

DOI: 10.5846/stxb202001210160

刘子豪, 陆建忠, 黄建武, 陈晓玲, 曾群. 基于全球气候模式集合的鄱阳湖流域未来潜在蒸散量及其干旱效应研究. 生态学报, 2021, 41(17): 6936-6948.

Liu Z H, Lu J Z, Huang J W, Chen X L, Zeng Q. Potential evapotranspiration and drought effects of Poyang Lake Basin based on global climate model ensemble. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6936-6948.

基于全球气候模式集合的鄱阳湖流域未来潜在蒸散量及其干旱效应研究

刘子豪¹, 陆建忠^{2,*}, 黄建武¹, 陈晓玲², 曾 群¹

¹ 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079

² 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

摘要: 鄱阳湖流域近年来旱涝灾害频发, 原有的水量平衡被打破。因此, 开展鄱阳湖地区潜在蒸散量及干旱效应研究具有重要意义。潜在蒸散量 (Reference Evapotranspiration, ET_0) 是评价区域水资源配置和计算干旱指数的重要指标。以我国的鄱阳湖流域为研究区, 依托统计降尺度模型, 基于站点观测数据、气候模式数据以及美国环境中心再分析数据, 运用遗传算法构建多模式集合, 模拟未来情景下流域潜在蒸散量和干旱指数 (Drought Index, DI) 时空演变特征。结果表明: 基于遗传算法构建的模式集合较单一气候模式或等权模式集合, 模拟性能佳; RCP4.5/8.5 情景下流域 ET_0 均呈上升趋势, ET_0 变化的第一主周期分别为 20 年和 4 年, 流域 ET_0 未来空间变化特征表现为东高西低; RCP8.5 情景下, 鄱阳湖流域 DI 在年际上呈显著上升趋势, 9—11 月是干旱风险防范的关键时期; 流域年 DI 变化的主周期为 8 年, 流域的中东部地区将是未来干旱风险防范的重点区域。本研究为认识区域尺度下气候变化对潜在蒸散量的影响提供借鉴, 同时为政府部门科学应对鄱阳湖流域未来时期可能出现的旱情提供的决策支持。

关键词: 全球气候变化; 模式集合; 潜在蒸散量; 干旱指数; 鄱阳湖流域

Potential evapotranspiration and drought effects of Poyang Lake Basin based on global climate model ensemble

LIU Zihao¹, LU Jianzhong^{2,*}, HUANG Jianwu¹, CHEN Xiaoling², ZENG Qun¹

¹ Key Laboratory of Geographic Process Analysis and Simulation of Central China Normal University, Wuhan 430079, China

² State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In recent years, droughts and floods have occurred frequently in the Poyang Lake Basin, and the original water balance has been broken. Therefore, it is of great strategic significance to carry out research on potential evapotranspiration and drought characteristics in the Poyang Lake Basin under climate change. Reference evapotranspiration (ET_0) is an important indicator for evaluating the allocation of water resources in the region and calculating the drought index. This paper takes Poyang Lake basin as the research area, relies on statistical downscaling models, selects daily observation data, global climate model data, and reanalysis data from the US Environmental Center. Relying on the genetic algorithms to construct a model set. The temporal and spatial evolution characteristics of the potential evapotranspiration and Drought Index (DI) of the basin under the future climate context are estimated. The results show that the genetic algorithm's model set has a better simulation performance than any single climate model and equal weight model set. Under the two scenarios of

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1506506); 武汉市应用基础前沿专项 (2019020701011502); 江西省重点研发计划 (20201BBG71002); 湖北省自然科学基金 (2019CFB736)

收稿日期: 2020-01-21; 网络出版日期: 2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lujzhong@whu.edu.cn

RCP4.5 and RCP8.5, the ET_0 in the Poyang Lake Basin shows an upward trend. The first major cycles of ET_0 change are 20 years and 4 years, respectively. The future spatial change characteristics of ET_0 in the basin are characterized by high in east and low in west. From 1961 to 2010, the interannual change of the DI in the Poyang Lake Basin showed a rising trend. It was high in summer and autumn and low in spring and winter. Spatially, the south and southeast of the Basin were the high value areas. Under the RCP8.5 scenario, the DI of the basin shows a significant upward trend in the interannual period. Autumn is a key period for preventing drought risks in the river basin. Eight years is the first major cycle of annual DI change in the Basin. The central and eastern regions of the Poyang Lake Basin will be key areas for future drought risk prevention. This study provides a reference for understanding the impact of climate change on potential evapotranspiration on a regional scale, and at the same time provides decision support for government departments to scientifically respond to possible droughts in the Poyang Lake Basin in the future.

Key Words: global climate change; multi-model ensemble; potential evapotranspiration; drought index; Poyang Lake Basin

全球气候变化是影响人类生存与发展,是全球面临的重大挑战^[1-3]。气候变化改变了大气环流特征,使得以潜在蒸散量 ET_0 和降水为代表的气象要素的重新分布。作为气候系统的核心过程,潜在蒸散量的变化会引起区域水循环与水资源的变化,潜在蒸散量的研究有利于科学的认识区域水分循环特征以及旱涝规律^[4-5]。

鄱阳湖流域是长江下游重要的经济区和生态区,近年旱涝灾害频发,流域的 ET_0 和干旱特征变化受到广泛关注^[6-10],如赵晓松等^[6]应用地面温度-植被指数三角关系法反演鄱阳湖湖区蒸散的时空分布及主要气候因子的影响;刘冲等^[7]基于 WaSSI-C 生态水文模型估算了鄱阳湖流域植被恢复和气候变化影响下蒸散的时空变化;齐述华等^[10]利用 Landsat 卫星系列遥感影像分析 2000 年以来鄱阳湖水文干旱的发生机制。然而相关研究多集中于历史时期,对流域未来 ET_0 和干旱特征分析仍较少涉及。目前未来气候研究主要是利用 CMIP5 气候耦合模式,通过降尺度的方法可以较好地解决空间分辨率粗糙带来的误差问题,这种方法在国内外已取得显著成果^[11-13]。由于气候系统的内部差异性,不同的气候模式的模拟能力在时间上和空间分布上具有不均匀性,多模式集合作为一种后处理统计方法,可以有效降低预测的不确定性^[14]。以往利用模式数据对未来气候特征的预估多集中于气温和降水两个方面^[15-17], ET_0 作为连接气象要素和水循环的关键物理量,是评价区域水资源配置、计算作物生产潜力的重要指标,但是现有关于鄱阳湖流域未来潜在蒸散或者干旱特征的研究相对少见,且所用数据多是基于单一气候模式或者等权模式集合^[18-19]。因此,本研究基于降尺度模型利用遗传算法构建模式集合,从不同情景下预估流域未来潜在蒸散量及干旱特征的时空演变特征及周期性规律,以期深入了解流域水分循环与水量平衡规律,科学的认识流域潜在蒸散量以及未来干旱形势的变化。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

鄱阳湖流域(24°28′—30°05′N, 113°33′—118°29′E)总面积 $16.22 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于中国东南部,地处长江中下游南岸(图 1)。流域年均气温为 17.1℃,年均降水量为 1632 mm,日照百分率达 43%—47%,属于典型的亚热带湿润季风气候区。流域地表覆被类型以森林、农田、草地和水体为主。流域地势起伏大,鄱阳湖流域是由修水、饶河、信江、抚河、赣江五大水系构成一个完整的系统^[20-21]。近年来,受五大支流和长江水系影响,鄱阳湖流域旱涝灾害频发,原有的水量平衡被打破。因此,鄱阳湖流域 ET_0 及干旱特征的研究具有重要战略意义。

