

旱地土壤水渗透深度预测模型研究

赵同应¹, 朱凌云¹, 卫丽萍¹, 王景秀², 王福仁²

(1. 山西省气象科学研究所, 山西 太原 030002; 2. 山西省长治县气象局, 山西 长治 041000)

摘 要: 为深入了解旱地土壤水渗透规律, 以 2000~2001 年田间试验资料为基础, 分析研究长治县过程降水量与不同类型土壤水渗透深度的关系, 并根据满溢渗透理论建立了旱地土壤水渗透深度预测模型。该模型简便适用, 准确率高, 为各类旱地土壤水渗透深度预测提供了新的方法, 在山西各县农业气象科技服务中收到较好的效果。

关键词: 土壤水; 渗透深度; 预测模型

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)04-0068-04

山西省地处中纬度大陆性季风气候区, 降水偏少, 十年九旱; 旱地面积占总耕地面积的 70% 以上, 农业生产以“雨养农业”为主, 农业雨情和墒情服务工作尤为重要。多年来我省农业气象工作者虽做了大量的努力, 然而还存在雨情单一、墒情预报滞后的缺点, 直观、实用的湿土层厚度(即过程降水后土壤水分渗透深度, 以下简称土壤水渗透深度)因受观测条件所限不易获取、又无经验推算模式的制约, 不能在农业气象墒情和雨情预报服务中使用, 降低了农业气象服务的效益。为此, 开展过程降水与雨水渗透规律研究, 建立旱地土壤水渗透深度的预测模型, 对更好地服务于农业, 特别是提高春、秋播种期的雨情和墒情服务质量有着十分重要的意义。

1 预测模型的建立

1.1 建模思路

土壤水分在农业气象学中有多种表示方法, 其中土壤贮水量表示法是指一定深度的土壤总含水的绝对数量。通常以 mm 为单位, 与气象资料中降水量、蒸发量的单位相同。其表达式为:

$$W = 0.1 \times h_s \times \rho_s \times W_0 \quad (1)$$

式中: h_s 是以 cm 表示的厚度; ρ_s 是土壤容重(g/cm^3), 乘以 10 是将 cm 化为 mm 值。如果将公式中的土壤湿度 $W_0(\%)$ 取值为田间持水量 $W_v(\%)$, 就成为一定土壤的最大贮水量 $W = 0.1 \times h_s \times \rho_s \times W_v$, 单位以 mm 表示。土壤贮水量与土壤最大贮水量的差值可表达为:

$$W' = 0.1 \times h_s \times \rho_s \times (W_v - W_0) \quad (2)$$

旱作农田土壤水渗透深度与过程降水量的关系, 主要受土壤质地、降水强度、前期土壤相对湿度、作物种类等因子的影响。由于平川旱地基本上无地面径流, 降水强度对土壤渗透深度的影响可忽略不计。故旱地土壤水渗透深度则是过程降水量、土壤质地、前期土壤湿度和作物截流量的函数。

土壤水渗透是指大气降水透过地面渗入土壤内部的过程, 当大气降水达到地面时, 首先补充土壤上层缺乏的水分, 达饱和点后, 由重力作用再向下渗透。据研究报道, 我国北方农田土壤水的渗透量计算, 一般采用满溢渗透的假定, 即降水或灌溉水湿润表土层达到田间持水量后, 再向下渗透。

本文根据满溢渗透假设理论, 设想通过求算有效过程降水量与当前土壤湿度(或前旬土壤湿度减去本时段蒸散值)距满溢渗透所需补充水量的比值来模拟土壤渗透深度, 即:

$$h = \frac{R - B}{(W_v - W_0) \times 0.1 \times h_s \times \rho_s}$$

或
$$h = \frac{R - B}{(W_v - W_0) \times 0.1 \times h_s \times \rho_s + E_i} \quad (3)$$
$$h = \frac{R - B}{W_v(1 - 0.01 W_x) \times 0.1 \times h_s \times \rho_s + E_i}$$

式中: h 为土壤渗透深度(cm); R 为过程降水量(mm); B 为作物截留量(mm); W_x 为降水前土壤相对湿度($\%$); W_v 为田间持水量($\%$); h_s 为土壤深度(cm); ρ_s 为土壤容重(g/cm^3); W_0 为土壤湿度($\%$); E_i 为 h_s 土层的实际蒸散量(mm)。

