落类型 Community type	初渗速率 Initial infiltration rate/(mm/min)	稳渗速率 Stable infiltration rate/(mm/min)	平均渗透速率 Mean infiltration rate/(mm/min)	渗透总量 Accumulative infiltration/mm
天然林 Natural forest	9.00	5.12	6.50	780
人工林 Artificial forest	2.63	2.19	2.49	298.8
林窗草地 Gap grassland	3.96	1.95	2.74	328.8
草地 Grassland	3.58	1.40	2.53	303.6
林缘灌木林 Forest edge shrub	5.41	1.70	3.20	384
山前灌木林 Piedmont shrub	2.67	0.85	1.55	186

2.49、2.74、2.53、3.20、1.55 mm/min。天然林无论是初渗速率、稳渗速率还是平均渗透速率都大于其他五种群落类型。人工林初渗速率最小,但是稳定入渗率仅次于天然林。稳渗速率、平均入渗速率和渗透总量的最小值均出现在山前灌木;天然林在相同时间内的渗透总量是山前灌木渗透总量的 4 倍,而初渗速率是山前灌木林的 3 倍。

土壤入渗速率随时间变化过程如图 1 所示。不同群落类型的土壤入渗过程有较大差异,但都表现出初渗速率>平均渗透速率>稳渗速率的相同趋势。六种不同群落类型的森林土壤,入渗开始初期渗透速率较高,而后随着时间的推移,逐渐降低,最终稳定在一个固定的水平上,即达到稳定入渗阶段。其中,天然林在整个实验过程中的渗透速率整体明显大于其他五种群落类型,且渗透速率随时间递减速率最快。而山前灌木林的渗透速率则明显小于其他五种群落类型。

2.2 土壤入渗过程的拟合与对比分析

采用实测的土壤入渗数据与 3 种模型进行拟合,得出了不同模型的模拟精度和参数估计值见表 4。

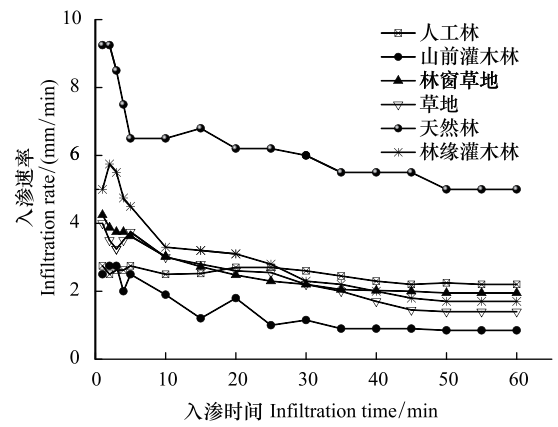


图 1 不同群落类型土壤渗透过程曲线
Fig.1 The soil infiltration process of different community type

表 4 入渗模型中参数的回归分析结果
Table 4 Regression results of model parameters

群落类型 Community type	考斯加可夫方程 Kostiakov model $I(t) = at^{-b}$			霍顿方程 Horton model $I(t) = I_f + (I_i - I_f)e^{-ct}$				菲利普方程 Philip model $I(t) = A + Bt^{-0.5}$		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>I_f</i>	<i>I_i - I_f</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R</i> ²
天然林 Natural forest	9.53	0.15	0.92	5.12	3.88	0.05	0.89	5.12	0.81	0.57
人工林 Artificial forest	2.79	0.04	0.48	2.19	0.44	0.06	0.72	2.19	0.04	0.81
林窗草地 Gap grassland	4.72	0.22	0.97	1.95	2.01	0.08	0.90	1.95	0.16	0.87
草地 Grassland	4.8	0.27	0.83	1.40	2.18	0.06	0.79	1.40	0.31	0.73
林缘灌木林 Forest edge shrub	6.94	0.33	0.92	1.70	3.71	0.05	0.89	1.70	1.228	0.58
山前灌木林 Piedmont shrub	3.99	0.39	0.91	0.85	1.82	0.07	0.94	0.85	0.13	0.86

