

基于西北区甘肃省监测数据的土壤墒情综合诊断模型验证

米长虹¹ 黄治平¹ 刘书田^{1,2} 侯彦林^{1,2*} 郑宏艳¹ 丁健¹ 王铄今² 侯显达²

(¹农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; ²北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室(广西师范学院), 广西地表过程与智能模拟重点实验室(广西师范学院), 南宁 530001)

摘要 本文应用甘肃省2个市区的13个墒情监测点的数据验证土壤墒情综合诊断模型在西北区半湿润和半干旱地区的适应性, 建模使用2012—2014年的数据, 模型验证使用2015年的数据。结果表明: 模型在西北区甘肃省半湿润和半干旱地区具有较好的适应性, 验证合格率分别为半湿润地区80%以上和半干旱地区90%以上; 不同降水量区域模型参数不同; 降水越少的地区模型预测合格率越高。本研究表明, 墒情综合诊断模型可以应用于西北半湿润和半干旱地区。

关键词 土壤含水量; 降水量; 甘肃省; 半干旱地区; 半湿润地区

Verification of integrated diagnostic model of soil moisture based on the monitoring data in Gansu Province. MI Chang-hong¹, HUANG Zhi-ping¹, LIU Shu-tian^{1,2}, HOU Yan-lin^{1,2*}, ZHENG Hong-yan¹, DING Jian¹, WANG Shuo-jin², HOU Xian-da² (¹Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; ²Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Guangxi Teachers Education University); Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation (Guangxi Teachers Education University), Nanning 530001, China).

Abstract: Using the data of 13 soil moisture monitoring sites in 2 counties in Gansu Province to verify the adaptability of the integrated diagnostic model of soil moisture in the semi-arid and semi-humid regions in Northwest China. The model was established by the data during the period of 2012–2014, and validated by the data of 2015. The results showed that the model had good adaptability in the semi-arid and semi-humid regions of Gansu Province, with a qualification rate of over 80% in the semi-humid regions and over 90% in the semi-arid regions. Different precipitation regions had different model parameters, and higher prediction accuracy of the model was found on less-precipitation monitoring sites. In conclusion, the integrated diagnostic model can be used in semi-arid and semi-humid regions in Northwest China.

Key words: soil water content; precipitation; Gansu Province; semi-arid region; semi-humid region.

甘肃省干旱与半干旱气候特征十分典型, 是我国气候变化敏感和生态环境脆弱区域(李栋梁, 2000; 郑度, 2008), 甘肃兰州以东地区分布着许多旱作土壤, 作物生长常受到干旱的威胁(邓振镛等, 1991; 李小刚等, 1994)。近30年甘肃地区气候变化

总体特征是气温呈上升趋势, 降水呈减少趋势(裴彬, 2009), 干旱气候特征及由干旱而引发的灾害分布规律成为近年研究的热点问题。常见的墒情预报方法有经验公式法、土层水量平衡法、土壤水动力学法、消退系数法(邵明安等, 1987; 张胜平等, 1996; 肖俊夫等, 1997)及随机方法(康绍忠等, 1994)等。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(郭海英等,

“中国农业科学院科技创新工程”(2016-cxgc-hyl)、广西科技开发项目(14125008-2-24)和天津市科技支撑计划(15ZCZDNC00700)。

收稿日期: 2017-03-15 接受日期: 2017-08-18

* 通讯作者 E-mail: 2483977138@qq.com

2005;蒲金涌等,2005;姚小英等,2006),蒲金涌等(2010)利用消退指数法建立了土壤含水量的预测模型及土壤干旱预警模型,准确率一般,杨兴国等(1998)在甘肃中部雨养农业区用 Y.M. 安格斯坦法预测未来一旬土壤水分变化趋势得到的结果比直接采用水量平衡法效果好。