收稿日期: 2005-07-05

作者简介: 赵同应(1952—), 男, 山西高平人, 高级工程师, 主要从事干旱农业土壤水分动态规律与抗旱新技术研究。E-mail: zty9006@yahoo.com.cn。

若取 $h = 1$, 则分母部分 $(W_v - W_0) \times 0.1 \times h_s \times \rho_s$ 表示在当前土壤湿度下, 1 cm 厚土层达到满溢渗透所需补充的水分(mm); 而 $(W_v - W_0) \times 0.1 \times h_s \times \rho_s + E_i$ 则表示前旬土壤湿度经过一段时间的蒸散后, 1 cm 厚土层达到满溢渗透所需补充的水分(mm)。

1.2 预测模型参数的建立

对于(3) 式中的 W_v (田间持水量, %) 和 ρ_s (土壤容重, g/cm³) 本文选用长治县农业气象试验站的土壤水文常数来模拟。各地土壤类型不同, 土壤水文常数也不同; 对土壤渗透深度的影响也不同。

B 作物截留量系指降水落到地面之前, 被作物茎叶截去的降水。一般作物截留量不很大, 只在降水初期和小雨时所占比例才较大。被截留的降水, 作物不能吸收, 而是从作物的茎叶表面蒸发掉, 故为无效降水。作物截流量与作物种类、叶面积大小、降水强度、持续时间、风速大小有关。当风速较大时作物截留量为 0, 可忽略不计; 当风速较小或微风时, 作物截留量与降水量呈 S 型曲线^[1] ($B = \frac{1}{(a + b e^{-R})}$), 与叶面积系数呈正相关。可用下式表示:

$$B = f(LAI, R)$$
$$= \begin{cases} LAI \times R / 5 & LAI \geq R \\ LAI / (1 + 2.5 e^{-R}) & LAI < R \end{cases} \quad (4)$$

式中: LAI 为叶面积系数; R 为过程降水量(mm)。本省各种作物不同生育时期的叶面积系数可取近似值如下。

冬小麦: 播种—越冬前=1, 越冬后—起身=2, 起身—拔节=3, 拔节—抽穗=4, 抽穗—收获=5

棉花: 播种—三叶=1, 三叶—现蕾=2, 现蕾—开花前期=3, 开花后期—停止生长=4

玉米: 播种—七叶=1, 七叶—拔节=2, 拔节—抽穗=2.5, 抽穗—完熟=3

谷子: 播种—出苗=1, 出苗—分蘖=2, 分蘖—拔节=3, 拔节—抽穗=4, 抽穗—成熟=5

E 实际蒸散量是指作物在某一时期内土壤水分的实际耗失量, 它包括地面棵间蒸发和植株蒸腾两部分, 是作物根层土壤水分的主要支出项。目前, 全国气象台站还未进行实际蒸散量的观测工作, 各种作物不同时段的实际蒸散量只能使用计算的方法求出。本文采用修正后的彭曼公式计算出测站逐旬日可能蒸发量(mm/d), 然后结合作物的蒸散系数

和前一旬土壤水分状况求出时段的实际蒸散量(mm)。实际蒸散量与可能蒸发量之间的差异和农田土壤湿润程度密切相关, 当农田湿润不足时, 两者差异较大, 农田足够湿润时, 两者相近。为提高旱地土壤水渗透深度预测模式的精度, 可根据农田湿润程度分别采用下面公式^[2]计算:

(1) 当土壤湿度大于等于相应时段土层临界湿度时, 即 $w_i \geq w_k$ 时

$$E = E_0 \times \theta \times t \quad (5)$$

(2) 当土壤湿度小于相应时段的土层临界湿度时, 即 $w_i < w_k$ 时

$$E = (W_{i-1} - W_p) \times [1 - e^{-E_0 \times \theta \times t / (W_k - W_p)}] \quad (6)$$

(3) 当时段 t 内 m 日前土壤足够湿润, m 日后湿润不足时,

$$E = E_0 \times \theta \times M + (W_{i-1} - E_0 \times \theta \times M - W_p) \times [1 - e^{-E_0 \times (t-m) \times \theta / (W_k - W_p)}] \quad (7)$$

