

# 放牧对希拉穆仁草原土壤入渗过程的定量评估

耿林昇<sup>1</sup>, 李红丽<sup>1</sup>, 董智<sup>1</sup>, 郭建英<sup>2</sup>, 陈新闻<sup>1</sup>

(1.山东农业大学林学院,泰山森林生态系统定位研究站,山东 泰安 271018;2.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020)

**摘要:**为定量评估放牧对草原土壤入渗的影响,了解和防治放牧造成的水土流失,科学评估草原水文调节功能,采用双环入渗法研究了放牧对典型草原土壤入渗性能的影响,并收集影响土壤入渗的环境特征变量。结果表明:(1)土壤入渗能力均受到放牧活动的干扰,随着放牧强度的增加,土壤初渗速率、稳渗速率减小,达到稳渗时的历时缩短,而轻度放牧对土壤入渗性能却具有增强作用,LG的初渗速率(5.12 mm/min)、稳渗速率(1.93 mm/min)、2 h 累积入渗量(213.42 mm)均较好,快速入渗至稳渗阶段历时延长。(2)不同放牧强度下,放牧强度与土壤初渗速率、稳渗速率、累积入渗量呈显著负相关关系,相关系数分别为-0.646, -0.770, -0.531。植被盖度、砂粒体积百分数、孔隙度均与土壤入渗速率呈正相关关系,而土壤容重则相反。土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度对土壤入渗速率的影响最为显著。适度放牧(LG, 1.5 羊/(hm<sup>2</sup>·月))会改善土壤特征参数及植被生长情况,提高土壤的入渗性能。(3)通过土壤入渗模型分析,Horton 模型对土壤入渗速率及土壤累积入渗的拟合效果均表现为最好。研究结果可为放牧条件下典型草原的土壤入渗及水文调节功能的定量评估提供参考。

**关键词:**放牧强度;土壤入渗;入渗速率;土壤累积入渗;希拉穆仁草原

**中图分类号:**S152.7<sup>+</sup>2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2022)02-0070-08

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.009

## Quantitative Evaluation of the Effects of Grazing on Soil Infiltration Process in Xilamuren Grassland

GENG Linsheng<sup>1</sup>, LI Hongli<sup>1</sup>, DONG Zhi<sup>1</sup>, GUO Jianying<sup>2</sup>, CHEN Xinchuang<sup>1</sup>

(1.College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taishan Forest Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018; 2.Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources of China, Hohhot 010020)

**Abstract:** In order to quantitatively evaluate the impact of grazing on the process of grassland soil infiltration, understand and prevent soil erosion by grazing and scientifically evaluate the hydrological regulation function of grassland, this study took Xilamuren grassland as the main research object and used the double-loop infiltration method to study the effects of grazing on soil infiltration performance of typical grassland and collected the environmental characteristic variables affecting soil infiltration. The results showed that: (1) The soil infiltration capacity was disturbed by grazing activities. With the increasing of grazing intensity, the initial soil infiltration rate and steady infiltration rate decreased, and the time to reach steady infiltration shortened. However, light grazing (LG) enhanced the infiltration performance of the soil. The initial infiltration rate (5.12 mm/min), steady infiltration rate (1.93 mm/min) and cumulative infiltration capacity (213.42 mm) for 2 hours were all good under the LG condition. The duration from the rapid infiltration stage to the stable infiltration stage of LG was prolonged. (2) Under different grazing intensities, there was a significant negative correlation between grazing intensity and soil initial infiltration rate, steady infiltration rate and cumulative infiltration amount, and the correlation coefficients were -0.646, -0.770 and -0.531, respectively. Vegetation coverage, sand volume percentage and porosity were all positively related to soil infiltration rate, while soil bulk density was the opposite. Soil bulk density, total porosity and capillary porosity had the most significant effect on soil infiltration rate. Appropriate grazing (LG, 1.5 sheep/(hm<sup>2</sup>·month))

收稿日期:2021-09-28

资助项目:国家自然科学基金项目(51879155,31870708)

第一作者:耿林昇(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事水土流失过程与机制研究。E-mail:stbcgl@163.com

通信作者:董智(1971—),男,教授,硕士生导师,主要从事荒漠化防治、生态修复研究。E-mail:nmgdz@163.com

improved soil characteristic parameters and vegetation growth, and increased soil infiltration performance. (3) Through the analysis of soil infiltration model, the Horton model had the best fitting effect on soil infiltration rate and soil cumulative infiltration. This study could provide a reference for the quantitative evaluation of soil infiltration and hydrological regulation function of typical grassland under grazing conditions.

