DOI: 10.5846/stxb201305080984

于文金,黄亦露,邵明阳.澜沧江流域极端天气灾害特征及波动趋势.生态学报,2015,35(5):1378-1387. Yu W J, Huang Y L, Shao M Y.Research on characteristics of extreme weather disasters and fluctuations trend on Lancang river basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5):1378-1387.

澜沧江流域极端天气灾害特征及波动趋势

于文金*,黄亦露,邵明阳

南京信息工程大学海洋学院,南京 210044

摘要:基于中国气象局国家气象信息中心提供的澜沧江 1961—2010 年气象资料,采用 小波分析、EMD 分解、CI 指数、均生函数 逐步回归模型、相关分析等方法,探讨 19 世纪末至 21 世纪初澜沧江流域极端天气灾害的变化特征,及其区域极端灾害变化和 全球气候变化之间的联系。结果表明:(1)1961—2010 年 50a 期间,年降水量趋于稳定,略有上升,但上升率较小,只有 3.1848。 年降水量距平分布图反映了降水量南多北少的区域差异,正负距平之间在-2 到 2 之间,北部干旱出现的几率较大。(2)近 20 年来,澜沧江区域干旱次数明显上升,而澜沧江流域年暴雨频次在过去 50a 和未来的 20a 内没有明显的增加趋势,干旱频次未 来 20 年内呈斜率 0.2635 的上升态势,未来该区域极端天气灾害主要是干旱灾害。(3)该区域降水和暴雨频次存在多尺度特征,两种研究方法都得到澜沧江流域降水量存在 2、7、15a 的变化周期,只是两种方法得出的主周期不同,EMD 方法比小波方法 更适合处理非平稳、非线性信号,可以认为澜沧江流域降水量存在 2、7、15a 的变化周期,且主周期为准 2a。(4)降水量和暴雨 频度序列的 IMF1 和 IMF2 周期在 2 —7 a 之间,与 ENSO 在年际变化上的信号相吻合,推断澜沧江流域暴雨和干旱灾害与 ENSO 有重要联系,且随着气温升高干旱灾害频次明显增加,显示区域极端气温灾害的变化与全球气候变暖有某种关联,是全 球气候变化的区域响应表现形式之一。

关键词:澜沧江;干旱;脆弱性;干旱指数;阀值

Research on characteristics of extreme weather disasters and fluctuations trend on Lancang river basin

YU Wenjin^{*}, HUANG Yilu, SHAO Mingyang

Nanjing University of Information Science and Technology, College of Marine Sciences, Nanjing 210044, China

Abstract: The meteorological data from 1961 to 2010 about the Lancang region which was provided by National Meteorological Information Center were used to to explore the link between the variation of the Lancang River Basin extreme weather disasters in the late 19th century to the early 21st century, and its regional extreme disasters change and global climate change the method whose using wavelet analysis, EMD decomposition, CI index, mean generating function stepwise regression model, mutation testing and correlation analysis etc were been used. It is showed that by the results: (1) Annual precipitation is stabilized, rose slightly, but the rate of rise is small, only 3.1848 in the 50-year period of which from 1951 to 2010. Annual precipitation anomaly maps to reflect regional differences in precipitation in the south than in the north, between positive and negative anomalies between -2 to 2, the probability of occurrence of the northern arid. (2) In the past 20 years, the Lancang area arid the number was significantly increased by the Lancang River Basin annual rainstorm frequency times in the past 50 years and the next 20 years there is no obvious increase trend, drought frequency times the next 20 years showed a slope of 0.2635 the rising trend, the future of the region of extreme weather disasters, mainly

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助[2013CB430200(2013CB430206)];国家重大科学研究计划项目(2012CB955900);江苏高校优势学 科建设工程资助项目(PAPD)

收稿日期:2013-05-08; 网络出版日期:2014-04-17

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yuwj@ nuist.edu.cn

http://www.ecologica.cn

drought disaster. (3) There have multi-scale features about regional precipitation and storm frequency, whose 2a, 7a, 15a change cycle in Lancang River Basin precipitation has been proved by two research methods, but whose main cycle by two method is different. It is showed that EMD method is more suitable than wavelet method to deal with non-stationary, non-linear signal, concluded that the precipitation of the Lancang River Basin 2a, 7a, 15a change cycle, and primary cycle prevail 2a. (4) The cycle of IMF1 and IMF2 about precipitation and frequent rainstorms the degree sequence is between 2—7 a, which is coincided similar to that of ENSO. It was inferred by it that there is important connection between the storms and drought disasters of Lancang River Basin and ENSO. As the temperature increased significantly increased frequency of drought disasters, all of those showed that extreme temperature disasters, climate change and global warming have some connection to one of the manifestations of global climate change, regional response.

