

# 晋西黄土区不同密度刺槐林土壤入渗特征及其影响因素

王珊珊<sup>1</sup>, 毕华兴<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, 刘俊<sup>7</sup>, 崔艳红<sup>1</sup>, 侯贵荣<sup>1</sup>, 云慧雅<sup>1</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083;  
3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),  
北京 100083;5.林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学),北京 100083;  
6.北京林果业生态环境功能提升协同创新中心,北京 102206;7.国家林业和草原局华东调查规划设计院,杭州 310019)

**摘要:**为研究林分密度对土壤入渗性能的影响,以晋西黄土区5种密度(1 075,1 300,1 575,1 800,2 150株/hm<sup>2</sup>)刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)林为研究对象,采用双环入渗法测定其土壤入渗过程,并对入渗特征指标与土壤理化性质的相关性进行分析。结果表明:(1)不同密度刺槐林土壤入渗过程的变化规律一致,均经过瞬间入渗(0~5 min)、缓慢入渗(5~40 min)和稳定入渗(40 min后)阶段。(2)土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量在不同林分密度下差异显著( $P<0.05$ ),不同密度刺槐林土壤入渗能力表现为1 075~1 800株/hm<sup>2</sup>,随林分密度增大,土壤入渗能力增强,在密度>1 800株/hm<sup>2</sup>后有减弱的趋势。故从林地土壤入渗能力角度,建议今后研究区刺槐林的经营密度以1 800株/hm<sup>2</sup>为宜。(3)采用Kostiakov模型、Horton模型、Philip模型和通用经验模型对不同密度刺槐林的土壤入渗过程进行模拟,从决定系数 $R^2$ 来看,通用经验模型的 $R^2$ 最大(0.990),故拟合效果最好,可作为晋西黄土区刺槐林土壤入渗过程的预测模型。(4)土壤入渗与土壤理化性质密切相关,不同密度刺槐林的土壤入渗性能与土壤容重呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与有机质和>0.25 mm水稳性团聚体含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与孔隙状况和质量含水率也有一定正相关性。

**关键词:**晋西黄土区;土壤入渗;入渗模型;林分密度;刺槐林

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)05-0231-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.032

## Soil Infiltration Characteristics and Influencing Factors of *Robinia pseudoacacia* Linn. with Different Densities in Loess Region of Western Shanxi Province

WANG Shanshan<sup>1</sup>, BI Huaxing<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, LIU Jun<sup>7</sup>, CUI Yanhong<sup>1</sup>, HOU Guirong<sup>1</sup>, YUN Huiya<sup>1</sup>

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083; 3.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 4.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5.Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 6.Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206; 7.East China Investigation Planning and Design Institute of State Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019)

**Abstract:** In order to study the influence of stand density on soil infiltration performance, five kinds of *Robinia pseudoacacia* Linn. stands (1 075, 1 300, 1 575, 1 800, 2 150 trees/hm<sup>2</sup>) in Loess region of Western Shanxi Province were selected as the research object. The soil infiltration process was determined by double-loop infiltration method, and the correlation of infiltration characteristic index and soil physicochemical properties were also analyzed. The results showed that: (1) The process of soil infiltration in *Robinia pseudoacacia* Linn. with different densities was the same, all of them went through the stages of transient infiltration, gradual infiltration, and stable infiltration. (2) There were significant differences in initial infiltration rates,

收稿日期:2020-03-02

资助项目:国家自然科学基金项目(31971725);国家重点研发计划项目(2016YFC0501704);2019校专项“科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心”(2011协同创新中心)(PXM2019\_014207\_000099)

第一作者:王珊珊(1997-),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail:wangshanshan0809@163.com

通信作者:毕华兴(1969-),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:bhx@bjfu.edu.cn

stable infiltration rates, average infiltration rates and cumulative infiltration amount under different stand densities ( $P < 0.05$ ). With the increase of stand densities (1 075~1 800 trees/hm<sup>2</sup>), soil infiltration capability increased. After the stand density of *Robinia pseudoacacia* Linn. was more than 1 800 trees/hm<sup>2</sup>, there was a trend of weakening in soil infiltration. Therefore, it was suggested that the management density of *Robinia pseudoacacia* Linn. in Loess region of Western Shanxi Province should be 1 800 trees/hm<sup>2</sup>. (3) The soil infiltration process of *Robinia pseudoacacia* Linn. with different densities was simulated by Kostiakov model, Horton model, Philip model and Universal Empirical model. In terms of  $R^2$ , the Universal Empirical model had the largest  $R^2$  (0.990), and could be used as a predictive model for the soil infiltration process of *Robinia pseudoacacia* Linn. in Loess region of Western Shanxi Province. (4) Soil infiltration capability was negatively correlated with soil bulk density ( $P < 0.01$ ), positively correlated with organic matter and  $> 0.25$  mm water-stable aggregate ( $P < 0.01$ ), and positively correlated with pore condition and water content.

**Keywords:** loess region of western Shanxi province; soil infiltration; infiltration model; stand density; *Robinia pseudoacacia* Linn.

