

三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗特征及其影响因素

张轩铭¹, 戴翠婷¹, 李朝霞¹, 周怡雯¹, 王天巍¹, 李 豪²

(1.华中农业大学水土保持研究中心,武汉 430070;2.武汉蓝天绿野咨询设计有限公司,武汉 430021)

摘要: 为探究典型母岩不同发育程度土壤入渗特征,在三峡库区王家桥小流域采用圆盘入渗仪测定新成土(S1)、雏形土(S2)、淋溶土(S3)3种紫色砂岩不同发育程度土壤入渗过程,探究入渗过程的影响因素,并用3种常用模型进行入渗过程模拟,分析比较这些模型的适宜性。结果表明:(1)不同发育程度间土壤理化性质差异显著。雏形土和淋溶土土壤容重较新成土分别增加10.71%,19.50%,土壤总孔隙度分别降低8.79%,18.69%,通气孔隙度分别降低67.40%,8.16%,土壤黏粒含量分别增加10.01%,38.36%,砂粒含量分别减小8.09%,48.29%,土壤有机质分别增加2.88%,8.68%。(2)不同发育程度土壤间初始入渗率、平均入渗率、饱和导水率均表现为新成土>雏形土>淋溶土,雏形土、淋溶土平均入渗率及饱和导水率分别是新成土的0.99,0.58和0.89,0.83倍。(3)不同发育程度土壤理化性质差异对土壤入渗具有显著影响,土壤入渗速率与总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度、砂粒含量呈正相关关系,与容重、黏粒含量、有机质含量呈负相关关系。(4)Horton模型对紫色砂岩不同发育程度土壤入渗过程拟合效果最优($R^2=0.942$),Kostiakov模型次之($R^2=0.858$),Philip模型拟合效果较差($R^2=0.832$)。通过观测与模拟不同发育程度土壤入渗过程,研究结果可为流域土壤水分运移规律探究提供有益借鉴。

关键词: 紫色砂岩; 土壤发育程度; 入渗; 三峡库区

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)04-0092-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.012

Soil Infiltration Characteristics and Influencing Factors of
Purple Sandstone with Different Degrees of
Development in the Three Gorges Reservoir Area

ZHANG Xuanming¹, DAI Cuiting¹, LI Zhaoxia¹, ZHOU Yiwen¹, WANG Tianwei¹, LI Hao²

(1.Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;
2.Wuhan Lantian Luye Consulting Design Co., Ltd., Wuhan 430021)

Abstract: In order to explore the soil water infiltration characteristics of typical parent rocks with different developmental degrees, a disc infiltration meter was used to determine the infiltration process of three kinds of purple sandstone with different development degrees, which were Entisol (S1), Cambisols (S2) and Alfisol (S3), to explore the influencing factors of the infiltration process, and three common models were used to simulate the infiltration process to analyze and compare the suitability of these models. The results showed that: (1) There were significant differences in soil physicochemical properties among different development degrees. Compared with the Entisol, the soil bulk density of the Cambisols and Alfisol increased by 10.71% and 19.50%, the total soil porosity decreased by 8.79% and 18.69%, the aeration porosity decreased by 67.40% and 8.16%, and the soil clay content increased by 10.01% and 38.36%, the sand content decreased by 8.09% and 48.29%, and the soil organic matter increased by 2.88% and 8.68%, respectively. (2) The initial infiltration rate, average infiltration rate and saturated hydraulic conductivity of soils followed the order of Entisol>Cambisols>Alfisol, and the average infiltration rate and saturated hydraulic conductivity of Cambisols and Alfisol were 0.99, 0.58 and 0.89, 0.83 times higher than those of the Entisol, respectively. (3) Differences in soil physical and chemical properties of different soil development

levels had a significant impact on soil water infiltration. Soil infiltration rate was positively correlated with total porosity, capillary porosity, aeration porosity and sand content, while negatively correlated with bulk density, clay content and organic matter. (4) The Horton model had a better fitting effect on the purple sandstone soil water infiltration process with different development degrees ($R^2=0.942$), followed by the Kostiaikov model ($R^2=0.858$), and the Philip model had a poor fitting effect ($R^2=0.832$). By observing and simulating the process of soil water infiltration of different development levels, the research results could provide a useful reference for the study of the soil water migration law in the watershed.

