

淮河流域水文非线性多水源时变增益模型研究与应用

万 蕙^{1,2}, 夏 军^{1,2}, 张利平^{1,2}, 宋霁云³, 余敦先^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072;

3. School of Sustainable Engineering and Built Environment, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA)

摘 要:基于传统时变增益模型(TVGM),进一步考虑地下径流退水,在传统 TVGM 只考虑单一地表水源的基础上,添加地下水源模块,对地表地下径流分别进行产、汇流计算,改进并提出了多水源 TVGM,并将其应用于淮河流域蚌埠以上 13 个水文站控制的代表性子流域。结果表明:多水源 TVGM 既继承了传统 TVGM 以简单结构描述复杂水文非线性系统关系的优点,同时通过增加地下水源模块,大大提高了洪水预报的精度。13 个子流域参数率定期和模型验证期中,传统 TVGM 分别有 9 个和 7 个子流域达到乙级洪水预报标准,而多水源 TVGM 分别提高到 12 个和 8 个,其中以大型流域和大水年改进效果尤佳。传统 TVGM 水量平衡系数为 0.88,多水源 TVGM 提高到 0.95,平均提高了 7%。洪峰模拟相对误差也由传统 TVGM 的 50%达标率提高到多水源 TVGM 的 92.3%,整体提高了 42.3%。因此,多水源 TVGM 能更好的应用于淮河流域洪水预报工作。

关键词:淮河流域;水文非线性;时变增益模型;多水源;洪水预报

中图分类号:P338

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)03-0014-06

淮河流域位于东经 111°55′~121°25′,北纬 30°55′~36°36′,属于东部季风区。流域面积约 27×10⁴km²,跨南北过渡气候带。淮河以南属亚热带区,淮河以北属暖温带区^[1]。流域内水网密布,上游与中游落差大,而中游与下游落差非常小。受这些特殊的气候、海陆相地理要素及人类活动的影响,该流域洪涝灾害频发。从建国以来,1954、1957、1975、1991、2003、2007 等年流域发生特大洪水,累计死亡人数达 2.9×10⁴,受灾面积超过 4 600×10⁴hm²。2003、2007 年全流域洪灾直接经济损失达 450 多亿元^[2],给国民经济造成重大损失。洪涝灾害已成为严重制约淮河流域社会、经济、生态可持续发展的关键因素之一。洪水预报作为防洪减灾非工程性措施的重要手段,在防汛指挥工作中发挥着举足轻重的作用^[3-4]。洪水预报从简单的经验关系,到结合 GIS 和 RS 的复杂数字流域水文模型,已得到飞速发展和广泛应用。国内外很多学者针对洪水预报模型已作了大量的研究工作,如 API 模型、水箱模型、萨卡门托模型、新安江模型等、Mike 模型、TOPMODEL 模型、VIC 模型

等。其中,我国水文学者夏军教授提出了水文非线性系统的时变增益模型(Time Variant Gain Model,简记为 TVGM)。该模型的主要特色在于用简单的土壤湿度表达降雨径流之间的非线性关系,能等价地模拟 Volterra 泛函级数表达的复杂非线性水文过程,在湿润、半湿润、半干旱地区等中小流域地区得到了广泛的应用^[5-8]。本文在传统时变增益模型(TVGM)注重水文非线性的基础上,通过添加地下径流模块,提出多水源时变增益模型(Multi-source Time Variant Gain Model),完善模型结构,并将该模型应用于淮河流域蚌埠上游 13 个水文站控制的子流域,为淮河流域防洪减灾提供决策支持,改进并完善洪水预报的方法和技术。

1 多水源时变增益模型

TVGM 模型是夏军教授于 1989~1995 年期间在爱尔兰国立大学戈尔威学院(UCG)参加国际河川径流预报研讨班时提出的一种方法。它的特点是:降雨径流的系统关系是非线性的,其中重要的贡献是产流过程中

收稿日期:2013-12-11

基金项目:国家自然科学基金(51279140, 51279139);中国科学院澳大利亚联邦科工组织战略合作项目(GJHZ1223);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014X07204-006)

作者简介:万蕙(1990-),女,湖南岳阳人,博士研究生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:wanhui208@126.com

通讯作者:夏军(1954-),男,湖北孝感人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:xiaj@igsnrr.ac.cn