森林的水源涵养功能是林冠层、枯落物层和土壤层截留降水、拦蓄径流的综合体现。土壤层作为最后的作用层,其水分入渗及贮存对调节地表径流和控制土壤侵蚀的影响显著。土壤入渗是地表径流和地下径流之间分配降水或其他形式地面供水的过程<sup>[1]</sup>,是降水、地面水、土壤水和地下水之间流通、转化的重要环节<sup>[2]</sup>。入渗能力较强的土壤,可以保证较多的降水就地入渗,一方面减少地表产流产沙量,从而防止冲刷;另一方面可形成地下径流、壤中流进而补给浅层地下水,有效地减轻了水土流失<sup>[3]</sup>。因此,研究土壤入渗特征、评价土壤入渗能力对防治水土流失、提升植被涵养水源能力有重要意义。

目前国内关于土壤入渗特征及其影响因素的研究<sup>[4]</sup>比较广泛认为,土壤理化性质是影响土壤入渗的主要因素之一,土壤容重、孔隙状况、粒径组成、有机质和水稳性团聚体含量等与土壤入渗性能密切相关<sup>[5]</sup>。但大多数研究<sup>[3,5-6]</sup>主要集中在比较不同植被类型、不同土地利用方式、不同土壤类型的土壤入渗特征及其影响因素,缺乏对同一植被类型不同林分密度下的研究。林分密度是重要的林分结构因子,不同密度林分的下层植被多样性、林地土壤养分和水热状况等存在差异<sup>[7]</sup>,从而导致土壤容重、有机质等性质发生变化,进而影响土壤的入渗特性。

晋西黄土残塬沟壑区于 1992 年实施退耕还林工程,现经过 27 年的植被恢复,已经形成较为稳定的森林生态系统<sup>[8]</sup>。刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)是该区主要的造林树种,能有效减轻水土流失,改善生态环境。本文以晋西黄土区 5 种密度(1 075, 1 300, 1 575, 1 800, 2 150 株/hm<sup>2</sup>)刺槐林为研究对象,通过探讨适合描述土壤入渗过程的最佳模型,比较其土壤入渗特征及影响因素。从林地土壤入渗能力角度,尝试提出该区刺槐林经营的适宜密度,以期

为改善林分结构、实现水土保持功能导向型植被定向调控提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域,地理坐标为 110°39'45"—110°47'45"E, 36°14'27"—36°18'23"N,流域面积 40.1 km<sup>2</sup>,属于典型的黄土残塬沟壑区。该地区系暖温带大陆性季风气候,年均气温 10℃;多年平均降水量 575.9 mm,其中 6—8 月降水量约占全年的 70%;年蒸发量为 1 729 mm。土壤类型为微碱性褐土,黄土母质,土质均匀。主要乔木树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)等;灌木树种主要有黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Lindl.)、丁香(*Syringa oblata* Lindl)等;草本植物主要有茜草(*Rubia cordifolia* L.)、艾蒿(*Artemisia argyi* Lev et Van)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)等。已有研究<sup>[9]</sup>表明,该区刺槐林成林密度多介于 1 300~2 400 株/hm<sup>2</sup>。

## 2 试验方法

### 2.1 样地设置

本研究在对蔡家川流域进行大量实地踏查的基础上,以代表性和典型性为原则,选取生境相似而密度不同的刺槐林布设标准样地。样地面积为 20 m×20 m,林分密度分别为 1 075, 1 300, 1 575, 1 800, 2 150 株/hm<sup>2</sup>。在样地内进行每木检尺和基础的林分调查,并记录海拔、坡度、坡向等立地条件指标。样地基本特征见表 1。

### 2.2 土壤入渗试验方法

野外土壤入渗试验采用双环入渗法,于 2019 年 7 月生长季进行,所使用的双环规格为:内环直径 15 cm,外环直径 30 cm,环高 30 cm,厚 2 mm。每个样

地内设 3 次重复试验,分别在不同密度刺槐林坡面的上、中、下 3 个位置选取比较平整的地段,将双环垂直压入土壤表面以下 25 cm。试验开始时向内环注水用于测量土壤入渗过程,在内外环之间注水防止发生侧渗,并保持内外环中水位一致。按照先密后疏的时间原则记录入渗量,根据前人试验情况,本试验前 10

min 每隔 30 s 记数,10~30 min 每隔 1 min 记数,30~60 min 每隔 5 min 记数,60~90 min 每隔 10 min 记数,在 90 min 时结束试验。

土壤入渗性能的特征指标一般有 4 个,分别是土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量<sup>[10]</sup>。

表 1 样地基本特征

样地编号	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	林龄/ a	平均 树高/m	平均 胸径/cm	郁闭度/ %	灌木 盖度/%	草本 盖度/%	枯落物 厚度/mm
I	1075	1130	17	阳坡	16	9.48	11.90	53	23	66	16.95
II	1300	1075	23	阴坡	16	7.55	8.76	52	32	73	20.05
III	1575	950	18	阳坡	15	9.90	11.21	58	33	70	25.03
IV	1800	982	13	半阳坡	17	10.54	12.98	66	36	82	36.58
V	2150	1090	28	半阳坡	16	8.04	9.22	73	33	62	25.27

2.3 土壤理化性质测定方法

环刀浸水法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度,重复 2 次;烘干法测定土壤质量含水率,重复 3 次;重铬酸钾外加热氧化法测定土壤

有机质含量,重复 3 次;采用干筛、湿筛方法利用 8411 型电动振筛机和 XY-100 型土壤团聚体分析仪测定 >0.25 mm 水稳性团聚体含量,重复 2 次。各样地土壤理化性质见表 2。

