

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.12.011

兰江流域降雨量与气候指数的相关性研究

刘莉¹, Krewinkel B C², Booij M J², 许月萍¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院 水文与水资源工程研究所, 浙江 杭州 310058;

2. 屯特大学 水工程与管理系, 荷兰 恩斯赫德 7522NB)

摘要:为探索兰江流域降雨量与气候指数的关系,利用1963—2000年间兰江流域28个气象站的日降雨量与同期经样条插值的太平洋年代际振荡(PDO)、南方涛动指数(SOI)和东亚夏季风指数(EASMI)日值时间序列,分别采用线性回归和多元回归方法分析兰江流域两大支流的降雨量与PDO和SOI的长期相关性及其与SOI和EASMI的短期相关性.结果表明,PDO与降雨量存在显著的长期正相关关系,其中金华江支流比衢江支流更为显著.在长期尺度上,SOI与降雨量存在负相关,且相关性均大于0.2.在短期尺度上,SOI、EASMI与降雨量均存在显著负相关;作为一种区域指数,EASMI与兰江流域降雨的相关性比其他指数显著,尤其在衢江流域,当PDO位于暖相位时,其相关性系数达到0.5.按照PDO相位划分的子时期评估结果显示,当PDO位于暖相位时,SOI、EASMI与降雨量的相关性都更为显著.多元回归分析证实PDO、SOI及EASMI的相互组合可显著提高其与降雨量的相关关系,特别是PDO-SOI组合,其与降雨量的相关性在金华江和衢江流域分别达到0.39和0.28.

关键词:气候指数;降雨量;兰江流域;线性回归;多元回归

中图分类号: P 333.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-973X(2018)12-2332-10

Correlation between climate indexes and precipitation of Lanjiang River

LIU Li¹, Krewinkel B C², Booij M J², XU Yue-Ping¹

(1. *Institute of Hydrology and Water Resources, College of Civil Engineering and Architecture,*

Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. *Department of Water Engineering and*

Management, University of Twente, Enschede 7522NB, Netherlands)

Abstract: Three climate indexes, including Pacific Decadal Oscillation (PDO), Southern Oscillation Index (SOI) and East Asian Summer Monsoon Index (EASMI), interpolated to daily values using spline interpolation method, were analyzed with daily precipitation from 28 meteorological stations over Lanjiang River Basin from 1963 to 2000 in order to investigate the correlation of precipitation and climate indexes. Both linear regression and multiple regression were adopted. The PDO index was investigated for the long-term relationship and the SOI index was investigated for both long and short term. The EASMI was only investigated for short term relationship. Results show that there is significant long-term positive correlation between precipitation and PDO, and the correlation in Jinhua subbasin was more significant than that in Qu subbasin. On long-term correlation, SOI is negatively correlated to precipitation with a correlation coefficient greater than 0.2. For short-term correlation, SOI and EASMI are negatively related to precipitation, and the correlation is more significant for EASMI since it is a regional-based index. Especially for Qu subbasin, a correlation coefficient up to 0.5 is found for EASMI when PDO is in warm phase. According to investigation at different subperiods defined by PDO phases, SOI and EASMI exhibit more

收稿日期: 2017-12-07. 网址: www.zjujournals.com/eng/fileup/HTML/201812011.htm

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项资助项目(2016YFE0122100); 国家自然科学基金资助项目(51379183); 浙江省自然科学基金资助项目(LR14E090001).

作者简介: 刘莉(1990—),女,博士生,从事洪水预报和水文模拟研究. orcid.org/0000-0001-7830-0386. E-mail: li_liu@zju.edu.cn
通信联系人: 许月萍,女,教授. E-mail: yuepingxu@zju.edu.cn

significant correlation with PDO in warm phase. Furthermore, multiple regression results show that index combination of SOI, PDO and EASMI can significantly increase the correlation with precipitation, especially the PDO-SOI combination with correlation coefficient up to 0.39 for Jinhua subbasin and 0.28 for Qu subbasin, respectively.

Key words: climate indexes; precipitation; lanjiang River; linear regression; multiple regression

随着全球气候变暖和人类活动的加剧, 极端降雨和洪水事件变得更加频繁和剧烈^[1-3], 不仅造成巨大的经济损失, 还威胁着人民的生命财产安全. 因此, 建立有效的降雨和洪水预警系统意义重大^[4].

洪水事件的发生与大气降水直接相关, 而研究发现大气环流受全球或者区域的气候类型影响显著^[5-6]. 气候类型的状态通常可以用气候指数来表示, 建立气候指数与大气降水的相关性从而提高洪水预报的精度是一种较为可行的方法. Zhang 等^[6]证实利用厄尔尼诺南方涛动 (El Niño Southern Oscillation, ENSO) 以及印度季风指数与径流的相关性能有效提高长江流域长期径流预报. 近些年, 随着集合预报方法在水文气象领域中的广泛应用, 气候指数也作为一种权重方法被引入到集合径流预报中^[5, 7]. 2012 年, Najafi 等^[8]通过主成分分析法得到包括太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 指数和南方涛动指数 (Southern Oscillation Index, SOI) 在内的多项气候指数与科罗拉多河流域春汛洪量的关系, 并根据该相关性定义集合成员的权重, 发现基于气候指数加权的集合预报能明显改善春汛的估计精度. 2015 年, 洪宇等^[9]研究发现汉江流域降水量和气温在月尺度上与 PDO 和 SOI 有着显著的相关性. 2016 年, Huang 等^[10]采用主成分分析法和 K 均值算法分析了内蒙古自治区降雨指数与 11 种主要气候指数的相关性, 发现 ENSO 和 SOI 与当地降雨显著相关.

降雨与气候指数的相关性研究针对长江流域已有较为深入的开展^[11-12], 结果证实 ENSO 影响着整个长江流域, 而流域下游主要受东亚夏季风指数 (East Asian Summer Monsoon Index, EASMI) 影响. 此外, Shen 等^[13]研究发现 PDO 对整个华东地区的降雨影响显著. 兰江流域位于东南地区, 距离长江流域下游段约 200 km, 基于此本文将着重讨论 PDO、SOI 和 EASMI 指数对研究流域的影响.

根据 Xu 等^[2, 14]的研究, 随着气候变化兰江流域将面临更为严峻的降雨和洪涝灾害, 但是迄今为止兰江流域降雨量与气候指数的相关性还没有

人进行过深入的研究, 并且针对大多数其他流域的早期研究都是基于月尺度甚至更长时间尺度, 本文将研究 SOI、PDO 和 EASMI 在日尺度上与兰江流域降雨的相关性, 从而为流域洪水预报和水资源管理提供可靠依据.

