

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0137

蒋永健,陆颖,祁昌军,等.适用于分布式水文模拟的空间插值方法改进[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):69-74. JIANG Y J, LU Y, QI C J, et al. An improved spatial interpolation method for distributed hydrological simulation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 69-74. (in Chinese)

## 适用于分布式水文模拟的空间插值方法改进

蒋永健<sup>1</sup>, 陆颖<sup>1,2</sup>, 祁昌军<sup>3</sup>, 王海龙<sup>1</sup>, 袁旭<sup>1</sup>, 梁斯琦<sup>1</sup>

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500; 2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091; 3. 生态环境部 环境工程评估中心, 北京 100012)

**摘要:**降水数据是水文模型重要输入数据之一,雨量空间插值是获得面雨量数据的有效方法。改进现有雨量插值方法,获取较为精确的逐日连续面域降水数据,并以补远江流域为例对改进效果进行验证,将插值后得到的降水数据作为输入条件,基于 MIKE SHE 水文模型模拟补远江流域径流过程,分析改进后的插值方法所得降水数据对模型精度的提高效果。结果表明:利用改进插值方法(简称 IDW-Thiessen 插值法)得到的降水数据,在模型模拟径流过程中的效果优于利用 Thiessen 多边形获得的降水数据;在补远江流域这一研究案例中,利用 IDW-Thiessen 插值法得到的降水数据模拟补远江日径流,所得结果的纳什系数在率定期和验证期都超过 0.7,高于利用 Thiessen 多边形法得到的降水数据进行径流模拟结果的纳什系数;IDW-Thiessen 插值法与 Thiessen 多边形得到的径流模拟结果相比,年平均误差减少 10%,雨季模型模拟精度提高 6%,旱季模型模拟精度提高了 7%,模拟径流过程线与实测径流过程线更吻合。

**关键词:**插值;补远江;MIKE SHE 模型;降水数据;IDW-Thiessen

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### An improved spatial interpolation method for distributed hydrological simulation

JIANG Yongjian<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1,2</sup>, QI Changjun<sup>3</sup>, WANG Hailong<sup>1</sup>, YUAN Xu<sup>1</sup>, LIANG Siqi<sup>1</sup>

(1. Institute of International River and Ecological Safety, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Key Laboratory of International River and Cross-border Ecological Security, Kunming 650091, China;

3. Environmental Engineering Assessment Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Precipitation data is one of the important input data in the hydrological model. Spatial interpolation of rainfall is an effective method to obtain surface rainfall data. Therefore, it is very important to improve the existing rainfall interpolation methods to obtain more accurate continuous time series and surface precipitation data. MIKE SHE hydrological model was used to simulate the daily runoff using improved interpolated precipitation data to analyze the accuracy of the model in the Yuan Jiang basin. Results exhibited that the precipitation data obtained by the improved method (IDW-Thiessen interpolation method) was better than Thiessen polygon in the process of runoff simulation. Therefore, daily runoff process was carried out by using the precipitation data obtained by IDW-Thiessen interpolation method in the Bu Yuan Jiang basin. The Nash coefficients were higher than 0.7 during the calibration and validation periods compared to the Nash coefficients of the runoff simulation results ob-

收稿日期:2019-03-30 修回日期:2019-09-25 网络出版时间:2019-10-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191008.1412.008.html>

基金项目:云南省自然科学研究重点项目(2017FA021);国家重点研发计划(2016YFA0601601);华能澜沧江水电股份有限公司科研项目(NZDDC2018/D01)

作者简介:蒋永健(1995—),女,山东日照人,主要从事水文水资源研究。E-mail:jiangyongjian\_ynu@foxmail.com

通信作者:陆颖(1978—),男,云南昆明人,副研究员,博士,从事水文生态学研究。E-mail:yinglu@ynu.edu.cn

tained by Thiessen polygon method. The annual average error of IDW-Thiessen interpolation method was reduced by 10%, the simulation accuracy in the rainy season was improved by 6%, and the simulation accuracy in the dry season was improved by 7%, respectively. Results also revealed that simulated runoff was comparable with the measured runoff.

