网络出版时间:2017-06-06　13:46　　DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.07.008
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170606.1346.016.html

扰动地表下不同长度坡面土壤物理性质及水分入渗特征

郭晓朦[1,2],何丙辉[1],姚　云[3],秦　伟[4],李天阳[5]

(1 西南大学 资源环境学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400715;2 四川沃尔宜环保科技有限公司,四川 成都 610064;
3 息烽县水务管理局,贵州 息烽 551100;4 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所 北京 100038;
5 四川大学 水利水电学院,四川 成都 610065)

[摘　要] 【目的】研究扰动地表下不同长度坡面土壤物理性质及水分入渗特征,为合理开发利用土地资源提供科学依据。【方法】通过野外调查与室内分析相结合的方法,于 2013 年选择具有代表性的坡度为 15°的地块,设置 6 个处理:长度 20 m 人工扰动地表坡面、长度 20 m 自然坡面、长度 40 m 人工扰动地表坡面、长度 40 m 自然坡面、长度 60 m 人工扰动地表坡面、长度 60 m 长自然坡面,测定不同处理土壤的物理性质及水分入渗过程,采用常用的 4 种入渗模型(Kostiakov 模型、Horton 模型、Philip 模型、通用经验公式模型)对土壤入渗过程进行拟合,并分析土壤水分入渗特征指标(初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率、90min 累计入渗速率)与理化性质的相关性。【结果】相同措施处理下,坡长越长,土壤体积质量越小。在扰动地表和自然坡面下,总孔隙度和非毛管孔隙度的差异不显著,扰动地表坡面土壤初始含水率表现为 60 m 坡长>40 m 坡长>20 m 坡长。采用常用入渗模型进行拟合时,Kostiakov 模型的拟合精度在 0.646～0.963,平均值为 0.886;Horton 模型的拟合精度在 0.878～0.981,平均值为 0.953,Philip 模型的拟合精度在 0.317～0.709,平均值 0.592,通用经验公式模型的拟合精度在 0.765～0.970,平均值为 0.920,可知 Horton 模型拟合精度最大。不同坡长下,自然坡面的土壤入渗特征指标大于扰动地表坡面。相关性分析结果显示,土壤水分入渗特征指标与土壤体积质量呈显著或极显著负相关,与非毛管孔隙度呈正相关,与土壤通气度呈极显著正相关;而毛管孔隙度、总孔隙度、自然含水率、有机质与土壤水分入渗特征指标相关性不显著。【结论】20 m 坡长下,扰动地表不利于改善土壤渗透性,扰动地表处理措施下的土壤水分入渗能力弱于自然坡面;60 m 坡长下,土壤通气性和透水性较好,土壤水分入渗能力强。Horton 模型是分析和预测扰动地表下不同坡长土壤水分入渗的最优模型。

[关键词] 扰动地表;不同坡长;土壤物理性质;水分入渗

[中图分类号] S152.7　　[文献标志码] A　　[文章编号] 1671-9387(2017)07-0057-09

Soil physical properties and infiltration characteristics of different slope lengths under disturbed surface

GUO Xiaomeng[1,2], HE Binghui[1], YAO Yun[3], QIN Wei[4], LI Tianyang[5]

(1 *College of Resources and Environment, Southwest University; Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing* 400715, *China*; 2 *Sichuan Allvery Environmental Protection Co. Ltd, Chengdu, Sichuan* 610064, *China*;
3 *Water Authority of Xifeng County, Xifeng, Guizhou* 551100, *China*; 4 *Department of Sediment Research China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 5 *College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan* 610065, *China*)

[收稿日期] 2016-06-10
[基金项目] 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301048);国家自然科学基金项目(41271291)
[作者简介] 郭晓朦(1989－),女,黑龙江哈尔滨人,硕士,主要从事城市水土保持研究。E-mail:zhiyin631127@sina.cn
[通信作者] 何丙辉(1966－),男,湖南岳阳人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。
E-mail:hebinghui@swu.edu.cn

Abstract:【Objective】This study investigated soil physical properties and water infiltration characteristics in disturbed surface with different slope lengths to provide scientific basis for rational development and utilization of land resources.【Method】Through field investigation and laboratory analysis methods, a representative block with 15 ° slope was selected in 2013 and six treatments were set up: disturbance surface slope in the length of 20 meters, natural slope in the length of 20 meters, disturbance surface slope in the length of 40 meters, natural slope in the length of 40 meters, disturbance surface slope in the length of 60 meters, and natural slope in the length of 60 meters. Physical properties and soil water infiltration process in different treatments were measured, and four common infiltration models (Kostiakov model, Horton model, Philip model, and general empirical formula model) were used to fit soil water infiltration process. The relationships between physical and chemical properties with soil water infiltration characteristics (initial infiltration rate, average infiltration rate, steady infiltration rate, and 90min cumulative infiltration) were also analyzed.【Result】In same treatments, longer slope length had smaller soil bulk density. With surface disturbance and natural slope, the differences in total porosity and non-capillary porosity were not significant, and initial soil water content was in the order of 60>40>20 meters. The fitting accuracy of Kostiakov model was 0.646－0.963 with an average of 0.886, that of Horton model was 0.878－0.981 with an average of 0.953, that of Philip model was 0.317－0.709 with an average of 0.592, and that of the general empirical formula model was 0.765－0.970 with an average of 0.920. Horton model had the largest fitting accuracy. Under different slope lengths, soil water infiltration of natural slope was greater than disturbed surface. Correlation analysis showed that soil water infiltration capacity was negatively and significantly correlated with soil bulk density, positively correlated with non-capillary porosity, and significantly and positively correlated with soil ventilation.【Conclusion】With 20 meters slope length, surface disturbance was not conducive to improve soil permeability, while with 60 meters slope length, soil ventilation and water permeability were better. Horton model was the optimal model to analyze and predict soil infiltration.

