

林地土壤的人渗及其模拟分析

吴长文

王礼先

(南昌水利水电高等专科学校 江西南昌 330029) (北京林业大学 100083)

摘 要 本研究对北京密云水库库区的8种主要林分的坡面土壤入渗指标采用双环入渗仪和针头式人工降雨器同时进行测试试验。对常见的四种入渗模型进行了研究和对比,得出了林分的入渗率均大于对照荒草坡。试验分析表明,双环入渗过程虽然与天然降雨入渗条件差别较大,但采用 Horton 入渗模型可方便地计算出林地土壤的有效贮水量,它与土壤孔隙法测试的结果是很接近的。而针头式人工模拟降雨入渗试验采用 Smith—P 模型能较好地描述在降雨条件下的入渗过程。

关键词 林地 入渗模型 双环入渗仪

The Analysis on the Characteristics of Infiltration and its simulating into Forested Land

Wu Changwen

(The College of Nanchang Water Resources and Hydro-Power Nanchang 330029)

Wang Lixian

(The college of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University Beijing 100083)

Abstract We researched the properties of soil infiltration of 8 types of main forest stands in Miyun reservoir area of Beijing by double-cycle infiltrator and syringe needle type of rainfall simulator. And the four types of infiltration model have been studied and compared with.

The research indicates that the double-cycle infiltrator can determine the amount of effective flood storage conveniently by Horton's model, and the Smith—p model can agreeably simulate the infiltrating process under the condition of steady intensity of rainfall. The result indicates that the forested land can greatly increase the regulating capacity to the runoff induced by rainfall.

Key words forested land infiltration simulated rainfall Double-cycle type of infiltrator

1 前言

在陆生植被中,森林具有最大的水源涵养功能,是一个面积广阔的绿色水库。山清水秀,山穷水尽,是一条普遍的客观规律。即使在降雨丰沛的热带地区,破坏森林也会造成水源枯竭现象^[2]。

土壤层是水源保护林水文效应的第三活动层,林下降水量在这里进行第三次分配,即通过林冠层和枯枝落叶层的水分,将渗入并贮存于土中,贮存于根层的水分通过根系吸收,植物蒸腾与土面蒸发而消耗,最后多余水量渗透到土壤下层(无根层)而成为地下水或以潜流流出林外。在一个森林

流域生态系统中,有根系的土层是巨大的水分贮蓄库和水文调节器。

水源保护林的涵养水源作用最终是通过流域出口的水量调节、水质改善和减少泥沙表现出来。而林地坡面的土壤入渗特性和土壤孔隙的贮水性能指标当然不能直接反映流域出口指标量的变化,但它是研究地表径流和坡面侵蚀的起点。

土壤的入渗过程和渗透能力决定了降雨过程再分配中地表径流和土壤水分的产生和发展,而合适的入渗模型是研究水源保护林保水功能的重要手段。

由于林地坡面水分入渗一般属于非饱和水分运动,故对土壤水分运动基本方程^[2,3],即使是最简单的边界条件,严格意义上解析解亦十分困难。为此,自本世纪初以来已有不少研究者提出了许多半理论、半经验甚至经验的入渗模型。

目前对田间土壤水分的研究突飞猛进,对林地坡面的土壤水分的研究亦逐步深入,由于计算机技术的发展,利用计算机对土壤水分运动基本方程进行差分求解已可以求得精确的数值解,而目前最有吸引力的是 SPAC 水分传输模型的研究^[4]。

由于本文旨在对雨水渗入土壤的量和时间过程进行研究,而没有涉及水分在土壤的再分配过程和空间传递,故问题可以大大简化。

在有充分供水(或降雨)条件下,在土层的最上部有一饱和水层,其土壤含水量处于饱和状态,其下含水量急速减小,称为过渡带;过渡带之下为水分传递带,此带内水分的传递主要靠重力作用;再以下就是湿润带。湿润带与下部含水量较小的交界面称湿润锋面。

