

红壤坡地生态系统土壤入渗特征比较研究*

彭亿^{1,2}, 李裕元², 李忠武¹, 阳小聪^{1,2}, 潘春翔², 谢小立²

(1. 湖南大学 环境科学与工程学院 环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082; 2. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

摘要:以亚热带红壤区6个典型坡地生态系统为研究对象,采用盘式负压入渗法,系统研究了红壤的入渗过程、特征及其与土壤主要理化性质的关系。选择的生态系统包括:农田(包括缓坡农田和陡坡农田各一块)、草地、灌丛、茶园、常绿落叶阔叶混交林、油茶林等。结果表明:各生态系统土壤入渗率随时间的变化均可拟合为幂函数形式。不同生态系统稳定入渗率变化范围为0.024~0.080 mm/min,其中农田和油茶林的稳定入渗率较大,草地和茶园的最小。稳定入渗率与土壤容重及初始含水量呈显著负相关,而与孔隙度呈正相关。入渗过程主要受孔隙度和黏粒含量的影响。土壤有效孔径和宏观毛管长的变化范围分别为0.064~0.179 mm和41.5~128.2 mm,但统计显示其与土壤主要理化性质之间的相关性均不显著。

关键词:土壤入渗;红壤;坡地生态系统;盘式入渗仪

中图分类号:S152.7;S181

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)06-0205-05

Comparison Study on Soil Infiltration Characteristics in Red Soil Slope Ecosystems

PENG Yi^{1,2}, LI Yu-yuan², LI Zhong-wu¹, YANG Xiao-cong^{1,2}, PAN Chun-xiang², XIE Xiao-li²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Hunan University, Ministry of Education, Changsha 410082, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Science, Changsha 410125, China)

Abstract: Soil infiltration characteristics, process and their relationship with soil main physical and chemical properties were studied. Six typical slope ecosystems in subtropical red soil region were selected and disc permeameter method was used. The selected ecosystems comprised of cropland (including steep and gentle slope types), grassland, shrub, tea garden, mixed evergreen and deciduous broadleaf forest, oil-tea (*Camellia oleifera*), woodland. Results showed that the relationship between soil infiltration rate and time in each ecosystems could be fitted as $Y = aX^{-b}$ ($P < 0.01$). The stable infiltration rate (I_s) in all ecosystems ranged from 0.024 to 0.080 mm/min, while I_s was the highest in cropland and oil-tea woodland but the lowest in grassland and tea garden. I_s was negatively correlated to soil bulk density, initial moisture, but positively correlated to soil porosity. Infiltration process was mainly affected by soil porosity and clay content. The range of soil mean available pore size (MAPS) and macro-capillary length (MCL) were 0.064~0.179 mm and 41.5~128.2 mm respectively. However, MAPS and MCL were non-significantly related to main soil physical and chemical properties.

Key words: soil infiltration; red soil; slope ecosystems; disc permeameter

土壤入渗是田间水分循环的首要环节,是影响降雨时空分布的重要因子。土壤入渗特征关系到地

表径流的产生、土壤侵蚀和化学物质运移等,是评价土壤抗侵蚀能力的重要指标^[1]。田间入渗测定方

* 收稿日期:2009-08-16

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-437);国家科技支撑计划(2007BAD87B11);中国科学院知识创新工程领域前沿项目(0651054040)

