

Trends Analysis on Spatiotemporal Characteristics of Reference Evaporation in the Yangtze River Basin

Zishuo Li^{1,2}, Xin'e Tao^{1,2}, Hua Chen^{1,2}

¹School of Water Resources and Hydropower Engineer, Wuhan University, Wuhan Hubei

²State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Science, Wuhan Hubei

Email: lizishuo2013@163.com

Received: Nov. 9th, 2015; accepted: Nov. 29th, 2015; published: Dec. 10th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on 134 hydro-meteorological gauges in the Yangtze River basin 1961-2010 daily meteorological data, the reference evaporation was calculated by using the Penman-Monteith method. To predict the future change of the reference evaporation, SDSM (the Statistical Down-Scaling Model) method was used to downscale the outputs of GCMs, which was firstly trained by utilizing the NCEP reanalysis data. Results show that: 1) SDSM reference evaporation method performed better in simulating the reference evaporation as to the high simulation deterministic coefficient (0.93) in the testing period; 2) 1961-2010 annual reference evaporation in the Yangtze River basin decreased significantly; decreasing sites concentrated in the lower reaches, the middle stream and the north of the Yangtze River basin; 3) under Rcp45 and Rcp85 climate scenarios, reference evaporation of the Yangtze River basin will increase in 2011 - 2099 years, and the rate of increase of reference evaporation under Rcp85 scenarios is greater than Rcp45.

Keywords

Climate Change, Yangtze River Basin, Statistical Down-Scaling Model, Reference Evaporation

长江流域参照蒸发量时空变化趋势分析

李子硕^{1,2}, 陶新娥^{1,2}, 陈 华^{1,2}

¹武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉

作者简介: 李子硕(1994-), 男, 研究领域水文水资源。

文章引用: 李子硕, 陶新娥, 陈华. 长江流域参照蒸发量时空变化趋势分析[J]. 水资源研究, 2015, 4(6): 522-529.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2015.46065>

²武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: lizishuo2013@163.com

收稿日期: 2015年11月9日; 录用日期: 2015年11月29日; 发布日期: 2015年12月10日

摘要

根据长江流域134个气象站1961-2010年逐日气象资料, 基于Penman-Monteith法计算参照蒸发量, 选取NECP再分析数据, 采用SDSM (the Statistical Down-Scaling Model)方法, 进行长江流域未来参照蒸发量的降尺度研究。研究表明: 1) SDSM方法对参照蒸发量能较准确的模拟, 检验期的确定性系数可达93%以上; 2) 1961~2010年长江流域的蒸发蒸腾量呈下降趋势, 显著下降的站点集中在长江中下游区域、长江流域北部的区域; 3) Rcp45与Rcp85气候情景下, 长江流域未来2011~2099年的参照蒸发量呈上升趋势, 且Rcp85情景下的参照蒸发量增加的幅度大于Rcp45。

关键词

气候变化, 长江流域, 统计降尺度, 参照蒸发蒸腾量

1. 引言

气候变化及其水循环的影响, 特别是对区域水文系统的影响是21世纪各国可持续发展中面临的重大课题[1][2]。蒸散发作为水循环中的重要组成部分, 其变化影响着全球的水文循环。参照蒸发量是确定集水区水量损失的关键水文要素, 用来计算实际蒸发蒸腾量, 制定灌溉制度以及作为水文模型的输入数据[3]-[7]。大气中CO₂的增加会改变全球的能量平衡, 导致全球气候变暖, 伴随着气候变暖, 全球水循环被改变, 反过来又影响到生态、社会、经济等和人类相关的各个方面[8][9]。

本文基于实测气象数据和Penman-Monteith (P-M)方法计算长江流域近50年各站点的逐日参照蒸发量(ET₀), 分析了长江流域近50年来ET₀的变化趋势及空间分布, 分析评估SDSM模型对模拟长江流域参照蒸发量的适用性, 重点分析日参照蒸发量的降尺度效果, 揭示长江流域未来在不同气候情景下ET₀的变化趋势, 为开展气候变化对长江流域水资源的影响研究提供基础和支撑。