**Keywords:** grazing intensity; soil infiltration; infiltration rate; soil cumulative infiltration; Xilamuren grassland

土壤入渗是指降水或灌溉水由地表进入土壤的过程,是水文过程的关键环节<sup>[1-3]</sup>,土壤入渗显著影响地表产流和土壤水分再分配<sup>[4]</sup>,进而影响局部土壤侵蚀和面源污染<sup>[5]</sup>。入渗是由土壤特性、供水条件、植被根系长势分布特征等因素综合作用的结果<sup>[6-7]</sup>,而放牧活动强烈影响着这些特征参数<sup>[8]</sup>,使土壤入渗过程表现出极大的时空异质性和尺度依赖性<sup>[9]</sup>。放牧显著改变区域土壤特征,牲畜长期采食、践踏等行为直接对草地植被及土壤特征造成影响<sup>[10]</sup>,进而影响土壤水分的入渗机制,造成区域水文过程的改变<sup>[11-13]</sup>,尤其在干旱、半干旱区域草地生态系统,放牧强度造成土壤水分的入渗及其含量变化,决定着生态系统的植被生长发育、分布格局及土壤-植被系统的演化方向和生态功能,最终影响区域生态系统服务和生态安全<sup>[14-15]</sup>。在干旱、半干旱区草地生态系统,基于放牧强度对草地土壤入渗的研究仍较薄弱,且目前缺少可以准确预测土壤入渗的数学模型来估计径流产生时间,并协助规划改善植被保护和水资源管理<sup>[16]</sup>。希拉穆仁草原是干旱半干旱地区的典型草原<sup>[17]</sup>,水文特征强烈影响着区域水文过程,探究放牧对土壤入渗特征的影响机制有助于维持草地生态系统稳定。基于此,本研究以希拉穆仁草原为研究对象,分析不同放牧强度对土壤入渗过程的影响,探究土壤入渗过程的预测和控制因子,及其耦合作用机制,比较不同模型模拟结果并评估它们在预测土壤入渗速率和累积入渗方面的准确性,筛选模型适用性,为科学评估干旱、半干旱区典型放牧草原的土壤入渗过程,进而评估草原水文调节功能、防治水土流失提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区包头市达尔罕茂明安联合旗南部的希拉穆仁草原(41°36'N,111°23'E),属于低山丘陵草原区,地形平缓,海拔1400 m。研究区属于中温带大陆性季风气候,多年平均气温2.5℃,多年平均降水量281 mm,50%以上的降水集中在7、8月。土壤为典型栗钙土,有效土层厚度约为40 cm,其下层为钙积层。主要建群种为克氏针茅(*Stipa krylovii* Ro-shev)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)、阿尔泰狗娃

花(*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.)和银灰旋花(*Convolvulus ammannii* Desr.)。

### 1.2 试验小区布设

在以克氏针茅为建群植物的典型地段,选取长期自由放牧的草地为研究对象,参照李博<sup>[18]</sup>草地退化分级标准,采用样线法进行植被样方调查,根据草地植物种类组成、群落高度、盖度、密度和地上生物量等指标对其进行分析,划分出重度放牧(HG,4.5羊/(hm<sup>2</sup>·月))、中度放牧(MG,3.0羊/(hm<sup>2</sup>·月))、轻度放牧(LG,1.5羊/(hm<sup>2</sup>·月))和对照样地(CK,0羊/(hm<sup>2</sup>·月)),然后建设放牧小区,试验区长450 m,宽100 m,小区外围及各小区用1.5 m高的围栏分割。各放牧梯度小区由西北向东南方向分别为重度放牧、中度放牧、轻度放牧和不放牧对照小区,其中3种放牧小区长130 m,宽100 m,不放牧小区长60 m,宽100 m。放牧期为每年6个月,5月1日开始,截止到10月31日。

### 1.3 土壤入渗与环境参数测定

于2018—2020年每年的7—8月在试验小区依据地统计学采样方法,将每个放牧小区均匀划分为9个取样区,在土样取样区,采用双环入渗法同时进行土壤入渗试验,按照先密后疏原则记录0~10,10~20,20~60,60~120 min时间段(各时间段测定间隔分别为1,2,5,10 min)内的土壤入渗量,直到入渗变化量达到每个测试下垫面的恒定值。入渗数据最终取代表性最强的一组作为该土壤类型的入渗特征曲线。同时在每个取样区进行植被调查,并在每个取样区分别以五点取样法,利用环刀法分别测定0—20 cm的土壤容重、含水率、孔隙度,并同时采集土样,带回室内风干,过2 mm筛,预处理后采用Mastersizer 2000型激光粒度仪测定土壤粒径体积分数。

### 1.4 土壤入渗模型选择与数据分析

国内外学者在大量研究土壤入渗过程的基础上,先后提出了多种描述土壤入渗过程的数学模型,为了筛选适合放牧条件下草原土壤入渗模型,本研究分别利用土壤入渗速率Kostiakov(KM)模型、Horton(HM)模型、Philip(PM)模型和通用经验模型(GM)<sup>[19]</sup>,土壤累积入渗Philip(PH)模型、Kostiakov(KO)模型、Modifiedkostiakov(MK)模型<sup>[20]</sup>、Horton(HO)模型<sup>[21]</sup>、Swartzendruber(SW)模型<sup>[22]</sup>模拟希

拉穆仁不同放牧下的土壤入渗过程特征,并与实测值进行对比分析,进而通过相关系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、纳什效率系数(NSE)和平均偏差(AD)4个统计参数检验其适用性和准确性,最终筛选出适合本区域的土壤入渗模型。

### (1) 土壤入渗模型

$$\text{Kostiakov 模型: } f(t) = at^{-b} \quad (1)$$

$$\text{Horton 模型: } f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2)$$

$$\text{Philip 模型: } f(t) = 0.5St^{-0.5} + f_c \quad (3)$$

$$\text{通用经验模型: } f(t) = a + bt^{-n} \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为 $t$ 时刻土壤入渗速率(mm/min); $f_0$ 为初始入渗速率(mm/min); $f_c$ 为稳定入渗速率(mm/min); $t$ 为入渗时间(min); $S$ 为土壤吸渗率; $a$ 、 $b$ 、 $k$ 、 $n$ 为经验参数。

### (2) 土壤累积入渗模型

$$\text{Philip 模型: } I(t) = St^{0.5} + f_c t \quad (5)$$

Swartzendruber 模型:

$$I(t) = f_c t + \frac{b}{a} [1 - \exp(-at^{0.5} - ct)] \quad (6)$$

$$\text{Horton 模型: } I(t) = ct + m(1 - e^{-at}) \quad (7)$$

$$\text{Kostiakov 模型: } I(t) = \alpha_1 t^{\beta_1} \quad (8)$$

$$\text{Modifiedkostiakov 模型: } I(t) = \alpha_2 t^{\beta_2} + f_c t \quad (9)$$

式中: $I(t)$ 为 $t$ 时刻土壤累积入渗量; $c$ 、 $m$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 为经验参数。