作者简介:彭亿(1985-),女,湖南长沙人,在读硕士,现从事生态系统恢复机理研究。E-mail: pengyi_101@163.com

通信作者:李裕元(1965-),男,河南焦作人,博士,副研究员,主要从事土壤植被关系研究。E-mail: liyy@isa.ac.cn

法中,圆盘入渗仪法相对快速、简易,主要应用于田间水力学参数的测定,以及土壤导水率、两区模型参数和大孔隙比例等方面的研究^[2-4]。红壤坡地是我国南方亚热带低山丘陵区广泛分布的土地类型之一,由于水热丰沛、地形复杂,分布着纷繁复杂的生态系统类型,同时也是我国重要的后备耕地资源,是发展南方杂粮和亚热带经济作物(茶叶、柑橘、油茶)的重要基地。但是由于红壤本身质地黏重,持水性能差,且该地区降雨大量集中在春夏季(4-7月),水资源时空分布极度不均,这不仅导致了严重的水土流失和洪涝灾害,也存在着严重的季节性干旱,从而制约了该地区水热资源的合理利用和坡地生产力的提高。因此,摸清红壤坡地不同生态系统的土壤水循环规律,对于促进该地区生态系统的科学管理和水资源利用率的提高具有重要的理论价值。基于此,本文以地处亚热带红壤丘陵区的桃源农业生态试验站的6个典型坡地生态系统为研究对象,采用盘式负压入渗法,系统研究了红壤的入渗过程、特征及其与土壤主要理化性质的关系,旨在探明不同坡地生态系统红壤的入渗性能及其主要影响因子,为坡地水资源的优化管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于湖南省桃源县中国科学院桃源农业生态试验站(简称桃源站)内,地理坐标为 $28^{\circ}55'N$, $111^{\circ}30'E$,海拔92.2~125.3 m,年平均气温 $16.5^{\circ}C$,年均降水量1447.9 mm,8-9月季节性干旱较为严重。年日照时数1531.4 h,为典型中亚热带北部湿润季风气候。该区地形为典型的江南红壤丘岗地貌。在区域地貌中,河湖冲积平原占13.4%,低丘岗地占49.3%,丘陵山地占36.0%。土壤类型主要为第四纪红土发育的红壤,黏粒多,结构差,持水性能差。

2 研究内容及实验方法

选取6个南方典型坡地生态系统:农田(包括缓坡农田和陡坡农田各一块)、草地、灌丛、茶园、常绿落叶阔叶混交林、油茶林等共7块样地。缓坡农田坡度为 5° ,面积为 $10\text{ m} \times 20\text{ m}$,陡坡农田及其他生态系统均为坡度 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,面积 $20\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。每块样地选择3个代表位置测定土壤的入渗过程,试验时间为2007年9-10月。

土壤入渗采用圆盘入渗仪测定。圆盘入渗仪底盘直径为25 cm,水头采用-10 mm。测定方法:试验开始后,前5 min每隔15 s读数一次;5~10 min

期间每30 s读数一次;10 min后,每1 min读数一次。初始入渗率为每次试验前3 min的土壤入渗率,稳定入渗率为30 min后的土壤入渗率。另采用-50 mm水头测定土壤的稳定入渗率,用两个不同水头的稳定入渗率计算有效孔径和宏观毛管长。计算方法如式(1),式(2)^[5]。

$$\lambda = \Delta h / (\ln K_1 - \ln K_2) \quad (1)$$

$$\lambda_m = 7.4 / \lambda \quad (2)$$

式中: λ ——宏观毛管长(mm); λ_m ——有效孔径; Δh ——两个水头的绝对差; K_1, K_2 ——与两个水头对应的导水率。

采用环刀法测定土壤的容重及含水量;吸管法测定颗粒组成;湿筛法测定团聚体稳定性;油浴加热- $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定土壤有机质含量。孔隙度的计算公式为:土壤总孔隙度=1-土壤容重/土粒密度;活性孔隙度=总孔隙度-凋萎含水量×容重;团聚体平均重量直径MWD的计算方法如式(3)。

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (3)$$

式中: x_i ——筛分出来第*i*级粒径范围团聚体的平均直径; w_i ——第*i*级粒径范围团聚体的重量占土壤样品干重的分数。

3 结果与分析

3.1 不同生态系统土壤的入渗特征

3.1.1 土壤入渗过程 由7块样地的土壤入渗过程(图1)可见,在入渗初期,前3 min内入渗率迅速下降,约至10 min时,下降趋于缓慢,最后趋向一个恒定的值,即土壤基本达到稳定入渗。试验发现,各生态系统土壤的水分入渗速率均在30 min内基本达到稳定状态。故将30 min作为本区土壤入渗的稳定时间。

