

长江中下游流域降水分区及其 气象干旱时间变化特征

李明^{1, 2} 赵茹昕¹ 王贵文¹ 柴旭荣¹¹

(1. 山西师范大学 地理科学学院, 山西 临汾 041000;

2. 山西师范大学 现代文理学院, 山西 临汾 041000)

【摘要】: 基于 1961~2015 年逐月降水格点数据, 首先通过系统聚类法对长江中下游流域进行降水分区, 然后以标准化降水指数为指标, 结合小波分析方法, 探讨了长江中下游流域各亚区气象干旱的时间演变规律及周期变化特征。结果表明: (1) 空间上, 可将长江中下游流域分为 6 个降水亚区, 即: 大巴山地农业区 (I)、湘鄂贵渝山地农业区 (II)、鄂中东平原农业区 (III)、湘赣平原丘陵农业区 (IV)、鄱阳湖平原农业区 (V) 和长江三角洲平原农业区 (VI)。(2) 不同降水亚区干湿事件交替过程存在差异, VI 区与其它亚区差异较大, II 区、IV 区和 V 区的干湿事件具有相似的时间演变模式; 除 VI 区外, 2000 年后其它降水亚区干旱发生频率增加明显。(3) 不同降水亚区气象干旱的第一主周期存在差异, 北部 (I 区、III 区、VI 区) 和南部 (II 区、IV 区、V 区) 具有明显的区域分化特征, 但各气候亚区大都显示出 3.5 年左右的显著周期。研究结果可为长江中下游流域各亚区气象干旱驱动因素的解释、干旱监测计划的制定、水资源的管理和旱灾的防治提供参考依据。

【关键词】: 长江中下游流域 气候分区 标准化降水指数 小波分析

【中图分类号】: P426.616 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)12-2719-08

IPCC 第五次评估报告显示, 全球气候变暖已成为不争的事实^[1]。受气候变暖的影响, 全球范围内极端气候事件频发^[2, 3], 尤其是干旱事件^[4]。干旱灾害亦是中国主要的气象灾害之一, 尤其是西北、华北地区^[4~6]。近 55 年来, 中国南方地区地表升温速率高于全球平均值^[7]。21 世纪后, 中国南方年均降水量偏少, 年际振荡幅度增大^[7], 气温和降水的共同作用致使中国南方干旱事件发生频率有所增加^[8, 9]。

长江中下游流域 (Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, MLYR) 是中国重要的棉、粮、油生产基地, 地处亚热带季风区, 受季风雨带南北移动的影响, 易形成旱涝灾害, 进而影响 MLYR 的农业生产和国家的粮食安全^[10]。许多学者已对 MLYR 的旱涝灾害进行了研究, 尤其是洪涝灾害^[11, 12]。陈鲜艳等^[13]和王文等^[10, 14]学者从整体的角度对 MLYR 的干旱特征进行了研究, 研究表明该流域受干旱灾害的侵扰逐渐增多。但是将 MLYR 作为一个整体进行干旱研究, 无法反映局部的气候变化, 不利于解释区域内部干旱的驱动因素。降水是最容易获得的气候变量之一, 它随着空间和时间尺度的变化而变化, 由于其对社会的深刻影响, 它是气候预测中最重要的变量。利用观测的降水数据来区分气候亚区有助于了解主要的区域气候特征以及确定每个区域的预测因子^[15]。目前, 少数学者对 MLYR 进行了洪灾风险分区的研究^[12, 16], 但未见有关 MLYR 分区的气象干旱研究。另外, 对于干旱的研究, 大多学者采

作者简介: 李明 (1982~), 男, 副教授, 主要研究方向为区域气候变化. E-mail: lim489@163.com
基金项目: 国家自然科学基金 (41501160, 31571604); 山西省高等学校科技创新项目 (2019L1020)

用研究区内气象站的观测数据^[4,10,13,14],但考虑到台站空间分布不均、基准站(基本站)相对较少等因素,数据精度可能会对研究结果有所影响^[17]。目前,常用的气象干旱指标主要包括标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)和 Z 指数等。其中 SPI 计算简单,输入数据仅需要降水量,且许多学者已证明 SPI 具有良好的稳定性,能很好地反映出不同时间段、不同区域的干旱状况^[4,18~20]。