2. 数据和方法

2.1. 研究区域概况

长江流域位于24°27'~35°54'N, 90°33'~122°19'E之间, 流域面积18,010⁴km², 全国总面积的18.8%, 流域地势变化幅度大, 西高东低并呈现三大阶梯状, 海拔从5000 m以上到500 m以下。长江流域的地貌类型复杂多样, 高原、山地和丘陵盆地占绝大部分, 平原面积较小。由于地域辽阔, 地形复杂, 季风气候十分典型, 长江流域分带性明显。长江流域是我国人口稠密、经济高度发达的地区, 在我国国民经济发展中具有举足轻重的作用和地位。

长江流域多年平均年降水量为1126.7 mm, 属于我国降水丰沛的地区。受局地环流和地形的影响, 年降水量的空间分布非常不均匀, 自东南向西北呈减少趋势。中下游地区除汉江水系和干流区下游外, 年降水量均多于1100 mm。长江流域多年平均陆面蒸发量为541 mm, 其地区分布趋势是中下游大于上游, 平原和盆地大于山区, 南岸大于北岸。按水系, 鄱阳湖、太湖、洞庭湖流域及中、下游干流区陆面蒸发量较大; 乌江、嘉陵江、岷江和汉江上游陆面蒸发量较小; 金沙江陆面蒸发量最小。从年陆面蒸发量等值线分布趋势看, 以500 mm等

值线贯穿地区最广，此线的西部和北部，多处在 300~400 mm 之间，在长江江源北部不足 200 mm，为全流域最低值区；此线以东、以南，大多为 600~700 mm，个别地区达 800 余 mm；四川盆地、金沙江下游、乌江及长江中游部分地区，大都在 500~600 mm 之间；在洞庭湖区至江汉平原，达 700~800 mm，并有一个 800 mm 的闭合圈；在鄱阳湖区，也有一个大于 800 mm 的高值区，其中赣江流域的吉安，陆面蒸发量超过 1000 mm，是长江流域最大值；长江中下游干流区间陆面蒸发量也达 700~800 mm。长江流域各地陆面蒸发有随高程增加而递减的趋势，即高程越高，陆面蒸发量越小；高程越低，陆面蒸发量越大。

2.2. 数据来源

本研究主要用到了三种数据类型，包括气象站的实测气象数据，NCEP (National Center for Environment Prediction)再分析数据和 GCM 输出数据。实测气象数据为长江流域 134 个气象站 1961~2010 年包括气温、风速、日照和相对湿度等逐日气象资料，流域内气象站点的分布情况如图 1 所示。NCEP 数据中，选取了 7 个大气因子，包括海平面气压、海平面处温度、500 hPa 处纬向风速、500 hPa 的位势高度、850 hPa 处比湿、850 hPa 处相对湿度、850 hPa 处温度。综合考虑 GCM 模式在中国地区的适应性、模式的分辨率和数据资料的连续性，GCM 数据采用 Postdam 气候影响研究所的数据在 Rcp45 和 Rcp85 的情景下输出 2011~2099 年的 ET_0 序列。

2.3. 参照蒸发量估算方法

在 ET_0 的计算方面采用世界粮农组织(FAO)推荐的参照蒸发量的标准计算方法 Penman-Monteith (P-M)公式，如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中， ET_0 为参照蒸发量，mm/d； R_n 为净辐射， $MJ/m^2 \cdot d$ ； G 为土壤热通量， $MJ/m^2 \cdot d$ ； T 为平均温度， $^{\circ}C$ ； u_2 为 2 m 处的风速， m/s ； e_s 为平均饱和水汽压， kPa ； e_a 为实际水汽压， kPa ； Δ 为饱和水汽压曲线斜率， $kPa/{}^{\circ}C$ ； γ 为干湿常数， $kPa/{}^{\circ}C$ 。

2.4. 趋势分析方法[10]-[12]

本研究采用 Mann-Kendall 检验进行趋势分析。在时间序列趋势分析中，Mann-Kendall 检验是世界气象组织推荐并已被广泛使用的非参数检验方法，最初由 Mann 和 Kendall 提出，现已被很多学者用来分析降雨、气温、

