

基于集合经验模态分解北疆降水多尺度变化特征

罗那那¹, 巴特尔·巴克¹, 吴燕锋²

(1. 新疆农业大学 草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要:降水是中国西北干旱区水资源的重要组成部分,利用合理方法有效认识降水的区域变化规律对指导农业发展尤为重要。基于北疆 42 个气象站 1961—2012 年降水序列数据,从气候时间序列中提取气候信号中各个尺度的变化,对北疆过去 52 a 来的降水进行多尺度分析,并对其空间差异进行了初步探讨。结果表明:过去 52 a 北疆降水量存在明显的年际和年代尺度的变化,年际尺度的周期为 5 a 和 8 a,年代尺度的周期为 10 a 和 30 a。变化趋势上,降水量 1985s 之前呈减少趋势,在 1985s 之后呈增加趋势,且后期的增幅大于前期的减幅。突变分析表明北疆年降水量呈增加趋势。集合经验模态分解 (EEMD) 是一种适用于非线性、非平稳序列的信号分析方法,将 EEMD 应用于气候要素时间序列,可提取可靠真实的气候变化信号,同时, EEMD 可以得到气候变化的固有时间尺度。

关键词:集合经验模态分解;多尺度变化;区域差异;北疆

中图分类号:P46

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)04-0362-06

Precipitation Multi-Scale Characteristics by Ensemble Empirical Mode Decomposition in Northern Xinjiang

LUO Nana¹, BAKE Batur¹, WU Yanfeng²

(1. College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Multi-scale characteristics of precipitation were analyzed by ensemble empirical mode decomposition (EEMD) by using monthly precipitation data of forty-two meteorological stations from 1961 to 2012. The results showed that rainfall experienced significant multi-scale characteristics, i. e., variability with 5 years and 8 years periodic patterns for inter-annual scale of 10-year and 30-year periodic patterns for inter-decadal scale. Precipitation tended to decline before the 1985s and increased after that. Moreover, increasing amplitude of precipitation in the later period was greater than the decreasing amplitude in the earlier period. Multi-scale analysis indicated that annual precipitation presented the increasing trend in north Xinjiang. Ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method is suitable for non-linear and non-stationary signal analysis. This method can work on nature signals (non-linear and nonstationary signals) and reduce the speckle noise.

Keywords: empirical mode decomposition; multi-scale changes; regional differences; northern Xinjiang

IPCC 在 2013 年报告指出,近 130 a(1880—2012 年)来,全球平均气温升高了 0.85℃(0.65—1.06℃),2003—2012 年平均温度比 1850—1900 年上升了 0.78℃,全球迅速变暖已经是一个不争的事实^[1]。气候的变暖会加速水分的循环,改变降水的时空分布及强度,造成极端降水事件发生^[2]。北疆作为新疆地区的主要粮棉产地,属典型的温带大陆干旱性气候,在全球变暖背景下,新疆自 1987 年以来气候出现由“暖干”向“暖湿”转型的现象^[3],气温^[4]、降水^[5-6]均出现增加趋势,

北疆也受其影响。因此,研究北疆的降水变化具有重要的现实意义和科学价值。目前,对北疆降水变化的研究主要集中在线性变化趋势上,如薛燕等^[7]通过对新疆 70 个气象站点降水观测资料的分析,得出近 50 a 来新疆年降水量总体呈上升趋势,年均增幅约为 0.67 mm/a;热孜宛古丽·麦麦提依明等^[8]新疆近 54 a 气温和降水变化特征表明新疆年降水量为整体上表现为由南向北增多的趋势,北疆的降水量最多,其次为天山山区,南疆的降水量最少。刘波等^[9]发现

新疆区域年降水在 1987 年发生转折性变化, 降水呈增加的主要趋势; 此外, 也有一些研究者利用自然正交分解(EOF)分析了新疆降水变化的基本空间分布型^[10]。随着信号检测技术的快速发展, Wu 和 Huang^[11]提出了一种新的时间序列信号处理方法, 即集合经验模态分解(EEMD)方法^[12]是一种近年来发展的时间上局部的自适应时间序列分析技术, 适合于分析非线性、非平稳的时间序列。而目前对北疆降水的非线性的研究较少。

