

# Climate Change Impact on Hydro-Climate Variables in the Xiangjiang Basin\*

Yi Xiao<sup>1</sup>, Shaohua Tang<sup>1</sup>, Hua Chen<sup>2</sup>, Linjuan Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Water Resources of Hunan Province, Changsha

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan  
Email: 7100120@qq.com

Received: Nov. 27<sup>th</sup>, 2012; revised: Dec. 11<sup>th</sup>, 2012; accepted: Dec. 27<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Based on the collection of historical hydro-climate data, such as precipitation, temperature and evaporation in the Xiangjiang Basin, the relationship between the local hydro-climate variables and large scale climate predictors of GCM has been established by using Automated Statistical Downscaling model. The future change of those hydro-climate variables was predicted by using this technical frame during the period of 2010-2099 in this basin. The results showed that temperature and evaporation will increase significantly, while precipitation has no significant change trend in future.

**Keywords:** Climate Change; Xiangjiang Basin; Statistical Downscaling Method; Temperature; Precipitation; Evaporation

## 气候变化对湘江流域降水气温和蒸发的影响变化预测\*

肖义<sup>1</sup>, 唐少华<sup>1</sup>, 陈华<sup>2</sup>, 胡林娟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖南省水利厅, 长沙

<sup>2</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉  
Email: 7100120@qq.com

收稿日期: 2012年11月27日; 修回日期: 2012年12月11日; 录用日期: 2012年12月27日

**摘要:** 通过收集和整理湘江流域历史水文气象资料, 利用统计降尺度方法建立湘江流域气温、降水和蒸发等要素同全球气候模式大尺度因子的统计关系, 分析和预测了未来湘江流域水文气象要素的变化情况。研究表明, 未来2010~2099年湘江流域气温和蒸发有较明显的上升趋势, 降水变化趋势不明显。

**关键词:** 气候变化; 湘江; 统计降尺度; 气温; 降水; 蒸发

### 1. 引言

气候变化已成为当今科学界、各国政府和社会公众普遍关注的环境问题之一<sup>[1,2]</sup>。气候异常增强了水文规律的不确定性和复杂性, 加大了水资源管理的难度。在全球气候变化背景下, 湘江流域水文循环规律

也发生了变化, 水资源时空分布不均的现象进一步加剧, 水文气象等极端灾害事件越发频繁: 2008年冬天罕见的低温冰冻灾害; 2009年10月下旬和11月上旬刚出现长时间干旱少雨和特枯水位, 紧接着又马上出现长时间的降雨和水位迅速抬升以至部分河段甚至逼近警戒水位的反常现象。因此, 分析气候变化影响下水文气象要素, 如气温、降水、和蒸发的变化情况, 为湘江流域的水资源规划与管理提供科学依据, 具有

\*基金项目: 国家自然科学基金(51279138)。

作者简介: 肖义(1980-), 博士, 湖南岳阳人, 主要从事水资源规划及管理有关工作。

重要意义。

## 2. 研究区域和数据

湘江流域年平均温度在 17℃ 以上, 最冷月平均温度最北部一般也在 4℃ 以上, 少见冰雪。但若遇北方猛烈寒潮侵入的时候, 全流域均可发生 0℃ 以下的低温, 如南部的郴州 2008 年发生了冰雪灾害, 但是这种低温持续时间不是很长。夏热时间一般较长, 其中 7 月为一年中最热的月份, 平均温度在 29℃~30℃ 左右, 个别地区达到 30℃ 以上。流域内降雨强度大且雨量充沛, 多年平均降雨量为 1458 mm, 个别地区可达 1700 mm, 呈现湘江南、东、北部偏多而中南部偏少的降雨特点, 多集中于 3~7 月, 其中汛期(4~9 月)降雨占全年的 70% 左右。流域多年平均径流深为 815 mm, 径流系数为 0.55 左右。

