

1960-2015年青海三江源地区降水时空特征

刘晓琼^{1,2}, 吴泽洲², 刘彦随³, 赵新正^{1,2}, 芮旻^{1,2}, 张健^{2,4}

(1. 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: 青海三江源地区是中国生态系统最为敏感和脆弱的地区, 其降水特别是生长季降水的波动, 是影响本区及江河中下游水资源安全、生态系统可持续发展的关键因素。综合线性趋势、Mann-Kendall 检验、BG 分割算法、R/S、EEMD 等多方法细致辨识了 1960-2015 年研究区降水量序列的时空特征。结果显示: ① 三江源降水量总体呈现弱增趋势, 21 世纪以来降水量显著增加, 各子源区气候倾向率不尽相同; ② 年、季降水量自东南向西北递减, 澜沧江源区夏季降水和黄河源区秋季降水呈弱减趋势, 雨量弱减区在空间上呈斑块状分布; ③ 年、季降水量年代际变化和增湿率的空间差异较明显, 春夏季降水气候倾向率与经纬度、海拔的复相关性显著高于冬季; ④ 20 世纪 90 年代中后期, 各子源区降水总体显现增强信号, 并于 2002 年前后发生突变; ⑤ 年际和低值年代际显著周期是造成降水量变动的主要因素; ⑥ 除澜沧江源区夏季降水趋于减少外, 其他年、季降水量变化呈现增幅不一的转湿趋势; ⑦ 横向比较各子源区可见, 长江源区降水变化更能表征高原气候变化。研究结果显示, 研究区降水时空序列变化具有明显的区域和季节差异性特征, 与以往类似研究存在些许差异, 可见为有效提高气候序列演变过程及突变诊断的准确性, 仍需进一步融合多方法实施集成分析。

关键词: 降水量序列; 统计特征; EEMD; 时空演变; 三江源地区

DOI: 10.11821/dlxb201909008

1 引言

世界第三级青藏高原降水时空变化具有显著的区域性, 降水量变化对该区域的冰川发育及沼泽、湿地等重要生态系统演化的影响较为深远, 一直是学界关注的热点问题^[1-5]。中国《第三次气候变化国家评估报告》研究结果显示, 1961-2012 年中国区域平均降水呈弱减趋势, 但高海拔地区呈增加趋势。西北地区年降水量呈弱增趋势, 大致以黄河河源至巴彦淖尔为界, 西部降水量呈增多趋势, 东部反之^[6]。长期以来, 青藏高原巨大的热力和动力扰动作用深刻地影响了东亚及北半球的大气环流^[7-8], 并直接影响到东亚、北半球乃至全球的气候变化。由于青藏高原气候变化的超前性和敏感性, 其素来被视为全球气

收稿日期: 2018-05-31; 修订日期: 2019-08-18

资助项目: 国家社会科学基金项目(16XGL015); 中国博士后科学基金特别资助项目(2017T100764); 国家自然科学基金项目(41661042) [Foundation: National Social Science Foundation of China, No.16XGL015; Postdoctoral Science Foundation Special funded project of China, No.2017T100764; National Natural Science Foundation of China, No.41661042]

作者简介: 刘晓琼(1977-), 女, 青海湟源人, 副教授, 硕士生导师, 中国地理学会会员(S110009604F), 主要从事气候变化与农业生产、区域农业与农村发展研究。E-mail: xiaoqiongliu2001@163.com

通讯作者: 张健(1980-), 男, 陕西大荔人, 副教授, 硕士生导师, 中国地理学会会员(S110010836M), 主要从事历史气候变化与社会响应、历史地理及其信息技术等研究。E-mail: zhangjian@nwu.edu.cn

候变化的预警区和放大器^[9-10],由此可见,青藏高原地区气候变化及其影响研究具有重要的现实价值和科学意义。

本文所选青海三江源自然保护区地处青藏高原北区,其气候变化与北区其他地区及唐古拉山以南的西藏区差异明显^[10-12],其降水量变化不仅影响青藏高原腹地旱涝变化,也将直接影响澜沧江、黄河和长江流域旱涝状况^[12]。有关三江源地区降水量变化的研究成果,主要包括不同情境下源区各季节降水变动及其综合效应^[13]、降水量时空变化特征及其生态环境效应^[14-17]、降水序列的周期与突变特征^[18-19]、极端降水事件演变及其成因^[20]、降水对径流的驱动分析^[21]、生态环境变化的气候特征^[22]、降水量空间插值^[23]等。以上成果证实,20世纪50年代以来青藏高原降水量时空差异显著,存在一定的周期震荡,但其突变不及气温序列明显。现有多数相关研究认为,青海三江源地区降水量总体呈弱增趋势,并存在一定的季节差异性。此外,可能受选取序列长短和观测台站数量不一等因素的影响,部分研究则认为三江源区降水呈弱减趋势^[24]。

纵观上述研究,青海三江源地区降水量更长序列的时空演变特征,以及区域空间差异的多方法集成分析尚待进一步精准辨识,各子源区年、季降水量序列突变点诊断、周期震荡差异、变化趋势等方面的探索仍相对不足。鉴于此,本文甄选1960-2015年研究区13个气象台站月均降水量数据,分源区探究1960-2015年降水量变化的统计特征及其影响因子,揭示三江源地区降水量更长序列时空变化特征,分源区辨识降水量年、季变化趋势和空间分异特征,试图综合分析研究区降水时空特征,为本区江河中下游地区水资源安全和生态系统可持续发展研究提供参考,亦为预测未来中国乃至全球气候变化等相关研究提供参照。

2 研究区概况

青海三江源地区地处青藏高原腹地,坐标为 $89^{\circ}45'E\sim 102^{\circ}23'E$ 、 $31^{\circ}39'N\sim 36^{\circ}12'N$,海拔3450~6621 m,行政区划涵括青海省果洛、玉树藏族自治州全境以及海南藏族自治州兴海、同德两县和海南藏族自治州的泽库、河南两县,以及格尔木市的唐古拉镇共计16县1镇,其区位及文中遴选的气象台站分布如图1所示。三江源地区系澜沧江—湄公

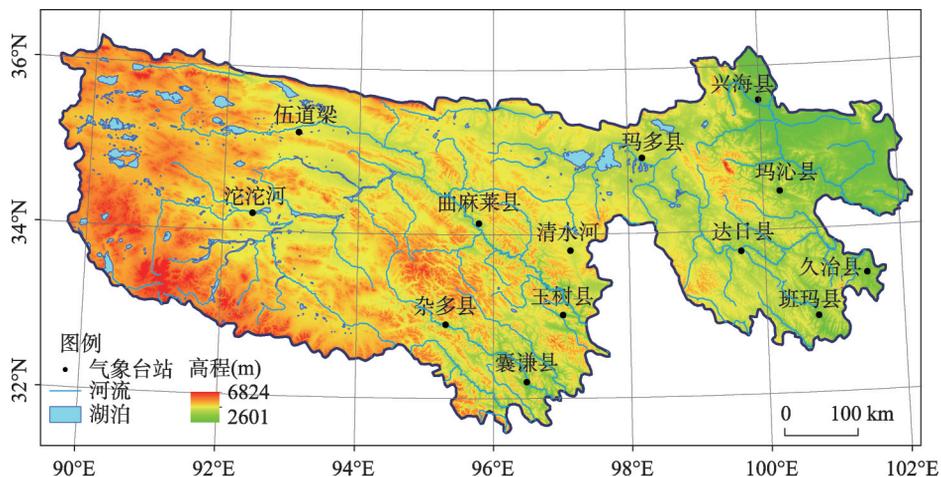


图1 青海三江源区及气象站点分布图

Fig. 1 The location of Three Rivers' Headstream Region and meteorological stations

河、黄河、长江的发源地,区内沼泽湿地、冰川、湖泊等水体广布,是中国江河重要的水源涵养区、补给区以及中国乃至亚洲的重要水源区,素有“江河源”“中华水塔”“生命之源”之称。区内长江源区面积 $15.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、黄河源区面积 $9.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、澜沧江源区面积 $3.68 \times 10^4 \text{ km}^2$,其他内陆河源区面积 $6.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区高原大陆型冷凉气候典型,冷热交替,干湿两季分明,日较差大而年较差小。三江源地区主体生态系统和特色生态系统依次为高寒草地以及湿地、冰川和高山永久积雪^[25],它是江河中下游及其周边地区重要的生态屏障和影响范围最大的生态调节区^[26-27],其降水量变动关乎青藏高原乃至亚洲的生态安全。

3 数据来源与分析方法

3.1 数据来源

青海三江源地区现设气象台站18个,考虑到各台站起始时间不一以及个别台站迁站(如河南县台站)等其他实际情况,文中降水量数据序列尽可能选择最长时间序列,经对比选取了13个台站,1960年1月1日-2016年2月28日共计56年的月均降水量跨度数据。气象数据取自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的三江源各台站降水量资料。降水量序列缺测值拟采用多元线性回归插补,经比对插值时就近选择拟插补台站临近两台站数据,并运用二元线性回归方程插补时的相关系数,普遍高于选用单站插补的一元线性回归方程所得到的结果,且均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,据此文中基于临近台站优先原则,选取二元线性回归模型插补缺测数据。具体分析时,澜沧江源区选取囊谦和杂多2个台站,黄河源区选取达日、兴海、玛多、久治和玛沁5个台站,长江源区选取玉树、曲麻莱、清水河、伍道梁、沱沱河和班玛6个台站。分析四季降水量变化时,春季时间为3-5月,夏季的为6-8月,秋季的为9-11月,冬季的为当年12月-次年2月。为减少气候序列中季节变化并使数据序列符合平稳随机过程的特性,文中选用距平值以滤去降水序列的月份变化影响,并据世界气象组织(WMO)相关规定,选取1981-2010年间的30年降水量均值作为多年均值计算研究区年、季平均降水量距平值。