本文所要探讨的问题是: 北疆地区过去 52 a 来降水的变化是由哪些时间尺度的振荡变化构成的, 这些不同尺度的振荡变化有何演变特征, 其中各个尺度的振荡对北疆降水变化的贡献如何, 哪些尺度的振荡是显著的或非显著的, 在不同时期内各个尺度的振荡对整个气候变化起何作用。为此, 本文借助 EEMD 方法, 从气候时间序列中提取气候信号中各个尺度的变化, 对北疆过去 52 a 来的降水进行多尺度分析, 以期揭示其不同时间尺度的振荡模态结构特征。

1 数据和方法

1.1 数据

本文所用 1961—2012 年的逐日降水量作为分析资料, 数据来自具有代表性、时间序列较为完整的北疆地区 42 个气象站, 所用资料均由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供, 该资料在发布前已进行过极值和时间一致性等检验^[13], 对部分气象站个别年缺失数据利用比值法进行了插补, 质量较好。

1.2 方法

1.2.1 Mann-Kendall 非参数趋势检验法 气候突变是指在较短时期内由一种相对稳定的气候状态, 过渡到另一种气候状态的变化, 它是气候系统非线性性质的一种表现。目前检测突变的方法有多种, 这里采用多数人认为理论基础和应用效果好的 Mann-kendall 法^[14]。计算结果分析绘出的 UF_k 和 UB_k 曲线图。当 UF_k 和 UB_k 的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。

1.2.2 集合模态分解 集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)方法是利用多次测量取平均值的原理, 通过在原数据中加入适当大小的白噪音来模拟多次观测的情景, 经多次计算后做集合平均, 它是 EMD 方法^[15]的改进。首先介绍 EMD 方法分解步骤。EMD 方法是一种适合于处理非平稳数据序列

的方法, 它将信号中不同尺度的波动和趋势逐级分解开来, 形成一系列具有不同特征尺度的数据序列, 每一个序列称为一个内在模函数(intrinsic modefunction, IMF)分量, 最低频率的 IMF 分量代表原始信号的总趋势或均值的时间序列。对于原始信号 $x(t)$, 确定 $x(t)$ 的所有局部极值点, 通过三次样条函数求得其上包络 $u_1(t)$ 和下包络 $u_2(t)$ 的局部均值

$$m_1 t = \frac{1}{2} (u_1(t) + u_2(t)) \quad (1)$$

$$h_1 t = x(t) - m(t) \quad (2)$$

如 $h(t)$ 不满足 IMF 条件, 则视其为新 $x(t)$, 重复(1)和(2)式的计算经过 k 次重复后, 得

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m(t) \quad (3)$$

在实际操作中过多地重复上述处理会使 IMF 变成幅度恒定的纯粹的频率调制信号, 从而失去实际意义。因此, 可采用标准差 SD (一般取 0.2~0.3) 作为筛选过程停止的准则, 当 SD 达到某个阈值时, 停止筛选。

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{h_{1(k-1)} - h_{1k}(t)}{h_{1(k-1)}(t)} \right]^2 \quad (4)$$

得到信号的第 1 个 IMF 分量 = 及其分离后的余项

$$r_1(t) = x(t) - C_1 \quad (5)$$

将 $r_i(t)$ 进行(1)~(5)式同样的“筛选过程”, 依次得到 C_2, C_3 , 直到 $r_i(t)$ 基本呈单调趋势 很小时停止, 则原信号重构为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) - r_n(t) \quad (6)$$

EEMD 的核心思想是利用白噪声具有频率均匀分布的统计特性, 当信号加入高斯白噪声后, 将使信号在不同尺度上具有连续性, 改变了信号极值点的特性, 促进抗混分解, 有效地避免了模式混叠现象。EEMD 分解步骤为: 首先在原始信号 $x(t)$ 中多次加入等长度的正态分布的白噪声 $n1(t)$ 即

$$x_i(t) = x(t) + n1(t) \quad (7)$$

$x_i(t)$ 为第 i 次加入白噪声后的信号, 再对 $x_i(t)$ 按(1)~(5)式进行 EMD 分解, 得到 IMF 分量 $C_{ij}(t)$ 和余项 $r_i(t)$, 其中 $C_{ij}(t)$ 表示第 $C_{ij}(t)$ 次加入白噪声后分解所得的第 j 个 IMF 分量。利用不相关随机序列的统计均值为零的原理, 将各分量 $C_{ij}(t)$ 进行整体平均以抵消多次加入白噪声对真实 IMF 的影响, 最终 EEMD 分解结果为:

$$C_j(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N C_{ij}(t) \quad (8)$$

