辽河源典型森林类型的土壤水文效应

宋小帅[1]，康峰峰[1]，韩海荣[1]，于晓文[1]，胡景东[2]，赵伟红[1]，高 晶[1]，赵金龙[1]，韩树文[2]
（1 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083；2 河北省平泉县林业局，河北 平泉 067500）

摘 要：[目的] 研究辽河源地区典型森林类型林下土壤的水文效应，为辽河源森林生态系统健康的监测和评价提供理论佐证。[方法] 选取典型森林类型，采用不同入渗模型拟合各森林类型土壤的入渗过程。[结果] (1) 土壤容重变化范围为 1.21～1.56 g/cm^3，油松中龄林最大，山杨成熟林最小；土壤总孔隙度变化范围为 41.26%～54.38%，山杨成熟林最大，油松中龄林最小；(2) 山杨成熟林土壤蓄水能力最强，为 1 087.56 t/hm^2；油松中龄林土壤蓄水能力最小，为 825.17 t/hm^2；(3) 山杨成熟林稳渗速率最大，为 1.33 mm/min；(4) 霍顿(Horton)入渗模型和菲利普(Philip)入渗模型能较好地反映各森林群落土壤入渗过程，但通用幂函数模型拟合结果较差。[结论] 不同森林类型土壤均表现出随着土层深度的增加容重逐渐增加的现象，阔叶林林下土壤蓄水能力要强于针叶林，通过比较认为可以利用霍顿(Horton)模型作为研究该区森林土壤水文功能的重要手段。

关键词：辽河源；典型森林类型；土壤；水文效应
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2015)02-0101-05 **中图分类号**：S715.3

Soil Hydrological Effects of Typical Forest Types in Upper Reaches of Liaohe River

SONG Xiaoshuai[1], KANG Fengfeng[1], HAN Hairong[1], YU Xiaowen[1],
HU Jingdong[2], ZHAO Weihong[1], GAO Jing[1], ZHAO Jinlong[1], HAN Shuwen[2]
(1. *Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2. *Forestry Bureau of Pingquan County, Hebei Province, Pingquan, Hebei* 067500, *China*)

Abstract: [Objective] Studying the hydrological effects of understory soil of typical forest types in the upper reaches of Liaohe River, aimed to provide theoretical evidence for the monitoring and evaluation of the forest ecosystem health. [Methods] The understory soils of some typical forest types were chosen to research their infiltration processes, and upon which the processes were fitted with several permeability models. [Results] (1) The soil bulk density ranged from about 1.21 g/cm^3 to 1.56 g/cm^3, the maximum value was found in the middle-aged *Pinus tabuli formis* forest and mature *Populus davidiana* forest had the minimum bulk density. The range of the total soil porosity was 41.26%～54.38%, mature *Populus davidiana* forest had the maximum porosity and middle-aged *Pinus tabuli formis* had the minimum porosity; (2) The soil water-holding capacity of mature *Populus davidiana* forest was greatest with a value of 1 087.56 t/hm^2 and middle-aged *Pinus tabulae formis* forest had the minimum value of 825.17 t/hm^2; (3) The steady infiltration rate of mature *Populus davidiana* forest was 1.33 mm/min; (4) Both Horton infiltration model and Philip model could reflect the soil infiltration course of each forest vegetation well, while the common power functional infiltration performed poorly. [Conclusion] The soils of different forest types had greater bulk density in deeper layer. The soil water storage capacity was bigger under broad-leaved forest than that under under coniferous forest. Horton model could be used as an important means to study the local hydrological function of forest soil.

Keywords: the upper reaches of Liaohe River; typical forest types; soil; hydrological effects

森林土壤层是森林生态系统水文作用的第三作用层，是植被生长的基础，土壤的水源涵养功能对调节洪水、干旱期为植被供水、防止水土流失具有重要作用。在研究土壤渗透规律的基础上探讨森林土壤水文作用才有意义，森林土壤的渗透性可对森林水分进行动态调节[1]，降雨经过土壤的渗透作用，一部分

