DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.009

水文响应指数及其在 TOPMODEL 参数区域化中的应用

张友静[1,2],陈 波[2],何 川[2],郝振纯[1]

(1.河海大学水文水资源及水利工程国家重点试验室,江苏 南京 210098;
2.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:提出一个描述流域单元地表特征的指数,该指数由 TOPMODEL 的地形指数(TI)和 SCS 的径流曲线数(CN)组成.以黄河中游的洛河流域为研究区,应用遥感和地理信息系统技术构建了水分响应指数(HRI),在分析其地学意义的基础上,提取了流域的水分响应单元(HRU).应用 TOPMODEL 率定了模型参数,建立了 HRI 和单元特征与主要模型参数的统计关系.利用该关系反演的参数验证流域的径流模拟,取得了较好的效果.试验结果表明,该指数可以用于流域的空间离散和水文模型参数的区域化分析,为资料缺乏地区的水文模型参数移用提供了新的方法.

关键词:水文响应指数;参数区域化;TOPMODEL;缺资料地区;遥感技术
中图分类号:P208 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-1980(2009)05-0539-06

流域径流过程的时空分布是数字流域的重要内容.为满足代表流域气象和下垫面条件空间异质性的要求,需要进行流域的空间离散.分布式水文模型采用格网或水分响应单元(HRU)等方法进行空间离散和径流模拟.但格网方法人为割裂了地表特征的空间连续性,而 HRU 则缺乏有效的单元提取方法和单元地理特征描述方法.同时,大多数资料缺乏地区的径流模拟需要移用有资料流域率定后的模型参数,但移用基于相似性原理的参数缺乏有效的参考指标.因此,探讨定量、合理的空间离散方法,研究单元地理特征描述方法,建立水文模型参数与地理特征间的关系,减少参数移用的不确定性成为当前模型参数区域化领域的重要课题,也是提取和表达流域信息、构建数字流域的需要.

本文以洛河流域为例,综合考虑流域下垫面形态结构和物质组成,采用 TOPMODEL 的地形指数(TI)和 SCS 模型的径流曲线数(CN)构建水分响应指数(HRI).在分析 HRI 地学意义的基础上,采用 HRI 结合归一化植被指数(NDVI)在子流域上提取 HRU,建立单元的 HRI 和单元特征与 TOPMODEL 参数的关系,并用验证流域实测数据检验反演参数的可靠性.

1 研究区与数据

本文研究区为黄河中游的洛河流域,包括 8 个水文站和 68 个雨量站,水文数据系列从 20 世纪 80 年代到 21 世纪初.该流域多年平均降水量为 720 mm,其中 65% 的降水集中在 6 ~ 9 月.流域面积约 11 000 km^2,流域内地貌、土壤和土地利用形式多样.各类要素的组合形成不同的产汇流单元.收集的流域各类数据如图 1 所示,其中土地利用变化情况通过陆地卫星数据分类得到(表 1),各期分类的总体精度为 85% 以上.

表 1 研究区 1980 ~ 2000 年土地利用变化情况监测

Table 1 Change of land use in study area from 1980 to 2000

年代	土地利用率/%						
	耕地	林地	草地	建筑物	水体	未利用地	总数
20 世纪 80 年代	25.85	25.75	40.76	0.27	1.02	6.35	100
20 世纪 90 年代	27.49	28.50	34.01	1.42	1.87	6.71	100
2000 年后	26.33	31.67	28.86	3.97	2.33	6.84	100

收稿日期:2009-04-08
基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(40830639).
作者简介:张友静(1955—),男,上海人,教授,主要从事遥感方法与应用研究.

