

# 基于REOF-EEMD的西南地区气候变化区域分异特征

刘晓琼<sup>1,2</sup>, 孙曦亮<sup>2</sup>, 刘彦随<sup>3</sup>, 张健<sup>2,4</sup>, 赵新正<sup>1,2</sup>, 芮旻<sup>1,2</sup>

(1. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 4. 西北大学丝绸之路研究院, 西安 710069)

**摘要:** 西南地区是全球变化区域响应的特殊地区, 探究其气候变化区域分异特征具有重要的科学意义。文中选用REOF方法开展研究区气温和降水变化特征的空间分区, 借助EEMD与BG分割算法等方法细致辨析了不同气候分区的气候演变特征。结果显示: ①西南地区年均温和年均降水变化均可划分为3个亚区, 各自的空间界限高度相似, 但降水Ⅱ、Ⅲ区的界限更偏南。②20世纪50年代以来各气温亚区的年均温显著升高, 川渝气温变化与全球变暖同步, 黔西、黔中、滇北散布若干点状冷区。各降水亚区的时空差异明显, 相较Ⅲ区, Ⅰ、Ⅱ区年均降水的波动性及年代际变化的差异更显著。③ENSO事件对研究区气候变化的影响深远, 不同气温、降水亚区对其的响应不尽相同。④不同气温亚区年均温序列突变点的收敛性较强, 大致发生在1997年前后。不同降水亚区年均降水序列突变点的收敛性较弱。⑤各气温亚区年均温增加的持续性较强, Ⅱ、Ⅲ区尤甚。降水Ⅰ、Ⅱ区降水变化趋势不甚明显且具有一定的随机性, Ⅰ区的可能呈减速趋缓的减湿趋势, Ⅱ区的可能出现弱度减湿趋势, Ⅲ区降水趋于弱增。

**关键词:** 气候变化; EEMD; REOF; 气候区划; 时空演变; 西南地区

DOI: 10.11821/dlyj020190387

## 1 引言

近百年来, 气候变暖与极端气候事件频发已成为全球气候变化的主要特征。IPCC第5次评估报告指出, 1983—2012年可能是过去1400年来最暖的30年, 2003—2012年全球平均温度较1850—1900年平均温度高 $0.78^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。第三次气候变化国家评估报告显示近百年来中国陆域平均增温 $1.2^{\circ}\text{C}$ , 明显高于世界平均水平; 年均降水量虽未见显著的趋势性变化, 但存在明显的区域差异; 未来极端气候事件增加, 暴雨、强风暴潮、旱涝灾害的强度和发生频次皆呈上升趋势<sup>[2]</sup>。近10余年来, 极端气候事件及气候灾害造成的经济、社会危害日趋严重, 气候变化敏感区气温、降水序列的演变特征及其空间分异已成为学者关注的热点问题。

本文研究的西南地区毗邻西藏自治区, 受青藏高原热源作用、西南季风和东南季风等多重季风环流、副热带高压带及复杂地形的交互影响, 气候变化的规律性独特, 旱涝灾害与山地灾害频发<sup>[3]</sup>, 素来是全国气候变化的特殊区和敏感区。丁一汇<sup>[4]</sup>的研究证实, 近年来, 全球气候变化对地处季风区和湿润区的西南地区影响显著。随着气温升高

收稿日期: 2019-05-15; 修订日期: 2019-12-24

基金项目: 国家社会科学基金项目(16XGL015)

作者简介: 刘晓琼(1977-), 女, 青海湟源人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为城乡发展与气候变化研究。  
E-mail: xiaoqiongliu2001@163.com

通讯作者: 芮旻(1985-), 男, 安徽合肥人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为时空数据分析与空间治理研究。  
E-mail: ruiyang@nwu.edu.cn

和降水日数的减少, 该区干旱特别是强度干旱的风险加大, 其持续期和强度有加剧趋势, 已成为影响中国的主要气候问题。学者们已就该区气候变化问题展开深入研究, 主要集中在西南地区气候变化事实<sup>[5-9]</sup>及模拟<sup>[10,11]</sup>、极端干旱气候<sup>[12,13]</sup>、气候异常及成因剖析<sup>[14,15]</sup>、气候变化对农业产出的影响<sup>[16,17]</sup>等方面。上述成果证实在复杂地形及多重季风气候的影响下, 西南地区气候变化的空间异质性强, 部分区域的气候变化与全球变暖并不同步。因此, 需基于精细化的气候区划, 选取主要气候要素更长时序的数据, 深入研判西南地区气候变化的时空特征。

目前学界多借助 EOF 和 REOF 方法开展气候区划研究。较之前者, 后者因能解构出主导型空间模态且分解出的各空间模态高度相关而得到了更广泛的应用, 取得的成果已较丰硕。但已有文献多聚焦于全国尺度<sup>[18-20]</sup>, 或侧重于关注青藏高原<sup>[21,22]</sup>、西北干旱区<sup>[23,24]</sup>、内蒙古<sup>[25,26]</sup>等其他气候变化敏感区和特殊区, 对西南地区的探讨尚待加强。基于 REOF 方法关注西南地区气候区划的主要研究成果有: 西南地区降水区域分异及其年代际变化特征<sup>[20]</sup>、降水序列气候特征及其区划<sup>[27]</sup>、不同季节降水的时空分异<sup>[28,29]</sup>、旱涝灾害<sup>[30]</sup>及干旱的时空分异特征<sup>[31]</sup>, 以及基于改进后地表湿润指数的干旱气候特征分析<sup>[32]</sup>等。

综观相关成果, 集成 REOF、EEMD 等多方法, 全面、细致研讨西南地区气温、降水区域分异及其气候演变特征的相关研究尚需补充。据此, 文中选取西南地区主要气候要素更长时序的数据, 融合 REOF、EEMD、气候序列突变诊断等方法, 全面探究近 57a 来研究区年均温、年均降水变化的特征分区及其演变规律, 并运用 EEMD 趋势项分析、R/S 分析等方法进行趋势预测, 以期在研讨西南地区各气温、降水量亚区气候演变规律的同时, 为地方生态环境建设、灾害性天气防御, 以及经济社会可持续发展、适应性策略选择等提供科学依据。

## 2 研究区概况

为增强与相关研究的可比性, 文中西南地区的划分继续沿用《中国气象地理区划手册》<sup>[33]</sup>区划标准, 该区划中的西南地区包括川、渝、滇、黔四省市。该区地理坐标介于  $97^{\circ}19'E \sim 110^{\circ}12'E$ 、 $21^{\circ}6'N \sim 34^{\circ}21'N$  之间, 区内地形条件极为复杂, 地势自东南向西北倾斜, 地貌类型包括横断山脉、四川盆地、长江三峡平行岭谷、云贵高原四类。西南地区区位及气象站点如图 1 所示。区内大部分地区海拔低于 1500 m, 西北部横断山平均海拔高于 4000 m, 南部云贵高原地势崎岖, 海拔多在 2000~4000 m 之间, 是中国地形条件最为复杂的气候变化特殊区。受复杂地形及多重季风环流的交互影响, 研究区气候变化的空间差异显著, 干湿季分明。湿季受东南季风和西南季风影响, 东南季风经四川盆地向西北推移过程中受边缘山地阻拦作用, 带来丰富的降水; 西南季风北上时受云贵高原阻隔, 在其南侧绕流并形成大量降

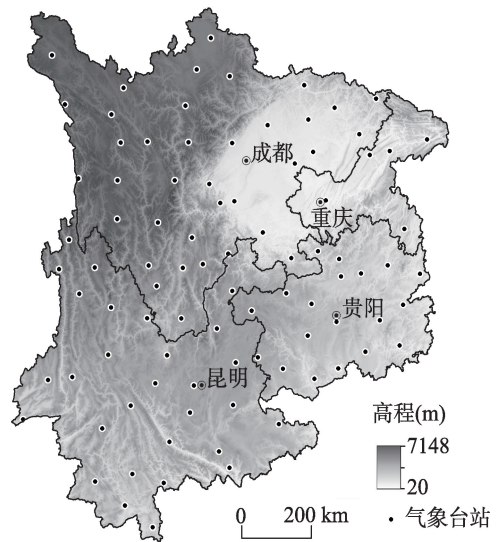


图1 西南地区气象站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Southwest China

水。云贵高原西部及横断山脉南部多为南北走向山脉,水汽推移过程中不断爬坡降水,水汽渐减,从而在横断山脉南部形成一个少雨区,年均降水量在600~800 mm之间。

### 3 数据处理与研究方法

#### 3.1 数据处理

文中气象数据取自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 西南四省市气象基准台站相关数据。秉承气候变化分析中所选台站数据序列时空分布的全面性和时间性原则,综合考虑区内气象台站缺测、起始年月不一致等情况,甄选了90个气象台站(均为中国气象数据网提供的基准站,缺测月份数据占比不足5%),所分析气象数据的时间跨度为1960年3月—2017年2月,缺测数据的插补基于临近台站优先原则,采用二元线性回归方法补充。为减少气候序列中季节性波动,使数据序列更符合平稳随机过程的特性,依据世界气象组织(WMO)相关规定,文中气候数据使用距平值以滤去气温降水序列月份变化的影响,并以1981—2010年最近30a年均温、年均降水量平均值为标准,计算西南地区气候要素的年、季均距平值。

#### 3.2 研究方法

**3.2.1 EOF与REOF** 经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)的分解原理是将有限空间内呈不规则分布的观测站点数据,分解为少数互相独立的典型模态。该方法极为关注气候要素场整体相关结构,分解出的模态集中体现了原变量场信息,是气候学领域进行空间分区的重要技术。

