

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.03.009

基于系统动力学方法的鄱阳湖流域水量平衡过程模拟与分析

朱漫莉^{1,2}, 高海鹰¹, 徐力刚², 张杰³, 吴永明³

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096;
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;
3. 江西省科学院, 江西 南昌 330096)

摘要:以鄱阳湖及其流域为研究对象,采用系统动力学(SD)方法构建了整个流域系统基本要素之间的物理结构和关系,对鄱阳湖流域水量平衡过程进行了模拟分析。以1978—1997年为校核期、1998—2007年为验证期,对鄱阳湖五河流域径流量及湖口水位模拟值与实测值进行比较分析。结果表明SD方法在流域产流、河湖水量交换过程的模拟上能取得较理想的效果。在此基础上,模拟了鄱阳湖流域降水、气温和用水量分别增减10%时,其他相关要素的系统响应。用水量、气温和降水的影响比例约为1:3:10,降水通过控制地表径流量、气温通过影响蒸散发和土壤蓄水来影响流域水文水资源过程。研究结果定量揭示了整个流域范围内水量变化的各环节对气候变化和人类活动的响应,反映了流域系统各个组成部分的相互作用。

关键词:系统动力学;鄱阳湖流域;水量平衡;过程模拟

中图分类号:P331.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)03-0046-07

Simulation and analysis of water balance process in Poyang Lake Basin based on system dynamic approach

ZHU Manli^{1,2}, GAO Haiying¹, XU Ligang², ZHANG Jie³, WU Yongming³

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
3. Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: Taking Poyang Lake and its watershed as the study subject, the physical structure and relationships of the basic elements of the whole basin system were constructed by the system dynamics(SD) approach, simulating and analyzing the water balance process of Poyang Lake Basin. Taking the years from 1978 to 1997 as the calibration period, and the years from 1998 to 2007 as the validation period, the simulated value and the measured value of the runoff and lake level of five river basins of Poyang Lake were compared and analyzed. The results indicate that adopting the SD approach can acquire an ideal performance on the simulation of basin runoff and water exchanging process between rivers and lake. Then we simulated the system response with 10% decrement and increment of precipitation, temperature and water usage in Poyang Lake Basin. The effects ratio of precipitation, temperature and water usage is 1:3:10. Precipitation influences the basin hydrological and water resource process by controlling surface runoff, while temperature by affecting evapotranspiration and soil water storage. This

基金项目:国家自然科学基金(41371121,41271034);国家重点基础研究发展计划(2012CB417005);中国科学院支持全国科学院联盟建设专项重大项目;江西省科技支撑项目(20122BBG70160)

作者简介:朱漫莉(1991—),女,硕士研究生,研究方向为流域水文过程。E-mail:mlzhu1991@126.com

通信作者:徐力刚,研究员。E-mail:lgxu@niglas.ac.cn

research has quantitatively explored the response of every links of water change in the whole basin to climate change and human activities, reflecting the interaction of various components in the basin system.

Key words: system dynamics; Poyang Lake Basin; water balance; process simulation

鄱阳湖是我国第一大淡水湖泊,流域水资源总量占长江流域水资源总量的15%,是我国重要的淡水资源库。近几十年来,鄱阳湖流域气候变化比较突出,社会经济快速发展,水资源开发利用程度加深,对流域水资源量产生了极其复杂的影响^[1]。鄱阳湖流域水文站的径流观测数据表明,20世纪50年代以来径流量一直呈增长趋势,但到了1997年,径流量发生反转,呈下降趋势;近年来鄱阳湖又出现了持续低水位,鄱阳湖流域水旱灾害频发已是公认的事实。因此,选取该流域进行水量变化模拟分析,定性、定量认识气候变化与人类活动对流域的降雨-径流关系和鄱阳湖的水量平衡过程的影响具有重要意义。

