

饶河流域未来水资源量变化预测分析

刘威¹, 张行南^{1,2,3}, 方园皓¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用景德镇气象站 1961–2001 年的实测降水、气温数据以及 NCEP 再分析数据, 建立饶河流域降水、气温的 SDSM 统计降尺度模型; 根据 IPCC AR4 排放情景特别报告中的 A2 和 B2 情景, 对 HADCM3 输出数据进行降尺度处理, 预测饶河流域未来时段 (2010–2099 年) 的降水、气温变化情况; 与新安江模型进行耦合, 得到未来时段饶河流域的水资源量。结果表明: 饶河流域未来水资源量持续减少, 且 A2 情景比 B2 情景的降幅更大, 至 2080s 时期 (2070–2099 年) 昌江支流最大降幅可达 31.01%。

关键词: 新安江模型; SDSM (Statistical Downscaling Model); 水资源量; 饶河流域

中图分类号: TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0015-05

Prediction and analysis of future water resources change in Raohe river basin

LIU Wei¹, ZHANG Xingnan^{1,2,3}, FANG Yuanhao¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro-Science, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the data of precipitation, temperature and NCEP reanalysis data of Jingdezhen meteorological station from 1961 to 2001, a statistical downscaling model of SDSM for precipitation and temperature in Raohe river basin was established; According to A2 and B2 scenarios of IPCC AR4 emission scenario special report, the output data of HADCM3 was downscaled to predict the precipitation and temperature change in the future period (2010–2099) in the Raohe River Basin; And coupled with the Xin'anjiang model to get the water resources of Raohe River Basin in the future period. The results show that the future water resources of the Raohe River Basin will decrease continuously, and the A2 scenario will have a larger decline than the B2 scenario, and the largest decline of Changjiang river in the period of 2080s (2070–2099) will reach 31.01%.

Key words: Xin'anjiang model; SDSM; water resources; Raohe River Basin

气候变化使水文循环发生改变, 直接影响降水、蒸发、径流等水文过程, 对水资源量的空间配置产生影响, 并改变水资源总量。气候变化条件下, GCM 输出数据与流域水文模型耦合是研究流域未来水资源量的重要方法^[1]。袁飞等^[2]应用 VIC 模型与 PRECIS 模式耦合, 对气候变化背景下海河流域水资源量的变化趋势进行预测。郝振纯等^[3]应用分布式水文模型与 GCM 输出的气候情景耦合, 分析山西省和黄河源区水资源量变化趋势。郭靖

等^[4]将全球气候模式和 VIC 水文模型进行耦合, 研究未来时段 A2 气候情景下汉江流域降水径流变化情况。饶河作为鄱阳湖重要的五河之一, 日照充足, 降水较丰沛, 是鄱阳湖流域水资源量的高值区, 但季节分配不均。

本文将饶河流域作为研究对象, 运用新安江模型和 SDSM 统计降尺度模型的耦合来预测饶河流域未来水资源量, 为饶河流域水资源综合利用, 水资源与生态环境保护提供依据。同时为进一步研究鄱阳

收稿日期: 2016-12-28; 修回日期: 2017-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51420105014); 水利部公益性行业科研专项项目 (201401034、2012AA12A309); 中国长江三峡集团公司资助项目 (0799556)

作者简介: 刘威 (1992-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究工作。

通讯作者: 张行南 (1960-), 男, 江苏张家港人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学与水资源方面研究。

湖流域未来水资源量变化,湖区防治洪水与旱灾提供参考。

1 新安江模型与 SDSM 统计降尺度模型理论基础

1.1 新安江模型

新安江模型是传统的概念性水文模型,模型结构包括蒸散发计算、产流计算、水源划分、汇流计算 4 个模块。模型的核心是蓄满产流及蓄水容量曲线的计算模块。主要适应于湿润与半湿润地区,在水文模拟预报中有较好的应用^[5]。

