

低频气候变化引起的珠江流域年均和 洪峰流量变化特征及灵敏度分析*

顾西辉¹, 张强², 孔冬冬¹, 肖名忠¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院//华南地区水循环与水安全
广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275;

2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室//
地表过程与资源生态国家重点实验室//减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 低频气候变化是引起内陆径流年际和年代际变化的一个重要驱动因子。通过分析 El Niño/Southern Oscillation (ENSO)、North Atlantic Oscillation (NAO)、Indian Ocean Dipole (IOD) 和 Pacific Decadal Oscillation (PDO) 等主要低频气候因子对珠江流域年均 (Q_{ann}) 流量和洪峰流量 (Q_{max}) 的影响及其影响量级, 研究结果表明珠江流域流量受到低频气候因子的显著影响, 但影响强度的时间平稳性与趋势性有显著区域差异。对相应区域具有持续显著影响及相关强度呈显著上升趋势的气候因子可以作为 Q_{ann} 和 Q_{max} 的预测信号。低频气候因子位于不同的相位, 导致珠江流域流量发生相应的变化: 负相位 ENSO、NAO 和 PDO 易致较低 Q_{ann} , 导致水文干旱风险的增加; 而正相位的 ENSO、IOD 及负相位 NAO 和 PDO 易引发较高 Q_{max} , 导致极端洪灾风险增加。对比 Q_{ann} 和 Q_{max} , Q_{max} 对于气候指标变化的灵敏度要高于 Q_{ann} , Q_{max} 灵敏度高于 Q_{ann} 的面积比例分别为 56%、59%、71% 和 36%。研究对于根据低频气候变化信号预测珠江流域 Q_{ann} 与 Q_{max} 及珠江流域洪旱灾害的预报与预警具有重要理论意义与实际应用价值。

关键词: 低频气候变化; 年平均流量; 年洪峰流量; 灵敏度

中图分类号: P333.2 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2017) 01-0138-07

Low frequency climate variability induced annual mean and annual maxim streamflow variations and related sensitivity across the Pearl River basin

GU Xihui¹, ZHANG Qiang², KONG Dongdong¹, XIAO Mingzhong¹

(1. School of Geography and Planning//Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern
China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education //
State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology//Academy of Disaster Reduction
and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Variability of the low-frequency climate change is the principle driver for the annual and inter-annual streamflow changes. The influences of low-frequency climate indices such as El Niño/Southern Oscillation (ENSO), North Atlantic Oscillation (NAO), Indian Ocean Dipole (IOD) and Pacific Dec-

* 收稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51425903); 香港特别行政区研究资助局 (CUHK441313); 安徽省自然科学基金 (1408085MKL23); 安徽省教育厅高校自然科学基金 (KJ2016A851)

作者简介: 顾西辉 (1990年生), 男; 研究方向: 气象水文学; E-mail: guxihui421@163.com

通信作者: 张强 (1974年生), 男; 研究方向: 流域气象水文学, 旱涝灾害机理; E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

adal Oscillation (PDO), on annual mean discharge (Q_{ann}) and annual peak discharge (Q_{max}) of the Pearl River basin have been quantitatively analyzed. The results show that: ① Q_{ann} and Q_{max} were significantly affected by different climate indices in different regions with distinctly different spatial patterns in terms of correlation degrees and sensitivity and also the trends of impact strength. ENSO and IOD at the same year exerted a persistent significant impact on the Q_{ann} at the regions covering most of the West River basin, and the strength of the correlation increased significantly, which can be taken as the predictor for Q_{ann} . For the same reason, PDO at the same year can be taken as the predictor for Q_{ann} in the eastern parts of the Pearl River basin and the North River basin, and NAO, IOD a year earlier and NAO at the same year can be taken as the predictor for Q_{max} in the middle Pearl River basin; ② As for the entire Pearl River basin, negative-phase ENSO, NAO and PDO tend to cause Q_{ann} at lower levels with an increasing risk of droughts. However, positive-phase ENSO, IOD and negative phase NAO and PDO tend to cause Q_{max} at higher levels with an increasing risk of extreme floods; ③ Q_{max} was more sensitive to variability of atmospheric circulation than Q_{ann} . Q_{ann} varied between 0.3% and 24%, while Q_{max} varied between 0.5% and 31% per unit index change. The NAO and IOD both at the same year and a year earlier show a higher sensitivity in most area of the Pearl River basin, but the sensitivity difference between Q_{ann} and Q_{max} was significant, the latter had an area ratio of 56%, 59%, 71% and 36% sensitivity higher than the former.

