

希拉穆仁天然草地不同群落土壤入渗特征

王则宇¹, 蒙仲举¹, 崔向新¹, 党晓宏¹, 王剑然², 单玉兵²

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 呼和浩特 010020)

摘要: 为了解希拉穆仁天然草地土壤入渗特征, 以未经人为干扰的围封草地为研究对象, 利用双环法测定了以蒙古韭(*Allium mongolicum*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、羊草(*Leymus chinensis*)、洽草(*Koeleria asiatica*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、短花针茅(*Stipa breviflora*) 6种植物为优势种的不同群落土壤入渗过程, 分析其入渗特征及影响因素。结果表明: 各样地土壤入渗速率随时间变化过程大致分为3个阶段, 土壤入渗速率在0~10 min呈急剧下降阶段, 10~30 min呈缓慢降低并趋于稳定阶段, 30 min后达到稳定阶段。通过对不同群落稳渗速率及达到稳渗前累积入渗量对比分析, 发现不同群落间土壤入渗性能存在较大差异, 其中, 洽草群落土壤入渗性能最好, 其次是羊草群落, 银灰旋花群落土壤入渗性能最差, 其原因是由于不同群落间土壤结构的差异性所致。通过相关性分析可知, 土壤容重、最大孔隙度、非毛孔隙度是影响该地区土壤入渗的关键因素。利用Horton模型能准确描述研究区土壤入渗随时间变化情况。

关键词: 土壤入渗; 不同群落; 影响因素; 希拉穆仁草原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0112-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.03.020

Soil Infiltration Characteristics of Different Plant Communities in the Xilamuren Grassland

WANG Zeyu¹, MENG Zhongju¹, CUI Xiangxin¹, DANG Xiaohong¹, WANG Jianran², SHAN Yubing²

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2. Inner Mongolia Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Hohhot 010020)

Abstract: In order to know the soil infiltration characteristics of the Xilamuren grassland, a study was carried out in an enclosed grassland to investigate the soil infiltration process of six plant communities (*Allium mongolicum*, *Convolvulus ammannii*, *Leymus chinensis*, *Koeleria asiatica*, *Stipa krylovii*, and *Stipa krylovii*) using the double-ring sampling method, and the influencing factors were analyzed. The results indicated that soil infiltration rates in different plots could be divided into three stages. The first stage was from 0 to 10 minutes, in which the infiltration rate showed a sharp decreasing trend; during 10 min to 30 min, the infiltration rate decreased slowly, and remained constant after 30 min. By analyzing the soil infiltration rates and infiltration amount, soil infiltration characteristics of the *Koeleria asiatica* community were the best, followed by those of the *Leymus chinensis* community, while those of the *Convolvulus ammannii* community was the worst. The differences in soil infiltration characteristics were caused by the differences in soil structures among communities. Correlation analysis showed that bulk density, maximum porosity, and non-capillary porosity were important factors affecting soil infiltration. Soil infiltration in the study area fitted the Horton model very well.

Keywords: soil infiltration; plant community; influencing factor; Xilamuren Grassland

土壤入渗是指降水或灌溉水通过地表进入土壤的过程, 其与植物对土壤水分的吸收利用、土壤水肥迁移、地表产流产沙、降雨再分配等问题紧密联系^[1]。已有研究表明, 土壤入渗性能越好, 相应地表径流越少, 发生土壤侵蚀的危害性越小^[2]。研究土壤入渗规律是探讨地表产流产沙机制的前提和基础, 对流域内地表径流的调

控及土壤侵蚀防治具有十分重要的意义^[3]。目前, 国内外对土壤入渗的研究主要针对不同土地利用方式下土壤入渗性能的差异、土壤入渗空间变异性及其影响因素等方面^[4-6]。Bormann等^[7]认为在土壤水分状况和供水条件一致的情况下, 土壤的入渗能力主要取决于土壤水力特性。何丹等^[4]研究发现, 土壤质地、容重和有机质