表 2 各样地土壤理化性质

样地编号	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	质量 含水率/%	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	>0.25 mm 水稳性 团聚体/%
I	1075	1.25±0.07a	44.09±1.96c	41.41±1.82c	2.68±0.20b	7.44±0.16d	10.21±0.17c	35.45±2.93c
II	1300	1.16±0.04b	53.89±1.18a	49.89±0.59a	2.68±0.09c	11.96±0.10a	10.96±0.18b	45.39±3.49b
III	1575	1.15±0.08b	53.01±1.48ab	50.55±1.48a	3.03±0.12b	11.76±0.21b	11.52±0.12a	47.09±2.15b
IV	1800	1.11±0.05b	53.14±0.30a	50.55±0.97a	1.65±0.17d	10.00±0.16c	11.61±0.24a	56.00±2.19a
V	2150	1.13±0.03b	51.00±1.19b	46.13±1.21b	4.88±0.10a	12.12±0.23a	11.49±0.19a	47.76±1.64b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同林分密度条件下差异显著(P<0.05)。

2.4 数据分析

运用 Excel 2016 和 SPSS 24.0 进行数据处理与分析。选取 Kostikov 模型、Horton 模型、Philip 模型和通用经验模型,在 SPSS 中对不同密度刺槐林的土壤入渗过程进行拟合,4 种模型的公式及参数代表意义见参考文献[11-12]。利用 R 语言进行主成分分析,并计算不同密度刺槐林土壤入渗能力的综合得分排序。在 Origin 2017 软件中作图。

速率随时间变化急剧下降,原因是水分在分子力的作用下被土壤颗粒快速吸附,形成一定的水压导致下渗峰面迅速延伸<sup>[12]</sup>,因此该阶段为瞬间入渗阶段。5~40 min 内 5 个样地土壤入渗速率的变化趋于平缓,这是因为此阶段内水分受重力和毛细管引力作用,在土壤颗粒间运动并逐渐充填土壤孔隙,直至填满<sup>[10]</sup>,因此该阶段为缓慢入渗阶段。40 min 后 5 个样地的土壤入渗速率没有明显变化,均保持在相对固定的水平,由于土壤入渗过程发展至此,土壤孔隙已被水分充满,达到了饱和状态,此时水分在重力作用下的移动属于饱和水流运动,土壤入渗速率维持稳定<sup>[13]</sup>,故此阶段为稳定入渗阶段。

3 结果与分析

3.1 不同密度刺槐林土壤入渗特征

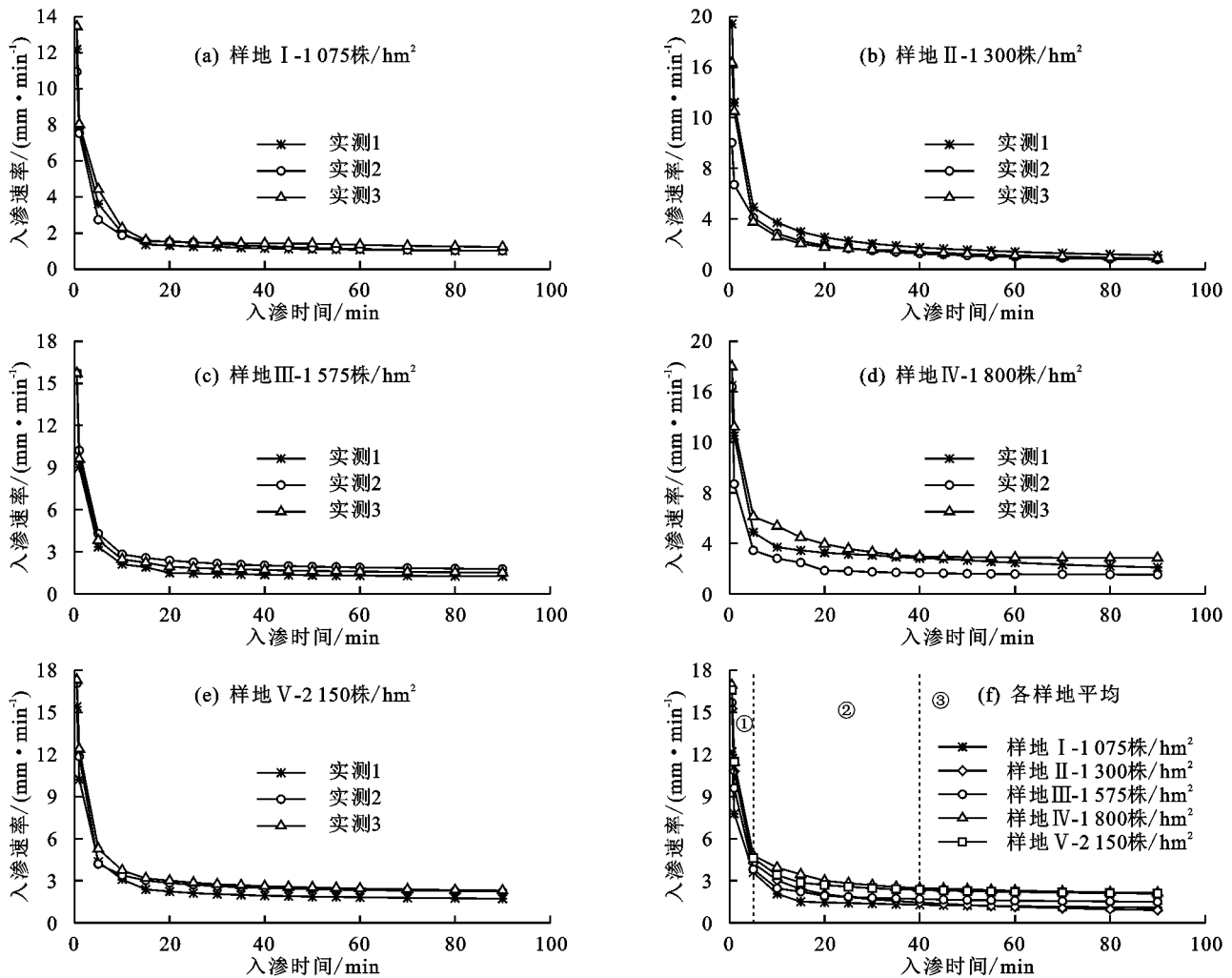
3.1.1 土壤入渗过程 土壤入渗是水分在分子力、毛管力和重力的共同作用下在土壤中运动的物理过程<sup>[13]</sup>。5 个刺槐林样地的土壤入渗过程变化曲线见图 1。不同密度刺槐林的土壤入渗过程表现出一致的变化规律,即初期入渗速率较大且变化较快,随后变化逐渐变缓,最终达到稳定状态。