Key words: low-frequency climate indices; annual mean discharge; annual peak discharge; sensitivity

珠江流域具有丰富的水资源, 位于亚洲季风区域。而亚洲季风受到 ENSO (El Niño/Southern Oscillation) 的显著影响^[1], 同时也受到 North Atlantic Oscillation (NAO)^[2]、Indian Ocean Dipole (IOD)^[3] 和 Pacific Decadal Oscillation (PDO)^[1] 的重要影响。因此有大量文献研究了低频气候变化对珠江流域气候的影响。Niu^[4] 认为 ENSO 对东部降水有显著影响, IOD 对珠江流域中部和东部降水有显著影响。Gu 等^[5] 指出 3 月份 NAO 对中国东南部 (即珠江流域的东南部) 降水有显著影响。Zhao 等^[6] 认为 El Niño/Southern Oscillation (ENSO) 和 PDO 均与珠江流域极端降水具有一致的周期特征。

近几十年来, 气候变化对珠江流域径流特征 (年平均流量 (Q_{ann}) 和年洪峰流量 (Q_{max})) 有明显的影响^[7-10]。然而大部分研究集中在低频气候变化对珠江流域降水等气象过程的影响, 很少涉及 ENSO、NAO、IOD 和 PDO 对年平均流量和年洪峰流量时空特征的影响, 仅有的一些研究往往局限在少数站点及少数几个气候指标^[11], 少数站点对珠江流域面上的覆盖度不够, 缺乏一定的代表性与全面性。基于此, 本文采用遍布珠江流域 62 个水文站点月径流量数据和 28 个水文站点年洪峰流量数据, 全面分析了 ENSO、NAO、IOD 和 PDO 对径流特征的影响, 并定量分析相关影响量级的灵敏度, 从而为理解珠江流域径流特征变化机理, 合理规划水资源利用及制定防洪防涝方案提供科学依据。

1 研究区域和数据

本文收集了遍布珠江流域 62 个水文站点 1960-2000 年月径流量数据 (图 1), 数据有少量缺测, 采用前后 7 a 平均法进行插值, 数据来源于中华人民共和国水利部。将月径流量数据处理成年平均流量 (Q_{ann} , 单位 m^3/s)。同时收集了遍布珠江流域 28 个水文站点 1951-2010 年年洪峰极值数据 (图 1, Q_{max} , 单位 m^3/s)^[8-10], 数据有少量缺测, 采用相邻站点年洪峰极值数据进行插值, 数据来源于广东省水文局。将 ENSO、NAO、IOD 和 PDO 1950-2010 年月时间数据处理成年时间数据, ENSO、NAO、IOD 和 PDO 数据来源于 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>。ENSO、NAO、IOD 和 PDO 正负值分别表示暖、冷相位。

2 方法

2.1 气候指标和年平均及洪峰流量的遥相关关系

ENSO、NAO、IOD 和 PDO 的强度随时间而变化, 并且其与遥相关影响的流域的距离也是不同的^[12], 因此有必要检验 ENSO、NAO、IOD 和 PDO 与年平均和洪峰流量相关强度的时间平稳性。采用 21 a 为时间尺度^[12] 计算提前 0-和 1-气候指标值和相应的 $\ln(Q_{\text{ann}})$ 和 $\ln(Q_{\text{max}})$ 相关系数 (21 a 能够保证序列具有一定的时间长度): 对于 Q_{ann} , 从 1960-1970 年滑动到 1980-2000 年, 共 21 个

滑动窗口；对于 Q_{max} ，从 1951 - 1971 年滑动到 1990 - 2010 年，共 40 个滑动窗口。分别统计 Q_{ann} 和 Q_{max} 达到相关系数达到显著性（显著性水平为 0.1）窗口数量占总窗口的比例，及采用 Mann-Kendall (MK) 法分别检测 Q_{ann} 和 Q_{max} 滑动相关系数序列的时间趋势性显著性水平为 0.1)。