采用 Excel 2010、Origin 2021、SPSS 18、R 4.0.5 软件进行数据整理、计算分析和图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同放牧强度土壤入渗过程的差异性变化特征

不同放牧强度下,土壤入渗过程均随着时间的增加,入渗速率变化均呈现从快速入渗阶段到趋稳阶段,最终达到稳渗阶段(图 1)。CK、LG 的快速入渗阶段(0~14 min)所历时间均接近,而 LG 的趋稳阶段(14~70 min)、稳渗阶段(>70 min)均较 CK 的趋稳阶段(14~60 min)、稳渗阶段(>60 min)推后。MG、HG 的快速入渗阶段(0~20 min)所历时间接近,但 MG 的趋稳阶段(20~50 min)与稳渗阶段(>50 min)均较 HG 的趋稳阶段(20~35 min)、稳渗阶段(>35 min)推迟发生,表明放牧强度超过适度放牧时,土壤入渗速率达到稳渗速率的时间缩短,土壤入渗能力下降,地表产流发生更快。随着放牧强度的增加,土壤初始入渗率呈“N”形变化,入渗速率在 MG 最低(3.41 mm/min),其次为 HG(3.87 mm/min),LG 最高(5.12 mm/min)(图 2)。土壤稳定入渗速率则呈倒“V”形变化,在 LG 最高(1.93 mm/min),在 HG

最低(1.41 mm/min)。LG 达到稳渗速率所用时间比 CK 延长,稳渗速率二者接近,而初渗速率较 CK 高。HG 土壤初渗速率较 MG 略高,但稳渗速率及达到稳渗所用时间均较其他强度差。LG 土壤结构情况在放牧活动下较 CK 改善,入渗性能变得更好,而 MG、HG 入渗性能却变差。

土壤入渗试验结束时,在不同放牧强度下,CK、LG 最终 2 h 累积入渗量较 MG、HG 表现出显著差异(图 3)。LG 累积入渗量最高(213.42 mm),其次为 CK(208.20 mm),二者最为接近,HG 累积入渗量最低(148.26 mm)。LG 快速入渗阶段时长及变化速率均较其他放牧强度高,CK 累积入渗变化速率整体较其他 3 区最小,但在 15 min 后,两区之间的累积入渗速率变化较为接近。MG、HG 前期快速入渗段变化率较为接近,但在 20 min 后,二者之间的累积入渗速率变化逐渐增大。LG、MG、HG 土壤入渗能力均受到放牧活动的干扰,LG 表现与 CK 接近且更好,而 MG 与 HG 却呈现变差趋势。

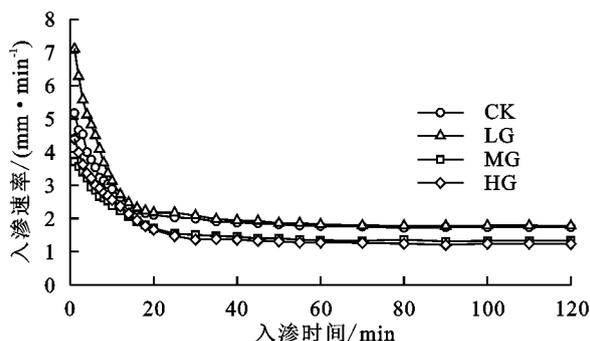


图 1 不同放牧强度下土壤入渗过程

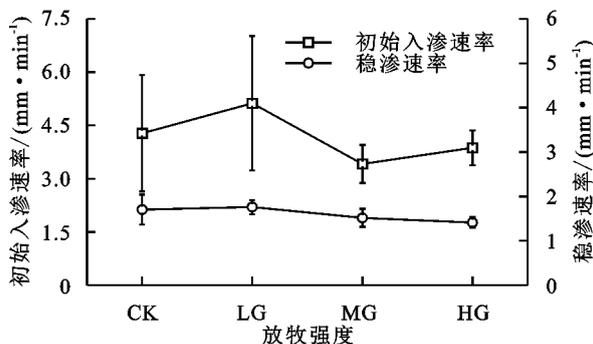


图 2 不同放牧强度下土壤入渗速率变化

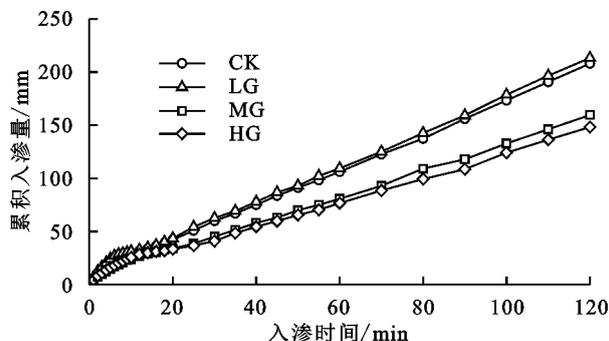


图 3 不同放牧强度下土壤累积入渗过程

## 2.2 不同放牧强度土壤入渗与土壤特征参数响应关系

由于外界环境的胁迫,随着放牧强度的增加,草地植被的多年生根茎禾草逐渐向多年生丛生禾草及 1、2 年生植物杂草演变,植被覆盖度呈下降趋势。CK、LG 植被覆盖度接近,且均显著高于 MG、HG。LG 中的放牧活动,使多年生根茎禾草所占比例减少,但丛生禾草比例却相对增加,且覆盖度增加。随着放牧强度的增加,土壤含水率、总孔隙度、毛管孔隙

度均呈先增大后减小趋势,且均在 LG 表现为最大值, HG 为最小值(表 1),而土壤容重的表现则完全相反。其中,总孔隙度在不同放牧强度条件下表现出的变化差异性最大。