**Key words:** interpolation; Bu Yuan Jiang; MIKE SHE model; precipitation data; IDW-Thiessen interpolation method

降水时空分布是影响流域产汇流的主要因素,是分布式水文模型重要输入条件<sup>[1-3]</sup>。连续时间序列面域实测数据可为水文模拟提供必要数据支撑,获取这些数据的常用方法主要有:卫星及雷达观测技术,该方法采用遥感手段观测降水,但数据处理过程复杂且精度偏低,制约了分布式水文模型在特定区域的应用<sup>[4-6]</sup>;目前水文模型中多采用 Thiessen 多边形获取连续时间序列面域降水数据,但采用单雨量站点的输入数据进行径流模拟时,未考虑降水的时空异质性,在气象水文要素分布不均的流域,导致模型模拟精度较低。例如,Charles 等<sup>[7]</sup>将 Thiessen 多边形获取的空间降水数据代入模型模拟比利时乌尔特和安贝尔韦流域径流,由于未考虑区域地形差异对降水影响,导致插值结果整体偏高;黄粤等<sup>[8]</sup>在开都河流域基于 MIKE SHE 模型建立水文模拟,由于干旱区内陆河流域气象水文资料缺乏,模型虽能反映开都河日径流过程,但模型效率仍有待提高。Thiessen 多边形插值法未考虑区域降水差异,导致插值结果精度较低,其它雨量插值方法如 IDW(反距离权重法)、样条函数法、普通克里金法等<sup>[9-14]</sup>,也能实现面域插值,但大多适用于年尺度或月尺度插值,而水文模型需要逐日时间序列降水数据的输入,此类方法在水文模型的输入上有一定欠缺。因此,需改进降水数据插值方法,寻求一种既能考虑面域插值,又能考虑连续时间序列的插值方法。本文拟通过结合这两类插值方法原理改进雨量插值方法,并以补远江流域为例,利用改进后的插值方法进行插值,将插值后得到的数据输入 MIKE SHE 水文模型,分析模型模拟效果。

## 1 研究区概况

本研究以曼安水文站为控制断面的补远江以上流域为研究区。补远江流域地处云南省南部,是澜沧江—湄公河中国境内径流量最大的支流<sup>[15]</sup>,其径流量占入海总量的 1.19%,径流补给来源主要是降水,多年平均流量 185 m<sup>3</sup>/s,平均径流深 764 mm,流域面积 7 747 km<sup>2</sup><sup>[16-17]</sup>。属亚热带季风气候区,旱雨季区分明显,雨季一般为 5 至 10 月,旱季为 11 至

4 月,降水量年内分配不均,年平均降水量 1 488 mm。研究区内设有芒昔坝站、石膏箐站、曼中田站、曼安站、永胜站、大寨站、光明站、大渡岗站、倚邦站、龙帕站十个雨量站,见图 1。