2.2 气候指标对年平均和洪峰流量影响的灵敏度

ENSO、NAO、IOD 和 PDO 对年平均和洪峰流量影响的灵敏度通过线性最小二乘回归方程计算^[12-14]：

$$\ln(q_i) = \beta_0 + \beta_1 a_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中 q_i 分别为 Q_{ann} 和 Q_{max} 第 i 年的实测值， a_i 分别为 ENSO、NAO、IOD 和 PDO 相应 Q_{ann} 和 Q_{max} 提前 0 - 和 1 - 年的指标值， β_0 和 β_1 为回归系数， ε_i 为误差项。其中， β_1 代表 ENSO、NAO、IOD 和 PDO 对 Q_{ann} 和 Q_{max} 影响灵敏度。珠江流域 62 个站点 Q_{ann} 和 28 个站点的 Q_{max} 序列分别有 41 a 和 60 a 的序列长度，能够确保得到的灵敏度是相对合理的。流量受到多重因素的影响，例如土地利用、水资源管理基础设施等。我们感兴趣检测年际气候涛动对流量的影响，即使在已经建立了水资源管理基础设施的区域，区域气候变化的信号依然能够影响到流量^[13]。因为我们只感兴趣检测流量记录中的气候信号，所以没有考虑土地利用和其他非气候因素对流量的影响。尤其是土地利用、调控和森林砍伐等会导致流量呈单调趋势变化。但是气候对流量年际变化的影响是决定性的，就在决定流量变化中扮演着重要的角色^[14]。

3 结果

3.1 气候指标对年平均和洪峰流量影响的时间平稳性

以 21 a 为一个时间窗口，从 1960 - 1980 年滑动到 1980 - 2000 年，共 21 个时间窗口，计算了每个时间窗口气候指标和 Q_{ann} 相关系数，并统计了显著性达到 0.1 水平的窗口数量占总窗口数量的百分比及相关系数的时间趋势（显著性水平为 0.1，图 2）。对于前一年 ENSO，具有持续可靠相关强度的区域集中在北江、柳江及佑江，其中北江和柳江相关强度呈显著上升趋势，佑江则呈显著下降趋势（图 2：ENSO 1），当年 ENSO 对珠江流域中部、西北部及北江流域具有持续可靠的相关强度，并且相关强度在珠江流域中部、西北部呈显著上升趋势（图 2：ENSO 0）。前一年 NAO 对珠江流域中部及东部保持持续可靠的相关强度，但是相关系数呈显

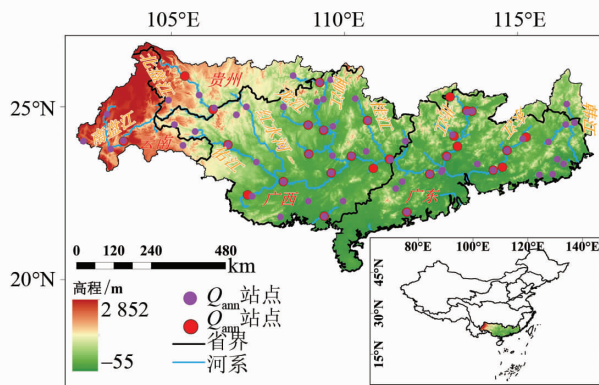


图 1 珠江流域径流站点地理分布图
Fig. 1 Locations of the Pearl River basin and the hydrological stations

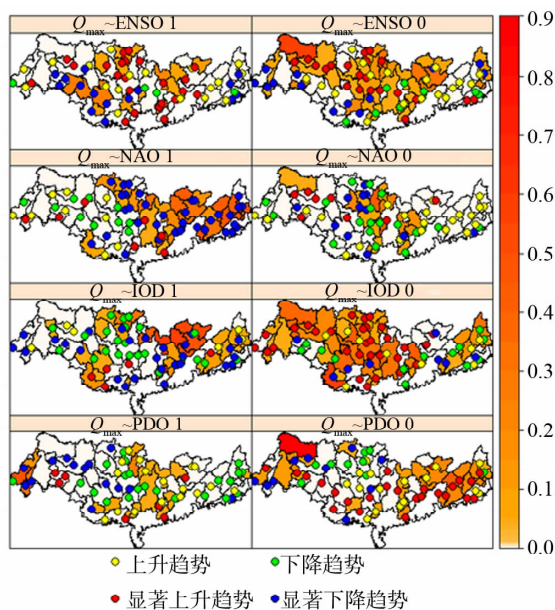


图 2 珠江流域 Q_{ann} 与气候指标值 21 a 滑动相关系数达到显著性（显著性水平为 0.1）的年份占滑动次数的比例及滑动相关系数时间趋势分布图（显著性水平为 0.1）
Fig. 2 The proportion of the years with significant relations (at significance level of 0.1) between Q_{ann} in the Pearl River basin and 21-year moving average of the climate indices, and spatial patterns of the trends in the moving correlation coefficients (at significance level of 0.1)

