

入渗速度的前期土壤含水量的校正

在研究不同植被类型、不同人为活动对土壤的涵养水源作用影响时，常应用“入渗速度”的比较。目前，作入渗速度试验时的水体温度校正已考虑到了，但前期土壤含水条件的校正却易被忽略。如不注意这一点，入渗速度的比较便失去了共同基础，所得结论也会出现偏差甚至错误。

本文试图建立一种新途径，将不同前期土壤含水条件下所测得的入渗速度换算到同一基础上来，以便进行正确比较。

一、Horton入渗方程

入渗速度随入渗时间变化的规律，常用Horton入渗方程表示¹⁾：

$$f = f_c + (f_i - f_c)e^{-k_1 t_1} \quad (1)$$

f 为 t_1 时的入渗速度； f_i 为 $t_1 = 0$ 时的入渗速度，亦即入渗能力； f_c 为稳渗速度； k_1 为消退指数； t_1 为影响土层含水深度(为0时)的入渗时间。式(1)可分解为 f_1 和 f_2 两部分：

$$f = f_1 e^{-k_1 t_1} + f_c (1 - e^{-k_1 t_1}) = f_1 + f_2 \quad (2)$$

f_1 为影响土层的吸水强度，其下渗量为影响土层含水深度的增量，随含水深度增加而减小，当影响土层达到最大含水深度 I_m 时 f_1 趋于0； f_2 为影响土层向深层排出的排水强度，开始为0，随含水深度的增加而增大，待土层饱和时 f_2 趋于 f_c 。

由于 f_2 不是影响土层的含水深度增量，所以影响土层含水深度 W_1 为：

$$W_1 = \int_0^{t_1} f_1 dt_1 = \int_0^{t_1} f_i e^{-k_1 t_1} dt_1 = \frac{f_i}{k_1} (1 - e^{-k_1 t_1}) \quad (3)$$

影响土层最大含水深度 I_m 为：

$$I_m = \int_0^{\infty} f_1 dt_1 = \int_0^{\infty} f_i e^{-k_1 t_1} dt_1 = \frac{f_i}{k_1} \quad (4)$$

由于入渗实验一般都不在前期含水深度为0时开始，所以不能直接把观测数据按上述公式拟合或分析处理。

二、Horton入渗方程的拟合和应用

1. 实验数据的拟合 一般常用优化计算²⁾或别的方法，对充分供水条件下的入渗数据拟合出实测入渗方程：

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (5)$$

f_0 为初渗速度； k 为实测消退指数； t 为实测入渗时间。

2. 影响土层深度的确定 在入渗前，应分层测出土壤含水率和饱和持水率，然后求出土壤含水饱和和差值的土层深度累积曲线。考虑到含水率较低时土层的排水强度 f_2 很小，可认

本文于1988年1月23日收到。

1) 曾代球等，1981，论非饱和产流的计算方法，水文，1:1-5。

2) 范鸣玉等，1982，最优化技术基础，清华大学出版社，156-171。

为 f_0 由影响土层的吸水强度 f_1 组成，这样可由 f_0 和 k 值按式(4)求出实验达到稳渗时影响土层含水深度的增量($\Delta W_d = f_0/k$)。将 ΔW_d 值与饱和差值深度累积曲线相比较，两者相等的一点所对应的土层深度即为该测试点的影响土层深度，其对应的饱和持水深度即为影响土层最大含水深度 I_m 。

3. 入渗方程的转化 k 值受土层前期含水率影响，一般随含水率的增加而增大；当含水率低时增加缓慢；含水率高时增加迅速。

在前期含水率较低时，为推导方便，可忽略 k 值所受影响。这时，前期含水条件不同的同一测点的两条入渗曲线[式(1)和式(5)]之间的关系可用图1表示。

图中的阴影面积表示影响土层的前期含水深度值 W_d 。若从 $t_1 = 0$ 时开始入渗实验，影响土层含水深度增加到 W_d 时所需的入渗时间为 Δt 。因入渗实验一般在 $W_d > 0$ 时开始，实际计数的入渗时间起点为 O 。为使比较基础相一致，需把实测数据拟合式(5)转化为式(1)。转化时 f_c 值不变。由图1可知：

