

---

# 基于逐步聚类的珠三角地区气候要素复杂性定量分析技术 开发

气候系统是城市生态复杂巨系统的重要组成部分。气候变化的加剧导致了城市群复合生态系统的脆弱性，使得多层式生态系统更为复杂，显著影响了珠三角地区的人流、资金流、物质流、能量流、信息流的交汇，也使得各类能源、环境、水资源、气候等要素之间的联系进一步复杂化，这在珠三角地区表现得尤为明显。珠三角地区地处东南沿海，受其自身地理位置影响，雨量充沛，热量充足，雨热同季。受海洋气候和内陆气候的双重影响，珠三角地区生态系统呈现出显著的动态、多样及空间差异性。与此同时，珠三角生态系统的演变又反过来影响局部气候要素的变化。例如，珠三角地区的关键气候要素如温度和降水等发生了显著变化，由此引发的区域性灾害（如干旱、热浪等）给当地的正常生产生活及经济活动带来了极大威胁。其次，气候变化无疑会改变珠三角地区水循环的时空变化过程，加剧了极端气候事件发生的概率与强度。在工业化、城镇化进程急速推进与气候变化的双重影响下，珠三角地区洪涝灾害愈加频繁。极端降雨、极端高温等促成了生态系统安全问题的频发，已成为珠三角城市群安全运行的重要威胁。整体而言，珠三角地区气候-生态系统之间存在多维复杂互动关系，气候要素的变化对于珠三角生态平衡发展起到了重要作用。

因此，为揭示未来变化环境下的珠三角城市群生态风险时空变化特征，本研究通过耦合区域气候变化与城市化进程情景，探讨气候变化背景下，珠三角地区气候要素的时空变化特征及其影响。开发珠三角地区气候要素复杂性定量分析技术，研究气候变化（尤其是关键气候要素变化）对珠三角城市群生态系统的影响，并由之建立科学的决策支持体系，既是解决珠三角城市群生态问题的必由之路，更是进一步对珠三角城市群的生态系统进行安全评估的重要组成部分。

基于此，本研究开发了基于逐步聚类、相关分析和主成分分析的珠三角地区气候要素复杂性定量分析技术，并以关键气候要素如干旱、热浪等为例，解析该地区气候变化的复杂不确定性，为揭示未来变化环境下的珠三角城市群生态风险时空变化特征提供依据。具体方法如下：

## 1) 基于逐步聚类的珠三角地区未来干旱预估

首先,通过多个全球气候模式(GCMs)驱动的逐步聚类干旱预测模型(SCP),在两个不同排放情景下(RCPs)对珠三角地区干旱状况进行预测评估。随后,基于多个气象站逐日最高气温观测数据,4个GCMs和来自于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的再分析数据,提出一种基于逐步聚类分析(SCA)的未来热浪预测(SCHW)模型,进而对珠三角未来热浪变化进行分析。逐步聚类(SCA)是一种基于多元方差分析的理论,具有自变量与因变量之间无函数化假设以及可以同时考虑多个因变量的优点。该方法依据 Wilks' lambda statistic 判别标准,通过两组 d 维因变量 e 和 f 建立 GCMs 与站点观测数据之间的统计关系:

$$\text{组内方差和: } E = \sum_{i=1}^{n_e} (e_i - \bar{e})(e_i - \bar{e}) + \sum_{j=1}^{n_f} (f_j - \bar{f})(f_j - \bar{f})$$

$$\text{组间方差和: } H = \frac{n_e n_f}{n_e + n_f} (\bar{e} - \bar{f})(\bar{e} - \bar{f})$$

$$\text{Wilks' 统计量: } \Lambda = \frac{|E|}{|E + H|}$$

具体地,对于珠三角地区的未来干旱变化的定量分析,主要是将 5 套 GCMs(即 CSIRO-Mk3.6.0,CNRM-CM5,HadGEM2-ES,MIROC5 和 MRI-CGCM3)在两个 RCP(即 RCP4.5 和 RCP8.5)下的输出数据进行统计降尺度。并通过两个气象干旱指数(即 SPEI 和 SPI)定量分析未来时期珠三角地区干旱状况的时空变异特征。同时,考虑到干旱预测过程中全球气候模式以及不同排放情景之间的不确定性,本研究通过析因分析方法(Multi-factorial analysis)对干旱预测过程中不确定性的主要来源展开追踪。