由于东南西三面环山, 湘江流域具有南高北低, 向北倾注的形势, 以衡阳以上为中上游, 其下为中下游。本文采用湘江流域 7 个气象站点的日均气温资料(1960~2008 年), 11 个站点的日蒸发资料(1984~2005 年), 177 个站点的日降雨资料(1984~2005 年)。对气温资料采用分站点分析统计计算, 对蒸发及降雨资料采用分子流域(中上游流域和中下游流域)进行分析统计计算。采用 NCEP/NCAR 全球再分析日资料作为观测的大尺度气候资料, 与区域气候要素建立统计模型。NCEP 再分析资料空间分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 覆盖湘江流域的网格数为  $3 \times 2$  个经纬网格, 测站和网格的位置关系见图 1。另外, 在 A2 和 B2 两种未来气候排放情景下, HadCM3 模型生成的大尺度气候资料作为统计模型的输入, 区域未来气候要素变化时间序列即为统计模型输出。

## 3. 统计降尺度技术

由于全球气候模型 GCM 分辨率一般比较粗, 不能适当地描述复杂地形、地表状况和某些物理过程, 从而对区域气候变化模拟产生较大的偏差, 影响其可信度<sup>[3-5]</sup>。因此, 需要一种尺度降解技术来建立流域水文模型同大尺度 GCM 模型的耦合机制<sup>[6,7]</sup>。目前统计降尺度方法已被广泛应用于研究和评估区域气候变化影响, 其中 ASD(Automated Statistical Downscaling model)模型<sup>[8]</sup>是基于自回归分析的一种统计降尺度模型。

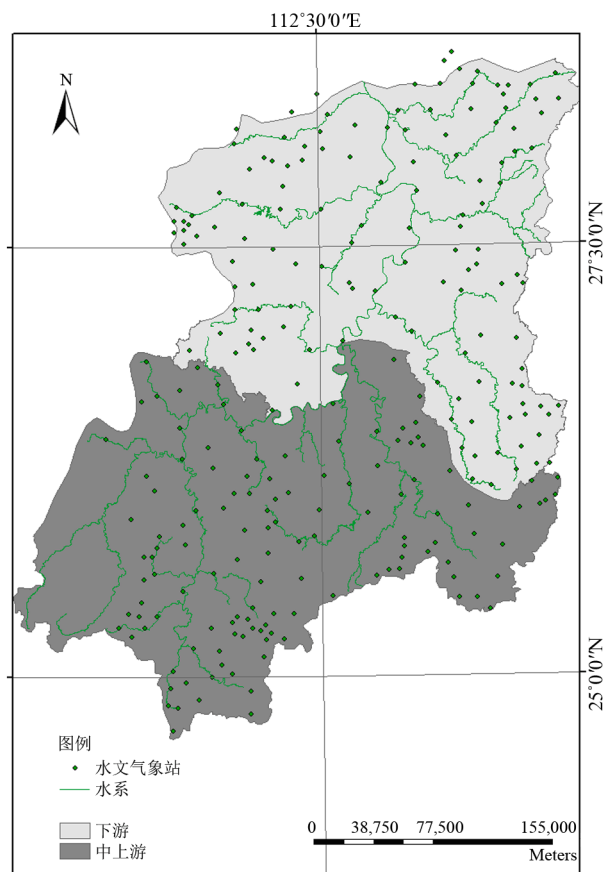


Figure 1. The distribution of NCEP grids and hydro-meteorological stations in the Xiangjiang Basin  
图 1. 湘江流域水文气象站点和 NCEP 网格分布图

统计降尺度法利用多年的观测资料建立大尺度气候状况(主要是大气环流)和区域气候要素之间的统计关系, 并应用于 GCM 输出的大尺度气候信息以预估区域未来的气候变化情景。ASD 模型采用向后逐步回归方法和偏相关分析方法来提取主因子。在建立大尺度气候因子与区域气象要素间的统计关系时, 统计降尺度法一般使用多元线性回归, 但是气候因子所组成的向量具有非正交性, 导致回归系数的最小二乘估计不稳定, 故 ASD 模型还提供了一种可以减轻气候因子非正交性影响的岭回归方法。对线性模型  $y = Xb + e$ , 岭回归系数计算公式如下:

$$b = (X^T X + kI)^{-1} X^T y \quad (1)$$

式中:  $I$  为单位矩阵,  $k$  为岭参数(当  $k = 0$  时, 即为最小二乘估计), 主因子在计算之前需标准化。

该模型对降雨的模拟过程是条件性的, 即先模拟降雨发生的概率, 再模拟降雨量, 计算公式如下:

$$O_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j p_{ij} \quad (2)$$

$$R_j^{0.25} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j p_{ij} + e_j \quad (3)$$

