

综合模型法土壤墒情诊断模型

米长虹¹ 郑宏艳¹ 侯显达² 侯彦林^{1,2*} 刘书田^{1,2} 黄治平¹ 丁健¹ 王铄今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 本文介绍了将平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法、移动统计法 6 个独立模型综合应用的墒情综合模型法的原理和方法, 并应用 7 个省 23 个县 87 个监测点 2012—2014 年的数据建模, 应用 2015 年的数据进行了验证。结果表明: 综合模型诊断和预测合格率高, 为 97% 以上。综合模型的优点: 6 个独立模型的参数在不同气候、下垫面和管理措施下的取值不同, 因此, 6 个独立模型即使按点统计也不通用; 而在同一次预测时, 6 个模型预测结果中总有一个预测精度较高的结果, 这个结果与时段降水量和初始土壤含水量之和高度相关; 通过对 6 个模型的适应性优选后, 从概率上选择水分来源数量对应的预测结果。

关键词 土壤含水量; 降水量; 时段模型; 逐日模型; 验证

Integrated diagnostic model of soil moisture. MI Chang-hong¹, ZHENG Hong-yan¹, HOU Xian-da², HOU Yan-lin^{1,2*}, LIU Shu-tian^{1,2}, HUANG Zhi-ping¹, DING Jian¹, WANG Shuo-jin² (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), Ministry of Education/Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation (Guangxi Teachers Education University), Nanning 530001, China).

Abstract: The principle and method of integrated diagnostic model of soil moisture were introduced, which synthesizes balance diagnostic model, statistical diagnostic model, subtractive statistical diagnostic model, ratio statistical diagnostic model, interval days statistics diagnostic model and moving statistics diagnostic model. The model was established by using the data of 87 monitoring sites in 23 counties in 7 provinces during the period of 2012–2014, and was validated by using the data of 2015. The results showed that the integrated model had high qualification rate (>97%) in diagnosis and prediction. The advantages of integrated diagnostic model are embodied as: (1) the parameters of the six independent models are different under different climates, underlying surface and management measures. Therefore, the six independent models are not universal even by site-specific statistics. (2) In the same prediction, one of the prediction results of the six models always has relatively high accuracy. This result is highly correlated with the sum of the precipitation in different periods and the initial soil water content. After adaptive optimization of the six models, the predicted result is selected according to the sum of water income by the probability.

Key words: soil water content; precipitation; time interval model; daily time series model; verification.

墒情也称土壤墒情,是作物根系分布层土壤水分的分布状况,即土壤含水量状况,其直接影响着作物的生长发育和产量、品质的形成,是确定灌溉的主要依据之一(张忠等,2007),对节水灌溉和排水措施、施肥决策等的制定具有重要意义(杨曙光,2007)。降水和灌溉是土壤水的主要来源,作物蒸腾和土壤蒸发以及深层渗漏是土壤水的主要去向。影响土壤墒情的因素包括:年降水量及其时间分配(赵晓光等,1999;杨开甲等,2015)、降水频率或日数、每次降水特征(降水量、降水持续时间、降水强度等)(邱扬等,2001;何其华等,2003;周景春等,2007;贾东于等,2014)、地形(高程、坡度、坡向、坡位)、土壤(质地、有机质、质地剖面等)(王栓全等,2009;李美婷等,2012;李美婷,2012)、作物栽培模式、灌溉管理方式、气温和土温、空气湿度、日照、风、作物有无和长势变化、土壤空隙变化以及时间等(马轶等,2012),同时墒情表现为土体(还涉及到不同层次)、田间和区域3个空间尺度与中期(月)、短期(周)和实时(每日)3个时间尺度上,因此精准的土壤含水量诊断和墒情等级划分并非易事,建立土壤墒情监测、诊断及预报模型和信息平台是一项紧迫的农业技术推广工作。然而,土壤墒情监测、诊断和预报理论、方法和技术体系还不够成熟,对其进行系统的科学研究,特别是大数据研究就显得十分重要和紧迫。

土壤含水量常见预测方法有经验公式法(许秀英等,2013)、水量平衡法(龚元石等,1995)、消退指数法(马孝义等,2002)、土壤水动力学(许秀英等,2013)、时间序列法(刘洪斌等,2003;白冬妹等,2014)、神经网络模型法(高如泰等,2005;周良辰,2007;郑重等,2007;聂春燕等,2010)、遥感监测法(李玉环等,2006)等。我们通过对全国土壤墒情监测网的墒情监测数据研究建立了平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法、移动统计法等6个土壤墒情诊断模型,见本专栏论文(《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》)。

传统的墒情诊断与预测大多采用单一模型,针对某一种特定模型的普遍适用性方面的研究鲜有报道。我们在对平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法、移动统计法等6个土壤墒情

诊断模型进行大量验证研究的过程中发现,每个模型对不同土壤墒情监测点的诊断准确率存在较大的差异,同时对于某一特定监测点总有2~3个模型的诊断准确率能达到满意的效果。基于以上原因,为探索符合准确性预期且具有相对普遍适用性的土壤墒情诊断模型,我们进行了6个模型联合应用的研究,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、最终诊断结果计算的3个步骤得到最终诊断结果。6个模型联合应用的方法即为本文所述综合模型法。

1 材料与方法

土壤墒情监测数据是从农业部节水处全国土壤墒情监测网上获得的(<http://123.127.160.49:8080/mm/login/login.jsp>)。土壤墒情监测数据含有日期,即监测年月日,一般每隔15 d测定1次土壤含水量;分0~20和20~40 cm 2层(本次只使用0~20 cm数据)测定的含水量数据;部分监测点有初始时测定的土壤容重数据。降水量数据是从国家标准气象站获得的历史上逐日降水量数据(<http://data.cma.cn/>)。

用于模型分析验证的监测点为87个,分别为:东北地区的吉林省3个县、市、区6个监测点;西北地区的甘肃省2个县、市、区13个监测点;华北地区的内蒙古自治区5个旗、县、市、区19个监测点,山西省2个县、市、区16个监测点,河北省3个县、市、区14个监测点;河南省3个县、市、区7个监测点,湖南省4个县、市、区12个监测点(湖南省为南方唯一验证的省份)。为了节省篇幅,各监测点原始数据未能全部列出,只以甘肃省平凉市辖区620801J001监测点为例进行介绍,如表1所示。

1.1 综合模型法土壤墒情诊断模型建模方法

经过对大量土壤含水量监测数据挖掘研究发现,因土壤类型、降水量特点、气候类型以及含水量水平不同,从诊断准确性方面看,我们研究建立的平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法、移动统计法等6种土壤墒情诊断方法各有优劣。为进一步提高诊断结果的准确性,采用6种模型综合应用来进行土壤的墒情诊断,称为综合模型法。