1 研究区域

1.1 研究区域概况

兰江流域 (118°4'E~120°38'E, 28°6'N~29°30'N) 位于浙江省西南部, 是钱塘江流域的主要支流, 如图 1 所示. 兰溪水文站以上控制集水面积约为 17 000 km². 流域位于亚热带湿润季风区, 全年平均温度约为 17 °C, 年平均降雨量达 1 600 mm, 5~9 月为主要的丰水期^[14]. 兰江上游西侧支流段为衢江支流, 集水面积约 5 600 km², 以山地和丘陵地形为主; 东上游段为金华江支流, 集水面积约 5 900 km², 其地形主要为平原. 本文将兰江流域分为金华江和衢江两大支流分别进行研究.

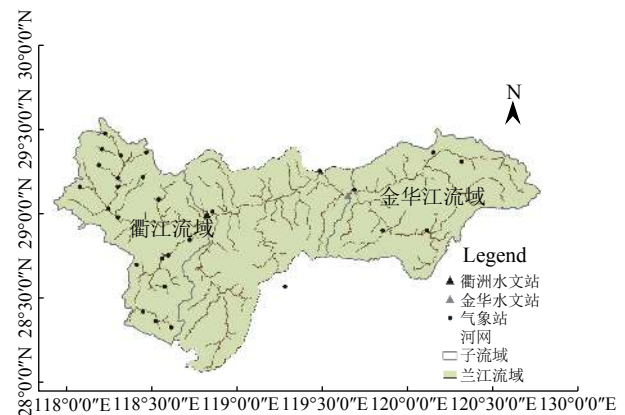


图 1 兰江流域位置和气象站点分布

Fig.1 Location of Lanjiang River and distribution of meteorology stations

1.2 研究资料

所采用的降雨数据是由中国气象局和浙江省气象局提供的兰江流域 28 个气象站点的日值数据. 数据长度为 1963—2000 年.

所用的逐月 PDO 和 SOI 数据分别来自于华盛顿大学的大气海洋研究联合中心^[15]和美国国家

海洋与大气管理局^[16]. EASMI 数据来自于北京师范大学李建平教授的个人主页^[17]. 所有气候指数的时间跨度与降雨数据保持一致.

2 研究方法

根据 Wilks^[18]的研究, 相对于线性插值样条插值方法更适用于对月平均数值的插值, 可以在保持插值序列平滑的同时, 产生合理的峰值. 本研究也证实样条插值可以比线性插值产生更为合理的日值数据. 因此样条插值方法被选取来对月平均气候指数插值, 以获取日尺度的气候指数. 考虑到流域丰水期主要集中在夏季, 本研究只针对 5~9 月期间 PDO 和 SOI 以及 7~8 月期间 EASMI 与相应时段降雨的相关性, 并通过泰森多边形法分别计算金华江流域和衢江流域的面雨量. PDO 的变换周期通常为 20~30 年, 因此主要研究其在长期尺度上与降雨的相关性. 而根据 Zhang 等^[6, 19]的研究, SOI 存在与降雨的长期相关性和短期相关性, 因此, 从长期和短期角度分别对 SOI 进行分析. 对 EASMI 只作短期相关性分析, 一是由于 EASMI 数据序列较短 (6~8 月), 二是由于 EASM 本身就是一年回归事件, 周期较短.

气候指数对降水的影响通常具有滞后效应^[9]. 参考 Demirel 等^[20-21]的研究, 每一个相关性评估都存在其最佳的时间分辨率 (R_T) 和滞后时间 (T_L), 如图 2 所示. 例如, 当事件 X 与 Y 相关性的最佳 T_L 为 6 d、最佳 R_T 为 3 d 时, 意味着当 X 发生 6 d 后, 可测得 X 与 Y 的最大相关性, 并且 X 不是某一天的值, 而是 3 d 的平均值. 在计算最佳 T_L 和 R_T 时需要确定其最大边界值. 对于 EASMI, 这个边界设定 8 月为 T_L 与 R_T 的和不超过 31 d, 因为 7 用于选取降雨事件, 剩下一个月的数据用于改变 T_L 和 R_T . 对于 SOI, 其短期评估的最大边界值设定为 $T_L=1$ a, $R_T=90$ d, 因为其他相关研究已经发现 SOI 与降雨的相关性主要与一年以内的 ENSO 事件有关^[19, 21]. 最后, 对于 SOI 和 PDO 的长期相关性分析, 最大 R_T 设定为 20 a^[6], 且在实际计算时, 为节省计算时间, 时间步长定为 50 d, 因为 SOI 与降雨每 50~100 d 可能呈现相反的相关性, 即变化周期大于 50 d. 不考虑滞后时间的影响, 根据计算结果, 相关性对 T_L 的改变不敏感, 因此最大 T_L 设为 0 d.

根据 Feng 等^[22]的研究发现, 本文所涉及的 3 个气候指数, 并非完全不相关. 总体而言, PDO

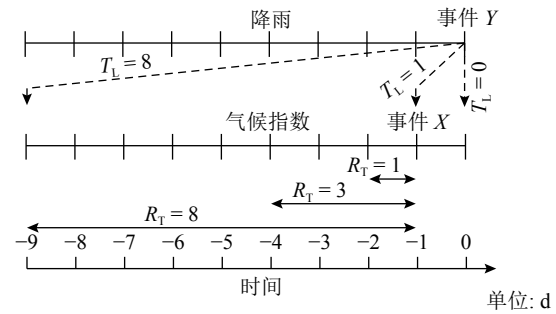


图 2 滞后时间和时间分辨率示意图

Fig.2 Schematic diagram of lag time and temporal resolution

和 SOI 基本处于负相关^[23]: 当 PDO 处于冷相位时, 会促使 ENSO 位于暖相位; 反之, 暖相位的 PDO 则会加强 SOI 的冷相位. 此外, 暖相位的 PDO 趋向于减弱东亚夏季风 (EASM), 造成中国北方地区降雨减少, 而长江流域降水增多^[22, 24-25]. 因此, 本文除了对每个气候指数采用线性回归作分别的相关性分析以外, 还将采用多元回归方法分析指数组合对降雨的影响. 鉴于 EASMI 和 SOI 与 PDO 所处的相位有着密切的联系, 在对这 2 个指数进行分析时, 将根据如图 3 所示的 PDO 的不同相位阶段, 将研究期分为 3 个子时期, 分别探究其对降雨量的影响, 即 1963—1976 (PDO-), 1977—1989 (PDO+), 1990—2000 (PDO+-) 时期. 其中线性回归分析通过计算皮尔逊相关系数获得, 其计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

式中: γ 为要素 X 与 Y 之间的相关系数; X_i 和 Y_i 为第 i 天的气候指数和降雨, \bar{X} 和 \bar{Y} 为均值, n 为要素序列长度.