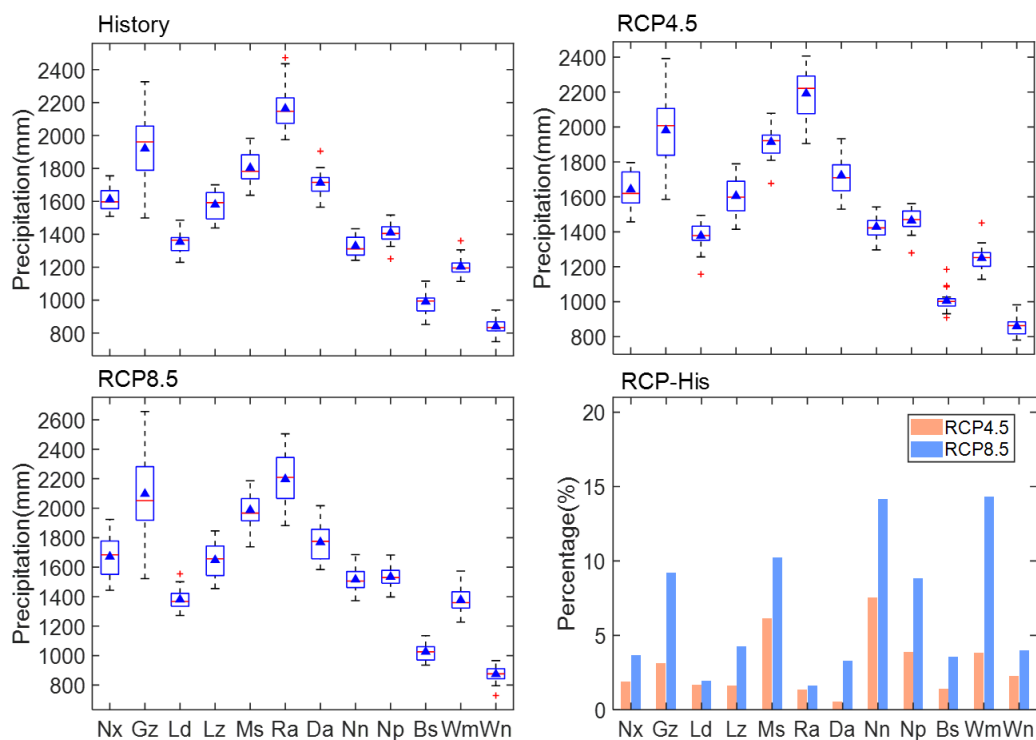


图 1 RCP4.5 和 RCP8.5 下预测得到的年降水及其变化

本研究采用多套 GCMs 的集合平均结果来预测评估未来时期研究区气候要素的变化。图 1 RCP4.5 和 RCP8.5 下预测得到的年降水及其变化显示了 RCP4.5/8.5 下预测得到的年降水的变化，结果表明年降水量在未来时期将增加。其中，在 RCP4.5 情景下，研究区所有气象站点年降水量预测值相比基准期的增加幅度为 0.53-7.77%，而在 RCP8.5 情景下，年降水量的增加幅度为 1.60-14.15%。

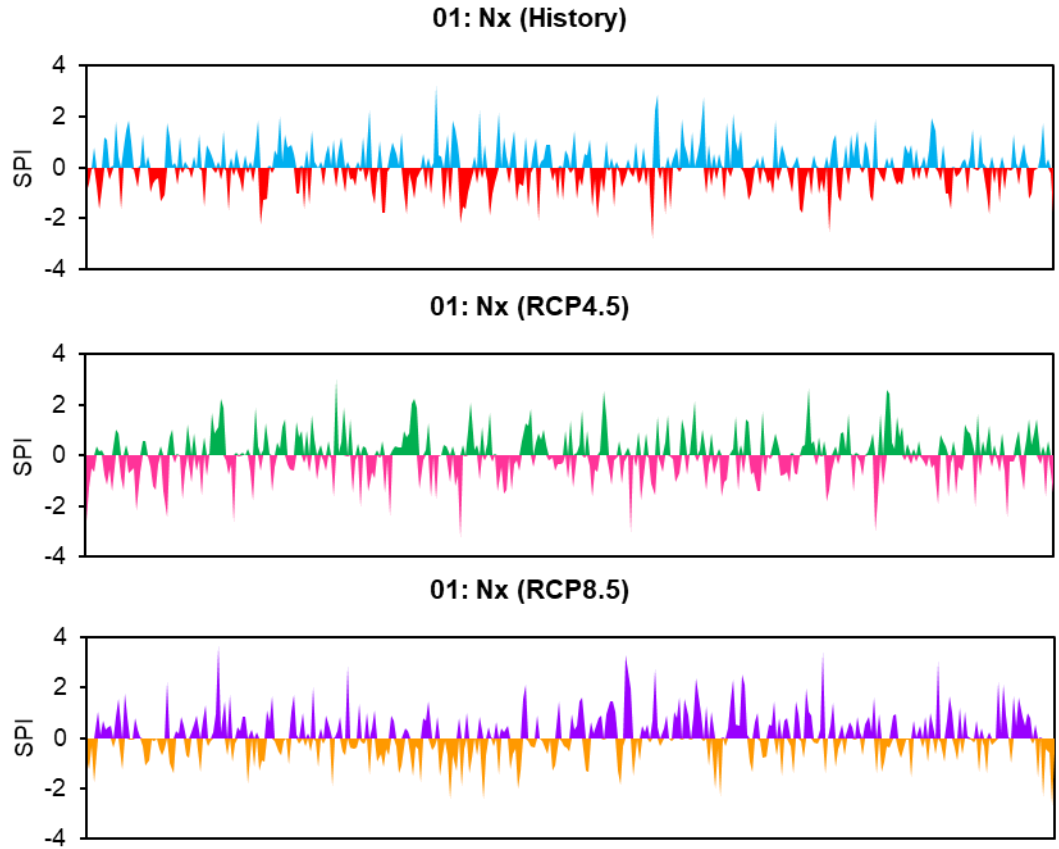


图 2 SPI 不同时期的月时间序列

本研究运用 SCA 研究方法，对珠江流域降水进行了统计降尺度。选定珠江流域 12 个气象站点，分析两种排放情景下 2080s（2075-2094 年）相对历史时期（1981-2000 年）降水的百分比变化，同时利用降尺度后集合平均的降水结果计算得到了未来 60 年（2041-2100 年）气象干旱指标 SPI 数值（详见图 2）。以南雄站点为例，分析 SPI 在历史(1959-2018)、RCP4.5(2041-2100)和 RCP8.5(2041-2100)三个时间段的月时间序列。与历史时期相比，尤其到本世纪末，极端干旱有所减少。

