

黑河流域土壤墒情预报模型

裴源生, 孙素艳, 于福亮

(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044)

摘要:针对黑河流域水资源匮乏问题,考虑了流域下垫面因素、气象因素以及实时灌溉的空间分布对土壤墒情的影响,为满足流域水资源实时调度模型系统的需求,建立了适合于该流域的土壤墒情预报模型;利用该模型对黑河流域 2001 年研究区内各计算单元不同作物的净灌溉定额和需水量进行计算,并与传统方法计算的需水量比较来检验模型的可行性。在黑河流域水资源实时调度需水计算中进行了初步应用,结果表明该模型能满足流域水资源实时调度的需要。

关键词:土壤墒情;预报模型;黑河流域

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2006)04-0005-04

Soil moisture prediction model for Heihe River Basin//PEI Yuan-sheng, SUN Su-yan, YU Fu-liang(*Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China*)

Abstract: In view of the current situation of water resources shortage in the Heihe River Basin, a soil moisture prediction model, which could meet the requirement of the real-time allocation system of river basin water resources, was developed with consideration of the effects of underlying surface, the meteorological factor, and the spatial distribution of real-time irrigation on the soil moisture. The model was applied to calculating the net irrigation quota and water demand of each calculation unit of different crops in the studied area in the Heihe River Basin for 2001, and the feasibility of the method was verified by comparison of the calculated results with those of the conventional methods. The preliminary application shows that the prediction model can meet the requirement of real-time allocation of water resources in the Heihe River Basin.

Key words: soil moisture; prediction model; Heihe River Basin

黑河流域水资源短缺,上中下游用水矛盾日益突出,缺水造成社会经济用水大量挤占生态环境用水,从而导致了不同程度的生态环境恶化,同时由于水利工程布局不合理且缺乏有效的水资源统一管理,造成用水蒸发渗漏损失量大,水事矛盾十分突出。为有效利用当地水资源,协调上中游经济用水和下游生态用水的矛盾,黑河流域管理局开展了水资源统一管理和调度工作,并着手进行流域水资源实时调度模型系统的研究和开发^[1]。实时调度模型中计算实时需灌水量的基础为土壤墒情预报模型,而传统的农业需水计算仅能满足规划或水资源配置中的需求,并不能真实模拟反映类似黑河流域这种大面积下的农业需水要求和过程,因此迫切需要建立一套科学合理的土壤墒情预报模型,对流域内土壤含水量的变化进行分析预报,为流域水资源实时调度提供重要的决策依据。

目前,我国关于土壤墒情的研究多数局限于实验点或灌区的研究,应用遥感进行的墒情监测也仅

限于土壤表层,而对于流域这种大面积区域内的土壤墒情预报的研究则较为少见。气象、地质、土壤、土地利用和土地覆盖等类型空间分布的差异性造成了空间属性的异向性,从而在一定程度上影响了流域内的土壤墒情预报,特别是流域内不同灌区及同一灌区内种植结构的不同和灌溉时序的不同,导致不同灌区及同一灌区内土壤墒情在空间上存在巨大差异。在流域水资源实时调度中,为了减少空间属性的异向性对土壤墒情模型预报的影响,需要将一个较大的流域划分成一系列空间属性相对均一的单元。根据作物种植结构和灌溉制度确定单元大小,其确定原则为单元内空间属性相对均一,而土壤墒情则视为具有均一性,从而对每个单元分别进行墒情计算。在此基础上计算每个单元的实时需灌水情况,然后累加各单元的实时需灌水量作为整个流域的实时需灌水量,从而为实时调度提供实时需灌水量的数据。基于此种墒情预报原理,本文以黑河流域为例,对该流域下的土壤墒情预报进行建模,以

期对流域内土壤墒情的变化进行科学合理的预报,进而实现流域水资源的统一管理和实时调度。

1 黑河流域概况

黑河是我国西北地区较大的内陆河,发源于祁连山中段。流域东起山丹县境内的大黄山,与石羊河流域接壤;西以嘉峪关境内的黑山为界,与疏勒河流域毗邻;北至内蒙古自治区额济纳旗境内的居延海,流域面积 14.3 万 km²。黑河流域地势南高北低、地形复杂。流域土壤的空间分布受地形、气候和植被影响,具有明显的垂向空间带谱分异特征。流域降水量由南向北、由高山向平原、自东向西递减,形成 3 个降水带,变化梯度很大,而蒸发能力的地区分布与降水量则相反。流域中游河西走廊属温带干旱亚区,光、热资源丰富,年温差较大,年日照时数长达 3000~4000 h,年均温度 6~8℃,无霜期 150~170 d,年降水量 110~370 mm,蒸发量 1200~2200 mm。中游地区气候条件有利于植物生长,是流域主要的灌溉农业区,农作物以小麦、玉米、油菜、甜菜等为主。