基于上述原因,本文采用 1961~2015 年逐月降水量格点数据,利用系统聚类的方法对 MLYR 进行降水分区,并以 SPI 作为气象干旱指标,分析 MLYR 各降水亚区的干旱变化趋势及其周期特征,以期为 MLYR 干旱监测计划的制定、水资源的管理和旱灾的防治提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究范围

MLYR 位于 106° 5' E~121° 54' E 和 24° 29' N~34° 11' N,涵盖了鄂中南部、湘中北部、赣北部、皖长江沿岸、苏南部、浙东北部及沪大部分区域(图 1),是中国经济最发达的地区之一。该地区处于亚热带季风区,气候湿润,地势低平,多湖泊。夏季,受西太平洋副热带高压控制,高温少雨^[21],易形成伏旱;10 月份,西太平洋副热带高压再次控制 MLYR,易形成伏秋连旱。尤其近年来,该流域降水呈减少趋势,致使干旱频繁发生^[11]。

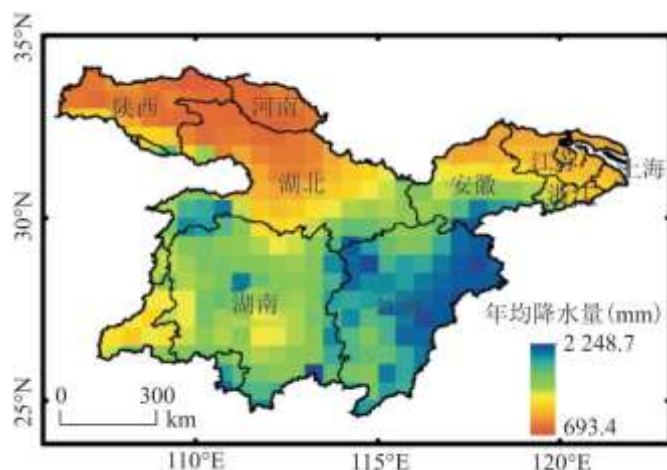


图 1 1961~2015 年 MLYR 年均降水量

1.2 数据来源

中国地面降水月值格点数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),坐标系统:WGS84;空间分辨率:0.5° × 0.5° ;时间段:1961~2015 年。该数据集基于国家气象信息中心基础资料专项最新整编的中国地面 2472 台站降水资料,利用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法进行空间插值,并结合 GTOPO30 数据消除了高程对降水空间插值精度的影响。经交叉验证、误差分析,表明数据质量状况良好^[17]。另外,1:25 万 MLYR 矢量边界来源于湖泊-流域科学数据中心(<http://lake.geodata.cn/>),坐标系统:WGS84,数据位置精度、接边精度、现势性均符合国家测绘局的有关技术规定和标准。

1.3 研究方法

1.3.1 系统聚类

气候分区研究,实质上就是将具有气候特征相似且空间上连续的区域聚合在一起,是聚类方法在地理空间上的应用。本文借助 R 软件,首先对数据进行了标准差标准化和去趋势的预处理,而后运用皮尔逊相关系数和离差平方和法,分别计算点与点之间的距离以及类与类之间的距离,并调用 HiClimR 统计包^[22]进行系统聚类,对 MLYR 进行降水分区。

1.3.2 标准化降水指数

SPI 是由 Mckee 等^[23]1993 年提出的,现已用于许多的干旱研究。它具有以下几个优点:(1)只需要降水数据;(2)可以用于不同的时间尺度;(3)不受地形的不利影响;(4)使用标准正态分布,可用于比较不同气候带的干湿状况。关于 SPI 的计算和应用的更多细节,可参考文献[4, 19, 23~26]。为了反映干旱的年际变化,并消除季节变化的影响^[27],本文选取 12 个月时间尺度的 SPI (SPI-12) 分析 MLYR 各降水亚区气象干旱的时间变化特征。依据《气象干旱等级 (GB/T20481-2006)》^[24],干旱等级的划分见表 1。

表 1 干旱等级划分

干旱等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
SPI 值	$(-0.5, +\infty)$	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-2.0, -1.5]$	$(-\infty, -2.0]$