REOF(Rotated Empirical Orthogonal Function)则是在EOF分析的基础上,截取累计解释方差达到特定标准的若干特征向量,进行方差极大旋转(正交旋转)转换,旋转后的典型模态结构清晰,可将原始场上与主成分信息高度相关的值集中在较小区域,极大地提高了所分离空间结构的辨识性<sup>[34]123</sup>。与EOF分析相比,REOF取样误差小,可有效简化变量场空间结构,彰显局部特征,且其分离出的空间结构能有效反映不同地域空间分布的相关性,故REOF在气候诊断研究中得到了更广泛地应用<sup>[18-22]</sup>。文中运用REOF分析时,选用标准差法预处理气象数据,并通过观察特征值对数曲线变化情况确定旋转主成分个数<sup>[34]123</sup>。

**3.2.2 突变分析方法** 文中拟集成累积距平分析、Mann-Kendall(M-K)法、滑动t检验、BG分割算法、改进的有序聚类分析等多方法,比对诊断西南地区年均温、年均降水序列突变点。上述方法皆是检测时间序列突变点的有效方法,其主要优缺点如下:累积距平分析通过观察距平累积值的变动情况来直观判断序列突变点,有时会出现多个突变点;M-K法不要求所分析数据样本服从一定分布,可避免少数异常值的干扰,一般只有一个突变点;滑动t检验需人为设置子序列时段,以避免突变点的漂移,突变点个数常因子序列长度而异<sup>[34]58</sup>;BG分割算法将突变检测视作分割计算问题,认为信号序列是由多个不同均值的子序列组成,并通过找出各子序列最大均值差是否满足不同的统计显著性来判断突变点<sup>[34,35]69</sup>,分析时需设定最小分割尺度,不适宜于分析短时间序列;改进的有序聚类分析法,兼顾同类离差平方和最小原则和类间离差平方和最大原则,分析结果的有效性和可比性明显高于传统有序聚类法。

M-K法、滑动t检验、BG分割算法均属均值突变检测,改进的有序聚类则为方差突变检测,为提高研究区气候序列突变分析结果的准确性,文中拟融合上述方法比对判断西南地区气候序列的突变点。

**3.2.3 EEMD** EMD (Empirical Mode Decomposition) 即经验模态分解, 该法从离散无序的原信号序列中提取有限的多尺度趋势分量, 剥离出的有限本征模函数IMF分量 (Intrinsic Mode Function, IMFs) 体现了原信号序列不同时间尺度的局部特征, 非常适合于分析非线性、非平稳的时间序列。EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) 又称改进的经验模态分析方法, 是在EMD的基础上通过添加人为白噪声和求取集合平均的方法, 有效解决了采用EMD分解信号序列时可能出现的混频现象。近年来, EEMD方法已被频繁应用于检测信号序列的尺度变化特征<sup>[36]</sup>和趋势预测<sup>[37]</sup>。文中分析时对拟分解序列进行了前后5年的数据延拓以消除端点效应<sup>[38]</sup>, 并在经过标准化的气候序列中加入信噪比为0.2的10组扰动白噪声, 然后运用平滑技术滤去易造成混频的奇异值。

**3.2.4 R/S** R/S分析方法即重标极差分析法 (Rescaled Range Analysis, R/S), 是判断气候、水文序列趋势变化的非参数分析方法, 计算出的Hurst值可有效表征非线性系统的趋势变化。0.5<H<1时, 未来趋势与过去一致, 时间序列具有持续性; H值越趋近于1, 持续性越强, 反之亦然。0<H<0.5时, 未来趋势与过去相反, 时间序列具有反持续性; H值越趋近于0, 反持续性越强。H=0.5时, 表明时间序列具有随机性, 其未来趋势与过去无关。

## 4 结果分析

### 4.1 气候变化的空间差异及其分区

**4.1.1 空间差异** 基于ANUSPLIN软件绘制的西南地区近57a年均温、年均降水量空间插值情况如图2所示。该软件借助薄盘样条函数理论, 引入海拔、经纬度等空间协变量进行插值, 其插值精度高<sup>[39]</sup>, 非常适合于山地、高原等地形条件复杂地区的空间插值<sup>[40]</sup>。图2a显示, 研究区年均温总体呈现出自东南向西北随海拔升高而降低的空间变化特征, 且其空间差异较显著。渝、川东为明显偏暖区; 滇黔两省因地形复杂, 区内温差较大, 黔、滇中部为次暖区; 川西, 滇北则为偏冷区。西南地区年均降水量空间分布 (图2b)

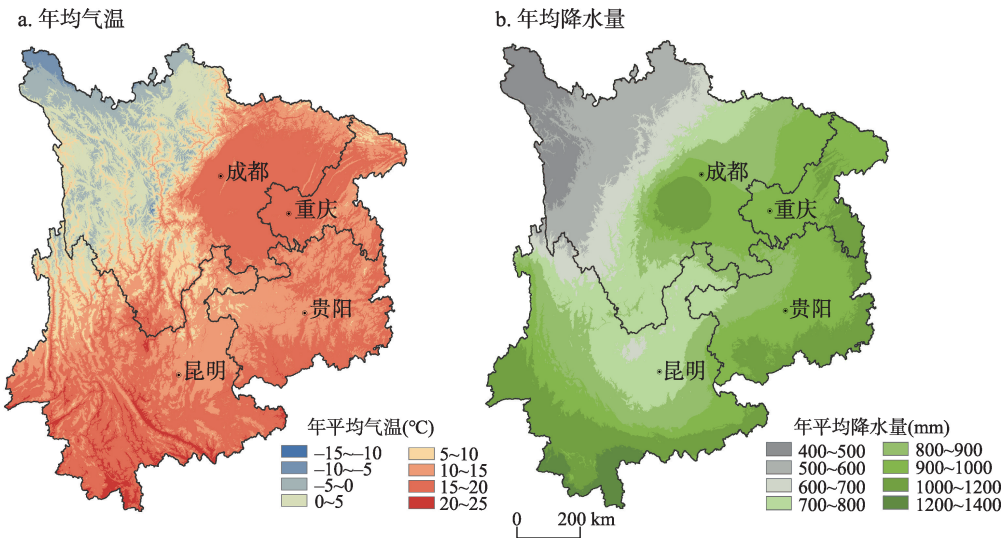


图2 1960—2016年西南地区年均温、年均降水空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the annual mean temperature and annual mean precipitation in Southwest China

显示研究区降水量相对丰沛, 年均降水量空间分布总体呈现出由南而北、自东向西随海拔增加呈条带状递减的变化趋势, 滇南、黔东、渝、川东的年均降水量多在 800 mm 以上, 流经川中、滇南的暖湿气流在此地受山脉、高原阻挡爬坡形成降水, 为相对偏湿区; 川西、滇北和黔西北的年均降水量常常不足 800 mm, 属相对偏干区。

实施气象要素空间插值时要求各点之间必须存在显著的相关性, 因此运用气候倾向率进行空间插值必须验证其与高程、经纬度等协变量的相关性, 然而受研究区已有基准台站数量的限制, 加之亦无相关研究成果证实气候倾向率与高程之间具有较高的相关性。因此, 文中仅以 90 个基准站年均温、年均降水气候倾向率空间分布来大致反映两者的空间变化情况。从 90 个基准站年均温气候倾向率的空间分布来看: 西南地区年均温变化总体显现出空间差异明显的增温趋势, 滇西、川西增温趋势明显, 黔、川东、渝西增温率较低, 该分析结果与孙娴等人对研究区增温率空间分布特征的研究结果<sup>[9]</sup>基本一致; 90 个基准站年均降水气候倾向率的空间分布总体呈现出以川西、川南、渝西、黔东南为主的相对增湿区与川东、滇东、黔西为主的相对变干区, 与任国玉等人的分析结果<sup>[41]</sup>所不同的是, 四川盆地东部及云贵高原东部并未出现明显的减湿趋势。

**4.1.2 空间分区** 为细致辨识研究区不同年均温、年均降水特征分区的演变特征, 文中开展了基于 EOF、REOF 的西南地区年均温、年均降水量特征分区的对比研究。表 1 为基于 EOF、REOF 的近 57a 西南地区年均温前 3 个特征向量的方差贡献率, 经计算前 3 个特征向量的累计方差贡献率为 94.57%, 即前 3 个特征向量能有效表征西南地区气温变化的整体特征; 研究区年均降水空间分区结果显示 (表 1), 年均降水前 3 个特征向量 (累计方差贡献率为 70.68%、70.70%) 的收敛速度滞后于年均温的, 因从第 4 个特征向量起其方差贡献率较低, 故前 3 个特征向量能全面表征研究区降水变化特征。经比较选用 REOF 方法分区时误差更低, 能更有效地反映各空间分区特征的相关性, 因此文中选用 REOF 法开展西南地区气候变化空间分区。

表 1 基于 EOF、REOF 的西南地区年均温、年均降水前 3 个模态的方差贡献率和累计方差贡献率

Tab. 1 Variance contribution rate and cumulative variance contribution rate of the first 3 modes of the annual mean temperature and annual mean precipitation based on EOF and REOF in Southwest China (%)

	年均温			年均降水		
	模态 I	模态 II	模态 III	模态 I	模态 II	模态 III
EOF 方差贡献率	78.68	11.77	4.12	45.51	18.19	6.98
EOF 累计方差贡献率	78.68	90.45	94.57	45.51	63.70	70.68
REOF 方差贡献率	45.85	38.60	10.12	28.43	29.82	12.45
REOF 累计方差贡献率	45.85	84.45	94.57	28.43	58.25	70.70

