

文章编号: 1008-2786-(2013)3-273-07

滇中不同植被恢复策略下土壤入渗性能 及其影响因素

侯秀丽^{1,2}, 付登高², 阎凯², 李博², 段昌群²

(1. 昆明学院 生命科学与技术系, 云南 昆明 650214; 2. 云南大学生命科学学院 环境科学与生态修复研究所, 云南 昆明 650091)

摘 要: 对按树林、荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林、次生常绿阔叶林 5 种不同植物群落恢复措施下, 土壤入渗性及其相关影响因子进行研究。结果表明: 土壤的饱和导水率在不同植物群落中的大小顺序为: 次生常绿阔叶林 > 针阔混交林和荒坡灌草丛 > 云南松林 > 按树林, 其值分别为 0.64、0.52、0.52、0.20、0.14 mm/min; 到达稳渗率的时间为云南松林和按树林高于其他植被类型。土壤入渗过程符合 Horton 入渗模型。在不同的植物群落恢复下, 随群落结构复杂程度的升高, 土壤容重下降, 总孔隙度及有机质含量递增; 土壤入渗与土壤容重成负相关关系, 与总孔隙度及有机质含量成正相关关系。在滇中地区以植物群落结构恢复为主要手段而间接的改善土壤性质, 进而改变土壤入渗的影响因子, 这样才能达到水源涵养的生态效应。

关键词: 土壤入渗; 土壤性质; Horton 入渗模型; 群落结构

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

土壤入渗是水分通过地表向下的流动, 从土壤表面渗入土壤形成土壤水的过程, 是植物吸收利用土壤水的唯一途径^[1], 土壤入渗性能直接影响着土壤对水分传输的再分配能力, 是植被水文功能研究的重要指标^[2-5]。不同植被类型、不同恢复阶段以及不同土层厚度的土壤渗透特性差异较大^[6-8]。以往的研究主要注重土壤入渗过程机理及模型、入渗特征、影响因素及植被恢复模式对入渗的影响评价方面^[9-11], 且研究区域多集中于黄土高原区^[12-13]。而在云南中部地区退化生态系统恢复过程中, 结合不同的恢复措施、土壤性质两方面的影响因素分析土壤入渗机制研究相对较少。

我国滇中地区由于人口密集, 人为干扰严重, 生态系统退化严重, 目前, 主要采用人工种植及自然恢

复植被的生态工程来改善生态环境。针对该地区退化生态系统的恢复特点, 一些学者的注意力主要集中在植物多样性、土壤肥力、植物群落的水文过程与植物群落关系等角度对比不同恢复措施条件下的生态效应方面^[14-20], 而针对土壤界面的水文效应研究甚少。本研究主要以滇中地区人工恢复及自然恢复所形成的按树林、云南松林、针阔混交林、次生常绿阔叶林、荒坡灌草丛林型为研究对象, 在分析不同植被恢复措施下土壤性质和土壤特征的基础上, 构建土壤入渗模型, 并利用相关分析方法研究土壤性质与土壤入渗之间的关系, 探讨植物群落-土壤性质-土壤入渗三者之间的交互关系。该研究为进一步探讨植物群落结构恢复, 为驱动因子改善土壤产流机制提供参考。

收稿日期(Received date): 2012-08-10; 改回日期(Accepted): 2013-01-10。

基金项目(Foundation item): 云南省科技厅应用基础研究计划项目(2011FZ175)、昆明学院校级课题(XJ11L036)、昆明学院人才引进项目。

[This work was supported by Natural Science Foundation of Yunnan Province (2011FZ175), Natural Science Foundation of Kunming University (XJ11L036), and the Scientific Research Foundation of Kunming University.]

作者简介(Biography): 侯秀丽(1977-), 女(汉), 博士, 主要从事生态水文学研究。[Hou Xiuli (1977-), female (Han nationality), Doctor of ecology, research field of Ecohydrology.] E-mail: hxlyn@yahoo.com.cn

* 通信作者(Corresponding author): 段昌群(1966-), 男(汉), 博士, 教授, 主要从事恢复生态学、污染生态学研究。[Duan Changqun (1966-), Male (Han nationality), Doctor of ecology, Professor, research field of Restoration Ecology and Pollution Ecology.] E-mail: chqduan@ynu.edu.cn