土壤湿度(即土壤含水量)不同所引起的产流量变化。全球 60 多个不同气候区域的流域实测长序列水文资料分析中发现,水文系统的增益 G 并非常数,而是与土壤湿度、流域下垫面特性以及气候特性有关,表现出地球水文系统固有的指数关系^[5]。通过引入时变增益的概念,夏军以严格的公式推导证明此简单的系统能等价地模拟 Volterra 泛函函数表达的复杂非线性水文过程^[5-6]。多项应用研究^[7-10]结果表明,TVGM 实际洪水预报应用效果良好,能从宏观上把握洪水现象的本质,尤其适用受季风影响的半湿润、半干旱地区和中小流域^[11]。

河道洪水包含地表径流和地下径流^[4,11],在我国湿润、半湿润地区,地下径流含量能达到总径流的 20%~40%^[12]。洪水预报模型中,地下径流的模拟在提高洪水预报精度,改善水资源管理,及加强后期枯季径流退水都起着至关重要的作用^[13]。传统 TVGM 模型结构简单,水源单一,仅考虑了地表径流对降雨的快速响应,缺少对地下径流的认识和考虑,在地下径流比重较小的地区能得到较好的发展和应用。但在湿润、半湿润地区,往往出现模型计算洪水过程退水过速,地下径流偏小。本文在传统 TVGM 基础之上,增加地下径流模块,发展并提出了多水源时变增益模型。多水源 TVGM 在原有的两个产流参数 g_1, g_2 的基础上,增加一个地下产流参数 g_3 ,既继承了传统 TVGM 参数少,结构简单的优点,又完善了模型结构,使计算结果更符合实际的水文过程,并将其应用到淮河流域洪水预报中。多水源时变增益模型结构流程图及原理如图 1 所示。

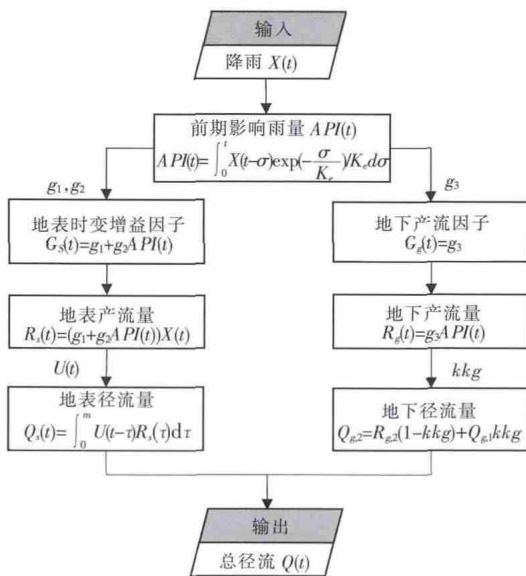


图 1 多水源时变增益模型结构流程图

Fig.1 The structure of multi-source time variant gain model (MTVGM)

1.1 产流计算

地表产流量 R_s 仍采用传统 TVGM 时变增益思想,将地表产流量表达为时变增益因子 G_s 与毛雨量 X 之积:

$$R_s(t) = G_s(t)X(t) \quad (1)$$

其中

$$G_s(t) = g_1 + g_2 API(t) \quad (2)$$

$$API(t) = \int_0^t U_0(\sigma)X(t-\sigma)d\sigma = \int_0^t \frac{\exp(-\frac{\sigma}{K_e})}{K_e} X(t-\sigma)d\sigma \quad (3)$$

式中: K_e 是与流域蒸发和土壤性质有关的滞时参数,一般约为系统记忆长度的某个倍数。系统记忆长度通常与流域面积、流域坡度等有关,可通过经验分析确定。

前人多项研究成果^[14-17],均表明地下径流与降雨量 $X(t)$ 存在显著相关关系。根据式(3),TVGM 中表达为降雨量 $X(t)$ 的线性水库函数。此外,API 为前期影响雨量,反映了土壤湿度情况,是产流计算的关键因子,直接影响地下径流过程。因此,本文建立地下产流量 R_g 与 API 的关系,即地下产流量 R_g 采用地下增益因子 g_3 与土壤前期影响雨量 API 之积表示,旨在既能描述地下径流量与降雨、API 之间的相关关系,又能保持多水源 TVGM 参数少、结构简单的优点:

$$R_g(t) = g_3 API(t) \quad (4)$$

因此,总产流量 R 即为地表产流量 R_s 与地下产流量 R_g 之和:

$$R(t) = R_s(t) + R_g(t) \quad (5)$$

将式(1),(2),(4)带入式(5)中,可得总产流量的计算公式为:

$$R(t) = G_s(t)X(t) + G_g(t)API(t) = (g_1 + g_2 API(t))X(t) + g_3 API(t) \quad (6)$$

