

一种通过地形指数提取流域自由水蓄水容量空间分布的方法^{*}

童冰星, 姚 成, 李致家, 黄小祥

(河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘 要: 对于分布式水文模型而言, 如何获得参数的空间分布是模型应用的重点和难点问题. 本文将分水源参数中的敏感参数——自由水蓄水容量为研究对象. 建立地形指数与自由水蓄水容量的函数关系, 以此提取流域内的自由水蓄水容量空间分布. 最后利用本方法提取了陕西省陈河流域的自由水蓄水容量空间分布, 并将之作为栅格型新安江模型的参数进行洪水模拟演算. 应用结果表明本文提出的方法得到了理想的模拟结果. 该方法以物理规律为基础能较为准确地计算出流域内自由水蓄水容量的空间分布, 为分布式模型的发展奠定了坚实的基础.

关键词: 参数的空间分布; 自由水蓄水容量; 地形指数; 分布式水文模型; 新安江模型; 陈河流域

A method to obtain the spatial distribution of free water storage capacity based on topographic index

TONG Bingxing, YAO Cheng, LI Zhijia & HUANG Xiaoxiang

(College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: Obtaining the spatial distribution of free water storage capacity is a significant matter for distributed hydrological model. In this paper, the free water storage capacity, a parameter that has a significant effect on the simulation results of model, was selected as a research object. We have established the function relationship between topographic index and free water storage capacity to get the spatial distribution of free water storage capacity. And then this method has been applied in Chenhe Catchment which is located in Shanxi Province. Its spatial distribution of free water storage capacity could be derived by the method. A distributed model, Grid-Xin'anjiang model, is obtained based on the spatial distribution of free water storage capacity. Application of the model to the Chenhe Catchment in Shanxi Province shows that this method is effective. This method, based on the laws of physic, can calculate the spatial distribution of free water storage capacity with higher accuracy. Thus, it provides a solid basis for development of a distributed model.

Keywords: Spatial distribution parameters; free water storage capacity; topographic index; distributed hydrological model; Xin'anjiang model; Chenhe Catchment

在水文模型的发展过程中^[1-4], 1970s 以来, 分布式流域水文模型^[5-10]被相继提出, 模型的结构与参数的物理意义越来越明确. 通常, 如果一个模型是建立在对于水文过程物理原理的理解上, 并且水文过程能够控制流域响应, 那么它就可以被认为是基于物理的模型^[11-12].

随着遥感、地理信息以及数字流域等技术的发展, 基于栅格数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的分布式水文模型以其充分考虑降雨和下垫面条件空间变化的特点, 已成为流域水文模型的发展趋势^[13-14]. 在分布式水文模型建模时, 其主要难点在于如何获取模型参数的空间分布^[15-19]. 石朋等在地形指数的基础上将新安江模型中率定出的张力水蓄水容量曲线视为一种统计上的已知量, 采用同比例的方法进行分析^[20]. 在蓄水容量曲线和地形指数曲线上采样, 选择同比例下的 W_i/W_{mm} 与 T_i-T_{min} 点绘成线 (图 1), 并进一步指出可以通过维布尔曲线来表现流域张力水蓄水容量与地形指数之间的关系, 并给出了它们之间

^{*} 国家自然科学基金项目 (51679061, 41130639)、国家重点研发计划项目 (2016YFC0402705)、水利部公益性行业科研专项 (201501022) 和中央高校基本科研业务费专项 (2016B04714) 联合资助. 2016-09-25 收稿; 2017-01-10 收修改稿. 童冰星 (1994~), 男, 硕士研究生; E-mail: 1803592975@qq.com.