土壤机械组成随着放牧强度的增加,砂粒体积分数逐渐增大,粉粒、黏粒体积分数逐渐减小。HG 的砂粒、粉粒、黏粒体积百分比均较 CK 发生显著变化,土壤逐渐粗化。

表 1 不同放牧强度植被与土壤特征

放牧强度	优势种	植被覆盖度/%	含水率/%	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
CK	糙隐子草+阿尔泰狗娃花+针茅+羊草	37.4a	6.69ab	1.45bc	36.27b	27.83b	8.43a	1.95a	37.84a	60.21b
LG	糙隐子草+阿尔泰狗娃花+针茅+羊草	39.6a	6.94a	1.43c	38.73a	31.42a	7.31a	1.48ab	33.80ab	64.73ab
MG	糙隐子草+针茅+阿尔泰狗娃花+羊草	31.0b	5.86ab	1.47b	34.26bc	27.71b	6.55a	1.46ab	31.73ab	66.81ab
HG	糙隐子草+银灰旋花+针茅+羊草	29.9b	5.42b	1.55a	33.53c	26.86b	6.68a	1.32b	28.26b	70.42a

注:小写字母表示不同放牧强度间的差异显著( $P < 0.05$ )。

运用皮尔逊相关性分析法分析不同放牧强度下土壤特征参数与初渗速率、稳渗速率、2 h 累积入渗量之间的关系(表 2)。随着放牧强度的增加,土壤初渗速率、稳渗速率均呈极显著下降趋势( $P < 0.01$ ), 2 h 累积入渗量呈显著下降趋势( $P < 0.05$ )。不同放牧强度下,土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、累积入渗量变化均与土壤容重、含水率、孔隙度以及机械组成相关。土壤容重与初渗速率、2 h 累积入渗量呈显

著负相关( $P < 0.05$ ),与稳渗速率则呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ )。总孔隙度、毛管孔隙度均与初渗速率、稳渗速率呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。土壤容重与孔隙度对入渗速率的影响较含水率、土壤机械组成更为明显。含水率与初渗速率、稳渗速率、2 h 累积入渗量的相关性无显著性差异,这与李卓等<sup>[23]</sup>的研究结果不一致,原因可能是该区土壤含水率变化范围仅为 5.42%~6.94%,整体土壤含水率均较小导致。

表 2 不同放牧强度土壤参数与入渗特征的相关性

土壤入渗参数	放牧强度	含水率	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	砂粒	粉粒	黏粒
初渗速率	-0.646**	0.358	-0.564*	0.816**	0.733**	0.374	0.298	0.308	0.143
稳渗速率	-0.770**	0.396	-0.723**	0.839**	0.731**	0.429	0.367	0.378	0.201
2 h 累积入渗量	-0.531*	0.286	-0.567*	0.671**	0.614*	0.287	0.254	0.263	0.103

注:\*表示  $P < 0.05$  级别(双尾)相关性显著;\*\*表示  $P < 0.01$  级别(双尾)相关性极显著。

## 2.3 土壤入渗模型验证

2.3.1 土壤入渗速率模型验证 由于土壤水分入渗过程变化复杂,许多研究者针对土壤入渗建立了若干模型,根据模型是否具有物理意义划分为 2 大类:一类是物理模型,包括 HM 模型和 PM 模型;另一类是经验模型,包括 KM 模型和 GM 模型。为进一步研究不同土壤类型对入渗过程的影响,选用以上 4 个模型对土壤入渗过程进行模拟。利用 4 种不同的入渗模型对不同放牧强度下 4 个小区的入渗速率进行模拟拟合(图 4)。

HM 拟合的初始入渗速率较实际值低 5.21%~9.55%,其拟合值除在入渗过程中的趋向稳定阶段及初始入渗速率低于实际值外,其他阶段拟合效果均较好。KM、GM 拟合的初始入渗速率分别较实际值高 6.40%~12.02%,6.94%~9.26%,二者对实际入渗

过程的拟合效果相似,对实际入渗过程的快速入渗的前半段拟合效果较好,其后一直到稳渗阶段前,拟合值高于实际值,达到稳渗速率后,拟合值低于实际值,且差值逐渐增大。PM 拟合的初始入渗速率较实际值高 12.19%~18.93%,其对入渗过程的快速入渗阶段拟合效果较实际值偏低,而入渗过程的趋稳阶段拟合效果则高于实际值。观测 4 种放牧强度下土壤入渗过程发现,当趋稳阶段历时越长时,最终稳定入渗速率的拟合值与实际最终稳渗速率值拟合效果越好。通过比较拟合模型系数  $R^2$ 、NSE、RMSE、AIC 值判定各模型的拟合效果, $R^2$ 、NSE 值越接近于 1, RMSE、AIC 值越小,模型拟合效果越好。由表 3 可知, HM 针对该区土壤水分入渗过程的拟合效果较其他模型与实际值偏差最小,模型性能优良,可信度最高;其次为 KM 和 GM,二者拟合效果接近, PM 拟合效果最差。