3.1.2 土壤入渗特征指标分析 由图 2 可知,不同密度刺槐林的土壤初始入渗速率依次表现为 1 800 株/hm<sup>2</sup> (16.96 mm/min) > 2 150 株/hm<sup>2</sup> (16.60 mm/min) > 1 575 株/hm<sup>2</sup> (15.71 mm/min) > 1 300 株/hm<sup>2</sup> (15.27 mm/min) > 1 075 株/hm<sup>2</sup> (12.20 mm/min),最大相差 28.07%。这是因为土壤初始入渗速率与土壤容重、孔隙状况、质量含水率、有机质和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量密切相关。由表 2 可知,

由图 1 可知,根据时间变化可将刺槐林的土壤入渗过程分为瞬间入渗(0~5 min)、缓慢入渗(5~40 min)和稳定入渗(40 min 后)3 个阶段。0~5 min 是入渗过程的初始阶段,此阶段内 5 个样地的土壤入渗

密度为 1 800 株/hm<sup>2</sup>的刺槐林土壤容重较小,孔隙状况良好,土质疏松多孔,所以其土壤初始入渗速率最大;密度为 1 075 株/hm<sup>2</sup>的刺槐林土壤初始入渗速率最小可能因为其土壤较紧实黏重,质量含水率最小,且土壤团聚体结构最不稳定。不同密度刺槐林的土壤稳定入渗速率大小为 1 800 株/hm<sup>2</sup> (2.14 mm/min) > 2 150 株/hm<sup>2</sup> (2.09 mm/min) > 1 575 株/hm<sup>2</sup> (1.50 mm/min) > 1 075 株/hm<sup>2</sup> (1.09 mm/min) > 1 300 株/hm<sup>2</sup> (0.91 mm/min)

min),最大相差 57.48%。从初始入渗速率至稳定入渗速率,密度为 1 800 株/hm<sup>2</sup>的刺槐林下降幅度最小,平均下降了 7.93 倍,说明密度为 1 800 株/hm<sup>2</sup>的刺槐林对土壤的改善作用较其他密度刺槐林显著,土壤质地较好,结构较稳定,蓄水能力较强。另外,土壤平均入渗速率和累积入渗量的表现与初始入渗速率一致,均在密度为 1 800 株/hm<sup>2</sup>的刺槐林样地达到峰值,其值分别为 3.10 mm/min,256.08 mm。