1.2 数据来源

1.2.1 地面观测资料

本文共选取鄱阳湖流域 14 个国家级气象站点逐日监测数据,气象指标分别为最高气温、最低气温、平均

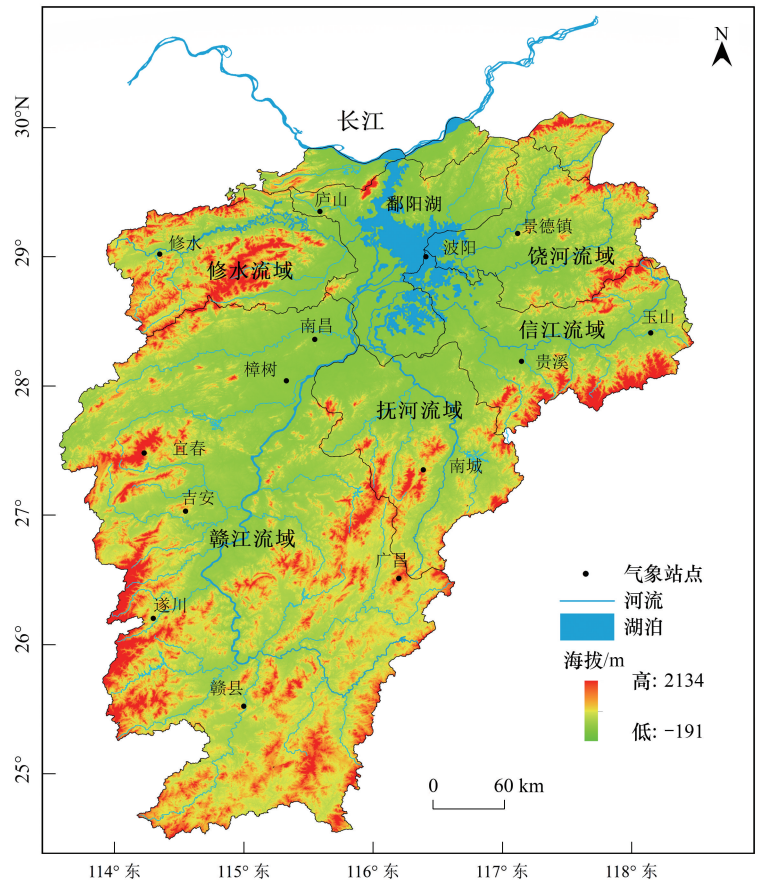


图1 鄱阳湖流域及气象站点分布

Fig.1 Poyang Lake Basin and Meteorological Station Distribution

气温、平均风速、日照时数、平均相对湿度以及小型蒸发皿蒸发量等,数据来源于中国气象数据共享服务中心 (<http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0029.0001.html>)。

1.2.2 再分析资料

NCEP 再分析资料数据是将多种实测数据利用同化技术处理得到的,在东亚地区具有较好的应用性^[21-22]。NCEP/NCAR 再分析数据是由美国国家环境预测中心(NCEP)和大气研究中心(NCAR)联合发布的全球 26 个预报因子 1961—2014 年的日序列再分析资料,网格分辨率是 2.5°×2.5°,共 144×73 个网格 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/reanalysis/>)。

1.2.3 全球气候模式数据

全球气候模式包括 15 个中等复杂程度的地球系统模式共 46 个地球系统模式,是气候变化研究的重要数据来源。CMIP5 共包含 4 种“典型浓度路径”(Representative Concentration Pathways, RCPs),本文在此选取应用最为广泛的 RCP4.5 和 RCP8.5 浓度路径作为研究情景,RCP4.5 作为中间稳定排放情景,在 RCP4.5 气候情景下,气温相较工业革命升高约 4.8℃,预计在 2100 年以后辐射强迫水平达 4.5 W/m²,更为接近全球实际发展水平,具有很大的参考价值。RCP8.5 作为按照当前水平不采取减排措施的高浓度排放路径,RCP8.5 气候情景下,气温相较工业革命升高约 6.9℃,预计在 2100 年以后辐射强迫水平达 8.5 W/m²,则具有更强的警示意义。综合考虑全球气候模式在我国各地区的适用性、模式输出数据的连续性、完整性以及模型的分辨率高低,本研究从全球 CMIP5 中选取 11 个作为研究工具,表 1 给出了 11 个气候模式的基本信息。

表 1 所选全球气候模式的基本信息

Table 1 Basic information on selected global climate models

序号 Sequence number	模式名称 Model name	单位 Institutions	国家 Nation	模式分辨率 Mode resolution
1	BCC-CSM1	BCC	中国	128×64
2	BNU-ESM	GCESS	加拿大	128×64
3	CanESM2	CCCMA	加拿大	128×64
4	CNRM_CM5	CNRM-CERFACS	法国	256×128
5	FGOALS-s2	LASG-CCESS	中国	128×60
6	IPSL-CM5A-MR	IPSL	法国	144×143
7	MIROC5	MIROC	日本	256×128
8	MIROC-ESM	MIROC	日本	128×64
9	MIROC-ESM-CHEM	MIROC	日本	128×64
10	MPI-ESM-MR	MPI-M	德国	192×96
11	NorESM1-M	NCC	挪威	144×95

2 研究方法

2.1 Penman-Monteith 公式

本研究采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith (P-M) 公式计算流域 ET_0 , 该公式以能量动态平衡、水汽扩散原理以及空气的热导定律为理论依据, 精度较高且计算误差小^[23]。其公式为:

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

式中, ET_0 表示潜在蒸散量 (mm/d); R_n 为太阳净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); u_2 为 2m 高度处平均风速; γ 为干湿表常数 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); $e_s - e_a$ 表示为饱和气压差。

2.2 基于遗传算法的模式集合

多模式集合可以有效地集成单一气候模式的优势, 减小模式的随机误差, 从而提高模式预报的准确率。模式集合通过计算每个网格训练期的数据, 得到每个网格点上不同气候模式的权重系数^[5]。基础模型如下所示:

$$F_t = \bar{O} + \sum_{i=1}^n a_i (F_{i,t} - \bar{F}_i) \quad (2)$$

式中, $\bar{F}_i$ 为第 i 个气候模式在训练期的平均预报值; $F_{i,t}$ 为第 i 个气候模式的预报值; $\bar{O}$ 为模型在训练期的平均观测值 n 是气候模式的个数; F_t 为模式集合后的预报值; t 是时间; a_i 表示回归系数, 也是各气候模式的权重, 由训练期数据计算得到, 本研究采用遗传算法来确定各气候模式的权重^[5]。

2.3 模式集合的构建

在利用遗传算法构建模式集合之前, 需要对所选气候模式进行降尺度分析, 降尺度模型可以关联全球气候模式和区域气候变量, 将大尺度, 低空间分辨率的全球气候模式数据转换为小尺度高空间分辨率的区域地面信息, 在未来气候的数值模拟和情景预估中已取得较为理想的效果^[24-26], 主要包括两个方面: (1) 基于区域预报量与全球大气环流 NCEP 预报因子之间的统计关系, 构建并验证 SDSM 模型; (2) 将全球气候模式数据输入至构建好的 SDSM 模型, 生成对区域未来气候的预估。具体过程参考笔者前期研究^[21], 基于构建好的统计降尺度模型, 分别输出不同气候模式在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下鄱阳湖流域潜在蒸散量及降雨量结果。利用统计降尺度模型所输出的降尺度后的 11 个模式数据, 结合鄱阳湖流域的格网数据, 基于遗传算法构建模式