本文所介绍的模型是按监测点建立的,因此所有下垫面因素的不同所带来的影响都包含在自身模型中,不同点之间下垫面因素的不同影响包含在不同模型参数之中,这是本系列研究的创新之处,即通过逐点地建模来消除下垫面因素不同的影响。专栏论文应用吉林省 4 个市(县)的 6 个监测点 2011—2015 年的监测数据验证了土壤墒情综合诊断模型,结果表明综合诊断模型在东北半湿润和半干旱区具有很好的适应性和很高的预测合格率,应用内蒙古自治区通辽市科尔沁区、锡林郭勒盟太仆寺旗、乌兰察布市丰镇市、呼和浩特市武川县、包头市达尔罕茂明安联合旗等 5 个旗县 19 个监测点 2010—2015 年的监测数据验证了土壤墒情综合诊断模型,结果表明综合诊断模型在华北区的半干旱区具有很好的适应性和很高的预测合格率。本文应用西北区的半湿润和半干旱区的甘肃省平凉市市辖区和定西市安定区的 13 个监测点 2012—2015 年的监测数据进一步验证土壤墒情综合诊断模型的适应性和预测合格率。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 土壤墒情数据 土壤墒情数据来源于全国土壤墒情监测系统 (<http://123.127.160.49:8080/>

mm/login/login.jsp),下载并整理出甘肃省平凉市市辖区和定西市安定区 13 个监测点 2012—2015 年表层土壤(0~20 cm)的墒情监测数据。监测点基本情况见表 1。

1.1.2 降水量数据 从中国气象科学共享服务网 (<http://data.cma.cn/>) 下载固定气象台站 2012—2015 年降水量数据,各监测点所对应的气象台站基本情况见表 2。

1.2 土壤墒情综合诊断方法

本文所述诊断方法包括 6 个独立的墒情诊断模型和 1 个综合诊断模型。6 个单独的诊断模型分别是平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法和移动统计法,其中平衡法和差减统计法为平衡模型,其他 4 个方法为统计模型,所有参数都通过统计获得(具体算法详见专栏文章)。综合诊断模型是 6 个独立诊断模型联合应用的模型。

1.2.1 单个模型的诊断方法 以监测点为基本诊断单元,利用某一特定监测点的 2014 年之前的历史墒情监测数据和相匹配的气象站降水量数据分别建立该监测点 6 个独立的墒情诊断模型,然后对所建立的模型进行自回归验证。

平衡法模型和移动统计法模型需要设定建模判断参数;全部 6 个独立诊断模型(平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法和移动统计法)均需要根据自回归验证结果、实测含水量数据和气象台站降水量数据的对比分析结果来确定水分来源项输入参数是否需要调整以及其相应的调整方案,调整水分来源项参数后重新建立的模型为最终模型。利用 6 个最终模型对各监测点进行墒情诊

表 1 甘肃省 13 个土壤墒情监测点基本情况
Table 1 Basic situation of 13 soil moisture monitoring sites in Gansu province

监测点编号	设置年份	所处位置	经度(°E)	纬度(°N)	主要种植作物	土壤类型
620801J001	2012	平凉市崆峒区白土村	106.84	35.39	小麦、夏玉米	壤土
620801J002	2012	平凉市崆峒区白土村	106.84	35.39	小麦、玉米	壤土
620801J004	2012	平凉市崆峒区贾洼村	106.69	35.57	小麦、玉米	壤土
620801J005	2012	平凉市崆峒区贾洼村	106.69	35.57	小麦、玉米	壤土
620801J006	2012	平凉市崆峒区上李村	106.55	35.64	小麦、玉米	壤土
621102J001	2012	安定区凤翔镇景家口村	104.68	35.50	马铃薯、玉米	壤土
621102J002	2012	安定区鲁家沟乡将台村	104.53	35.81	马铃薯、玉米	壤土
621102J003	2012	安定区凤翔镇景家口村	104.68	35.50	马铃薯、玉米、小麦	壤土
621102J004	2012	安定区鲁家沟乡将台村	104.52	35.81	马铃薯、玉米	壤土
621102J005	2012	安定区青岚乡大坪村	104.67	35.57	马铃薯、玉米、小麦	壤土
621102J006	2012	安定区青岚乡大坪村	104.67	35.59	马铃薯、小麦	壤土
621102J007	2012	安定区香泉乡马莲村	104.52	35.42	马铃薯、玉米	壤土
621102J008	2012	安定区香泉乡马莲村	104.52	35.42	马铃薯、玉米	壤土

表 2 甘肃省 13 个土壤墒情监测点对应气象台站的基本情况

Table 2 The basic situation of 13 soil moisture monitoring sites and the corresponding meteorological stations in Gansu Province

