

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

Zishuo Li<sup>1,2</sup>, Xin'e Tao<sup>1,2</sup>, Hua Chen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Water Resources and Hydropower Engineer, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Science, Wuhan Hubei

Email: lizishuo2013@163.com

Received: Nov. 9<sup>th</sup>, 2015; accepted: Nov. 29<sup>th</sup>, 2015; published: Dec. 10<sup>th</sup>, 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 NECP 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<sup>1,2</sup>, 陶新娥<sup>1,2</sup>, 陈 华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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。

<sup>2</sup>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  $\text{CO}_2$  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( $\text{ET}_0$ ), 分析了长江流域近 50 年来  $\text{ET}_0$  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  $\text{ET}_0$  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  $24^{\circ}27' \sim 35^{\circ}54' \text{N}$ ,  $90^{\circ}33' \sim 122^{\circ}19' \text{E}$  之间, 流域面积  $180 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 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<sub>0</sub> 序列。

### 2.3. 参照蒸发量估算方法

在 ET<sub>0</sub> 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<sub>0</sub>为参照蒸发量，mm/d；R<sub>n</sub>为净辐射；G为土壤热通量，MJ/m<sup>2</sup>·d；T为平均温度，℃；u<sub>2</sub>为2 m处的风速，m/s；e<sub>s</sub>为平均饱和水汽压，kPa；e<sub>a</sub>为实际水汽压，kPa；Δ为饱和水汽压曲线斜率，kPa/℃；γ为干湿常数，kPa/℃。

### 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、

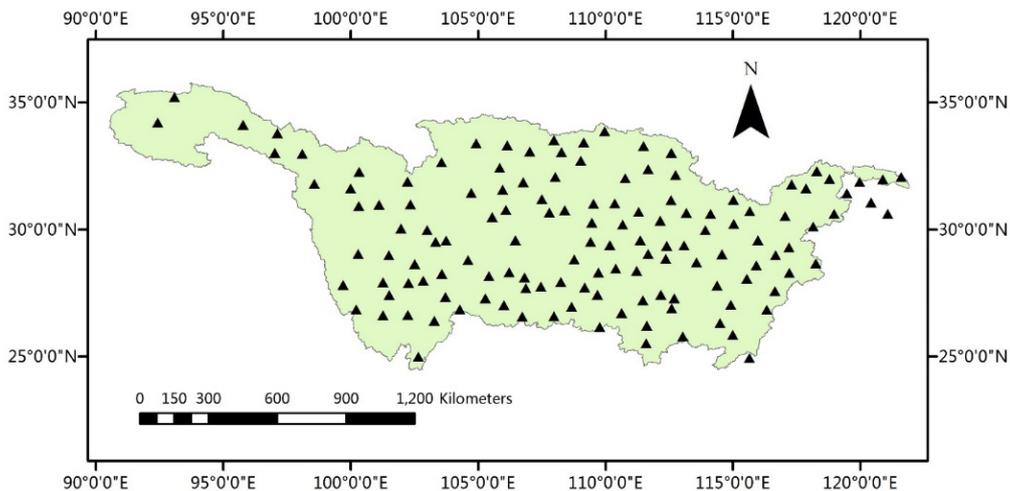


Figure 1. The location map of weather stations in Yangtze River basin

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：

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

其中

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

$S$  为正态分布，其均值为 0，方差  $\text{Var}(S)$  按下式计算：

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

当  $n > 10$  时，标准的正态统计变量通过下式计算：

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

这样，在双边的趋势检验中，在给定的  $\alpha$  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  $\alpha$  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发效果较好。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。

