

应用遗传算法拟合浑水入渗经验公式

白 丹, 李占斌

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘 要: 探索浑水入渗规律, 对浑水灌溉、流域降雨产汇流、土壤侵蚀机理的研究与应用具有一定的价值。该文首先分析了影响浑水入渗主要因素的基础上, 提出了浑水入渗试验方案。根据浑水入渗试验资料, 认为入渗时间和物理性粘粒含量是影响浑水入渗的主要因素, 引入粘性指数来反映浑水中物理性粘粒含量的大小, 在此基础上, 提出了浑水入渗经验公式。应用遗传算法, 以浑水入渗经验公式中待求参数为优化变量, 采用二进制编码, 拟合这些待求参数。分析结果表明: 拟合的浑水入渗经验公式精度较高; 浑水与清水入渗的差异主要是由浑水中物理性粘粒的存在引起的; 浑水中物理性粘粒含量越大, 累积入渗量就越小。

关键词: 浑水; 入渗规律; 粘性指数; 遗传算法

中图分类号: S275; TV 142

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0076-04

1 引 言

我国西北黄土地区, 水土流失严重, 研究这一地区的流域降雨产汇流和土壤侵蚀机理问题都涉及到浑水入渗问题; 同时由于我国北方地区部分河流夏季含沙量大, 在研究浑水灌溉问题中也同样涉及到这类问题。

王文焰等^[1]率先开展了这方面的试验研究工作, 并认为影响浑水累积入渗量 I 大小主要因素是入渗时间 T 和入渗浑水含沙率 ρ , 先针对某一泥沙颗粒级配入渗浑水, 分别采用不同含沙率的浑水入渗试验资料, 应用一元回归分析法, 分别计算其不同含沙率的浑水累积入渗量经验公式 $I = A T^B$ 的待定参数, 式中 A 和 B 为待求参数; 在此基础上分别采用一元回归分析法, 分别计算经验公式 $\alpha = A/A_0 = 1 - a\rho^c$ 和 $\beta = B/B_0 = 1 - b\rho^d$ 中的待定参数 a, c, b, d , 其中 A_0 和 B_0 为清水累积入渗量经验公式中的待定参数, 最后导出累积浑水入渗量经验公式为 $I = \alpha A_0 T^{\beta B_0}$, 这一公式只适合描述某一泥沙颗粒级配浑水入渗过程, 对于不同的泥沙颗粒级配浑水, 要再通过试验和计算确定经验公式中的有关参数, 但在实际应用中, 入渗浑水中泥沙颗粒级配在空间和时间上是会有变化的, 所以这一公式的应用受到限制。其后一些浑水连续入渗研究^[2-4]的思路基本与文献^[1]类似。还有一些关于浑水入渗机理和数学模型的研究^[4-6]方面的成果。

进一步探讨浑水入渗规律, 特别是入渗浑水中物理性粘粒含量对入渗的影响问题, 是本文研究的主要内容。

2 试验方案的确定

在清水入渗过程中, 影响入渗的主要因素有土壤质地、土壤初始含水量、土壤温度、土壤表层积水厚度等因素, 在各种因素作用下, 开始时入渗速率较大, 以后逐渐

减小, 最终趋于稳定值, 考斯加可夫公式较好地反映了清水入渗速度随时间的变化过程。在浑水入渗过程中, 除上述主要影响因素外, 浑水特性对入渗影响很大, 在相同的入渗时间、相同的含沙率条件下, 浑水中泥沙颗粒级配不同, 其累积入渗量不同, 因此在本次试验方案设计中, 分别配制了不同颗粒级配(见表 1)、不同含沙率的浑水, 进行浑水入渗试验。试验方案见表 2。

表 1 试验浑水小于某一粒径颗粒含量百分数

Table 1 The percent less than a certain granularity content of the muddy water in the experiment

级配序号	颗粒直径/mm				
	< 0.05	< 0.01	< 0.005	< 0.002	< 0.001
1#	88.29	13.81	13.07	11.25	1.42
2#	83.52	32.14	23.26	13.85	7.78
3#	83.95	42.05	31.25	22.58	15.32

表 2 试验方案

Table 2 The experiment design

方案序号	含沙率/%				
	0	5	10	15	25
1	清水				
2			1#		
3					1#
4			2#		
5				3#	
6		3#			
7					3#
8				1#	

3 试验结果分析与计算

3.1 试验结果分析

根据试验方案的实测数据, 在双对数坐标中绘制各试验方案中累积入渗量与时间的关系线(见图 1)。从图 1 可以看出, 在双对数坐标中, 清水和浑水的累积入渗量与时间的关系线几乎平行(方案 1 与其它方案), 反映出一定的含沙率、一定颗粒级配的浑水入渗仍符合考斯