监测点 编号	气象 站号	气象站 位置	经度 (°E)	纬度 (°N)	台站至监 测点距离 (km)
620801J001	53915	平凉市辖区	106.67	35.55	24
620801J002	53915	平凉市辖区	106.67	35.55	24
620801J004	53915	平凉市辖区	106.67	35.55	3
620801J005	53915	平凉市辖区	106.67	35.55	3
620801J006	53915	平凉市辖区	106.67	35.55	15
621102J001	52983	榆中市	104.15	35.87	63
621102J002	52983	榆中市	104.15	35.87	35
621102J003	52983	榆中市	104.15	35.87	63
621102J004	52983	榆中市	104.15	35.87	35
621102J005	52983	榆中市	104.15	35.87	58
621102J006	52983	榆中市	104.15	35.87	56
621102J007	52983	榆中市	104.15	35.87	60
621102J008	52983	榆中市	104.15	35.87	60

断,诊断方式分为时段诊断和逐日诊断 2 种。所谓时段诊断即只进行监测日的墒情诊断,而逐日诊断是从每年第一个监测日开始对全年每天的土壤含水量都进行诊断。对于每一个监测点,均可获得 6 个模型的时段诊断值和逐日诊断值。单个诊断模型的建立及相关参数的设定见专栏论文(《平衡法土壤墒情诊断模型》、《统计法土壤墒情诊断模型》、《差减统计法土壤墒情诊断模型》、《比值统计法土壤墒情诊断模型》、《间隔天数统计法土壤墒情诊断模型》、《移动统计法土壤墒情诊断模型》、《综合模型法土壤墒情诊断模型》)。

1.2.2 综合诊断方法 依据单个模型诊断结果,通过模型优选、时段和逐日诊断值确定、最终诊断结果计算 3 个步骤得到最终诊断结果,这一过程称为综合诊断方法。

模型优选:以“诊断误差绝对值大于 3 个质量含水量的个数少”为原则,对 6 个模型的诊断结果进行筛选,优选出针对某一特定监测点 3 个时段诊断的优选模型和 3 个逐日诊断的优选模型。在五级土壤墒情等级划分中,一个墒情等级大概为 5~6 个质量含水量范围(即 5%~6%质量含水量范围),根据土壤质量含水量与墒情等级的关系,以及基于异地气象站降水量预测土壤含水量可能产生的误差大小,以±3 个质量含水量(即 3%)以内作为土壤墒情诊断误差的合格标准。以含水量作为判断标准可以

直接与生产实际相结合,比较直观地反映土壤墒情状况。

时段和逐日诊断值确定:从优选模型的预测结果中筛选确定时段和逐日诊断值,诊断值的确定按照对土壤含水量影响最大且参数容易获取的原则,以相邻 2 个监测日间的时段降水量(P_w)和诊断日上一一次的土壤含水量监测值(P_i)来确定。具体的确定原则为: $P_w \leq a$ 时,取优选出 3 个优选模型诊断结果的最小值;当 $a < P_w \leq b$ 时,考虑 P_i ,如果 P_i 处于高值区域(高值根据具体监测点的实际墒情状况确定),即取 3 个优选模型诊断结果中的最大值; P_i 处于中低区域时,即取 P_i ;当 $b < P_w \leq c$ 时,取 3 个优选模型诊断结果的最大值;当 $P_w > c$ 时,取监测记录的最大值-1。其中 a 、 b 、 c 值是根据每个监测点墒情监测数据和时段累计降水量而设定的判断参数, $a > b > c$ 。

最终诊断结果计算:计算某个特定监测点的时段诊断值与逐日诊断值的平均值,即为最终诊断结果。

综合诊断方法见专栏论文(《综合模型法土壤墒情诊断模型》)。

1.2.3 验证方法 对于诊断结果的验证采用 2 种验证方式,一种是对参与建模土壤墒情数据的自回归验证,另一种是对未参与建模数据的 2015 年墒情诊断结果的验证。验证过程采用的主要指标包括每个监测点诊断结果的合格率以及诊断误差的最大值、最小值、平均值。