1.3.3 小波分析

小波在时间域与频率域都具有表征时间序列局部特征的能力,而它的局部分析特性使其成为对非平稳、不连续时间序列进行量化的一种有效工具。时间序列的连续小波变换是其与局部基函数或小波的卷积,可以在频率和时间上以灵活的分辨率被拉伸和平移。小波系数表示时间序列和小波的近似程度,小波功率谱定义为小波系数模的平方,其大小可以反映出信号在时域和频域上的强弱程度;小波全谱是是将小波功率谱在某一周期上进行时间平均,小波全谱图是小波功率谱随尺度变化过程的体现^[28]。本文选取 Morlet 小波研究 SPI-12 时间序列的变化周期,因为它在时间与频率的局部化之间有着很好的平衡^[29]。另外,由于本研究中使用的 SPI-12 数据集具有有限长度,因此在小波功率谱的开始和结束时刻会产生误差。为了减小边缘效应的影响,本文在进行小波变换之前在 SPI-12 时间序列的末端进行了补零,变换后将其移除^[30]。

2 结果与分析

2.1 不同降水特征下的降水分区

基于 R 软件平台,借助 HiClimR 统计包,使用系统聚类方法,以 1961~2015 年 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 逐月降水量格点数据为输入数据,计算出多年的月平均降水量作为分区指标,考虑到区域的连续性和独立性,最终将 MLYR 分成 6 个亚区,见图 2。

(1) 大巴山地农业区 (I)。

该区位于长江、黄河两大水系间的秦巴山区,地形复杂多样,是亚热带北部边缘地区^[31]。主要包括陕西省南部的汉中市、安康市、商洛市以及湖北省十堰市的西部,共 35 个格点,总面积约 $8.49 \times 10^4 \text{ km}^2$,年均降水量 978.9mm,是 6 个分区中降水最少的一个区。由于受秦岭的影响,该区环境对气候变化的响应较为敏感^[32]。

(2) 湘鄂贵渝山地农业区(II)。

该区地处云贵高原东北侧,受武陵山地地形影响,常年保持相对较高的湿度。主要以湘西部地区(湖南省常德市、怀化市、张家界市、湘西土家族苗族自治州)为主,同时包括贵州省铜仁地区和黔东南苗族侗族的中东部,以及湖北省仙桃市、潜江市、荆州市南部和咸宁市北部,共46个格点,总面积约 $1.33 \times 10^5 \text{km}^2$,年均降水量1355.9mm。

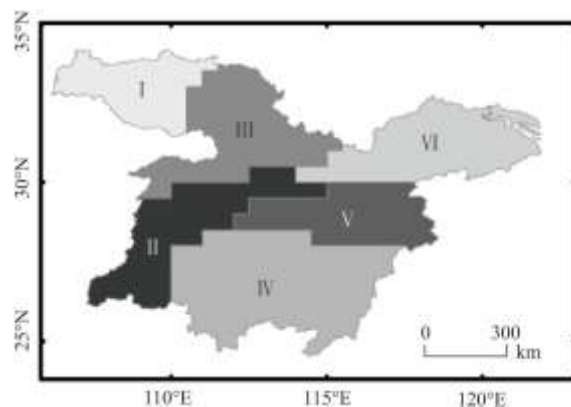


图2 MLYR 降水分区图

(3) 鄂中东平原农业区(III)。

该区处于中国地势第二级阶梯向第三级阶梯过渡地带,其中江汉平原为全国酷热地带之一,易发生干旱。主要由湖北省大部分地区和河南省南阳市南部组成,共52个格点,总面积约 $1.28 \times 10^5 \text{km}^2$,年均降水量1078.8mm。

(4) 湘赣平原丘陵农业区(IV)。

该区主要包括湖南省南部和江西省南部地区,共有83个格点,总面积约 $2.22 \times 10^5 \text{km}^2$,年平均降水量为1552.3mm,是六个分区分区中面积最大的一个区域。

(5) 鄱阳湖平原农业区(V)。

该区是6个区中降水最多的区域,地势总体上较为平坦,四周低山丘陵相间分布,河网密集,是“江南鱼米之乡”。主要由江西省北部地区及湖南省岳阳市组成,共有38个格点,总面积约为 $1.02 \times 10^5 \text{km}^2$,年平均降水量为1651.7mm。

