

黄浦江源头区主要植被类型土壤入渗特征及模拟分析

陈三雄¹, 沈 义²

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广州 510610; 2. 江苏泗阳水利建筑安装工程公司, 江苏 泗阳 223700)

摘 要:采用“双环法”测定了黄浦江源头区不同植被类型土壤渗透过程,并应用考斯恰可夫公式、霍顿公式、菲利浦公式和通用经验公式 4 种常用入渗模型进行了拟合分析。结果表明:(1) 落叶阔叶林土壤平均渗透率最高,达 828.93 mm/h,分别是松林、草地、茶园、灌木林、毛竹林、常阔林、裸露地的 1.27, 1.38, 1.48, 1.48, 1.88, 2.04, 3.76 倍;松林、草地、茶园、灌木林之间,灌木林、毛竹林、常阔林之间渗透性差异不显著;裸露地平均渗透率最低,在 5% 水平下裸露地平均渗透速率显著低于落叶阔叶林、松林等林(草)地平均渗透速率。各林地土壤的渗透能力之间有差异,但都要强于裸露地,表明森林植被能有效改善土壤的渗透能力。(2) 对 8 种不同样地土壤的典型入渗过程进行拟合的结果表明,考斯恰可夫公式和菲利浦公式拟合理想,以考斯恰可夫公式拟合最佳,而霍顿公式、通用经验公式与实测点拟合较差。

关键词:土壤入渗; 入渗模型; 双环法; 植被类型

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0059-05

Simulation Analysis on Soil Infiltration Characteristics Under Main Vegetation Types in Huangpu River Source Region

CHEN Sanxiong¹, SHEN Yi²

(1. Pearl River Water Planning Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou 510610, China; 2. Jiangsu Siyang Water Conservancy Construction and Installation Engineering Company, Siyang, Jiangsu 223700, China)

Abstract: Soil infiltration characteristics under main vegetation types in the source region of Huangpu River were studied by using method of ‘double rings’. Four widely used infiltration models such as Koctakob formula, Horton formula, Philip formula and general empirical formula were used to fit and analyze infiltration patterns. The results showed that: (1) soil infiltration of deciduous broad-leaved forest has the highest permeability, reaching 828.93 mm/h, and has ratios of 1.27, 1.38, 1.48, 1.48, 1.88, 2.04, and 3.76 to pine, grass, tea, shrubbery, bamboo forest, evergreen forest, and bare ground, respectively. Among the other forest types, permeability doesn’t differ between shrubs, bamboo forest, and evergreen forest, while bare ground has the lowest permeability lower than deciduous broad leaf, pine and other forest (grass) under 5% significant level, the soil infiltration capacities of all forest types are better than bare ground, indicating that the forest vegetation can effectively improve soil infiltration capacity; (2) fitting the infiltration processes of eight soil under different vegetation types indicated that Koctakob formula was the best model, followed by Philip formula, Horton formula and general empirical equation.

Keywords: soil infiltration; infiltration model; double rings method; vegetation types

土壤入渗是指降雨落到地面上的雨水从土壤表面渗入土壤形成土壤水的过程,是降水、地表水、土壤水和地下水相互转化过程中的关键一环^[1]。土壤渗透性是描述土壤入渗快慢的极为重要的土壤物理特征参数之一。已有研究表明,在其他条件相同的情况下,径流对土壤的侵蚀能力,除流速外,主要取决于地表径流量的多少,而径流量的多少与土壤透水性能关系密切^[2-3]。土壤渗透性能越好,地表径流就会越少,

土壤的流失量也会相应减少。近年来,许多专家建议将“增加土壤入渗、就地拦蓄降雨径流”作为防治土壤侵蚀的战略决策^[4-5]。因此,土壤对降水的渗透能力是影响土壤侵蚀的重要因素之一^[6],是土壤水文效应评价的重要指标^[7],同时也是实施水土保持规划时必须认真考虑的因素。