3.2 分析方法

文中选用线性倾向和滑动平均法,拟合研究区降水序列年内、年际变化趋势;选取累积距平分析、M-K(Mann-Kendall)法、改进的有序聚类分析,以及不同子序列时间尺度上的滑动t检验、Le page等多种方法综合诊断研究区降水序列年、季突变,并借助EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition)推求三江源地区降水序列显著周期。

线性倾向估计和滑动平均方法是拟合时间序列趋势变化最简单有效的方法,前者通过线性回归求解信号序列相对于时间变化的相关性变动来确定其变化趋势,后者则采用低通滤波的方式来确定^[28]。累积距平分析、M-K法、改进的有序聚类分析、滑动t检验等均是诊断时间序列突变发生时间的有效方法,主要优缺点如下:累积距平分析可通过距平累积值变动情况,直观判断序列突变点;M-K法无需数据样本遵从一定分布,可避免少数异常值的干扰,但一般只有1个突变点;改进的有序聚类分析法,兼顾同类离差最小和异类均方差求和最小原则,分析结果较传统有序聚类法有效且可比性更强,突变点个数一般为1~2个;Le page法、滑动t检验均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不一而异;BG(Bernaola Galvan)分割算法将突变检测视为分割问题,将序列视作多个不同均值的子序列,通过找出各子序列最大均值差是否满足不同统计显著性来判断突变点^[29],分析时需设最小分割尺度,不太适用于短时间序

列。M-K法、Le page法、滑动t检验、BG分割算法等属均值突变检测，改进的有序聚类属方差突变检测，为综合诊断研究区降水量序列突变结果，文中拟集成上述方法，以综合比对判断研究区降水量序列突变点。

EEMD即集合经验模态分析，是改进的经验模态分析方法，其中的EMD（Empirical Mode Decomposition）与基于谐波基和小波基函数的傅里叶分析和小波分析不同，EMD无需指定所分析离散时间序列的基函数，直接对时间序列进行经验模式分解，从原离散无序的信号序列中提取各尺度趋势分量，剥离出的有限本征模函数IMF（Intrinsic Mode Function）分量体现了基于不同时间尺度的原信号序列的局部特征。与小波谱相比，基于EMD求解的Hilbert谱在时频域的分辨率均高于小波谱，信噪比高，非常适合非线性、非平稳信号序列分析^[30]。改进的EMD即EEMD，在原有基础上通过添加人为的白噪声和求取集合平均的方法，克服了使用EMD分解信号序列时可能出现的混频现象^[31]，近年来，EEMD方法被频繁用于检测气候水文信息序列的尺度变化特征。文中分析时，对拟分解数据进行了前后5年的数据延拓以消除端点效应，并在归一化后的降水序列加入信噪比为0.02的100组扰动白噪声，随后采用平滑技术滤除造成混频的奇异值。

R/S分析方法即重标极差分析法（Rescaled Range Analysis），是由英国水文学家Hurst在分析尼罗河多年水文变动趋势强度时提出的，计算相对简单，其值可以有效探索非线性系统趋势变化^[32]。其计算值介于0~0.5之间表明序列变化具有反持续性，等于0.5表明序列具有随机性不存在趋势变动，大于0.5则表示序列变化为正持续性。

4 结果分析

4.1 三江源降水量变化趋势分析

1960-2015年全区年降水变化趋于弱增（图2），年降水的气候倾向率为20.048 mm/10a，这与春夏季增湿率明显高于秋夏两季，夏季降水变幅不明显及秋季降水减幅相对较弱等原因有关，春季降水增幅大则与降水日数增多、强度增大等原因直接相关（图3）。降水量增加的根本原因包括气候变暖导致陆地水循环加快、水汽含量增加和有利的天气形势等^[33]。分源区看，澜沧江、黄河、长江源区年降水气候倾向率分别为7.524 mm/10a、4.403 mm/10a、8.031 mm/10a（图3），这与第三次气候变化国家评估报告中提出的1961-2012年黄河以西降水量趋于增加，且其年代际变化特征显著的结论一致^[6]。此外，全区、各子源区年降水变动的M-K趋势分析结果也与气候倾向率分析结果完全一致。

从年代尺度上看（图2），全区20世纪60年代中后期以前降水量波动相对平稳，60年代中后期至70年代末期降水量波动下降，80年代中期前年降水波动上升，90年代初期到21世纪初期则明显减少随后又显著增加；分源区看，据三源区各年代降水量统计表（表1），长江源区各年代最高、最低降水量、极差和年降水均值几乎都低于澜沧江、黄

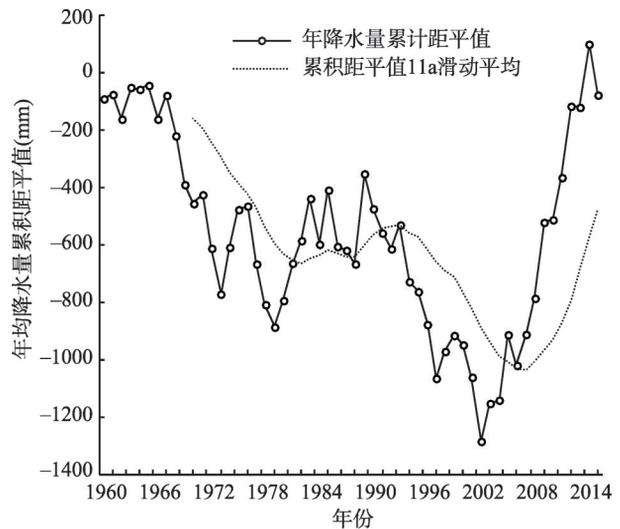


图2 1960-2015年青海三江源地区降水量累积距平值
Fig. 2 The accumulative anomaly of precipitation in Three Rivers' Headstream Region during 1960-2015

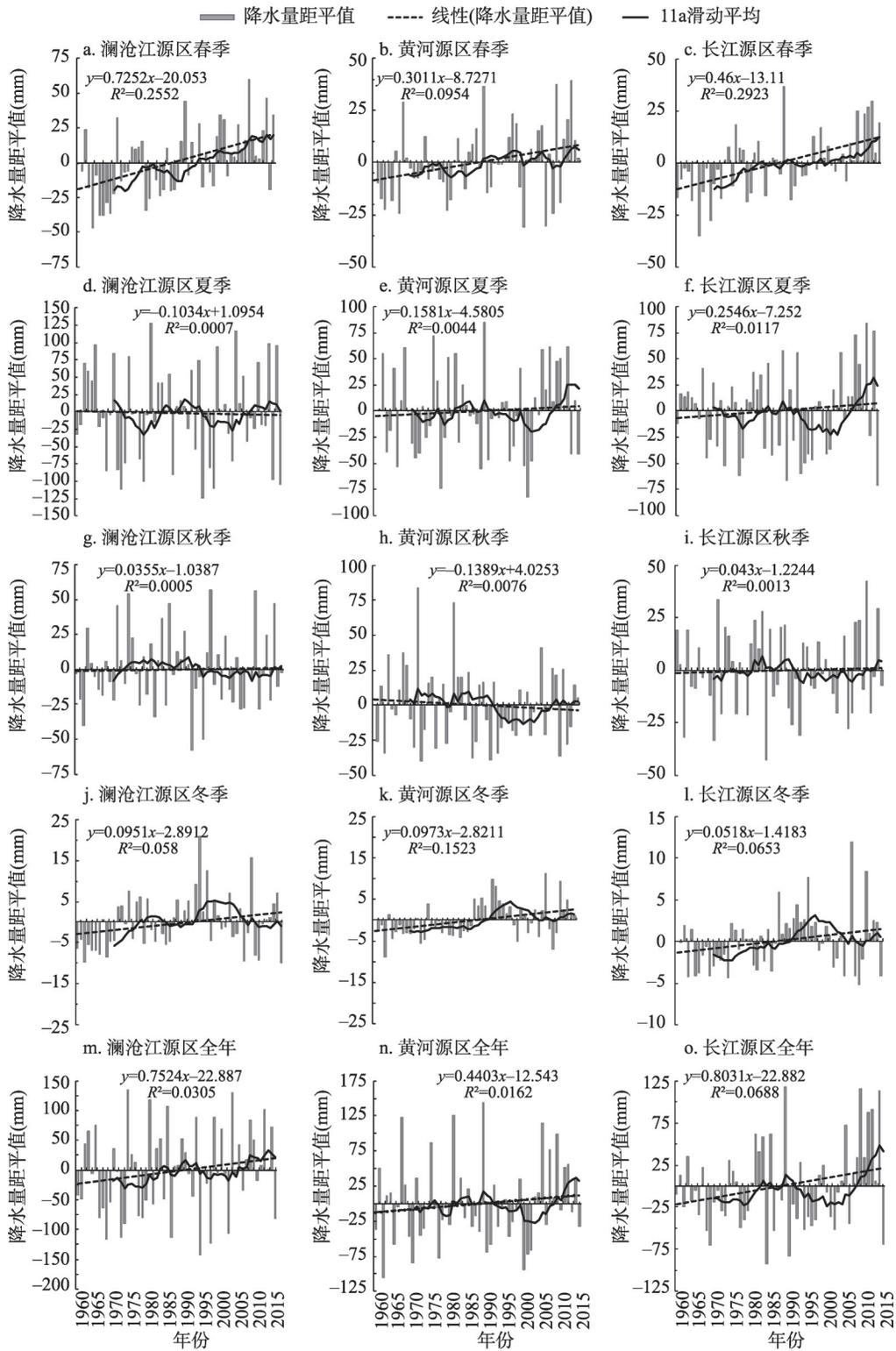


图3 1960-2015年青海三江源地区年、季降水量距平值变化图

Fig. 3 The change of annual and seasonal precipitation anomaly in the Three Rivers' Headstream Region during 1960-2015