对入渗过程的拟合结果表明:各生态系统土壤入渗率随时间的变化均可拟合为幂函数: $Y = aX^{-b}$,其 R^2 均达到0.848~0.972($P < 0.01$)。其中 a, b 为回归系数,变化范围分别为 $0.159 \leq a \leq 0.496$, $0.435 \leq b \leq 0.801$ 。其中 a 值主要反映了初始入渗率的大小, b 值则对应曲线的变化形状, b 值越大,曲线的拐角越陡,入渗稳定的越快。

3.1.2 土壤入渗特征 从前3 min平均入渗率(表1)来看,油茶林(0.513 mm/min)和两种农田的初始入渗率最大,其次为茶园和灌丛,混交林和草地(0.150 mm/min)的较小。入渗至15 min时,平均入渗率较前3 min平均入渗率均下降40%~50%。入渗至30 min时,平均入渗率下降约60%,表明红

壤土水分入渗变化过程较稳定, 且各生态系统之间较为相似。

各生态系统的稳定入渗率(水头为-10 mm, 下同)表现为: 缓坡农田 > 陡坡农田、油茶林 > 灌丛 > 混交林 > 草地、茶园。其中缓坡农田的稳定入渗率(0.080 mm/min)最高, 草地和茶园最低, 缓坡农田是茶园的 3.3 倍。其它生态系统稳定入渗率在 0.026~0.063 mm/min 之间。各生态系统的 30 min 累计入渗量与稳定入渗率变化趋势基本一致。从这个结果来看, 农田、油茶林、灌丛等土壤在非饱和条件下入渗性能较好, 可以更好地应对季节性干

旱。另外, 许多积水入渗研究中林地和灌丛等的入渗率高于农田^[6], 与我们的结果相反, 这可能是因为积水入渗通过大孔隙, 而负压入渗主要靠基质吸力的原因。比较发现各生态系统的入渗率比黄土高原黄绵土的研究结果低几倍到十几倍, 而与重庆的紫色土较为接近^[7-8]。入渗率普遍较低, 这是由于相比其他类型土壤, 红壤的质地黏重, 孔隙较少。而盘式入渗仪本为负压入渗, 入渗速率比积水入渗小。过低的入渗率容易放大仪器本身的误差, 影响其对入渗性能的评述, 故笔者建议研究红壤的入渗性能时应结合积水入渗方法。