的函数方程,这样依据地形指数栅格就能求解出流域内张力水蓄水容量的分布。

新安江模型^[21-23]在三水源划分中借鉴了山坡水文学的概念,引入了自由水蓄水库来解决水源划分的问题,其自由水蓄水库的高度即为自由水蓄水容量(S_m)。自由水蓄水容量是国内进行产流计算与水源划分中关键的参数,而对于 S_m 而言, S_m/S_{mm} 与 T_i-T_{imin} 之间却没有表现出规则的曲线关系(图2)。然而由邹亮等在浙江湍口小流域所做的实验表明地形指数大的地方,汇流面积大,坡度平缓,通常土壤厚度大,且植被茂盛^[24]。而同时姜文军等的研究发现在土壤厚度、坡度、植被覆盖以及高程等各种因子中,土壤腐殖质厚度与土壤厚度的联系最为紧密^[25],且通常土壤腐殖质厚度大的地方自由水蓄水容量也大。这就说明了地形指数与自由水蓄水容量在物理机制上有着密不可分的联系。

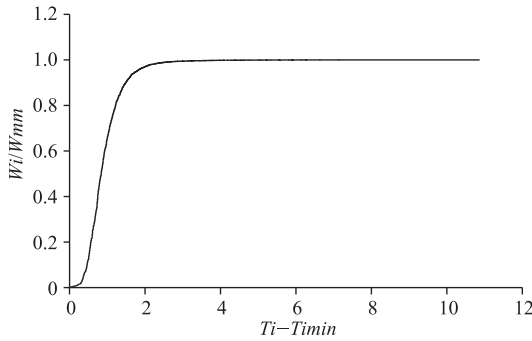


图1 地形指数-张力水蓄水容量的对应关系

Fig.1 Relationship between topographic index and soil moisture storage capacity

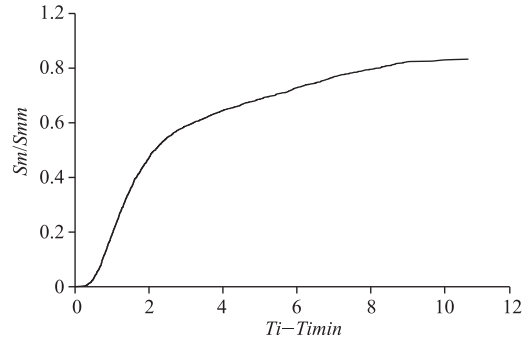


图2 地形指数-自由蓄水容量的对应关系

Fig.2 Relationship between topographic index and free water storage capacity

1 自由水蓄水容量的空间分布

流域汇流过程除了受控于降水特性外,还与流域下垫面的地形地貌条件存在着明显的因果关系,这为用下垫面特征来推求水文模型参数提供了可能。石朋等^[20]在探究地形指数同蓄水容量之间的定量关系时发现流域张力水蓄水容量曲线与地形指数曲线之间服从位移量为零的对数维布尔分布曲线,其曲线的方程为:

$$\frac{W_i}{W_{mm}} = \exp \left\{ - \left[\frac{\ln(T_i - T_{imin} + 1)}{\alpha} \right]^\beta \right\} \quad (1)$$

式中, W_i 是单个网格张力水蓄水容量, W_{mm} 是流域最大张力水蓄水容量, T_i 为网格地形指数值, T_{imin} 为流域最小地形指数值, α 为反映网格大小的尺度参数, β 为形状参数。

在蓄满产流的概念中采用流域张力水蓄水容量曲线来考虑土壤含水量分布不均的问题,对于闭合的流域,流域张力水蓄水容量曲线采用抛物线形为宜,可以用公式(2)表示:

$$a = 1 - \left(1 - \frac{W_i}{W_{mm}} \right)^b \quad (2)$$

式中, a 是流域中小于等于 W_i 的面积比例, b 为张力水蓄水容量曲线方次。

联立公式(1)与公式(2)可以求出流域地形指数曲线的函数方程式:

$$\ln(T_i - T_{imin} + 1) = \alpha \{ -\ln[1 - (1 - a)^{1/b}] \}^{1/\beta} \quad (3)$$

三水源水源划分时采用与流域张力水蓄水容量曲线相类似的方法来考虑流域内自由水蓄水容量分布不均的问题,类似于公式(2),流域自由水蓄水容量公式为:

$$a = 1 - \left(1 - \frac{S_i}{S_{mm}} \right)^{EX} \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(5)中可以求解出地形指数与自由水蓄水容量之间的函数关系式为:

$$1 - \frac{Si}{Smm} = \left\{ 1 - \exp \left[- \left[\frac{1}{\alpha} \ln(Ti - Timin + 1) \right]^\beta \right] \right\}^{b/EX} \quad (5)$$