黄浦江是上海重要的水源地,被誉为上海的“母亲河”。黄浦江发源于浙江省安吉县龙王山。安吉县

地处浙江省西北部,是一个自然资源丰富的山区特色县,也是我国著名的十大竹乡之一。本文对黄浦江源头区——浙江省安吉县主要植被类型土壤渗透性进行了研究,以期为当地土壤侵蚀防治措施的采取提供可靠依据和科学指导。

1 研究区概况

试验区设在浙江省安吉县。安吉县地处浙江省西北部,位于东经 119°53′—119°14′,北纬 30°52′—30°23′,总面积 1 886 km²,其中丘陵山地 940. 05 km²,占总面积的 49. 84%。位于北亚热带季风区,年平均气温 15℃,极端最高气温 40. 8℃,极端最低气温 -17. 4℃,年平均降雨量 1 350 mm,≥10℃的积温为 4 934. 1℃,无霜期 226 d。安吉属中亚热带常绿阔叶林北部亚地带青冈、苦槠植被区,天然植被有青冈、苦

槠常绿阔叶林、马尾松、针阔混交林、竹林以及灌丛植被。人工植被有国外松林、马尾松林、杉木、湿地松及经济林。安吉有林地面积 109 875. 2 hm²。绝大部分森林分布于低山丘陵地带,土壤主要是发育于酸性岩浆岩和沉积岩的红壤土类。

2 研究方法

2.1 样地选择

试验地位于安吉县龙王山自然保护区内,选择有代表性的植被类型:毛竹林、灌木林、落叶阔叶林(简称落阔林)、湿地松、火炬松林(简称松林)、青冈—苦槠常绿阔叶林(简称常阔林)、茶园和草地(表 1)。每种类型各设样地 3 块,裸露地设为对照。各样地土壤、气候等条件基本一致,所在区域由于管护到位,人为干扰少,植被保存较好。

表 1 样地基本情况

样地类型	毛竹林	松林	常阔林	茶园	灌木林	落阔林	草地	裸露地
起源	天然林	人工林	天然林	人工林	天然林	天然林	天然	—
林龄/a	4	23	22	12	20	60	—	—
密度/(株·hm ⁻²)	2476	1300	970	16667	5797	775	—	—
平均胸径/cm	10. 12	21. 58	15. 62			20. 41	—	—
平均树高/m	8. 4	17. 2	9. 14		2. 7	10. 5	—	—
郁闭度/%	70	70	60	60	90	50	100	—
坡度	25°	24°	25°	20°	22°	26°	17°	17°
坡位	中	中	中下	中	中上	中上	下	下
坡向	SE	SE	SE	SW	S	SW	S	S

2.2 土壤渗透性测定

在各种植被类型样地内选择典型地段(离道路、桥梁、林缘较远,人为干扰较少的地方),设置 20 m×20 m 的标准样地,采用“双环法”测定土壤渗透性能。双环外环直径 60 cm,内环 30 cm。在样地内坡面局部相对平坦地点(或略加平整,尽可能少扰动表层土壤),用木锤将内环、外环按照同一圆心打入土中,入土深度 10 cm。将测针固定在内环迎光处,以测针针尖为固定标志,对内外环加水,保持内外环水面大致相等。每隔一段时间间隔观察内环水位,并加水至针尖,记

录内环加水量,直至单位时间内加水量趋于稳定。

2.3 土壤入渗模型

合适的人渗模型是研究土壤渗透规律、评价森林植被保持水土及涵养水源功能的重要手段。多年来,世界各国学者对土壤水分运动机制和过程进行了大量的研究,通过确定某些参数与土壤特征之间的关系,建立土壤入渗模型。较为常用的模型有考斯恰可夫(Koçtakob)公式、霍顿(Horton)公式、菲利浦(Philip)公式和通用经验公式等^[8-11]。各模型表达式及参数见表 2。

表 2 4 种常用入渗模型一览表

模型名称	入渗率表达式	参数说明
考斯恰可夫公式	$f(t)=at^{-b}$	$f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; a 、 b 为试验求得的参数
霍顿公式	$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$	$f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; f_0 为初渗率; f_c 为稳渗率; k 为试验求得的参数
菲利浦公式	$f(t)=\frac{1}{2}At^{-\frac{1}{2}}+B$	$f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; A 、 B 为试验求得的参数。
通用经验公式	$f(t)=a_1+b_1t^{-n}$	$f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; a_1 、 b_1 、 n 为试验求得的参数(a_1 相当于稳渗率)。