针对鄱阳湖流域的水文水资源变化特征,国内外已开展了不少研究。Sun等^[2]研究了鄱阳湖流域降雨时间序列变化规律及其水文响应,叶许春等^[3]探讨了流域河川径流的变化过程和规律及其与鄱阳湖水旱灾害的关系,罗蔚等^[4]分析了鄱阳湖流域入湖总水量的变化趋势与急转规律,马海波等^[5]对鄱阳湖出湖径流序列的变化过程进行了分析。此类研究主要基于观测资料的统计分析,探究了五河(饶河、抚河、信江、修水、赣江)流域的降雨-径流-水量交换过程,研究结果均表明入湖径流量对湖泊水位起着主控作用。在水量平衡影响因素研究方面,Hu等^[6]量化地描述了长江对鄱阳湖水量变化的影响,认为长江对鄱阳湖的较强作用主要发生在7—9月;郭华等^[7]进一步的研究表明,三峡水库在10月份的大量蓄水使得长江对鄱阳湖的作用频率有所减弱;万小庆等^[8]建立了环湖区水资源平衡分析模型来研究社会用水的影响作用;Shankman等^[9]研究了江湖管理政策和土地利用对鄱阳湖洪水位的影响。更多的研究强调了气候变化对流域水文水资源过程的影响作用,这些研究主要采用水文模型模拟方法,如蔡玉林等^[10]应用陆地表面模型VIC水循环模式模拟了不同气候情景下的径流变化;李云良等^[11]以分布式水文模型WATLAC为模拟工具,探讨了鄱阳湖流域水资源对气候变化的响应。除了对流域径流的模拟,国内外许多学者还通过各种模型的构建研究了湖泊的水量水位变化机制,这些模型包括水位动态预测模型^[12]、湖泊流域联合模拟模型^[13]以及江湖关系水动力模型^[14]等。以上研究从不同角度不同侧面反映了鄱阳湖流域水文水资源变化的作用

机制,但并未定量揭示整个流域范围内水量变化对气候变化和人类活动的响应作用。当前对有关鄱阳湖流域气候和人类活动影响作用的研究,主要集中在流域径流量变化的分析。基于五河流域与湖泊密切的水量关系,单方面的流域模拟研究显然是不足的,需要开展基于整个流域的主要影响要素分析。

流域水资源量的变化既受到气候要素的影响,又与当地水资源的开发利用相关,并受湖泊本身蓄水条件的限制,故其影响过程因素复杂多元。以往对水量变化影响要素的研究往往片面强调数据资料的分析,而忽略对驱动机制的研究。系统动力学(system dynamics, SD)方法专注于对多变量、高阶次、非线性的复杂大系统运动的研究,更能满足流域水量变化研究的需求^[15]。本文所采用的SD模拟方法针对鄱阳湖流域水量平衡过程,在功能上,希望实现水文模型的物理机制与水文非线性系统理论的结合,为水文水资源过程寻求了一种简单的系统关系。在效果上将降水、气温、用水量及其他与产水耗水相关的系数作为流域水资源系统的单个组成要素,着力表现其与系统其他组成部分的相互作用,得到流域各环节及整个流域的有效反应,从而实现各要素对水资源过程影响作用的分析。研究结果旨在帮助深入了解鄱阳湖流域水文水资源系统的形成机制。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

鄱阳湖流域位于长江中下游南岸,东经113°35′~118°29′,北纬24°29′~30°05′N之间(图1),总流域面积16.22万km²,占长江流域面积的9%,占江西省面积的97.2%。五河来水分别从南、东、西3面流入湖泊,经调蓄后由湖口注入长江。湖泊水域面积3950km²,是长江最大的通江湖泊。鄱阳湖流域地处亚热带湿润季风气候区,气候温和,雨量丰沛。流域内多年平均气温为11.6~19.6℃,且气温自北向南递增,最热、最冷月份分别是7月和1月,冷暖温差约20℃。流域多年平均年降水量为1400~1800mm,降水年内和年际变率大,全年降水50%以上集中在4—6月,最小降雨量出现在11—12月。流域多年平均地表水径流量为1545.5亿m³,平均年径流深为925.7mm,多年平均地下水资源量为379.0亿m³。