Keywords: purple soil; soil development degree; infiltration; Three Gorges Reservoir area

土壤入渗是指降水从地表渗入土壤形成土壤水分的过程^[1-2],作为水文循环中的重要一环,入渗是降水等地表水转化为土壤水的唯一途径,土壤入渗能力深刻影响着降水的再分配过程,对降水的有效储存与转化利用至关重要^[3]。有研究^[4]证实土壤入渗主要受土壤性质的影响,而土壤性质与土壤发生发育过程密不可分。

土壤发育是指从岩石的风化产物或堆积物经成土因素作用开始,经过物质与能量的转化和迁移,并使土体构造发生变化,形成目前状态下土壤的过程^[5]。母质在不同环境条件的交互作用下形成不同发育程度的土壤^[6]。土壤发育程度的差异不仅导致明显不同的土壤剖面层次结构,土层间性质也具有明显的变异。Torrent 等^[7]研究认为,成土作用影响土壤的颗粒粒径分布,土壤中砂粒含量与黏粒含量分别随土壤发育程度的增加而减少和增多,而且随成土时间增长,土壤深层的黏粒含量逐渐增加^[8]。有研究^[9]表明,土壤层次间容重、质地、孔隙度等的差异影响入渗过程,非均质的土壤剖面层次水分运动明显不同于均质土壤,主要表现为非均质土在土壤分层处存在毛管障碍,降低土壤入渗速率。吴奇凡等^[10]认为,土壤剖面层次结构上粗细质地土层的排列顺序导致土层间土壤水力参数的不同,进而影响土壤的入渗特征,细质土的分布位置决定整个土体的土壤饱和导水率大小;Schwen 等^[11]研究发现,剖面土壤水力特性垂向变化明显,随着土层深度的加深,土壤导水率逐渐下降,且导水率的变化与土壤结构密切相关^[12]。因此,本研究着眼于不同发育程度土壤的入渗特征以及探究其入渗差异的关键影响因素。

紫色砂岩广泛分布于三峡库区及其周边的丘陵和山地区域,具有疏松易崩解的特征,在亚热带湿润气候条件下碎裂成碎石,进入土壤后在相对较短时间内风化成土^[13]。受到母质特性和不同地形下的侵蚀堆积过程的影响,发育程度较低的土壤土层薄、土壤分层不明显,表土层向下即过渡到母质层,发育程度较高的土壤具有明显的层次结构,且土层间

土壤性质差异明显。不同的剖面结构使土壤入渗、产汇流、土壤侵蚀等过程受土壤发育程度影响显著,因此研究三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗性质对该区域水分运移规律和土壤侵蚀防治具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验研究区位于三峡库区秭归县王家桥小流域(110°40′—110°47′E, 31°05′—31°15′N)。王家桥小流域属长江二级支流,流域总面积为 16.7 km²,海拔最高 1 180 m,最低 184 m。流域属于北亚热带湿润季风气候,气候温和、四季分明、雨热同期。多年平均降水量为 1 192 mm,雨量分布不均,降水集中在 4—9 月。流域属于典型的山区小流域,地形切割强烈,形成山高坡陡的地貌特征。流域出露中生界侏罗系蓬莱镇组地层,成土母质以紫色砂岩为主。根据前期土壤调查,由土壤系统分类确定研究区内紫色砂岩发育的主要土壤类型包括紫色正常新成土、紫色湿润锥形土和钙质湿润淋溶土^[14]。

1.2 样品采集

前期在研究区挖掘土壤剖面并进行土壤调查,选取流域内典型的 3 种不同发育程度土壤类型,由低到高依次为 S1(新成土)、S2(锥形土)、和 S3(淋溶土),综合考虑植被覆盖度、地形状况等因素,在保证这些条件基本一致的条件下,每种土壤类型设立林地、果园、耕地 3 种不同土地利用的样地用来进行原位圆盘入渗试验,再根据各种发育程度最大土壤厚度分层取环刀样品和散土样品来测定土壤性质,S1(新成土)取 0—10 cm 土壤样品;S2(锥形土)取 0—10, 10—20, 20—30 cm 土壤样品;S3(淋溶土)取 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土壤样品。样地土壤基本信息见表 1。

1.3 试验方法

试验于 2020 年 9—11 月进行,使用圆盘入渗仪原位测定样地土壤入渗率。圆盘入渗仪的储水管高

100 cm,直径为 3.7 cm,入渗底盘直径为 12 cm。试验前去除样点表面的枯枝落叶等杂物,整理出足够的平整地面,在环内铺满 3 mm 厚的细沙并用钢尺刮平,然后将入渗仪充满水,并检查气密性,随后赶出气泡。在土壤入渗试验过程中,前 10 min 每隔 30 s 记录 1 次入渗量,10~40 min 每隔 5 min 记录 1 次,40~90 min 每隔 10 min 记录 1 次。计算出初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率、饱和导水率作为

入渗指标。其中初始入渗率=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入渗率;平均入渗率=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。采用吸管法测定土壤颗粒组成、环刀法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度等指标,重铬酸钾—外加加热法测定土壤有机质含量。