收稿日期: 2002-07-04 修订日期: 2003-03-20

作者简介: 白 丹, 男, 教授, 研究方向为节水灌溉和环境系统工程。
西安市西安理工大学 748 信箱 西安理工大学水资源研究所,
710048 电话: 029-2310596



加可夫公式的规律, 文献[1]中的经验公式也反映了这一点。但浑水入渗在很大程度上受到浑水特性的制约, 这主要是在浑水入渗过程中, 浑水中泥沙沉积在入渗土壤的表面, 形成一个沉积层。与清水入渗相比, 这个沉积层的形成改变了入渗的上边界条件, 起到阻渗作用。

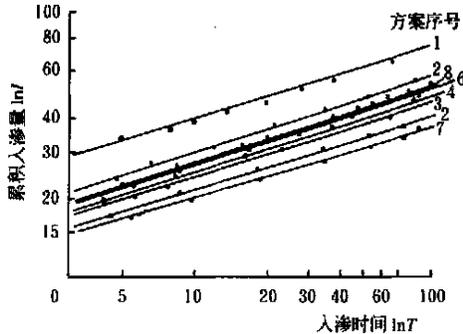


图 1 累积入渗量和时间的关系

Fig 1 Relationship between infiltration volume and time

从图 1 还可以看出, 在相同入渗时间、相同含沙率条件下, 浑水中泥沙颗粒级配不同, 入渗水量也不同(如方案 2 和方案 4), 这主要取决于沉积层中土壤物理性粘粒含量的多少, 因为小于 0.01 mm 粒径的物理性粘粒含量是土壤粒度组成中一个重要指标, 大量文献资料表明^[7]土壤的物理特性, 如可塑性、膨胀性、吸湿性、渗透性及最大分子持水量等都以 0.01 mm 粒径为明显界限。图 1 也反映出浑水中物理性粘粒含量越高, 减渗效果越大。

3.2 浑水入渗经验公式的形式

根据以上分析结果, 引入粘性指数的概念, 其定义为

$$M = \frac{100}{100 + \rho S} \quad (1)$$

式中 M —— 粘性指数; ρ —— 浑水含沙率, %; S —— 浑水中小于 0.01 mm 粒径颗粒含量的百分数。

粘性指数反映了物理性粘粒含量的大小, 其值与物理性粘粒含量大小成反比, 在清水中 $M = 1$ 。

根据图 1, 取一固定入渗时间(如 $T = 10$ min), 在双对数坐标中, 绘出粘性指数与累积入渗量关系线, 如图 2 所示。

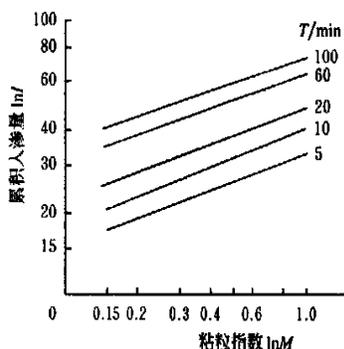


图 2 累积入渗量和粘粒指数的关系

Fig 2 Relationship between infiltration volume and soil clay index

在图 1 的双对数坐标中, 累积入渗量与入渗时间呈直线关系; 在图 2 的双对数坐标中, 累积入渗量与粘性指数呈直线关系, 即在三维空间中, 当累积入渗量、入渗时间和粘性指数均取对数坐标时, 三者呈直线关系。

$$\ln I = \ln C + r \cdot \ln M + s \cdot \ln T \quad (2)$$

式中 I —— 累积入渗量, mm; T —— 入渗时间, min; C, r, s —— 待求参数。

根据(2)式有

$$I = CM^r T^s \quad (3)$$

3.3 应用遗传算法计算经验公式中的待求参数

以累积入渗量的估计值 \hat{I}_i 和实测值 I_i 的剩余平方和 Q 最小为目标函数

$$\begin{aligned} \min Q &= \sum_{i=1}^m (I_i - \hat{I}_i)^2 \\ &= \sum_{i=1}^m (I_i - CM^r T^s)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

以待求参数为优化变量, 确定其参数取值范围后, 这一优化问题则为只含上、下限约束的最优化问题。遗传算法^[9]对解决这类问题是比较容易的。对于这一问题, 遗传算法的构造过程如下

1) 编码 二进制编码的码精度为

$$\delta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^L - 1} \quad (5)$$

式中 δ —— 参数编码精度; U_{\max}, U_{\min} —— 参数取值范围; L —— 参数二进制编码长度。

依据各参数 (C, r, s) 解的精度要求(有效位数), 按照(5)式求得其二进制码位数 (m_1, m_2, m_3), 将这 3 个二进制位串顺序连接起来, 构成一个个体染色体(见图 3), 编码总位数为