式中, Si 是单个网格自由水蓄水容量, Smm 是流域最大自由水蓄水容量, EX 为自由水蓄水容量方次。

由公式(5)所给出的函数关系便可以由流域地形指数栅格得到流域自由水蓄水容量栅格, 从而通过地形指数提取流域自由水蓄水容量的空间分布。

2 研究流域概况

本文选择陕西省陈河流域作为研究流域(图3)。陈河流域面积 1490 km², 地处秦岭北麓, 为秦岭褶皱带, 上游大部分为高中山区, 海拔高程 700~3500 m, 山势雄伟峰谷相间, 地形破碎, 山坡多为凹凸坡, 仅在分水岭一带分布有直线坡。流域内较大的河流有大莽河、板房子河、虎豹河、王家河, 河系呈扇形排列。该流域位于北温带, 属大陆性季风气候, 多年平均降水量 700~900 mm, 河流水量主要系雨水补给, 局部暴雨是发生洪水的主要原因。流域平均径流深度 100~500 mm, 径流系数 0.2~0.5, 为相对较高产流区, 侵蚀模数 100~200 t/km²。流域属暖温带落叶阔叶林及针阔混合林带, 林相的垂直分布规律比较明显, 流域森林覆盖率为 82%。流域在地质构造上属北秦岭褶皱带, 主要建造岩为变质混合岩类, 花岗岩体也有零星分布。土壤分布由下到上有黄褐土、褐土、褐棕壤、高山草甸土。由于母岩的风化, 流域表层有沙性土壤分布^[26-27]。

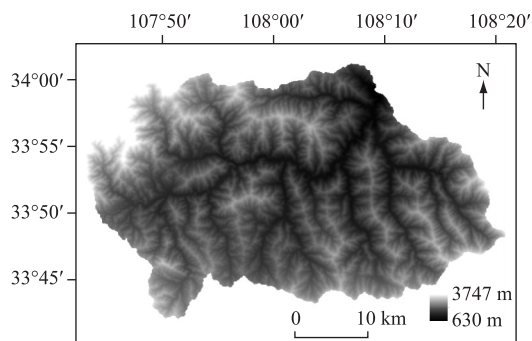


图3 陈河流域 DEM 图

Fig.3 DEM of Chenhe Catchment

3 算例

公式(5)的主要作用是用已知空间分布的地形指数来提取流域上自由水蓄水容量的空间分布。在具体的应用过程中, 式中的 $Ti - Timin$ 项可以通过流域 DEM 计算得到。在集总式模型率定出的流域蓄水量曲线与自由水蓄水容量曲线作为已知的条件下, Smm 、 b 和 EX 均为已知量。公式(5)中剩下的两个参数 α 与 β 可以通过计算出的流域自由水蓄水容量曲线与已知的自由水蓄水容量曲线的拟合(图4)而率定出来。

本文利用从地理空间数据云下载的 90 m 分辨率的 DEM 数据提取陈河流域的自由水蓄水容量空间分布栅格, 并结合陈河流域中 2003—2012 年间的 17 场洪水资料进行流域洪水模拟计算。通过计算结果与实测流量资料的比较来验证该方法是否实用、准确。本文所选择的模型为栅格新安江模型^[24, 28-30], 该模型将流域划分为若干个小的栅格单元, 在每一个栅格单元上借鉴新安江模型的方法利用蓄满产流模式进行产流计算, 计算出每个栅格的产流之后依照一定的汇流次序采用马斯京根法或者是水力学的方法逐栅格汇流到流域出口位置。栅格新安江模型可以把流域自由水蓄水容量栅格等栅格资料直接作为模型的输入。

将公式(5)与公式(1)计算得到的流域自由水蓄水容量分布栅格(图5)和张力水蓄水容量栅格作为栅格新安江模型的输入参数。对于其余分布式的参数如流域内的植被栅格, 土壤覆盖栅格等采用地理信息系统工具提取得到; 对于集总式参数如河网蓄水消退系数(CS)和地下水消退系数(CG)等结合洪水资料率定得到。由此进行流域洪水演算, 并将之与实测流量资料作比较(表1)。

