

不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗特征及影响因素

宋爱云¹, 董林水¹, 刘世荣², 刘京涛¹

(1. 滨州学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603;

2. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘 要:对卧龙自然保护区不同海拔高度的典型亚高山草甸群落类型(嵩草草甸、狼毒草甸、糙野青茅草甸)的土壤入渗性能进行了对比研究。结果表明,亚高山草甸土壤入渗过程总体上可分为 3 个阶段,即入渗瞬变阶段(0—5 min)、入渗渐变阶段(5—30 min)和稳定入渗阶段(30 min 后)。在入渗瞬变阶段和渐变阶段,不同群落类型的入渗速率表现为嵩草草甸>狼毒草甸>糙野青茅草甸。另外,在嵩草草甸的研究表明,随着土层深度增加,土壤入渗速率呈现逐渐递减的趋势。分别运用 Philip、蒋定生、Horton、Kostiakov 4 种模型拟合了不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗过程,表明 Horton 模型的拟合精度最高。相关分析表明,亚高山草甸土壤稳渗速率与土壤容重存在极显著负相关关系,而与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤通气度以及单位面积的地上部分生物量均呈极显著正相关关系。

关键词:亚高山草甸; 群落类型; 土壤入渗; 土壤物理性质; 生物量

中图分类号: S152.72

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0041-05

Soil Infiltration Characteristics and Its Influencing Factors in Different Subalpine Meadow Communities

SONG Aiyun¹, DONG Linshui¹, LIU Shirong², LIU Jingtao¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The soil infiltration properties of three typical subalpine meadow communities under different altitudes in the Wolong Nature Reserve were examined. The three subalpine meadow communities include *Kobresia setchwanensis* meadow, *Stellera chamaejasme* meadow and *Deyeuxia scabrescens* meadow. The results showed that the process of soil infiltration in subalpine meadow could be divided into 3 stages including transient phase, gradual phase and stable phase. In the transient phase and gradual phase, the sequence of the soil infiltration rates in three different communities were *Kobresia setchwanensis* meadow>*Stellera chamaejasme* meadow>*Deyeuxia scabrescens* meadow. In addition, with increase of soil depth in the *Kobresia setchwanensis* meadow, the soil infiltration rate showed a gradually decreasing trend. The models of Philip, Jiang Dingsheng, Horton and Kostiakov were used to fit the soil infiltration processes in different subalpine meadow communities. The results showed that Horton model has the highest precision. Correlation analysis showed that the final stable soil infiltration rate had the significantly negative correlation with the soil bulk density, but the significantly positive correlation with the soil total porosity, non-capillary porosity, soil aeration and the aboveground biomass per unit area.

Keywords: subalpine meadow; community types; soil infiltration; soil physical property; biomass

土壤水分入渗性能能够决定降雨进程和再分配过程中的地表径流水平、土壤储水性能以及地下水的补给^[1-3]。土壤渗透能力主要受土壤物理性质、植被类型、地形等因素影响^[4-5]。开展土壤入渗性能研究,

对于区域土壤侵蚀预测、洪水预报、水土保持措施的制定均具有非常重要的意义^[6]。

岷江上游地区处于青藏高原的东缘地区,该区域草地面积占土地总面积的 35%,是岷江上游绿色生

态屏障的关键组成部分,在涵养水源、保持水土、调节径流等方面均具有重要作用^[7-8]。亚高山草甸是岷江上游草地的主要类型之一,开展亚高山草甸的土壤入渗性能研究是深入分析流域水文循环特征和产流机制的基础性研究工作。

岷江上游地区亚高山草甸不同海拔高度的群落优势种及物种组成均差异较大^[9-10],不同群落类型生境下的土壤入渗特征是否存在显著差异,目前还没有研究清楚,比较分析亚高山草甸不同群落类型的土壤入渗特征,将为今后开展亚高山草甸生态水文功能分类量化和评估提供理论依据。