集合,具体流程如图 2 所示:

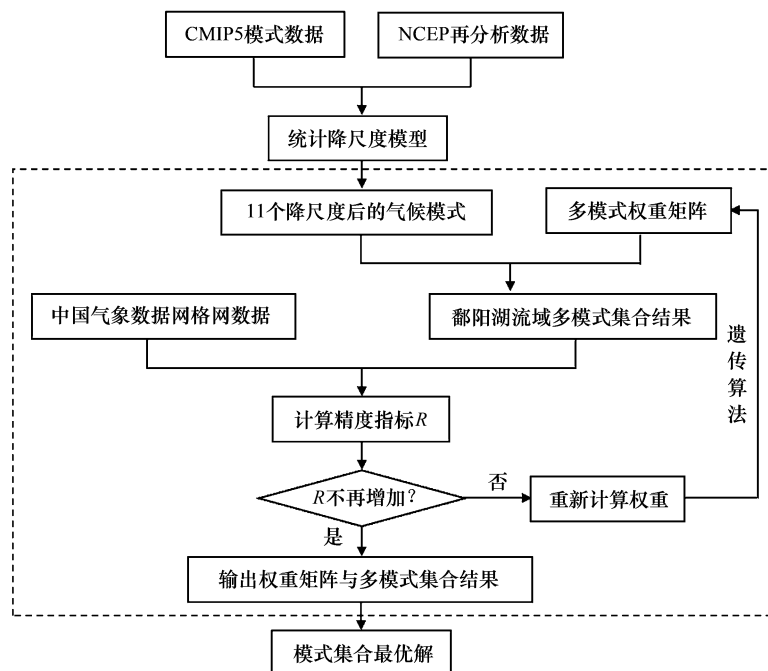


图2 模式集合流程图

Fig.2 Mode ensemble flowchart

CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, 第五次国际耦合模式比较计划); NCEP (National Centers for Environmental Prediction, 美国国家环境预测中心)

3 结果与分析

3.1 基于遗传算法的模式集合精度评估

本文基于遗传算法确定各模式的最优权重,得到鄱阳湖流域模式集合结果,借助泰森多边形法,将计算出的流域历史时期(1961—2010年)多年平均潜在蒸散量和降水作为观测值,并以 Taylor 图来验证的模式集合的模拟精度^[27]。如图 3 可以看出,绿色实点更接近观测点,表明基于遗传算法的模式集合(GA-MME)结果要更接近于观测值,具有更高的相关系数,其模拟结果优于等权模式集合(MME)和任意单一模式模拟结果^[5]。如图 4 所示为流域 ET_0 及降雨量的逐月模拟值精度评价,结果显示,基于遗传算法的模式集合对 ET_0 和降雨量的模拟精度均最高, RMSD 分别为 2.32 和 0.97,在秋冬季季节模拟性能最佳。总的来说,将 CMIP5 模式模拟的性能由小到大排序为单一模式<MME<GA-MME。

3.2 鄱阳湖流域未来情景下潜在蒸散量(ET_0)时空演变特征

3.2.1 流域 ET_0 的时间变化趋势及周期性特征

本研究以 1961—2010 年作为基准期(历史时期),将未来按 30a 时段划分为未来初期(2011—2040)、未来中期(2041—2070)以及未来远期(2071—2100),鄱阳湖流域不同情景下的未来 ET_0 的年际变化如图 5 所示。流域 ET_0 在基准期呈显著的下降趋势,在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,流域的 ET_0 由下降趋势转为上升,且 RCP8.5 情景 ET_0 值上升幅度更大。

流域在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景 ET_0 季节变化特征如图 6 所示。其中,每列代表一年的数据,每个方格代表一个月的累积 ET_0 量,红色和蓝色箭头表示月 ET_0 分别在 2011—2100 年内呈现出增加或减少的趋势,星号表示具有显著趋势($P < 0.1$),由下到上分别为春季(3、4、5月),夏季(6、7、8月),秋季(9、10、11月),冬季(12月、次年1、2月)。可以看出流域的 ET_0 值具有明显的季节特征,除 RCP4.5 情景下的冬季外,未来情景下不同

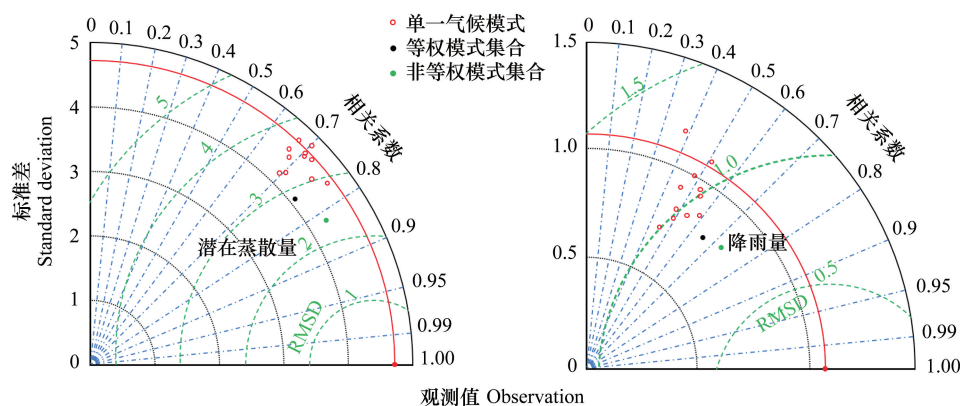


图3 模式集合结果验证

Fig.3 Mode ensemble result verification

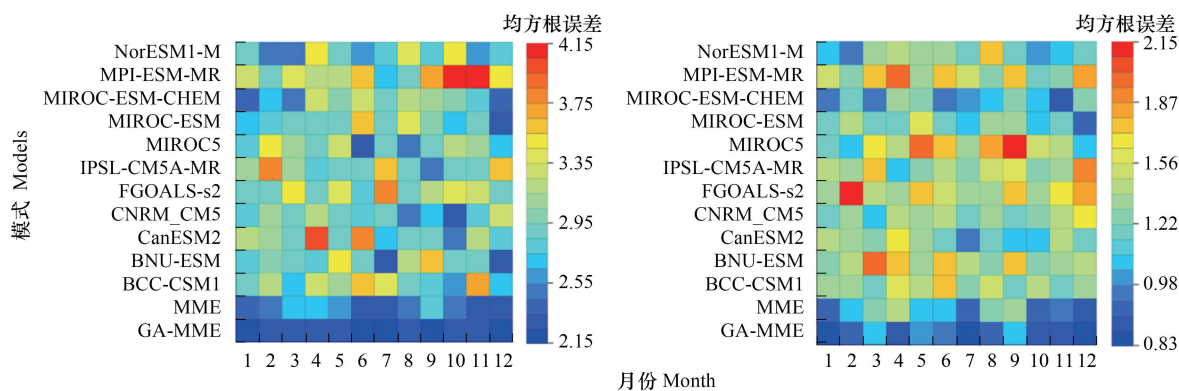


图4 模式集合精度月值验证

Fig.4 Monthly verification of mode ensemble accuracy

季节流域 ET_0 均呈显著的上升趋势 ($P < 0.1$), ET_0 高值区由 RCP4.5 情景下的夏秋季转为 RCP8.5 春夏季。

为了更好的了解流域 ET_0 的时间变化特征, 本文利用 Morlet 小波分析法分析了鄱阳湖流域 ET_0 的周期性变化^[28]。如图 7 所示, 为鄱阳湖流域 2010—2100 年不同情景下平均 ET_0 小波分析图, 流域 ET_0 在演化过程中存在的多时间尺度特征。RCP4.5 情景下 ET_0 表现出三种尺度的变化规律, 分别为 3—7 a、8—17 a、18—32 a, 其中 18—32 a 的模值最大, 周期变化最明显; ET_0 存在 5 个峰值, 最大峰值对应着 20 a 的时间尺度, 意味着 20 a 是流域 ET_0 年际变化的第一主周期。RCP8.5 情景下存在两类尺度的周期变化, 分别为 4—7 a 和 7—25 a, 以 7—25 a 的模值最大; ET_0 存在 3 个较为明显的峰值, 震荡最明显处对应着 14 a 的时间尺度, 为流域 ET_0 年际变化的第一主周期。