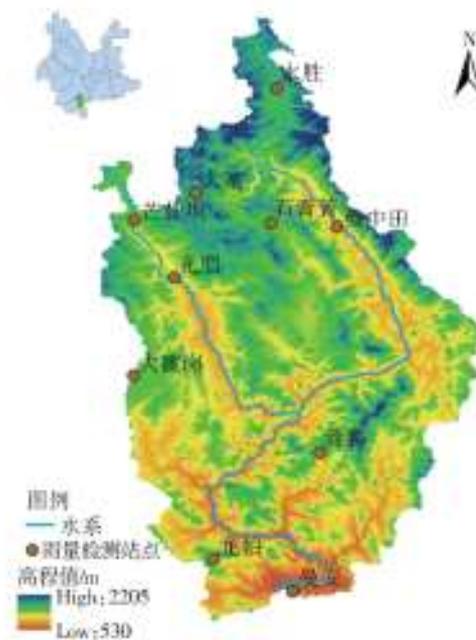


图 1 研究区雨量站分布

Fig. 1 Distribution of rainfall stations in the study area

## 2 研究方法

IDW、样条函数、克里金插值等插值方法的插值结果与站点位置及站点降水数据有关, Thiessen 多边形插值与站点位置有关,考虑到连续时间序列输入数据是水文模拟的关键数据,且水文模拟需要插值精度较高的面域数据。为找到一种插值效果好且能满足水文模型数据需求的插值方法,本研究结合这两类插值方法对雨量插值进行改进,总思路是选取 IDW、样条函数、克里金插值等插值方法中的一种与 Thiessen 多边形结合。由于 IDW、样条函数、克里金插值等插值方法在不同地区适用性不同,为提高改进后的插值方法精度,在针对不同区域选取插值方法时需要讨论哪种插值方法的插值效果较好,然后再将选取出的插值方法与 Thiessen 多边形结合。本研究以澜沧江支流补远江流域模拟为例,

对比分析了不同插值方法对模型效率提高的程度,为类似的模型降水插值提供参考。

## 2.1 插值方法改进

考虑到不同插值方法在各地适用性存在差异,以补远江流域为例,选取一种在研究区内插值精度较高的插值方法进行改进。运用该插值方法对研究区 2007—2012 年年均降水数据插值,再利用 Thiessen 多边形叠加,研究区被划分成各个面域块,每个面域块中包含多个条带和一个雨量监测站点。图 2 中每条色带都代表一个条带区的降水量范围,本研究取该范围的中间值作为该条带区的降水平均值。计算每个面域块中各个条带区降水平均值与该面域块内雨量站降水数据的倍比,每一个条带区都有相对应的倍比数,以该面域块内雨量监测站点日降水数据乘以对应条带的倍比数,则得到各条带区日降水数据,从而得到整个区域上连续时间序列的面域降水数据。避免了 Thiessen 多边形简单以点代面的弊端,既考虑降水空间异质性,又考虑时间连续性,满足水文模型的数据需求。其公式为

$$p' = \frac{C}{P} \times p \quad (1)$$

式中: $p'$ 为所求条带区日降雨数据; $P$ 为各监测站点年降水值; $p$ 为某一雨量监测站点日降雨数据; $C$ 为各条带区平均年降水量值。

## 2.2 基于 IDW-Thiessen 插值法的补远江流域雨量插值

本文通过评价 IDW、样条函数、克里金插值三种常用插值方法在补远江流域的适用性,选出一种适用性较好的插值方法,对该方法进行改进。以补远江流域 2007—2012 年曼中田站、曼安站、永胜站、大寨站、光明站、大渡岗站、倚邦站、龙帕站点的降水数据进行插值,以芒昔坝站、石膏箐站点降水数据进行验证。采用 Pearson 相关系数( $r$ )、平均相对误差(MRE)、平均绝对误差(MAE)进行精度验证。相关系数反映两个变量线性相关程度, $r$ 值越大,表示相关程度越高;当 $0 < |r| < 1$ 时,表示两变量存在一定程度的线性相关;且 $|r|$ 越接近 1,两变量间线性关系越密切; $|r|$ 越接近于 0,表示两变量的线性相关越弱。 $|r| < 0.4$ 为低度线性相关; $0.4 \leq |r| < 0.7$ 为显著性相关; $0.7 \leq |r| < 1$ 为高度线性相关。通过计算站点预测值与实测值的 Pearson 相关系数、平均相对误差、平均绝对误差,对插值结果精度进行比较分析(皮尔森相关系数:置信度为 0.05),其结果见表 1。

表 1 多年平均降水量空间插值验证结果

Tab. 1 Verification results of spatial interpolation of multi-year average precipitation

插值方法	$r$	MRE/%	MAE
IDW	0.8	8.6	145
样条插值	0.7	9.0	146
克里金插值	0.7	9.6	159

多年平均降水量空间插值验证结果表明:IDW 的相关系数最高为 0.8,即实际降水数据与插值结果数据高度相关,样条函数与克里金插值的相关系数相同为 0.7,即实际降雨数据与插值结果数据显著性相关;克里金插值法的 MRE 最高为 9.6%,IDW 的 MRE 为 8.6%,样条函数插值的 MRE 为 9%;MAE 系数三者的排序为:IDW < 样条函数插值 < 克里金插值,即 IDW 精度高于克里金插值法和样条函数插值法。因此补远江流域雨量插值中, IDW 插值精度较高。