1.2 SDSM 统计降尺度模型

SDSM 统计降尺度模型基于一种多元回归和随机天气发生器相耦合的原理^[6],可以把大尺度、低分辨率的 GCM 输出的气候情景转化为区域尺度的地面气候变化要素(如气温、降水)^[7]。模型主要包括两部分内容:首先通过多元线性回归方法建立预报量与预报因子之间的统计关系,并确定天气发生器所需参数;然后根据 GCM 输出数据与生成的参数,生成小尺度的未来日序列。使用 SDSM 模型一般包含 5 个步骤:数据质量控制、筛选因子、率定模型、天气发生器、情景发生器。预报量根据研究目的确定,预报因子从 26 个气象因子中选择,选择预报因子的依据是必须与预报量之间有较强的相关性。因子筛选后,率定好模型,就可以应用于 GCM 输出的未来气候情景,降尺度到气象站点,得到未来的日数据系列^[8]。

2 研究区域及数据资料

2.1 研究区域

饶河流域位于鄱阳湖流域东北部的北半部,主要由乐安河与昌江组成,主支流乐安河流域面积为 8 367 km²(含浙江省境内 229 km²,安徽境内 62 km²),昌江面积为 5 851 km²(含安徽境内 1 883 km²),尾间面积为 1 623 km²^[9]。流域多年平均气温为 16.7~17.7℃,多年平均降水量为 1 687~1 870 mm^[10],是鄱阳湖流域降水最多的地区之一。流域年径流量为 132.9×10⁸ m³,占鄱阳湖流域的 9.6%。饶河流域水系图见图 1。

2.2 数据资料

- 使用的数据主要包括以下 3 类:
- (1)景德镇气象站点 1961–2010 年逐日降水与逐日平均气温数据。
 - (2)逐日蒸发实测数据,渡峰坑,虎山站点逐日

流量数据,数据年限为 1953–2010 年。

(3)大尺度气候数据。包括 NCEP 再分析数据(1961–2001 年)和 GCM(General Circulation Model)模拟数据。NCEP 数据空间分辨率为 3.75°×2.5°,GCM 数据选用英国 Hadley 气候预测与研究中心的 HadCM3 模式,数据年限为 1961–2001 年和 2010–2099 年。



图 1 饶河流域水系图

3 SDSM 统计降尺度模型的建立与检验

3.1 因子选择

美国国家环境预报中心(NCEP)的全球再分析资料,在很多气候模拟和预测研究中都被作为区域气候模式的驱动场和初始场资料,并用来检验模拟结果^[11]。本文用 NCEP 再分析数据作为观测的大尺度数据,与区域气候要素建立统计模型。

应用 SDSM 降尺度模型,在 26 个气象因子中选出适合对景德镇气象站点的日平均气温、日降水进行降尺度的因子,其中筛选因子以各因子的解释方差和偏相关分析为依据。

根据各气象因子的 0.05 置信水平的检验情况和解释方差大小,将逐月方差贡献较大者选取为预报因子,以保证预报因子与预报量有一定的相关性,对各月的气温和降水有一定的预报能力^[12],表 2 给出了对景德镇气象站点气温与降水要素降尺度的因子。

3.2 模型的率定与检验

选取景德镇气象站点实测月平均降水、气温数据及筛选后的 NCEP 再分析数据(时间年限均为 1961–2001 年),建立与检验饶河流域统计降尺度模型,其中 1961–1990 年数据用于模型建立,1991–2001 年数据用于模型检验。

3.3 模型的率定与检验

选取景德镇气象站点实测月平均降水、气温数据及筛选后的 NCEP 再分析数据(时间年限均为

1961 – 2001 年),建立与检验饶河流域统计降尺度模型,其中 1961 – 1990 年数据用于模型建立,1991 – 2001 年数据用于模型检验。

表 1 NCEP 再分析数据

序号	气候因子	编码	序号	气候因子	编码
1	平均海平面气压	mslp	14	500 hPa 散度	p5zh
2	海平面风速	p__f	15	850 hPa 风速	p8_f
3	海平面纬向温度	p__u	16	850 hPa 纬向温度	p8_u
4	海平面径向温度	p__v	17	850 hPa 径向温度	p8_v
5	海平面涡度	p__z	18	850 hPa 涡度	p8_z
6	海平面地转风速	p_th	19	850 hPa 位势高度	p850
7	海平面散度	p_zh	20	850 hPa 地转风速	p8th
8	500 hPa 风速	p5_f	21	850 hPa 散度	p8zh
9	500 hPa 纬向温度	p5_u	22	500 hPa 相对湿度	r500
10	500 hPa 径向温度	p5_v	23	850 hPa 相对湿度	r850
11	500 hPa 涡度	p5_z	24	海平面相对湿度	rhum
12	500 hPa 位势高度	p500	25	地表比湿	shum
13	500 hPa 地转风速	p5th	26	地表平均温度	temp