著下降趋势。而当年 NAO 主要对珠江流域中部一部分地区保持持续可靠的相关强度，相关系数成非显著下降趋势（图 2：NAO 1 和 NAO 0）。前一年 IOD 主要对北江流域和珠江流域东部地区具有持续可靠的相关强度，但是相关系数呈显著下降趋势，当年 IOD 几乎与整个珠江流域（除了北江流域）保持持续可靠的相关强度且整个西江流域相关系数

呈显著增加趋势（图 2：IOD 1 和 IOD 0）。前一年 PDO 与珠江流域显著相关强度的持续性较差，而当年 PDO 则对东部及北江流域具有持续可靠的相关强度且相关系数呈显著增加趋势（图 2，PDO 1 和 PDO 0）。

同样分析了 Q_{\max} 与气候指标相关强度的时间平稳性和趋势（图 3）。从图 3 中可以看出，前一年和当年 ENSO 均对整个西江流域保持持续可靠的相关强度，但是前一年 ENSO 与 Q_{\max} 相关系数在佑江流域呈显著下降趋势，而当年 ENSO 与 Q_{\max} 相关系数在柳江和龙江呈显著下降趋势（图 3：ENSO 1 和 ENSO 0）。前一年 NAO 主要对西江下游保持持续可靠的相关强度且相关系数呈显著上升趋势，而当年 NAO 主要对西江流域中部及中西部保持持续可靠的相关强度，且北江流域和西江下游相关系数呈显著上升趋势（图 3：NAO 1 和 NAO 0）。前一年 IOD 对珠江流域中部及北江流域保持持续可靠的相关强度，珠江流域中部地区相关系数呈显著上升趋势而北江流域呈显著下降趋势；当年 IOD 对珠江流域中南部及北江流域、东江流域保持持续可靠的相关系数，佑江及西江下游干流、东江流域相关系数呈显著下降趋势而北江流域呈显著上升趋势（图 3：IOD 1 和 IOD 0）。前一年 PDO 几乎对整个珠江流域保持持续可靠的相关强度，西江流域中部及中西部相关系数呈显著下降趋势，而北江流域则呈显著上升趋势；当年 PDO 与珠江流域保持持续可靠相关强度的影响集中在东江流域和珠江流域西部，东江流域相关系数呈显著上升趋势（图 3：PDO 1 和 PDO 0）。

3.2 冷暖时期下气候指标对年平均和洪峰流量的影响

珠江流域所有站点 Q_{ann} 和 Q_{\max} 通过距平处理，分别建立与气候指标之间的关系，并用箱型图表示不同等级的 Q_{ann} 和 Q_{\max} 对应的气候指标的离散程度（图 4）。就珠江流域整个流域所有站点统一来看，ENSO、NAO 和 PDO 对整个珠江流域超过平均水平的 Q_{ann} 的影响在正负相位并没有显著差别，然而负相位的 ENSO、NAO 和 PDO 易引发 Q_{ann} 处于低水平（ Q_{ann} 低于平均水平的一半），可能导致珠江流域水资源短缺，IOD 暖相位易引发珠江流域 Q_{ann} 极大的增加（ Q_{ann} 超过平均水平的 2 倍以上，图 4：a - d），可能导致水资源较为丰沛。相比于 Q_{ann} ，气候指标对 Q_{\max} 的影响尤其是极端洪水的影响较为显著。极端洪水（ Q_{\max} 超过平均水平的 2 倍以上）易发生在 ENSO 暖相位、NAO 冷相位、IOD 暖相位和