含量等因素都可能成为土壤入渗的主要变异源。

我国对土壤入渗的研究主要集中在黄土丘陵区、西南红土山区、紫色土区等地区^[8-9],而对于我国西北部典型草原的土壤入渗研究较少。希拉穆仁草原位于我国内蒙古西部干旱区,全年干旱少雨,降雨分布不均,多以暴雨形式产生^[10]。近年来随着草原不断退化,大面积草地出现裸露斑块且地表板结程度较高,极易形成径流,是土壤侵蚀严重地区^[11]。因此,本文以希拉穆仁草原围封区天然草地为研究对象,研究了当地常见的 6 种草地植被群落类型下土壤入渗特征及其影响因素,以此探讨希拉穆仁草原土壤入渗机制及其与当地植被群落间相互关系,为有效维持草地群落稳定,减少土壤侵蚀,防治草地退化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区达茂旗希拉穆仁草原(111°00′—111°20′ E,41°12′—41°31′ N)。该区域属中温带半干旱大陆性季风气候区,降雨量少,且年际、月季变幅悬殊,年平均降雨量约 281 mm,多集中于 7—8 月份;全年多风,年大风日数为 65 d,平均风速为 4.5 m/s,风沙天气多发于春季和冬季。希拉穆仁草原生态环境脆弱,为风水复合侵蚀区,风蚀和水蚀

的交替作用造成土壤板结和地表颗粒粗化,荒漠型退化是当地草原退化的主要表现形式。研究区土壤属内蒙古栗钙土亚带,多为砂壤土,土层较薄(约 40—70 cm),下层土壤钙质化程度高,土壤腐殖质含量低。该区域地带性植被群落建群种为克氏针茅,草地群落以羊草×克氏针茅为主,其他主要植物种有冷蒿、银灰旋花、冰草、洽草等多年生旱生草本植物,呈典型草原特征。近年来,由于受过度放牧及旅游业的破坏性扩张等人为强力扰动,该区域草地严重退化。试验地位于水利部牧科所从 2002 年开始围封的围封区,研究区内地形相对平缓,完全排除放牧和旅游等人为干扰,至 2016 年已围封 14 a,围封面积达到 133 hm²。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 试验于 2016 年 8 月中旬在希拉穆仁草原围封区域内进行,沿东西方向布设 4 条样线,每条样线间隔 50 m,样线长度为 300 m,调查并记录沿途植被特征,根据植物群落特征及优势种变化情况,在每条样线及周边设置 6~10 个 1 m×1 m 样方,本次调查共在围封区设置 35 个样方,测量样方内每种植物的高度、盖度、多度、地上生物量等指标,之后进行计算分析,并利用双向指示种分析法^[12]选出 6 种群落类型样地,每类样地内包含了 3~10 个样方,调查样地基本情况(表 1)。

表 1 样地基本情况

土层深度/cm	样方数	优势种	植物种数	总盖度/%	平均高度/cm	地上生物量/g	枯落物生物量/g
30—40	8	蒙古韭×克氏针茅	9	45	25	187.07	78.70
50—60	5	银灰旋花	8	70	12	323.06	12.39
50—60	6	羊草	18	80	30	341.48	96.94
60—70	3	洽草×克氏针茅	20	95	35	532.18	114.67
50—60	10	克氏针茅	6	45	38	444.63	105.74
70—80	3	短花针茅×克氏针茅	5	48	45	305.02	127.16

1.1.2 样品采集及相关指标测定 在已确定的 6 块不同植被类型样地,用环刀分 3 层(0—10,10—20,20—30 cm)进行土样采集。土壤含水量采用烘干法测定,土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度及土壤最大持水量均利用环刀法进行测定^[13]。土壤入渗利用双环法,根据任宗萍等^[14]的双环直径对土壤入渗速率的影响研究以及本研究区实地情况,本试验采用自制双环测渗仪,外环直径为 17 cm,内环直径为 8.5 cm,环高 20 cm。在已确定的 6 块不同植被类型样地内,剪除待测地表植被及枯落物,将双环测渗仪用橡胶锤缓慢均匀打入地下 10 cm 深,尽量保持土壤结构不受破坏,利用量筒为圆环供水,当内环和外环水层厚度达到 5 cm 时开始用秒表计时,并分别在 0,0.5,1,2,3,5,7,10,15,20,25,30 min 及以后每 10 min 读取量筒标尺刻度,直到刻度变化平稳为止,同时为与实际相结合,试验在 2 种情况(试验前 15 d 无降雨,试验期间有间歇性降雨)下分别进行 3