表1 三江源地区不同年代降水量平均值、最高值、最低值、极差计算表(mm)

Tab. 1 The average, maximum, minimum value and range value of precipitation in different ages in the Three Rivers' Headstream Region (mm)

		多年平均值	20世纪60年代	20世纪70年代	20世纪80年代	20世纪90年代	21世纪初10年	2010-2015年
降水量 平均值	澜沧江源区	537.40	514.95	517.34	553.71	523.55	561.02	551.33
	黄河源区	500.43	516.82	508.89	530.25	490.69	515.71	522.01
	长江源区	445.71	430.41	429.25	462.60	419.48	454.08	488.65
降水量 最高值	澜沧江源区	672.30	613.50	672.30	656.15	626.45	666.40	638.40
	黄河源区	643.70	667.63	603.98	635.07	546.85	613.90	582.17
	长江源区	562.80	479.51	474.40	562.80	472.40	560.22	557.57
降水量 最低值	澜沧江源区	394.10	421.70	424.05	424.90	394.10	431.30	456.40
	黄河源区	395.22	414.58	427.35	462.18	440.40	409.78	458.80
	长江源区	352.37	374.97	395.03	352.37	361.93	392.93	376.12
降水量 极差	澜沧江源区	278.20	191.80	248.25	231.25	232.35	235.10	182.00
	黄河源区	248.48	253.06	176.63	172.88	106.45	204.12	123.37
	长江源区	210.43	104.54	79.37	210.43	110.47	167.28	181.45

河源区的,属相对少雨区,但其年降水气候倾向率值最高(图3)。由于澜沧江源区受西南季风作用影响更强烈,年降水均值最高,除20世纪60年代外,其他年代的最高降水量、极差均高于黄河、长江源区,是相对多雨区,黄河源区年降水变化居于两者之间。

全区年、夏季降水变化相似(图3)。从各子源区降水情况看,澜沧江、黄河源区季增湿率变化次序均为春夏秋冬(澜沧江源区夏季、黄河源区秋季降水呈弱减趋势),长江源区季增湿率变化次序依次为春夏秋冬且均为正值。比较来看,除秋季外,长江、黄河源区季降水变动趋势极为相似,澜沧江源区冬季降水年代际双峰型震荡异于其他两区。进一步对比发现,虽然长江源区年均降水顺次低于澜沧江、黄河源区,但其增湿率最高属相对增湿高地,澜沧江次之,黄河源区增湿率最低,属增湿洼地。

经对比图3及研究区分年代降水变动统计表(表1)可知,年、夏季降水在20世纪70年代初期-80年代中期/20世纪90年代后期-21世纪10年代前后偏多,为相对湿期,20世纪60年代/80年代中期-90年代后期/21世纪10年代前后降水量偏少,为相对干期,20世纪60-90年代黄河源区年、夏季降水量增幅相对较小;春季降水量总体自20世纪60年代中期以来趋于增加,20世纪80-90年代末期有弱度减湿趋势,20世纪90年代末期以来增湿尤为明显,黄河源区在20世纪90年代后期以前的增湿幅度弱于其他两区;秋季降水量在20世纪60-70年代中期/90年代中后期-21世纪10年代前后偏多,而20世纪70-90年代中期、21世纪10年代前后以来偏少,长江源区20世纪60-70年代湿期起始时间较其他两源区滞后5a左右;全源区及各子源区冬季降水基本自20世纪70-90年代/21世纪10年代前后以来偏多,20世纪90年代初期-21世纪10年代前后偏少,澜沧江源区湿期起始时间较其他两源区提早10a左右。

经比较研究区及其周边地区年均降水量气候倾向率(表2)可知,3个子源区增湿率均低于1961-2010年青藏高原的增湿率,除黄河源区的略低外,全源区和澜沧江、长江源区的增湿率均高于青海湖南部地区、西北地区的,特别是西南地区的。可见,因研究时段不一,研究区增湿率虽较青藏高原低,但与周边地区相比仍属相对增湿区。

借助ANUSPLIN进行的降水量空间插值,综合考虑了海拔、经纬度等协变量,其实际插值精度较高,非常适合于地形条件复杂的山地、高原地区的空间插值^[23],文中据此分析了研究区年、季降水空间分布特征(图4)。由图4可知,三江源地区降水空间分布

表2 青海三江源及其周边地区降水量气候倾向率比较

Tab. 2 The increase amplitude of precipitation in the Three Rivers' Headstream Region and its surrounding areas

区域	研究时段	增湿幅度(mm/10a)	区域	研究时段	增湿幅度(mm/10a)
三江源全区	1960-2015年	20.048	青海湖南部地区 ^[34]	1961-2013年	4.42
澜沧江源区	1960-2015年	7.524	青藏高原 ^[35]	1961-2010年	9.329
黄河源区	1960-2015年	4.403	西北地区 ^[36]	1961-2014年	4.87
长江源区	1960-2015年	8.031	西南地区	1960-2016年	-7.61

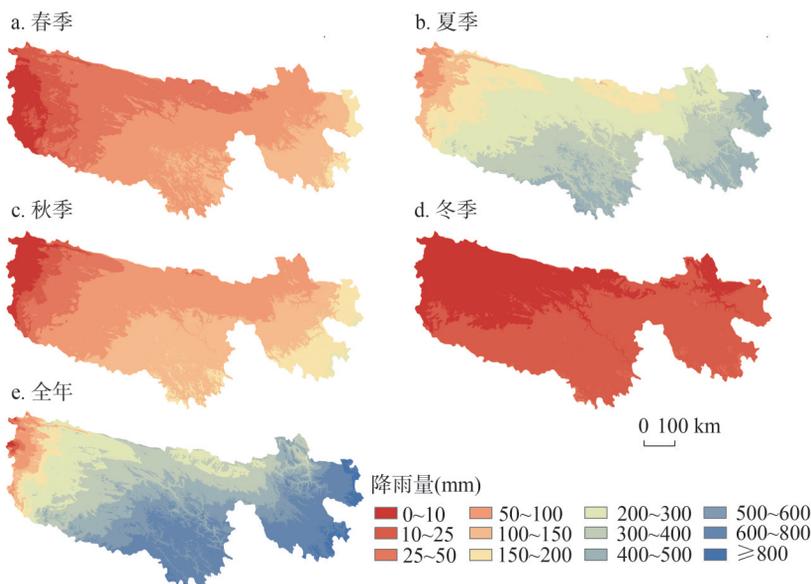


图4 1960-2015年三江源年、季均降水量空间分布图

Fig. 4 The annual and seasonal precipitation in the Three Rivers' Headstream Region during 1960-2015

的季节和区域差异明显, 年降水空间分布与雨季特别是夏季降水的空间分布相近, 年降水和春夏秋三季降水自东南向西北均随海拔升高而减少, 该分布特征主要是由地形以及对流层气流系统的辐合、辐散等影响造成的; 冬季降水量最低且空间差异小, 但其增幅仍自东南向西北随海拔增高而弱减。具体来看, 夏季降水量减少区依次为久治、玉树、囊谦、班玛、清水河, 秋季降水量减少区为久治、达日、杂多、班玛、玉树、玛沁。

另据图3可知, 黄河源区是主要的秋季减湿区和冬季增湿区, 澜沧江源区是主要的春季增湿区和夏季减湿区, 长江源区是相对的夏季增湿区, 说明雨季平均海拔较高的长江源区降水量增加值高于其他两源区, 冬季则相反。

为了解各地理单元降水量的影响因子, 文中拟合了降水量增幅最显著的春夏冬三季降水量与经纬度、海拔之间的复相关关系^[19]: $y_1 = 66.2564 - 1.9973w + 0.0146j + 0.0011h$, $y_2 = -78.6872 + 3.6889w - 0.569j + 0.0028h$ 和 $y_3 = -17.1082 - 0.219w + 0.2073j + 0.00128h$, 式中: y_1 、 y_2 、 y_3 分别为春夏冬三季季均降水量气候倾向率; w 、 j 分别为十进制的纬度和经度; h 为海拔 (m)。春、夏季降水量气候倾向率与三者的复相关系数通过了0.001的显著性水平检验, 冬季的通过了0.01的显著性水平, 说明春夏冬三季降水量增率自东向西, 从南到北随海拔升高而增加; 春季降水量增率与纬度呈负相关, 与经度正相关; 夏季反之; 冬季降水增率则随经度升高而增加, 随纬度升高而减少。三江源地区春季降水与三

者之间的复相关系数分别为-0.818、-0.0435、-0.0125,夏季的为0.7168、-0.5238、0.5843,冬季的为-0.2328、0.3333和0.0483,说明影响春季降水气候倾向率的因子依次为纬度、经度和海拔,夏、冬两季分别为纬度、海拔和经度以及经度、纬度和海拔。