1.2 汇流计算

为确保脉冲响应函数非负,并控制水量平衡,多水源 TVGM 地表汇流采用二约束脉冲响应函数。至于地下汇流过程,考虑到地下水的水面比降较为平缓,可认为其涨落洪泄蓄关系相同,则可采用线性水库地下汇流计算公式为^[11]:

$$Q_{g,2} = R_{g,2}(1 - kkg) + Q_{g,1}kkg \quad (7)$$

式中: $Q_{g,1}, Q_{g,2}$ 分别为时段初、末地下径流出流量; $R_{g,2}$ 为本时段地下产流量; kkg 为地下汇流参数。

2 应用与检验

以淮河流域蚌埠闸以上为研究区域,选取潢川、蒋

家集、息县、班台、漯河、蒙城、淮滨、周口、界首、王家坝、润河集、鲁台子、蚌埠 13 个水文站控制的代表性子流域为研究对象, 研究资料范围为 2002~2008 年 4~9 月连续 3h 降雨径流资料,通过建立多水源时变增益模型,实现洪水预报,比较新模型的预报效果和精度。其中 2002~2006 年用于模型参数的率定,2007~2008 年用于模型的检验。

水文站控制流域信息见表 1; 在选取的 2002~2008 年中,2003、2005、2007 年属于大水年,2002、2008 年属于中水年,2004、2006 年属于小水年,在该段时间内包含大、中、小三种不同大小的洪水类型,资料长度一致。由此可知,资料具有较好的一致性、可靠性和代表性。本文选取 Nash 效率系数^[20]、水量平衡系数^[21]和洪峰相对误差^[21]来衡量模型模拟效果。模型优选参数结果及检验期计算结果见表 2。

表1 淮河流域蚌埠上游13个水文站控制流域信息
Table1 The information of the 13
hydrological stations above Bengbu in the Huaihe river basin

流域出口 水文站	地理坐标		控制面积 /km ²	流域内雨 量站个数	流域规模
	经度/°E	纬度/°N			
潢川	115.05	32.13	2050	4	小型
蒋家集	115.73	32.3	5930	12	
息县	114.73	32.33	10190	24	
班台	115.07	32.72	11280	19	
漯河	114.03	33.58	12150	14	中型
蒙城	116.55	33.28	15475	19	
淮滨	115.42	32.43	16005	31	
周口	114.65	33.63	25800	26	
界首	115.35	33.27	29290	28	
王家坝	115.6	32.43	30630	55	
润河集	116.1	32.52	40360	68	
鲁台子	116.63	32.57	88630	105	大型
蚌埠	117.38	32.93	121330	164	

根据我国《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)^[21]对洪水预报模型评价标准,在参数率定期,传统 TVGM 模拟结果中 9 个水文站达到乙级标准(效率系数 $R^2>0.7$),多水源 TVGM 的模拟结果 12 个达到乙级标准,并以中小型流域为主(包括潢川、蒋家集、息县、班台、漯河、淮滨、周口、界首、润河集);模型验证期传统 TVGM 检验结果达到乙级标准有 7 个,而多水源 TVGM 提高到 8 个,其中淮滨站模拟效率系数为 0.93,达到甲级标准(效率系数 $R^2>0.9$),说明改进后的多水源

TVGM 达标率(乙级标准)比传统 TVGM 高,洪水预报效果更精确;且从不同流域类型结果改进情况对比中可以看出,大型流域模拟效果平均从 0.615 提高到 0.713,平均提高 9.8%,中型流域模拟效果从 0.748 提高到 0.789,平均提高 4.2%,小型流域模拟效果从 0.73 提高到 0.77,平均提高 3.8%,可知大型流域的改进效果最佳,中型流域次之,小型流域效果不显著。以鲁台子和蚌埠两个水文站为代表的大型流域,集水面积大,降雨径流水文系统庞大而复杂,地下径流比重大^[12-13],添加地下径流模块后的多水源 TVGM 能更好的考虑地下径流产汇流过程,因此在地下径流比重越大的地区,改进效果越明显,而小型流域位于山区,洪水陡涨陡落,地下径流补给区小,以地表汇流为主,地下径流偏少,传统 TVGM 已经能较好的反映洪水过程,因此多水源 TVGM 添加地下径流模块改进效果不明显。