Key Words: Lancang river; drought; vulnerability; drought index; threshold

进入新世纪以来,全球变暖趋势日益引起人们的关注,全球变化条件下,极端事件频繁发生,是气候变化的重要表现特征,许多情况下,它既是气候系统对自然生态改变最敏感的响应,也是造成气候系统改变的驱动力^[1-3]。过去几十年的研究发现在全球大部分陆地表面出现了显著的强降雨增加而小雨及中雨减弱的趋势,这种广泛增加的强降水事件被许多学者归因于气候变暖^[4-5],而区域极端气候事件对全球气候变化的响应机理尚不清晰,极端气候灾害的归因问题也存在诸多疑点^[6]。干旱和洪涝灾害作为最重要的极端气候事件表现形式成为反映全球变化背景下区域响应的重要方面,成为研究全球变化特征和相关机理的重要领域。澜沧江-湄公河流域纵贯 13 个纬度,最大相对高差近 5000 m,跨 6 种气候带,是一个特殊的环境变化敏感区,它在气候、水文、地理、生态学等多方面都具有重要的科学研究价值。探讨澜沧江-湄公河流域降水特征和干旱机理对于认识澜沧江流域实时灌溉预报调度、水资源合理配置及其对气候变化下的区域气候灾害响应机理等重大问题具有重要的意义。

1 资料和方法

1.1 资料来源和处理

资料来源于中国气象局国家气象信息中心,为选择 足够数量的典型站,使采用的降水资料能够代表研究区 降水情况并满足后续分析计算的基本要求,根据多步迭 代估计方法对站点最优个数进行估计,从而得出最佳样 本数量(选取置信水平为 95%的 Student t 检验得到置 信区间),共选取了澜沧江流域及其周边 35 站,数据经 严格订正,研究时段为 1961—2010 年,各站点位置如 图 1。

研究中根据国家气象局制定的气象行业规范标准, 并参考国内外同类研究^[7-9],简化为日降水量 0.1—5 mm,5—10 mm,10—50 mm,50 mm 以上 4 个量级,其中 第 1 个和第 2 个常俗称"毛毛雨",对土壤水分涵养具 有重要意义,第四个则属暴雨或大暴雨,往往会诱发洪 涝、滑坡、泥石流等严重自然灾害,它们都属于极端降水 的范畴。10—50 mm 量级在本研究中则主要用于对比 参照。对于网站个别年份资料缺失问题均经过等距离 插值法处理。





1.2 研究方法

1.2.1 干旱指数

本文所用干旱指标是由国家气候中心创建的以标准化降水指数、湿润度指数及近期降水量为基础的综合 干旱指数 Ci,该指标适合实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估。综合气象干旱指数(Ci)的计算如下:

$$Ci = aZ_{30} + bZ_{90} + cM_{30} \tag{1}$$

式中, Z₃₀、Z₉₀分别为近 30 天和近 90 天标准化降水指数 SPI 值, M₃₀为近 30 天相对湿润度指数,该指数是表征 某时段降水量与蒸发量之间平衡的指标之一。a 为近 30 天标准化降水系数, b 为近 90 天标准化降水系数, c 近 30 天相对湿润度系数。干旱等级划分见表 1, 研究中, 设定降水量致灾阀值, 20d 无降水为轻旱, 30d 无降 水为中旱, 60d 无有效降水为重旱。