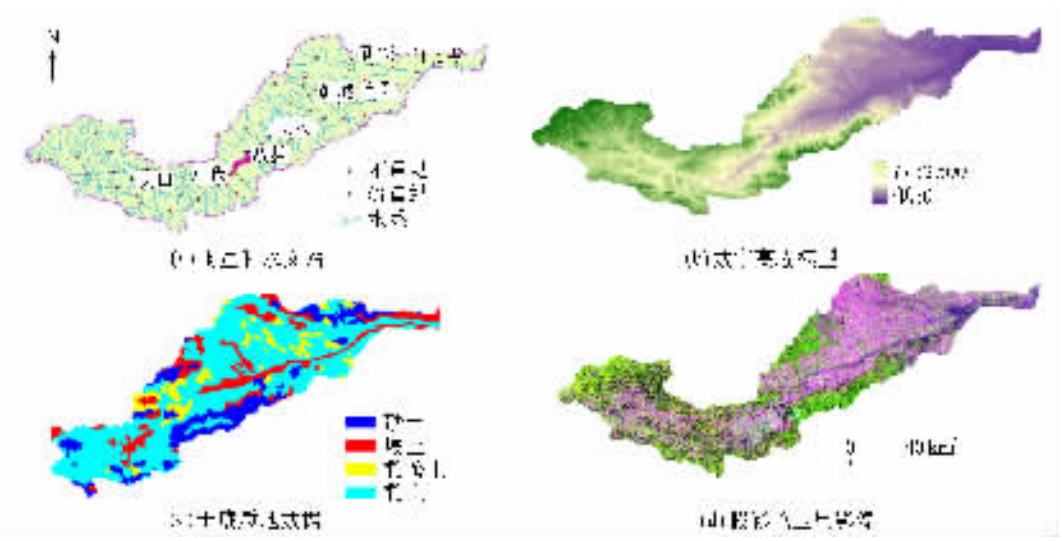


图1 研究流域下垫面相关的数据

Fig. 1 Data of underlying surface in study basin

2 HRI构建与分析

2.1 HRI构建

流域下垫面的特征决定流域单元对降水输入的响应.流域下垫面的特征可从两方面描述:流域形态结构和物质组成特征.TOPMODEL采用地形指数的空间分布来反映流域水分亏缺的空间分布,并假定流域内具有同一地形指数的区域具有水文相似性,但较少考虑单元的物质组成特征.CN值在SCS模型中是用于描述降雨-径流关系的参数,反映了流域下垫面单元的产流能力.CN值受到多方面因素影响,土壤类型以及地表土地利用覆盖状况是CN值2个决定性参数.本文采用改进的多流向法计算地形指数,并在综合分析流域土地利用类型、土壤质地特征和土壤前期湿润条件下,确定适用于所研究流域的CN值,具体的过程参见有关文献[1-2].

根据TOPMODEL模型中TI和SCS模型中CN值的物理意义,构建单元的水分响应指数HRI.该指数不仅充分考虑了土地利用类型、土壤类型、植被覆盖等对水文循环的影响,同时还考虑了地形的影响.水分响应指数的计算方法如下[2-3]:

$$\beta_{HRI} = (\beta_{TI}\beta_{CN})^{\alpha} \tag{1}$$

式中:β_{HRI}——水分响应指数;β_{TI}——地形指数;α——经验指数,与区域水热条件有关.本文α取1/2.研究区流域TI值,CN值和HRI值的计算结果如图2所示.