2 土壤墒情预报模型的建立

2.1 单元划分

应流域实时调度对实时需灌水量的要求,对研究区进行两个层次的单元划分。首先依据灌区、行政分区及引水口状况进行一级单元划分,将研究区划分为 18 个一级单元,即在水资源实时调度过程中,进行水量调度的计算分区,最小面积为 1300 多 hm²,最大面积可达 2 万多 hm²。全流域的实时调度主要是依据调度时段的来水情况和这些计算单元的需水情况进行,而且在整个预报过程中认为降雨和土质资料在一级单元上是一致的。在一级单元内,种植结构和灌水制度的不同也会导致土壤墒情状况千差万别,因此依据种植结构和轮灌周期对一级单元进行概念性的二级划分,保证每天灌溉时可以灌整数块。根据面积大小将每个一级单元划分为 20~300 个二级子单元,整个流域共划分了 2200 多个二级子单元,每个子单元的土壤墒情认为是均一的,以每个子单元为基本单位分别进行土壤墒情预报,在此基础上计算各一级单元的实时需灌水量,进而应用于实时调度中。

2.2 单元间关系

本次研究的水资源实时调度中,调度时段为 5 d,计算单元间的关系主要考虑在总水量上的控制^[1]。就整个流域来说,将一个调度时段内各个一级单元的总需水量之和作为流域的总需水量。就一级单元内各个二级子单元来说,按作物的生长阶段分为作物生长关键期和非关键期,将土壤含水量以各种作

物土壤水分胁迫时的临界土壤含水量和土壤适宜含水量下限进行划分,以此得到各个二级子单元的配水优先级。通过土壤墒情预报模型中对作物实时需灌水量的分析,可以得到各二级子单元的实时需灌水量,根据各二级子单元的配水优先级,进行灌区内部引水量的分配。

一级单元内各二级子单元间的关系描述用数学式表达为

$$Q_k = \sum_{l=1}^n b_{kl} I_{kl} \quad (1)$$

式中: k 为一级单元序号; l 为二级子单元序号; n 为各一级单元中的二级子单元数,因一级单元的面积不同而变化; I_{kl} 为一级单元 k 中二级子单元 l 的需灌水量,万 m³; b_{kl} 为是否需要灌溉的系数,取 0 或 1,0 表示不灌水,1 表示灌水; Q_k 为一级单元 k 的需水量,万 m³。

由于各二级子单元灌溉状况不同,调度时段末与调度时段初土壤墒情之间的关系也就不同。在本次研究过程中,当前调度时段初和调度时段末土壤墒情之间的关系,由后面研究的逐日土壤墒情预报模型计算。而当前调度时段初与上一调度时段末土壤墒情之间的关系则分灌水情况讨论:若子单元不灌水,则认为当前调度时段初的土壤墒情即为上一调度时段末的土壤墒情;若灌水,则考虑将其灌至土壤适宜含水量的上限值,即当前调度时段初的土壤墒情值为土壤适宜含水量的上限值。用数学表达式表示为

$$(W_{kl})_{t+1,0} = \begin{cases} (W_{kl})_t & b_{kl} = 0 \\ (W_{kl})_{\text{上}} & b_{kl} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为调度时段; $(W_{kl})_t$ 为一级单元 k 中二级子单元 l 的 t 调度时段末的土壤墒情; $(W_{kl})_{t+1,0}$ 为一级单元 k 中二级子单元 l 的 $t+1$ 调度时段初的土壤墒情; $(W_{kl})_{\text{上}}$ 为一级单元 k 中二级子单元 l 的土壤适宜含水量上限值。

2.3 土壤墒情预报模型

土壤墒情预报模型建立的依据是水量平衡原理:在任意计算单元的土壤计划湿润层中,一定时段内进入的水量与输出的水量之差等于该计算单元土壤计划湿润层内的蓄水量变化。土壤水分预报主要受气象、土壤和作物三方面因素的影响。在自然条件下,大气降水是土壤水分的主要来源,而农田作物蒸散发量则是土壤水分的主要支出项^[2]。