基于 REOF 分解实现的近 57a 西南地区年均温变化的空间分区如图 3a~图 3c、图 3g 所示, 具体分析时以各亚区代表站历年年均温均值为依据, 选取年均温模态皆在最高载荷绝对值范围内的气象台站作为代表站, 将 REOF 分解中居于前 3、空间模态载荷值绝对值  $\geq 0.6$  的向量场划为高值区, 并以阴影表示 (图 3a~图 3c)。分区结果显示, 西南地区年均温变化可分为 3 个区 (空间模态), I 区载荷向量场高值包括渝、黔、滇南及川东 (图 3a), 方差贡献为 45.85%, 是西南地区最为常见的模态, 西南季风对其气温变化的影响较为强烈, 东南季风对其影响相对较小; II 区载荷向量场高值中心位于川西南及滇北 (图 3b), 方差贡献率为 38.6%, 该区地处青藏高原东侧, 高原季风和西南季风对其的影响较为强烈; III 区载荷向量场高值中心位于川西北, 方差贡献率为 10.12%, 该区位于青藏高原东北侧, 属青藏高原高寒气候向四川盆地中亚热带气候的过渡区域 (图 3c), 气温

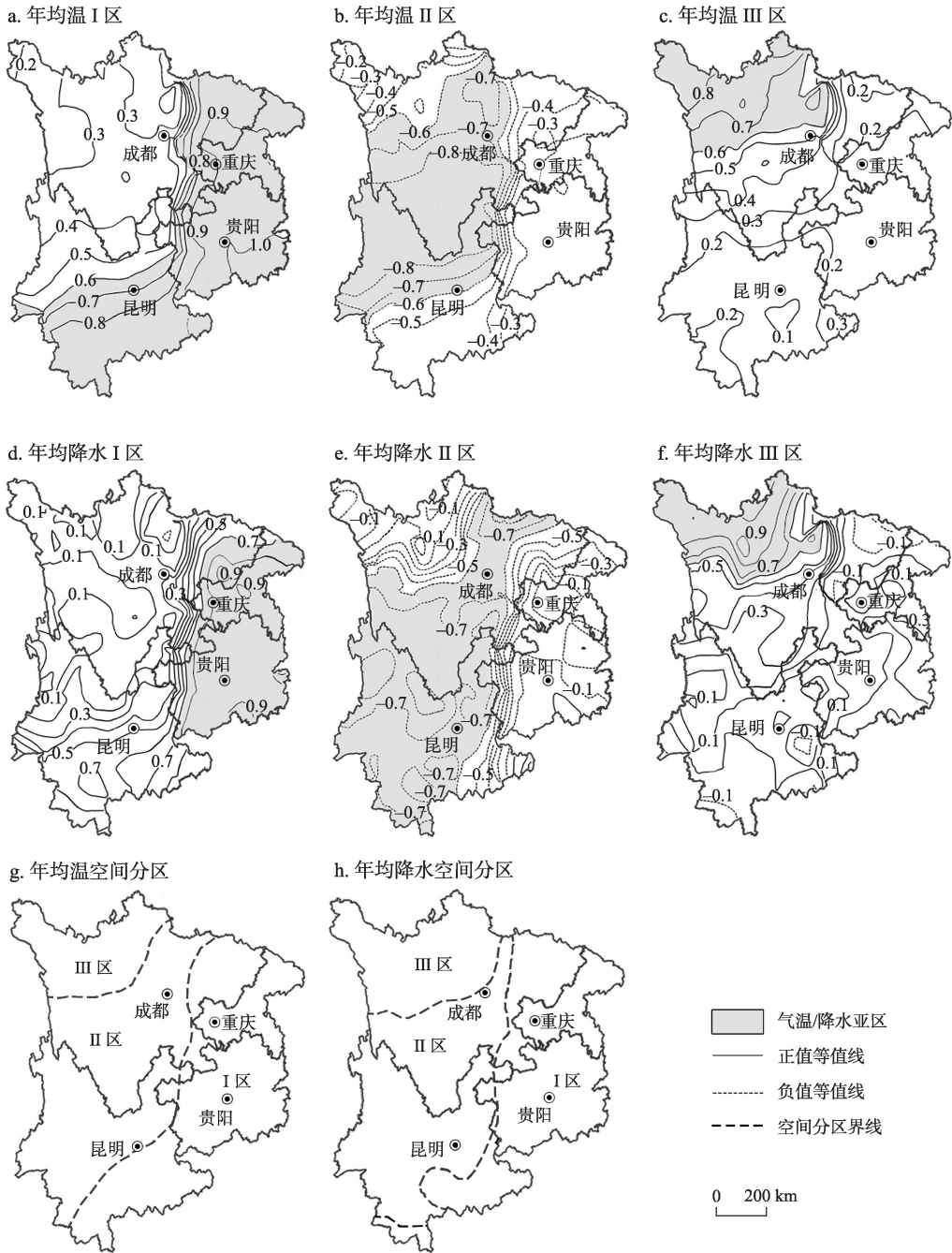


图3 1960—2016年基于REOF的西南地区年均温及年均降水变化的空间分区

Fig. 3 Spatial divisions of the annual mean temperature and annual mean precipitation changes based on REOF in Southwest China from 1960 to 2016

变化受西风南支急流、西南季风和高原季风的综合影响。

同理，西南地区年均降水量序列的变化亦可划为3个区（图3d~图3f）：I区载荷向量场高值覆盖渝、黔大部、川东、滇东南（图3d），方差贡献率为28.43%，西南季风对其影响强烈，其降水多集中于夏季；II区载荷向量场高值中心位于川南和滇中北（图

3e), 方差贡献率值为 29.82%。受西南季风及青藏高原东侧偏北冷空气的相互作用, 夏季经常出现大范围强烈降水<sup>[42]</sup>; III区载荷向量场高值中心位于川西北(图3f), 方差贡献率为 12.45%, 该区位于青藏高原东北侧, 降水变化主要受华北至河套地区一带辐合气流的影响, 高原季风强时表现为东北风辐合, 高原季风弱时表现为西南季风辐合<sup>[43]</sup>。

基于REOF的西南地区年均温、年均降水气候分区如图3g、图3h所示, 经对比该分区结果与西南地区地形地貌、气象台站分布及气候特点的吻合度较高。

### 4.2 不同分区的气候变化特征

**4.2.1 趋势分析** 图4a~图4c刻画了西南地区3个气温分区年均温的变动情况, 57a来3区年均温皆呈波动上升趋势, 线性趋势均通过了99%的置信水平检测。3区年均温气候倾向率均高于全球平均增温率(0.07℃/10a), II区的相关性最强(0.233℃/10a), 其增温率略高于近50余年来全国平均增温率((0.21~0.25)℃/10a); III区增温率(0.206℃/10a)与

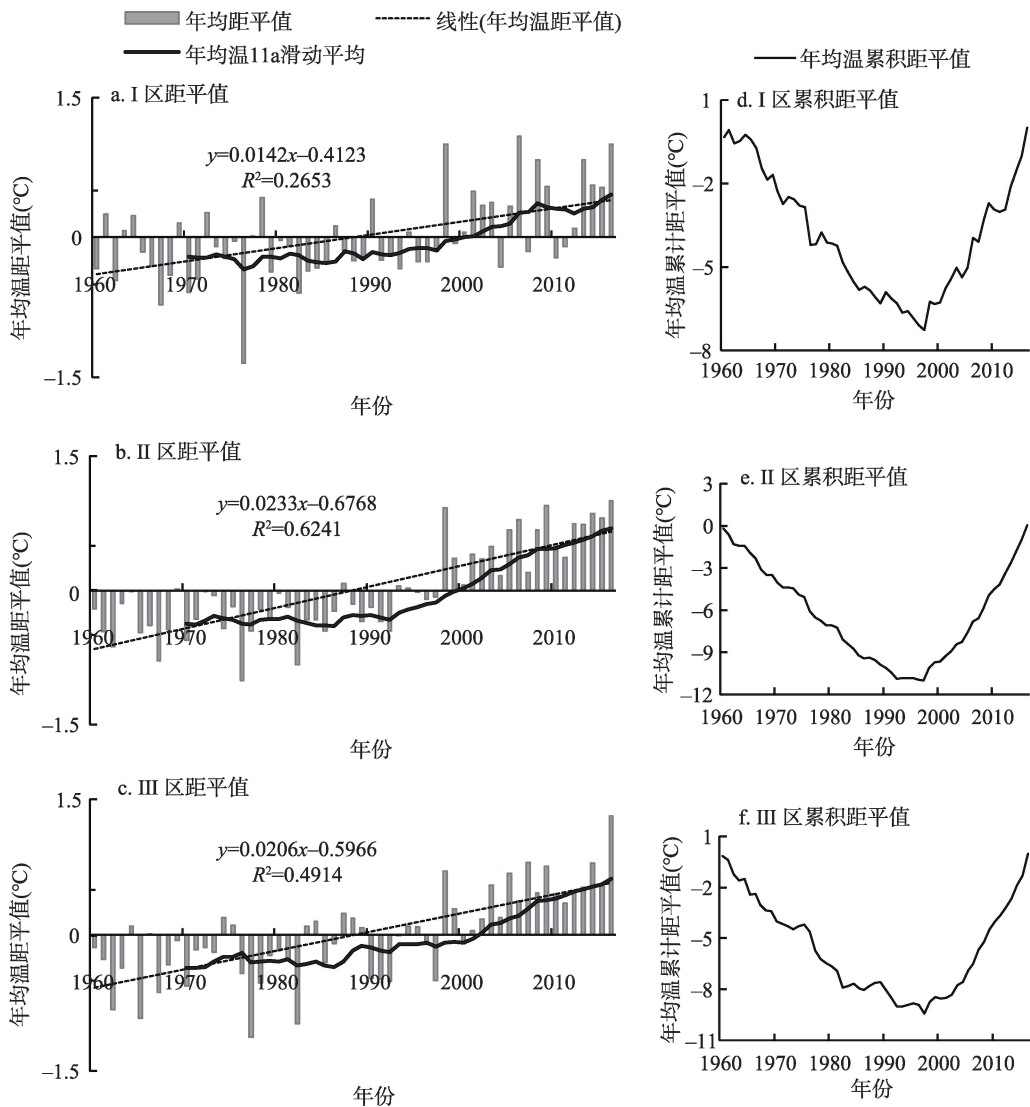


图4 1960—2016年西南地区各气温分区年均温距平值变化

Fig. 4 Annual mean temperature anomaly changes of three subregions in Southwest China from 1960 to 2016