如图 2、3 所示,补远江流域被划分成多个面域块,每个面域块中包含多个条带和一个雨量监测站点。以倚邦站所在面域块为例(图 3):该面域块被插值图切割成 6 个条带区,由条带区左右两侧分割线可知每个条带区降水的上限和下限,求其平均值  $C$ ;计算倚邦站年降水值  $P$  与平均值  $C$  的倍比  $X$ ,倍比数由内向外分别为:1,0.99,0.97,0.94,0.93。每一个条带区都有相对应的倍比,以倚邦站日降水数据乘以对应条带的倍比数,得到每条条带

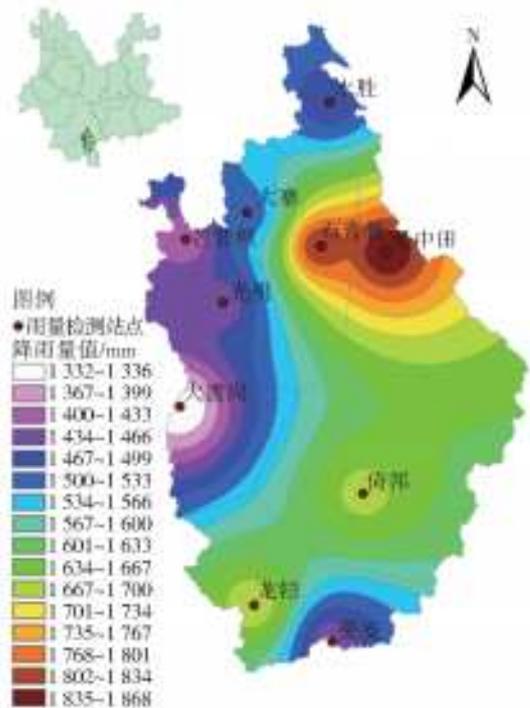


图 2 IDW 与 Thiessen 结合

Fig. 2 IDW and Thiessen combination graph



图 3 IDW 与 Thiessen 分析

Fig. 3 IDW and Thiessen analysis graph

区日降水数据。例如：若倚邦站某日降水为零，乘以相应的倍比数，则每一条带区日降水都为零；若倚邦站某日降水为 50 mm，乘以相应条带的倍比数，得到每一条带区相应的日降水数据，分别为：50、49.5、48.5、47、46.5 mm，从而得到整个补远江流域连续时间序列面域降水数据，满足水文模型数据需求。

### 3 MIKE-SHE 模型模拟

#### 3.1 模型建立

近年来，MIKE SHE 水文模型被广泛应用于水文分析领域，建立模型所需数据主要包括 DEM、土壤、降水、蒸发等，这些数据的获取及输入大多依赖于 RS 和 GIS 技术<sup>[18-24]</sup>。根据补远江流域 2008—2012 年水文气象及地理信息数据构建 MIKE SHE 水文模型，2008—2010 年设定为模型率定期，2011—2012 年为模型验证期。

本文首先将 Thiessen 多边形插值得到的降水数据代入模型，并进行参数率定及验证。主要率定参数包括饱和含水率、饱和导水率、曼宁系数、给水度等。采用 Nash-Sutcliffe 模型效率系数 (NSE)<sup>[25]</sup>、相关系数 ( $r$ )<sup>[26]</sup> 及平均相对误差 (MRE) 评价模型模拟结果。由于降雨量是主要输入条件，其数据来源是基于实测及空间数据插值，雨量输入部分不涉及相关参数的率定及验证，其次，由于雨量数据的输入

不改变流域的下垫面特征及植被分布情况，均不会对其它参数造成影响，因此本研究在将 IDW-Thiessen 插值方法得到的降水数据带入模型时，不直接对参数进行调整，而是采用上述已经调整好的参数。