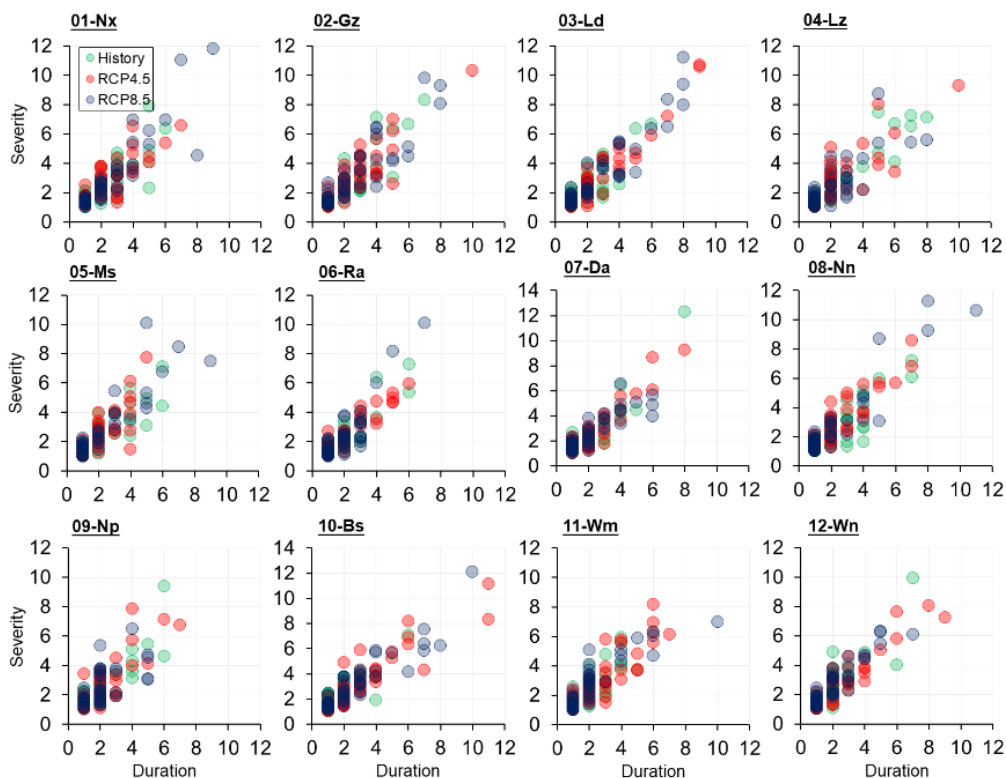


图 3 未来时期干旱状况的变化

干旱作为影响最广泛的自然灾害，其特征变化与温度和降水等息息相关，因而在此基础上，本研究进一步分析了珠三角地区未来时期干旱状况的变化。图 3 展示了珠三角地区站点尺度干旱状况在历史及未来阶段的变化。与历史时期相比，在 RCP4.5 下，持续时间为 1 至 2 个月的干旱事件将减少 7.7%；持续时间为 3 到 4 个月的干旱事件将增加 4.3%；持续时间为 5 个月及以上的干旱事件将增加 3.4%。在 RCP8.5 下，这一增加比例分别为 6.1%、1.4%和 4.7%。这一结果意味着珠三角地区未来时期将会出现更多的更高严重程度的中长期干旱事件。由于全球气候模式及排放情景的不确定性，在干旱预测过程中追踪其不确定性的来源对提升干旱状况的预测能力具有重要意义。

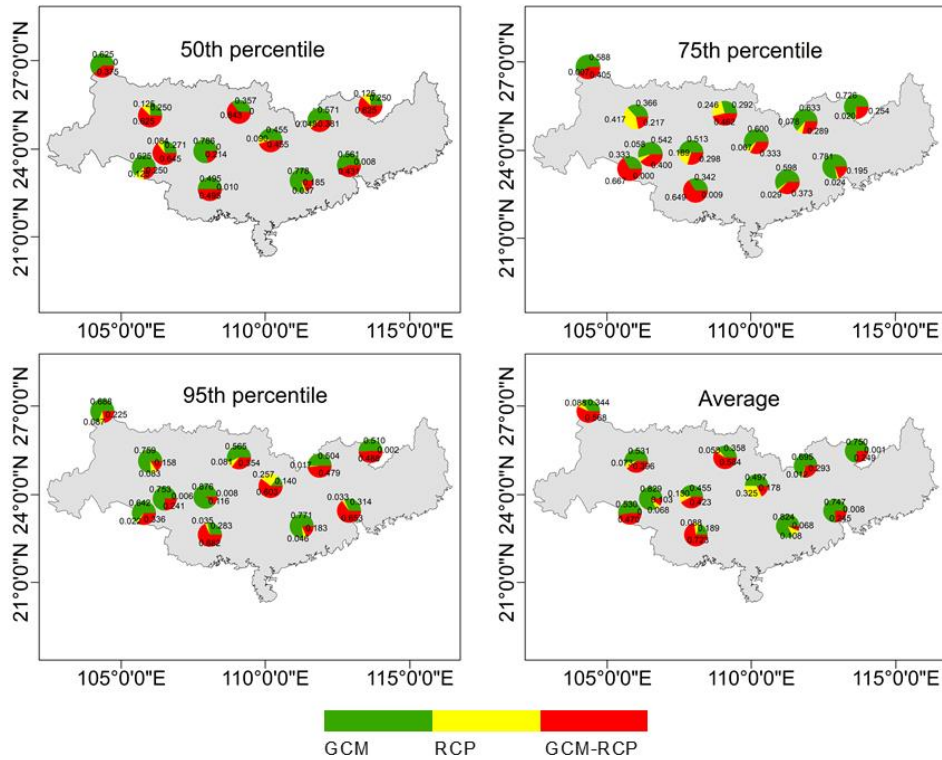


图 4 各站点干旱预测不确定来源

本研究中干旱预测的不确定性来源主要包括 GCMs、RCP 以及两者交互作用的影响。图 4 显示了在 4 个响应下干旱状况预测过程中不确定性的主要来源。结果表明 GCMs 是干旱预测中不确定性来源的主要贡献，其贡献比例分别达到了 50.20%、52.61%、56.71%和 56.24%。除此之外，GCMs 和 RCPs 交互作用的影响也占有较高比重，其贡献率分别为 44.37%、37.86%、37.66%和 35.83%。这一结果清楚的表明 GCMs 是珠三角地区干旱预测过程中不确定性来源的主要贡献因子，并且 GCMs 和 RCP 交互作用的影响同样不可忽视。