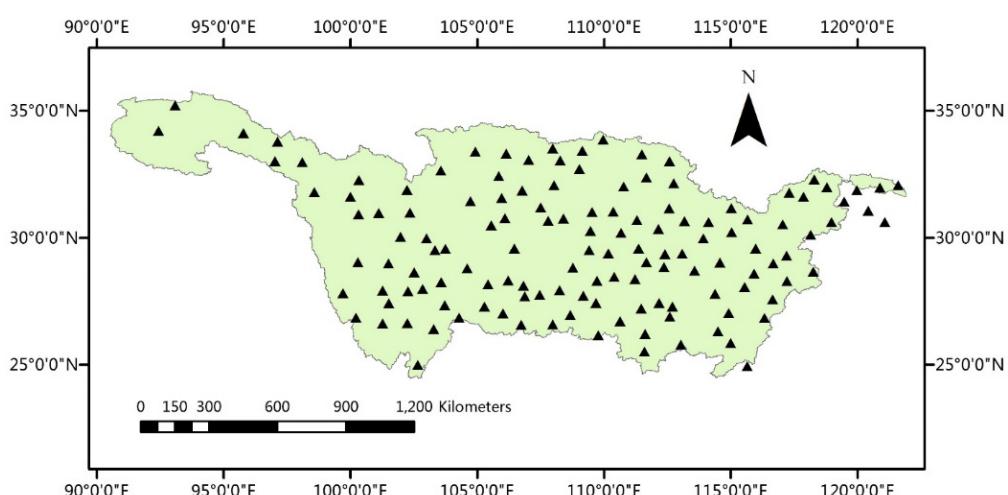


Figure 1. The location map of weather stations in Yangtze River basin

图 1. 长江流域位置和气象站点分布

径流和水质等要素时间序列的趋势变化。Mann-Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，适用于水文、气象等非正态分布的数据，计算简便。

在 Mann-Kendall 检验中，原假设 H_0 为时间序列数据 (x_1, \dots, x_n) ，是 n 个独立的、随机变量同分布的样本；备择假设 H_1 是双边检验，对于所有的 $k, j \leq n$ ，且 $k \neq j$ ， x_k 和 x_j 的分布是不相同的，检验的统计变量 S 计算如下式：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n Sgn(x_j - x_k) \quad (2)$$

其中

$$Sgn(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

S 为正态分布，其均值为 0，方差 $Var(S)$ 按下式计算：

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

当 $n > 10$ 时，标准的正态统计变量通过下式计算：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

这样，在双边的趋势检验中，在给定的 α 置信水平上，如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ，则原假设是不可接受的，即在 α 置信水平上，时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。而对于统计变量 Z ，若大于 0，则时间序列呈上升趋势；若小于 0，则时间序列是下降趋势。

2.5. 统计降尺度模型

本文对长江流域应用降尺度模型 SDSM [13]-[15]，选择 ET_0 为预报量，遵循预报因子的选择原则，通过 SDSM 中的“筛选变量程序”进行相关分析，优选出与 ET_0 相关性较高的 5 个大气因子，分别为海平面气压、海平面处温度、500 hPa 处纬向风速、850 hPa 处比湿、850 hPa 处温度。基于 1961~1990 年长江流域各站点的 ET_0 数据与所选择的 NECP 预报因子建立多元回归统计关系，计算 SDSM 天气发生器的模型参数，构建 SDSM 模型。同时利用 1991~2010 年的 NCEP 逐日数据对 SDSM 模型进行验证。将 Rcp45 与 Rcp85 输出到 2011~2099 年逐日数据出入入到 SDSM 模型，模拟得到 Rcp45 和 Rcp85 情景下各站点 ET 序列。

为较系统地评价降尺度效果，本文采用效率系数，相关系数分别衡量模型对 ET_0 的变化趋势的捕捉能力，利用平均偏差评价模型的系统偏差。

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_1^n (y_i - x_i)^2}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{y_i - x_i}{x_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_1^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) \right]^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

3. 结果和讨论

3.1. 过去 50 年长江流域参照蒸发量的变化

根据 P-M 方程, 计算长江流域 1961~2010 年逐日 ET_0 , 并由此计算长江流域历年参照蒸发量, 如图 2 所示。长江流域的平均年 ET_0 为 957.8 mm, 由图 2 可知, 长江流域 1961~2010 年参照蒸发量年值呈混合的上下波动, 1961~1981 年有下降趋势, 1991~2010 年有上升的趋势。根据 M-K 检验结果 $Z = 2.54$, 1961~2010 年间长江流域年 ET_0 整体呈显著下降的趋势。

图 3 为长江流域 1961~2010 年各站点年 ET_0 变化趋势的空间分布图。由图 3 中可以得到, 1961~2010 年间, 有 97 个站点的年 ET_0 序列呈下降趋势(占站点总数的 72%), 其中 48 个站点(占站点总数的 36%)下降趋势显著(通过 M-K 检验 95% 置信水平, 图中显著性通过实心三角形体现), 集中在长江中下游区域、长江流域北部的区域; 有 38 个站点的年 ET_0 序列呈上升趋势, 其中 13 个站点上升趋势显著。上升和下降趋势显著站点的平均标准正态统计量分别为 2.71 和 -2.81。