表 2 景德镇站点选择的因子

气象要素	预报因子
气温	地表比湿、地表平均温度
降水	500 hPa 相对湿度、850 hPa 相对湿度、海平面相对湿度

表 3 给出了所建立的 SDSM 统计降尺度模型模拟与实测气温的对比分析,其中模拟值与实测值取

率定期(1961 – 1990)与检验期(1991 – 2001)的多年平均值。由表 3 可知,率定期 A2,B2 情景下,气温绝对误差的绝对值最大值均为 1.4℃,A2、B2 的偏差绝对值范围均为 0.1 ~ 1.4℃;检验期 A2,B2 情景下,气温绝对误差的绝对值最大值分别为 1.9℃和 2℃,A2、B2 的偏差绝对值范围分别为 0.1 ~ 1.9℃、0.2 ~ 2℃。表明 SDSM 模型能较好的模拟饶河流域的气温过程。

表 3 SDSM 模型对饶河流域气温模拟的绝对误差℃

月份	率定期					检验期				
	实测	A2	B2	Δ(A2)	Δ(B2)	实测	A2	B2	Δ(A2)	Δ(B2)
1	4.9	5.0	5.0	0.1	0.1	5.8	5.6	5.6	-0.2	-0.2
2	6.5	6.8	7.0	0.3	0.5	8.6	8.7	8.8	0.1	0.2
3	11.0	11.2	11.2	0.2	0.2	12.0	11.9	10.9	-0.1	-1.1
4	16.9	16.2	16.3	-0.7	-0.6	17.9	16.0	16.5	-1.9	-1.4
5	21.8	21.6	21.6	-0.2	-0.2	22.7	21.7	21.3	-1.0	-1.4
6	25.1	25.7	25.7	0.6	0.6	25.8	26.1	25.6	0.3	-0.2
7	28.7	30.1	30.1	1.4	1.4	29.2	30.6	30.8	1.4	1.6
8	28.5	29.2	29.2	0.7	0.7	28.6	29.2	29.5	0.6	0.9
9	24.3	23.6	23.5	-0.7	-0.8	25.4	24.3	23.4	-1.1	-2.0
10	18.7	18.4	18.5	-0.3	-0.2	19.8	18.9	18.7	-0.9	-1.1
11	12.5	12.9	13.0	0.4	0.5	13.5	13.0	12.7	-0.5	-0.8
12	6.8	6.9	6.9	0.1	0.1	8.0	7.7	7.7	-0.3	-0.3

图 2 和图 3 分别列出了率定期与检验期实测、A2 和 B2 情景下模拟的多年平均月降水序列。从图 2 和图 3 中可以看出,虽然率定期 GCM 输出数据模拟降水整体偏大,但偏大的幅度在可接受的范围内;在检验期,A2 和 B2 情景下输出数据能较好的拟合实测降水,因此可以应用 HadCM3 输出数据进行降尺度分析,得到饶河流域未来降水、气温序列。

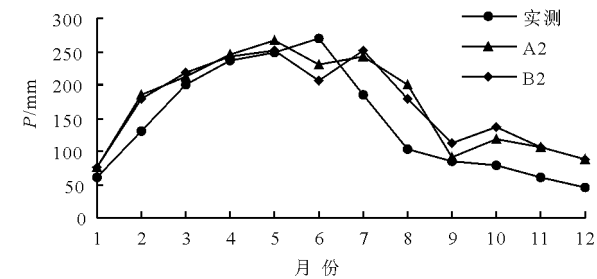


图 2 率定期实测与模拟降水对比分析 (1961 - 1990 年多年平均)