就本研究区的岩土层含水量的垂直分布而言,一般将地下水面以上部分称为包气带,以下部分称为饱和带。在水分的垂向运动中,包气带对降雨有二次调节分配作用:(1)降雨后的入参与径流;(2)入渗水量先补给土壤含水量,在满足土壤毛管孔隙水量后,余水以重力形式运动,形成壤中流或地下径流。

本文是“北京市密云水库水源保持林涵养水源效益研究”的部分内容。

2 试验条件与方法

本文对密云水库库区周围的8种主要林分的林地土壤入渗特性和贮水性能,在大量试验的基础上进行了试验的分析。本研究区地处北京市北部,位于东经116°37′~117°31′,北纬40°13′~40°48′。试验林地为山地丘陵坡地,属石质山地,平均降水量660mm,其中夏季降雨量占全年76.5%,夏季平均气温24.6℃,属半湿润向半干旱过渡的过渡带。调查和试验的代表性标准地基本情况见表1。

表1 代表性标准地(针头式降雨)基本情况

编号	林分	类别	坡角	前期含水量 (%)	林龄 (年)	郁闭度 (%)	枯落物厚度 (cm)	土壤容重 (g/cm ³)	土壤厚度 (cm)	主要下层植被	代表的有效标准地数计:79
1	刺槐	I	25	6.28	15~16	85~95	2.3	1.24	35	荆条、艾草、白草	3
		II	25	10.08	7~8	80~95	3.3	1.39	30	荆条、艾草、白草	11
2	油松	I	25	5.80	30	85	2.7	1.43	50	荆条、三叶绣线菊、羊胡草	4
		II	20	6.02	22	30	2.2	1.46	45	荆条、白草、狗尾草、地衣	10
3	栎树	I	34	14.22	23	91	5.0	1.24	52	绣线菊、杜鹃、蒿类、白草	14
		II	21	3.21	15	86	3.0	1.47	45	胡枝子、铁杆蒿、羊胡草	8
4	山杨	I	35	9.17	22	90	5.9	1.01	54	毛榛、绣线菊、狗尾草	3
		II	27	13.00	16	84	4.1	1.18	45	毛榛、艾蒿、狗尾草	8
5	桦树		26	19.88	25	95	6.0	0.97	55	绣线菊、蒺藜、白草	4
6	侧柏		20	10.02	22	57	2.0	1.18	30	荆条、中华卷柏、羊枯草	8
7	落叶松		25	15.30	13	95	5.2	1.21	50		4
8	椴树		25	19.41	27	91	5.7	0.98	60	毛榛、胡枝子、麦穗	4
9	荒草地	I	15	8.40				1.47	30	荆条、白草、狗尾草	8
		II	28	11.20				1.60	20	狗尾草、白草	5

林地入渗特性试验采用针头式人工模拟降雨器^[5]和双环入渗仪同时对照(双环的内环10cm,

外环30cm,高30cm)。

3 不同林分的土壤入渗规律分析

3.1 入渗模型

描述土壤入渗模型很多,以下仅介绍常用的几种入渗模型。

3.1.1 入渗率模型

(1)考斯加柯夫公式(КОСЯКОВ)

$$f = a't^{-1/2} \quad (1)$$

f, a', t 分别为入渗率,入渗率系数和时间。

此公式适于入渗率较高的情况。

(2)菲利普公式(Philip)

$$f = (1/2)st^{-1/2} + A \quad (2)$$

S, A 分别为吸水率和稳渗率。

Philip 公式是在水分运动基本方程式的基础上,经简化推导出来的,因此它有一定的物理基础。

(3)霍顿公式(Horton)