以 5 d 作为调度时段,则此时段内的土壤墒情由于灌水状况的不同产生很大差异,因此,在土壤墒情预报模型中将研究时段取为 1 d,将一个调度时段内的实时需灌水量累加值作为该调度时段的需灌水量。根据水量平衡原理推出墒情预报的土壤水分动

态方程,即根据本时段初土壤计划湿润层内的含水量、本时段内保存在土壤计划湿润层内的有效雨量的预测值、作物灌溉水量、作物蒸发蒸腾量和作物对地下水的利用量来预测本时段末土壤计划湿润层内的含水量,进而作墒情预报:

$$W_i = W_{i0} + P_{有i} + I_i - ET_i + K_i - D_i \quad (3)$$

式中: W_i 为 i 时段末土壤计划湿润层内的含水量, mm; W_{i0} 为 i 时段初土壤计划湿润层内的含水量, mm; $P_{有i}$, I_i 分别为 i 时段内保存在土壤计划湿润层内的有效雨量和作物灌溉水量, mm; ET_i 为 i 时段内作物蒸发蒸腾量, mm; K_i 为 i 时段内土壤计划湿润层内作物对地下水的利用量, mm; D_i 为 i 时段内土壤计划湿润层内的渗漏量, mm, 当土壤计划湿润层内的含水量不超过田间持水量或在胁迫生长条件下, 该项一般可忽略不计, 当土壤计划湿润层内的含水量超过田间持水量时, 超过部分按渗漏处理。

2.3.1 作物蒸发蒸腾量的确定

作物蒸发蒸腾量的计算, 是土壤墒情预报中的重要内容之一。作物蒸发蒸腾量是指当土壤水分和肥力适宜时, 大面积上的无病虫害作物在给定的生长环境中能取得高产潜力的条件下, 为满足植株蒸腾、棵间蒸发、组成植株体所需要的水量^[2-3]。

影响作物蒸发蒸腾量的因素有很多, 包括作物特性、气象条件、土壤性质和农业技术措施等^[2,4-5]。在本预报模型中, 根据具体资料, 作物蒸发蒸腾量实时预报值采用某时段的参考作物蒸发蒸腾量和作物系数、胁迫系数来确定。计算公式为

$$ET_i = K_s K_{ci} ET_{i0} \quad (4)$$

式中: ET_{i0} 为 i 时段内参考作物的逐日蒸发蒸腾量, mm/d; K_{ci} 为 i 时段的作物系数; K_{si} 为 i 时段的土壤水分胁迫系数。

a. 参考作物蒸发蒸腾量的确定。 计算参考作物蒸发蒸腾量的方法很多, 主要有经验公式法、水汽扩散法、能量平衡法及综合法。目前以联合国粮农组织推荐的修正彭曼公式应用较广, 也最为准确, 但其参数较多, 需要的资料比较多, 而根据实际资料情况, 该方法对于本次预报难以采用。所以, 在本次墒情预报的模型中采用经验公式法, 即以温度和水汽压为参数建立相应的公式^[6]计算:

$$ET_{i0} = -k(e_i \times 31.449 T_{ki} \ln RH_i + 1) \quad (5)$$

式中: T_{ki} 为 i 时段内的平均气温, K; RH_i 为 i 时段内的平均相对湿度; e_i 为 i 时段内空气的平均实际水汽压, hPa; $k(e_i)$ 为 i 时段内与实际水汽压有关的水

分传导率。

b. 作物系数的确定。 由于受该地区实验条件和已有实验资料的限制, 作物系数用作物各生育阶段均不受旱处理的作物蒸发蒸腾量与同期参考作物蒸发蒸腾量推求。本次墒情预报中的作物系数采用已有实验资料分析得到。具体数据可见有关资料^①。

c. 土壤水分胁迫系数的确定。 在田间水分充足时, 作物不受到胁迫, 土壤水分胁迫系数为 1; 非充分灌溉或水分不足时, 土壤水分胁迫系数主要反映土壤水分状况对作物蒸发蒸腾量的影响^[7-8]。公式如下:

$$K_{si} = \begin{cases} 1 & \theta_i > \theta_{c1} \\ \ln(1 + \theta_i) / \ln 101 & \theta_{c2} < \theta_i < \theta_{c1} \\ \epsilon \exp[(\theta_i - \theta_{c2}) / \theta_{c2}] & \theta_i < \theta_{c2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ_i 为实际平均土壤含水率, 对于旱地, 为占田间持水率的百分数; θ_{c1} 为土壤水分充分的临界土壤含水率, 旱地取田间持水率的 90%; θ_{c2} 为土壤水分胁迫时的临界土壤含水率, 旱地取田间持水率的 60%; ϵ 为经验系数, 旱地作物取 0.89。