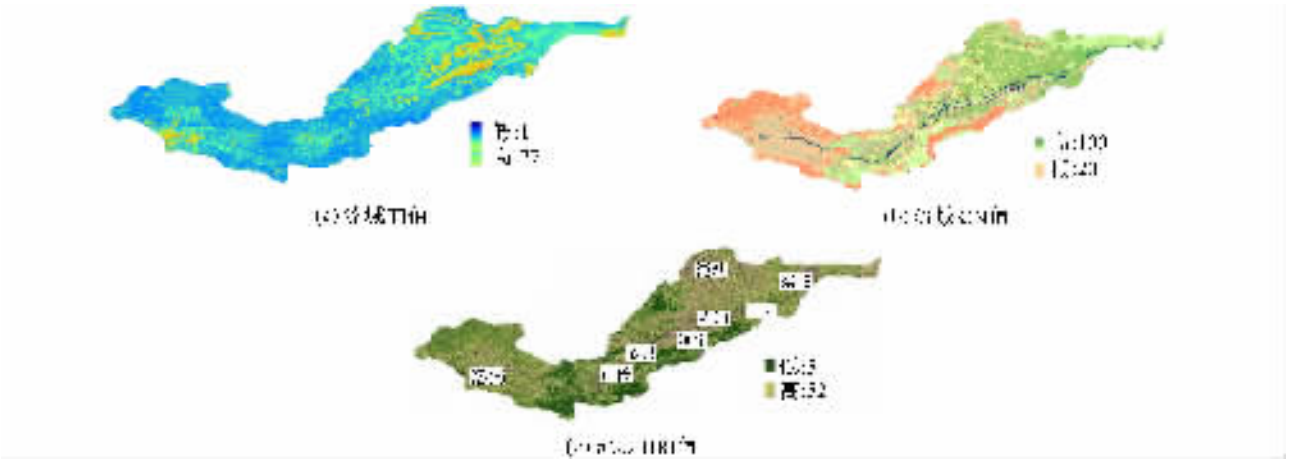


图2 洛河流域TI值,CN值和HRI值分布

Fig. 1 Distribution of topographic index, curve number and HRI in Luohe River basin

2.2　HRI 地学意义分析

HRI 是一个量纲为 1 的指数，其作用在于定量描述流域的地理特征，提取 HRU，并为水文模型参数资料缺乏地区移用提供定量依据．对比图 1 ~ 3 可见，HRI 与地形和土地覆盖等地理特征具有较强的一致性．如城市区域具有较高的 HRI 值，而覆盖良好的山区则具有较低值，从而反映了单元产流特征．为了进一步分析 HRI 的地学意义，建立了 HRI 与流域主要地表特征参数的关系，如图 3 所示．由图 3 可见，HRU 的地表特征参数与 HRI 具有良好的相关关系．其中，HRI 与 NDVI 的相关系数接近 0.9，与地表蒸散发量的相关系数达到 0.75．统计分析表明，HRI 可以较好地反映地表的蓄水或产流能力．

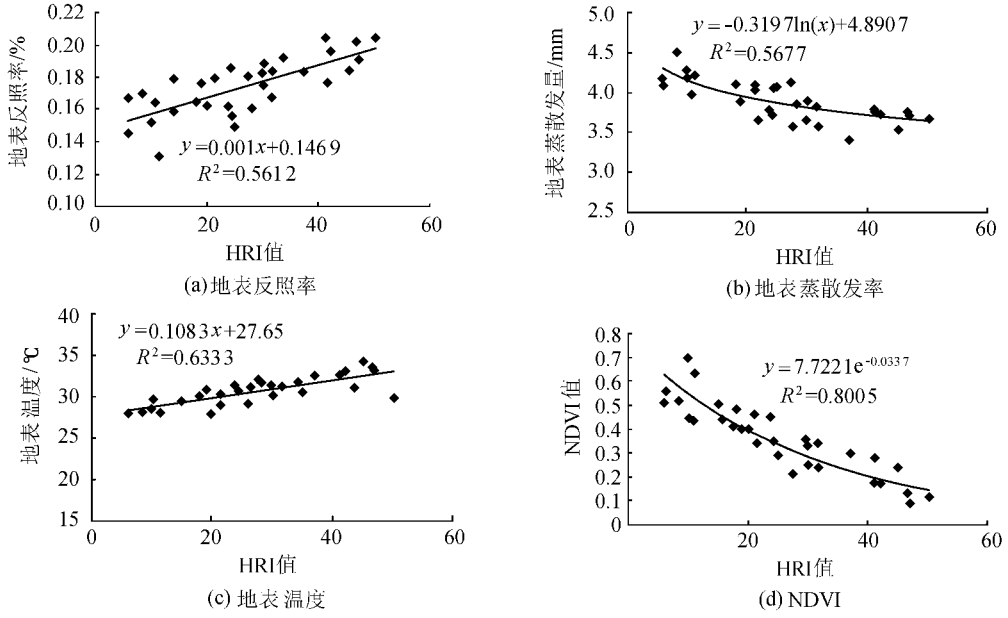


图 3　HRI 与地表参数关系

Fig. 3　Relationship between HRI and geographical parameters

2.3　流域水分响应单元提取

对于结构复杂的流域，每个子流域内部也存在着多种土地利用方式和土壤类型的组合，并具有对降水的不同水文响应．利用 HRI，强调植被对单元产流的影响，利用空间分析方法对 HRI 和 VI（植被指数）进行叠加分析，并统计分析新生成的多边形的属性特性．按照确定的地理指标，对叠置后产生的具有不同属性的多边形进行重新分类或分级，其过程和 HRU 分布如图 4 所示．