注:①为瞬间入渗阶段;②为缓慢入渗阶段;③为稳定入渗阶段。

图 1 不同密度刺槐林土壤入渗过程

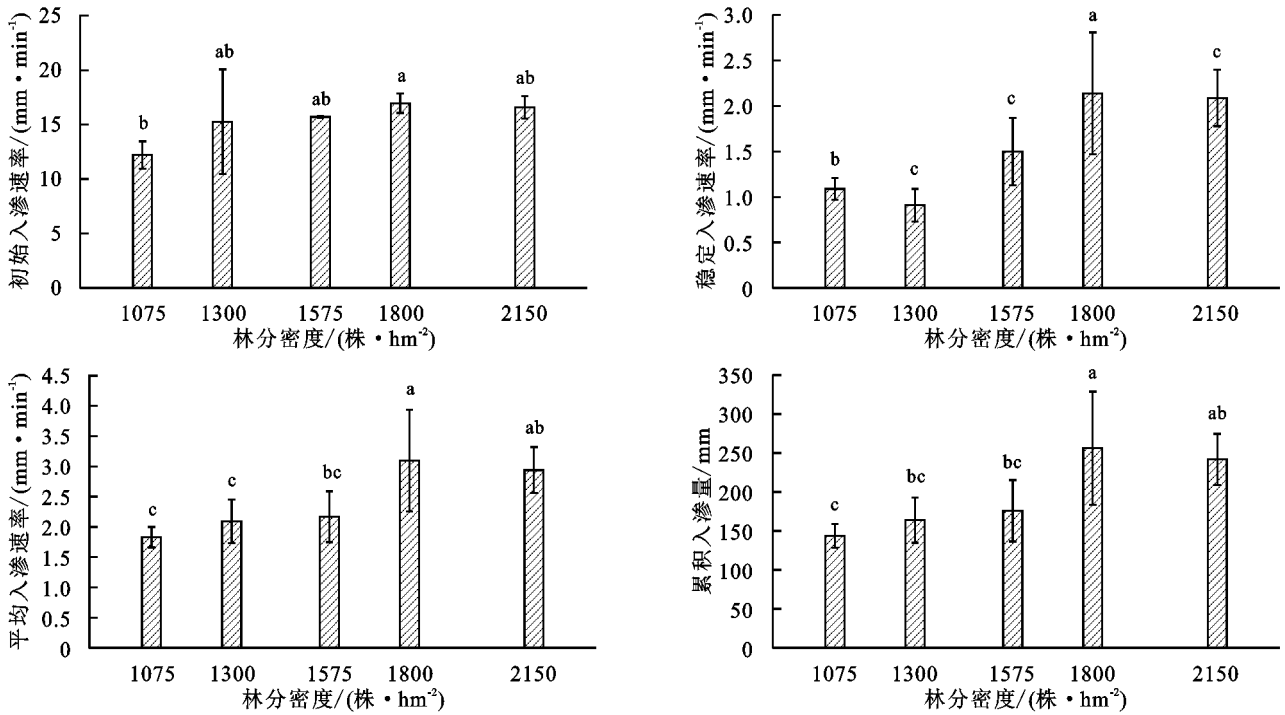
综合分析得出,随刺槐林分密度增大(1 075~2 150 株/hm<sup>2</sup>),4 个土壤入渗特征指标近似表现为先增大后减小的趋势,其值均在密度为 1 800 株/hm<sup>2</sup>时达到最大,且方差分析表明,每个指标在不同林分密度下均存在显著差异( $P < 0.05$ ),说明林分密度对林地土壤入渗特征具有一定影响。林分密度对林木生长发育有重要影响,它决定了林分的空间结构,进而影响到林内光、热、水分等环境因子的分配,使林下生境及群落结构与多样性发生变化<sup>[7]</sup>。林分密度可通过改变林内枯落物的数量和质量对土壤养分输入产生影响<sup>[14]</sup>;也会通过改变群落的生产力来决定生物量的分配格局,导致植被对土壤养分的吸收产生差异<sup>[15]</sup>,进而改变土壤养分

状况,最终对土壤入渗特征产生影响。

3.1.3 不同密度刺槐林土壤入渗能力评价 土壤入渗能力是影响土壤侵蚀的重要因子,也可作为评价植被能否充分发挥水土保持功能的重要指标<sup>[16]</sup>。为综合评价晋西黄土区不同密度刺槐林的土壤入渗能力,揭示初始入渗速率( $X_1$ )、稳定入渗速率( $X_2$ )、平均入渗速率( $X_3$ )和累积入渗量( $X_4$ )对土壤入渗能力的贡献,对 4 个土壤入渗特征指标进行主成分分析。根据主成分分析原理,提取了主成分 $P_1$ 和 $P_2$ ,主成分方程分别为:

$$P_1 = 0.465 X_1 + 0.496 X_2 + 0.518 X_3 + 0.519 X_4 \quad (1)$$

$$P_2 = 0.842 X_1 - 0.503 X_2 - 0.123 X_3 - 0.151 X_4 \quad (2)$$



注:图柱上方不同小写字母表示不同林分密度条件下差异显著( $P < 0.05$ )。

图 2 不同密度刺槐林土壤入渗特征指标

由表 3 可知,主成分 $P_1$ 的贡献率为 91.291%, $P_2$ 的贡献率为 7.265%, $P_1$ 和 $P_2$ 的累积贡献率为 98.556%,可以解释整个总方差。这说明用单一土壤入渗特征指标的大小代表入渗能力的强弱是局限的,需综合考虑初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗

速率及累积入渗量 4 个指标,才能全面地表述土壤入渗能力。由主成分分析得到的土壤入渗能力综合评价函数为:

$$P = \frac{3.652 P_1 + 0.291 P_2}{3.943} \quad (3)$$

表 3 土壤入渗能力的 PCA 分析

主成分	初始入渗速率 ( $X_1$ )	稳定入渗速率 ( $X_2$ )	平均入渗速率 ( $X_3$ )	累积入渗量 ( $X_4$ )	特征值	贡献率/%	累积 贡献率/%
$P_1$	0.465	0.496	0.518	0.519	3.652	91.291	91.291
$P_2$	0.842	-0.503	-0.123	-0.151	0.291	7.265	98.556

注: $X_i$ 为各指标的标准化数据。

为更好地比较不同密度刺槐林土壤入渗能力的强弱,通过得出的综合评价函数(公式(3)),计算各密度刺槐林土壤入渗能力得分。由表 4 可知,不同密度刺槐林的土壤入渗能力表现为 1 800 株/hm<sup>2</sup> > 2 150 株/hm<sup>2</sup> > 1 575 株/hm<sup>2</sup> > 1 300 株/hm<sup>2</sup> > 1 075 株/hm<sup>2</sup>。随刺槐林分密度增大(1 075~1 800 株/hm<sup>2</sup>),土壤入渗能力逐渐增强,在密度 > 1 800 株/hm<sup>2</sup> 后有减弱的趋势,故密度为 1 800 株/hm<sup>2</sup> 的刺槐林土壤入渗能力较强,控制土壤侵蚀和防治水土流失的效果更加明显。

