

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.03.002

基于土壤地形指数和下垫面水文分区的流域模型参数率定

颜梅春¹, 陈贝贝¹, 李致家², 金文韬¹, 杨宇晖¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对流域水文响应会受到地质、地形、地貌、植被、土壤等自然地理因素以及土地利用等下垫面因素综合作用的特点, 根据流域下垫面的地理特征进行水文响应分区。借助遥感资料对流域下垫面进行分类并获取土地覆盖/土地利用信息, 结合流域土壤类型数据与地形指数推求流域的土壤地形指数。进一步地, 利用遥感分类信息和土壤地形指数进行流域的水文分区, 率定各个水文分区SCS模型的参数 C_N 值并进行水文模拟, 结果表明, 屯溪流域21次和东湾流域32次洪水径流模拟相对误差均比传统方法的小。

关键词: 土壤地形指数; SCS模型参数; 下垫面水文分区; 遥感; 屯溪流域; 东湾流域

中图分类号: TP79; P343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)03-0197-06

Parameter calibration for watershed hydrology model based on soil topography index and hydrological partition of underlying surface

YAN Meichun¹, CHEN Beibei¹, LI Zhijia², JIN Wentao¹, YANG Yuhui¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Because the hydrological response of watersheds is comprehensively affected by physical geographical factors, such as geology, topography, landforms, vegetation, and soil, and underlying surface factors, such as land use, hydrological partition was conducted based on the geographical characteristics of underlying surface of watersheds. The underlying surface of watersheds was classified with remote sensing data and information on land cover and land use was obtained. By combining data of watershed agrotpe and the topography index, the soil topography index was calculated. Furthermore, taking advantage of the remote sensing data and soil topography index, hydrological partition was conducted, the parameter C_N of the SCS model was calibrated in every hydrological subregion, and hydrological simulation was conducted. The results showed that the relative error was less with the proposed method than with the traditional method in 21 flood runoff simulations in the Tunxi Watershed and 32 flood runoff simulations in the Dongwan Watershed.

Key words: soil topography index; SCS model parameter; hydrological partition of underlying surface; remote sensing; Tunxi Watershed; Dongwan Watershed

流域模型是模拟流域输出过程的数学模型, 当前得到广泛应用的是有物理意义且根据系统输入、输出关系确定模型参数的概念化模型。从水流空间运动能力变化的角度, 流域水文模型分为集中式和分布式模型。分布式模型全面考虑降雨和下垫面的空间不均匀性对洪水造成的影响^[1], 需要大量时空分布数据的支持。近年来, 国内外研究者借助遥感技术提供的大量下垫面信息开展了许多研究工作^[2-7], 结果表明水文遥感方法能提高径流估算精度和改善传统的水文模型结构与应用^[8-9]。此类研究重点关注景观类型与水文特征在

收稿日期: 2014-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(41130639)

作者简介: 颜梅春(1971—), 女, 湖南衡阳人, 副教授, 博士, 主要从事遥感应用研究。E-mail: yanmeichun@hhu.edu.cn

大流域尺度上的相关性,很少从技术实现的角度探讨小流域尺度上水文模型的参数获取问题。研究中,在通过遥感影像获取关于流域下垫面土地利用情况后,还需要与流域地形数据和土壤分类数据相结合。由于这些不同来源数据的观测精度存在较大差异,如何将其统一到一个比例尺下并且进行叠加,以进行水文分区并对流域模型参数进行率定成为亟须解决的问题。本研究综合遥感土地覆盖、地面高程和土壤属性率定参数并进行流域水文模拟,以期综合利用多源数据,探讨水文模型思路,提高流域水文模拟的精度。

1 研究区域和研究数据

屯溪流域在新安江流域上游,位于118°20'E,29°43'N,地势西高东低,植被良好,年均降水量1600 mm,年内、年际分配极不均匀;河川径流年内、年际变化较大,是典型的湿润区。东湾流域位于黄河支流伊洛河上游,属半湿润区,地处111°E~112°E,33°N~34.5°N,地势西高东低,上游林地面积大,属大陆性季风气候区;降水量分布极不均匀,山地多雨,河谷及附近丘陵少雨。

采用中国科学院南京土壤研究所提供的1:1000000土壤属性数据^[10-12]。含0~20 cm和20~100 cm厚度的美国制土壤砂粒(颗粒直径大于0.05 mm)、土壤粉粒(直径范围0.05~0.002 mm)、土壤黏粒(直径小于0.002 mm)含量和土壤饱和导水率信息。