4.2 三江源降水量序列突变分析

表3是基于累积距平、M-K、改进的有序聚类等算法的3个子源区年、季均降水量突变点分布情况。经比对,澜沧江、黄河、长江源区年均降水序列的突变点依次为:无、2002年、2004年,季均降水量突变点(排序以突变强弱程度为依据)顺次为:澜沧江源区:1988年与1989年/1998年、无、无、1969年与1970年/1985年/1995年;黄河源区:1984年与1985年、无、无、1986年/1996年与1997年;长江源区:1972年/1996年与1997年/2007年、2002年、无、1986年/1973年/1997年。总体来看,各子源区年降水序列突变不显著,长江源区突变程度相对较高且其变点分布较为复杂,黄河、长江源区年降水大致在21世纪早期发生了较显著转湿突变,澜沧江源区突变不显著;分季节来看,冬、春降水突变较夏季显著,冬季降水突变时间相对一致,秋季降水序列自稳性强,对外部条件变化不敏感,无明显突变(表3)。此外,按1755年为太阳活动第一周的国际规定推算,各子源区降水量序列转湿突变多发生在太阳黑子活动极小年前后。

4.3 基于EEMD的降水量序列显著周期分析

图5~图10依次是借助EEMD实现的各子源区年、季均降水量距平序列IMFs分量图。表4是各源区年均降水量序列各IMFs分量的震荡周期及其对应的相关系数和方差贡献率,表4中相关系数为各分量显著性检验结果,各分量的方差贡献率则表征其对原序列的影响程度。

由图5~图6、表4可知,澜沧江源区年降水平均周期为准3~5 a、14 a、28 a、32 a,方差分析结果表明IMF1-2特别是IMF1分量对年降水变化有重要贡献,通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。对季节的周期分析发现,春季降水存在准3~6 a、20 a、133 a、67 a多尺度变化,夏季降水存在准2~5 a、20 a、30 a、80 a的平均周期,秋季降水存在准2~5 a、15 a、37 a、67 a平均周期,冬季降水存在准3~6 a、23 a、40 a、89 a的周期变化。IMF1-3特别是IMF1分量是季降水量变化的重要贡献者,冬季降水序列中IMF4方差贡献率也较高(9.75%),其置信水平均为99%。

图7与图8揭示了黄河源区年、季均降水量序列各IMFs分量变动情况。由图7~图8、表4可知,年降水序列的震荡周期依次为准3~9 a、14 a、33 a、67 a,年降水变化主要由IMF1-3,特别是IMF1决定,置信水平顺次为99%、99%和95%。对季节的周期分析发现,春季降水震荡周期为准3~7 a、14 a、25 a、80 a,其他三季的震荡周期顺次为准3~8 a、14 a、27 a、72 a,准4~7 a、16 a、22 a、57 a和准3~6 a、18 a、31 a、67 a。季降水量变化取决于IMF1-3,特别是IMF1,秋季尤为显著,冬季序列中IMF3方差贡献率高于其他三季,除秋季IMF2相关系数为0外,其他三季IMF1-3显著性检测大于95%。

图9与图10表征了长江源区年、季均降水量序列IMFs分量变动情况,由图9~图10、表4可知,年、季震荡周期依次为准2~4 a、8 a、32 a、100 a,准3~8 a、15 a、35 a、89 a,准2~6 a、11 a、31 a、80 a,3~10 a、20 a、33 a、89 a,准3~6 a、13 a、26 a、73 a。年、季降水量变化主要由IMF1-2决定,春季降水IMF3以及夏季IMF4方差贡献值分别高于之前的高频分量,除秋季(95%)外其他三季显著性水平均为99%。

从三源区年、季降水序列震荡周期来看,2~8 a的年际周期与ENSO事件的2~7 a周期基本一致,说明ENSO事件对青海三江源地区降水变化有深刻影响,但三源区年、季降水周期与太阳黑子活动11 a周期性并无明显相关。

表3 青海三江源地区降水量序列突变点综合诊断表
Tab. 3 Synthetic diagnosis results about catastrophe point of precipitation series in Three Rivers' Headstream Region during 1960-2015

检验方法	年际突变点			
	澜沧江源区	黄河源区	长江源区	澜沧江源区
				四季突变点
				黄河源区
				长江源区
累计距平分析	1965, 1979, 1993, 1997	1968, 1980, 1989, 2002	1979, 1989, 2003	春: 1984, 1998, 2008; 夏: 1978, 1989, 2002; 秋: 1983, 2001; 冬: 1986, 1997; 春: 1985 ^{***} , 1992 ^{***} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1982 ^{**} ; 春: 25a, 20a, 10a, 5a 子序列: -; 1988 ^{**} ; 15a 子序列: 1984 [*] ; 10a 子序列: 1988 ^{**} ; 5a 子序列: 1970 [*] , 1978 ^{**} ; 夏: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 5a 子序列: 1970, 1989 [*] ; 冬: 25a 子序列: 1985 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 [*] , 1984 [*] ; 15a 子序列: -; 10a 子序列: 1970 ^{***} , 1985 ^{**} , 1995 [*] ; 5a 子序列: 1969 [*] , 1985 ^{**} ; 春: 25a 子序列: 1988 ^{**} ; 20a 子序列: 1988 ^{**} ; 15a 子序列: 1998 [*] ; 10a 子序列: 1970 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 10a 子序列: 1970, 1989 [*] ; 冬: 25a 子序列: 1985 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 [*] , 1984 [*] ; 15a 子序列: -; 10a 子序列: 1970 ^{***} , 1985 ^{**} , 1995 [*] ; 5a 子序列: 1969 [*] , 1985 ^{**} ; 春: 25a 子序列: 1988 ^{**} ; 20a 子序列: 1988 ^{**} ; 15a 子序列: 1991 [*] , 1995 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: -; 10a 子序列: 2002 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 1989 [*] ; 10a 子序列: 1994 [*] , 2004 [*] ; 冬: 25a, 20a, 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1996 [*] , 1986 ^{**} ; 春: -; 夏: -; 秋: -; 冬: 1986 ^{**} ; 春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1988 ^{**} , 1998 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1975, 1996; 夏: 1967, 1978, 2002; 秋: 1970, 1989, 2007; 冬: 1986; 春: 1997 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1974 ^{**} ; 春: 25a 子序列: -; 20a 子序列: 1980 [*] ; 15a 子序列: -; 10a 子序列: 1972 [*] ; 5a 子序列: 1996 [*] , 2008 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: - 10a 子序列: 2003 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{***} ; 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 [*] , 1997 [*] ; 春: 25a, 20a, 5a 子序列: -; 15a 子序列: 1975 [*] ; 10a 子序列: 1972 [*] ; 夏: 25a, 20a 子序列: -; 15a 子序列: 1997 [*] ; 10a 子序列: 1997 [*] , 2002 [*] ; 5a 子序列: 1965 [*] ; 秋: 25a, 20a, 15, 10a 子序列: -; 5a 子序列: 1968 [*] -1969 [*] ; 冬: 25a, 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 [*] , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 [*] , 1995 [*] , 1997 [*] ; 春: 1972 [*] , 2007 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1986 ^{**} ; 春: 1972 ^{**} ; 夏: 2014 [*] ; 秋: -; 冬: -;
M-K法	-	-	-	春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1969 ^{**} ; 春: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 1988 ^{**} ; 15a 子序列: 1988 ^{**} , 1993 [*] , 1998 ^{**} ; 10a 子序列: 1988 ^{**} ; 5a 子序列: 1970 [*] , 1978 ^{**} ; 夏: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a 子序列: -; 5a 子序列: 1970, 1989 [*] ; 冬: 25a 子序列: 1985 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 [*] , 1984 [*] ; 15a 子序列: -; 10a 子序列: 1970 ^{***} , 1985 ^{**} , 1995 [*] ; 5a 子序列: 1969 [*] , 1985 ^{**} ; 春: 25a 子序列: 1988 ^{**} ; 20a 子序列: 1988 ^{**} ; 15a 子序列: 1991 [*] , 1995 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: -; 10a 子序列: 2002 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 1989 [*] ; 10a 子序列: 1994 [*] , 2004 [*] ; 冬: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: 1985 ^{**} ; 10a 子序列: 1985 ^{**} ; 春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1988 ^{**} , 1998 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1975, 1996; 夏: 1967, 1978, 2002; 秋: 1970, 1989, 2007; 冬: 1986; 春: 1997 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1974 ^{**} ; 春: 25a 子序列: -; 20a 子序列: 1980 [*] ; 15a 子序列: -; 10a 子序列: 1972 [*] ; 5a 子序列: 1996 [*] , 2008 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: - 10a 子序列: 2003 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{***} ; 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 [*] , 1997 [*] ; 春: 25a, 20a, 5a 子序列: -; 15a 子序列: 1975 [*] ; 10a 子序列: 1972 [*] ; 夏: 25a, 20a 子序列: -; 15a 子序列: 1997 [*] ; 10a 子序列: 1997 [*] , 2002 [*] ; 5a 子序列: 1965 [*] ; 秋: 25a, 20a, 15, 10a 子序列: -; 5a 子序列: 1968 [*] -1969 [*] ; 冬: 25a, 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 [*] , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 [*] , 1995 [*] , 1997 [*] ; 春: 1972 [*] , 2007 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1986 ^{**} ; 春: 1972 ^{**} ; 夏: 2014 [*] ; 秋: -; 冬: -;
滑动t检验法	25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; -;	25a, 20a, 15a, 5a 子序列: -; 10a 子序列: 1973 ^{**} , 2004 [*] ; 2004 [*] ;	25a, 20a, 15a, 5a 子序列: -; 10a 子序列: 1973 ^{**} , 2004 [*] ; 2004 [*] ;	春: 1984, 1998, 2008; 夏: 1978, 1989, 2002; 秋: 1983, 2001; 冬: 1986, 1997; 春: 1985 ^{***} , 1992 ^{***} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1982 ^{**} ; 春: 25a, 20a, 10a, 5a 子序列: -; 15a 子序列: 1984 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: 2004 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a, 20a, 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1986 ^{**} , 1997 [*] ; 春: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a, 20a, 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1986 ^{**} , 1997 [*] ; 春: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1986 ^{**} , 1996 ^{**} , 1986 ^{**} ; 春: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: 1985 ^{**} ; 10a 子序列: 1985 ^{**} ; 春: 25a 子序列: 1988 ^{**} ; 20a 子序列: 1988 ^{**} ; 15a 子序列: 1991 [*] , 1995 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: -; 10a 子序列: 2002 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 1989 [*] ; 10a 子序列: 1994 [*] , 2004 [*] ; 冬: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: 1985 ^{**} ; 10a 子序列: 1985 ^{**} ; 春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1988 ^{**} , 1998 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1975, 1996; 夏: 1967, 1978, 2002; 秋: 1970, 1989, 2007; 冬: 1986; 春: 1997 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1974 ^{**} ; 春: 25a 子序列: -; 20a 子序列: 1980 [*] ; 15a 子序列: -; 10a 子序列: 1972 [*] ; 5a 子序列: 1996 [*] , 2008 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: - 10a 子序列: 2003 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{***} ; 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 [*] , 1997 [*] ; 春: 25a, 20a, 5a 子序列: -; 15a 子序列: 1975 [*] ; 10a 子序列: 1972 [*] ; 夏: 25a, 20a 子序列: -; 15a 子序列: 1997 [*] ; 10a 子序列: 1997 [*] , 2002 [*] ; 5a 子序列: 1965 [*] ; 秋: 25a, 20a, 15, 10a 子序列: -; 5a 子序列: 1968 [*] -1969 [*] ; 冬: 25a, 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 [*] , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 [*] , 1995 [*] , 1997 [*] ; 春: 1972 [*] , 2007 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1986 ^{**} ; 春: 1972 ^{**} ; 夏: 2014 [*] ; 秋: -; 冬: -;
BG分割算法	-	-	2008 [*]	春: -; 夏: -; 秋: -; 冬: 1986 ^{**} ; 春: 1980 ^{***} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1986 ^{**} ;
改进的有序聚类分析	-	-	-	春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1988 ^{**} , 1998 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1989 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1970 ^{**} ; 春: 1975, 1996; 夏: 1967, 1978, 2002; 秋: 1970, 1989, 2007; 冬: 1986; 春: 1997 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1974 ^{**} ; 春: 25a 子序列: -; 20a 子序列: 1980 [*] ; 15a 子序列: -; 10a 子序列: 1972 [*] ; 5a 子序列: 1996 [*] , 2008 [*] ; 夏: 25a, 20a, 15a, 5a 子序列: - 10a 子序列: 2003 ^{**} ; 秋: 25a, 20a, 15a, 10a, 5a 子序列: -; 冬: 25a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{***} ; 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 ^{**} , 1986 [*] , 1997 [*] ; 春: 25a, 20a, 5a 子序列: -; 15a 子序列: 1975 [*] ; 10a 子序列: 1972 [*] ; 夏: 25a, 20a 子序列: -; 15a 子序列: 1997 [*] ; 10a 子序列: 1997 [*] , 2002 [*] ; 5a 子序列: 1965 [*] ; 秋: 25a, 20a, 15, 10a 子序列: -; 5a 子序列: 1968 [*] -1969 [*] ; 冬: 25a, 15a 子序列: 1986 ^{**} ; 20a 子序列: 1981 ^{**} ; 10a 子序列: 1973 [*] , 1986 ^{**} , 1996 ^{**} ; 5a 子序列: 1973 [*] , 1995 [*] , 1997 [*] ; 春: 1972 [*] , 2007 ^{**} ; 夏: -; 秋: -; 冬: 1986 ^{**} ; 春: 1972 ^{**} ; 夏: 2014 [*] ; 秋: -; 冬: -;