2.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel,SAS 软件进行处理和分析。

3 结果与分析

3.1 不同样地土壤渗透性

各样地土壤不同时刻实测渗透速率见图 1。为

探讨各样地土壤渗透速率的差异性,对各样地土壤渗透速率进行方差分析,在 5% 水平下,Prob>F 概率为 0.000 1,表明各样地土壤渗透性存在显著差异,这主要是因为各样地中影响土壤渗透性的主导因素如容重、有机质、总孔隙度有所不同。为进一步分析差异来源,进行多重比较,结果见表 3。可知,落阔林土壤渗透性与其他 7 种样地有显著差异,落阔林在前 180 min 内的平均渗透速率最高,达 828.93 mm/h,分别是松林、草地、茶园、灌木林、毛竹林、常阔林、裸露地的 1.27、1.38、1.48、1.48、1.88、2.04、3.76 倍;松林、草地、茶园、灌木林、毛竹林、常阔林在前 180 min 内的平均渗透速率分别为 654.13、601.61、560.29、559.78、439.88、405.94 mm/h,松林、草地、茶园、灌木林之间,灌木林、毛竹林、常阔林之间差异不显著;裸露地在前 180 min 内的平均渗透速率为 220.20 mm/h,在 5% 水平下裸露地平均渗透速率显著低于落阔林、松林等林(草)地平均渗透速率。

3.2 不同样地土壤入渗过程的拟合

采用考斯恰可夫(Koctakob)公式、霍顿(Horton)公式、菲利浦(Philip)公式和通用经验公式 4 种入渗模型,

分别对 8 种不同土地利用类型土壤的入渗过程利用 SAS 软件进行拟合分析,模型参数及拟合结果见表 4。

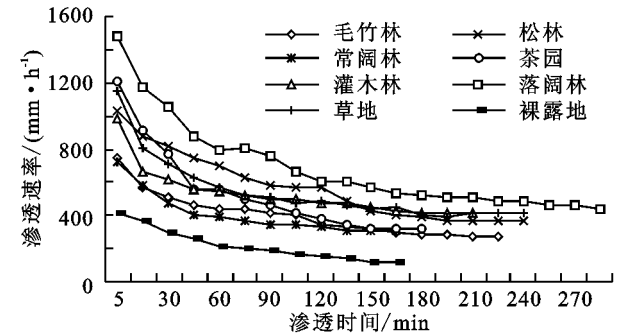


图 1 各样地土壤渗透过程

表 3 各林地土壤渗透性多重比较结果

样地类型	平均值/(mm·h ⁻¹)	样本数	组别
落阔林	828.93	12	A
松林	654.13	12	B
草地	601.61	12	B
茶园	560.29	12	B
灌木林	559.78	12	BC
毛竹林	439.88	12	C
常阔林	405.94	12	C
裸露地	220.20	12	D