1 研究地概况与方法

1.1 概况

研究地位于滇中高原云南省楚雄彝族自治州凤马场小流域,101°28'18"E、25°24'09"N,属亚热带季风气候,海拔2100~2200 m,年降雨量为800~1300 mm,有明显的干湿季节,降雨主要集中在5—10月。土壤属于紫色沙土,pH值为3.1~4.1。地带性植被为半湿润常绿阔叶林^[11],由于历史原因已破坏殆尽。该地区经自然及人工恢复形成5种典型植被:荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林、桉树人工林及次生常绿阔叶林。荒坡灌草丛在1997年退化牧地基础上自然恢复所形成,桉树人工林为1995年人工种植史密斯桉和兰桉所形成,云南松林是20世纪80年代进行飞机播种所形成的人工林,针阔混交林及次生常绿阔叶林是经自然恢复所形成的次生林。

1.2 实验方法

1.2.1 土壤入参与土壤物理性质测定

自1998年以来,云南大学和楚雄牟定县水土保持办公室合建生态定位观测站,在坡度、坡向大致一致的同—区域中选取荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林、桉树人工林、次生常绿阔叶林5种植物群落建立径流小区,每种植物群落建立3个平行的径流小区,共计15块,常年进行水文及土壤营养动态等方面的研究。在2011—10—20—23,采用双环法测定土壤的入渗性能^[21](内环直径为35.5 cm,高25 cm,外环直径为50.5 cm),试验统一历时80 min,以80 min时的入渗速率作为土壤的稳渗速率,在同一地块重复测试3次,结果取平均值。本研究为了说明各植被类型的土壤性质对土壤入渗性能的影响,在开展入渗试验的同时,测定样点中初始的土壤水

分含量,并在测试点附近采集不同深度(10 cm,20 cm,30~50 cm层)土样,用作室内土壤理化性质的测定和分析。采用环刀法测定土壤表层容重,同时计算土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度。土壤有机质含量测定采用重铬酸钾氧化法测定。

1.2.2 数据处理

利用origin软件,用不同的入渗模型拟合各种植被类型的土壤下渗过程,求解初渗速率、稳渗速率、达到稳渗率的时间等特征入渗参数。在分析入渗数据时计算各植被历时10 min时土壤总入渗量。利用spss统计软件,采用皮尔逊相关指数分析土壤入参与土壤性质关系。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复策略下土壤入渗性能

对滇中不同植被类型表层土壤,利用双套环法测定土壤入渗情况,结果见图1。从土壤水分入渗率随时间的变化曲线来看,各植被类型土壤入渗过程可以分为三个阶段。第一阶段,入渗速率很大,变化率大,此阶段土壤水分主要受土壤表面分子力作用,入渗量的变化与初始含水量关系密切。第二阶段,随着含水量的增加土壤入渗率逐渐降低,变化率要小于第一阶段,入渗主要受毛管力的作用。随着入渗过程的进行,土壤逐渐为水饱和,入渗速率趋向一个较稳定的数值,入渗过程进入第三阶段,这时分子力不再起作用,毛管力非常微弱,而主要受重力作用,此时的入渗速率即为土壤稳渗率。从测定结果来看,荒坡灌草丛、云南松林、桉树林在入渗第一阶段,其入渗变化率要高于针阔混交林及常绿阔叶林;在入渗第二阶段,针阔混交林和次生常绿阔叶林入渗变化率要高于荒坡灌草丛、云南松林和桉树林。第三阶段,各植被类型土壤稳渗率大小顺序为次生

表1 5种植被类型的群落结构

Table 1 The structure of the five plant communities

植被类型	荒坡灌草丛	桉树林	云南松林	针阔混交林	次生常绿阔叶林
优势物种	滇油杉	史密斯桉	云南松	滇油杉、云南松、滇青	滇青冈、滇油
多样性指数(香浓-威纳) index	1.0	0.2	0.4	1.0	1.4
物种数	9	14	13	23	31
树木基部面积/(m ² /hm ²)	0.9	17.3	24.7	40.1	40.6
最大树高/m	2.6	30	23	20	25
最大胸径/cm	6	38	26	22	22
林龄/a	8	14~18	35~45	35~45	35~45