从水量平衡的角度来看,传统 TVGM 水量平衡系数平均为 0.88,总体偏小,而多水源 TVGM 水量平衡系数平均为 0.95,提高了 7%,且更接近于实际水量,因此多水源 TVGM 水量平衡优于传统 TVGM,其原因是传统 TVGM 缺少对地下径流的考虑,导致水量模拟精度偏低,而多水源 TVGM 添加地下模块后,考虑了消退较慢的地下径流过程,相比传统 TVGM 快速消退的地表径流过程,更接近真实的水文过程,能够提高模拟精度。

从对洪峰的模拟结果来看,传统 TVGM50%的水文站达标(洪峰模拟相对误差模拟精度小于 20%),而多水源 TVGM 提高到 92.3%,较传统 TVGM 整体提高了 42.3%。在所有的代表性子流域中,多水源 TVGM 最小洪峰模拟误差达-0.4%(见漯河站率定期),具有较高的洪峰预报精度。其中,蚌埠站洪峰模拟结果较差,可能原因是由于蚌埠上游存在较多闸坝调蓄,正常来水年汛期闸坝开闸泄洪,对洪水过程影响较小;但丰水年(如 2003、2007 年)闸坝为保护下游城市安全,会对洪水进行削峰和坦化调蓄,改变自然条件下的洪水过程。因此,出现模拟洪峰往往比实测洪峰偏大的现象。

在上述总体分析的基础之上,选取润河集水文站控制的代表子流域,将传统 TVGM 模型与多水源 TVGM 模型模拟结果进行进一步对比说明(见图 2)。由图 2 可知,不管是率定期(图 2(a))还是验证期(图 2(b)),相比传统 TVGM,多水源 TVGM 更能准确的模拟洪峰流量和退水过程。通过对两个模型产汇流机理的分析,出现上述现象的主要原因是传统 TVGM 假定洪

表2 多水源TVGM与传统TVGM效果比较
Table2 The performance comparison between MTVGM and TVGM

流域出口 水文站	产流参数			计算 时期	Nash 效率系数		水量平衡系数		洪峰流量相对误差 /%	
	g_1	g_2	g_3		传统 TVGM	多水源	传统 TVGM	多水源	传统 TVGM	多水源
潢川	-0.25	0.50	0.32	率定	0.80	0.87	0.82	1.06	-32.3	-8.8
				验证	0.56	0.53	0.83	0.85	-11.6	5.6
蒋家集	-0.05	0.20	0.30	率定	0.78	0.82	0.83	1.00	20.4	13.7
				验证	0.79	0.86	1.40	1.36	-9.7	-11.9
息县	-0.32	0.61	0.28	率定	0.81	0.83	0.88	1.04	-28.9	-19.5
				验证	0.83	0.84	0.92	0.93	20.6	29.6
班台	-0.33	0.57	0.23	率定	0.59	0.81	0.86	0.96	-20.8	-3.9
				验证	0.80	0.80	0.86	0.86	28.6	5.3
漯河	-0.31	0.45	0.12	率定	0.83	0.85	0.83	0.99	-20.2	-0.4
				验证	0.64	0.71	1.28	1.46	-4.4	3.8
蒙城	-0.85	1.36	0.13	率定	0.68	0.70	0.83	1.00	-20.9	-16.0
				验证	0.73	0.73	0.91	0.86	-15.4	-16.0
淮滨	-0.31	0.64	0.29	率定	0.82	0.84	0.83	0.96	-14.7	-10.7
				验证	0.78	0.93	0.83	0.96	-7.9	-18.9
周口	-0.75	1.21	0.10	率定	0.87	0.88	0.76	0.96	-16.4	-0.9
				验证	0.72	0.80	1.24	0.86	21.9	8.6
界首	-0.89	1.32	0.11	率定	0.8	0.82	0.87	0.98	-23.1	-6.1
				验证	0.67	0.54	0.79	0.92	11.4	2.4
王家坝	-0.58	1.22	0.19	率定	0.67	0.73	0.86	0.90	-7.5	-5.0
				验证	0.69	0.69	0.88	0.88	8.3	-14.1
润河集	-0.74	1.28	0.18	率定	0.79	0.83	0.85	0.96	-48.9	-11.5
				验证	0.74	0.88	0.74	0.74	-31.7	-17.2
鲁台子	-0.43	0.79	0.16	率定	0.76	0.87	0.83	0.88	-17.0	-6.3
				验证	0.6	0.64	0.76	0.75	9.9	-14.2
蚌埠	-0.46	0.88	0.20	率定	0.42	0.67	0.74	0.82	61.9	17.9
				验证	0.68	0.67	0.84	0.86	-14.4	24.1

