

渝北水源区水源涵养林构建模式 对土壤渗透性的影响

赵洋毅¹, 王玉杰^{1,*}, 王云琦¹, 赵占军¹, 吴云², 陈林²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 重庆缙云山国家级自然保护区管理局, 重庆 400700)

摘要: 土壤渗透性是评价土壤水源涵养作用重要指标之一, 其受制于许多外在和内在因素的影响, 与植被类型、土壤结构、土壤种类和降雨强度等关系密切。为探讨不同构建模式水源涵养林对土壤渗透性能的影响, 以裸地为对照, 以土壤初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量表征土壤渗透性, 对重庆北部水源区 8 种不同构建模式的水源涵养林地的土壤渗透性及其与理化性质的关系进行研究。结果表明: 不同模式水源林地和同一模式林地不同层次土壤渗透性能存在较大差异, 各林地土壤渗透性随土壤深度的增加而降低, 母质层土壤渗透性受林分类型和林分结构等外界条件的干扰较小, 差异不显著; 8 种林地土壤渗透性均好于裸地, 各林地土壤渗透性能大小依次为: 广东山胡椒 × 杉木混交林 > 马尾松 × 柳杉混交林(火烧迹地) > 四川大头茶 × 四川山矾混交林 > 毛竹 × 四川山矾 × 马尾松混交林 > 马尾松 × 广东山胡椒混交林 > 马尾松 × 四川大头茶混交林 > 广东山胡椒 × 四川杨桐混交林 > 毛竹纯林 > 裸地, 根据土壤渗透能力可将 8 种模式林分类型分为 4 类: 第 1 类, 广东山胡椒 × 杉木混交林和马尾松 × 柳杉混交林, 土壤渗透性最好; 第 2 类, 四川大头茶 × 四川山矾混交林, 土壤渗透能力较好; 第 3 类, 毛竹 × 四川山矾 × 马尾松混交林、马尾松 × 广东山胡椒混交林、广东山胡椒 × 四川杨桐混交林、马尾松 × 四川大头茶混交林, 土壤渗透性好; 第 4 类, 毛竹林和裸露地, 土壤渗透性最差。以广东山胡椒和杉木混交的林分模式的土壤渗透性最好, 毛竹纯林地最差, 毛竹纯林对提高土壤渗透性作用较差, 营林时适当增加毛竹林中其他树种的混交比例可增强林地土壤渗透性能。通用经验方程对各林分土壤入渗过程的拟合效果最好, 比较适用于描述本研究区域水源涵养林地土壤入渗特征的模型, Kostikov 方程拟合效果次之, Horton 方程最差; 结合相关分析, 筛选出 9 个极显著或显著影响土壤渗透性能的土壤理化性质因子, 通过主成分分析法, 得到土壤渗透性能综合参数 α 及与其极显著相关因子的综合参数 β , 并构建土壤渗透性各指标及其综合参数 α 与 β 的线性回归模型, 为重庆北部的水源涵养林建设和防治水土流失提供理论依据。

关键词: 重庆北部; 水源涵养林; 土壤渗透性; 土壤理化性质

Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in northern Chongqing City

ZHAO Yangyi¹, WANG Yujie^{1,*}, WANG Yunqi, ZHAO Zhanjun¹, WU Yun², CHEN Lin²

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry Education, Beijing 100083, China

2 Chongqing Jinyunshan National Nature Protection Region Management Bureau, Chongqing 400700, China

Abstract: Soil infiltration rate is an important index in evaluating functions of soil and water conservation, which depends on many internal and external factors, and is closely correlated with forest types, soil structure, soil types, and intensity of rainfall and so on. It is also the a key factor in modeling soil water movement and erosion process where, The goal of this study was to determine the effects of reforestation methods that employ different water conservation forests on soil infiltration capability in northern water source area of Chongqing City. We used bare land as a control. We measured soil initial

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A1802); 国家自然科学基金项目(30671661); 国家林业局“948”项目(2007-4-14)

收稿日期: 2009-09-05; **修订日期:** 2010-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn

infiltration, stable infiltration, average infiltration and accumulative water quantity as soil infiltration capability, and determined the relationship between soil infiltration capability and soil physical and chemical properties under eight models of water conservation forest practices. The results showed that the soil infiltration capability values were significantly different in different forest models and different soil layers in the same forest. The soil infiltration capability declined with the increase of soil depth. Vegetation covers had no effect on the haplite soil layers. We found that the infiltration capability of all forest plots was higher than that of bare land. The order of soil infiltration capability from high to low was: *Lindera kwangtungensis* *Cunninghamia lanceolata* forest > *Pinus massoniana* *Cryptomeria fortunei* *Hooibrenk* forest > *Gordonia acuminata* *Symplocos setchuanensis* forest > *Phyllostachys pubescens* *Symplocos setchuanensis* *Pinus massoniana* forest > *Pinus massoniana* *Lindera kwangtungensis* forest > *Pinus massoniana* *Gordonia acuminata* forest > *Lindera kwangtungensis* *Adinandra bockiana* forest > *Phyllostachys pubescens* forest > bare land, and the test eight models of water conservation forest could be classified into four groups, based on soil infiltration capability. The first group, *L. kwangtungensis* *C. lanceolata* forest and *P. massoniana* *C. f. Hooibrenk* forest, had the strongest soil infiltration capability, and the second group with a stronger soil infiltration capability was *G. acuminata* *S. setchuanensis* forest. *P. pubescens* *S. setchuanensis* *P. massoniana* forest, *P. massoniana* *L. kwangtungensis* forest, *L. kwangtungensis* *A. bockiana* forest and *P. massoniana* *G. acuminata* forest were classified into the third group with a relatively strong soil infiltration capability, while *P. pubescens* forest and bare land belonged to the fourth group. In the eight reforestation models, *L. kwangtungensis* *C. lanceolata* forest, was best in improving soil infiltration capability. The role of *P. pubescens* forest, however, was the least. Because bamboo pure forest cover was largest in the study region, and the bamboo forests played a poor role in improving soil structure and infiltration capability, bamboo forests should be managed by increasing the proportion of other species of mixed forest soil to enhance soil infiltration capability. A common empirical infiltration model could give the best performance on the infiltrating processes in the eight forest models, followed by the Kostiakov and the Horton model. Correlation analysis showed that soil infiltration capability was greatly affected by soil physical and chemical properties. Based on the correlation analyses, nine factors, which have extremely significant or significant effect on soil infiltration capability, were selected. The comprehensive parameters of soil infiltration (α) and soil physical and chemical properties (β) were obtained by the Principal Component Analysis, and the linear regression models of five indices of soil infiltration capability and the comprehensive parameters (α and β) was built. These research results may be useful for local reforestation campaigns in term of tree species and forest community selections.