表 1 样地基本概况

土地利用	土壤发育程度	剖面结构	平均土壤厚度/cm	成土母质	土壤类型	海拔/m	坡位
林地	S1	A—C	13	紫色砂岩	紫色正常新成土	816	上坡
	S2	A—Bw—C	31	紫色砂岩	紫色湿润锥形土	725	上坡
	S3	A—B—C	39	紫色砂岩	钙质湿润淋溶土	346	下坡
果园	S1	A—C	12	紫色砂岩	紫色正常新成土	704	中坡
	S2	A—Bw—C	28	紫色砂岩	紫色湿润锥形土	734	中坡
	S3	A—B—C	40	紫色砂岩	钙质湿润淋溶土	449	下坡
耕地	S1	A—C	10	紫色砂岩	紫色正常新成土	819	上坡
	S2	A—Bw—C	27	紫色砂岩	紫色湿润锥形土	453	中坡
	S3	A—B—C	39	紫色砂岩	钙质湿润淋溶土	338	下坡

1.4 数据处理与模型选取

采用 SPSS 25.0 软件进行数据分析,Origin 2020 软件进行土壤入渗过程模拟与制图。对入渗过程进行定量描述与模拟的模型迄今还未得到统一和普遍适用,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对地区水文过程模拟的重要手段。本文使用 3 个目前主流的土壤入渗模型用于入渗过程模拟:

(1)Kostiakov 模型:

$$f(t)=at^{-b}$$
(1)

式中: $f(t)$ 为土壤入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 、 b 为拟合参数。

(2)Philip 模型:

$$f(t)=0.5St^{-0.5}+A$$
(2)

式中: A 、 S 为与入渗有关的经验系数。

(3)Horton 模型:

$$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$$
(3)

式中: f_0 为初始入渗率(mm/min); f_c 为稳定入渗率(mm/min); k 为试验求得的经验参数。

2 结果与分析

2.1 不同发育程度土壤基本理化性质

不同发育程度土壤理化性质见表 2。不同发育程度的土壤土层间理化性质指标均具有一定的差异。土壤容重随土层深度的增加而增加,20—40 cm 的 2 个土层显著大于 0—20 cm 的 2 个土层($p<0.05$);土

壤总孔隙度随土层深度的增加而减小,且 0—20 cm 的 2 个土层与 20—30,30—40 cm 土层之间具有显著差异($p<0.05$);土壤毛管孔隙度随土层深度的增加而逐层减小,但不具有显著差异($p>0.05$);土壤通气孔隙度随土层深度的增加而逐层减小,30—40 cm 土层显著小于 0—30 cm 的 3 个土层($p<0.05$);土壤砂粒含量随土壤发育程度的增加而显著减小,即 $S3<S2<S1$,黏粒含量随土壤发育程度的增加而显著增加,即 $S3>S2>S1$ ($p<0.05$)。土壤砂粒含量随土层深度的增加而减小,黏粒含量随土层深度增加而增加,20—40 cm 的 2 个土层显著大于与 0—20 cm 的 2 个土层($p<0.05$)。土壤有机质随土层深度的增加而逐层减小,各土层间差异显著($p<0.05$)。

2.2 不同发育程度土壤入渗特征

从图 1 可以看出,不同发育程度的土壤入渗指标大小均具有一定差异。其中 S1、S2、S3 初始入渗率平均值分别为 5.56,4.94,3.09 mm/min,稳定入渗率分别为 1.99,1.81,1.74 mm/min,平均入渗率分别为 3.91,3.60,2.57 mm/min,饱和导水率分别为 2.23,1.93,1.80 mm/min。林地、耕地、果园均呈现明显的随发育程度增加土壤入渗率减小的趋势,即 $S1>S2>S3$ 。

土壤入渗速率随时间变化过程见图 2。不同发育程度土壤入渗过程有较大差异,但均表现出初始入渗率>平均入渗率>稳定入渗率的趋势,入渗开始初期入渗速率较高,而后随着时间推移逐渐降低,最终稳定于定值,即达到稳定入渗阶段。S1 在整个试验