注:表中资料据唐勤等,2007。

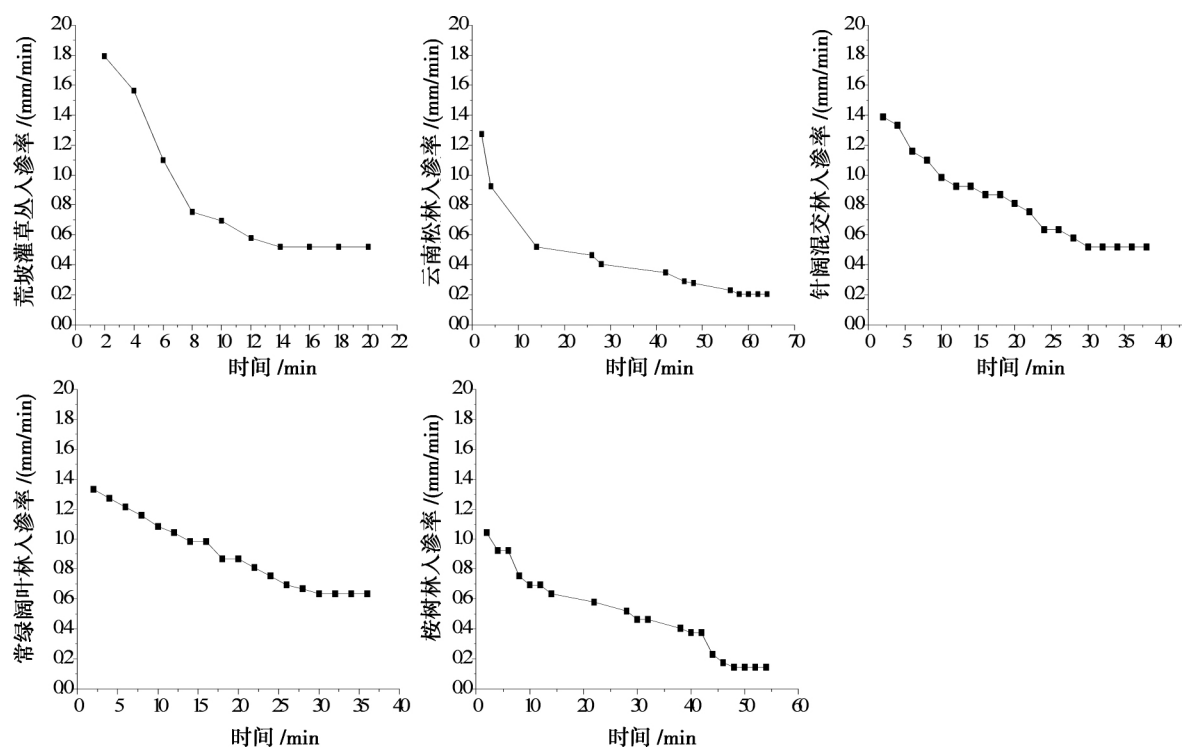


图1 5种植被类型土壤入渗

Fig. 1 Infiltration of soil at the five vegetations

常绿阔叶林 > 针阔混交林 > 荒坡灌草丛 > 云南松林 > 桉树林。图中结果表明次生常绿阔叶林土壤的渗透性最高,其次针阔混交林 > 荒坡灌草丛 > 云南松林 > 桉树林。次生常绿阔叶林中各植物物种组成丰富,根系发育好,增大土壤的通透性,与其他植被类型相比桉树林和云南松林林分结构以单一物种组成,其林下植被稀少致使土壤孔隙度低。

2.2 土壤入渗模型

根据土壤入渗试验测定土壤水分入渗过程,利用 Horton 入渗模型,拟合了各植被类型表层土壤(20 cm)的土壤水分入渗方程(表2)。从表中可以看出各植被类型入渗方程均呈现指数递减的趋势,且拟合曲线的相关系数都高于0.95。荒坡灌草丛土壤入渗过程线的初始入渗率最高(1.79 mm/min),其次为针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 云南松林 > 桉树林。荒坡灌草丛入渗测定时,土壤水分含量(12.61%)明显低于其他植被类型,致使该种植被土壤入渗过程线的初始入渗率要远远高于其他植被类型,再者荒坡灌草丛覆盖度高,植物根系比较发达,尤其是须根较多,而且多分布于土壤表层,因而其初渗较快。各植被类型达稳渗率历时云南松林最长,为58 min,其次为桉树林,48 min,次生常绿阔叶林及针阔混交林都为30 min,荒坡灌草丛时间最短,

为14 min,这说明荒坡灌草丛表层土壤达到饱和历时远低于其他植被类型。而桉树林与云南松林由于认为扰动破坏了原来的土壤结构,改变了土壤非毛管孔隙,水流在重力作用下带动土壤颗粒重塑土体构型,致使达到稳渗的历时增长。