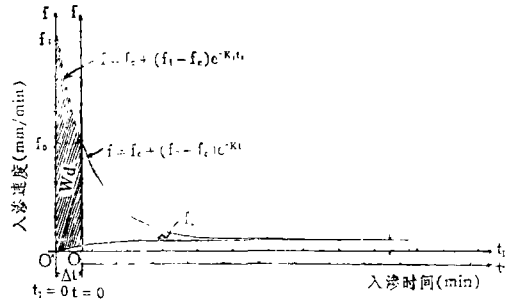


图1 同一测试地点两条入渗曲线的关系

$$t_1 = t + \Delta t \tag{6}$$

当 t_1 为任一值时，由式(1)和式(6)可知其入渗速度：

$$f = f_c + (f_i - f_c)e^{-k_1 \Delta t} e^{-k_1 t} \tag{7}$$

当 $t_1 = \Delta t$ 时， $f = f_0$ ，代入式(1)得：

$$f_0 = f_c + (f_i - f_c)e^{-k_1 \Delta t} \tag{8}$$

或 $(f_i - f_c)e^{-k_1 \Delta t} = f_0 - f_c$ ，代入式(7)得：

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k_1 t} \tag{9}$$

将式(9)和式(5)相比较，可知两者是等价的，且： $k_1 = k$ (10)

由图1又知，从 $t_1 = \Delta t$ 处开始入渗到达稳渗速度 f_c 这段时间内，影响土层含水深度增量 ΔW_d 为：

$$\Delta W_d = \int_{\Delta t}^{\infty} f_i e^{-k_1 t_1} dt_1 = \int_{\Delta t}^{\infty} f_i e^{-k_1 t} dt_1 = \frac{f_i}{k} e^{-k_1 \Delta t} \tag{11}$$

因影响土层最大含水深度 I_m 为：

$$I_m = W_d + \Delta W_d \tag{12}$$

所以，
$$\frac{f_i}{k} = W_d + \frac{f_i}{k} e^{-k_1 \Delta t} \quad \text{或} \quad kW_d = f_i - f_i e^{-k_1 \Delta t} \tag{13}$$

由式(8)和式(10)得：

$f_i e^{-k_1 \Delta t} = (f_0 - f_c) + f_c e^{-k_1 \Delta t}$ 代入式(13)得：

$$kW_d = f_i - (f_0 - f_c) - f_c e^{-k_1 \Delta t} \tag{14}$$

由式(3)知 W_d 和 Δt 的关系为：

$$k\Delta t = -\ln\left(1 - \frac{kW_d}{f_i}\right) \tag{15}$$

$$\Delta t = -\frac{1}{k} \ln\left(1 - \frac{kW_d}{f_i}\right) \quad (16)$$

将式(15)代入式(14)得:

$$f_i^2 - (f_0 - kW_d)f_i + f_c kW_d = 0 \quad (17)$$

解上式得:

$$f_i = \frac{1}{2} \{ (f_0 + kW_d) \pm [(f_0 + kW_d)^2 - 4f_c kW_d]^{\frac{1}{2}} \}$$

当 W_d 趋于0时, kW_d 趋于0; f_0 趋于 f_i , 分别将 $kW_d=0$ 和 $f_0=f_i$ 代入上式, 则 f_i 的解确定为:

$$f_i = \frac{1}{2} \{ (f_0 + kW_d) + [(f_0 + kW_d)^2 - 4f_c kW_d]^{\frac{1}{2}} \} \quad (18)$$

推导结束。根据式(18)便可由前期含水深度 W_d 和实测入渗方程参数推导出入渗能力, 这样消除了含水条件对入渗速度的影响, 在此基础上便可进行入渗性能的比较。

4. 应用例 贾志军等³⁾曾在同一个裸露黄土坡耕地径流小区内用模拟降雨进行不同含水率入渗规律的实验(表1)。因雨强小, 每次实验产流前都是非充分供水入渗。由于前期土壤含水率不同, 使得每次实验的入渗参数差异很大。

表1 土壤含水率对入渗的影响

土壤含水率 W (%)	降雨强度 I (mm/min)	达到稳渗的时间 t_t (min)	开始产流时间 T (min)	稳渗速度 f_0 (mm/min)	产流后入渗速度和 入渗时间的经验关系
7.89	1.531	55	13.5182	0.303	$f = 15.848t^{-0.895}$
12.57	1.540	48	5.5644	0.303	$f = 12.285t^{-0.966}$
17.00	1.524	35	3.1298	0.303	$f = 4.691t^{-0.785}$
21.19	1.522	12	2.0566	0.303	$f = 2.717t^{-0.924}$

为利用此例验证本文推导的前期土壤含水条件校正方法, 必须先把表1中的经验关系改为式(5)的形式。因产流前为非充分供水入渗, 不能直接用表1数据改写成式(5)的形式, 需做如下推导。