次重复。

2.4 数据处理及分析

土壤入渗速率采用达西定律进行计算^[14],公式为:

$$F_t = \frac{L \times h}{(H + L) \times t}$$
 (1)

式中: F_t 为 t 时间土壤入渗速率(mm/min); h 为 t 时间水面下降高度(mm); H 为固定水位深(cm); L 为环入土深(cm)。

利用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件对实测数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤入渗特征

由图 1 可知,整体上研究区内各样地土壤入渗速率均随时间呈先急剧减小后趋于稳定的变化规律。6 种植物群落土壤入渗速率均在 0~10 min 急剧下降,在入渗开始 10 min 时各样地平均土壤入渗速率较 1 min 时下降了 71%;在 10~30 min 土壤入渗速率下

降幅度明显变缓并逐渐趋于稳定;入渗开始 30 min 后土壤入渗速率基本维持稳定,即已达到稳渗状态,各样地土壤稳定入渗速率在 0.5~2 mm/min 之间,其大小依次为洽草>羊草>克氏针茅>蒙古韭>短花针茅>银灰旋花。对降雨(降雨时间约为 6 h,累

计降雨量约为 20 mm)后土壤处于湿润状态下(测得各样地初始含水量为 8%~10%)各样地进行土壤入渗速率测定发现,降雨后的土壤入渗速率在入渗开始的第 1 阶段明显小于雨前,但在土壤入渗达到稳定后雨后和雨前的土壤入渗速率无明显差异。

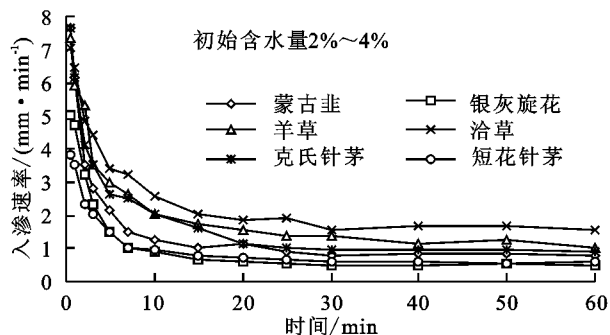


图 1 6 种植被群落土壤入渗过程曲线

当土壤入渗速率达到稳定后土壤入渗能力常用稳定入渗速率来表征,但在达到稳定之前,土壤入渗能力常用稳渗前累积入渗量来表征^[15]。由图 1 可知,各样地土壤入渗速率在 30 min 后基本达到稳定,故以入渗开始后 30 min 土壤累积入渗量来衡量各样地土壤前期入渗能力。由图 2 可知,所有样地土壤累积入渗量在 0~10 min 增加速度较快,在入渗 10 min 后各样地土壤累积入渗量曲线斜率明显变缓,且不同群落类型间土壤累积入渗量曲线斜率出现明显差异。随着时间推移,其差异愈来愈大,在入渗 30 min 时其大小依次为洽草>羊草>克氏针茅>蒙古韭>短花针茅>银灰旋花,此结果与图 1 中土壤入渗达到稳渗状态时的土壤入渗速率大小表现一致。