Key words: disturbed surface; slope length; soil physical properties; water infiltration

在经济的不断发展下,农林建设开发项目的数量逐渐增多,坡地和山地不断被开发利用,大面积的土壤地表被人工扰动,加剧了水土流失,例如煤矿开采[1]、开荒等人为扰动地表活动,造成植被破坏以及大量的土地疏松裸露,土壤受侵蚀程度增强[2]。黄毅[3]和贺亮等[4]分别研究了甘肃干旱地区及滇南地区扰动地表后水土流失情况及防治对策,另有一些专家重点研究了生态系统中扰动破坏地表对环境的影响[5-7],但是当前关于人为扰动紫色土地表的研究不够深入,特别是关于人为扰动后土壤物理性质的分析研究还存在不足,同时因紫色土土层浅薄,母岩疏松,并易于崩解,所以深入研究人为扰动地表后对紫色土壤物理性质的影响是必要的。

坡长是影响土壤理化性质的重要因素之一,也是决定土壤侵蚀程度的地形因素,目前不同坡长对土壤性质的影响研究多集中在黄土高原区[8-9],蔡强国[10]的研究结果表明,坡面侵蚀产沙量随坡长先呈增加趋势,但是当坡长大于某一临界长度时,单位面积侵蚀量反而会随着坡长的增加而减少。坡长不同,土壤侵蚀量及径流量也不同,并随坡长的增加而增加[11],而土壤入渗是降雨或灌溉水再分配的重要过程[12],也是研究分析土壤侵蚀过程的重要参数,不同坡长下土壤入渗过程存在差异。本研究进行了3种不同坡长下人为扰动地表试验,分析扰动地表下不同长度坡面土壤物理性质及水分入渗过程的变化,以期为今后合理开发和利用土地资源提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区歇马镇西南大学试验农场(106°18′2.46″－106°25′0.5″ E,29°43′50.51″－29°48′59.12″ N),距重庆市主城区约为30 km。地貌类型为浅丘地貌,海拔175～1 312 m。研究区属亚热带温暖湿润季风气候区,年平均气温18.6 ℃,全年日照时效1 006.2 h,无霜期359 d,年降雨量1 173.6 mm,气候温和,光雨热同季,热量丰富,雨

量充沛。土壤主要是侏罗纪沙溪庙组母质发育的中性紫色水稻土和灰棕紫泥土。

1.2　试验设计

于 2013 年在研究区选择一个土壤质地具有代表性的、坡度为 15°的地块，设置 6 个处理：长度 20 m 扰动地表坡面、长度 20 m 自然坡面、长度 40 m 扰动地表坡面、长度 40 m 自然坡面、长度 60 m 扰动地表坡面、长度 60 m 长自然坡面，其中扰动地表坡面处理设 2 次重复，自然坡面处理设 1 次重复，共计 9 个径流小区，径流小区设计为长方形，径流小区宽度均为 1 m。为了防止各小区间发生土壤颗粒和养分的交换，小区之间用水泥墙体隔开。各小区基本情况见表 1。9 个径流小区样地处理前，其土壤条件、土壤养分情况基本一致。试验开始前，扰动小区由人工翻松表土深约 30 cm，并拔去荒草植被，表面耙平。自然恢复小区不进行松土及拔草处理，保持自然坡面，其上长有杂草，覆盖度为 60%。

本研究所用数据的试验观测时间为 2014 年，对各处理下径流小区每月进行管理，自然坡面作为对照组，每月进行人工适当处理使其覆盖度保持在 55%～60%；扰动地表处理的坡面，在每月进行适当人工除草、扰动处理，雨季时因坡面植被增长较快，故雨季时每月进行 3～4 次除草，使其保持疏松裸露地表，人为扰动时长为 1 d。