2 结果与分析

2.1 甘肃省平凉市辖区 620801J002 验证

以甘肃省平凉市辖区 620801J002 监测点为例,论述土壤墒情综合诊断模型的验证过程,对全部监测点(含甘肃省平凉市辖区 620801J002)的主要验证结果进行综合分析与讨论。该监测点距离 53915 号国家气象站约 24 km。采用 2012—2014 年数据建立 6 个墒情诊断模型并进行诊断计算,根据计算结果以及实测含水量数据和气象台站降水量数据的对比分析,确定在 2012 年 5 月 18 日增加 60 mm 灌溉量。使用调整后的降水量重新建立 6 个诊断模型并确定模型参数,据此进行该监测点的墒情诊断,依据诊断结果并按照综合模型应用流程进行模型优选,时段诊断和逐日诊断的优选模型见表 3。

表 3 平凉市辖区 620801J002 监测点优选诊断模型
Table 3 Optimization model of monitoring site (620801J002) in Pingliang City

诊断方式	优选模型名称
时段诊断	间隔天数统计法、移动统计法、差减统计法
逐日诊断	间隔天数统计法、比值统计法、平衡法

按照综合模型应用流程对该监测点进行了建模数据的自回归验证和 2015 年数据的验证。综合模型建模数据自回归验证结果见表 4,2015 年历史数据验证结果见表 5。

由表 4 可见,模型综合应用得到的最终诊断结果中,误差大于 3 个质量含水量的个数为 8 个,占 16.0%,其中大于 5 个质量含水量的有 3 个,为 6.0%;如果将预测误差小于 3 个质量含水量的预测结果作为合格预测结果,则综合模型预测合格率为 84.00%,自回归预测的平均误差为 1.85%,最大误差 7.92%,最小误差 0.01%。

由表 5 可见,模型综合应用得到的最终诊断结果中,误差大于 3 个质量含水量的个数为 3 个,为 17.65%,未出现误差大于 5 个质量含水量的预测结果;如果将预测误差小于 3 个质量含水量的预测结果作为合格预测结果,则综合模型预测合格率为 82.35%,2015 年历史数据验证结果的平均误差为 1.63%,最大误差 4.23%,最小误差 0.10%。

综上所述,综合模型自回归验证和 2015 年历史监测数据验证结果的合格率分别为 84.00% 和 82.35%。

2.2 甘肃省 13 个监测点验证

2.2.1 模型参数 模型参数包括平衡法模型、移动统计法模型判断参数和 6 个模型的水分来源项调整参数。

(1)平衡法模型判断参数 平衡法模型判断参数包括 2 类,一类是在建立 P_v (蒸渗流)方程过程中自变量最大值参数,该自变量为“ P_i+P_w ”,所代表的含义是“前一次含水量监测值与相邻 2 个监测日间累计降水量之和”,单位为 mm;另一类是采用 P_v (蒸渗流)方程计算含水量诊断值过程中,自变量(P_i+P_w)的分段参数,单位为 mm(见专栏论文《平衡法土壤墒情诊断模型》)。全部 13 个监测点的平衡法模型参数见表 6。

(2)移动统计法判断参数 该参数指统计法模型中建立含水量与时段日均降水量相关性方程过程所依据的含水量(质量含水量)中心点和步长,单位

表 4 综合模型 2012—2014 年建模数据自回归验证结果 (620801J002) (%)

Table 4 Autoregressive result of integrated diagnostic model with the data during the period of 2012–2014 (620801J002) (%)