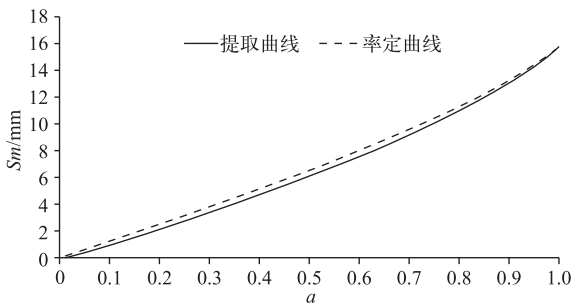


图 4 计算与率定的自由水累计曲线比较
Fig.4 Comparison between simulated summation curve of free water storage capacity and calibrated summation curve of free water storage capacity

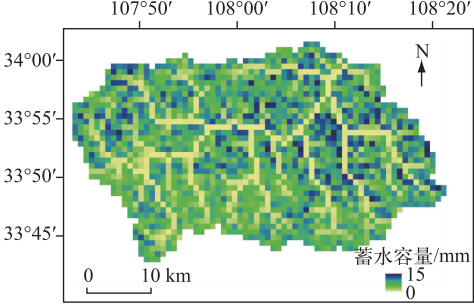


图 5 陈河流域自由水蓄水容量分布
Fig.5 Spatial distribution of free water storage capacity in Chenhe Catchment

表 1 次洪模拟结果

Tab.1 Results of flood simulation

	洪水编号	降雨/ mm	实测径流/ mm	计算径流/ mm	径流深 误差/%	实测洪峰/ (m^3/s)	计算洪峰/ (m^3/s)	洪峰误差/ %	峰现时间 误差/h	确定性 系数
率定	2003082622	140.10	89.37	106.72	19.41	628	713	13.46	1	0.75
	2003090319	68.13	67.47	61.88	-8.29	740	658	-11.06	-1	0.96
	2011080301	44.20	36.91	42.56	-5.65	390	433	-11.00	0	0.88
	2005070106	94.00	40.57	36.30	4.27	373	310	16.90	-1	0.81
	2010072101	85.62	53.63	67.84	26.50	623	638	2.40	0	0.82
	2006090308	27.30	20.01	21.34	-1.33	328	267	18.50	-2	0.81
	2011091520	123.33	110.36	88.42	-19.88	1200	1102	-8.17	-1	0.82
	2009081814	51.50	39.04	34.97	4.07	267	245	8.20	-3	0.71
	2010071508	40.70	16.05	15.05	0.99	198	183	7.70	-2	0.93
验证	2005092520	232.38	175.64	205.43	17.14	1740	1624	-6.69	3	0.64
	2010081820	71.63	29.21	32.24	9.99	647	697	7.74	-1	0.66
	2010082218	55.89	52.59	62.75	19.33	585	582	-0.53	-1	0.91
	2003091711	100.55	76.52	86.01	12.4	694	767	10.55	-2	0.87
	2011091008	68.16	57.61	61.61	6.93	865	770	-10.96	2	0.93
	2008071909	97.48	27.53	31.85	15.69	618	605	-2.03	3	0.62
	2012070720	67.40	33.09	39.89	-6.81	386	374	3.10	-2	0.83
	2012083013	133.76	84.75	74.28	-12.34	1710	1417	-17.13	1	0.90

依据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)的要求,在陈河流域 2003—2012 年间的 17 场洪水中,用于率定的有 9 场洪水,用于验证的有 8 场洪水(表 1)。

用于率定的 9 场洪水中:8 场洪水径流深相对误差 $<20\%$,平均模拟径流深相对误差为 10.04%;9 场洪水洪峰相对误差 $<20\%$,模拟洪峰合格率为 100%,平均模拟洪峰相对误差为 10.82%;9 场洪水的确定性系数 >0.6 ,其中 ≥ 0.9 的有 2 场; $0.7 \leq$ 确定性系数 <0.9 的有 7 场。