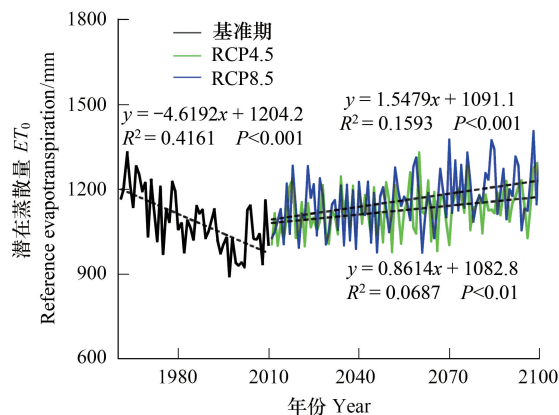


图5 鄱阳湖流域 1961—2100 年潜在蒸散量年际变化特征

Fig.5 Interannual variation of potential evapotranspiration in Poyang Lake Basin from 1961 to 2100

RCP: 典型浓度路径 Representative concentration pathways

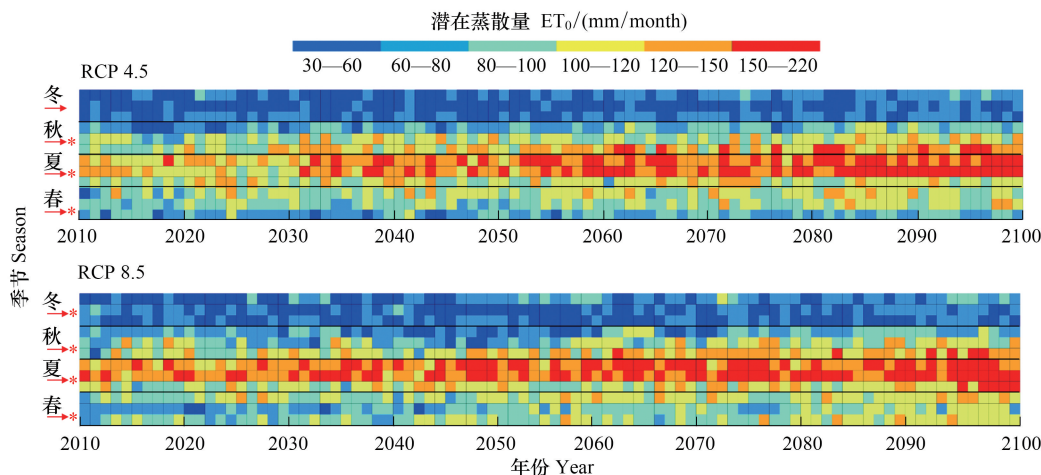


图 6 鄱阳湖流域 2010—2100 年不同情景下 ET_0 季节变化特征

Fig. 6 Seasonal variation of ET_0 in different scenarios in Poyang Lake Basin from 2010 to 2100

ET_0 : 潜在蒸散量 Reference evapotranspiration

3.2.2 流域 ET_0 的空间演变特征

鄱阳湖流域在 RCP4.5 情景下 ET_0 的空间分布如图 8 所示, 鄱阳湖流域 ET_0 在未来的 3 个不同时期变化特征非常相似, 从未来初期到未来远期, 南部以赣县、遂川为中心的高值区逐渐与东北部以波阳、南昌、贵溪和南城为中心的次高值区逐渐连成一个整体, 高值区范围明显扩大, 而以修水、宜春和樟树中心的低值区范围则相对逐渐缩小。随着时间的推移, 鄱阳湖流域 ET_0 在 RCP4.5 情景下呈不断增加的态势, 表现出东高西低的空间分布特征。图 8 为鄱阳湖流域在 RCP8.5 情景下 ET_0 的空间分布, 可以看出鄱阳湖流域南部的高值区逐渐向北扩张, 使得以赣县、遂川为中心南部高值区和以波阳、南昌为中心的北部高值区在鄱阳湖流域东部地区连成一个整体。总的来说, 鄱阳湖流域在 RCP8.5 情景下未来 ET_0 的空间分布与 RCP4.5 情景下较为相似, 整体上呈东高西低, 局地略有突出分布的特征, 且流域 ET_0 在 RCP8.5 情景下增幅要明显高于 RCP4.5 情景。

3.3 鄱阳湖流域干旱指数的时空演变特征

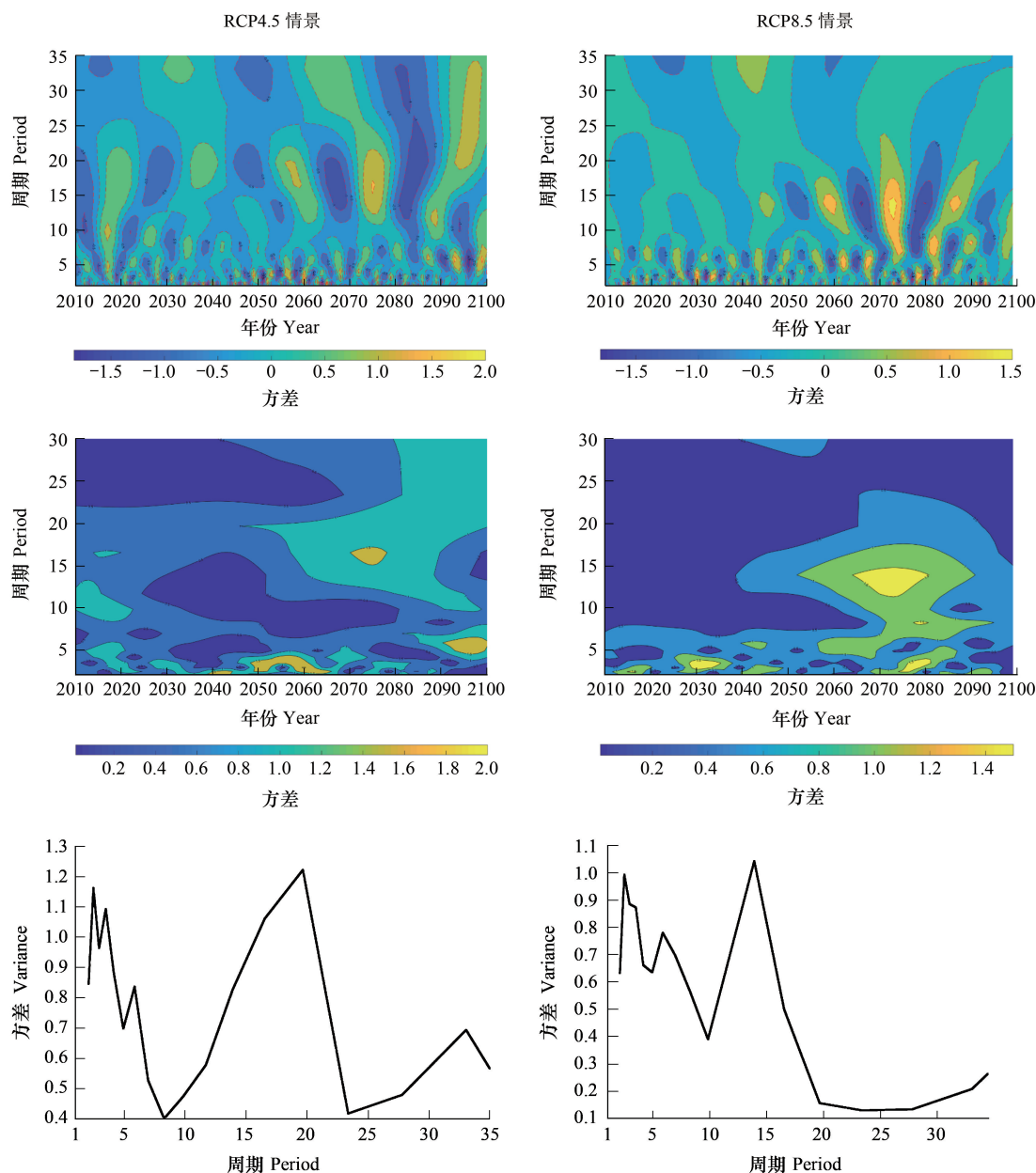
结合历史时期及模式集合所输出的未来 ET_0 及降水数据, 基于 Budyko 的水热平衡耦合理论, 估算出鄱阳湖流域不同时期干旱指数 (Drought Index, DI) 的变化特征^[21, 29-30], 计算公式为:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right) = f(\phi) \quad (3)$$

