

森林土壤渗透系数的数学模型

裴铁璠 孙纪政 卢凤勇 迟振文

(中国科学院林业土壤研究所)

李文秀

(辽宁省水利科学研究所)

提 要

通过森林土壤渗透系数试验,应用数量化理论(I)建立了森林土壤渗透系数的数学模型。影响森林土壤渗透系数的第一位因子是土壤质地与容重的交互作用,其次为土壤质地、容重、含根量、容重与含根量的交互作用。数量化理论(I)可用于大面积森林土壤渗透系数的估算,其精度较高。

渗透是水流经多孔介质的现象,渗透系数是土壤中水呈层流状态,水力梯度等于1时的渗透速度。森林土壤的渗透是森林水量平衡中必不可少的一项,它为森林生态系统的水收支、洪水预报、水土保持及水资源的合理开发利用提供必要的科学依据。过去国内外关于这方面的研究很多,也建立了不少数学模型,但多数用于土工试验或耕层土壤渗透系数的估算,对于大面积森林土壤渗透的预测,尚无比较合适的数学模型。已往,计算土壤的渗透系数通常用达西公式,然而,达西公式用来计算森林土壤的渗透系数,误差较大,其原因:森林土壤的渗透系数不但与土壤质地、土壤容重、土壤空气含量、降雨强度及渗入水温度、纯度有关,还依赖于森林植被种类及土壤的含根量。由于森林植被及土壤含根量随林分及地域变化较大,因此,用达西公式计算森林土壤的渗透系数,势必因采样差异带来较大误差。为了克服达西公式在这方面的局限性,并对森林土壤的渗透系数进行预测,我们对长白山自然保护区不同类型的森林土壤做了渗透试验,利用具有交互作用的数量化理论(I)对试验结果进行分析,并建立了数学模型。

一、采样、试验方法及结果

1、**采样**。1980年8月,我们在吉林省长白山自然保护区内四个不同类型林下及高山苔原、高山荒漠随机采集了21个土样,见表1。

2、**试验方法及结果**。根据土工试验规程,对全部土样测定了饱和渗透系数,测定方法因土而异,粘土用南55型渗透仪法,砂土用70型渗透仪法,细砂土用卡明斯基管法

表 1 采样地的自然状况

样本号	采样地 标准地 号	土 类	林 型	林龄	郁闭度	代 表 植 物
1	1	粘质粉砂土	灌木阔叶红松林	160	第一层 0.8	乔木：红松、椴树、槭树
2	1	"	"	160		
3	1	"	"	160		
4	1	粘质粉砂土	灌木阔叶红松林	160	第二层 0.4	下木：毛榛子、东北溲疏、 东北茶藨、刺五加
5	1	"	"	160		
6	1	"	"	160		
7	1	"	"	160		
8	1	粘质粉砂土	灌木阔叶红松林	160	第三层 0.4	草本：山茄子、透骨草、 麻子、水金凤、蕨类、苔 草
9	1	"	"	160		
10	1	"	"	160		
11	1	均一粘土(白浆土)	"	160		
12	1	均一粘土(黄土)	"	160		
13	3	含砾砂细粒土	苔藓红松云杉林	160	0.85	红松、云冷杉、槭树、蔷薇、 卫矛、槭桔、羊胡子、苔草
14	3	含细粒土砂	苔藓红松云杉林	160		
15	5	微含细粒土砾	苔藓岳桦云杉林	160	0.93	鱼鳞云杉、红皮云杉花楸 忍冬、蔷薇、星叶兔耳伞、 类叶牡麻
16	6	含细粒土砾	高草岳桦林	80	0.6	乔木：岳桦 草本：星叶兔耳伞
17	6	含砾砂细粒土	"			
18	9	含砾砂细粒土	苔原		1	牛皮杜鹃、槭桔、笃斯
19	9	"	"			
20	9	含细粒土砂	"			
21	10	微含细粒土砂	荒漠		0	无

(试验结果见表 2)。

二、渗透系数的数学模型

渗透是土壤的一种力学特性，它依赖于土壤质地、构造、植被类型、土壤小气候及渗透水的纯度和温度。这些因子中，一种是非数量因子，一种是数量因子。为了比较准确地定量表述诸因子对渗透系数的作用，我们应用数量化理论 (I) 来探讨这个问题。数量化理论 (I) 通常用下面两式表示：

$$\hat{X}'Xb = \hat{X}'Y \quad (1)$$

$$\hat{Y}_i = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) \hat{b}_{jk} \quad (2)$$