表 3 模型参数率定结果

Tab. 3 Model parameter values during calibration

参数	率定结果
坡面流曼宁系数 <sup>[27]</sup> /( $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ )	30
饱和含水率/( $m \cdot s^{-1}$ )	0.42
饱和导水率/( $m \cdot s^{-1}$ )	$3 \times 10^{-5}$
给水度	0.39
渗漏时间常数/d	20
林冠截留系数/mm	0.05
双层水平平衡系数	1
河床透水系数	$4.3 \times 10^{-5}$
河道流曼宁系数/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	35

#### 3.2 径流模拟结果分析

利用 Thiessen 多边形和 IDW-Thiessen 得到补远江流域两组连续时间序列面域降水数据，记为 A 组和 B 组，分别将其输入模型模拟径流量，发现模型模拟结果都能较好地与实测径流量吻合 (图 4)，但利用 B 组数据得到的模拟结果与实测径流量一致性更强，其纳什系数更高，见表 5。其原因在于 IDW-Thiessen 插值法是基于 Thiessen 多边形插值原理结合 IDW 插值法原理对雨量分布的面域进行细分，因此能提高面域降雨插值精度，进一步提高径流模拟结果精度。补远江流域旱雨季区分明显，但无论是旱季还是雨季，除 2008 年外，其它年份 B 组数据误差值均小于 A 组数据。旱季模型模拟精度提高了 7%，除去 2008 年，模型模拟精度提高 10%；雨季模型模拟精度提高 6%，比旱季略低 (表 4)；模型模拟径流量年均误差除 2008 年外，其它年份 B

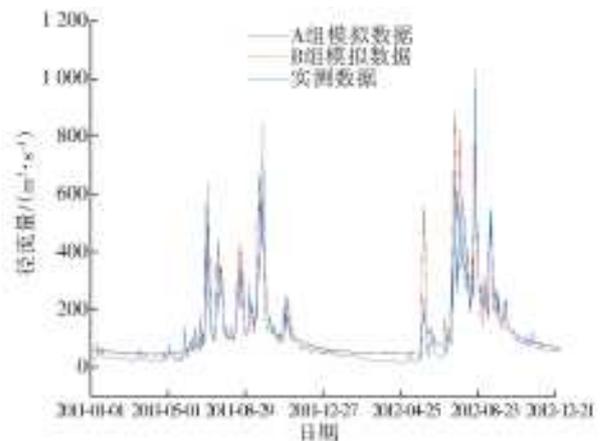


图 4 补远江流域逐日径流量验证期模拟结果

Fig. 4 Daily runoff simulations during calibration and validation periods by in the Buyuan Jiang Basin

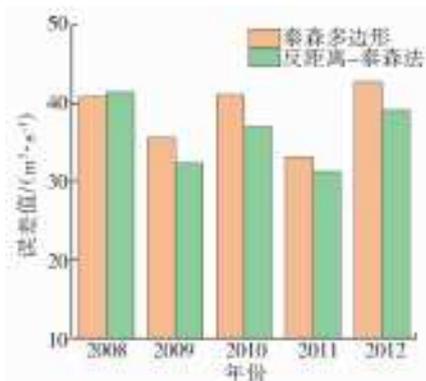


图5 模型模拟径流量年均误差

Fig. 5 Annual average error of model

表4 两组数据径流模拟旱雨季误差

Tab. 4 Errors in two runoff simulations data sets

	during dry and rainy season					单位: m <sup>3</sup> /s
时间	2008	2009	2010	2011	2012	
旱季(A)	10.34	8.50	16.79	19.78	18.12	
旱季(B)	10.94	7.52	15.20	17.91	16.22	
雨季(A)	71.21	62.62	65.25	46.44	67.10	
雨季(B)	71.74	57.13	58.64	44.51	62.24	

组数据模拟结果误差均小于A组数据(图5);B组数据模拟径流纳什系数在率定期和验证期都超过0.7,相关性系数为0.9,为高度相关(表5)。

表5 模型模拟结果分析

Tab. 5 Analysis of model simulation results

方法	NSE	R	MRE
Thiessen(率定期)	0.71	0.86	39.32
IDW-Thiessen(率定期)	0.74	0.87	37.05
Thiessen(验证期)	0.69	0.89	37.99
IDW-Thiessen(验证期)	0.73	0.89	35.34