实测瞬时入渗速度和入渗开始后影响土层含水增量 P_a 的关系:

$$f = k(I_m - P_a) + \frac{P_a}{I_m} f_0 = f_1 + f_2 \quad (19)$$

在计算时段 $T_1 = 1$ min时, 时段平均入渗速度 \bar{f} 为:

$$\bar{f} = (1 - e^{-k}) (I_m - P_a) + \left[1 - \frac{I_m - P_a}{kI_m} (1 - e^{-k}) \right] f_0 = \bar{f}_1 + \bar{f}_2 \quad (20)$$

当 T_1 不等于1 min时, 时段平均入渗速度为:

$$\bar{f} = \left(\frac{1 - e^{-kT_1}}{T_1} \right) (I_m - P_a) + \left[1 - \frac{I_m - P_a}{kI_m} \left(1 - \frac{e^{-kT_1}}{T_1} \right) \right] f_0 = \bar{f}_1 + \bar{f}_2 \quad (21)$$

3) 贾志军等, 1987, 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究, 中国水土保持, (9), 25-27。

从入渗到产流这段时间内, 因无径流, 累积入渗量 W_1 等于降雨量:

$$W_1 = I \cdot T \quad (22)$$

I 为降雨强度, T 为开始产流时间。

因入渗开始时影响土层含水增量 P_0 为 0 和产流前 f_2 受地表供水强度影响不大, 故可由式(21)中的 \bar{f}_2 求出产流前影响土层排水量 D 。

$$D = \bar{f}_2 T = \left[1 - \frac{1}{k} \left(\frac{1 - e^{-kT}}{T} \right) \right] f_0 T \quad (23)$$

开始产流时或充分供水入渗开始时, 影响土层的实际含水增量为:

$$P_0 = W_1 - D = \left[I - \left[1 - \frac{1}{k} \left(\frac{1 - e^{-kT}}{T} \right) \right] f_0 \right] T \quad (24)$$

因式(5)描述的是充分供水入渗规律, 所以只能采用产流后的入渗数据拟合式(5)中有关参数。在 3 个参数中, 除 f_0 为实测值外, 尚有 f_0 和 k 待定。为增加拟合结果的确信性和各拟合参数的可比性, 设法将 2 个参数拟合简化为 1 个参数拟合。

因开始产流时入渗速度等于降雨强度, 所以用 I 取代式(19)中的 f , 将式(24)代入式(19), 可得到 f_0 和 k 的关系:

$$f_0 = \frac{1}{2} [kIT + f_0(1 - e^{-kT} - kT) + I] + \left\{ [kIT + f_0(1 - e^{-kT} - kT) + I]^2 - 4[f_0 T(kI - kf_0 + \frac{1 - e^{-kT}}{T} f_0)] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

从而只需拟合 k 这一个参数, f_0 由上式可得。

本例拟合入渗参数所用的目标函数为产流到稳渗这段时间内, 利用式(20)得出的计算时段为 1 min 的时段平均入渗速度, 和由表 1 经验关系求出的入渗速度差值的平方和, 均达到最小。求出式(5)的入渗参数, 再代入式(18)最后才求得该试验的入渗能力(表 2)。这样便将不同的前期土壤含水条件统一起来, 在此基础上便可进行入渗特性的比较。

表 2 入 渗 参 数 的 拟 合 结 果

土壤含水率 W (%)	初渗速度拟合值 f_0 (mm/min)	稳 渗 速 度 f_0 (mm/min)	入渗能力拟合值 f_1 (mm/min)	消退指数拟合值 k (min ⁻¹)
7.89	2.5619	0.303	2.9553	0.06026
12.57	2.1235	0.303	2.6954	0.08265
17.00	2.0784	0.303	2.9347	0.14147
21.19	2.5561	0.303	4.0845	0.39976

由此例看出, 除前期含水率较高的第 4 组数据外, 其余 3 组低含水率时入渗能力的拟合值比较接近。这 3 个入渗能力拟合值之间的差异比 3 个初渗速度拟合值之间的差异小得多。

(三) 结果和讨论

1. 因 k 值受前期含水率影响, 在前期土壤含水率较高时, 不宜作为入渗性能的比较指标。
2. 本文推导结果式(18)在前期土壤含水率的较低范围内可以应用。
3. 为减小误差, 应尽量在土壤较干燥时进行入渗实验。
4. 为简化计算和提高精度, 最好在充分供水条件下进行入渗实验。

(中国林业科学研究院林业研究所 王彦辉)