过程中的入渗速率整体明显大于 S2 和 S3,而 S3 的入渗速率则明显小于 S1 和 S2。

表 2 典型土地利用不同发育程度土壤理化性质

土地利用类型	土壤发育程度	土层深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	通气孔隙度/%	颗粒组成/%			有机质/ (g·kg ⁻¹)
							砂粒	粉粒	黏粒	
林地	S1	0—10	1.30±0.06c	42.17±2.35a	36.25±1.22a	5.92±0.67e	42.04±2.32b	36.73±0.94b	21.22±1.38d	8.81±0.62b
		0—10	1.40±0.02b	38.36±0.55b	19.86±2.20f	18.51±2.44a	48.44±0.31a	26.78±0.21d	24.78±0.32c	7.55±0.23c
	S2	10—20	1.42±0.05b	38.33±1.57b	21.37±2.19ef	16.96±1.37ab	43.51±0.55b	27.57±0.76d	28.92±1.31b	1.44±0.36e
		20—30	1.44±0.02b	38.16±1.00b	23.07±0.35d	15.10±1.33b	30.40±1.37c	43.70±1.42a	25.90±0.51c	3.44±0.16d
	S3	0—10	1.54±0.02a	34.60±0.72c	22.85±1.53d	11.76±1.56c	28.21±2.74c	37.68±2.68b	34.11±0.05a	9.04±0.06b
		10—20	1.49±0.02a	35.78±1.03c	25.92±0.80c	9.86±0.24c	29.67±1.94c	35.27±0.59bc	35.06±1.35a	7.31±0.31c
		20—30	1.52±0.01a	35.00±0.33c	24.85±1.12cd	10.16±1.11c	30.76±0.79c	34.06±0.59c	35.17±0.19a	13.95±0.23a
	S3	30—40	1.56±0.02a	30.14±1.00d	28.62±1.46b	1.54±0.48d	41.31±1.37b	33.01±0.93c	25.68±1.50c	2.57±0.34f
	S1	0—10	1.27±0.05c	49.09±2.40a	27.46±2.13a	21.63±3.26b	25.85±0.72d	51.75±0.87a	22.4±0.18bcd	10.98±1.12b
果园	S1	0—10	1.38±0.04c	46.68±0.38ab	29.39±2.08a	17.29±2.24c	51.80±0.31a	29.57±1.76b	18.64±1.45d	12.97±0.19a
		10—20	1.29±0.07c	51.28±0.74a	30.79±2.87a	20.49±1.60b	51.52±1.73a	29.16±0.46b	19.32±1.27d	9.14±0.20c
	S2	20—30	1.47±0.02ab	37.26±0.70cd	25.92±2.57a	11.33±1.91d	41.54±0.18b	37.40±1.14b	21.06±1.11cd	3.59±0.54f
		0—10	1.35±0.02b	40.86±1.42c	16.85±1.69bc	24.01±1.10ab	31.76±2.04c	41.63±1.14b	26.6±0.90abc	11.43±0.34b
	S3	10—20	1.35±0.03b	41.56±3.01bc	14.06±2.03c	27.50±2.69a	31.64±0.84c	40.06±0.90b	28.3±0.06ab	9.57±0.50c
		20—30	1.54±0.06a	33.90±3.39d	13.48±1.49c	20.42±3.90b	30.88±1.83c	40.09±1.69b	29.03±0.86a	4.99±0.62e
		30—40	1.57±0.04a	32.65±1.74d	20.11±2.34b	12.54±1.42cd	32.16±0.58c	38.76±0.31b	29.07±0.89a	7.15±0.43d
	S1	0—10	1.37±0.02de	46.54±2.01abc	40.04±0.43a	6.50±0.57c	24.64±0.70b	52.92±0.66a	22.44±3.71bc	12.13±0.28a
		0—10	1.31±0.04e	49.95±0.47a	25.01±1.12d	24.94±1.10a	47.51±0.36a	27.94±1.62b	24.54±1.87bc	8.63±0.49c
耕地	S2	10—20	1.50±0.08c	43.41±3.18c	16.16±0.78e	27.25±2.49a	48.39±1.17a	30.65±2.49b	20.96±3.62c	4.90±0.18e
		20—30	1.54±0.06a	33.62±1.51e	14.50±0.93e	19.13±0.83b	40.21±0.09a	25.89±0.56b	33.90±0.62a	1.38±0.01f
	S3	0—10	1.35±0.04cd	45.45±1.60bc	37.11±1.38b	8.34±1.22c	22.45±1.70b	49.09±3.03a	28.46±1.38abc	12.37±0.68a
		10—20	1.30±0.08de	47.28±3.06ab	38.81±2.35ab	8.47±1.38c	23.44±0.03b	46.78±1.73a	29.78±1.71abc	11.07±0.70b
	S3	20—30	1.53±0.03b	38.51±1.51d	33.79±0.38c	4.71±1.05d	19.10±0.55b	50.67±1.74a	30.24±1.23ab	7.40±0.12d
		30—40	1.59±0.02a	32.45±0.76e	24.45±1.30d	8.00±0.70c	18.78±0.52b	47.11±0.47a	34.11±0.99a	4.26±0.46e
	S1	0—10	1.37±0.02de	46.54±2.01abc	40.04±0.43a	6.50±0.57c	24.64±0.70b	52.92±0.66a	22.44±3.71bc	12.13±0.28a
		0—10	1.31±0.04e	49.95±0.47a	25.01±1.12d	24.94±1.10a	47.51±0.36a	27.94±1.62b	24.54±1.87bc	8.63±0.49c
	S2	10—20	1.50±0.08c	43.41±3.18c	16.16±0.78e	27.25±2.49a	48.39±1.17a	30.65±2.49b	20.96±3.62c	4.90±0.18e
		20—30	1.54±0.06a	33.62±1.51e	14.50±0.93e	19.13±0.83b	40.21±0.09a	25.89±0.56b	33.90±0.62a	1.38±0.01f
	S3	0—10	1.35±0.04cd	45.45±1.60bc	37.11±1.38b	8.34±1.22c	22.45±1.70b	49.09±3.03a	28.46±1.38abc	12.37±0.68a
		10—20	1.30±0.08de	47.28±3.06ab	38.81±2.35ab	8.47±1.38c	23.44±0.03b	46.78±1.73a	29.78±1.71abc	11.07±0.70b
	S3	20—30	1.53±0.03b	38.51±1.51d	33.79±0.38c	4.71±1.05d	19.10±0.55b	50.67±1.74a	30.24±1.23ab	7.40±0.12d
		30—40	1.59±0.02a	32.45±0.76e	24.45±1.30d	8.00±0.70c	18.78±0.52b	47.11±0.47a	34.11±0.99a	4.26±0.46e