3.2. 统计降尺度模型模拟效果评价

本研究对长江流域 134 个站点的模拟结果的平均值进行评价, 并采用 1961~1990 年为率定期, 1991~2010 年为验证期。表 1 给出了 SDSM 模型在率定期与验证期对逐日 ET_0 的模拟效果, 其中率定期与检验期的相对误差 Re 均为 9.25%, 效率系数高达 0.93, 相关系数也都在 0.93 以上, 证明 SDSM 模型在模拟长江流域的参照蒸散效果较好。另外图 4 给出了检验期(1991~2010 年) P-M 法计算的月 ET_0 和 SDSM 模型模拟的月 ET_0 的结果比较。可以得出, 基于 NECP 模拟的 ET_0 及其变化规律与 P-M 法的计算值较为一致。总的来说, SDSM 模型模拟的效果较好, 可以用于 GCM 输出 ET_0 结果的降尺度应用。

3.3. 未来气候变化情景下长江流域 ET_0 的变化预测

经 MK 趋势分析可得, 长江流域 ET_0 在 Rcp45 情景下有显著的上升趋势, 在 Rcp85 情景下亦有显著的上升趋势。由图 5 可知, 在 Rcp45 及 Rcp85 的情景下, 长江流域的年 ET_0 均呈稳步上升的趋势, 且变化趋势在 Rcp85 情景下较 Rcp45 情景下明显。长江流域的年 ET_0 Rcp85 情景较 Rcp45 情景变化幅度大, 上升趋势更加明显。

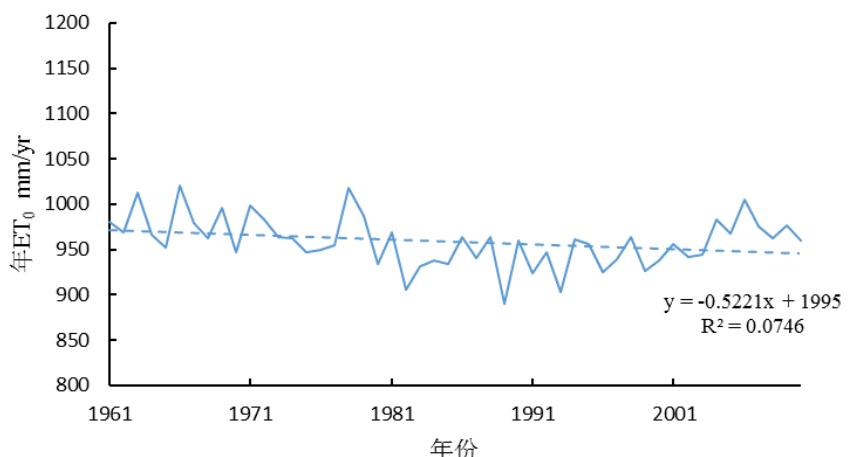


Figure 2. The temporal trend of annual ET_0 in Yangtze River basin during 1961-2010
图 2. 1961~2010 年长江流域年 ET_0 变化趋势

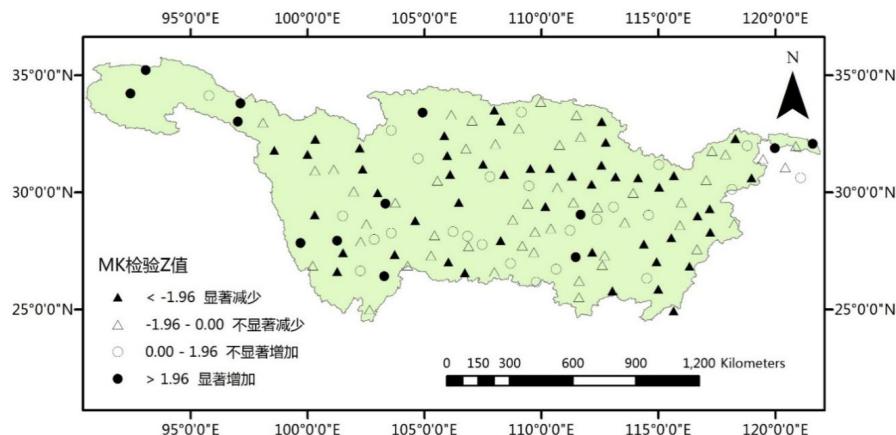


Figure 3. Spatial distribution of trends and their significance of ET_0 during 1961-2010
图 3. 1961~2010 年 ET_0 变化趋势及显著性的空间分布

