

# 土壤墒情诊断理论和方法

侯彦林<sup>1,2\*</sup> 李敬亚<sup>1</sup> 米长虹<sup>1</sup> 黄治平<sup>1</sup> 刘书田<sup>1,2</sup> 郑宏艳<sup>1</sup> 丁健<sup>1</sup> 王铄今<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; <sup>2</sup>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** 本文对土壤墒情诊断理论和方法进行了简述,并介绍了国内墒情监测、诊断和预报现状。重点介绍了所建立的平衡法、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 6 个独立的墒情诊断模型及其联合应用的综合诊断模型。应用 2012—2014 年 7 省 23 个县 87 个监测点的数据建模,并应用 2015 年的数据进行了验证。结果表明:所有模型构建简单,参数获得容易;综合模型优于 6 个独立模型。所建立的 6 个独立模型和综合模型适用于基于降水量的土壤墒情诊断和预测。

**关键词** 土壤墒情; 诊断和预报模型; 降水量; 验证

**Theory and method of soil moisture diagnosis.** HOU Yan-lin<sup>1,2\*</sup>, LI Jing-ya<sup>1</sup>, MI Chang-hong<sup>1</sup>, HUANG Zhi-ping<sup>1</sup>, LIU Shu-tian<sup>1,2</sup>, ZHENG Hong-yan<sup>1</sup>, DING Jian<sup>1</sup>, WANG Shuo-jin<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; <sup>2</sup>Key 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:** This paper reviewed the theory and methods of soil moisture diagnosis, and introduced the status quo of soil moisture monitoring, diagnosis and prediction in China. Six independent models were emphatically presented, which included balance diagnostic model, statistical diagnostic model, subtractive statistical diagnostic model, ratio statistical diagnostic model, interval days statistical diagnostic model and movable statistical diagnostic model. Meanwhile, an integrated diagnosis model by combined application of the six independent models was also introduced. Models were established by the data of 87 monitoring sites in 23 counties in 7 provinces during the period of 2012–2014, and were validated by the data of 2015. The results showed that all the models were simple and the parameters were easy to obtain. Integrated diagnostic model was superior to the 6 independent models. In conclusion, the 6 independent models and the integrated diagnostic model were suitable for the diagnosis and prediction of soil moisture based on precipitation.

**Key words:** soil moisture; diagnosis and prediction model; precipitation; verification.

我国水资源紧缺,农业是用水大户,每年用水总量为  $3900 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 约占全社会总用水量的 70% ~ 80%。干旱缺水已成为我国粮食稳定增产、农业可持续发展的重要制约因素。根据农业部统计,建国以来,我国旱灾发生频率不断增加,其中轻旱发生频率

为 90%,中旱发生频率为 60% ~ 70%,大旱发生频率达到 25% ~ 30%。近几年来我国旱情面积、发生频次、严重程度等都呈现增加的态势(顾颖等,2011)。

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,其多少直接影响着作物的生长发育和产量、品质的形成,也是确定灌溉的主要依据之一(康绍忠,1987;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

“中国农业科学院科技创新工程”项目(2016-cxgc-hyl)、天津市科技支撑计划项目(15ZCZDNC00700)、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: 2017-05-31

\* 通讯作者 E-mail: 2483977138@qq.com

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(李明生,2005;高全等,2016)。影响土壤墒情的因素包括:年降水量及其时间分配、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)(周景春等,2007;贾东于等,2014;杨开甲等,2015)、地形(高程、坡度、坡向、坡位)(何其华等,2003;马轶等,2012)、土壤(质地、有机质、质地剖面等)(赵晓光等,1999;王栓全等,2009)、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、土壤孔隙变化以及时间等(邱杨等,2001;李美婷等,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(徐英等,2004;高磊,2012;贾玉华,2013)。精准的土壤含水量诊断和墒情等级划分并非易事,所以,建立土壤墒情监测、诊断和预报模型和信息平台是一项紧迫的农业技术推广工作。

当前土壤墒情监测、诊断和预报研究和应用广泛使用3S、互联网和物联网技术(Njoku *et al.*, 2002; Scott *et al.*, 2003; Ben *et al.*, 2006; McCartney *et al.*, 2006),一个集降水量和灌溉量、土壤含水量、作物长势和遥感技术等于一体的综合土壤墒情监测、诊断与预报体系正在逐步形成,可望建立自动化监测、信息化管理和实时诊断及预报的在线土壤墒情云服务平台。