(4) 当时段 t 内 n 日前为湿润不足, n 日后为足够湿润时,

$$E = (W_{i-1} - W_p) \times [1 - e^{-E_0 \times \theta \times t / (W_k - W_p)}] + E_0 \times (t - n) \times \theta \quad (8)$$

式中: W_i 为时段土壤湿度(mm); W_k 为土壤临界湿度(mm); W_{i-1} 为前一旬末的土壤湿度(mm); E_0 为时段可能蒸发量(mm); θ 为时段内作物蒸散系数; t 为时段天数; W_p 为蒸发等于零时的土壤湿度(mm)。

土壤临界湿度(W_k) 与蒸发等于零时的土壤湿度(W_p) 据研究报道可分别近似地取为 60% 的田间持水量和稳定凋萎湿度 / 1.34。

θ (作物蒸散系数) 是可能蒸发与蒸发或可能蒸散与蒸散的比值, 它随作物种类、生育阶段的变化而变化, 且有一定的差异。但同一种作物, 同一时段各地区之间的差异却相差较小。本文在无山西各种作物不同阶段蒸散系数的条件下, 使用邻近省的作物蒸散系数(表略)。

因作物根系主要分布在 1 m 土层内, 且实际蒸散(E) 计算公式中的作物蒸散系数(θ) 是采用 1 m 土层资料计算的^[2], 为此 1 cm 土层的实际蒸散量(E_i) = $E/100$ 。

2 预测模型效果检验

2.1 模型回代效果检验

用旱地土壤水渗透深度模型对长治县已有的土

壤渗透深度资料进行回代检验,取 $\alpha = 0.05$,土壤渗透深度($\hat{y}_i$)的区间估计值为 $\hat{y}_i \pm 1.96 S_y$,误差落

在 $\{\hat{y}_i \pm 1.96 S_y\}$ 的约占 95%。用相对误差($\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \times 100$)理论^[3]进行模拟效果检验,结果见表 1。

表 1 土壤渗透深度模拟回代效果

Table 1 The regressive and iterative predicted effects of soil penetration depth

方程表达式 Equation	土壤类型 Soil type	样本个数 Samples	相对误差<30% Relative error	
			样本数 Samples	%
$h = (R - B) / (W_v - W_0) \times 0.1 \times h_s \times \rho_s$	壤土 Loam	73	54	74
$h = (R - B) / W_v (1 - 0.01 W_x) \times 0.1 \times h_s \times \rho_s$	砂土 Sandy soil	11	8	73

注:公式符号同前。Notes: The symbols of equations are the same with the above paragraph.

从表 1 可以看出旱地土壤水渗透深度模式的模拟效果,壤土地有 74%以上样本的相对误差小于 30%,而砂土地 73%以上样本相对误差小于 30%。

2.2 模型预测效果检验

我们用长治县气象局 2001 年 8 月玉米地、试验

地、砂土地的土壤渗透深度资料进行了模拟模型预测效果检验(见表 2);由于砂土地土壤容重的不均匀性,导致个别预测值的相对误差偏大。其它地类与时间的相对误差均低于 25%,预测效果较好。

表 2 预测效果(相对误差)检验(%)

Table 2 The predicted effects (relative error) test

项目 Item	8 月 8 日 Aug. 8		8 月 14 日 Aug. 14		8 月 19 日 Aug. 19	8 月 25 日 Aug. 25
	试验地 Experiment field	砂土地 Sandy soil field	玉米地 Corn field	砂土地 Sandy soil field	玉米地 Corn field	试验地 Experiment field
实测值 Measured value	6.6	8.3	3.4	3.9	7.5	13.0
预测值 Predicted value	8.3	9.8	4.2	6.07	9.0	10.4
相对误差 Relative error	25.8	18.1	23.5	55.6	19.7	-20.0

注:试验地和玉米地的土质为壤土。

Notes: The soil type of experiment field and corn field is the loam.