## 2) 基于逐步聚类的珠三角地区未来热浪预估

对于珠三角地区未来热浪的潜在变化，本研究主要是基于 4 套 GCMs 数据（CNRM-CM5，CSIRO-Mk3.6.0，IPSL-CM5A-MR 和 MIROC5）在未来两个排放情景（RCP4.5 和 RCP8.5）下的数据，结合再分析数据（NCEP）和观测的日最高气温数据（daily maximum temperature, Tmax）开展降尺度研究。通过相对热浪(absolute heatwave evenets, AHWs)和绝对热浪(relative heatwave evenets, RHWs)来定义珠三角地区的未来热浪。此外，同时采用单一指标（如热浪的发生次数，

HWN、持续时间，HWDU、量级，HWM）和综合性指标（热浪的强度，HWI、频率，HWF、累积强度，HWTI）对未来珠三角地区的热浪频率、强度、历时等特征变化进行定量分析。

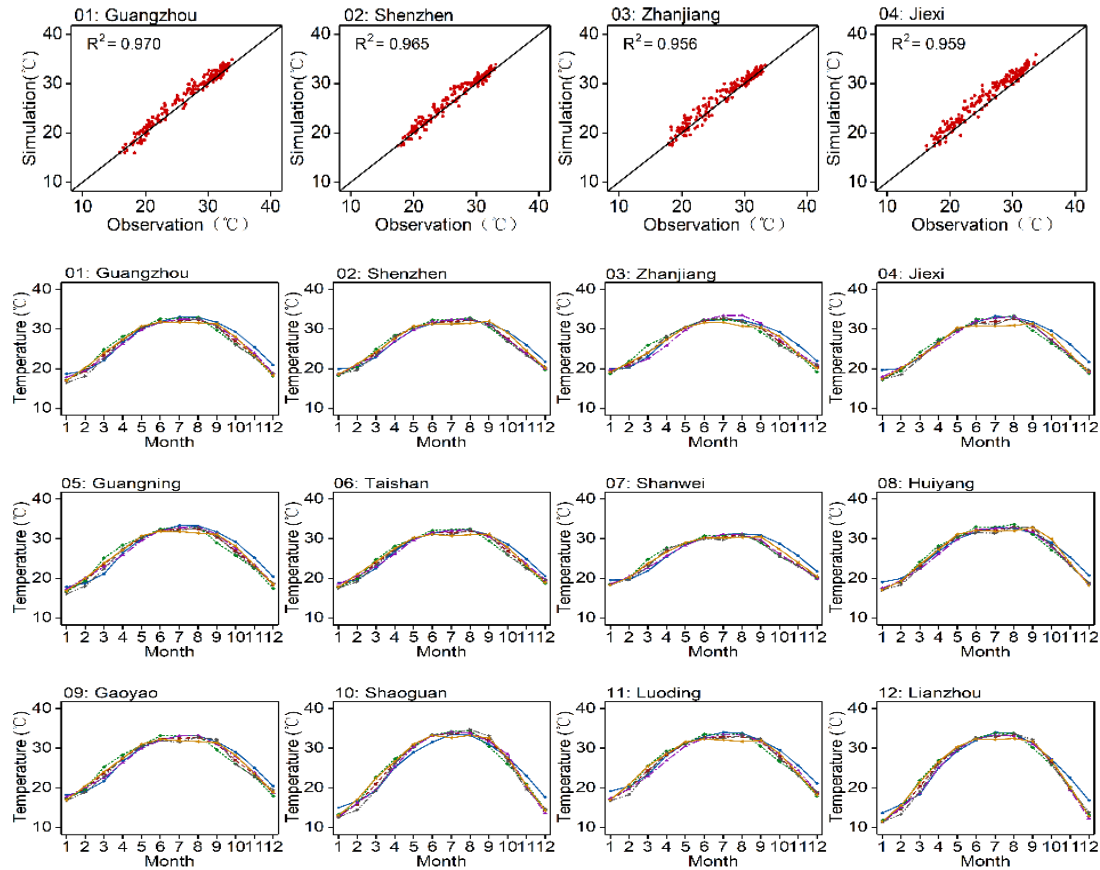


图 5 四个 GCMs 及其集合在四个站点温度的验证结果（1991-2005 年）

首先,对基于 NCEP 再分析数据和站点的日最高气温观测数据建立的热浪降尺度模型 (SCHW) 进行验证。图 5 展示了珠三角地区由 NCEP 再分析数据输入到 SCHW 得到的模拟输出值与观测的日最高气温之间的决定系数 ( $R^2$ )。可以看出,这些决定系数的值均在 0.95 以上,这说明降尺度模型的训练和验证结果较好,可以充分地捕捉站点观测日最高气温的特征。此外,在月尺度的验证图中,还可以看出, SCHW 对 5 月至 10 月份的日最高气温的模拟效果优于其他月份 (图 5)。这说明开发的模型对于日最高气温模拟效果较好,为未来热浪变化的分析提供了高质量的输入数据。