本研究的目的是基于长期观测数据建立本地降水量与土壤墒情即土壤含水量之间的定量关系,实现根据降水量逐日预测土壤墒情的目的。研究成果以专栏论文的方式呈现,共分为4个部分:第一部分为综合介绍,即本文;第二部分分别介绍所建立的6个独立模型和将6个独立模型联合应用的综合模型,通过7篇论文呈现;第三部分分别介绍应用7个省23个县87个监测点连续4年的监测数据进行模型验证,以7篇论文呈现;第四部分分别介绍模型评价、模型应用条件评价和综合分析,通过3篇论文呈现。本文对我国墒情监测与预报现状进行简述,并对提出的墒情诊断和预报模型及其应用做一概括性的介绍。

## 1 土壤墒情预报模型

### 1.1 土壤水分测定方法

土壤墒情测定的基本工作是土壤含水量的测定,常见的土壤水分测定方法包括:烘干法(oven dr-

ying method)、张力计法(tensiometer)、中子仪法(neutron instrument method)、时域反射仪法(time-domain reflectometer)、遥感监测法(remote sensing monitoring),还有 $\gamma$ 射线透射法(gamma ray transmission method)、频域反射法(frequency domain reflection)、电阻法(electric-resistivity method)、电容法(capacitance method)、探地雷达法(ground penetrating radar method)等(时新玲等,2003;张学礼等,2005;张晓虎等,2008)。

(1)烘干法:烘干法一直是公认的经典和最精确的测定土壤绝对质量含水量的方法,因其操作简单,得到广泛应用。其缺陷是取样及测定时间长,破坏土壤结构,难以实现定点连续监测土壤水分的动态变化。

(2)张力计法:张力计法又称负压计法。在非饱和土壤中,土壤的溶质势可以忽略不计,张力计插入待测土体中一段时间至平衡后,此时土壤水分与其所受的基质势具有一一对应的关系。因此,用张力计法监测土壤含水量时,通常是先在室内测定所测土壤的水分特征曲线(土壤质量含水量和负压计法测定的土壤基质势关系曲线即土壤水吸力关系曲线),然后根据土壤水分特征曲线,由张力计测得的土壤基质势反算出土壤含水量。由于张力计结构并不复杂,易于制造,易于操作,使用较为广泛。但是该法易受环境温度影响,仪器稳定性较差。而且由于负压计具有滞后性,往往不能及时反映土壤水分状况,对太过干燥的土壤不适用。

(3)中子仪法:中子仪法适用于监测田间土壤水分动态,能长期定位连续测定,不用采土,不破坏土壤结构,不受滞后作用影响;中子仪还可与自动记录系统和计算机连接,因而成为田间原位测定土壤含水量较好的方法,并得到广泛的应用。中子仪法的主要缺点是需要田间校准、中子仪价格昂贵和有辐射危害。

(4)时域反射仪法:时域反射仪法是利用时域反射原理定点微波测量技术测量某一土层内的土壤水分情况,即通过考察电磁脉冲在土壤介质中的通过时间间接测定土壤含水量。时域反射仪法的仪器有较好的测量效果,是目前较先进的土壤湿度仪,便于实现自动化监测,但价格较为昂贵。

(5)遥感法:遥感监测法主要是利用气象卫星的热通道资料来反演土壤的含水量,是一种大范围的土壤墒情监测方法。遥感监测常用的方法有热惯

量法和作物缺水指数法等,前者主要用于裸露土壤或作物生长前期,后者虽可用于作物生长旺盛期,但其计算复杂,要求地面气象因素较多,在实践应用中有较大困难。

以上为常用的土壤水分测定方法,其中烘干法为标准方法,中子仪法为第二标准方法,时域反射仪法为主流的连续田间测定方法,张力计法为简易的连续田间测定方法,遥感法可以进行大范围土壤含水量的估算,以上所有方法都离不开烘干法对土壤质量含水量的标定(汪潇等,2007;杨涛等,2010)。