注:表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示不同土层间差异显著($p<0.05$)。

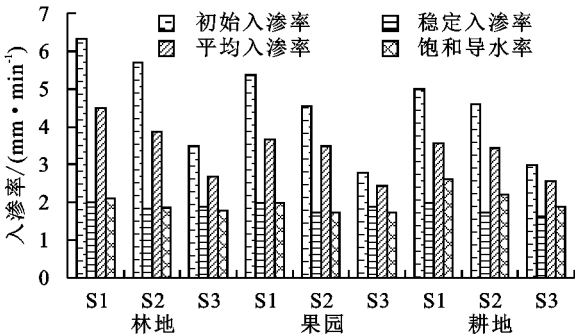


图 1 不同发育程度土壤入渗特征

2.3 入渗特征影响因素

土壤入渗状况受到土壤容重、土壤孔隙度、土壤质地、有机质含量、土壤结构等性质的影响^[15-16]。因此,对土壤入渗特征与影响土壤入渗的影响因素进行相关分析。从表 3 可以看出,初始入渗率与容重、总孔隙度、通气孔隙度、黏粒含量之间呈极显著相关关系,稳定入渗率仅与有机质含量极显著相关($p<0.01$);平均入渗率与总孔隙度、通气孔隙度、土壤容重、黏粒含量、砂粒含量之间呈极显著相关($p<0.01$);饱和导水

率与总孔隙度、土壤容重之间呈极显著相关,与毛管孔隙度呈显著相关($p<0.05$)。

采用冗余分析(RDA)研究土壤入渗速率与土壤理化性质之间的关系,将土壤理化性质作为解释变量,土壤入渗速率作为响应变量进行分析,可通过其夹角大小来确定变量间的相关性,夹角越小,相关性越强,当夹角 $<90^{\circ}$ 时,解释变量与响应变量呈正相关;当夹角 $>90^{\circ}$ 时,解释变量与响应变量呈负相关。可以通过将 1 个变量与在其他变量的箭头投影来读出其近似相关性。土壤理化性质对土壤入渗特征值在第 1 排序轴(RDA1)的解释量为 48.29%,在第 2 排序轴(RDA2)的解释量为 41.73%,即前 2 轴对土壤入渗速率的累计解释值为 90.03%,累计解释拟合方差值为 97.80%,表明前 2 轴能较好地解释土壤理化性质与土壤入渗速率的关系。其中 RDA1 可以较好地解释初始入渗率、稳定入渗率的变化,其主要影响因素包括总孔隙度、砂粒含量、黏粒含量、容重和通气孔隙度;RDA2 可以较好地解释稳定入渗率、饱和