本研究在卧龙自然保护区选择不同海拔高度(3 100~3 600 m)的 3 种亚高山草甸群落类型,分别研究比较其土壤入渗特征及影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省卧龙自然保护区西北部,地理位置在东经 102°52′—103°54′、北纬 30°45′—31°20′,属于典型的亚热带内陆山地气候,冬夏季风交替显著,气候凉爽,雨热同季,干湿分明。区域内亚高山草甸主要分布在海拔 3 100~3 650 m,水土保持能力强,表层有机

质含量高,土壤为酸性土壤。本研究选择不同海拔高度的 3 种亚高山甸群落类型,包括糙野青茅草甸(3 100~3 300 m)、狼毒草甸(3 350~3 450 m)和嵩草草甸(3 500~3 600 m),对其研究比较土壤入渗特征。上述 3 种亚高山草甸群落类型重要值最大的优势种分别为糙野青茅(*Deyeuxia scabrescens* (Griseb.) Munro ex Duthie)、狼毒(*Stellera chamaejasme* Linn.)和四川嵩草(*Kobresia setchwanensis* Hand. -Mazz.),其具体的群落结构特征见表 1。

1.2 土壤取样及测定方法

在亚高山草甸生长最旺盛的 8 月份,采用样带和样方法进行土壤样品的取样测定工作。分别在上述 3 种亚高山草甸类型内各选取 8 个样地,共计 24 个样地。每个样地内选择植被分布均匀的典型地段设置 3 个 1×1 m²样方。在每个样方内收获其中所有植物的地上部分,用于测定单位面积的地上生物量。同时,在上述每个 1×1 m²样方内挖土壤剖面,每个剖面分为 3 层,分别为 0—15 cm,15—30 cm,30—45 cm,在每层内用 100 cm³环刀取原状土样两个。室内测定土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度、非毛管孔隙度以及土壤通气度^[11],测定结果见表 2。土壤入渗速率采用双环法测定^[12]。测定数据采用 Excel 及 SPSS 19.0 软件统计分析。

表 1 亚高山草甸 3 种典型群落类型的样地概况

群落类型	海拔高度/m	优势物种	盖度	地上生物量/ (g·m ⁻²)
糙野青茅草甸	3100~3300	糙野青茅(<i>Deyeuxia scabrescens</i> (Griseb.) Munro ex Duthie)、珠芽蓼(<i>Polygonum viviparum</i> Linn.)、粘毛香青(<i>Anaphalis bulleyana</i> (J. F. Jeffr.) Chang)、扭盔马先蒿(<i>Pedicularis oliveriana</i> Prain)、黄帚橐吾(<i>Ligularia virgaurea</i> (maxim.) Mattf.)	70%~95%	1222.40
狼毒草甸	3350~3450	狼毒(<i>Stellera chamaejasme</i> Linn.)、驴蹄草(<i>Caltha palustris</i> Linn.)、川甘蒲公英(<i>Taraxacum lugubre</i> Dahlst.)、突隔梅花草(<i>Parnassia delavayi</i> Franch.)、藜芦(<i>Veratrum nigrum</i> Linn.)	75%~95%	1403.07
嵩草草甸	3500~3600	四川嵩草(<i>Kobresia setchwanensis</i> Hand. -Mazz.)、圆穗蓼(<i>Polygonum macrophyllum</i> D. Don)、驴蹄草、甘青老鹳草(<i>Geranium pylzowianum</i> maxim.)、丝叶苔草(<i>Carex capilliformis</i> Franch)	75%~90%	1172.80

表 2 不同亚高山草甸群落类型的土壤水分物理性质

群落类型	土层深度/cm	容重/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤通气度/%
糙野青茅草甸	0—15	0.72±0.02	66.89±0.24	12.90±0.14	20.59±0.05
	15—30	0.82±0.01	64.62±0.12	6.35±0.09	13.00±0.16
	30—45	0.91±0.03	59.07±0.19	6.35±0.23	8.62±0.02
狼毒草甸	0—15	0.80±0.04	65.17±0.08	11.85±0.15	34.63±0.17
	15—30	0.78±0.01	54.72±0.22	10.55±0.07	16.03±0.09
	30—45	0.89±0.01	60.93±0.35	9.65±0.13	14.65±0.10
嵩草草甸	0—15	0.70±0.03	64.33±0.11	12.85±0.08	31.65±0.13
	15—30	0.78±0.01	63.00±0.19	8.40±0.03	21.70±0.06
	30—45	0.87±0.02	59.71±0.26	7.82±0.24	15.29±0.07