Key Words: Northern Chongqing; water conservation forest; soil infiltration capability; soil physical and chemical properties

土壤水分入渗过程和渗透能力决定了降雨进程的水分再分配,从而影响坡地地表径流和流域产流及土壤水分状况,土壤渗透性能是评价土壤水分调节能力和林分涵养水源的重要指标之一,同时也是影响土壤侵蚀的重要因素之一,是研究土壤水文效应的重要指标^[1-3]。已有结果表明^[4-5],土壤渗透性能越好,地表径流就越小,地表流失量也会相应地减少,对土壤水土保持影响极大。因此,研究森林土壤的渗透性规律对探讨产流机制和森林调洪作用具有重要意义。目前,国内外许多学者对土壤水分入渗性能进行了大量研究^[1,4-7],并建立了 Green-Ampt, Phillip, Horton 等著名模型及经验公式,对土壤入渗过程进行定量描述和模拟^[8-9]。土壤渗透性能与理化性质的关系研究大多集中在物理性质对土壤渗透性能的影响方面^[6,10],而对土壤化学性质对入渗性能的研究多集中在土壤有机质含量或是土壤肥力综合影响方面^[7,11],土壤养分具体指标对土壤渗透性能的影响研究则较少。

由于不同森林类型其树种生物学特性与林分结构的不同,其林分的功能也存在一定的差异^[12],水源涵养林是区域经济发展的屏障,在保护水源、调控径流量方面具有重要功能。因此,优化配置水源涵养林体系可以

有效地提高植被的水源涵养功能,充分利用乡土树种合理配置水源林,探究高效合理的水源涵养林模式是建成持续、稳定水源补给区的重要因素。本文以重庆北部缙云山国家级自然保护区为研究基地,以提高水源涵养林对重庆市水源区的水源涵养效益、防治土壤侵蚀和改善水源质量为目的,通过对 8 种不同构建模式水源涵养林的土壤渗透性能及理化性质对其的影响进行研究,其中,土壤化学性质对渗透性能的影响采用多个指标综合分析,构建土壤渗透性与理化性质的线性回归模型,以便从造林营林角度,最大程度的发挥森林的功能,为该区水源涵养林建设和防治水土流失提供一定的理论依据。

1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区境内嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区(106°22'E, 29°49'N),海拔 350—951.5m,具有亚热带季风湿润性气候特征,年平均气温 13.6℃,年均降水量 1611.8mm,年平均蒸发量 777.1mm 年均日照 1293.9h。土壤以酸性黄壤土为主,为典型的中亚热带常绿阔叶林带。

试验示范区实验研究林总面积约为 33.5hm²,主要采用的树种有四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、四川山矾(*Symplocos setchuanensis*)、四川杨桐(*Adinandra bockiana*)、广东山胡椒(*Lindera kwangtungensis*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、细齿叶柃(*Euryanitida Korthals*)、白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)等。

2 研究方法

2.1 标准地的选设与调查

在试验示范区内选取 8 块不同构建模式的水源涵养林地,各样地的造林时间是在 1996 年春季,采用株间混交方式,株行距为 2m×2m。8 块林地在文中依次用 1,2,3,4,5,6,7 和 8 作为代码表示,以裸地 9 作为对照地。2008 年 8 月,分别在各样地选定具有代表性的标准样方(20m×20m),其中马尾松火烧迹地内标准样方为 10m×40m,建立固定标准地。样方内测定树木密度、平均高度、平均胸径等林分特征,各样地基本概况见表 1。

2.2 土壤采样与测定

供试土壤为酸性黄壤土。分别在各样方内的典型地段挖掘土壤剖面,记录土壤层次及土层厚度,按由下向上顺序逐层分 4 个层次采集土样,分装后将土样带回实验室风干、研磨过筛,进行分析。土壤容重,毛管孔隙度与非毛管孔隙度等物理性质采用环刀法;土壤含水量采用烘干法^[13-14]。土壤 pH 值用 pH 计测定;有机质采用重铬酸钾-外加热法;土壤全氮采用半微量凯氏法;全磷采用碱熔-钼锑抗比色法;全钾采用碱融-火焰光度计法;速效氮采用碱解扩散法;有效磷采用 NH₄F-HCl 浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用 CH₃COONH₄浸提-火焰光度法^[13]。

土壤渗透性测定采用环刀法^[14]。各指标计算的方法为:初渗率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间,本研究取最初入渗时间为 2min;平均渗透速率=达稳渗时的渗透总量/达稳渗时的时间;稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率;因所有土样渗透速率在 90min 前已达稳定,为了便于比较,渗透总量统一取前 120min 内的渗透量。

试验数据利用 EXCEL2007 和 SPSS16.0 软件进行分析和处理。

3 结果与分析

3.1 不同模式水源涵养林地土壤渗透性能

水分入渗过程是一个复杂的水文过程,在林地中由于受林分类型、林分结构、林地枯落物储量和根系分布等的影响,土壤渗透性存在很大差别^[15-17]。在研究土壤渗透性时,常采用的 4 个指标是最初入渗率、稳渗率、平均渗透速率和渗透总量^[6-7]。从图 1 可以看出,各林分 A、AB、B 层土壤的初渗率、稳渗率、平均渗透率和 120 min 渗透总量存在较大差异,其大小均表现为随土壤深度的增加而降低,表明各林分土壤渗透性能随土壤深度的增加而减弱,其原因应与森林对林地的改良作用随土壤深度的增加而减弱密切相关。8 种模式林地的 C 层土壤的初渗率($F=2.17, F_{0.05}=2.65$)、稳渗率($F=2.44, F_{0.05}=2.65$)、平均渗透率($F=2.03, F_{0.05}=$

2. 65) 和 120 min 渗透总量 ($F=2.48, F_{0.05}=2.65$) 经方差分析得出差异均不显著, 由于此层土壤为母质层, 受林分类型和林分结构等外界条件的干扰较小, 因此土壤渗透性差异不大。

表 1 不同模式水源涵养林地的树种组成及样地基本概况
Table 1 Tree species composition of water conservation forest and characteristics of plot

样地 Plot (树种组合模式 Models of mixed forests)	其他伴生树种 Other associated forests	平均胸径 Average DBH /cm	平均树高 Average height /m	郁闭度 Coverage	林分密度 Stand density/ (棵·hm ⁻²)	海拔 Altitude /m	坡度 Slope degree /(°)	坡向 Slope aspect	土壤深度 Soil depth /cm
1 四川大头茶 × 四川 山矾	细齿叶柃 <i>E. Korthals</i> , 白毛新木姜子 <i>N. aurata</i>	10.22	12.74	0.7	2200	825	22	NW	98
2 毛竹 × 四川山矾 × 马尾松	细齿叶柃 <i>E. Korthals</i> , 杉木 <i>C. lanceolata</i>	10.78	10.55	0.8	2900	810	17	N	131
3 马尾松 × 广东山 胡椒	四川山矾 <i>S. setchuanensis</i> , 四川杨桐 <i>A. bockiana</i>	14.59	12.35	0.7	1400	790	20	NW	123
4 毛竹	无	10.95	14.91	0.6	4600	800	13	NW	113
5 广东山胡椒 × 杉木	四川山矾 <i>S. setchuanensis</i>	10.88	8.95	0.8	2300	810	10	NW	75
6 马尾松 × 柳杉	柳杉 <i>C. fortunei</i> Hooibrenk	8.52	5.99	0.4	1100	770	20	N	124
7 广东山胡椒 × 四川 杨桐	四川山矾 <i>S. setchuanensis</i> , 白毛新木姜子 <i>N. aurata</i>	12.93	8.98	0.9	3100	850	15	N	92
8 马尾松 × 四川大 头茶	杉木 <i>C. lanceolata</i> , 四川山矾 <i>S. setchuanensis</i>	8.2	7.3	0.8	1510	760	21	NW	86
9 裸地 (CK)						860	15	N	85