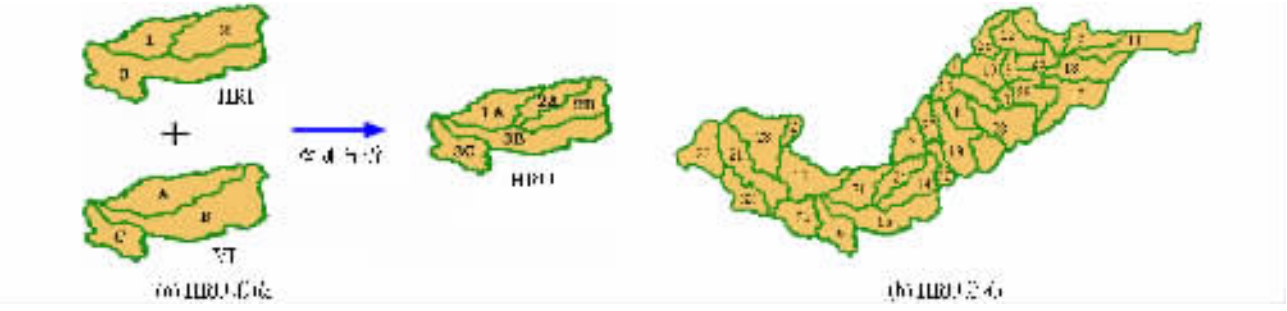


图 4　HRU 形成过程与分布

Fig. 4　Forming process and distribution of hydrological response units

2.4　TOPMODEL 参数率定与检验

采用试错法率定 TOPMODEL 模型参数．由于该研究区只设 8 个流量站，因此，本文首先利用 20 场次洪水资料率定出每个流量站控制的子流域参数，然后统计每个子流域和 HRU 的 HRI 均值．对于不在流量站控制范围内的子流域或 HRU，采用平均方法求得各单元的模型参数．

以洛河流域内的灵口子流域为检验流域，流域参数包括离散化后得到的 7 个 HRU 和率定后的参数．10 场洪水的洪峰流量、峰现时间误差的统计如表2所示．由表2可见，10场洪水洪峰流量的平均模拟相对误差

只有0.25%,最大误差为8.4%,且具有较高的确定性.因此,率定的单元模型参数具有较高的可靠性.

为了得到各水文响应单元的模型参数值,首先应判断出与所求单元HRI值最接近的2个子流域,然后以这2个子流域或HRU参数的平均值作为HRU的参数值.由此可求出每个HRU的模型参数[4].

表2 验证阶段洪峰流量相对误差,峰现时间误差

Table 2 Relative errors of peak flood discharge and time at validation stage

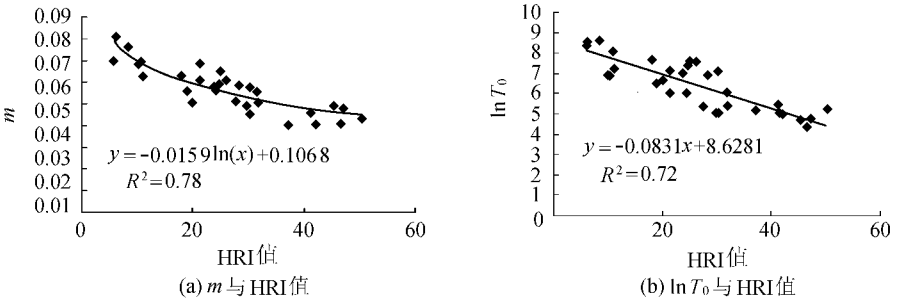
洪号	模拟洪峰流量 Q_{mc}/(m³·s⁻¹)	实测 t 时洪峰流量 Q_{mo}/(m³·s⁻¹)	洪峰流量相对误差 D_q/%	峰现时误差 D_t/h
800701	810.24	760.13	-6.59	0
820629	740.32	808.13	8.39	-1
830729	1820.06	1720.62	-5.77	-2
830816	450.64	420.67	-7.12	0
840908	810.20	880.32	7.96	+1
850912	1500.24	1420.37	-5.62	-1
880519	3410.05	3520.19	3.12	+3
890710	1350.71	1300.23	-3.88	+1
980804	850.16	920.47	7.63	+1
990729	1301.24	1361.38	4.41	0
均值	1304.39	1311.25	0.25	0.2