1.3 土壤入渗模型选择

土壤入渗可用达西定律描述,Richards 首次将其引入非饱和土壤水分运动中,并建立了 Richards 方程^[13]。之后,国内外学者建立了很多模拟土壤入渗

速率随时间变化的入渗模型,本研究选择比较经典的 4 种模型对亚高山草甸土壤入渗过程进行模型拟合,即 Philip 模型、蒋定生模型、Horton 模型和 Kostiakov 模型^[14]。

表 3 土壤水分入渗模型公式及参数说明

模型名称	公式	参数说明
Philip	$f(t)=(1/2)S t^{(-1/2)}+k$	S 为吸水率(mm/min); k 是土壤稳定入渗速率(mm/min); $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)
蒋定生	$f(t)=f_c+(f_1-f_c)/t^\alpha$	f_1, f_c 分别为初始入渗速率和稳定入渗速率(mm/min); α 为指数; $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)
Horton	$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-Kt}$	f_0 与 f_c 分别为初始入渗速率和稳定入渗速率(mm/min); K 是经验参数; $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)
Kostiakov	$f(t)=at^{-b}$	a 为初始入渗率(mm/min); b 为衰减系数; $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)

2 结果与分析

2.1 不同草甸群落的土壤入渗过程及特征

从图 1 中可看出,3 种亚高山草甸群落类型的表层土壤(0—15 cm)的入渗特征均表现出类似变化规律,即在入渗初期渗透速率变化较快,然后变化趋于平缓,最后逐步达到稳定状态。亚高山草甸的土壤入渗过程总体上可以分为 3 个阶段:(1) 入渗瞬变阶段(0—5 min),入渗过程的初始阶段是水分浸润阶段,入渗水量首先供给土壤毛细孔隙后,形成一定的水压,使下渗峰面快速延伸。此阶段内土壤入渗速率随时间急剧下降,3 种群落类型的渗透速率表现为:嵩草草甸>狼毒草甸>糙野青茅草甸,其土壤初始入渗速率依次为 21.89,18.85,9.82 mm/min。(2) 入渗渐变阶段(5—30 min),此阶段主要是包气带内土壤孔隙水分的充填过程,因而,这一阶段内的土壤入渗速率趋缓,其中嵩草草甸入渗速率的减少速度明显快于其他两种群落类型,至 30 min 时嵩草草甸与狼毒草甸的入渗速率已基本相当。(3) 稳定入渗阶段(30 min 后),土壤孔隙被水分充满达到饱和后,水分在重力作用下向下渗透,入渗速率稳定在相对固定的水平上,即为稳渗速率。3 种亚高山草甸群落类型表层土壤的稳定入渗速率为狼毒草甸>嵩草草甸>糙野青茅草甸,其值依次为 10.37,9.03,4.72 mm/min。

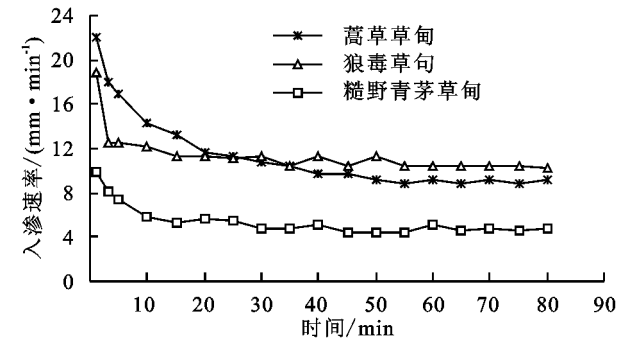


图 1 3 种亚高山草甸群落类型表层土壤(0—15 cm)水分入渗过程

为了研究亚高山草甸不同土层的入渗特征,本文以嵩草草甸为例,对比分析了不同土壤层次的入渗过

程。由图 2 可知,嵩草草甸土壤入渗能力随土层深度增加而递减,表层土壤(0—15 cm)的初始入渗速率和稳定入渗速率均明显大于中层(15—30 cm)和下层(30—45 cm),不同时段土壤入渗速率均随土层深度增加而逐步递减,这主要是由于随着土层深度增加,土壤容重不断增大,而总孔隙度则逐渐减小(表 1),从而导致土壤入渗速率逐步减小。