### 3.2 不同密度刺槐林土壤入渗过程拟合

采用 Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型和通用经验模型与实测土壤入渗数据进行拟合,表 5 为拟合得到的参数结果和决定系数  $R^2$ 。

表 4 土壤入渗能力综合评价

样地 编号	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	$P_1$	$P_2$	$P$	排序
I	1075	-2.552	-0.793	-2.422	5
II	1300	-1.374	0.794	-1.214	4
III	1575	-0.444	0.358	-0.385	3
IV	1800	2.428	-0.162	2.237	1
V	2150	1.942	-0.197	1.784	2

注: $P$  为正数和负数分别表示高于和低于总体均值。

在 Kostiakov 模型中,参数  $a$  在数值上近似等于前 2 min 的土壤入渗速率,故  $a$  值大小与初始入渗速率呈正比<sup>[6]</sup>,不同密度刺槐林样地的  $a$  值表现为样地 V > 样地 IV > 样地 II > 样地 III > 样地 I,与实测初始入渗速率的情况不符。在 Horton 模型中,初始入渗速率( $f_0$ )表现为样地 III 最大,与实测样地 IV 最大的情况不符;稳定入渗速率( $f_c$ )表现为样地 IV 最大,其次是样地 V,样

地I最小,与实测结果偏差较小。在 Philip 模型中,土壤吸湿率  $S$  可反映土壤入渗能力的强弱,入渗能力越强的土壤, $S$  值越大<sup>[17]</sup>。由表 5 可知, $S$  值大小依次为样地V > 样地IV > 样地III > 样地II > 样地I,与实测结果偏差较小。在通用经验模型中,初始入渗速率( $a_1$ )的表现样地II最大,样地III最小,与实测样地IV最大,样地I最小的情况不符;稳定入渗速率( $b_1$ )的表现样地IV > 样地V > 样地III > 样地I > 样地II,与实测值大小顺序一致,说明偏差较小。

决定系数  $R^2$  可以用来表示不同模型对土壤入渗过程的拟合效果, $R^2$  越大,拟合效果越好<sup>[10]</sup>。Kostiakov 模型的  $R^2$  为 0.924~0.999,平均为 0.954; Horton 模型的  $R^2$  为 0.913~0.973,平均为 0.946;

Philip 模型的  $R^2$  为 0.930~0.988,平均为 0.963;通用经验模型的  $R^2$  为 0.959~0.999,平均为 0.990。4 个模型  $R^2$  的平均值均在 0.900 以上,说明拟合效果均较好,可在一定程度上反映土壤入渗规律,在实际中都有其应用价值。其中通用经验模型的  $R^2$  最大,表明通用经验模型比 Kostiakov 模型、Horton 模型和 Philip 模型更适用于模拟和预测晋西黄土区刺槐林的土壤入渗过程。通用经验模型是在对黄土高原大量野外测试资料进行分析的基础上,由 Kostiakov 模型和 Horton 模型改良而来,当  $t \rightarrow \infty$  时, $f(t)$  为稳定入渗速率,因而该模型的参数物理意义比较明确<sup>[2]</sup>,对晋西黄土区刺槐林土壤入渗的拟合效果更佳,这与陈文媛等<sup>[11]</sup>在黄土丘陵区的研究结果相似。

表 5 入渗模型拟合结果

样地 编号	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	Kostiakov 模型			Horton 模型				Philip 模型			通用经验模型			
		$a$	$b$	$R^2$	$f_0$	$f_c$	$k$	$R^2$	$S$	$A$	$R^2$	$a_1$	$b_1$	$n$	$R^2$
I	1075	8.500	0.520	0.954	12.440	1.252	0.299	0.973	16.604	0.111	0.952	8.027	0.405	0.598	0.959
II	1300	10.594	0.544	0.999	15.116	1.400	0.295	0.932	20.135	0.069	0.988	10.594	0.050	0.544	0.999
III	1575	9.732	0.505	0.924	20.414	1.767	0.719	0.953	18.273	0.199	0.930	7.941	1.350	0.861	0.998
IV	1800	11.113	0.414	0.949	18.890	2.587	0.503	0.913	20.222	0.892	0.977	9.299	1.762	0.685	0.997
V	2150	11.122	0.436	0.945	18.364	2.386	0.447	0.957	20.433	0.708	0.970	9.336	1.653	0.707	0.997

### 3.3 土壤入渗影响因素

土壤入渗可认为是水分在土壤孔隙管道内流动并不断深入的过程,因此受土壤孔隙状况影响较大,而土壤孔隙状况又是由土壤结构、质地等共同决定的。所以,本研究选取 7 个土壤理化性质指标与土壤入渗特征指标进行了相关性分析。

由表 6 可知,土壤容重和孔隙状况对土壤入渗的作用效果相反,初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量与土壤容重呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度呈正相关,但显著性不同。其中总孔隙度、毛管孔隙度与初始入渗速率的正相关性达到显著水平( $P < 0.05$ ),非毛管孔隙度与稳定入渗速率、累积入渗量的正相关性达到显著水平( $P < 0.05$ ),这与刘芝芹等<sup>[3]</sup>的研究结果相近。因为土壤容重越大,土壤越紧实,孔性越差,入渗性能越弱;容重越小,土壤越疏松,孔