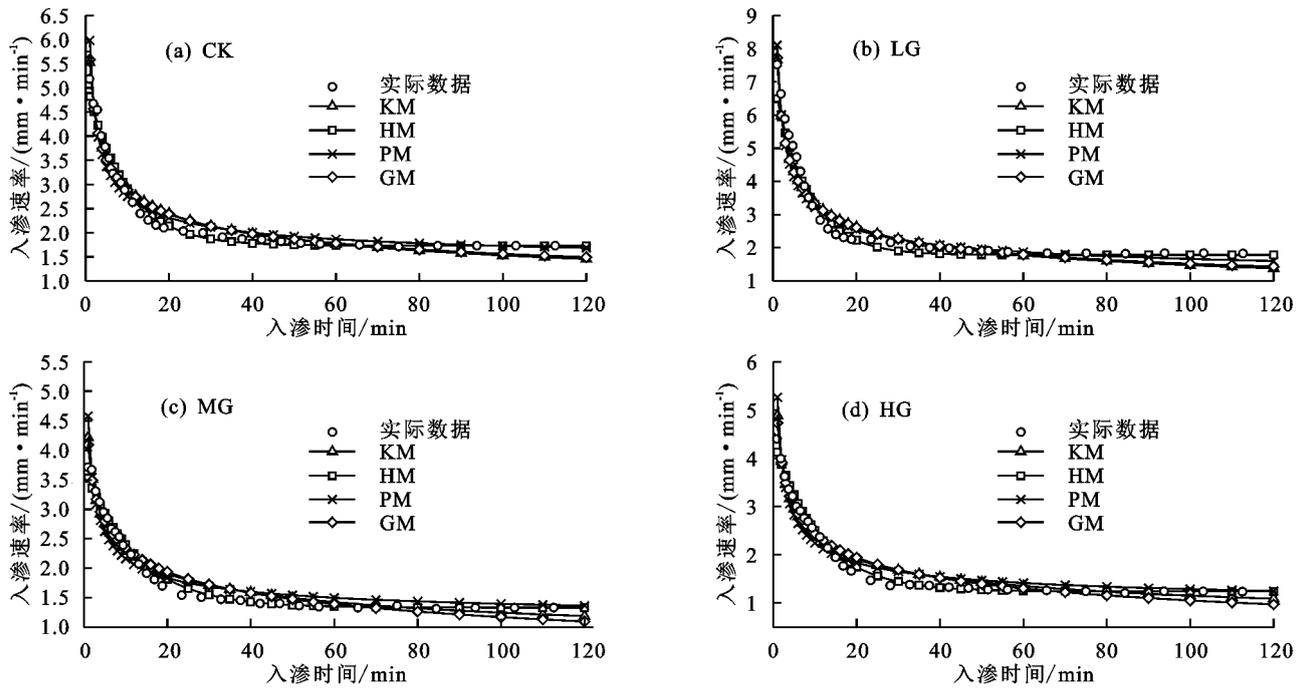


图 4 不同放牧强度下土壤入渗速率实际值与拟合值的比较

表 3 不同放牧强度下土壤入渗速率拟合模型拟合结果对比

模型	放牧强度	拟合方程	$R^2$	RMSE	NSE	AIC
KM	CK	$f(t) = 5.53t^{-0.28}$	0.958	0.201	0.960	14.662
	LG	$f(t) = 7.66t^{-0.36}$	0.950	0.331	0.952	27.210
	MG	$f(t) = 4.22t^{-0.27}$	0.944	0.172	0.950	10.691
	HG	$f(t) = 4.89t^{-0.31}$	0.955	0.198	0.956	14.193
HM	CK	$f(t) = 1.73 + (4.82 - 1.73)e^{-0.11t}$	0.988	0.111	0.988	-1.837
	LG	$f(t) = 1.78 + (6.50 - 1.78)e^{-0.12t}$	0.985	0.182	0.985	10.730
	MG	$f(t) = 1.33 + (3.53 - 1.33)e^{-0.08t}$	0.989	0.082	0.989	-9.447
	HG	$f(t) = 1.24 + (4.12 - 1.24)e^{-0.09t}$	0.994	0.072	0.994	-12.760
PM	CK	$f(t) = 4.73t^{-0.5} + 1.25$	0.936	0.249	0.938	20.018
	LG	$f(t) = 7.16t^{-0.5} + 0.95$	0.942	0.356	0.944	29.059
	MG	$f(t) = 3.54t^{-0.5} + 1.04$	0.884	0.250	0.893	20.111
	HG	$f(t) = 4.42t^{-0.5} + 0.85$	0.913	0.274	0.916	22.414
GM	CK	$f(t) = 0.27 + 5.31t^{-0.31}$	0.957	0.200	0.960	15.966
	LG	$f(t) = 0.24 + 7.49t^{-0.38}$	0.949	0.330	0.952	28.570
	MG	$f(t) = -1.20 + 5.29t^{-0.17}$	0.948	0.164	0.954	10.979
	HG	$f(t) = -1.04 + 5.77t^{-0.22}$	0.959	0.184	0.962	13.923

2.3.2 土壤累积入渗模型验证 通过 5 种不同土壤累积入渗模型对不同放牧强度下 4 个小区的累积入渗量进行模拟拟合(图 5)。由拟合效果的  $R^2$ 、NSE、RMSE、AIC 值可知,HO 拟合结果与实际值偏差小,拟合性能优良,可信度高,SW 拟合效果仅次之,KO 拟合效果最差。PH、KO 拟合的初始累积入渗量分别较实际值相差  $-20.04\% \sim 13.67\%$ ,  $-86.64\% \sim -33.50\%$ ,二者对实际入渗过程的拟合效果相似,实际入渗过程的快速入渗阶段拟合值略低于实际值,入渗趋稳阶段拟合值略高于实际值,达到稳渗速率后,拟合值低于实际值且差值逐渐增大。MK 拟合的初始累积入渗量分别较实际值高  $46.37\% \sim 53.64\%$ ,入渗过程中快速入渗的后半阶段的拟合值略高于实

际值,其余阶段拟合结果均较好。HO、SW 拟合的初始累积入渗量分别较实际值相差  $14.29\% \sim 18.43\%$ ,  $-28.51\% \sim 5.98\%$ ,前者拟合值较实际初始累积入渗量偏高且变化幅度较后者小,后者较实际值偏低且变化幅度较大,而二者拟合效果评估值相似且与实际值相差均较小。通过比较拟合模型系数  $R^2$ 、NSE、RMSE、AIC 值(表 4)可知,5 种拟合模型的  $R^2$ 、NSE 值均高于 0.98,各模型之间差别较小,表明 5 种模型均能较好地拟合土壤累积入渗过程。而通过 RMSE、AIC 值分析可知,HM 对该区土壤累积入渗过程的拟合效果较其他模型与实际值偏差最小,模型性能优良,可信度最高,其余拟合效果由优到劣依次为 SW 模型、MK 模型、PH 模型和 KO 模型。

