平衡法土壤墒情诊断模型

李 兆[1] 黄治平[1] 刘书田[1,2] 侯彦林[1,2*] 郑宏艳[1] 丁 健[1] 米长虹[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 本文首先介绍传统水量平衡法利弊,重点介绍了所建立的基于土壤初始含水量、时段降水量和时段"蒸渗流项"的平衡法土壤墒情诊断模型的原理和建模方法,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:平衡法模型诊断和预测合格率只有 50%左右;模型合格率不高的主要原因是基于降水量和土壤含水量之和的分段预测时数据量少,导致参数确定依据不足。所建立的平衡法模型作为墒情诊断模型使用还需进一步研究。

关键词 土壤含水量; 降水量; 时段模型; 逐日模型; 验证

Balance diagnostic model of soil moisture. LI Zhao[1], HUANG Zhi-ping[1], LIU Shu-tian[1,2], HOU Yan-lin[1,2*], ZHENG Hong-yan[1], DING Jian[1], MI Chang-hong[1], WANG Shuo-jin[2] ([1]*Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin* 300191, *China*; *Key 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: The advantages and disadvantages of traditional water balance method were discussed. The principle and modeling method of balance diagnostic model of soil moisture based on initial soil water content, time-period precipitation and time-period "evapotranspiration, leakage and runoff" were emphatically introduced. The model was established by the data of 87 monitoring sites in 23 counties in 7 provinces during 2012-2014, and validated by the data of 2015. The results showed that the balance diagnostic model had only about 50% qualification rate in diagnosis and prediction. The main reason for the low qualification rate was the small amount of data based on the subsection prediction of the sum of precipitation and soil water content, which led to an inadequate pre-requirement for parameter determination. The balance diagnostic model established as a soil moisture diagnostic model needs to be further studied.

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、地表径流(包括面流)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、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

天津市科技支撑计划项目(15ZCZDNC00700)、"中国农业科学院科技创新工程"项目(2016-cxgc-hyl)、全国农业技术推广中心节水处项目(2016-hx-hyl-5)和广西科技开发项目(14125008-2-24)资助。
收稿日期: 2017-03-15 接受日期: 2017-08-26
* 通讯作者 E-mail: 2483977138@qq.com

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,可见精准的土壤含水量诊断和墒情等级划分并非易事,因此建立土壤墒情诊断、预报模型和信息平台是一项紧迫的农业技术推广工作。

目前,国外依托先进的计算机与无线通讯等高新技术,基于Internet和3S技术,建立了适合于国外农业土壤气象环境的土壤墒情预报模型,这些技术大都依托于先进的技术和高效的管理,不适合我国目前的情况,因而很难推广应用(Njoku *et al.*,2002;Ben *et al.*,2006;Mccartney *et al.*,2006)。我国土壤墒情预报经过近40年的发展,先后使用过的模型包括经验公式法(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。

传统的水量平衡法(黄昌勇,2000;Bierkens,2001)是基于农田尺度的水分来源与去向的遵循质量守恒定律的田间土壤水分平衡式,即$\triangle W=P+I+U-E-T-R-I_n-D$,式中,$\triangle W$为计算时段末土体贮/储水量之差,mm;$P$为降水量;$I$为灌溉量;$U$为上行水量;$E$为土面蒸发量;$T$为叶面蒸发量;$R$为地表径流损失量;$I_n$为植物冠层截留量;$D$为下渗水量。其中,$P+I=P$(可测),$E+T=ET$(蒸散),$I_n$后期也就占降水量的2%~5%。也可合并在$ET$中即$ET_i$,平坦地和没有暴雨和降水强度大的情况下,$R=0$,则:$\triangle W=P+U-ET_i-D$,如没有上行水时,$U=0$,即可通过$\triangle W=P-ET_i-D$反求出$ET_i$。

传统水量平衡法不受气象因素影响,其结果在非均匀下垫面和任何天气条件下均可应用,原理简单,预测精度较高;缺点是所需参数和实测数据较多,预测精度受实测资料数量和精度的影响较大,一些参数的获取困难。本文方法与传统的水量平衡法在表达式形式上一致,但是变量的含义不同,求解方法不同,它能够利用较少的参数预测土壤含水量,其表达式为:$\triangle W=P_{(i+1)}-P_i=P_w-P_v$,式中,$P_{(i+1)}$为后一次实测的土壤含水量(mm高度);$P_i$为前一次实测的土壤含水量(mm高度);$P_w$为相邻2个监测日之间的降水量(mm);$P_v$为"蒸渗流项"(mm),在数值上等于水量平衡法中的$U-ET_i-D$。本文在传统水量平衡法的基础上作了改进,提出平衡法土壤墒情诊断模型,有效降低了自变量数量。

