

甘肃黄土高原土壤水分预测及旱情预警模型研究

蒲金涌¹,姚晓红¹,辛昌业¹,刘小强²

(1.甘肃省天水农业气象试验站,甘肃天水 741020; 2.天水市气象局,甘肃天水 741000)

摘要: 2006年天水农业气象试验站在自然状态下进行了土壤水分的消退试验,根据试验数据,揭示了土壤水分的消退规律。结果表明,从最适宜土壤湿度的上限开始,土壤含水量随时间的消退为对数曲线。从最适土壤水分含量的上限到下限需5 d时间,土壤失水速度为13.4 mm/d;从轻旱上限消退至严重干旱需20 d时间,土壤水分散失速度为3.9 mm/d。在此基础上建立了100 cm土层土壤含水量的预测模型及土壤干旱预警模型,经不同降水年型土壤水分实测值的检验表明,土壤含水量预测模型准确率较高,土壤干旱预警模型在预测不同程度的土壤干旱时准确率比较高,有一定实用性。

关键词: 土壤水分;旱情;预测;模型;黄土高原

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0254-05

干旱是困扰甘肃黄土高原雨养农业区主要气象灾害,自1971年开始,甘肃黄土高原每年平均都有50.5万hm²农作物遭受不同程度干旱灾害的影响^[1]。随着区域气候对全球变化的响应,该地气候暖干化及干旱的危害程度有逐年增加之势,对社会经济发展及粮食安全生产造成极大影响^[2]。干旱气候特征及由于干旱而引发的灾害分布规律也成为近年研究的热点问题之一。许多学者对该地区的降水异常变化规律、干旱异常的地域分布特点及陆面蒸散等方面作了比较深刻的研究,建立了许多标定干旱发生的指标和模型^[3-11]。但是这些研究的注意力多集中在大气降水及地表水分的运动上,对因土壤水分散失而导致的土壤干旱现象的研究相对较少。甘肃黄土高原处于半干旱半湿润气候的过渡带,潜在蒸散远大于降水量,水资源比较匮乏^[12-22]。由于土壤干旱缺水而导致的作物生长受阻的现象每年都有不同程度地发生,其变化规律值得深入研究。

土壤水分是联系地表水和地下水的纽带,在水资源的形成、转化与消耗中具有重要作用。是农作物利用水分的最后一个过程,其多寡变化、消长分布直接关系到作物的生长状态,在农业生产中,土壤水分的预警预测及土壤干旱的预警是迫切需要而在实际应用中难以解决的问题之一^[23,24]。因为土壤水分的消退非常复杂,其过程不仅与土壤的特性有关,而且还与根系层间与环境间的水分交换有关,降水的渗透、不同时间的蒸散都是必须要考虑的要素。

对土壤水分比较精确的预报模型主要有机理模型,其比较全面地考虑了环境因素的影响,物理意义明确,具有一定的通用性^[25-27]。但需要的观测数据比较多,模型的参数较多,计算比较复杂,有些参数具有其时空变化规律,限制了其大范围的推广使用。而经验模型与时间序列模型直接根据土壤水分的观测试验资料分析其水分的消退规律,所需参数较少,计算方法简便,在一定特定的时间和地区有一定适用性^[28]。

本文根据天水农业气象试验站的试验及土壤水分观测资料,对土壤水分的消退过程进行分析,建立土壤墒情的预测预警模型,并以历史资料进行检验,以探讨土壤水分预测及土壤干旱预警途径。

1 试验与资料

2006年9月2日至9月28日,我们在天水农业气象试验站进行了在自然状态下土壤水分的消退试验。试验的样土取自天水农业气象试验站试验田(表1),土质为甘肃黄土高原最具有代表性的粉壤土,100 cm土壤容重平均为1.36 g/cm³,100 cm土层最大水分容纳量为329 mm。从10 cm土层开始,每隔10 cm分层次取130~150 g的样土,各取2个重复。放置于 $\phi = 6$ cm, $H = 12$ cm的圆形容器中,初始土壤湿度控制在作物生长的最适利用状态(土壤重量含水率为80%左右)。在试验样土中栽种冬小麦,试验期间对土壤含水量不进行人为干预,每天

收稿日期:2009-09-15

基金项目:中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象基金(IAM200803);国家科技部公益行业(气象)科研专项“西北地区旱作农业对气候变暖的响应特征及其预警和应对技术研究”(GYHY200806021)

作者简介:蒲金涌(1960—),男,甘肃天水市人,高级工程师,主要从事土壤湿度测定、试验研究及气象服务业务工作。E-mail:pujinyong6@163.com。

