土壤入渗积水时间预测模型研究*

李雪转[1,2]　樊贵盛[1]

（1 太原理工大学水利科学与工程学院，太原　030024）

（2 山西水利职业技术学院水利工程系，山西运城　044004）

摘　要　在室内进行了 8 种均质土壤入渗积水时间的测定试验。采用不同的变量组合形式、利用数理统计原理对土壤入渗积水时间进行预测。结果表明：(1)用土壤干容重、初始含水量、土壤砂粒、黏粒含量、供水强度等常规土壤物理参数预测入渗积水时间是可行的。(2)多元线性预测模型和多元非线性预测模型的预测精度结果基本相同，只是所得的模型参数不同，多元线性预测模型更简单。(3)在同一预测模型下，考虑的因素越多，预测模型的预测精度相对越高。

关键词　入渗积水时间；预测模型；土壤水分入渗

中图分类号　S152；TV93　　**文献标识码**　A

入渗积水时间是小强度降雨或喷洒条件下水分进入土壤过程中的一个关键点，研究入渗积水时间对降雨径流的产生、水土保持和喷灌技术的研究有重要意义，前人对此进行了大量研究。Mein-Larson、Smith 等利用降雨强度、土壤饱和导水率、湿润锋处的水吸力等参数来计算积水时间，由于这些参数难以准确确定，应用时有一定的局限性。有人研究了降雨强度和土壤初始含水量对产流时间的影响并给出了定性关系[1-5]；郑子成[6]、郭伟[7]、陈洪松等[8]研究了耕作措施、湿润速率、植被类型、地表结皮等因素对产流时间的影响；但综合考虑各因素对土壤入渗积水时间的影响及其预测内容研究得较少。由于供水强度的不稳定性和土壤条件的变异性及影响土壤入渗因素的复杂性，再加上计算方法的局限性，到目前为止，还没有一种简单方法能确定多因素共同作用下的土壤入渗积水时间。在农田灌溉上，许多学者对多种灌溉条件下的土壤水分入渗进行预测预报，方法主要有数理模拟法、数理统计法和 BP 神经网络[9-10]等，均取得了较好的效果。本文从容易确定的土壤物理参数和供水条件入手，通过不同条件下入渗积水时间测定的试验数据，分析影响土壤入渗积水时间的主导因素，利用数理统计原理，建立入渗积水时间与主要影响因素之间的数学关系，实现了对不同土壤条件下的入渗积水时间的预测，为喷灌技术要素的合理确定、水土保持及水文学的径流研究提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试验土壤性质

为了使所建立的入渗积水时间预测模型更具有普遍性，试验时选用山西省境内 8 种不同质地 0 ~ 20 cm 的表层土壤作为供试土壤，质地划分是根据国际制进行[11]，供试土壤的砂粒变化范围为 290 ~ 910 g kg^{-1}，粉粒含量变化范围为 50 ~ 560 g kg^{-1}，黏粒含量变化范围为 40 ~ 230 g kg^{-1}；土壤干容重变化范围为 1.15 ~ 1.55 g cm^{-3}；土壤初始含水量变化范围为 1.06% ~ 23.8%（占土体积的百分数）；土壤有机质含量小于 1.5%。

1.2　试验方案

入渗积水时间测定试验是针对供水强度、土壤结构、初始含水量、土壤质地四个变量进行。对于每一种土壤质地，土壤结构从疏松到密实设计 5 个干容重水平。初始含水量从风干土含水量到田间持水率的 80%，设计 3 ~ 6 个初始含水量水平，供水强度在 0.02 ~ 0.14 cm min^{-1}之间变化，设计 5 ~ 6 个供水强度水平，共进行各种组合下的入渗试验 400 组。

1.3　试验设备

入渗积水时间测定试验设备主要由供水系统

* 国家自然科学基金项目(40671081)、山西省自然科学基金项目(20051074)资助

作者简介：李雪转(1968—)，女，山西临猗人，博士，副教授，主要研究方向节水灌溉技术、水土环境控制。E-mail：lxz488@tom.com

收稿日期：2010 - 12 - 28；收到修改稿日期：2011 - 07 - 22

和渗吸系统两大部分组成,试验设备简图见图 1。供水系统由马氏筒、调节板、滴水器和均衡器组成。马氏筒用来保证提供恒压供水和测量入渗水量;调节板调节控制供水强度;滴水器是保证流量小的情况下均匀无压出流;均衡器的作用是保证滴水器流出的水量均匀渗入渗吸筒。渗吸系统是由渗吸筒和过滤层组成。渗吸筒盛装试验用的土样;过滤层的作用主要是保证渗吸筒内土壤的通气性,以便使水分能顺利地渗入土柱。