1.2 数据来源

本研究所用气象资料为1978—2007年鄱阳湖

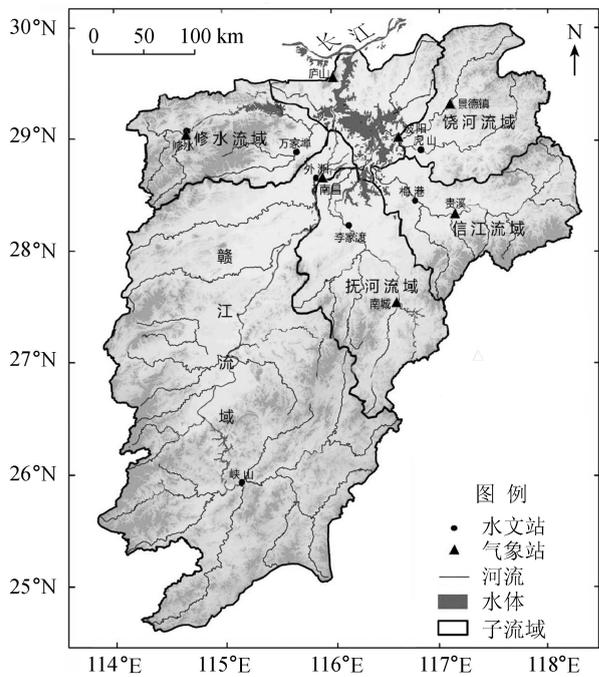


图1 鄱阳湖流域及气象水文站点

五河流5个常规气象站(图1)月降水、气温和潜在蒸发数值,以及湖区3个气象站(图1)的降水和蒸发资料。气象资料由江西省气象站提供,潜在蒸发量通过彭曼公式计算得到,湖区蒸发量根据蒸发皿蒸发数据折算得到。水文资料包括鄱阳湖五河水系主要控制站外洲站、李家渡站、梅港站、万家埠站和虎山站的1978—2007年实测日流量数据,以及鄱阳湖出口—湖口水文站1978—2007年间日水位、流量实测数据。用水资料统计数据来源于江西省统计年鉴以及江西省水资源公报,对少数年份的缺项数据,用标准平均值进行了插补处理,最终得到1978—2007年鄱阳湖流域的年度用水量、用水分配及用水结构情况。

2 研究方法

单纯的水量平衡模型对湖泊出入水量的模拟效果欠佳,因此,本文采用系统动力学方法来构建包括五河流域在内的整个流域的水文水资源过程。系统动力学有专用的软件与语言,Vensim、PD-plus、STELLA、POWERSIM等,都是现在常用的SD软件。本文采用STELLA软件来完成模拟。STELLA通过图形化的符号建立流域水资源的系统结构,通过方程表示系统要素之间的定量关系,从而在宏观上近似地重构现实系统。

2.1 鄱阳湖流域水量平衡过程的系统结构

如图2所示,在鄱阳湖流域水文水资源系统中,湖泊水量直接影响到湖泊水位面积的变化,并由此

间接影响入流量、出流量和湖区降水蒸发量,通过输入湖泊初始时段的水量和各时段湖区蒸发降水量,迭代计算出各时段湖泊水量,再根据湖泊水量换算得到湖口水位。湖泊入流量则与流域径流的产生直接相关,图2的虚线框描述了五河流域径流产生的系统动力学过程。流域径流一般由地表流、各层土壤径流和基流组成。为更准确地实现径流量的模拟,本文将径流组成概化为地表流和壤中流两部分,并引入中间变量土壤蓄水来表示植被层及地表各层的总蓄水量。土壤蓄水同样通过迭代计算得到。土壤蓄水直接影响蒸散发、地表流和壤中流,分别与蒸散发系数(a_1)、地表径流系数(a_2)和壤中流系数(a_3)有关。降水、气温和用水量影响着流域径流的产生,也是整个系统其他变量发生变化的首级驱动要素,为系统的主要输入变量。

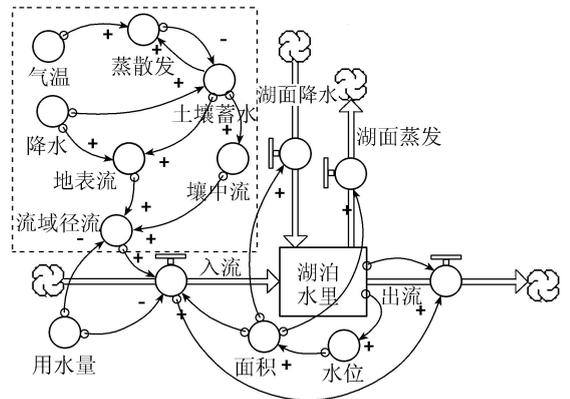


图2 鄱阳湖流域水文水资源的系统动力学过程

2.2 参数的率定及模拟结果评估

方程中大部分参数可根据已有的数据资料查阅或计算得到,只有与产流直接相关的 a_1 、 a_2 和 a_3 需要率定。选取五河流域的5个水文站1978—1997年的月流量资料对模型参数进行率定,将1998—2007年月流量资料用于模型验证。采用确定性系数 R^2 、Nash-Sutcliffe效率系数 N_{NSE} 和多年径流相对误差 R_{RE} 这3个指标来评估模拟效果。相关表达式为