## 1.2 土壤墒情预报模型

墒情诊断和预报模型主要有确定性和随机性两类模型。确定性模型:是从土壤水分运移、转化所遵循的物理规律(如质量守恒、能量守恒)出发,建立土壤水动态模型,主要包括概念性模型(水量平衡模型)、机理性模型(SPAC 水分传输模型、SPAC 水热传输模型)等。影响农田土壤水分动态变化的因素(气象、土壤、作物等)在时间、空间上均有一定的随机特性,从不同的角度考虑以上随机因素的影响,便可以得到不同类型的随机性墒情预报模型,如随机土壤水动力学模型等。

常见的墒情诊断和预报模型有:经验公式法、水量平衡法、消退指数法、土壤水动力学法、遥感监测法,还有时间序列法、神经网络模型法和支持向量机法等(栗容前等,2005;许秀英等,2013)。每种模型方法各有其优缺点。经验公式法具有建模简单,所需数据量少的特点;但其模型参数易受时空分布的影响,适用范围小,模型不利于推广应用,预报结果稳定性和可靠性差,一个地区建立的经验公式只能适用于这个特定的地区和特定的作物,模型不利于推广应用。水量平衡法不受气象因素影响,计算公式简单、预测精度较高,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,在有大量实测资料时能达到较高的精度;缺点是所需参数较多,一般进行各种假设后,往往造成精度的降低;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。消退指数法所需参数较少且容易获得,方法相对简单,但遇到较大降雨或灌溉过多或地下水埋深较浅时,即下边界通量不能忽略时误差较大,而且模型中土壤水分消退指数的地域和时域的局限性较强,遇到降雨或灌溉时,需要考虑水分入渗系数,其参数的确定要因地制宜。土壤水动力学法理论基础坚实,能够动态反映土壤水分的变化情况;模

型参数及其计算方法是关键环节,该方法的优点是具有坚实的土壤物理背景,但需要许多难以测定的土壤和作物参数,且这些参数又存在着相当大的空间变异性,这些都限制了该方法的田间实际应用。遥感法是通过建立遥感信息与土壤含水量的回归模型而实现大范围实时的土壤含水量预测,但需要积累大量的观测数据,工作量大,模型也不稳定;地面实测资料多为点状,影响模型预测精度。

## 1.3 我国墒情监测、诊断和预报现状

长期以来,国家对土壤墒情监测、诊断和预报工作高度重视,先后在农业部、水利部和气象局三个部门建立了墒情监测和预报系统,对实时指导农业生产发挥了极为重要的作用。国家“十三五”百大工程中的第17项“确保建成高标准农田8亿亩、力争10亿亩(灌溉是基本保障)”和第19项“新增高效节水灌溉面积1亿亩(墒情监测、诊断和预报是合理灌溉的科学依据)”都与墒情有着直接和重要的关系,同时互联网、物联网、大数据、云计算等也为现代化、信息化和实时的墒情监测、诊断和预报平台建设和运行提供了先进的技术手段和保障。然而,现实中面对的一个难题是墒情诊断与预报的理论和方法并不太实用(李明生等,2005;吴代晖等,2010;马扬飞,2012;许秀英等,2013),迫切需要理论和方法创新、技术体系创新和服务模式创新。

水利部从2003年开始推进土壤墒情监测工作,组织建立土壤墒情监测网络,并于2006年颁布了《土壤墒情监测规范》(SL 364—2006),2012年颁布了《土壤墒情评价指标》(贾宏伟等,2014),对监测站网密度、监测制度、监测方法以及墒情评级指标等进行了规范。2012年水利部对土壤墒情监测现状的评价是:“旱情监测系统建设还处于起步阶段,土壤墒情监测站点稀少、精度不高,旱情监测评估和预测分析能力严重滞后”。根据墒情监测现状,水利部水利水电规划设计总院审查编制了《土壤水分监测仪器通用技术条件》(试行),建立了测墒仪器准入制度。虽然我国水利系统引进了一些先进的土壤墒情自动监测仪器,但目前土壤水分的监测仍主要使用传统的人工土钻取土、烘干测量土壤含水量方法(章树安等,2013)。由于墒情自动监测设备采用的相关参数在不同区域、不同土壤环境中存在差异,因此水利部门正在加速推进土壤墒情自动监测设备参数率定工作,检验和率定土壤墒情自动监测设备的适用性和实用性。