性越好,入渗性能越强<sup>[18]</sup>。质量含水率只与初始入渗速率的正相关性达到显著水平( $P < 0.05$ ),与其他 3 个指标的相关性不显著( $P > 0.05$ ),这与刘目兴等<sup>[19]</sup>对不同初始含水率下黏质土壤入渗特征的部分研究结论相悖,原因可能是不同研究区的土壤质地存在较大差异。土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量与有机质和  $> 0.25$  mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。土壤团聚体是土壤结构优劣的标志之一, $> 0.25$  mm 水稳性团聚体是良好的土壤结构体,可创造良好的孔性条件<sup>[20]</sup>,有利于土壤入渗;此外,有机质则是通过促进土壤中团聚体的形成,间接地对土壤入渗产生积极的影响<sup>[21]</sup>。同时值得注意的是,除非毛管孔隙度外,其他土壤理化性质指标均与初始入渗速率达到显著相关性( $P < 0.05$ ),可见土壤理化性质对初始入渗速率的作用更明显,这也与已有学者<sup>[17,19]</sup>的研究结果一致。

表 6 土壤入渗特征指标与理化性质相关性分析

指标	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	质量含水率	有机质	>0.25 mm 水稳性团聚体
初始入渗速率	-0.727**	0.683*	0.613*	0.501	0.535*	0.769**	0.741**
稳定入渗速率	-0.729**	0.310	0.302	0.582*	0.217	0.744**	0.694**
平均入渗速率	-0.724**	0.291	0.290	0.505	0.150	0.700**	0.693**
累积入渗量	-0.807**	0.456	0.428	0.525*	0.288	0.743**	0.768**

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关(双尾)。

## 4 讨论

同一植被类型不同林分密度对土壤入渗能力有显著影响。赵小婵<sup>[16]</sup>在华北土石山区不同密度人工油松林地的研究表明,土壤入渗能力随林分密度的增大而增强( $1\ 746\ \text{株}/\text{hm}^2 > 1\ 444\ \text{株}/\text{hm}^2 > 1\ 058\ \text{株}/\text{hm}^2$ ),与本研究所得结果类似。本研究中,刺槐林的土壤入渗能力表现为随林分密度增大( $1\ 075 \sim 1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ )而逐渐增强,密度 $> 1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ 后减弱。由表1可知,刺槐林下灌木、草本和枯落物的数量随林分密度的增大近似呈先增加后减少的趋势,并在密度为 $1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ 时达到峰值,这种趋势与土壤入渗能力的表现相同,故可以以此解释不同林分密度下土壤入渗能力存在的差异。有研究<sup>[10]</sup>表明,植物根系在土壤表层错综分布,有效地改善了土壤孔隙状况,同时根系衰亡为土壤输入了有机质,促进了土壤团聚体的形成,间接提升了土壤的入渗能力。此外在一定范围内,刺槐林分密度增大导致郁闭度增大,致使林内光照减少、温度下降,有利于枯落物积累<sup>[14]</sup>,进而改善土壤养分状况,有利于土壤入渗。另外,本研究还发现,土壤入渗性能与土壤容重、孔隙状况、质量含水率、有机质和 $> 0.25\ \text{mm}$ 水稳性团聚体含量密切相关,与其他学者<sup>[5,22]</sup>的研究结果一致。由表2可知,密度为 $1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ 的刺槐林土壤容重较小,孔隙状况良好,有机质和 $> 0.25\ \text{mm}$ 水稳性团聚体含量较高,故从土壤条件的角度也可以解释土壤入渗能力较强的是密度为 $1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ 的刺槐林。除以上原因外,光照和温湿度条件、海拔、坡度、坡向等立地因子对土壤入渗也有一定影响,需进一步综合考虑。

本研究通过野外双环入渗试验,结合室内对比分析,探究了不同密度刺槐林的土壤入渗特征及其影响因素,为晋西黄土区适宜刺槐林分密度的界定提供了相应的理论基础。根据不同密度刺槐林土壤入渗特征的差异和土壤入渗能力的强弱情况,建议今后研究区刺槐林的经营密度以 $1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ 为宜,对于密度过低或过高的林分,在满足林业生产的同时,应及时地进行科学补植或间伐,以充分发挥林地的水土保持功能。因研究时间有限,本研究仅从土壤入渗能力的角度提出了研究区刺槐林经营的适宜密度,对其他因素的影响未充分考虑。今后将进一步扩大研究范围和深度,在土壤入渗能力的基础上,结合晋西黄土区土壤水分承载力、林分耗水机理、林水平衡等研究结果,全面考虑各项影响因素,提出经营刺槐林的适宜密度,为改善林分结构、实现水土保持功能导向型植被定向调控提供理论依据。