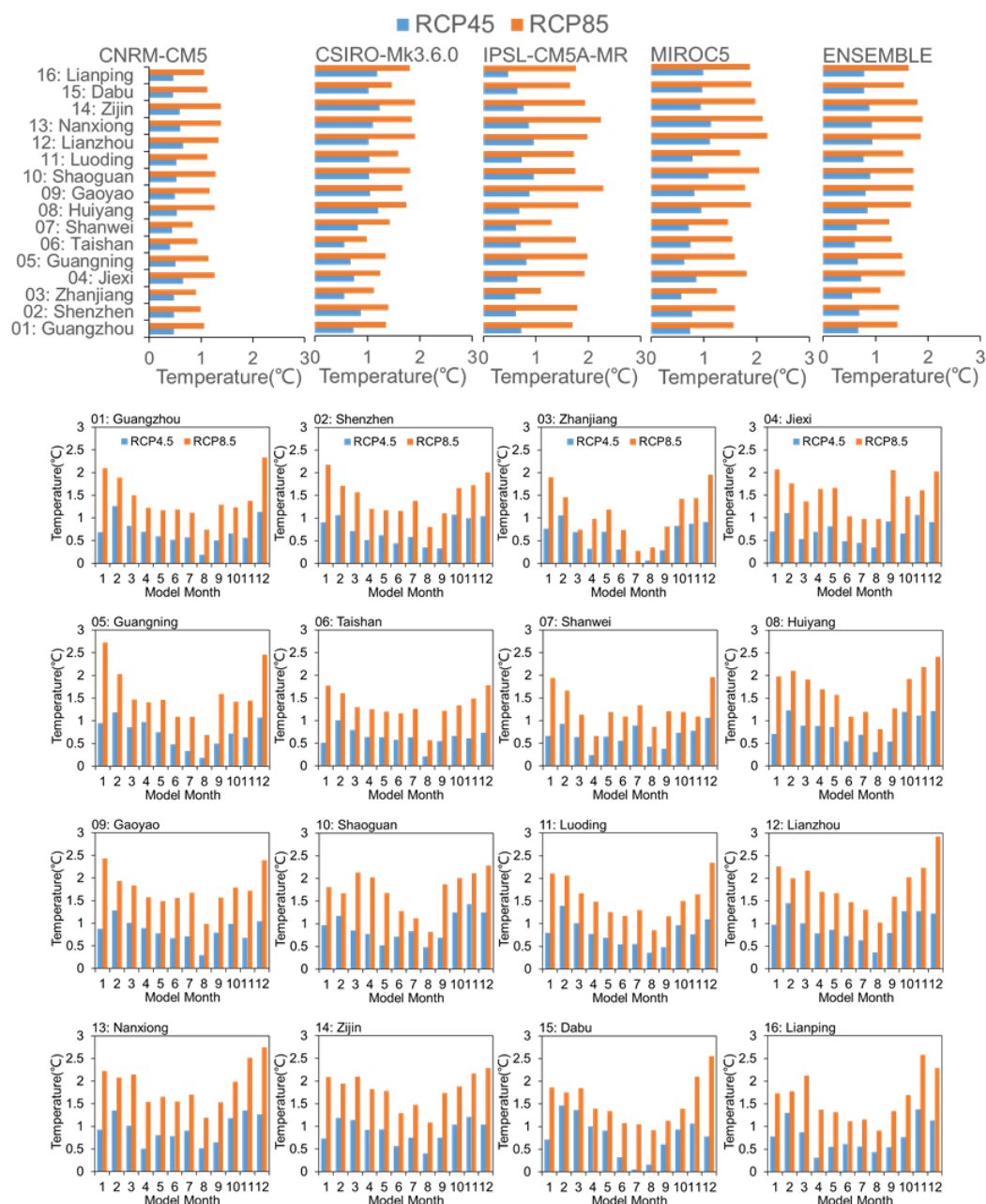


图 6 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 4 个站点的年均日最大温度的变化趋势

本研究使用 4 个 GCM 的模型集合探究了珠三角地区未来时期(2066-2095)相对于历史时期(1976-2005)的温度变化(详见图 6)。结果表明两个 RCP 情景(RCP4.5 和 RCP8.5)下,珠三角地区未来的日最高温度在年际尺度和月尺度上均呈显著增长趋势。具体地,在年际尺度上,以广州市为例,4 个 GCM 及其模型集合在未来(RCP8.5 情景下)的温度增长分别为  $0.48^{\circ}\text{C}$ ,  $0.74^{\circ}\text{C}$ ,  $0.72^{\circ}\text{C}$ ,  $0.74^{\circ}\text{C}$ , 和  $0.67^{\circ}\text{C}$ 。在季节尺度上, SCHW 模拟的结果在各站点之间存在显著的



---

差异。但从整体来看，各站点在春季节和冬季的增加较多，夏季的增量次之，秋季最少，且年际增长幅度低于季节的，其增长分别为 0.0016-0.0030℃和 0.0030-0.0054℃。