1 建模原理与应用方法

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)。土壤墒情监测数据包括: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两层(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。降水量数据是从就近的国家标准气象站获得的历史上每日降水量的数据(http://data.cma.cn/)。

1.1 平衡法土壤墒情诊断模型的原理和建模方法

平衡法土壤墒情诊断模型就是将影响土壤墒情的2个重要因素,即相邻2个监测日之间的降水量和前一次实测土壤含水量作为自变量(在求P_v/*days*时也用到了相邻2个监测日的间隔天数),将后一次实测土壤含水量作为因变量,再引入相邻2个监测日之间的土壤水分的"蒸渗流(蒸发+渗漏+径流)"项,从而建立的平衡法(遵循质量守恒定律)土壤墒情诊断模型,其数学表达式为:

$$P_{(i+1)}=P_i+P_w-P_v \tag{1}$$

式中:$P_{(i+1)}$为后一次实测的土壤含水量(mm高度);P_i为前一次实测的土壤含水量(mm高度);P_w为相邻2个监测日之间的降水量(mm);P_v为"蒸渗流项"(mm)。

平衡法土壤墒情诊断模型分"时段模型"和"逐日模型"两类。

1.1.1 时段模型法 "时段模型法"就是要根据2个监测日之间的初始含水量和时段降水量这两个关键参数预测后一次土壤含水量的方法,但是需要确定第三个参数P_v,而P_v与时段降水量之间并不是简单的线性关系,这就需要建立分段确定P_v的方法,在实际应用中将根据P_i+P_w先确定P_v。

时段模型法的计算过程如下:

第一步:计算相邻2个监测日之间的降水量(P_w)和实测含水量(P_i)之和,即P_i+P_w(mm);这里质量(重量)含水量转化为高度含水量公式如下:

水层厚度(mm)= 土层厚度(mm)×土壤容重

$(g \cdot cm^3)$×质量含水量百分数　　(2)

第二步:根据式(1)即 $P_{(i+1)}=P_i+P_w-P_v$,反求"蒸渗流项"P_v(mm)。

第三步:计算每日蒸渗流($mm \cdot d^{-1}$),即求 $P_v/days$,$days$ 为间隔天数;求 $P_v/days$ 的目的是为了处理间隔天数不为 15 d 的情况,于是根据 $P_v/days$ 可以求算任意间隔天数的 P_v。

第四步:以 P_i+P_w 为横坐标、以 $P_v/days$ 为纵坐标做散点图,如图 1(以甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点为例,$n=48$,下同)。

第五步:观察分析散点图的趋势,可以看出,当(P_i+P_w)大于约 80 mm 之后,$P_v/days$ 随(P_i+P_w)增加而波动变大,当(P_i+P_w)超过 150 mm 后甚至 $P_v/days$ 呈现下降趋势,再结合土壤水运动规律,可以将 60~80 mm 作为一个界限,即小于这个界限值范围内,可以建立回归方程以反映 P_i+P_w 和 $P_v/days$ 的定量关系,而大于这个界限值范围后,宜采用其他方法描述 P_i+P_w 和 $P_v/days$ 的关系。本案例中界限值定为 60 mm(即关键参数),其对应的回归方程为 $P_v/days=0.0513(P_i+P_w)-1.4258$($r=0.8559^{**}$,$n=27$),如图 2 所示。结论中会指出平衡法诊断和预测合格率不高,其原因就是因为在数据处理过程中人为地划分了 P_i+P_w 和 $P_v/days$ 定量关系的上限,并且由于样本量有限,不能包括不同初始含水量和不同降水量的主要组合情况,因此这个界限很难划分准确。

在建立不同监测点模型时,应主要考虑具体土壤特性和含水量最大值等监测结果而具体确定监测点模型表示方式和参数,即每个监测点的模型和参数是特异性的,它反映了气象-土壤-作物等共同作用的特性。

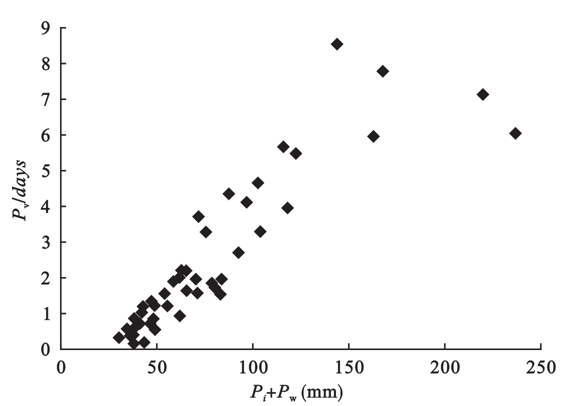

图 1　P_i+P_w 和 $P_v/days$ 的散点图

Fig.1　Scatter plot of (P_i+P_w) and $P_v/days$

第六步:将 P_i+P_w 分段,分别建立土壤含水量预测模型和确定参数,以甘肃省平凉市辖区 620801J001 站点 P_i+P_w 和 $P_v/days$ 散点图为例的分段方法如下:

(A)当 $P_i+P_w \leq 60$ mm 时,用"蒸渗流项"方程"$y=0.0513x-1.4258$(图 2),计算 $P_v/days$,即 y 值,再计算预测含水量,$P_{(i+1)预}=[(P_i+P_w)-(y \times days)]/2.3$(2.3 是土层厚度取 20 cm、土壤容重取1.15 $g \cdot cm^{-3}$得到的换算系数);

(B)当 $P_i+P_w \in (60\ mm, 80\ mm)$时,用(A)中每日蒸渗流方程计算 $P_v/days$(x 取 60),即 $y=0.0513 \times 60-1.4258$,将 y 值代入下式再计算预测含水量:$P_{(i+1)预}=(60-y \times days)/2.3$;

(C)当 $P_i+P_w>80$ mm 时,$P_{(i+1)预}$=最大实测值-1(当降雨量达到一定大时,土壤含水量就可以达到饱和,过多的降水量对土壤墒情作用不大,因此不用蒸渗流方程计算,即取 $P_{(i+1)预}$=最大实测值-1)。

1.1.2　逐日模型法　"逐日模型法"是根据前一次观测日的土壤含水量和以后每日降水量诊断下一日土壤含水量,直到间隔多日的后一次观测日土壤含水量测定结果出来后再进行校验为止的方法;"时段模型法"按天预测就是"逐日模型法",实际预测时每天分别针对前 1 天、前 2 天、……前 15 天的累积降水量获得 15 个预测值再求平均而获得,这里认为当前含水量与最近 15 天降水量关系密切,其计算方法如下:

第一步:利用时段法算法和所获得的参数,所不同的是每次预测 1 天,时间间隔也为 1 天。

第二步:与时段法算法不同的是分别取诊断日前 1 天、前 2 天、……前 15 天的累计降水量(P_w),每天得到15个预测值,将15个预测值平均作为逐

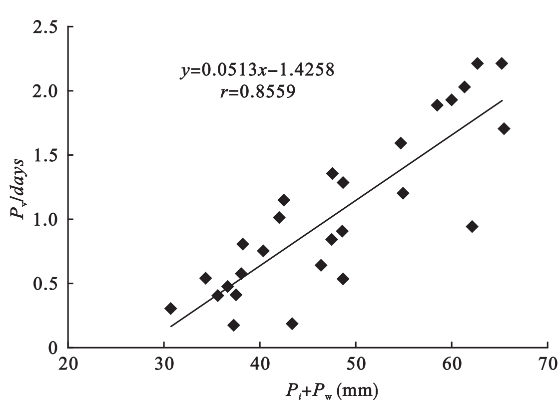

图 2　P_i+P_w 和 $P_v/days$ 的散点图

Fig.2　Scatter plot of (P_i+P_w) and $P_v/days$

日的每日预测值;

通用公式为:

$P_{预测j}=f(P_i,\ P_i+P_{wj},\ day_j)$ ($j=1,2,\cdots\cdots14,15$;P_i为第 i 个实测值;P_{wj}为预测日前 j 天的降水量之和;day_j为预测日前 j 天)　(3)

逐日表达式为:

$$P_{预测1}=f(P_i,\ P_i+P_{w1},days_1) \quad (4)$$

$$P_{预测2}=f(P_i,\ P_i+P_{w2},day_2) \quad (5)$$

……

$$P_{预测15}=f(P_i,P_i+P_{w15},day_{15}) \quad (6)$$

每日预测值:

$$P_{逐日预测}=(P_{预测1}+P_{预测2}+\cdots\cdots+P_{预测15})/15 \quad (7)$$

具体计算时,根据 P_i+P_{w1}数值大小判断用哪个公式进行计算,甘肃省平凉监测点采用(P_i+P_{wj})≤60 mm、60 mm<(P_i+P_{wj})≤80 mm 和(P_i+P_{wj})>80 mm 三个公式计算。

第三步:当间隔天数≤15 d 时(一般监测点时间间隔为 15 d 测定一次),每个预测值均以上一个实测值为准进行计算;当间隔天数>15 d 时,需要计算出一个第 15 天的预测值即 $P_{逐日预测}$,用该值取代 P_i进行后面日期的预测,直到下一个有实测值的日期。