式中: N 为添加白噪声序列的数目, 文献指出白噪声对分析信号的影响遵循如下的统计规律:

$$e = a/\sqrt{n} \text{ 或 } \ln e + 0.5a \ln N = 0 \quad (9)$$

式中: e 为标准离差, 即输入信号与相应 IMF 分量重构结果的偏离; a 为白噪声幅值。可以看出当噪声幅值 a 增加时, N 值也应增大以便减少噪声对分解结果的影响, 且大体来说分析信号以高频分量为时, 白噪声幅值 a 应较小, 反之亦然。因此 EEMD 的应用可以不依赖人的主观介入, 仍具有自适应性。同时, EEMD 可借助于白噪声的集合扰动进行显著性检验, 从而给出各个 IMF 的信度。

2 北疆降水的多尺度变化特征

2.1 北疆降水年际变化

从图 1 可以看出, 降水量总体呈增加趋势, 在 20 世纪 80 年代中期逐年降水变化出现转折, 在 80 年代中期以前降水相对偏少, 之后则相对偏多, 整个时段内整体偏干。此外, 在偏干时期中的 60 年代至 80 年代初期为严重偏湿时期, 降水距平最高低于 70 mm, 趋势表现为减少—增加—减少趋势特征, 70 年代初是湿润期的转折年份。同时, 80 年代中期之后降水偏多年份显著增加。从 1961—1985 年的 25 a 间, 有 8 a 的降水距平低于 -50 mm, 偏少年份平均偏少 60 mm; 而在 1985 年之后的 25 a 间, 仅有 3 a 的降水出现了异常偏少, 平均距平值达到 -50 mm, 分别是 1991 年、1998 年、2008 年。有 10 a 的降水最高值增加到 50 mm 以上。其中降水量最高年份在 1998 年达到 95 mm, 降水偏多年份的偏多趋势明显, 尤其是 1985—2012 年增加趋势更加明显。

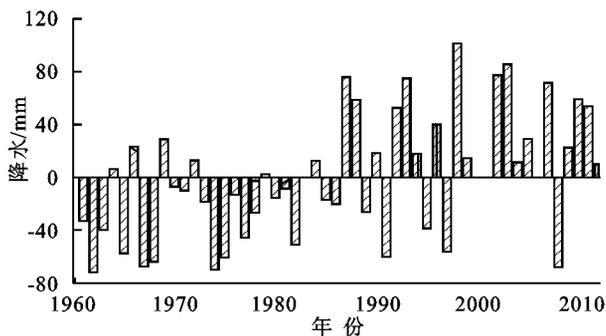


图 1 1961—2012 年北疆年降水量距平年际变化

2.2 北疆降水变化多尺度分解

图 2(A—E) 为对 1961—2012 年北疆降水距平进行 EEMD 分解得到的 4 个 IMF 分量(IMF1—4) 和趋势分量(RES)。各个 IMF 分量依次反映了从高频到低频不同时间尺度的波动特征, 最后所得趋势项表示原数据总体随时间变化的趋势。图 2 中每个 IMF 分量信号的波动具有相对稳定的准周期性, 在相同的时段内, 不同时间尺度的准周期振荡随时间也呈现或强或弱的非均匀变化, 这种振荡强度的非均匀

变化反映了大气内部动力过程和外部强迫共同作用的非线性。可以求取平均周期, 并将每种尺度信号波动频率和振幅对原数据总体特征影响程度用方差贡献率表示出来。表 1 给出了不同尺度 IMF 分量所表征的不同时间尺度波动的平均周期, 虽然一个 IMF 分量可能包含不同尺度变化的信息, 但同一个时间段、不同 IMF 分量却不会包含同一个尺度的波动信号。分析图 2(A—D) 中的 4 个 IMF 分量, 见表 1 所示, 在年际尺度上, 北疆各月降水具有准 5 a(IMF1) 和准 8 a(IMF2) 的气候变率; 在年代际尺度上, 具有准 10 a(IMF3) 和准 30 a(IMF4) 的气候变率。