监测日	实测值	时段 预测值	逐日 预测值	最终 预测值	误差值
2012-04-09	13.36	—	—	—	—
2012-04-23	13.19	12.93	13.39	13.16	-0.03
2012-05-07	13.50	13.19	13.19	13.19	-0.31
2012-05-24	22.32	18.46	21.88	20.17	-2.15
2012-06-08	14.99	20.02	19.30	19.66	4.67
2012-06-23	11.95	14.04	14.42	14.23	2.28
2012-07-03	18.27	23.61	23.61	23.61	5.34
2012-07-23	20.05	18.27	18.27	18.27	-1.78
2012-08-08	20.40	16.99	15.70	16.35	-4.06
2012-08-22	19.20	23.61	23.61	23.61	4.41
2012-09-07	23.29	19.62	21.24	20.43	-2.86
2012-09-23	23.27	19.94	19.66	19.80	-3.47
2012-10-10	22.99	20.17	17.79	18.98	-4.01
2012-10-23	15.54	17.99	17.47	17.73	2.19
2012-11-10	14.54	13.52	13.12	13.32	-1.22
2013-03-10	16.22	—	—	—	—
2013-03-25	14.57	14.09	14.16	14.13	-0.44
2013-04-10	14.25	13.55	13.07	13.31	-0.94
2013-04-25	12.83	14.25	14.25	14.25	1.42
2013-05-10	11.82	13.09	13.30	13.19	1.37
2013-05-24	12.62	15.92	15.23	15.58	2.96
2013-06-09	11.83	12.62	12.62	12.62	0.79
2013-06-25	23.62	23.61	23.61	23.61	-0.01
2013-07-18	23.77	23.61	23.61	23.61	-0.16
2013-07-25	24.23	20.05	23.53	21.79	-2.44
2013-08-12	24.11	23.61	23.61	23.61	-0.50
2013-08-26	14.01	20.84	23.03	21.93	7.92
2013-09-11	17.66	23.61	23.61	23.61	5.95
2013-09-22	17.24	17.66	17.66	17.66	0.42
2013-09-30	17.88	19.30	18.93	19.12	1.24
2013-10-09	13.74	15.44	15.00	15.22	1.48
2013-10-21	16.15	13.74	13.74	13.74	-2.41
2013-10-29	14.03	14.09	14.82	14.46	0.43
2013-11-12	15.61	13.61	14.01	13.81	-1.80
2014-03-21	13.85	—	—	—	—
2014-03-27	13.10	12.56	12.98	12.77	-0.33
2014-04-07	13.70	13.09	13.22	13.15	-0.55
2014-04-17	22.62	23.61	23.61	23.61	0.99
2014-04-28	24.42	23.14	22.6	22.87	-1.55
2014-05-10	15.61	17.51	18.80	18.16	2.55
2014-05-20	13.69	14.13	14.10	14.12	0.43
2014-05-30	13.05	13.21	13.34	13.28	0.23
2014-06-11	11.79	12.50	12.84	12.67	0.88
2014-07-07	12.88	11.79	11.79	11.79	-1.09
2014-07-23	12.63	12.88	12.88	12.88	0.25
2014-08-14	13.40	12.42	13.61	13.02	-0.39
2014-08-29	14.15	17.11	17.07	17.09	2.94
2014-09-28	24.61	23.61	23.61	23.61	-1.00
2014-10-09	22.28	22.08	22.64	22.36	0.08
2014-10-19	20.25	20.02	18.75	19.38	-0.87
2014-10-27	19.57	16.71	16.68	16.69	-2.88
2014-11-07	17.95	16.95	16.52	16.73	-1.22
2014-11-21	17.92	15.26	15.14	15.20	-2.72

表 5 综合模型 2015 年历史监测数据的验证结果 (620801J002) (%)

Table 5 Validation result of integrated diagnostic model with the data in 2015 (620801J002) (%)

监测日	实测值	时段	逐日	最终	误差值
		预测值	预测值		
2015-03-10	17.01	—	—	—	—
2015-03-18	17.26	15.20	15.01	15.1	-2.16
2015-03-29	15.83	15.56	15.33	15.44	-0.39
2015-04-08	16.70	18.02	17.83	17.92	1.22
2015-04-26	16.11	16.70	16.70	16.70	0.59
2015-05-06	16.23	15.27	15.07	15.17	-1.06
2015-05-26	15.83	16.23	16.23	16.23	0.40
2015-06-12	15.87	17.85	22.36	20.10	4.23
2015-07-10	14.40	15.87	15.87	15.87	1.47
2015-07-27	12.55	13.26	13.79	13.52	0.97
2015-08-07	12.72	12.55	12.55	12.55	-0.17
2015-08-24	14.94	12.72	12.72	12.72	-2.22
2015-09-12	18.50	14.94	14.94	14.94	-3.56
2015-09-24	19.48	18.50	18.50	18.50	-0.98
2015-10-07	19.66	16.99	17.34	17.16	-2.50
2015-10-29	19.76	19.66	19.66	19.66	-0.10
2015-11-09	19.61	16.94	16.76	16.85	-2.76
2015-11-22	19.49	16.64	16.34	16.49	-3.00

表 6 甘肃省 13 个墒情监测点平衡法模型参数

Table 6 Parameters of balance diagnostic model of 13 soil moisture monitoring sites in Gansu Province

