生态学杂志 Chinese Journal of Ecology 2017,**36**(12):3399-3406 DOI: 10.13292/j.1000-4890.201712.030

基于内蒙古自治区监测数据的土壤墒情综合诊断模型验证

李敬亚[1] 王铄今[2] 侯彦林[1,2] 刘书田[1,2*] 郑宏艳[1] 米长虹[1] 黄治平[1] 丁 健[1]

([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 本文应用内蒙古自治区5个旗/县的19个墒情监测点的数据验证土壤墒情综合诊断模型在内蒙古区半干旱地区的适用性，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：模型在内蒙古自治区半干旱地区具有较好的适应性，验证合格率为94%以上；模型预测合格率与纬度、经度之间没有显著的相关关系，这是因为所有监测点都位于半干旱地区，降水量差异较小。墒情综合诊断模型可以应用于内蒙古境内半干旱地区。

关键词 土壤含水量；降水量；半干旱地区；综合诊断模型；模型合格率

Verification of integrated diagnostic model of soil moisture based on monitoring data in Inner Mongolia. LI Jing-ya[1], WANG Shuo-jin[2], HOU Yan-lin[1,2], LIU Shu-tian[1,2*], ZHENG Hong-yan[1], MI Chang-hong[1], HUANG Zhi-ping[1], DING Jian[1] ([1]*Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin* 300191, *China*; [2]*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 data of 19 soil moisture monitoring sites in 5 counties in Inner Mongolia were used to verify the adaptability of integrated diagnostic mode of soil moisture in the semi-arid regions in Inner Mongolia. Model was established by the data of 2012-2014, and validated by the data of 2015. The results showed that the model had good adaptability in the semi-arid regions of Inner Mongolia, and the qualification rate was over 94%. There was no obvious pattern between the qualification rate of the model's prediction and latitude and longitude, because all monitoring sites were located in semi-arid areas and rainfall difference was small. In conclusion, integrated diagnostic model can be used in semi-arid areas of Inner Mongolia.

Key words: soil water content; precipitation; semi-arid area; integrated diagnostic model; qualification rate of model.

墒情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）。春季的土壤墒情与上年度封冻前秋季降水、冬季积雪、当年春季降水、春季风力的大小、温度的高低、解冻和冻结的日期等因素有一定的关系（李京兵，2004；刘建忠等，2008；柳领君等，2008；张秀珍等，2011），内蒙古大部分地区一般降水量和平均降水强度较小，暴雨少，土壤疏松，土壤表面干燥，径流量可视为零，而且内蒙古东四盟各地生长季降水量呈下降趋势也使同期0~30 cm土壤湿度下降（于宏君等，2010）。内蒙古部分地区的土壤水分与沙尘暴也有很大的相关性（李彰俊等，2005；李宁等，2007），所以土壤墒情预测至关重要。侯琼等（2000）利用初始土壤有效水分贮存量、降水量和实际蒸散量建立玉米农田土壤墒情评估方法，但预测合格率较低，周海峰等（2009）利用

天津市科技支撑计划（15ZCZDNC00700）、广西科技开发项目（14125008-2-24）、“中国农业科学院科技创新工程”（2016-cxgc-hyl）和全国农业技术推广中心节水处项目（2016-hx-hyl-5）资助。
收稿日期：2017-05-24 接受日期：2017-09-21
*通讯作者 E-mail: liushutian6952@126.com

神经网络建立的不同深度土层体积含水率预报模型和刘雪琴等(2009)针对干旱半干旱地区建立的土壤水分统计插值模型合格率虽然较高,但适用范围太小,推广性差。有关土壤墒情预报模型的研究进展一直很缓慢,以致至今也没有通用的适合于田间墒情预报的模型供使用(尚松浩等,2002;孙凯,2005)。

《基于东北区吉林省监测数据的土壤墒情综合诊断模型验证》应用东北区的半湿润和半干旱区的吉林省的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,综合诊断模型在吉林省具有很好的适应性和很高的预测合格率。本文应用半干旱区的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个旗县的19个监测点2010—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 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个旗县的19个监测点2010—2015年表层土壤(0~20 mm)的墒情监测数据。监测点基本情况见表1。