1: *Gordonia acuminata* × *Symplocos setchuanensis*; 2: *Phyllostachys pubescens* × *Symplocos setchuanensis* *Pinus massoniana*; 3: *Pinus massoniana* *Lindera kwangtungensis*; 4: *Phyllostachys pubescens*; 5: *Lindera kwangtungensis* *Cunninghamia lanceolata*; 6: *Pinus massoniana* *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk; 7: *Lindera kwangtungensis* *Adinandra bockiana*; 8: *Pinus massoniana* *Gordonia acuminata*; 9: Bare land

为综合分析比较不同模式林地不同层次的土壤渗透性差异, 以最初渗透速率 (X_1)、稳渗率 (X_2)、平均渗透率 (X_3) 和前 120min 总渗透量 (X_4) 为评定指标进行主成分分析 (表 2)。结果表明, 前两个主成分的方差累积贡献率高达 98.74%, 几乎解释了整个总方差, 信息量损失很小。其中又以第 1 主成分提供的信息量最大, 方差贡献率达 93.4%。因子负荷量表明, 第 1 主成分上所有变量的正荷载相差不大, 但以前 120min 总渗透

表 2 土壤渗透性主成分分析
Table 2 Principal component analysis of soil infiltration

参数 Parameter	主成分 Component			
	P_1	P_2	P_3	P_4
X_1	0.9327	0.3526	0.0715	0.0238
X_2	0.9494	-0.2969	0.0975	0.0328
X_3	0.9859	-0.0231	-0.1629	0.0294
X_4	0.9963	-0.0243	0.0014	-0.0826
特征值 Eigen value	3.7359	0.2136	0.0412	0.0093
贡献率 Proportion	0.9340	0.0534	0.0103	0.0023
累积贡献率 Cumulative proportion	0.9340	0.9874	0.9977	1.0000

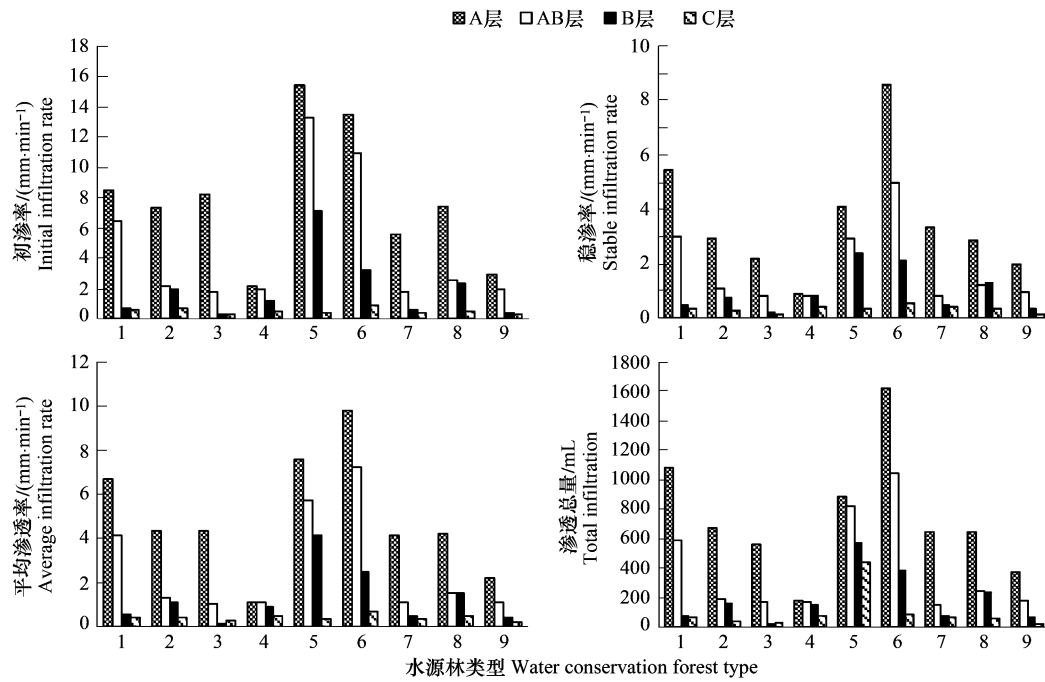


图1 不同模式水源涵养林地土壤渗透性

Fig. 1 Soil infiltration of different soil levels under different water conversation forest

量的最高(0.9963),可以解释为对渗透能力总的量度。其主成分方程为: $\alpha = 0.4826\alpha_1 + 0.4912\alpha_2 + 0.5101\alpha_3 + 0.5154\alpha_4$ (α_i 为各指标的标准化数据)。为了比较各林地土壤渗透性能,根据第1个主成分方程,计算不同模式水源林地不同层次土壤渗透性能得分,并进行排序。

从表3可看出,不同模式的水源涵养林地的土壤渗透性能均随土壤深度的增加而降低,虽不同土层土壤渗透性排序略有不同,但在A、AB、B层,8种林地中以5号样地即广东山胡椒×杉木混交林地土壤渗透性最好,以8号样地即毛竹纯林地最差,但均好于裸地。而由于C层为母质层,受植被的影响较小,前文也得出在该层各样地土壤渗透性差异不显著,因此与前三层规律存在差异。从综合平均得分来看,广东山胡椒×杉木混交林地土壤渗透性最佳,其次是马尾松×柳杉混交林地(火烧迹地),以毛竹纯林和裸地最差。其中以广东山胡椒×杉木混交林地土壤渗透性最好主要是由于根据调查结果和测定结果显示土壤疏松,土壤厚度最薄,植被根系分布特别发达,且该林地的土壤枯落物较多,土壤有机质含量丰富,土壤结构较好。马尾松×柳杉混交林地其次由于该样地是马尾松火烧迹地,土壤中含有林木燃烧残余灰,致使土壤有机质含量较高。而有机

表3 不同模式水源林地土壤渗透性评价

Table 3 The evaluation table of soil infiltration capabilities of different models forest

