

# 基于 CMIP5 模式和 SDSM 的赣江流域 未来气候变化情景预估

刘卫林, 熊翰林, 刘丽娜, 朱圣男, 陈祥

(南昌工程学院 江西省水工程安全与资源高效利用工程研究中心, 南昌 330099)

**摘要:**赣江流域未来气候变化预估,对于了解该流域未来水资源的变化、指导流域防洪抗旱和水资源的合理开发利用具有重要意义。为预估该流域未来气候变化,利用 1961—2005 年赣江流域 6 个气象站数据、NCEP 再分析数据并选择了 CMIP5 中 CanESM2 模式下 3 种排放情景 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, 采用 SDSM 模型研究了赣江流域未来气候变化。结果表明:(1) 赣江流域未来温度和降水总体均呈上升趋势。(2) 在 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 这 3 种排放情景下赣江流域未来最高气温分别增加 1.8, 2.1, 2.8℃; 未来最低气温分别增加 1.1, 1.2, 1.9℃; 未来平均气温分别增加 1.5, 1.6, 2.3℃; 3 种排放情景下未来温度空间分布都是南高北低, 西高东低, 并在南北方向呈带状和环状分布。(3) 在未来 3 个时期(2020s, 2050s, 2080s)、3 种排放情景下赣江流域气温呈上升趋势, 且 6 月份增幅最大, 2 月份增幅最小。(4) 在未来 3 个时期、3 种排放情景下, 赣江流域未来降水均呈增加的趋势; 5—10 月降水量均呈现下降趋势, 1—4 月、11—12 月降水量呈现增加趋势; 3 种情景下的未来降水空间分布基本呈南低北高, 在南北方向呈递增趋势。对赣江流域气候要素模拟与预估表明, 赣江流域未来气候变化存在降水增加及极端天气事件发生的危险, 分析结果可为赣江流域气候变化的水文响应及气候变化的适应性研究提供科学依据。

**关键词:**气候变化; SDSM; 赣江流域; 气温; 降水

**中图分类号:** P467

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2019)02-0145-08

## Estimate of the Climate Change in Ganjiang River Basin Using SDSM Method and CMIP5

LIU Weilin, XIONG Hanlin, LIU Lina, ZHU Shengnan, CHEN Xiang

(Jiangxi Engineering Research Center of Water Engineering Safety and Resources  
Efficient Utilization, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** Estimating future climate change of Ganjiang River can provide important guidance for flood control, drought relief, development and utilization of water resources in the basin. Based on the meteorological data in Ganjiang River Basin from 1961 to 2005 and NCEP reanalysis data, SDSM statistical downscaling model has been established. Future precipitation and temperature in the Ganjiang River Basin were predicted by atmospheric circulation factors coming from CMIP5 experiments: RCP2.6 (low emission of greenhouse gases) the RCP8.5 (highest emission of greenhouse gases) and RCP4.5 (median emission of greenhouse gases) forcing pathways under CanESM2. Finally, the characteristics of temporal and spatial patterns of future precipitation and temperature in the basin were analyzed. The results show that: (1) the temperature and precipitation of Ganjiang River Basin will present the rising trend in general in the future; (2) under the three emission scenarios of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5, the maximum temperature in the Ganjiang River Basin will increase by 1.8℃, 2.1℃ and 2.8℃, respectively, and the minimum air temperature will increase by 1.1, 1.2 and 1.9℃, respectively, in the future, and the future average temperature will increase by 1.5, 1.6 and 2.3℃, respectively; (3) in the next three periods (2020s, 2050s and 2080s) and three emission scenarios, the temperature of the Ganjiang River Basin will rise, and the largest increase will occur in June, the smallest increase will occur in February; (4) in the next three periods and three emission scenarios, the

收稿日期: 2018-04-11

修回日期: 2018-05-28

资助项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ170980); 江西省科技厅青年资助项目(20132BAB213025); 国家自然科学基金青年基金(51309130); 江西省优势科技创新团队建设计划项目(20171BCB24012); 江西省水工程安全与资源高效利用工程中心开放基金课题(OF201610); 江西省大学生创新创业教育计划项目(201411319019)

第一作者: 刘卫林(1978—), 男, 江西新余人, 副教授, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: weilin\_liu@nit.edu.cn

future precipitation in the Ganjiang River Basin will increase, and the precipitation from May to October will present the downward trend, and the precipitation from January to April, November and December will present the increasing trend. The results can provide the scientific basis for the study of the hydrological response of the climate change and the adaptability of the climate change in the Ganjiang River Basin.

**Keywords:** climate change; SDSM; Ganjiang River Basin; temperature; precipitation

随着土地利用以及人类活动的影响,全球地表气温正在不断升高,1906—2005 年全球地表气温上升了  $(0.74 \pm 0.18)^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>。气候变化对人类的生活起居、农业的生产需要、社会的经济发展乃至整个生态系统产生深远影响,带来一系列环境和社会问题。与此同时,气候变暖导致极端天气事件频发,尤其体现在对气候变化较为敏感和脆弱的地区<sup>[2-3]</sup>。因此,开展气候变化研究,对区域水资源的可持续利用、水利工程安全高效运行管理、保证经济社会稳定发展具有重要意义。

目前,研究未来气候变化的主要工具是大气环流模式(GCMs),其输出信息只能反映大尺度网格气候变化的平均特征,直接使用将会忽略植被、地形等小尺度的差别,对研究精度有影响<sup>[3-6]</sup>。因此,使用 GCM 预测结果作为区域水文水资源变化评估输入因子时,需进行降尺度分析,将 GCM 输出的大尺度、低分辨率信息转化为区域尺度信息。降尺度分为动力降尺度、统计降尺度、动力降尺度与统计降尺度相结合的方法<sup>[4,7-9]</sup>。统计降尺度始于 20 世纪 90 年代,它将大尺度气候模式转化为可应用的小尺度、提高了区域分辨率。本文使用的第 5 次国际耦合模式比较计划 CMIP5 比前一阶段 CMIP3 更加精确与复杂,是目前较先进的预估未来气候变化方法<sup>[5-6]</sup>。该模式对中国区域模拟,模拟温度能力较降水偏强,在降水中对平均降水和极端降水的模拟偏强<sup>[7]</sup>,且在鄱阳湖流域应用较少。因此,本文以鄱阳湖流域比较具有代表性的流域——赣江流域为例,采用统计降尺度模型,分析流域尺度上的降尺度效果,选取 2020s(2006—2035 年),2050s(2036—2065 年),2080s(2066—2100 年)3 个时段,以 1991—2005 年为基准期,对 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 这 3 种排放情景下赣江流域未来气温和降水可能变化的情况进行模拟和对比分析,为赣江流域气候变化的水文响应研究和气候变化下适应政策的制定提供科学依据。