表 1　不同径流小区的基本情况

Table 1　Basic situation of different runoff plots

处理 Treatment	土壤类型 Soil type	小区处理方式 Plot treatment	小区规格 Plot size	坡度/(°) Slope degree	植被覆盖度/% Vegetation coverage
长度 20 m 扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 20 meters	紫色土 Purple soil	人工除草、人工翻松表土深约 30 cm Artificial weeding, scarifying topsoil of 30 cm depth	1 m×20 m	15	0
长度 20 m 自然坡面 Natural slope with the length of 20 meters	紫色土 Purple soil	保持自然坡面 Keep the natural slope	1 m×20 m	15	60
长度 40 m 扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 40 meters	紫色土 Purple soil	人工除草、人工翻松表土深约 30 cm Artificial weeding, scarifying topsoil of 30 cm depth	1 m×40 m	15	0
长度 40 m 自然坡面 Natural slope with the length of 40 meters	紫色土 Purple soil	保持自然坡面 Keep the natural slope	1 m×40 m	15	60
长度 60 m 扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 60 meters	紫色土 Purple soil	人工除草、人工翻松表土深约 30 cm Artificial weeding, scarifying topsoil of 30 cm depth	1 m×60 m	15	0
长度 60 m 自然坡面 Natural slope with the length of 60 meters	紫色土 Purple soil	保持自然坡面 Natural slope	1 m×60 m	15	60

1.3　采样方法

根据研究区所处地形以及不同坡长等特点，综合考虑样点分布的代表性，于 2014 年 5 月进行采样，采样前一周已经对径流小区进行了人工除草，采样时扰动小区保持裸露状态。采用对角线混合法，采集 0～20 cm 土层土样，每个小区分为上坡、中坡、下坡 3 个坡位进行采样，每个坡位取 3 个采样点，混合均匀后用四分法分取 1 kg 左右组成 1 个土壤样品，每个小区设置 3 次重复，用以测定土壤理化性质。用环刀及铝盒分别采集每个小区表层原状土样品，采样点分别为坡上、坡中、坡下，用于测定土壤入渗速率、土壤初始含水率、土壤体积质量、孔隙度等物理性质，最后取平均值。

1.4　测定指标及方法

采样后立即对相关土壤理化指标进行了测定，保证试验数据的准确性。初始含水率采用烘干法测定，有机质含量采用重铬酸钾容量法测定；在进行入渗试验前，用环刀法测定土壤体积质量、孔隙度和土壤通气度等土壤物理性质指标[13]。

渗透速率测定前，先将装有测试土壤的环刀浸入水中 12 h，浸水时保持水面与环刀口平齐。随后利用室内法（环刀法）[14]对土壤渗透速率进行测定。入渗试验具体操作方法为：在装有原状土的环刀上方对接一个空环刀，并用玻璃胶带密封两个环刀之间的缝隙，在装有土体环刀的下方放置漏斗和烧杯，在漏斗架上固定好装置，烧杯用来收集穿透土体的水分。向空环刀内加水至于环刀口齐平，待漏斗下方滴下第一滴水开始计时，每隔 1，2，5 min 更换 1 次漏斗下的烧杯，并分别测量渗水量。试验过程中加水时保持与环刀口齐平[15]。

各指标处理方法为：初始入渗速率＝最初入渗时段内渗透量/入渗时间（最初入渗时间取前 3 min），平均渗透速率＝达到稳渗时的渗透总量/达到稳渗时的时间，稳定入渗速率为单位时间内的渗

透量趋于稳定(即内环水头趋于稳定)时的渗透速率,累计入渗量统一取前90 min计算[16]。

1.5 数据分析

运用EXCEL 2010及SPSS 19.0分析软件进行数据的处理和统计对比分析。

利用相关数学模型对土壤渗透特征进行模拟,可以更好地描述扰动地表下不同长度坡面土壤入渗特征,对土壤入渗模型进行研究分析,常用的模型有以下4种。

Kostiakov模型:

$$f(t)=at^{-n}。\quad(1)$$

式中:$f(t)$为入渗速率,t为入渗时间,a、n为拟合参数。

Horton模型:

$$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}。\quad(2)$$

式中:f_0和f_c分别为初始入渗速率和稳定入渗速率,k为经验参数。

Philip模型:

$$f(t)=(1/2)st^{-1/2}+A。\quad(3)$$

式中:s为土壤吸水率,A为稳定入渗速率。

通用经验公式模型:

$$f(t)=at^{-n}+b。\quad(4)$$

式中:a、b为经验参数,n为拟合参数。

2 结果与分析

2.1 扰动地表下不同长度坡面土壤基本理化性质

由表2可以看出,6种处理措施下,相同坡长下土壤体积质量差异性不显著。扰动地表和自然坡面土壤体积质量的变化规律为20 m坡长>40 m坡长>60 m坡长。在相同坡长下,长度40,60 m扰动地表坡面的土壤体积质量比自然坡面分别高2.99%,8.8%。扰动地表坡面与自然坡面土壤体积质量变化幅度大小顺序为60 m坡长>40 m坡长>20 m坡长。

表2 扰动地表下不同长度坡面土壤的基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil in disturbed surface with different slope lengths