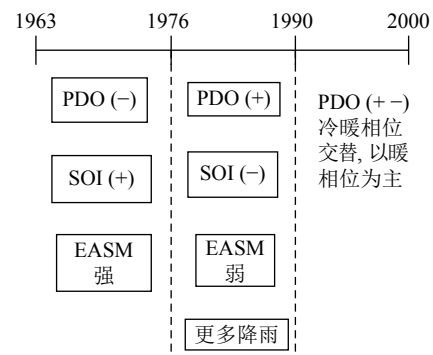


图 3 按时间线表示的指数间的相互作用

Fig.3 Interaction of climate indexes represented by timeline

多元回归分析采取的指数组合为 PDO-SOI, SOI-EASMI 和 EASMI-PDO, 通过式 (2) 可获得降雨量 y 的估计值:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k. \quad (2)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_k 为气候指数, b_1, b_2, \dots, b_k 为回归系数, \hat{y} 为降雨量的估计值. 降雨量实测值 y 与估计值 \hat{y} 的相关系数即为相应的指数组合与降雨量的相关系数.

需要注意的是, 多元回归的使用前提是所涉及的变量 x 是相互独立的, 但是本研究所采用的气候指数实际是以某种复杂的方式部分相关的. 对气候数据进行一个初步的相关性分析, 发现 PDO、SOI 和 EASMI 两两之间的相关系数均小于 0.15, 因此假定数据基本是相互独立的.

显著性检验采用 Kutner 等^[26]提出的公式:

$$t^* = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad H_0: \beta = 0, \quad H_A: \beta \neq 0. \quad (3)$$

式中: $n-2$ 为自由度. 同 t 检验一样, 该方法先建立零假设 H_0 和备择假设 H_A , 再计算检验统计量 t^* , 可得到显著性结论, $\beta=0$ 表示相关性不显著, $\beta \neq 0$ 表示相关性显著.

3 结果分析与讨论

3.1 线性回归分析

PDO 和 SOI 在长期尺度上与降雨的相关性如图 4 所示, 图中, γ 为相关系数. 总体来说, 金华江流域的相关性比衢江流域显著. 由图 4(a) 可知, 对于金华江流域, PDO 在 $R_T=8\sim 18$ a 时可以得到与降雨量较高的相关性, 极值约在 R_T 为 16 a 处出现. 而衢江流域 PDO 与降雨量的高相关性约出现在 $R_T=15\sim 16.5$ a, 其显著性略高于 95% 置信水平, 不及金华江流域显著. 考虑到 PDO 是一个长期指数, 这个结果可以认为是合理的. 与 PDO 相反, SOI 在 2 个流域均与降雨量有着显著的负相关性, 其中金华江流域的最佳 R_T 是 12~13 a, 衢江流域为 6.5~8 a 或者 10.5~11.5 a. 表 1 总结了如图 4 所示的最佳相关性的统计结果.

在短期尺度上, SOI 与 EASMI 在整个研究期内随滞后时间和时间分辨率的变化情况如图 5 所示. 可以看出, SOI 与降雨量的相关性是动荡变化的(图 5(a)、(b)), 每 50~100 d 可呈现完全相反的 2 种相关性. 猜想这种正负相间的相关性可能是由 ENSO 所处的不同阶段造成的, 即厄尔尼诺

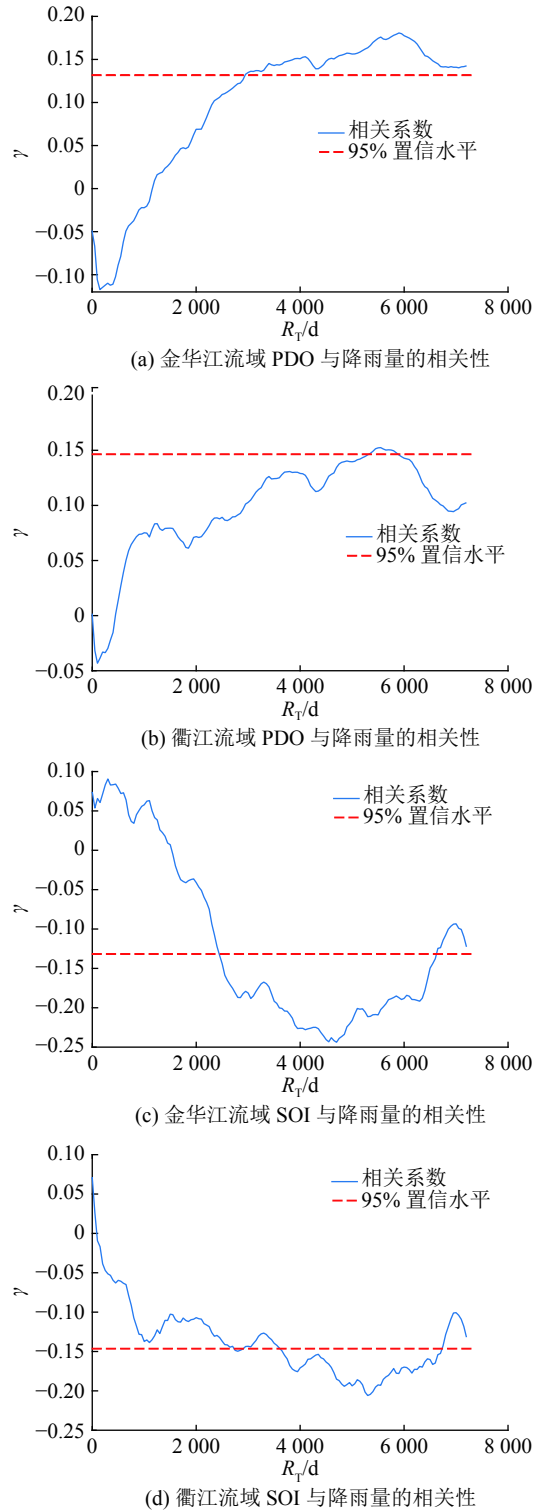


图 4 衢江流域和金华江流域降雨量与太平洋年代际振荡 (PDO) 以及南方涛动指数 (SOI) 的长期相关性

Fig.4 Long-term correlation between precipitation and Pacific Decal Oscillation (PDO) and Southern Oscillation Index (SOI) for Jinhua subbasin and Qu subbasin