表1 综合气象干旱等级的划分表

	Table 1	Comprehensive meteorological drought level division table					
等级 Grade	类型 Type	Ci 值 Value of Ci	干旱影响程度 Extent of the effects of drought				
1	无旱	-0.6 <ci< td=""><td>降水正常或较常年偏多,地表湿润,无旱象</td></ci<>	降水正常或较常年偏多,地表湿润,无旱象				
2	轻旱	$-1.2 < Ci \le -0.6$	降水较常年偏少,地表空气干燥,土壤出现水分轻度不足				
3	中旱	-1.8< <i>Ci</i> ≤-1.2	降水持续较常年偏少,土壤表面干燥,土壤出现水分不足,地表植物叶 片白天有萎蔫现象				
4	重早	-2.4< <i>Ci</i> ≤-1.8i	土壤出现水分持续严重不足,土壤出现较厚的干土层,植物萎蔫 ^[17] 、 叶片干枯,果实脱落;对农作物和生态环境造成较严重影响,工业生 产、人畜饮水产生一定影响				
5	特旱	$Ci \leq -2.4$	土壤出现水分长时间严重不足,地表植物干枯、死亡;对农作物和生态 环境造成严重影响,工业生产、人畜饮水产生较大影响				

1.2.2 降水周期变化研究方法

(1) Morlet 小波分析

小波方差分析是小波分析的重要内容,小波方差图反映了能量随时间尺度的分布,可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度^[10],对应峰值处的尺度称为主要时间尺度,用以反映时间序列的主要周期。其 计算式为:

$$\omega(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |K(a,\tau)|^2 d\tau$$
(2)

Morlet 小波系数的实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息,正的小波 系数反映出分析对象在该时间段为偏多期,负值时反映为偏少期,零值对应着突变点。

(2)EMD法

为深入分析极端降水变化的典型地区的演变特征,本文借鉴 Huang 等^[11]提出的经验模态分解方法 (Empirical Mode Decomposition, EMD),选择的站点降水量序列进行分解。EMD 可对一个时间信号将其不同 尺度(频率)的波动或趋势逐级分解开来,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,称为本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF),它是目前处理非平稳、非线性信号,特别是分析时间序列趋势的最好方法,相 比传统的傅立叶谱分析、小波分析等具有明显的优势^[12-13]。游程理论是指持续出现的同类事件,在其前或其 后为另外事件。年降水资料可视为一个离散序列,若以多年平均降雨量 Q_0 为阈值,凡 $Qi>Q_0$ 者具有正变差, 属多水集团; $Qi \leq Q_0$ 者具有负变差,属少水集团。当连续出现 $Qi>Q_0$ (或 $Qi \leq Q_0$)时,则出现连丰年(或连枯 年),连丰年称为正游程,连枯年称为负游程,以此分析降水的丰枯变化^[11-12]。游程概率可用下式计算:

$$\frac{P = \rho^{(k-1)} \times (1 - \rho)}{\rho = (s - s_1)/s}$$

$$(3)$$

式中,P为连续K年丰水或枯水发生概率;K为连续丰水(枯水)的年数;p为模型分布参数;s为统计资料中丰水(枯水)年累计频次;s1为连丰(枯)年发生的累计年频次。

2 结果与分析

2.1 降水特征

通过对澜沧江流域降水资料分析发现,1960—2011 年 50a 期间,年降水量趋于稳定,略有上升,但上升率较 小,只有3.1848,中间虽有波动,总体反应了稳定的湿润 气候特征。年降水量距平分布图(图2)反映了降水量 南多北少的区域差异,距平差距不大,正负距平之间在 -2到2之间。从区域空间分布来看,北部干旱出现的 几率较大。采用均生函数逐步回归模型对未来 20a 内 该流域降水量进行预测,拟合结果预测(图 2)2011— 2016年年降水量处于上升趋势,此后缓慢下降,2021年 后重新步入上升趋势,但总量变化不大。

2.2 极端灾害天气特征

采用综合气象干旱指数 Ci 和其确定的指标,对澜 沧江流域 1956—2010 年年度和春季时间段不同程度干 旱频率进行计算,研究结果显示,全年发生轻旱情况比 较广,中南部均出现轻旱分布;中旱分部区域和轻旱区 域基本吻合,但趋于萎缩,呈三团状分布;重特旱分布面 积较小,只有在中部一小部分和南部山区。春季干旱情 况来看,也体现出出现干旱的区域主要在南部地区,但 春季干旱呈现出与全年干旱不同的特征,轻旱分布面积 小,中大干旱分布面积较大(图4),因此,澜沧江流域春 季防旱任务严重,应特别重视春季干旱的预防预报。