收稿日期：2014-02-24 修回日期：2014-03-18
资助项目：林业公益性行业科研专项“森林生态服务功能分布式定位观测与模型模拟”(201204101)
第一作者：宋小帅(1987—)，男(汉族)，山西省晋城市人，硕士研究生，主要研究方向为森林生态学。E-mail：swxwky@163.com。
通信作者：韩海荣(1963—)，男(回族)，青海省西宁市人，教授，博士生导师，主要从事森林生态学方面的研究。E-mail：hanhr@bjfu.edu.cn。

进入土壤的毛管孔隙供植物吸收和林地蒸发，一部分贮存在非毛管孔隙成为土壤水分的来源[2]。国内外学者对植被对土壤渗透的影响已做了很多研究[3-5]，并建立了菲利普(Philip)入渗模型、霍顿(Horton)入渗模型和通用模型等来拟合森林土壤入渗过程[6-10]，但由于土壤性质的复杂性，定量描述还未统一，模型模拟也不具有普遍适用性，目前大多研究都是针对模型的修正和入渗参数的确定。

地表异质性以及土壤水文参数的多尺度定量表达是土壤水文作用研究面临的一个重点和挑战[11]。对不同空间尺度的土壤水文效应过程、机理和影响因子还需系统的深入理解，也缺乏多要素的土壤水文综合观测系统，所以需要在传统取样研究的基础上，结合数学、计算机和 3S 技术，实现土壤水文效应研究的大尺度转换和分析。

本研究区位于辽河的发源地——辽河源，对于该区的森林土壤水文特征还没有专门的研究，选取辽河源典型森林类型：油松中龄林、近熟林和成熟林、山杨成熟林、华北落叶松中龄林为研究对象，分析不同森林类型林下土壤的水文特征，运用不同入渗模型拟合各森林类型土壤的入渗过程，旨在进一步了解该区森林在水土保持和水源涵养等方面的规律，为辽河源森林生态系统健康的监测和评价提供理论支持。

1 研究区概况

研究地位于河北省平泉县辽河源自然保护区大窝铺林场(118°22′—118°37′E，41°01′—41°21′N)。该地区处于暖温带向寒温带过渡地带，属于半湿润半干旱大陆性季风型山地气候，年均气温 7.3 ℃，无霜期 110～125 d，全年日照 2 000～2 900 h，年平均降雨量 540 mm，年平均蒸发量 1 800 mm，湿润度为 0.4，历年平均晴天日数为 170 d 左右。土壤主要是棕壤土和褐土，土层深厚，表现为上轻下黏，0.01～0.05 mm 的中粉砂的含量在各土层中含量变化都不大，约占 6%～10%，棕壤中以 0.25～0.05 mm 和 0.05～0.01 mm 含量最高，而淋溶褐土则以 1～0.25 mm 含量最高，褐土黏粒含量超过 30%。土壤 pH 值 6.5～7.5，有机质含量较丰富，一般表土含量 0.5%～4.8%，最高可达 15%。

森林植被主要是乔木油松(*Pinus tabulaeformis*)天然林、山杨林(*Populus davidiana*)和白桦林(*Betula platyphylla*)及其混交林、华北落叶松林(*Larix principis-rupprechtii*)；灌木层有锦带花(*Weigela florida*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、榛(*Corylus heterophylla*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)等；草本层以白颖薹草(*Carex duriuscula subsp. rigescens*)为主。

2 研究方法

2.1 样地调查

于 2012 年 7—8 月在大窝铺林场设立标准样地(20 m×30 m)调查辽河源地区典型森林类型，每种森林类型进行 3 个样地的重复，对林木进行每木检尺，测量树高、胸径等因子，各样地基本情况详见表 1。

表 1 样地基本情况

编号	森林类型	坡度/(°)	坡向	郁闭度	海拔/m	密度/(株·hm^{-2})	平均树高/m	平均胸径/cm
Ⅰ	油松中龄林	27	南	0.62	1 004	1 017	11.33	16.1
Ⅱ	油松近熟林	17	南	0.55	998	634	15.60	20.6
Ⅲ	油松成熟林	18	北	0.37	990	434	20.68	38.4
Ⅳ	山杨成熟林	19	西	0.65	1 067	917	11.26	16.2
Ⅴ	华北落叶松中龄林	18	西	0.65	995	1 500	9.57	11.7