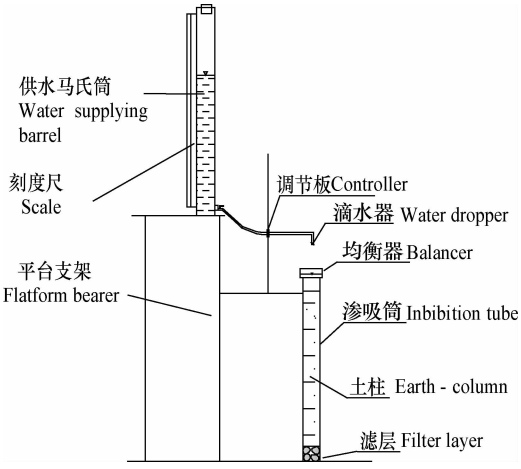

图 1 入渗积水时间试验设备示意图

Fig. 1 Sketch map of the experimental device used in measuring infiltration waterlogging time

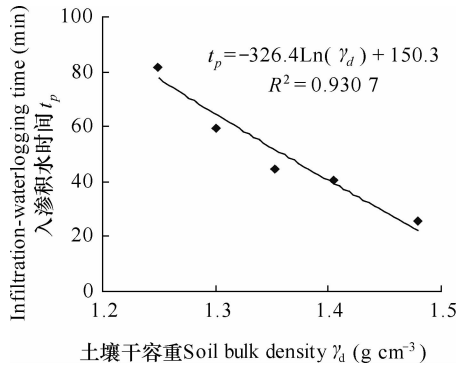

图 2 入渗积水时间随土壤干容重的变化曲线

Fig. 2 Curve of infiltration-waterlogging time vs soil bulk density

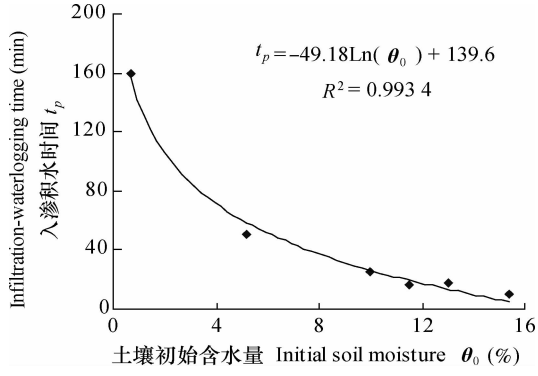

图 3 入渗积水时间随初始含水量的变化曲线

Fig. 3 Curve of infiltration-waterlogging time vs initial soil moisture

2 入渗积水时间预测模型

2.1 模型自变量选择

影响入渗积水时间的因素较多,经试验结果分析认为,主要有以下几个因素:

(1) 土壤结构

图 2 所示曲线是粉砂质黏壤土在供水强度为 0.051 cm min^{-1}、土壤初始含水量为 3.8% 条件下不同土壤干容重(γ_d)对入渗积水时间影响的变化曲线。根据试验数据拟合方程和相关系数如图所示。由图 2 可以看出,在供水强度和含水量一定条件下,积水时间随土壤干容重的增加而减小,即土壤结构由疏松变到密实,积水时所需要时间逐渐缩短,它们之间符合对数函数关系。

(2) 初始含水量

图 3 是壤质砂土在供水强度为 0.10 cm min^{-1}、土壤干容重为 1.55 g cm^{-3}条件下,入渗积水时间与土壤初始含水量(θ_0)间的关系曲线。由图 3 可以看出,在供水强度和土壤干容重相同的条件下,随着初始含水量的增加,入渗积水时间减小,它们之间符合对数函数关系,拟合方程和相关系数见图 3 所示,相关系数较高,说明土壤初始含水量与积水时间的相关性较好。