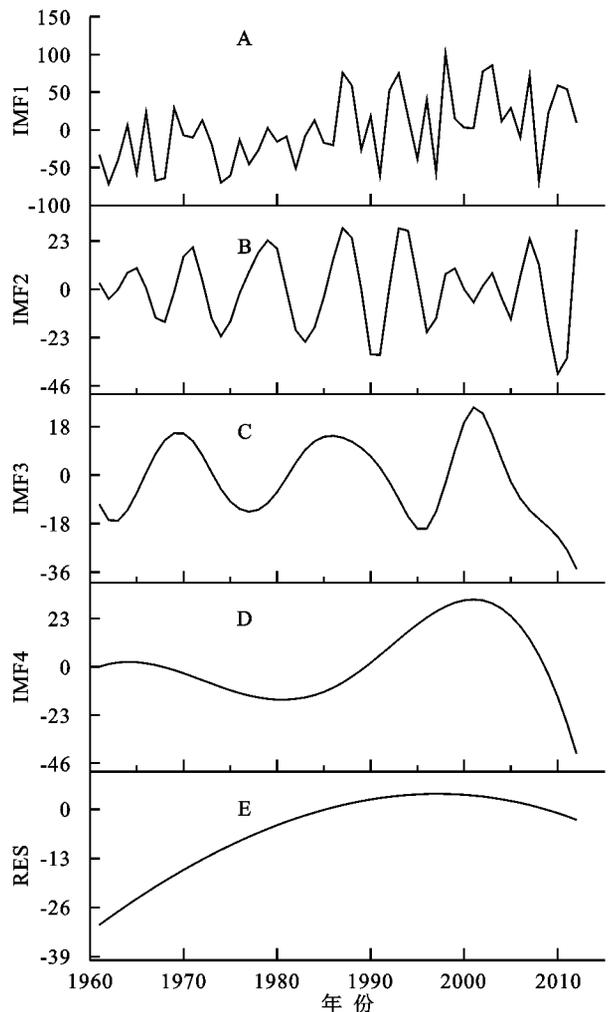


图 2 1961—2012 年北疆降水年际变化的 EEMD 分解

表 1 1961—2012 年北疆降水各 IMF 分量的周期特征

降水序列 IMF 分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	RES
周期/a	5	8	10	30	—
贡献率/%	36.23	21.46	19.16	13.25	9.87

表 1 同时也给出了各分量的方差贡献率, 结合图 2 和表 1, IMF1(图 2A) 表示的 5 a 准周期贡献率最大, 达到 36.2%, 震荡信号十分明显, 除 20 世纪 70 年代初到 80 年代末振幅较小, 其余时期振幅较大, 同时, 从 20 世

纪90年代后振幅表现出明显的增大趋势,但在2005年之后呈下降趋势;IMF2(图2B)表示的8a准周期方差贡献率为21.5%,其在20世纪90年代初及大约2005年之前的振幅要小于其余时期;图2C中IMF3分量表示的10a准周期贡献率为19.2%,其在20世纪90年代后的振幅较小;IMF4(图2D)分量表示的30a准周期贡献率为13.3%,显示在该时间尺度上,北疆降水在20世纪60年代至90年代末处于偏少状态,从20世纪80年代末以及90年代之后是偏多的;趋势分量(图2E)的方差贡献率达9.8%,从图2E可以看出,在总体变化趋势上,自1961—1990年以来,北疆降水显著增加趋势,但是在1990—2000年之后呈下降趋势,自2000年后下降趋势最为明显。

最大的30a准周期尺度上的变化(IMF4)大约在20世纪80年代初发生转折,在80年代初之前IMF4保持较平缓的下降趋势,自80年代初之后则变为准周期性的波动变化且从80年代初至90年代末处于负位相,即降水处于负距平时期,90年代之后IMF4则转为正位相,2000年之后又呈显著的下陷趋势。

2.3 北疆降水的年际和年代际重构变化

通过表1中各IMF分量的方差贡献率大小也可以看出,在年际振荡和年代际振荡中,年际振荡在降水变化中占据主导地位。为进一步探究北疆降水的多尺度变化特征,分别对IMF分量进行重组合并计算。见图3原始距平序列表示北疆降水距平值的年际变化序列,年际变化序列表示IMF1与IMF2之和后的时间序列,年代变化表示IMF3与IMF4之和后的时间序列,变化趋势即为EEMD分解后的趋势项。图3可以看出,重组后年际变化时间序列能充分反映原始距平序列的年际变化特征。从图中可以看出,北疆降水呈明显的波动上升趋势,年际变化和年代际变化后呈缓慢上升趋势,其中,年代际变化波动趋势较小。北疆降水在1965s—1985s波动较大,在1990s之后波动较小,从趋势项可以看出,以90年代中期为界,90年代中期之前降水变化呈缓慢上升趋势,90年代中期呈下降趋势。