和拉尼娜. 正如 Jin 等^[19, 27]的研究所证实的, 厄尔尼诺和拉尼娜与气候的反应各不相同, 同时具有完全不同的滞后效应. 相对其他 2 个指数来说, EASMI 与降雨量具有更高的相关性, 尤其是在衢

表 1 PDO/SOI 在长期尺度上与降雨量的最佳相关性和时间分辨率

Tab.1 Optimal correlation values and temporal resolutions for PDO/SOI with precipitation in long term relationship

流域	气候指数	R_T/d	r
金华江	PDO	3 000~6 500	<u>0.18</u>
	SOI	3 500~6 500	<u>-0.24</u>
衢江	PDO	5 200~6 000	<u>0.15</u>
	SOI	4 000~6 500	<u>-0.21</u>

注:下划线数据表示高于 95% 置信水平的显著相关性

江流域,具体如图 5(c)、(d)所示.在金华江流域,相关系数与 T_L 和 R_T 均呈现一定的线性关系,随着 T_L 和 R_T 的增大,相关系数不断减小.衢江流域的相关性随 T_L 和 R_T 变化不显著,相关系数保持在 -0.3 左右,表现出显著的负相关性. EASMI 在 2 个流域表现如此不同,可能与流域地理位置有关,衢州流域相比于金华江流域更偏西,处于更为内陆的地方,更少受到来自海洋等其他因素的影响^[28].表 2 为图 5 的统计信息, $\gamma_{SOI-max}$ 为 SOI 与降雨量的最大相关系数, $\gamma_{SOI-min}$ 为 SOI 与降雨量的最小相关系数,同理, $\gamma_{EASMI-min}$ 为 EASMI 与降雨量的最小相关系数.

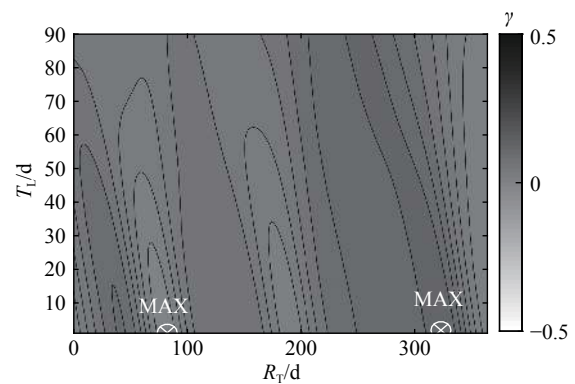
表 2 SOI 和 EASMI 在短期尺度上与降雨量的相关性

Tab.2 Correlation for SOI and EASMI with precipitation in short-term scale

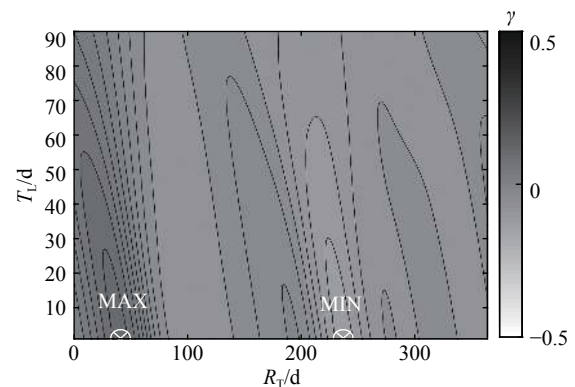
流域	$\gamma_{SOI-max}$	$\gamma_{SOI-min}$	$\gamma_{EASMI-min}$
金华江	0.019	-0.012	<u>-0.162</u>
衢江	0.108	<u>-0.129</u>	<u>-0.287</u>

注:下划线数据表示高于 95% 置信水平的显著相关性

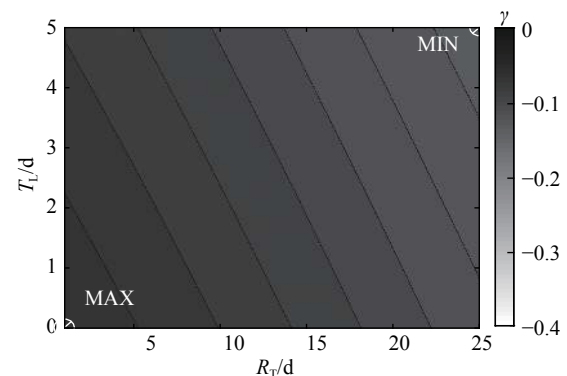
为了更深入地分析 SOI 和 EASMI 对降雨量的影响,按照如图 3 所示的不同 PDO 相位阶段划分的 1963—1976, 1977—1989 和 1990—2000 三个子时期的结果如图 6 和 7 所示.可以看到大多数的相关系数极值都发生在小于一个月的时间分辨率内,这跟 SOI 具有的短期变化性质有关.由表 3 (P 为降雨量) 的统计结果不难看出, SOI 与降雨量在第一个子时期具有显著的负相关关系,相关系数 r_1 最大达到 0.279. 在第二个子时期,则呈现出显著的正相关,其中衢江流域的相关系数 r_2 达到了 0.334. 可以肯定的是,当 PDO 位于冷相位时, SOI 与降雨量有着明显的负相关性,而 PDO 位于暖相位时, SOI 与降雨量正相关性显著.



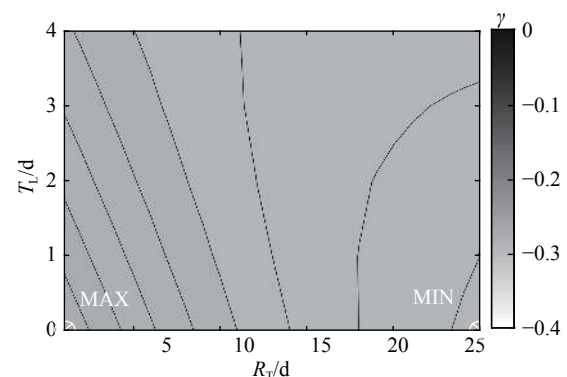
(a) 金华江流域 SOI 与降雨量的相关性



(b) 衢江流域 SOI 与降雨量的相关性



(c) 金华江流域 EASMI 与降雨量的相关性



(d) 衢江流域 EASMI 与降雨量的相关性

图 5 SOI 和东亚夏季风指数(EASMI)与降雨量(1963—2000年)在不同滞后时间和时间分辨率时的相关性

Fig.5 Correlation between SOI and East Asian Summer Monsoon Index (EASMI) and precipitation during 1963 to 2000 for different lag times and temporal resolutions