## 1 研究区域及数据来源

赣江是长江的第七大支流,属于鄱阳湖流域水系,由南至北纵贯江西全省,是江西省最大河流,长 766 km。该流域位于长江流域南侧,地理位置为  $113.58^\circ\text{E}$ — $116.63^\circ\text{E}$ ,  $24.52^\circ\text{N}$ — $28.75^\circ\text{N}$ ,属于亚热带

湿润季风气候,流域面积为  $83\,500\text{ km}^2$ 。流域范围自南向北涉及南昌、宜春、新余、萍乡、吉安、赣州 6 个市,赣江流域周边山区降水量大,而中游区是全流域的降水低值区,赣江流域部分气象站多年平均降雨量为  $1\,698\text{ mm}$ ,多年平均气温为  $17.8\sim 19.7^\circ\text{C}$ ,流域内多年平均年蒸散量为  $583.81\text{ mm}$ 。

本研究采用赣江流域 6 个国家级气象站点数据 1961—2005 年逐日气象数据,数据来源于气象共享网(<http://data.cma.cn>);CMIP5 模式数据采用加拿大环境与气候变化网(<https://www.canada.ca/en.html>)CanESM2 数据,共有  $128 \times 64$  个网格,选取 6 个网格为本研究区域覆盖的网格,网格分辨率为  $2.8125^\circ \times 2.79061^\circ$ 。选择以下 3 种排放情景 RCP2.6(低等温室气体排放情景)RCP4.5(中等温室气体排放情景)RCP8.5(最高温室气体排放情景)典型浓度路径,对未来气温、降水进行模拟。

## 2 SDSM 统计降尺度模型

SDSM 模型是由 Wilby 等建立的降尺度工具,融合了天气发生器和多元线性回归技术,是一种转换函数与随机天气发生器耦合的降尺度方法。SDSM 模型的主要流程有两点:一是建立预报因子与预报量间的统计关系,二是利用 GCM 数据预估未来预报量。该模型广泛应用于亚洲、欧洲、美洲的气象、水文等研究领域,其基本原理如下:

$$w_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j P_{ij}; R_i^{0.25} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j P_{ij} + e_i \quad (1)$$

$$T_i = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j P_{ij} + e_i \quad (2)$$

式中: $w_i$ 是第  $i$  天发生降水的概率; $\alpha, \beta, \gamma$  为模式参数; $R_i$ 是降水量; $T_i$ 是温度变量; $e_i$ 为误差。模拟温度时用公式(1),模拟降雨则用公式(2)。模拟出发生降水时,才继续模拟  $R_i$ (降水量)。

### 2.1 预报因子的选择

本文主要研究共 26 个预报因子,对 6 个站点利用逐步回归的方法,选取其中最优预报因子。预报因子选择影响着模拟程度的好坏,选择相关性更强的预报因子会预报更准确的信息。当预报变量为气温(降水)时,选择气温(降水)因子相关性更强,所以大尺度气温变量相对于其他环流因子更准确,预报因子选择

大尺度气温和其他环流因子比单个预报因子效果更好。为了防止出现多个预报因子共线现象,对地面气温进行估计时,排除互相关系大的情况<sup>[8-9]</sup>。

预报因子对预报量产生的是直接影响过程,降尺度分析只考虑统计关系,所以进行气温降尺度模型选择为“无条件过程”。在对降水量的率定中,要设置数

值的非负性,本文因子数量控制在 4~6 种,各站点因子选择情况见表 1。同一个站点所选择的预报因子对于 3 个气温模式变化不大,多数情况下只有少量偏差,在 2 m 平均气温与近地表比湿度的选择率最高,这 2 个预报因子对气温模拟的敏感性很高。而降水筛选出的预报因子选择就很多。

表 1 各站点预报因子选择

站点	$T_{\text{mean}}$	$T_{\text{max}}$	$T_{\text{min}}$	$P$
遂川	$p, p500, s850, s, t$	$p500, s500, s850, s, t$	$p, p500, s850, s, t$	$p1zh, p8\_v, p8\_z, p850, s500, s850$
赣县	$p, p500, s850, s, t$	$p500, s850, s, t$	$p, p500, s500, s850, s, t$	$p1\_z, p1zh, p8\_z, s500, s850, s$
宜春	$p, p1\_v, p5\_u, p850, s, t$	$p, p1\_v, p5\_u, s500, s, t$	$p, p5\_u, s850, s, t$	$p, p1zh, p8\_v, p8\_z, p850, s850$
南昌	$p, p8\_v, s850, s, t$	$p, p500, p8\_v, s850, s, t$	$p500, s500, s, t$	$p, p8\_z, p850, s500, s850, s$
吉安	$p1\_v, p8\_v, s500, s, t$	$p1\_v, p5\_f, p8\_z, s500, s, t$	$p, p500, s850, s, t$	$p, p1zh, p8\_z, p850, s500, s850$
樟树	$p, p500, s850, s, t$	$p5\_u, p500, s500, s850, s, t$	$p500, s850, s, t$	$p, p1zh, p8\_v, p8\_z, s500, s$