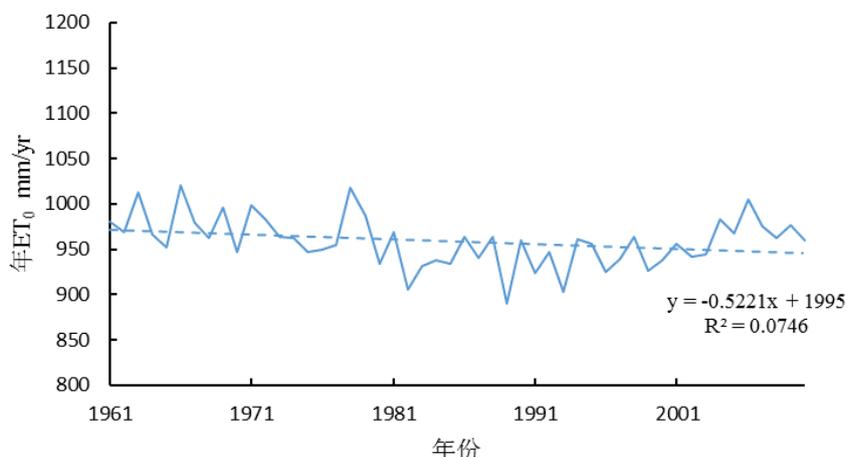
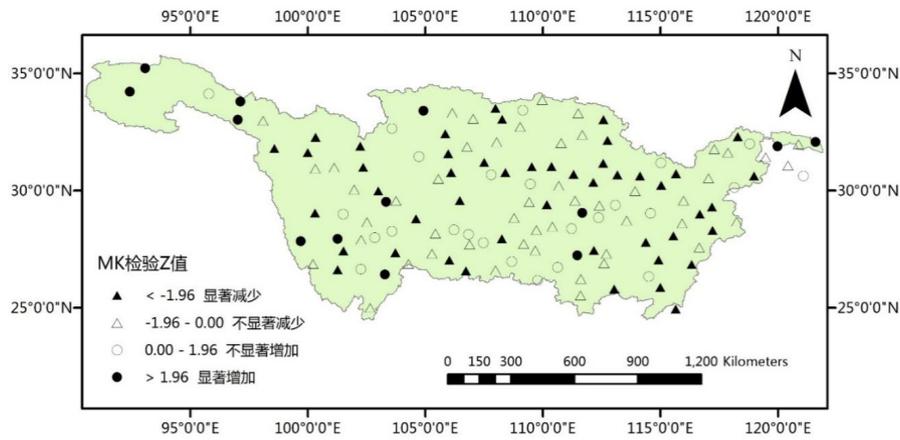
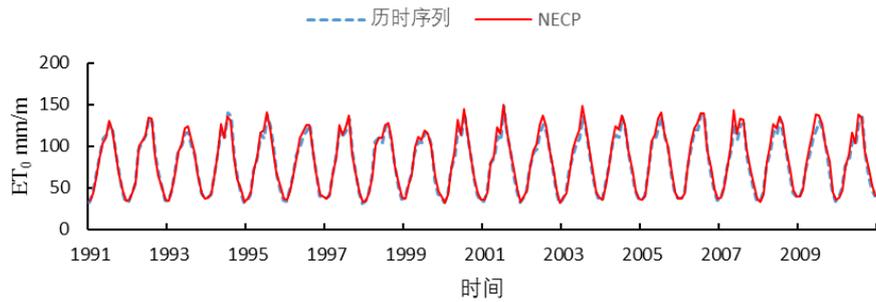


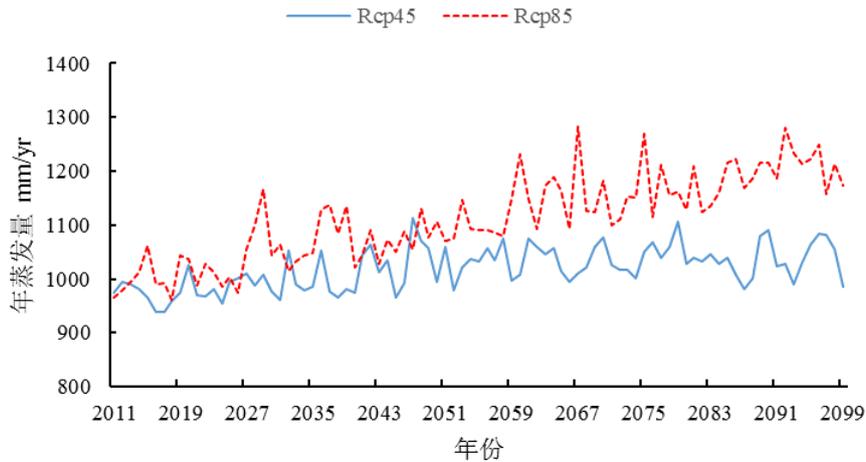
Figure 2. The temporal trend of annual  $ET_0$  in Yangtze River basin during 1961-2010  
图 2. 1961~2010 年长江流域年  $ET_0$  变化趋势



**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<sub>0</sub> 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<sub>0</sub> 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<sub>0</sub>，使用 Mann-Kendall 方法对 ET<sub>0</sub> 进行趋势分析，得到以下认识：

1) 基于 SDSM 的 ET<sub>0</sub> 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<sub>0</sub> 的模拟效果较好，可以用来预测未来情景下的 ET<sub>0</sub>。

2) 1961~2010 年长江流域的平均 ET<sub>0</sub> 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<sub>0</sub> 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. and 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/10.1177/030913339702100403>
- [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. Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. Climate Research, 2003, 23(3): 183-194. <http://dx.doi.org/10.3354/cr023183>