式中:  $O_i$  为日降雨概率,  $R_j$  为日降雨量,  $p_{ij}$  为气候因子,  $n$  为选择的气候因子的数目,  $\alpha$  和  $\beta$  为模型参数,  $e_j$  为模型误差。

对温度的模拟则是无条件的:

$$T_j = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j p_{ij} + e_j \quad (4)$$

式中:  $T_j$  为日温度(平均值、最大值、最小值),  $\gamma$  为模型参数, 假设  $e_j$  符合高斯分布, 可按下列公式计算:

$$e_j = \sqrt{VIF/12z_j} Se + b \quad (5)$$

式中:  $z_j$  为一正态分布的随机数,  $Se$  是模拟值的标准差,  $b$  为模型偏差,  $VIF$  为方差膨胀因子。当采用 NCEP 再分析资料来率定模型时,  $VIF$  和  $b$  分别取为 12 和 0; 当使用 GCM 资料生成未来气候情景时,  $VIF$  和  $b$  按下列公式计算:

$$b = M_{obs} - M_d \quad (6)$$

$$VIF = \frac{12(V_{obs} - V_d)}{Se^2} \quad (7)$$

式中:  $V_{obs}$  为率定期观测值的方差,  $V_d$  为率定期模型输出中确定性部分的方差,  $Se$  为标准差,  $M_{obs}$  为率定期观测值的平均值,  $M_d$  为率定期模型输出中确定性部分的平均值。

## 4. 分析与讨论

### 4.1. 统计降尺度模型的建立

如前所述, 对气温, 建立各站点与其所在格网间的统计模型; 对降雨和蒸发, 则建立各分区与湘江流域覆盖的所有格网间的统计模型。将以上相关资料及参数信息输入模型中, 经模拟计算可得湘江流域水文气象要素未来气候变化情景。建立的统计模型的确定性系数见表 1 和表 2。

由表 1 和表 2 可以看出, ASD 模型对气温的模拟效果很好, 效率系数都达到 0.95 左右, 而对降雨的模拟效果比较差, 效率系数都没有超过 0.40, 对蒸发的模拟效果处于中间, 在 0.65 到 0.80 之间。对气温,

直接采用建立的统计模型生成未来气候变化情景; 对降雨和蒸发, 采用确定性系数最大的统计模型生成未来气候变化情景。

以各气温站观测值作为基准, 在检验期流域中上 A2 和 B2 情景下模拟值同各月平均气温观测值的绝对偏差可见图 2。

由上系列图可知, 在 A2 和 B2 两种情景下, 中上游各站气温的模拟值在夏季偏高, 在冬季偏低, 在春秋两季偏差都向正方向增加; 但 A2 情景下在四季偏差都较大, B2 情景下则在春季的偏差比较小; 另外,

Table 1. Deterministic coefficient of temperature downscaling model

表 1. 气温统计模型确定性系数

站点编码	站名	格网	R2
57679	长沙	31X23Y	0.9631
57774	双峰	30X24Y	0.9403
57776	南岳	31X24Y	0.9771
57866	零陵	30X24Y	0.9436
57872	衡阳	31X24Y	0.9573
57965	道县	30X24Y	0.9475
57972	郴州	31X24Y	0.9507

Table 2. Deterministic coefficient of precipitation and evaporation downscaling models

表 2. 降雨及蒸发统计模型确定性系数

分区	格网	R2 (Precipitation)	R2 (Evaporation)
	30X24Y	0.2689	0.6992
中上游	31X23Y	0.2351	0.6516
	31X24Y	0.3488	0.7467
	30X24Y	0.3026	0.7385
中下游	31X23Y	0.3552	0.7172
	31X24Y	0.3560	0.7980

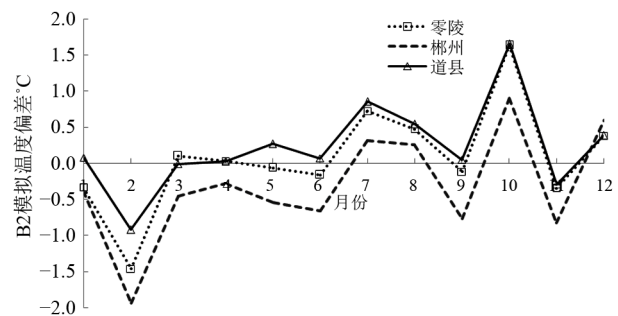


Figure 2. The absolute deviation between monthly average temperature observation and simulation from A2 and B2 scenario in the Xiangjiang Basin