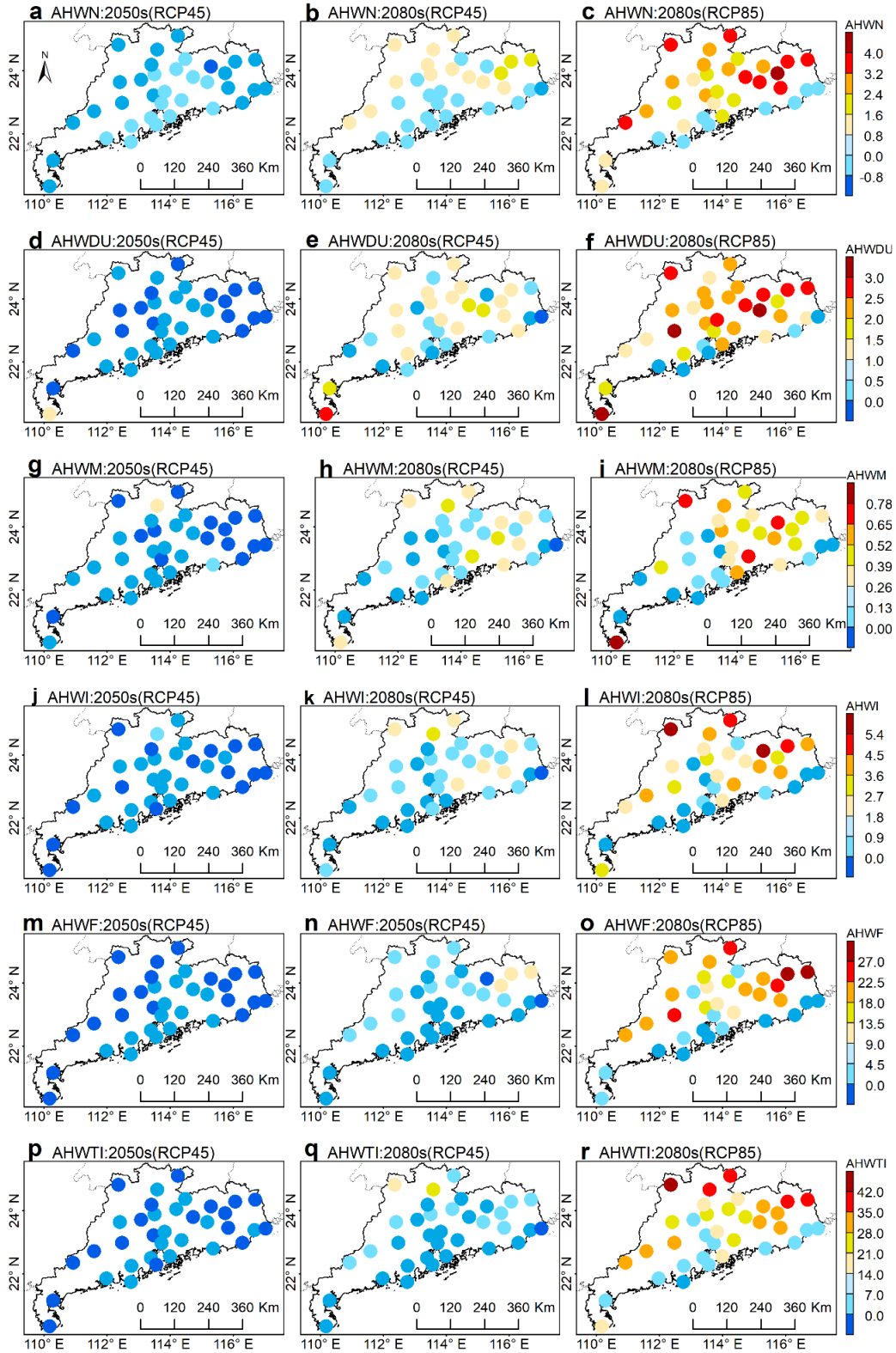


图 7 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 2050s 和 2080s 期间，由多 GCMs 集合驱动的绝对热浪各指标预估变化在广东省的空间分布（AHWN (a-c)，AHWDU (d-f)，AHWI (g-i)，AHWI (j-l)，AHWF (m-o)，AHWTI (p-q)）（点的不同颜色表示该站的预估变化值）。

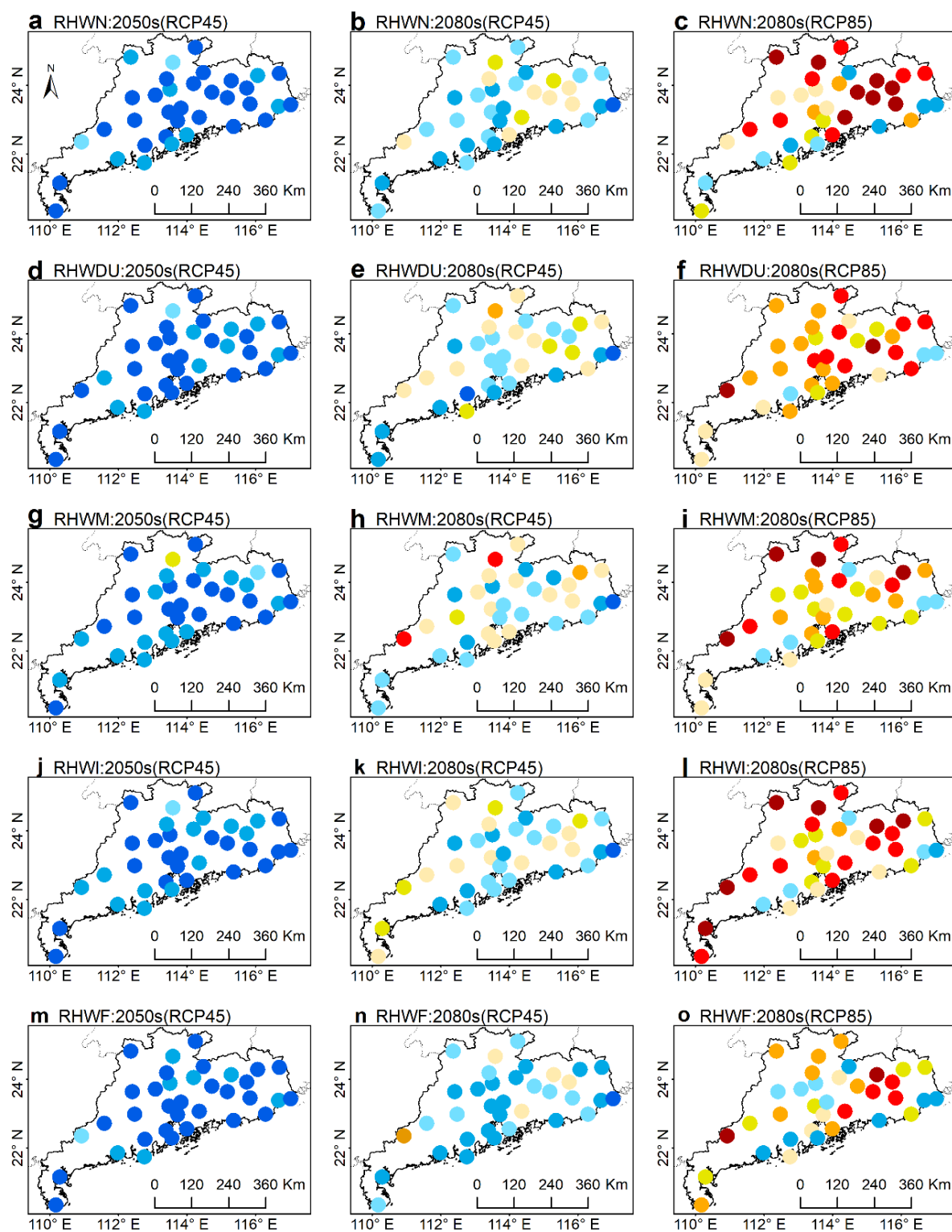


图 8 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的 2050s 和 2080s 期间，由多 GCMs 模型集合驱动的相对热浪各指标预估变化在广东省的空间分布（RHWN（a-c），RHWDU（d-f），RHW（g-i），RHWI（j-l），RHW（m-o），RHWI（p-q））（点的颜色