表 3 SOI 与降雨量在 1963—1976、1977—1989 和 1990—2000 三个子时期内的相关性

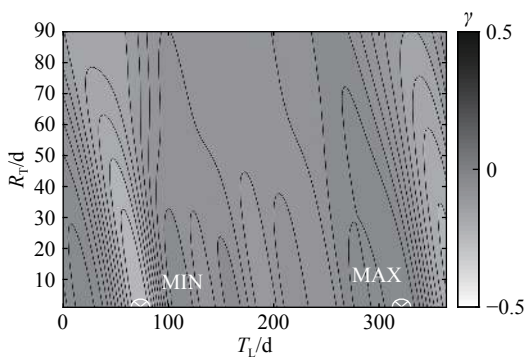
Tab.3 Maximum correlations for SOI with precipitation for three subperiods from 1963 to 1976, 1977 to 1989 and 1990 to 2000

流域	相关性	r_1 (PDO -)	r_2 (PDO +)	r_3 (PDO +/-)
金华江	SOI-P+	-0.023	<u>0.278</u>	0.148
	SOI-P-	<u>-0.240</u>	0.031	-0.163
衢江	SOI-P+	0.085	<u>0.334</u>	0.137
	SOI-P-	<u>-0.279</u>	-0.078	-0.171

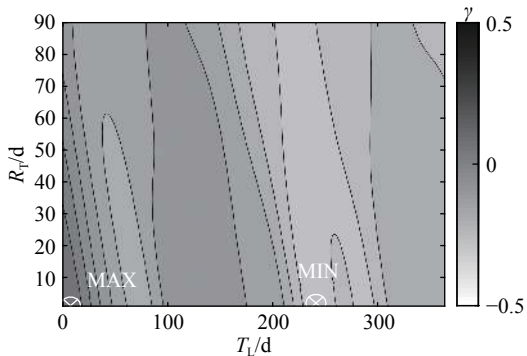
注: 下划线数据表示高于 95% 置信水平的显著相关性

第三个子时期的相关系数 r_3 结果则较为复杂, 具体可能和该时期内 PDO 的冷暖交替有关.

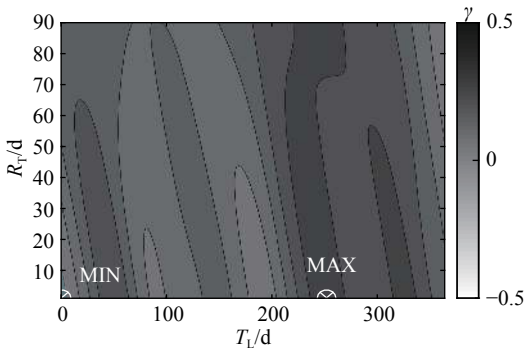
如图 7 所示为 EASMI 与降雨量在 3 个子时期内的相关关系, 可以看到, 相比起其他子时期, 第



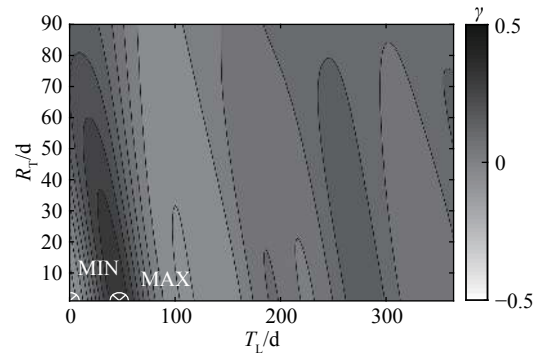
(a) 金华江流域 SOI 与降雨的相关性 (1963-1976)



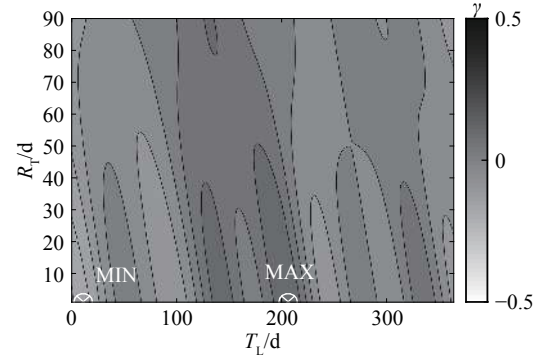
(b) 衢江流域 SOI 与降雨量的相关性 (1963—1976)



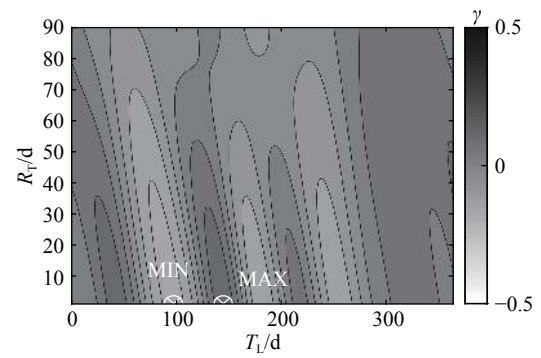
(c) 金华江流域 SOI 与降雨量的相关性 (1977—1989)



(d) 衢江流域 SOI 与降雨量的相关性 (1977—1989)



(e) 金华江流域 SOI 与降雨量的相关性 (1990—2000)



(f) 衢江流域 SOI 与降雨量的相关性 (1990—2000)

图 6 SOI 与降雨量在 1963—1976、1977—1989 和 1990—2000 三个子时期内的相关性

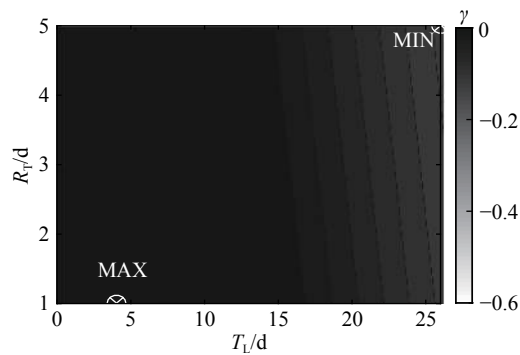
Fig.6 Correlation between SOI and precipitation during three different subperiods from 1963 to 1976, 1977 to 1989 and 1990 to 2000