采用均生函数逐步回归模型对未来 20a 内该流域 暴雨量进行预测(图5),可知由暴雨发生频率来看, 1986年前,呈现震荡下降趋势,其后,又呈现明显的震 荡上升趋势。2000年和2001年都达到了14次之多。 从降水游程来看,30d 以上间隔降水游程呈现明显上升 趋势,年均 60d 无降水几率在 1988 年显著上升,是 70 Fig.3 The graph of trend of Precipitation on Lancang River Basin 年代的4倍。这说明,近20年来,澜沧江区域干旱次数 明显上升。

35°N 349 339 32 31 30° 29 28° 27 26° 25° 24° 23° 22° 21° 20° 949 96 98 100° 102° 104°E

图 2 澜沧江区域年降水量距平分布图

Fig.2 The map of precipitation anomaly distribution in Lancang **River** region





研究发现,35个站点中,出现 30d 以上无降水频次的最多达 25个(2006年),而且发现,连续高值和连续 低值现象,连续高值出现在1966—1970,1983—1986,1993—2003,2006—2010时间段,其中间间隔为低值区, 这也表明了区域降水具有持续性特征,连枯的模型参数值大于连丰的,则连枯较连丰更频繁的出现。代表站 的 Hurst 系数均大于 0.5,介于 0.523---0.842 之间,均值为 0.658。表明该区降水具有持续性特征,现在的降 水特性将会影响未来的降水趋势。均生函数逐步回归模型预测结果显示(图5,图6),澜沧江流域年暴雨频 次在未来的 20a 内没有明显的增加趋势,而 30d 以上无降水的中旱以上干旱频次自 2006 年以来明显上升,预 测结果也显示干旱频次未来 20a 内呈斜率 0.2635 的上升态势,说明未来澜沧江流域干旱灾害有加重趋势,未 来该区域极端天气灾害主要是干旱灾害。

综合观察 1961—2010 年 50a 澜沧江区域气温变化和极端天气状况发现,50a 来,区域年均温呈现震荡上升

1381

趋势,1981年前尚不明显,1981年后呈现明显增温趋势,这与东亚地区气候变化趋势和全球变暖的趋势相吻合; 本区域暴雨灾害天气出现频度总体来看呈现相对稳定状态,上升趋势不明显。而干旱灾害特别是 30d 以上无降 水事件出现频率呈现震荡上升趋势,2005年以来呈现加速上升趋势,与温度上升相呼应,并且研究发现,暖年干 旱频次明显高于同时间冷年的干旱频次,例如,在暖年 1968、1977、1985、1996、2008年份,均出现了明显的干旱频 次峰值,暖年也有降水峰值,且 1981年后干旱趋势与气温增加趋势也比较一致(图 7),因此,在一定程度上可以 推断,澜沧江流域干旱灾害频度趋于活跃是全球气候变暖下的区域响应的一种表现形式。



图 4 澜沧江流域干旱灾害情况分布(a,b,c;表示全年轻旱、中旱、重旱;d,e,f分别表示春季轻旱、中旱、重旱分布) Fig.4 Lancang River Basin drought disaster distribution (b,c said light drought, drought, annual drought; d, e, f said spring light drought, drought, heavy drought distribution)

2.3 极端灾害周期特征

2.3.1 小波结果分析

根据小波理论研究结果发现,澜沧江流域 50a 的年降水量存在多个尺度的周期,比较复杂。存在 4 个明

显的特征时间尺度,分别为 2、6—7、9a 和 15—17a。其 中,2 年的周期振荡基本贯穿整个研究时域,表现稳定, 在 2000 年后,周期振荡逐渐消失;6—7a 的周期存在于 1979 年之前,期间周期稳定,之后周期振荡消失,以 5a 的周期为主,且周期有随着时间的延长增长的趋势;周 期 8—10a 几乎贯穿整个研究时域,从 1962 年开始,周 期振荡比较稳定,但是周期有减小的趋势;15—17a 的 周期振荡贯穿整个研究时域,在这个尺度上近 55 年来 云南地区的降水大致经历了少→多→少→多→少→多



→少的过程,而在 2010 年处的等值线还未完全闭合,说明 2010 以后的几年里在该周期上降水量正处于偏少期;看其它周期均说明在 2010 年后降水量偏少(图 8)。小波方差表现出 4 个峰值,降水量序列存在 2、6—7、9、15—17a 的振荡周期,这些周期决定了降水量在整个时间域内的变化特性。其中 9 年的扰动能量很大,其次是 6—7、2a,最后是 15—17a 的周期,可见 9a 的周期是主周期(图 8)。