$$f = f_o + (f_c - f_o)e^{-kt} \quad (3)$$

式中, f 为 t 时刻的入渗率; f_c 为稳定入渗率; f_o 为初始入渗率。

Horton 公式过去认为属纯经验性模型,后来有人证明它有一定的物理依据,它在描述流域入渗规律性有一定的局限性,但作为对单点降雨入渗的模型,在实用上是很有效的。

(4)Smith-Parlange(1978)模型

Smith-Parlange 入渗模型是对不同质地的土壤进行大量降雨入渗数值模拟计算而提出的稳定降雨入渗模型:

$$\begin{cases} f = i & (t < t_p) \\ f = f_o + B(t - t_a)^{-n} & (t > t_p) \end{cases} \quad (4)$$

i, f_o ——分别为降雨雨强、稳渗率;

t_a, t_p ——分别为临界时间常数、产流历时;

B, n ——分别为系数、指数。

通过对以上4种入渗模型的比较,可以发现,考斯加柯夫公式是最简单的入渗模型,菲利普公式则可以认为是对它的改进式(多了一个常数项),而 Smith-P 入渗模型则是菲利普公式的改进通用式,尤其是对降雨的入渗,Smith-P 能很好地模拟实际的降雨过程。但 Smith-P 模型的参数较多,模型的动用较为复杂。

3.1.2 入渗量模型 由以上的入渗模型对时间 t 积分,即为入渗量 F 。其公式与相应入渗量模型列为表2。

3.2 林地入渗过程的模拟

3.2.1 双环入渗 采用 Philip 和 Horton 公式分别进行典型入渗过程模拟。不同林分的入渗模拟参数见表3。

表2 四个人渗模型一览表

模 型 名 称	入 渗 率 表 达 式	累 积 入 渗 量 公 式
考斯加柯夫	$f=a't^{-1/2}$	$F=2a't^{1/2}$
菲利普(Philip)	$f=(1/2)st=-1/2+A$	$F=st^{1/2}+At$
霍顿(Horton)	$f=f_0+(f_c-f_0)e^{-kt}$	$F=f_0t+(f_c-f_0)(1-e^{-kt})/k$
史密斯(Smith-P)	$f=i \quad (t < t_p)$ $f=f_0+B(t-t_0)^{-n} \quad (t > t_p)$	$F=it_p+f_0(t-t_p)$ $+B[(t-t_0)^{1-n}-(t_p-t_0)^{1-n}]/(1-n)$

表3 不同林分入渗模型的拟合参数(双环入渗)

编 号	林 分	典型类	Philip[式(6.6)]			Horton[式(6.7)]			
			S	A	r	f_c	f_0	k	r
1	刺 槐	I	18.78	6.00	0.901	12.20	6.60	0.052	0.991
		II	10.59	2.80	0.921	6.25	3.10	0.057	0.989
2	油 松	I	43.57	1.12	0.987	24.69	3.62	0.110	0.997
		II	11.96	2.20	0.912	13.02	2.52	0.116	0.991
3	栎 类	I	13.75	3.02	0.932	10.32	3.40	0.092	0.990
		II	18.35	1.42	0.922	7.11	1.80	0.101	0.998
4	山 杨	I	36.39	2.95	0.902	17.64	4.65	0.106	0.992
		II	23.39	1.63	0.910	19.00	1.80	0.097	0.994
5	桦 树		68.65	4.70	0.900	38.20	7.60	0.095	0.977
6	侧 柏		18.25	5.92	0.968	19.85	6.75	0.119	0.998
7	落叶松		15.20	3.63	0.902	8.40	4.32	0.029	0.994
8	椴 栎		44.04	2.65	0.992	16.50	4.63	0.070	0.993
9	荒草坡	I	19.30	2.75	0.982	8.80	3.60	0.100	0.995
		II	16.99	1.35	0.984	6.70	2.12	0.124	0.992

注:实测时,取 $t_0=2.5\text{min}$ 时, $f=f_0$; r 为拟合相关系数。

根据表3拟合相关系数 r 的大小,可判断 Horton 比 Philip 公式拟合效果更好。从表4总入渗量的比较可知,总的情况是,Horton 公式比 Philip 的拟合效果的误差要小。因为 Philip 式中 t 的指数为一固定常数,难以适应各种土壤在不同土质前期含水量条件下的入渗曲线变化。尤其是曲线较平缓时(即土壤前期含水量较高时),入渗过程的拟合效果较差。