另外,通过试验去各植被类型土壤的前10 min累计入渗量,其反映了土壤的贮水能力,各植被类型累计入渗量大小依次为:针阔混交林累计入渗量最高为11.30 mm,其次为常绿阔叶林(7.91 mm) > 荒坡灌草丛(7.58 mm) > 云南松林(4.47 mm) > 桉树林(3.90 mm)。

土壤的饱和导水率试验值实际上是土壤的稳定入渗率,但因为其接近土壤的饱和导水率,通常就被用来代表土壤的饱和导水率(表2)。不同植被类型土壤的饱和导水率也有差异,处于较高演替阶段的次生常绿阔叶林饱和导水率最高为0.64 mm/min,桉树林饱和导水率最低为0.14 mm/min。

2.3 土壤性质

土壤物理性质的变化直接影响水分在土壤中传输,而土地利用(植被类型)是造成土壤物理性质空间异质性的原因之一。表3为各植被类型在不同的土壤深度层的物理性质。从表中可以看出荒坡灌丛及云南松林土壤总孔隙度和毛管孔隙度表层(10

表 2 5 种植被类型土壤入渗模型
Table 2 Infiltration model at the five vegetations

植被类型	土层深度 /cm	下渗方程	相关系数	初渗率 /(mm/min)	饱和导水率 /(mm/min)	达稳渗时间 /min	初渗时含水量 /%	前 10 min 累计 入渗量/mm
荒坡灌草丛	20	$f = 2.16e^{-t/4.96} + 0.52$	0.97	1.79	0.52	14	12.61	7.58
云南松林	20	$f = 1.09e^{-t/13.02} + 0.23$	0.96	1.27	0.2	58	17.24	4.47
针阔混交林	20	$f = 1.21e^{-t/21.25} + 0.52$	0.98	1.38	0.52	30	33.29	11.30
常绿阔叶林	20	$f = 1.21e^{-t/30.62} + 0.64$	0.98	1.33	0.64	30	30.78	7.91
桉树林	20	$f = 1.97e^{-t/95.63} + 0.14$	0.96	1.04	0.14	48	27.34	3.90

cm) 要高于其他层 ,而非毛管孔隙度则表现为随土壤深度而增加的趋势。常绿阔叶林及针阔混交林最高总孔隙度则是在 20 cm 土壤层;常绿阔叶林中毛管孔隙度在 10 cm 土壤层最低 ,而针阔混交林毛管孔隙度在表层土壤中(30 ~ 50 cm) 最低。桉树林总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度都是在土壤 20 cm 层中最高。各植被类型下土壤容重都表现为随土壤深度的增加而增大 ,表层土壤容重最低。在表层土壤中桉树林及云南松林土壤容重要高于其他植被类型 ,荒坡灌草丛土壤容重在该层最低 ,这是由于荒坡灌草丛以低矮灌木为主 ,草本层覆盖度较高使土壤表层容重低于其他植被类型 ,而桉树林及云南松林有单一优势物种构成的林型其林下灌木及草本覆盖率低是表层的土壤容重最高。在 20 cm 层土壤容重大小顺序为桉树林 > 云南松林 > 针阔混交林 > 荒坡灌草丛 > 常绿阔叶林;而在 30 ~ 50 cm 层土壤容重则是云南松最高 ,荒坡灌草丛最低。

2. 4 土壤入渗性能与土壤性质相关分析

本研究选取了影响土壤入渗速率的容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、有机质含量等因子 ,对其与土壤饱和导水率(稳渗速率) 的关系进行相关分析(表 4) 。可以看出土壤饱和导水率与土壤容重呈极显著负相关 ,与土壤总孔隙度及有机质含量呈现显著的正相关。土壤容重是土体密实程度和总孔隙度大小的总和反映 ,容重越大 ,土体越密实 ,孔隙度越小 ,渗水越慢 ,其相应土壤稳渗率就越低。土壤孔隙的大小、分布以及连通状况与土壤渗水能力关系密切 ,孔隙越多 ,土壤的渗透率越大。土壤有机质能增加土壤团聚体的形成 ,团聚体的大小和数量随有机质含量的提高而增加 ,同时孔隙稳定性也随着有机质含量的提高而增大 ,所以本研究结果中土壤总孔隙度与有机质含量呈显著正相关和土壤稳渗率与有机质含量呈现显著正相关也都证明了这一点。另外 ,土壤容重与总孔隙度呈现显著负相关。