注: $t$ 表示在 2 m 平均气温; $s$ 表示近表面比湿度; $p$ 表示海平面气压; $v$ 表示经向速度分量; $z$ 表示涡度; $u$ 表示纬向速度分量; $p500$ 表示 500 hPa 位势高度场; $s500$ 表示在 500 hPa 高度比湿度; $s850$ 表示在 850 hPa 高度比湿度; $zh$ 表示散度。

2.2 模型的验证与率定

赣江流域 SDSM 模型率定结果见表 2。模型对于温度的模拟解释方差处于 50%~80%,标准误差处于 1.5~3.6;降水处于 20%~34%,降水标准误差为 0.38~0.43。统计降尺度的方法很多,SDSM 模型也被我国的专家学者应用于很多流域,如郝振

纯<sup>[10]</sup>、魏凤英<sup>[11]</sup>等的预报模型,国内外专家学者在不同地区的模拟情况有不同模拟情况,刘敏等<sup>[8]</sup>在江淮地区温度的解释方差为 69.6%~73.9%,翟文亮等<sup>[12]</sup>在东江流域温度的解释方差为 57%~65%,降水的解释方差为 23%~29%,相比本文的结果证明本文的率定、模拟较好。

表 2 赣江流域 SDSM 模型率定期的解释方差和标准误差

预报量	项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
$T_{\text{mean}}$	解释方差(%)	71.6	78.4	76.2	73.5	66.3	58.6	55.5	49.9	73.2	73.6	79.4	76.1
	标准误差(℃)	1.86	2.09	2.10	2.11	1.85	1.64	1.41	1.36	1.56	1.67	1.70	1.72
$T_{\text{max}}$	解释方差(%)	65.1	64.8	60.7	60.6	66.2	53.1	56.1	49.8	63.1	68.1	64.9	64.3
	标准误差(℃)	3.33	3.58	3.70	3.34	2.79	2.38	1.85	1.77	2.34	2.64	2.72	2.9
$T_{\text{min}}$	解释方差(%)	73	74.2	73.1	69.7	63.1	62.8	50.1	51.2	74.2	71.9	72.3	69
	标准误差(℃)	1.42	1.4	1.42	1.45	2.03	1.56	1.66	1.66	1.45	1.85	2.14	2.11
$P$	解释方差(%)	31.9	30.1	32.9	27.5	29	33.2	27.7	20.8	23.9	20.4	27.1	25.7
	标准误差(℃)	0.4	0.42	0.41	0.43	0.43	0.41	0.38	0.42	0.38	0.4	0.38	0.39

将观测序列分为两部分,第一部分为率定期(1961—1990 年)用于建立统计关系(表 2),第二部分为验证期(1990—2005 年)进行检验模型可靠性(图 1)。模拟赣江流域各个站点日平均气温、日最高气温、日最低气温和降水,与赣江流域实测值进行对比。在率定期内,流域月最高气温、月最低气温、月平均气温的观测值与模拟值拟合程度较好,最高气温拟合程度最好。率定期与验证期相对比,多年平均偏低 0.24~1.44℃,(1) 平均温度:平均温度在 2,4,6,11 月的模拟情况较其他月份较差,模拟值比实际值低约 1℃。6,7,8 月模拟值一般比实际值偏高,模拟程度较好。(2) 最低温度:1,2,4,11,12 月模拟值比实际值低 0.8℃,8,9 月模拟程度最好。(3) 最高温度:最高温度年平均温度与模拟值差 0.17~0.54℃,模拟程度较 3 个预报量最好,模拟值较年平均低。

在率定期与验证期的模拟中 SDSM 模型降水模拟较气温模拟拟合程度差,4,5,6,9,10 月模拟值较降雨高,有较大的差异性。笔者认为主要有以下 4 个方面:(1) 降水是一个随机过程,一直是模拟的难点,对于随机性的研究在现阶段还比较困难;(2) 降水受地形因素影响很大,受大气环流和一些微小的地形地势影响 SDSM 模型并不能很好的模拟结果,会产生误差;(3) 预报因子的选择本就具有多样性和不确定性;(4) SDSM 建立的统计关系比较单一,在有些情况不能完全反映流域内降水与预报因子的物理意义。综上 4 点所述,降雨的模拟不如气温模拟也是可以理解的。对于本文来说流域范围大,而符合条件的气象站数据较少,也是原因之一,但是在其他学者研究的过程中也遇到了降水模拟差的情况<sup>[12-14]</sup>,综上所述本文的研究方法较为可靠。