综合模型法墒情诊断模型的应用流程是先采用6种方法分别进行时段诊断后优选出3种模型,再利用时段含水量(P_w)确定一个“时段诊断值”;同样

表 1 甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点原始数据
Table 1 Original data of 620801J001 monitoring site in Pingliang area of Gansu Province

日期	间隔天数	实测含水量 (P_i) (%)	实测含水量 (P_i) (mm)	时段降雨量 (P_w) (mm)
2012-04-09	-	13.34	30.68	-
2012-04-23	14	13.13	30.20	9.84
2012-05-07	14	14.50	33.35	31.34
2012-06-08	32	15.05	34.62	50.52
2012-06-23	15	12.04	27.69	13.15
2012-07-03	10	19.57	45.01	60.20
2012-07-23	20	19.92	45.82	35.30
2012-08-08	16	20.54	47.24	16.36
2012-08-22	14	20.05	46.12	75.04
2012-09-07	16	21.95	50.49	57.66
2012-09-23	16	21.92	50.42	29.06
2012-10-10	17	21.68	49.86	33.17
2012-10-23	13	15.22	35.01	9.93
2012-11-10	18	14.96	34.41	2.48
2013-03-10	-	12.68	29.16	-
2013-04-10	31	10.36	23.83	6.41
2013-04-25	15	12.91	29.69	24.95
2013-05-10	15	11.85	27.26	12.55
2013-05-24	14	12.89	29.65	48.84
2013-06-09	16	11.99	27.58	33.16
2013-06-25	16	23.38	53.77	89.46
2013-07-18	23	24.41	56.14	165.43
2013-07-25	7	24.44	56.21	13.97
2013-08-12	18	24.31	55.91	106.28
2013-08-26	14	24.00	55.20	37.24
2013-09-11	16	18.48	42.50	111.06
2013-09-22	11	17.88	41.12	22.71
2013-09-30	8	18.35	42.21	30.48
2013-10-09	9	14.10	32.43	0.39
2013-10-21	12	16.53	38.02	16.32
2013-10-29	8	14.58	33.53	0.08
2013-11-12	14	15.66	36.02	14.14
2014-03-18	-	13.41	30.84	-
2014-03-27	9	12.29	28.27	0.09
2014-04-07	11	14.31	32.91	9.21
2014-04-17	10	25.33	58.26	10.20
2014-04-28	11	23.70	54.51	57.91
2014-05-10	12	15.70	36.11	4.02
2014-05-20	10	13.93	32.04	0.50
2014-05-30	10	13.22	30.41	6.30
2014-06-11	12	12.13	27.90	3.92
2014-07-07	26	13.15	30.25	43.76
2014-07-23	16	12.85	29.56	24.46
2014-08-14	22	13.93	32.04	16.82
2014-08-29	15	15.10	34.73	64.65
2014-09-28	30	24.07	55.36	201.00
2014-10-09	11	22.35	51.41	47.31
2014-10-19	10	21.04	48.39	14.00
2014-10-27	8	19.38	44.57	0.38
2014-11-07	11	18.30	42.09	10.61
2014-11-21	14	17.91	41.19	1.54

方法获得一个“逐日诊断值”,分别以“时段诊断值”和“逐日诊断值”的平均值作为最终的诊断结果,其流程图如图 1。

1.1.1 模型优选 分别用平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法、移动统计法进行土壤墒情进行诊断,再对 6 种方法时段诊断结果进行筛选,依次以“诊断误差绝对值大于 3 个质量含水量的个数少”、“诊断误差绝对值大于 5 个质量含水量的个数少”和“平均误差小”为依据,将这 6 种方法进行排序,挑选出最好的 3 个模型。

1.1.2 “时段诊断值”的计算 时段诊断值确定:从优选模型的预测结果中筛选确定时段诊断值,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)和诊断日上一天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,取优选出 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减 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, $a > b > c$ 。表 2 为 87 个监测站点选取原则的参数表。

1.1.3 “逐日诊断值”的计算 “逐日诊断值”的计算过程、参数等与“时段诊断值”相同,但是“时段诊断值”采用 P_w ，“逐日诊断值”采用 P_{w15} (标准化的时段降水量),即将相邻 2 个监测日的实际时段降水量折算成间隔 15 d 的降水量,转换公式为:

$$P_{w15} = P_w \div D \times 15 \quad (1)$$

式中: P_{w15} 为标准化的时段降水量(mm 高度); P_w 为相邻 2 个监测日之间的实际降水量(mm); D 为第($i+1$)次监测到第 i 次监测的间隔时间。