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{mean})(D_i - D_{mean})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{mean})^2 \sum_{i=1}^n (D_i - D_{mean})^2} \quad (1)$$

$$N_{NSE} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - D_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{mean})^2}} \quad (2)$$

$$R_{RE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - D_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中： Q_i 为实测值； D_i 为模拟值； Q_{mean} 为实测值的平均值； D_{mean} 为模拟值的平均值； n 为径流序列的长度。

3 研究结果与讨论

3.1 鄱阳湖流域径流过程与模拟效果分析

图3为校核期和率定期五河流域水文站径流模拟值和观测值的比较。5个水文站点模拟与观测径流过程线拟合良好，均很好地再现了各子流域的径流特征和变化趋势。由图3可见，五河水系径流年际变率较大，以1978—1982年和20世纪90年代径流增长最为显著，分别在1982和1998年到达高峰；1983—1987年左右，李家渡、梅港和外洲站年径流呈较明显降低趋势，集水面积较小的虎山站和万家埠站径流变化则呈微弱波动；1998年之后，由于人类活动影响作用的增强，各子流域水量变化趋势不尽相同，梅港、虎山和万家埠站径流量年际变化较不稳定，整体上略微减少，李家渡站和外洲站径流量则明显呈增加趋势。各河流径流年内分配也具有一定的不均匀性，五河水系径流的年内分配较一致，春夏季是主要产流时期，径流在3—4月迅速增加，在5月底和6月初达到峰值，7—8月径流直线减少，随后进入枯季。

表1为校核期与验证期五河流域径流量统计指标结果。在校核期，5个水文站点的径流相对误差

R_{RE} 在 $\pm 10\%$ 内，Nash-Sutcliffe效率系数变化范围为0.70~0.90，确定性系数在0.90以上，拟合效果较为理想。验证期各统计指标与校核期相差较小，除外洲站的Nash-Sutcliffe效率系数降至0.68，虎山站的相对误差有些偏高外，总体拟合效果较满意。就各子流域径流模拟效果而言，信江流域最好，其次为抚河流域。修水和饶河流域的控制站点选在支流上，由于实际径流量较小，相对误差略高于其他流域。赣江流域模拟值与观测值相差最大，这主要是因为该流域面积较大，同一时段的不同区域降水和气温有所不同，产流条件也不尽相同，而模拟时将此流域作为单个产流单元，未考虑子流域的空间非均匀性，导致个别时段径流量的拟合存在一定的误差。总体来说，SD方法对鄱阳湖流域产流过程具有较好的动态模拟能力，能提供可靠的湖泊来水输入条件。

表1 SD方法对鄱阳湖流域五河径流模拟效果评估结果

五河流域	水文站	校核期			验证期		
		确定性系数 R^2	效率系数 N_{NSE}	相对误差 $R_{RE}/\%$	确定性系数 R^2	效率系数 N_{NSE}	相对误差 $R_{RE}/\%$
抚河	李家渡	0.93	0.85	-2.72	0.90	0.80	-1.89
信江	梅港	0.93	0.83	-0.40	0.92	0.82	-1.04
赣江	外洲	0.90	0.72	0.52	0.89	0.68	-0.21
饶河	虎山	0.94	0.84	9.31	0.92	0.78	13.80
修水	万家埠	0.91	0.79	4.89	0.88	0.77	4.29

3.2 鄱阳湖湖口水位变化过程模拟

鄱阳湖湖口水位模拟值与观测值对比结果如图4所示，图4(a)为1978—2007年模拟水位与观测水位对比图，图4(b)为长期月平均水位比较。由图4可见，模拟结果能较准确地呈现湖泊水位的年际变化和季节性变化趋势。在低水位(低于15 m)时，模