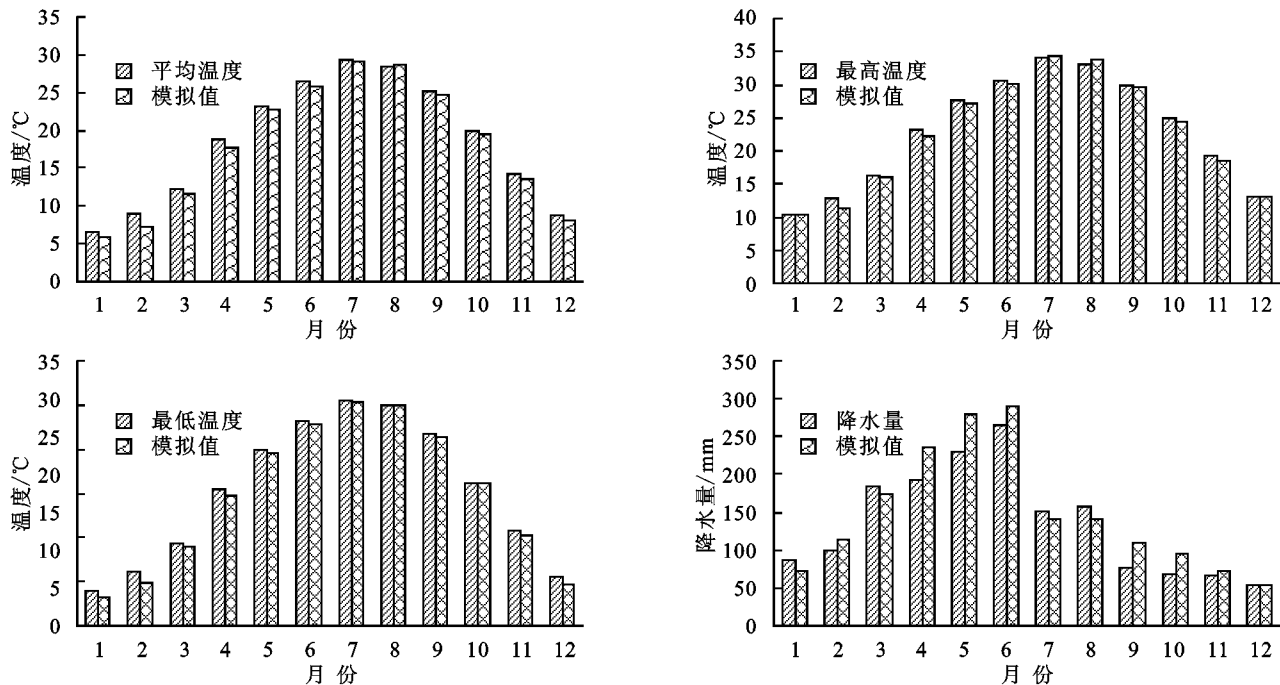


图 1 赣江流域验证期温度与降水对比

### 3 未来气候气温与降水变化

#### 3.1 未来气温变化

图 2 为赣江流域最高、最低、平均温度多年平均实测值与预测期 2006—2100 年的 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 这 3 种情景的模拟值对比。如图 2 所示,折线图表现的 trend 明显,反映出未来气温各月份的变化。对比赣江流域基准期的气温可知,在 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 情景下,未来最高气温分别上升 1.8, 2.1, 2.8℃;最低气温增加 1.1, 1.2, 1.9℃;平均气温增加 1.5, 1.6, 2.3℃。其中, RCP8.5 增长速度最快, RCP4.5 次之, RCP2.6 最慢。

将 2006—2100 年的预测数据分为 3 个阶段: 2020s (2006—2035 年), 2050s (2036—2065 年), 2080s (2066—2100 年), 分别对 3 个时段、3 种排放情景下的最高、最低、平均温度进行比较分析, 结果见表 3, 图 3—5。

从图 3—5 可看出, 在未来情景下各种温度均呈增加趋势, RCP8.5 增加浮动最大, RCP4.5 次之, RCP2.6 浮动最小。图 3 为赣江流域 3 种排放情景最高温度与基准期对比。RCP2.6 情景下, 最高气温在 2030s 期间约上升 1.6℃, 在 2050s 期间约上升 2.5℃, 2080s 期间上升 2.51℃; RCP4.5 情景下, 最高气温在 2030s 期间约上升 1.4℃, 在 2050s 期间约上升 2.8℃, 2080s 期间上升 3.1℃; RCP8.5 情景下, 最高气温在 2030s 期间约上升 1.7℃, 在 2050s 期间约上升 2.7℃, 2080s 期间上升 4.1℃。其中, 4—6 月、9 月、10 月温度增幅较为显著。

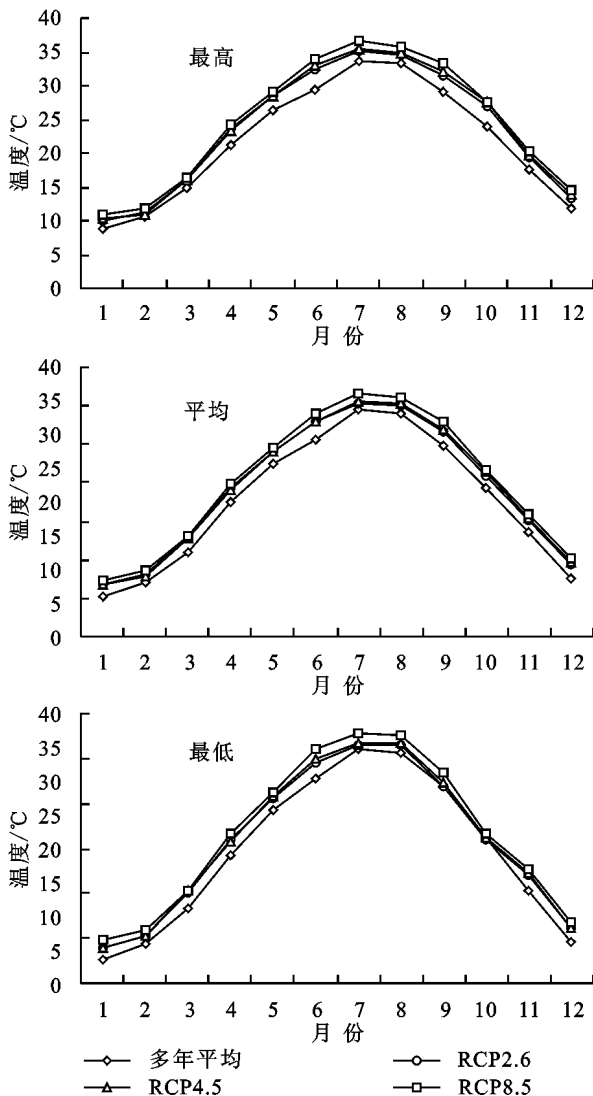


图 2 赣江流域未来情景最高、平均、最低温度预测

表 3 赣江流域未来气温变化 ℃

时段	最低气温增加量			最高气温增加量			平均气温增加量		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
2020s	0.90	0.67	1.20	1.63	1.40	1.70	1.20	0.7	1.03
2050s	1.68	2.06	2.29	2.50	2.82	2.73	1.55	1.67	1.97
2080s	1.68	2.33	3.58	2.51	3.16	4.16	1.57	1.97	3.06