导水率的变化,其主要影响因素包括毛管孔隙度、粉粒含量、有机质含量、容重和通气孔隙度(图 3)。

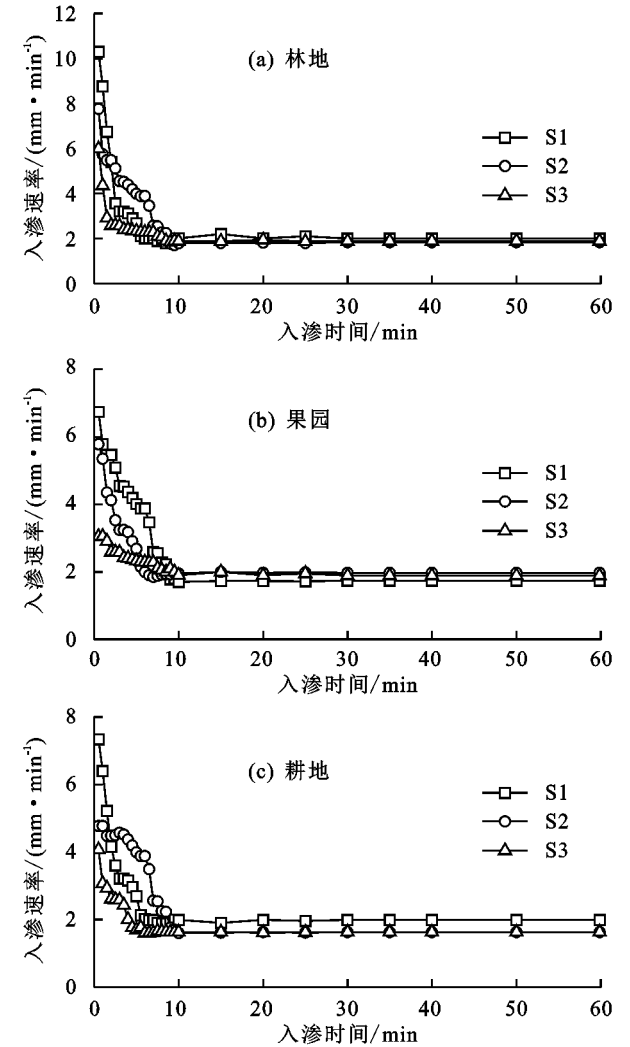


图 2 不同发育程度土壤入渗过程

2.4 入渗模型拟合效果

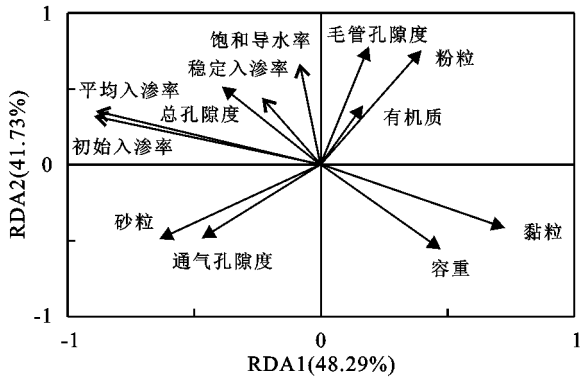
为进一步探究经典入渗模型对不同发育程度土壤入渗的适用性,使用 3 种经典入渗模型对入渗过程进行拟合,拟合结果见表 4。Kostiakov 入渗模型中, a 为经验入渗常数,即第 1 个单位时段内的平均入渗速率,可用来表征初始入渗率的大小; b 值的大小可以表明入渗速率随时间减小的速度, b 值越大,则入渗速率随时间减小的速度越快。由表 4 可知,Kostiakov 方程拟合的参数 a 值从小到大依次为 $S3 < S2 < S1$,与 $S1$ 发育程度初始入渗率最大的规律相一致; b 值在 $S1$ 最大,这与 $S1$ 初始入渗率最大相一致。在 Horton 入渗模型中,将拟合得到的初始入渗率 f_0 和稳定入渗率 f_s 与实测值相比,平均误差分别是 0.37 和 2.98,说明 Horton 模型对该区域的初始入渗率模拟效果优于稳定入渗率。Philip 模型中 S 值在一定程度上反映初始入渗率的大小。 S 平均值由小到大依次为 $S3 < S2 < S1$,与 $S1$ 初始入渗率最大的规律相一致。

对入渗过程的拟合效果可以用回归方程的决定系数(R^2)表示,其值越大,拟合效果越好。Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型对土壤入渗过程拟合决定系数均值分别为 0.858,0.832,0.942,说明 3 种模型均能较好地拟合入渗过程,且 Horton 模型(R^2 为 0.830~0.986)对各入渗过程的拟合效果均为最优。而 Kostiakov(R^2 为 0.619~0.950)模型和 Philip (R^2 为 0.486~0.962)模型拟合效果次之,二者相比,Philip 模型对 $S1$ 发育程度的土壤入渗效果优于 Kostiakov 模型,而对 $S2$ 和 $S3$ 土壤入渗过程模拟效果各有优劣。