2.2 土壤物理性状

在每种森林类型的 3 个标准样地内，每个样地选取 3 个代表性样点，用铝盒按 0—20 cm，20—40 cm，40—60 cm 分层取样，带回实验室后烘干求土壤含水量；用 100 cm^3 的环刀按 0—20 cm，20—40 cm，40—60 cm 分层取样，实验室内用环刀浸泡法测定土壤容重、非毛管孔隙度和毛管孔隙度[12]。

2.3 土壤入渗特征

保持土壤原始性状，采用室内双环入渗法定量观测土壤初渗速率、稳渗速率以及渗透时间[13]。利用 SPSS 和 Sigmaplot 统计软件，应用 Philip 入渗模型、Horton 入渗模型和通用入渗模型拟合各林分类型土壤入渗过程，表达式为：

Philip 模型：$f=0.5ST^{-0.5}+A$

式中：S——吸水率(mm/min)；A——常数，相当于稳渗速率(mm/min)；T——入渗时间(min)。

Horton 模型：$f=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$

式中：f_0——初渗速率(mm/min)；f_c——稳渗速率

(mm/min)；k——经验常数(衰减系数)。

通用模型：$f=at^{-n}+b$

式中:a,b——经验常数；n——衰减系数；f——入渗速率；t——入渗时间。

2.4　土壤蓄水能力

土壤饱和浸水后的土壤蓄水能力计算公式为：$W_t=10\ 000p_th$，$W_0=10\ 000p_0h$，$W_c=10\ 000p_ch$

式中:W_t——土壤最大蓄水量(t/hm^2)；W_0——土壤非毛管蓄水量(t/hm^2)；W_c——土壤毛管蓄水量(t/hm^{-2})；p_t——土壤总孔隙度(%)；p_0——土壤非毛管孔隙度(%)；p_c——土壤毛管孔隙度(%)；h——土层厚度(m)[8]。

3　结果与分析

3.1　不同森林类型土壤物理特性分析

土壤的物理特性是指土层厚度、容重、孔隙度等指标,土壤容重是单位体积自然状态下土壤(包括土壤空隙的体积)的干重,是土壤紧实度的指标;孔隙度是单位土壤总容积中的孔隙容积[14]。土壤容重和孔隙度直接影响着土壤保水、透气、透水的性能,土壤孔隙是土壤中水分、养分、空气等运移的通道,是植物根系生长的场所,可以表征土壤的物理结构和水文特征。根据对各森林群落土壤的定位观测,计算研究区 0—60 cm 土壤的容重和孔隙度(表 2)。从表 2 可以看出,不同森林类型土壤均表现出随着土层深度的增加容重逐渐增加的现象,这与土壤紧实度和有机质含量有关,表层土壤由于枯落物分解,有机质含量较高,容重较小,深层土壤矿质含量增加,容重增大。越靠近土壤表层,植物根系活动越多,其对土壤的改良效果也越明显,使得土壤孔隙增大。从均值来看,土壤容重变化范围为:1.21～1.56 g/cm^3,表现为:油松中龄林＞油松近熟林＞油松成熟林＞华北落叶松中龄林＞山杨成熟林;总孔隙度变化范围为:41.26%～54.38%,表现为:山杨成熟林＞华北落叶松中龄林＞油松成熟林＞油松近熟林＞油松中龄林。随森林演替的进展,土壤容重逐渐减小,土壤孔隙度逐渐增大。

3.2　不同森林类型土壤蓄水能力

森林土壤通过蓄水调节森林水文过程,土壤蓄水量是评价森林涵养水源能力的重要指标,其大小主要由土壤厚度和土壤孔隙状况决定[15]。土壤最大蓄水量是毛管蓄水量和非毛管蓄水量之和,分别影响森林土壤的保水和蓄水能力,毛管水只做垂直运动,是植物根系吸收和林地蒸发的来源,非毛管水在重力作用下在土壤中既做上下运动,也做横向渗透,起着调节流量、稳定水位的功能,因此,通常非毛管水也称为有效蓄水量[16]。从图 1 可以看出,山杨成熟林土壤非毛管蓄水量和最大蓄水量最大,分别为 283.31 和 1 087.56 t/hm^2;华北落叶松中龄林毛管蓄水量最大,为 838.66 t/hm^2;山杨成熟林土壤最大蓄水量最大,为 283.31 t/hm^2;油松中龄林土壤非毛管蓄水量、毛管蓄水量和最大蓄水量均为最小,分别为 140.88,684.29,825.17 t/hm^2。阔叶林土壤蓄水能力大于针叶林,华北落叶松林略大于油松林,就油松林土壤的非毛管蓄水量、毛管蓄水量和最大蓄水量来看,均表现为:成熟林＞近熟林＞中龄林,说明随着森林演替的进行,土壤蓄水能力逐渐增强。