1.1.2 气象数据 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。

表3为内蒙古自治区19个土壤墒情监测点所归属的4个气象站的年降水量情况,由于采取使用就近气象站数据的原则,所以每个县无论有几个监测点所对应的气象站也只是一个。表3表明,利用2015年之前的3~5年的降水量数据建立的模型中包括了平水年、丰水年和枯水年年型(最后8个监测点缺少枯水年年型)。其中150502J002监测点情况为:2010到2015年降水量距平百分率(与多年平均降水量之差的百分比)分别为:-2.37%(近似平水年;建模年)、-41.19%(枯水年;建模年)、26.73%(丰水年;建模年)、-4.78%(近似平水年;建模年)、-4.83%(近似平水年;建模年)、22.18%(丰水年,验证年),可见,建模年型包括了平水年、丰水年和枯水年年型,验证年为丰水年年型;152527J001~152527J005的5个监测点情况为:建模年型包括平水年、丰水年和枯水年年型,验证年型为枯水年年

表1 内蒙古自治区19个土壤墒情监测点基本情况
Table 1 Basic situation of 19 soil moisture monitoring sites in Inner Mongolia

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
150502J002	2010	科尔沁区海舍力嘎查村	122.32	43.54	玉米	黏土
152527J001	2011	太仆寺旗朝阳村	114.97	42.05	小麦	砂壤土
152527J002	2011	太仆寺旗宝昌镇复兴村	115.16	42.05	小麦	砂壤土
152527J003	2011	太仆寺旗千斤沟镇楚仑乌苏村	115.41	41.76	马铃薯	黏壤土
152527J004	2011	太仆寺旗骆驼山镇楚仑乌苏村	115.52	41.88	小麦、胡麻	黏壤土
152527J005	2012	太仆寺旗宝昌镇头支箭村	115.33	41.97	小麦、莜麦	黏壤土
150981J001	2011	丰镇市王家营村	113.37	40.40	马铃薯	壤土
150981J002	2011	丰镇市头台村	113.40	40.51	玉米	壤土
150981J003	2011	丰镇市胡家营村	113.43	40.55	马铃薯	壤土
150981J004	2011	丰镇市于家营村	113.44	40.35	玉米	壤土
150981J005	2011	丰镇市十三号村	113.10	40.46	玉米	壤土
150125J003	2011	武川县大豆铺村	111.86	41.20	马铃薯,油菜	砂壤土
150125J004	2011	武川县小西滩村	111.58	41.38	马铃薯,油菜	砂壤土
150125J005	2012	武川县小安字号村	111.47	41.34	马铃薯,油菜	-
150223J001	2012	达茂旗南拐子村	111.25	41.57	马铃薯	壤土
150223J002	2012	达茂旗大苏吉村	111.07	41.48	马铃薯	壤土
150223J003	2012	达茂旗下滩村	110.55	41.41	马铃薯	砂壤土
150223J004	2012	达茂旗明安滩村	110.35	41.39	马铃薯	砂壤土
150223J005	2012	达茂旗堂圪旦村	110.07	41.52	马铃薯	壤土

表 2　内蒙古自治区 19 个土壤墒情监测点对应气象台站的基本情况

Table 2　Basic situation of 19 soil moisture monitoring sites and the corresponding meteorological stations in Inner Mongolia

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)
150502J002	54135	通辽市	122.27	43.60	8
152527J001	53391	化德县	114.00	41.90	82
152527J002	53391	化德县	114.00	41.90	97
152527J003	53391	化德县	114.00	41.90	118
152527J004	53391	化德县	114.00	41.90	126
152527J005	53391	化德县	114.00	41.90	110
150981J001	53487	大同市	113.33	40.10	34
150981J002	53487	大同市	113.33	40.10	46
150981J003	53487	大同市	113.33	40.10	51
150981J004	53487	大同市	113.33	40.10	29
150981J005	53487	大同市	113.33	40.10	45
150125J003	53362	四子王旗	111.68	41.53	40
150125J004	53362	四子王旗	111.68	41.53	19
150125J005	53362	四子王旗	111.68	41.53	27
150223J001	53362	四子王旗	111.68	41.53	36
150223J002	53362	四子王旗	111.68	41.53	51
150223J003	53362	四子王旗	111.68	41.53	95
150223J004	53362	四子王旗	111.68	41.53	112
150223J005	53362	四子王旗	111.68	41.53	134

型;150981J001~150981J005 的 5 个监测点情况为:建模年型包括平水年、丰水年和枯水年年型,验证年型为平水年年型;150125J003~150223J005 的 8 个监测点情况为:建模年型包括平水年、丰水年,缺少枯水年年型,验证年型为平水年年型。由表 3 可以得出初步结论,建模和验证年型包括了不同降水年型,如果模型的预测合格率高,则模型预测结果可靠。