表 3 5 种植被类型土壤性质
Table 3 Soil properties at the five vegetations

植被类型	土层深度 /cm	土壤容重/(g/cm ³)	总孔隙度 /%	非毛管孔隙度 /%	毛管孔隙度 /%	有机质含量 /%
荒草坡	10	1.22 ± 0.10	45.9 ± 4.4	9.4 ± 1.2	36.6 ± 2.6	1.57 ± 0.13
	20	1.2 ± 0.11	38.1 ± 3.1	12.0 ± 1.3	26.1 ± 2.1	0.03 ± 0.01
	30 ~ 50	1.3 ± 0.04	42.3 ± 3.8	12.7 ± 0.9	29.6 ± 1.6	0.03 ± 0.01
云南松	10	1.29 ± 0.14	44.5 ± 4.0	7.9 ± 0.8	36.6 ± 2.1	0.41 ± 0.05
	20	1.32 ± 0.19	38.5 ± 2.5	8.0 ± 0.9	30.5 ± 2.3	0.03 ± 0.01
	30 ~ 50	1.65 ± 0.07	39.8 ± 2.6	9.8 ± 1.1	30.1 ± 1.5	0.03 ± 0.01
针阔混交林	10	1.24 ± 0.13	41.6 ± 3.9	13.1 ± 1.2	28.6 ± 2.4	1.62 ± 0.13
	20	1.28 ± 0.15	48.0 ± 3.8	14.5 ± 2.0	33.5 ± 1.2	0.03 ± 0.01
	30 ~ 50	1.51 ± 0.03	44.1 ± 2.6	15.4 ± 1.0	28.7 ± 2.8	0.04 ± 0.03
次生常绿阔叶林	10	1.26 ± 0.16	41.1 ± 3.0	13.1 ± 0.7	28.0 ± 3.0	1.46 ± 0.14
	20	1.18 ± 0.13	49.5 ± 3.2	9.3 ± 1.6	40.2 ± 2.3	0.04 ± 0.01
	30 ~ 50	1.49 ± 0.05	40.2 ± 2.7	10.1 ± 1.7	30.1 ± 1.5	0.03 ± 0.01
桉树林	10	1.31 ± 0.07	31.6 ± 1.5	4.3 ± 0.5	27.3 ± 1.8	1.12 ± 0.22
	20	1.37 ± 0.07	42.6 ± 2.3	12.4 ± 1.6	30.2 ± 2.1	0.04 ± 0.01
	30 ~ 50	1.41 ± 0.05	36.93 ± 2.1	7.4 ± 0.7	29.5 ± 2.4	0.03 ± 0.00

表 4 土壤饱和导水率与影响因子的相关分析

Table 4 Spearman correlations between soils saturated infiltration and soil property

	饱和导水率	土壤容重	总孔隙度	非毛管孔隙度	毛管空隙度	土壤初始含水量	有机质含量
饱和导水率	1	-0.975 **	0.975 **	0.718	0.564	0.308	0.921 *
土壤容重		1	-0.9 *	-0.6	-0.7	-0.1	-0.821
总孔隙度			1	0.8	0.4	0.5	0.975 *
非毛管孔隙度				1	-0.1	0.7	0.718
毛管空隙度					1	-0.4	0.359
土壤初始含水量						1	0.564
有机质含量							1

3 讨论

土壤水分入渗过程是流域水分循环的一个重要环节,不但决定着降雨进入土壤的速率和数量,而且还最终决定植被类型的产流量的大小。许多学者在一定假设的基础上,从理论上得到了不同条件下的土壤水分运动方程,如 Green - Ampt 方程、Philip 入渗方程、Kostiakov 经验公式、Horton 入渗公式。在本研究中,滇中各植被类型下的土壤入渗过程的模拟适合用 Horton 入渗模型,其相关系数都高于 0.9;次生常绿阔叶林稳渗率、达到稳渗率历时及入渗量都为最高,桉树林及云南松林最低。各植被类型的土壤入参与土壤状况相关,在本研究中土壤的入渗率与土壤容重、孔隙度及有机质含量显著相关。有机质含量多的林型,土壤团粒结构多其稳定性好^[22],团粒和团粒之间的非毛管空隙多,是水分入渗的通道。在团粒内部有大量的毛管孔隙,可以保存大量的水分。再者,在入渗的过程中,由于孔隙稳定性随着有机质含量的提高而增大^[23],入渗水流的实际过水面积也增大,因而在入渗过程中通过的水量也增大。在土壤原始含水率基本相近的情况下,有机质含量多的土壤基质吸力大,土壤土水势梯度大,在入渗的过程中渗吸的水量就多。李雪转和樊贵盛^[24]研究也表明,随有机质含量的增加土壤的入渗能力增大。因此,在其他条件相同的条件下,有机质含量高的土壤入渗能力大。在滇中地区多物种组成的林型其水稳性团粒高于单一物种所组成的林型。次生常绿阔叶林土壤空隙度、有机质含量都高于其他植被类型,土壤容重低于桉树林及云南松林,造成在次生常绿阔叶林下有较高土壤入渗率及水分储存能力,这是因为次生常绿阔叶林及针阔混交林其群落结构完善,对土壤物理性质的改善都优于其他植被