样地 Plots	A 层 A layer		AB 层 AB layer		B 层 B layer		C 层 C layer		平均得分 Average score	排序 Ordination
	得分 Score	排序 Ordination	得分 Score	排序 Ordination	得分 Score	排序 Ordination	得分 Score	排序 Ordination		
1	1.1392	4	0.3241	3	-0.4785	6	-0.6444	5	0.0851	3
2	1.2717	3	0.1322	5	-0.4278	5	-0.6700	6	0.0765	4
3	0.9709	6	-0.0472	6	-0.1534	3	-0.5924	4	0.0445	5
4	0.3968	8	-0.2424	8	-0.6291	8	-0.4964	2	-0.2428	8
5	1.3547	1	0.3241	1	0.0852	1	-0.5335	3	0.3076	1
6	1.3530	2	0.2654	2	-0.2136	4	-0.7629	9	0.1605	2
7	0.5450	7	0.2282	4	-0.4890	7	-0.3853	1	-0.0253	7
8	1.0935	5	-0.1352	7	-0.1500	2	-0.7021	8	0.0266	6
9	0.3152	9	-0.2929	9	-0.6657	9	-0.6999	7	-0.3358	9

质能够促进土壤中团粒结构的形成,增加土壤的疏松性、通气性和透水性,对改善土壤结构起着重要作用^[18],所以渗透性较好。毛竹林地的土壤渗透性较差主要是由于林地枯落物少,养分归还量少,土壤结构较差,故其土壤渗透性能差,针对重庆北部水源地区的毛竹纯林覆盖率较大的情况,营林时适当增加毛竹林中其他树种的混交比例可增强林地土壤渗透性能。而裸地由于没有植被覆盖,土壤紧实致密,土壤渗透性能最差。

以第 1 主成分的标准化主成分得分为 X 轴,以第 2 主成分的标准化得分为 Y 轴作散点图(图 2)。根据图 2 将各样地土壤渗透能力进行分类(表 4),结果与实测的渗透结果一致。其中,广东山胡椒×杉木混交林与马尾松×柳杉混交林(火烧迹地)划分第 1 类,土壤渗透性最好。四川大头茶×四川山矾混交林为第 2 类,渗透性好;毛竹×四川山矾×马尾松混交林、马尾松×广东山胡椒混交林、广东山胡椒×四川杨桐混交林、马尾松×四川大头茶混交林为第 3 类,土壤渗透性较好;而毛竹纯林和裸地为第 4 类,渗透性差。

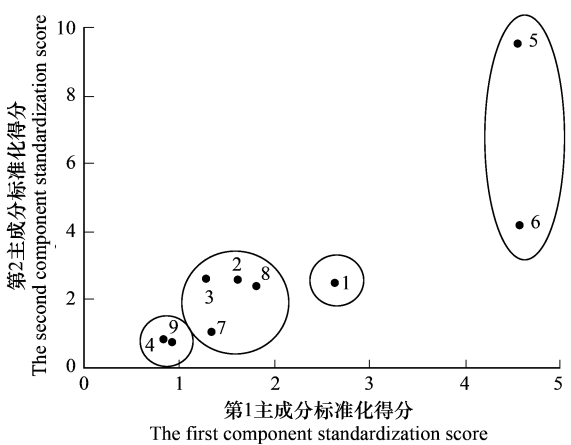


图 2 前两个主成分的散点聚类
Fig. 2 Scatter plots and cluster of the first two principal components

表 4 不同模式水源林地土壤渗透性能分类

Table 4 Classification of soil infiltration capabilities of different models forest

类别 Grade	水源林模式类型 Models of water conservation forest	渗透性能 Infiltration capacity
第 1 类 First	广东山胡椒×杉木混交林 <i>L. kwangtungensis</i> × <i>C. lanceolata</i> forest; 马尾松×柳杉林(火烧迹地) <i>P. massoniana</i> × <i>C. fortunei</i> Hooibrenk forest	最好 Best
第 2 类 Second	四川大头茶×四川山矾混交林 <i>Gordonia acuminata</i> × <i>Symplocos setchuanensis</i> forest	较好 Better
第 3 类 Third	毛竹×四川山矾×马尾松混交林 <i>P. pubescens</i> × <i>S. setchuanensis</i> × <i>P. massoniana</i> forest; 马尾松×广东山胡椒混交林 <i>P. massoniana</i> × <i>L. kwangtungensis</i> forest; 广东山胡椒×四川杨桐混交林 <i>L. kwangtungensis</i> × <i>A. bockiana</i> forest; 马尾松×四川大头茶混交林 <i>P. massoniana</i> × <i>G. acuminata</i> forest	好 Good
第 4 类 Fourth	毛竹纯林 <i>P. pubescens</i> forest; 裸地 bare land	差 Poor

3.2 不同模式水源林地土壤入渗过程拟合

有关土壤水分入渗的数学模型有许多,包括纯经验公式和半理论、半经验模型,如 Green-Ampt 公式、Philip 公式、Kostiakov 经验公式和 Horton 方程等^[8-9]。本文结合前人研究成果,选用 4 个概念较为明确、可靠又常用的土壤水分入渗模型对各林分不同层次土壤入渗过程进行模拟:

Kostiakov 公式
$$f(t) = at^{-b} \tag{1}$$

式中, $f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; a 、 b 为拟合参数。

Horton 公式
$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-\beta t} \tag{2}$$

式中, $f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; f_o 和 f_c 分别为初渗率和稳渗率; β 为经验参数。

Philip 公式
$$f(t) = 0.5St^{-1/2} + A \tag{3}$$

式中, S 为吸着率 ($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); A 为稳渗速率。

通用经验公式
$$f(t) = a + bt^{-k} \tag{4}$$

式中, $f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; a 、 b 为经验参数; k 为拟合参数。

结果(表 5)表明,各林分不同层次水分入渗 4 个回归模型均达显著相关,但模型的拟合优度存在差异。比较 4 种入渗模型的相关系数(R^2)可以看出,其中 Kostiakov 方程拟合优度为 0.548—0.983, Horton 方程拟合优度为 0.624—0.955,通用经验方程拟合优度为 0.641—0.993。在 45 个土壤水分入渗最优模型中,通用经

验方程 18 个,占总数的 40%, Kostiakov 方程 13 个, Philip 方程 9 个,而 Horton 方程只有 5 个,仅占总数的 11.1%,表明在这 4 种模拟土壤水分入渗过程的方程中,通用经验方程效果最佳, Horton 方程效果最差,通用经验方程是比较适用于描述本研究区域水源涵养林地土壤入渗特征的模型。