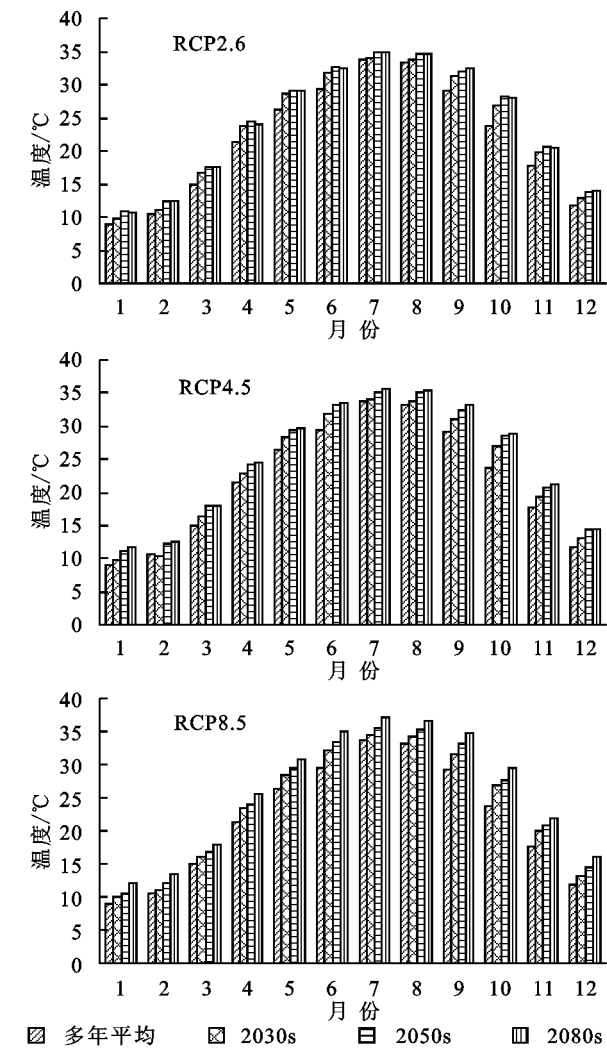


图 3 赣江流域 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 情景最高温度与基准期对比

图 4 为赣江流域 3 种排放情景平均温度与基准期对比。平均温度在 RCP2.6 情景下,在 2030s 期间约上升 1.2℃,在 2050s 期间约上升 1.5℃,2080s 期间上升 1.6℃;RCP4.5 情景下,平均气温在 2030s 期间约上升 0.7℃,在 2050s 期间约上升 1.7℃,2080s 期间上升 2℃;RCP8.5 情景下,平均气温在 2030s 期间约上升 1℃,在 2050s 期间约上升 2℃,2080s 期间上升 3.1℃。其中,3—6 月、9—12 月增幅明显。

图 5 为赣江流域 3 种排放情景最低温度与基准期对比。最低温度在 RCP2.6 情景下,在 2030s 期间约上升 0.9℃,在 2050s 期间约上升 1.7℃,2080s 期间上升 1.7℃;RCP4.5 情景下,最低气温在 2030s 期

间约上升 0.7℃,在 2050s 期间约上升 2.1℃,2080s 期间上升 2.3℃;RCP8.5 情景下,最低气温在 2030s 期间约上升 1.2℃,在 2050s 期间约上升 2.3℃,2080s 期间上升 3.6℃。其中,3—6 月,11—1 月温度增幅较明显。

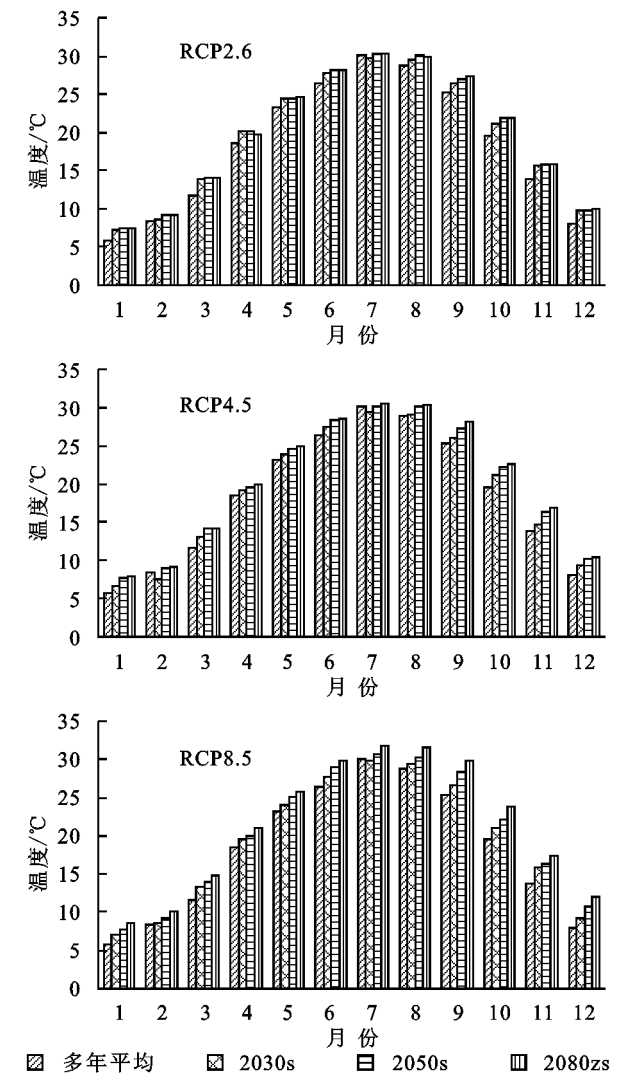


图 4 赣江流域 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 情景平均温度与基准期对比

从上述分析可知,在未来气候变化中,RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 这 3 种排放情景下平均气温、最高气温和最低气温均呈增加趋势,但增加幅度略有不同,其中,RCP8.5 高排放情景下二氧化碳排放量更高,RCP8.5 增加幅度更加明显;未来 3 个时期赣江流域的气温呈现明显的上升趋势,且 6 月份增幅最

大,2 月份增幅最小;在未来情景下,气温增加幅度越来越大,RCP8.5 增幅>RCP4.5 增幅>RCP2.6 增幅。最高气温在 4—6 月、9 月、10 月温度增幅较为显著,更易发生极端气温。