类型。土壤孔隙按当量直径的大小可分为毛管孔隙与非毛管孔隙,土壤水分贮存可分为吸持贮存和滞留贮存两种形式^[25-26]。森林植被的土壤改良作用主要体现在提高非毛管孔隙度和非毛管持水率以及滞留贮存水量等方面,即森林植被可以有效地提高土壤的滞留贮水能力,从而发挥较大的保持水土和涵养水源作用。所以在本研究中有有机质含量高的次生常绿阔叶林下土壤的水力传导度大,相应的土壤入渗能力大。

土壤容重反映了土壤坚实度和孔隙度的大小,对土壤的通透性、渗透性、持水能力以及土壤的抗侵蚀能力都有非常大的影响。许多学者研究发现土壤容重与土壤入渗速率呈负相关关系,即土壤容重越大、入渗能力越弱,土壤容重越小,土壤入渗速率越大,产流历时越晚^[27-30]。在其他影响入渗的因素一定时,土壤饱和导水率和累积入渗量与容重呈明显负相关关系^[31-34]。在本研究中,土壤的入渗能力也与土壤容重呈现负相关关系,这与以上研究结论相一致。森林植被之所以增加入渗能力,主要是因为森林植被能减小土壤容重、增大土壤孔隙度和贮水量。土壤入渗能力与土壤孔隙度密切相关,特别是其与土壤的非毛管孔隙度呈现线性关系^[34]。程根伟等^[34]研究发现土壤入渗能力是孔隙度有极显著的相关性。在本研究中从桉树林、荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林、次生常绿阔叶林演替阶段的发展,其对林下土壤的改善程度也随之增强,致使次生常绿阔叶林下具有土壤的入渗能力强并减小地表径流量。

4 结论

滇中高原桉树林、荒坡灌草丛、云南松林、针阔混交林、次生常绿阔叶林物种植物群落结构逐步完善,土壤结构也成渐进及跳跃性发展,其主要表现在

土壤容重下降,总孔隙度及有机质含量递增。土壤因素的改变主要体现在饱和导水率随植物群落演替阶段的升高而逐渐增大,大小顺序也相应的表现为次生常绿落叶林>针阔混交林和荒坡灌草丛>云南松林>桉树林,其值分别为0.64、0.52、0.52、0.2、0.14 mm/min;到达稳渗率的历时也是云南松林和桉树林高于其他植被类型。通过土壤物理性质与土壤饱和导水率相关分析表明也证明了在植被恢复过程中土壤结构的改善与土壤入渗的相关性。

参考文献(References)