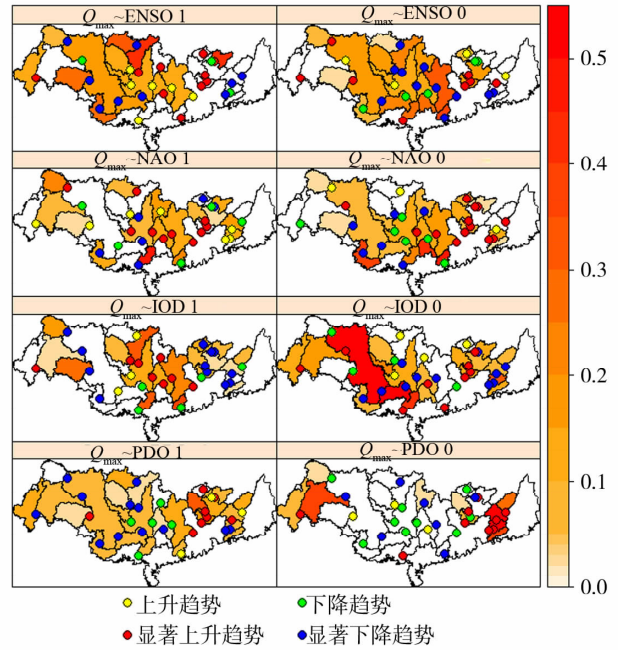


图 3 珠江流域 Q_{\max} 与气候指标值 21 a 滑动相关系数达到显著性（显著性水平为 0.1）的年份占滑动次数的比例及滑动相关系数时间趋势分布图（显著性水平为 0.1）

Fig. 3 The proportion of the years with significant relations (at significance level of 0.1) between Q_{ann} in the Pearl River basin and 21-year moving average of the climate indices, and spatial patterns of the trends in the moving correlation coefficients (at significance level of 0.1)

PDO 冷相位时期（图 4：e - h），这些时期珠江流域洪灾风险增加。

3.3 气候指标对年平均和洪峰流量灵敏度影响

通过灵敏度定量分析气候指标对 Q_{ann} 和 Q_{\max} 的影响（图 5 和图 6）。从图 5 中可以看出，前一年和当年 ENSO 对 Q_{ann} 的影响较小，大部分地区灵敏度处于 0.1 以下，也就是说单位 ENSO 的增加引起低于 10% 的 Q_{ann} 的减少，且大部分地区 Q_{ann} 对于前一年 ENSO 更敏感。前一年 NAO 对珠江流域东部、北江及柳江地区 Q_{ann} 有较明显的影响，单位 NAO 的增加引起上述地区 Q_{ann} 10% ~ 20% 的增加；当年 NAO 主要引起西江流域 Q_{ann} 减少，单位 NAO 的增加引起西江 Q_{ann} 低于 10% 的减少，珠江流域东部 Q_{ann} 10% ~ 20% 的增加，珠江流域东部和北江 Q_{ann} 对前一年 NAO 更敏感。在 4 个气候指标中 IOD 对珠江流域的影响最为显著，东江流域、北江流域、柳江和龙江相应于前一年的 IOD，灵敏度处于 0.1 ~ 0.3，单位 IOD 的增加引起上述地区 Q_{ann} 10% ~ 30% 的增加；当年 IOD 对整个西江流域灵敏度处于 0.1 ~ 0.4 之间，而对于珠江流域东部（东江、