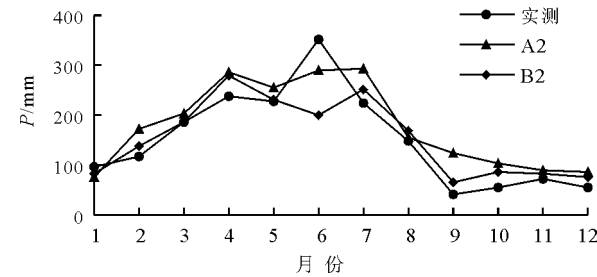


图 3 检验期实测与模拟降水对比分析 (1991 - 2001 年多年平均)

4 未来径流变化预测分析

4.1 气温 - 蒸发回归分析

通过降尺度模型得到未来降水、气温序列,为了将气温序列转化为新安江模型所需要的蒸发序列,根据徐若兰等^[13]的思路,可分析景德镇气象站点多年实测蒸发值与实测气温之间的回归关系。根据已

有的气象站点与蒸发站点实测资料 (1952 - 2010 年),建立回归关系,结果见图 4。由图 4 可知,两者关系密切,确定性系数达到 0.932。

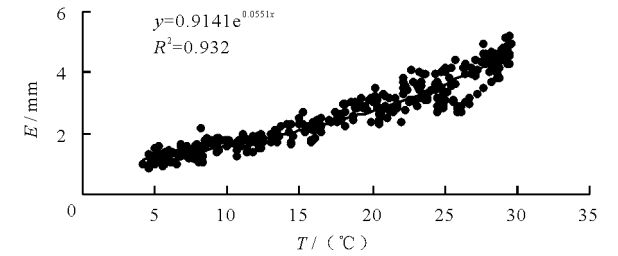


图 4 景德镇站点蒸发与气温回归关系

4.2 未来降水蒸发预测

通过上述建立好的 SDSM 统计降尺度模型,对大尺度的 GCM 气候输出数据进行降尺度,可以得到饶河流域未来时期的降水,气温日序列,再通过上述气温、蒸发回归关系,可以得到蒸发序列。时间上,选取 1961 - 2001 为基准年,2010 - 2099 为未来时段。为了便于统计分析,将未来 90 年划分为三个时期:分别为 2020s (2010 - 2039 年),2050s (2040 - 2069 年),2080s (2070 - 2099 年)^[14]。

表 4 给出了未来时期相对于基准期年降水、气温和蒸发的变化情况,其中基准期的降水量采用 GCM 模拟的数据,使基准期和未来的降水能在相同的模拟误差下进行比较。可以看出,无论是 A2 情景还是 B2 情景,未来时段降水均呈现不同程度的减少,气温呈现不同程度的增加,由气温和蒸发建立的回归关系可以得到蒸发也呈现不同程度的增加趋势。降水的变幅先减小后增加,在 2080s 时期达到最大变幅,气温和蒸发则随着时间依次增加。B2 情景降水的变幅明显小于 A2 情景的变幅,气温和蒸发的变幅则相差不大。

表 4 饶河流域未来年降水、气温和蒸发变化情况

情景	变量	基准期	未 来					
			2020s	变幅/%	2050s	变幅/%	2080s	变幅/%
A2	P/mm	2075.30	1895.90	-8.64	1989.9	-4.11	1820.9	-12.26
	$T/^{\circ}\text{C}$	17.38	18.13	4.33	19.17	10.31	19.61	12.83
	E/mm	857.50	893.80	4.23	946.50	10.38	969.7	13.08
B2	P/mm	1992.20	1946.20	-2.31	1985.00	-0.36	1862.4	-6.51
	$T/^{\circ}\text{C}$	17.35	18.08	4.23	18.84	8.60	19.60	13.00
	E/mm	855.80	891.04	4.12	929.10	8.57	969.00	13.23