表 4 入渗模型参数拟合结果

入渗模型	公式参数	林地类型							
		毛竹林	松林	常阔林	茶园	灌木林	落阔林	草地	裸露地
考斯恰可夫公式	<i>a</i>	1263.6	2102.7	1124.5	2586.8	1309.7	2898.5	1744.3	929.63
	<i>b</i>	0.2727	0.3063	0.2593	0.3977	0.2163	0.3246	0.2718	0.3729
	<i>R</i> ²	0.9433	0.8778	0.9945	0.9709	0.9725	0.9707	0.9877	0.9225
	Prob> <i>F</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	<i>f</i> _c	273.04	363.17	303.63	324.64	409.55	437.02	413.55	121.47
霍顿公式	<i>f</i> ₀ − <i>f</i> _c	962.90	2317.3	796.95	2528.49	756.13	1829.1	1054.1	687.59
	<i>k</i>	0.0274	0.0315	0.0401	0.0453	0.0271	0.0202	0.0289	0.0356
	<i>R</i> ²	0.6953	0.7346	0.7287	0.7933	0.7492	0.8027	0.8664	0.6148
	Prob> <i>F</i>	0.0001	0.0001	0.0008	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0043
	<i>A</i>	1263.7	3766.9	2382.7	5035.8	2916.9	5899.9	3972.4	1671.3
菲利浦公式	<i>B</i>	0.2727	330.28	225.10	174.92	331.89	334.77	291.32	93.35
	<i>R</i> ²	0.9433	0.7790	0.9718	0.9481	0.9794	0.9072	0.9824	0.8613
	Prob> <i>F</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
通用经验公式	<i>a</i> ₁	273.04	363.17	303.63	324.64	409.55	437.02	413.55	121.47
	<i>b</i> ₁	18183	30664	18093	102837	13679	87497	35769	8645
	<i>n</i>	1.3499	1.5943	1.5451	1.8317	1.3078	1.4879	1.5191	1.3113
	<i>R</i> ²	0.4258	0.4185	0.4954	0.5031	0.5037	0.5174	0.5794	0.3819
	Prob> <i>F</i>	0.0084	0.0068	0.0156	0.0098	0.0045	0.0002	0.0016	0.0427

由表 4 可知,不同土地利用类型土壤考斯恰可夫入渗公式参数 *a* 变化范围为 929.63~2 898.51,最小值出现在裸露地上,最大值出现在落阔林上;*b* 变化在 0.216 3~0.397 7,它反映了入渗速率的递减情况,*b* 值越大,入渗速率随时间递减越快,可以看出,茶园、裸露地入渗速率减小较快,灌木林地减小较慢。

霍顿公式拟合结果表明,稳渗率 *f*_c 变化在 121.47~437.02,最大值出现在落阔林上,最小值出现在裸露地上;*K* 值变化在 0.020 2~0.045 3,裸露地、茶园、常阔林地入渗速率减少较快,落阔林、灌木林地入渗速率减少较慢;*f*₀−*f*_c 变化在 687.59~2 528.49,裸露地的入渗率最小,而落阔林、茶园、松林表现出较强

的入渗性能。在通用经验式中, a_1 实际上相当于稳渗率, a_1 值最大的是落阔林, 其次为草地和灌木林, 最小的为裸露地。菲利普公式拟合结果表明, A 值变化在 1 671.3~5 899.9, 其最小值出现在裸露地, 最大值出现在落阔林地。

3.3 不同样地土壤入渗模型拟合程度评价

为了表述上述 4 种入渗公式与实测值之间的拟合程度, 将不同试验地入渗公式的拟合值与实测值进行比较(图 2)。由图 2 可以看出, 入渗初期, 渗透速率变化较为剧烈, 然后逐步趋于平缓, 最后达到稳定,

趋向一个恒定值。这一过程大致可以将土壤入渗过程分为瞬变阶段(0~15 min), 入渗渐变阶段(15~120 min)以及入渗稳定阶段(120 min 以后)。根据图中所示, 把拟合程度分为好(用++表示)、较好(用+表示)、差(用-表示)3 个等级来进行定性评价^[12], 结果见表 5。从表 5 中可以看出, 在瞬变阶段与渐变阶段, 考斯恰可夫公式和菲利普公式拟合较好, 而霍顿公式、通用经验公式拟合不理想; 在稳定阶段, 考斯恰可夫公式、霍顿公式、菲利普公式、通用经验公式 4 个公式与实测点都拟合较好。