处理 Treatment	土壤体积质量/(g·cm^{-3}) Soil bulk density	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	总孔隙度/% Total porosity	初始含水率/% Initial soil water content	有机质/(g·kg^{-1}) Organic matter	土壤通气度/% Soil venting quality
长度20 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 20 meters	1.41±0.06 ab	37.62±1.51 ab	5.40±3.80 a	43.02±2.30 a	22.19±1.28 a	22.20±2.87 a	11.71±4.60 a
长度20 m自然坡面 Natural slope with the length of 20 meters	1.45±0.08 a	37.74±3.81 ab	4.88±2.89 a	42.62±4.79 a	20.16±2.20 a	25.16±0.10 ab	13.57±3.89 a
长度40 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 40 meters	1.38±0.10 ab	37.43±2.66 ab	4.47±1.78 a	41.90±3.47 a	22.33±1.86 a	28.29±1.61 ab	11.09±2.47 a
长度40 m自然坡面 Natural slope with the length of 40 meters	1.34±0.04 ab	43.02±4.08 a	4.41±1.01 a	47.43±3.15 a	25.35±6.40 a	34.56±4.82 b	13.32±6.20 a
长度60 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 60 meters	1.36±0.06 ab	38.31±2.83 ab	5.39±2.79 a	43.70±0.09 a	23.82±1.28 a	30.13±9.80 ab	11.39±3.09 a
长度60 m自然坡面 Natural slope with the length of 60 meters	1.25±0.15 b	36.90±3.03 b	8.76±1.49 a	45.66±4.47 a	20.52±0.58 a	30.78±7.53 ab	20.04±7.90 a

注:同列数据后标不同小写字母表示在$P<0.05$水平差异显著。

Note: Different small letters represent significant difference at $P<0.05$ level.

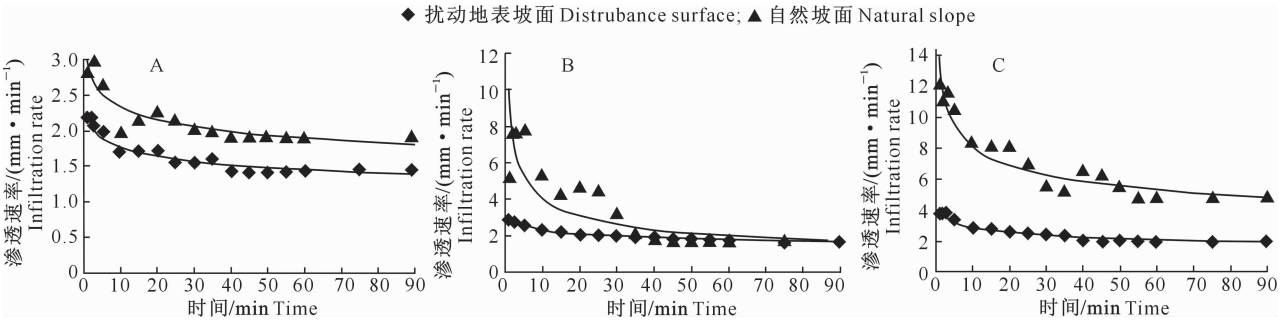
表2中,各处理的土壤总孔隙度在41.90%~47.43%,土壤毛管孔隙度在36.90%~43.02%,土壤非毛管孔隙度在4.41%~8.76%。扰动地表处理措施下,长度40 m坡面的土壤总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度最小。在相同坡长下,长度20 m扰动地表坡面土壤的总孔隙度和非毛管孔隙度比自然坡面分别高0.94%和10.66%,长度40 m扰动地表坡面土壤的非毛管孔隙度比自然坡面高1.36%,长度60 m扰动地表坡面土壤毛管孔隙度比自然坡面高3.82%。通过方差分析,各处理间的总孔隙度和非毛管孔隙度的差异性不显著,同一坡长不同处理措施下土壤毛管孔隙度的差异性不显著。

表2中,6种措施处理下,土壤初始含水率在20.16%~25.35%。长度20 m扰动地表坡面和长度60 m扰动地表坡面土壤初始含水率分别比对应的自然坡面高10.07%和16.08%。不同坡长扰动

地表处理措施下土壤初始含水率为 60 m 坡长＞40 m 坡长＞20 m 坡长。

2.2　扰动地表下不同长度坡面对土壤水分入渗的影响

2.2.1　扰动地表下不同长度坡面土壤水分入渗过程　由图 1 可以看出，不同坡长扰动地表处理措施下土壤入渗过程存在一定的差异，随着时间的延长，渗透速率的变化趋于平缓，水分开始入渗阶段渗透速率下降幅度偏大，但下降幅度越来越小，经过一定时间后达到稳定入渗。长度 20，40，60 m 扰动地表坡面土壤渗透过程达到稳定入渗的时间分别为 40，60，55 min，长度 20，40，60 m 自然坡面土壤渗透过程达到稳定入渗的时间分别为 50，50，55 min。40 和 60 m 自然坡面下的土壤渗透速率随时间变化较大，入渗曲线较陡，40 和 60 m 扰动地表坡面土壤入渗速率随时间变化较小，入渗曲线较平缓。20 m 扰动地表坡面和 20 m 自然坡面下土壤入渗速率随时间变化的趋势相差并不明显。3 种坡长条件下，自然坡面的土壤渗透速率均大于扰动地表坡面。