采用2003年SRTM(shuttle radar topography mission,美国航天飞机于2000年2月11—22日用雷达测图技术得到的数字地表高程模型)的DEM(digital elevation model,分辨率90 m),获取流域范围并计算流域的地形指数。屯溪流域2013年10月Landsat 8卫星OLI影像及东湾流域2011年8月TM影像,通过FLAASH校正裁剪等预处理和决策树结合最大似然法分类,将下垫面分为森林、耕地、居民地、水体、裸岩、裸土共6类,总精度分别为88%和93%,见图1。

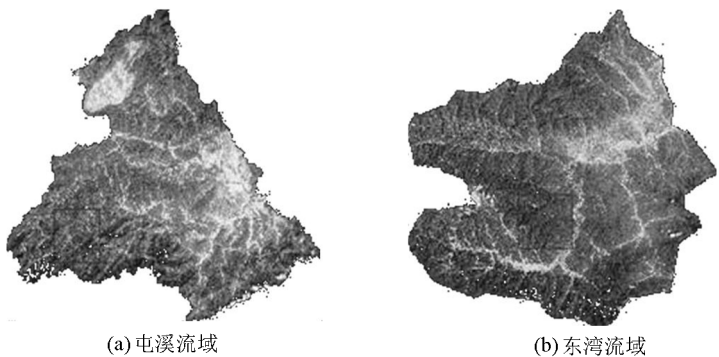


图1 研究区范围的Landsat影像
Fig. 1 Landsat images of study area

2 研究方法

2.1 重要参数确定

2.1.1 地形指数

地形指数是一些以物理概念为基础的水文模型(如TOPMODEL)的重要参数。Beven和Kirkby提出了湿度指数(亦称地形指数)的概念^[13],是从流域高程信息中提取地貌指数来研究流域水文机制,其计算公式为 $I_T = \ln(\alpha/\tan\beta)$ (其中 I_T 为地形指数, α 为单位等高线长的上坡汇流面积, β 为局部坡度角)。TOPMODEL模型是以计算地形指数及其分布为基础的,根据地形指数及流域平均土壤相对含水量即可简便地确定产流区的空间分布及其动态变化,减少了模型参数个数和计算量^[14]。由于TOPMODEL的成功,地形指数已被广泛地应用于研究流域水文过程的空间不均匀性^[15]。D8算法是1984年由Callaghan和Mark提出的^[16],径流仅流向周围8个邻域中最陡的单元,这种算法在45°或其倍数的方向上往往会产生平行径流;多流向算法是Quinn等^[17]于1991年提出对D8的改进算法,其将水流按照坡度的比例分配至相邻较低的单元上,当下坡单元的主方向和对角方向上具有相同高程时,主方向得到的汇水面积将是对角方向的1.4倍。在丘陵区地形起伏平缓的小流域,D8(单流向法)和多流向法计算出的地形指数的分布曲线大致相似。所以,对于一些仅需要湿度指数分布的水文模型来说,可用单流向法来代替多流向法。

2.1.2 土壤地形指数

地形指数仅考虑地形对径流形成的影响,且假定土壤性状是均匀的。事实上,土壤的导水性与土壤的颗粒组成和成分密切相关。为将土壤的空间差异考虑引入模型,本研究构建了考虑土壤空间差异的土壤地形指数 S_1 ,以便更真实地反映径流形成过程。其公式如下:

$$S_1 = I_T - \ln T_0$$

(1)

式中: T_0 ——土壤深度与土壤饱和导水率之乘积。

因为土壤饱和导水率在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 100 cm 深度上存在差异,需用分段函数计算 T_0 :

$$T_0 = \begin{cases} DK_{0-20} & D \leq 20 \text{ cm} \\ K_{0-20} \times 20 + D_{20}K_{20-100} & D > 20 \text{ cm} \end{cases}$$

(2)

式中: D ——土壤层厚度; K_{0-20} ——0 ~ 20 cm 土壤饱和导水率; K_{20-100} ——20 ~ 100 cm 土壤饱和导水率。

处理时,首先将矢量格式的土壤数据转换成网格大小为 1 000 m 的栅格数据,然后用同样为栅格数据类型的 D8 方法计算的地形指数数据进行运算。

2.2 下垫面水文分区

利用流域土壤地形指数以及遥感影像的分类数据进行水文分区。处理时,先对耕地、水体、裸土、裸岩、居民地、林地这 6 类地物分别赋予 1 ~ 6 的属性值。土壤地形指数也根据其数据范围进行重新分级,共 4 级,其中屯溪流域分为:−4 ~ 0、0 ~ 4、4 ~ 8 和 8 ~ 12;东湾流域分为:−4 ~ −1、−1 ~ 2、2 ~ 5 和 5 ~ 8,组合起来进行 2 个流域的水文分区(表 1、表 2)。