*R*² 为判定系数

由表 4 可以看出,不同的方程对于不同群落土壤入渗过程的模拟精度均有所差异。

Kostiakov 入渗模型中,*a* 为经验入渗常数,即第一个单位时段内的平均入渗速率,*a* 值的大小主要受土壤结构、孔隙度和非毛管孔隙度等多种因素的影响;*b* 值的大小可以表明入渗速率随时间减小的程度,*b* 值越大,则入渗速率随时间减小的程度越快。由表 3 可知,Kostiakov 方程拟合的参数 *a* 值介于 2.79 与 9.53 之间,其中天然林的 *a* 值最大,与天然林初始入渗率最大的规律相一致。*a* 值在人工林和山前灌木林均小于其他群落类型。*b* 值在山前灌木林和林缘灌木林较大,说明山前灌木林和林缘灌木林入渗速率随时间递减速率较快。

在 Horton 入渗方程中,将实测的稳定入渗率代入,拟合得到天然林、人工林、林窗草地、草地、林缘灌木林、山前灌木林的初始入渗率分别为 8.46、2.56、3.53、3.22、4.89、2.36 mm/min,与实测值相差 0.07—0.54 mm/min。

Philip 方程中 *A* 为稳渗速率,将各处理 *A* 值带入求得参数 *B*,*B* 值在 0.04—1.228 之间,它在一定程度上反映了初始入渗率的大小。*B* 值最小出现在人工林中,这与表 2 实测人工林初始入渗率最小的结果相一致。

不同模型对入渗过程的拟合效果可以用回归方程的判定系数 *R*² 表示,*R*² 越大,则拟合效果越好。由表 2

中拟合结果可以看出 Kostiakov 模型判定系数在 0.48 和 0.97 之间,人工林拟合判定系数最小。在 Horton 模型中,判定系数除人工林与草地外,也都接近或者超过 0.90;Philip 模型判定系数介于 0.57 与 0.86 之间,适宜性较差。

2.3 入渗速率影响因子分析

土壤是多孔介质,当水分在这其中运动时,入渗状况必定会受到土壤孔隙度、初始含水量、土壤质地、有机质含量、土壤团聚体的水稳性等土壤物理和生物化学特性的影响^[19-20]。因此,表 5 在 SPSS 软件中对土壤入渗特征与影响土壤入渗的直接和间接因素进行了相关分析。

表 5 土壤入渗速率与各影响因子的相关分析

Table 5 Correlations between soil infiltration rate and different influencing factors

	有机质含量 Organic matter content/(g/kg)	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	土壤含水率 Soil moisture/%
初始入渗率 Initial infiltration rate	0.743 **	-0.731 **	-0.776 *	-0.566
稳定入渗率 Stable infiltration rate	0.411	-0.521	-0.643	-0.423
平均入渗率 Average infiltration rate	0.371	-0.714 *	-0.512	-0.417

*, ** 分别表示相关系数达 0.05, 0.01 显著水平

土壤有机质含量与土壤入渗速率呈正相关,且与初始入渗率达到显著水平。土壤容重与土壤入渗能力呈现显著的负相关。土壤毛管孔隙度与土壤入渗速率呈现负相关,且与初始入渗率和平均入渗率显著负相关。土壤的含水率与入渗过程呈现负相关,土壤初始含水量越大,则初始入渗率越低。也可以说,在土壤结构相同的情况下,土壤入渗率与土壤含水量呈现反比关系,随土壤含水量的增加而递减,直至稳定入渗。

3 讨论与结论

3.1 入渗过程及影响因素分析

土壤水分渗入过程是水分在分子力、毛管力和重力的综合作用下在土壤中运动的物理过程,入渗按土壤水分受力情况及运行特征可分为 3 个阶段:渗润阶段、渗漏阶段和渗透阶段^[21]。渗润阶段水分主要受分子力作用,被土壤颗粒吸附而形成薄膜水,对于干燥的土壤,该阶段入渗率明显大于其他阶段;渗漏阶段下渗水主要受到重力和毛细管引力,该阶段土壤水主要在土壤颗粒间的孔隙移动,并开始充填孔隙,直至充满水,此阶段下渗速率迅速递减;渗透阶段土壤孔隙已被水充满达到饱和,水分在重力作用下移动,属于饱和水流运动,水分入渗率维持稳定。这也就是不同群落类型的土壤入渗过程存在差异,但是都具有初渗速率>平均入渗速率>稳定入渗速率的相同趋势的原因。