用于验证的 8 场洪水中:8 场洪水径流深相对误差 $<20\%$,平均模拟径流深相对误差为 12.57%;8 场洪水洪峰相对误差 $<20\%$,模拟洪峰合格率为 100%,平均模拟洪峰相对误差为 7.34%;8 场洪水的确定性系数 >0.6 ,其中 ≥ 0.9 的有 3 场, $0.7 \leq$ 确定性系数 <0.9 的有 2 场。

对于用于验证计算的 8 场洪水,将栅格新安江模型计算的结果与传统的新安江模型计算的结果作比

较,结果表明:采用了本文提取出来的自由水蓄水容量作为输入的栅格新安江模型计算出来的结果,无论是在洪峰误差、峰现时间误差,还是在确定性系数方面整体上,均优于传统的新安江模型计算得到的结果(表2)。

表 2 验证结果对比

Tab.2 Comparison between calculation of Grid-Xin'anjiang model and Xin'anjiang model

洪水编号	栅格新安江模型			新安江模型		
	洪峰误差/%	峰现时间误差/h	确定性系数	洪峰误差/%	峰现时间误差/h	确定性系数
2005092520	-6.7	3	0.64	15.0	-4	0.63
2010081820	7.7	-1	0.66	11.1	-3	0.68
2010082218	-0.5	-1	0.91	4.9	2	0.89
2003091711	10.6	-2	0.87	1.2	0	0.80
2011091008	-11.0	2	0.93	18.1	-3	0.90
2011091520	-2.0	3	0.62	13.3	1	0.95
2008071909	3.1	-2	0.83	17.7	-2	0.82
2012083013	-17.1	1	0.90	34.9	-4	0.80

由表 1、2 以及图 6 可见,次洪模拟效果理想、准确。本文所提出的方法可以合理可靠地计算出流域自由水蓄水容量的空间分布。

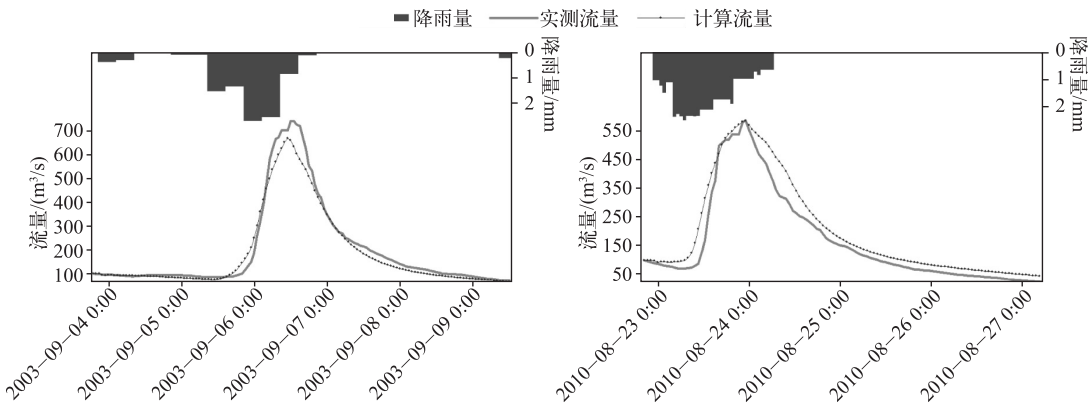


图 6 2003090319 号洪水和 2010082218 号洪水

Fig.6 Simulated result and measured result of flood in September 3-9, 2003 and August 22-27, 2010

4 结论与展望

本文中所提出方法的核心思想是:通过确定每个栅格点上自由水蓄水容量与地形指数的函数关系,利用已知空间分布的地形指数提取出自由水蓄水容量在流域上的空间分布。

验证本文中提出的公式时将本方法计算得到的自由水蓄水容量栅格作为栅格新安江模型的输入,计算陈河流域 2003—2012 年间的 17 场洪水,在径流深、洪峰和峰现时间这 3 个方面与实测资料作比较之后发现模拟结果准确,从而说明了本文所提出的方法实用有效,可以得到流域内自由水蓄水容量的合理分布,为栅格水文模型的应用提供了一个可靠的输入条件。