全国水平相当；I区的(0.142℃/10a)则相对较低。分站来看，川渝两地皆无气温变化率为负值的区域，气温变冷区零星散布于黔中(贵阳站)、黔西(盘县)、滇北(华坪、元谋两站)；90个基准站年均降水的空间变化表现为以川西、川东(20个基准站)、渝西(1个基准站)、滇西北(3个基准站)、滇北(3个基准站)、滇南端(1个基准站)、黔东(2个基准站)为主的相对增湿区，以及包含渝黔滇、川北、川中，特别是渝黔绝大部分地区的相对变干区。图4d~图4f标识了3区近57a年均温累积距平值变化情况，由此可知3区先后于20世纪90年代中后期进入了显著增温期，此后年均温的增幅和波动性明显大于之前时段。

图5a~图5c描绘了西南地区3个年均降水变化气候分区的波动情况，可知研究区年均降水变化的空间差异较明显，I、II区年均降水气候倾向率为负值，且其减幅皆高于III区的增幅(7.295 mm/10a)，但均未通过相关性检验。近57a西南地区各降水变化气候分区的年均降水累计距平值变化显示(图5d~图5f)，研究区年均降水波动性强且其阶段性特征明显，I、II区波动趋势相近，大致呈“M”型(I区尤为明显)，III区波动情况与

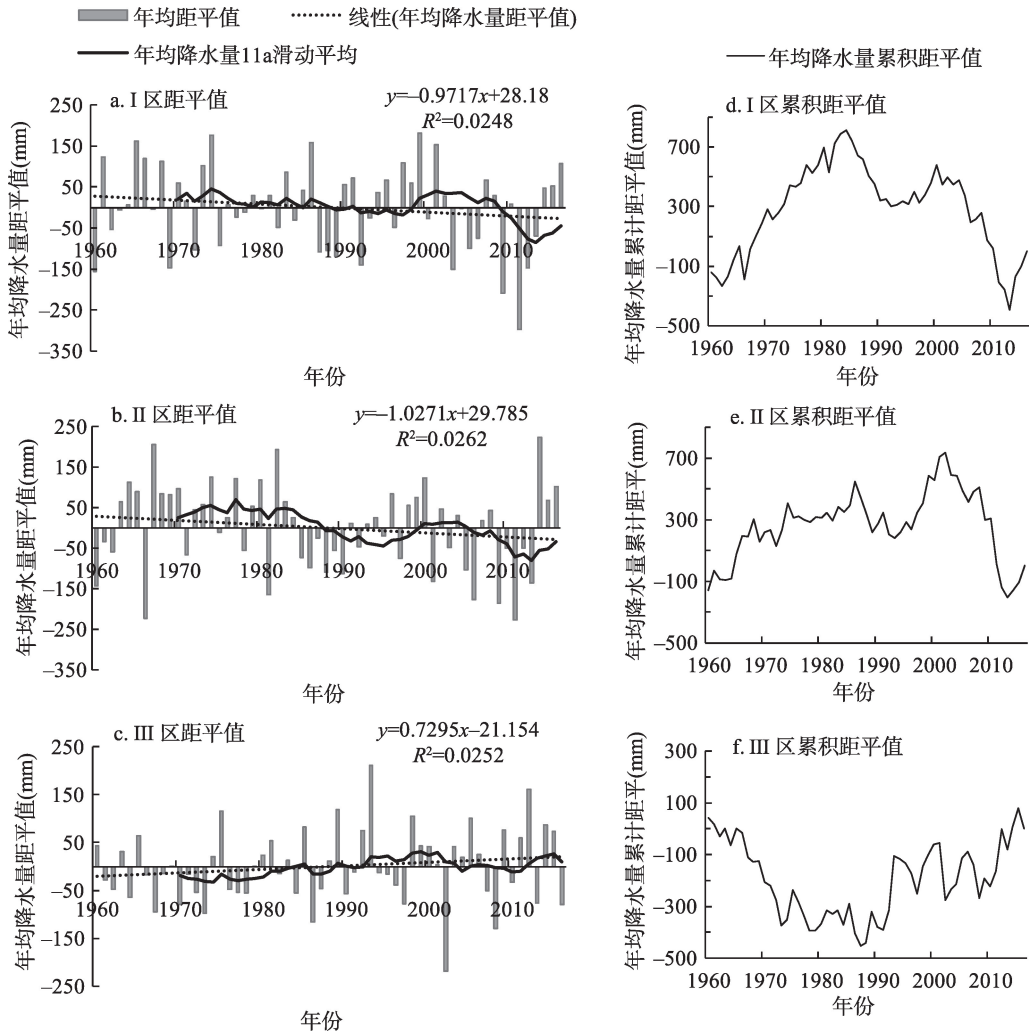


图5 1960—2016年西南地区各降水分区年均降水距平值变化

Fig. 5 Annual mean precipitation anomaly changes of three subregions in Southwest China from 1960 to 2016



之相反,大致呈“W”型。分年代来看,1960s—1980s初期/1990s初期—2000年前后/2013年以来,I区降水呈增加趋势,属湿润期;1980s中期—1990s初期/2000—2013年前后则呈减少趋势,属相对干期。1960s—1986年/1992—2001年前后,II区降水量波动增加,属相对湿润期;2001—2013年前后降水呈减少趋势,属相对干期。1960s—1987年前后/2001—2008年前后,III区降水波动减少,属相对干期;1980s后期—2001a/2008年前后以来,降水趋于波动增加,属相对湿期。此外,I、III区,特别是I区降水的波动性明显强于II区的。

**4.2.2 突变分析** 表2为融合M-K法、滑动t检验、BG分割算法、改进的有序聚类分析等多方法实现的西南地区不同气候分区突变点分布情况。经比对,研究区3个年均温的特征分区均于1997年前后发生冷突变,I、II区年均降水序列分别于1983—1984年、2001—2002年前后发生湿突变,III区年均降水序列未发生明显突变。

表2 1960—2016年西南地区气候变化突变点综合诊断

Tab. 2 Synthetic diagnosis result about catastrophe point of the annual mean temperature and annual mean precipitation series in Southwest China from 1960 to 2016

分析方法	年均温序列突变点(年)			年均降水量序列突变点(年)		
	I区	II区	III区	I区	II区	III区
累计距平分析	1996	1996	1997	1984/1992/ 2000/2013	1986/1992/ 2001/2013	1987/2001/ 2008
M-K法	1999*	2000**	2002**	-	2001*	-
滑动t检验:						
5a子序列	1997*	1992*	2004*	1990*	2001*	-
10a子序列	1996*—1997*	1997***	1997**	1983*/2003*	2002*	-
15a子序列	1988*/1997***	1997**	1997***	1982*—1983*	-	-
20a子序列	-	-	-	1983*/1986*	-	-
25a子序列	-	-	-	-	-	-
BG分割算法 (最小分割尺度25a)	1997**	1997**	1998**	-	-	-
改进的有序聚类分析	1997**/1999*	1997***	1997**	1984*	2008*	-

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示通过0.05、0.01、0.001的显著性检测;—表示连续年份;/表示非连续年份。

**4.2.3 周期提取** 基于EEMD的近57a西南地区各气温和降水变化气候分区的时间序列分解结果显示(图6、图7见第1225页),研究区3个气温变化空间分区的时间序列均可分解为5个IMF及1个趋势项(Residua, RES),其中的RES代表年均温序列中周期长于序列长度的部分,它表征了序列随时间变化的总趋势。表3(见第1226页)为各气温、降水变化空间分区所对应时间序列中IMFs的周期、方差贡献率及相关系数,表中相关系数为各分量显著性检验结果,方差贡献率表征IMF分量及RES对原序列的影响程度。

借助EEMD实现的西南地区年均温序列的IMF分量(图6)及其相关系数和方差贡献率变化(表3,见第1226页)显示,西南地区3个气温变化空间分区的年均温序列均存在明显的准3a年际周期,I、II区的IMF2还表征出明显的准6a年际周期,其与北半球气温3~4a、准6a的年际尺度变化周期相似<sup>[44]</sup>,且与ENSO事件2~7a周期相近;年代际尺度方面,3个气温分区存在与太阳黑子活动单周期相同的准11a变化周期,还普遍存在42a、准35a、44a,以及III区独有的准16a变化周期;准世纪尺度方面,3个气温分区分别存在80a、100a、准89a变化周期。从各IMFs方差贡献率及相关系数来看,3区IMF1、IMF2方差贡献率占比较高,气温II、III区IMF4方差贡献率占比亦相对较高,其相关性均通过了 $\alpha=0.01$ 显著性检验。比较来看,气温I区年均温震荡以高频特征为主,II、III区的则以中高频特征为主。