表4 典型入渗曲线(双环)模型计算的人渗量(120min)与实测值比较

地 类	实 测 入 渗 总 量 (mm)	Philip 公式			Horton 公式	
		计算入渗量 (mm)	与实测值差 (%)	计算入渗量 (mm)	与实测值差 (%)	计算渗吸量 F_1 (mm)
刺 槐	I 908.2	925.8	+1.9	899.5	-1.0	234.6
	II 435.4	452.0	+3.9	427.2	-1.8	109.6
油 松	I 620.5	611.7	-1.4	625.9	+0.9	224.5
	II 394.2	395.0	+0.3	393.1	-0.3	112.2
栎 树	I 500.0	513.0	+2.6	483.2	-3.4	112.2
	II 287.3	271.4	-5.6	268.6	-6.6	70.4
山 杨	I 702.2	752.6	+7.3	680.5	-3.1	166.4
	II 103.6	451.8	+11.9	393.3	-2.5	195.9
白 桦	I 1245.1	1316.0	+5.7	1234.1	-0.9	402.1
侧 柏	I 917.2	910.3	-0.8	920.1	+0.3	166.8
落叶松	I 581.8	602.1	+3.4	551.6	-5.2	239.7
椴 栎	I 750.3	800.4	+6.7	725.1	-3.3	235.7
荒草坡	I 503.2	541.4	+7.6	484.0	-3.8	88.0
	II 312.7	348.1	+11.5	291.7	-6.7	54.0

注: F_1 由式(6)计算。

值得指出,有的研究者把双环试验的累积入渗量看作是土壤的贮水容量,这是不妥的。实际上,双环入渗量有三部分去处:一是就地土柱的渗吸量;二是向深层的裂隙渗漏量;还有一部分是向入渗土柱的侧边土壤渗透。尽管双环入渗试验为避免侧渗在入渗环外保持一定水层,但对孔隙度大,而土壤含水量又小的林地土层,这种侧渗量在较深层仍是可观的。

3.2.2 人工降雨(针头式)入渗过程模拟 通过对所有试验标准地的降雨入渗试验分析,为了使选出的代表性入渗曲线能保持在合理的偏差范围内,故有的林分(或地类)选出了二种有代表性的入渗曲线,它们代表了二种条件相差明显的情况。其选出的原理是采用最小二乘法原理,使入渗拟合曲线的参数最接近平均值情况的一次实测入渗过程曲线(在 Lotus1-2-3 软件包中进行)。

我们在分析所有的实测降雨入渗曲线后发现,前面介绍的4种入渗模型中,Smith-P 模型是符合实际的,故采用 Smith-P 模型对不同林分(或地类)的典型入渗曲线进行模拟,其结果见表5。

表5 代表性标准地降雨试验($I=1.00\text{mm/min}$)入渗模型参数(Smith-P 模型)