1.1.4 综合模型法结果 综合模型法结果是将同一个监测点的“时段诊断值”与“逐日诊断值”取平均值,作为最终诊断结果。

1.2 软件

本文所使用的软件为 Excel 和编写的墒情算法软件,前期探讨算法时使用 Excel,当算法确定后编制软件并使用。

1.3 结果评价方法

土壤墒情等级中,一个墒情等级大概为 5~6 个

表2 87个监测站点选取原则的参数
Table 2 Parameters of 87 monitoring sites

省别	监测点及编号	参数(mm)	省别	监测点及编号	参数(mm)
吉林省	220881J005 洮南市	20、50、100	山西省	140932J008 偏关县	20、50、80
吉林省	220822J003 通榆县	20、50、80	山西省	140932J009 偏关县	20、50、80
吉林省	220822J004 通榆县	20、50、80	山西省	140932J0010 偏关县	20、50、80
吉林省	220722J001 长岭县	20、50、80	山西省	140421J001 长治县	20、50、80
吉林省	220722J005 长岭县	20、50、80	山西省	140421J002 长治县	20、50、80
吉林省	220421J005 东丰县	20、50、100	山西省	140421J003 长治县	20、50、80
内蒙古	150502J002 科尔沁区	20、50、80	山西省	140421J005 长治县	20、50、80
内蒙古	152527J001 太仆寺旗	20、50、80	山西省	140421J006 长治县	20、50、80
内蒙古	152527J002 太仆寺旗	20、50、80	山西省	140421J007 长治县	20、50、80
内蒙古	152527J003 太仆寺旗	20、50、80	山西省	140421J008 长治县	20、50、80
内蒙古	152527J004 太仆寺旗	20、50、80	河北省	130224J004 滦南县	20、50、80
内蒙古	152527J005 太仆寺旗	20、50、80	河北省	130224J005 滦南县	20、50、80
内蒙古	150981J001 丰镇市	20、50、80	河北省	130183J001 晋州市	20、50、80
内蒙古	150981J002 丰镇市	20、50、80	河北省	130183J002 晋州市	20、50、80
内蒙古	150981J003 丰镇市	20、50、80	河北省	130183J003 晋州市	20、50、80
内蒙古	150981J004 丰镇市	20、50、80	河北省	130183J004 晋州市	20、50、80
内蒙古	150981J005 丰镇市	20、50、80	河北省	130183J005 晋州市	20、50、80
内蒙古	150125J003 武川县	20、50、80	河北省	130183J007 晋州市	20、50、80
内蒙古	150125J004 武川县	20、50、80	河北省	130183J008 晋州市	20、50、80
内蒙古	150125J005 武川县	20、50、80	河北省	130183J009 晋州市	20、50、80
内蒙古	150223J001 达茂旗	20、50、80	河北省	130183J010 晋州市	20、50、80
内蒙古	150223J002 达茂旗	20、50、80	河北省	130183J011 晋州市	20、50、80
内蒙古	150223J003 达茂旗	20、50、80	河北省	130528J009 宁晋县	20、50、80
内蒙古	150223J004 达茂旗	20、50、80	河北省	130528J010 宁晋县	20、50、80
内蒙古	150223J005 达茂旗	20、50、80	河南省	410184J005 新郑市	20、50、80
甘肃省	620801J001 平凉市辖区	20、50、80	河南省	410184J006 新郑市	20、50、80
甘肃省	620801J002 平凉市辖区	20、50、80	河南省	410184J007 新郑市	20、50、80
甘肃省	620801J004 平凉市辖区	20、50、80	河南省	410184J009 新郑市	20、50、80
甘肃省	620801J005 平凉市辖区	20、50、80	河南省	410381J006 偃师市	20、50、80
甘肃省	620801J006 平凉市辖区	20、50、80	河南省	410482J005 汝州市	20、50、80
甘肃省	621102J001 安定区	20、50、100	河南省	410482J009 汝州市	20、50、80
甘肃省	621102J002 安定区	20、50、100	湖南省	433122J002 泸溪县	20、50、500
甘肃省	621102J003 安定区	20、50、80	湖南省	430903Z001 赫山区	20、50、250
甘肃省	621102J004 安定区	20、50、80	湖南省	430903J001 赫山区	20、50、250
甘肃省	621102J005 安定区	20、50、100	湖南省	430903J002 赫山区	20、50、250
甘肃省	621102J006 安定区	20、50、80	湖南省	430903J003 赫山区	20、50、250
甘肃省	621102J007 安定区	20、50、100	湖南省	431281J001 洪江市	20、50、500
甘肃省	621102J008 安定区	20、50、80	湖南省	431281J002 洪江市	20、50、500
山西省	140932J001 偏关县	20、50、80	湖南省	431281J003 洪江市	20、50、500
山西省	140932J002 偏关县	20、50、80	湖南省	431281J005 洪江市	20、50、500
山西省	140932J003 偏关县	20、50、80	湖南省	431103Z001 冷水滩	20、50、250
山西省	140932J005 偏关县	20、50、80	湖南省	431103Y003 冷水滩	20、50、250
山西省	140932J006 偏关县	20、50、80	湖南省	431103Y005 冷水滩	20、50、250
山西省	140932J007 偏关县	20、50、80	-	-	-

质量含水量(即5%~6%质量含水量),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的实际误差,将以 ± 3 个质量含水量以内作为土壤墒情诊断误差的合格标准,即若预测值与实测值的差值在3个质量含水量范围内,则为合格。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。土壤墒情监测站点一般一个月监测2次,且监测年限少(4~5年),如果划分季节、月份、雨季等会造成数据量少,没有代表性。本文对监测点数据保证样本数量的前提下对样本进行整体的计算,没有人为划分监测时间区段,这样有利于模型简化。

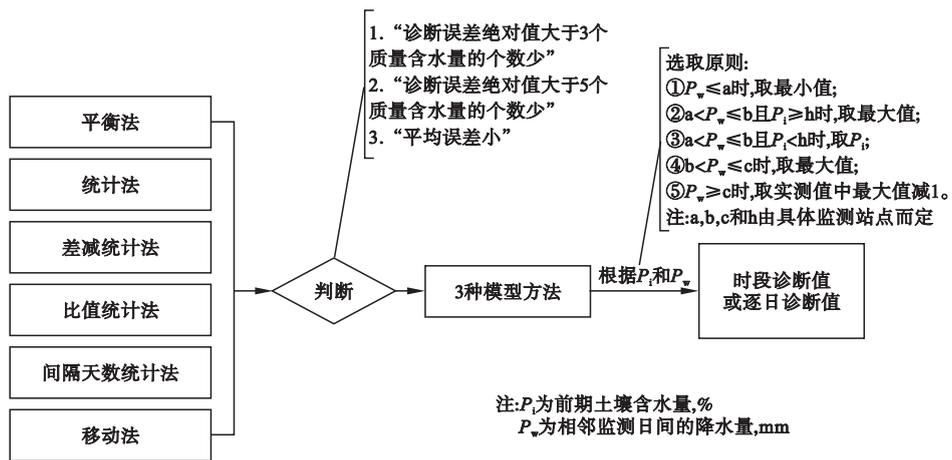


图1 综合模型的优选模型流程图

Fig.1 Flow chart of optimization model based on integrated diagnostic model

2 结果与分析

以甘肃省平凉市辖区 620801J001 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(含平凉市辖区 620801J001)的主要验证结论进行综合分析讨论。

本模型所采用的降水量为国家气象局气象站数据,土壤墒情监测数据中没有灌溉时间和灌溉量的记录,其降水量数据与墒情监测点的实际降水量在个别时间段内可能存在较大差距,使得个别监测时间的土壤含水量突然明显增加,而时段的降水量不足以满足土壤含水量增加之幅度,合理的解释就是灌溉造成了土壤含水量的突然明显增加(即使没有灌溉,也可以理解为监测点的降水量明显高于气象站的降水量)。因此,在模型建立过程中需要对出现以上情形时段的水分来源项进行修正,修正的方法是假定在时段内有灌溉,从而在水分来源项中增加灌溉量。本案例(甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点)考虑 2014 年 4 月 7—17 日时间段内增加灌溉量,最终灌溉时间确定为时段中点,即将 2014 年 4 月 12 日作为灌溉日而增加灌溉,考虑到普通灌溉方式确定为灌溉量为 100 mm。

2.1 时段诊断值

表 3 为甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2012—2014 年水分来源项修正前后综合模型法时段诊断结果。