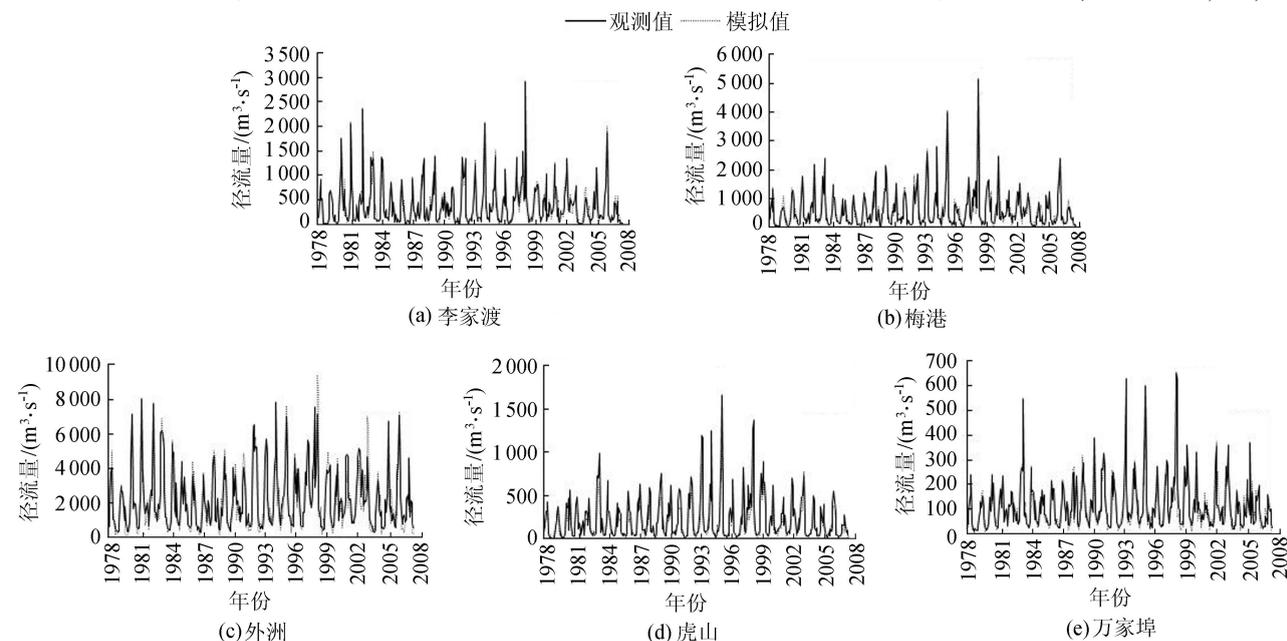
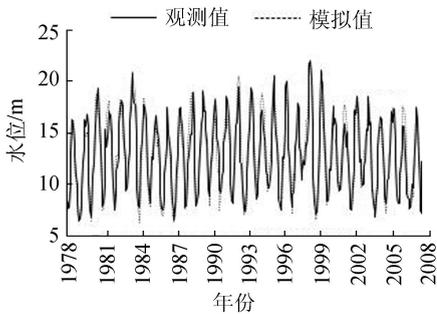
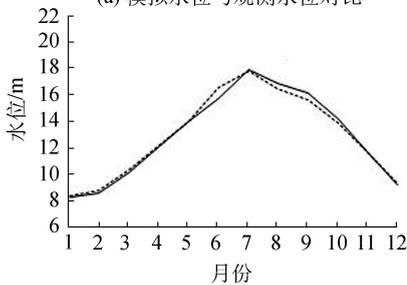


图3 1978—2007年五河流域水文站径流量模拟值与观测值对比



(a) 模拟水位与观测水位对比



(b) 长期月平均水位比较

图4 1978—2007年鄱阳湖湖口站水位模拟值与观测值对比

拟值与观测值表现出良好的一致性,而在高水位(高于15 m)时,模拟效果则有所降低。这与湖泊的形态构造有着直接关系。鄱阳湖容积-水位变化曲线表明,在水位高于15 m时,湖泊水位对水量的变化较为敏感。从水位模拟的季节特征上看,模拟值在径流量最大的5—6月偏高,可能与流域径流模拟结果偏高有关。在7—9月,长江中上游洪水来临,对湖口出流量具有顶托作用,而模拟中未能准确体现其复杂的影响作用,因此在8—9月模拟水位有所偏低。总体来说,SD方法在湖泊水量平衡过程的模拟上能取得较理想的结果,并充分体现湖泊水位对

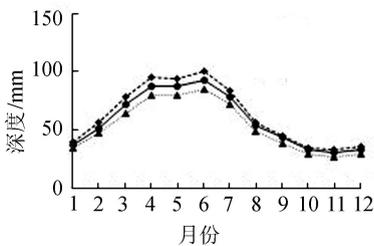
流域径流的响应过程。

3.3 鄱阳湖流域水文水资源过程的驱动要素分析

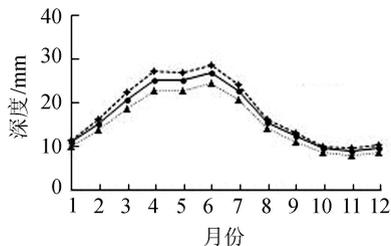
根据鄱阳湖流域水文水资源的系统动力学过程分析(图2),降水、气温和用水量是该系统的主要输入变量,是影响水量平衡过程各个环节的关键驱动要素。本研究通过单变量控制模拟方法,即以1978—2007年的变量取值为基准,综合考虑现实条件下降水、气温和用水量的变动幅度,在模型模拟过程中分别设定这3种核心驱动因素增减10%的情景时其他相关要素的系统响应,从而确定这几项关键驱动要素对流域系统的影响作用与情景响应关系。