表2 土样渗透系数、容重、颗分测定结果

样本号	渗透系数		粒 径							小 (毫米)			分 类 名 称	
	干容重 克/立方厘米	K _v 厘米/秒	>20 (%)	20-10 (%)	10-5 (%)	5-2 (%)	2.0-0.5 (%)	0.5-0.25 (%)	0.25-0.10 (%)	0.10-0.05 (%)	0.05 (%)	0.005 (%)		<0.005 (%)
1	0.41	5.51×10 ⁻⁶												粘质粉砂土
2	0.56	9.92×10 ⁻⁶												"
3	0.60	1.80×10 ⁻⁵												"
4	0.35	1.39×10 ⁻⁴												"
5	0.66	2.35×10 ⁻⁵												"
6	0.70	5.10×10 ⁻⁵												"
7	0.73	1.27×10 ⁻⁴												"
8	0.64	1.53×10 ⁻⁴												"
9	0.72	5.10×10 ⁻⁵												"
10	0.50	1.53×10 ⁻⁴												"
11	1.70	9.83×10 ⁻⁷												"
12	1.66	1.09×10 ⁻⁷												"
13	0.92	2.66×10 ⁻⁴												均一粘土 (白浆土)
14	1.12	4.92×10 ⁻⁴	1	2	7	7	17	8	10	25	28	5	5	均一粘土 (黄土)
15	1.31	1.12×10 ⁻³		7	12	31	19	8	8	20	16	1	1	含砾砂细粒土
16	1.64	1.51×10 ⁻⁴	6	11	15	15	31	10	4	5				含细粒土砂
17	1.15	1.05×10 ⁻³	4	8	8	9	9	5	11	8	20			微含细粒土砾
18	0.44	7.8×10 ⁻³					10	4	7	17	29			含砾砂细粒土
19	0.58	8.42×10 ⁻³												含砾砂细粒土
20	1.00	2.07×10 ⁻³												含砾砂细粒土
21	1.39	2.34×10 ⁻⁴	5	10	13	25	20	8	28	5	10	9	9	含砾砂细粒土
														微含细粒土砾

※按土工试验规程分类。

式中:

\hat{Y}_i 为 Y_i 的估算值;

b_{jk} 为类目得分;

$\delta_i(j, k)$ 为 j 项目之友类目在 i 个样本中的反应;

$\delta_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 个样本中 } j \text{ 项目定性数据为类目时} \\ 0 & \text{否则;} \end{cases}$

X 为自变量的反应矩阵;

X' 为 X 的转置矩阵;

b 为系数矩阵;

Y 为因变量矩阵。

表 3

土壤饱和和渗透系数数量化反应表

样本号	渗透系数 反 应 $10^4 Y_i$	土壤种类		容重 (g/cm^3)		含根量 (%)		土壤种类 × 容重				$10^4 Y_i$			
		精	砂	0.6 以下	0.61 -1.1	1.1 以上	2.5 以下	2.5 以上	1-2	3-4	5-6	1-2	3-4	无交互作用	有交互作用
1	0.51	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	12.26	1.12
2	0.992	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	12.26	1.12
3	0.180	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	5.53	0.87
4	1.390	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	12.26	1.12
5	0.235	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	-21.91	0.37
6	0.510	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	5.53	0.87
7	1.270	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	5.53	0.87
8	1.530	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	5.53	0.87
9	0.510	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	-21.91	0.37
10	1.530	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	12.26	1.12
11	0.00983	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	-9.31	5.46
12	0.00109	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	-9.31	5.46
13	2.660	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	24.65	11.68
14	4.920	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	9.82	6.09
15	11.200	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	9.82	6.09
16	1.510	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	9.82	6.09
17	10.500	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	9.82	6.09
18	78.000	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	58.82	81.10
19	84.200	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	58.82	81.10
20	20.700	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	24.65	11.68
21	2.340	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	9.82	6.09
		1	2	0	3	4	0	5	0	6	7	0	8		

根据上述理论，把影响我们渗透试验的因子分为5个项目12个类目，列出反应表（表3）把反映表数值代入正规方程组（1），上机计算结果：

未考虑交互作用的渗透系数

$$\hat{Y}_i = [39.6943\delta_i(1.1) + 58.8179\delta_i(1.2) - 34.1665\delta_i(2.2) - 48.9996\delta_i(2.3) - 27.4356\delta_i(3.2)] \times 10^{-4} \text{ (cm/sec)} \quad (3)$$