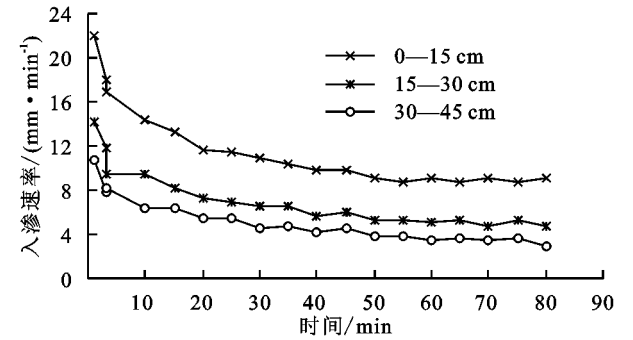


图 2 嵩草草甸不同深度土壤的水分入渗过程

2.2 亚高山草甸土壤入渗模型拟合

利用表 3 中的 4 个模型,拟合亚高山草甸土壤的入渗过程,结果见表 4。不同模型的模拟效果可用回归方程的决定系数 R^2 表示,其值越大,拟合效果越好。由表 4 可看出,总体来看土壤入渗过程以 Horton 模型的拟合效果最好,其次为 Kostiakov 模型,而其余两种模型拟合精度相对要低一些。Horton 模型属经验公式,能够描述长时间的土壤入渗特征,且模型参数具有物理意义,因而,Horton 模型适于描述亚高山草甸的土壤入渗过程。

2.3 亚高山草甸土壤入渗性能的影响因素

土壤渗透性受土壤结构、质地、生物量等多种因素的影响。对亚高山草甸不同群落类型的土壤稳渗速率与土壤物理性质及单位面积群落地上生物量进行 Pearson 相关性分析,涉及指标(表 5)包括:土壤稳渗速率(Y)、土壤容重(X_1)、毛细孔隙度(X_2)、总孔隙度(X_3)、非毛细孔隙度(X_4)、土壤通气度(X_5)、最大持水量(X_6)、毛细持水量(X_7)、最小持水量(X_8)及单位面积地上生物量(X_9)。

表 4 4 种土壤入渗模型的回归参数

群落类型	土层 深度/cm	Philip 模型			蒋定生模型		Horton 模型		Kostiakov 模型		
		<i>s</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
嵩草草甸	0—15	35.27	6.28	0.951	0.55	0.934	0.08	0.995	22.74	0.25	0.983
	15—30	22.67	4.154	0.956	0.53	0.946	0.06	0.976	14.67	0.24	0.986
	30—45	18.10	2.769	0.940	0.49	0.937	0.05	0.973	11.20	0.26	0.975
狼毒草甸	0—15	17.36	9.209	0.962	0.87	0.980	0.06	0.960	16.78	0.12	0.965
	15—30	8.84	7.19	0.917	0.46	0.920	0.05	0.967	11.23	0.09	0.973
	30—45	5.62	5.21	0.907	0.82	0.874	0.20	0.936	7.58	0.07	0.872
糙野青茅草甸	0—15	12.97	3.83	0.974	0.60	0.961	0.14	0.981	9.79	0.19	0.981
	15—30	14.40	1.94	0.989	0.72	0.979	0.24	0.992	8.74	0.28	0.979
	30—45	16.63	0.87	0.929	0.60	0.901	0.11	0.993	8.85	0.37	0.947