图5为降水增减10%时,“土壤蓄水—径流量—湖泊入流量—湖口水位”这一系统链中相关要素的响应。根据图5进行进一步统计分析表明当降水量增减10%时,土壤蓄水和壤中流变化率均为7.10%和-9.64%,地表径流对降水量的增减变化最为敏感,其对应变化率分别为13.51%和-14.77%,体现了土壤蓄水和降水改变的双重影响结果。相应湖泊来水量变化率为12.89%和-10.40%,湖泊水位各月平均变化率为6.36%和-6.04%。在1—7月,湖泊水位的变化趋势与来水量保持一致,此后由于出水量受长江顶托作用,对来水量变化不敏感而基本维持不变,使得湖泊水位浮动维持在0.6~1.0 m,变化趋势略大于来水量。除湖泊水位,当降水变化率一定时,相应系统链中各要素的变化趋势呈现高度一致性,各月变化率基本保持稳定,这表明以降水为首要驱动要素的该系统链在流域水文水资源系统中起关键作用,降水改变较大时,其他要素的干扰作用将被大大削弱。

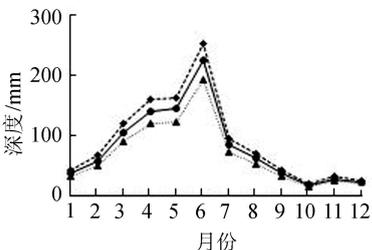
—●— 降水不变 —▲— 降水减少10% —◆— 降水增加10%



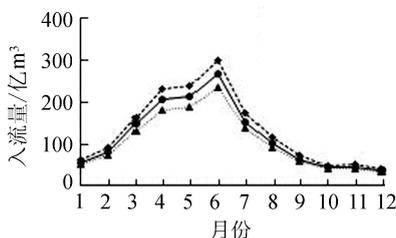
(a) 土壤蓄水



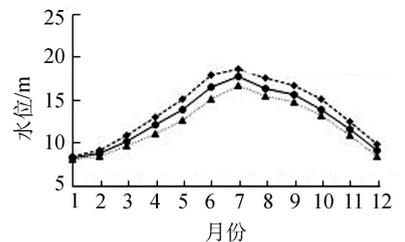
(b) 壤中流



(c) 地表径流



(d) 湖泊入流量



(e) 湖口水位

图5 降水量变化的系统响应

图6为气温增减10%时,“蒸散发-径流量-湖泊入流量-湖泊水位”这一系统链中相关要素的响应。受气温驱动的该系统链中各要素同时受降水的影响。由图6可见,在降水量较低的秋冬季节,蒸发量、径流量等变化均不明显,表明在干旱条件下,土壤湿度较低,蒸散发主要受土壤湿度控制,温度变化不会带来显著影响。在降水量较充足、土壤湿度较大的4—8月,系统链中各要素对温度变化敏感性较强,其中蒸散发的变化最为显著,在6月其最大正负变化率达13.13%和-23.91%,土壤蓄水和壤中流的变化量与蒸散发变化量呈负线性相关,而其余变量在降水影响下对气温变化的敏感性相对削弱,总体变化率在5%以下。由于出流量变化的复杂性,湖泊水位相对来水量的变化趋势在7月前后也有所不同,7—12月浮动约为0.05~0.08 m。总的来看,气温降低对该系统链的影响程度明显高于气温增高,这主要由于该流域蒸散发处于较高水平,当温度增加时,蒸散发增加的潜力小于温度降低带来的蒸散发减少量。

用水量的影响作用主要体现在湖泊来水量上,而不改变子流域的产流过程。模拟计算表明,在用水量最高的7—9月,用水量增减10%将导致3.0亿~4.3亿 m^3 的湖泊来水量改变,而出水量则变化不明显,水位最高浮动0.1 m;4—6月及10月水量变化相对较小,约为0.8亿~1.5亿 m^3 ,水位浮动在0.05 m以下;其他月由于用水量少,对水量平衡过程无显著影响。与降水 and 气温相比,用水量对鄱阳湖流域水量的影响作用较小,但统计数据表明,1978—2007年,鄱阳湖流域用水量增加了38%,而