2.4 北疆降水变化空间分布类型

由以上分析可知,北疆降水量整体上呈现出上升的变化趋势。实际上,由于受北疆复杂地形、环流类型及其强弱等因素的影响,在不同的区域,降水变化趋势过程并不相同。为了更详细地剖析各气象台站降水的变化趋势,本文对42个气象台的降水距平序列分别做了EEMD分解,并基于趋势项(RES)探究

各站点年降水量的变化趋势类型。各个气象站年降水量变化趋势类型大致可分为2类:上升型和先升后降型。本文所采用北疆气象台站的分类结果见图4,可以看出:上升型共有25个气象台站,先升后降型有13个气象台站。其中,上升型站点分布在阿勒泰、哈巴河、布尔津、塔城地区、伊犁河谷地区、沙湾、北塔山、富蕴等地区;先升后降型的站点主要分布在吉木乃、福海、和布克赛尔、克拉玛依、达坂城等地。

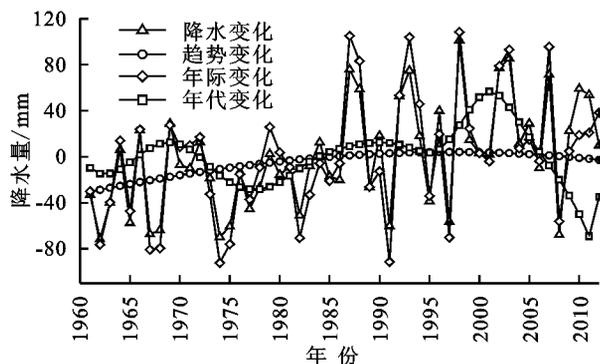


图3 1961—2012年北疆降水的多时间尺度变化特征

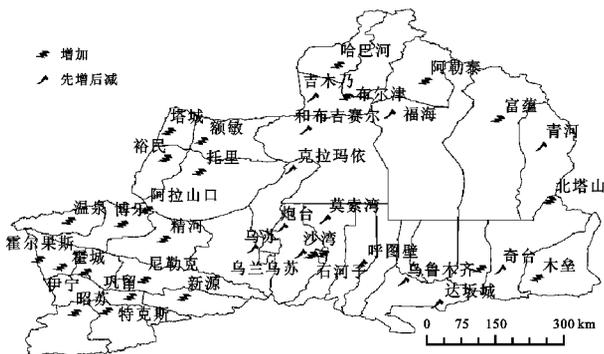


图4 北疆降水量变化趋势类型空间分布

2.5 北疆降水空间分布及其变化趋势的空间分布特征

2.5.1 降水空间分布特征 由于自然地理环境的空间异质性,北疆地区的年降水量的空间分布差异明显。图5可以看出,近52a以来,北疆降水空间分布类型主要为3类,小于200mm,200~300mm、大于300mm。其中,小于200mm的降水量气象站点占15个,主要分布在北疆东中部,降雨量最小的分布在富蕴和青河站点,分别为122.15mm,114.57mm;最高降水量分布在奇台和乌苏,达到220.05mm和184.81mm;200~300mm站点大致有20个,主要分布在北疆的西北部,其中除了克拉玛依、尼勒克、巩留之外大部分地区降水量达到250mm以上,包括分布在盆地四周的、乌鲁木齐、和呼图壁,降水量也达到210mm以上;降水量大于300mm以上的比较少,最有代表的是吉木乃、裕民和霍城,究其原因可能受地形因素的影响。通过对北疆年平均降水进行突变分析可得到,北

疆降水突变趋势类型分为 2 类:不显著增加趋势和显著增加趋势,由此得到北疆降水的突变气候倾向率类型也呈现不显著增加和显著增加 2 类。总体来看(图 5),北疆降水呈显著增加趋势,增加趋势最明显的有布尔津、克拉玛依、裕民、博乐和达坂城。不显著增加趋势大致分布在塔城和温泉。这可能是由于环流因子和地形所致