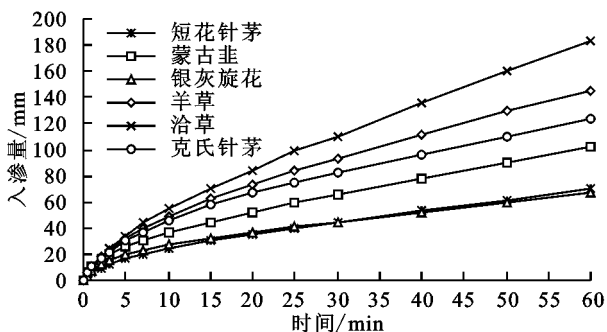


图 2 各样地累积入渗量

由图 3 可知,各样地土壤最大持水量整体上随土层深度增加而减小,其中,蒙古韭群落样地土壤最大持水量在不同土层间变化最大,变化范围为 18%~35%,其次是羊草,变化范围为 22%~39%,洽草群落样地最为稳定,变化范围为 32.5%~33.5%。对不同群落类型间土壤最大持水量比较发现,洽草群落样地土壤持水量最大(32.25%),是持水量最小的银灰旋花群落样地(23.60%)的 1.37 倍,整体上 6 种群落类型土壤最大持水量大小依次为洽草>羊草>克氏针茅>短花针茅>蒙古韭>银灰旋花。

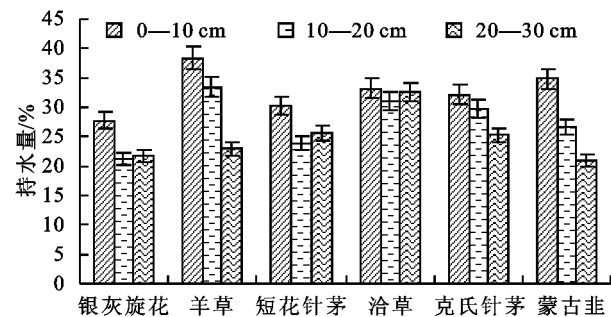
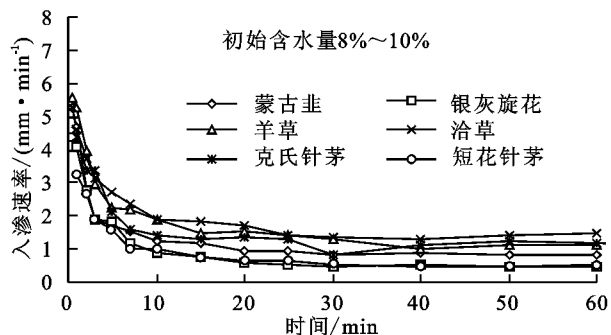


图 3 各样地 0—30 cm 土层土壤最大持水量

2.2 土壤入渗影响因子分析

由表 2 可知,在正常无降雨情况下除短花针茅群落土壤初始含水量较高(4.09%)外,其他植被群落土壤初始含水量变化范围为 2.14%~2.92%。土壤容重和总孔隙度体现了土壤的松紧程度,不同植被群落土壤容重范围为 1.35~1.63 g/cm³,其中以银灰旋花群落样地最大。不同群落土壤毛管与非毛管孔隙度大小规律表现不同,土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度最大分别为蒙古韭群落和羊草群落。银灰旋花群落土壤毛管与非毛管孔隙度均最小。2 种初始含水率下土壤其他物理性质基本维持一致。

土壤初始含水量、土壤容重和孔隙度在很大程度上决定着土壤的渗透性能。一般表示土壤渗透性能大小的指标有初始入渗率、稳定入渗率和饱和导水率^[14],但由于饱和导水率是由稳定入渗率计算得出,因此本文利用 SPSS 19.0 对各类样地初始入渗率、稳定入渗率和 30 min 累积入渗量 3 个土壤入渗指标与土壤初始含水量、容重等指标进行相关性分析发现(表 3),初始入渗率、稳定入渗率、30 min 累积入渗量与土壤初始含水量均呈负相关关系,但其中只有初始入渗率与之达到显著水平。3 个土壤入渗指标与土壤容重呈显著负相关,与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度显著正相关。毛管孔隙度与 3 个土壤入渗指标均呈正相关关系,但未达到显著水平。