(3) 土壤质地

土壤质地通常用砂粒、粉粒和黏粒含量来表示,图 4 所示的曲线是八种土壤质地在初始含水量为 2.5%~3.3%、干容重为 1.4 g cm^{-3}、供水强度为 0.06 cm min^{-1}条件下,入渗积水时间随土壤黏粒含量(x)的变化曲线。由图 4 可以看出:入渗积水时间随着土壤黏粒含量的增加而减小,它们之间符合对数函数关系,拟合曲线方程和相关系数见图 4 所示,说明土壤质地对入渗积水时间有较大影响。

(4) 供水强度

供水强度(R_0)是指单位时间内单位面积上的供水量。图 5 是土壤质地为砂壤土、初始含水量为 2.3%、土壤干容重为 1.35 g cm^{-3}条件下的入渗积水时间随着不同供水强度(0.04 ~ 0.11 cm min^{-1})

的变化曲线。根据试验数据拟合的方程和相关性如图 5 所示。土壤入渗积水时间随着供水强度的增加而减少；它们之间符合幂函数关系，说明供水强度对积水时间影响显著。

根据试验数据分析可知，土壤干容重、初始含水量、土壤质地和供水强度与入渗积水时间均有较好的相关性，这些因素对入渗积水时间的影响均较大[12]。在建立入渗积水时间预测模型时，初步选定这四个因素作为自变量，其他因素对入渗积水时间也有影响，在模型常数项中综合考虑。

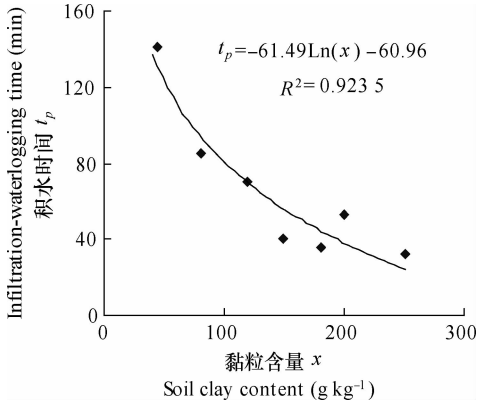

图 4　入渗积水时间随黏粒含量的变化曲线

Fig. 4　Curve of infiltration-waterlogging time vs soil clay content

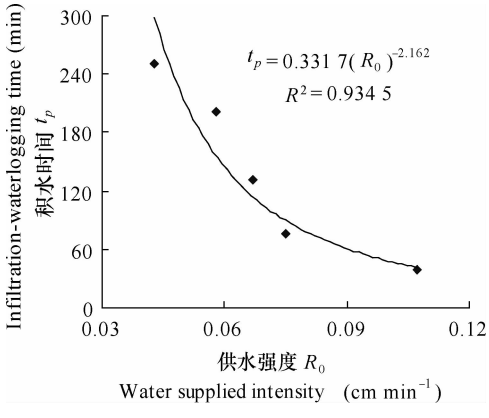

图 5　入渗积水时间随供水强度的变化曲线

Fig. 5　Curve of infiltration-waterlogging time vs water supply intensity

2.2　预测模型结构

根据入渗积水时间测定试验结果，应用数理统计中的多元线性回归模型，建立土壤入渗积水时间与其主要影响因素之间的数学模型，选择预测精度较高的模型作为入渗积水时间的预测模型。

多元线性模型结构（Ⅰ）为：

$$t_p = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \cdots\cdots + a_n x_n \tag{1}$$

由于积水时间与土壤干容重、土壤黏粒含量、土壤初始含水量及供水强度之间关系呈对数函数关系或幂函数关系，现将自变量进行对数处理，然后再利用数理统计原理进行回归模型，构造的多元非线性模型结构（Ⅱ）为：

$$t_p = \alpha_0 + \alpha_1 \ln x_1 + \alpha_2 \ln x_2 + \alpha_3 \ln x_3 + \cdots\cdots + a_n \ln x_n \tag{2}$$