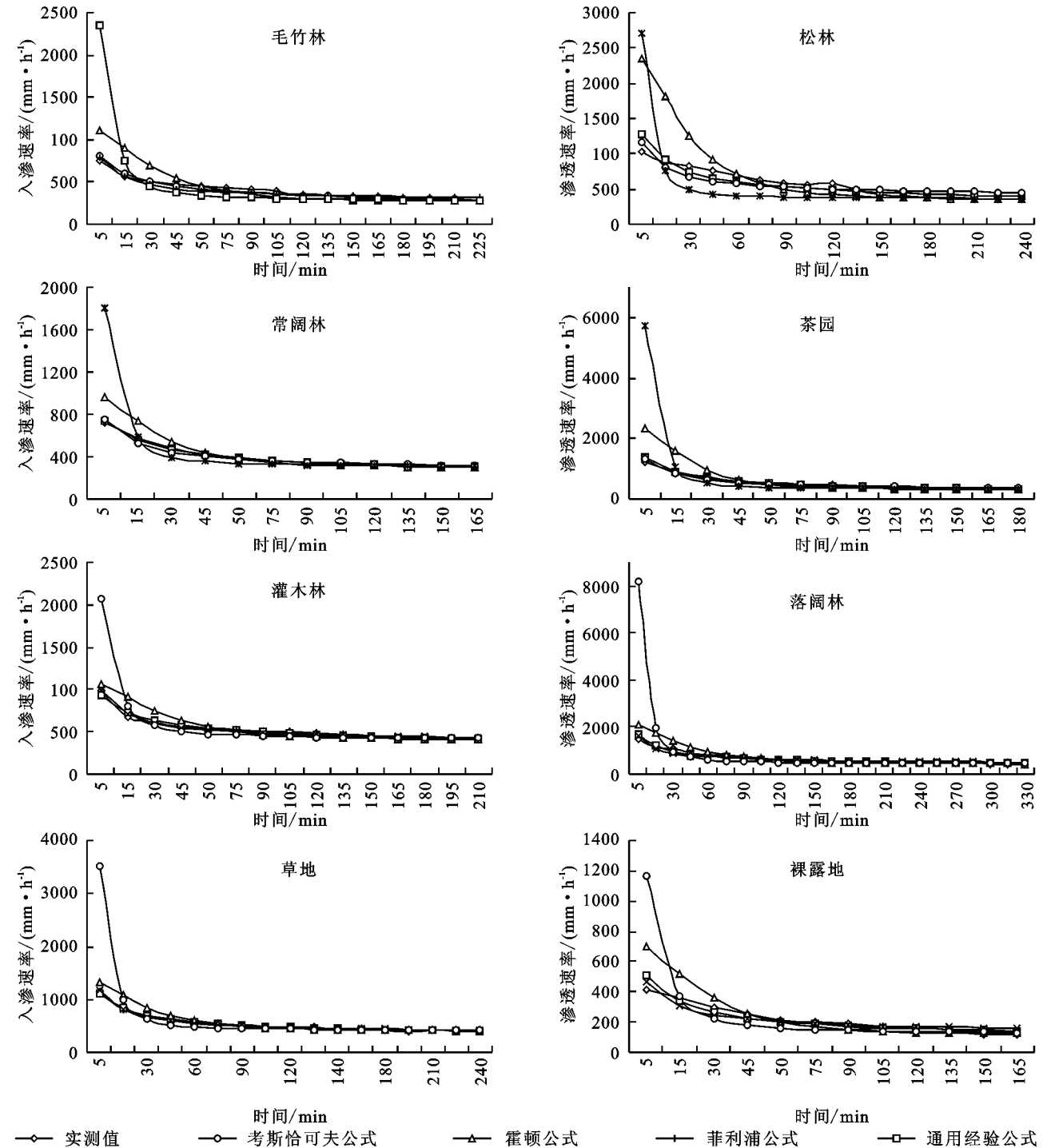


图 2 各样地 4 种入渗模型拟合比较

表 5 入渗公式与实测点拟合评价

样地类型	考斯恰可夫公式			霍顿公式			菲利浦公式			通用经验公式		
	瞬变阶段	渐变阶段	稳定阶段	瞬变阶段	渐变阶段	稳定阶段	瞬变阶段	渐变阶段	稳定阶段	瞬变阶段	渐变阶段	稳定阶段
毛竹林	++	++	++	—	—	+	++	++	++	—	—	+
松林	+	+	++	—	—	+	+	+	++	—	—	+
常阔林	++	++	++	—	—	+	++	++	++	—	—	+
茶园	++	++	++	—	—	++	++	++	++	—	+	++
灌木林	++	++	++	+	+	++	++	++	++	—	+	++
落阔林	++	++	++	+	+	++	++	++	++	—	+	++
草地	++	++	++	+	+	++	++	++	++	—	+	++
裸露地	+	+	++	—	—	++	++	++	++	—	—	++