- [1] Lü Gang, Wu Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics [J]. Chinese Agriculture Science Bulletin, 2008, 24(7): 497-499 [吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 农业工程科学, 2008, 24(7): 497-499]
- [2] Wang Wei, Zhang Hongjiang, Du Shicai, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of typical plantations in Simian Mountain of Chongqing Municipality [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3): 113-117 [王伟, 张洪江, 杜士才, 等. 重庆市四面山人工林土壤持水与入渗特性[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 113-117]
- [3] Hu Xiujuan, Cheng Jimin, Wan Huie. Community characteristics and litter hydrological effects of *Quercus Liaotungensis*, *Pinus Tabulaeformis* and *Pinus Tabulaeformis* f. *Shekannensis* Forests in Ziwlun Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 46-50 [胡秀娟, 程积民, 万惠娥. 子午岭林区辽东栎、油松、柴松群落特征及其枯枝落叶层水文效应研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 46-50]
- [4] Yu Xinxiao, Zhao Yutao, Zhang Zhiqiang, et al. Characteristics of soil water infiltration in sub-alpine Dark Coniferous Ecosystem of upper reaches of Yangtze River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 14(1): 15-19 [余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, 14(1): 15-19]
- [5] Jimenez C C, Tejedor M, Morillas G, et al. Infiltration rate in andisols: effect of changes in vegetation cover (Tenerife Spain) [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 61(3): 153-158
- [6] Zeng Lixiong, Xiao Wenfa, Huang Zhilin, et al. Soil infiltration capacity of conversion of cropland to forest in Lanlingxi small watershed in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 199-202 [曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 等. 兰陵溪小流域主要退耕还林植被土壤渗透特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 199-202]
- [7] Shi Zhongjie, Wang Yanhui, Yu Pengtao, et al. Study on different forestry vegetation's eco-hydrological function in Liupan Mountain of Ningxia China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 134-138 [时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 134-138]
- [8] Wang Mengjun, Zhang Guangcan, Liu Xia, et al. Characteristics of soil water infiltration and water-holding under different forest community in Yimeng Mountainous forest area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6): 26-31 [王梦军, 张光灿, 刘霞, 等. 沂蒙山林区不同森林群落土壤水分贮存与入渗特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 26-31]
- [9] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1940, 5: 399-417
- [10] Philip J R. Theory of infiltration [J]. Advance in Hydro Science, 1969, 5: 216-296
- [11] Hillel D. Soil and water-physical principles and processes [M]. New York: Academic Press, 1971.
- [12] Zhu Xianmo, Tian Jiying. The study on strengthening anti-scourability and penetrability of soil in Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(3): 1-9 [朱显谟, 田积莹. 强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 1-9]
- [13] Liu Xianzhao, Kang Shaozhong. Study on soil infiltration distribution of small watershed in gullide region of Loess Plateau [J]. Journal of Jilin Forestry University, 1997, 13(4): 203-208 [刘贤赵, 康绍忠. 黄土高原沟壑区小流域土壤入渗分布规律的研究[J]. 吉林林学院学报, 1997, 13(4): 203-208]
- [14] Wang Zhenhong, Duan Changqun, Qi Lianchun, et al. A preliminary investigation of ecological issues arising in the man-made forest of Eucalyptus in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(6): 64-68 [王震洪, 段昌群, 起联春, 等. 我国桉树林发展中的生态问题探讨[J]. 生态学杂志, 1998, 17(6): 64-68]
- [15] Wang Zhenhong, Duan Changqun, Wen Chuanhao, et al. Soil erosion and soil improvement of three artificial forest communities in middle Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001b, 21(2): 23-27 [王震洪, 段昌群, 文传浩, 等. 滇中三种人工林群落控制土壤侵蚀和改良土壤效应[J]. 水土保持通报, 2001b, 21(2): 23-27]
- [16] Wang Zhenhong, Duan Changqun, Yang Jiansong. Plant biodiversity and community structure of semi-humid evergreen broadleaved forests at different secondary succession Stages [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(9): 1583-1587 [王震洪, 段昌群, 杨建松. 半湿润常绿阔叶林次生演替阶段植物多样性和群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1583-1587]
- [17] Wang Zhenhong, Duan Changqun. Ecological restoration effects of typical manmade ecosystems and relationships between restoration variables in middle Yunnan area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1439-1445 [王震洪, 段昌群. 滇中几种人工林生态系统恢复效应研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1439-1445]
- [18] Wang Zhenhong, Zhang Ling, Duan Changqu, et al. Relationship between manmade forest community structure and soil erosion in Muding County of Yunnan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2001a, 6(2): 74-79 [王震洪, 张玲, 段昌群, 等. 滇中三种典型人工林群落结构与土壤侵蚀关系研究[J]. 水土保持研究, 2001a, 6(2): 74-79]
- [19] Tang C Q, Hou X L, Gao K, et al. Man-made versus natural forests in mid-Yunnan, southwestern China: plant diversity, water and soil conservation [J]. Mountain Research and Development, 2007, 27(3): 242-249
- [20] Hou Xiuli, Duan Changqun, Tang Cindy Q, et al. Nutrient relocation, hydrological functions, and soil chemistry in plantations as compared to natural forests in Central Yunnan, China [J]. Ecological Research, 2010, 25: 139-148
- [21] Zhang Aiguo, Zhang Pingcang. Study on factors of regional soil and