A. 20 m 坡长 Solpe in 20 meters；B. 40 m 坡长 Solpe in 40 meters；C. 60 m 坡长 Solpe in 60 meters

图 1　扰动地表下不同长度坡面土壤水分入渗过程

Fig. 1　Soil water infiltration process in disturbed surface with different slope lengths

2.2.2　扰动地表下不同长度坡面土壤水分入渗特征　研究土壤入渗时，常用的 4 个指标为初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率和累计入渗量。由表 3 可以看出，不同坡长扰动地表处理措施下，土壤水分入渗特征变化明显，变化规律为初始入渗速率＞平均入渗速率＞稳定入渗速率。各种措施处理下，自然坡面下土壤水分入渗特征大于扰动地表坡面。

表 3　扰动地表下不同长度坡面土壤水分入渗速率特征

Table 3　Soil infiltration rates in disturbed surface with different slope lengths

处理 Treatment	初始入渗速率/(mm·min⁻¹) Initial infiltration rate	平均入渗速率/(mm·min⁻¹) Average infiltration rate	稳定入渗速率/(mm·min⁻¹) Steady infiltration rate	90 min 累计入渗量/mL 90 minutes cumulative infiltration
长度 20 m 扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 20 meters	2.14	1.67	1.45	139.37
长度 20 m 自然坡面 Natural slope with the length of 20 meters	2.94	2.15	1.90	183.53
长度 40 m 扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 40 meters	2.82	2.03	1.61	169.82
长度 40 m 自然坡面 Natural slope with the length of 40 meters	6.78	3.64	1.72	250.50
长度 60 m 扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 60 meters	3.78	2.45	1.96	203.23
长度 60 m 自然坡面 Natural slope with the length of 60 meters	11.61	6.95	4.82	551.05

由表 3 可知，在不同坡长下，长度 60 m 扰动地表坡面土壤初始入渗速率比长度 20，40 m 扰动地表坡面分别高 76.63％和 34.02％，长度 60 m 自然坡面土壤的初始入渗速率比长度 20，40 m 自然坡面分别高 294.90％和 71.24％。扰动地表坡面和自然坡面下，土壤平均入渗速率的变化规律均为 60 m 坡长＞40 m 坡长＞20 m 坡长。土壤稳定入渗速率为 1.45～4.82 mm/min，60 m 自然坡面的稳定入渗速

率与其他处理差异较大。不同长度自然坡面下,土壤稳定入渗速率表现为60 m坡长>20 m坡长>40 m坡长,而扰动地表坡面则为60 m坡长>40 m坡长>20 m坡长。90 min累计入渗量最小的是长度20 m扰动地表坡面,分别占40,60 m扰动地表坡面土壤90 min累计入渗量的82.07%和68.58%。长度60 m自然坡面的土壤90 min累计入渗量最大,分别比长度20,40 m自然坡面高200.25%和119.98%。

表3显示,20,40,60 m自然坡面的土壤初始入渗速率比相同长度的扰动地表坡面分别高37.38%,140.43%,207.14%;对于平均入渗速率,长度20,40,60 m自然坡面分别比相同长度的扰动地表坡面高28.74%,79.31%,183.67%;20,40,60 m自然坡面的稳定入渗速率分别比相同长度的扰动地表坡面分别高31.03%,6.83%,145.92%。长度20,40,60 m自然坡面的90 min累计入渗量比相同长度的扰动地表坡面分别高31.68%,47.51%,171.15%。可以看出,除稳定入渗速率外,随着坡长的增加,自然坡面的初始入渗速率、平均入渗速率及90 min累计入渗速率与扰动地表坡面差异越来越大。

2.2.3 扰动地表下不同长度坡面土壤水分入渗特征模拟 研究土壤入渗时通常使用回归模型对入渗特征进行拟合,拟合度越高模型就越适合。扰动地表下不同长度坡面土壤水分入渗参数拟合结果见表4。

表4 扰动地表下不同长度坡面土壤水分入渗参数拟合结果

Table 4 Fitting results of soil water infiltration parameters in disturbed surface with different slope lengths

处理 Treatment	Kostiakov模型 Kostiakov model			Horton模型 Horton model			
	a	n	R^2	f_0	f_c	k	R^2
长度20 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 20 meters	2.282	0.110	0.963	2.244	1.449	0.076	0.978
长度20 m自然坡面 Natural slope with the length of 20 meters	3.115	0.120	0.914	3.072	1.893	0.076	0.959
长度40 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 40 meters	3.056	0.132	0.951	2.885	1.665	0.049	0.962
长度40 m自然坡面 Natural slope with the length of 40 meters	8.106	0.279	0.646	7.542	0.988	0.037	0.878
长度60 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 60 meters	4.166	0.172	0.929	3.948	1.915	0.058	0.981
长度60 m自然坡面 Natural slope with the length of 60 meters	13.298	0.215	0.912	12.261	4.789	0.054	0.958