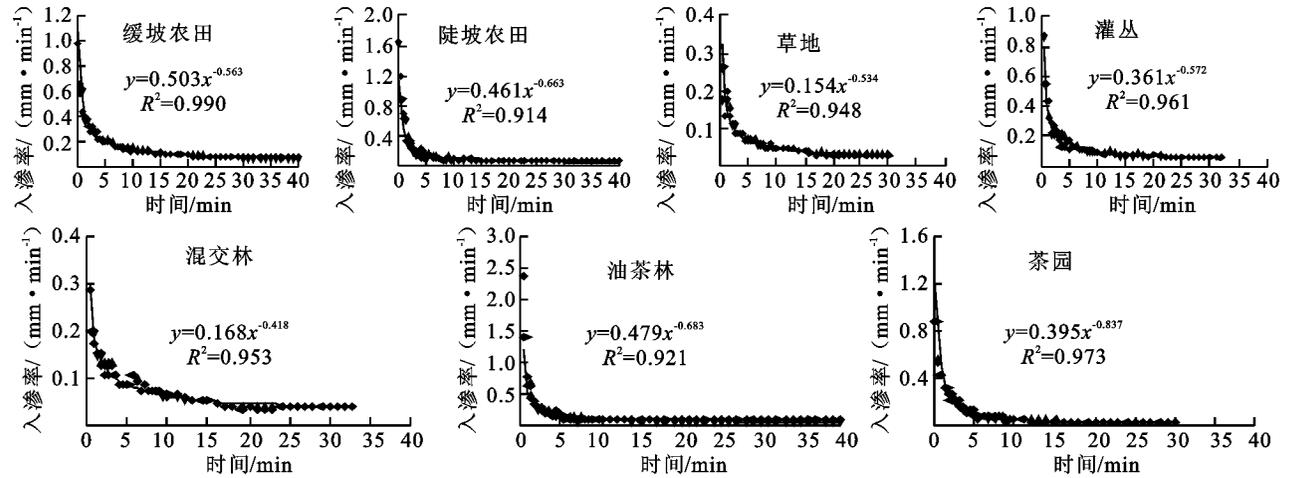


图 1 不同生态系统红壤负压入渗过程模拟

表 1 不同生态系统土壤的入渗参数

生态系统	前 3 min 平均入渗率/(mm·min ⁻¹)	前 15 min 平均入渗率/(mm·min ⁻¹)	30 min 平均入渗率/(mm·min ⁻¹)	30 min 累积入渗量/mm	稳定入渗率/(mm·min ⁻¹)	宏观毛管长/mm	有效孔径/mm
缓坡农田	0.454b	0.271b	0.218c	4.67c	0.080d	128.2b	0.064a
陡坡农田	0.480b	0.245b	0.191bc	3.72bc	0.063cd	67.8a	0.111ab
草地	0.150a	0.089a	0.070a	1.47a	0.026a	41.5a	0.179b
灌丛	0.313ab	0.204b	0.160b	3.13ab	0.052bc	60.8a	0.140ab
混交林	0.155a	0.096a	0.078a	1.74a	0.036ab	63.7a	0.139ab
油茶林	0.513b	0.249b	0.193bc	3.16abc	0.060c	48.8a	0.156b
茶园	0.352ab	0.165ab	0.124ab	2.13ab	0.024a	71.29a	0.104ab

宏观毛管长为平均孔隙长度, 是一个概化值, 宏观毛管长越大, 毛细管对土壤水分入渗的影响就越大。土壤有效孔径是指与一定的土壤水吸力相当的孔径。有效孔径与土壤水吸力呈反比, 孔径愈小则土壤水吸力愈大。由不同生态系统土壤的入渗参数(表 1)可以看出, 宏观毛管长以缓坡农田最大(128.2 mm), 远高于其他生态系统。其次为茶园、陡坡农田、混交林、灌丛等, 油茶林与草地的最小, 有效孔径的变化趋势与宏观毛管长相反。由此可见, 农田、茶园等土壤入渗受土壤毛管作用的影响较大, 且土壤水吸力较大, 而草地、油茶林相对均较小。

3.2 不同生态系统土壤的性质

由不同生态系统表层土壤性质(表 2)可以看出, 各生态系统土壤容重的变化范围在 1.0~1.3 g/cm³ 之间, 其中草地与茶园的容重较大, 其次为陡坡农田和灌丛, 而油茶林、缓坡农田、混交林的较小。这与人为干扰程度和植物的根系分布状况密切相关。农田土壤由于长期耕作, 容重下降; 林地土壤有机质含量丰富, 且含有大量植物根系, 容重较小。

土壤孔性受其质地、结构及有机质含量影响。土壤总孔隙度、孔隙大小分布及弯曲度——即土壤孔隙的几何性状, 对土壤导水率及持水特性有直接

的影响。本研究所选各生态系统间土壤的孔隙度变化范围不大, 均为 50% ~ 60%, 但差异达到显著水平。活性孔隙度则为 20% ~ 40%, 占总孔隙度的 50% 左右。油茶林、缓坡农田、混交林的总孔隙度和活性孔隙度最高。其中林地孔隙度高与其容重较小、有机质含量较高有关。农田孔隙度高与人为耕作的有关。

土壤的团聚体特征用平均重量直径(*MWD*) 表示, *MWD* 大说明土壤大团聚体多, 结构稳定。从表 2 来看, 油茶林和混交林的土壤 *MWD* 值最大, 其次为两种农田生态系统, 灌丛、茶园及草地较小。其变化趋势基本上与土壤孔隙度一致, 与土壤容重相反。