表 1 屯溪流域水文分区

Table 1 Hydrological partition of Tunxi Watershed

S_1	序号	类别	F/km^2	S_1	序号	类别	F/km^2
−4 ~ 0	1	耕地	1	4 ~ 8	13	耕地	8
	2	水体	1		14	水体	48
	3	裸土	17		15	裸土	26
	4	裸岩	4		16	裸岩	55
	5	居民地	11		17	居民地	83
	6	林地	146		18	林地	537
0 ~ 4	7	耕地	13	8 ~ 12	19	耕地	5
	8	水体	42		20	水体	13
	9	裸土	51		21	裸土	3
	10	裸岩	56		22	裸岩	12
	11	居民地	89		23	居民地	13
	12	林地	1 130		24	林地	56

注: F 表示面积,以下同。

表 2 东湾流域水文分区

Table 2 Hydrological partition of Dongwan Watershed

S_1	序号	类别	F/km^2	S_1	序号	类别	F/km^2
−4 ~ −1	1	耕地	20	2 ~ 5	11	耕地	45
	2	水体	9		12	水体	13
	3	裸土	59		13	裸土	139
	4	居民地	41		14	居民地	81
	5	林地	449		15	林地	868
−1 ~ 2	6	耕地	29	5 ~ 8	16	耕地	1
	7	水体	18		17	水体	1
	8	裸土	108		18	裸土	5
	9	居民地	57		19	居民地	6
	10	林地	933		20	林地	10

2.3 模型参数率定

SCS 模型可客观反映土壤类型、土地利用方式及前期土壤含水量对降雨径流的影响,其显著特点是模型结构简单、所需输入参数少,是一种较好的小型集水区径流计算方法^[18]。SCS 模型的水量平衡方程可表示为

$$\frac{Q}{P-I_a}=\frac{F_w}{S}\tag{3}$$

其中 $I_a=\lambda S$ $\lambda=at_p$

式中: P ——总降雨量,mm; I_a ——截流、表层蓄水等初损值,mm; F_w ——累积下渗量(不包括 I_a),mm; Q ——直接径流量,mm; S ——当时可能最大滞留量,mm; a ——Horton 常数; t_p ——降水时刻到地表径流形成的时段。 λ 的取值范围为 $0.1\leq\lambda\leq0.3$ 。

为计算 S ,引入土壤最大蓄水能力参数 C_N 。 C_N 是无量纲参数,理论取值范围为 $0\sim100$,实践取值范围为 $40\sim98$ 。径流量取决于降雨量与降雨前集水区的土壤最大蓄水量,而土壤最大蓄水量又与集水区的土壤质地、土地利用方式和降雨前的土壤湿润状况有关。研究中将水体、建筑、裸岩归为不透水类,其余为透水类,重新定义分区属性并对流域进行下垫面水文分区,率定 C_N 值,结果见表3。

表3 两流域下垫面水文分区属性对应的 C_N 值

Table 3 C_N value corresponding to hydrological partition property of underlying surface of Tunxi and Dongwan watersheds

编号	透水性	S_1	屯溪流域			S_1	东湾流域		
			F/km^2	权重	C_N		F/km^2	权重	C_N
1	不透水	—	427	0.1764	100	—	226	0.0781	100
2	透水	-4~0	164	0.0678	45	-4~-1	528	0.1826	40
3	透水	0~4	1194	0.4934	50	-1~2	1070	0.3670	50
4	透水	4~8	571	0.2360	65	2~5	1052	0.3638	60
5	透水	8~12	64	0.0264	70	5~8	16	0.0055	70

3 结果与分析

为比较,将屯溪流域和东湾流域内的土壤按成分组成情况分成砂土、沙壤土、壤土、黏土,统计出每类土壤的面积。

通过查表对照土壤属性和土地利用状况,得到传统方法 C_N 率定值(表4)。

表4 两流域传统方法 C_N 值确定

Table 4 C_N value of Tunxi and Dongwan watersheds obtained using traditional method