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。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 个独立诊断模型均需要根据自回归验证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结果,确定水分来源项输入参数是否需要调整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。

表 3　内蒙古自治区 19 个土壤墒情监测点年降水量(mm)

Table 3　Annual precipitation of 19 soil moisture monitoring sites in Inner Mongolia(mm)

监测点编号	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	多年平均
150502J002	376.2	226.6	488.3	366.9	366.7	470.8	385.3
152527J001	–	222.1	393.2	457.7	239.0	252.4	317.7
152527J002	–	222.1	393.2	457.7	239.0	252.4	317.7
152527J003	–	222.1	393.2	457.7	239.0	252.4	317.7
152527J004	–	222.1	393.2	457.7	239.0	252.4	317.7
152527J005	–	–	393.2	457.7	239.0	252.4	317.7
150981J001	–	301.0	512.8	502.8	404.6	369.4	361.7
150981J002	–	301.0	512.8	502.8	404.6	369.4	361.7
150981J003	–	301.0	512.8	502.8	404.6	369.4	361.7
150981J004	–	301.0	512.8	502.8	404.6	369.4	361.7
150981J005	–	301.0	512.8	502.8	404.6	369.4	361.7
150125J003	–	–	403.9	317.7	283.7	270.1	278.3
150125J004	–	–	403.9	317.8	283.7	270.1	278.3
150125J005	–	–	403.9	317.8	283.7	270.1	278.3
150223J001	–	–	403.9	317.8	283.7	270.1	278.3
150223J002	–	–	403.9	317.8	283.7	270.1	278.3
150223J003	–	–	403.9	317.8	283.7	270.1	278.3
150223J004	–	–	403.9	317.8	283.7	270.1	278.3
150223J005	–	–	403.9	317.8	283.7	270.1	278.3

–:监测点没有墒情监测数据的年份降水量未列出。

利用6个最终模型对各监测点进行墒情诊断，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。

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中的最大值；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，$a>b>c$。

最终诊断结果计算：计算某个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、最小值和平均值。

2 结果与分析

以通辽市科尔沁区150502J002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(含科尔沁区150502J002)的主要验证结论进行综合分析与讨论。

2.1 科尔沁区150502J002验证

该监测点距离54135号国家气象站约8 km。采用2010—2014年数据建立6个墒情诊断模型并进行了诊断计算，通过对比分析计算结果、实测含水量数据和气象台站降水量数据，发现诊断模型所采用的气象台站降水量与该监测点的实际降水情况比较吻合，因此未对模型输入参数进行调整。使用建立的6个诊断模型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4。

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(2015年4月29日增加40 mm灌溉量，2015年10月19日增加40 mm灌溉量)。综合模型建模数据自回归验证结果见表5，2015年数据验证结果见表6。

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9个，为21.43%，其中大于5个重量含水量的有2个，为4.76%；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78.57%，自回归预测的平均误差为2.13%，最大误差6.63%，最小误差0.04%。

由表6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1个，为6.25%，未出现误差大于5个重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93.75%，2015年历史数据验证结果的平均误差为1.01%，最大误差3.21%，最小误差0.00%。

表4 通辽市科尔沁区150502J002监测点优选诊断模型
Table 4 Optimization model of monitoring site (150502J002) in Horqin district, Tongliao City

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

表 5　综合模型 2010—2014 年建模数据自回归验证结果(150502J002)(%)

Table 5　Autoregressive result of integrated diagnostic model with the data during the period of 2010 - 2014 (150502J002)(%)