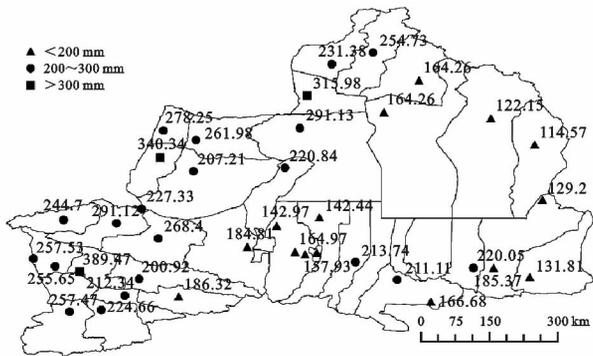


图 5 北疆年均降水量空间分布

2.5.2 降水变化趋势特征

(1)气候倾向率空间分布特征。本文采用最小二乘法计算气候倾向率,得到变化趋势具有很大的区域差异,通过对北疆年平均降水进行趋势分析可得到,北疆降水气候倾向率空间分布趋势类型分为 2 类:不显著增加趋势和显著增加趋势(图 6),从总体来看,北疆降水量呈现明显的显著增加趋势,其中,除了青河、富蕴、哈巴河气象站点倾向率处于低值,其他气候倾向率值均在 10 mm 以上。其中,达坂城达到最高,气候倾向率为 19.74 mm,青河和塔城达到最低,倾向率为 6.93 mm 和 9.93 mm。而不显著增加趋势仅分布在塔城和温泉站点,气候倾向率分别为 9.93 mm 和 17.35 mm。

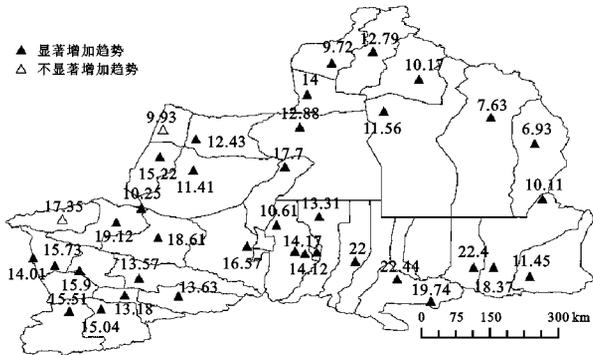


图 6 北疆年降水量的气候倾向率空间分布特征

(2)北疆降水量变化趋势的 M-K 检验空间分布特征。为了探究北疆降水的突变特征,基于 Mann-Kendall 法计算北疆地区气降水的时间序列的正序列的 UF_k (黑色粗线)和反序列的 UB_k (黑色细线)。取显著水平 $\alpha=0.05$ 情况下临界值为 ± 1.96 。当 Z 值超过 1.96 值则认为发生显著性变化。基于 ArcGIS 绘制

可得(图 7),结果显示:北疆降水量变化趋势空间分布呈 2 类,不显著增加和显著增加趋势。降水量变化趋势的不显著增加分布在塔城和温泉,而其他的大多数站点主要呈显著性增加趋势。对于降水变化趋势存在区域差异的更深层次原因,有待于进一步探讨。



图 7 北疆降水量变化趋势的 M-K 检验空间分布

3 讨论

通过 EEMD 方法分解的趋势项以及利用本征模函数 IMF3—4 和趋势项重构的降水年代际变化可以看出,北疆整体气候明显由“干”趋“湿”,北疆年平均降水突变趋势类型分为 2 类:不显著增加趋势和显著增加趋势,且降水空间分布特征差异明显。已有相关研究表明,湿年代际背景下降水偏多年主要是由于偏西和偏北路径水汽输送增强所致,而干年代际背景下降水偏多年主要源于偏北路径水汽输送的增强^[16]。北疆水汽输送途径还存在明显的月尺度差异。此外,北疆自身环境改变及其周边高原热力异常对其降水变化也有重要影响^[17]。赵勇等^[18]通过研究发现,北疆地区的总云量和低云量变化可直接影响到地气系统的水循环过程,从而对同期降水起到一定的调节作用。新疆气温明显升高,在一定程度上加速了土壤的蒸发和植被的蒸散,导致空中水汽含量明显增多,亦有利于形成局地降水^[19]。北疆降水量整体上呈降水增加,湿度增大的趋势^[20-21],这与本研究结论具有一致性。该工作仅为初步诊断分析。还需深入研究北疆降水多尺度的影响因子的物理演变过程及其对外强迫的响应机制,此外,可以利用北疆降水的多尺度特征,合理规划农作物种植,达到多产高效。