15:00 用 JA5003 电子天平样土进行称重,观察自然状态下的水蒸散量观测水分的消退过程。同时进行容器内种植作物冬小麦的物候观测。试验从指示作物播种到凋萎一共进行了 26 d。土壤湿度从适宜状

态的上限(重量含水率 80% 左右)到严重干旱(重量含水率 40% 左右)。试验作物冬小麦的达到三叶物候期。试验期间环境平均气温为 16.0℃,空气相对湿度为 82%。

表 1 10 ~ 100 cm 土层土壤农业水分常数
Table 1 Soil moisture constant in 10 ~ 100 cm

水分常数 Moisture constant	深度 Depth(cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
容重 Bulk density (g/cm ³)	1.21	1.26	1.17	1.21	1.18	1.33	1.37	1.68	1.73	1.71
凋萎湿度 Wilting soil moisture (%)	6.70	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.50	6.50	6.40	6.40
田间持水量 Field water-holding (%)	26.7	25.5	25.5	25.5	24.4	24.2	23.2	22.0	22.6	22.2

土壤湿度用重量含水率 $W = \text{土壤含水重} / \text{干土重} (\%)$; 土壤含水量 $V = \rho \times h \times w$, 其中 w 为重量含水率 (%); ρ 为土壤容重 (g/cm^3); h 为土层厚度 (cm); V 为含水量 (mm)。占田间持水量 $W_f = w / \text{田间持水量} (\%)$ 。运用检验模型的实测资料取自天水农业气象试验站 1980 ~ 2008 年土壤水分常规观测值。土壤干旱采用农业气象服务业务中常用的指标:土壤含水量占田间持水量 60% ~ 80% 为最适宜湿度,土壤含水量占田间持水量 40% ~ 59% 为轻旱,土壤含水量占田间持水量小于 40% 为重旱。

下,土壤水分的消退速度是不一样的。从最适宜湿度的上限消退至适宜湿度的下限,需要 5 d 的时间。蒸散失水的速度为 13.4 mm/d,是水分最容易损失的阶段。从轻早上限消退至严重干旱需要 20 d 的时间,蒸散失水的速度为 3.9 mm/d。整个土壤水分的消退过程可以用(1)式描述。

$$W = -47.135 \ln(t) + 286.9 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.9941, P < 0.001)$$

式中, W 为土壤含水量 (mm); t 为从最适宜土壤湿度上限算起消退的天数 (d)。用幂函数模拟了土壤水分随时间散失的过程,效果比较好,见式(2)。

$$W_t = 15.939e^{-0.1034t} \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.9095, P < 0.001)$$

式中, W_t 为散失的土壤水分 (mm); t 为从最适宜土壤湿度上限算起消退的天数 (d)。

2 土壤预测预警模型

2.1 土壤水分的消退规律

在无降水及灌溉的自然状态下,土壤含水量从最适宜湿度的上限因蒸散而消退至严重干旱随时间的变化呈对数曲线见图 1。不同的初始湿度状态

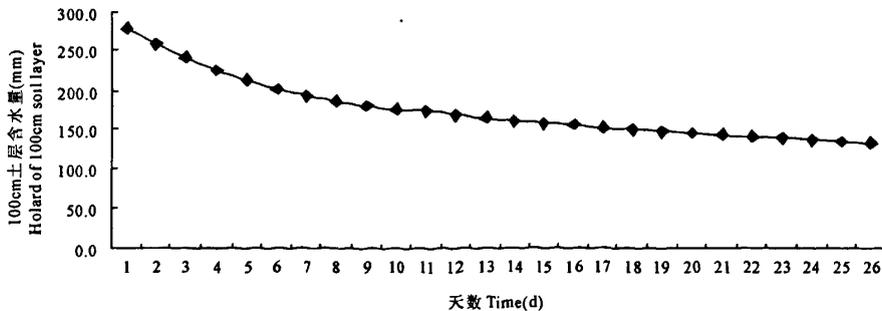


图 1 100 cm 土层土壤含水量随时间消退过程

Fig.1 Soil water content depletion with time in 100 cm soil layer

2.2 水分预报模型及检验

在降水量比较小,不能形成径流的情况下,田间的水分平衡可以用(3)式表示。

$$W_2 - (W_1 + P) = ET + Q \quad (3)$$

式中, W_1 、 W_2 分别表示 t_1 、 t_2 时刻的 1 m 土层贮水量 (mm); P 为相应时段的降水量 (mm); Q 为边界水分

通量(以向深层渗漏为正) (mm); ET 为相应时段的蒸散量 (mm)。

土壤水分的减少主要是由蒸散和深层的渗漏造成的,除较大降水或灌溉短期内有一定量的深层渗漏外,在研究区域内 100 cm 的土层深度中一般是没

有水分可以渗漏的, $Q = 0$ 。从初始 t_1 时土壤含水量 W_1 变化到 t_2 时的土壤含水量 W_2 间的蒸散量 ET 可以用 W_1 表示, 结合式(2)、式(3)在求算某一时段的大田内的土壤含水量时, 用(4)式就可以预测未来土壤含水量。