表 5 土壤入渗性能与影响因素相关性分析

指标	<i>X</i> ₁	<i>X</i> ₂	<i>X</i> ₃	<i>X</i> ₄	<i>X</i> ₅	<i>X</i> ₆	<i>X</i> ₇	<i>X</i> ₈	<i>X</i> ₉
<i>X</i> ₂	−0.30								
<i>X</i> ₃	−0.55**	0.94**							
<i>X</i> ₄	−0.78**	0.03	0.38						
<i>X</i> ₅	−0.63**	0.28	0.50*	0.67**					
<i>X</i> ₆	−0.90**	0.27	0.52*	0.79**	0.41				
<i>X</i> ₇	−0.88**	0.28	0.52*	0.75**	0.37	0.98**			
<i>X</i> ₈	−0.85**	0.29	0.52*	0.72**	0.30	0.98**	0.99**		
<i>X</i> ₉	−0.65**	0.09	0.37	0.81**	0.60**	0.62**	0.64**	0.55**	
<i>Y</i>	−0.67**	0.37	0.55**	0.58**	0.93**	0.44	0.43	0.36	0.58**

注：* 为 0.05 水平上显著相关；** 为 0.01 水平上显著相关。

表 5 看出,土壤稳渗速率与土壤容重呈极显著负相关,而与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤通气度以及单位面积地上生物量均呈极显著正相关,而与其他指标间没有显著相关关系。这主要是由于土壤容重越大,土体越坚实,土壤渗透性能越弱;而单位面积地上生物量越大,对应的地下根系越发达,土壤孔隙性越好,因而,渗透性能越好。另外,土壤容重除与毛管孔隙度的相关性没达显著水平外,与其余各指标均存在极显著负相关,可见土壤容重对植物生物量及土壤入渗性能均有直接影响。

3 讨论与结论

3.1 讨论

由图 1 可知,狼毒草甸与嵩草草甸的初始入渗速率和稳定入渗速率均明显大于糙野青茅草甸,这主要由于狼毒草甸与嵩草草甸的根系均较为发达,土壤质地松软,造成其水分渗透速率相对较高。赵景波等对青海湖西北部土壤入渗规律的研究表明,低草地的稳定入渗速率明显小于高草地,并指出高草地根系发育深度大是造成这种现象的主要原因^[15]。王则宇等对希拉穆仁天然草地不同群落类型的土壤入渗特征进行对比研究表明,洽草群落土壤入渗性能最好,其次为羊草,而银灰旋花群落土壤入渗性能最差;研究认为洽草群落植被盖度大,腐殖质层厚,根系密度大,土

壤结构良好,因而更有利于水分的下渗;但银灰旋花群落退化较严重,土壤板结,导致其水分渗透性能最差^[16]。综上所述,草地类型及其根系发育情况与土壤的入渗速率密切相关。

由图 2 可知,不同时段内嵩草草甸土壤入渗速率均随着土层深度的增加而逐步递减。李超等对黄土丘陵区撂荒地不同土层深度的入渗特征研究表明,各样地土壤的初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率均表现为表层>亚表层>底层^[17]。同样,李建兴等对紫色土坡耕地耕层土壤入渗性能的研究也得出相同结论,即土壤入渗速率随着土层深度的增加而递减^[18]。

国内外学者已经针对不同土壤类型的入渗过程进行了很多模拟研究,对于各种模型的模拟精度评价不尽相同。马浩等应用 Philip 模型、Horton 模型、Kostiakov 模型和蒋定生模型对川中丘陵紫色土区的土壤水分入渗过程进行拟合,结果表明 Horton 模型拟合最好^[19]。陈文媛等对不同退耕年限林草植被的土壤入渗过程进行拟合,认为通用模型比 Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型更适用于描述黄土丘陵区土壤入渗特征^[20]。而姚宝林等对南疆棉田土壤入渗特征的研究表明,通用经验模型和 Kostiakov 模型能较好的模拟各处理土壤入渗过程,Horton 模型次之,Philip 模型拟合较差^[21]。由此可知,不同的土壤类型可能适用不同的入渗模型进行拟合,几种模型无论是理论

的还是经验的,均在一定程度上反映了土壤水分的入渗规律,都有其使用价值^[22]。

土壤入渗性能的影响因素包括土壤物理性质、土壤初始含水率、下垫面植被盖度、地面坡度以及降雨强度等^[21]。与本研究的结果类似,马浩等在川中丘陵紫色土区开展的研究表明,土壤容重与土壤入渗速率呈负相关关系^[19];而董三孝等对黄土丘陵退耕坡地天然草地的研究表明,随着群落生物量的逐步增加,土壤入渗能力显著改善^[23]。