式中，t_p为入渗积水时间（min）；α_i为模型系数；x_i为第 i 个影响因素变量；n 为变量个数；α_0为常数项。

2.3　预测模型建立

在影响入渗积水时间的主导因素中，土壤质地可用砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量三种形式表示。在预测时为了能反映多因素对其的综合影响，使预测结果更接近实测值，预测精度更高。在土壤质地中选择其中的一个量或两个量与其他三个变量组合，变量组合方式见表 1，对于不同的变量组合，利用式（1）、式（2）对入渗积水时间进行预测。

预测模型参数估计采用数理统计中多元线性回归参数估计方法进行。回归模型的显著性检验采用方差分析方法进行。对于每一种变量组合，根据试验数据分别计算样本总离差 Q_T（平方和）、剩余离差 $Q_{剩余}$和回归离差 $Q_{回归}$，然后由剩余离差 $Q_{剩余}$、回归离差 $Q_{回归}$及其相应的自由度计算样本的 F 值，并与给定的显著水平（α = 0.05）对应的 F_α值比较，确定其显著性，若计算 F 值大于 F_α值，说明回归模型是显著的。回归系数的显著性检验是采用 T 检验法。依据试验观测值计算 T 值，按给定的显著水平 α 查得 $t_{\alpha/2}(m-n-1)$，然后比较计算 T 值和查得的 $T_{\alpha/2}$大小，确定其显著性，若计算 T 值大于 $T_{\alpha/2}$，说明回归系数是显著的。

对于室内 400 组试验数据进行分析、整理，剔除一些不符合规律的瑕疵数据，取 50 多组试验数据作为预报模型的验证数据；保留 305 组数据，对于每一种变量组合，利用式（1）、式（2）和上述的回归模型检验方法对入渗积水时间进行预测。根据试验观测值计算 F 值和给定的显著水平对应的 F_α值、T 值和给定显著水平的 $T_{\alpha/2}$值[13]、预测相对误差和预测样本长度见表 2。

表 1 变量组合方式表

Table 1 Forms of variable combination

变量组合编号 Serial No. of variable combination	土壤干容重 Soil bulk density	土壤初始含水量 Initial soil moisture	砂粒含量 Content of sand	粉粒含量 Content of silt	黏粒含量 Content of clay	供水强度 Water supply intensity
1	√	√	√			√
2	√	√		√		√
3	√	√			√	√
4	√	√	√	√		√
5	√	√		√	√	√
6	√	√	√		√	√

表 2 不同变量组合下的入渗积水时间预测模型回归参数估计及检验表

Table 2 Estimation and validation of regression parameters of infiltration waterlogging time prediction model using combinations of different variables

变量组合 Variable combination	模型 Model	F	$F_{0.05}$	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	$T_{0.025}$值	样本长度 Sample length	相对误差 Relation error (%)
1	Ⅰ	12.56	2.37	-14.73	-3.72	18.89	—	—	-19.29	1.96	305	30.0
	Ⅱ	12.50	2.37	-13.99	-3.43	18.90	—	—	-18.75	1.96	305	30.2
2	Ⅰ	11.48	2.37	-12.03	-3.28	—	-14.93	—	-17.89	1.96	305	32.6
	Ⅱ	10.32	2.37	-11.6	-2.56	—	-12.89	—	-16.33	1.96	305	33.8
3	Ⅰ	13.28	2.37	-14.63	-5.92	—	—	-20.37	-20.61	1.96	305	29.7
	Ⅱ	11.00	2.37	-12.48	-4.25	—	—	-16.05	-17.78	1.97	305	32.8
4	Ⅰ	11.47	2.21	-13.76	-2.88	14.71	10.88	—	-22.01	1.96	305	29.0
	Ⅱ	9.28	2.21	-8.63	-2.67	10.39	4.87	—	-18.22	1.96	305	32.2
5	Ⅰ	13.01	2.21	-17.01	-4.15	—	7.87	-16.81	-23.18	1.96	305	28.3
	Ⅱ	10.10	2.21	-13.39	-3.23	—	2.35	-11.52	-18.2	1.96	305	32.6
6	Ⅰ	13.49	2.21	-17.01	-3.48	11.33	—	-13.09	-24.49	1.96	305	27.3
	Ⅱ	11.85	2.21	-15.06	-2.70	9.15	—	-11.01	-11.85	1.96	305	28.5