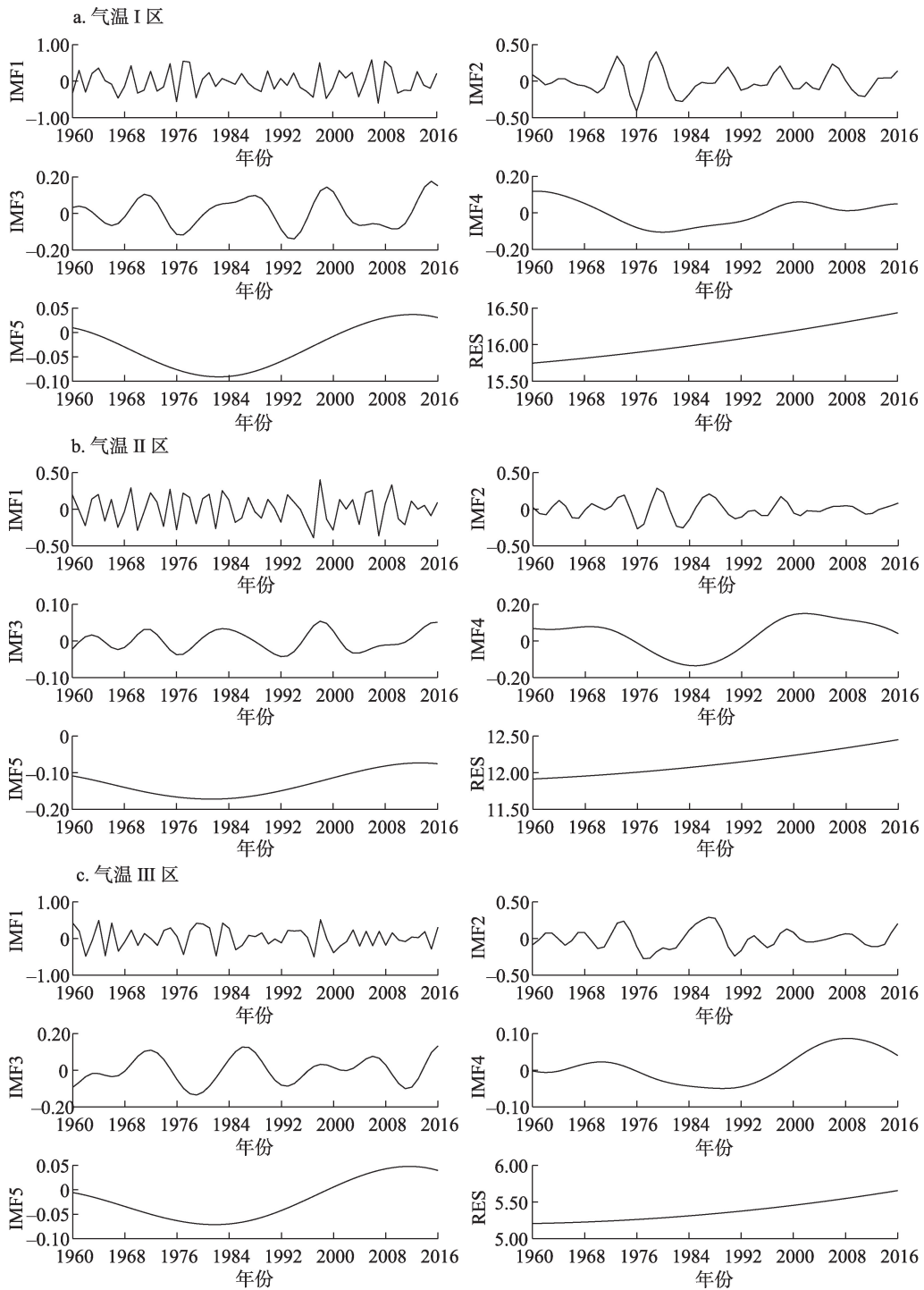


图6 基于EEMD的西南地区各气温分区年均温序列趋势分解

Fig. 6 Decomposition of the annual mean temperature of three subregions in Southwest China based on EEMD

由图7及表3(见第1226页)可知,3个年均降水变化空间分区的IMF1方差贡献率高,表明该分量与原序列相关性较强(均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验),其表征的准3a

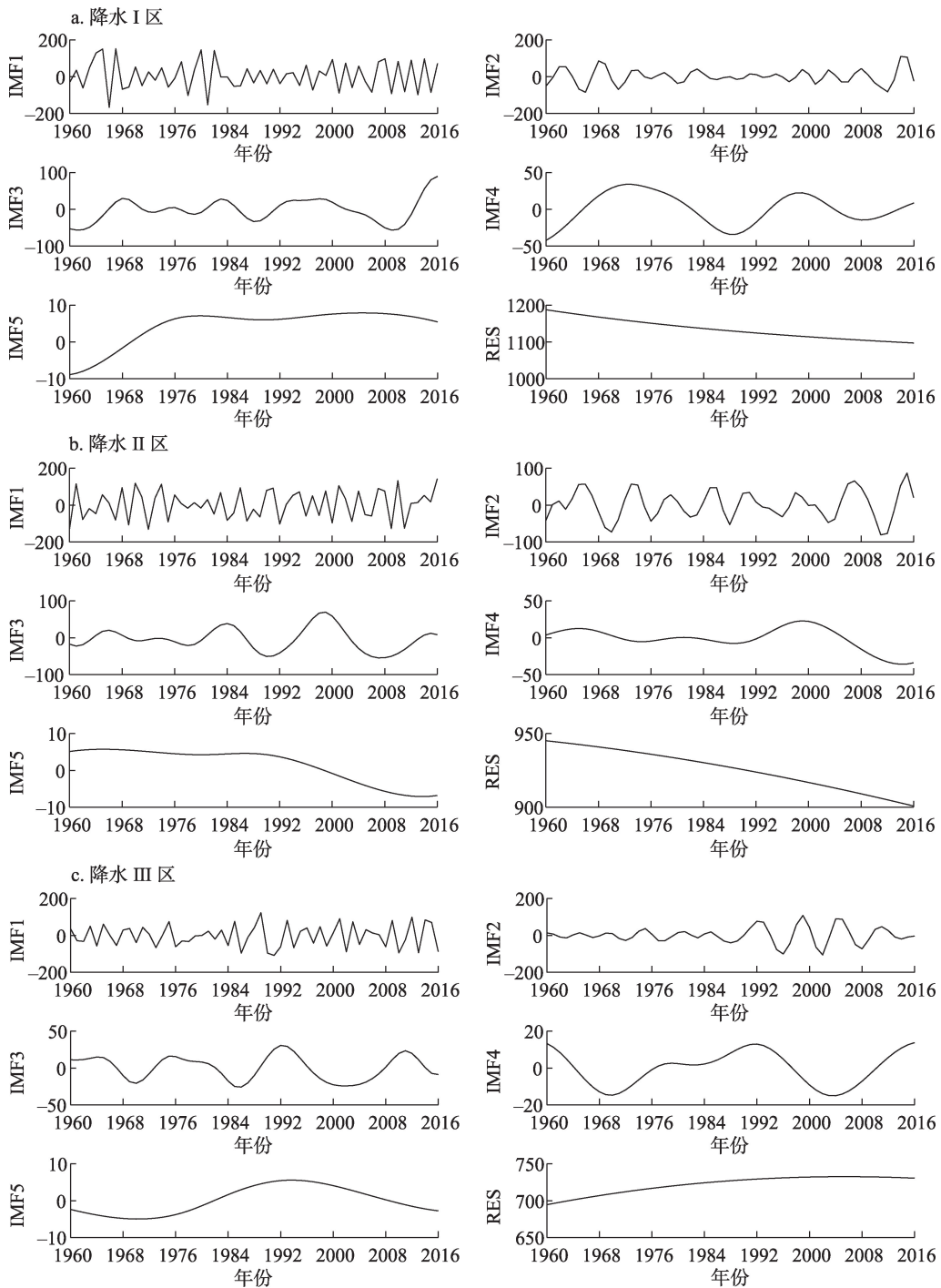


图7 基于EEMD的西南地区各降水分区年均降水序列趋势分解

Fig. 7 Decomposition of the annual mean precipitation of three subregions in Southwest China based on EEMD

周期与全国多数地区降水变化周期相似；3区IMF2及其对应的相关系数和方差贡献率变化表明其年均降水分别存在准6a、准8a、准6a年际周期，所对应的方差贡献率仅次于IMF1分量表明其对降水变化的贡献亦较大；年代际尺度方面，I区降水存在17a、准20a

表3 西南地区各气候变化分区年均温、年均降水序列的IMF分量周期、方差贡献率及相关系数

Tab. 3 Periodicity, variance contribution rate and correlation coefficient of the annual mean temperature and annual mean precipitation of three subregions in Southwest China from 1960 to 2016