表 2 各样地土壤基本物理性质

样地类型	初始含水量/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
蒙古韭	2.14±0.21a	1.41±0.06ab	47.81±1.82bc	41.66±1.17b	6.68±2.99a
	8.09±0.64a	1.40±0.11ab	47.97±2.21bc	41.10±1.47b	6.87±2.12ab
银灰旋花	2.65±0.08b	1.63±0.05c	40.43±1.54a	36.59±0.08a	3.64±1.95a
	7.98±0.52a	1.64±0.04c	39.80±1.88a	36.51±1.22a	3.29±2.74a
羊草	2.18±0.18a	1.38±0.01a	48.47±0.40c	40.16±1.15b	8.31±1.06a
	8.47±0.81a	1.36±0.15a	49.13±1.21c	40.01±1.97ab	9.12±2.34b
洽草	2.29±0.12ab	1.35±0.05a	49.46±1.54c	41.65±0.26b	7.81±1.64a
	7.79±0.66a	1.33±0.08a	50.12±0.68c	41.21±2.01b	8.91±2.01b
克氏针茅	2.92±0.17b	1.42±0.07ab	47.15±2.41bc	41.33±2.17b	5.82±5.09a
	8.51±0.95a	1.41±0.12ab	47.48±0.25bc	40.33±2.58ab	7.15±1.12ab
短花针茅	4.09±0.11c	1.53±0.05bc	43.53±1.55ab	39.80±1.35ab	3.73±0.72a
	10.25±0.17b	1.52±0.05bc	43.86±0.75ab	39.00±2.21ab	4.86±1.31a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

表 3 土壤入渗指标与影响因子相关性分析

指标	初始含水量	土壤容重	总孔隙度	非毛管孔隙度	毛管孔隙度
初始入渗率	-0.894*	-0.811*	0.810*	0.883*	0.787
稳定入渗率	-0.530	-0.827*	0.827*	0.857*	0.647
30 min 累积入渗量	-0.683	-0.872*	0.872*	0.901*	0.683

注:*表示在 0.05 水平上显著相关。

2.3 土壤入渗模型

土壤入渗模型是研究土壤入渗的重要方法,国内外学者建立了许多土壤入渗经验模型,用来模拟土壤入渗随时间变化特征^[13],本研究通过 4 种常用的土壤入渗经验模型对实测数据进行拟合。

Kostiakov 公式:

$$f=at^{-b} \tag{2}$$

式中: f 为入渗速率; t 为入渗时间; a 为拟合参数; b 为经验系数一般为 0.3~0.8。

Horton 公式:

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

式中: f 为入渗速率; t 为入渗时间; f_c 为稳定入渗率; f_0 为初始入渗率; k 为土壤物理特征指数。

Philip 公式:

$$f=st^{-1/2}+A \tag{4}$$

式中: f 为入渗速率; t 为入渗时间; s 为土壤吸收系数; A 为稳定入渗率。

通用经验公式:

$$f=a_1t^{-n}+b_1 \tag{5}$$

式中: f 为入渗速率; t 为入渗时间; a_1 、 b_1 为拟合参数; n 为经验系数。

由表 4 可知,4 种模型 R^2 均在 0.85 以上,说明拟合效果良好,其中 Horton 模型拟合结果与实测数据的相关性最高,其 R^2 为 0.965~0.995,蒙古韭群落样地土壤初始入渗速率最大,其次是羊草,银灰旋

花初始入渗速率最小。洽草群落土壤稳渗速率最大,银灰旋花土壤稳渗速率最小。拟合公式中各样地土壤初始入渗速率和稳渗速率与实测结果大小规律表现一致。方程中 k 是经验常数,决定着土壤入渗过程中达到稳渗状态的快慢,因此从 k 值看出,蒙古韭群落在入渗过程中最先达到稳渗状态,其次是银灰旋花,洽草群落最晚达到稳渗状态, k 值大小主要与土壤质地有关,以蒙古韭为优势种群落样地土壤表层砂质化程度较高,但其深层土壤质地坚硬并且较早出现钙质化土层,而洽草群落样地上下层土壤质地较为均匀。

Kostiakov 模型拟合的公式 a 值为 3.8~5.9, a 值是表征第一个单位时间段平均土壤入渗速率的经验系数,主要受土壤结构的影响,公式中 a 值大小依次为洽草>蒙古韭>羊草>克氏针茅>短花针茅>银灰旋花,除洽草和蒙古韭外其他样地 a 值大小顺序与实测初始入渗速率大小顺序一致,说明拟合结果与实测值存在较小偏差。公式中 b 值大小表示土壤入渗速率随时间减小的程度, b 值在蒙古韭群落样地中最大,洽草群落样地中最小。说明蒙古韭样地土壤入渗速率随时间减小程度最大,洽草群落样地土壤入渗速率随时间减小程度最小。