林分 类型		双环试验	实测数据(降雨试验)						模拟模型参数									
			稳渗率 (mm/min)	产流历时 t_p (分·秒)	入渗率(mm/min)			公式 $f_t=f_0+B(t-t_0)^{-n}$				计算累计入渗量			计算产 流历时 (min) t_{p*}	入渗 系数 λ	相对 入渗值	
					12min	30min	120	f_0	B	t_0	n	$t=12$	30	120				
1	刺槐	I	2.00	4 52	0.795	0.641	0.514	0.504	0.837	1.993	0.566	10.56	22.67	75.130	4.514	0.63	1.91	
		II	0.60	10 16	0.891	0.320	0.120	0.118	1.535	7.534	0.655	11.185	20.288	40.582	9.864	0.34	1.03	
2	油松	I	2.2	4 51	0.864	0.747	0.530	0.529	0.700	3.704	0.358	11.539	25.715	87.533	6.729	0.73	2.21	
		II	0.625	5 55	0.759	0.600	0.470	0.468	0.700	4.01	0.517	10.735	22.195	71.722	5.710	0.60	1.82	
3	栎树	I	1.40	1 54	0.848	0.681	0.592	0.409	0.725	0.710	9.245	20.808	75.967	1.728	0.63	1.31		
		II	0.87	2 09	0.610	0.478	0.433	0.428	0.232	2.150	0.507	7.72	14.136	55.170	2.319	0.46	1.39	
4	山杨	I	1.80	3 11	0.822	0.772	0.746	0.738	0.137	3.087	0.705	10.301	23.926	91.011	3.486	0.76	2.30	
		II	3.80	3 26	0.650	0.462	0.439	0.430	2.700	0.865	8.366	16.786	55.480	3.422	0.46	1.39		
5	桦树		9.40	4 20	0.940	0.850	0.760	0.758	0.375	1.392	0.421	11.477	27.094	101.085	4.222	0.84	2.55	
6	侧柏		8.50	2 00	0.762	0.540	0.300	0.296	0.659	1.182	0.252	9.432	20.414	67.574	1.951	0.56	170	
7	落叶松		4.76	5 35	0.702	0.451	0.320	0.319	0.705	4.457	0.260	10.839	22.811	73.059	5.600	0.61	1.85	
8	榿栎		4.50	6 50	0.931	0.910	0.880	0.874	0.100	6.342	0.325	11.735	28.243	109.265	6.833	0.91	2.76	
9	荒草坡	I	0.90	3 33	0.645	0.480	0.200	0.200	1.117	0.756	0.380	9.907	20.089	58.349	3.475	0.49	1.48	
		II	0.20	4 53	0.548	0.200	0.080	0.080	1.466	3.823	0.537	10.233	17.599	39.037	6.004	0.33	1	

注(1):荒草坡 I 为灌草坡;荒草坡 II 为露荒坡;(2):计算产流历时 $t_p = t_0 + [B/(1-f_0)]^{1/n}$ 。

采用 Smith-P 模型中以计算坡面的产流历时和不同时刻的入渗率。由表5可知,从平均入渗系数来看,林地的入渗系数值是对照荒草坡的1.39~2.76。因此,本库区水源保护林在高雨强($I=1.0\text{mm/min}$)和长历时(2h)的降雨中仍有较强的入渗能力,林地有较强的削减暴雨洪水能力。

4 结束语

尽管双环入渗的试验条件与野外降雨条件下的入渗条件截然不同,但因其试验简单,而且更重要的是,其入渗过程几乎只与土壤物理性状(孔隙率、含水量和孔隙形状等)直接有关,而不受土壤表面的枯落物、下层灌草的枝叶等遮挡的影响,也几乎不直接与坡度发生作用,故其指标能单一地反映不同林分(或地类)的土壤入渗性能的相对值。而人工降雨入渗试验则不仅反映了土壤本身的入渗特性(尤其在汇流面积小时),还受林冠地被物、坡度等因子的直接影响,故同时使用2种入渗试验方法,可相互参照以取得可靠的实测数据。

尽管 Horton 模型是纯经验性入渗模型,用它模拟双环入渗过程,其入渗率只具有相对意义,但仍不失为一种评价土壤层入渗能力的有效方法。而 Smith-P 模型能很好地模拟降雨入渗过程。

参考文献

- 王礼先等,森林水文研究及流域治理综述,水土保持科技情报,1990(2)
- D. 希勒尔著,土壤和水—物理过程,华孟军译,农业出版社,1981
- 雷志栋等,土壤水动力学,清华大学出版社,1988
- 康绍忠等,土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用,西北农业大学学报,1992
- 吴长文,一种可用于水土保持林地入渗试验的微型降雨器,南昌水利学报,1992(2)