由表 2 可以看出：

(1) 六种变量组合条件下的预测模型(Ⅰ、Ⅱ)计算的 F 值均大于相应的 $F_{0.05}$值、计算的 T 值均大于 $T_{\alpha/2}$值，说明这六种变量组合条件下的预测模型(Ⅰ、Ⅱ)均是显著的，所选变量(四个或五个)均是显著的。

(2) 对于每一种变量组合而言，预测模型Ⅰ、Ⅱ的预测误差基本接近，但预测模型Ⅱ的误差略大一些，可能是由于自变量对数处理时带来的误差累积所致，说明用多元线性和非线性模型这两种模型对入渗积水时间预测的结果相同，只是预测模型参数(α)的数值不同(见表 3)。由于模型Ⅰ较模型Ⅱ的结构简单，且预测误差小，所以选择模型Ⅰ作为入渗积水时间的预测模型。

(3) 从预测相对误差分析可知，对于每一种变量组合，模型预测误差相差不大，但五变量组合模型预测误差较四变量组合模型预测误差小，说明考虑的影响因素越多，预测结果越准确。经过分析比较，最后取变量组合 6 为入渗积水时间的预测模型，该预测模型(Ⅰ、Ⅱ)参数见表 3。

表 3 入渗积水时间预测模型参数表

Table 3 Parameters of the infiltration waterlogging time prediction model

预测变量 Forecast variable	模型 Model	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
x_1, x_2, x_3, x_4, x_5	Ⅰ	318.7	-154.7	-52.7	51.9	-226.6	-687.4
	Ⅱ	64.48	-203.4	-2.441	23.59	-27.68	-48.22

注：x_1表示土壤干容重，x_2表示初始含水量，x_3表示砂粒含量，x_4表示黏粒含量，x_5表示供水强度 Note: x_1 for soil bulk density, x_2 for initial soil moisture, x_3 for content of sand, x_4 for content of clay and x_5 for water supply intensity

2.4　预测模型验证

四种不同土壤质地的土壤条件和供水强度见表4。将表4中的变量值和表3中的系数(α_0、α_1、α_2、α_3、α_4、α_5)代入式(1)中,就能预测出不同条件下的入渗积水时间。根据上述方法得到的四种土壤条件下的入渗积水时间预测值、实测值和误差见表4。

由表4可以看出,在不同条件下,利用变量组合6模型对入渗积水时间进行预测,除壤质黏土预测误差较大外,其他三种质地的预测误差均比较小,说明引用土壤干容重、初始含水量、砂粒含量、黏粒含量和供水强度五个变量,利用多元线性模型对土壤入渗积水时间进行预测是可行的。

表4　各种土壤条件下的入渗积水时间预测值和实测值

Table 4　Predicted and measured infiltration waterlogging times in soils different in condition

土壤质地 Soil texture	土壤干容重 Soil bulk density ($g\ cm^{-3}$)	初始含水量 Initial soil moisture (%)	砂粒含量 Content of sand (%)	黏粒含量 Content of clay (%)	供水强度 Water supply intensity ($cm\ min^{-1}$)	预测值 Predicted (min)	实测值 Measured (min)	误差 Error (%)
壤质黏土 Loamy clay	1.306	8.0	33	25	0.087	20.4	16.83	21.2
砂质黏壤土 Sandy clay loam	1.350	8.5	56	20	0.051	54.1	57.57	6.02
砂壤土 Sandy loam	1.400	8.3	66	8	0.095	48.6	50.7	4.14
壤质砂土 Loamy sand	1.550	5.2	91	4	0.097	47.7	51.0	6.47

3　结　论

1）影响土壤入渗积水时间的主要因素有：土壤干容重、初始含水量、砂粒含量、黏粒含量和供水强度。

2）多元线性预测模型和多元非线性预测模型的预测精度结果基本相同,只是所得的模型参数(α)不同,多元线性预测模型更简单。

3）在同一预测模型下,考虑的因素越多,预测模型的预测精度相对越高。

4）采用多元线性回归模型,引用土壤干容重、初始含水量、砂粒含量、黏粒含量和供水强度对入渗积水时间预测是可行的。

本论文仅是根据入渗积水时间测定试验数据,利用多元线性和非线性模型对土壤入渗积水时间进行预测,建立了入渗积水时间与主要影响因素间的数学模型,为入渗积水时间、降雨径流产生时间的确定提供一种新的计算方法。但是,对于300组样本而言,多元线性模型预测精度仍较低,需进一步探求新的预测方法,将其预测误差降低至15%左右。