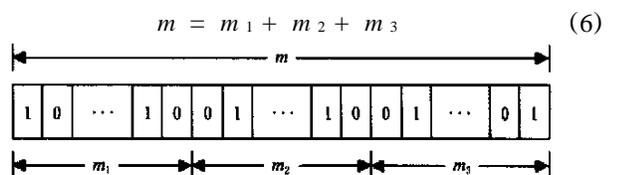


图 3 二进制遗传编码示意图

Fig 3 Binary system code

2) 解码 将 m 位长的二进制编码切断为 3 个二进制的编码串, 其长度分别为 m_1, m_2 和 m_3 , 然后转换为十进制变量值 C, r 和 s 。

3) 确定个体评价方法 在这一优化问题中, 目标函数总取非负值, 并且以求函数最小值为优化目标, 则适应度按照下式计算

$$F(x) = \begin{cases} Q_{\max} - Q(C, r, s) & Q(C, r, s) < Q_{\max} \\ 0 & Q(C, r, s) \geq Q_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $F(x)$ —— 适应度函数; Q_{\max} —— 进化到当前代为止的最大目标函数值。

4) 设计遗传算子 包括设计选择算子、交叉算子和变异算子。

5) 确定遗传算法的运行参数 包括群体大小、终

止代数、交叉概率和变异概率。

在本问题中,通过试算^[9],确定遗传算法各项运行参数取值为:群体大小 $M = 30$,终止进化代数 $T = 200$,交叉概率 $p_c = 0.5$,变异概率 $p_m = 0.02$ 。其它运行参数见表 3,3 个变量构成一个 34 位个体染色体。计算得目标函数值 $Q = 79.98$,经验公式的各参数计算值见表 3,代入公式(3)

$$I = 22.46M^{0.350}T^{0.252} \quad (8)$$

表 3 其它运行参数和计算结果

待求参数	U_{min}	U_{max}	δ	L	计算值
C	0	100	0.01	14	22.46
r	0	1.00	0.001	10	0.350
s	0	1.00	0.001	10	0.252

3.4 经验公式精度分析

用经验公式计算的相对误差按下式计算

$$\Delta = \frac{|I_r - I|}{I_r} \times 100\% \quad (9)$$

式中 Δ ——相对误差,%; I_r ——累积入渗量实测值,mm; 方案 8 的实测值; I ——累积入渗量计算值,mm。

用试验方案 8 的实测数据来验证(8)式的计算值,其结果见表 4。

表 4 相对误差

Table 4 The relative error

$T/m in$	16	20	38	48	56	65	80	100
I_r/mm	31.50	33.89	35.26	41.24	41.80	45.20	45.40	52.21
I/mm	30.49	32.29	37.91	40.21	41.80	43.40	45.73	48.37
$\Delta/\%$	3.24	4.84	7.51	2.51	0.00	3.99	0.72	7.35

从表 4 可以看出,二者最大相对误差为 7.51%,表明提出的浑水入渗试验公式精度较高,比较全面地反映了浑水入渗规律,同时也反映出(3)式所假定 I, M 和 T 的关系是正确的。

4 浑水入渗规律探讨

4.1 公式中各因素对累积入渗量的影响

在公式(3)中,影响累积入渗量的因素有两个,即粘性指数 M 和入渗时间 T ,通过计算,确定各因素的待求指数,由表 3 可以看出: $r > s$,表明在浑水入渗过程中,粘性指数和入渗时间对入渗都具有重要影响,但粘性指数较入渗时间的影响大。

4.2 浑水入渗速度

对(2)式 T 求导,即求得浑水入渗速度

$$i = \frac{dI}{dT} = CM^r T^{s-1} \quad (10)$$

式中 i ——浑水入渗速率,mm/m in。

(10)式中 C_s 值的物理意义为清水入渗时在第 1 m in 末的入渗速度。

4.3 浑水中粘粒含量对入渗的影响

浑水中物理性粘粒含量为

$$m = \rho S \quad (11)$$

式中 m ——浑水中物理性粘粒含量百分数, %。

由(1)、(3)和(11)式得

$$I = C \left(\frac{100}{100+m} \right)^r T^s \quad (12)$$

对上式 m 求导得

$$\frac{dI}{dm} = - \frac{Cr}{100} \left(\frac{100}{100+m} \right)^{r+1} T^s \quad (13)$$

因 $\frac{dI}{dm} < 0$,反映出在连续入渗过程中,浑水中物理性粘粒含量越大,累积入渗量越小。

5 结 论

1) 认为浑水与清水的差异主要是由浑水中物理性粘粒含量所造成的,浑水中物理性粘粒含量的多少,是影响浑水入渗量大小的主要因素,故由此而引入的粘性指数的概念较为全面客观地反映了浑水入渗特性。