表 2　不同森林类型土壤物理特性

森林类型	土层厚度/cm	土壤容重/(g·cm^{-3})	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%
Ⅰ	0—20	1.49	8.61	35.22	43.84
	20—40	1.54	7.12	34.92	42.04
	40—60	1.65	5.39	32.51	37.90
	均值	1.56	7.04	34.21	41.26
Ⅱ	0—20	1.37	10.87	37.26	48.13
	20—40	1.46	9.37	35.38	44.75
	40—60	1.54	7.73	34.12	41.85
	均值	1.46	9.32	35.59	44.91
Ⅲ	0—20	1.32	10.47	39.57	50.03
	20—40	1.33	10.44	39.39	49.83
	40—60	1.48	7.90	36.19	44.09
	均值	1.38	9.60	38.38	47.98
Ⅳ	0—20	1.11	16.24	41.95	58.19
	20—40	1.19	14.34	40.86	55.21
	40—60	1.33	11.91	37.82	49.74
	均值	1.21	14.17	40.21	54.38
Ⅴ	0—20	1.22	11.43	42.70	54.14
	20—40	1.33	8.15	41.63	49.78
	40—60	1.35	7.69	41.47	49.16
	均值	1.30	9.09	41.93	51.02

注:Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ所代表的森林类型详见表 1。下同。

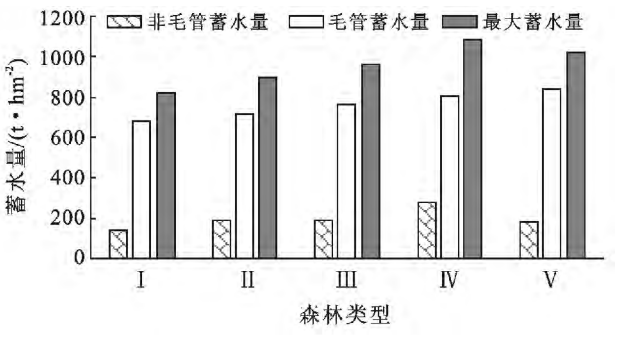


图 1　不同森林类型土壤蓄水量

3.3 不同森林类型土壤入渗特征

3.3.1 **不同森林类型土壤入渗过程** 土壤入渗是土壤重要的水文物理性质，入渗能力的大小与土壤质地、孔隙状况、有机质含量等有关，对林地土壤持水和地表径流形成有重要影响，反映了土壤涵养水源的能力。土壤的渗透性能反映了土壤层的动态调节能力，土壤入渗速率调节水分进入土壤、在地表积存或产生地表径流的过程[1]。降水在渗透性能良好的林地土壤内合理分配，这也是其水土流失较少的原因之一。不同森林群落林地土壤入渗过程结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，不同森林类型土壤入渗过程表现出一致的趋势，入渗开始阶段速率较大，然后迅速下降，随着入渗过程的进行，入渗速率逐渐减小，但变化趋势比较平缓，50～60 min 后达到稳定渗透状态，入渗速率不再变化。不同森林类型土壤入渗速率差别明显，初渗速率变化范围为 1.42～8.54 mm/min，排序为：山杨成熟林＞油松成熟林＞油松近熟林＞油松中龄林＞华北落叶松中龄林；稳渗速率变化范围为0.26～1.33 mm/min，排序也表现为：山杨成熟林＞油松成熟林＞油松近熟林＞油松中龄林＞华北落叶松中龄林。