式中, E 为实际蒸散量, E_0 为潜在蒸散量, P 为降水量, $f(\phi)$ 为辐射干燥度 (干旱指数), $\phi = E_0/P$, DI 对流域干湿状况的划分界限^[31]为: (干旱: $5 \leq DI < 12$; 半干旱: $2 \leq DI < 5$; 半湿润 $0.75 \leq DI < 2$; 湿润: $0.35 \leq DI < 0.75$)。

3.3.1 历史时期流域 DI 的时空演变特征

1961—2010 年 (历史时期) 鄱阳湖流域干旱的空间分布格局如图 9 所示, 干旱指数在空间上总体表现为南高北低, 局地略有突出, 除赣县和南城外, 鄱阳湖流域大部分属典型的湿润气候区 ($DI < 0.75$)。鄱阳湖流域历史时期干旱指数表现出明显的季节特征 (图 9), 秋季最高 ($DI = 1.24$) 其次是夏季 ($DI = 0.74$)。除春季外, DI 值在其余三个季节均呈上升趋势, 以秋季最为显著 ($P < 0.1$)。鄱阳湖流域历史时期多年平均 DI 值为 0.72, 整体上呈波动上升趋势 (图 9), 表现出一定的“干化”特征, 这与数据显示的鄱阳湖流域近年来气温的增高和降水量的减少关系密切。综上, 历史时期鄱阳湖流域干旱指数时间序列上整体表现为波动上升趋势, 以秋季最为显著, 空间上呈南高北低的分布格局。

图7 鄱阳湖流域 ET_0 不同情景下的小波分析Fig.7 Wavelet analysis of ET_0 in Poyang Lake watershed in different scenarios

3.3.2 RCP8.5 情景下流域 DI 时间变化趋势及周期性特征

未来时期鄱阳湖流域干旱指数变化如图 10 所示,流域 DI 将呈显著的波动上升趋势($P < 0.01$),多年平均 DI 值为 0.82。2011—2064 年,流域多年平均 DI 值 < 0.75 ,以湿润气候为主要特征,2064 年以后, DI 值逐渐上升高于 0.75,表明在 21 世纪中后期,鄱阳湖流域气候特征将从湿润过渡到半湿润类型,流域所面临的干旱风险进一步提升。

RCP8.5 情景下流域干旱指数同样表现出明显的季节变化(图 11),与历史时期不同的是流域干旱指数在春、夏季均呈显著上升趋势。特别需要注意的是在流域的春季,干旱指数由历史时期的下降趋势在 RCP8.5 情景转为显著的上升趋势,这可能 RCP8.5 情景下蒸散量的增加、降水的减少以及气温的升高和具有一定联系。四季多年平均 DI 值排列依次为秋季(1.43) > 夏季(1.02) > 春季(0.69) > 冬季(0.60),较历史时期分别增

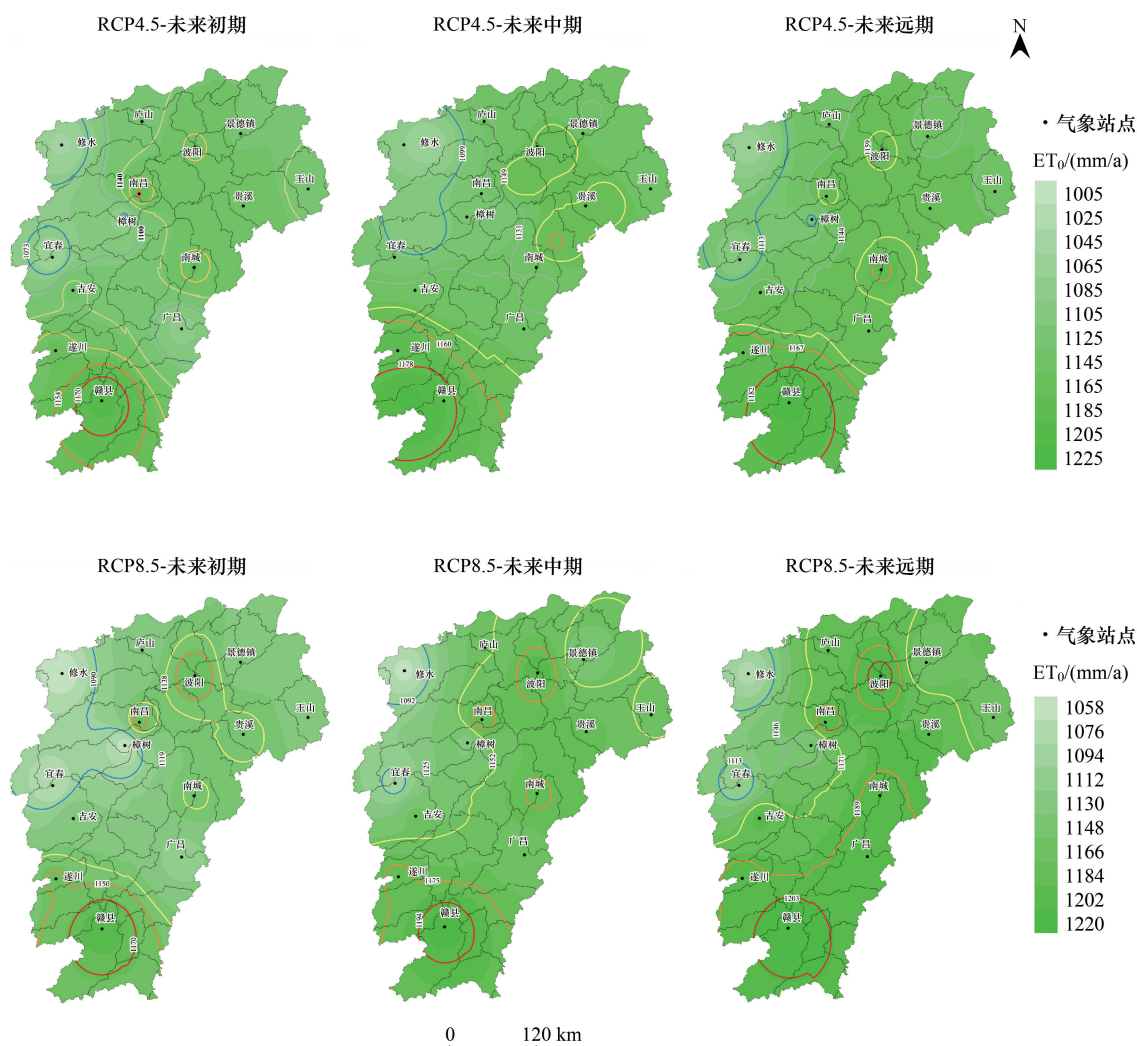


图 8 鄱阳湖流域 RCP4.5、RCP8.5 情景下未来 ET_0 的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of ET_0 in the future in the Poyang Lake Basin under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