图 1 墒情监测点分布示意图  
Fig.1 Distribution of soil moisture monitoring sites

2010 年,农业部发布《农业部办公厅关于做好土壤墒情监测工作的通知》(农办农[2010]60 号)要求各部门针对本区域水资源状况、不同耕地类型及农作物种植情况,结合各种农业建设项目,按照土壤墒情监测网络化、标准化、信息化的建设标准,建立合理监测站点,并根据监测结果及时发布土壤墒情监测信息,科学指导农业生产。随后,农业部办公厅印发了《全国土壤墒情监测工作方案》,对监测点布设,数据采集,指标体系建立,墒情评价等做了新的具体要求,通过改进监测技术方法,推进数据自动采集、信息无线传输和结果可视化表达,全面提升监测效率和服务能力。2014 年,全国农技中心在北京召开的秋冬种墒情会商会提出应加强墒情监测网络体系建设,开展墒情监测关键技术研究,建立墒情会商制度,加强与气象、水利等部门的协调沟通,与农情、苗情监测紧密合作,强化相关信息合作共享。农业部墒情监测数据采集利用固定式采集站,即采用 GPRS/GSM 技术,开发了利用基站信息的具有自主定位的墒情采集器,实现了墒情监测网络的快速部署和低成本定位,这是目前农业部用的最多的土壤墒情监测设备。

气象局对土壤墒情的监测主要是用气象卫星与遥感热惯量法、作物缺水指数法、红外辐射法等相结合,同时考虑降水、土壤水、作物需水状况,从而实现多源实时观测/预报数据对于旱进行监测预报。例

如,河南气象局以 EOS/MODIS 卫星资料和遥感监测、河北省气象局应用 FY3C 卫星数据和 Terra 卫星数据合成分析对土壤墒情进行评价,结合土壤墒情与降雨量、气温等气象因子间的相关关系,判断土壤增墒情况。由于自动站具有较高的响应大气温度变化的灵敏度(刘芴今等,2011),自动观测数据相对于人工观测数据更能反映土壤水分真实情况。因此,气象部门建立健全了自动土壤水分观测站网,实现了土壤水分自动观测站资料的实时接收。

2 材料与方法

基于土壤墒情预报模型现状对 2012—2014 年(个别监测点数据从 2011 年开始)的农业部部分土壤墒情监测数据进行了系统研究,建立了 6 个独立的土壤墒情诊断模型(平衡法、统计法、差减统计法、比值统计法、间隔天数统计法、移动统计法)和将 6 个独立诊断模型联合应用的综合诊断模型,应用 2015 年土壤墒情监测数据进行了综合诊断模型的验证。

2.1 数据来源、参数确定和指标计算方法

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站上获得的(<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