表 2 不同生态系统表层土壤性质比较

生态系统	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙度/ %	活性孔 隙度/ %	饱和含 水量/ %	<i>MWD</i>	有机质/ %	< 0.002 mm 黏粒/ %
缓坡农田	1.055ab	61.0d	36.8d	60.6d	1.70ab	1.78ab	38.00a
陡坡农田	1.170bc	54.6b	27.7ab	51.5ab	1.74ab	2.15bc	40.99a
草地	1.290c	52.4ab	22.7ab	50.9ab	1.22a	1.97ab	35.71a
灌丛	1.175bc	56.4bc	29.4bc	55.0bc	1.58a	1.69a	42.23a
混交林	1.099ab	61.2d	35.9cd	60.3d	2.24bc	3.70d	36.41a
油茶林	1.034a	60.0cd	36.2cd	56.0c	2.40c	2.51c	35.45a
茶园	1.269c	50.3a	21.1a	49.7a	1.51a	1.94ab	48.31a

3.3 红壤入渗性能影响因素分析

3.3.1 入渗特征影响因素 稳定入渗率、30 min 累计入渗量与容重呈显著负相关关系(表 3)。说明

表 3 土壤水分入渗参数与影响因子的相关系数矩阵

土壤因子	容重	总孔隙度	活性孔隙度	初始含水量	黏粒
宏观毛管长	- 0.187	0.097	0.131	- 0.252	- 0.057
有效孔径	0.207	- 0.028	- 0.093	0.312	0.002
稳定入渗率	- 0.613*	0.564*	0.592*	- 0.488*	- 0.100
前 3 min 平均入渗率	- 0.331	0.146	0.215	- 0.528*	0.308
30 min 累计入渗量	- 0.432*	0.353	0.390	- 0.651**	0.098
<i>a</i>	- 0.258	0.110	0.165	- 0.679**	0.261
<i>b</i>	0.396	- 0.523*	- 0.487*	- 0.385	0.575*

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

前 3 min 平均入渗率、稳定入渗率与初始含水量之间均呈显著负相关, 这说明土壤的初始含水量不仅对初始入渗率有较大影响, 对稳定入渗率也有一定的影响。其原因可能在于随着土壤初始含水量的增加, 一方面土壤的吸水量会减少, 另一方面土壤黏粒吸水膨胀导致孔隙度的相对减小, 尤其是胶体含量大的土壤更为显著。总的来讲, 各生态系统的入渗率主要与土壤结构和初始含水量有关。

土壤入渗参数宏观毛管长和有效孔径变化范围分别为 41.5 ~ 128.2 mm 和 0.064 ~ 0.179 mm, 但

油茶林和混交林土壤 *MWD* 大的原因可能是林下有较厚的落叶层, 经微生物分解后的腐殖质增加了土壤水稳性团粒结构含量, 这与黄土高原的研究结果基本一致^[9]。但有所不同的是黄土高原区草地的土壤团聚体结构比农田的好, 导致这种差别的原因可能在于土壤颗粒组成的巨大差异。红壤黏粒 (< 0.002 mm) 含量一般较高 (> 35%), 因此黏粒对于团聚体胶结的作用相对较强; 而黄土高原土壤由于黏粒含量相对较低, < 0.005 mm 黏粒含量一般在 15% 以下^[10] (可以推测 < 0.002 mm 的黏粒含量会更低), 团聚体的形成更主要地依赖于有机质的胶结作用。

容重越大, 土壤结构越紧实, 其入渗性能越差。各入渗率与土壤总孔隙度和活性孔隙度之间均为正相关, 且活性孔隙度的相关比总孔隙度更显著。

统计显示其与容重、黏粒含量、团聚体稳定性、有机质含量等土壤主要理化性质之间的相关性均不显著, 这可能是由于土壤入渗性能受多因子的综合影响, 且关系较为复杂。

3.3.2 入渗过程影响因素 相关分析结果(表 3)表明, 回归系数 *a* 与初始含水量之间呈极显著的负相关关系, 进一步反映了土壤初始含水量对初始入渗速率的显著影响; 系数 *b* 与黏粒含量和孔隙度之间分别呈显著正相关和负相关关系, 说明土壤黏粒含量越高, 孔隙度越小, 土壤系数 *b* 值越大, 也就是