表 5 不同水源林地不同层次土壤入渗模型

Table 5 The soil infiltration models of different layers in different forests

样地 Plot	土壤层次 Soil layer	Kostiakov 方程 Kostiakov model	R^2	Horton 方程 Horton model	R^2	Philip 方程 Philip model	R^2	通用经验方程 Common experienced model	R^2
1	A	$y = 11.099t^{-0.155}$	0.873	$y = 5.452 + 3.049e^{-0.0339t}$	0.916	$y = 7.18t^{-1/2} + 4.997$	0.682	$y = 9.988 + 0.99t^{-0.154}$	0.907
	AB	$y = 0.787t^{-0.204}$	0.770	$y = 2.991 + 3.461e^{-0.069t}$	0.895	$y = 6.876t^{-1/2} + 2.218$	0.967	$y = 6.479 + 0.813t^{-0.207}$	0.945
	B	$y = 7.291t^{-0.207}$	0.974	$y = 0.313 + 0.341e^{-0.053t}$	0.929	$y = 0.726t^{-1/2} + 0.248$	0.815	$y = 0.702 + 0.087t^{-0.204}$	0.818
	C	$y = 0.798t^{-0.158}$	0.865	$y = 0.327 + 0.286e^{-0.018t}$	0.820	$y = 0.548t^{-1/2} + 0.348$	0.721	$y = 0.721 + 0.073t^{-0.158}$	0.904
2	A	$y = 12.311t^{-0.321}$	0.942	$y = 2.898 + 4.453e^{-0.0459t}$	0.920	$y = 10.338t^{-1/2} + 2.053$	0.833	$y = 8.928 + 1.344t^{-0.319}$	0.986
	AB	$y = 2.703t^{-0.291}$	0.932	$y = 1.058 + 1.068e^{-0.069t}$	0.853	$y = 2.225t^{-1/2} + 0.706$	0.879	$y = 2.132 + 0.275t^{-0.231}$	0.943
	B	$y = 2.547t^{-0.231}$	0.903	$y = 0.719 + 1.272e^{-0.036t}$	0.929	$y = 2.449t^{-1/2} + 0.514$	0.890	$y = 2.09 + 0.305t^{-0.291}$	0.965
	C	$y = 1.046t^{-0.428}$	0.934	$y = 0.232 + 0.481e^{-0.097t}$	0.868	$y = 1.002t^{-1/2} + 0.055$	0.956	$y = 0.675 + 0.118t^{-0.428}$	0.934
3	A	$y = 2.386t^{-0.233}$	0.548	$y = 2.179 + 6.039e^{-0.055t}$	0.955	$y = 14.166t^{-1/2} + 0.853$	0.883	$y = 10.062 + 1.787t^{-0.467}$	0.983
	AB	$y = 17.396t^{-0.467}$	0.962	$y = 0.819 + 0.911e^{-0.052t}$	0.663	$y = 1.78t^{-1/2} + 0.686$	0.876	$y = 1.841 + 0.224t^{-0.206}$	0.970
	B	$y = 0.208t^{-0.168}$	0.651	$y = 0.134 + 0.112e^{-0.047t}$	0.636	$y = 0.359t^{-1/2} + 0.11$	0.762	$y = 0.333 + 0.043t^{-0.217}$	0.749
	C	$y = 0.379t^{-0.217}$	0.671	$y = 0.099 + 0.203e^{-0.069t}$	0.624	$y = 0.209t^{-1/2} + 0.078$	0.619	$y = 0.2 + 0.023t^{-0.168}$	0.653
4	A	$y = 2.386t^{-0.233}$	0.976	$y = 0.858 + 1.292e^{-0.05t}$	0.888	$y = 2.388t^{-1/2} + 0.603$	0.979	$y = 2.071 + 0.279t^{-0.234}$	0.936
	AB	$y = 1.247t^{-0.104}$	0.959	$y = 0.835 + 1.074e^{-0.056t}$	0.810	$y = 1.767t^{-1/2} + 0.645$	0.970	$y = 1.682 + 0.194t^{-0.171}$	0.817
	B	$y = 1.777t^{-0.17}$	0.887	$y = 0.802 + 0.351e^{-0.061t}$	0.954	$y = 0.765t^{-1/2} + 0.713$	0.908	$y = 1.2 + 0.094t^{-0.104}$	0.958
	C	$y = 0.531t^{-0.058}$	0.747	$y = 0.4 + 0.093e^{-0.028t}$	0.713	$y = 0.187t^{-1/2} + 0.395$	0.601	$y = 0.522 + 0.025t^{-0.058}$	0.765
5	A	$y = 31.067t^{-0.526}$	0.983	$y = 4.095 + 11.403e^{-0.078t}$	0.955	$y = 25.914t^{-1/2} + 0.395$	0.953	$y = 16.71 + 3.13t^{-0.526}$	0.973
	AB	$y = 12.276t^{-0.362}$	0.956	$y = 2.92 + 10.432e^{-0.025t}$	0.954	$y = 21.186t^{-1/2} + 1.584$	0.930	$y = 14.915 + 2.557t^{-0.398}$	0.948
	B	$y = 21.82t^{-0.398}$	0.982	$y = 2.411 + 4.751e^{-0.049t}$	0.918	$y = 10.525t^{-1/2} + 1.496$	0.866	$y = 8.409 + 1.346t^{-0.362}$	0.991
	C	$y = 7.347t^{-0.015}$	0.646	$y = 0.341 + 0.089e^{-0.013t}$	0.632	$y = 0.005t^{-1/2} + 0.369$	0.621	$y = 0.349 + 0.015t^{-0.015}$	0.641
6	A	$y = 14.243t^{-0.112}$	0.921	$y = 8.574 + 4.881e^{-0.028t}$	0.887	$y = 8.722t^{-1/2} + 7.876$	0.829	$y = 13.554 + 1.102t^{-0.112}$	0.926
	AB	$y = 16.121t^{-0.265}$	0.962	$y = 4.933 + 6.018e^{-0.049t}$	0.918	$y = 13.721t^{-1/2} + 3.74$	0.847	$y = 12.822 + 1.773t^{-0.265}$	0.989
	B	$y = 3.576t^{-0.128}$	0.974	$y = 2.122 + 6.018e^{-0.045t}$	0.784	$y = 2.371t^{-1/2} + 1.811$	0.858	$y = 3.357 + 0.3t^{-0.128}$	0.962
	C	$y = 1.167t^{-0.228}$	0.965	$y = 0.552 + 0.368e^{-0.126t}$	0.905	$y = 1.041t^{-1/2} + 0.326$	0.910	$y = 0.993 + 0.129t^{-0.228}$	0.973
7	A	$y = 0.349t^{0.014}$	0.741	$y = 3.346 + 2.217e^{-0.032t}$	0.884	$y = 4.209t^{-1/2} + 3.014$	0.807	$y = 5.789 + 0.541t^{-0.137}$	0.932
	AB	$y = 6.236t^{-0.137}$	0.911	$y = 0.818 + 0.984e^{-0.075t}$	0.919	$y = 1.767t^{-1/2} + 0.587$	0.986	$y = 1.664 + 0.204t^{-0.197}$	0.921
	B	$y = 1.843t^{-0.197}$	0.967	$y = 0.404 + 0.111e^{-0.025t}$	0.724	$y = 0.343t^{-1/2} + 0.389$	0.752	$y = 0.618 + 0.045t^{-0.096}$	0.888
	C	$y = 0.642t^{-0.096}$	0.865	$y = 0.312 + 0.168e^{-0.033t}$	0.892	$y = 0.343t^{-1/2} + 0.389$	0.757	$y = 0.516 + 0.175t^{-0.114}$	0.823
8	A	$y = 11.85t^{-0.316}$	0.962	$y = 2.865 + 4.599e^{-0.049t}$	0.916	$y = 10.292t^{-1/2} + 1.977$	0.865	$y = 8.744 + 1.318t^{-0.315}$	0.993
	AB	$y = 2.681t^{-0.174}$	0.973	$y = 1.227 + 1.314e^{-0.039t}$	0.937	$y = 2.388t^{-1/2} + 0.996$	0.979	$y = 2.463 + 0.279t^{-0.174}$	0.935
	B	$y = 2.169t^{-0.124}$	0.870	$y = 1.285 + 1.051e^{-0.062t}$	0.881	$y = 1.767t^{-1/2} + 1.072$	0.970	$y = 2.109 + 0.194t^{-0.123}$	0.817
	C	$y = 0.722t^{-0.207}$	0.851	$y = 0.361 + 0.145e^{-0.095t}$	0.844	$y = 0.548t^{-1/2} + 0.242$	0.721	$y = 0.615 + 0.073t^{-0.207}$	0.904
9(CK)	A	$y = 3.314t^{-0.116}$	0.964	$y = 1.972 + 0.97e^{-0.042t}$	0.629	$y = 2.1t^{-1/2} + 1.784$	0.867	$y = 3.151 + 0.266t^{-0.117}$	0.960
	AB	$y = 1.856t^{-0.158}$	0.883	$y = 0.956 + 1.041e^{-0.064t}$	0.857	$y = 1.767t^{-1/2} + 0.734$	0.969	$y = 1.771 + 0.194t^{-0.158}$	0.813
	B	$y = 0.474t^{-0.067}$	0.745	$y = 0.342 + 0.082e^{-0.028t}$	0.763	$y = 0.187t^{-1/2} + 0.336$	0.651	$y = 0.464 + 0.025t^{-0.067}$	0.764
	C	$y = 0.356t^{-0.287}$	0.637	$y = 0.129 + 0.153e^{-0.136t}$	0.718	$y = 0.359t^{-1/2} + 0.066$	0.762	$y = 0.289 + 0.043t^{-0.287}$	0.749