考虑交互作用的渗透系数

$$\hat{Y}_i = [25.2073\delta_i(1.1) + 81.1000\delta_i(1.2) - 24.3348\delta_i(2.2) - 3.7082\delta_i(2.3) - 24.0915\delta_i(3.2) - 45.0852\delta_i(4.2) - 94.8894\delta_i(4.3) + 23.5915\delta_i(5.2)] \times 10^{-4} \text{ (cm/sec)} \quad (4)$$

用方程（3）、（4）预测森林土壤的饱和渗透系数，其精度如何需要检验，通常用复相关系数 \hat{K}_{YY} （ \hat{Y} 和 Y 之间的样本相关系数 \hat{K}_{YY} ）和剩余标准差 S 来衡量；

$$\text{未考虑交互作用 } \hat{K}_{YY} = 0.838, S = 13.405 \times 10^{-4};$$

$$\text{考虑交互作用 } \hat{K}_{YY} = 0.988, S = 3.74 \times 10^{-4}.$$

后者复相关系数0.988，毋庸置疑，估算值和实测值 Y 的关系相当密切。此外，从剩余标准差可知，用方程（4）估算出的渗透系数，有95%的误差不超过 7.48×10^{-4} （2S）厘米/秒，由此看来，预测精度是比较高的。为了比较每个项目单独对渗透系数的贡献，我们用方差比和得分范围参照比较，项目的方差比和得分范围越大，说明它对渗透系数的贡献，我们用方差比和得分范围参照比较，项目的方差比和得分范围越大，说明它对渗透系数的贡献越大，方差比为

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{(i)} - \bar{X}^{(i)})^2}{\sum_{i=1}^{r_i} (Y_i - \bar{Y})^2}$$

$$\text{其中 } X_i^{(i)} = \sum_{k=1}^{r_i} \delta_i(j, k) \hat{b}_{j, k}$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

$$j = 1, 2, \dots, m.$$

得分范围即项目中 $b_{jk_{n..}} - b_{jk_{n..}}$ ，其结果详见表4。从表4可见，方差比和得分范围趋势一致，土壤质地与容重的交互作用对渗透系数的影响是第一位因子，其次是土壤质地。

表 4

各项目的方差比及得分范围

项 目	土壤质地	容 重	含 根 量	土壤质地×容量	容量×根量
方差比	1.399	0.219	0.217	3.707	0.916
得分范围	55.79	24.33	24.09	94.89	23.59

三、问题讨论

1、如上所述,土壤的渗透系数依赖于许多因子。过去有许多关于土壤渗透的数学模型,其中最有名的是达西定律(1852年):

$$K = QL/ Ath \quad \text{或} \quad V = Ki$$

还有Crank公式(1956年):

$$i = \frac{1}{2} (Q_0 - Q_1) \sqrt{\frac{D}{\pi t}}$$

$$I = (Q_0 - Q) \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$$

沙马林公式:

$$K = 800 \frac{P^3 d_e^2}{(1-p)^2} \quad 2 \text{ (cm/24小时)},$$

霍顿公式: $f = f_0 + (f_1 - f_0)e^{-Kt}$ (英寸/分) 等等。

关于达西定律,在文章开始已作介绍,此不赘述;Crank公式中平均扩散率D难以准确确定;沙马林公式中 d_e —土壤颗粒有效直径确定误差比较大;霍顿公式中决定了 f_0 和 f_1 的困难。我们用数量化理论(I),从影响渗透系数诸因子中选取了土壤质地、容重、含根量以及它们之间的交互作用,尽管忽略了一些因子,但仍然得到比较满意的拟合情况。

($KYY = 0.988$, $S = 3.74 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)。这是因为,我们抓住了在渗透中起主要作用的土壤质地与容量的交互作用这项非数量因子,把它数量化,纳入渗透方程。土壤的渗透系数与土壤质地、容重密切相关,一般说来,渗透系数砂土大于粘土,并且它与土壤容重成负相关。因此,土壤质地同容重的交互影响致使容重比较小的砂土最易于渗透,这与我们的试验结果完全一致。