一个子时期 (1963—1976) 的相关性最为不显著, 这可能与前文所提及的 PDO 处于冷相位时, 长江流域下游及其周边区域降水较少有关. 总体而言, 降雨量与 EASMI 存在显著的负相关性, 且该相关性主要受滞后时间的影响. 金华江流域最显著的相关性发生在第二个子时期, 最大负相关系数达到 0.407, 最佳 $T_L=25$ d, $R_T=2$ d. 衢江流域的相关性比金华江更为明显, 第二和第三个子时期的负相关系数都达到 0.5 以上, 其中第二个子时期的最佳 $T_L=0$, R_T 达到 30 天, 第三个子时期的最佳 $T_L=9$ d, 最佳 $R_T=1$ d. 相应的最高相关系数的统计

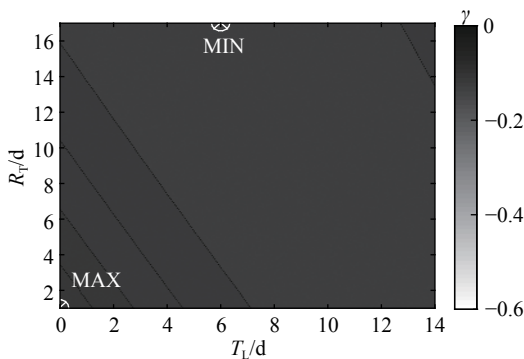
结果呈现在表 4 内,表中, γ_{\min} 为相关系数最小值;“+”表示实际的最佳值可能大于目前率定值,因为数据靠近设定的边界值.

3.2 多元回归分析

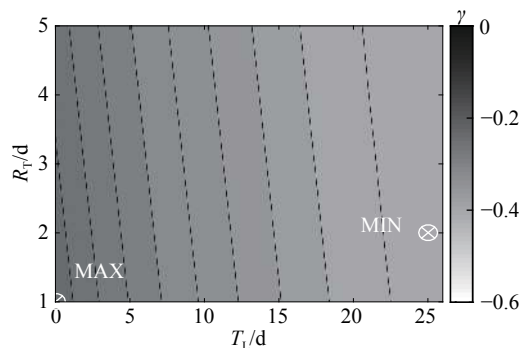
指数组合与降雨量的多元回归分析结果如图 8 和表 5 所示,其中 $T_{L-EASMI}$ 为气候指数 EASMI 的滞后时间, R_{T-PDO} 为气候指数 PDO 的时间分辨率, R_{T-SOI} 为气候指数 SOI 的时间分辨率. 对于 PDO 和 SOI(长期尺度),只研究 R_T 对其相关性的影响,而研究 EASMI 时则只对 T_L 进行调整,从图 7 可知, EASMI 对 T_L 更为敏感. 多元回归分析最重要的结论是,所有的指数组合都能得到与降雨量更为显著的正相关性. PDO-SOI 组合的相关系数比分别采用 PDO 和 SOI 单独评估时的相关性高很多;金华江流域 PDO-SOI 与降雨量的相关性达到 0.39,而单独的 PDO 相关性为 0.19, SOI 为



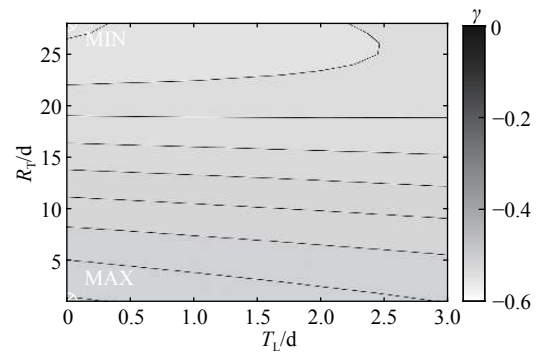
(a) 金华江 EASMI 与降雨量的相关性 (1963—1976)



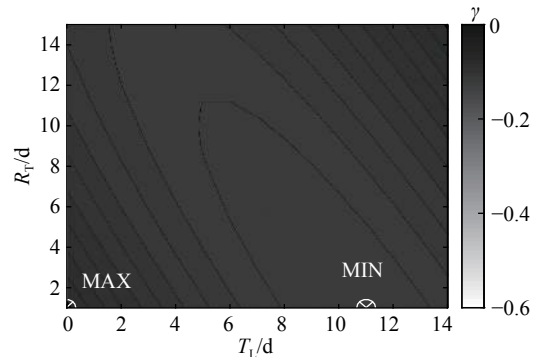
(b) 衢江 EASMI 与降雨量的相关性 (1963—1976)



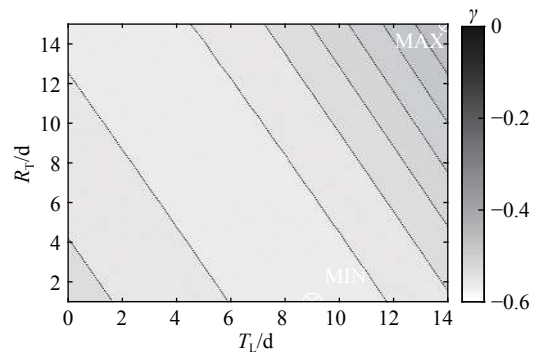
(c) 金华江 EASMI 与降雨量的相关性 (1977—1989)



(d) 衢江 EASMI 与降雨量的相关性 (1977—1989)



(e) 金华江 EASMI 与降雨量的相关性 (1990—2000)



(f) 衢江 EASMI 与降雨量的相关性 (1990—2000)

图 7 EASMI 与降雨量在 1963—1976、1977—1989 和 1990—2000 三个子时期内的相关性

Fig.7 Correlation between EASMI and precipitation during three different subperiods from 1963 to 1976, 1977 to 1989 and 1990 to 2000

表 4 EASMI 与降雨量在 1963—1976, 1977—1989 和 1990—2000 三个子时期内的相关性

Tab.4 Correlations for EASMI with precipitation for three short subperiods from 1963 to 1976, 1977 to 1989 and 1990 to 2000

时期	金华江			衢江		
	γ_{\min}	T_L/d	R_T/d	γ_{\min}	T_L/d	R_T/d
1963—1976	-0.128	26+	5+	-0.134	6	17+
1977—1989	<u>-0.407</u>	25	2	<u>-0.527</u>	0	28+
1990—2000	-0.129	11	1	<u>-0.567</u>	9	1

注: 下划线数据表示高于 95% 置信水平的显著相关性

表 5 降雨量与气候指数组合的多元回归分析相关系数值
Tab.5 Correlation values of multiple regression analysis between precipitation and climate index compositions