表示预估变化值)

本研究对未来热浪相较于历史时期（1976-2005）的变化进行探究。结果表明，在两种排放情景下（RCP4.5 和 RCP8.5），珠三角的热浪频次、持续时间和强度等指标均呈现出显著增加的特征（图 7 和图 8）。具体地，在空间上，各个热浪指标在内陆的预估增量高于沿海地区的站点，绝对热浪(AHWs)的增量呈现出从沿海向内陆增加的趋势，而相对热浪的增量在空间上则相对分散。在时间上，各指标在 RCP8.5 情景下 2080s 的预估增量最高，RCP4.5 情景下 2080s 的次之，RCP4.5 情景下 2050s 的最低。指标上，综合指标(HWI、HWF 和 HWTI)的增量显著高于单一指标（HWN、HWDU 和 HWM）。此外，考虑到广东省的区域气候和地理差异较大，相对定义更适合描述该区域的热浪。

3) 基于 RCM 模型系统的未来气候变化对热浪干旱的潜在影响分析

全球气候模型（GCM）通常用于不同排放情景下的未来气候变量预估。由于 GCM 空间分辨率过于粗糙，预估结果可能存在较大的系统偏差且无法准确地反映较小区域尺度的气候特征。因此通常使用 RCM 将 GCM 的输出降尺度到更高的分辨率，并根据实测气候数据做偏差校正以取得更可信的评估结果。综上，本研究建立了一个 RCM 模型系统（图 19），以探讨未来气候变化热浪干旱的潜在影响，具体地以黄土高原为例说明该模型系统的适用性。

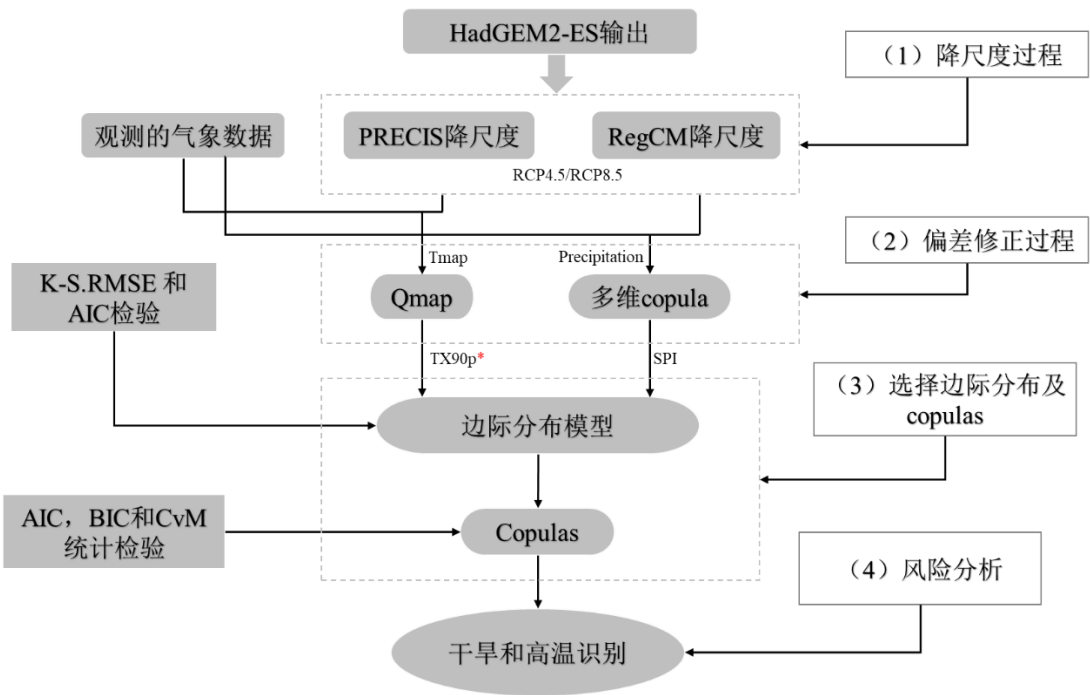


图 9 热旱概率识别系统流程图

具体而言，利用 Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS) 和 Regional Climate Model system (RegCM) 区域气候模型模拟黄土高原历史和未来 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的降水量 (Precip) 和最高温度 (Tmax)。分别采用常用的分位数映射方法 (Qmap) 和 Copula 模型对 Tmax 和 Precip 进行偏差校正。对 SPI (标准化降水指数) 和 TX90p (日最高温超过历史时期第 90 百分位数的天数占比) 构建合适的边缘分布，并基于 Copula 方法，建立 TX90p 和 SPI 的联合分布。最后，还对未来不同情景下单变量和双变量重现期在不同水平上的表现进行了分析。