但是,流域自由水蓄水容量空间分布的确定是关键,也是难点,本文提取自由水蓄水容量的空间分布的方法也有不完善之处。准确的模拟效果并不能够说明流域内每一个栅格单元上自由水蓄水容量参数取值的准确性。因此提取自由水蓄水容量的空间分布仍是一个值得进一步探讨与研究的问题。

5 参考文献

- [1] Xu Zongxue. Hydrological models: past, present and future. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2010, **46**(3): 278-289. [徐宗学. 水文模型: 回顾与展望. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, **46**(3): 278-289.]
- [2] Rui Xiaofang, Jiang Chengyu, Zhang Jincun. Development of Watershed Hydrological models. *Journal of China Hydrology*, 2006, **26**(3): 23-26. [芮孝芳, 蒋成煜, 张金存. 流域水文模型的发展. 水文, 2006, **26**(3): 23-26.]
- [4] Beven KJ. Uniqueness of place and the representation of hydrological processes. *Hydrol Earth System Sci*, 2000, **4**(2): 203-213.
- [5] Xu Zongxue, Cheng Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **41**(9): 1009-1017. [徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展. 水利学报, 2010, **41**(9): 1009-1017.]
- [6] Beven KJ. How far can we go in distributed hydrological modeling?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001, **5**(1): 1-12.
- [7] Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin Bulletin des Sciences Hydrologiques*, 1979, **14**(11): 1085-1099.
- [9] Beven KJ. Changing ideas in hydrology—The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 1983, **15**(2): 157-172.
- [10] Beven KJ. A discussion of distributed hydrological modelling. *Distributed Hydrological Modelling*, 1996, **22**(1): 255-278.
- [11] Song Xiaomeng, Zhan Chesheng, Xia Jun *et al.* An efficient global sensitivity analysis approach for distributed hydrological model. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **22**(2): 210-221. DOI: 10.1007/s11442-012-0922-5. [宋晓猛, 占车生, 夏军等. 分布式水文模型全局敏感性高效分析方法研究. 地理学报, 2012, **22**(2): 210-221.]
- [12] Zhang Jun'e, Lu Chuiyu, Qin Dayong *et al.* Regional “four-water” transformation based on distributed hydrological model. *Advances In Water Science*, **22**(5): 596-604. [张俊娥, 陆垂裕, 秦大庸等. 基于分布式水文模型的区域“四水”转化. 水科学进展, 2011, **22**(5): 596-604.]
- [13] Huang Qing, Zhang Wangchang. Influence of topographic index algorithm on runoff simulation of distributed hydrological model. *River Water Resources and Power*, 2008, **26**(6): 20-24. [黄晴, 张万昌. 地形指数算法设计对分布式水文模型径流模拟影响研究. 水电能源科学, 2008, **26**(6): 20-24.]
- [14] Xu Jing, Ren Liliang, Cheng Yuanhua *et al.* Topographic index calculation that is independent of the DEM spatial resolution. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2008, **48**(6): 984-990. [徐静, 任立良, 程媛华等. 不受 DEM 空间分辨率影响的地形指数计算. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(6): 984-990.]
- [15] Yong Bin, Zhang Wanchang, Chen Yanhua. A new algorithm of the topographic index $\ln(\alpha/\tan\beta)$ in TOPMODEL and its resultant analysis. *Geographical Research*, 2007, **26**(1): 38-45. [雍斌, 张万昌, 陈艳华. TOPMODEL 中地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 的新算法. 地理研究, 2007, **26**(1): 38-45.]
- [16] Yong Bing, Zhang Wanchang, Fu Congbing. Effects of the topographic index spatial scale transition for regional climate model analysis. *Progress in Natural Science*, 2007, **17**(3): 346-352. [雍斌, 张万昌, 符淙斌. 用于区域气候模式的地形指数空间尺度转换效果分析. 自然科学进展, 2007, **17**(3): 346-352.]
- [17] Xie Hehai, Huang Guoru. Some calculation methods for topographic index. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2006, **34**(1): 46-50. [解河海, 黄国如. 地形指数若干计算方法探讨. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, **34**(1): 46-50.]
- [18] Deng Peng, Li Zhijia, Xie Fan. Application of TOPMODEL in Buliu River catchment, Pearl River basin and comparison with Xin'anjiang model. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 442-444. DOI: 10.18307/2009.0320. [邓鹏, 李致家, 谢帆. TOPMODEL 在珠江流域布柳河流域的应用及其与新安江模型的比较. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 442-444.]
- [19] Zhong Li, Yao Cheng, Li Zhijia *et al.* Effect of land surface changes on design flood using Xin'anjiang-Haihe Model. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 975-982. DOI 10.18307/2015.0525. [钟栗, 姚成, 李致家等. 应用新安江-海河模型研究下垫面变化对设计洪水的影响. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 975-982.]
- [20] Shi Peng, Rui Xiaofang, Qu Simin *et al.* Calculating storage capacity with topographic index. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(2): 264-267. [石朋, 芮孝芳, 瞿思敏等. 一种通过地形指数计算流域蓄水容量的方法. 水科学进展,