图 2. 湘江流域月平均温度 A2、B2 情景模拟绝对偏差结果

A2 情景下模拟值在实测值上下振荡频率小, B2 情景下模拟值与实测值间的偏差起伏变化较大, 另外湘江流域下游各气温站点起伏变化基本一致。

以实测值作为基准, 在检验期 A2 和 B2 情景下, 湘江流域两个子流域的月平均降雨量和月平均蒸发量的模拟值与实测值之间的绝对偏差可见图3和图4。

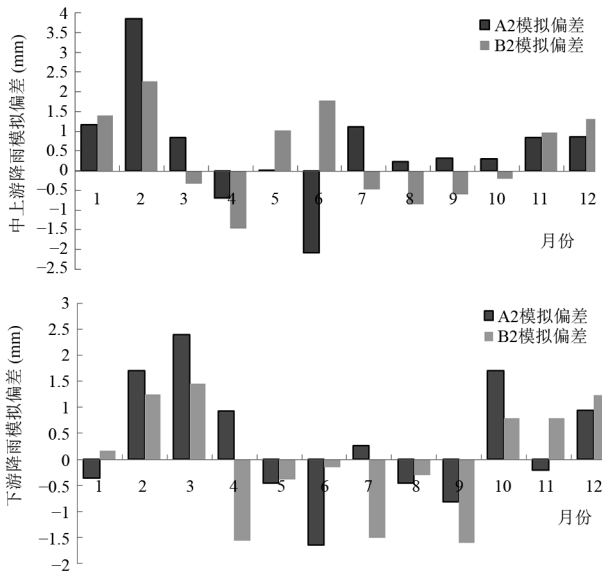


Figure 3. The absolute deviation between monthly average precipitation observation and simulation from A2 and B2 scenario in the Xiangjiang Basin  
图3. 流域月平均降雨量模拟效果

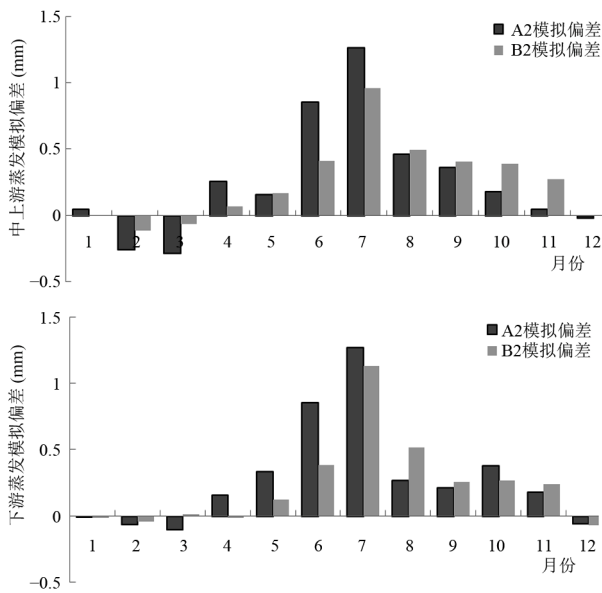


Figure 4. The absolute deviation between monthly average evaporation observation and simulation from A2 and B2 scenario in the Xiangjiang Basin  
图4. 流域月平均蒸发量模拟效果

由上系列图可知, A2 情景比 B2 情景的最大正偏差和最小负偏差值都大; 湘江流域 A2 和 B2 情景下的月平均降雨量, 总体来说, 枯水季节有正偏差, 汛期则出现负偏差, 使降雨年分布趋向均匀化; 但中上游月平均降雨量偏差在汛期 A2 情景下先正后负, B2 情景下负正交替; 整个湘江流域的月平均蒸发量在 A2、B2 情景下变化趋势基本相同, 即在夏季正偏差最大, 到冬季则偏差最小, 对年分布来说则加大了不均匀性。

### 4.2. 未来湘江流域水文气象要素变化预测

由以上建立统计模型并验证后, 将 HadCM3 在 A2 和 B2 情景下生成的未来气候因子资料降解可得湘江流域 2010 年~2099 年的日均气温、日均降雨量和日均蒸发量。