- water conservation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1-7 [张爱国, 张平仓. 区域水土流失土壤因子研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-7]
- [22] Huang Changyong. Soil science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 82-83, 101-111 [黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 82-83, 101-111]
- [23] Ai Haijian. Analysis of affecting factors of soil water-retention and porosity [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(3): 75-77 [艾海舰. 土壤持水性及孔性的影响因素浅析 [J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3): 75-77]
- [24] Li Xuezhuang, Fan Guisheng. Influence of organic matter content on infiltration capacity of field soils [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(1): 59-62 [李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力影响的试验研究 [J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(1): 59-62]
- [25] Wang Zhiguo, Zhang Yunlong, Liu Xushi, et al. Forestry ecological engineering [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999: 63-65 [王治国, 张云龙, 刘徐师, 等. 林业生态工程学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 63-65]
- [26] Yu Zhimin, Yu Xinxiao. Ecological benefit of forest for water conservation [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999: 45-55 [于志民, 余新晓. 水源涵养林效益研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 45-55]
- [27] Wu Faqi, Zhao Xining, She Diao. Analysis on affecting factors of soil infiltration in slope farmland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(1): 16-18 [吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析 [J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16-18]
- [28] Yang Yansheng, Shi Deming, Yao Zongyu. Study on soil infiltration in Xingguo County, Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1982, 6: 33-38 [杨艳生, 史德明, 姚宗虞. 江西兴国县土壤渗透性的研究 [J]. 水土保持通报, 1982, 6: 33-38]
- [29] Jiang Dingsheng, Huang Guojun. Study on the rate of soil infiltration in region of Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(4): 299-305 [蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究 [J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299-305]
- [30] Wang Guoliang, Liu Guobin, Zhou Shenglu. The effect of vegetation restoration on soil stable infiltration rates in small watershed of Loess Gully Region [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 529-535 [王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 529-535]
- [31] Fei Liangjun, Tan Qilin, Wang Wenyan, et al. Infiltration character and influential factor of point source under adequate water supply [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 5(2): 70-74 [费良军, 谭奇林, 王文焰, 等. 充分供水条件下点源入渗特性及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 1999, 5(2): 70-74]
- [32] Deng Jiancai, Chen Xiaomin, Zhang Jiabao, et al. Saturated hydraulic conductivities of three soils in Huang-Huai-Hai Plain [J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(3): 1-3 [邓建才, 陈效民, 张佳宝, 等. 黄淮海平原主要土壤水力参数的研究 [J]. 灌溉排水, 2002, 21(3): 1-3]
- [33] Zhang Zhenhua, Xie Hengxing, Liu Jilong, et al. Quantitative analysis of influence of air resistance and soil bulk density on one-dimensional vertical infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 36-39 [张振华, 谢恒星, 刘继龙, 等. 气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 36-39]
- [34] Cheng Genwei, Yu Xinxiao, Zhao Yutao, et al. The hydrological cycle and its mathematical models of forest ecosystem in mountains [M]. Beijing: Science Press, 2004. [程根伟, 余新晓, 赵玉涛, 等. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.]

Soil Infiltration and Correlative Analysis with Some Factors in the Different Restoration Method in Central Yunnan

HOU Xiuli^{1,2}, FU Denggao², YAN Kai², LI Bo², DUAN Changqun²

(1. Department of Life Sciences and Biotechnology, Kunming University, Kunming 650214, China;

2. Institute of Environmental Sciences and Ecological Restoration, School of Life Sciences of Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In this study, soil infiltration was investigated in five types of vegetations, including shrubland, Pinus forest, semi-natural forest, natural secondary forest and Eucalyptus plantation in Yunnan province. The results showed that the saturated infiltration ratio was 0.64, 0.52, 0.52, 0.20, 0.14 mm/min respectively under natural secondary forest, semi-natural forest, shrubland, Pinus forest, and Eucalyptus forest; Pinus and Eucalyptus forests took longer time to the saturated infiltration state than the other vegetation. The Horton infiltration model can simulate soil infiltration process in central Yunnan. In the process of restoration process, the vegetation in higher succession stage showed the lower soil bulk density, higher porosity and organic matter content in soil; water infiltration in soil was negatively correlated with soil bulk density and positively correlated with soil organic matter and porosity, which lead to higher infiltration in soil with the increasing of succession stage. In central Yunnan, the more complexity of community structure was restored to improve of soil structure and change soil infiltration.

Key words: soil infiltration; soil property; Horton infiltration model; community structure