表 3 土壤入渗特征与理化性质间的相关关系

土壤理化性质	初始入渗率	稳定入渗率	平均入渗率	饱和导水率
容重	-0.487 **	-0.040	-0.520 **	-0.362 **
总孔隙度	0.470 **	-0.034	0.499 **	0.321 **
毛管孔隙度	0.002	0.030	0.025	0.265 *
通气孔隙度	0.386 **	-0.049	0.382 **	-0.017
砂粒	0.486 **	-0.054	0.479 **	0.022
粉粒	-0.177	0.183	-0.179	0.088
粘粒	-0.622 **	-0.211	-0.605 **	-0.194
有机质含量	-0.104	0.313 **	-0.104	0.021

注: *、** 分别表示相关系数达 0.05,0.01 显著水平。



注: 实心箭头为解释变量;空心箭头为响应变量。

图 3 土壤理化性质和土壤入渗指标间冗余分析排序

3 讨论

3 种发育程度土壤入渗率均呈现随土壤发育程度增加而减小的趋势。 $S2$ 、 $S3$ 初始入渗率较 $S1$ 分别减小 11.47%,41.60%,平均入渗率分别减小 12.42%,9.08%,稳定入渗率分别减小 3.48%,32.88%,饱和导水率分别减小 10.63%,16.95%。同样有研究^[17]发现,发育程度最高的土壤具有最低的饱和导水率,这可能由于产生分层的土壤相比均质土壤明显降低下渗速率。在本研究中, $S1$ 因不具有明显的土壤分层可被视为均质土体,而 $S3$ 具有明显的土壤层次,且 20—40 cm 的 2 个土层与 0—20 cm 的 2 个土层间容重、总孔隙度、通气孔隙度、砂粒含量、黏粒含量均具

有显著差异,故对入渗过程形成阻滞效应^[18]。由表 3 和图 2 可知,土壤入渗率与黏粒含量呈极显著负相关关系,与砂粒含量呈极显著正相关关系,与已有研究^[19]结果相似。Zaibon 等^[20]研究认为,黏粒含量随着土层深度的增加而增加,而黏粒含量高的土层土壤质地较细,通常具有较少的大孔隙,因此土壤深层入渗速率迅速下降。S3 的土壤入渗率明显低于 S1 和 S2,可能是由于较高发育程度的土壤通过增加深层细颗粒占比而导致土壤入渗速率降低^[21]。由相关分析可知,土壤入渗率和土壤容重呈极显著负相关关系,

表 4 不同发育程度土壤入渗过程模拟结果

土壤发育 程度	土地利用 类型	Kostiakov			Philip			Horton			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>R</i> ²	<i>f_e</i>	<i>f₀</i>	<i>k</i>	<i>R</i> ²
S1	林地	7.34	0.59	0.936	16.82	−0.96	0.945	1.93	13.99	0.65	0.986
	果园	5.14	0.42	0.950	9.30	0.48	0.962	1.89	7.67	0.47	0.976
	耕地	5.66	0.46	0.941	10.99	0.18	0.953	1.91	9.04	0.52	0.985
S2	林地	6.32	0.38	0.866	10.70	0.98	0.828	1.18	7.59	0.19	0.929
	果园	5.72	0.32	0.749	8.47	1.46	0.658	0.70	6.71	0.14	0.924
	耕地	4.96	0.26	0.619	6.02	1.87	0.486	0.15	5.55	0.09	0.830
S3	林地	4.16	0.36	0.870	6.67	0.79	0.925	2.14	9.35	1.25	0.958
	果园	2.93	0.15	0.894	2.39	1.71	0.811	1.78	3.23	0.20	0.943
	耕地	3.21	0.31	0.897	4.70	0.85	0.927	1.55	4.49	0.02	0.949

Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型均能拟合不同发育程度土壤入渗过程,其中 Horton 模型拟合效果最优,其次为 Kostiakov 模型,而 Philip 模型拟合效果不够理想。Horton 模型虽是纯经验公式,但能描述长时间的入渗特征,且模型参数具有物理意义,是模拟本研究入渗过程的最优模型;Kostiakov 模型假设初始入渗速率无限大,当时间无限延长时,入渗速率趋近于 0,本试验中在达到稳定入渗后入渗率趋于定值,因此拟合效果不够理想;Philip 模型是在半无限均质土壤有积水条件下求得,只适用于均质土壤一维垂直入渗的情况,仅对近似均质土的 S1 拟合效果较好,且在原位自然土壤下三维入渗应用有一定局限性。相比较而言,Horton 模型对紫色砂岩不同发育程度土壤入渗过程拟合效果最优,适用性最强。

4 结论

(1)不同发育程度土壤入渗速率随发育程度的增高而减小,初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率、饱和导水率均表现为 S1(新成土) > S2(雏形土) > S3(淋溶土)。

(2)不同发育程度土壤因土壤性质差异对土壤入渗具有显著影响,初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率、饱和导水率与总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙

与总孔隙度和通气孔隙度呈极显著正相关关系。土壤容重是土壤紧实度与孔隙度的间接反映^[22],土壤入渗是水分在土体孔隙内流动并且不断深入的过程,所以容重和孔隙度对土壤入渗产生较大的影响^[23]。已有研究^[24]表明,低发育程度的土壤具有较高的孔隙度和较低的容重。综上所述,本研究中发育程度较低的土壤可视为近似均质土,且颗粒较粗,孔隙较大,导致容重偏小,土壤入渗速率和饱和导水率较大;而发育程度较高的土壤具有明显的土壤分层,且深层土壤颗粒较细,容重偏大,孔隙较小,不利于土壤水分下渗^[25-28]。

度、砂粒含量呈正相关关系,与容重、黏粒含量、有机质含量呈负相关关系。

(3)Kostiakov 模型、Philip 模型、Horton 模型均能拟合不同发育程度土壤入渗过程,决定系数由大到小依次为 Horton 模型 > Kostiakov 模型 > Philip 模型。

参考文献:

[1] Abrol V, Ben-Hur M, Verheijen F G A, et al. Biochar effects on soil water infiltration and erosion under seal formation conditions: Rainfall simulation experiment[J].Journal of Soils and Sediments,2016,16(12):2709-2719.

[2] Schwartz R C, Schlegel A J, Bell J M, et al. Contrasting tillage effects on stored soil water, infiltration and evapotranspiration fluxes in a dryland rotation at two locations[J].Soil and Tillage Research,2019,190:157-174.

[3] Wang H, Zhang G H, Liu F, et al. Effects of biological crust coverage on soil hydraulic properties for the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Processes, 2017, 31 (19):3396-3406.

[4] Tongway D J, Ludwig J A. Vegetation and soil patterning in semi-arid mulga lands of Eastern Australia[J]. Australian Journal of Ecology,1990,15(1):23-34.

[5] 吕贻忠,李保国.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2006.

[6] 罗友进.区域成土过程:认识与表达[D].重庆:西南大

- 学,2011.
- [7] Torrent J, Nettleton W D. Simple textural index for assessing chemical weathering in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43(2): 373-377.
- [8] Lichter J. Rates of weathering and chemical depletion in soils across a chronosequence of Lake Michigan sand dunes[J]. Geoderma, 1998, 85(4): 255-282.
- [9] Cho K W, Song K G, Cho J W, et al. Removal of nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events[J]. Chemosphere, 2009, 76(5): 690-696.
- [10] 吴奇凡, 樊军, 杨晓莉, 等. 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1280-1290.
- [11] Schwen A, Zimmermann M, Bodner G. Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 169-181.
- [12] Müller K, Katuwal S, Young I, et al. Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures[J]. Geoderma, 2018, 313: 82-91.
- [13] Zhong S Q, Han Z, Du J, et al. Relationships between the lithology of purple rocks and the pedogenesis of purple soils in the Sichuan Basin, China[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): e13272.
- [14] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] 云慧雅, 毕华兴, 王珊珊, 等. 不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 183-189.
- [16] 冯娜, 刘冬冬, 赵荣存, 等. 岩溶山地植被恢复中碳酸盐岩红土入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 162-169, 175.
- [17] Villarreal R, Lozano L A, Salazar M P, et al. Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198: e104528.
- [18] 崔浩浩, 张光辉, 张亚哲, 等. 层状非均质包气带渗透性特征及其对降水入渗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 1-9.
- [19] Ren Z P, Zhu L J, Wang B, et al. Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(4): 546-555.
- [20] Zaibon S, Anderson S H, Kitchen N R, et al. Hydraulic properties affected by topsoil thickness in switchgrass and corn-soybean cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5): 1365-1376.
- [21] Lin H S, McInnes K J, Wilding L P, et al. Effects of soil morphology on hydraulic properties I. Quantification of soil morphology[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(4): 948-954.
- [22] Fischer C, Tischer J, Roscher C, et al. Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties[J]. Plant and Soil, 2015, 397(1): 1-16.
- [23] Chang Z Q. Soil water infiltration of Subalpine Shrub Forest in Qilian Mountains, northwest of China[J]. Agronomy Journal, 2020, 113(12): 829-839.
- [24] 唐嘉鸿. 微地形主导下紫色泥岩发育土壤的发生特征[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [25] 崔浩浩, 张冰, 冯欣, 等. 不同土体构型土壤的持水性能[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 1-5.
- [26] 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.
- [27] 李志, 袁颖丹, 胡耀文, 等. 海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 635-645.
- [28] Latorre B, Peña C, Lassabatere L, et al. Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve. Numerical analysis and field application[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 1-12.