曲线的拐角越陡,入渗越容易达到稳定状态;而黏粒含量低、孔隙度大的土壤,如缓坡农田、草地、混交林等生态系统,入渗过程达到稳定的时间就相对较长,因此会延长地表初始产流的时间,从而减少了水土流失。

4 结论

(1)红壤丘陵区各生态系统入渗率随时间的变化均可较好地拟合为幂函数曲线: $Y = aX^{-b}$;入渗的稳定时间一般在 30 min 以内。

(2)各生态系统稳定入渗率以缓坡农田最高,为 0.080 mm/min,然后依次为陡坡农田、油茶林、灌丛、混交林、草地和茶园最小,缓坡农田是茶园的3.3倍。宏观毛管长以缓坡农田最大(128.2 mm),远高于其他生态系统,油茶林与草地的最小,有效孔径的变化趋势与宏观毛管长相反。

(3)土壤稳定入渗率与土壤容重及初始含水量呈显著负相关,与孔隙度呈正相关。入渗过程则主要受孔隙度和黏粒含量影响。

参考文献:

[1] 张永涛,杨吉华,夏江宝,等.石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J].水土保持学报,2002,16(4):123-126.
[2] 樊军,邵明安,王全九.田间测定土壤导水率的方法研

究进展[J].中国水土保持科学,2006,4(2):114-119.

(上接第204页)

[12] 李红寿.用耗散结构理论对莫高窟园林用水的分析[J].生态学报,2006,22(6):3454-3462.
[13] 崔向新,蒙仲举,高永,等.不同粒径砾石覆盖对土壤水分蒸发的影响[J].中国农村水利水电,2009(3):24-23.
[14] 原翠萍,张心平,刘汗,等.砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J].农业工程学报,2008,24(8):17-20.
[15] 曹红霞,康绍忠,何华.灌溉对土壤水分分布和潜水蒸发的影响[J].西北农林科技大学学报,2003,31(5):73-76.
[16] 曹红霞,康绍忠,何华.蒸发和灌水频率对土壤水分分布影响的研究[J].农业工程学报,2003,19(6):1-3.
[17] 莫兴国.区域蒸发研究综述[J].水科学进展,1996,7

[3] Angulo-Jaramillo R, Vandervaere J P, Roulier S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments[J]. Soil Tillage Research, 2000, 55: 1-29.
[4] Cameira M R, Fernando R M, Pereira L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silt loam alluvial soil in southern Portugal[J]. Soil Tillage Research, 2003, 70: 131-140.
[5] 薛绪掌,张仁铎.用盘式入渗仪数据计算土壤导水参数[J].水利学报,2001,10:12-18.
[6] 高鹏,穆兴民.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分入渗的对比试验[J].中国水土保持科学,2005,3(4):27-31.
[7] 许明祥,刘国彬,卜崇峰,等.圆盘入渗仪测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J].农业工程学报,2002,18(4):54-58.
[8] 马晓刚,张兵,史东梅,等.丘陵区不同土地利用类型紫色土入渗特征研究[J].水土保持学报,2007,21(5):24-29.
[9] 杨光,丁国栋,常国梁,等.黄土高原不同退耕还林地森林植被改良土壤特性研究[J].水土保持研究,2006,13(3):204-210.
[10] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:31.

(2): 180-185.

[18] 李红寿,汪万福,张国彬,等.地形地貌对莫高窟区域微环境的影响[J].敦煌研究,2008,(3):98-102.
[19] 汪万福,王涛,李最雄,等.敦煌莫高窟顶灌木林带防风固沙效应[J].生态学报,2004,24(11):2493-2498.
[20] 刘新平,张铜会,赵哈林,等.流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J].干旱区地理,2006,29(4):523-526.
[21] 钱天伟,刘春国.饱和-非饱和土壤污染物运移[M].北京:中国环境科学出版社,2007:67-76.
[22] 李国振.塔里木河流域绿洲边缘土壤蒸发与积盐的初步分析[J].干旱区地理,1998,21(1):29-31.
[23] 王会肖.砂土土壤蒸发的测定与模拟[J].中国农业气象,1997,18(4):29-35,38.