处理 Treatment	Philip模型 Philip model			通用经验公式模型 General formula model			
	s	A	R^2	a	b	n	R^2
长度20 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 20 meters	3.515	1.542	0.709	4.735	−2.474	0.046	0.965
长度20 m自然坡面 Natural slope with the length of 20 meters	4.909	2.041	0.614	68.375	−65.310	0.004	0.921
长度40 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 40 meters	5.238	1.916	0.650	203.857	−200.851	0.002	0.970
长度40 m自然坡面 Natural slope with the length of 40 meters	19.919	3.048	0.317	2 594.659	−2 586.539	0.001	0.765
长度60 m扰动地表坡面 Disturbance surface slope with the length of 60 meters	8.493	2.273	0.621	294.189	−290.127	0.002	0.954
长度60 m自然坡面 Natural slope with the length of 60 meters	32.078	6.188	0.642	996.067	−983.238	0.002	0.945

由表4可知,各类模型的拟合精度存在一定差异。表示方程与实际结果的拟合精度大小的参数是回归方程中的决定系数R^2,R^2越大,说明方程的拟合效果就越好。Kostiakov模型的拟合精度在0.646~0.963,平均值为0.886;Horton模型的拟合精度在0.878~0.981,平均值为0.953;Philip模型的拟合精度在0.317~0.709,平均值0.592;通用经验公式模型的拟合精度在0.765~0.970,平均值为0.920。通过比较平均拟合精度大小,可以得出Horton模型是最优模型,通用经验公式模型次之。

2.3 土壤基本理化性质与水分渗透性的相关性

影响土壤水分入渗的因素有很多,土壤水分入渗能力与土壤孔隙度、土壤体积质量、初始含水率、有机质、土壤通气性等指标密切相关[17]。本研究选取6个处理的土壤体积质量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、初始含水率、土壤通气度及有机质与初始入渗速率、平均入渗速率、稳定入渗速率及90 min累计入渗量的平均值进行相关性分析,结果

见表 5。表 5 中，初始入渗速率与土壤体积质量呈极显著负相关；平均入渗速率、稳定入渗速率及 90 min 累计入渗量与土壤体积质量呈显著负相关，与非毛管孔隙度呈显著或极显著正相关；4 个土壤入渗特征指标与土壤通气度均呈极显著正相关，而与毛管孔隙度、总孔隙度、初始含水率、有机质 4 个指标相关性不显著。可以看出，在本研究小区内土壤水分入渗能力主要受土壤体积质量、非毛管孔隙度及土壤通气度的影响。

表 5　土壤基本理化性质与土壤水分渗透性的相关系数

Table 5　Correlate coefficient among soil physical properties and soil water infiltration properties

指标 Index	土壤体积质量 Bulk density	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	总孔隙度 Total porosity	初始含水率 Initial soil water content	土壤通气度 Soil aeration porosity	有机质 Organic matter
初始入渗速率 Initial infiltration rate	−0.918**	0.101	0.799	0.731	−0.100	0.917**	0.682
平均入渗速率 Average infiltration rate	−0.907*	−0.021	0.859*	0.646	−0.209	0.949**	0.608
稳定入渗速率 Steady infiltration rate	−0.817*	−0.333	0.957**	0.386	−0.463	0.956**	0.342
90 min 累计入渗量 90 min cumulative infiltration	−0.889*	−0.138	0.904*	0.555	−0.303	0.961**	0.520

注：* 表示相关性达显著水平（$P<0.05$），* * 表示相关性达极显著水平（$P<0.01$）。

Note: *. Correlation is significant at the $P<0.05$ level; * *. Correlation is significant at the $P<0.01$ level.

3　结论与讨论

土壤水分入渗性能是评价植被层水分调节能力的重要指标[18]，由于土地利用和种植方式不同，即使是同一类型的土壤，其渗透性能也会有很大的差异[19]。本研究通过对扰动地表下不同长度坡面的土壤物理性质及水分入渗特征的测定，分析了不同坡长扰动地表的土壤物理性质及土壤水分入渗特征指标的差异，并评价了 4 种常用入渗模型在研究区内的适宜性。