由表 3 可见,综合模型法时段诊断的 3 个优选模型分别是间隔天数统计法、差减统计法和统计法;时段诊断结果中,诊断误差绝对值大于 3 个质量含

水量的有 6 个,为全部诊断结果个数的 12.5%,其中大于 5 个质量含水量的有 2 个,为全部诊断结果的 4.17%;按照诊断误差在 3 个质量含水量范围以内为诊断合格的标准,则综合模型法土壤墒情诊断模型自回归预测合格率为 87.5%,平均误差为 1.72%,最大误差为 11.05%,最小误差为 0.02%。水分来源项修正后综合模型法土壤墒情诊断模型自回归预测合格率为 79.17%(大于 3 个质量含水量的增加 4 个,其中大于 5 个质量含水量的减少 1 个),平均误差为 1.66%,最大误差为 5.85%,最小误差为 0.02%,加灌溉后的最大预测误差有所减小。

2.2 逐日诊断值

表 4 为甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2012—2014 年灌溉前后综合模型法逐日诊断结果。

由表 4 可见,综合模型法逐日诊断的 3 个优选模型分别是间隔天数统计法、差减统计法和统计法;逐日诊断结果中诊断误差绝对值大于 3 个质量含水量的有 7 个,占全部诊断结果个数的 14.58%,其中大于 5 个质量含水量的有 2 个,占全部诊断结果个数的 4.17%;按照诊断误差在 3 个质量含水量范围以内为诊断合格的标准,则综合模型法逐日诊断自回归预测合格率为 85.42%,平均误差为 1.74%,最大误差为 10.94%,最小误差为 0.02%。水分来源项修正后(即灌溉后)综合模型法逐日诊断自回归预测合格率为 89.58%(大于 3 个质量含水量的减少 2 个,其中大于 5 个质量含水量的减少 1 个),平均误差为 1.56%,最大误差为 5.85%,最小误差为 0.01%,可见加灌溉后的预测误差有所减小。

表3 甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2012—2014 年综合模型时段诊断结果 (%)

Table 3 Interval results of integrated diagnostic model for 620801J001 monitoring site in Pingliang area of Gansu Province during the period of 2012–2014 (%)

监测日	实测值	原始数据结果					加灌溉后结果				
		间隔天数 统计法	差减 统计法	统计法	时段 诊断值	误差值	间隔天数 统计法	差减 统计法	统计法	时段 诊断值	误差值
2012-04-09	13.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012-04-23	13.13	14.21	14.15	13.54	13.54	0.41	13.90	13.83	12.87	12.87	-0.26
2012-05-07	14.50	15.24	14.92	14.85	13.13	-1.37	15.09	14.79	14.80	13.13	-1.37
2012-06-08	15.05	14.23	16.51	16.88	14.50	-0.55	14.10	16.54	14.25	14.50	-0.55
2012-06-23	12.04	15.11	15.27	15.00	15.00	2.96	14.82	14.98	13.99	13.99	1.95
2012-07-03	19.57	16.82	15.50	16.27	24.33	4.76	16.90	15.62	19.77	24.33	4.76
2012-07-23	19.92	17.85	18.77	19.06	19.57	-0.35	17.70	18.67	19.19	19.57	-0.35
2012-08-08	20.54	17.63	18.19	18.64	17.63	-2.91	17.37	17.92	18.57	17.37	-3.17
2012-08-22	20.05	21.37	20.98	20.87	24.33	4.28	21.55	21.22	21.73	24.33	4.28
2012-09-07	21.95	19.89	19.98	20.09	20.09	-1.86	19.93	20.07	20.71	20.71	-1.24
2012-09-23	21.92	19.35	19.87	20.37	20.37	-1.55	19.18	19.71	20.75	20.75	-1.17
2012-10-10	21.68	19.40	20.03	20.45	20.45	-1.23	19.26	19.90	20.96	20.96	-0.72
2012-10-23	15.22	18.65	18.93	19.72	18.65	3.43	18.37	18.60	18.90	18.37	3.15
2012-11-10	14.96	14.18	14.92	14.51	14.18	-0.78	13.79	14.54	13.12	13.12	-1.84
2013-03-10	12.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013-04-10	10.36	11.11	13.63	12.81	11.11	0.75	10.65	13.28	12.41	10.65	0.29
2013-04-25	12.91	13.33	13.07	12.57	10.36	-2.55	13.11	12.89	14.46	10.36	-2.55
2013-05-10	11.85	13.98	14.02	13.41	13.41	1.56	13.68	13.72	13.70	13.68	1.83
2013-05-24	12.89	15.51	14.92	15.34	15.51	2.62	15.48	14.94	17.83	17.83	4.94
2013-06-09	11.99	14.91	14.86	14.82	12.89	0.90	14.75	14.75	15.81	12.89	0.90
2013-06-25	23.88	17.43	16.69	18.40	24.33	0.45	17.69	17.07	21.10	24.33	0.45
2013-07-18	24.41	26.51	26.64	23.49	24.33	-0.08	27.31	27.67	25.17	24.33	-0.08
2013-07-25	24.44	21.18	20.66	21.79	21.79	-2.65	20.97	20.36	21.05	21.05	-3.39
2013-08-12	24.31	24.42	24.51	22.82	24.33	0.02	24.82	25.02	25.03	24.33	0.02
2013-08-26	24.00	21.30	21.56	21.99	21.99	-2.01	21.21	21.47	21.73	21.73	-2.27
2013-09-11	18.48	24.75	24.45	22.77	24.33	5.85	25.20	25.01	24.83	24.33	5.85
2013-09-22	17.88	17.99	17.63	17.88	18.48	0.60	17.80	17.41	21.12	18.48	0.60
2013-09-30	18.35	18.55	17.61	17.81	18.55	0.20	18.44	17.46	21.83	21.83	3.48
2013-10-09	14.10	17.04	16.62	16.86	16.62	2.52	16.70	16.22	19.35	16.22	2.12
2013-10-21	16.53	15.25	14.86	14.51	14.10	-2.43	15.00	14.59	15.28	14.10	-2.43
2013-10-29	14.58	16.24	15.57	15.41	15.41	0.83	15.90	15.16	15.04	15.04	0.46
2013-11-12	15.66	15.08	15.04	14.72	14.72	-0.94	14.80	14.76	14.16	14.16	-1.50
2014-03-18	13.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014-03-27	12.29	14.49	13.79	12.95	12.95	0.66	14.14	13.38	12.00	12.00	-0.29
2014-04-07	14.31	14.09	13.52	12.72	12.72	-1.59	13.79	13.20	12.46	12.46	-1.85
2014-04-17	25.33	15.34	14.72	14.28	14.28	-11.05	21.09	19.43	25.89	24.33	-1.00
2014-04-28	23.70	23.37	23.01	22.74	23.37	-0.33	23.47	23.09	22.60	23.47	-0.23
2014-05-10	15.70	19.53	19.84	21.13	19.53	3.83	19.21	19.45	20.44	19.21	3.51
2014-05-20	13.93	15.54	15.11	14.78	14.78	0.85	15.18	14.71	14.07	14.07	0.14
2014-05-30	13.22	14.93	14.34	13.75	13.75	0.53	14.62	13.99	13.48	13.48	0.26
2014-06-11	12.13	14.14	13.84	13.06	13.06	0.93	13.79	13.47	12.91	12.91	0.78
2014-07-07	13.15	13.57	14.87	15.12	12.13	-1.02	13.42	14.85	15.20	12.13	-1.02
2014-07-23	12.85	14.59	14.65	14.39	13.15	0.30	14.36	14.46	14.78	13.15	0.30
2014-08-14	13.93	13.12	14.16	13.66	13.12	-0.81	12.79	13.90	13.58	12.79	-1.14
2014-08-29	15.10	17.27	16.77	17.48	17.48	2.38	17.35	16.93	19.79	19.79	4.69
2014-09-28	24.07	22.82	23.10	25.92	24.33	0.26	23.81	24.45	20.81	24.33	0.26
2014-10-09	22.35	22.16	21.85	21.97	22.16	-0.19	22.18	21.84	22.18	22.18	-0.17
2014-10-19	21.04	19.67	19.48	20.31	20.31	-0.73	19.43	19.18	19.22	19.43	-1.61
2014-10-27	19.38	18.58	18.16	18.98	18.16	-1.22	18.25	17.75	19.10	17.75	-1.63
2014-11-07	18.30	17.81	17.64	18.05	17.64	-0.66	17.54	17.32	18.03	17.32	-0.98
2014-11-21	17.91	16.32	16.64	16.87	16.32	-1.59	15.96	16.25	19.21	15.96	-1.95