(6) 长江三角洲平原农业区(VI)。

该区由主要由太湖平原和长江三角洲冲积平原组成,整体地势低平,低丘散布,共有51个格点,总面积约为 $1.33 \times 10^5 \text{km}^2$,年平均降水量为1254.4mm。

2. 2MLYR 降水亚区干湿事件时间演变特征

在降水分区的基础上,分别计算各亚区逐月的SPI值,绘制SPI-12序列的时间演变图(图3),并统计中旱、重旱和特旱的发生次数。

I 区干旱事件在 1990 年以前发生频次少强度低, 其中 1966~1979 年干旱事件相对较多, 但以轻旱和中旱为主, 1966 年出现一次重旱, SPI 值最小达到-1.8; 1980~1989 年为主要湿润期, 在 1983 年出现一次较为严重的涝灾, 最严重月份 SPI 值达到 2.9; 1990~2003 年干旱事件发生频率高且较为严重, 有 12 个月达到特旱, 1999 年 SPI 指数最小值达到-3.1, 出现特大旱情。此外, 在 2013~2014 年发生连旱。1961~2015 年间, I 区有 111 个月份达到中旱及以上等级, 其中中旱 77 个月、重旱 21 个月、特旱 13 个月。总体看来, I 区干湿变化存在阶段性, 1990s 以后重旱、特旱事件增加明显。

II 区 1961~1987 年间干湿事件变化交替频繁, 1988~2003 年为主要湿润期, 2004~2015 年为主要干旱期。1961~2015 年间, II 区有 119 个月达到中旱及以上等级, 其中中旱 81 个月、重旱 29 个月、特旱 9 个月。1972 年发生严重的旱灾, 1984~1986 年连旱, 2013 年发生 60 年一遇的干旱。

III 区干湿事件交替频繁。1963~1964、1967~1972、1973、1979~1984、1989~1990、1996、1998、2000 年为主要湿润年份, 1965~1967、1978~1979、1992~1995、1999、2001 及 2009~2015 年为主要干旱年份。III 区共有 113 个月达到中旱及以上等级, 其中中旱 69 个月、重旱 35 个月、特旱 9 个月, SPI 于 1966 年底达到最小值-2.3。2009 年以后, 鄂中东区出现持续性干旱事件。

IV 区经历了 1963~1968 年的干旱期、1969~1981 年的相对湿润期、1982~1990 年的相对干旱期、1991~2002 年的湿润期以及 2003 年以后的干旱期, 该区干旱历时较短的事件较多。IV 区共有 108 个月达到中旱及以上等级, 其中中旱 69 个月、重旱 33 个月、特旱 6 个月, SPI 于 1963 年达到最小值-2.8。

V 区与其相邻的 IV 区干湿事件交替存在相似性, 例如干旱事件以中轻旱居多, 1990s 湿润事件多于干旱事件, 2000 年后干旱事件增加明显。但也存在一些差异, V 区中旱事件(54 个月)少于 IV 区。V 区由于受到洞庭湖和鄱阳湖的影响, 降水较丰沛, 干旱事件相对较少。

VI 区在 1980 年以前, 干旱事件多于湿润事件, 在 1960s 中后期发生持续干旱, 1980s 至 1990s 为主要湿润期, 2000 年后虽有干湿变化, 但幅度不大。VI 区共有 89 个月达到中旱及以上等级, 其中特旱 17 个月。SPI 最小值-3.4 出现于 1979 年, 表明最严重的干旱发生于该区^[25]。

综上, (1) MLYR 不同降水亚区干湿事件交替过程存在差异。其中, VI 区与其它亚区差异较大; II 区、IV 区和 V 区的干湿事件具有相似的时间演变模式, 但他们在不同时间段上的干旱历时和干旱程度仍有所差异。(2) MLYR 全域性干旱主要发生 1966~1967、1978~1979、1986、2001、2006、2011、2013 年。(3) 除 VI 区外, 2000 年后 MLYR 干旱发生频率增加明显。