2.3.2 EMD 分解结果分析

前人研究发现^[14-16],EMD 分解有可能产生虚假分量,相关系数较大、图像相似性较好的分量才是最主要的分量。计算了各序列 EMD 分解得出的 IMF 分量和原序列的相关系数,对各个分解出的 IMF 项与原序列进行相关系数统计,可以看出一般前两个分量与原序列相符程度比较高,此外对相关系数进行了 *t* 检验,给定显著性水平 α=0.05,查相关系数表,表格中带**部分为未通过显著性检验,同时设置相关系数 1/10 为门限值,未通过显著性检验和未达到门限值的均看做虚假分量。分析结果显示,除春季 IMF7、秋冬 IMF8 外,各

1383

IMF1 与原序列相关系数均大于门限值,且绝大部分达 到 0. 05 显著性水平(表 2),显示 EMD 分解的结果比 较理想。需要说明的是,本文分析采用的是消除趋势后 标准化的分解序列,缺失数据采取了等距插值法处理。

澜沧江流域降水量序列 EMD 分解的结果显示,澜 沧江流域降水量总体来说振幅逐渐变小,而平均周期由 短变长。暴雨频次序列 IMF1—IMF5 的平均周期分别 为2.8、4.2、6.2、9.4、16.7、25a, 而降水序列的平均周期 分别为 2.9、7.1、15.4、30.8 a.因此二者周期对应关 系较好,暴雨频次序列的变化周期小于降水序列周期 (图 9)。计算各模态和趋势项的方差贡献率,得出 IMF1 的贡献率最大,2.8a 和 4.2a 是暴雨频次的主周 期,2.9a 和 7.1a 为暴雨降雨量的主周期,即准 2 a 周期 是澜沧江流域洪灾的主要周期,同时也是中国洪灾变化 的最主要周期(表3)。进一步将暴雨变化划分为年际 信号(IMF1、IMF2)、年代际信号(IMF3)和几十年际信 号(IMF4、IMF5),则各信号的方差贡献率基本上是递减 的,且年际信号(前两个分量)包括了最主要的方差贡 献率,洪灾和降水序列年际信号的累计方差贡献率分别 达 51.3% 和 84.1% (表 4)。



图 8 澜沧江流域降水小波震荡周期

Fig. 8 Precipitation wavelet vibration period about Lancang River Basin

		相关系数 Correlation coefficient						
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
春季 Spring	0.65	0.34	0.30	0.21 **	0.31	0.31	0.04 **	0.37
夏季 Summer	0.61	0.45	0.28 **	0.09 **	0.38	0.28 **	0.19**	
秋季 Autumn	0.71	0.51	0.26 **	0.30	0.19 **	0.27 **	0.28 **	0.03 **
冬季 Winter	0.71	0.51	0.26 **	0.30	0.19 **	0.27 **	0.28 **	0.03 **

表 2 EDM 分解各分量和原序列相关系数 Table 2 The correlation coefficient about EDM decomposition components and raw sequence

* * 为未通过显著性检验

综合对比两种方法得出的结果发现,根据小波理论研究澜沧江流域降水量序列存在 2、6—7、9、15—17a 的振荡周期,其中 9a 的扰动能量很大,其次是 6—7、2a,最后是 15—17a 的周期,可见 9 年的周期是主周期。 澜沧江流域降水量序列 EMD 分解的结果显示,澜沧江流域降水量总体来说振幅逐渐变小,降水序列的平均 周期分别为 2.9、7.1、15.4、30.8 a,准 2、7a 为其主周期,对比两者可以看到,两种研究方法都得到澜沧江流域 降水量存在周期性变化,而且均存在 2、7、15a 的变化周期,只是两种方法得出的主周期不同,由于采用 EMD 方法比小波方法具有更强的局部表现能力,所以适合处理非平稳、非线性信号,所以,推断沧江流域降水量存 在 2、7、15a 的短期变化周期,而且主周期为 EMD 方法所得到的主周期,即准 2a。

一些学者在分析中国近 500a 旱涝时发现,中国东部夏季降水有世纪周期存在,认为 1873—2000 年东亚 夏季风有显著的 80a 周期,其次尚有 40a 周期、8—10a 周期及准 2a 周期等^[17-19]。这些结论与本文的分析结 果得出的结论不一致主要原因在于前两位研究者是从中长期时间序列得出的长期波动规律,而本文研究结果 更多的是对中短期震荡规律的研究。 5 期