表 4 甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2012—2014 年灌溉前后综合模型逐日诊断结果 (%)

Table 4 Daily results of integrated diagnostic model before and after irrigation for 620801J001 monitoring site in Pingliang area of Gansu Province during the period of 2012–2014 (%)

监测日	实测值	原始数据结果					加灌溉后结果				
		间隔天数 统计法	差减 统计法	统计法	时段 诊断值	误差值	间隔天数 统计法	差减 统计法	统计法	逐日 诊断值	误差值
2012-04-09	13.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012-04-23	13.13	13.54	14.06	13.41	13.41	0.28	13.00	13.74	13.83	13.00	-0.13
2012-05-07	14.50	14.85	15.09	13.62	13.13	-1.37	14.60	14.93	14.79	13.13	-1.37
2012-06-08	15.05	16.00	15.95	19.07	14.50	-0.55	15.39	15.55	15.70	14.50	-0.55
2012-06-23	12.04	15.00	15.11	15.85	15.00	2.96	14.60	14.82	14.98	14.60	2.56
2012-07-03	19.57	17.22	16.75	12.29	24.33	4.76	17.63	16.89	16.27	24.33	4.76
2012-07-23	19.92	18.35	17.61	19.34	19.57	-0.35	18.19	17.36	17.64	19.57	-0.35
2012-08-08	20.54	17.73	16.69	19.11	16.69	-3.85	17.44	16.29	16.77	16.29	-4.25
2012-08-22	20.05	20.87	21.21	24.57	24.33	4.28	20.99	21.39	21.22	24.33	4.28
2012-09-07	21.95	20.11	20.03	21.45	21.45	-0.50	20.21	20.10	20.07	20.21	-1.74
2012-09-23	21.92	19.19	17.96	19.95	19.95	-1.97	19.11	17.68	18.17	19.11	-2.81
2012-10-10	21.68	19.20	18.01	17.09	19.20	-2.48	19.13	17.73	18.22	19.13	-2.55
2012-10-23	15.22	19.73	18.37	19.21	18.37	3.15	19.68	18.07	18.61	18.07	2.85
2012-11-10	14.96	13.86	14.27	13.94	13.86	-1.10	12.81	13.69	14.08	12.81	-2.15
2013-03-10	12.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013-04-10	10.36	12.43	13.89	12.69	12.43	2.07	10.65	13.23	13.50	10.65	0.29
2013-04-25	12.91	12.57	13.33	10.45	10.36	-2.55	12.13	13.11	12.89	10.36	-2.55
2013-05-10	11.85	13.41	13.98	13.74	13.41	1.56	12.88	13.68	13.72	12.88	1.03
2013-05-24	12.89	15.34	15.36	15.08	15.36	2.47	15.35	15.32	14.94	15.35	2.46
2013-06-09	11.99	15.55	15.79	14.09	12.89	0.90	15.11	15.51	15.43	12.89	0.90
2013-06-25	23.88	20.43	20.26	12.01	24.33	0.45	20.91	20.64	19.77	24.33	0.45
2013-07-18	24.41	23.17	27.06	25.37	24.33	-0.08	23.27	28.00	27.17	24.33	-0.08
2013-07-25	24.44	22.46	23.17	22.68	23.17	-1.27	22.44	23.36	23.40	23.40	-1.04
2013-08-12	24.31	21.23	21.70	25.37	24.33	0.02	21.23	21.86	22.09	24.33	0.02
2013-08-26	24.00	22.13	21.82	23.05	23.05	-0.95	22.16	21.82	22.11	22.16	-1.84
2013-09-11	18.48	22.45	25.02	25.37	24.33	5.85	22.52	25.67	25.22	24.33	5.85
2013-09-22	17.88	18.79	18.56	18.16	18.48	0.60	18.78	18.51	18.53	18.48	0.60
2013-09-30	18.35	18.80	18.67	19.60	19.60	1.25	18.85	18.68	18.59	18.85	0.50
2013-10-09	14.10	16.86	16.14	15.86	15.86	1.76	16.55	15.76	16.22	15.76	1.66
2013-10-21	16.53	14.54	14.81	14.95	14.10	-2.43	14.12	14.54	14.61	14.10	-2.43
2013-10-29	14.58	16.24	16.04	15.02	15.02	0.44	15.94	15.78	15.98	15.78	1.20
2013-11-12	15.66	14.72	14.93	14.27	14.27	-1.39	14.30	14.64	14.76	14.30	-1.36
2014-03-18	13.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014-03-27	12.29	12.95	13.58	12.88	12.88	0.59	12.27	13.19	13.39	12.27	-0.02
2014-04-07	14.31	12.72	13.49	13.31	12.72	-1.59	12.11	13.16	13.20	12.11	-2.20
2014-04-17	25.33	14.39	14.67	15.27	14.39	-10.94	21.42	20.41	19.52	24.33	-1.00
2014-04-28	23.70	22.76	22.96	23.14	23.14	-0.56	22.75	23.06	23.28	23.28	-0.42
2014-05-10	15.70	21.40	20.02	19.83	19.83	4.13	21.45	19.82	20.35	19.82	4.12
2014-05-20	13.93	14.96	14.95	14.48	14.48	0.55	14.48	14.59	14.87	14.48	0.55
2014-05-30	13.22	13.78	14.20	13.91	13.78	0.56	13.23	13.85	14.01	13.23	0.01
2014-06-11	12.13	13.06	13.69	13.13	13.06	0.93	12.42	13.32	13.47	12.42	0.29
2014-07-07	13.15	15.01	15.47	12.17	12.13	-1.02	14.48	15.17	15.05	12.13	-1.02
2014-07-23	12.85	15.22	15.55	13.05	13.15	0.30	14.68	15.23	15.21	13.15	0.30
2014-08-14	13.93	13.79	14.61	15.68	13.79	-0.14	12.87	14.16	14.24	12.87	-1.06
2014-08-29	15.10	17.48	17.27	15.76	17.48	2.38	17.71	17.35	16.93	17.71	2.61
2014-09-28	24.07	22.20	22.88	16.46	24.33	0.26	22.77	23.53	22.45	24.33	0.26
2014-10-09	22.35	22.02	21.77	22.56	22.56	0.21	22.05	21.78	22.04	22.05	-0.30
2014-10-19	21.04	20.34	18.99	19.10	20.34	-0.70	20.33	18.73	19.26	20.33	-0.71
2014-10-27	19.38	19.19	17.91	17.46	17.46	-1.92	19.10	17.60	18.13	17.60	-1.78
2014-11-07	18.30	18.05	17.21	17.34	17.21	-1.09	17.86	16.90	17.32	16.90	-1.40
2014-11-21	17.91	16.89	16.19	15.86	15.86	-2.05	16.58	15.83	16.27	15.83	-2.08