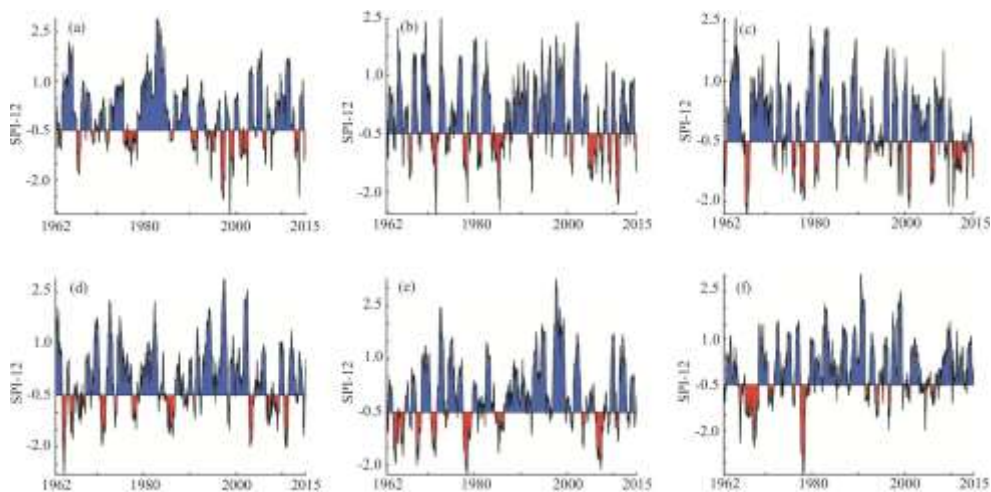


图 3 MLYR 降水亚区 SPI-12 时间序列 (a) I 区, (b) II 区, (c) III 区, (d) IV 区, (e) V 区, 和 (f) VI 区

2.3 不同降水亚区干旱的周期特征

图 4 为 MLYR 不同降水亚区 SPI-12 时间序列的小波功率谱和小波全谱图, 白色粗实线表示周期特征达到 $\alpha=0.05$ 显著性水平, 黑色粗实线为影响锥。因受边界效应的影响, 网格覆盖区域的周期特征存在不确定性, 分析时不予考虑。

图 4a 小波功率谱图表明 I 区 SPI-12 时间序列存在 3 个显著周期, 分别为 4 年左右周期(1961~1970 年)、1.5~3 年周期(1996~2005 年)和 6~10 年周期(1973~1992 年), 但从小波全谱上看, 仅 9.3 年周期的小波功率谱在整个时间段上的平均值达到了 $\alpha=0.05$ 显著性水平。

II 区 SPI-12 时间序列主要存在 1.5~8.0 年的显著周期(图 4b), 其中 1966~1985 年表现出 2~4 年的变化周期; 1998~2008 年以 3.5~6.0 年的周期为主, 期间叠加着 2 年左右的短周期, 7~8 年振荡周期存在于 1984~1991 年。小波全谱图表明 II 区 SPI-12 时间序列的第一主周期为 3.5 年, 第二主周期 1.9 年。

III 区 SPI-12 时间序列也主要表现出 1.5~8 年的显著周期, 且显著周期随着时间的变化呈现缩短的趋势(图 4c)。其中, 在 1966~1973 存在 3.8~7 年的振荡周期, 1975~1988 年显示出 1.8~5.0 年的变化周期, 1995~2004 年表现出 1.5~3 年的年际变化。此外, 在 1984~1995 年间还表现出很强的 7~8 年主振荡周期。第一主周期 6.6 年, 第二主周期 3.5 年, 第三主周期 2.2 年。

图 4d 小波功率谱图表明 IV 区 SPI-12 时间序列在 1970~1988 年间以 8 年左右周期为主, 其间叠加着 2~4 年的短周期。1993~2013 年存在 1.5~5.0 年的振荡周期。第一主周期 2.5 年, 第二主周期 3.7 年。

V 区 SPI-12 时间序列主要存在 4 个显著周期(图 4e), 分别为 2~4 年周期(1965~1975 年)、8 年左右周期(1972~1988 年)、3~5 年周期(1992~2007 年)和 1.8~3.0 年周期(2009~2013 年)。第一主周期 3.7 年。