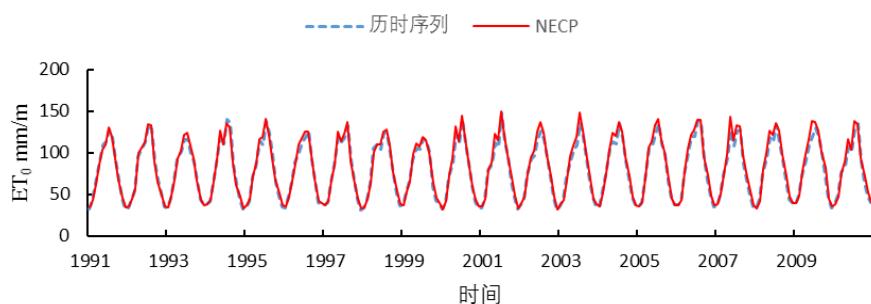


Figure 4. Comparison of calculated and simulated monthly ET_0 by SDSM driven by NECP scenarios in validation period
图 4. 检验期基于 SDSM 的 NECP 情景下月 ET_0 模拟值与历史计算值的比较

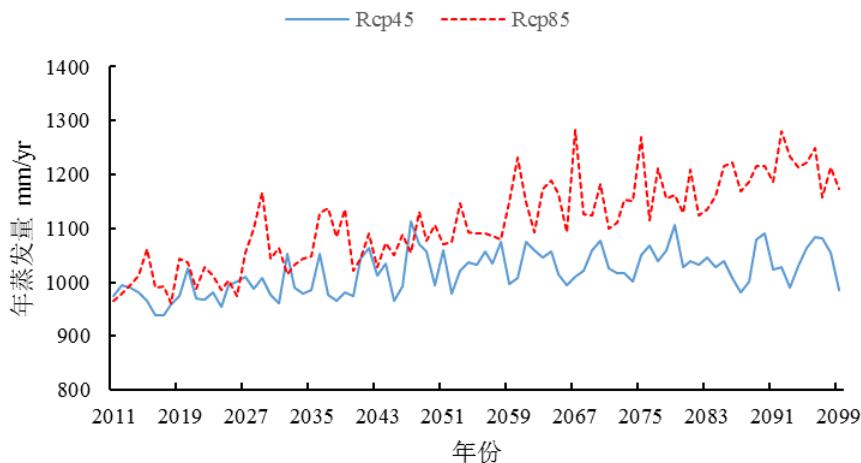


Figure 5. The annual mean ET_0 simulations from Rcp45 and Rcp85 scenario in Yangtze River basin from 2011 to 2099
图 5. Rcp45 与 Rcp85 情景下 2011-2099 年长江流域年 ET_0 的模拟

由表 2 可得, Rcp45 的情景下, 2011~2099 年长江流域有 131 个站点(占站点总数的 98%)呈上升趋势, 其中显著上升的站点有 115 个(占站点总数的 86%); Rcp85 的情景下, 2011~2099 年长江流域有 134 个站点(占站点总数的 100%)全部呈显著上升趋势。Rcp45 与 Rcp85 情景下的显著上升站点的平均标准正态统计量分别为 4.23

Table 1. Performance assessment for SDSM predictands during calibration and validation periods**表 1. 统计降尺度模型率定期和验证期的模拟效果评价**

时期	Re (%)	Ens	R2
率定期(1961~1990)	9.25	0.9302	0.9330
检验期(1991~2010)	9.25	0.9323	0.9428

Table 2. Trends of the annual mean ET_0 simulations from Rcp45 and Rcp85 scenario in Yangtze River Basin from 2011 to 2099**表 2. Rcp45 和 Rcp85 条件下 2011~2099 年长江流域各站点年 ET_0 变化趋势统计**

情景	趋势	显著上升	不显著上升	显著下降	不显著下降
Rcp45	站点数	115	16	0	3
	百分比	85.82%	11.94%	0.00	2.24%
Rcp85	站点数	134	0	0	0
	百分比	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%