长了 15.37%, 37.8%, 68.5% 和 25%, 增幅最大的季节是春季, 可见, 鄱阳湖流域未来时期春旱风险将显著提高^[5]。在 RCP8.5 情景下, 鄱阳湖流域的湿润月份 ($0.35 < DI < 0.75$) 呈下降趋势, 半湿润月份 ($0.75 < DI < 2$) 和半干旱月份 ($DI > 2$) 数量显著增加 (图 11)。综上, RCP8.5 情景下, 鄱阳湖流域伏旱和春旱的发生频率将显著提高, 流域未来“干化”特征更为明显。

鄱阳湖流域年均 DI 在 2011—2100 年表现出显著的周期性变化特征 (图 12), RCP8.5 情景下年代际尺度上存在两个高值中心, 分别在 2023—2025 年和 2046—2048 年, 流域干旱指数在 4—12 a 尺度上波动最为显著, 且模值最大, 出现了早-湿交替的准 12 次震荡。流域 DI 的小波方差图中存在三个明显的峰值, 分别为 8 a、4 a、17 a 的时间尺度, 其中又以 8 a 的周期震荡最为显著, 为 RCP8.5 情景下流域年 DI 变化的第一主周期, 4 a 为第二主周期, 14 a 为 DI 变化的第三主周期。即 8 a、4 a、17 a 三个周期波动控制着 RCP8.5 情景下流域 DI 在整个时间域内 (2011—2100 年) 的变化特征^[5]。

3.3.3 RCP8.5 情景下流域 DI 的空间演变特征

RCP8.5 情景下鄱阳湖流域未来不同时期干旱指数的空间演变具有显著的差异性 (图 13), 在未来初期 (2011—2040 年), 流域 DI 的空间分布特征与历史时期较为一致, 呈南高北低的分布特征。 DI 值为 0.75 的等

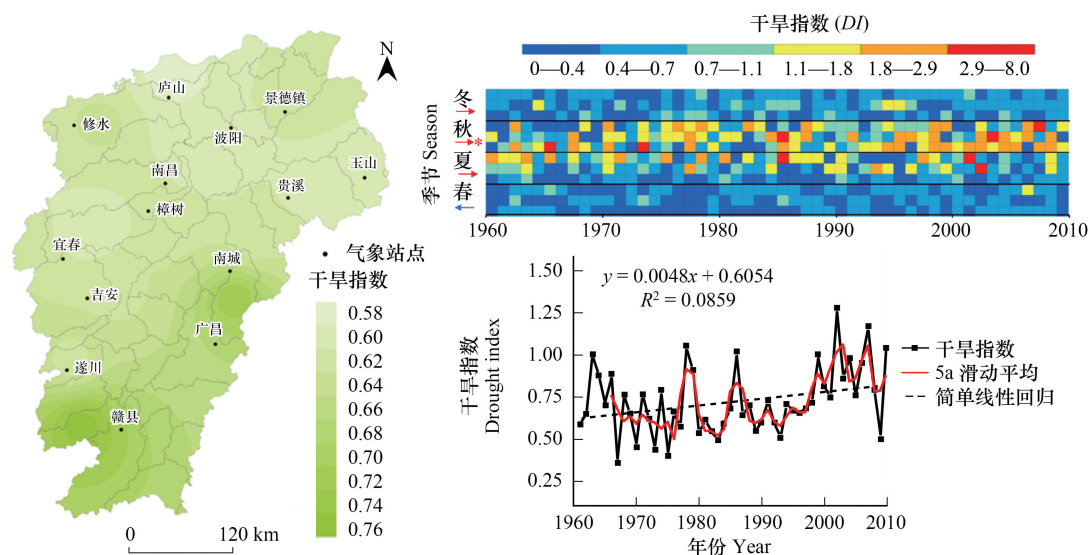


图9 鄱阳湖流域历史时期干旱指数时空分布特征

Fig.9 Spatial-temporal distribution of drought index in the historical period of Poyang Lake Basin

值线大致位于赣江流域以南的地区,即该区域正在由湿润区向半湿润区转变;在未来中期(2041—2070年),干旱高风险区主要位于流域的东南方向,鄱阳湖流域 DI 的高值中心由初期的两个减少为一个以南城为中心的东南高值区,次高值区 ($DI > 0.75$) 向流域的中部、北部扩大,半湿润区面积进一步增加;在未来远期(2071—2100年),鄱阳湖流域 DI 以南城为中心的东南高值区向流域西北方向扩大, DI 的高值区增加至两个,在流域中部的樟树地区形成第二个 DI 高值区。南昌、樟树、吉安以东为代表的次高值区范围进一步扩大,此高值区的 DI 值较中期明显增大。 DI 为 0.75 的等值线北移至流域的宜春、玉山一线,赣江流域的大部、抚河流域的全部以及信江流域的大部份地区,均由湿润地区转为半湿润区。

总的来说,RCP8.5 情景下鄱阳湖流域 2011—2100

年不同时期干旱指数的演变具有明显的空间差异性,干旱指数的高值区由未来初期的南部转为中期的东部,范围向流域中部地区不断扩张,最终在未来远期形成以南城和樟树为中心的中东部高值区域,流域的中东部地区为未来干旱风险防范的重点区域。21 世纪以后,鄱阳湖流域 RCP8.5 情景下干旱指数随时间的推移增大,半湿润地区逐渐增多且向北拓展,鄱阳湖地区的干湿状况发生明显变化。

4 结论

本文基于 CMIP5 多个气候模式,经统计降尺度处理后,利用遗传算法构建了鄱阳湖流域气象要素的多模式集合,得到鄱阳湖流域 ET_0 及干旱指数在不时期的时空演变特征。主要结论如下:

(1) 本研究中基于遗传算法构建的模式集合模拟精度相较于任意单个气候模式和等权模式集合,模拟性能更佳。

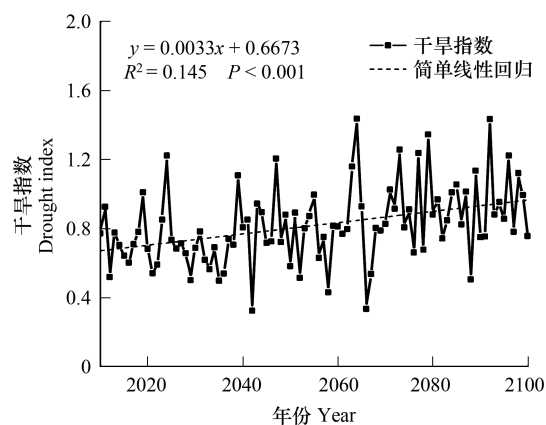


图10 鄱阳湖流域未来时期干旱指数年际变化特征

Fig.10 Interannual variation of drought index in the future period of Poyang Lake Basin