2.3 综合模型最终结果

最终结果定义为“时段诊断值”和“逐日诊断值”的平均值。表5为甘肃省平凉市辖区620801J001监测点2012—2014年综合模型法最终结果。

由表5可知,综合模型法的应用得到的最终诊断结果中,诊断误差绝对值大于3个质量含水量的为7个,占全部诊断结果个数的14.58%,其中大于5个质量含水量的有1个,占全部诊断结果个数的2.08%;按照诊断误差在3个质量含水量范围内的诊断合格的标准,则综合模型自回归预测合格率为85.42%,平均误差为1.61%,最大误差为5.85%,最小误差为0.02%。

2.4 2015年预测结果

自回归预测是指将建模数据代入模型中预测的结果,每一次预测的结果都称之为土壤墒情的诊断

结果;预测是指基于所建立的模型,使用未建模的数据预测的土壤墒情结果。本文中用2014年之前的历史数据建模,2015年数据不参与建模,用于模型验证。表6为利用甘肃省平凉市辖区620801J001监测点2012—2014年数据建立综合模型法后再用2015年数据进行验证的结果。2015年没有出现土壤含水量突然明显增加,因此未对2015年数据的水分来源项进行修正。

从表6可见:应用综合模型法得到的最终诊断结果中,诊断误差绝对值大于3个质量含水量的为1个,占全部诊断结果个数的5.88%,未出现误差大于5的预测结果;按照诊断误差在3个质量含水量范围以内为诊断合格的标准,则综合模型验证合格率为94.82%,平均误差为1.66%,最大误差为3.15%,最小误差为0.06%。就本案例而言,通过2015年数据对综合模型法的验证说明该模型可行。

表5 甘肃省平凉市辖区620801J001监测点2012—2014年综合模型最终诊断结果(%)

Table 5 Final results of integrated diagnostic model after irrigation for 620801J001 monitoring site in Pingliang area of Gansu Province during the period of 2012–2014 (%)

监测日	实测值	时段 诊断值	逐日 诊断值	最终 预测值	误差值	监测日	实测值	时段 诊断值	逐日 诊断值	最终 预测值	误差值
2012-04-09	13.34	-	-	-	-	2013-09-22	17.88	18.48	18.48	18.48	0.60
2012-04-23	13.13	12.87	13.00	12.93	-0.20	2013-09-30	18.35	21.83	18.85	20.34	1.99
2012-05-07	14.50	13.13	13.13	13.13	-1.37	2013-10-09	14.10	16.22	15.76	15.99	1.89
2012-06-08	15.05	14.50	14.50	14.50	-0.55	2013-10-21	16.53	14.10	14.10	14.10	-2.43
2012-06-23	12.04	13.99	14.60	14.29	2.25	2013-10-29	14.58	15.04	15.78	15.41	0.83
2012-07-03	19.57	24.33	24.33	24.33	4.76	2013-11-12	15.66	14.16	14.30	14.23	-1.43
2012-07-23	19.92	19.57	19.57	19.57	-0.35	2014-03-18	13.41	-	-	-	-
2012-08-08	20.54	17.37	16.29	16.83	-3.71	2014-03-27	12.29	12.00	12.27	12.14	-0.15
2012-08-22	20.05	24.33	24.33	24.33	4.28	2014-04-07	14.31	12.46	12.11	12.28	-2.03
2012-09-07	21.95	20.71	20.21	20.46	-1.49	2014-04-17	25.33	24.33	24.33	24.33	-1.00
2012-09-23	21.92	20.75	19.11	19.93	-1.99	2014-04-28	23.70	23.47	23.28	23.38	-0.32
2012-10-10	21.68	20.96	19.13	20.04	-1.64	2014-05-10	15.70	19.21	19.82	19.52	3.82
2012-10-23	15.22	18.37	18.07	18.22	3.00	2014-05-20	13.93	14.07	14.48	14.28	0.35
2012-11-10	14.96	13.12	12.81	12.96	-2.00	2014-05-30	13.22	13.48	13.23	13.36	0.14
2013-03-10	12.68	-	-	-	-	2014-06-11	12.13	12.91	12.42	12.66	0.53
2013-04-10	10.36	10.65	10.65	10.65	0.29	2014-07-07	13.15	12.13	12.13	12.13	-1.02
2013-04-25	12.91	10.36	10.36	10.36	-2.55	2014-07-23	12.85	13.15	13.15	13.15	0.30
2013-05-10	11.85	13.68	12.88	13.28	1.43	2014-08-14	13.93	12.79	12.87	12.83	-1.10
2013-05-24	12.89	17.83	15.35	16.59	3.70	2014-08-29	15.10	19.79	17.71	18.75	3.65
2013-06-09	11.99	12.89	12.89	12.89	0.90	2014-09-28	24.07	24.33	24.33	24.33	0.26
2013-06-25	23.88	24.33	24.33	24.33	0.45	2014-10-09	22.35	22.18	22.05	22.12	-0.23
2013-07-18	24.41	24.33	24.33	24.33	-0.08	2014-10-19	21.04	19.43	20.33	19.88	-1.16
2013-07-25	24.44	21.05	23.40	22.23	-2.21	2014-10-27	19.38	17.75	17.60	17.68	-1.70
2013-08-12	24.31	24.33	24.33	24.33	0.02	2014-11-07	18.30	17.32	16.90	17.11	-1.19
2013-08-26	24.00	21.73	22.16	21.94	-2.06	2014-11-21	17.91	15.96	15.83	15.9	-2.02
2013-09-11	18.48	24.33	24.33	24.33	5.85	-	-	-	-	-	-

