

Application of Distributed VIC Hydrological Model in the Poyang Lake Uncontrolled Intervening Basin

Shenglian Guo¹, Jiali Guo^{2,3}, Jun Wang^{2,4}, Haijin Guo^{2,4}, Sunyun Lv^{2,4}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan

³College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang

⁴Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan

Email: slguo@whu.edu.cn

Received: Aug. 1st, 2014; revised: Oct. 5th, 2014; accepted: Nov. 10th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With land use data and soil type data, the grid vegetation and soil parameter banks were established respectively. A distributed VIC hydrological model with spatial resolution of 5 km × 5 km was applied in the Poyang Lake uncontrolled intervening basin, and a grid parameterization scheme was proposed to calibrate hydrological model. Application results show that the distributed VIC model performs fair better than lumped model, i.e., the distributed VIC model can basically well simulate runoff hydrograph and water resources quantity in this study area. Meanwhile, with the support of more sophisticated terrain, soil and vegetation data, the application results of distributed VIC model will be considerably promoted. This study will provide a reference and approach for hydrological simulation in the ungauged plain lake basin.

Keywords

Distributed VIC Model, Uncontrolled Intervening Basin, Hydrological Simulation, Poyang Lake

分布式VIC水文模型在鄱阳湖未控区间流域模拟应用

作者简介: 郭生练(1957-), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源开发利用方面的研究。

郭生练^{1,2}, 郭家力^{2,3}, 王 俊^{2,4}, 郭海晋^{2,4}, 吕孙云^{2,4}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

³三峡大学水利与环境学院, 宜昌

⁴长江水利委员会水文局, 武汉

Email: slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2014年8月1日; 修回日期: 2014年10月5日; 录用日期: 2014年11月10日

摘 要

本文利用土地利用数据和土壤类型资料, 分别建立了流域植被网格参数库和土壤网格参数库, 构建了鄱阳湖未控区间流域 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 网格分布式VIC水文模型, 并提出了水文参数网格化方法。应用结果表明, 分布式流域模型的模拟结果略优于集总式水文模型, 能较好地模拟区域径流过程和水资源量。在更精细的地形、土壤、植被数据支持下, 分布式VIC模型的应用效果会有提升空间。本研究首次把分布式VIC水文模型应用于鄱阳湖未控区间流域, 对于湖区等无资料地区的水文模拟分析提供了参考和有效途径。

关键词

分布式VIC模型, 未控区间流域, 水文模拟, 鄱阳湖

1. 引言

鄱阳湖区地处长江干流与五河来水的汇合地带, 受特殊的地理位置、自然条件及区域经济社会发展的影响, 目前湖区的自然灾害仍然频繁, 防洪减灾、水资源综合利用、水资源与生态环境保护等任务仍十分繁重[1]。其中, 鄱阳湖未控区间流域属无径流资料地区, 该地区的水资源量分析计算及湖区水量平衡分析问题长期困扰着和工程技术和科研人员。

鄱阳湖作为我国第一大淡水湖, 一直是学者们研究的热点, 主要针对退田还湖对鄱阳湖洪水调蓄能力影响[2]、洪水灾害评估[3]、土地利用变化[4]、河湖关系[5]以及对鄱阳湖入、出湖水量等的趋势分析[6]等方面展开, 但是集中分析湖区水量平衡问题的研究较少。郭家力等[7]曾使用水量平衡方法对鄱阳湖湖口流量进行修正并采用系统模型进行验证, 但是该研究中使用的水量平衡方法以及多输入单输出系统模型, 无法分析模拟水文变量的空间分布规律。分布式流域水文模型(distributed hydrological model)是当今水文科学研究和应用的热点、难点和重点之一。分布式流域水文模型不仅可以帮助人们更加深入地了解水文循环在不同时间和空间尺度上的演变规律和过程, 而且为综合解决实践中各种与水文循环紧密相关的问题提供了一个更加有效的框架和平台[8]。本文将分布式 VIC 水文模型应用到鄱阳湖未控区间流域, 模拟分析径流时空变化规律, 为合理有效地评估湖区水资源量提供科学依据。