3.3 土壤理化性质对渗透性的影响

设土壤深度为 X_1 , 土壤容重为 X_2 , 土壤初始含水率为 X_3 , 总孔隙度为 X_4 , 毛管孔隙度为 X_5 , 非毛管孔隙度为 X_6 , 孔隙比为 X_7 , pH 值为 X_8 , 有机质含量为 X_9 , 全 N 为 X_{10} , 全 P 为 X_{11} , 全 K 为 X_{12} , 速效 N 为 X_{13} , 有效 P

为 X_{14} , 速效 K 为 X_{15} , 最初渗透率为 Y_1 , 稳渗率为 Y_2 , 平均渗透率为 Y_3 , 总渗透量为 Y_4 进行相关分析。

结果表明(表 6),不同构建模式的水源涵养林地土壤渗透性与总孔隙度、非毛管孔隙度呈极显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关,与土壤厚度、初始含水率、毛管孔隙度和孔隙比的关系不显著。一方面可以看出,土壤的初始含水率与渗透性关系不显著,这可能是由于该地区土壤的水分特征所致,本地区土壤含水率普遍较高且含水率差异不显著。另一方面看出,土壤非毛管孔隙度和总孔隙度越大,土壤的渗透性越好;土壤容重越大,土壤则紧实,土壤的渗透性差。土壤渗透性指标与非毛管孔隙呈极显著相关,与毛管孔隙关系不显著,说明非毛管孔隙对土壤渗透性的影响起更重要的作用。

表 6 土壤理化性质与渗透性相关关系矩阵
Table 6 Correlation matrix of soil physical and chemical property and infiltration characteristics

土壤渗透性 Soil infiltration	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Y_1	-0.2253	-0.4928 **	-0.052	0.4243 **	0.2313	0.4901 **	0.1856	-0.4371 **
Y_2	-0.274	-0.5159 **	0.07	0.4756 **	0.0834	0.4722 **	0.0113	-0.3732 *
Y_3	-0.2575	-0.4924 **	0.0295	0.4735 **	0.1486	0.4917 **	0.0821	-0.3860 *
Y_4	-0.2599	-0.4977 **	0.0362	0.4759 **	0.1397	0.4778 **	0.0723	-0.3797 *

土壤渗透性 Soil infiltration	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
Y_1	0.3813 *	0.5384 **	0.2591	0.1582	0.4667 **	0.3922 *	0.5090 **
Y_2	0.4063 *	0.4904 **	0.2293	-0.021	0.5624 **	0.3959 *	0.4660 **
Y_3	0.4177 *	0.5309 **	0.2863	0.0521	0.5579 **	0.3792 *	0.5094 **
Y_4	0.4185 *	0.5285 **	0.2801	0.0432	0.5628 **	0.3693 *	0.5058 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

不同水源涵养林地土壤渗透性与全 N、速效 N、速效 K 呈极显著正相关,与有机质、有效 P 呈显著正相关,与全 P、全 K 关系不显著,pH 值与初渗率呈极显著负相关,与稳渗率、平均渗透率和渗透总量呈显著负相关(表 6)。可以看出土壤化学性质的大多指标对土壤渗透性的影响比较显著,特别是全 N、速效养分和有机质含量这个主要指标的多与少决定了土壤肥力的大小,同时也关系到土壤渗透能力的强弱。pH 值与土壤渗透性能显著负相关,特别是与初渗率达到极显著负相关,可能是由于该区属于酸雨较严重的区域,pH 值均较小,样地 pH 值为 3.70—4.44,土壤的酸性较强。林义成^[19]等和吴忠东^[20]等研究表明,pH 值越大,土壤中含有的交换性钠含量越大,土粒越分散;土壤粘重闭结,通透性就越差,不利于水分的流通。因此,在入渗水相同条件下,水分在最初渗透通过土壤时,同时也是土壤受水分淋溶的过程,逐渐淋溶出土壤中存在的大量酸性阳离子,随着渗透时间的增加,酸性阳离子则逐渐减少,影响效果也逐渐减弱。

根据土壤渗透性与土壤理化性质的相关分析结果,选择了与土壤渗透性指标均极显著或显著相关的因子:土壤容重(β_1)、总孔隙度(β_2)、非毛管孔隙度(β_3)、pH 值(β_4)、有机质含量(β_5)、全 N (β_6)、速效 N (β_7)、有效 P (β_8)、速效 K(β_9),分别对其进行主成分分析(表 7),结果表明,土壤理化性质第 1 主成分方差贡献率 78.15%,且土壤理化性质在第 1 主成分上的负荷量均在 0.7185 以上,其中土壤有机质含量在第 1 组分量的负荷量最大,达 0.9566,土壤 pH 值的负荷量最小,但也高达 0.7836,表明与土壤渗透性

表 7 土壤理化性质主成分分析
Table 7 Principal Component analysis of soil physical and chemical properties