- 2008, **19**(2): 264-267.]
- [21] Xin Penglei, Li Zhijia, Tang Jiahui *et al.* Parameter global optimization of the Xinanjiang model: A case of Yuetan Basin. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 626-634. DOI: 10.18307/2011.0420. [辛朋磊, 李致家, 汤嘉辉等. 新安江模型参数全局优化——以月潭流域为例. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 626-634.]
- [22] Li Zhijia, Bao hongjun, Kong Xiangguang. Flood routing and forecasting model of lake nansihu by coupling hydrological model with hydraulie models. *J Lake Sci*, 2005, **17**(4): 299-304. DOI: 10.18307/2005.0403. [李致家, 包红军, 孔祥光. 水文学与水力学相结合的南四湖洪水预报模型. 湖泊科学, 2005, **17**(4): 299-304.]
- [23] Hapuarachchi HAP, Li Zhijia, Wang Shouhui. Application of SCE-UA Method for calibrating the Xinanjiang Watershed Model. *J Lake Sci*, 2001, **13**(4): 305-314. DOI: 10.18307/2001.0404. [Hapuarachchi HAP, 李致家, 王寿辉. SCE-UA 方法在新安江模型参数优化中的应用. 湖泊科学, 2001, **13**(4): 305-314.]
- [24] Zou Liang, Zhang Xingnan, Dang Lei *et al.* Observation and analysis of hydrological underlying surface in Tuankou Basin. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(4): 19-22. [邹亮, 张行南, 党磊等. 湍口小流域水文下垫面要素调查与分析. 水电能源科学, 2015, **33**(4): 19-22.]
- [25] Jiang Wenjun, Zhu Xujia. Analysis of factors affecting soil humus thickness in natural Mongolian Quercus forest in Mudanjiang forest region. *Forestry Survey and Design*, 2008, (4): 80-82. [姜文军, 祝旭加. 牡丹江林区天然蒙古栎林土壤腐殖质厚度影响因子分析. 林业勘察设计, 2008, (4): 80-82.]
- [26] Lu Ling, Li Xin, Cheng Guodong. Analysis on the seasonal phenological characteristics of the Heihe River Basin with AVHRR NDVI Data Set. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(2): 188-191. [卢玲, 李新, 程国栋. 利用 NOAA-AVHRR 植被指数数据集分析黑河流域季候特征. 中国沙漠, 2002, **22**(2): 188-191.]
- [27] Wang Genxu, Wang Jian, Wu Yanqing. Features of eco-environmental changes in Heihe River Basin over recent 10 year. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, **22**(5): 528-533. [王根绪, 王建, 仵彦卿. 近 10 年来黑河流域生态环境变化特征分析. 地理科学, 2002, **22**(5): 528-533.]
- [28] Yao C. Improving the flood prediction capability of the Xinanjiang model in ungauged nested catchments by coupling it with the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**(19): 1035-1048.
- [29] Lia HX, Zhang YQ, Chiew FHS *et al.* Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinanjiang model with MODIS leaf area index. *Journal of Hydrology*, 2009, **370**(1): 155-162.
- [30] Yao Cheng, Ji Yiqiu, Li Zhijia *et al.* Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, **40**(1): 42-47. [姚成, 纪益秋, 李致家等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(1): 42-47.]