2. 研究区域和数据

鄱阳湖未控区间是指五河七口(赣江-外洲站、抚河-李家渡站、信江-梅港站、抚河-虎山站、渡峰坑站和修水-虬津站、万家埠站)控制站以下至湖口之间的鄱阳湖区, 区间面积约 $25,082\text{ km}^2$ 。鄱阳湖流域及未控区间范围见图 1。分布式水文模型需要收集地形、土壤、植被以及水文气象等数据。VIC 模型所需要的模型输入是降水、时段最高气温和最低气温。研究收集了鄱阳湖未控区间内 72 个雨量站 1999~2009

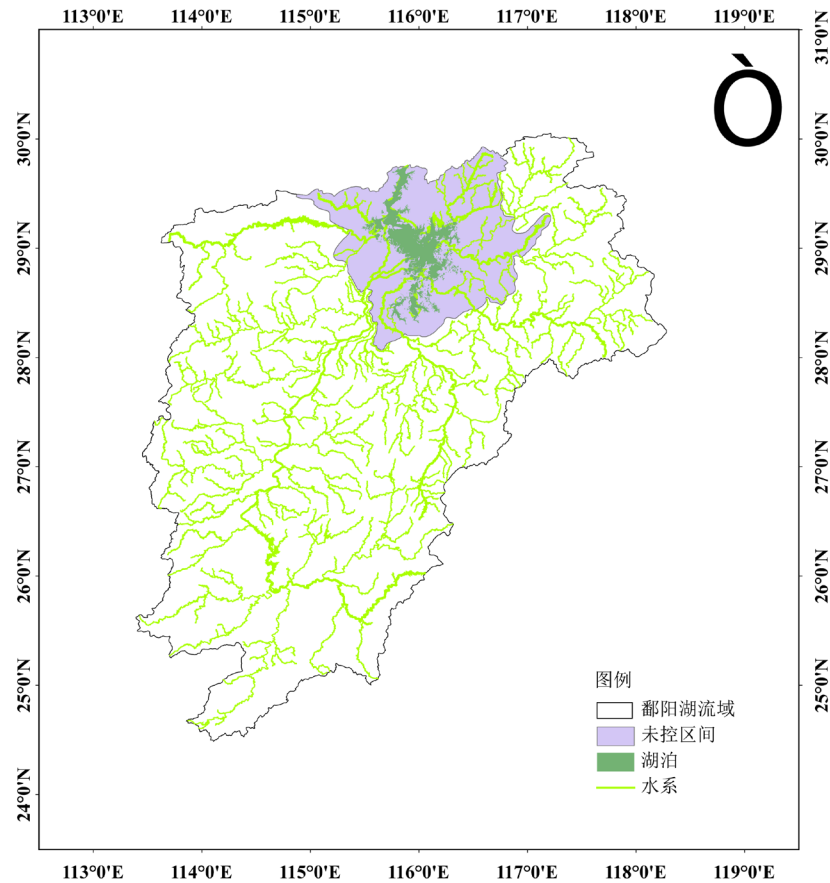


Figure 1. The sketch map of the Poyang Lake and uncontrolled intervening basin
图 1. 鄱阳湖流域及未控区间位置图

年日降水数据,流域周围共收集到 16 个国家气象站点的 1999~2009 年逐日最高、最低气温数据。本研究将 1999~2005 年作为模型的率定期,2006~2009 年作为模型的验证期。每个网格的水文气象条件是依据附近雨量站和气象站的观测值采用反距离加权插值方法获得。采用美国马里兰大学研制的全球 1 km 土地覆被资料,来描述鄱阳湖未控区间集水区域的当前植被覆被分布,该土地覆被分类将全球分为 14 种陆面覆盖类型,第 0 类为水体,第 1~11 类为 11 种植被类型,第 12 类为裸土,第 13 类为城市建筑。土壤质地分类采用世界粮农组织 FAO (Food and Agriculture Organization)发布的全球土壤数据,FAO 土壤数据对两种深度的土壤特性进行了描述,其中 0~30 cm 为上层,30~100 cm 为下层。