使用模拟模式对安泽、隰县、运城、万荣、河曲、临汾、昔阳县 2000 年作物生育期间的土壤水渗透深度进行了预测检验,结果见表 3。

分析表 3 可知:旱地土壤水渗透深度预测模式对山西省主要农气站 2000 年度土壤表层湿土深度(土壤表层出现干土层、降水量大于 5 mm 时的土壤水渗透深度)的预测有 83%(15/18)样本的相对误差小于 30%,其中最小的相对误差为 2%,最大相对误差为-47.8%。河曲县为闲置的河谷砂地,土质不匀,相对误差较大;万荣冬小麦 6 月上旬为成熟后

期,叶面枯黄,作物截留量减少的因素未考虑进去,致使预测相对误差也偏大。

以上回代和预测效果表明:土壤水渗透深度预测模型是一种计算简便、准确率较高、适宜基层台站和生产单位使用的土壤水分预测模型,可在全省气象台站农业气象服务工作(特别适用于作物播期雨情和墒情服务)中使用。由于试验时间短、土壤渗透深度资料少以及作者水平所限,还存在着不足之处,有待进一步改进。

表 3 山西省主要农气站 2000 年土壤水渗透深度预测结果

Table 3 The predicted results of the soil-water penetration depth of the main agriculture meteorological stations in 2000 in Shanxi

站 名 Station name	作物种类 Crop type	测定时间 Test time (M-d)	预测深度 Predicted depth(cm)	实际深度 Actual depth(cm)	绝对误差 Absolute error(cm)	相对误差 Relative error(%)
安泽 Anze	玉米 Corn	05-12	8.3	8	0.3	3.8
安泽 Anze	玉米 Corn	06-04	9.1	10	-0.9	-8.7
安泽 Anze	玉米 Corn	06-29	11.2	9	2.2	24.6
隰县 Xixian	谷子 Millet	06-03	6.4	8	-1.7	-20.6
隰县 Xixian	谷子 Millet	06-16	3.2	3	0.2	8.0
隰县 Xixian	谷子 Millet	06-21	10.3	8	2.3	28.4
隰县 Xixian	谷子 Millet	09-04	3.9	4	-0.1	-2.3
临汾 Linfen	冬麦 Winter wheat	06-03	14.9	16	-1.2	-7.2
河曲 Hequ	裸地 Bare land	08-16	10.4	8	2.4	29.9
河曲 Hequ	裸地 Bare land	05-26	14.7	10	4.7	47.4
运城 Yuncheng	冬麦 Winter wheat	05-08	1.7	2	-0.3	-15.0
运城 Yuncheng	冬麦 Winter wheat	06-04	16.2	25	-8.8	-35.3
昔阳 Xiyang	玉米 Corn	06-28	9.8	10	-0.2	-2.4
昔阳 Xiyang	玉米 Corn	06-15	2.76	3	-0.2	-8.0
昔阳 Xiyang	玉米 Corn	06-04	2.84	3	-0.2	-5.3
昔阳 Xiyang	玉米 Corn	08-21	8.2	8	0.2	2.5
万荣 Wanrong	冬麦 Winter wheat	09-21	23.7	20	3.7	18.3
万荣 Wanrong	冬麦 Winter wheat	06-03	17.2	33	-15.8	-47.8

参 考 文 献:

[1] 南京气象学院. 农业气象学[M]. 北京:气象出版社,1984.

[2] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算[M]. 北京:气象出版社, 1989.

[3] 陈玉祥,张汉亚. 预测技术与应用[M]. 北京:机械工业出版

社,1985.

[4] 卢玉邦. 土壤水分预报模型的研究[J]. 土壤学报, 1989, 26 (1):20-23.

[5] 钟兆站,赵聚宝,郁小川. 中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2):1-5.

A Study on the prediction mode of soil water penetration depth for dry land

ZHAO Tong-ying¹, ZHU Ling-yun¹, WEI Li-ping¹, WANG Jing-xiu², WANG Fu-ren²
(1. Shanxi Province Meteorological Institute, Taiyuan, Shanxi 030002, China;
2. Changzhi County Meteorological Bureau, Changzhi, Shanxi 041000, China)

Abstract: In order to research the penetration rules of soil water on dry-land, we analyzed the relationship between the procession precipitation and the soil-water penetration depth of different soil types in Changzhi County, based on the fields experiment during 2000~2001. Then we established the prediction mode of soil-water penetration depth for dry-land according to brimming penetration hypothesis theory. This mode was applicable, easy to use and high of accurate rate. The mode provided a new method of the prediction of soil-water penetration depth for all kinds of dry-land, and gained good effects on the agriculture meteorological technology services in all counties in Shanxi.

Keywords: soil-water; penetration; depth; mode