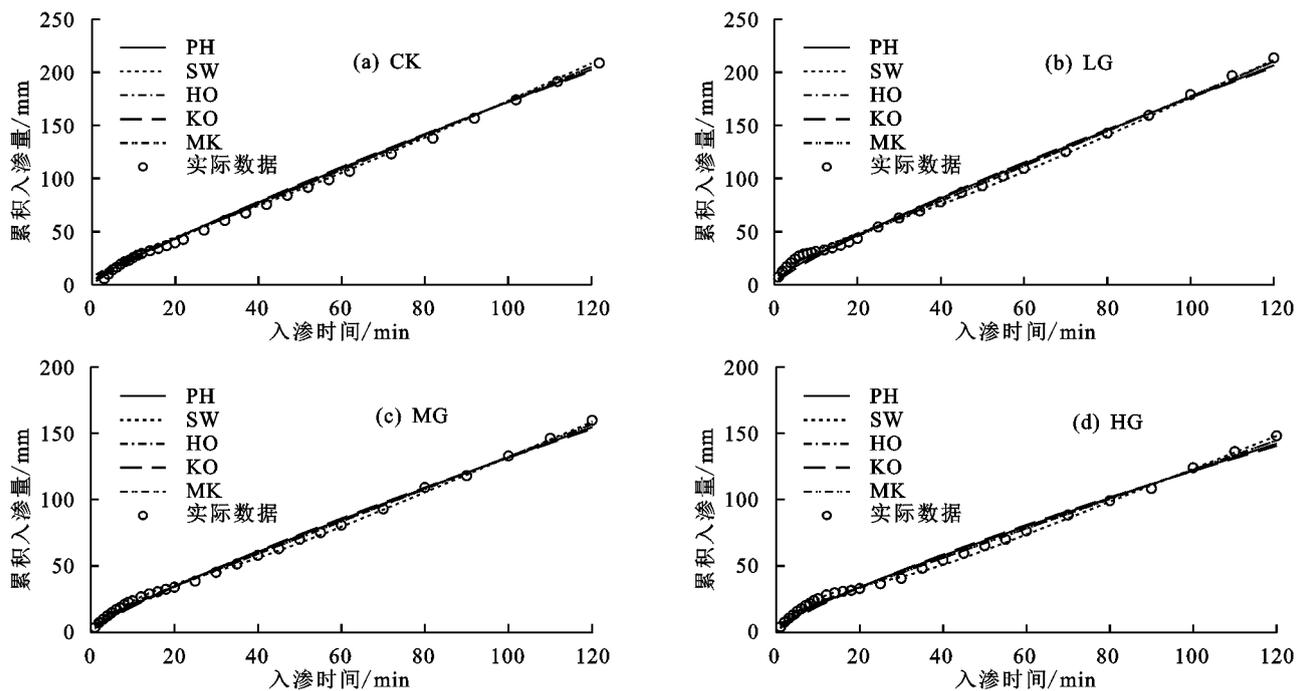


图 5 不同放牧强度下实际土壤累积入渗与拟合土壤累积入渗的比较

表 4 不同放牧强度下土壤累积入渗拟合模型拟合结果对比

模型	放牧强度	拟合方程	$R^2$	RMSE	NSE	AIC
PH	CK	$I(t) = 3.74t^{0.5} + 1.35t$	0.997	2.837	0.998	81.307
	LG	$I(t) = 4.63t^{0.5} + 1.30t$	0.994	4.300	0.994	91.785
	MG	$I(t) = 3.32t^{0.5} + 0.98t$	0.996	2.793	0.996	80.912
	HG	$I(t) = 3.91t^{0.5} + 0.83t$	0.992	3.527	0.992	86.789
SW	CK	$I(t) = 1.73t - 6.42 [1 - \exp(0.53t^{0.5} - 0.07t)]$	0.999	1.373	0.999	64.509
	LG	$I(t) = 1.78t - 3.03 [1 - \exp(0.93t^{0.5} - 0.13t)]$	0.996	3.346	0.997	86.941
	MG	$I(t) = 1.33t - 1.17 [1 - \exp(1.24t^{0.5} - 0.17t)]$	0.999	1.529	0.999	67.214
	HG	$I(t) = 1.24t - 0.88 [1 - \exp(1.60t^{0.5} - 0.23t)]$	0.998	1.772	0.998	70.930
HO	CK	$I(t) = 1.62t + 10.93(1 - e^{-0.52t})$	0.999	1.311	0.999	63.343
	LG	$I(t) = 1.64t + 13.46(1 - e^{-0.72t})$	0.998	2.164	0.999	75.963
	MG	$I(t) = 1.22t + 10.04(1 - e^{-0.40t})$	0.999	1.582	0.999	68.077
	HG	$I(t) = 1.11t + 11.84(1 - e^{-0.42t})$	0.997	2.078	0.997	74.944
KO	CK	$I(t) = 3.29t^{0.86}$	0.995	3.982	0.995	89.848
	LG	$I(t) = 3.81t^{0.83}$	0.990	5.609	0.991	98.477
	MG	$I(t) = 2.78t^{0.84}$	0.992	3.706	0.993	88.036
	HG	$I(t) = 3.13t^{0.79}$	0.987	4.481	0.987	92.820
MK	CK	$I(t) = 8.05t^{0.11} + 1.60t$	0.999	1.827	0.999	70.218
	LG	$I(t) = 12.01t^{0.02} + 1.64t$	0.998	2.610	0.998	79.208
	MG	$I(t) = 6.81t^{0.13} + 1.20t$	0.998	2.084	0.998	73.543
	HG	$I(t) = 8.40t^{0.11} + 1.09t$	0.995	2.631	0.996	79.411