#### 4 结 语

本文为满足分布式水文模型的数据需求,改进雨量插值方法,并以补远江流域为例进行验证。结果显示,对比 Thiessen 多边形法,利用改进后的插值方法得到的连续时间序列面域降水数据模拟径流过程,其模拟结果精度在率定期和验证期都有提高,模拟径流量值与实测径流量值之间的误差减小,雨季和旱季误差明显减小,模型模拟效果更好。

#### 参考文献(References):

[1] 周祖昊,贾仰文,王浩,等. 大尺度流域基于站点的降雨时空展布[J]. 水文, 2006, 26(1): 6-11. (ZHOU Z H, JIA Y W, WNAG H, et al. Station-based spatial-temporal distribution of rainfall in large-scale watershed[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(1): 6-11. (in

Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0852.2006.01.003.

[2] 王中根,刘昌明,吴险峰. 基于 DEM 分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 168-173. (WANG Z G, LIU C M, WU X F. Review of distributed hydrological models based on DEM[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 168-173. (in Chinese))

[3] 袁旭,陆颖,赵著燕,等. 国内 MIKE SHE 水文模型研究与应用综述[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(1): 13-17. (YUAN X, LU Y, ZHAO Z Y, et al. Research and application of MIKE SHE hydrological model in China[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(1): 13-17. (in Chinese))

[4] GRAYSON R B, BLOSCHE G, WESTERN A W, et al. Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response [J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(8-12): 1313-1334. DOI: 10.1016/S0309-1708(02)00060-X.

[5] STISEN S, JENSEN K H, SANDHOLT I, et al. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin [J]. Journal of Hydrology, 2008, 354(1-4): 131-148. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.03.006.

[6] 吕爱锋,贾绍凤. 遥感驱动的分布式实际径流模拟研究[J]. 南水北调与水利工程, 2016, 14(3): 7-11. (LYU A F, JIA S F. Distributed real runoff simulation driven by remote sensing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 7-11. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.03.002.

[7] LY S, CHARLES C, DEGR A. Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale, the use of several variogram models in the ourthe and ambleve catchment [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15: 2259-2274.

[8] 黄粤,陈曦,包安明,等. 干旱区资料稀缺流域日径流过程模拟[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 333-336. (HUANG Y, CHEN X, BAO A M, et al. Daily runoff process simulation in arid basins with scarce data[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 333-336. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2009.03.008.

[9] 王玉德. 基于 Arcgis 的泰森多边形法计算区域平均雨量[J]. 吉林水利, 2014, 6(6): 58-60. (WANG Y D. Tyson polygon method based on Arcgis is used to calculate regional average rainfall [J]. Jilin Water Conservancy, 2014, 6(6): 58-60. (in Chinese)) DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2014.06.016.

[10] BRADLEY S G, DIRKS K N, STOW C D. High resolution studies of rainfall on Norfolk island, Part III: a model for rainfall redistribution [J]. Journal of Hydrology, 1998, 208(3-4): 194-203. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00156-5.