$$W_2 = W_1 - 15.939e^{-0.1034T} + P \quad (4)$$

式中, W_2 为土壤含水量预测值, $T = t + q$, 其中 t 为含水量从适宜状态消退至 W_1 时的天数(d), 可以从表 2 中查出; q 为在当前土壤含水量值下预测后期土壤含水量的天数(d)。

表 2 自然状态下 100 cm 土层土壤含水量消退过程

Table 2 Soil water content depletion under natural condition in 100 cm soil layer

天数 Time (d)	重量含水率 Soil moisture (%)	含水量 Holard (mm)	失水量 Water loss (mm)	累计失水量 Accumulated water loss (mm)	天数 Time (d)	重量含水率 Soil moisture (%)	含水量 Holard (mm)	失水量 Water loss (mm)	累计失水量 Accumulated water loss (mm)
1	83	279	—	—	14	48	162	3.2	117.7
2	77	260	19.2	19.2	15	47	159	2.8	120.5
3	67	242	18.1	37.3	16	46	156	3.1	123.6
4	63	226	15.9	53.3	17	46	153	3.0	126.6
5	60	212	14.3	67.6	18	45	150	2.2	128.8
6	57	201	10.5	78.0	19	44	148	2.6	131.4
7	56	193	8.1	86.1	20	43	145	2.5	133.9
8	54	187	6.3	92.4	21	43	145	2.3	136.2
9	53	181	5.7	98.2	22	42	141	2.3	138.5
10	53	177	4.4	102.6	23	41	139	2.1	140.5
11	51	173	3.8	106.4	24	41	137	1.9	142.4
12	50	169	4.2	110.6	25	40	135	1.5	143.9
13	48	165	3.8	114.5	26	40	134	1.4	145.4

分不同年代及土壤水分测量期间(3月上旬~11月上旬)的降水年型(1987 降水量: 636.0 mm, 距平百分比: 31%; 1996 降水量: 311.1 mm, 距平百分比: -9%; 1999 降水量: 439.8 mm, 距平百分比: -9%; 2007 年降水量: 582.5 mm, 距平百分比: 20%)。利用式(4)对土壤水分进行了预测并与实测值进行了比较(图 2)。预测值与实测值在土壤水分的变化趋势上有比较好的一致性。尤其是在 7 月上

旬以前的冬小麦生长阶段的预测值与实际值的差异最小。在不同的降水年型的土壤含水量预测结果可以看出(表 3), 预测值与实测值的相关系数 (R^2) 均在 0.5 以上, F 值计算表明各年份均通过假设检验 ($F_{0.01} = 7.82$), 剩余均方差 S 与实测值平均值的在 0.11~0.26。对降水特多年份(1987 年)的预测效果好于降水特少年份(1996 年)。

表 3 不同降水年型土壤水分实测值与预测值的比较

Table 3 The comparison of measured and calculated values of soil water content

项目 Item	1987		1996		1999		2007	
	3月中旬~ 11月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of Nov.	3月中旬~ 7月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of July	3月中旬~ 11月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of Nov.	3月中旬~ 7月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of July	3月中旬~ 11月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of Nov.	3月中旬~ 7月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of July	3月中旬~ 11月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of Nov.	3月中旬~ 7月上旬 From the sec- ond ten days of March to the first ten days of July
R^2	0.6820	0.5671	0.5012	0.5723	0.7910	0.5298	0.6903	0.6247
F	22.62	12.37	8.72	12.79	36.78	9.45	23.66	18.6
S	36.7	28.6	24.1	17.1	24.98	18.3	67.63	43.8