在天山森林北坡六种不同群落类型土壤入渗性能研究过程中,由图 1 和表 3 可知,天然林的四项入渗指标(初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率和渗透总量)均大于其他五种群落类型。主要原因可能是天然云杉林的植被盖度较大,错综分部的根系使板结的土壤产生松动,改善土壤结构,从而加快了土壤水分入渗的过程。同时,根系的衰亡将会为土壤提供有机质,促进土壤中团聚体的形成,进而增强了土壤的渗透性。对青海湖周边土壤入渗性能的研究结果表明,低草地的稳定入渗速率明显小于高草地,认为高草地根系发育深度远大于低草地是造成这种现象的关键因素^[22]。人工林的渗透性能较天然林低下的原因,除了其改善林地能力和生产力弱,种植密度过大的原因以外;也同本地的封山育林措施不到位有极大的关系。

一般认为,土壤的表层初始入渗率与超渗产流密切相关^[23],平均入渗速率则可较好的表征土壤的渗透性能^[24]。土壤入渗速率高的群落类型,在缓解地表径流产生、减少径流产生的规模与缩减径流持续时间等多方面效果显著;同时,森林土壤发育程度越高,土壤物理条件越有优势,抗侵蚀能力越强,是研究区最为稳定的土壤生态系统。所以可以断言,天然林是该试验区土壤发育程度最高,最为稳定的生态系统。

针对各种不同土壤类型的入渗规律进行的模拟研究中,对不同模型的模拟精度评价不尽相同。Kostiakov

入渗模型中, b 值在山前灌木林最大, 说明山前灌木林随时间减少速率最快。这可能同润湿阶段下土壤结构变化有关^[25], 对金沙江流域森林土壤入渗特征研究中^[26], 也得出 Kostikov 模型拟合效果比 Horton 模型和 Philip 模型拟合效果好的结论。Kostikov 模型是所有入渗公式中最简单的, 属于经验性公式, 适用于入渗率较高的情况。

群落类型不同的情况下, 土壤理化特性也存在相应差异, 直接或间接影响着土壤入渗性能。土壤孔隙, 尤其是非毛管孔隙的特性和数量对入渗的影响较大, 而土壤的孔隙状况又同土壤质地、土壤结构和以及腐殖质等基本性质密切相关。土壤中的有机质在矿化的过程中能够释放大量的营养物质, 改善孔隙状况从而间接影响土壤入渗性能。作为间接影响因子, 通常认为土壤有机质是通过促进团聚体的形成而间接影响土壤渗透性能^[27]。

土壤容重是土壤紧实度与气相比的间接反映, 决定着土壤的紧实和松散程度。土壤入渗也可认为是水分在土体孔隙管道内流动并且不断深入的过程, 所以容重会对土壤水分入渗产生较大的影响。土壤容重越大, 土壤孔隙越小, 则通气性越差, 土壤入渗能力相应的也就降低^[28-29]。由表 2 可知, 天然林的容重明显小于其他群落类型土壤容重, 说明天然林土壤水分下渗能力较好, 这与本文先前的论述一致。

土壤含水量对入渗率有两方面的影响, 一方面是入渗前土壤初始含水量对入渗率的影响, 另一方面则是入渗过程中土壤含水量发生变化, 会致使入渗率发生变化^[30]。

研究不同森林群落植被与入渗产流之间的关系, 大多是从土壤的理化性质方面进行参数比对来判定其土壤的入渗性能, 但是对于不同群落植被作用下土壤入渗能力的演变过程及其规律缺少全面的定量研究。特别是对于降雨机制下不同植被类型的坡面土壤水分运动及入渗速率变化的过程特征、水分再分配等多种过程还有待深入研究^[31]。

3.2 结论

通过环刀法对天山林区天然林、人工林、林窗草地、草地、林缘灌木林、山前灌木林六种森林群落类型的土壤入渗过程进行观测, 分析有机质含量、毛管孔隙度、容重、土壤含水率对土壤入渗性能的影响, 评价常用三种入渗模型的适宜性。

由分析可见, 本研究区不同群落类型土壤土壤性质与发育程度差异很大, 森林水源涵养功能主要靠土壤与森林共同发挥作用, 所以只有同时具备优良的森林植被和深厚的土壤, 长效且有效地改善土壤入渗性能, 才能具有丰富的水文生态功能和较高的水文生态效益。

参考文献 (References):