4.3 未来径流预测

将上述得到的未来时段年降水、蒸发序列作为

新安江模型的输入,模拟预测饶河流域未来径流量。选用遗传算法优选新安江模型参数^[15]。输入

相关参数信息,如流域面积、资料率定期长度及检验期长度、参数优选范围、参数初始值、流域的初始条件和参数优选算法中的参数等,再将渡峰坑站、虎山站的流量系列以及分区平均降雨和平均蒸发量输入模型中进行模拟计算。其中率定期为1997-2002年,检验期为2003-2004年。模型率定与检验结果见表5及图5~8。

表5 饶河流域控制站新安江模型率定和检验结果

子流域	确定性系数(R^2)	
	率定期	检验期
渡峰坑	0.66	0.67
虎山	0.70	0.71

将基准期和未来时期的逐日降水,蒸发序列输入率定好的流域水文模型,保持参数不变,得到基准期1961-2001年和未来2010-2099年的子流域径流序列。结果见表6。

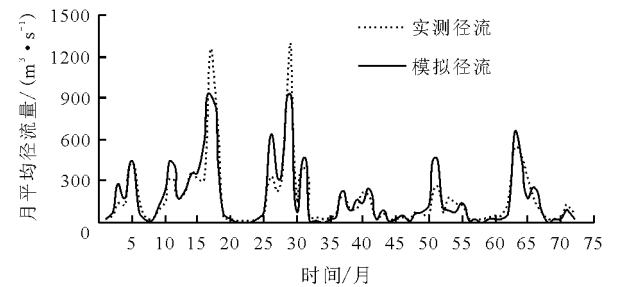


图5 率定期渡峰坑站实测与模拟月径流过程(1997-2002年)

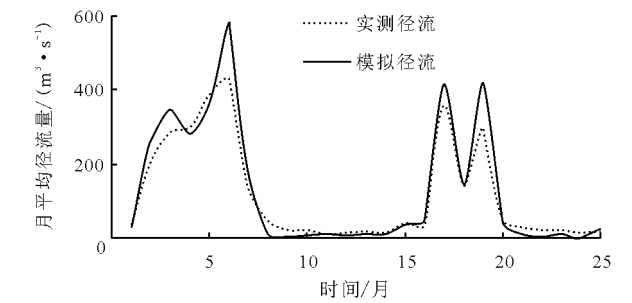


图6 检验期渡峰坑站实测与模拟月径流过程(2003-2004年)

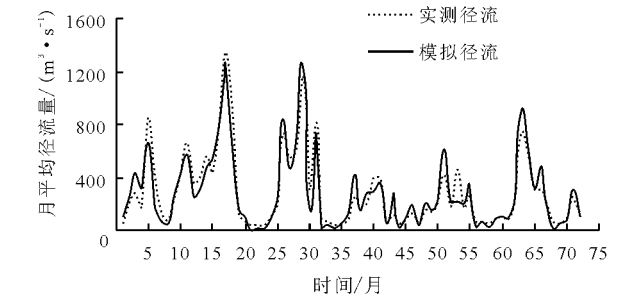


图7 率定期虎山站实测与模拟月径流过程(1997-2002年)

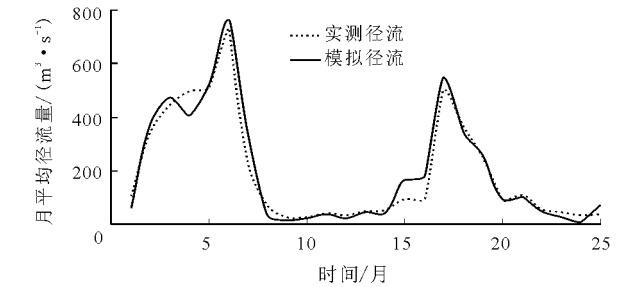


图8 检验期虎山站实测与模拟月径流过程(2003-2004年)

表6 饶河流域未来径流量变化情况

10⁸ m³

子流域	情景	基准期	未 来					
			2020s	变幅/%	2050s	变幅/%	2080s	变幅/%
渡峰坑	A2	59.18	49.41	-16.51	52.11	-11.95	40.83	-31.01
	B2	55.44	51.8	-6.57	51.87	-6.44	44.48	-19.77
虎山	A2	100.48	88.18	-12.24	92.55	-7.89	79.22	-21.16
	B2	95.57	91.25	-4.52	92.35	-3.37	83.49	-12.64