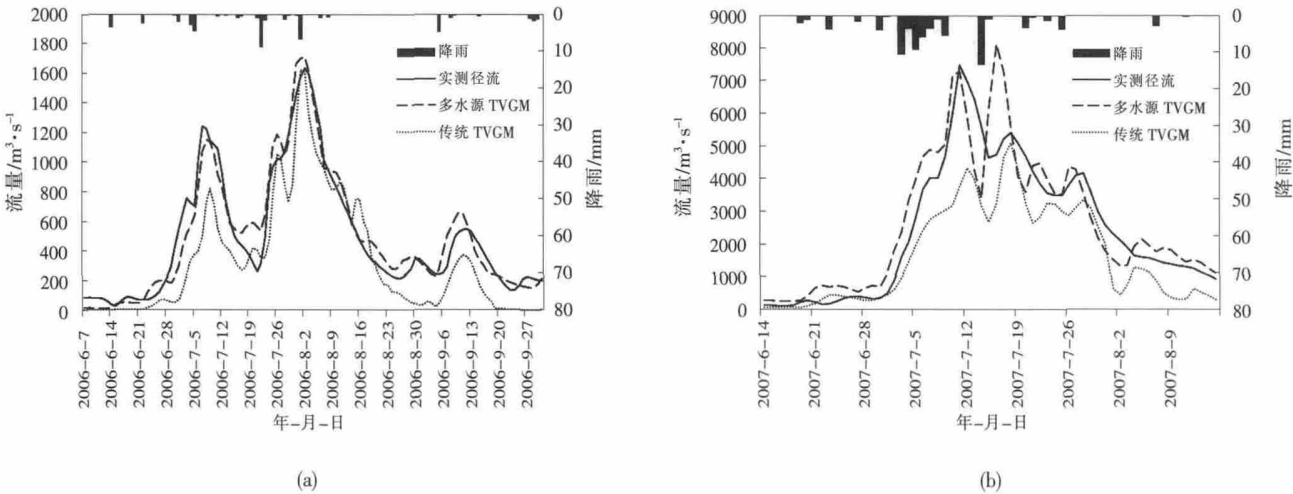


图2 润河集上游流域 MTVGM 洪水预报结果
(a.2006 年参数率定期计算结果; b.2007 年模型验证期计算结果)
Fig.2 The flood forecasting results from MTVGM in Runheji subbasin
(a. The results of the parameters calibration in 2006; b. for the results of the model verification in 2007)

水全都来自地表过程,形成的洪水陡涨陡落,退水点提前,消退速度快;而将洪水水源分成地表和地下两部分,考虑地下产流因子,添加地下径流模块,并结合地下水的实际情况进行汇流,使多水源 TVGM 保留了传统 TVGM 结构简单的优点,又使模型结构更合理,因此,多水源 TVGM 洪峰模拟更准确,退水过程更符合实际。此外,对不同来水条件下模型结果分析可知,多水源模型相比传统 TVGM 改进程度存在较大的差别。2007 大水年改进效果最优,从丙级标准上升到乙级标准;中、小水年均达到乙级标准,原因在于大洪水造成河道水量越大,水流越快^[6],这种非线性关系导致大洪水多具有陡涨陡落的特性,传统 TVGM 以地表径流为主,能较好的模拟中小型洪水的过程,而大洪水导致水文的非线性特征加强,因此,多水源 TVGM 分析地表、地下径流各自的产汇流过程,考虑更多水文非线性特性,主要改进洪峰及退水部分,相比传统 TVGM,在大洪水中更能体现优势。综上所述,改进后的多水源 TVGM 模型相比传统 TVGM 预报精度得到了很大的提高,尤其对于大洪水的预报改进作用更加明显,能较好的应用于淮河流域洪水预报工作。