2) 这一公式可用于研究流域降雨产汇流、土壤侵蚀和浑水灌溉的理论及应用问题,这一公式较全面地反映了浑水入渗规律。由此公式可以推出考斯加可夫公式为 $M = 1$ (清水)时的一个特例。另外自然界中的浑水受多种因素影响,其含沙率和颗粒级配变化都很大,应用本文提出的浑水入渗公式时,需在应用地区做少量的浑水入渗试验确定公式中的有关参数。本浑水入渗公式既可计算或预测该地区不同浑水条件下的累积入渗量,又可以计算出其入渗速度。所以,这一公式具有较高的实用价值。

3) 利用遗传算法,拟合浑水入渗经验公式有关参数,为研究这类问题提供了一种新的方法。

4) 由于浑水入渗问题的复杂性,要从理论上解决这一问题,还需做大量的试验研究工作。本文所提出的浑水入渗经验公式尚不能较为全面地反映浑水入渗机理,但本文提出的经验公式无疑在这方面是一个有益的探索。

[参 考 文 献]

[1] 王文焰,等 黄土地区浑水入渗能力试验研究[J] 水土保持学报,1994,8(1): 59~ 62

[2] 费良军,王文焰,等 泥沙粒度组成对浑水间歇入渗特性的影响研究[J] 农业工程学报,1999,15(1): 139~ 143

[3] 费良军,王文焰,等 浑水波畦灌条件下的间歇入渗试验研究[J] 水利学报,1998,(5): 65~ 70

[4] 费良军,王文焰,等 浑水间歇入渗模型研究[J] 水利学报,1999,(2): 39~ 43

[5] 王全九,王文焰,等 浑水入渗机制及模拟模型研究[J] 农业工程学报,1999,15(3): 135~ 138

[6] 陈洪松,邵明安 细颗粒泥沙的絮凝沉降特性[J] 土壤通报,2002,33(5): 356~ 359

[7] Ramirez H, Rodriguez O, Shainberg I Effect of gypsum on furrow erosion and intake rate[J] Soil Science, 1999,(164): 351~ 357.

[8] 黎庆淮, 等. 土壤与农作[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.

[9] 周 明, 等. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

Fitted empirical formula for muddy water infiltration using genetic algorithm

Bai Dan, Li Zhanbin

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract The experimental design plans were determined on analyzing main factors to affect infiltration capability of muddy water. Based on the experimental data, it is considered that the main factors are infiltration time and soil clay content, the concept of soil clay index was presented to denote soil clay content in muddy water, and muddy water infiltration expression was presented. The concerned parameters in the expression are regarded as the optimal variables and determined by binary system code method of the genetic algorithm. It showed that muddy water infiltration expression was relatively accurate, and the reason for muddy water infiltration differing from rinsing was the clay in muddy water, and the more the soil clay index was, the less the accumulation infiltration amount was.

Key words: muddy water; infiltration; soil clay index; genetic algorithm

《农业工程学报》2003 年第 5 期英文论文征稿启事

鉴于本刊 2001 年第 1 期及 2002 年第 5 期英文编辑的投稿踊跃, 出版成功, 并在海外宣传力度较大, 本刊编委会研究决定, 在没有申请到英文刊号之前, 继续在现有《农业工程学报》中每年第 5 期出英文专辑, 以满足英文论文投稿作者的需求和作为最终出版英文刊的过渡。现征收 2003 年第 5 期(9 月底出版)英文稿, 具体要求如下:

1. 收稿截止日期 2003 年 7 月 15 日, 请拟投稿作者在此前将英文表达规范定稿的英语论文寄到本刊编辑部。可用打印稿和软磁盘投稿, 欢迎用电子邮件投稿。来稿请附作者单位, 详细通讯地址、邮编、电话、电子邮件地址及最快捷的联系方式。请自留底稿, 不论刊用与否, 恕不退稿。

2. 来稿要求文字精练, 语句通顺, 论点明确, 数据可靠。每篇论文字数在 8000 词以内(约大 16 开 6 页内), 来稿须按标题名、作者姓名(汉语拼音)、单位、摘要、关键词、论文正文、参考文献及详细中文摘要(包括研究的目的、方法、结果和结论)的顺序书写, 获得各种基金资助的论文请注明基金或项目名称及编号。

3. 来稿刊登与否由编委会经严格“三审制”审定, 拟特请部分英文写作水平较高的同行专家审稿, 对决定录用的 6 页内论文收取 1500 元/篇版面费, 每超过 1 页加收 200 元版面费。所有作者在投稿的同时寄审稿费 100 元/篇。

(本 刊)