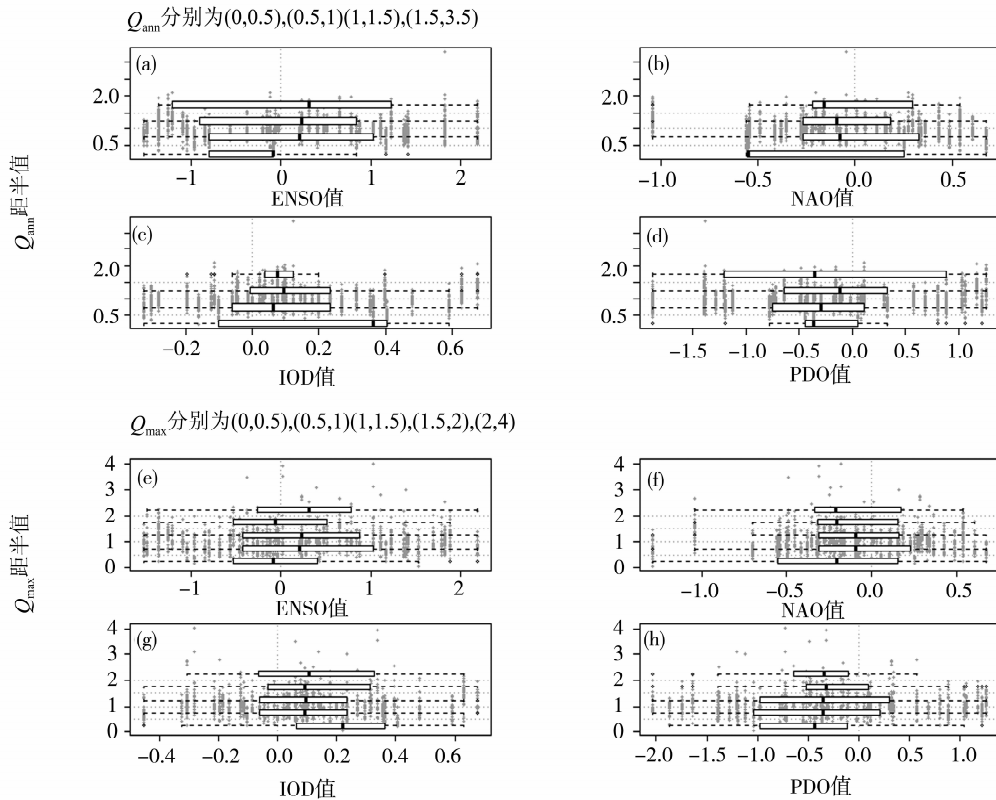


图4 珠江流域 Q_{ann} 和 Q_{max} 距平值 (Q_{ann} 或 Q_{max} 分别除以相对应的均值) 与气候指标的关系

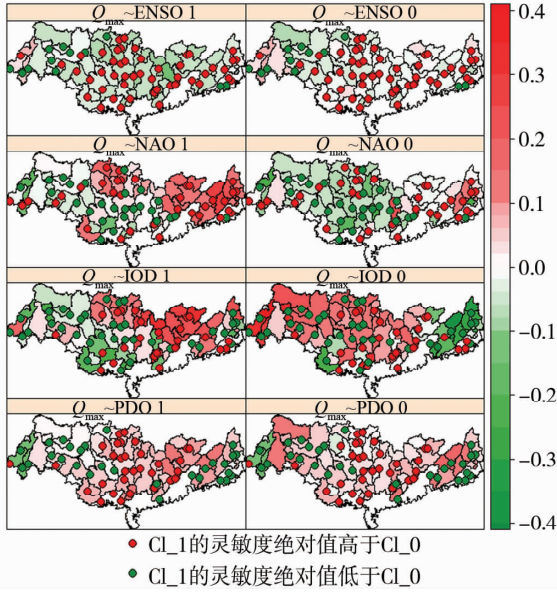
Fig. 4 The relationship between Q_{ann} and Q_{max} anomalies of the Pearl River basin and the climate indices considered in this study

韩江) 灵敏度处于 $-0.3 \sim -0.1$ 之间, 北江流域 Q_{ann} 对前一年 IOD 敏感。珠江流域大部分地区 Q_{ann} 对前一年和当年 PDO 的灵敏度较低, 总体来说处于 0.1 以下的水平, 单位 PDO 的增加仅引起大部分地区 Q_{ann} 增加 10% 以下。

图 6 给出了 Q_{max} 相对于各个气候指标灵敏度的空间分布。从图 6 中可以看出, 前一年单位 ENSO 的增加引起珠江流域大部分地区 Q_{max} 减少 0% ~ 10%, 而当年单位 ENSO 的增加引起珠江流域大部分地区 Q_{max} 增加 0% ~ 10%, 西江中部干流 Q_{max} 对于前一年 ENSO 的灵敏度高于当年 ENSO。前一年单位 NAO 的增加引起珠江流域支流龙江 Q_{max} 增加 10% ~ 20%, 当年 NAO 对 Q_{max} 灵敏度的影响在空间分布上比较零散, 西江下游及北江、东江当年 NAO 对 Q_{max} 的灵敏度高于前一年 NAO。相比其他气候指标, IOD 对珠江流域 Q_{max} 的灵敏度要大的多, 前一年 IOD 单位的增加引起西江流域东北部 Q_{max} 20% ~ 50% 增加, 而西江流域西南部及东江流域 Q_{max} 10% ~ 40% 的减少; 当年单位 IOD 的增加主要引起佑江和东江流域 Q_{max} 10% ~ 40% 的减少, 西江东北部受到前一年 IOD 的灵敏度要大于当年 IOD。前一年 PDO 和当年 PDO 对于珠江流域 Q_{max}