表 6 甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2015 年综合模型预测的结果 (%)

Table 6 Prediction results of integrated diagnostic model of 620801J001 monitoring site in Pingliang area of Gansu Province in 2015 (%)

监测日	实测值	时段 诊断值	逐日 诊断值	最终 预测值	误差值
2015-03-10	17.59	-	-	-	-
2015-03-18	17.89	15.93	15.76	15.84	-2.05
2015-03-29	16.14	16.30	16.09	16.20	0.06
2015-04-08	16.85	18.60	17.23	17.91	1.06
2015-04-26	16.72	16.85	16.85	16.85	0.13
2015-05-06	16.71	15.91	15.77	15.84	-0.87
2015-05-26	14.92	16.71	16.71	16.71	1.79
2015-06-12	15.91	18.95	19.17	19.06	3.15
2015-07-10	14.75	15.91	15.91	15.91	1.16
2015-07-27	12.26	14.24	13.8	14.02	1.76
2015-08-07	12.41	12.26	12.26	12.26	-0.15
2015-08-24	15.27	12.41	12.41	12.41	-2.86
2015-09-12	18.24	15.27	15.27	15.27	-2.97
2015-09-24	19.63	18.24	18.24	18.24	-1.39
2015-10-07	20.09	17.54	17.92	17.73	-2.36
2015-10-29	19.73	19.17	18.02	18.6	-1.13
2015-11-09	19.87	17.43	17.21	17.32	-2.55
2015-11-22	19.89	17.29	16.97	17.13	-2.76

表 7 综合模型验证结果 (%)

Table 7 Summary results of integrated diagnostic model (%)

监测点及编号	自回归验证 合格率	2015 年数据验 证合格率	监测点及编号	自回归验证 合格率	2015 年数据验证 合格率
220881J005 洮南市	94.12	84.62	140932J008 偏关县	100.00	93.33
220822J003 通榆县	81.82	100.00	140932J009 偏关县	100.00	93.75
220822J004 通榆县	80.00	90.00	140932J0010 偏关县	100.00	84.62
220722J001 长岭县	85.11	87.50	140421J001 长治县	96.30	92.31
220722J005 长岭县	91.18	100.00	140421J002 长治县	92.59	84.62
220421J005 东丰县	88.57	75.00	140421J003 长治县	96.30	84.62
150502J002 科尔沁区	78.57	93.75	140421J005 长治县	88.89	100.00
152527J001 太仆寺旗	81.63	85.71	140421J006 长治县	92.59	84.62
152527J002 太仆寺旗	91.84	100.00	140421J007 长治县	92.59	92.31
152527J003 太仆寺旗	84.00	100.00	140421J008 长治县	96.30	100.00
152527J004 太仆寺旗	90.70	100.00	130224J004 滦南县	79.69	84.62
152527J005 太仆寺旗	88.57	83.33	130224J005 滦南县	77.78	76.92
150981J001 丰镇市	84.09	100.00	130183J001 晋州市	95.00	80.00
150981J002 丰镇市	87.50	100.00	130183J002 晋州市	92.07	90.00
150981J003 丰镇市	90.70	100.00	130183J003 晋州市	93.65	90.00
150981J004 丰镇市	85.37	94.44	130183J004 晋州市	84.13	100.00
150981J005 丰镇市	83.72	100.00	130183J005 晋州市	93.65	90.00
150125J003 武川县	88.89	100.00	130183J007 晋州市	95.56	100.00
150125J004 武川县	90.70	100.00	130183J008 晋州市	97.83	90.00
150125J005 武川县	97.06	92.86	130183J009 晋州市	91.30	80.00
150223J001 达茂旗	84.21	93.75	130183J0010 晋州市	95.65	80.00
150223J002 达茂旗	89.66	87.50	130183J0011 晋州市	93.48	100.00
150223J003 达茂旗	91.07	100.00	130528J009 宁晋县	88.24	91.67
150223J004 达茂旗	91.07	100.00	130528J0010 宁晋县	91.18	100.00
150223J005 达茂旗	89.29	76.47	410184J005 新郑市	85.71	100.00

2.5 综合模型法验证结果

综合模型法模型诊断结果汇总见表 7,综合模型法墒情诊断模型对全部 7 个省 23 个县 87 个监测点的诊断结果,以单个监测点诊断合格率为 75% 以上为模型适用性标准。

从表 7 可见:综合模型法土壤墒情诊断模型自回归预测结果除个别的合格率在 75% 以下,多数在 85% 以上,预测结果合格率 $\geq 75%$ 的站点数占总站点数的 97.70%。2015 年验证结果合格率均在 75% 以上,并且多数在 85% 以上。综合模型明显提高了预测合格率,比单独使用 6 种模型的预测合格率高。