### 3 讨论

希拉穆仁草原位于干旱半干旱地区的风蚀、水蚀两相侵蚀区<sup>[24]</sup>,土壤水文过程对该区域生态系统的植物群落类型、分布、结构和组成起决定性作用<sup>[25]</sup>。当地的放牧活动使土壤参数发生改变,进而影响土壤入渗过程,且不同土壤参数之间的耦合效应对入渗的影响也有较大的差异。放牧活动的加强,外加干旱的环境胁迫,使草地植被受到最直接的影响,植物群落

的高度、覆盖度、生物量下降,植物由叶片面积较大、根系分布较深的多年生根茎禾草向多年生丛生禾草及1,2年生植物杂草演变<sup>[26]</sup>,土壤孔隙度、含水率、黏粒体积分数、粉粒体积分数整体变化趋势呈减小趋势,而土壤容重、砂粒体积分数则呈增大趋势,土壤入渗性能降低,入渗水文过程发生改变。这是由于在过度放牧下,家畜的践踏、采食能够抑制微生物和植物根系的生长发育,恶化土壤结构,降低土壤通气性,土

壤容重增大,土壤结构的稳定性减弱,土壤机械组成向粗化趋势转变,促使土壤表面紧实度增加,地表产流量增加,水力侵蚀能力增大,同时由于降雨入渗的利用率降低,外加剧烈的风蚀活动,使当地主要环境因子土壤含水率不断下降<sup>[27-28]</sup>,导致生态环境逐渐恶化。通常情况下,土壤入渗速率与土壤含水率呈负相关,与土壤孔隙度、土壤砂粒体积分数呈正相关<sup>[10]</sup>,但本研究的土壤含水率范围为 5.42%~6.94%,整体含量较小,加之土壤孔隙度对土壤入渗速率的影响显著大于土壤含水率、土壤砂粒体积分数及其耦合效应<sup>[29]</sup>,且 LG 的土壤孔隙度显著高于其他放牧强度,因而有利于降水的入渗,导致 LG 的初始入渗速率、稳渗速率在各放牧强度下均为最大。适度放牧可改善土壤参数及植被生长情况,增大土壤的入渗性能。HG 的土壤初始入渗速率的变化趋势与其他放牧强度不同,且并不为最小值,这是由于 HG 较 MG 相比,二者孔隙度虽无显著差异,但 HG 土壤表层含水率更低,且砂粒体积分数更高,多个土壤参数的耦合效应使 HG 较 MG 表现更为疏松,吸水性更强,初始入渗速率因此也较 MG 高。研究同时发现,不同放牧强度下,土壤入渗过程均经历快速入渗阶段、趋稳阶段及稳渗阶段,与杨思维等<sup>[30]</sup>研究的入渗过程变化相一致,但本研究结果也表明,当放牧强度超过一定程度时,土壤入渗速率达到稳渗阶段的时间缩短,使土壤抗降雨侵蚀能力下降,发生土壤侵蚀的风险增大。

土壤入渗速率拟合模型的拟合结果表明,较其他拟合模型相比,Horton 模型的  $R^2$ 、NSE、RMSE、AIC 值均表现最好,对本研究区的土壤入渗速率拟合效果最好,其次为 Kostiakov 模型、通用经验模型,Philip 模型拟合效果最差。导致 4 种模型表现出差异,可能是由于土壤入渗过程曲线为前期入渗速率较高,经入渗速率快速下降阶段后,入渗速率变化减缓且逐渐趋于一个稳定常数值,而 KM 的后期拟合结果仍呈指数下降趋势,稳渗后期拟合效果较差;GM 中指数参数  $n$  反映入渗速率的下降速率,虽然拟合效果较好,但与实际情况不符;PM 的拟合模型的指数系数恒定,对于入渗速率下降减缓趋稳部分的拟合效果,与多参数的 GM、HM 相比,拟合效果较差。HM 的  $f_0$ 、 $f_c$  的数值变化范围分别为 3.53~6.5,1.24~1.78 mm/min,均与实际值范围 3.71~7.12,1.33~1.78 mm/min 相接近,表明  $f_0$ 、 $f_c$  均能较好地代表实际的初渗速率与稳渗速率,可以得出 HM 能较好地描述长时间土壤入渗速率的变化,这与许多学者<sup>[19,28,31]</sup>的研究结果一致。土壤累积入渗拟合模型的拟合结果表

明,Horton 模型拟合结果最佳,Swartzenruber 模型拟合效果与 Horton 模型接近。这是由于二者模型中的主要影响参数  $m$ 、 $c$  分别与  $f_c$ 、 $b/a$  意义相同,但 Swartzenruber 模型的  $b/a$  中的  $a$  又是 1 个指数参数,两参数之间具有显著制约关系,在该区中的拟合效果较 Horton 模型差。Kostiakov 模型拟合效果表现最差,经修改后的 Modified kostiakov 模型的拟合效果较 Kostiakov 模型表现更好。因此,在本研究区中,Horton 模型对土壤入渗速率及土壤累积入渗量的拟合效果均较好。而陈娟等<sup>[10]</sup>研究表明,通用模型更适合于荒漠草原区水分的研究,吕文聪等<sup>[32]</sup>研究结果表明,Kostiakov 模型可以更好地反映不同粒径砾石覆盖土壤水分入渗过程,杜建会等<sup>[33]</sup>研究发现,典型绿地土壤累积入渗过程更符合 Kostiakov 模型,表明不同区域入渗模型适用性存在差异,因此应更注重不同区域类型、不同研究对象的土壤入渗特征研究。