降水量与气温变化不显著,变化率最大时期分别不超过8%和3%。可见随着人口的增长和经济的发展,用水变化的可能性远大于降水和气温,因此其影响作用不可忽略。

4 结论

a. 本研究通过SD方法构建流域系统基本要素之间的物理结构和关系,对鄱阳湖流域流量、水位进行模拟评估。整体上,SD方法能有效反映径流、湖泊之间的相互作用机理,特别适用于河流、湖泊集水域的研究。研究表明,SD方法在流域产流过程的模拟上能取得较理想的效果,赣江流域外洲站模拟精度偏低,表明所构建的系统结构不能反映大流域的空间非均匀性。对湖口站模拟结果与实际水位拟合良好,能较准确地呈现湖泊水位的变化趋势,高水位时拟合误差偏大,主要是由于高水位对湖泊水量变化的敏感性以及长江洪水顶托作用的复杂性。

b. 通过单变量控制来研究鄱阳湖流域降水、气温和用水量的影响作用,对相应系统链中其他要素模拟分析表明,降水在流域系统中起关键作用,主要体现在对地表径流和湖泊来水的影响,降水量改变较大时,其他条件的干扰作用则被削弱。气温通过影响蒸散发和土壤蓄水来改变水量平衡条件,且影响作用主要反映在土壤湿度较高的春夏季节,其他变量受降水量控制,对气温变化的敏感性相对较低,气温降低比气温升高的影响效果更为显著。

c. 鄱阳湖流域水文水资源过程在降水和气温的驱动下,变化趋势基本一致,但由于出水量在7—9月受长江顶托作用,受来水量变化影响作用较小,

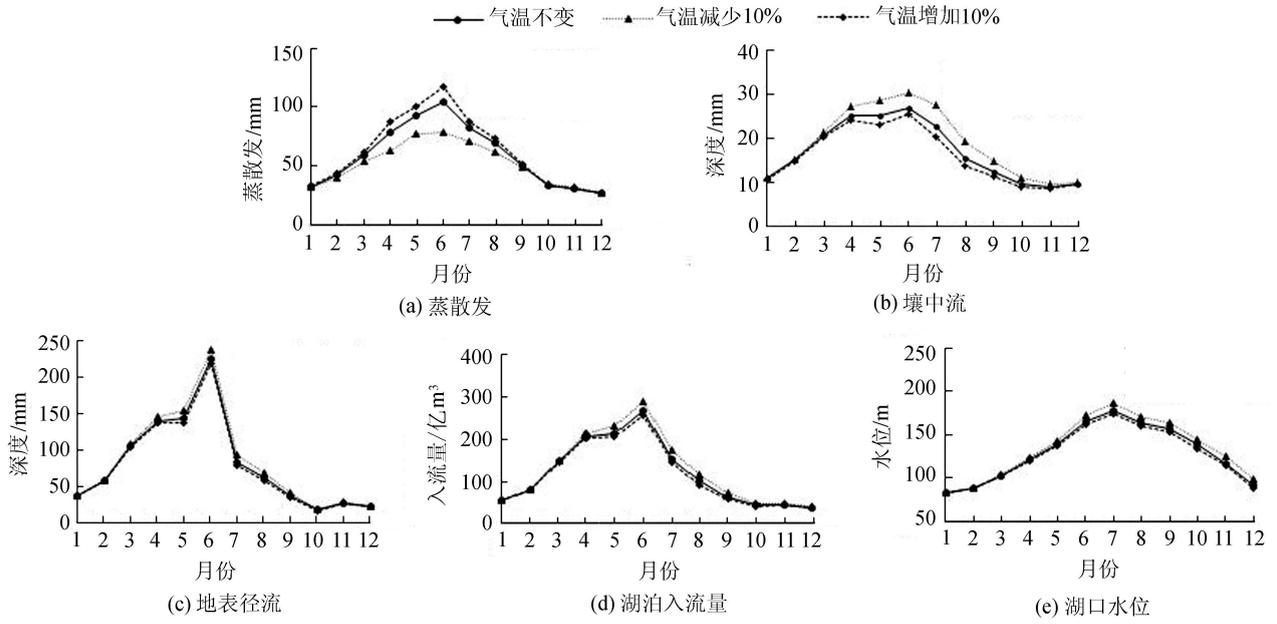


图6 气温变化的系统响应

使得湖泊水位在7月前后变化趋势有所不同。用水量的影响主要体现在7—9月,总体来看,用水量对流域水文水资源过程的影响最小,用水量、气温和降水的影响比例约为1:3:10,但由于用水量变化的可能性要大于降水和气温变化,因此其影响作用不可忽略。