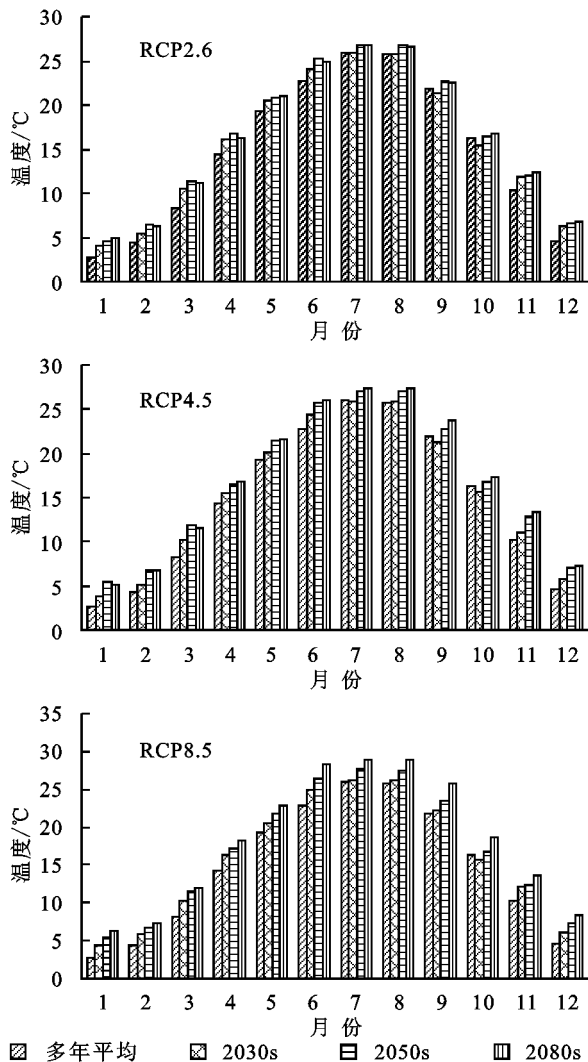


图 5 赣江流域 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景最低温度与基准期对比

### 3.2 未来降水变化

为分析赣江流域未来降水变化情况,将 2006—2100 年分为 3 个时段:2020s(2006—2035 年)、2050s(2036—2065 年)、2080s(2066—2100 年),以 1991—2005 年为基准期,对比分析 3 个时段、3 种排放情景下的降水量变化。由图 6 可知,未来气候 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 这 3 种排放情景下,赣江流域未来降水均呈增加的趋势,5—10 月降水量均呈现下降趋势,1—4 月、11 月、12 月降水量呈现增加态势;RCP8.5 变化幅度最大,RCP4.5 次之,RCP2.6 最小。相对于多年平均降水量,RCP2.6 情景下,降水量在 2020s、2050s 和 2080s 均呈震荡趋势,在这 3 个时期多年平均降雨量约为 1 600 mm,与年平均差距

很小;RCP4.5 情景下降水量变化较为复杂,在 2020s、2050s 间呈震荡趋势,有增有减,在 2080s 年降水量增加约 200 mm;RCP8.5 情景下降水量在 2020s 趋势平稳,而在 2050s 与 2080s 时段增加,月平均增加量最大可达 126 mm。

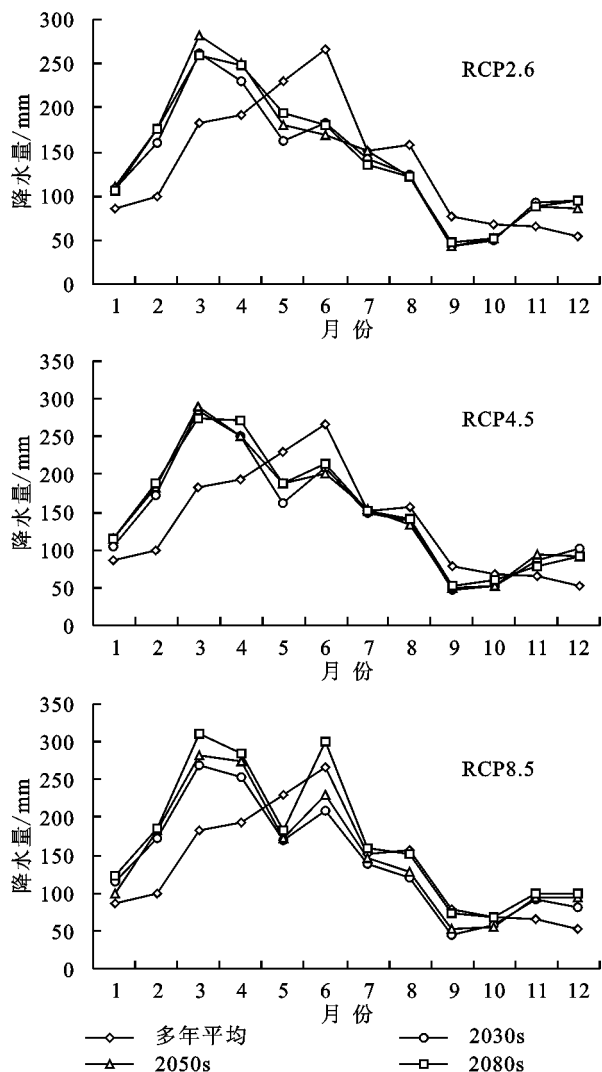


图 6 赣江流域 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下降水量与基准期相对比

### 3.3 未来温度及降水空间变化

根据克里金插值法得到赣江流域 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情境下平均温度、平均降水变化情况(图 7—8)。图 7 为赣江流域未来 3 种情景下平均温度空间变化图,3 种情景模式下的未来温度空间分布都是南高北低,西高东低,并在南北方向呈带状和环状分布。图 8 为赣江流域未来 3 种情景下平均降水空间变化图,3 种情景下的未来降水空间分布基本呈南低北高,在南北方向呈递增趋势,RCP8.5 情景下平均降水分布仅是局部变化,其他两种模式在赣江流域北部呈环状增加,这说明赣江流域未来降水有明显的空间分布不均匀性。