3 模型参数的区域化方法与验证

Bastola等[5]将参数区域化归纳为3种方法:空间近似,地学推理和统计方法.其中,将模型参数与流域特征相关是一种广泛应用的方法.该方法基于相似性原理,采用相似性准则,将率定的模型参数移用到资料缺乏地区.研究[6](包括回归方法和人工神经网络方法等)已经证实该方法的可行性[7].但上述研究通常使用单个流域变量或它们的组合与模型参数建立统计关系[8-12].由于单变量不能完全表达模型参数的内涵,这样变量的组合会失去地学意义,因此,对流域特征的描述必须建立在HRU的基础上,以减小空间异质性的影响.同时,还需具备描述径流形成的能力.本文应用HRI分析单元尺度上的地学特征与模型参数的关系以及参数区域化的方法.

3.1 HRI与TOPMODEL参数 m 和 $\ln T_0$ 关系

TOPMODEL模型中的参数 m 是指土壤下渗率呈指数衰减的速率.它与土壤下渗率成正比.对于高植被覆盖的地区,HRI值相对较小,有利于土壤的下渗;对于城镇地区,由于不透水面面积增大,容易形成产流,HRI值也相对较大.$\ln T_0$ 为土壤刚达到饱和时有效下渗率自然对数的流域均值.该参数较为敏感,一般为5~10.在实际工作中,很难通过试验获得点的 $\ln T_0$ 值.利用每个HRU的边界矢量图对HRI分布图进行掩模,从而得到每个HRU的平均HRI,并与单元模型参数 m 和 $\ln T_0$ 进行相关分析,反演得到的结果如图5所示.



(a) m 与HRI值 (b) $\ln T_0$ 与HRI值

图5 参数 m,$\ln T_0$ 与HRI关系

Fig. 5 Relationship among m, $\ln T_0$ and HRI

土壤下渗率参数 m 与HRI值呈对数衰减关系,相关系数 $R^2=0.78$.究其原因,HRI大的地方多为植被覆盖率较低,土壤下渗率相对较小,而 m 与下渗率成正比,故其土壤下渗率参数较小;通常有植被的地区,植物根系改良土壤的作用使土壤孔隙状况明显改善,从而增加了下渗速度和下渗量.从图5还可以看出,$\ln T_0$ 随着HRI的增加而呈线性减少,其相关系数 $R^2=0.72$.究其原因,主要是由于HRI的增大,其产流能力也相应增大,从而增加饱和坡面流在产流机制中的比率,使得洪峰值偏大.

3.2 单元植被参数与TOPMODEL参数 SR_{max} 和 SR_0 关系

SR_{max} 为根带最大蓄水能力指标,与植被的覆盖率和土壤质地有关.根带土壤饱和缺水量 SR_0 是TOPMODEL模型中表征蒸散发的1个参数.利用遥感数据计算NDVI值和植被覆盖率,并分别建立回归关系,得到回归关系和反演的 SR_{max} 分布图,如图6所示.