流域	指数组合	r	$R_{T-PDO/d}$	$R_{T-SOI/d}$	$T_{L-EASMI/d}$
	PDO-SOI	<u>0.39</u>	200~1 800	4 000~5 000	-
金华江	EASMI-PDO	<u>0.45</u>	200~800	-	25
	EASMI-SOI	<u>0.41</u>	-	4 500~5 500	25
	PDO-SOI	<u>0.28</u>	200~1 000	5 000~6 000	-
衢江	EASMI-PDO	<u>0.45</u>	2 200	-	19
	EASMI-SOI	<u>0.44</u>	-	1 300	17

注: 下划线数据表示高于 95% 置信水平的显著相关性

-0.24; 衢江流域 PDO-SOI 组合与降雨量的相关性最大达到 0.28, 而单独的 PDO 和 SOI 与降雨量的相关系数分别仅为 0.14 和 -0.2. 可见, PDO-SOI 组

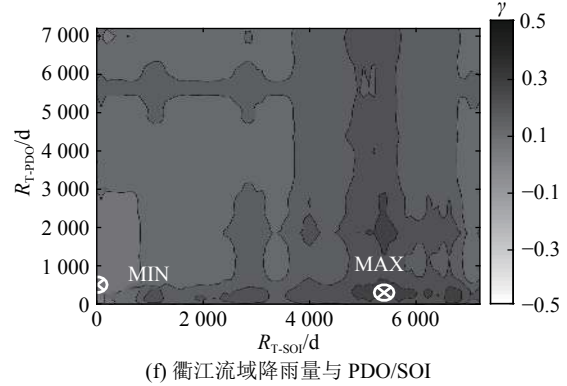
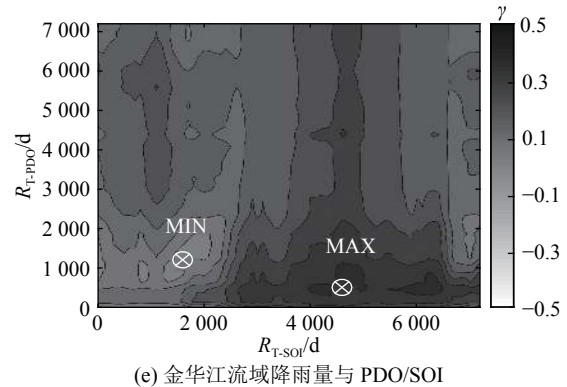
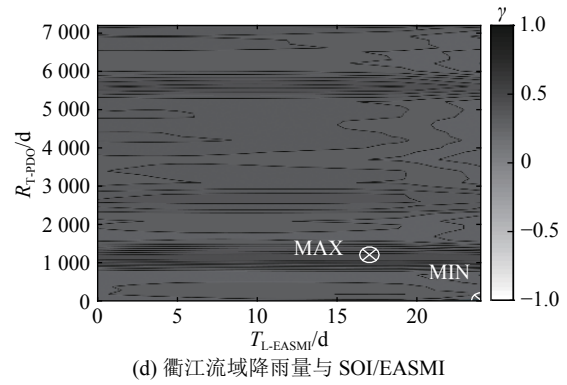
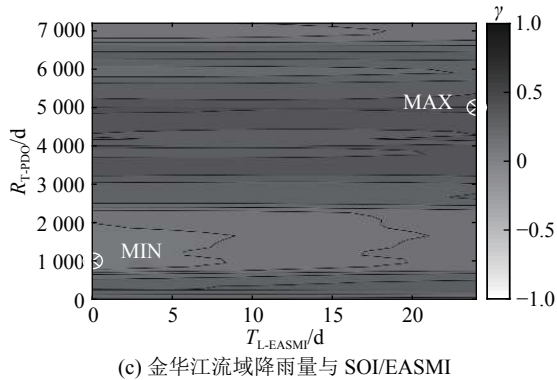
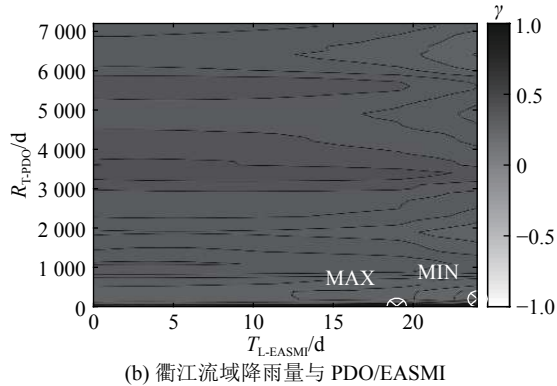
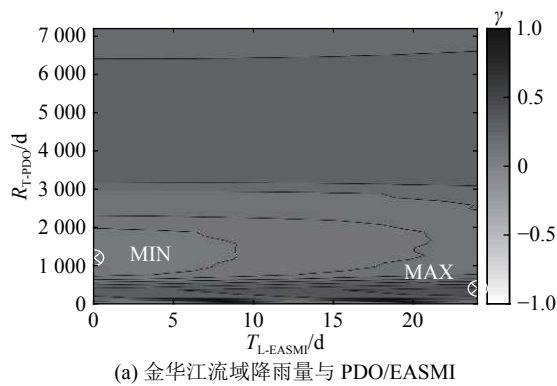


图 8 降雨量与气候指数多元回归分析的相关性

Fig.8 Correlation for multiple regression analysis between precipitation and climate indexes

合可以有效地提高降雨量与气候指数的相关性. 对于 EASMI 相关的组合, 相关系数的提高主要集中在金华江流域, 其中 EASMI 与 PDO 和 SOI 的指数组合与降雨量的相关系数分别达到 0.45 和 0.41, 而单独的 EASMI 与降雨量的相关系数仅为 -0.162. 多元回归后, EASMI 与降雨的负相关性消失了, 这是由于回归公式中 EASMI 的回归系数为负值. 当相关系数达到最佳时, 各气候指数的回归系数总结在表 6 中, b_1 和 b_2 为回归系数. 可以看到, EASMI 在回归组合中的系数始终为负值, 且系数通常较大, 可见在组合中更多的权重倾向于分配给区域性的气候指数 EASMI. 此外, 从图 8(a)~(d) 可以看出, 与图 7 相比, 滞后时间对

表 6 获得最佳相关性时多元回归的回归系数

Tab.6 Coefficient for multiple regression analysis when optimal correlation is obtained

流域	指数组合	b_1	b_2
金华江	PDO-SOI	-4.80	-2.92
	EASMI-PDO	-9.04	-6.35
	EASMI-SOI	-1.51	-2.85
衢江	PDO-SOI	-3.70	-4.09
	EASMI-PDO	-8.28	5.57
	EASMI-SOI	-6.17	-1.42