从 Philip 公式拟合结果来看, s 值大小表现为蒙古韭>克氏针茅>羊草>洽草>短花针茅>银灰旋花, s 表示土壤吸水率,反映了土壤入渗能力的大小, s 值越大,表征土壤入渗能力越强。公式中除短花针茅和银灰旋花外,其他样地 s 值所反应情况的与实测土壤入渗性能指标存在较大偏差。

通用经验公式中, a_1 、 b_1 分别表征初始入渗率和稳定入渗率,从拟合结果看出,初始入渗率和稳定入渗率最大分别为洽草和蒙古韭群落。其结果与实测

值存在一定偏差。

综合以上 4 种公式与实测值的相关系数以及所反

映的结果比较分析发现,4 种公式中 Honton 公式能准确的描述研究区内土壤入渗速率随时间变化情况。

表 4 6 种群落类型土壤入渗模型回归分析

样地类型	Kostiakov			Honton				Philip		通用经验公式		
	a	b	R^2	f_0	f_c	k	R^2	S	R^2	a_1	b_1	R^2
蒙古韭	5.791	0.567	0.985	9.523	0.992	0.519	0.987	11.471	0.947	5.301	0.073	0.981
银灰旋花	3.871	0.538	0.943	6.053	0.548	0.351	0.995	8.326	0.949	4.666	-0.698	0.953
羊草	5.776	0.517	0.967	7.821	1.355	0.279	0.978	10.585	0.963	6.662	-0.831	0.976
洽草	5.938	0.349	0.974	7.482	1.720	0.233	0.985	9.743	0.953	7.024	-1.051	0.978
克氏针茅	5.772	0.476	0.986	8.326	1.183	0.341	0.965	11.271	0.945	6.280	-0.503	0.988
短花针茅	4.365	0.495	0.963	6.284	0.695	0.294	0.991	8.973	0.964	5.590	-1.119	0.976

3 讨论

土壤入渗速率是单位时间单位面积土壤的入渗水量,其主要依靠土壤毛管对水分的吸力以及水自身的重力,在入渗前期土壤水吸力为推动土壤入渗的主要作用力。根据土壤水势原理,随着水分不断渗入土体,土壤含水量增加,土壤水吸力不断减小直到水分最终只受重力作用而下渗,此时土壤水分入渗速率基本趋于稳定^[15-16]。因此,各类样地土壤入渗速率均表现为先急剧减小后逐渐稳定,并且大致分为 3 个阶段。同时由于一定量降雨增加了土壤初始含水率,从而减小了土壤水吸力,因此降雨后各样地土壤初始入渗速率明显降低。

土壤持水及渗透性能决定着水分入渗的速度和分布,同时也是评价土壤对水分调控和涵养水源的重要指标^[17]。研究结果表明,土壤渗透及持水能力均表现最好和最差的分别是洽草群落和银灰旋花群落。土壤渗透和持水能力主要取决于土壤容重和孔隙度,不同群落类型土壤持水能力大小可以间接反映出不同群落类型土体物理特征,土体越疏松,土壤持水量越大;而土体越致密,板结程度越高,相应其持水量越小^[19]。而在实际调查中也发现,洽草群落植被覆盖度高,植物残枝及枯落物形成的土壤腐殖质层较厚,加之根系密布,有效改善了土壤结构,使其土壤持水能力较强,更有利于水分下渗;而银灰旋花群落植被退化比较严重,地表出现裸露斑块且土壤板结程度较高,故其土壤渗透及持水能力均表现最差。

土壤容重和孔隙度决定了土壤的紧实与松散程度,土壤质地越紧实黏重,对水分下渗的阻碍作用越强,水分下渗越慢^[20]。熊东红等^[21]研究发现,土壤容重、总孔隙度与土壤初始入渗率、稳定入渗率、累积入渗量均呈显著相关关系,但作用效果相反。研究中土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度对土壤入渗性能的影响与以往大多数研究结果一致,而初始含水量和毛管孔隙度对土壤入渗性能的影响与以往研究存在一