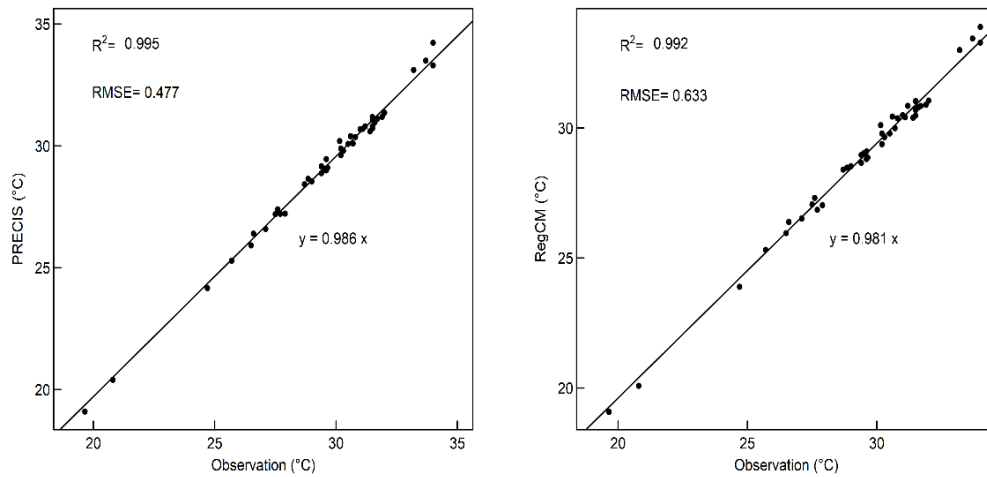


图 10 两个 RCM 输出日最高气温在 44 个站点的偏差校正性能比较

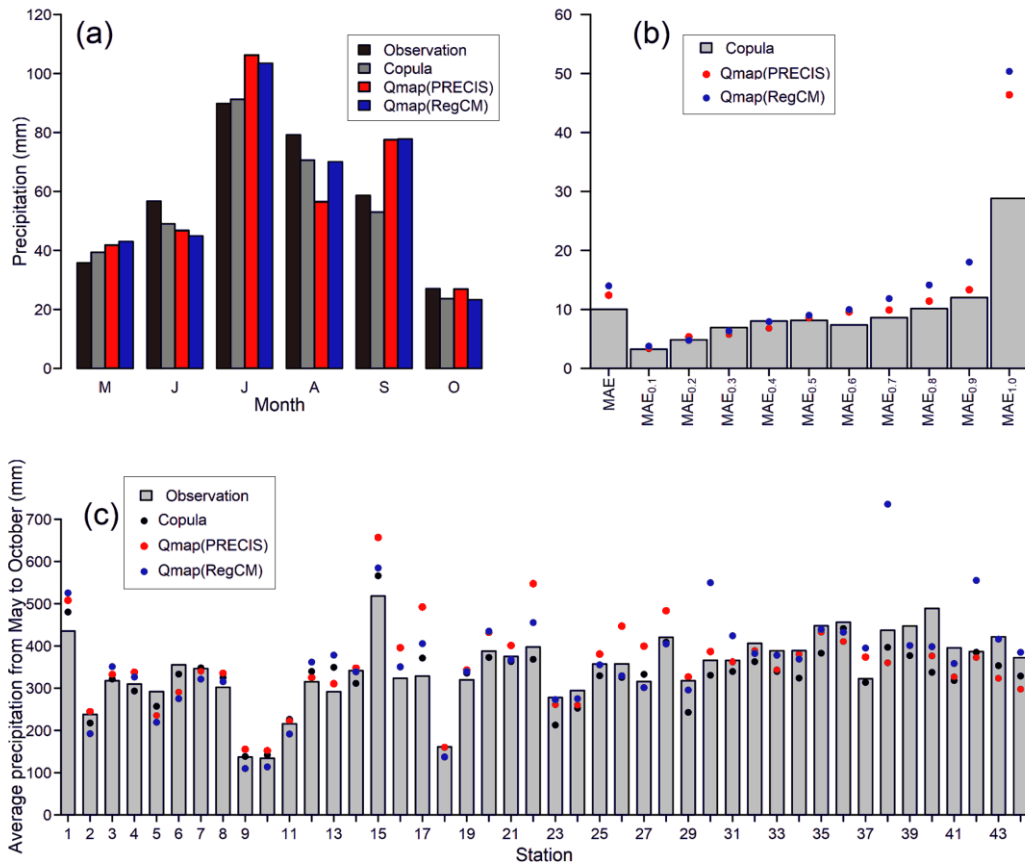


图 11 不同方法对降水的校正比较

本研究使用 Qmap 方法来校正 PRECIS 和 RegCM 模型输出的日最高温度数据（图 10）。PRECIS 模型输出的验证结果显示 44 个站点日时间尺度 Tmax 的确定系数 ( $R^2$ ) 在 0.63-0.79 之间，平均值为 0.73，而 RegCM 校正后的确定系数在 0.55-0.81 之间，平均值为 0.72。PRECIS 模型和 RegCM 模型输出 Tmax 的校正结果在月尺度上  $R^2$  均大于 0.95，可以满足气候变化分析的需要。利用 Copula 模型对 PRECIS 和 RegCM 模型的月降水量进行校正。基于平均绝对误差 (MAE)，将 Copula 模型与常用的偏差校正方法 Qmap 进行了比较（图 11）。结果显示，Copula 模型得到的校正结果的 MAE 值在整体上明显小于 Qmap 方法得到的 MAE 值，因此 Copula 模型的性能相对 Qmap 方法更优、更稳定。在此基础上，本研究运用了因子设计的方法探究了模型结果对 PRECIS 和 RegCM 两种动态降尺度方法以及 Qmap 和 Copula 两种偏差修正方法的敏感性。两种偏差修正方法的敏

---

感性。

综上所述，在全球变暖的背景下，珠三角地区在未来时期将会出现更多的更高严重程度的中长期干旱事件，GCMs 及 GCMs 和 RCP 之间的交互作用对珠三角地区干旱预测过程中不确定性的巨大影响值得注意。此外，该地区的热浪频次、持续时间和强度等在未来也呈现出显著增加趋势。基于 RCM 模型系统的偏校正方法在处理气候变化对于旱热浪的影响方面显示出的良好性能，而未来珠三角面临较高的热浪和发生风险，故可考虑将该方法可推广应用于珠三角地区，以探究气候变暖对该区域的干旱热浪的潜在影响。这不仅有助于构建气候变化条件下珠三角城市群生态风险预测预警平台，也可为该地区极端气候事件的识别、评估和风险预警及气候变化影响下产生的一系列生态问题提供科学基础和技术支持，从而对珠三角地区整生态环境的改善及区域社会经济的可持续发展产生积极影响。