注: BG分割算法最小分割尺度 25a; *表示通过0.05的显著性检测; **表示通过0.01的显著性检测; ***表示通过0.001的显著性检测。

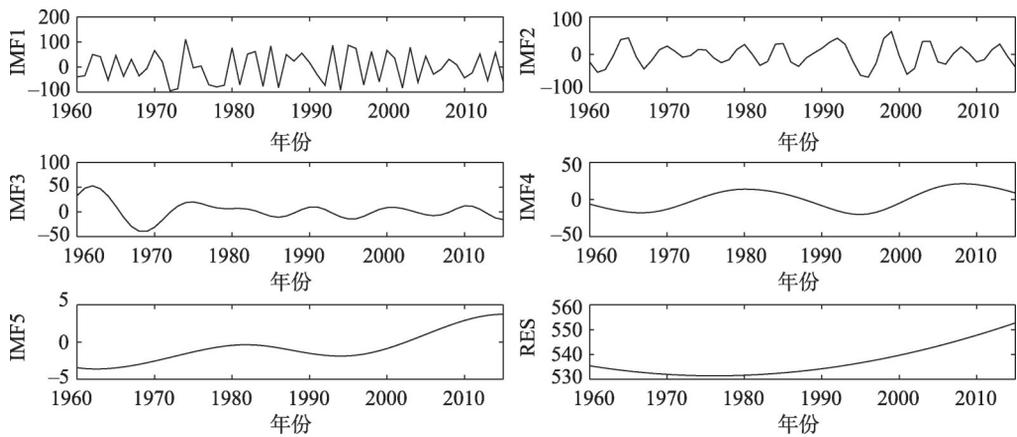


图5 基于EEMD的澜沧江源区年均降水量序列趋势分解

Fig. 5 The trend decomposition of annual precipitation in the Lantsang River Headwater Region based on EEMD

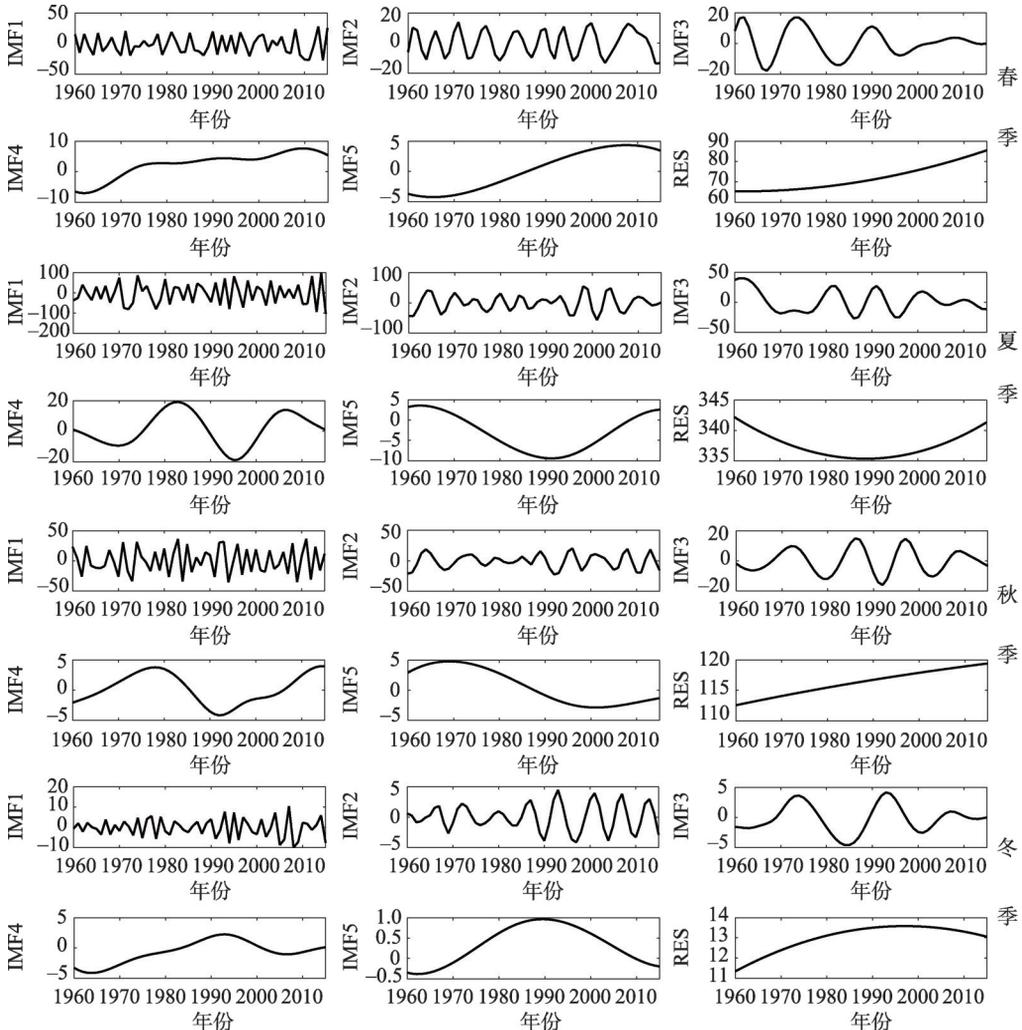


图6 基于EEMD的澜沧江源区季均降水量序列趋势分解

Fig. 6 The trend decomposition of seasonal precipitation in the Lantsang River Headwater Region based on EEMD