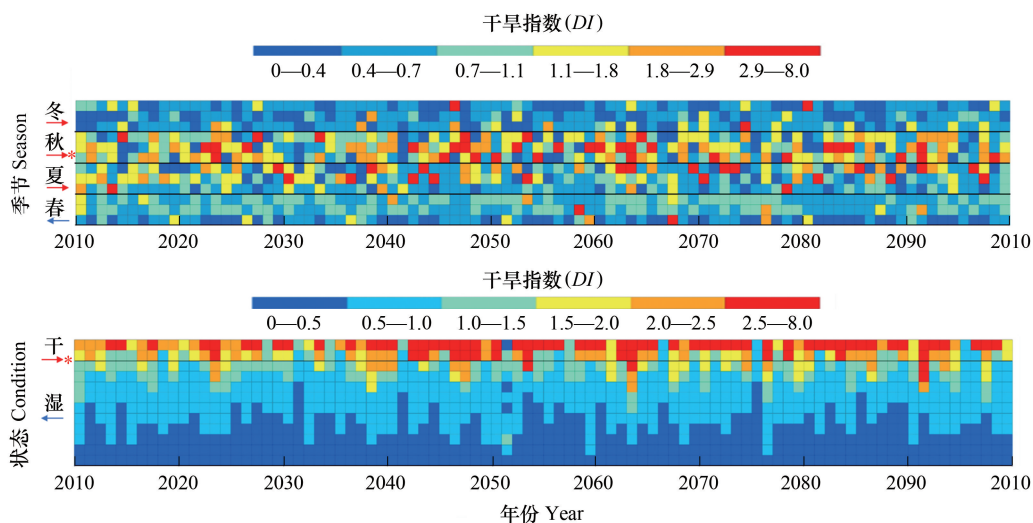


图 11 鄱阳湖流域 2011—2100 年 RCP8.5 情景下 DI 季节变化特征

Fig.11 Seasonal changes of DI in the Poyang Lake Basin under the RCP8.5 scenario from 2011 to 2100

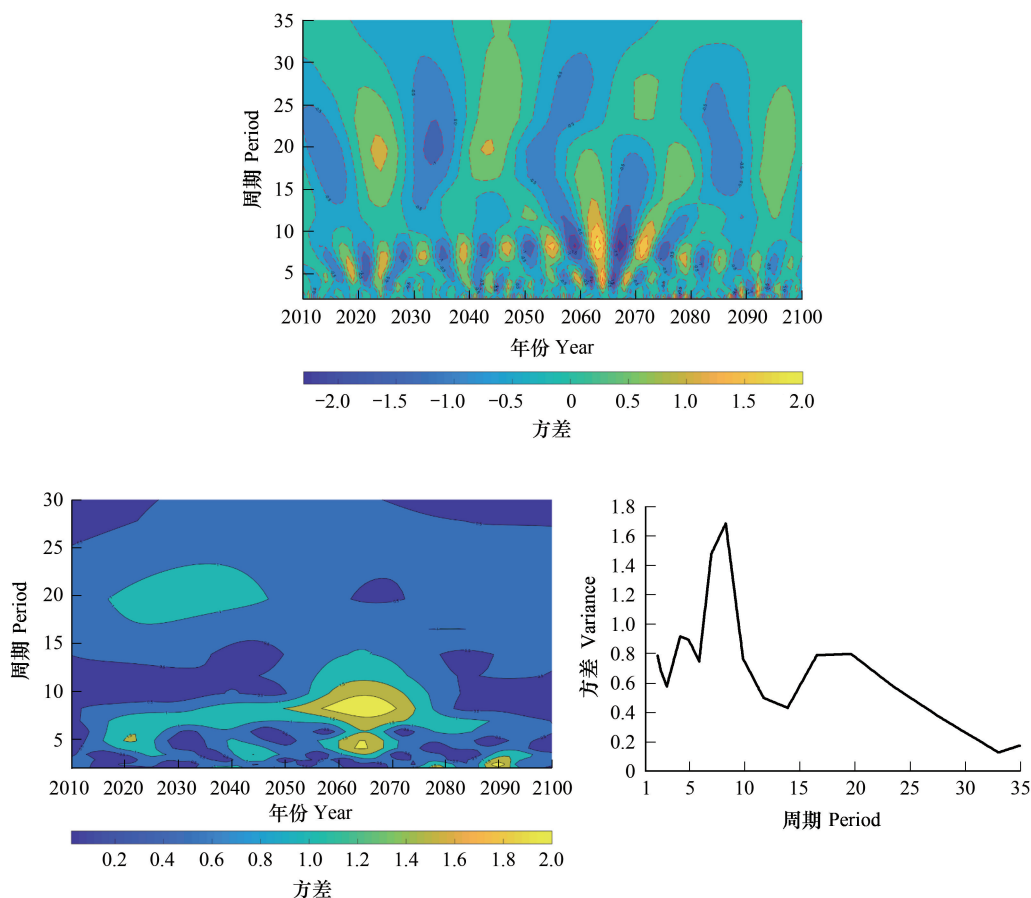


图 12 RCP8.5 情景下鄱阳湖流域 DI 的小波分析

Fig.12 Wavelet analysis of DI in Poyang Lake watershed under RCP8.5 scenario

(2) RCP4.5 和 RCP8.5 情景下鄱阳湖流域的 ET_0 呈波动上升趋势, 在空间分布上总体表现出东高西低, 局地略有突出的特征。在 RCP4.5 情景下 20 a 为流域年 ET_0 变化的第一主周期。在 RCP8.5 情景下, 4 年为流域

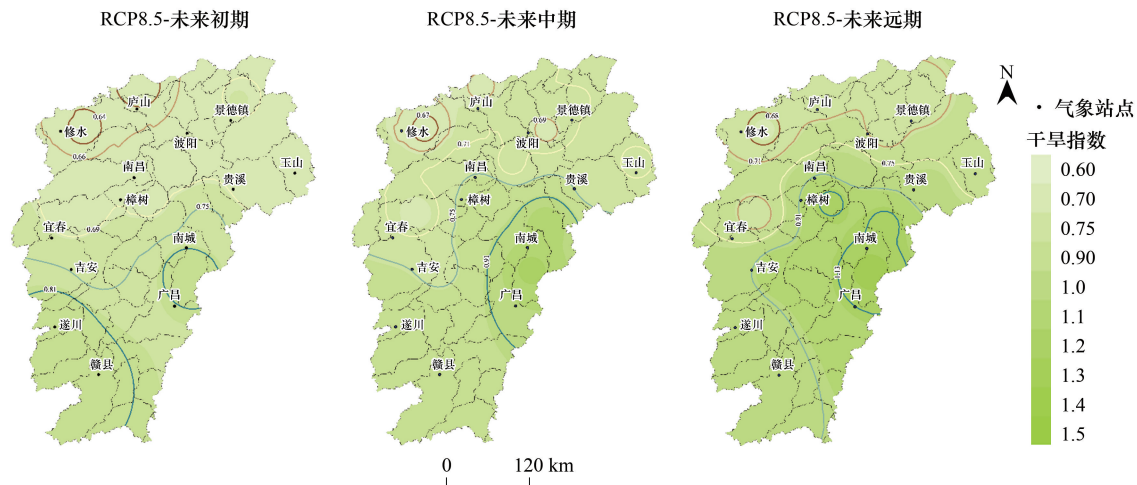


图 13 鄱阳湖流域 2011—2100 年 RCP8.5 情景下 DI 空间变分布特征

Fig.13 The spatial distribution of DI in the Poyang Lake Basin under the RCP8.5 scenario from 2011 to 2100