编号	透水性	土壤分类	屯溪流域			东湾流域		
			F/km^2	权重	C_N	F/km^2	权重	C_N
1	不透水	—	337	0.128921	100	342	0.117445	100
2	透水	A	501	0.191660	87	822	0.282280	50
3	透水	B	399	0.152640	87	707	0.242788	50
4	透水	C	1177	0.450268	93	55	0.018887	75
5	透水	D	200	0.076511	80	986	0.338599	50

分别对屯溪流域1982—2002年间21次和东湾流域1961—2000年间32次洪水资料率定参数 C_N ,进行水文模拟,模拟时认为降雨量是降水量与前期含水量之和, $R_{实}$ 为实测的地表径流量, Q 为利用SCS模型计算所得的地表径流量。相对误差为两者之差与计算所得地表径流的比值^[19]。统计相对误差小于或等于0.3的比例,可对比其与传统 C_N 模拟径流的误差。结果表明:屯溪流域21场洪水中,本方案的合格率为90.48%,远高于传统方法计算的合格率(61.90%);东湾流域的32场洪水,本方案的合格率为84.38%,高于传统方法计算的合格率(78.13%)。以上结果说明考虑土壤地形指数的 C_N 值对估计降水产生的地表径流效果较好。对于不合格的场次,误差大的原因可能还有降雨中心不同、前期土壤湿度差异以及微地貌复杂程度等因素^[20]。

由于资料的限制,土壤属性数据的比例尺为1:1000000,造成土壤信息较粗略,以及在与遥感影像和地形数据叠合时空分辨率偏粗的不足;同时,本次研究忽略了研究区的土地利用变化对水文响应的影响,如果水文数据更丰富、更新,研究结果将更有实践意义;仅定性考虑 C_N 值也有局限,因此对于 C_N 值与土壤地形指数、与前期土壤湿度和下垫面土地利用景观结构等的定量关系研究,是下一步研究的重点。总之,综合考虑降雨中心、土地利用、地形地貌、土壤属性等下垫面因素影响的分布式水文模型估测降雨径流将更具客观性和稳定性。

4 结 语

利用遥感资料获得流域下垫面的地形地貌和土地覆盖/土地利用信息,再结合流域土壤类型等属性数据,进行流域下垫面响应分区和水文模型的参数率定,对比结果发现屯溪流域和东湾流域模拟的结果均优于传统方法模拟的精度,说明本研究思路和方法具有一定的优越性。另外,本研究是建立在忽略土地利用变化和前期土壤湿度差异影响的基础上,如果能利用尺度范围更小的土壤类型等属性数据、明确模型的 C_N 值与土壤地形指数及土地利用景观结构的定量数学关系,将使本文思路、方法更具有明确的物理意义和实际应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SANZANA P, JANKOWFSKY S, BRANGER F, et al. Computer-assisted mesh generation based on hydrological response units for distributed hydrological modeling[J]. Computers & Geosciences, 2013,57:32-43.
- [3] 李巧萍,丁一汇. 植被覆盖变化对区域气候影响的研究进展[J]. 南京气象学院学报, 2004,27(1):131-140. (LI Qiaoping, DING Yihui. Research progress in the effect of vegetation change on regional climate[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2004,27(1):131-140. (in Chinese))
- [4] 刘明,王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应[J]. 生态学报,2008,28(12):5970-5979. (LIU Ming, WANG Kelin. Analysis on hydrological responses to changes of landscape patterns in them idle and upper reaches of Dongting Lake Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(12):5970-5979. (in Chinese))
- [5] 史培军,袁艺,陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报,2001,21(7):1042-1051. (SHI Peijun, YUAN Yi, CHEN Jin. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China[J]. Acta Ecologica Sinica,2001,21(7):1042-1051. (in Chinese))
- [6] 张旭,蒋卫国,周廷刚,等. GIS支持下的基于DEM的水文响应单元划分:以洞庭湖为例[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(4):17-21. (ZHANG Xu, JIANG Weiguo, ZHOU Tinggang, et al. Hydrological response unit division for Dongting Lake based on DEM and GIS[J]. Geography and Geo-Information Science,2009,25(4):17-21. (in Chinese))
- [7] 胡凤彬. 流域水文模型参数的水文分区法[J]. 水文, 1989,7(1):34-40. (HU Fengbin. Hydrological model parameters hydrological zoning methods[J]. Hydrology, 1989,7(1):34-40. (in Chinese))
- [8] 熊江波. 用遥感资料确定水文模型参数的方法[J]. 环境遥感,1987,2(1):33-43. (XIONG Jiangbo. Determine model parameters using remote sensing data hydrological methods[J]. Environment Remote Sensing, 1987, 2(1):33-43. (in Chinese))
- [9] 卢德宝,史正涛,李玉辉,等. 巴江岩溶流域水文模拟研究[J]. 水文,2014,34(1):52-57,6. (LU Debao, SHI Zhengtao, LI Yuhui, et al. Hydrological modeling for karst area in Bajiang River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2014,34(1):52-57, 6. (in Chinese))
- [10] 史学正,于东升,高鹏,等. 中国土壤信息系统(SISChina)及其应用基础研究[J]. 土壤,2007,39(3):329-333. (SHI Xuezheng, YU Dongsheng, GAO Peng, et al. Soil information system of China (SISChina) and its application[J]. Soils, 2007, 39(3):329-333. (in Chinese))
- [11] SHI Xuezheng, WANG H J, WARNER E D. et al. Cross-reference for relating genetic soil classification of China with WRB at different scales[J]. Geoderma,2010,154(1):344-350.
- [12] SHI Xuezheng, YU Dongsheng, WARNER E D, et al. Soil database of 1:1 000 000 digital soil survey and reference system of the Chinese genetic soil classification system[J]. Soil Survey Horizons, 2004,45(4):129-136.
- [13] 邓慧平,李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002,21(2):203-210. (DENG Huiping, LI Xiubin. Relationship of upslope contribution area and soil water content in TOPMODEL[J]. Progress in Geography, 2002,21(2):203-210. (in Chinese))
- [14] BEVEN K J, KIRKBY M J, SCHPFIELD N, et al. Testing a physically based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments[J]. Journal of Hydrology,1984,69(1):119-143.
- [15] 张镛光,王克林,陈洪松,等. 基于DEM的地形指数提取方法及应用[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(6):715-719. (ZHANG Duguang, WANG Kelin, CHEN Hongsong, et al. Method and application for extracting topographic index based on DEM[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005,14(6):715-719. (in Chinese))
- [16] GARBRECHT J, MARTZ L W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models [J].