参数 Parameter	主成分 Component		
	P1	P2	P3
β_1	-0.8198	0.0921	0.2270
β_2	0.8032	-0.4170	0.6318
β_3	0.8089	0.5338	0.0337
β_4	-0.7836	-0.1319	-0.0699
β_5	0.9566	0.3784	-0.0085
β_6	0.8243	-0.1110	-0.0202
β_7	0.7938	0.4549	-0.1797
β_8	0.7979	-0.6218	0.0783
β_9	0.8985	-0.1543	0.1017
特征值 Eigen value	4.6241	1.0074	0.8109
贡献率 Proportion	0.7814	0.1119	0.0601
累积贡献率 Cumulative proportion	78.1468	87.1564	93.1599

显著相关的土壤理化性质的第 1 主成分表达了其绝大多数信息,其方程为 $\beta = -0.3812\beta_1 + 0.3735\beta_2 + 0.3762\beta_3 - 0.3644\beta_4 + 0.4449\beta_5 + 0.3833\beta_6 + 0.3691\beta_7 + 0.3711\beta_8 + 0.4178\beta_9$ 。

因此,结合前文土壤渗透性主成分分析结果, α 和 β 分别解释为土壤渗透性、土壤理化性质主成分,可定义 α 为土壤渗透性综合参数, β 为土壤理化性质参数,以最初入渗速率(Y_1)、稳渗速率(Y_2)、平均渗透速率(Y_3)和 120min 总渗透总量(Y_4)和渗透性综合参数 α 的标准化主成分得分为因变量,以土壤理化性质参数(β)的标准化主成分得分为自变量进行回归分析,得到回归方程: $Y_1 = 1.6274 + 2.1589\beta (R^2 = 0.6011, P = 0.0001)$; $Y_2 = 1.13 + 0.944\beta (R^2 = 0.7136, P = 0.0001)$; $Y_3 = 1.3798 + 1.5382\beta (R^2 = 0.6396, P = 0.0001)$; $Y_4 = -0.3332 + 0.8113\beta (R^2 = 0.8596, P = 0.0001)$; $\alpha = 0.6565 + 1.5707\beta (R^2 = 0.8722, P = 0.0001)$;均达到极显著水平。

表 8 土壤渗透性能及理化性质的第 1 主成分方程

Table 8 The first principal component characters of soil infiltration and physical and chemical properties

参数 Parameter	主成分方程 Principal equation	方差贡献率 Ratio of Variance /%
土壤渗透性 Soil infiltration	$\alpha = 0.4826\alpha_1 + 0.4912\alpha_2 + 0.5101\alpha_3 + 0.5154\alpha_4$	93.4
土壤理化性质 Soil physical and chemical properties	$\beta = -0.3812\beta_1 + 0.3735\beta_2 + 0.3762\beta_3 - 0.3644\beta_4 + 0.4449\beta_5 + 0.3833\beta_6 + 0.3691\beta_7 + 0.3711\beta_8 + 0.4178\beta_9$	78.16

4 结论与讨论

(1)通过 8 种不同构建模式水源涵养林地(以裸地为对照)的土壤渗透性分析得出,各林地 A、AB、B 层土壤渗透性存在较大差异,土壤渗透性能随土壤深度的增加而减弱,森林对林地的改良作用随土壤深度的增加而减弱密切相关。而 C 层土壤的渗透性能差异不显著,由于此层为土壤母质层,受林分类型和林分结构等外界条件的影响较小。8 种模式的水源林地土壤渗透性能均好于裸地,各样地土壤渗透性能大小依次为:广东山胡椒×杉木混交林(0.3076) > 马尾松×柳杉混交林(火烧迹地)(0.1605) > 四川大头茶×四川山矾混交林(0.0851) > 毛竹×四川山矾×马尾松混交林(0.0765) > 马尾松×广东山胡椒混交林(0.0445) > 马尾松×四川大头茶混交林(0.0266) > 广东山胡椒×四川杨桐混交林(-0.0253) > 毛竹纯林(-0.2428) > 裸地(-0.3358),以广东山胡椒×杉木混交林地土壤渗透性最好,说明在该水源区以广东山胡椒和杉木混交这种模式对提高土壤渗透性作用显著,以毛竹纯林地最差,刘道平^[6]等和张昌顺^[7]等研究认为,不同的林分地土壤渗透性均以毛竹纯林地最差,这与本研究相似,而本研究通过与毛竹混交种植四川山矾和马尾松混交林地土壤渗透性则得到提高,所以毛竹纯林对改善土壤结构,提高土壤渗透性作用较差。因此,笔者认为在该区造林营林时对此要加以重视。

(2)土壤入渗过程模拟结果表明:在 4 种模拟土壤水分入渗过程的方程中,通用经验方程拟合效果最佳,Kostiakov 方程拟合效果次之,Horton 方程效果最差。通用经验方程是比较适用于描述本研究区域水源涵养林地土壤入渗特征的模型。

(3)以往研究土壤理化性质对土壤渗透性的影响,特别是化学性质的影响大多是通过土壤有机质含量指标进行分析,而土壤养分指标对土壤渗透性的影响研究则较少,本文通过研究土壤养分指标中的有机质含量、pH 值、全 N、全 P、全 K、速效 N、有效 P 和速效 K 指标对土壤渗透性的影响,发现除了有机质含量外,土壤 pH 值、全 N、速效 N、有效 P 和速效 K 显著影响土壤渗透性能,特别本研究得出 3 种常规土壤速效养分对渗透性均具有显著影响,实质是森林对改善土壤性质具有重要意义,土壤养分含量高,则土壤中的生物丰富,生物活动频繁,对改善土壤结构起到重要作用,进而影响土壤的渗透性能。此外,本研究表明该区土壤 pH 值对渗透性影响显著,而刘广路等^[15]研究认为土壤 pH 值与土壤渗透性关系不显著,原因可能是由于该区属于酸雨较严重的地区,土壤酸化严重,对土壤的结构产生一定的影响。因此,土壤酸化严重进而影响土壤渗透性的机理

以及对通过合理营林改善土壤酸化有待于进一步研究。

(4) 由于大多研究林地土壤渗透性能多集中在表层土或多层土壤的平均渗透指标来比较不同林分各指标的差异,这种研究和评价林地土壤渗透性能的方法不够全面。如降雨历时较长,这时用表层土壤初渗率或稳渗率或平均渗透率就不能真实反映土壤渗透性能与地表径流的关系,此时用下层土土壤渗透性能来评价林地土壤渗透性能更准确。因此,本研究采用分层次多指标法来比较不同林分类型土壤渗透性能。经主成分分析,得到表征土壤渗透性能综合参数($\alpha = 0.4826\alpha_1 + 0.4912\alpha_2 + 0.5101\alpha_3 + 0.5154\alpha_4$)和表征显著影响土壤渗透性的理化性质指标的综合参数($\beta = -0.3812\beta_1 + 0.3735\beta_2 + 0.3762\beta_3 - 0.3644\beta_4 + 0.4449\beta_5 + 0.3833\beta_6 + 0.3691\beta_7 + 0.3711\beta_8 + 0.4178\beta_9$),并构建了土壤初渗速率(Y_1)、稳渗速率(Y_2)、平均渗透速率(Y_3)、渗透总量(Y_4)和渗透性能综合参数 α 以及与土壤渗透性显著相关的理化性质指标的综合参数 β 的回归模型:
 $Y_1 = 1.6274 + 2.1589\beta$ ($R^2 = 0.6011, P = 0.0001$); $Y_2 = 1.13 + 0.944\beta$ ($R^2 = 0.7136, P = 0.0001$); $Y_3 = 1.3798 + 1.5382\beta$ ($R^2 = 0.6396, P = 0.0001$); $Y_4 = -0.3332 + 0.8113\beta$ ($R^2 = 0.8596, P = 0.0001$); $\alpha = 0.6565 + 1.5707\beta$ ($R^2 = 0.8722, P = 0.0001$)。