年 ET_0 变化的第一主周期。

(3) 鄱阳湖流域 DI 年际变化在历史时期 (1961—2010 年) 呈波动上升趋势, 表现出一定的“干化”特征; DI 夏秋季高, 春季低, 以春季增幅最大; 流域 DI 在空间呈南高北低。

(4) RCP8.5 情景下, 鄱阳湖流域干旱指数在年际变化上呈显著的上升趋势 ($P < 0.01$), 四季多年平均 DI 值秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季, 伏旱和春旱的发生频率将显著提高, 流域未来“干化”特征更为明显, 8 年时间尺度是鄱阳湖流域年 DI 变化的第一主周期; RCP8.5 情景下干旱指数的高值区由未来初期的南部转为中期的东部, 范围向流域中部地区不断扩张, 最终在未来远期形成以南城和樟树为中心的中东部高值区域, 流域的中东部地区为未来干旱风险防范的重点区域。

5 讨论

基于遗传算法构建的模式集合较于单个气候模式或等权模式集合模拟精度更高, 但其对鄱阳湖流域气候的模拟仍存在一定的不确定性, 尤其在降水上, 具有较大的误差。此外, 本文所使用的统计降尺度模型存在缺乏完整的物理机制、统计关系用于未来气候变化以及需要大量基础数据等局限, 使得研究结果存在一定的误差。在今后的研究工作中, 利用 CMIP6 模式数据, 结合多源数据, 利用算法将统计降尺度与动力降尺度方法相结合, 在全球气候模式 (GCM) 中嵌入区域气候模型 (RCM), 以提高模型模拟精度, 并从海气耦合机理上分析区域气象、水文要素变化的原因。

参考文献 (References):

- [1] 於琰, 曹明奎, 李克让. 全球气候变化背景下生态系统的脆弱性评价. 地理科学进展, 2005, 24(1): 61-69.
- [2] 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞, 吴良, 鲁春霞, 郭金花, 曲婷婷, 刘刚, 沈镭, 成升魁. 全球气候变化下的中国粮食安全问题研究. 自然资源学报, 2018, 33(6): 927-939.
- [3] Druckman J N, McGrath M C. The evidence for motivated reasoning in climate change preference formation. Nature Climate Change, 2019, 9(2): 111-119.
- [4] 曹永强, 李维佳. 辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因. 生态学报, 2018, 38(20): 7276-7287.
- [5] 刘子豪. 鄱阳湖流域未来情景下潜在蒸散量及干旱响应研究[D]. 华中师范大学, 2020.
- [6] 赵晓松, 刘元波, 吴桂平. 基于遥感的鄱阳湖湖区蒸散特征及环境要素影响. 湖泊科学, 2013, 25(3): 428-436.
- [7] 刘冲, 齐述华, 汤林玲, 何蕾. 植被恢复与气候变化影响下的鄱阳湖流域蒸散时空特征. 地理研究, 2016, 35(12): 2373-2383.
- [8] 涂安国, 李英, 聂小飞, 莫名浩. 鄱阳湖流域参考作物蒸散量变化特征及其归因分析. 生态环境学报, 2017, 26(2): 211-218.

- [9] 唐国华, 胡振鹏. 气候变化背景下鄱阳湖流域历史水旱灾害变化特征. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1274-1283.
- [10] 齐述华, 张秀秀, 江丰, 王鹏. 鄱阳湖水文干旱化发生的机制研究. 自然资源学报, 2019, 34(1): 168-178.
- [11] 陈杰, 许崇育, 郭生练, 陈华. 统计降尺度方法的研究进展与挑战. 水资源研究, 2016, 5(4): 299-313.
- [12] Yang T, Li H H, Wang W G, Xu C X, Yu Z B. Statistical downscaling of extreme daily precipitation, evaporation, and temperature and construction of future scenarios. Hydrological Processes, 2012, 26(23): 3510-3523.
- [13] 陈威霖, 江志红, 黄强. 基于统计降尺度模型的江淮流域极端气候的模拟与预估. 大气科学学报, 2012, 35(5): 578-590.
- [14] Kang H, An K, Park C, et al. Multi-model output statistical downscaling prediction of precipitation in the Philippines and Thailand[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(15): 87-101.
- [15] Chen J, Brissette F P, Leconte R. Coupling statistical and dynamical methods for spatial downscaling of precipitation. Climatic Change, 2012, 114(3/4): 509-526.
- [16] 李晓菲, 徐长春, 李路, 罗映雪, 杨秋萍, 杨媛媛. CMIP5 模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估——以开都-孔雀河为例. 资源科学, 2019, 41(6): 1141-1153.
- [17] Timbal B, Fernandez E, Li Z. Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(3): 341-358.
- [18] Zhang L, Chen X L, Lu J Z, Fu X K, Zhang Y F, Liang D, Xu Q Q. Precipitation projections using a spatiotemporally distributed method: a case study in the Poyang Lake watershed based on the MRI-CGCM3. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(3): 1649-1666.
- [19] Wang W G, Xing W Q, Shao Q X, Yu Z B, Peng S Z, Yang T, Yong B, Taylor J, Singh V P. Changes in reference evapotranspiration across the Tibetan Plateau: observations and future projections based on statistical downscaling. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(10): 4049-4068.
- [20] Lu J Z, Chen X L, Zhang L, Sauvage S, Sánchez-Pérez J M. Water balance assessment of an ungauged area in Poyang Lake watershed using a spatially distributed runoff coefficient model. Journal of Hydroinformatics, 2018, 20(5): 1009-1024.
- [21] 刘子豪, 陆建忠, 黄建武, 陈晓玲, 张玲, 盛颖东. 基于 CMIP5 模式鄱阳湖流域未来参考作物蒸散量预估. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1685-1697.
- [22] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析. 应用气象学报, 2001, 12(3): 337-347.
- [23] Lecina S, Mart, Nez-Cob A, P.J. Pérez, et al. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(3): 181-198.
- [24] 左正康, 张飞舟, 张玲, 孙逸渊, 张瑞华, 于田, 陆建忠. 基于时空分布式的 CMIP5 气候多模式集合优化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(05): 805-814.
- [25] 范丽军. 统计降尺度方法集合预估华东气温的初步研究[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 392-402.
- [26] 张学珍, 李侠祥, 张丽娟等. RCP 8.5 气候变化情景下 21 世纪印度粮食单产变化的多模式集合模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2314-2328.
- [27] Govindasamy B, Taylor K E, Duffy P B, Santer B D, Grossman A S, Grant K E. Limitations of the equivalent CO₂ approximation in climate change simulations. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D19): 22593-22603.
- [28] 刘晓梅, 闵锦忠, 刘天龙. 新疆叶尔羌河流域温度与降水序列的小波分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(03): 566-570.
- [29] Zhang L, Potter N, Hickel K, Zhang Y Q, Shao Q X. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework-Model development and testing. Journal of Hydrology, 2008, 360(1/4): 117-131.
- [30] 徐志鹏, 刘文飞, 沈芳芳, 段洪浪, 吴建平, 陈官鹏, 徐晋. 基于扩展的 Budyko 模型定量评估平江流域森林恢复和气候变异对季节性径流的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8783-8793.
- [31] Arora V K. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. Journal of Hydrology, 2002, 265(1/4): 164-177.