3. 模型构建

VIC (Variable Infiltration Capacity)可变下渗能力水文模型是一个基于空间分布网格化的分布式水文模型。VIC 模型是一个具有一定物理概念的水文模型,其主要特点是:1) 同时考虑陆-气间水分收支和能量收支过程;2) 同时考虑两种产流机制(蓄满产流和超渗产流);3) 考虑次网格内土壤不均匀性对产流的影响;4) 考虑次网格内降水的空间不均匀性;5) 考虑积雪融化及土壤融冻过程。该模型已经在世界上很多地区得到了广泛应用,国内已有专著对其进行的详细介绍[9],本文不再赘述。

3.1. 流域空间离散

综合考虑地理信息数据的空间分辨率和计算机的计算能力,同时为以后和区域气候模式的分辨率相

匹配, 本文采用 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 网格单元将鄱阳湖未控区间进行离散。选取东经 $116^{\circ}20'$, 北纬 $28^{\circ}58'$ 为未控区间中心点, 网格尺寸取为 0.0417° , 约为 5 km , 整个未控区间流域共划分了 1374 个网格(见图 2)。该网格分布是构建基于网格的鄱阳湖未控区间分布式水文模型的框架, 后续的植被参数网格文件库、土壤参数网格文件库及水文参数网格库的建立均以此网格分布为基础。

3.2. 植被参数网格库

VIC 模型中考虑了植被的蒸发蒸腾和冠层截留, 对每种植被类型需要标定的参数有: 结构阻抗、最小气孔阻抗、叶面积指数、反照率、粗糙率、零平面位移等, 这些参数主要根据 LDAS 的工作来确定, 表 1 中列出了植被类型的部分参数。首先对全球 1 km 土地覆被数据作投影转换, 然后利用流域边界从中切取出鄱阳湖未控区间土地覆被数据, 用建好的 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 流域网格切割得到鄱阳湖未控区间土地覆被空间分布, 以上步骤在 ERDAS 和 ArcGIS 软件中实现。建立植被覆盖参数网格数据库, 包括各个网格内植被类型的总数、每种植被在该网格所占的面积比例及每种植被根区深度和所占的比例。

3.3. 土壤参数网格库

研究中 VIC 模型第 1、2 层的土壤参数取上层土壤数据的值, 第 3 层土壤的土壤参数取下层土壤数据的值。在土壤参数中与土壤特性有关的参数, 在模型标定后就不再改动, 如土壤饱和和体积含水量、饱和和土壤水势、土壤饱和水力传导度等, 这些参数根据文献确定。选取每个网格内面积比例最大的一类土壤及其对应的土壤参数, 生成土壤类型网格参数库。表 2 给出了各种土壤类型的主要水力属性指标。

3.4. 水文参数网格化

分布式水文模型的优势在于能考虑参数的空间变异。本文采用下述方法将参数进行网格化:

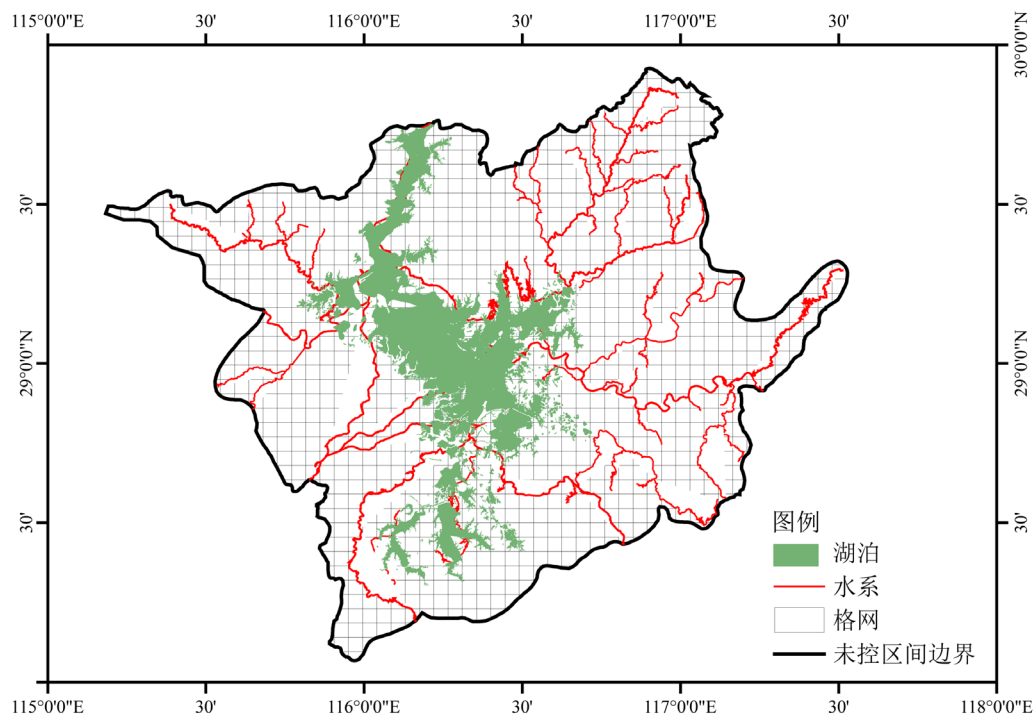


Figure 2. The grid cell diagram of the Poyang Lake uncontrolled intervening basin

图 2. 鄱阳湖未控区间网格示意图

Table 1. The parameter of different vegetation types
表 1. 植被类型部分参数表

分类号	植被类型	反照率	最小气孔阻抗(s/m)	叶面积指数	糙率(m)	零平面位移(m)
1	常绿针叶林	0.12	250	3.40~4.40	1.4760	8.040
2	常绿阔叶林	0.12	250	3.40~4.41	1.4760	8.040
3	落叶针叶林	0.18	150	1.52~5.00	1.2300	6.700
4	落叶阔叶林	0.18	150	1.52~5.00	1.2300	6.700
5	混交林	0.18	200	1.52~5.00	1.2300	6.700
6	林地	0.18	200	1.52~5.00	1.2300	6.700
7	林地平原	0.19	125	2.20~3.85	0.4590	1.000
8	密灌丛	0.19	135	2.20~3.85	0.4590	1.000
9	灌丛	0.19	135	2.20~3.85	0.4590	1.000
10	草原	0.20	120	2.20~3.85	0.0738	0.402
11	耕地	0.10	120	0.02~5.00	0.0060	1.005

Table 2. Soil hydraulic properties index table
表 2. 土壤水力属性指标表

土壤分类号	土壤类型	沙土含量%	粘土含量%	容重 g/cm ³	田间持水量 cm ³ /cm ³	萎蔫点 cm ³ /cm ³	孔隙度	饱和水力传导度 cm/hr
1	沙土	94.83	2.27	1.49	0.08	0.03	0.43	38.41
2	壤质沙土	85.23	6.53	1.52	0.15	0.06	0.42	10.87
3	沙壤土	69.28	12.48	1.57	0.21	0.09	0.4	5.24
4	粉质壤土	19.28	17.11	1.42	0.32	0.12	0.46	3.96
5	粉土	4.5	8.3	1.28	0.28	0.08	0.52	8.59
6	壤土	41	20.69	1.49	0.29	0.14	0.43	1.97
7	沙质粘壤土	60.97	26.33	1.6	0.27	0.17	0.39	2.4
8	粉质粘壤土	9.04	33.05	1.38	0.36	0.21	0.48	4.57
9	粘壤土	30.08	33.46	1.43	0.34	0.21	0.46	1.77
10	沙质粘土	50.32	39.3	1.57	0.31	0.23	0.41	1.19
11	粉质粘土	8.18	44.58	1.35	0.37	0.25	0.49	2.95
12	粘土	24.71	52.46	1.39	0.36	0.27	0.47	3.18

- 1) 首先将鄱阳湖未控区间流域的网格进行编号，以整型数 1、2、3、…、1374 作为网格的唯一标识，记录五河七口水文控制站所在网格。
- 2) 将唯一标识的网格进行分类，参数网格化布局如图 3 所示：属于湖泊的网格——A；属于西河流域及类似下垫面条件的网格——B；属于博阳河流域及类似下垫面条件的网格——C；其余网格——D；其中 B 类与 D 类、C 类与 D 类之间需要反复调整。
- 3) A 类网格即为 VIC 模型默认的水面，降雨直接产流；B 类网格采用西河流域率定的参数；C 类网格采用博阳河流域率定的参数；D 类网格的参数需要优选。