随着植被的自然恢复,土壤有机质含量及土壤物理性质均处于动态变化过程中,明确自然植被的演替与土壤入渗性能的响应关系是开展植被生态水文功能评价的基础性工作,因此,今后可重点开展相关的研究工作。

3.2 结论

不同亚高山草甸群落类型土壤入渗过程对比分析表明,在入渗瞬变阶段和入渗渐变阶段,3种群落类型渗透速率大小顺序表现为:嵩草草甸>狼毒草甸>糙野青茅草甸。3种亚高山草甸群落类型均具有较高的稳定入渗速率,通常情况下,该地区的降水强度较少达到或超过稳渗速率而超渗产流。以嵩草草甸为例,分析了土壤入渗能力随土层深度的变化规律,表明不同时段的土壤入渗速率均随土层深度增大而呈逐步递减趋势。

分别应用 Philip、蒋定生、Horton、Kostiakov 模型对不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗过程进行了拟合,表明 Horton 模型拟合精度最高,其次为 Kostiakov 模型。今后研究中,可采用 Horton 模型拟合和预测亚高山草甸的土壤入渗过程。

相关分析表明,土壤稳渗速率与土壤容重呈极显著负相关,而与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤通气度及单位面积地上生物量均呈极显著正相关,说明土壤容重、土壤孔隙度及植物生物量与土壤入渗性能均密切相关。

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,1997:34-36.
- [2] 陈三雄,沈义.黄浦江源头区主要植被类型土壤入渗特征及模拟分析[J].水土保持研究,2016,23(6):59-63.
- [3] Wang Y, Shao M, Liu Z, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China[J]. Journal of Hydrology, 2013,487(2):13-23.
- [4] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: rainfall simulation on dryland

soils, Fowlers Gap, Australia[J]. Hydrological Processes, 2012,26(15):2211-2224.

- [5] Duan R, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soils [J]. Irrigation Science, 2011,29(5):379-389.
- [6] 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.
- [7] 田雨,方自力,谢强,等.岷江上游植被在汶川地震中的损毁及灾后恢复状况[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):735-740.
- [8] 陈文年,吴宁,罗鹏.岷江上游地区的草地资源与畜牧业发展[J].长江流域资源与环境,2002,11(5):446-450.
- [9] 宋爱云,刘世荣,史作民,等.卧龙自然保护区亚高山草甸植物群落物种多样性研究[J].林业科学研究,2006,19(6):767-772.
- [10] 宋爱云,刘世荣,史作民,等.卧龙自然保护区亚高山草甸的数量分类与排序[J].应用生态学报,2006,17(7):1174-1178.
- [11] 闫建梅,何丙辉,田太强,等.川中丘陵区不同土地利用方式土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2014,28(1):53-57,62.
- [12] 陈楚楚,黄新会,刘芝芹,等.滇西北高原湿地不同植被类型下的土壤入渗特性及其影响因素[J].水土保持通报,2016,36(2):82-87.
- [13] Richards L A. Capillary conduction of liquids in porous mediums [J]. Physics, 1931,1(5):318-333.
- [14] 赖坡,程圣国,陈勇,等.降雨入渗模型的研究方法综述[J].山西建筑,2016,42(26):71-73.
- [15] 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.
- [16] 王则宇,蒙仲举,崔向新,等.希拉穆仁天然草地不同群落土壤入渗特征[J].水土保持学报,2017,31(3):112-117.
- [17] 李超,周正朝,朱冰冰,等.黄土丘陵区不同撂荒年限土壤入渗及抗冲性研究[J].水土保持学报,2017,31(2):61-66.
- [18] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):725-731.
- [19] 马浩,尹忠东,许智超.川中丘陵紫色土区土壤水分入渗性能研究[J].西北林学院学报,2011,26(3):68-72.
- [20] 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.
- [21] 姚宝林,李光永,李发永.南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J].中国农业科学,2014,47(22):4453-4462.
- [22] 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.
- [23] 董三孝.黄土丘陵区退耕地植被自然恢复过程及其对土壤入渗的影响[J].水土保持通报,2004,24(4):1-5.