2.3.2 土壤计划湿润层内作物对地下水利用量的确定

土壤计划湿润层内作物对地下水的利用量 K_i 是指地下水借毛管力作用上升到根区被作物利用的水量, 它与地下水埋深、土壤性质、作物种类、作物需水强度、土壤计划湿润层的含水量等有关。该利用量随灌区地下水动态和各阶段土壤计划湿润层的深度不同而变化^[2]。

由于资料有限, 在本模型中 K_i 采用甘肃省张掖地区的实验资料进行分析计算。预报时根据计算单元的地下水位埋深情况, 参见张掖平原堡相应水位埋深下的地渗仪蒸发强度^②, 由式(7)估算土壤计划湿润层内作物对地下水的利用量并参与水量平衡计算。

$$K_i = E_{hi} \quad (0.25 \leq h \leq 3.0) \quad (7)$$

式中: h 为 i 时段的地下水位埋深, m; E_{hi} 为 i 时段 h 水位埋深下的蒸发强度, mm/d。

2.3.3 计算单元作物的实时需灌水量

将计算单元土壤计划湿润层内含水量的预报值与适宜作物生长情况的土壤含水量值进行比较, 确定作物是否需要灌溉, 各种作物实时需灌水量的累加值即为计算单元在该时段的作物需灌水量。如果时段末土壤计划湿润层内的含水量小于土壤水分胁迫时的临界土壤含水量, 则本时段作物需要灌溉, 水量充足时, 可灌至土壤适宜含水量的上限值:

$$I_{ij} = [W_{ij\text{上限}} - (W_{ij0} + P_{有ij} - ET_{ij} + K_{ij} - D_{ij})] S_j \times 10^{-3} \quad (8)$$

①水利部农田灌溉研究所, 中国水利水电科学研究院水利所. 北方地区主要农作物灌溉用水定额的研究. 2000.

②甘肃省地质矿产局第二水文地质工程地质队. 黑河干流中游地区地下水数值模拟的参数研究. 1989.

式中: i 为时段; j 为作物; I_{ij} 为 i 时段 j 作物的需灌水量,万 m^3 ; $W_{ij\text{上限}}$ 为 i 时段末适宜 j 作物生长的土壤含水量上限,mm; S_j 为 j 作物的种植面积, hm^2 。

则计算单元在该时段的作物需灌水量为

$$I_i = \sum_{j=1}^m I_{ij} \tag{9}$$

式中: m 为作物种类; I_i 为计算单元 i 时段的作物需灌水量,万 m^3 。

灌水原则:对实时预报的土壤计划湿润层内的含水量进行分析,当已经达到或接近作物土壤计划湿润层内的土壤适宜含水量下限时即需要灌水。对于每个计算单元,在部分时间内可能因为水量供应的限制,而使得部分单元不能进行及时灌溉,此时该计算单元作物即受到胁迫作用。在极限情况下,应该以计算单元土壤计划湿润层内的凋萎系数作为控制下限值。

3 模型检验

采用 2001 年黑河中游地区的实际气象资料,根据灌区种植结构、不同作物生长期的土壤适宜含水量等,并考虑冬灌需水,利用土壤墒情预报模型预测黑河流域 2001 年研究区内计算单元的不同作物净灌溉定额和需水量,并与传统的定额法计算的需水量进行比较,以检验土壤墒情预报模型的准确性。利用土壤墒情预报模型预测的 2001 年研究区内各计算单元的不同作物净灌溉定额见表 1,两种需水计算方法的结果比较见表 2。