4) D 类网格参数优选的方案如下：①设定 2 组初始值：第 1 组是 A 类和 B 类参数的算术平均值；第 2 组是以汉江流域皇庄站以下区域(与本文研究区域气候下垫面条件较为接近)的参数[10]；②以 2 组初始值为上下限，在此之间设置若干套参数，逐个检验，若所得效率系数高于集总式模型，即停止检验；③若此若干套参数检验完毕之后仍未到达要求，返回第②步，将网格划分在 B 类与 D 类、C 类与 D 类之间进行调整，直至模型率系数满足要求，最终 D 类参数的优选结果如表 3。

4. 模拟结果与分析

对未控区间进行径流模拟分为两种方式：集总式和分布式。集总方式是将整个研究区域作为一个计算单元，计算流量过程与修正后的湖口流量过程扣除五河七口流量进行对比；分布式即按照上述划分的网格进行分别计算，其中五河七口的入流作为水文站所在网格的产流，将各网格产流汇流至湖口后与修正后的湖口流量进行对比。如表 4 所示，分布式 VIC 水文模型率定期模型效率系数为 68.59%，年径流相

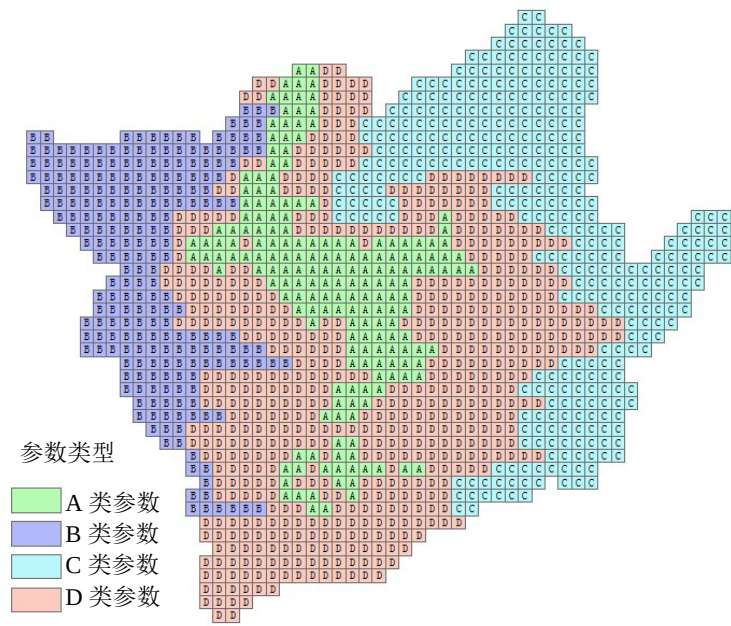


Figure 3. Spatial distribution of grid parameter patterns for the Poyang Lake uncontrolled intervening basin
图 3. 鄱阳湖未控区间流域网格参数类型分布图

Table 3. VIC model parameters for different parts of the Poyang Lake uncontrolled intervening basin
表 3. 不同区域分别采用的 VIC 模型参数值

参数	产流参数							汇流参数		
	b	Ds	Dsmax	Ws	dep1	dep2	dep3	an	al	ckg
最小值	0.001	0.00001	0.0001	0.1	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1
最大值	0.5	1	5.0	1.0	0.07	0.5	0.5	0.5	5.2	1
初始值	0.20	0.25	1.0	0.7	0.14	0.30	0.05	0.05	1.5	0.8
B 类西河	0.35	0.15	1.0	0.8	0.005	0.25	0.35	0.25	2	0.9
C 类博阳河	0.29	0.30	1.0	0.85	0.14	0.30	0.015	0.2	1.85	0.8
D 类	0.22	0.34	5.23	0.67	0.08	0.56	0.33	0.23	2.5	0.26

对误差值为 2.69%；检验期模型效率系数为 73.56%，年径流相对误差值为-6.53%。由此可见，建立的 VIC 分布式水文模型比集总式模型在模型效率系数上有所改观，径流总量相对误差也控制在 5%左右，由此可见，采用具有较强物理意义的分布式水文模型，能得到比集总式相当甚至更好的模拟效果。