由图6(a)可见,SR_{max} 与植被覆盖率有显著的关系,随着植被覆盖率的增大而增大,二者呈线性增长关系,相关系数 $R^2=0.80$.这表明,植被覆盖率大的地区植被茂盛,腐殖质厚,则根系形成的土壤孔隙大,故根带最大蓄水能力也较大.由图6(a)可知,洛河流域卢氏水文站以上流域的 SR_{max} 相对较大,主要是由于该地

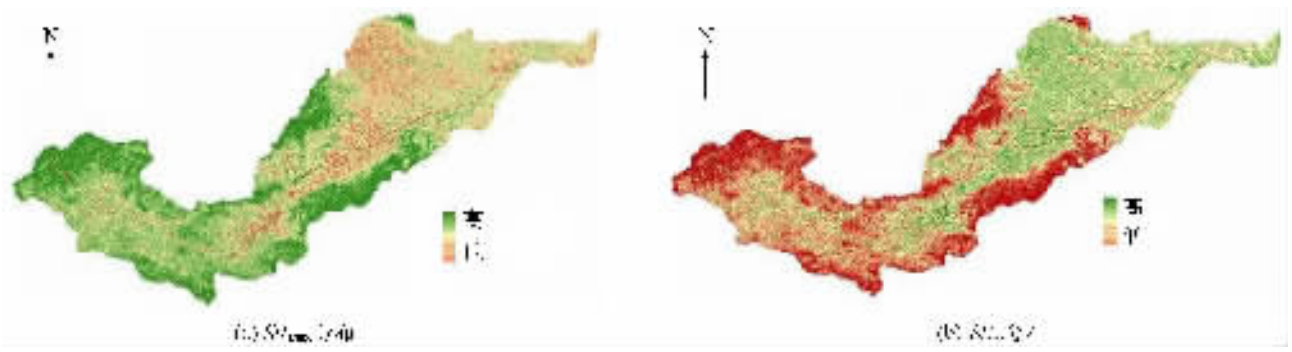


图 6　反演参数 SR_{max} 和 SR_0 的空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of back parameters SR_{max} and SR_0

区植被覆盖率较大，故其根带最大蓄水能力较大．而卢氏下游地区多为城镇，植被覆盖率较低，城镇不透水面面积增大，从而蓄水能力偏低．

根带土壤饱和缺水量 SR_0 是 TOPMODEL 模型中表征蒸散发的 1 个参数．在 TOPMODEL 模型中饱和面上水分以完全蒸发能力蒸发．在其他参数相同的情况下，SR_0 随着蒸散发的增大而减小．许多研究表明，植被蒸散发与 NDVI 呈强烈的正相关，随着 NDVI 值的增大而增大．因此，SR_0 会随着 NDVI 的增大而减少，二者成对数递减关系，其相关系数 $R^2 = 0.75$，其空间分布见图 6(b)．

3.3　反演模型参数的验证

为了验证反演模型参数在资料缺乏地区的可靠性，将人工率定的参数作为真值．将上述用相关关系反演出的模型参数值与人工率定的参数值进行对比分析，考察参数值本身的误差和由模型模拟出的结果误差．选取长水子流域作为验证流域，该流域内分别设有 9 个雨量站．利用上述统计关系反演的模型参数与人工率定参数的差值见表 3．由表 3 可见，反演模型参数的相对误差在人工率定参数均值的 10% 之内，因此，参数反演的结果是可靠的．将人工率定参数组中的 m，$\ln T_0$，SR_{max}，SR_0 由反演参数替代，对长水子流域进行模拟计算．表 4 为长水流域 8 次洪水模拟误差统计结果．

表 3　验证长水子流域反演参数与人工率定参数的差值

Table 3　Differences of calibrated and derived parameters for Changshui sub-basin

m	SR_{max}	R_v	$\ln T_0$	SR_0
0.004	−0.005	100	−0.58	0.0004

表 4　验证长水子流域径流模拟误差

Table 4　Errors of runoff simulation in testing Changshui sub-basin

洪号	人工率定的模型参数对应的模拟结果			反演模型参数替代后的模拟结果		
	确定性系数	洪峰相对误差/%	Δt/h	确定性系数	洪峰相对误差/%	Δt/h
820731	0.8541	−8.67	−2	0.8619	−9.04	−1
830729	0.8150	10.82	+1	0.8079	10.21	+2
831003	0.9013	−4.61	0	0.9106	−3.94	−1
850912	0.7963	−12.64	+1	0.7908	−11.56	0
850914	0.7794	11.38	−3	0.7681	12.52	−4
870215	0.8723	8.91	0	0.8813	8.76	+1
880519	0.8817	−8.98	+2	0.8675	−10.28	0
890710	0.8045	10.83	−3	0.8079	10.80	−3
均值	0.8380	0.88	−0.5	0.8370	0.93	−0.75