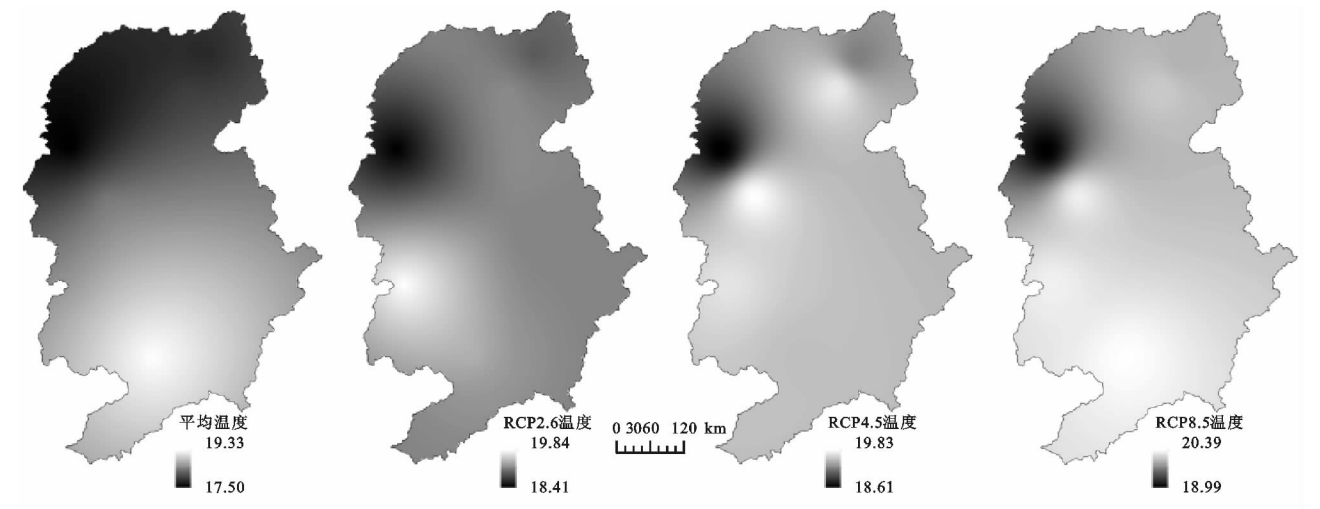


图 7 赣江流域 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 情景下平均温度空间分布

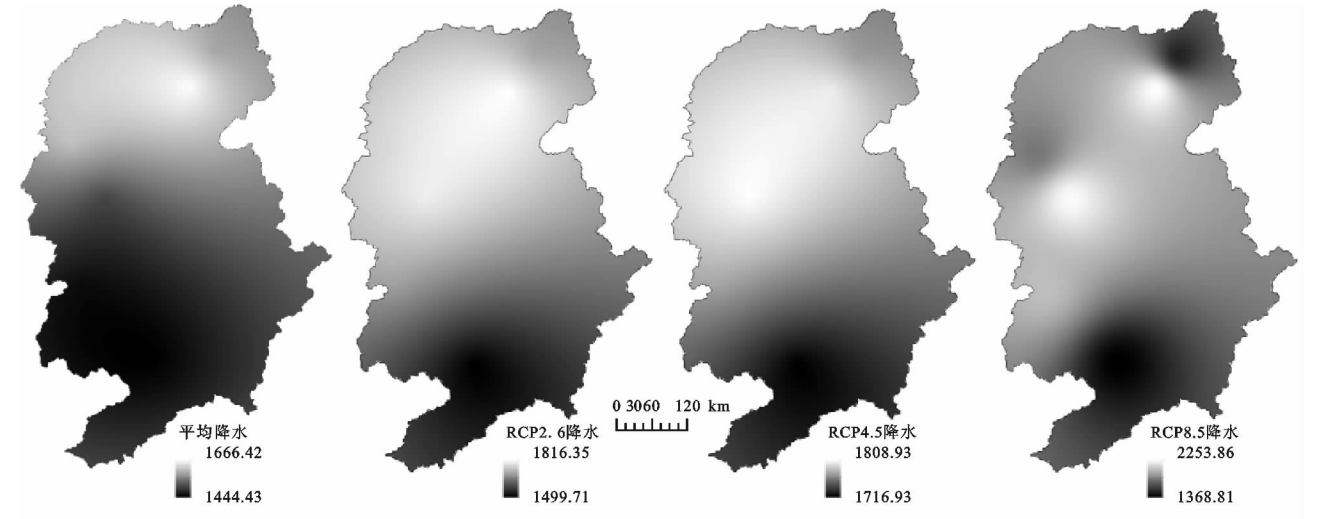


图 8 赣江流域 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 情景下平均降水空间分布

4 结论

本文以赣江流域为例,采用统计降尺度模型,分析流域尺度上的降尺度效果,以 1961—2005 年为基准期,对 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 这 3 种排放情景下赣江流域未来气温和降水可能变化的情况进行了模拟和对比分析。对气温的研究趋势符合中国气候与环境演变评估(I)全国气温趋势;降水情况,尤其是 7—10 月降水量下降符合郭家力等<sup>[15]</sup>、田鹏<sup>[16]</sup>使用的 CMIP3 模式;与杨绚等<sup>[17]</sup>使用 CMIP5 模式对中国气温与降水预估情况有类似的结论。运用 CMIP5 模式、降尺度方法,取 1961—1990 年为率定期,1991—2005 年为验证期,在不同的站点筛选出不同的预报因子,预估赣江流域 2006—2100 年 3 个时段 2020s,2050s,2080s 间 CMIP5 模式 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 情景下气温及降水,分析气温和降水变化,有如下结论:

(1) 模型率定期、验证期结果表明,模型对赣江流域的模拟效果较好,相比较其他研究成果而言具有

较高的解释方差和较小的标准误差,表明 CMIP5 模式与 SDSM 模型在赣江流域可以适用。

(2) 赣江流域未来温度和降水总体均呈上升趋势。在 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5 这 3 种情景下赣江流域未来最高气温分别增加 1.8,2.1,2.8℃;未来最低气温分别增加 1,1.2,1.9℃;未来平均气温分别增加 1.5,1.6,2.3℃;3 种情景下未来温度空间分布都是南高北低,西高东低,并在南北方向呈带状和环状分布。3 种情景下的未来降水空间分布基本呈南低北高,在南北方向呈递增趋势,这说明赣江流域未来降水有明显的空间分布不均匀性。

(3) 未来的 3 个时期赣江流域的气温呈现明显的上升趋势,随着时间的增加,气温升高幅度增大,且有愈加愈烈的趋势;在未来情景下,气温增加幅度越来越大,RCP8.5 增幅>RCP4.5 增幅>RCP2.6 增幅;流域内未来气温升高幅度:最高气温>最低气温。未来的 3 个时期赣江流域降水在 RCP2.6 与 RCP4.5 主要呈震荡趋势,有增有减,而在 RCP8.5 呈增加趋势。

(4) 月尺度上,在未来 3 个时期、3 种情景下赣江

流域气温呈上升趋势,且 6 月份增幅最大,2 月份增幅最小;未来气温在最高温度、RCP8.5 情况下变化幅度最大,最高气温在 4—6 月、9 月、10 月温度增幅较为显著,到 21 世纪末升温约 4℃。降水总体呈增加趋势,5—10 月降水量均呈现下降趋势,1—4 月、11 月、12 月降水量呈现增加态势。

本文仅使用一种气候模式数据进行气候变化预估,具有不确定性。在以后的研究中,将增加更多的评价指标,采用不同的降尺度方法,运用多模式集合等方法综合分析未来气候变化,以减少模拟结果的不确定性。

#### 参考文献:

- [1] Gray V. Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers[J]. Energy & Environment, 2007,18(3): 433-440.
- [2] Gleick P H, Adams R M, Amasino R M, et al. Climate change and the integrity of science[J]. Science, 2010, 328(5979):689-690.
- [3] Edenhofer O, Seyboth K. Intergovernmental panel on climate change(IPCC)[J]. Encyclopedia of Energy Natural Resource & Environmental Economics, 2005, 26(2):48-56.
- [4] 刘昌明,刘文彬,傅国斌,等. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨[J]. 水科学进展,2012,23(3):427-437.
- [5] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012,93(4):485-498.
- [6] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. Nature, 2010, 463(7282):747-756.
- [7] 吴佳,周波涛,徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5 模式模拟评估和预估[J]. 地球物理学报,2015,58(9):3048-3060.
- [8] 刘敏,王冀,刘文军. SDSM 统计降尺度方法对江淮地区地面气温模拟能力评估及其未来情景预估[J]. 气象科学,2012,32(5):500-507.
- [9] 刘永和,郭维栋,冯锦明,等. 气象资料的统计降尺度方法综述[J]. 地球科学进展,2011,26(8):837-847.
- [10] 郝振纯,时芳欣,王加虎. 统计降尺度法在黄河源区未来降水变化分析中的应用[J]. 水电能源科学,2011(3):1-4.
- [11] 魏凤英,黄嘉佑. 我国东部夏季降水量统计降尺度的可预测性研究[J]. 热带气象学报,2010,26(4):483-490.
- [12] 翟文亮,李朋俊,林凯荣,等. 基于 SDSM-SWAT 的气候变化下东江流域径流预测模拟[J]. 人民珠江,2016, 37(4):1-6.
- [13] 邱冰,姜加虎,孙占东,等. 基于统计降尺度模型的博斯腾湖流域未来气温和降水变化趋势分析[J]. 资源科学,2010,32(6):1133-1140.
- [14] 赵芳芳,徐宗学. 黄河源区未来气候变化的水文响应[J]. 资源科学,2009,31(5):722-730.
- [15] 郭家力,郭生练,郭靖,等. 鄱阳湖流域未来降水变化预测分析[J]. 长江科学院院报,2010,27(8):20-24.
- [16] 田鹏. 气候与土地利用变化对径流的影响研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [17] 杨绚,李栋梁,汤绪. 基于 CMIP5 多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析[J]. 中国沙漠,2014,34(3):795-804.

(上接第 144 页)

- [14] 赵磊,杨逢乐,袁国林,等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报,2015,35(6):1961-1972.
- [15] 赵磊,杨逢乐,王俊松,等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报,2008,28(8): 1561-1570.
- [16] 黄英,王杰,史正涛,等. 高原盆地城市水源地脆弱性研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [17] 刘志勇. 昆明市城市住宅小区雨水水质特性及资源化研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2016.
- [18] 曹言. 基于 SCS 模型的滇池流域雨水资源潜力估算研究[D]. 昆明:云南大学,2013.
- [19] 顾雯,李丽,石晓丹,等. 改进的 SCS 模型在黑龙江省中小流域径流模拟中的应用[J]. 水文,2017,37(3):70-74.
- [20] 符素华,王向亮,王红叶,等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. 干旱区地理,2012,35(3):415-420.
- [21] 曹言,柴素盈,王杰,等. 昆明市土地利用变化对地表径流的影响[J]. 水电能源科学,2018,36(8):22-25.
- [22] 王红雷,王秀茹,王希. 利用 SCS-CN 模型方法估算流域可收集雨水资源量[J]. 农业工程学报,2012,28(12):86-91.
- [23] 吴志宜,余志强,朱雪坚. SCS 模型在不同土地利用类型地表产流计算中的应用:以余姚地区为例[J]. 浙江大学学报:理学版,2016,42(2):226-230.
- [24] 谢长坤,蔡永立,左俊杰. 基于 SCS 法模拟的上海郊区农田地表产流特征及原因[J]. 长江流域资源与环境, 2012,21(1):44-51.
- [25] 王红艳,张志强,查同刚,等. 径流曲线数(SCS-CN)模型估算黄土高原小流域场降雨径流的改进[J]. 北京林业大学学报,2016,38(8):71-79.