图 4(a)和(b)分别绘出了鄱阳湖未控区间 VIC 模型率定期和检验期日径流过程模拟图。图中所示的计算流量过程即为郭家力等[8]对湖口流量修正后的结果。从这些图中可以看出，分布式 VIC 水文模型可以较好地模拟鄱阳湖未控区间的降雨径流过程，但客观来说，目前建立的未控区间流域的 VIC 分布式水文模型在有更高精度的数据支持下，还具有较大的提升空间。

Table 4. Comparison of simulation results between lumped and distributed VIC models for the Poyang Lake uncontrolled intervening basin

表 4. 鄱阳湖未控区间分布式和集总式 VIC 模型应用效果

率定方式	时期	模型效率系数 R^2 (%)	径流总量相对误差 RE (%)
集总式	率定期	65.64	4.33
	检验期	70.54	-3.43
分布式	率定期	68.59	2.69
	检验期	73.56	-6.53

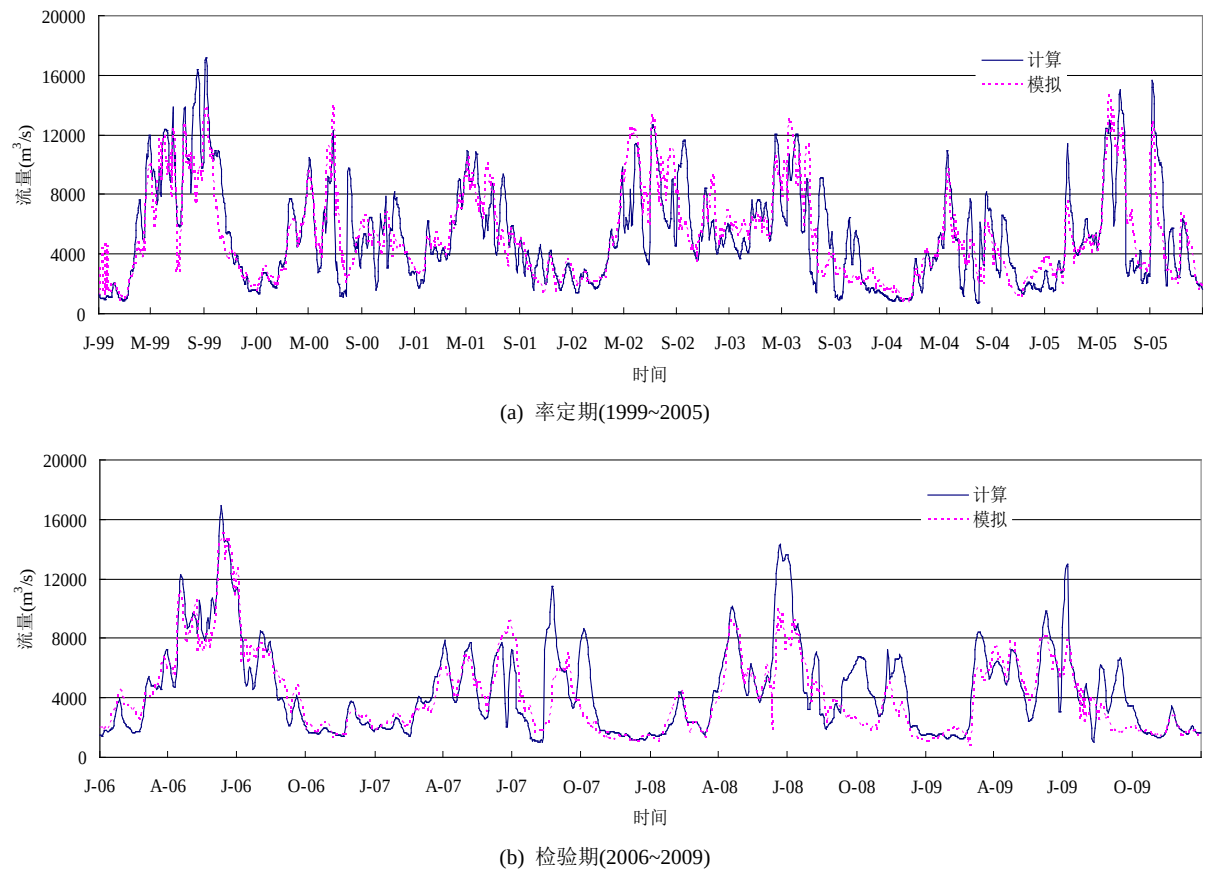


Figure 4. Comparison between simulated and modified daily discharge hydrographs for the Poyang Lake uncontrolled intervening basin