致谢:感谢美国北卡罗莱纳州大学孙阁老师和北京林业大学齐实老师对文章写作的帮助。

References:

- [1] Turner B L, Meyer W B, Skole D L. Global land-use/land-cover change: Towards an integrated program of study. *Ambio*, 1994, 23 (1): 91-95.
- [2] Zhang Z Q, Wang L X, Yu X X, Klaghofer E. Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (1): 79-84.
- [3] Li X P, Chen X, Wang Z Q, Ma K, Zhang R L. Characteristics of water and soil loss occurrence under con tour hedges condition in red soil slope fields. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science*, 2003, 29 (4): 368-374.
- [4] Wu Q X, Han B, Li Y Y. Characteristics of soil infiltration in watersheds in loess hilly region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2 (6): 125-129.
- [5] Lei T W, Liu H, Pan Y H, Zhao J, Zhao S W, Yang Y H. Measurement methods and models of rainfall runoff-inflow of sloping soil infiltration properties. *Science in China Ser. D: Earth Sciences*, 2005, 35 (12): 1180-1186.
- [6] Liu D P, Chen S X, Zhang J C, Xie L, Jiang J. Soil infiltration characteristics under main vegetation types in Anji County of Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (3): 493-498.
- [7] Zhang C S, Fan S H, Guan F Y, Liu G L, Weng Y Z. Soil infiltration characteristics and its influencing factors under *Phyllostachys edulis* forest in northern Fujian Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45 (1): 36-42.
- [8] Lin H S, McInnes K J. Macro-porosity and initial moisture effects on infiltration rates in Vertisols and Vertic intergrades. *Soil Science*, 1998, 163 (1): 2-8.
- [9] Zhao X N, Wu F Q. Developments and reviews of soil infiltration research. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19 (1): 42-45.
- [10] Huo X P, Li X W, Zhang J, Fan C, Dai J, Zhang X H, Zhang L H. Soil permeability capability of sub alpine coniferous forests in western Sichuan. *China. Research of Soil and Water Conservation*, 2009, (16)3: 192-195.
- [11] Meng G T, Fang X J, Lang N J, Li G X, Yuan C M, Wen S L. Water and soil conservation benefits of Man-made *Acaciadea lbata* forest in mountain area of Jinshajiang river watershed in Yunnan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, (14) 4: 60-63.
- [12] Jiang Z L. Forest ecology (5): Function of forest ecosystem to water and soil conservation (1). *Chinese Journal of Ecology*, 1984 (6): 58-63.
- [13] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 62-174, 466-469, 511.
- [14] Zhang W R, Xu B T. Long-term site-specific observation and research methods of forest soil. Beijing: Chinese Forestry Press, 1986: 30-36.
- [15] Liu G L, Fan S H, Qi L H, Xiao F M, Wu J L, Chen X C. Soil Infiltration characteristics of different *Phyllostachys pubescens* forests. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 (6): 44-46, 56.
- [16] Qi L H, Zhang X D, Zhou J X, Zhou X L, Zhou X L, Tian Y X, Wu J P, Ke Y Z. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of vegetation restoration communities in watershed, Northwest Hunan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43 (3): 1-7.
- [17] Zhou W, Zhang J H. Soil infiltration under different patterns of land use in Gully Erosion Area of the Jinshajiang River Basin. *Soil*, 2006, 38 (3): 333-337.
- [18] Tian J Y, Huang Y D. Investigation on physical properties of soil in relation to the index of soil resistance to erosion in the region of Ziwoiling,

Kansu. *Acta Pedologica Sinica*, 1964, 12(3): 286-296.

- [19] Lin Y C, Ding N F, Fu Q L, Ding B H, Wang J H. The measurement of electric conductivity in soil solution and analysis of its correlative factors. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(2): 83-86.
- [20] Wu Z D, Wang Q J. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1): 231-236.

参考文献:

- [2] 张志强, 王礼先, 余新晓, Klaghofer E. 森林植被影响径流形成机制研究进展. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 79-84.
- [3] 李新平, 陈欣, 王兆骞, 马琨, 张如良. 高植物篱笆条件下红壤坡耕地水土流失的发生特征. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2003, 29(4): 368-374.
- [4] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究. *中国水土保持科学*, 2004, 2(6): 125-129.
- [5] 雷廷武, 刘汗, 潘英华, 赵军, 赵世伟, 杨永辉. 坡地土壤降雨入渗性能的径流-入流-产流测量方法与模型. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(12): 1180-1186.
- [6] 刘道平, 陈三雄, 张金池, 谢莉, 姜姜. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 493-498.
- [7] 张昌顺, 范少辉, 管凤英, 刘广路, 翁玉榛. 闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子. *林业科学*, 2009, 45(1): 36-42.
- [9] 赵西宁, 吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 42-45.
- [10] 霍小鹏, 李贤伟, 张健, 范川, 代杰, 张兴华, 张良辉. 川西亚高山暗针叶林土壤渗透性能研究. *水土保持研究*, 2009, (16)3: 192-195.
- [11] 孟广涛, 方向京, 郎南军, 李贵祥, 袁春明, 温绍龙. 云南金沙江流域山地圣诞树人工林水土保持效益. *水土保持学报*, 2000, (14)4: 60-63.
- [12] 姜志林. 森林生态学(五): 森林生态系统蓄水保土的功能(1). *生态学杂志*, 1984(6): 58-63.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 62-174, 466-469, 511.
- [14] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究法. 北京: 中国林业出版社, 1986: 30-36.
- [15] 刘广路, 范少辉, 漆良华, 肖复明, 吴继林, 陈孝丑. 不同类型毛竹林土壤渗透性研究. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 44-46, 56.
- [16] 漆良华, 张旭东, 周金星, 周小玲, 田育新, 吴建平, 柯裕洲. 湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性. *林业科学*, 2007, 43(3): 1-7.
- [17] 周维, 张建辉. 金沙江支流冲沟侵蚀区四种土地利用方式下土壤入渗特性研究. *土壤*, 2006, 38(3): 333-337.
- [18] 田积莹, 黄义端. 甘肃子午岭土壤侵蚀区土壤物理性质与土壤的阻力指数. *土壤学报*, 1964, 12(3): 286-296.
- [19] 林义成, 丁能飞, 傅庆林, 丁炳红, 王建红. 土壤溶液电导率的测定及其相关因素分析. *浙江农业学报*, 2005, 17(2): 83-86.
- [20] 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(1): 231-236.