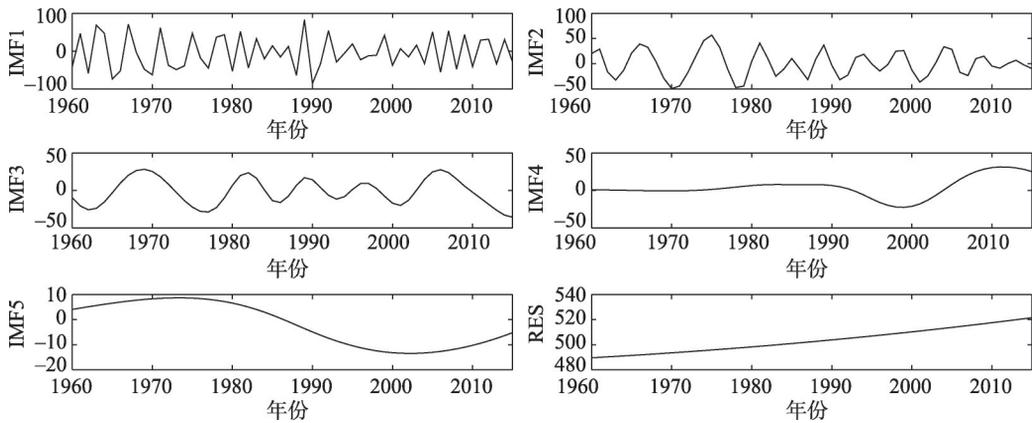


图7 基于EEMD的黄河源区年均降水量序列趋势分解

Fig. 7 The trend decomposition of annual precipitation in the Yellow River Headwater Region based on EEMD

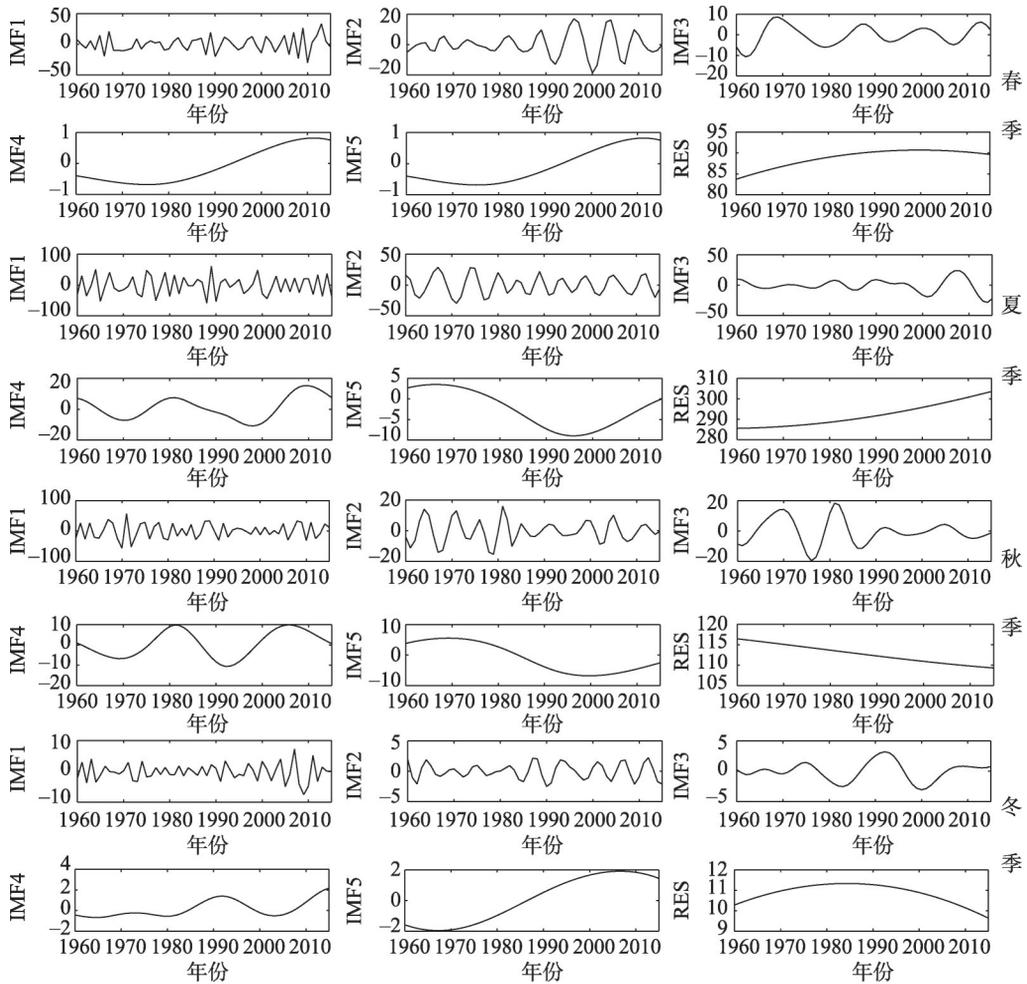


图8 基于EEMD的黄河源区季均降水量序列趋势分解

Fig. 8 The trend decomposition of seasonal precipitation in the Yellow River Headwater Region based on EEMD

表4 三江源区年均降水量序列IMF分量周期、相关系数及方差贡献率

Tab. 4 The period, correlation coefficient and the variance contribution rate of the annual precipitation in Three Rivers Headstream Region during 1960-2015

	周期(a)			相关系数			方差贡献率(%)		
	澜沧江	黄河	长江	澜沧江	黄河	长江	澜沧江	黄河	长江
IMF1	2.88	2.84	2.44	0.83***	0.79***	0.75***	72.59	59.60	57.34
IMF2	5.03	8.60	4.19	0.41***	0.47***	0.49***	16.21	20.19	18.58
IMF3	13.56	14.29	7.69	0.23**	0.25**	0.30***	6.65	9.65	5.71
IMF4	27.59	33.33	32.00	0.22**	0.32***	0.45***	3.70	5.53	13.98
IMF5	32.00	66.67	100	0.20*	-0.04	0.32***	0.08	2.25	0.18
RES	/	/	/	0.17*	0.14	0.33***	0.78	2.77	4.21

注：*表示通过0.1的显著性检测；**表示通过0.05的显著性检测；***表示通过0.01的显著性检测。

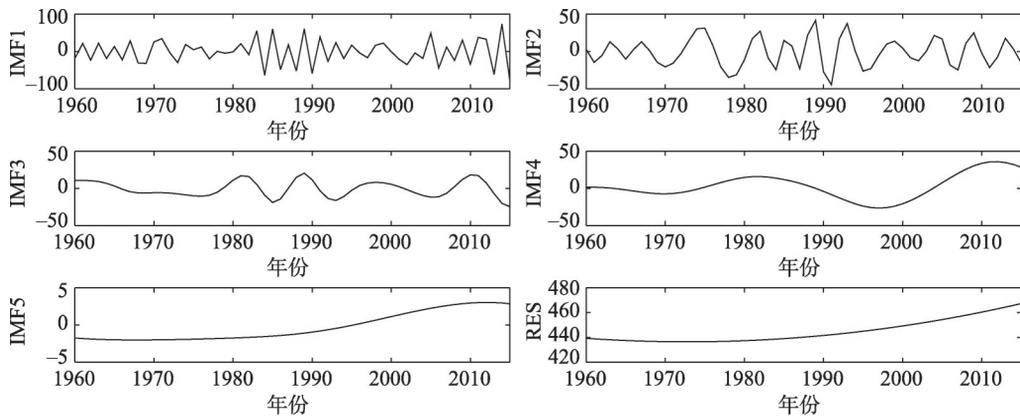


图9 基于EEMD的长江源区年均降水量序列趋势分解

Fig. 9 The trend decomposition of annual precipitation in the Yangtze River Headwater Region based on EEMD

4.4 三江源降水量序列变化趋势预测

基于EEMD的研究区降水量序列RES (Residua) 变化分析(图5~图10)结果显示,澜沧江源区年降水自20世纪70年代中后期以来增速明显,此前降幅低于随后的增幅。春季降水的增幅大于秋季,20世纪80年代中后期夏季降水趋于增加,此前减幅略高于随后的增幅,20世纪90年代后期以来冬季降水趋于减少,减幅大于之前的增幅;黄河源区年、夏季降水呈明显增加趋势,春季降水自20世纪90年代后期以来趋于弱度减少,减幅明显小于之前的增幅,秋季降水一直呈弱度减少趋势,冬季降水自20世纪80年代中期以来呈减少趋势,减幅高于此前增幅;长江源区年降水自20世纪70年代中期以来呈较明显的增加趋势,春季降水一直趋于弱度增加,夏季降水从20世纪80年代初期以来趋于增加,增幅高于之前的减幅,秋季降水自21世纪初期以来趋于弱度减少,减幅显著低于之前的增幅,冬季降水自20世纪80年代中后期以来趋于减少,减幅略较之前的增幅高。

M-K趋势分析结果显示,除三源区春季降水及澜沧江、黄河源区冬季降水外,研究区年、夏秋季降水均未通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检测。长江源区春季降水增幅最高,澜沧江、黄河源区次之;冬季降水变化中黄河源区的最强,澜沧江、长江源区的次之。年降水趋势变化依次为长江、澜沧江、黄河源区;澜沧江夏季降水呈弱减趋势,黄河、长江源区的弱增,且黄河源区的增幅略高;黄河源区秋季降水呈较明显减少趋势,长江源区的弱增,澜沧江源区的无变动。