- [1] 魏俊岭, 金友前, 郜红建, 常江, 章力干. 施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 965-971.
- [2] 李志军, 赵海清, 冯恩民, Cheng Bin, 卢鹏. 北极夏季海冰表面积雪层内水分含量的时空分布. 水科学进展, 2007, 18(1): 24-28.
- [3] 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.
- [4] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190.
- [5] Huang M B, Elshorbagy A, Lee Barbour S, Zettl J, Si B C. System dynamics modeling of infiltration and drainage in layered coarse soil. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 185-197.
- [6] 杨弘, 裴铁璠. 森林流域非饱和土壤水与饱和土壤水转化研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1773-1779.
- [7] 刘道平, 陈三雄, 张金池, 谢莉, 姜姜. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性. 应用生态学报, 2007, 18(3): 493-498.
- [8] 霍小鹏, 李贤伟, 张健, 范川, 代杰, 张兴华, 张良辉. 川西亚高山暗针叶林土壤渗透性能研究. 水土保持研究, 2009, 16(3): 192-195.
- [9] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30.
- [10] 雷廷武, 毛丽丽, 张婧, 刘汗, 赵世伟. 土壤入渗测量方法. 北京: 科学出版社, 2017.
- [11] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878.
- [12] 肖庆礼, 黄明斌, 邵明安, 任利东. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布. 农业工程学报, 2014, 30(2): 124-131.
- [13] 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 仇瑶, 何平. 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素. 生态学报, 2014, 34(7): 1626-1634.
- [14] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 王文栋, 何平, 王慧杰, 谢锦. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性. 生态学报, 2015, 35

(23): 7842-7851.

- [15] 王瑞永, 刘莎莎, 王成章, 郭玉霞, 严学兵. 不同海拔高度高寒草地土壤理化指标分析. 草地学报, 2009, 17(5): 621-628.
- [16] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration//Transactions of 6th Committee International Society of Soil Science. Russian: Society of Soil Science, 1932: 17-21
- [17] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America Journal, 1940, 5(3): 399-417.
- [18] Philip J R. The Theory of infiltration; 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Science, 1957, 84(3): 257-264.
- [19] 雷廷武, 刘汗, 潘英华, 赵军, 赵世伟, 杨永辉. 坡地土壤降雨入渗性能的径流-入流-产流测量方法与模型. 中国科学 D 辑 地球科学, 2005, 35(12): 1180-1186.
- [20] 张昌顺, 范少辉, 官凤英, 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.
- [21] 周健民, 沈仁芳. 土壤学大辞典. 北京: 科学出版社, 2013.
- [22] 赵景波, 陈颖, 曹军骥, 张冲, 胡建. 青海湖西北部土壤入渗规律研究. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3): 90-96.
- [23] 许晓鸿, 王佩将, 张瑜, 崔斌, 崔海锋, 隋媛媛, 申聪颖. 吉林低山丘陵区土壤的入渗特征. 土壤通报, 2015, 46(3): 544-549.
- [24] 刘艇, 王继红. 不同植被覆盖土壤水库容特征及渗透速率. 四川农业大学学报, 2010, 28(4): 471-474, 479-479.
- [25] 陈建刚, 李启军, 侯旭峰, 张书函, 冒建华. 奶水河流域不同植被覆盖条件下土壤入渗及模型的比较分析. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 22-26.
- [26] 刘芝芹, 郎南军, 彭明俊, 温绍龙, 李甜江, 吴云飞. 金沙江流域典型森林土壤水分入渗特征试验研究. 水土保持通报, 2014, 34(2): 43-47.
- [27] Bamutaze Y, Tenywa M M, Majaliwa M J G, Vanacker V, Bagoora F, Magunda M, Obando J, Wasige J E. Infiltration characteristics of volcanic sloping soils on Mt. Elgon, Eastern Uganda. CATENA, 2010, 80(2): 122-130.
- [28] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 何淑勤, 文毅, 干晨兵. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素. 水土保持学报, 2010, 24(1): 33-36.
- [29] 刘小林, 郑子龙, 蔺岩雄, 袁一超, 孟玉珂. 甘肃小陇山林区主要林分类型土壤水分物理性质研究. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 7-11.
- [30] Al-Seekh S H, Mohammad A G. The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties. Environmental Management, 2009, 44(1): 37-45.
- [31] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 庄宁, 杨春霞, 张浩. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展. 中国水土保持, 2017, (3): 27-30.