注: b_1 和 b_2 分别与相应的指数组合的第一、第二个气候指数对应。

EASMI 相关的指数组合与降雨量的相关性的影响变得微乎其微。

4 结 语

兰江流域的降雨量在日尺度上均与 PDO 存在较为显著的正相关性, 其中金华江流域的最佳时间分辨率约为 16 a, 衢江流域约为 15 a, 但显著性不及金华江流域显著. 从长期尺度来讲, SOI 与降雨量存在显著的负相关性, 负相关系数达到 0.2 以上; 在短期尺度上, 兰江流域受 EASMI 的影响更为显著, 特别是衢江流域, 最大负相关系数为 0.278. 3 个子时期的相关性评估结果证实 SOI 和 EASMI 与降雨量的相关性均受 PDO 所处相位的影响, 当 PDO 位于暖相位时, SOI 与降雨量正相关性明显, EASMI 与降雨量的负相关性显著. 同时, 由不同指数组合 PDO-SOI, SOI-EASMI 和 EASMI-PDO 的多元回归分析可得到比简单线性回归更显著的相关关系, 且均为正相关。

参考文献 (References):

- [1] CROSSMAN J, FUTTER M N, ONI S K, et al. Impacts of climate change on hydrology and water quality: future proofing management strategies in the Lake Simcoe watershed, Canada [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39(1): 19–32.
- [2] XU Y P, ZHANG X J, RAN Q H, et al. Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 483: 51–60.
- [3] 马冲, 高希超, 许月萍, 等. 基于降雨温度偏差纠正的金华江流域未来地表径流预估[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 20–27.
- [4] MA Chong, GAO Xi-cao, XU Yue-ping, et al. Evaluation of future surface runoff in Jinhua River basin based on bias correction [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(5): 20–27.
- [5] 张洪波, 敖天其, 王汉涛, 等. BTOPMC 在山区流域暴雨洪水预警预报中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 1: 12–19.
- [6] ZHANG Hong-bo, AO Tian-qi, WANG Han-tao, et al. Application of BTOPMC in storm flood warning and prediction in mountain basin [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2014, 1: 12–19.
- [7] BRADLEY A A, HABIB M, SCHWARTZ S S. Climate index weighting of ensemble streamflow forecasts using a simple Bayesian approach [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7382–7400.
- [8] ZHANG Q, XU C, JIANG T, et al. Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2): 265–274.
- [9] WERNER K, BRANDON D, CLARK M, et al. Climate index weighting schemes for NWS ESP-based seasonal volume forecasts [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(6): 1076–1090.
- [10] NAJAFI M R, MORADKHANI H, PIECHOTA T C. Ensemble streamflow prediction: climate signal weighting methods vs. climate forecast system reanalysis [J]. *Journal of hydrology*, 2012, 442: 105–116.
- [11] 洪宇, 丁名时, 郑永宏, 等. PDO 指数, SOI 指数与汉江流域气候变率的关系[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2015, 51(1): 91–95.
- [12] HONG Yu, DING Ming-shi, ZHENG Yong-hong, et al. Relationship among PDO index, SOI index and climate variabilities in the Hanjiang River basin [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2015, 51(1): 91–95.
- [13] HUANG J, CHEN X, ZHOU L, et al. Statistical analysis of the relationship between climate-induced maize yield and rainy-season precipitation across Inner Mongolia, North China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 129(3-4): 1145–1156.
- [14] TONG J, QIANG Z, DEMING Z, et al. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470–2003) [J]. *Quaternary International*, 2006, 144(1): 29–37.
- [15] ZHANG Q, XU C Y, JIANG T, et al. Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow

- of the Yangtze River, China [J]. **Journal of Hydrology**, 2007, 333(2-4): 265–274.
- [13] SHEN C, WANG W C, GONG W, et al. A Pacific Decadal Oscillation record since 1470 AD reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China [J]. **Geophysical Research Letters**, 2006, 33(3): L03702.
- [14] XU Y P, ZHANG X, TIAN Y. Impact of climate change on 24-h design rainfall depth estimation in Qiantang River Basin, East China [J]. **Hydrological Processes**, 2012, 26(26): 4067–4077.
- [15] The Pacific Decadal Oscillation (PDO) [EB/OL]. [2017 –12 –07]. <http://research.jisao.washington.edu/pdo/>.
- [16] Monthly Atmospheric and SST Indices [EB/OL]. [2017 –12 –07]. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>
- [17] The Monthly East Asian Summer Monsoon Index (EASMI) Data [EB/OL]. [2017 –12 –07]. <http://ljp.gcess.cn/dct/page/65577>.
- [18] WILKS D S. **Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100)** [M]. New York: Academic Press. 2011: 364–378.
- [19] JIN Y H, KAWAMURA A, JINNO K, et al. Quantitative relationship between SOI and observed precipitation in southern Korea and Japan by nonparametric approaches [J]. **Journal of Hydrology**, 2005, 301(1): 54–65.
- [20] DEMIREL M C, BOOIJ M J, HOEKSTRA A Y. Identification of appropriate lags and temporal resolutions for low flow indicators in the River Rhine to forecast low flows with different lead times [J]. **Hydrological Processes**, 2013, 27(19): 2742–2758.
- [21] LV A, JIA S, ZHU W, et al. El Niño-Southern Oscillation and water resources in the headwaters region of the Yellow River: links and potential for forecasting [J]. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2011, 15(4): 1273.
- [22] FENG J, WANG L, CHEN W. How does the East Asian summer monsoon behave in the decaying phase of El Niño during different PDO phases? [J]. **Journal of Climate**, 2014, 27(7): 2682–2698.
- [23] MANTUA N J, HARE S R, ZHANG Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 1997, 78(6): 1069–1079.
- [24] LI H, DAI A, ZHOU T, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000 [J]. **Climate Dynamics**, 2010, 34(4): 501–514.
- [25] HUANG R, CHEN J, WANG L, et al. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. **Advances in Atmospheric Sciences**, 2012, 29(5): 910–942.
- [26] NETER J, KUTNER M H, NACHTSHEIM C J, et al. **Applied linear statistical models** [M]. Chicago: Irwin, 1996: 1317.
- [27] LAU K M, WENG H. Coherent modes of global SST and summer rainfall over China: an assessment of the regional impacts of the 1997–98 El Niño [J]. **Journal of Climate**, 2001, 14(6): 1294–1308.
- [28] YIHUI D, CHAN J C L. The East Asian summer monsoon: an overview [J]. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 2005, 89(1): 117–142.