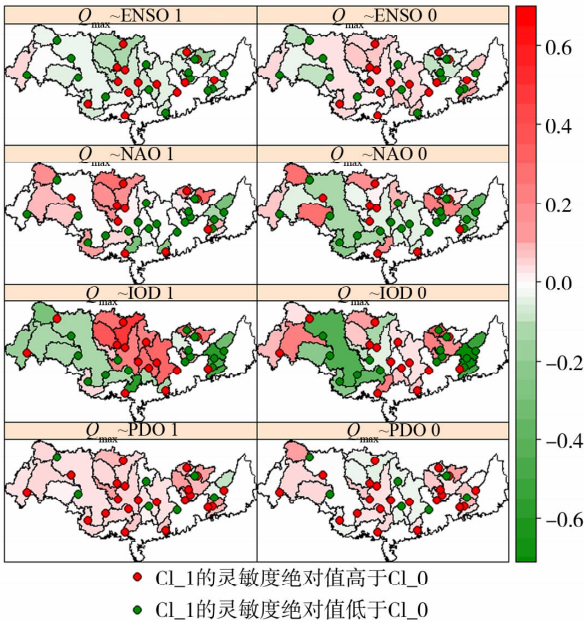
的灵敏度处于 $0 \sim 0.1$ 范围内, 也就是前一年和当年单位 PDO 的增加均引起珠江流域大部分地区 Q_{max} 0% ~ 10% 的增加。

为了进一步比较对应气候指标下 Q_{ann} 和 Q_{max} 灵敏度大小, 计算出 Q_{max} 灵敏度高于 Q_{ann} 灵敏度的面积, 将珠江流域分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的栅格, 采用反距离权重插值, 统计分析 Q_{max} 高于 Q_{ann} 栅格数量与总栅格数量的比例 (图 7)。ENSO 和 PDO 对 Q_{max} 和 Q_{ann} 的灵敏度的差异较小, 差异范围集中在 10% 以内。前一年和当年 ENSO、前一年和当年 PDO 对 Q_{max} 的灵敏度大于 Q_{ann} 的面积分别为 59%、71%、43% 和 14%。西江大部分区域前一年 NAO 对 Q_{max} 的灵敏度明显大于 Q_{ann} , 占总面积的比例为 56%, 而北江和珠江流域东部则相反; 西江下游干流当年 NAO 对 Q_{max} 的灵敏度明显大于 Q_{ann} , 占总面积比例为 59%, 而珠江流域东部及西江上游南盘江区域 Q_{max} 的灵敏度明显小于 Q_{ann} 。IOD 对珠江流域 Q_{max} 和 Q_{ann} 灵敏度的差异性在所有气候指标中最明显。珠江流域上游、柳江和东江前一年 IOD 对 Q_{max} 的灵敏度明显大于 Q_{ann} , 占总面积比例为 71%; 佑江、北江和东江当年 IOD 对 Q_{max} 的灵敏度明显大于 Q_{ann} , 占总面积比例为 36%。



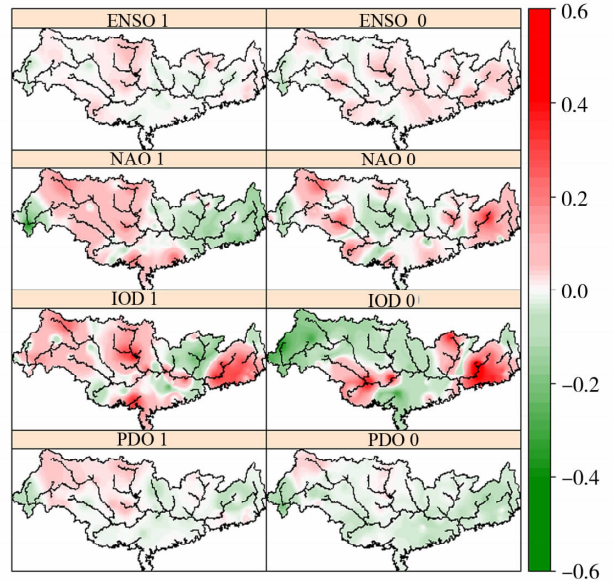
CL₁ 和 CL₀ 分别表示对应 Q_{ann} 序列，相应气候指标值序列提前 1 a 和 0 a。

图 5 珠江流域 Q_{ann} 与气候指标值的灵敏度空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of the sensitivity of Q_{ann} to each climate index across the Pearl River basin



CL₁ 和 CL₀ 分别表示对应 Q_{max} 序列，相应气候指标值序列提前 1 a 和 0 a

图 6 珠江流域 Q_{max} 与气候指标值的灵敏度空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of the sensitivity of Q_{max} to each climate index across the Pearl River basin



Q_{max} 灵敏度绝对值减去 Q_{ann} 灵敏度绝对值

图 7 对应气候指标下 Q_{max} 灵敏度与 Q_{ann} 灵敏度差异空间分布图

Fig. 7 Spatial patterns of the differences between Q_{max} and Q_{ann} with each climate index in terms of sensitivity