		周期 (a)			方差贡献率 (%)			相关系数		
		I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区
年均温	IMF1	2.70	3.40	2.90	73.39	57.72	69.71	0.70**	0.39**	0.48**
	IMF2	5.60	5.60	10.80	17.25	19.45	16.48	0.44**	0.32**	0.38**
	IMF3	11.40	11.30	15.70	4.72	4.14	4.80	0.23*	0.24*	0.35**
	IMF4	42.00	34.80	44.00	3.20	11.95	7.39	0.48*	0.51**	0.57**
	IMF5	80.00	100.00	88.90	1.44	6.74	1.63	0.54**	0.76**	0.65**
年均 降水量	IMF1	2.50	2.60	2.70	66.10	69.35	62.18	0.75**	0.80**	0.73**
	IMF2	5.60	7.60	6.10	17.87	17.07	31.67	0.51**	0.51**	0.56**
	IMF3	17.00	12.50	14.30	10.97	10.74	4.47	0.43**	0.43**	0.23*
	IMF4	19.50	30.80	25.80	4.80	2.59	1.45	0.40**	0.29	0.21*
	IMF5	114.00	40.00	50.00	0.25	0.24	0.23	-0.07	0.20	0.16

注：\*、\*\*分别表示通过0.05、0.01的显著性检测。

的变化周期，II区的存在准13a、准31a、40a的变化周期，III区的存在准14a、准26a、50a的变化周期，表明3区年均降水年代际周期的空间异质性明显；3个年均降水特征分区的IMF5方差贡献率低、且未通过显著性检验，表明年均降水的高值年代际尺度并不显著。

为验证西南地区不同气候分区对ENSO事件的响应情况，经对比聚焦ENSO事件及其发生强度的相关文献，选取了陈虹颖等《近65年ENSO事件强度变化及时频特征研究》分析的1951年1月至2016年5月ENSO事件发生时间<sup>[45]</sup>，对照分析了西南地区近57a不同气候变化亚区冬夏气候变化对厄尔尼诺、拉尼娜事件的响应情况。分析结果如下：

(1) 在厄尔尼诺年，3个气温亚区暖冬发生频次略高于凉夏的，20世纪80年代中期以来此类响应更加明显；I、II区冬、夏季均温变化情况相似，且其凉夏发生频次高于气温III区的。3个降水亚区冬季增湿较明显，I区尤甚，II、III区略有不及，但I、II区冬季增湿变化的步调相近；从夏季增湿情况来看，3区夏季增湿情况大致相当，但I区略少。

(2) 在拉尼娜年，I、II区特别是II区冬、夏均温皆偏低，冷冬的发生频次远高于凉夏发生频次，且II区出现凉夏频次偏高；20世纪90年代中期以来，III区凉夏发生频次开始减少，暖冬、热夏发生频次不断增多。3个降水亚区冬季减湿现象明显，I区尤甚。3区夏季降水对其的响应则不一而同，总体来看III区夏季减湿最为明显，I、II区大体相当，但各年变化情况不尽一致。

由上可知，I、II区气温、降水对ENSO事件的响应基本同步，III区气温、降水对其的响应则不尽相同。可见ENSO事件对西南地区气候变化有着较深刻影响。另外，各分区年均温、年均降水量序列年际震荡周期均与ENSO事件变化周期相近，也能说明ENSO事件对西南地区气温、降水量序列的波动有一定的影响。

**4.2.4 趋势预测** 基于EEMD各亚区气候序列RES的变化显示未来3区年均温均呈单调上升趋势；3区年降水趋势项变化则不尽相同，I区年均降水序列的RES呈单调下降趋势但降速趋缓，II区的呈加速下降趋势，III区的表现为先增后加速下降（时间拐点为2005年）。

M-K趋势分析结果显示3个气温分区年均温序列UF曲线的变化远超 $u_{0.001}=2.56$ 的显著性水平，表明升温趋势极为显著，其趋势值变化次序依次为II区>III区>I区（图8）；

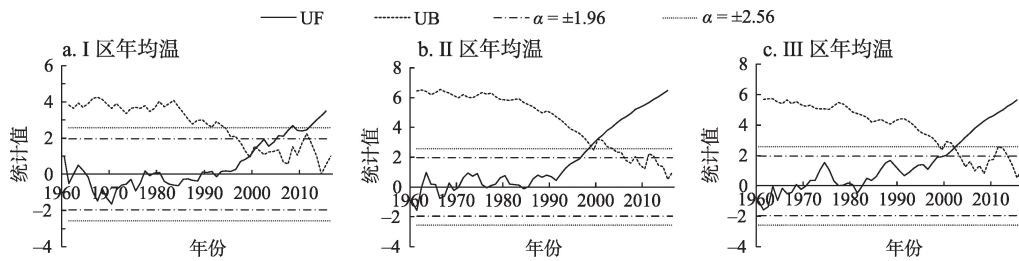


图8 西南地区各气温分区年均温M-K统计量曲线

Fig. 8 Mann-Kendall statistic curve of the annual mean temperature of three subregions in Southwest China

3个降水气候分区年均降水序列UF曲线变化均未超过 $u_{0.05}=1.96$ 的显著性水平,其中降水量I、II区的趋势值为负值,III区的为1.38,其趋势值绝对值的变化次序为III区>II区>I区(图9)。

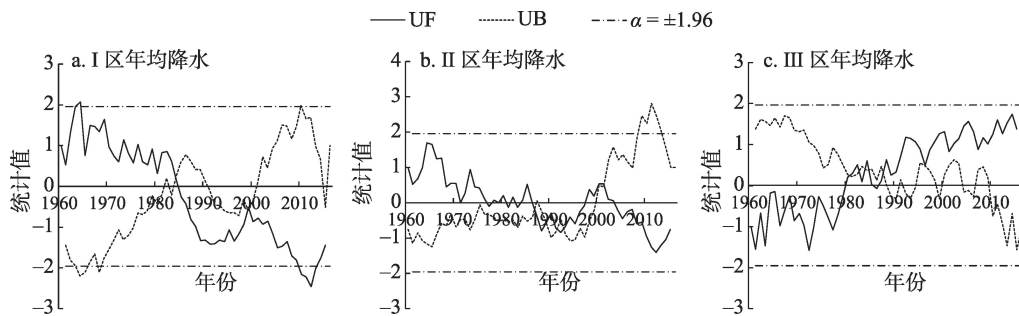


图9 西南地区各降水分区年均降水M-K统计量曲线

Fig. 9 Mann-Kendall statistic curve of the annual mean precipitation of three subregions in Southwest China

基于R/S分析的各气候分区Hurst指数值变化显示(见表4),I区序列Hurst值为0.5784,说明近期年均温变化趋势虽与其他两区一致,但远期年均温变化趋势可能存在反转;II、III区年均温的Hurst值明显高于0.5,表明两区年均温变化趋势具有较强的持续性,未来II、III区年均温将呈强持续性增温趋势;各降水变化特征分区的Hurst值变化情况显示,I区降水变化趋势存在弱的反持续性,II区的具有弱持续性,鉴于两区Hurst值接近0.5,可以认为I、II区未来年均降水量变化存在随机性,难以判定未来趋势。III区降水与I、II区的变化趋势差异较明显,其历史变化趋势具有反持续性,未来年均降水趋于减少。

由上可知,西南地区年均温、年均降水的M-K趋势分析结果与RES变化趋势极为相近,基于R/S分析的研究区年均温变化分析结果与前两者基本一致,I、II区年均降水变化趋势则表现出了一定的不确定性和随机性,III区降水序列R/S分析结果与前两种分析结果相反。

表4 西南地区各特征分区年均温、年降水序列Hurst指数

Tab. 4 Hurst index of the annual mean temperature of different spatial divisions in Southwest China

	年均温			年均降水量		
	历史趋势	Hurst指数	未来趋势	历史趋势	Hurst指数	未来趋势
I区	增加	0.5784	增加	减少	0.4815	弱增
II区	增加	0.8404	增加	减少	0.5156	弱减
III区	增加	0.7197	增加	增加	0.4269	减少

## 5 讨论

基于REOF分解的近57a西南地区各气温分区的年均温均呈明显的波动增加趋势,90个基准站中仅4站的年均温气候倾向率 $<0^{\circ}\text{C}$ (4站零星散布于黔西、黔中、滇北),川、渝两地年均温变化与全球变化同步。这一分析结果与马振峰等人经分析1961—2010年川、滇、黔、渝、藏五省区气候数据后,提出四川盆地东北部和西南部的气温存在明显的下降趋势,即其与全球暖化不同步<sup>[8]</sup>的结论不同。此外,该结论也与孙娴等人提出的1951—2001年,全国气候变冷区呈斑点状散落在川南、川东<sup>[9]</sup>的结论不一致,但与其认为黔西北、滇北等地存在点状冷区的结论<sup>[9]</sup>大致相同。四省市年均降水变化的时空差异较大,滇黔渝3省市总体呈减湿趋势,川西高原弱度增湿的结论与刘晓冉等<sup>[6]</sup>、王英等<sup>[7]</sup>的研究结果相近。可见,同一研究区的气候变化特征,会因所分析气候序列时序长短以及站点不同而产生一定的差异。

基于REOF分解实现的气候变化特征分区,是在保证累计方差贡献率不变的前提下,尽可能将分解后含原始场高值主成分的信息场集中于较小区域,极大地提高了各变量场的方差贡献率值。即REOF分解结果能最大程度地揭示非线性气候序列主震荡型,并在有效克服EOF分区结果无法明晰不同空间场地理特征的同时,尽可能削减EOF分区时取样多寡对气候分区的影响,且其分解结果与研究区实际地形地貌特征以及气候变化特点高度吻合,是分离气候变量场空间结构的新倾向<sup>[18,34]23</sup>。此外,研究区气候变化分区结果显示REOF分解下的气候模态划分可信度较高,文中年均温、年均降水I、II区的分界线,同史培军等所划分的中国气候变化一级区划中藏东南-西南温暖趋势带、西南-华南干暖趋势带分界线高度相似<sup>[18]</sup>,II、III区的分界线也与中国气候变化二级区划中IV<sub>1</sub>、IV<sub>2</sub>的分界线相似。