3 结论

淮河流域洪水预报是闸坝汛期安全运行的可靠保障,也为闸坝群联合调度提供理论科学依据。它不仅对于合理保护与应用洪水资源,减轻洪水灾害损失具有重大意义,同时在水利工程建设与管理以及工农业生产与人民生活等方面发挥着重要作用。本文基于传统 TVGM 模型,对地下径流进行分割,添加地下径流模块,并提出多水源时变增益模型,并将其应用到淮河流域蚌埠闸以上进行洪水预报应用研究,本文的主要工作和结论如下:

(1)多水源 TVGM 在流域产流计算过程中,将地表、地下净雨的产生过程通过土壤前期影响雨量(API)予以区分:地表产流量为地表时变增益因子 G_s 与毛雨量 X 之积,其中 G_s 为 API 简单线性函数;地下产流量则是 API 与地下产流因子的乘积,作为地下径流水源过程,添加地下径流模块。

(2)多水源 TVGM 在流域汇流计算过程中,通过上述划分的地表、地下净雨,采用不同的汇流方式,最终得到流域出口断面流量。地表采用二约束脉冲响应函数汇流,确保非负及水量平衡,更符合水文过程;根据地下水水面平稳的特点,地下径流采用线性水库进行

汇流。流域出口断面流量为快速地表径流与慢速地下径流之和,避免了洪水退水过速和地下径流偏小。

(3)通过淮河流域蚌埠闸上游 13 个子流域的建模与检验,发现与传统 TVGM 相比,多水源 TVGM 洪峰与地下径流部分更完善,提高了模型洪水预报的精度。多水源 TVGM 洪水预报结果中 12 个流域均达到乙级标准,其中 1 个达到甲级标准。在不同规模流域中,大型流域改进效果最佳,中型流域次之,小型流域效果一般。多水源 TVGM 水量平衡比传统 TVGM 平均提高 7%,洪峰流量相对误差达标率整体提高 42.3%,受河流筑坝的影响,闸坝影响下的洪峰模拟比实际洪峰偏大。多水源 TVGM 对大水年改进效果最优,从丙级标准提高到乙级标准,中、小水年次之。总体来说,多水源 TVGM 在传统 TVGM 基础之上添加地下径流模块,以简单的模型结构和参数表达复杂的降雨径流水文非线性系统关系,洪水预报效果相比传统 TVGM 得到了显著的提高,能较好的指导淮河流域防洪减灾工作,改进并完善了我国洪水预报的方法和技术。

参考文献:

- [1] 魏凤英,张婷. 淮河流域夏季降水的振荡特征及其与气候背景的联系 [J]. 中国科学 (D 辑), 2009,39 (10):1360-1374. (WEI Fengying, ZHANG Ting. Oscillation characteristics of summer precipitation in the Huaihe river valley and relevant climate background [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2009,39 (10):1360-1374. (in Chinese))
- [2] 郝玲. 淮河流域暴雨时空演变特征及灾害风险评估[D]. 南京:南京信息工程大学, 2011. (HAO Ling. Analyses on Space-time Change Features of Rainstorm and Risk Assessment over Huaihe River Basin [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [3] 葛守西. 现代洪水预报技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1999. (GE Shouxi. Flood Forecasting Technology in Modern Time [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [4] 包为民,张建业. 水文预报(第四版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009. (BAO Weiming, ZHANG Jianyun. Hydrological Forecasting (4th edition) [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [5] XIA Jun. Real-time Rainfall Runoff Forecasting by Time Variant Gain Models and Updating approaches [A]. Research Report of the 6th International Workshop on River Flow Forecasting [C]. UCC, Ireland, 1995.
- [6] 夏军. 水文非线性系统理论与方法 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002. (XIA Jun. Hydrological Nonlinear System Theory and Method [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese))
- [7] XIA Jun, O'Connor K M, Kachroo R K, et al. A non-linear Perturbation model considering catchment wetness and its