1.2　数据来源

以甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点为例,列于表 1。平凉市位于甘肃省东部,陕、甘、宁三省(区)交汇处,地处 34°54′ N—35°43′ N,108°30′ E—107°45′ E,全市辖泾川、灵台、崇信、华亭、庄浪、静宁六县和崆峒一区,总土地面积 1.1 万 km²,海拔 890~2857 m。年均气温 8.5 ℃,年平均降水量 511.2 mm。平凉市的气候,属半干旱、半湿润的大陆性气候,气候特点是南湿、北干、东暖、西凉,由于地形和海拔的影响,气候的垂直差异明显。在农业气候区划中,属于陇东温和半湿润农业气候区。平凉市辖区 2012 年纳入全国土壤墒情网开始进行土壤墒情监测工作,平凉市辖区 620801J001 监测点位于崆峒区白土村,土质为壤土,主要种植小麦和夏玉米。

本模型所采用的降水量为国家气象局气象台站数据,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,有时个别监测时间的土壤含水量突然明显增加很大的幅度,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

表 1　甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点的原始数据

Table 1　Original data of 620801J001 monitoring site in Pingliang, Gansu Province

日期	间隔天数 (days)	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

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,需要对监测点降水量进行修正;如果不满足土壤含水量突然明显增加很大幅度和气象站降水量不足以满足土壤含水量增加之幅度这两个条件,就不能考虑对监测点降水量进行修正)。因此,必须在原始数据中将灌溉量(准确的说法是水分来源项的修正)适当增加到适当时间段内的降水量之中。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,最终在时间上取大致时段中间点即将2014年4月12日作为灌溉日而增加灌溉,经过反复试算灌溉量确定为100 mm。

1.3 软 件

本文所使用的软件为Excel和自编的墒情算法软件,前期探讨算法时使用Excel,当算法确定后自编软件并使用。

1.4 样本集、参数和误差评价标准的确定

土壤墒情监测点一般一个月监测2次,目前数据只有2~4年,如果划分季节、月份、雨季等会造成样本量少,没有代表性。本文对监测点数据在保证样本数量的前提下对样本进行整体的统计,没有人为按不同季节划分监测时间区段,这样有利于模型的高度简化和应用。

平衡法墒情诊断模型的参数(即如**1.1.1**中用到的60、80 mm)是根据监测站点含水量范围及散点图趋势确定的,不同监测点参数组合不同。表2为87个监测站点平衡法参数表。

所使用的87个监测点的含水量范围不等,最大质量含水量平均值为21.46%,最小质量含水量平均值为9.49%,平均质量含水量为15.64%。在5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%质量含水量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%质量含水量范围内,则为预测结果合格。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。基于以上实际情况,本系列研究没有使用相对误差作为模型的预测合格率,设想如果土壤含水量为10%,预测偏差为1%时则相对误差为10%,土壤含水量为20%,预测偏差为4%时则误差为20%;用户不关心相对误差大小,用户最关心的也不是土壤含水量多少,而是墒情等级,因为每个墒情等级直接与生产措施相关,所以确定3%质量含水量作为模型预测合格与否的标准是合适的。

2 结果与分析

2.1 时段模型

由表3可见,时段模型法预测的质量含水量与实测质量含水量相比误差大于3%质量含水量的监测日有10个,为20.83%,其中大于5%质量含水量的监测日有6个,为12.50%;如果将预测误差小于3%质量含水量作为预测合格标准,则平衡法时段模型自回归的合格率为79.17%,平均误差为2.30%,最大误差10.00%,最小误差0.02%;数据调整后(即加灌溉后)时段模型自回归的合格率还为79.17%(其中大于5%质量含水量的减少1个,其他未变化),平均误差为2.17%,最大误差为7.26%,最小误差为0.18%,可见加灌溉后的预测误差有所减小。可以看出,平衡法的预测整体趋势与实际测量值的趋势一致,但仍有个别点的预测值与实际测量值有较大的偏差。

2.2 逐日模型

由表4可见,从逐日模型法预测结果中筛选出所有监测日所对应的预测结果,将有监测记录的预测结果与实测结果相比,预测误差大于3%质量含水量的监测日有7个,占14.58%,其中大于5%质量含水量的有1个,占2.08%;如果将预测误差小于3%质量含水量作为预测合格标准,则平衡法逐日模型自回归的合格率为85.42%,平均误差为1.87%,最大误差为10.06%,最小误差为0.15%;从数据调整后(即加灌溉后)逐日模型自回归的合格率仍然为85.42%(其中大于5%质量含水量的减少1个,其他未变化),平均误差为1.78%,最大误差为4.75%,最小误差为0.23%,可见加灌溉后的预测误差有所减小。平衡法的逐日模型预测的土壤含水量趋势与实际测量值趋势相吻合,可以清晰看出2个实际监测日期之间的含水量变化,并且逐日模型的结果比时段模型的结果更好。