监测点编号	所处市 (区)	自变量 最大值参数 (mm)	自变量分段参数	
			最小值 (mm)	最大值 (mm)
620801J001	平凉市辖区	71.66	60	80
620801J002	平凉市辖区	77.32	60	80
620801J004	平凉市辖区	79.51	60	80
620801J005	平凉市辖区	75.02	60	80
620801J006	平凉市辖区	78.12	60	80
621102J001	安定区	78.68	60	80
621102J002	安定区	65.66	60	80
621102J003	安定区	66.69	60	80
621102J004	安定区	67.92	60	80
621102J005	安定区	65.30	60	80
621102J006	安定区	69.69	60	80
621102J007	安定区	67.28	60	80
621102J008	安定区	64.73	60	80

为%(见专栏文章《移动统计法土壤墒情诊断模型》)。全部 13 个监测点的移动统计法模型参数见表 7。

(3)水分来源项调整参数 每个诊断模型均以监测点为基本诊断单元,13 个监测点水分来源项参数(灌溉+降水)调整方案见表 8。

2.2.2 各监测点优选模型 各监测点优选模型见表 9。由表 9 可见,统计法在逐日诊断中全部被选

表 7 甘肃省 13 个墒情监测点移动统计模型参数

Table 7 Parameters of movable statistical diagnostic model of 13 soil moisture monitoring sites in Gansu Province

监测点 编号	所处市 (区)	中心点参数		步长 参数
		最小值	最大值	
620801J001	平凉市辖区	11	24	2
620801J002	平凉市辖区	12	23	2
620801J004	平凉市辖区	12	23	2
620801J005	平凉市辖区	12	23	2
620801J006	平凉市辖区	12	24	2
621102J001	安定区	14	25	2
621102J002	安定区	15	23	2
621102J003	安定区	11	24	2
621102J004	安定区	10	21	2
621102J005	安定区	11	23	2
621102J006	安定区	11	21	2
621102J007	安定区	16	26	2
621102J008	安定区	12	24	2

表 8 甘肃省 13 个墒情监测点水分来源项参数调整方案

Table 8 Parameter adjustment scheme of water source of 13 soil moisture monitoring sites in Gansu Province

监测点编号	所处市(区)	参数调整	调整方案
620801J001	平凉市辖区	调整	2014 年 4 月 12 日增加 100 mm 灌溉量
620801J002	平凉市辖区	调整	2012 年 5 月 18 日增加 60 mm 灌溉量
620801J004	平凉市辖区	未调整	—
620801J005	平凉市辖区	未调整	—
620801J006	平凉市辖区	未调整	—
621102J001	安定区	调整	2012 年 8 月 19 日和 2014 年 4 月 8 日均增加 50 mm 灌溉量
621102J002	安定区	调整	2014 年 4 月 8 日增加 80 mm 灌溉量
621102J003	安定区	未调整	—
621102J004	安定区	调整	2013 年 10 月 4 日和 2014 年 8 月 19 日均增加 50 mm 灌溉量
621102J005	安定区	调整	2014 年 4 月 8 日增加 50 mm 灌溉量
621102J006	安定区	调整	2014 年 3 月 4 日和 2014 年 8 月 19 日均增加 50 mm 灌溉量
621102J007	安定区	调整	2012 年 8 月 19 日增加 50 mm 灌溉量
621102J008	安定区	调整	2014 年 8 月 19 日增加 50 mm 灌溉量

中,而差减统计法在时段和逐日诊断中分别被选中 10 和 12 次。

2.2.3 诊断值确定过程的参数设定 采用优选模型进行时段和逐日诊断值的确定过程需要设置判断参数,即 2.2 所述的 a 、 b 、 c 值,全部 6 个监测点的判断参数设定见表 10。

2.2.4 验证结果与分析 采用诊断结果与实测值的误差和诊断合格率两大类指标对综合模型进行验证,其中误差值包括最大值、最小值、平均值,诊断合格率指诊断结果合格的监测日占全部监测日的比例,验证结果汇总见表 11。

表 9 甘肃省 13 个监测点的优选诊断模型
Table 9 Optimization model of 13 soil moisture monitoring sites in Gansu Province