- application in river flow forecasting [J]. Journal of Hydrology, 1997,200:164–178.
- [8] Xia J. A system approach to real time hydrological forecasts in watersheds [J]. Water International, 2002,27(1):87–97.
- [9] 宋星原. 时变增益水文模型的改进及实时预报应用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002,35(2):1–4. (SONG Xingyuan. Research on real-time rainfall-runoff forecasting by improved time variant gain model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002,35(2):1–4. (in Chinese))
- [10] 宋星原,邵东国,夏军. 淮河流域非线性产汇流实时预报模型研究[J]. 水电能源科学, 2003,21(9):1–3. (SONG Xingyuan, SHAO Dongguo, XIA Jun. Research on real-time flood forecast model of nonlinear runoff and concentration for Yanghe basin [J]. Water Resources and Power, 2003,21(9):1–3. (in Chinese))
- [11] 叶守泽,詹道江. 工程水文学(第三版)[M]. 北京:中国水利出版社, 2003. (YE Shouze, ZHAN Daojiang. Engineering Hydrology (3rd edition) [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese))
- [12] 王佩兰. 三水源新安江流域模型的应用经验[J]. 水文, 1982,(5): 24–31. (WANG Peilan. Application of three-source Xinanjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1982,(5):24–31. (in Chinese))
- [13] Laurent Ahiablame, Indrajeet Chaubey, Bernard Engel, Keith Cherkauer, Venkatesh Merwade. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA [J]. Journal of Hydrology, 2013,476:13–27.
- [14] U. Haberlandt, B. Klöcking, V. Krysanova, A. Becker. Regionalization of the baseflow index from dynamically simulated flow components: a case study in the Elbe river basin [J]. Journal of Hydrology, 2001,248:35–53.
- [15] D. Mazvimavi, A.M.J. Meijerink, H.H.G. Savenije, A. Stein. Prediction of flow characteristics using multiple regression and neural networks: a case study in Zimbabwe[J]. Phys. Chem. Earth, 2005,30:639–647.
- [16] C. Santhi, P.M. Allen, R.S. Muttiah, J.G. Arnold, P. Tuppada, Regional estimation of baseflow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions [J]. Journal of Hydrology, 2008,351:139–153.
- [17] Y. Zhu, R.L. Day. Regression modeling of streamflow, baseflow, and runoff using geographic information systems [J]. J. Environ. Manage., 2009,90:946–953.
- [18] Beven K J. Rainfall-Runoff Modelling The Primer[M]. John Wiley & Sons, LTD, 2002.
- [19] Tom Chapman. A comparison of algorithms for streamflow recession and baseflow separation [J]. Hydrological Processes, 1999,(13):701–714.
- [20] Nash, J.E., J. Sutcliffe. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970,(10):282–290.
- [21] GB/T 22482–2008, 水文情报预报规范 [S]. (GB/T 22482–2008, Standard for Hydrological Information and Hydrological Forecasting [S]. (in Chinese))

Multi-source Time Variant Gain Model and Its Application in Huaihe River Basin

WAN Hui^{1,2}, XIA Jun^{1,2}, ZHANG Liping^{1,2}, SONG Jiyun³, SHE Dunxian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China

3. School of Sustainable Engineering and Built Environment, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA)

Abstract: Based on traditional Time Variant Gain Model (TVGM), this paper developed a multi-source TVGM (MTVGM) by considering the additional baseflow process. MTVGM is composed of surface flow submodel and baseflow submodel, which independently calculate the runoff generation and flow concentration respectively. The model was then applied to 13 subbasins above Bengbu water sluice in the Huaihe River Basin. The results show that MTVGM can not only keep the advantage of the TVGM which uses the simple structure to describe the complexity in nonlinear hydrological relationship, but also greatly improve the forecast accuracy. Among the parameter calibration and model verification period, the forecast accuracy of 9 and 7 subbasins respectively meet the B-grade for traditional TVGM, while the subbasin numbers increase to 12 and 8 respectively for MTVGM. The performance of MTVGM was especially improved in large basins and large flood years. The water balance efficiency improves from 0.88 of TVGM to 0.95 of MTVGM, and the average increase is about 7%. The relative flood peak error is also promoted from 50% in TVGM to 92.3% in MTVGM, with an improvement of 42.3% in total. Therefore, MTVGM can be better applied in flood forecasting in Huaihe River Basin.

Key words: Huaihe River Basin; hydrological nonlinearity; TVGM; multi-source; flood forecasting