注:++表示拟合程度好,+表示拟合程度较好,—表示拟合程度差。

另外,由表 4 可知,8 个样地土壤入渗参考斯恰可夫公式拟合因子决定系数 R^2 为 0.877 8~0.994 5,模型精度检验概率 $\text{Prob}>F$ 为 0.000 1;菲利浦公式拟合因子决定系数 R^2 为 0.779 0~0.982 4,模型精度检验概率 $\text{Prob}>F$ 为 0.000 1;霍顿公式拟合因子决定系数 R^2 为 0.614 8~0.866 4,模型精度检验概率 $\text{Prob}>F$ 为 0.000 1;通用经验公式拟合因子决定系数 R^2 在 0.381 9~0.579 4 之间,模型精度检验概率 $\text{Prob}>F$ 为 0.000 2~0.042 7。综合 4 个人渗模型参数拟合结果中的因子决定系数 R^2 ,模型精度检验概率 $\text{Prob}>F$ 及图 2,考斯恰可夫公式和菲利浦公式拟合理想,以考斯恰可夫公式拟合最佳,而霍顿公式、通用经验公式与实测点拟合较差。

4 结论

(1) 落阔林土壤平均渗透率最高,达 828.93 mm/h,分别是松林、草地、茶园、灌木林、毛竹林、常阔林、裸露地的 1.27,1.38,1.48,1.48,1.88,2.04,3.76 倍;松林、草地、茶园、灌木林之间,灌木林、毛竹林、常阔林之间渗透性差异不显著;裸露地平均渗透率最低,在 5%水平下裸露地平均渗透速率显著低于落叶阔叶林、松林等林(草)地平均渗透速率。这主要是因为各样地中影响土壤渗透性的主导因素如容重、有机质、总孔隙度有所不同。落阔林地有机质丰富,根系发达,土壤通透性好,渗透能力极强。裸露地土壤较紧实,土壤结构较差,土壤通透性不佳,渗透能力弱。各林地土壤的渗透能力之间有差异,但都要强于裸露地,表明森林植被能有效改善土壤的渗透能力。

(2) 对 8 种不同样地土壤的典型入渗过程进行拟合的结果表明,考斯恰可夫公式和菲利浦公式拟合

理想,以考斯恰可夫公式拟合最佳,而霍顿公式、通用经验公式与实测点拟合较差。

参考文献:

[1] 解文艳,樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(4):381-384.

[2] 王秀英,曹文洪. 水土保持措施下的土壤入渗研究及次暴雨地表产流计算方法[J]. 泥沙研究,1996(6):79-83.

[3] 牛云,刘贤德,张虎,等. 祁连山水源涵养林土壤渗透功能的分析与评价[J]. 西北林学院学报,2001(S):35-38.

[4] 陈丽华,余新晓. 晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究[J]. 北京林业大学学报,1995,17(1):42-47.

[5] 董三孝. 黄土丘陵区退耕坡地植被自然恢复过程及其对土壤入渗的影响[J]. 水土保持通报,2004,24(4):1-5.

[6] 张启昌,陈真,于春玲. 黄土低山丘陵区土壤渗透过程的研究[J]. 吉林林学院学报,1997,13(1):45-48.

[7] 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.

[8] 王经民,吴钦孝,韩冰,等. 陕北黄土区土壤入渗模型的比较探讨[J]. 农业系统科学与综合研究,2004,20(4):288-290.

[9] 韩冰,吴钦孝,李秧秧,等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J]. 防护林科技,2004(5):1-3.

[10] 康绍忠,张书函,聂光镛,等. 内蒙古敖包小流域土壤入渗规律的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):38-46.

[11] 高人,周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 农村生态环境,2002,18(4):1-4.

[12] 陈建刚,李启军,侯旭峰,等. 奶水河流域不同植被覆盖条件下土壤入渗及模型的比较分析[J]. 中国水土保持科学,2004,2(3):22-26.