Journal of Hydrology, 1997,193 (1/2/3/4):204-213.

[17] QUINN P F, BEVEN K J, CHEVALLIER P, et al. The prediction of hill slope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models[J]. Hydrological Processes,1991,5(1):59-79.

[18] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS 模型及其研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(2):120-124. (LIU Jiafu, JIANG Weiguo, ZHAN Wenfeng, et al. Processes of SCS model for hydrological simulation: a review[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(2):120-124. (in Chinese))

[19] 李致家,于莎莎,李巧玲,等. 降雨-径流关系的区域规律[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012,40(5):597-605. (LI Zhijia, YU Shasha,LI Qiaoling, et al. Regional pattern of rainfall-runoff relationship[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2012,40(5):597-605. (in Chinese))

[20] 姚成,章玉霞, 李致家,等. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2013,41(2):108-113. (YAO Cheng,ZHANG Yuxia,LI Zhijia, et al. Hydrological simulations and similarities in ungauged basins[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2013,41(2):108-113. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学“堤坝工程安全与减灾”
教育部长江学者创新团队通过结题验收

2015 年 5 月 15 日,受教育部科技司委托,河海大学组织专家召开“堤坝工程安全与减灾”教育部创新团队验收会。专家组组长由浙江大学龚晓南院士担任,专家组成员包括天津大学顾晓鲁教授、中国建筑科学研究院钱力航研究员、同济大学黄宏伟教授、北京航空航天大学姚仰平教授、华中科技大学郑俊杰教授和东南大学洪振舜教授。河海大学副校长唐洪武教授出席会议,创新团队骨干成员参加了会议。

专家组听取了团队的总结汇报,现场考察了研究平台的建设情况,并进行了交流。经过评议,专家组对创新团队取得的成绩给予高度评价,一致认为团队已超额完成计划任务,创新成果显著,发展潜力大。同意通过结题验收,综合评议结果为优秀,并建议教育部对团队进行滚动资助。

“堤坝工程安全与减灾”教育部长江学者创新团队自 2011 年获批以来,以河海大学岩土工程国家重点学科和岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室为依托,主要就高土石坝筑坝料特性和坝体抗震分析,高速铁路、高速公路路堤变形机理及沉降控制和围海造地大面积超软地基处理等方面开展了深入研究。研究对完善粗粒土本构理论、提升软基处理机理分析和设计理论水平具有很高的学术价值,同时也对水利、交通、围海造地等重大基础工程建设做出了重要贡献,取得了显著的社会与经济效益。

(本刊编辑部供稿)