土壤体积质量时是土壤物理性质中重要指标之一，土壤体积质量的大小可以判断土壤物理性质的好坏。土壤体积质量越小，土壤就越疏松，通气性和透水性也就越好[20]。本研究中，长度 40，60 m 扰动地表坡面的土壤体积质量高于自然坡面，其原因可能是在自然降雨过程中产生大量坡面径流，扰动地表坡面下土壤表面裸露更容易受到雨水的滴溅，使土壤易形成板结，造成其土壤体积质量比自然坡面大。本试验中，在相同措施处理下，坡长越长，土壤体积质量越小，说明长度 60 m 坡面的土壤通气性和透水性比长度 20，40 m 坡面好。在扰动地表坡面下，长度 40 m 坡面土壤的总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度均最小。初始含水率是影响土壤水分入渗和传导过程，改变土壤水分渗透速率的重要因子[21]。本研究中，不同处理措施间土壤初始含水率差异性不显著，但土壤初始含水率数值整体偏高，其原因是在采样前径流小区所在地区发生自然降雨，土壤表层较为湿润所致。本研究中，不同坡长扰动地表坡面下，土壤初始含水率表现为 60 m 坡长＞40 m 坡长＞20 m 坡长。20，40，60 m 扰动地表和自然坡面下土壤入渗过程达到稳定的时间为 40～60 min，对于长度 20 m 坡面而言，扰动地表处理措施不利于改善土壤渗透性，并可能会加剧土壤侵蚀。不同措施处理下，自然坡面的土壤水分入渗特征指标大于扰动地表坡面，不同坡长下土壤入渗能力不同，其原因主要是发生自然降雨时，会在坡面上产生大量坡面径流，不同坡长下土壤表面的径流总量不同造成了土壤入渗效果的不同。此外，因自然坡面上长有杂草，杂草的生长有助于提高土壤的固土能力以及大量的凋落物回归土壤，增加了自然坡面的土壤通气程度，所以自然坡面的土壤水分入渗能力更强[22]。在进行土壤水分入渗过程拟合时，Kostiakov 模型中的 a 值能反映出入渗方程的斜率的大小，判断瞬时入渗速率衰减的快慢[23]，其数值与土壤体积质量有关[24]，通过模拟结果可以看出，a 值介于 2.282～13.298，其中长度 60 m 自然坡面的 a 值最大，长度 20 m 扰动地表坡面的 a 值最小，说明长度 60 m 自然坡面的土壤水分入渗曲线斜率最大，瞬时入渗速率衰减最快。在用 Horton 模型拟合时，k 值为 0.037～0.076，其中长度 20 m 扰动地表坡面和 20 m 自然坡面的 k 值均最大，说明相对于长度 20 m 坡面，长度 40 和 60 m 坡面的入渗速率的递减有所减慢，因此坡面越长，其对土壤水分入渗有一定减缓作用。在 Philip 模型中，参数 s 能够有效地反映土壤水分入渗能力大小，s 值越大，入渗能力越强，s 越小，入渗能力越弱[24]。由 s 值可以看出，扰

动地表处理措施下的土壤水分入渗能力要弱于自然坡面,且坡面越长土壤水分入渗能力越强。模拟结果显示,在本研究区 Horton 模型更适合模拟不同坡长扰动地表坡面土壤水分的入渗过程。

本研究中,初始入渗速率与土壤体积质量呈极显著负相关;平均入渗速率、稳定入渗速率及 90 min 累计入渗量与土壤体积质量呈显著负相关,与非毛管孔隙度呈显著或极显著正相关;4 个土壤入渗特征指标与土壤通气度均呈极显著正相关,而与毛管孔隙度、总孔隙度、初始含水率、有机质相关性不显著。可知在本研究小区内土壤体积质量、非毛管孔隙度及土壤通气度对土壤入渗能力有主要影响。

[参考文献]

[1] 张晓克.矿业扰动区地表覆被时空变化规律研究[D].太原:太原理工大学,2010.
Zhang X K. Resarch of temporal and spatial variation for land cover in mining disturbed zone [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.

[2] 贺小容,何丙辉,秦 伟,等.不同坡长条件下扰动地表对土壤养分的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):154-158,163.
He X R, He B H, Qin W, et al. Effect of disturbance surface on soil nutrient under different slope length [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 154-158, 163.

[3] 黄 毅.甘肃干旱地区工程建设扰动地表后恢复措施初探[J].甘肃水利水电技术,2011,47(9):58-61.
Huang Y. Disscussing restoration measures after construction disturbance surface in the arid region of Gansu Province [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2011, 47(9): 58-61.

[4] 贺 亮,李光伟,刘国东.滇南地区高扰动地表水土流失及防治对策[J].水土保持研究,2008,15(2):77-79.
He L, Li G W, Liu G D. The situation and coutermeasures of soil and water loss on the high disturbed surface in south Yunnan Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(2): 77-79.

[5] 唐明艳,杨永兴.不同人为干扰下纳帕海湖滨湿地植被及土壤退化特征[J].生态学报,2013,33(20):6683-6691.
Tang M Y, Yang Y X. Analysis of vegetation and soil degradation characteristics under different human disturbance in lakeside wetland, Napahai [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6681-6693.

[6] 佟乌云,陈有君,李绍良,等.放牧破坏地表植被对典型草原地区土壤湿度的影响[J].干旱区资源与环境,2000,14(4):55-60.
Tong W Y, Chen Y J, Li S L, et al. Effect of vegetation destruction by pasturing on soil moisture of typical grassland [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(4): 55-60.