2、渗透按土壤含水量饱和渗透和非饱和渗透。除潮湿地区外,一般情况下,土壤处于非饱和状态。在非饱和状态下,只要降雨强度不大于渗透速度,就不产生径流。

由此看来，我们所研究的饱和状态下的渗透系数对于了解林区降雨产生径流及土壤侵蚀具有实际意义。按土壤剖面分同一土壤的渗透和不同土壤的分层渗透。我们所做的是前一种，它只能代表分层土壤中一个层次的渗透，具有局限性。Hanks、Bowers、Miller和Gardner于1962年研究了分层渗透问题，他们介绍，尽管土壤剖面制作均匀，有连续的基质吸力和水力势值，但湿度值和传导系数在层间界限处能出现突然中断。关于森林土壤的分层渗透问题，有待今后进行探讨。

3、森林土壤比裸露土壤易于渗透。见表5

土 质	森林土壤 (厘米/秒)	裸露土壤 (厘米/秒)
粘 质 土	8.7×10^{-6}	$10^{-6} - 10^{-7}$
粘 土	5.5×10^{-7}	$< 10^{-7}$

其原因：（1）降雨落到林冠，其中一部分被截留（截留量与林冠郁闭度、降雨强度、持续时间距前一次降雨时间及树种有关），另一部分与枝叶碰撞后下落，其中一部分被下木和草本所截留，余者落到地面，因此，雨滴速度大大减低，不会改变表层土壤的疏松状况，雨水容易渗入。反之，雨滴毫无阻拦地打到裸露土壤上，造成土粒飞溅的冲击力要比上述情况作用力大一千倍到一万倍；（2）森林土壤上面覆盖着枯枝落叶层，它腐烂并混入土壤中，使土壤里含有丰富的腐殖质，又由于根系、土壤动物、微生物的作用使土壤表层粗大孔隙增加（通常孔隙占60—70%），并形成稳定的团粒结构。此外，由于地上长有树木草本，根系深入地下，也促使土壤变松，使降雨非常容易渗入。渗入量与植被类型及土壤含根量有关（植被类型与渗入量关系有待今后探索）。据日本学者竹下敬司（1978年）介绍，在温带森林里，发育良好的土壤每分钟可以渗入100毫米的雨量。

四、结 论

1、长白山自然保护区森林土壤饱和渗透系数的数学模型为

$$Y_i = [25.2073\delta_i(1.1) + 31.1000\delta_i(1.2) - 24.3348\delta_i(2.2) - 3.7082\delta_i(2.3) - 24.0915\delta_i(3.2) - 45.0852\delta_i(4.2) - 94.8894\delta_i(4.3) + 23.5915\delta_i(5.2)] \times 10^{-4} \text{ (cm/sec)} ;$$

2、根据我们所测，影响森林土壤饱和渗透系数的第一位因子是土壤质地与容重的交互作用，其次顺序为土壤质地、容重、含根量、容重与含根量的交互作用；

3、数量化理论（I）可用于森林土壤渗透速度的预测，方法简便，精度较高（我们求得 K_{YY} 为0.988）。

利用单张航片的影象 转绘规划底图初探

徐 国 礼

(中国科学院西北水土保持研究所)

一、前言

黄土丘陵区,在航片上地类界线比其他类型区更为详细而明显。利用航片影象转绘规划底图,已成为水土保持综合规划工作者共同关心的问题。本文介绍用单张航片描绘的土地类型图与航测地形图相应点分别组成的几何图形,以航测地形图水系交叉点为控制,放大到规划底图所需要的比例尺作为控制图形,按网格法将地类界线转绘到控制图形内。方法简便,速度快,基本上满足规划底图对地类界线及量算面积等精度的要求。

A MATHEMATICAL MODEL OF INFILTRATION COEFFICIENT OF FOREST SOIL

Pei Tiefun Sun Jizheng Lu Fengyoun Chi Zhenwen

(Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica)

Li wenxiu

(Liaoning Provincial Institute of Water Conservancy Science)

ABSTRACT

We collected 21 soil samples from different forest soil in Chang Bai Mountain and built a mathematical model on infiltration coefficient of forest soil under saturation with theory (I) of quantification. Results are following:

1. The mathematical model about infiltration coefficient of forest soil under saturation is drawn;

2. First factor, which affects the infiltration is the interaction between soil texture and soil unit weight. According to the importance of other factors, we have soil texture, unit weight, root quantity in soil and interaction between the last two;

3. Theory (I) of quantification could be used easily with higher precision for estimating infiltration coefficient of forest soil under saturation.