4 结 论

本文全面调查了 ENSO、NAO、IOD 和 PDO 对珠江流域 Q_{ann} 和 Q_{max} 的影响，分析了各个气候模式与 Q_{ann} 和 Q_{max} 区域性相关关系、相关强度时间平稳性，调查了不同冷暖事件下 Q_{ann} 和 Q_{max} 的差异性，最后定量分析了各个气候模式引起的 Q_{ann} 和 Q_{max} 的灵敏度，得出以下有意义的结论：

- 1) 各气候模式与 Q_{ann} 和 Q_{max} 相关强度时间平稳性及趋势差异性较大。对于 Q_{ann} ，当年 ENSO 和 IOD 均对西江大部分区域及当年 PDO 对珠江流域东部及北江保持持续显著相关影响，且相关强度呈显著上升趋势，最有利于 Q_{ann} 的预测；对于 Q_{max} ，前一年 NAO 和 IOD 及当年 NAO 均对珠江流域中部保持持续显著相关影响，且相关强度呈显著上升趋势，最有利于 Q_{max} 预测。

2) 就整个珠江流域来看，负相位 ENSO、NAO 和 PDO 倾向于引发 Q_{ann} 处于较低水平，导致干旱风险增加；而正相位的 ENSO、IOD 及负相位的 NAO 和 PDO 倾向于引发 Q_{max} 处于较高水平，导致极端洪水风险增加。

3) Q_{max} 对于气候指标变化的灵敏度要高于 Q_{ann} 。单位气候指标变化平均引起 Q_{ann} 和 Q_{max} 分别发生 0.3% ~ 24%、0.5% ~ 31% 的改变，其中前

一年和当年 NAO 和 IOD 引起的 Q_{ann} 和 Q_{max} 的差异较为显著, Q_{max} 灵敏度高于 Q_{ann} 的面积比例分别为 56%、59%、71% 和 36%。NAO 和 IOD 对珠江流域大部分区域 Q_{ann} 保持较高的灵敏度; ENSO、IOD 和当年 NAO 对珠江流域大部分区域 Q_{max} 保持较高的灵敏度。

参考文献:

- [1] CHEN W, FENG J, WU R G. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(2): 622–635.
- [2] YUAN Y, YANG H, ZHOU W, et al. Influences of the Indian Ocean dipole on the Asian summer monsoon in the following year[J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(14): 1849–1859.
- [3] LINDERHOLM H W, OU T H, JEONG J H, et al. Interannual teleconnections between the summer North Atlantic Oscillation and the East Asian summer monsoon[J]. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 2011, 116: D13107.
- [4] NIU J. Precipitation in the Pearl River basin, South China: scaling, regional patterns, and influence of large-scale climate anomalies[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(5): 1253–1268.
- [5] GU W, LI C Y, LI W J, et al. Interdecadal unstationary relationship between NAO and east China's summer precipitation patterns[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L13702.
- [6] ZHAO Y F, ZOU X Q, GAO L G, et al. Changes in precipitation extremes over the Pearl River Basin, southern China, during 1960–2012[J]. *Quaternary International*, 2014, 333: 26–39.
- [7] CHEN Y Q D, ZHANG Q, CHEN X H, et al. Multiscale variability of streamflow changes in the Pearl River basin, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(2): 235–246.
- [8] ZHANG Q, GU X H, SINGH V P, et al. Flood frequency analysis with consideration of hydrological alterations: Changing properties, causes and implications[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 803–813.
- [9] ZHANG Q, GU X H, SINGH V P, et al. Stationarity of annual flood peaks during 1951–2010 in the Pearl River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3263–3274.
- [10] ZHANG Q, GU X H, SINGH V P, et al. Flood frequency under the influence of trends in the Pearl River basin, China: changing patterns, causes and implications[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(6): 1406–1417.
- [11] OUYANG R, LIU W, FU G, et al. Linkages between ENSO/PDO signals and precipitation, streamflow in China during the last 100 years[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(9): 3651–3661.
- [12] WARD P J, EISNER S, FLORKE M, et al. Annual flood sensitivities to El Niño-Southern Oscillation at the global scale[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(1): 47–66.
- [13] BOUWER L M, VERMAAT J E, AERTS J C J H. Regional sensitivities of mean and peak river discharge to climate variability in Europe[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D19103.
- [14] WARD P J, BEETS W, BOUWER L M, et al. Sensitivity of river discharge to ENSO[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L12402.