由上表可以看出,未来时段不论是A2情景还是B2情景,径流量均呈现不同程度的减少;2080s时期相较于2020s与2050s两个时期,降幅明显偏大,渡峰坑在A2情景下最大降幅可达31.01%;B2情景在2020s与2050s两个时期降幅不太明显,2080s降幅显著,整体B2情景降幅明显小于A2情景。

5 结 论

(1)未来气候模式下,饶河流域降水呈现减少

趋势,蒸发呈现增加趋势,降水的变幅先减小后增大,气温与蒸发的变幅则逐年增大。

(2)在A2和B2情景下,饶河流域年径流量呈减少趋势,其中昌江流域降幅小于乐安河降幅,2080s时期相较于2020s与2050s两个时期,降幅显著,至2080s时期昌江支流最大降幅可达31.01%。总体上看,B2情景降幅明显小于A2情景。

(下转第26页)

- 时空特征及其对气候因子的响应[J]. 地理科学, 2015, 35(8):1033-1041.
- [8] 李鹏飞, 刘文军, 赵昕奕. 京津冀地区近 50 年气温、降水与潜在蒸散量变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3):137-143.
- [9] 王 琼, 张明军, 潘淑坤, 等. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5):1292-1302.
- [10] 史建国, 严昌荣, 何文清, 等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(6):773-778.
- [11] 曾丽红, 宋开山, 张 柏, 等. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化[J]. 水科学进展, 2010, 21(2):194-200.
- [12] 王素萍. 近 40a 江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5):960-965.
- [13] 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9):1470-1476.
- [14] 卢亚静, 秦天玲, 刘少华, 等. 西藏那曲流域典型测站气候特征分析[J]. 人民长江, 2016, 47(22):32-38.
- [15] 徐丽梅, 郭 英, 刘 敏, 等. 1957 年至 2008 年海河流域气温变化趋势和突变分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5):995-1001.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [17] 符淙斌, 王 强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4):482-493.
- [18] 戴明宏, 李玉涛, 王腊春, 等. 典型喀斯特地区参考作物蒸散量的时空变化分析——以贵州省为例[J]. 地球与环境, 2016, 44(3):342-352.
- [19] 张伟伟, 王 允, 张国斌. 西南地区 1960-2013 年参考作物蒸散量时空变化特征及成因分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2):135-141.
- [20] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 1981-2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J]. 地理学报, 2013, 67(2):1471-1481.

(上接第 19 页)

参考文献:

- [1] 王 乐, 郭生练, 洪兴骏, 等. 赣江流域未来降雨径流变化模拟预测[J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 3(6):522-531.
- [2] 袁 飞, 谢正辉, 任立良, 等. 气候变化对海河流域水文特性的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3):274-279.
- [3] 郝振纯, 李 丽, 王加虎, 等. 气候变化对地表水资源的影响[J]. 地球科学, 2007, 32(3):139-146.
- [4] 郭 靖, 郭生练, 张 俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究[J]. 水文, 2009, 29(5):18-22.
- [5] 包为民, 等. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [6] 褚健婷, 夏 军, 许崇育. SDSM 模型在海河流域统计降尺度研究中的适用性分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12):1825-1832.
- [7] 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.
- [8] 王 宁. 基于 VIC 模型和 SDSM 的气候变化下西北旱区的径流响应模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [9] 潘海军. 鄱阳湖流域饶河水资源分配探讨[J]. 广东水利水电, 2014(8):81-83.
- [10] 江西省水利厅. 江西河湖大典[M]. 武汉: 长江出版社, 2010.
- [11] 赵天保, 艾丽坤, 冯锦明. NCEP 再分析资料和中国站点观测数据的分析与比较[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2):278-294.
- [12] 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.
- [13] 徐若兰, 陈 华, 郭 靖. 气候变化对汉江流域上游水文极值事件的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3):383-386.
- [14] 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.
- [15] 陈炯烽, 张万昌. 概念性水文模型遗传算法多目标参数优选研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6):5-7+11.