注：Δt 中 + 代表模拟洪峰提前，− 代表滞后．

由表 4 可见，2 组模型参数模拟的结果十分接近，确定性系数都在 0.83 以上．试验结果表明，本文提出的模型参数区域化方法是可靠的，可以应用于无资料地区．

4　结　　语

研究结果表明，HRI 具有一定的地学意义，可作为描述器刻画流域单元的地学特征，并可用于提取 HRU．根据洛河流域的试验结果，HRI 结合遥感技术还可以用于 TOPMODEL 关键参数的区域化分析．这不仅有助于流域的空间离散化方法的研究，参数区域化的统计分析也有助于资料缺乏地区径流时空模拟和水资源精细

化管理.

参考文献:

[1] 俞冰.土地利用变化及其对径流的影响[D]. 南京:河海大学,2007.

[2] 陈波.洛河流域空间离散化及径流模拟研究[D]. 南京:河海大学,2008.

[3] QUINN P F,BEVEN K J,LAMB R. The ln(α/tan β) index:how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework[J]. Hydrological Processes,1994,9:161-185.

[4] 靳晓莉,张奇,许崇育. 一个概念性水文模型的参数区域化研究:以东江流域为例[J]. 湖泊科学,2008,20(6):723-732.(JIN Xiao-li,ZHANG Qi,XU Chong-yu. Regionalization study of a conceptual hydrological model in the Donjiang Basin[J]. Journal of Lake Science,2008,20(6):723-732.(in Chinese))

[5] BASTOLA S,ISHIDAIRA I,TAKEUCHI K. Regionalisation of hydrological model parameters under parameter uncertainty:a case study involving TOPMODEL and basins across the globe[J]. Journal of Hydrology,2008,357:188-206.

[6] KLING H,NACHTNEBEL H P. A method for the regional estimation of runoff separation parameters for hydrological modelling[J]. Journal of Hydrology,2009,364:163-174.

[7] LEE H,MCINTYRE N,WHEATER H,et al. Selection of conceptual models for regionalization of the rainfall-runoff relationship[J]. Journal of Hydrology,2005,312:125-147.

[8] HEUYELMANS G,MUYS B,FEYEN J. Regionalisation of the parameters of a hydrological model:comparison of linear regression models with artificial neural nets[J]. Journal of Hydrology,2006,319:245-260.

[9] BERGER K P,ENTEKHABI D. Basin hydrological response relations to distributed physiographic descriptors and climate[J]. Journal of Hydrology,2001,247:169-182.

[10] SEFTON C E M,HOWARTH S M. Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales[J]. Journal of Hydrology,1998,211:1-16.

[11] XU C Y. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to a large area in central Sweden[J]. Hydrol Earth System Science,2003,7:317-324.

[12] RAGAN R M,ASCE M,THOMAS T J,et al. Runoff synthesis using Landsat and SCS model[J]. Journal of the Hydraulics Division,1980,106(5):667-678.

Application of hydrological response index in regionalization of TOPMODEL parameters

ZHANG You-jing[1,2], CHEN Bo[2], HE Chuan[2], HAO Zhen-chun[1]

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*;
2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: A hydrological response index (HRI) describing the characteristics of land surface components of a basin was put forward. HRI was composed of the topographic index of TOPMODEL and the curve number of SCS model. The Luohe River basin in the middle reaches of Yellow River was taken as a study case, and its HRI was established by use of GIS and remote sensing techniques. Based on the analysis of its geographical significance, hydrological response units of the basin were extracted. The model parameters were calibrated by TOPMODEL, and the relationship between HRI and the key model parameters was yielded. The back parameters derived from the relationship was employed to verify the runoff simulation of the basin. Satisfactory results were achieved. The test results show that the proposed HRI can be applied to the spatial discretization of basins and the regionalization of hydrological model parameters, and it provides a new method for the utilization of hydrological model parameters in the regions with sparse data.

Key words: hydrological response index; parameter regionalization; TOPMODEL; region with sparse data; remote sensing technique