## 5 结论

(1)不同密度刺槐林土壤入渗过程的变化规律一致,均经过瞬间入渗( $0 \sim 5\ \text{min}$ )、缓慢入渗( $5 \sim 40\ \text{min}$ )和稳定入渗( $40\ \text{min}$ 后)阶段。土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量在不同林分密度下差异显著( $P < 0.05$ ),说明林分密度对林地土壤入渗特征具有一定影响,根据主成分分析得到的各密度刺槐林土壤入渗能力排序为 $1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2 > 2\ 150\ \text{株}/\text{hm}^2 > 1\ 575\ \text{株}/\text{hm}^2 > 1\ 300\ \text{株}/\text{hm}^2 > 1\ 075\ \text{株}/\text{hm}^2$ ,即随刺槐林分密度增大( $1\ 075 \sim 1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ ),土壤入渗能力逐渐增强,在密度 $> 1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ 后有减弱的趋势。因此,从林地土壤入渗能力角度,建议今后研究区刺槐林的经营密度以 $1\ 800\ \text{株}/\text{hm}^2$ 为宜。

(2)Kostiakov模型、Horton模型、Philip模型和通用经验模型对晋西黄土区刺槐林土壤入渗过程的拟合效果存在差异,从决定系数 $R^2$ 来看,通用经验模型( $R^2 = 0.990$ ) $>$ Philip模型( $R^2 = 0.963$ ) $>$ Kostiakov模型( $R^2 = 0.954$ ) $>$ Horton模型( $R^2 = 0.946$ ),表明通用经验模型更符合本研究区刺槐林土壤入渗的实际情况。

(3)土壤入渗与土壤结构和质地密切相关,整体上,土壤入渗性能与土壤容重呈极显著负相关,与有机质和 $> 0.25\ \text{mm}$ 水稳性团聚体含量呈极显著正相关,与孔隙状况和质量含水率也有一定相关性。说明土壤容重越小,孔隙状况越好,并且有机质和 $> 0.25\ \text{mm}$ 水稳性团聚体含量越高,土壤入渗性能越好。

### 参考文献:

- [1] 张洪江,王礼先.长江三峡花岗岩坡面土壤流失特性及其系统动力学仿真[M].北京:中国林业出版社,1997.
- [2] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
- [3] 刘芝芹,黄新会,王克勤.金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2014,28(2):57-62.
- [4] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等.不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J].水土保持研究,2016,23(1):13-17.
- [5] 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):1-11.
- [6] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.
- [7] 邵英男,刘延坤,李云红,等.不同林分密度长白落叶松人工林土壤养分特征[J].中南林业科技大学学报,2017,37(9):27-31.

(下转第243页)

- 质和酶活性海拔分布特征[J].水土保持学报,2019,33(2):207-213.
- [16] 车宗玺,刘贤德,车宗奇,等.祁连山青海云杉林土壤有机质及氮素的空间分布特征[J].水土保持学报,2014,28(5):164-169.
- [17] 赵维俊,刘贤德,徐丽恒,等.祁连山青海云杉林动态监测样地土壤 pH 和养分的空间异质性[J].干旱区地理,2015,38(6):1179-1189.
- [18] 张平,刘贤德,车宗玺,等.祁连山青海云杉林土壤养分异质性分析[J].干旱区地理,2012,35(4):594-598.
- [19] 王正权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:71-99.
- [20] 张敏,贺鹏飞,陈伟强.基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异分析[J].东北农业大学学报,2010,41(3):53-58.
- [21] 薛志婧,侯晓瑞,程曼,等.黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性[J].水土保持学报,2011,25(3):161-168.
- [22] 张梦薇,吕成文.丰乐河流域表层土壤有机碳空间变异特征研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(7):1576-1583.
- [23] 李莉,贾宝顺,习红昂,等.小尺度下浓香型烟区土壤微量元素的空间变异性[J].中国农学通报,2011,27(1):105-110.
- [24] 牛赟,刘贤德,赵维俊,等.祁连山青海云杉(*Picea crassifolia*)林浅层土壤碳、氮含量特征及其相互关系[J].中国沙漠,2014,34(2):371-377.
- [25] 王凤,孟浩峰,侯德明,等.黑河上游冰沟流域 3 种林地土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系[J].草业科学,2015,32(4):640-646.
- [26] 杨敏,杨飞,杨仁敏,等.祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J].土壤,2017,49(2):386-392.
- [27] 曾立雄,雷蕾,王晓荣,等.海拔梯度对祁连山青海云杉林乔木层和土壤层碳密度的影响[J].生态学报,2018,38(20):7168-7177.
- (上接第 237 页)
- [8] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363,371.
- [9] 常译方,毕华兴,许华森,等.晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):227-232.
- [10] 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):1-8.
- [11] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [12] 宋爱云,董林水,刘世荣,等.不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗特征及影响因素[J].水土保持研究,2018,25(3):41-45.
- [13] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.
- [14] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.
- [15] 刘骏,杨清培,余定坤,等.细根对竹林—阔叶林界面两侧土壤养分异质性形成的贡献[J].植物生态学报,2013,37(8):739-749.
- [16] 赵小婵.华北土石山区不同密度人工油松林地土壤水分入渗研究[D].河北保定:华北电力大学,2016.
- [17] 王琛,吴云飞,李甜江,等.金沙江不同林分的土壤入渗特征研究[J].西部林业科学,2019,48(3):69-77.
- [18] 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.
- [19] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [20] 查同刚.土壤理化分析[M].北京:中国林业出版社,2017.
- [21] Abid M, Lal R. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2):364-372.
- [22] 郑凯利,邓东周.若尔盖湿地土壤入渗性能及其影响因素[J].水土保持研究,2019,26(3):179-191.