参 考 文 献

[1] McDowell R W, Sharpley A N. The effect of antecedent moisture conditions on sediment and phosphorus loss during overland flow: Mahantango Creek catchment, Pennsylvanian, USA. Hydrological Processes, 2002, 16: 3 037—3 050

[2] 沈冰,王文焰,沈晋. 短历时降雨强度对黄土坡地径流形成影响的实验研究. 水利学报,1995,26(3): 21—27. Shen B, Wang W Y, Shen J. Experimental study on the effect of rain intensity on runoff formation over loess slope within short duration (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(3): 21—27

[3] 李裕元,邵明安. 降雨条件下坡地水分转化特征实验研究. 水利学报,2004,35(4): 48—53. Li Y Y, Shao M A. Experimental study on characteristics of water transformation on slope land (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(4): 48—53

[4] Castillo V M, Gomez-Plaza A, Martinez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A simulation approach. Journal of Hydrology, 2003, 284: 114—130

[5] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验. 农业工程学报,2008,24(5): 65—68. Wang H, Wang Q J, Shao M A. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,

24(5): 65—68

[6] 郑子成,吴发启,何淑勤. 耕作措施对产流作用的研究. 土壤, 2004,36(3): 320—327. Zheng Z C, Wu F Q, He S Q. Effects of cultivation management on runoff (In Chinese). Soils, 2004, 36(3): 320—327

[7] 郭伟,史志华, 陈利顶,等. 不同湿润速率对三种红壤坡面侵蚀过程的影响. 土壤学报, 2008, 45(1): 26—31. Guo W, Shi Z H, Chen L D, et al. Effects of wetting rate on erosion processes on hillslops of red soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 26—31

[8] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究. 水土保持学报,2005,19(2): 5—8. Chen H S, Shao M A, Zhang X C, et al. Field experiment on hillshop rainfall infiltration and runoff under simulated rainfall conditions (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 5—8

[9] 樊贵盛. 冻融土壤水分入渗规律与冬灌水过程研究. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2001: 91—95. Fan G S. Study on the law of water infiltration into freeze-thaw soils and the irrigation process of winter surface irrigation (In Chinese). Beijing: College of Resource and Environment, China Agricultural University, 2001: 91—95

[10] 曹崇文. 用土壤传输函数确定入渗参数的方法研究. 太原: 太原理工大学水利科学与工程学院, 2007: 62—70. Cao C W. Method study on determining soil infiltration parameters with pedo-transfer functions (In Chinese). Taiyuan: College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, 2007: 62—70

[11] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社,2000: 75. Huang C Y. Pedology (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000: 75

[12] 李雪转,樊贵盛,王雪. 影响土壤入渗积水时间因素的试验. 农业工程学报,2009,25(9): 27—31. Li X Z, Fan G S, Wang X. Experiments on factors of effecting ponding time under soil infiltration conditions (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(9): 27—31

[13] 陈魁. 应用概率统计. 北京: 清华大学出版社,2002: 360—361,366—368. Chen K. Application probability statistic (In Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 360—361,366—368

MODELS FOR FORECASTING INFILTRATION-WATERLOGGING TIME IN SOIL

Li Xuezhuan[1,2] Fan Guisheng[1]

(1 *College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

(2 *Hydraulic Engineering Department, Shanxi Water Conservancy Technical College, Yuncheng, Shanxi* 044004, *China*)

Abstract An indoor test was carried out to measure time it takes for water to go from infiltration to waterlogging in 8 types of soils homogenous in texture. To predict the time, different forms of variable combination were adopted and principles of mathematical statistics used. Results show that it is feasible to forecast the time using five conventional soil physical parameters, i. e. soil bulk density, initial moisture, sand content, clay content and water supply intensity; forecasting using the multivariable linear prediction model is more or less the same in accuracy as that using the multivariable unlinear prediction model, except that they yield different parameters, and that the former is more simple; and when using any one of the two, relatively speaking the more factors are taken into account, the more precise the prediction would be.

Key words Infiltration-waterlogging time; Forecast model; Soil water infiltration