[7] 吴海勇,彭晚霞,宋同清,等.桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化[J].水土保持学报,2008,22(4):143-147.
Wu H Y, Peng W X, Song T Q, et al. Changes of soil nutrients in process of natural vegetation restorationin karst disturbed area in northwest Guangxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 143-147.

[8] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀—搬运过程的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(3):1-4.
Wang X Y, Zheng F L. Effects of slope length on detachment and transport processes on a loessial hillslope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 1-4.

[9] 邓利强.黄土区工程堆积体水蚀特征及测算模型坡长因子试验研究[D].北京:中国科学院大学,2014.
Deng L Q. Experimental study on water erosion characteristics and slope length factor of water erosion calculation model for engineering accumulation in loess area [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.

[10] 蔡强国.坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J].泥沙研究,1989(4):84-91.
Cai Q G. Slope soil erosion process on slope length [J]. Journal of Sediment Research, 1989(4): 84-91.

[11] 张信宝,文安邦,奎因 T A,等.黄土峁坡农地侵蚀与坡长的关系[J].中国水土保持,1998(1):17-18,25.
Zhang X B, Wen A B, Quin T A, et al. Relation between erosion of slope farmland of loess mound and slope length [J]. Soiland Water Conservation in China, 1998(1): 17-18, 25.

[12] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等.渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2010,30(15):4162-4172.
Zhao Y Y, Wang Y J, Wang Y Q, et al. Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics insource water protect areas in northern Chongqing City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4162-4172.

[13] 中华人民共和国林业行业标准.森林土壤分析方法 LY/T 1220~1275-1999 [S].北京:国家林业局,1999.
The Standards of Forestry in People's Republic of China. The analysis method of forest soil LY/T 1220~1275-1999 [S]. Beijing: State Forestry Administration, 1999.

[14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
Institute of Soil Science of Chinese Academy of Sciences in Nanjing. Soil physical and chemical property analysis [M]. Shanghai: The Science & Technology Press in Shanghai, 1978.

[15] 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.
Liu M X, Nie Y, Yu J. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 871-878.

[16] 李建兴,何丙辉,姚 云,等.网格式生物埂对坡面土壤贮水及

渗透性的影响［J］. 灌溉排水学报，2012，31(6)：38-41.
Li J X，He B H，Yao Y，et al. Effects of net form banks on slope surface soil infiltration characteristic［J］. Journal of Irrigation and Drainage，2012，31(6)：38-41.

［17］ 吕　刚，吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述［J］. 农业工程学报，2008，24(7)：494-499.
Lü G，Wu X Y. Review on influential factors of soil infiltration characteristics［J］. Chinese Agricultural Science Bulletin，2008，24(7)：494-499.

［18］ 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.
Yan J M，He B H，Tian T Q，et al. Soil infiltration and water-holding characteristics of different land use in Sichuan Hilly Basin［J］. Journal of Soil and Water Conservation，2014，28(1)：53-57.

［19］ 刘　洁，李贤伟，纪中华，等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性［J］. 生态学报，2011，31(8)：2331-2340.
Liu J，Li X W，Ji Z H，et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou［J］. Acta Ecologica Sinica，2011，31(8)：2331-2340.

［20］ 吕贻忠，李保国. 土壤学［M］. 北京：中国农业出版社，2006.
Lü Y Z，Li B G. Agrology［M］. Beijing：China Agriculture Press，2006.

［21］ 袁建平，蒋定生，甘　淑. 影响坡地降雨产流历时的因子分析［J］. 山地学报，1999，17(3)：259-264.
Yuan J P，Jiang D S，Gan S. Factors affecting rainfall runoff duration on sloping land［J］. Journal of Mountain Science，1999，17(3)，259-264

［22］ 黄　欢，何丙辉，鲍玉海，等. 不同模式地埂植物篱对土壤颗粒组成特征参数的影响［J］. 水土保持学报，2014，28(6)：256-261.
Huang H，He B H，Bao Y H，et al. Effects of different terrace hedgerow patterns on the characteristic parameters of soil particle size distribution［J］. Journal of Soil and Water Conservation，2014，28(6)：256-261.

［23］ 李天阳，何丙辉，田家乐，等. 重庆璧山 5 种典型农林混作模式土壤理化性质及水分入渗特性［J］. 水土保持学报，2013，27(4)：103-108，200.
Li T Y，He B H，Tian J L，et al. Soil physical and chemical properties and soil infiltration characteristics of five agroforestry intercropping types in Bishan，Chongqing［J］. Journal of Soil and Water Conservation，2013，27(4)：103-108，200.

［24］ 黄　茹，黄　林，何丙辉，等. 三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究［J］. 西南大学学报(自然科学版)，2013，35(9)：1-6.
Huang R，Huang L，He B H，et al. Characteristics of Soil of soil water infiltration under different biological regulation measures in Three Gores Reservoir Region［J］. Journal of Southwest University(Natural Science Edition)，2013，35(9)：1-6.