监测点 编号	所处市 (区)	时段诊断 优选模型	逐日诊断 优选模型
620801J001	平凉市辖区	差减统计法、间隔天数 统计法、统计法	差减统计法、间隔天 数统计法、统计法
620801J002	平凉市辖区	间隔天数统计法、差减 统计法、移动统计法	间隔天数统计法、比 值统计法、平衡法
620801J004	平凉市辖区	间隔天数统计法、移动 统计法、比值统计法	差减统计法、统计 法、平衡法
620801J005	平凉市辖区	差减统计法、统计法、 移动统计法	差减统计法、统计 法、比值统计法
620801J006	平凉市辖区	统计法、间隔天数统计 法、移动统计法	统计法、差减统计 法、平衡法
621102J001	安定区	差减统计法、间隔天数 统计法、比值统计法	差减统计法、比值统 计法、统计法
621102J002	安定区	差减统计法、比值统计 法、间隔天数统计法	差减统计法、比值统 计法、统计法
621102J003	安定区	差减统计法、间隔天数 统计法、移动统计法	差减统计法、间隔天 数统计法、统计法
621102J004	安定区	间隔天数统计法、统计 法、移动统计法	间隔天数统计法、统 计法、差减统计法
621102J005	安定区	差减统计法、比值统计 法、移动统计法	差减统计法、比值统 计法、统计法
621102J006	安定区	差减统计法、间隔天数 统计法、移动统计法	差减统计法、间隔天 数统计法、统计法
621102J007	安定区	差减统计法、比值统计 法、间隔天数统计法	差减统计法、比值统 计法、统计法
621102J008	安定区	差减统计法、间隔天数 统计法、移动统计法	差减统计法、间隔天 数统计法、统计法

表 10 甘肃省 13 个墒情监测点的判断参数
Table 10 Judgment parameters of 13 soil moisture monitoring sites in Gansu Province

监测点 编号	所处市 (区)	判断参数设定		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
620801J001	平凉市辖区	20	50	80
620801J002	平凉市辖区	20	50	80
620801J004	平凉市辖区	20	50	80
620801J005	平凉市辖区	20	50	80
620801J006	平凉市辖区	20	50	80
621102J001	安定区	20	50	100
621102J002	安定区	20	50	100
621102J003	安定区	20	50	80
621102J004	安定区	20	50	80
621102J005	安定区	20	50	100
621102J006	安定区	20	50	80
621102J007	安定区	20	50	100
621102J008	安定区	20	50	80

3 结论与讨论

3.1 诊断模型参数

在对甘肃省 13 个监测点验证过程中,平衡法模型自变量(P_i+P_w)最大值参数范围为 60~80 mm,自变量分段参数(最小值和最大值)全部为 60 和 80 mm;移动统计法模型中心点参数最小值范围为 11%~16%,最大值范围为 21%~26%,步长均为 2%;

表 11 甘肃省 13 个土壤墒情监测点验证结果(%)
Table 11 Validation results of 13 soil moisture monitoring sites in Gansu Province

监测点 编号	验证 方式	最大 误差	最小 误差	平均 误差	验证 合格率
620801J001	自回归验证	5.85	0.02	1.61	85.42
	2015 年数据验证	3.15	0.06	1.66	94.82
620801J002	自回归验证	7.92	0.01	1.85	84.00
	2015 年数据验证	4.23	0.10	1.63	82.35
620801J004	自回归验证	4.36	0.10	1.40	88.00
620801J005	2015 年数据验证	5.84	0.09	1.51	82.36
620801J005	自回归验证	7.03	0.00	1.86	76.47
620801J006	2015 年数据验证	4.94	0.22	1.55	82.36
	自回归验证	5.15	0.12	1.69	84.00
621102J001	2015 年数据验证	3.73	0.01	1.45	76.47
	自回归验证	5.10	0.09	1.23	95.65
621102J002	2015 年数据验证	3.07	0.09	0.99	94.12
	自回归验证	3.38	0.06	1.19	97.73
621102J002	2015 年数据验证	4.57	0.00	1.06	88.24
	自回归验证	6.18	0.32	2.33	73.93
621102J003	2015 年数据验证	4.73	0.19	1.41	93.34
621102J004	自回归验证	5.46	0.09	1.63	91.30
621102J004	2015 年数据验证	2.77	0.20	1.23	100.00
	自回归验证	5.90	0.00	1.22	89.36
621102J005	2015 年数据验证	3.46	0.02	0.86	94.12
	自回归验证	5.96	0.05	1.92	83.67
621102J006	2015 年数据验证	3.25	0.19	1.11	94.12
	自回归验证	6.60	0.04	1.33	89.58
621102J007	2015 年数据验证	3.83	0.01	1.07	88.24
	自回归验证	5.76	0.05	2.01	79.59
621102J008	2015 年数据验证	2.65	0.00	0.97	100.00