监测日	实测值	时段预测值	逐日预测值	最终预测值	误差值
2010-06-10	24.98	-	-	-	-
2010-06-25	18.38	20.04	21.00	20.52	2.14
2010-09-10	22.70	18.38	18.38	18.38	-4.32
2010-09-25	18.38	20.32	20.32	20.32	1.94
2010-10-10	25.69	22.14	20.76	21.45	-4.24
2011-05-10	28.85	-	-	-	-
2011-05-25	19.85	20.18	21.64	20.91	1.06
2011-07-25	17.40	19.85	19.85	19.85	2.45
2011-08-25	17.81	17.40	17.40	17.40	-0.41
2011-09-10	16.37	17.40	18.29	17.85	1.48
2011-09-25	20.42	16.94	17.63	17.28	-3.14
2011-10-10	21.65	19.29	19.29	19.29	-2.36
2011-10-25	20.91	20.20	20.20	20.20	-0.71
2012-04-05	26.48	-	-	-	-
2012-04-10	22.67	19.18	21.18	20.18	-2.49
2012-04-23	17.60	20.35	20.15	20.25	2.65
2012-04-30	22.55	23.99	19.60	21.80	-0.75
2012-05-03	22.43	20.63	20.97	20.80	-1.63
2012-05-25	19.93	19.84	19.76	19.80	-0.13
2012-06-09	20.44	19.93	19.93	19.93	-0.51
2012-06-25	17.50	21.57	20.64	21.11	3.61
2012-07-10	12.70	17.50	17.50	17.50	4.80
2012-09-25	10.45	12.70	12.70	12.70	2.25
2013-04-20	17.50	-	-	-	-
2013-04-25	15.30	16.99	18.02	17.51	2.21
2013-04-28	17.40	17.33	17.22	17.28	-0.12
2013-05-04	22.54	17.40	17.40	17.40	-5.14
2013-05-09	19.93	20.63	20.61	20.62	0.69
2013-05-24	18.38	19.93	19.93	19.93	1.55
2013-06-09	17.65	17.63	18.57	18.10	0.45
2013-07-13	14.37	17.65	17.65	17.65	3.28
2013-07-26	23.60	22.64	20.86	21.75	-1.85
2013-08-25	22.65	21.55	21.04	21.30	-1.35
2013-09-10	20.04	23.02	21.75	22.39	2.35
2013-09-25	17.27	19.00	19.10	19.05	1.78
2013-10-10	17.65	17.20	18.02	17.61	-0.04
2013-10-25	20.93	18.12	18.45	18.28	-2.65
2014-04-05	22.30	-	-	-	-
2014-04-10	22.60	20.48	20.44	20.46	-2.14
2014-04-15	22.76	20.63	20.12	20.38	-2.38
2014-04-20	19.52	20.63	20.18	20.41	0.89
2014-05-10	23.00	19.07	19.60	19.34	-3.67
2014-05-26	24.16	22.38	21.34	21.86	-2.30
2014-07-25	23.60	22.98	20.73	21.86	-1.75
2014-09-09	21.09	18.96	19.48	19.22	-1.87
2014-09-28	26.36	19.74	19.73	19.74	-6.63
2014-10-11	22.03	20.36	21.52	20.94	-1.09

表 6　综合模型 2015 年历史监测数据的验证结果(150502J002)(%)

Table 6　Validation result of integrated diagnostic model with the data in 2015 (150502J002)(%)

监测日	实测值	时段预测值	逐日预测值	最终预测值	误差值
2015-03-26	15.61	-	-	-	-
2015-04-10	18.14	17.50	17.64	17.57	-0.57
2015-04-24	16.16	17.53	18.35	17.94	1.78
2015-05-05	20.32	19.39	18.98	19.19	-1.14
2015-05-10	19.91	17.93	20.14	19.03	-0.88
2015-07-10	20.91	23.20	22.96	23.08	2.17
2015-08-11	23.57	20.63	20.08	20.36	-3.21
2015-09-11	22.81	22.52	21.23	21.88	-0.93
2015-10-12	22.03	19.47	19.58	19.53	-2.51
2015-10-25	24.52	21.56	21.53	21.55	-2.98

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 78.57%和 93.75%。

2.2　内蒙古自治区 19 个监测点验证

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

(1)平衡模型判断参数

平衡模型判断参数包括 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)分段参数,单位为 mm(见专栏文章《平衡法土壤墒情诊断模型》)。全部 19 个监测点的平衡法模型参数见表 7。

(2)移动统计模型判断参数

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,单位为%(见专栏文章《移动统计法土壤墒情诊断模型》)。全部 19 个监测点的移动统计模型参数见表 8。

(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,因此各监测点建模过程的水分来源项参数(灌溉+降水)是否需要调整以及调整方案不同,全部 19 个监测点模型输入参数调整方案见表 9。

2.2.2　各监测点优选模型　从表 10 可以看出,时段模型中,模型被选中的次数为差减统计模型 18 次、间隔天数统计模型 15 次、移动统计模型 10 次、统计模型9次、比值统计模型5次、平衡模型0次;