3.3.2 **不同森林类型土壤入渗过程模拟** 土壤入渗能力不仅决定着地表径流的形成，还影响着植物根系水分环境，研究不同土壤入渗能力对防止水土流失和提高森林植被生产力有重要作用，而使用合适的土壤入渗模型是方便、准确地了解不同土壤入渗差异的重要手段。采用菲利普(Philip)模型、霍顿(Horton)模型和通用(幂函数)模型对不同森林类型土壤的实测入渗数据进行拟合，菲利普(Philip)模型所用方程与土壤渗透的物理过程相一致，霍顿(Horton)模型所用方程表示的是入渗速率与随着渗透过程进行而变化的吸水率的关系，通用(幂函数)模型是一个经验方程。拟合所得结果详见表 3。从表 3 拟合结果可以看出，菲利普(Philip)模型和霍顿(Horton)模型对不同森林类型土壤入渗过程均能取得较好的拟合结果，但通用(幂函数)模型的拟合结果与实测值偏差较大(结果未列出)，说明通用(幂函数)模型不适合本研究区土壤入渗模拟。从拟合的稳渗速率来看(菲利普模型 A、霍顿模型 f_c)，不同模型拟合结果差别较大，其中霍顿(Horton)模型的结果最接近实测值，与实测值相差在 0.1%～47.3%之间(平均值 9.7%)，菲利普(Philip)模型拟合结果与实测值相差在 16.1%～101.1%之间(平均值 40%)，表明对辽河源地区典型森林群落采用霍顿(Horton)模型进行拟合可以得到较好的效果。

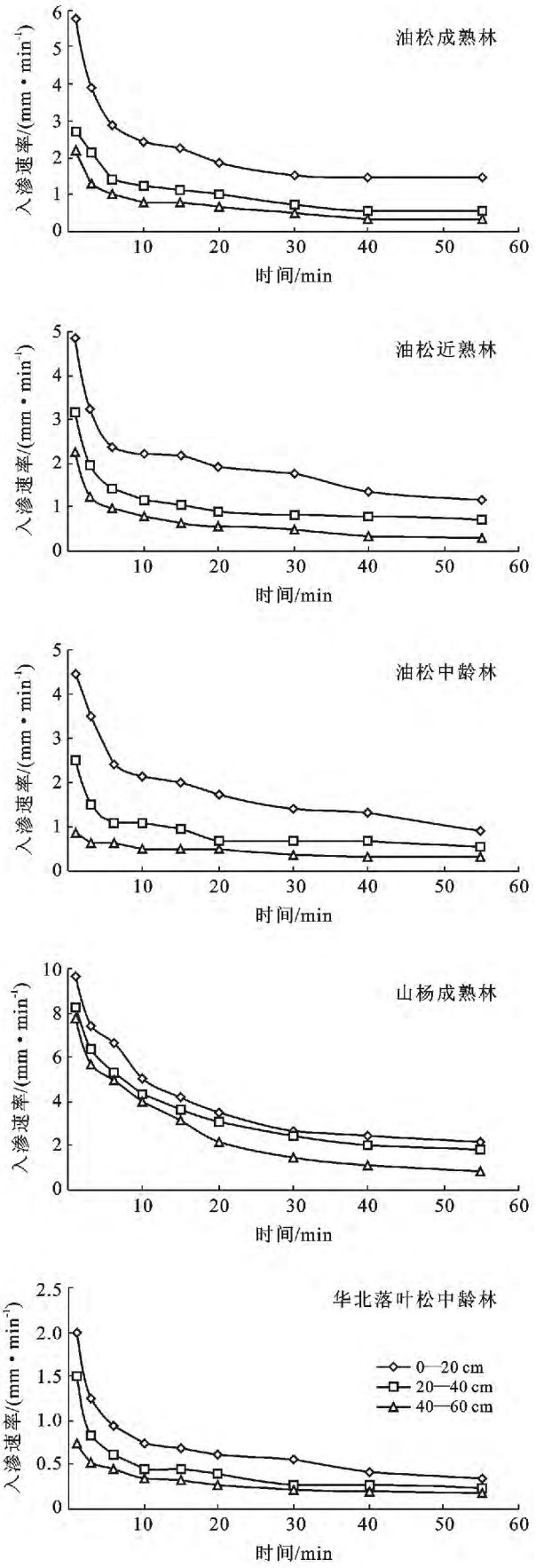


图 2 不同森林类型土壤入渗过程曲线

表 3　不同森林类型土壤入渗特征参数的实测值与拟合值

森林类型	实测入渗速率/(mm·min^{-1})		菲利普(Philip)模型			霍顿(Horton)模型			
	f_0	f_c	S	A	R^2	f_0	f_c	k	R^2
Ⅰ	2.61	0.58	4.51	0.81	0.976	2.40	0.59	0.11	0.923
Ⅱ	3.42	0.74	6.02	0.89	0.995	3.05	0.74	0.15	0.912
Ⅲ	3.56	0.81	6.48	0.93	0.988	3.21	0.81	0.14	0.951
Ⅳ	8.54	1.33	15.33	2.68	0.949	7.93	1.96	0.10	0.975
Ⅴ	1.42	0.26	2.63	0.32	0.996	1.26	0.26	0.15	0.926