有 9 个监测点在建模时进行了水分来源项(灌溉)输入参数的调整;优选模型时段和逐日诊断值确定过程的判断参数均为 20、50 和 80 mm。

由以上模型参数的汇总可见,就本文所述 13 个墒情监测点的验证来看,在气候相似的地区单个监测点的模型在甘肃省的空间扩展应用范围较大,因此采用综合诊断模型对省域土壤墒情进行诊断时,可以根据地形、土壤类型以及气候类型相似的原则,将单个监测点建模的方式扩展为区域建模方式建立模型的参数体系。

3.2 与本地区其他研究的对比

杨兴国等(1998)利用水量平衡法和 Y.M 安格斯坦法对甘肃中部雨养农业区土壤水分预测进行了对比,结果表明 Y.M 安格斯坦法比水量平衡法效果好,但误差较大。蒲金涌等(2010)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了分析并建立了土壤墒情的预报预警模型,该模型得到的精度较高但试验数据量少,地

域性强,通用性较差。本文使用大量数据进行建模,后进行验证,并且每个监测点单独建模,其中隐含了土壤下垫面状况,精度和实用性较强。

3.3 结 论

综合诊断模型在甘肃省平凉市市辖区和定西市安定区 13 个监测点的验证结果表明,时段和逐日的 26 次验证中,最低的诊断合格率为 73.93%,由此看来,该模型在甘肃省具有较好的适用性;平凉和安定区分别属于半湿润和半干旱气候区,不同气候区模型参数不同,2 个气候区模型合格率平均分别为 83.63%和 90.81%,说明降水越少的地区模型合格率越高。综合模型在甘肃省的验证结果表明:(1)模型具有较好的适用性;(2)不同降水量区域模型参数不同;(3)降水越少的地区模型预测合格率越高。

参考文献

- 邓振镛,林日暖. 1991. 甘肃省土壤水分变化特征与分区的研究. 干旱地区农业研究, (3): 67-76.
- 康绍忠,刘晓明,熊运章. 1994. 土壤植物大气连续体水分传输理论及其应用. 北京:水利电力出版社.
- 郭海英,马鹏里,杨兴国,等. 2005. 陇东黄土高原塬区冬小麦越冬期土壤水分损耗规律浅析. 土壤通报, 36(2): 165-168.
- 李小刚,杨 治,谢恩波. 1994. 甘肃几种旱地土壤低吸力

- 段持水性能的初步研究. 土壤通报, (4): 155-157.
- 李栋梁. 2000. 甘肃气候. 北京:气象出版社.
- 裴 彬. 2009. 近 30 年来甘肃气候变化趋势及其对干湿状况的影响. 干旱区资源与环境, 23(9): 90-94.
- 蒲金涌,姚小英,贾海源,等. 2005. 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. 土壤通报, 36(4): 483-486.
- 蒲金涌,姚晓红,辛昌业,等. 2010. 甘肃黄土高原土壤水分预测及早情预警模型研究. 干旱地区农业研究, 28(3): 254-258.
- 邵明安,杨文治,李玉山. 1987. 植物根系吸收土壤水分的数学模型. 土壤学报, 24(4): 295-304.
- 肖俊夫,陈玉民,孙景生. 1997. 利用反推法进行农田灌溉预报的初步研究. 灌溉排水, 16(1): 29-32.
- 姚小英,王澄海,蒲金涌,等. 2006. 甘肃黄土高原地区土壤水热特征分析. 土壤通报, 37(4): 666-670.
- 杨兴国,柯晓新,张旭东,等. 1998. 甘肃中部雨养农业区土壤水分预测模式的研究. 干旱气象, 16(4): 44-46.
- 郑 度. 2008. 中国生态地理区域系统研究. 北京:商务印书馆.
- 张胜平,杨 罗. 1996. 山东省墒情规律分析及实用墒情预报方案编制的探讨. 水文, (3): 24-30.

作者简介 米长虹,男,1968 年生,副研究员,主要从事农业资源环境数据挖掘与环境影响评价研究。E-mail: mch68@sina.com

责任编辑 张 敏