2.3 2015年预测结果与分析

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

表 2　平衡法 87 个监测站点参数

Table 2　Parameters of balance diagnostic method of 87 monitoring sites

市	县、区、旗	站点号	参数*(mm)	市	县、区、旗	站点号	参数(mm)
辽源市	东丰县	220421J005	65、80	忻州市	偏关县	140932J008	40、80
白城市	洮南县	220881J005	70、100	忻州市	偏关县	140932J009	40、80
白城市	通榆县	220822J003	30、50	忻州市	偏关县	140932J010	40、80
白城市	通榆县	220822J004	30、50	长治市	长治县	140421J001	50、80
松原市	长岭县	220722J001	55、80	长治市	长治县	140421J002	50、80
松原市	长岭县	220722J005	55、80	长治市	长治县	140421J003	50、80
包头市	达茂旗	150223J001	45、80	长治市	长治县	140421J005	50、80
包头市	达茂旗	150223J002	45、80	长治市	长治县	140421J006	50、80
包头市	达茂旗	150223J003	45、80	长治市	长治县	140421J007	50、80
包头市	达茂旗	150223J004	45、80	长治市	长治县	140421J008	50、80
包头市	达茂旗	150223J005	45、80	石家庄市	晋州市	130183J001	60、80
乌兰察布市	丰镇市	150981J001	40、80	石家庄市	晋州市	130183J002	60、80
乌兰察布市	丰镇市	150981J002	40、80	石家庄市	晋州市	130183J003	60、80
乌兰察布市	丰镇市	150981J003	40、80	石家庄市	晋州市	130183J004	60、80
乌兰察布市	丰镇市	150981J004	40、80	石家庄市	晋州市	130183J005	45、80
乌兰察布市	丰镇市	150981J005	40、80	石家庄市	晋州市	130183J007	60、80
通辽市	科尔沁区	150502J002	50、80	石家庄市	晋州市	130183J008	60、80
锡林郭勒盟	太仆寺旗	152527J001	50、80	石家庄市	晋州市	130183J009	60、80
锡林郭勒盟	太仆寺旗	152527J002	50、80	石家庄市	晋州市	130183J010	45、80
锡林郭勒盟	太仆寺旗	152527J003	50、80	石家庄市	晋州市	130183J011	60、80
锡林郭勒盟	太仆寺旗	152527J004	50、80	唐山市	滦南县	130224J004	60、80
锡林郭勒盟	太仆寺旗	152527J005	50、80	唐山市	滦南县	130224J005	60、80
呼和浩特市	武川县	150125J003	50、80	邢台市	宁晋县	130528J009	45、80
呼和浩特市	武川县	150125J004	50、80	邢台市	宁晋县	130528J010	45、80
呼和浩特市	武川县	150125J005	50、80	平顶山	汝州市	410482J005	50、80
定西市	安定区	621102J001	60、80	平顶山	汝州市	410482J009	50、80
定西市	安定区	621102J002	60、80	郑州市	新郑市	410184J005	40、80
定西市	安定区	621102J003	60、80	郑州市	新郑市	410184J006	50、80
定西市	安定区	621102J004	60、80	郑州市	新郑市	410184J007	45、80
定西市	安定区	621102J005	60、80	郑州市	新郑市	410184J009	50、80
定西市	安定区	621102J006	60、80	洛阳市	偃师市	410381J006	65、80
定西市	安定区	621102J007	60、80	益阳市	赫山区	430903J001	75、100
定西市	安定区	621102J008	60、80	益阳市	赫山区	430903J002	75、100
平凉市辖区	平凉市	620801J001	60、80	益阳市	赫山区	430903J003	75、100
平凉市辖区	平凉市	620801J002	60、80	益阳市	赫山区	430903z001	75、100
平凉市辖区	平凉市	620801J004	60、80	怀化市	洪江市	431281J001	60、100
平凉市辖区	平凉市	620801J005	60、80	怀化市	洪江市	431281J002	60、100
平凉市辖区	平凉市	620801J006	60、80	怀化市	洪江市	431281J003	60、100
忻州市	偏关县	140932J001	40、80	怀化市	洪江市	431281J005	60、100
忻州市	偏关县	140932J002	40、80	永州市	冷水滩区	431103Y003	75、100
忻州市	偏关县	140932J003	40、80	永州市	冷水滩区	431103Y005	75、100
忻州市	偏关县	140932J005	40、80	永州市	冷水滩区	431103z001	75、100
忻州市	偏关县	140932J006	40、80	湘西土家族苗族自治州	泸溪县	433122J002	55、80
忻州市	偏关新	140932J007	40、80	–	–	–	–