4　结 论

(1) 不同森林类型 0—60 cm 土壤由浅层至深层土壤容重逐渐增加,毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度逐渐减少的趋势。枯落物对土壤改良作用明显,枯落物腐烂分解改善土壤结构,同时增加了有机质含量,使得浅层土壤比深层土壤更疏松透气。土壤容重与总孔隙度变化趋势相反,与已有研究结果[17]相同。森林土壤受到凋落物、树根以及林下生物群落的影响,有机质和腐殖质多集中在土壤的表层,随着土壤加深,这些物质的含量逐渐减少,使得土壤容重表现出随着土层深度增加,容重逐渐增加的趋势。同时深层土壤密实度高,因为地下水的存在其含水率也较大,这也会造成深层土壤容重比浅层大。山杨林和华北落叶松林林下植被比油松林多,在这些植被的根系的共同作用下,使得山杨林和华北落叶松林土壤比油松林土壤容重小,孔隙度大,同时油松枯落物分解较慢,对土壤改善不力也加剧了这一现象。

(2) 不同森林类型土壤最大蓄水量变化范围为 825.17～1 087.56 t/hm^2,大小排序为:山杨成熟林>华北落叶松中龄林>油松成熟林>油松近熟林>油松中龄林。通常用有效蓄水量来衡量森林土壤调节水分能力的高低,不同森林类型土壤最大蓄水量变化范围为 140.88～283.31 t/hm^2,大小排序为:山杨成熟林>油松成熟林>油松近熟林>华北落叶松中龄林>油松中龄林。说明阔叶林林下土壤蓄水能力要优于针叶林[18]。

(3) 通过菲利普(Philip)模型、霍顿(Horton)模型和通用(幂函数)模型对不同森林类型土壤水分入渗过程进行拟合,霍顿(Horton)模型拟合结果比菲利普(Philip)模型更接近实测值,通用(幂函数)模型拟合效果较差。可以利用霍顿(Horton)模型作为研究本地区森林土壤水文功能的重要手段。

[参 考 文 献]

[1] 王树力,胡天然. 松花江干流四种珍贵树种阔叶林的土壤水文特性[J]. 土壤通报,2010,41(2):294-298.

[2] 田超,杨新兵,李军,等. 冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报,2011,25(4):221-226.

[3] 刘道平,陈三雄,张金池,等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报,2007,18(3):494-498.

[4] 余新晓,程根伟. 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,2003,14(1):16-19.

[5] 刘世荣,孙鹏森,温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究[J]. 植物生态学报,2003,27(1):16-22.

[6] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil science society of America Journal, 1940, 5(3):399-417.

[7] Philip J R. The theory of infiltration about sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Science, 1957, 84(4): 257-264.

[8] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. 水土保持学报,2004,18(6):1-5.

[9] 胡建朋,杨吉华,罗明达,等. 山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):54-58.

[10] 杨海龙,朱金兆,毕利东. 三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):63-69.

[11] 李小雁,马育军. 水文土壤学:一门新兴的交叉学科[J]. 科技导报,2008,26(9):78-82.

[12] 张光灿,夏江宝,王贵霞,等. 鲁中花岗岩山区人工林土壤水分物理性质[J]. 水土保持学报,2005,19(6):44-48.

[13] 王光玉. 杉木混交林水源涵养和土壤性质研究[J]. 林业科学,2003,39(1):15-20.

[14] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京. 中国林业出版社,2005.

[15] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等. 宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J]. 水土保持学报,2007,21(1):95-98.

[16] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.

[17] 陈波,杨新兵,赵心苗,等. 冀北山地 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报,2012,26(2):196-202.

[18] 姜海燕,赵雨森,陈祥伟,等. 大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):149-153.