VI 区 SPI-12 时间序列 1970~2002 年存在极强的 6~10 年主振荡周期, 其中在 1968~1973 及 1998~2003 年叠加着 3~4 年的周期, 1974~1985 年、1988~2001 年叠加有 1.5~4 年的振荡周期(图 4f)。第一主周期为 9.3 年, 第二主周期 3.5 年。

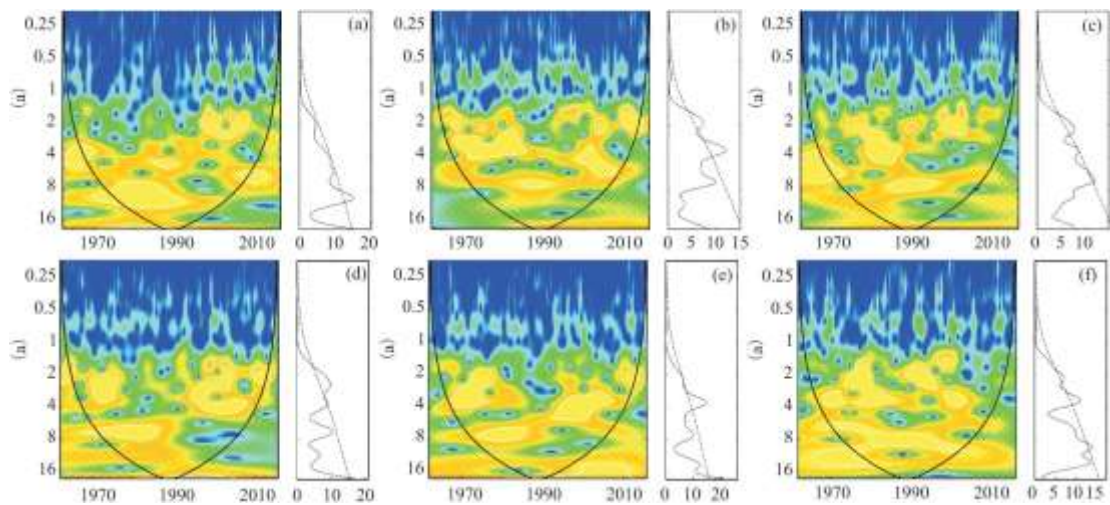


图 4 MLYR 降水亚区 SPI-12 时间序列的 Morlet 小波功率谱及小波全谱图

综上, (1)不同降水亚区气象干旱的第一主周期存在差异, 北部(I区、III区、VI区)和南部(II区、IV区、V区)具有明显的局部化特征。(2)各降水亚区大都存在着3.5年左右的主周期。

3 结论与讨论

本文基于1961~2015年逐月的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 降水格点数据, 运用系统聚类法对MLYR进行了降水分区, 并分析了各降水亚区干旱的变化趋势及其周期特征。主要得到以下结论:

(1)MLYR可分为6个降水亚区: 大巴山地农业区(I)、湘鄂贵渝山地农业区(II)、鄂中东平原农业区(III)、湘赣平原丘陵农业区(IV)、鄱阳湖平原农业区(V)、长江三角洲平原农业区(VI)。

(2)MLYR不同降水亚区干湿事件交替过程存在差异, VI区与其它亚区差异较大, II区、IV区和V区的干湿事件具有相似的时间演变模式; 除VI区外, 2000年后其他降水亚区干旱发生频率增加明显。

(3)MLYR不同降水亚区气象干旱的第一主周期存在差异, 北部(I区、III区、VI区)和南部(II区、IV区、V区)具有明显的区域分化特征, 但各降水亚区大都显示出3.5年左右的主周期。

近年来, MLYR干旱发生频繁, 已经严重影响到人民的生产生活和国家粮食安全^[25]。但是, 将MLYR作为单一的研究对象, 无法揭示该区域内的干旱变化, 有必要依据气候变量对MLYR进行空间细分。目前, 大多数学者基于气象站点数据, 采用旋转正交函数分解(EOF)方法进行气候分区研究^[33, 34], 但是 EOF是一种经验方法, 在确定气候亚区边界上存在着一定的主观性和模糊性, 而本文基于格点数据, 利用系统聚类方法可以明确各气候亚区的边界, 不过存在分界线不够光滑的问题。

参考文献:

- [1]巢清尘, 周波涛, 孙颖, 等. IPCC气候变化自然科学认知的发展[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 7-13.
- [2]刘吉峰, 丁裕国, 江志红. 全球变暖加剧对极端气候概率影响的初步探讨[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 837-842.
- [3]李维京, 赵振国, 李想, 等. 中国北方干旱的气候特征及其成因的初步研究[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 1-5.
- [4]周扬, 李宁, 吉中会, 等. 基于SPI指数的1981-2010年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694-1706.
- [5]马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 737-746.
- [6]任余龙, 石彦军, 王劲松, 等. 1961-2009年西北地区基于SPI指数的干旱时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 938-948.
- [7]张强, 姚玉璧, 王莺, 等. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7206-7218.
- [8]王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 基于标准化降水指数的1960-2011年中国不同时间尺度干旱特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 827-834.

-
- [9]姚玉璧,王莺,王劲松. 气候变暖背景下中国南方干旱灾害风险特征及对策[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3):432-439.
- [10]王文,蔡晓军. 长江中下游地区干旱变化特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(6):1587-1593.
- [11]张桂香,霍治国,吴立,等. 1961-2010年长江中下游地区农业洪涝灾害时空变化[J]. 地理研究, 2015, 34(6):1097-1108.
- [12]卞洁,李双林,何金海. 长江中下游地区洪涝灾害风险性评估[J]. 应用气象学报, 2011, 22(5):604-611.
- [13]陈鲜艳,周兵,钟海玲,等. 2011年长江中下游春旱的气候特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1):139-145.
- [14]王文,许志丽,蔡晓军,等. 基于PDSI的长江中下游地区干旱分布特征[J]. 高原气象, 2016, 35(3):693-707.
- [15]CHEN L J, CHEN D L, WANG H J, et al. Regionalization of precipitation regimes in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2009, 2(5):301-307.
- [16]秦年秀,姜彤. 基于GIS的长江中下游地区洪灾风险分区及评价[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(5):1-7.
- [17]赵煜飞,朱江,许艳. 近50a中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学, 2014, 34(4):414-420.
- [18]高西宁,徐庆喆,丛俊霞,等. 基于标准化降水指数的辽宁省近54年干旱时空规律分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11):1851-1857.
- [19]杨茂灵,王龙,高瑞,等. 南盘江流域近30年季节性干旱时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2):251-256.
- [20]唐宝琪,延军平,李双双,等. 近55年来华东地区旱涝时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3):497-505.
- [21]罗剑锋,陈敏,李煜,等. 两类ENSO事件对长江中下游地区季节降水的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4):82-89.
- [22]BADR H S, DEZFULI A K, ZAITCHIK B F, et al. Regionalizing Africa: Patterns of precipitation variability in observations and global climate models[J]. Journal of Climate, 2016, 29(24):9027-9043.
- [23]MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//In Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993:179-184.
- [24]张强,邹旭恺,肖风劲,等. 气象干旱等级(GB/T 20481-2006) [S]. 北京:中国标准出版社, 2006:14-15.
- [25]李明,柴旭荣,王贵文,等. 长江中下游地区气象干旱特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2):374-384.
- [26]李明,胡炜霞,王贵文,等. 基于Copula函数的中国东部季风区干旱风险研究[J]. 地理科学, 2019, 39(3):506-515.
- [27]GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980-2010[J]. Journal of Hydrology, 2013, 494:32-42.

-
- [28]王勇, 缪启龙, 丁园圆. 西北地区春季沙尘暴的区域性时间变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11):30-37.
- [29]GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(5/6):561-566.
- [30]WANG Q, LIU Y Y, TONG L J, et al. Rescaled statistics and wavelet analysis on agricultural drought disaster periodic fluctuations in China from 1950 to 2016[J]. Sustainability, 2018, 10(9):3257.
- [31]冯彩琴, 董婕. 陕南地区近 47 年来气温、降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8):122-126.
- [32]李小燕, 任志远, 张翀. 陕南气温变化的时空分布[J]. 资源科学, 2012, 34(5):927-932.
- [33]李明, 王贵文, 张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6):65-70.
- [34]袁云, 李栋梁, 安迪. 基于标准化降水指数的中国冬季干旱分区及气候特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4):917-925.