监测点涉及省份包括吉林省、内蒙古区、甘肃省、河北省、山西省、河南省以及湖南省;* 指 P_i+P_w 分段的分界点,例如甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点计算步骤中的 60、80。

验证。表 5 为利用甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2012—2014 年数据建立平衡法模型后再用 2015 年数据进行验证的结果。

从表5可知,在利用2012—2014年原始数据

表 3 甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2012—2014 年灌溉前后平衡法时段模型预测结果(%)

Table 3 Interval results of balance diagnostic model before and after irrigation for 620801J001 monitoring site in Pingliang of Gansu Province during the period of 2012-2014 (%)

监测日	实测值	原数据预测值	原数据误差值	加灌溉后预测值	加灌溉后误差值	监测日	实测值	原数据预测值	原数据误差值	加灌溉后预测值	加灌溉后误差值
2012-04-09	13.34	-	-	-	-	2013-09-22	17.88	18.18	0.30	18.23	0.35
2012-04-23	13.13	13.64	0.51	13.86	0.73	2013-09-30	18.35	20.34	1.99	20.37	2.02
2012-05-07	14.50	16.03	1.53	16.09	1.59	2013-10-09	14.10	15.55	1.45	15.68	1.58
2012-06-08	15.05	22.17	7.12	22.17	7.12	2013-10-21	16.53	15.59	-0.94	15.72	-0.81
2012-06-23	12.04	14.08	2.04	14.25	2.21	2013-10-29	14.58	14.73	0.15	14.86	0.28
2012-07-03	19.57	22.17	2.60	22.17	2.60	2013-11-12	15.66	14.52	-1.14	14.68	-0.98
2012-07-23	19.92	22.17	2.25	22.17	2.25	2014-03-18	13.41	-	-	-	-
2012-08-08	20.54	14.59	-5.95	14.66	-5.88	2014-03-27	12.29	12.82	0.53	13.01	0.72
2012-08-22	20.05	22.17	2.12	22.17	2.12	2014-04-07	14.31	13.92	-0.39	14.11	-0.20
2012-09-07	21.95	22.17	0.22	22.17	0.22	2014-04-17	25.33	15.33	-10.00	22.17	-3.16
2012-09-23	21.92	14.59	-7.33	14.66	-7.26	2014-04-28	23.70	22.17	-1.53	22.17	-1.53
2012-10-10	21.68	22.17	0.49	22.17	0.49	2014-05-10	15.70	17.22	1.52	17.28	1.58
2012-10-23	15.22	16.72	1.50	16.78	1.56	2014-05-20	13.93	13.95	0.02	14.13	0.20
2012-11-10	14.96	12.41	-2.55	12.71	-2.25	2014-05-30	13.22	14.32	1.10	14.48	1.26
2013-03-10	12.68	-	-	-	-	2014-06-11	12.13	13.18	1.05	13.40	1.27
2013-04-10	10.36	10.09	-0.27	10.65	0.29	2014-07-07	13.15	7.41	-5.74	7.52	-5.63
2013-04-25	12.91	14.19	1.28	14.35	1.44	2014-07-23	12.85	14.18	1.33	14.30	1.45
2013-05-10	11.85	13.53	1.68	13.75	1.90	2014-08-14	13.93	11.04	-2.89	11.31	-2.62
2013-05-24	12.89	16.03	3.14	16.09	3.20	2014-08-29	15.10	22.17	7.07	22.17	7.07
2013-06-09	11.99	14.59	2.60	14.66	2.67	2014-09-28	24.07	22.17	-1.90	22.17	-1.90
2013-06-25	23.88	22.17	-1.71	22.17	-1.71	2014-10-09	22.35	22.17	-0.18	22.17	-0.18
2013-07-18	24.41	22.17	-2.24	22.17	-2.24	2014-10-19	21.04	18.90	-2.14	18.95	-2.09
2013-07-25	24.44	21.06	-3.38	21.09	-3.35	2014-10-27	19.38	17.46	-1.92	17.55	-1.83
2013-08-12	24.31	22.17	-2.14	22.17	-2.14	2014-11-07	18.30	17.27	-1.03	17.35	-0.95
2013-08-26	24.00	22.17	-1.83	22.17	-1.83	2014-11-21	17.91	14.02	-3.89	14.21	-3.70
2013-09-11	18.48	22.17	3.69	22.17	3.69	-	-	-	-	-	-