参考文献:

- [1] 叶许春,张奇,刘健,等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流变化的影响研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 835-841. (YE Xuchun, ZHANG Qi, LIU Jian, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff of Poyang Lake catchment [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5): 835-841. (in Chinese))
- [2] SUN Shanlei, CHEN Haishan, JU Weimin. Effects of climate change on annual streamflow using climate elasticity in Poyang Lake Basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(1/2): 169-183.
- [3] 叶许春,张奇,刘健,等. 鄱阳湖流域天然径流变化特征与水旱灾害[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 140-147. (YE Xuchun, ZHANG Qi, LIU Jian, et al. Natural runoff change characteristics and flood/drought disasters in Poyang Lake catchment basin [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 140-147. (in Chinese))
- [4] 罗蔚,张翔,邓志民,等. 近50年鄱阳湖流域入湖总水量变化与旱涝急转规律分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 845-855. (LUO Wei, ZHANG Xiang, DENG Zhimin, et al. Variation of the total runoff into Poyang Lake and drought-flood abrupt alternation during the past 50 years [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 845-855. (in Chinese))
- [5] 马海波,郭慧芳,董增川,等. 鄱阳湖出湖径流序列的多时间尺度小波分析[J]. 人民长江, 2011, 42(11): 53-55. (MA Haiibo, GUO Huifang, DONG Zengchuan, et al. Multi-time scale wavelet analysis of runoff sequences out of Poyang Lake [J]. Yangtze River, 2011, 42(11): 53-55. (in Chinese))
- [6] HU Q, FENG S, GUO H. Interactions of the Yangtze River flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China [J]. Journal of Hydrology, 2007, 347: 90-100.
- [7] 郭华, HU Qi, 张奇. 近50年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 609-618. (GUO Hua, HU Qi, ZHANG Qi, et al. Changes in hydrological interactions of the Yangtze River and the

Poyang Lake in China during 1957—2008 [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 609-618. (in Chinese))

- [8] 万小庆,许新发. 鄱阳湖环湖区水资源供需平衡分析[J]. 人民长江, 2010, 41(6): 43-47. (WAN Xiaoqing, XU Xinfu. Hydrological effects of Poyang Lake catchment in response to climate changes [J]. Yangtze River, 2010, 41(6): 43-47. (in Chinese))
- [9] SHANKMAN D, DAVIS L, LEEUW J. River management, land-use change, and future flood risk in China's Poyang Lake region [J]. International Journal of River Basin Management, 2009, 7(4): 423-431.
- [10] 蔡玉林,孙国清,过志峰,等. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响模拟[J]. 资源科学, 2009, 31(5): 743-749. (CAI Yulin, SUN Guoqing, GUO Zhifeng, et al. Simulation for influence of climate change on the streamflow variation in Poyang Lake Basin [J]. Resources Science, 2009, 31(5): 743-749. (in Chinese))
- [11] 李云良,张奇,李相虎,等. 鄱阳湖流域水文效应对气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10): 232-236. (LI Yunliang, ZHANG Qi, LI Xianghu, et al. Hydrological effects of Poyang Lake catchment in response to climate changes [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(10): 232-236. (in Chinese))
- [12] 方中英,钟茂生,王明文,等. 鄱阳湖水位动态预测模型[J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 2003, 27(3): 5-7. (WAN Zhongying, ZHONG Maosheng, WANG Mingwen, et al. Dynamic prediction model of Poyang Lake's water level [J]. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Sciences, 2003, 27(3): 5-7. (in Chinese))
- [13] 李云良,张奇,姚静,等. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 227-235. (LI Yunliang, ZHANG Qi, LI Xianghu, et al. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes for Lake Poyang catchment system [J]. Journal of Lake Science, 2013, 25(2): 227-235. (in Chinese))
- [14] LAI XIJUN, JIANG J H, LIANG Q H. Large-scale hydrodynamic modeling of the middle Yangtze River Basin with complex river-lake interactions [J]. Journal of hydrology, 2013, 492(7): 228-243.
- [15] WINZ I, BRIERLEY G, TROWSDALE S. The use of system dynamics simulation in water resources management [J]. Water Resource Management, 2009, 23: 1301-1323.

(收稿日期:2014-08-21 编辑:彭桃英)