图 4. 鄱阳湖未控区间分布式 VIC 模型模拟日平均径流过程

5. 结论与展望

本文构建了鄱阳湖未控区间的 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 网格, 利用收集到的土地利用数据和土壤类型资料, 分别建立了流域植被网格参数库和土壤网格参数库; 提出了未控区间流域的水文参数网格化方法。在鄱阳湖未控区间流域分别建立集总式和分布式 VIC 水文模型。应用结果表明, 模型的模拟结果良好, 基本能模拟水资源量特征。同时可以看到, 在更精细的地形、土壤、植被数据支持下, 分布式 VIC 模型的应用效果会有广阔的提升空间。

本研究首次把分布式 VIC 水文模型应用于鄱阳湖未控区间流域, 对于湖区等类似的无资料地区分布式水文模型的应用提供了参考和有效途径。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51190094)。

参考文献 (References)

- [1] 余达锦, 胡振鹏. 鄱阳湖生态经济区生态产业发展研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 231-236.
YU Dajin, HU Zhenpeng. Research on the development of eco-industry in Poyang Lake Eco-Economic Zone. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(3): 231-236. (in Chinese)
- [2] 姜鲁光, 封志明, 于秀波, 甄霖, 黄河清. 退田还湖后鄱阳湖区洪水调蓄功能的多情景模拟[J]. 资源科学, 2010, 32(5): 817-823.
JIANG Luguang, FENG Zhiming, YU Xiubo, ZHEN Lin and HUANG Heqing. Scenario analysis on the flood regulation service of the Poyang Lake region. Resources Science, 2010, 32(5): 817-823. (in Chinese)
- [3] 云惟群, 付凌晖, 王惠文. 鄱阳湖地区洪水灾害模式分析[J]. 灾害学, 2003, 18(1): 30-35, 46.
YU Weiqun, FU Linghui and WANG Huiwen. Flood pattern analysis of Poyang Lake area. Journal of Catastrophology, 2003, 18(1): 30-35, 46. (in Chinese)
- [4] 蔡海生, 朱德海, 赵小敏. 1998 年前后鄱阳湖区土地利用变化分析[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(6): 88-93.
CAI Haisheng, ZHU Dehai and ZHAO Xiaomin. Change of land utilization in Poyang Lake zone around 1998. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(6): 88-93. (in Chinese)
- [5] 罗蔚, 张翔, 邓志民, 肖洋. 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): 845-856.
LUO Wei, ZHANG Xiang, DENG Zhimin and XIAO Yang. Variation of the total runoff into Poyang Lake and drought-flood abrupt alternation during the Past 50 years. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 845-856. (in Chinese)
- [6] 郭华, 姜彤, 王国杰, 苏布达, 王艳军. 1961~2003 年间鄱阳湖流域气候变化趋势及突变分析[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 443-451.
GUO Hua, JIANG Tong, WANG Guojie, SU Buda and WANG Yanjun. Observed trends and jumps of climate change over of Poyang Lake basin, China: 1961-2003. Journal of Lake Science, 2006, 18(5): 443-451. (in Chinese)
- [7] 郭家力, 郭生练, 李天元, 刘德地. 鄱阳湖未控区间流域水量平衡分析及校验[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 30-32, 58.
GUO Jiali, GUO Shenglian, LI Tianyuan and LIU Dedi. Water balance analysis and verification of Poyanghu Lake intervening basin. Water Resources and Power, 2012, 30(9): 30-32, 58. (in Chinese)
- [8] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
XIONG Lihua, GUO Shenglian. Distributed hydrological models. Beijing: China Water Resources and Power Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 郝振纯, 李丽, 王加虎, 罗健. 分布式水文模型理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
HAO Zhenchun, LI Li, WANG Jiahu and LUO Jian. Theory and methods of distributed hydrological model. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [10] GUO, S.L., GUO, J., ZHANG, J. and CHEN, H. VIC distributed hydrological model to predict climate change impact in the Hanjiang basin. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(11): 3234-3239.