表 4 甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2012—2014 年灌溉前后平衡法逐日模型预测结果(%)

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

监测日	实测值	原数据预测值	原数据误差值	加灌溉后预测值	加灌溉后误差值	监测日	实测值	原数据预测值	原数据误差值	加灌溉后预测值	加灌溉后误差值
2012-04-09	13.34	-	-	-	-	2013-09-22	17.88	20.39	2.51	20.42	2.54
2012-04-23	13.13	13.41	0.28	13.56	0.43	2013-09-30	18.35	19.60	1.25	19.63	1.28
2012-05-07	14.50	15.17	0.67	15.26	0.76	2013-10-09	14.10	15.86	1.76	15.98	1.88
2012-06-08	15.05	17.78	2.73	17.89	2.84	2013-10-21	16.53	15.52	-1.01	15.62	-0.91
2012-06-23	12.04	15.85	3.81	15.95	3.91	2013-10-29	14.58	15.02	0.44	15.14	0.56
2012-07-03	19.57	20.44	0.87	20.45	0.88	2013-11-12	15.66	14.27	-1.39	14.4	-1.26
2012-07-23	19.92	19.01	-0.91	19.10	-0.82	2014-03-18	13.41	-	-	-	-
2012-08-08	20.54	19.11	-1.43	19.18	-1.36	2014-03-27	12.29	12.88	0.59	13.05	0.76
2012-08-22	20.05	23.2	3.15	23.2	3.15	2014-04-07	14.31	13.31	-1.00	13.46	-0.85
2012-09-07	21.95	21.45	-0.50	21.47	-0.48	2014-04-17	25.33	15.27	-10.06	20.99	-4.34
2012-09-23	21.92	19.95	-1.97	19.99	-1.93	2014-04-28	23.70	23.14	-0.56	23.14	-0.56
2012-10-10	21.68	17.09	-4.59	17.21	-4.47	2014-05-10	15.70	19.83	4.13	19.88	4.18
2012-10-23	15.22	19.21	3.99	19.25	4.03	2014-05-20	13.93	14.48	0.55	14.61	0.68
2012-11-10	14.96	13.94	-1.02	14.16	-0.80	2014-05-30	13.22	13.91	0.69	14.05	0.83
2013-03-10	12.68	-	-	-	-	2014-06-11	12.13	13.13	1.00	13.29	1.16
2013-04-10	10.36	12.69	2.33	12.98	2.62	2014-07-07	13.15	16.05	2.900	16.16	3.01
2013-04-25	12.91	14.79	1.88	14.88	1.97	2014-07-23	12.85	13.00	0.15	13.21	0.36
2013-05-10	11.85	13.74	1.89	13.87	2.02	2014-08-14	13.93	15.68	1.75	15.84	1.91
2013-05-24	12.89	15.08	2.19	15.15	2.26	2014-08-29	15.10	15.76	0.66	15.85	0.75
2013-06-09	11.99	14.01	2.02	14.19	2.20	2014-09-28	24.07	22.58	-1.49	22.59	-1.48
2013-06-25	23.88	21.03	-2.85	21.05	-2.83	2014-10-09	22.35	22.56	0.21	22.58	0.23
2013-07-18	24.41	23.27	-1.14	23.27	-1.14	2014-10-19	21.04	19.1	-1.94	19.14	-1.90
2013-07-25	24.44	22.68	-1.76	22.69	-1.75	2014-10-27	19.38	17.46	-1.92	17.54	-1.84
2013-08-12	24.31	23.34	-0.97	23.35	-0.96	2014-11-07	18.30	17.34	-0.96	17.41	-0.89
2013-08-26	24.00	23.05	-0.95	23.05	-0.95	2014-11-21	17.91	15.86	-2.05	15.97	-1.94
2013-09-11	18.48	23.23	4.75	23.23	4.75	-	-	-	-	-	-

表 5　甘肃省平凉市辖区 620801J001 监测点 2015 年平衡法预测结果(%)

Table 5　Prediction results of 620801J001 monitoring site by balance diagnostic model in Pingliang of Gansu Province in 2015(%)