由图 5 可知, 在 A2 和 B2 情景下, 湘江流域的气温均呈稳步上升趋势, 且变化趋势在 A2 情景下较在 B2 情景下明显; 另外, 除了南岳站由于地形因素气温较低外, 气温自南向北降低; 而整个流域的气温变化趋势基本一致。

由图 6 可知, 在 A2 和 B2 情景下, 湘江流域的降雨量起伏变化较大, 且 A2 情景下的变化幅度大于 B2 情景下的变化幅度; 另外, 中上游降雨量的变化幅度较中下游的变化幅度大。总体来说, 未来 2011 年到

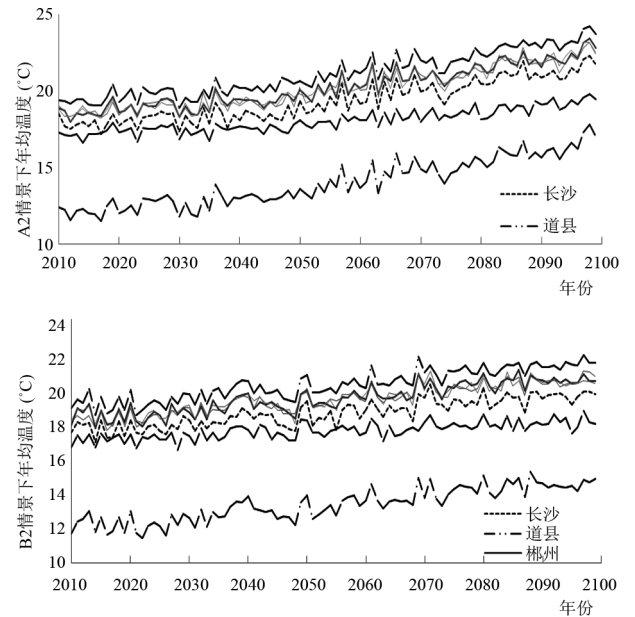


Figure 5. The annual mean temperature simulations from A2 and B2 scenario in the basin from 2010 to 2099  
图5. 2010~2099 年各气温站年均气温模拟

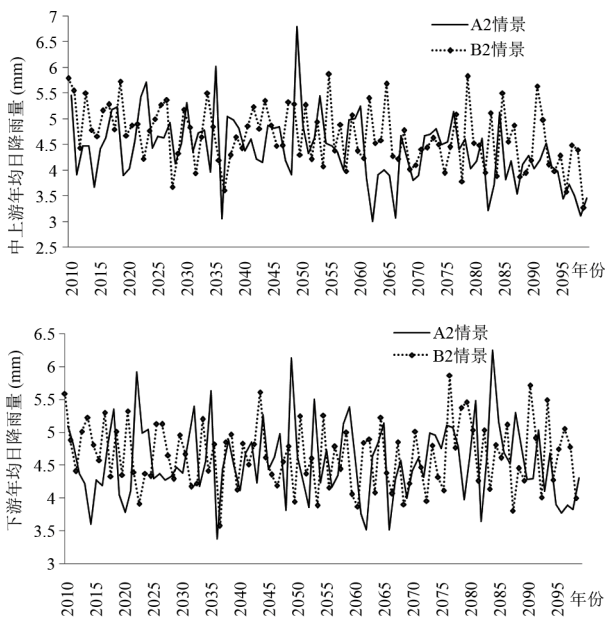


Figure 6. The annual mean precipitation simulation from A2 and B2 scenario in the basin from 2010 to 2099  
图 6. 湘江流域未来 2010~2099 年年均降雨量

2099 年湘江流域丰枯水年间有, 且中上游降雨量有减少的趋势。

由图 7 可知, 湘江流域的蒸发量在未来 A2 和 B2 情景下均呈增加趋势; 中上游的蒸发量比中下游的蒸发量大, 且中上游的蒸发量 A2 情景较 B2 情景变化幅度大, 中下游的蒸发量 A2 情景较 B2 情景变化幅度小。

## 5. 结论

为了分析和预测气候变化影响下, 湘江流域气温、降水和蒸发的变化情况, 本文应用 ASD 统计降尺度模型, 来建立全球气候模式的大尺度气候因子同湘江流域水文气象要素之间的统计关系。主要研究结论如下:

1) ASD 统计降尺度方法对气温的模拟效果很好, 效率系数都达到 0.95 左右, 对蒸发的模拟效果较好, 效率系数在 0.65~0.80 之间, 然而降雨的模拟效果比较差, 效率系数都没有超过 0.40。目前无论是国内还是国外, 统计降尺度方法对日降水的模拟, 都很难取得令人非常满意的结果。

2) 在 A2 和 B2 两种情景下, 湘江流域各站气温的模拟值在夏季偏高, 在冬季偏低, 在春秋两季偏差都向正方向增加; 月平均降雨量枯水期相对偏差较大, 汛期较小, 而中上游流域相对偏差较大的时间较

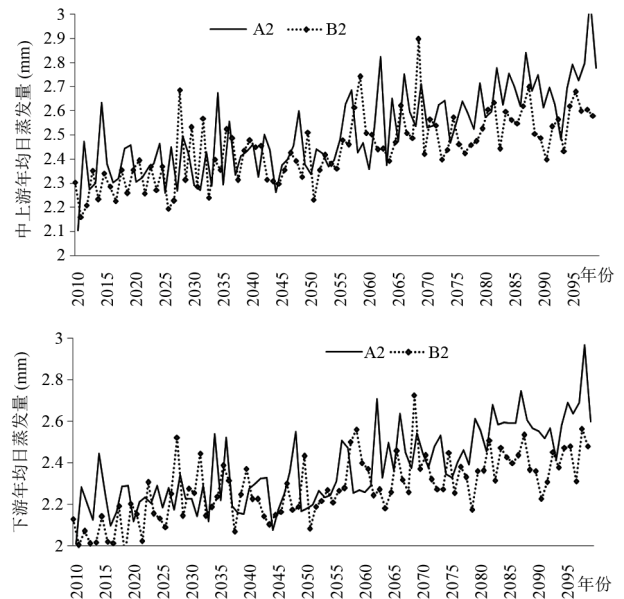


Figure 7. The annual mean evaporation simulation from A2 and B2 scenario in the basin from 2010 to 2099  
图 7. 湘江流域未来 2010~2099 年年均蒸发量

为集中, 下游流域相对偏差较大的时间相对较分散; 月平均蒸发量汛期相对偏差比较大, A2 情景的偏差大于 B2 情景的偏差。

3) 在 A2 和 B2 情景下, 湘江流域的气温均呈稳步上升趋势, 且变化趋势在 A2 情景下较在 B2 情景下明显; 湘江流域的降雨量起伏变化较大, 变化趋势不明显, 需要进一步分析明确, 且 A2 情景下的变化幅度大于 B2 情景下的变化幅度; 湘江流域的蒸发量在未来均呈增加趋势, 中上游的蒸发量 A2 情景较 B2 情景变化幅度大, 下游的蒸发量 A2 情景较 B2 情景变化幅度小。

## 参考文献 (References)

- [1] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
China's National Assessment Report on Climate Change Editing Committee. China's national assessment report on climate change. Beijing: Science Publication, 2007. (in Chinese)
- [2] IPCC. METZ, B., DAVIDSON, O. R., BOSCH, P. R., DAVE, R., MEYER, L. A., Eds. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] WILBY, R. L., WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. Progress in Physical Geography, 1997, 21(4): 530-548.
- [4] XU, C. Y. From GCMs to river flow: A review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. Progress in Physical Geography, 1999, 23(2): 229-249.

- [5] CHEN, H., XU, C.-Y. and GUO, S. L. Comparison of statistical downscaling methods and their performance in driving hydrological models in climate change study. *Journal of Hydrology*, 2012, 434-435: 36-45.
- [6] XU, C.-Y., WIDÉN, E. and HALLDIN, S. Modelling hydrological consequences of climate change—Progress and challenges. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(6): 789-797.
- [7] CHEN, H., GUO, J., GUO, S. L., XU, C.-Y. and XIONG, W. Downscaling of daily precipitation from GCMs predictions in Hanjiang Basin using smooth support vector machine. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(2): 274-284.
- [8] HESSAMI, M., GACHON, P., OUARDA, T. B. M. J. and ST-HILAIRE, A. Automated regression-based statistical downscaling tool. *Environmental Modelling and Software*, 2008, 23: 813-834.