EEMD 方法明显优于 EMD 方法、小波分析等时频分析方法,适用于非线性、非平稳序列的信号分析。在气候变化研究中,EEMD 方法能把气候要素时间序列中隐含的真实气候变化信号提取出来,尤其可得到气候变化的固有时间尺度,而且当趋势变化和大尺度振荡混淆在一起时,EEMD 方法能有效地甄别出大尺度循环和非线性变化趋势,这有助于探究气候异常诊断。

4 结论

(1) 过去 50 a 北疆降水量总体可以分为两个时段,即 1961—1985 呈减少趋势,在 1985—2010 呈增加趋势,且后期增幅大于前期减幅;在不同时间尺度上,降水量存在两个尺度范围,年际尺度上的 5 a 和 8 年的周期,年代尺度上的 10 a、30 年的周期。北疆降水的年际和年代际重构变化表示过去 50 a 北疆降水呈稳步增加趋势,但后期增势弱于前期增势。

(2) 降水变化趋势具有明显的区域差异,可归纳为 2 种变化类型,即上升型、先升后降型;此外,单一气象站点之间,单一气象站点与新疆整体之间,降水发生变化的转折时间也存在较大差异,这说明新疆各气象站降水变化并非完全同步,这两种变化类型可能更多的是受控于地形因素。对于降水变化趋势存在区域差异的更深层次原因,有待于进一步探讨。

(3) 北疆降水突变趋势类型及降水量气候倾向率的分布,北疆降水突变趋势类型和突变气候倾向率类型分为 2 类:不显著增加趋势和显著增加趋势,而北疆年均降水量分布类型以上升趋势为主。

参考文献:

- [1] Stocker T, Dahe Q, Plattner G K E. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013, the physical science basis[R]. Final draft underlying scientific-technical assessment IPCC, Stockholm, 2013.
- [2] Cai W, Santoso A, Wang G, et al. Increased frequency of extreme Indian Ocean Dipole events due to greenhouse warming[J]. *Nature*, 2014, 510(7504):254-258.
- [3] Shi Y, Shen Y, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3):379-393.
- [4] 何毅,杨太保,陈杰,等. 1955—2012 年南北疆气温、降水及相对湿度趋势分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2):269-277.
- [5] 苏向明,刘志辉,魏天锋,等. 艾比湖面积变化及其径流特征变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3):252-256.
- [6] 赵勇,杨青,马玉芬. 新疆北部地区春夏季干旱的区域性和持续性特征[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(3):472-478.
- [7] 薛燕,韩萍,冯国华. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势[J]. *干旱区研究*, 2003, 20(2):127-129.
- [8] 热孜宛古丽·麦麦提依明,杨建军,刘永强,等. 新疆近 54 年气温和降水变化特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(2):128-133.
- [9] 刘波,冯锦明,马柱国,等. 1960—2005 年新疆气候变化的基本特征[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(4):414-426.
- [10] 南庆红,杨舵,杨青. 应用 EOF 方法分析新疆降水变化特征[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(5):554-559.
- [11] Yang Z, Yu Z, Xie C, et al. Application of Hilbert - Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process [J]. *Measurement*, 2014, 47:14-21.
- [12] 薛春芳,侯威,赵俊虎,等. 集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用[J]. *物理学报*, 2013, 62, (10):35-46.
- [13] Wang X L, Chen H F, Wu Y H, et al. New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(12):2416-2436.
- [14] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4):423-421.
- [15] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1):1-41.
- [16] 杨莲梅,李霞,张广兴. 新疆夏季强降水研究若干进展及问题[J]. *气候与环境研究*. 2011, 16(2):188-198.
- [17] Meehl G A, Teng H. Regional precipitation simulations for the mid-1970s shift and early-2000s hiatus [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41 (21):7658-7665.
- [18] 赵勇,崔彩霞,贾丽红,等. 中国天山区域云量的变化及其与降水的关系[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(6):1-7.
- [19] 史玉光. 新疆降水与水汽的时空分布及变化研究[M]. 北京:气象出版社, 2014.
- [20] 刘天虎,刘天龙. 集合经验模态分解下中国新疆降水变化趋势的区域特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(4):17-24.
- [21] 赵直,徐晗. 极点对称模态分解下中国新疆温度变化趋势的区域特征[J]. *地理研究*, 2014, 33(12):2358-2366.