监测日	实测值	时段预测值	时段误差值	逐日预测值	逐日误差值
2015-03-10	17.59	–	–	–	–
2015-03-18	17.89	16.28	−1.61	16.23	−1.66
2015-03-29	16.14	16.12	−0.02	16.26	0.12
2015-04-08	16.85	18.95	2.10	18.28	1.43
2015-04-26	16.72	13.23	−3.49	18.93	2.21
2015-05-06	16.71	17.12	0.41	16.89	0.18
2015-05-26	14.92	11.81	−3.11	18.32	3.40
2015-06-12	15.91	22.17	6.26	22.40	6.49
2015-07-10	14.75	22.17	7.42	17.13	2.38
2015-07-27	12.26	13.27	1.01	15.13	2.87
2015-08-07	12.41	17.90	5.49	17.49	5.08
2015-08-24	15.27	13.95	−1.32	13.07	−2.20
2015-09-12	18.24	22.17	3.93	21.07	2.83
2015-09-24	19.63	17.52	−2.11	19.18	−0.45
2015-10-07	20.09	16.65	−3.44	17.72	−2.37
2015-10-29	19.73	22.17	2.44	18.91	−0.82
2015-11-09	19.87	17.17	−2.70	18.13	−1.74
2015-11-22	19.89	15.87	−4.02	17.42	−2.47

进行加灌溉数据处理后建模得到的 2015 年平衡法时段模型预测结果中,预测误差大于 3%质量含水量的监测日有 8 个,占 47.06%,其中大于 5%质量含水量的监测日有 3 个,占 17.65%,如果将预测误差小于 3%质量含水量作为预测合格标准,则平衡法时段模型预测的合格率为 52.94%;平衡法逐日模型预测结果中,预测误差大于 3%质量含水量的监测日有 3 个,占 17.65%,其中大于 5%质量含水量的监测日有 2 个,占 11.76%,如果将预测误差小于 3%质量含水量作为预测合格标准,则平衡法逐日模型预测的合格率为 82.35%。2015 年没有出现土壤含水量突然明显增加的情况,所以 2015 年未作灌溉处理。

2.4　平衡法模型验证结果

针对 7 个省 23 个县 87 个监测站点的验证结果列于表 6,并以单个监测点诊断合格率 75%以上的点为模型适用性标准。时段模型诊断结果表明自回归和 2015 年数据验证合格的监测点数分别为 50 个和 36 个,合格率分别为 57.47%和 41.38%;逐日模型诊断结果表明合格的监测点数分别为 43 个和 47 个,合格率分别为 49.43%和 54.02%。

表 6　平衡法模型诊断结果

Table 6　Diagnostic results of balance diagnostic model

	时段诊断模型		逐日诊断模型	
	自回归验证	2015 年数据验证	自回归验证	2015 年数据验证
诊断合格的监测点数	50	36	43	47
合格点数占总监测点百分比	57.47	41.38	49.43	54.02

2.5　平衡法模型适用性分析

适用性主要评价平衡法模型单独使用情况下对全部 87 个监测点的诊断结果,以单个监测点诊断合格率 75%以上为模型适用性标准。时段模型和逐日模型诊断结果均表明合格的监测点占监测点总数比例均为 50%左右,所以从适用性角度看,平衡法模型适用性一般。

2.6　平衡法模型存在问题

从模型构建原理角度考虑,平衡法诊断模型符合质量守恒定律,但实际验证过程中发现该模型的诊断误差较大、适用性不强。主要原因可能包括以下几个方面: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)参数由于样本数量有限,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的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。结合后续的系列论文中的其他 5 个独立诊断模型的研究结果,平衡法预测合格率最低,这间接说明其他 5 个独立模型也存在上述的一、三、四、五的问题,但是预测合格率高,可见上述第二个问题是平衡法预测合格率不高的关键性影响因素。

平衡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,时段法建模并不断得到修正后,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网的建立提供了模型方法,还可以就某一气候区域或其他特殊区域的需要建立在线墒情诊断与预测网。

3 结 论

平衡法模型诊断和预测合格率只有50%左右;模型合格率不高的原因主要是分段预测时数据量少,导致参数确定依据不足。

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.

黄昌勇. 2000. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.

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, (4): 199-200.

杨曙光. 2007. 土壤墒情研究进展. 山西水利, **23**(1): 106-107.

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.

Bierkens M. 2001. Spatio-temporal modeling of the soil water balance using a stochastic model and soil profile descriptions. *Geoderma*, **103**: 27-50.

Ben B, Karen MB. 2006. Spatial dynamics of soil moisture and temperature in a black spruce boreal chrono sequence. *Canadian Journal of Forest Research*, **36**: 2794-2802.

Mccartney JS, Zornberg JG. 2006. Correction of lightning effects on water content reflectometer soil moisture data. *Vadose Zone Journal*, **5**: 673-683.

Njoku EG, Wilson WJ, Yueh SH, *et al*. 2002. Observations of soil moisture using a passive and active low-frequency microwave airborne sensor during SGP99. *Geoscience and Remote Sensing*, **40**: 2659-2673.

作者简介 李 兆,男,1991年生,硕士研究生,主要从事农业资源环境数据挖掘研究。E-mail: lizhaonl@foxmail.com
责任编辑 张 敏