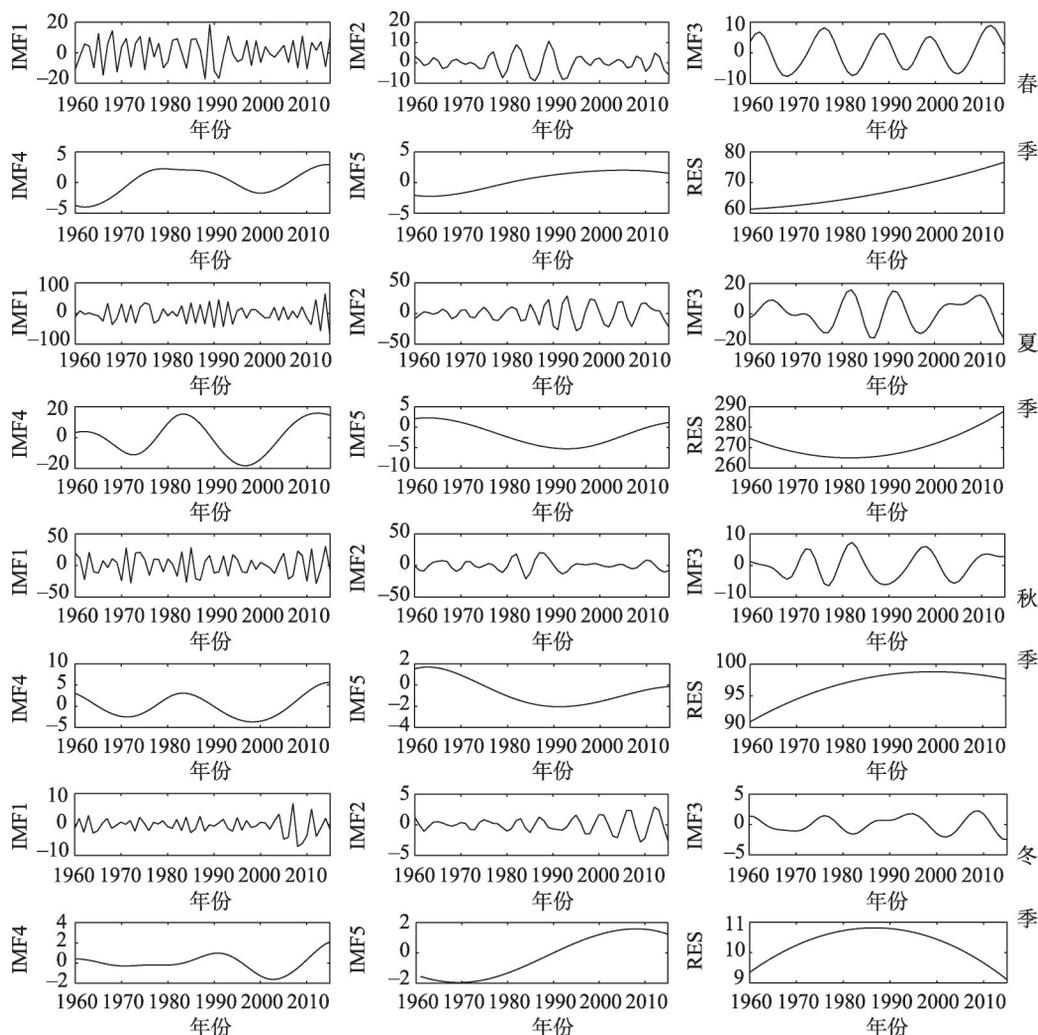


图10 基于EEMD的长江源区季均降水量序列趋势分解

Fig. 10 The trend decomposition of the seasonal precipitation in the Yangtze River Headwater Region based on EEMD

从全区年、季降水R/S分析结果看(表5),除澜沧江源区夏季降水Hurst指数 < 0.5 外,研究区年降水和春秋冬三季降水Hurst指数均 > 0.5 (长江源区秋季降水Hurst指数为0.51)。总体来说,研究区年、季降水量未来增湿趋势为冬 $>$ 春 $>$ 年 $>$ 秋 $>$ 夏,澜沧江源区夏季降水趋于弱减,长江源区秋季降水趋于弱增,研究区其他年、季降水量未来变化趋势则呈现强的持续性变化(即未来一段时期,降水量明显增加)。

表5 三江源区降水量序列Hurst指数

Tab. 5 The Hurst exponent of seasonal and annual precipitations in Three Rivers' Headstream Region

区域	降水量序列				
	年均降水量	春季降水量	夏季降水量	秋季降水量	冬季降水量
澜沧江源区	0.552	0.822	0.493	0.546	0.729
黄河源区	0.606	0.579	0.596	0.633	0.863
长江源区	0.652	0.696	0.677	0.51	0.787

5 结论与讨论

5.1 结论

本文综合多方法剖析,揭示了三江源区较长时段降水序列的时空特征,主要结论为:

(1) 与周边地区相比,研究区年降水量序列总体呈弱增趋势,21世纪以来降水量显著增加,降水量及其气候倾向率的季节、空间差异显著。

(2) 年、季降水量总体呈现自东南向西北递减的变化趋势。长江源区是相对少雨的增湿高地,黄河源区为雨量居中的增湿洼地。澜沧江源区夏季降水和黄河源区秋季降水呈弱减趋势,降水量弱减区在空间上呈斑块状分布。

(3) 年、季降水量年代际和增湿率的变化差异较明显。3个子源区夏季降水年代际变动与年降水趋于一致,其他三季降水和年代际变化则不尽相同,长江源区湿期起始时间较晚,澜沧江源区的相对较早。

(4) 春夏降水气候倾向率与经纬度、海拔的复相关性显著高于冬季。影响春夏冬三季降水气候倾向率的因子不尽相同,雨季海拔较高的长江源区降水量增加值最高,冬季则相反。

(5) 各子源区年、季降水突变并不显著,主要发生在21世纪早期,年、季降水量突变点多为转湿变点,且多发生在太阳黑子活动极小年前后。冬春降水突变较夏季显著,冬季降水突变时间相对一致,秋季降水序列自稳性强,无显著突变。

(6) ENSO事件影响下年际和低值的年代际显著周期是造成降水量变动的主要因素,且显著周期的区域、季节差异明显。长江源区显著周期及其对序列变化的贡献率异于其他两区。

(7) 各子源区年、季降水未来变化趋势的区域、阶段和季节差异明显。除澜沧江夏季降水趋于极弱度减少外,其他年、季降水量变化大体呈现增幅不一的转湿趋势。此外,相比而言,长江源区在表征高原气候变化方面更具有代表性。

5.2 讨论

就研究区降水序列变化趋势而言,文中研究结论与第三次气候变化国家评估报告中西北地区的变动情况基本一致,即降水量呈弱增湿趋势,气候变化的季节性明显,冬春增湿程度高于夏秋。与认为三江源地区年降水量趋于减少的研究^[24]相比,由于文中分析的是1960-2015年不含泽库的其他13个台站雨量数据,因此除春季降水趋于增加、夏季降水弱度减少的结果相似外,年、秋冬变化趋势则相反,可见研究时段及测站数量有别是造成分析结果不同的主要原因。与丁一汇等、王根绪等研究结果相一致^[2,15]的是研究区除长江源区夏季降水有弱增趋势外,其他两区夏季降水量呈持续减少趋势且三区秋季降水量整体呈弱减趋势。但与李林等^[19]提出的研究区冬、春季降水量呈显著增加趋势,而夏、秋季降水量呈微弱减少趋势的研究结果略有差异。三江源区年均、特别是夏季降水量变率的空间差异并不显著,这与卢鹤立^[5]等通过研究1961-2004年青藏高原夏季降水变率后,认为三江源地区是夏季降水变率最小区域的研究结论相近。

相较研究区气温序列突变分布^[17],三源区年、季均降水量序列突变不明显,且季突变的时空差异较为明显。基于不同突变检测方法推算的研究区降水量序列突变分析结果的显著性相似,但其具体突变时间存在一定的差异。丁一汇等在分析青藏高原与中国其他地区气候突变点时亦提到,滑动t检验、Yamamoto、M-K检测气候序列突变信号时有一定差异^[2]。综合来看,累积距平分析最为简单直观,滑动t检验分析结果与Le page相

对接近且 15 a、10 a 序列分析结果更为可靠, M-K 突变检验、改进的有序聚类法, 特别是 BG 分割虽然算法相对复杂, 但其分析结果相对少而精准。可见, 多方法综合诊断可有效提高气候序列突变点判断结果的准确性。与青藏高原^[2, 11]以及研究区^[14, 18-19, 22]降水量突变时间的同类研究相比, 本文研究序列较长且融合多方法研判, 因此突变时间节点和方向与相关研究不尽相同, 可见时间序列变点本身具有一定的区域和季节差异性, 并可能因研究序列长短、分析方法而异。

趋势分析方面, 线性倾向估算相对简捷, M-K 与 R/S 法同作为非参数时间序列变化趋势检验方法, 是在直观判断原时间序列走势的同时, 借助统计检验值的显著性水平判断其走向; 基于 EEMD 的 RES 趋势变量则是逐步分解剥离年际、年代际、多年代际波动后原时间序列的残差趋势项, 所有 IMFs 之和与 RES 基本吻合, 故基于 EEMD 的 RES 分析更能反映年、季降水量随时间演变的总体走势。仅就文中比对结果来看, 基于 EEMD 的 RES 变化分析结果的可信度较 R/S 分析的高。

与黄河、澜沧江源区相比, 长江源区地处高原腹地, 受地势及气流输送变化的影响, 其年、季降水量气候倾向率、突变点分布, 以及显著周期等与其他两源区差异性较大, 降水量变化更趋同于青藏高原降水变化, 说明其在表征高原气候变化方面更具有代表性^[22]。

参考文献(References)