表 7　内蒙古自治区 19 个墒情监测点平衡模型参数
Table 7　Parameters of balance diagnostic method of 19 soil moisture monitoring sites in Inner Mongolia

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）
150502J002	科尔沁区	76.41	50	80
152527J001	太仆寺旗	112.83	50	80
152527J002	太仆寺旗	114.71	50	80
152527J003	太仆寺旗	117.47	50	80
152527J004	太仆寺旗	117.47	50	80
152527J005	太仆寺旗	109.61	50	80
150981J001	丰镇市	85.27	50	80
150981J002	丰镇市	72.91	50	80
150981J003	丰镇市	80.89	50	80
150981J004	丰镇市	72.95	50	80
150981J005	丰镇市	70.40	50	80
150125J003	武川县	63.30	40	80
150125J004	武川县	61.69	40	80
150125J005	武川县	63.76	40	80
150223J001	达茂旗	67.90	45	80
150223J002	达茂旗	66.25	45	80
150223J003	达茂旗	67.23	45	80
150223J004	达茂旗	60.04	45	80
150223J005	达茂旗	67.14	45	80

表 8　内蒙古自治区 19 个墒情监测点移动统计模型参数
Table 8　Parameters of movable statistical diagnostic model of 19 soil moisture monitoring sites in Inner Mongolia

监测点编号	所处市（区）	中心点参数		步长参数
		最小值	最大值	
150502J002	科尔沁区	14	26	2
152527J001	太仆寺旗	7	15	2
152527J002	太仆寺旗	7	14	2
152527J003	太仆寺旗	7	18	2
152527J004	太仆寺旗	9	15	2
152527J005	太仆寺旗	9	14	2
150981J001	丰镇市	10	14	2
150981J002	丰镇市	10	13	2
150981J003	丰镇市	8	15	2
150981J004	丰镇市	9	13	2
150981J005	丰镇市	10	13	2
150125J003	武川县	5	12	2
150125J004	武川县	5	11	2
150125J005	武川县	6	8	2
150223J001	达茂旗	5	14	2
150223J002	达茂旗	6	14	2
150223J003	达茂旗	5	13	2
150223J004	达茂旗	4	13	2
150223J005	达茂旗	6	13	2

表 9　内蒙古自治区 19 个墒情监测点水分来源项参数调整方案
Table 9　Parameter adjustment scheme of water source of 19 soil moisture monitoring sites in Inner Mongolia

监测点编号	所处市（区）	参数调整	调整方案
150502J002	科尔沁区	未调整	-
152527J001	太仆寺旗	调整	2012 年 7 月 4 日、2013 年 4 月 27 日、2014 年 4 月 15 日和 5 月 8 日均增加 50 mm 灌溉量
152527J002	太仆寺旗	调整	2012 年 9 月 6 日和 2014 年 5 月 8 日均增加 50 mm 灌溉量
152527J003	太仆寺旗	调整	2012 年 7 月 4 日增加 80 mm 灌溉量
152527J004	太仆寺旗	未调整	-
152527J005	太仆寺旗	调整	2012 年 5 月 15 日、2014 年 4 月 15 日和 5 月 8 日均增加 50 mm 灌溉量
150981J001	丰镇市	调整	2012 年 5 月 7 日增加 50mm 灌溉量，2013 年 6 月 19 日增加 60 mm 灌溉量
150981J002	丰镇市	调整	2013 年 6 月 19 日增加 60 mm 灌溉量
150981J003	丰镇市	调整	2014 年 5 月 14 日增加 50 mm 灌溉量
150981J004	丰镇市	调整	2013 年 6 月 19 日增加 60 mm 灌溉量
150981J005	丰镇市	调整	2013 年 6 月 19 日增加 60 mm 灌溉量，2014 年 4 月 23 日增加 50 mm 灌溉量
150125J003	武川县	调整	2011 年 6 月 19 日增加 100 mm 灌溉量，2011 年 10 月 19 日和 2012 年 5 月 1 日增加 50 mm 灌溉量
150125J004	武川县	调整	2011 年 6 月 19 日增加 100 mm 灌溉量，2014 年 8 月 19 日增加 60 mm 灌溉量
150125J005	武川县	未调整	-
150223J001	达茂旗	调整	2012 年 5 月 8 日和 6 月 5 日均增加 60 mm 灌溉量
150223J002	达茂旗	调整	2012 年 5 月 8 日和 6 月 5 日、2013 年 6 月 20 日均增加 60 mm 灌溉量
150223J003	达茂旗	调整	2012 年 5 月 8 日增加 60 mm 灌溉量
150223J004	达茂旗	调整	2012 年 5 月 8 日增加 60 mm 灌溉量
150223J005	达茂旗	调整	2012 年 5 月 8 日增加 60 mm 灌溉量