## 4 结论

(1)在不同放牧强度下,LG 初始入渗速率(5.12 mm/min)、稳渗速率(1.93 mm/min)、2 h 累积入渗量(213.42 mm)分别较其他放牧强度表现最佳。随着放牧强度的增大,土壤入渗速率达到稳渗速率的历时逐渐缩短,而 LG 的历时较其他放牧强度延长。适度放牧会提高土壤入渗性能,增强对降雨的快速贮存以及蓄洪与涵养水源作用

(2)随着放牧强度的增大,土壤孔隙度、含水率、黏粒体积分数、粉粒体积分数、植被盖度、初始入渗速率、稳渗速率均呈先增大后减小趋势,土壤容重、砂粒体积分数呈增大趋势,土壤参数特征值均在 LG 表现最佳。土壤容重与土壤总孔隙度、毛管孔隙度是土壤入渗速率的显著影响因子,分别与土壤入渗速率和累积入渗量呈显著负相关和显著正相关关系,显著影响土壤的入渗能力和贮水能力。适度放牧可改善土壤参数、植被生长情况以及土壤的入渗性能。

(3)通过土壤入渗速率模型和土壤累积入渗模型分析,Horton 模型对土壤入渗速率及土壤累积入渗量的拟合效果均表现为拟合结果与实际值偏差最小,拟合性能优良,可信度最高。土壤入渗速率模型中 Philip 模型拟合效果最差。土壤累积入渗模型中 Kostiakov 模型拟合效果表现最差;Swartzenruber 模型拟合效果仅次于 Horton 模型,主要是二者中的主要参数意义相似,但后者的各个参数独立性、适用性更好。

### 参考文献:

- [1] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等.定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J].应用生态学报,2014,

- 25(8):2281-2288.
- [2] 吕刚,顾宇书,魏忠平,等.白石砬子自然保护区几种主要植被类型土壤入渗特性研究[J].生态环境学报,2013,22(5):780-786.
- [3] Bagarello V, Castellini M, Prima S D, et al. Soil hydraulic properties determined by infiltration experiments and different heights of water pouring[J].Geoderma, 2014,213:492-501.
- [4] 王承书,杨晓楠,孙文义,等.极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J].土壤学报,2020,57(2):296-306.
- [5] 娄义宝,史东梅,江娜,等.土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J].土壤学报,2020,57(6):1399-1410.
- [6] 马婧怡,贾宁凤,程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J].生态学报,2018,38(10):3471-3481.
- [7] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7571-7579.
- [8] 王兴,宋乃平,杨新国,等.放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应[J].草业学报,2013,22(5):27-36.
- [9] 王涵,赵文武,贾立志.近 10 年土壤水蚀研究进展与展望:基于文献计量的统计分析[J].中国水土保持科学,2021,19(1):141-151.
- [10] 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.
- [11] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(增刊 1):397-410.
- [12] Michal D, Tomas V, Jaromir D, et al. Interpretation of ponded infiltration data using numerical experiments [J].Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(3):289-299.
- [13] Jesús R C, Igor B, Hadis M, et al. The impact of vineyard abandonment on soil properties and hydrological processes[J].Vadose Zone Journal,2017,16(12):1-7.
- [14] 郭茹茹,杨磊,李宗善,等.半干旱黄土高原苜蓿草地撂荒过程土壤水分变化特征[J].生态学报,2020,40(23):8618-8626.
- [15] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J].生态学报,2016,36(11):3441-3449.
- [16] Mirzaee S, Zolfaghari A A, Gorji M, et al. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2014,60(5):681-693.
- [17] 王琴,蒙仲举,汪季,等.希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被—土壤响应特征[J].生态学报,2017,37(4):1159-1167.
- [18] 李博.中国北方草地退化及其防治对策[J].中国农业科学,1997,30(6):1-9.
- [19] 樊才睿,张成福,史小红,等.草甸草原不同放牧强度草地土壤水分入渗特征[J].节水灌溉,2020(3):27-32.
- [20] 吴军虎,李玉晨,邵凡凡,等.生化黄腐酸对土壤物理性质及水分运动特性的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):159-164,171.
- [21] 程慧娟,张俊友,王全九.垂直线源灌不同线源直径下的入渗规律及其模型适用性研究[J].节水灌溉,2020(6):29-32,37.
- [22] Jha M K, Mahapatra S, Mohan C, et al. Infiltration characteristics of lateritic vadose zones: Field experiments and modeling [J]. Soil and Tillage Research, 2019,187:219-234.
- [23] 李卓,刘永红,杨勤.土壤水分入渗影响机制研究综述[J].灌溉排水学报,2011,30(5):124-130.
- [24] 耿林昇,李红丽,董智,等.放牧对希拉穆仁草原土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):121-126.
- [25] 邹慧,高光耀,傅伯杰.干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J].生态学报,2016,36(11):3127-3136.
- [26] 张娜,秦艳,金轲,等.放牧对典型草原群落特征及土壤物理性状的影响[J].中国草地学报,2020,42(4):91-100.
- [27] 李茜,孙亚男,林丽,等.放牧高寒嵩草草地不同演替阶段土壤酶活性及养分演变特征[J].应用生态学报,2019,30(7):2267-2274.
- [28] 尤全刚,薛娴,彭飞,等.高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应[J].中国沙漠,2015,35(5):1183-1192.
- [29] 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):1610-1620.
- [30] 杨思维,张德罡,牛钰杰,等.短期放牧对高寒草甸表层土壤入渗和水分保持能力的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):96-101.
- [31] 孙福海,肖波,张鑫鑫,等.黄土高原生物结皮覆盖对土壤积水入渗特征的影响及其模型模拟[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(10):82-91.
- [32] 吕文聪,邱阳,谢忠奎,等.砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):46-51.
- [33] 杜建会,方政,林志斌.广州市典型绿地土壤水分入渗特征[J].生态学报,2021,41(24):9869-9877.