- [1] Yao Tandong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian. The range of climate change in the Qinghai Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(1): 98-106. [姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题. *科学通报*, 2000, 45(1): 98-106.]
- [2] Ding Yihui, Zhang Li. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 794-805. [丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较. *大气科学*, 2008, 32(4): 794-805.]
- [3] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 3-11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近三十年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, 60(1): 3-11.]
- [4] Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. Spatial characters of temperature and precipitation in the Tibetan Plateau. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 1996, 26(4): 354-358. [林振耀, 赵昕奕. 青藏高原气温降水变化的空间特征. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 1996, 26(4): 354-358.]
- [5] Lu Heli, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Temporo-spatial and distribution of summer precipitation over the Qinghai-Tibetan Plateau during the last 44 years. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 946-958. [卢鹤立, 邵全琴, 刘纪远, 等. 近 44 年来青藏高原夏季降水的时空分布特征. *地理学报*, 2007, 62(9): 946-958.]
- [6] The third national assessment report on climate change, compiling group. *The Third National Assessment Report on Climate Change*. Beijing: Science Press, 2015. [《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.]
- [7] Yang Jianchu, Tao Shiyang, Ye Duzheng, et al. *Meteorology in Qinghai-Xizang Plateau*. Beijing: Science Press, 1960. [杨鉴初, 陶诗言, 叶笃正, 等. 西藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1960.]
- [8] Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Xin, et al. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(1): 47-56, 167-168. [吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局. *大气科学*, 2005, 29(1): 47-56, 167-168.]
- [9] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A driver and amplifier of the global climate change - III. The impact of climate change on the Qinghai-Tibet Plateau's uplift. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1996, 32(1): 108-115. [潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器—III. 青藏高原隆起对气候变化的影响. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1996, 32(1): 108-115.]
- [10] Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of

- climatic fluctuation in China. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(6): 633-636. [冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. *科学通报*, 1998, 43(6): 633-636.]
- [11] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(2): 157-170. [韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. *大气科学*, 2003, 27(2): 157-170.]
- [12] Yang Wei, He Jinhai, Wang Panxing, et al. Inhomogeneity characteristics of intra-annual precipitation over the Tibetan Plateau in recent 42 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 376-384. [杨玮, 何金海, 王盘兴, 等. 近42年来青藏高原年内降水时空不均匀性特征分析. *地理学报*, 2011, 66(3): 376-384.]
- [13] Xu Yinlong, Zhang Yingxian, Lin Wantao, et al. Analyses on the climate change scenarios over the Three Rivers' Headstream Region in China. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(5): 667-675. [许吟隆, 张颖娴, 林万涛, 等. “三江源”地区未来气候变化的模拟分析. *气候与环境研究*, 2007, 12(5): 667-675.]
- [14] Yi X S, Li G S, Yin Y Y. Spatio-temporal variation of precipitation in the Three-River Head- water Region from 1961 to 2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(3): 447-464.
- [15] Wang Genxu, Li Qi, Cheng Guodong, et al. Climate change and its impact on the eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 346-352. [王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40a来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 346-352.]
- [16] Qian Shuan, Fu Yang, Pan F F. Climate change tendency and grassland vegetation response during the growth season in Three-River Source Region. *Science China Earth Science*, 2010, 40(10): 1439-1445. [钱拴, 伏洋, Pan F F. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1439-1445.]
- [17] Ge Sang, Tang Xiaoping, Lu Hongya. Climatic characteristics of rainfall and rainy days during the last 35 years over the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9): 924-930. [格桑, 唐小萍, 路红亚. 近35年青藏高原雨量和雨日的变化特征. *地理学报*, 2008, 63(9): 924-930.]
- [18] Li Zhanjie, Yu Jingshan. Analysis on precipitation cycles in the Yellow River Basin. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2010, 46(3): 401-404. [李占杰, 鱼京善. 黄河流域降水要素的周期特征分析. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 401-404.]
- [19] Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over Sanjiangyuan Region in recent 43 years. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 79-85. [李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近43年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 79-85.]
- [20] Li Lin, Li Fengxia, Zhu Xide, et al. Study on the evolution law and cause of the extreme climatic events over the source region of the three rivers. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4): 656-663. [李林, 李凤霞, 朱西德, 等. 三江源地区极端气候事件演变事实及其成因探究. *自然资源学报*, 2007, 22(4): 656-663.]
- [21] Zhang Shifeng, Hua Dong, Meng Xiuqing, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the Three-River Headwaters Region. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 13-24. [张士锋, 华东, 孟秀敬, 等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析. *地理学报*, 2011, 66(1): 13-24.]
- [22] Yang Jianping, Ding Yongjian, Shen Yongping, et al. Climatic features of eco-environment change in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(1): 7-16. [杨建平, 丁永建, 沈永平, 等. 近40a来江河源区生态环境变化的气候特征分析. *冰川冻土*, 2004, 26(1): 7-16.]
- [23] Tan Jianbo, Li Ainong, Lei Guangbin. Contrast on anusplin and cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(4): 875-886. [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.]
- [24] Tang Hongyu, Yang Xiaodan, Wang Xijuan, et al. Analyses of precipitation change in the source regions of three rivers during 1956-2004. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(1): 47-54. [唐红玉, 杨小丹, 王希娟, 等. 三江源地区近50年降水变化分析. *高原气象*, 2007, 26(1): 47-54.]
- [25] Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Shao Quanqin, et al. The dynamic changes of ecosystem spatial pattern and structure in the Three-River Headwaters Region in Qinghai province during recent 30 years. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 829-838, 974. [徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 等. 30年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化. *地理研究*, 2008, 27(4): 829-838, 974.]
- [26] Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12. [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.]

- [27] Shao Quanqin, Liu Jiyuan, Huang Lin, et al. Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve from 2005 to 2009. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1645-1656. [邵全琴, 刘纪远, 黄麟等. 2005-2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. *地理研究*, 2013, 32(9): 1645-1656.]
- [28] Wei Fengying. *Statistical Diagnosis and Prediction of Modern Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 57-63. [魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术*. 北京: 气象出版社, 2007: 57-63.]
- [29] 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. [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.]
- [30] Huang N E, Shen Z, Long S, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [31] Lei Yaguo. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(5): 71-77. [雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断. *机械工程学报*, 2011, 47(5): 71-77.]
- [32] Rehman S. Study of Saudi Arabian climatic conditions using Hurst exponent and climatic predictability index. *Chaos Solitons & Fractals*, 2009, 39(2): 499-509.
- [33] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.]
- [34] Yan Rong, Guo Shousheng, An Guanghui, et al. 1961-2013 precipitation variation characteristics in the southern part of Qinghai Lake. *China Agronomy Bulletin*, 2015, 31(22): 248-255. [闫蓉, 郭守生, 安光辉, 等. 1961-2013年青海湖南部地区降水变化特征分析. *中国农学通报*, 2015, 31(22): 248-255.]
- [35] Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. Temporal and spatial variability of precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau based on high resolution lattice observation data. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 271-281. [林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 基于高分辨率格点观测数据的青藏高原降水时空变化特征. *自然资源学报*, 2015, 30(2): 271-281.]
- [36] Shang Shasha, Lian Lishu, Ma Ting, et al. Temporal and spatial variations of temperature and precipitation in Northwest China during the last 65a. *Study on Arid Zone*, 2018, 35(1): 68-76. [商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近 65a 中国西北地区气温和降水的时空变化特征. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 68-76.]

Spatial-temporal characteristics of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers' Headstream Region, Qinghai, China

LIU Xiaoqiong^{1,2}, WU Zezhou², LIU Yansui³, ZHAO Xinzheng^{1,2},
RUI Yang^{1,2}, ZHANG Jian^{2,4}

(1. The Provincial Key Laboratory of Surface System and Environment Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Urban and Environment, 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, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstracts: The Three Rivers' Headstream Region in Qinghai Province is the area with the most fragile ecosystem in China, its annual changes of the precipitation in the growing season are the key to the security of the water resources and the sustainable development of the ecosystem in the local area and the lower Lantsang River, Yellow River and Yangtze River. This paper studied the spatial-temporal characteristics of the precipitation in the Three Rivers' Headwater Region during the last 56 years by using the linear regression, Mann-Kendall test, heuristic segmentation algorithm, R/S, and EEMD et al. The results show that there is an obvious difference in the spatial-temporal characteristics of the precipitation with the variation of area and reason. The results are as follows: The precipitation series of study area showed a weak trend of getting- humid, and it increased significantly since the 21st century, the climate tendency rates of precipitation in the three sub-headwaters region are not the same; The annual and seasonal precipitation decreased from southeast to northwest, the summer precipitation of the Lantsang River Headwater Region and the autumn precipitation of the Yellow River Headwater Region decreased weakly, the areas where precipitation reduced weakly spotted in spacial distribution, the order of seasonal precipitation climate tendency rates of the Lantsang River and the Yellow River Headwater Region are spring, winter, autumn and summer precipitation, while the Yangtze River Headwater Region are spring, summer, winter and autumn precipitation(which are all positive); The decadal variation and the climate tendency rates of precipitation are more obvious; The multiple correlation coefficient between the climatic tendency rates of precipitation in spring, summer and longitude, latitude, altitude are significantly higher than that in winter; There was a wet turning signal in the middle and late 1990s, but the catastrophe point of the precipitation time series occurred around 2002; Inter-annual and low-value Inter-decadal prominent period are the main factors which caused the precipitation variation; With the exception of summer precipitation in the Lantsang River Headwater Region, the other seasonal and the annual precipitation changes showed a trend of different getting- humid; By comparison, the precipitation change in the Yangtze River Headwater Region is more representative than the other two regions in climate change of the Tibetan Plateau. Therefore, it is necessary to continue the research with more characterizing methods to further improve the detection accuracy of the variation process of the characteristics of climate series.

Keywords: Precipitation series; statistical characteristics; EEMD; spatial and temporal evolution; the Three Rivers' Headstream Region