逐日模型中，模型被选中的次数为统计模型 18 次、差减统计模型 17 次、间隔天数统计模型 12 次、比值统计模型 9 次、移动统计模型 1 次、平衡模型 0 次；在时段和逐日模型中，差减统计模型被优选的次数最多为 18 和 17 次，可见该方法适用性最好。

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

表 10　内蒙古自治区 19 个监测点的优选诊断模型

Table 10　Optimization model of 19 soil moisture monitoring sites in Inner Mongolia

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
150502J002	科尔沁区	间隔天数统计法、比值统计法、移动统计法	间隔天数统计法、比值统计法、统计法
152527J001	太仆寺旗	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
152527J002	太仆寺旗	比值统计法、统计法、差减统计法	比值统计法、统计法、间隔天数统计法
152527J003	太仆寺旗	差减统计法、移动统计法、间隔天数统计法	差减统计法、比值统计法、统计法
152527J004	太仆寺旗	差减统计法、移动统计法、间隔天数统计法	差减统计法、比值统计法、统计法
152527J005	太仆寺旗	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
150981J001	丰镇市	差减统计法、统计法、间隔天数统计法	差减统计法、统计法、比值统计法
150981J002	丰镇市	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、比值统计法
150981J003	丰镇市	差减统计法、统计法、比值统计法	差减统计法、统计法、比值统计法
150981J004	丰镇市	差减统计法、统计法、间隔天数统计法	差减统计法、统计法、间隔天数统计法
150981J005	丰镇市	差减统计法、统计法、间隔天数统计法	差减统计法、统计法、比值统计法
150125J003	武川县	差减统计法、移动统计法、统计法	差减统计法、移动统计法、统计法
150125J004	武川县	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
150125J005	武川县	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
150223J001	达茂旗	差减统计法、统计法、移动统计法	差减统计法、统计法、间隔天数统计法
150223J002	达茂旗	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
150223J003	达茂旗	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
150223J004	达茂旗	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
150223J005	达茂旗	差减统计法、间隔天数统计法、比值统计法	差减统计法、间隔天数统计法、统计法

断参数设定 $a=20, b=50, c=80$。

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。

3　结论与讨论

3.1　结论

综合诊断模型在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

表 11　内蒙古自治区 19 个土壤墒情监测点验证结果(%)

Table 11　Validation results of 19 soil moisture monitoring sites in Inner Mongolia

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
150502J002	自回归验证	6.63	0.04	2.13	78.57
	2015 年数据验证	3.21	0.00	1.01	93.75
152527J001	自回归验证	8.59	0.00	1.94	81.63
	2015 年数据验证	3.39	0.30	1.96	85.71
152527J002	自回归验证	5.07	0.02	1.45	91.84
	2015 年数据验证	2.32	0.30	1.04	100.00
152527J003	自回归验证	6.06	0.01	1.51	84.00
	2015 年数据验证	2.90	0.00	0.88	100.00
152527J004	自回归验证	5.39	0.03	1.43	90.70
	2015 年数据验证	1.40	0.70	1.01	100.00
152527J005	自回归验证	7.30	0.02	1.47	88.57
	2015 年数据验证	4.82	0.10	1.60	83.33
150981J001	自回归验证	8.45	0.00	1.49	84.09
	2015 年数据验证	2.15	0.04	0.94	100.00
150981J002	自回归验证	5.42	0.03	1.47	87.50
	2015 年数据验证	2.26	0.00	1.27	100.00
150981J003	自回归验证	5.04	0.02	1.19	90.70
	2015 年数据验证	2.08	0.02	0.52	100.00
150981J004	自回归验证	5.31	0.00	1.23	85.37
	2015 年数据验证	7.74	0.04	1.36	94.44
150981J005	自回归验证	7.20	0.01	1.53	83.72
	2015 年数据验证	2.87	0.18	1.23	100.00
150125J003	自回归验证	6.75	0.04	1.73	88.89
	2015 年数据验证	2.86	0.31	1.15	100.00
150125J004	自回归验证	5.40	0.03	1.31	90.70
	2015 年数据验证	2.80	0.04	1.34	100.00
150125J005	自回归验证	3.10	0.16	1.29	97.06
	2015 年数据验证	4.00	0.02	1.14	92.86
150223J001	自回归验证	8.82	0.03	1.53	84.21
	2015 年数据验证	4.31	0.10	1.45	93.75
150223J002	自回归验证	8.71	0.00	1.55	89.66
	2015 年数据验证	5.07	0.09	1.62	87.50
150223J003	自回归验证	7.62	0.07	1.39	91.07
	2015 年数据验证	2.68	0.04	0.86	100.00
150223J004	自回归验证	7.87	0.01	1.28	91.07
	2015 年数据验证	2.67	0.22	0.99	100.00
150223J005	自回归验证	7.84	0.01	1.40	89.29
	2015 年数据验证	6.03	0.08	1.53	76.47