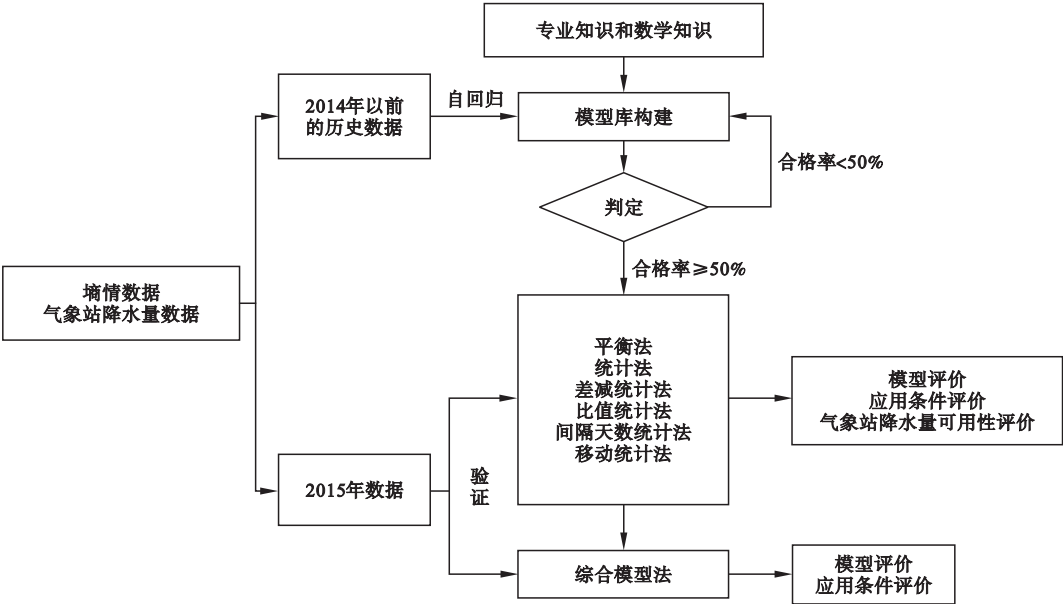


图 2 主要研究内容框图  
Fig.2 Block diagram of the main research contents

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天降水量的数据 (<http://data.cma.cn/>)。

研究样本最后确定为 7 个省 23 个县 87 个监测站点,所有监测站点的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%。为统计方便,直接使用质量含水量差值作为合格标准,确定为预测值与实测值的差值在 3 个质量含水量范围内即 3%的质量含水量范围内的则为诊断或预测合格。

2.2 数据分析软件

研究过程中所使用的软件为 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。

3 研究内容

主要研究内容如图 2 所示。

4 结果与分析

4.1 模型合格率

如果以预测结果合格率≥75%为标准(对于模型的自回归而言,假设一个监测点有 100 次的监测结果,其中有 75 次的诊断或预测误差在 3%质量含水量差值内),6 种模型应用结果见表 1。综合模型最终结果是将时段结果与逐日结果取平均,其结果见表 2,

自回归预测结果合格率均在 75%以上。2015 年验证结果均在 73%以上,预测结果合格率≥75%的站点数占总站点数的 97.70%,综合模型明显提高了预测合格率,这也说明了建立综合模型的必要性。

4.2 优选模型比例和验证方法合格率

本文从优选模型比例和验证方法合格率指标两方面对 6 个诊断模型进行综合评价:(1)优选模型比例指标是指每个模型被综合诊断确定为优选模型的次数占总验证监测点数的比例,结果见表 3;(2)验证方法合格率指标是指自回归验证合格率与 2015 年数据验证合格率的平均,并分别按时段和逐日合格率计算,结果见表 4;(3)从表 3 和表 4 可以

表 1 六个模型的应用结果  
Table 1 Application results of 6 models

模型名称	预测结果 合格率≥75%	时段		逐日	
		自回归	2015 验证	自回归	2015 验证
平衡法	个数	50	36	43	47
	占总数百分比(%)	57.47	41.38	49.43	54.02
统计法	个数	64	54	79	80
	占总数百分比(%)	73.56	62.07	90.80	91.95
差值统计法	个数	82	80	77	83
	占总数百分比(%)	94.25	91.95	88.51	95.40
比值统计法	个数	76	78	72	80
	占总数百分比(%)	87.36	89.66	82.76	91.95
间隔天数统计法	个数	86	78	81	83
	占总数百分比(%)	98.85	89.66	93.10	95.40
移动统计法	个数	85	75	62	59
	占总数百分比(%)	97.70	86.21	71.26	67.82

n=87,以预测结果合格率≥75%为标准。下同。

表 2 综合模型的应用结果  
Table 2 Application results of integrated diagnostic model

模型名称	预测结果合格率≥75%	自回归	2015 验证
综合法	个数	85	87
	占总数百分比(%)	97.70	100.00

表 3 六个模型为优选模型的指标比较  
Table 3 Comparison of 6 models as the preferred models

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	移动统计法
时段优选模型	5	36	72	37	62	49
逐日优选模型	5	71	76	49	47	13
优选模型合计	10	107	148	86	109	62
优选模型排序	6	3	1	4	2	5

看出,在采用综合诊断流程(详见后续论文《综合模型法土壤墒情诊断模型》)情况下,6 个诊断模型优劣顺序如下:差减统计法、间隔天数统计法>移动统计法>比值统计法>统计法>平衡法;而着眼于各种模型的预测功能情况下,逐日预测的稳定性以及准确性是首选的指标,此种背景下差减统计法、间隔天数统计法、移动统计法、比值统计法和统计法都是比较适用的模型。