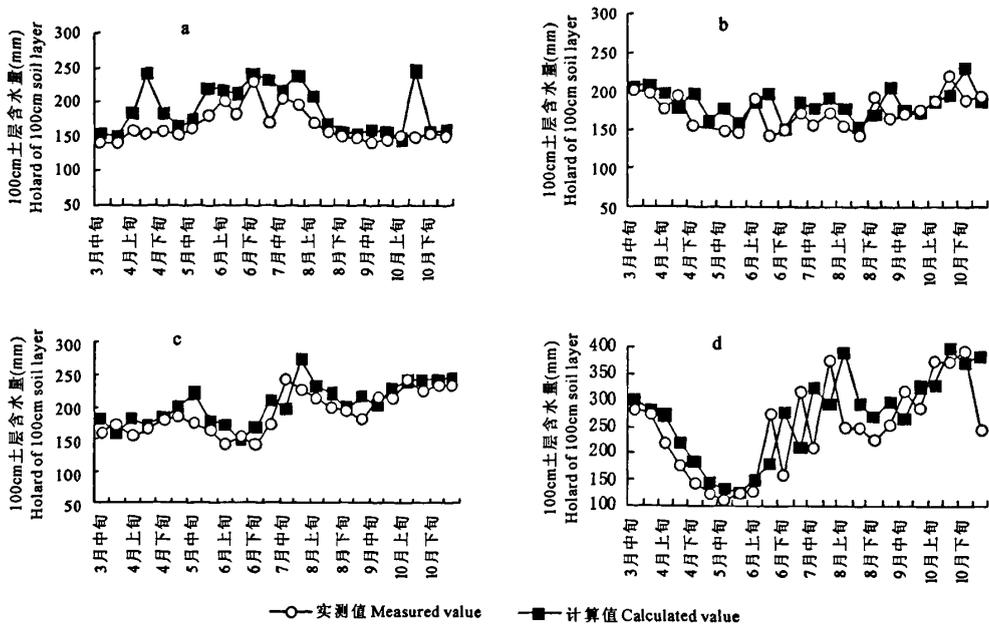


图 2 不同降水年型 100 cm 土层降水实测值及计算值(a:1987 年;b:1996 年;c:1999 年;d:2007 年)

Fig. 2 The measured and calculated values of soil water content of 100cm soil layer in different type years of precipitation (a:1987, b:1996, c:1999, d:2007)

2.3 土壤干旱预警模型及检验

综合(1)式及表 2 得到预报土壤含水量达到干旱临界值时所需的天数的公式:

$$T_i = A - e^{\frac{286.9 - W_1 - P}{47.135}} \quad (5)$$

式中, T_i 为土壤含水量从初始含水量 W_1 (mm) 状态下消退至干旱状态下的天数(d); P 为预测降水量值 (mm); A 为根据试验土壤含水量在适宜上限降至不同于旱程度临界值所需用的天数(d); 预警轻旱时 $A = 5$; 预警重旱时 $A = 22$ 。(5) 式在已知当前土壤含

水量及降水量 P 的条件下, 可以预报未来干旱来临的天数, 达到预警效果。模型定义为当 $T_i \leq 0$ 时, 就表明当时土壤含水量已达所要预警土壤干旱状态的临界值。

用(5)式对 1987 年、1996 年、1999 年及 2007 年出现的土壤轻、重旱进行了预警预报, 发现模型的预测准确率比较高(表 4)。1987 年、1996 年对轻旱预测的准确率均超过了 95%。对轻旱预测的准确率高于重旱。

表 4 不同降水年型不同干旱程度的预测结果

Table 4 The model forecasting results of different kinds of drought in different type years of precipitation

年份 Year	重旱 Serious drought			轻旱 Light drought		
	发生次数 Occurrence number	预测准确数 Forecasting number	准确率 Accuracy (%)	发生次数 Occurrence number	预测准确数 Forecasting number	准确率 Accuracy (%)
1987	4	4	100	24	23	95.8
1996	3	1	33.3	24	23	95.8
1999	4	1	25.0	19	15	78.9
2007	5	4	80.0	8	7	87.5
合计(平均) Sum (Average)	12	10	83.3	75	68	90.7

3 讨论

本文根据试验揭示了土壤水在自然状态下的消退的规律, 建立了土壤水分预测模型。为甘肃黄

土高原 100 cm 土层水分的估算提供了依据。经过当地不同降水年型土壤水分实测值的检验比较, 表明该模型预测预警效果比较好。该模型的特点是比较简单且参数比较少, 实用性强。但其主要缺陷是

模型的地域性比较强,由于缺乏资料仅在试验地中得到印证,通用性不一定好。在应用这一模型时可根据计算值与当地实测值对比推求各方程系数,再用于相似条件下的水分预测及干旱预警。

参考文献:

- [1] 邓振镛,张强,尹克志,等.干旱灾害对干旱气候变化的影响[J].冰川冻土,2007,29(1):39—45.
- [2] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉,等.黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J].资源科学,2005,27(5):146—152.
- [3] 谭桂容,孙照渤,陈海山.旱涝指数的研究[J].南京气象学院学报,2002,25(2):153—158.
- [4] 袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望[J].地球科学进展,2004,19(6):982—991.
- [5] 孙荣强.旱情评定与旱灾指标之探讨[J].自然灾害学报,1994,3(3):49—55.
- [6] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):185—189.
- [7] 吴洪宝.我国东南部夏季干旱指数研究[J].应用气象学报,2000,11(2):137—144.
- [8] 杨金虎,杨启国,姚玉璧,等.中国西北夏季干旱指数研究[J].资源科学,2006,28(3):17—22.
- [9] 王劲松,郭江勇,周天斌,等.干旱指标研究的进展与展望[J].干旱区地理,2007,20(1):60—65.
- [10] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等.西北地区干旱指标的研究[J].高原气象,1998,17(4):381—386.
- [11] 王位泰.干旱与冬小麦和玉米产量关系的分析[J].中国农业气象,2002,23(3):27—30.
- [12] 姚小英,王澄海,蒲金涌,等.甘肃黄土高原地区土壤水热特征分析[J].土壤通报,2006,37(4):886—891.
- [13] 郭海英,赵建祥,杨兴国,等.陇东塬区适生农作物水分利用率及经济效益对比分析[J].土壤通报,2007,38(4):489—494.
- [14] 蒲金涌,姚小英,贾海源,等.甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及有效利用程度研究[J].土壤通报,2005,36(4):483—486.
- [15] 蒲金涌,姚小英,邓振镛,等.气候变化对甘肃黄土高原土壤贮水量的影响[J].土壤通报,2006,37(6):1086—1090.
- [16] 郭海英,马鹏里,杨兴国,等.陇东黄土高原塬区冬小麦越冬期土壤水分损耗规律浅析[J].土壤通报,2005,36(2):145—148.
- [17] 张洪芬,王静松,黄斌.西峰黄土高原麦田土壤水分的垂直分布[J].土壤通报,2006,37(6):1081—1085.
- [18] 张谋草,李宗樊,黄斌,等.越冬期不同覆盖对土壤水分变化及黄花菜生长和产量的影响[J].土壤通报,2007,38(4):563—569.
- [19] 姚小英,蒲金涌,王澄海,等.甘肃黄土高原 40a 来土壤水分蒸散量变化特征[J].冰川冻土,2007,29(1):126—130.
- [20] 郭海英,赵建祥,黄斌,等.冬小麦生产年土壤水分变化对农业生产影响分析[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):246—248.
- [21] 车什国,郭胜利,高会议.黄土高原沟壑区果园还耕对土壤水的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):60—64.
- [22] 黄斌,张洪芬,强玉柱.西峰黄土高原作物生长土壤水分损耗速率分析[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):241—245.
- [23] 李军,邢明安,张兴昌.黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究[J].自然资源学报,2004,19(6):58—63.
- [24] 孟春雷.土壤蒸发及水热传输研究综述[J].土壤通报,2007,38(2):234—239.
- [25] 韩承荣.中国水利百科全书[M].北京:水利出版社,1991:1470—1472.
- [26] 康绍忠,张富仓.玉米生长条件下田间土壤水分动态预报方法的研究[J].生态学报,1997,17(3):245—251.
- [27] 黄冠华,沈荣开,张瑜芳.考虑气象因素不确定条件下土壤墒情的估计与预测[J].水利学报,1997(增刊):195—202.
- [28] 尚松浩,雷志栋,杨诗秀.冬小麦田间墒情预报的经验模型[J].农业工程学报,2000,16(5):31—33.

A study on models of forecasting soil moisture and warning drought in Gansu loess plateau

PU Jin-yong¹, YAO Xiao-hong¹, XIN Chang-ye¹, LIU Xiao-qiang²

(1. The Agrometeorological Experiment Station of Tianshui, Tianshui, Gansu 741020, China;

2. Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China)

Abstract: We made an experiment of soil water consuming at the Agrometeorological Experiment Station of Tianshui in 2006. Based on the test data, the characteristics of soil moisture depletion under natural condition was studied. The results showed that the soil moisture depletion turned out a logarithmic curve with time beginning from the most suitable point. The duration of soil moisture decreasing from the highest limit of optimum to the lowest limit was 5 days, with a speed of 13.4 mm a day. From light drought to serious drought it needed 20 days, and the ratio of soil water consuming was 3.9 mm a day. Based on these results, we established the models to forecast soil moisture and warn drought. The models showed high accuracy by testing with measured values, and they had a certain degree of practicality.

Keywords: soil moisture; drought; forecasting; model; loess plateau