气温I区年均温序列突变与林婧婧<sup>[46]37</sup>(其研究区区划与本文一致,均为川滇黔渝四省市)研究结果一致,II、III区突变时间则分别提早3a和4a;降水序列突变方面,降水II区突变时间与胡豪然等<sup>[27]</sup>、林婧婧<sup>[46]37</sup>的研究相似(研究区区划与本文一致,亦为川滇黔渝四省市),I、III区的则不尽相同。可见,同一研究区域气候序列的突变时间常因研究方法、序列长短不同而异。考虑到各类突变分析方法的原理、优缺点各异,在推求气候序列突变时,应融合方差突变检测和均值突变检测等多类方法综合研判,以提高分析结果的准确性。

ENSO事件对西南地区气温、降水序列变化的影响较为深刻,研究区各气候亚区对其的响应不尽相同,总体来看,I、II区气温、降水对ENSO事件的响应趋于一致,III区气温、降水对其的响应则与其他两区不尽相同。从3区年均温、年均降水序列的主要震荡周期来看,ENSO事件的低频年际周期、太阳黑子活动影响下的低值年代际周期可能是决定3区年均温序列变动的主要因子。ENSO事件影响下的低频年际周期,则可能是影响各降水分区所对应时间序列震荡周期的主要因素。

## 6 结论

经借助REOF方法开展西南地区气温、降水特征分区,融合多方法细致甄别各亚区气候变化特征,可得出如下主要结论:

(1) 比较来看,REOF方法能分解出气候变化场上主导型的空间结构,其分解结果既能彰显局地特征,又能保证分离出的各模态间保持高度相关性。经与同类研究结果比

对,文中借助REOF方法将西南地区气温、降水变化分为3个边界相似度极高的分区结果与主流的研究结果相近,且其与西南地区地形地貌特征及其气候变化特点相契合。

(2)近57年来,川渝气温变化与全球变暖同步,黔中、黔西、滇北零星散布若干冷区;黔、滇、渝降水变化以区内散落少量增湿点的减湿为主,四川省的降水变化则以川中、川北散布若干减湿点的弱度增湿为主。

(3)不同气候分区年均温、年均降水未来变化趋势不尽相同。3个气温亚区年均温均呈增幅不一的显著上升趋势,Ⅱ、Ⅲ区的尤甚。降水Ⅰ、Ⅱ区降水变化趋势不甚明显且具有一定的随机性,Ⅰ区可能呈减速趋缓的减湿趋势,Ⅱ区可能出现弱度减湿趋势,Ⅲ区降水趋于弱增。

**致谢:**真诚感谢二位匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力,评审专家对本文引言、结果分析、结论梳理方面的修改意见,使本文获益匪浅。

### 参考文献(References)

- [1] Allen S K, Plattner G K, Nauels A, et al. Climate change 2013: The physical science basis. An overview of the working group 1 contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Computational Geometry*, 2007, 18(2): 95-123.
- [2] 《第三次气候变化国家评估报告》编写组. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015. [The Third National Assessment Report on Climate Change Compiling Group. The Third National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 2015.]
- [3] 石兴琼, 肖天贵, 房玉洁, 等. 西南地区不同地质灾害影响区的降水阈值研究. *高原山地气象研究*, 2016, 36(1): 63-67. [Shi Xingqiong, Xiao Tianguai, Fang Yujie, et al. Study of precipitation concentration threshold at the different geological disaster affected zone in Southwest China. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2016, 36(1): 63-67.]
- [4] 丁一汇. 气候变化加大西南地区干旱风险. *中国气象报*, 2014-08-27(1). [Ding Yihui. Climate change increases drought risk in Southwest China. *China Meteorological News*, 2014-08-27(1).]
- [5] 马柱国, 任小波. 1951-2006年中国区域干旱化特征. *气候变化研究进展*, 2007, 3(4): 195-201. [Ma Zhuguo, Ren Xiaobo. Drying trend over China from 1951 to 2006. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(4): 195-201.]
- [6] 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 我国西南地区1960-2000年降水资源变化的时空特征. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 783-792. [Liu Xiaoran, Li Guoping, Fan Guangzhou, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation resource in Southwest China during 1961-2000. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 783-792.]
- [7] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. *地理研究*, 2006, 25(6): 1031-1040, 1148. [Wang Ying, Cao Mingkui, Tao Bo, et al. The variation characteristics of spatial patterns of precipitation in China under the global climate change. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1031-1040, 1148.]
- [8] 马振锋, 彭骏, 高文良, 等. 近40年西南地区的气候变化事实. *高原气象*, 2006, 25(4): 633-642. [Ma Zhenfeng, Peng Jun, Gao Wenliang, et al. Climate variation of Southwest China in recent 40 years. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(4): 633-642.]
- [9] 孙娴, 林振山. 经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征. *地理学报*, 2007, 62(11): 1132-1141. [Sun Xian, Lin Zhenshan. The regional features of temperature variation trends over China by empirical mode decomposition method. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1132-1141.]
- [10] 张武龙, 张井勇, 范广洲. CMIP5模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估. *大气科学*, 2015, 39(3): 559-570. [Zhang Wulong, Zhang Jingyong, Fan Guangzhou. Evaluation and projection of dry and wet season precipitation in Southwestern China using CMIP5 models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(3): 559-570.]
- [11] 吴迪, 裴源生, 赵勇, 等. IPCC A1B情景下中国西南地区气候变化的数值模拟. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 275-284. [Wu Di, Pei Yuansheng, Zhao Yong, et al. Numerical simulations of climate change under IPCC A1B scenario in Southwestern China. *Progress in Geography*, 2012, 31(3): 275-284.]
- [12] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征. *地理学报*, 2011, 66(9): 1179-1190. [He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng, et al. Climate variation characteristics of the extreme drought events in Southwest China during recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1179-1190.]
- [13] Zhang Mingjun, He Jinyun, Wang Baolong, et al. Extreme drought changes in Southwest China from 1960 to 2009. *Jour-*

- nal of Geographical Sciences, 2013, 23(1): 3-16.
- [14] 蒋兴文, 李跃清. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因素. 地理学报, 2010, 65(11): 1325-1335. [Jiang Xingwen, Li Yueqing. The spatio-temporal variation of winter climate anomalies in southwestern China and the possible influencing factors. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1325-1335.]
- [15] 范思睿, 王维佳, 陈添宇, 等. 西南地区春季降水异常与大尺度环流关系. 干旱区地理, 2016, 39(1): 47-57. [Fan Sirui, Wang Weijia, Chen Tianyu, et al. Relation between spring precipitation anomaly in southwestern China and large-scale circulation. *Arid Land Geography*, 2016, 39(1): 47-57.]
- [16] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 基于APSIM模型的气候变化对西南春玉米产量影响研究. 资源科学, 2016, 38(1): 155-165. [Dai Tong, Wang Jing, He Di, et al. Modelling the impacts of climate change on spring maize yield in Southwest China using the APSIM model. *Resources Science*, 2016, 38(1): 155-165.]
- [17] 周曙东, 朱红根. 气候变化对中国南方水稻产量的经济影响及其适应策略. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10): 152-157. [Zhou Shudong, Zhu Honggen. Economic analysis of climate change impact on the rice yield in southern China and its adaptive strategy. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(10): 152-157.]
- [18] 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961-2010年). 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2294-2306. [Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. Division of climate change in China (1961-2010). *Science Sinica: Earth Sciences*, 2014, 44(10): 2294-2306.]
- [19] 张晶晶, 陈爽, 赵昕奕. 近50年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 1-6. [Zhang Jingjing, Chen Shuang, Zhao Xinyi. Spatial divergency of temperature change during 1951-2000 in China and its correlation with global climate change. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(4): 1-6.]
- [20] 王艳皎, 闫峰. 1960-2010年中国降水区域分异及年代际变化特征. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1354-1363. [Wang Yanjiao, Yan Feng. Regional differentiation and decadal change of precipitation in China in 1960-2010. *Progress in Geography*, 2014, 33(10): 1354-1363.]
- [21] 蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 青藏高原近50年来气温的年代际变化. 高原气象, 2003, 22(5): 464-470. [Cai Ying, Li Dongliang, Tang Maochang, et al. Decadal temperature changes over Qinghai-Tibet Plateau in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 464-470.]
- [22] 焦洋, 游庆龙, 林厚博, 等. 1979-2012年青藏高原地区地面气温时空分布特征. 干旱区研究, 2016, 33(2): 283-291. [Jiao Yang, You Qinglong, Lin Houbo, et al. Spatio-temporal distribution of surface temperature over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2012. *Arid Zone Research*, 2016, 33(2): 283-291.]
- [23] 张永, 陈发虎, 勾晓华, 等. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布: 基于PDSI数据. 地理学报, 2007, 62(11): 1142-1152. [Zhang Yong, Chen Fahu, Gou Xiaohua, et al. The temporal and spatial distribution of seasonal dry-wet changes over the northwestern China: Based on PDSI. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1142-1152.]
- [24] 陈少勇, 郭江勇, 郭忠祥, 等. 中国西北干旱半干旱区年平均气温的时空变化规律分析. 干旱区地理, 2009, 32(3): 364-372. [Chen Shaoyong, Guo Jiangyong, Guo Zhongxiang, et al. Discipline of temporal and spatial variation of annual mean air temperature in arid and semiarid region in northwest China in the recent 46 years. *Arid Land Geography*, 2009, 32(3): 364-372.]
- [25] 陈豫英, 陈楠, 王式功, 等. 中蒙干旱半干旱区降水的时空变化特征(I): 年降水特征及5-9月降水的REOF分析. 高原气象, 2010, 29(1): 33-43. [Chen Yuying, Chen Nan, Wang Shigong, et al. Temporal and spatial change features of precipitation over China-Mongolia arid-and semiarid-areas (I): REOF analyses on annual rainfall feature and May-September rainfall feature. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(1): 33-43.]
- [26] 陈效述, 彭嘉栋, 李慧敏. 内蒙古地区气温变化的季节和区域差异. 地理研究, 2009, 28(1): 27-35. [Chen Xiaochu, Peng Jiadong, Li Huimin. Seasonal and regional differences of air temperature changes in Inner Mongolia. *Geographical Research*, 2009, 28(1): 27-35.]
- [27] 胡豪然, 梁玲. 近50年西南地区降水的气候特征及区划. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(7): 146-154. [Hu Haoran, Liang Ling. Climatic characteristics and regionalization of rainfall in Southwest China in the last 50 years. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, 37(7): 146-154.]
- [28] 范思睿, 王维佳. 西南地区春季降水时空变化特征. 干旱气象, 2015, 33(5): 740-747. [Fan Sirui, Wang Weijia. Spatial-temporal changes of spring precipitation in Southwest China. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(5): 740-747.]
- [29] 张顺谦, 马振峰, 陈文秀, 等. 西南地区秋绵雨变化趋势与周期性特征的区域差异. 自然资源学报, 2014, 29(2): 275-284. [Zhang Shunqian, Ma Zhenfeng, Chen Wenxiu, et al. Area-differentiation of changing trend and periodic characteristics of autumn continuous rainy days in Southwest China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2), 275-284.]
- [30] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 等. 气候变暖背景下中国西南干旱时空分异特征. 资源科学, 2015, 37(9): 1774-1784. [Yao Yu-