4.3 模型应用条件分析

4.3.1 关于气象站数据用于监测点墒情诊断和预报的可行性 本次统计样本 7 个省 23 个县 87 个监测点只是全国监测点的部分数据,这 87 个监测点至少证明了就近气象站降水量可以用于墒情监测点墒情的诊断和预报,这为两套数据之间的数据分析架起了桥梁;至于其他监测点气象站降水量是否适合监测点墒情诊断与预报则需要进一步的模型和参数优化及其验证。

4.3.2 关于模型应用的下垫面条件 综合诊断模型可以应用于不同气候条件、不同地貌单元和海拔高度、不同土壤类型和质地类型、不同作物类型(大田作物、蔬菜、果树)、不同熟制类型、不同监测时间

(除冻期外的所有时段),距离气象站的不同距离和方位,唯一限制条件是气象站的降水量要与墒情监测点的降水量趋势总体上一致。综合诊断之所以具有普适性是因为每个监测点模型和参数都是按监测点因地制宜的统计结果。

4.3.3 6 个模型的特点 6 个模型都遵循统计学规律,其中平衡法和差减统计法还遵循质量守恒定律;平衡法中  $P_v$  ( $P_v$  为两次监测时段内土壤水分的蒸发、渗漏和径流的合计)是通过统计方法建立的与  $(P_i+P_w)$  ( $P_i$  为某次监测的土壤含水量,  $P_w$  为两次监测时段内的降水量之和)的定量关系;6 个模型中共有的变量为  $P_{(i+1)}$  (与  $P_i$  相对应的后一次监测的含水量)、 $P_i$ 、 $P_w$ ,加上  $P_v$ 、 $P_i \times P_w$ 、days (两次监测时段的天数)3 个特殊变量构成 6 个模型的所有变量;历史数据中,  $P_{(i+1)}$ 、 $P_i$ 、 $P_w$ 、 $P_i \times P_w$ 、days 都是已知数据,  $P_v$  是通过差减法可以获得的具体数值。6 个变量在历史数据中都有确定的数值,参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  等都是可以通过统计方法求出的。可见,模型构建简单、参数容易获得。因此,方法具有推广前景。

4.3.4 模型适应性 验证结果表明,6 个独立模型和 1 个综合模型适用于所验证的 7 个省 23 个县 87 个监测点 2 到 4 年的监测数据,这说明模型具有广泛的适应性。

4.3.5 6 个诊断模型优劣顺序 在优劣顺序上:差减统计法、间隔天数统计法>移动统计法>比值统计法>统计法>平衡法;而着眼于各种模型的预测功能情况下,逐日预测的稳定性以及准确性应该是首选的指标,此种背景下差减统计法、间隔天数统计法、移动统计法、比值统计法和统计法都是比较适用的模型。这说明,在缺少参数的地区可以按气候、地貌、土壤和作物的相似性来选择已有模型试用,这将大量节省人力、物力、财力和时间,同时为提高诊断和预报速度、扩大诊断和预报面积提供了模型库和

表 4 六个模型不同验证方法的合格率比较  
Table 4 Comparison of qualified rate of 6 models with different verification methods

模型名称	时段诊断				逐日诊断			
	自回归验证(%)	2015 年数据验证(%)	合格率平均值(%)	合格率排序	自回归验证(%)	2015 年数据验证(%)	合格率平均值(%)	合格率排序
平衡法	57.47	41.38	49.43	6	49.43	54.02	51.73	6
统计法	73.56	62.07	67.82	5	90.80	91.95	91.38	3
差减统计法	94.25	91.95	93.10	2	88.51	95.40	91.96	2
比值统计法	87.36	89.66	88.51	4	82.76	91.95	87.36	4
间隔天数统计法	98.85	90.80	94.83	1	93.10	95.40	94.25	1
移动统计法	97.70	86.21	91.96	3	71.26	67.82	69.54	5