表 1 2001 年研究区内各计算单元作物的净灌溉定额

		m^3/hm^2							
单元名称	小麦	玉米套种	玉米	其他粮食作物	瓜菜	棉花	油料	其他经济作物	草
上三	6735	7845	6420	6135	5850		6960	7140	3885
大满	6735	7845	6420	6135	5850			7140	3885
盈科	6735	7845	6420		5850			7140	3885
西浚	6735	7845	6420	6135	5850		6960	7140	3885
沙河	6735	7845	6420	6135	5850	6870	6960	7140	3885
乌江	6735	7845	6420	6135	5850		6960		
梨园河	6810	7845	6645	6135	5910	6945	7035	7215	3885
鸭暖	6810	7845	6645	6135	5910	6945	0	7215	3885
廖泉	6810	7845		6135	5910	6945	7035	7215	3885
板桥	6795	7845	6645	6060	5895	6945	7050	7230	3885
平川	6810	7845	6645		5910	6945			3885
三清渠	7035	7995	6795	6330	6135		7275	7485	4005
友联	7035	7995	6795	6330	6135	7245	7275	7485	4020
骆驼城	7035	7995	6795	6330	6135		7275	7485	4005
六坝	7035	7995	6795	6330	6135	7245		7485	4005
大湖湾	7035	7995	6795	6330	6135	7245	7275	7485	4005
罗城	7035	7995	6795	6330		7245		7485	4005
鼎新	7035	7995	6795	6330	6135	7245	7275	7485	4005

由表 1 可以看出,2001 年研究区内各计算单元的不同作物净灌溉定额基本符合当地实际情况;由

表 2 2001 年农业需水预测结果比较

灌区	灌溉水利用系数	土壤墒情预报模型 预报结果/万 m^3		定额法计算 结果/万 m^3		误差/%
		净需水	毛需水	净需水	毛需水	
上三灌区	0.46	3433.25	7463.59	3152.91	6854.15	8.2
大满灌区	0.49	13899.69	28482.97	13743.80	28163.52	1.1
盈科灌区	0.50	9879.52	19602.23	9946.77	19735.65	0.7
西浚灌区	0.51	11705.32	23178.84	11263.67	22304.30	3.8
沙河灌区	0.48	2934.23	6062.46	2967.50	6131.21	1.1
乌江灌区	0.46	4128.55	8936.25	3987.87	8631.76	3.4
梨园河灌区	0.50	12473.33	25097.24	11877.26	23897.90	4.8
鸭暖灌区	0.47	2149.25	4563.17	2053.80	4360.50	4.4
廖泉灌区	0.47	2612.47	5534.90	2596.68	5501.44	0.6
板桥灌区	0.44	3504.62	7929.02	3493.37	7903.55	0.3
平川灌区	0.46	3513.75	7638.58	3487.55	7581.62	0.7
三清渠灌区	0.46	3488.18	7550.16	3366.48	7286.75	3.5
友联灌区	0.46	6301.60	13610.36	6022.39	13007.32	4.4
骆驼城灌区	0.62	3637.31	5904.73	3359.28	5453.38	7.6
六坝灌区	0.46	1655.41	3583.13	1533.68	3319.64	7.4
大湖湾灌区	0.46	3887.29	8395.88	3727.53	8050.82	4.1
罗城灌区	0.46	1669.24	3652.61	1520.51	3327.16	8.9
鼎新灌区	0.40	5454.49	13602.21	5571.34	13893.61	2.1
合计		96327.49	200788.32	93672.38	195404.29	2.7

表 2 可得两种需水计算方法的结果误差均在 10% 之内,而且多数计算单元的误差在 5% 之内,因此可以认为该土壤墒情预报模型结果满足要求。分析可知,2001 年模型计算全区需灌水量为 20.08 亿 m^3 ,定额法计算结果为 19.54 亿 m^3 ,实际该年从黑河引水的灌溉渠道总引水量为 20.80 亿 m^3 。应用该模型的主要目的是为水资源实时调度服务,两种方法的需水结果与实际调度结果误差均不大,但是墒情预报模型可以满足对需水进行实时预报,且实现了对流域内大面积土壤墒情的预报,其预报结果合理可靠,因而在今后实施流域水资源实时调度过程中,流域土壤墒情预报模型较定额法更具有科学性和推广性。

参考文献:

[1] 赵勇,裴源生,于福亮.黑河流域水资源实时调度系统[J].水利学报,2006,37(1):82-88.

[2] 郭元裕.农田水利学[M].3 版.北京:中国水利水电出版社,1999.

[3] 张明炷,黎庆淮,石秀兰.土壤学与农作学[M].3 版.北京:中国水利水电出版社,1994.

[4] 康绍忠,蔡焕杰.农业水管理学[M].北京:中国农业出版社,1996.

[5] 刘昌明,王会肖.土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M].北京:科学出版社,1999.

[6] 康绍忠,刘晓明,熊运章,等.土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.

[7] 蔡甲冰,蔡林根,刘钰,等.非标准状况下作物系数的计算方法[J].中国农村水利水电,2002(2):32-37.

[8] 陈海芳.土壤墒情监测预报技术研究[D].南京:河海大学,1999.

(收稿日期:2005-10-14 编辑:熊水斌)