旗县的 19 个监测点的验证结果表明,时段和逐日的 38 次验证中,最低的诊断合格率为 76.47%,有 36 次验证的合格率达到 80%以上,占验证监测点总数的 94.74%。由此看来,该模型在内蒙古自治区具有较好的适用性,并且模型合格率与纬度、经度之间没有明显的规律。

3.2 诊断模型参数

在对内蒙古自治区 19 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 60~118 mm,自变量分段参数(最小值和最大值)有 3 个点为 40 和 80 mm,5 个点为 45 和 80 mm,11 个点为 50 和 80 mm;移动统计法模型中心点参数最小值范围为 4%~14%,最大值范围为 8%~26%,步长均为 2%;有 16 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 19 个墒情监测点的验证来看,单个监测点的模型在内蒙古自治区的空间扩展应用范围较大,这是因为内蒙古区主要处于半干旱区域,气象条件较为单一,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,并建立模型的参数体系。有关综合模型诊断土壤墒情时应注意的事项参见之前的专栏论文。

3.3 内蒙古区内模型合格率与气候区或降水量关系

内蒙古区境内的 19 个墒情监测点模型合格率平均为 91.49%;分别对 19 个监测点的模型合格率与纬度、经度进行统计,发现它们之间没有显著的相关关系,其原因可能是是内蒙古区均属于半干旱地区,降水量差异较小,在后续专栏论文中将对模型合格率与年均降水量之间关系进行具体分析和统计。

参考文献

侯 琼, 郝文俊. 2000. 内蒙古地区玉米农田土壤墒情动态预测模式. 干旱地区农业研究, **18**(4): 50-56.

李京兵. 2004. 土壤墒情影响因子及旱情分析与预测. 安徽水利科技, (3): 47-48.

李彰俊, 李 宁, 顾 卫, 等. 2005. 内蒙古中西部地区土壤水分对沙尘暴的贡献. 地球科学进展, **20**(1): 24-28.

李 宁, 杜子璇, 许英军, 等. 2007. 土壤湿度与风速对沙尘暴发生的贡献程度分析. 自然灾害学报, **16**(4): 1-5.

柳领君, 张 宏. 2008. 高寒草甸土壤水分空间分布及其影响因子研究进展. 草业与畜牧, (2): 1-4.

刘建忠, 纪旭昱, 刘建梅, 等. 2008. 察右后旗天然草场土壤墒情变化规律及影响因子分析. 内蒙古气象, (1): 40-41.

刘雪琴, 李 宁, 温玉婷, 等. 2009. 内蒙中西部土壤水分统计插值模型试验. 气象科学, **29**(6): 734-741.

孙 凯. 2005. 墒情(旱情)监测与预测预报方法研究(博士学位论文). 北京: 中国农业大学.

尚松浩, 毛晓敏, 雷志栋, 等. 2002. 冬小麦田间墒情预报的 BP 神经网络模型. 水利学报, **33**(4): 60-63.

于宏君, 吕东波, 赵慧颖, 等. 2010. 气候变化对内蒙古东部土壤墒情的影响评估. 安徽农业科学, **38**(30): 17090-17091.

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.

张秀珍, 常志刚, 杜树平, 等. 2011. 莫旗春季土壤墒情的影响因子及提高措施. 现代农业科技, (5): 278-279.

周海峰, 魏占民, 徐宏伟. 2009. 辣椒不同深度土壤墒情预报的 BP 神经网络模型. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, **30**(2): 235-238.

作者简介 李敬亚,女,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: hbuljy@ 163.com

责任编辑 张 敏