- bi, Zhang Qiang, Wang Jingsong, et al. Temporal-spatial abnormality of drought under climate warming in Southwest China. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1774-1784.]
- [31] 刘琳, 徐宗学. 西南地区旱涝特征及其趋势预测. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1792-1801. [Liu Lin, Xu Zongxue. Drought and flood characteristics and trend prediction in Southwest China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(10): 1792-1801.]
- [32] 颜玉倩, 朱克云, 李建云, 等. 基于改进后地表湿润指数的我国西南干旱气候特征研究. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1012-1021. [Yan Yuqian, Zhu Keyun, Li Jianyun, et al. Drought climate characteristics in Southwest China based on the modified surface humidity index. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 1012-1021.]
- [33] 中国气象局预测减灾司, 中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册. 北京: 气象出版社, 2006. [China Meteorological Administration Forecast Disaster Reduction Division, National Meteorological Center. *China Meteorological Geographical Divisions Manual*. Beijing: China Meteorological Press, 2006.]
- [34] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. *Statistical Diagnosis and Prediction of Modern Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]
- [35] 封国林, 龚志强, 董文杰, 等. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究. *物理学报*, 2005, 54(11): 5494-5499. [Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Dong Wenjie, et al. Abrupt climate change detection based on heuristic segmentation algorithm. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(11): 5494-5499.]
- [36] 李玉霞, 陈玲玲, 江亭桂, 等. 基于EEMD的太阳活动对印度夏季风的多尺度胁迫分析. *地理科学*, 2018, 38(4): 628-635. [Li Yuxia, Chen Lingling, Jiang Tinggui, et al. Multi-scale modulation analysis of Indian summer monsoon by solar activity based on EEMD method. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(4): 628-635.]
- [37] 徐岩岩, 常军. 基于DERF2.0模式1-52天最低温度逐日预报的检验评估. *高原气象*, 2018, 37(4): 1042-1050. [Xu Yanyan, Chang Jun. Evaluation of the minimum temperature forecast of 1-52 days based on DERF2.0 model. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(4): 1042-1050.]
- [38] 邓拥军, 王伟, 钱成春, 等. EMD方法及Hilbert变换中边界问题的处理. *科学通报*, 2001, 46(3): 257-263. [Deng Yongjun, Wang Wei, Qian Chengchun, et al. Boundary problem in EMD method and Hilbert transform processing. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(3): 257-263.]
- [39] 刘志红, 李领涛, 麦克维卡·蒂姆等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用. *气象*, 2008, 34(2): 92-100. [Liu Zhihong, Li Lingtao, McVicar T R, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(2): 92-100.]
- [40] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素Anusplin和Cokriging空间插值对比分析. *高原气象*, 2016, 35(4): 875-886. [Tan Jianbo, Li Ainong, Lei Guangbin. Contrast on Anusplin and Cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(4): 875-886.]
- [41] 任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 中国大陆降水时空变异规律: II. 现代变化趋势. *水科学进展*, 2015, 26(4): 451-465. [Ren Guoyu, Ren Yuyu, Zhan Yunjian, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II. Recent trends. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 451-465.]
- [42] 尤丽钰, 霍义强, 陈隆勋. 云南雨季开始和大气环流季节变化的关系. *云南大学学报(自然科学版)*, 1981, (1): 94-110. [You Liyu, Huo Yiqiang, Chen Longxun. The relationship between the beginnings of rainy season and the seasonal change of atmospheric circulation in Yunnan. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 1981, (1): 94-110.]
- [43] 白莹莹, 张焱, 李强, 等. 四川盆地夏季降水区域差异及其与季风的联系初探. *气象*, 2014, 40(4): 440-449. [Bai Yingying, Zhang Yan, Li Qiang, et al. Preliminary study on regional difference of summer rainfall in Sichuan Basin and their connections with summer monsoons. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(4): 440-449.]
- [44] 林振山, 汪曙光. 近四百年北半球气温变化的分析: EMD方法的应用. *热带气象学报*, 2004, 20(1): 90-96. [Lin Zhen-shan, Wang Shuguang. EMD analysis of northern hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(1): 90-96.]
- [45] 陈虹颖, 徐峰, 李晓惠, 等. 近65年ENSO事件强度变化及时频特征研究. *热带气象学报*, 2017, 33(5): 683-694. [Chen Hongying, Xu Feng, Li Xiaohui, et al. Intensity variability and time-frequency characteristics of ENSO in the last 65 years. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 33(5): 683-694.]
- [46] 林婧婧. 气候变暖背景下我国气候态变化对气候检测、评估和监测的影响. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2015. [Lin Jingjing. The influence of the different climate states on climate detection, assessment and monitor over China under the background of climate warming. Lanzhou: Master Dissertation of Lanzhou University, 2015.]

## Spatial division of climate change and its evolution characteristics in Southwest China based on REOF-EEMD

LIU Xiaoqiong<sup>1,2</sup>, SUN Xiliang<sup>2</sup>, LIU Yansui<sup>3</sup>, ZHANG Jian<sup>2,4</sup>, ZHAO Xinzheng<sup>1,2</sup>, RUI Yang<sup>1,2</sup>

(1. The Provincial Key Laboratory of Surface System and Environment Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

4. Institute of Silk Road Studies China, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** Southwest China is a special region in the context of global climate change. It is crucial to study the climate change in different parts of this region. In addition, it is important to explore the climate change characteristics of the counties in the study area which have benchmark meteorological stations. In this paper, the Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF) was chosen to carry out climate regionalization according to annual mean temperature and annual mean precipitation change in Southwest China. Despite that, the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD), Bernaola Galvan heuristic Segmentation Algorithm (BGSA) and other methods were used to analyze the spatio-temporal evolution of climate change in subregions of the study area. Here are the results: (1) According to annual mean temperature and annual mean precipitation changes, the temperature and precipitation changes in the study area could be regionalized into three subregions respectively. The spatial boundaries of these two types of subregions were extremely similar, and the southern boundaries of precipitation subregions II and III were much more boarder than those of the temperature subregions II and III. (2) Annual mean temperatures in three temperature subregions have been rising significantly since 1950, and the temperature changes in Sichuan and Chongqing kept pace with global warming. It is worth mentioning that there were several cold areas sporadically distributed in the western Guizhou, the central Guizhou and the northern Yunnan. In terms of precipitation subregions, the spatial and temporal differences of annual mean precipitation were much larger, and the spatial and temporal differences of the interdecadal variation in the precipitation subregions I and II were more prominent than those in the precipitation region III. (3) The ENSO events had a profound influence on the climate change of Southwest China, and these three temperature and precipitation subregions responded differently to it. (4) The convergence of mutational site of annual mean temperature series in the three temperature subregions was strong (which all began around the year 1997), while that of annual mean precipitation series in the three precipitation subregions was relatively weak. (5) The climate warming trends in the three temperature subregions were obvious, especially in the subregions I and II. Regarding to annual mean precipitation, the trends of the precipitation in subregions I and II had certain randomness, the trend of annual mean precipitation in precipitation subregion I may decelerate with slower deceleration, and that in precipitation subregion II may weakly decelerate, while that of subregion III may weakly accelerate.

**Keywords:** climate change; EEMD; REOF; climate regionalization; spatial and temporal evolution; Southwest China