定偏差^[1]。其原因是由于研究区干旱少雨,各样地土壤含水量均较低(仅为 2%~5%),加之土壤下层钙积层的出现对入渗后期土壤入渗速率有一定干扰,因此研究区初始含水量和毛管孔隙度对土壤稳渗速率影响较弱,具体原因仍有待今后进一步试验论证。

4 结论

(1)研究区内 6 种群落类型土壤入渗过程大致可分为 3 个阶段,即土壤入渗速率在入渗开始后 0~10 min 呈极速下降阶段,10~20 min 下降速率明显减慢并趋于稳定,30 min 后达到稳渗状态。不同群落类型土壤入渗性能存在较大差异,其中洽草群落表现最好,由此说明洽草群落具有较强的蓄水减流能力,而银灰旋花群落样地土壤渗透及持水性均最弱,所以面对大雨时更易达到饱和状态,因此其发生土壤侵蚀的危险性会更大。

(2)土壤容重、总孔隙度和非毛管孔隙度是影响研究区土壤入渗的关键因素。随着植被的退化,土壤结构逐渐发生改变,土壤容重增加,孔隙度减小,使得其渗透性能也随之降低。

(3)通过利用考斯加可夫公式、霍顿公式、菲利普公式和通用经验公式,对入渗数据进行模拟发现,霍顿模型最适合描述研究区土壤入渗速率随时间变化情况。

参考文献:

[1] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 何丹,马东豪,张锡洲,等. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源[J]. 水科学进展,2013,24(3):340-348.

[5] 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.
- [6] Duan R, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soils [J]. *Irrigation Science*, 2011, 29(5): 379-389.
- [7] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils[J]. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 295-302.
- [8] 高婵婵,余凯,赵传燕,等. 黄土丘陵区安家沟流域土壤入渗特性空间变异的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 90-95.
- [9] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗与产流产沙过程[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 190-195.
- [10] 常颖. 内蒙古希拉穆仁草原产流产沙试验过程研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [11] 张瑞强,高天明,刘铁军. 希拉穆仁修复退化草地水土流失观测研究[J]. *草业科学*, 2010, 27(3): 21-25.
- [12] 席小康,朱仲元,郝祥云. 锡林河流域草原植物群落分类及其多样性分析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1320-1326.
- [13] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 任宗萍,张光辉,王兵,等. 双环直径对土壤入渗速率的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 94-97, 103.
- [15] 王珍,冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 75-80.
- [16] 唐金林,杨洁,刘窑军,等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 122-126.
- [17] 刘目新,聂艳,于婧. 不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 871-878.
- [18] 郭晓朦,何丙辉,秦伟,等. 不同坡长条件扰动地表下土壤入渗与贮水特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 198-203.
- [19] 赵锦梅,张德罡,刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 422-429.
- [20] 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性及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 57-62.
- [21] 熊东红,霍娟,杨丹. 元煤干热河谷冲沟集水区土壤入渗性能及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 170-175.
- (上接第 111 页)
- [23] 王国重,梅亚东,双瑞,等. 豫西山区淤地坝泥沙淤积过程及流域产沙模型[J]. *武汉大学学报工学版*, 2010, 43(5): 558-561.
- [24] 魏霞,李占斌,李鹏,等. 黄土高原典型淤地坝淤积机理研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(6): 10-13.
- [25] 刘鹏,岳大鹏,李奎. 陕北黄土洼淤地坝粗颗粒沉积与暴雨关系探究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 79-83.
- [26] 龙翼,张信宝,李敏,等. 陕北子洲黄土丘陵区古聚湫洪水沉积层的确定及其产沙模数的研究[J]. *科学通报*, 2009, 53(1): 73-78.
- [27] Liu G, Liu P L, Warrington D N, et al. Resolving ecological and economic challenges: An application of sustainable ecological agriculture on the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2011, 9(1): 575-582.
- [28] 徐学选,刘普灵,琚彤军,等. 黄土丘陵区燕沟流域水土流失治理的水沙效应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 113-117.