和 7.69 综上所述, 长江流域的 ET 在 21 世纪会持续上升。

4. 结论

基于历史气象资料和 Rcp45 及 Rcp85d 统计降尺度输出, 结合 FAO P-M 公式和统计降尺度 SDSM 法, 计算了过去 50 年和模拟未来 89 年 Rcp45 和 Rcp85 情景下长江流域 ET_0 , 使用 Mann-Kendall 方法对 ET_0 进行趋势分析, 得到以下认识:

- 1) 基于 SDSM 的 ET_0 模拟值和 PM 公式计算值在率定期和检验期均比较一致, 证实了 SDSM 模型对 ET_0 的模拟效果较好, 可以用来预测未来情景下的 ET_0 。
- 2) 1961~2010 年长江流域的平均 ET_0 年值呈下降趋势, 下降趋势显著的站点主要分布在长江中下游, 流域的北部及东部。
- 3) 2011~2099 年在 Rcp45 和 Rcp85 两种气候情景下, 长江流域的 ET_0 年值呈增加趋势, 在 Rcp85 情景下增加趋势较 Rcp45 的情景下更加明显。

基金项目

国家自然科学基金(51339004; 51279138)。

参考文献 (References)

- [1] 肖义, 唐少华, 陈华, 等. 气候变化对湘江流域降水气温和蒸发的影响变化预测[J]. 水资源研究, 2013, 2(1): 70-75.
XIAO Yi, TANG Shaohua, CHEN Hua, et al. Climate change impact on hydro-climate variables in the Xiangjiang basin. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(1): 70-75. (in Chinese)
- [2] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 刘兆飞. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 455-461.
ZUO Depeng, XU Zongxue, LI Jingyu and LIU Zhaofei. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in Weihe River basin under future climate change. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 455-461. (in Chinese)
- [3] 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.
CHU Jianting, XIA Jun and XU Chongyu. Suitability analysis of SDSM model in the Haihe River basin. Resources Science, 2008, 30(12): 1825-1832. (in Chinese)
- [4] 向田恬, 陈华, 郭家力, 等. 气候变化对嘉陵江流域降水变化影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 75-77.
XIANG Tiantian, CHEN Hua, GUO Jiali, et al. Impact of climate change on prediction of precipitation in Jialing River of the upper Yangtze River basin. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 75-77. (in Chinese)

- [5] 王丽娜. 统计降尺度方法对黄河上游流域气象要素模拟分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 2: 114-118.
WANG Lina. Simulation analysis of meteorological element by statistical downscaling method in Yellow River basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 2: 114-118. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 郝振纯, 杨荣榕, 陈新美, 陈玺, 梁之豪, 达娃顿珠. 1960~2011 年长江流域潜在蒸发量的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 408-419.
HAO Zhenchun, YANG Rongrong, CHEN Xinmei, CHEN Xi, LIANG Zhihao and DAWA Dunzhu. Tempo-spatial pattern of the potential evaporation in the Yangtze River catchment for the period 1960-2011. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 408-419. (in Chinese)
- [8] 邢万秋, 王卫光, 邵全喜, 杨慧, 彭世彰, 余钟波, 杨涛. 未来气候情景下海河流域参考蒸发蒸腾量预估[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 2: 239-251.
XING Wanqiu, WANG Weiguang, SHAO Quanxi, YANG Hui, PENG Shizhang, YU Zhongbo and YANG Tao. Projection of future reference evapotranspiration change across the Haihe River basin. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 2: 239-251. (in Chinese)
- [9] 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. <http://dx.doi.org/10.1177/03091339702100403>
- [10] DA SILVA, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environment*, 2004, 58(4): 575-596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.12.002>
- [11] MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>
- [12] KENDALL, M. G. Rank correlation methods. London: Griffin, 1975.
- [13] WILBY, R. L., HAY, L. E. and LEAVESLEY, G. H. A comparison of downscaled and raw GCM output: Implications for climate change scenarios in the SanJuan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology*, 1999, 225(1-2): 67-91. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00136-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00136-5)
- [14] WILBY, R. L., DAWSON, C. W. and BARROW, E. M. SDSM—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17(2): 147-159. [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3)
- [15] WILBY, R. L., TOMLINSON, O. J. and DAWSON, C. W. Multi2site simulation of precipitation by conditional resampling. *Climate Research*, 2003, 23(3): 183-194. <http://dx.doi.org/10.3354/cr023183>