- [11] MAIR A,FARES A. Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island [J]. 2011,16:371-383.
- [12] 邬伦,吴小娟,肖晨超,等. 五种常用降水量插值方法误差时空分布特征研究-以深圳市为例[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(3):19-24. (WU L, WU X J, XIAO C C, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of errors in five commonly used Precipitation Interpolation methods: Shenzhen City as an example [J]. Geography and Geo-Information Science. 2010,26(3):19-24. (in Chinese))
- [13] 蔡福,于贵瑞,祝青林,等. 气象要素空间化方法精度的比较研究-以平均气温为例[J]. 资源科学,2005,27(5):173-179. (CAI F, YU G R, ZHU Q L, et al. A comparative study on accuracy of spatialization methods for meteorological elements: Taking average temperature as an example[J]. Resource Science. 2005,27(5):173-179. (in Chinese))
- [14] 何大明. 澜沧江-湄公河水文特征分析[J]. 云南地理环境研究,1995,7(1):59-73. (HE D M. Analysis of hydrological characteristics of Lancang-Mekong River [J]. Yunnan Geographic Environment Research. 1995,7(1):59-73. (in Chinese))
- [15] 王国泰,张守平,杨清伟,等. 基于空间插值方法的重庆降水信息展布[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(3):18-23. (WANG G T, ZHANG S P, YANG Q W, et al. Precipitation information distribution in Chongqing based on spatial interpolation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology. 2018,16(3):18-23. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0063.
- [16] 蒋博,王福山,沈忱,等. 澜沧江支流补远江对干流水温影响研究[J]. 水力发电学报,2018,38(2):1003-1243. (JIANG B, WANG F S, SHEN C, et al. Study on the influence of Buyuan River, a tributary of Lancang River, on the water temperature of the main stream [J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2018,38(2):1003-1243. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdbx.20190208.
- [17] 钟荣华,杨春明,傅开道,等. 补远江流域水沙特性及其变化分析[J]. 人民长江,2011,24(42):29-33. (ZHONG R H, YANG C M, FU K D, et al. Characteristic of water and sediment in Buyuan River basin and its variation analysis[J]. People's Yangtze River. 2011,24(42):29-33. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2011.24.005.
- [18] 刘昌明,夏军,郭生练,等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. 水科学进展,2004,15(4):495-500. (LIU C M, XIA J, GUO S L, et al. Preliminary study and progress of distributed hydrological model in Yellow River basin[J]. Advances In Water Science. 2004,15(4):495-500. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2004.04.017.
- [19] REFGAARD J C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models [J]. Journal of Hydrology. 1997. 198: 69-97. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03329-X.
- [20] JAKEMAN A J, HORNBERGER G M, LIT TLEWOOD I G, et al. A systematic approach to modelling the dynamic linkage of climate, physical catchment descriptors and hydrological response component [J]. Math Compute Simul. 1992. 33(5):359-366.
- [21] HENRIKSEN H J, TROLDORF L. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark [J]. Journal of Hydrology. 2003. 280: 52-71. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00186-0.
- [22] 罗敏,刘铁,黄粤,等. 未来气候情景下和田河流域日径流过程模拟[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):11-17. (LUO M, LIU T, HUANG Y, et al. Daily runoff simulation in Hetian River basin under future climate scenarios [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering. 2016,27(02):11-17. (in Chinese)) DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.02.03.
- [23] 赵著燕,陆颖,袁旭,等. MIKE SHE 在生态水文大区的适用性评价[J]. 东北水利水电,2018(3):30-33. (ZHAO Z Y, LU Y, YUAN X, et al. Applicability evaluation of MIKE SHE in eco-hydrological region [J]. Northeast Water Conservancy and Hydropower. 2018(3):30-33. (in Chinese)) DOI:10.14124/j.cnki.dbslstd22-1097.2018.03.011.
- [24] 姜凌峰,薛联青,刘远洪,等. 基于 MIKE SHE 模型的干旱区节水灌溉对地下水水位的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2016,35(2):59-65. (JIANG L F, XUE L Q, LIU Y H, et al. Study on the influence of water-saving irrigation on groundwater level in arid area based on MIKE SHE model [J]. Journal of Irrigation and Drainage. 2016,35(2):59-65. (in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.gggs.2016.02.011.
- [25] VELEZ J J, LOPEZUNZU F, PURICELLI M, et al. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework [J]. Hydro Earth Syst Sci Discuss,2009(13):229-246.
- [26] GUO HAO, CHEN SHENG, BAO AN MING, et al. Intercomparison of high resolution satellite precipitation products over Central Asia [J]. Remote Sensing, 2015,7(6):7181-7211. DOI:10.3390/rs70607181.
- [27] 丁泽浩. MIKE21 曼宁数对水域流速模拟影响研究 [J]. 资源节约与环保,2018(3):30-31. (DING Z H. Study on the influence of MIKE21 Manning number on the simulation of water flow velocity [J]. Resource saving and environmental protection. 2018(3):30-31. (in Chinese)) DOI: 10.16317/j.cnki.12-1377/x.2018.03.020.