参数库。

**4.3.6 关于合格率更高模型建立的可能性** 除上述 87 个监测点外,还有更多监测点的数据需要验证。为了进一步提高诊断和预报合格率,可以考虑按移动统计法的思想将土壤初始含水量分成至少高、中、低 3 个档次,在每个档次里再分别应用除移动统计法外的 5 个模型,然后再在 5 个模型中优选出 3 个模型后再根据时段降水量和土壤初始含水量之和最后判断预测结果;同时也要针对 0~40 cm 或更深土层进行验证。

## 5 结 论

基于降水量的土壤墒情诊断与预测系列模型的建立过程和验证结果表明:(1)所有模型构建简单、参数容易获得;(2)6 个独立模型都可以实现时段诊断和逐日诊断;(3)综合模型优于 6 个独立模型的单独使用;(4)按监测点建模能够最大限度地消除下垫面和管理因素的影响,使模型的预测合格率较高。

## 参考文献

- 高 磊. 2012. 黄土高原小流域土壤水分时间稳定性及空间尺度性研究(博士学位论文). 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心).
- 高 全, 杨 扬, 杨剑虹. 2016. 土壤墒情观测与降水关系探讨. 农业科技与信息, (28): 110-111.
- 顾 颖, 倪深海, 林 锦, 等. 2011. 我国旱情旱灾情势变化及分布特征. 中国水利, (13): 27-30.
- 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.
- 贾宏伟, 郑宝仙. 2014. 区域土壤墒情监测的探讨. 中国水利学会. 科技创新与水利改革——中国水利学会 2014 学术年会论文集(上册). 中国水利学会, 4.
- 贾玉华. 2013. 坡面土壤水分时空变异的试验研究(博士学位论文). 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心).
- 康绍忠. 1987. 旱地土壤水分动态模拟的初步研究. 农业气象, 8(2): 38-41.
- 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.
- 李明生, 刘 震. 2005. 土层水量平衡模型在土壤墒情预报中的应用. 东北水利水电, 23(1): 49-51.
- 李明生. 2005. 土壤墒情预报模型应用研究(硕士学位论文). 南京: 河海大学.
- 刘芳今, 李 毅. 2011. 自动站与人工站气象观测数据差异浅析. 云南大学学报: 自然科学版, (S1): 253-258.
- 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.
- 马扬飞. 2012. 土壤墒情预报模型与精准灌溉控制系统研究(硕士学位论文). 北京: 北京林业大学.
- 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.
- 时新玲, 王国栋. 2003. 土壤含水量测定方法研究进展. 中国农村水利水电, (10): 84-86.
- 粟容前, 康绍忠, 贾云茂, 等. 2005. 农田土壤墒情预报研究现状及不同预报方法的对比分析. 干旱地区农业研究, 23(6): 194-199.
- 汪 潇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 2007. 遥感监测土壤水分研究综述. 土壤学报, 44(1): 157-163.
- 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.
- 吴代晖, 范闻捷, 崔要奎, 等. 2010. 高光谱遥感监测土壤含水量研究进展. 光谱学与光谱分析, 30(11): 3067-3071.
- 徐 英, 陈亚新, 史海滨, 等. 2004. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. 农业工程学报, 20(2): 1-5.
- 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 涛, 宫辉力, 李小娟, 等. 2010. 土壤水分遥感监测研究进展. 生态学报, 30(22): 6264-6277.
- 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.
- 张晓虎, 李新平. 2008. 几种常用土壤含水量测定方法的研究进展. 陕西农业科学, 54(6): 114-117.
- 张学礼, 胡振琪, 初士立. 2005. 土壤含水量测定方法研究进展. 土壤通报, 36(1): 118-123.
- 章树安, 章雨乾. 2013. 土壤水分监测技术方法应用比较研究. 水文, 33(2): 25-28.
- 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.
- 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.
- Ben B, Karen MB. 2006. Spatial dynamics of soil moisture and temperature in a black spruce boreal chronosequence. 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.
- Scott CA, Bastiaanssen WGM, et al. 2003. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129: 326-335.

**作者简介** 侯彦林,男,1959 年生,博士,研究员,博士生导师,中国科学院“百人计划人才”、“中国农业科学院科技创新工程团队首席科学家”、“广西师范学院北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室农业地理大数据挖掘与信息化团队首席专家”。E-mail: 2483977138@qq.com

**责任编辑** 张 敏