3 讨论

3.1 综合模型法适用性

综合模型法模型诊断结果表明,合格的监测点数占总监测站点 95% 以上,综合模型法精度最高。

3.2 综合模型法存在的问题与改进方法

综合模型的优点:6 个独立模型的参数在不同气候、下垫面和管理措施下的取值不同,因此,6 个

续表 7

Table 7 Continued

监测点及编号	自回归验证 合格率	2015 年数据验 证合格率	监测点及编号	自回归验证 合格率	2015 年数据验证 合格率
620801J001 平凉市辖区	85.42	94.82	410184J006 新郑市	90.70	92.31
620801J002 平凉市辖区	84.00	82.35	410184J007 新郑市	89.19	100.00
620801J004 平凉市辖区	88.00	82.36	410184J009 新郑市	83.93	92.31
620801J005 平凉市辖区	76.47	82.36	410381J006 偃师市	82.54	79.27
620801J006 平凉市辖区	84.00	76.47	410482J005 汝州市	84.05	82.61
621102J001 安定区	95.65	94.12	410482J009 汝州市	76.79	82.61
621102J002 安定区	97.73	88.24	433122J002 泸溪县	90.24	100.00
621102J003 安定区	73.93	93.34	430903Z001 赫山区	92.31	100.00
621102J004 安定区	91.30	100.00	430903J001 赫山区	73.33	75.71
621102J005 安定区	89.36	94.12	430903J002 赫山区	86.11	76.92
621102J006 安定区	83.67	94.12	430903J003 赫山区	91.67	76.92
621102J007 安定区	89.58	88.24	431281J001 洪江市	98.04	100.00
621102J008 安定区	79.59	100.00	431281J002 洪江市	96.08	100.00
140932J001 偏关县	100.00	93.33	431281J003 洪江市	94.12	100.00
140932J002 偏关县	100.00	93.33	431281J005 洪江市	98.04	100.00
140932J003 偏关县	100.00	93.33	431103Z001 冷水滩	90.32	84.62
140932J005 偏关县	100.00	93.33	431103Y003 冷水滩	83.33	76.92
140932J006 偏关县	100.00	92.86	431103Y005 冷水滩	87.10	84.62
140932J007 偏关县	100.00	100.00	-	-	-

独立模型即使按点统计也不通用;然而在同一次预测时,6个模型预测结果中总有一个预测精度较高的结果,这个结果与时段降水量和初始土壤含水量之和高度相关;通过对6个模型的适应性优选后,从概率上选择水分来源数量对应的预测结果。有效避免了异常值的出现。

与6个独立模型一样,综合模型误差产生的主要原因也是以下5个方面:一是土壤水分来源项为异地气象站的降水量数据;二是诊断过程中分段预测时所依据的(P_i+P_w)参数由于样本量有限,因此界限划分的依据不足;三是监测点没有灌溉记录;四是土壤含水量从低到高和从高到低过程中,土壤孔隙所发生的变化对土壤水运动有直接影响,该影响并未考虑在模型中;五是不同监测点和同一监测点不同时间的土壤容重采用统一数值也会带来高度含水量的计算误差。

综合模型法模型合格率的提高有赖于以下3方面措施的改进:利用物联网技术实时获得监测点的降水量;当监测数量足够大时根据(P_i+P_w)划分的界限将更符合实际;记录灌溉时间和额度。

时段法就是利用2次监测时段的降水量对土壤墒情进行诊断和预测,随着监测数量的增多和措施的改进,诊断和预测合格率会明显提高。逐日诊断和预报可以实现土壤墒情的实时监控和预报,使得

现阶段不具备自动墒情监测条件的地区也能够及时获得当地实时的墒情状况,可见逐日法是实现土壤墒情信息化管理的潜力方法。对于特定监测点而言,时段法建模在不断得到修正后,再采用逐日法即可实现实时动态土壤墒情的预测,这就为县级和省级乃至国家级的土壤墒情监测和诊断网的建立提供了模型方法。

参考文献

- 白冬妹,郭满才,郭忠升,等. 2014. 时间序列自回归模型在土壤水分预测中的应用研究. 中国水土保持, (2): 42-45.
- 高如泰,陈焕伟,李保国,等. 2005. 基于BP神经网络的土壤水力学参数预测. 土壤通报, 36(5): 641-646.
- 龚元石,李保国. 1995. 应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量. 水科学进展, 6(1): 16-21.
- 何其华,何永华,包维楷,等. 2003. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化. 山地学报, 21(2): 149-156.
- 贾东于,文军,张堂堂,等. 2014. 黄土高原降水对土壤含水量和导热率的影响. 高原气象, 33(3): 712-720.
- 李美婷,武红旗,蒋平安,等. 2012. 利用土壤的近红外光谱特征测定土壤含水量. 光谱学与光谱分析, 32(8): 2117-2121.
- 李美婷. 2012. 新疆不同质地土壤含水量光谱特征分析(硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆农业大学.
- 李玉环,王静,曹银贵. 2006. 土壤墒情遥感反演与旱情诊断. 地理科学进展, 25(2): 123-130.

- 刘洪斌, 武 伟, 魏朝富, 等. 2003. 土壤水分预测神经网络模型和时间序列模型比较研究. 农业工程学报, **19**(4): 33-36.
- 马孝义, 王君勤, 李志军. 2002. 基于土壤消退指数的田间土壤水分预报方法的研究. 水土保持研究, **9**(2): 93-96.
- 马 轶, 张维江, 朱旭东, 等. 2012. 好水川流域梯田土壤含水量变化规律研究. 中国水土保持, (5): 47-49.
- 聂春燕, 胡克林, 邵元海, 等. 2010. 基于支持向量机和神经网络的土壤水力学参数预测效果比较. 中国农业大学学报, **15**(6): 102-107.
- 邱 扬, 傅伯杰, 王 军, 等. 2001. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子. 应用生态学报, **12**(5): 715-720.
- 王栓全, 岳宏昌, 王 伟. 2009. 黄土丘陵沟壑区不同土地类型的土壤水分特性. 干旱地区农业研究, **27**(6): 93-96.
- 许秀英, 衣淑娟, 黄操军, 等. 2013. 土壤含水量预报现状综述. 农机化研究, (7): 11-15.
- 杨开甲, 林瑞坤, 曾昊川, 等. 2015. 2013年福州市土壤水分变化规律及降雨量对其的影响. 农业与技术, **35**(4): 199-200.
- 杨曙光. 2007. 土壤墒情研究进展. 山西水利, **23**(1): 106-107, 109.
- 张 忠, 蒲胜海, 何春燕, 等. 2007. 我国土壤墒情预报模型的研究进程及发展方向. 新疆农业科学, **44**(5): 720-723.
- 赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 等. 1999. 黄土高原坡耕地土壤水分主要受控因子研究. 水土保持通报, **19**(1): 10-14.
- 郑 重, 马富裕, 李江全, 等. 2007. 农田水量平衡法和BP神经网络法预测土壤墒情的对比. 石河子大学学报(自然科学版), **25**(6): 757-761.
- 周景春, 苏玉杰, 张怀念, 等. 2007. 0-50 cm 土壤含水量与降水和蒸发的关系分析. 中国土壤与肥料, (6): 23-27.
- 周良臣. 2007. 利用土壤水动力学模型预测麦田土壤水分的研究. 节水灌溉, (3): 10-13.
-
- 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
-