图 9 夏季降水量 EMD 分解与暴雨频次 EMD 分解量示意图

Fig.9 EMD about precipitation in summer and EMD about rainstorm frequency decomposition of decomposition volume diagram

表 3 各个 IMF 分量对用	小有分量的万差贡献率
-----------------	------------

Table 5 The main component on an subscales of the variance contribution rat	Table 3	The IMF	component on	all subscales of	of the	variance	contribution	rate
---	---------	---------	--------------	------------------	--------	----------	--------------	------

		方差贡献率 Variance contribution rate								
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8		
春季 Spring	47.62	19.67	8.19	3.11	5.50	8.29	0.20	7.41		
夏季 Summer	38.70	23.80	6.57	6.53	9.14	10.15	5.11	—		
秋季 Autumn	58.93	16.01	4.42	8.81	2.83	3.50	5.47	0.01		
冬季 Winter	39.83	6.25	15.21	2.91	17.84	7.82	2.77	7.37		

同时,降水量和暴雨频度序列的 IMF1 和 IMF2 周期在 2 —7a 之间,与 ENSO 在年际变化上的信号相吻合。ENSO 是海气耦合系统中最强的年际变化信号,它对东亚夏季风的强弱变化和中国夏季降水的分布有重

要影响,可以推断澜沧江流域暴雨和干旱灾害与 ENSO 有重要联系,这一点也得到其他学者研究结果的 验证^[20-23]。

Table 4	The IMF compone	ents of varia	nce contribu	ition rate of	rainstorm f	requency		
相关系数和方差贡献 Correlation coefficient and variance contribution	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
相关系数 Correlation coefficient	0.65	0.36	0.51	0.21 *	0.32	0.29	-0.04 *	0.11 *
方差贡献 Variance contribution	51.24	13.58	17.65	2.36	4.78	9.81	0.11	0.49

表 4 暴雨频次各 IMF 分量的方差贡献率

带*为未通过显著性检验

3 小结

(1) 1961—2010 年 50a 期间,年降水量趋于稳定,略有上升,但上升率较小,只有 3.1848。年降水量距平 分布图反映了降水量南多北少的区域差异,正负距平之间在-2 到 2 之间,北部干旱出现的几率较大。

(2)近20年来,澜沧江区域干旱次数明显上升,而澜沧江流域年暴雨频次在过去50a和未来的20a内没 有明显的增加趋势,预测结果显示干旱频次未来20a内呈斜率0.2635的上升态势,说明未来澜沧江流域干旱 灾害有加重趋势,未来该区域极端天气灾害主要是干旱灾害。

(3)两种研究方法都得到澜沧江流域降水量存在周期性变化,而且均存在2、7、15a的变化周期,只是两种方法得出的主周期不同,由于采用 EMD 方法比小波方法具有更强的局部表现能力,所以适合处理非平稳、非线性信号,所以,断定澜沧江流域降水量存在2、7、15a的短期变化周期,而且主周期为准2a。

(4) 降水量和暴雨频度序列的 IMF1 和 IMF2 周期在 2 —7a 之间, 与 ENSO 在年际变化上的信号相吻合, 推断澜沧江流域暴雨和干旱灾害与 ENSO 有重要联系。

通过以上研究发现,澜沧江区域气候变化和灾害天气的波动规律与全球气候变化具有一定程度的关联性,近年来的极端干旱天气可能是气候变暖的区域响应事件,其两者之间的定量关联和相关作用机理是下一步研究的方向。

参考文献(References):

- [1] Kao S C, Govindaraju R S. A copula-based joint deficit index for droughts. Journal of Hydrology, 2010, 380(1/2): 121-134.
- [2] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [3] 方修琦,陈莉,李帅. 1644—2004年中国洪涝灾害主周期的变化.水科学进展, 2007, 18(5): 656-661.
- [4] 刘会玉,林振山,张明阳.建国以来中国洪涝灾害成灾面积变化的小波分析.地理科学,2005,25(1):43-48.
- [5] 尹义星, 许有鹏, 陈莹. 基于复杂性测度的中国洪灾受灾面积变化研究. 地理科学, 2008, 28(2): 241-246.
- [6] 陈莹, 尹义星, 陈兴伟. 19世纪末以来中国洪涝灾害变化及影响因素研究. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2110-2120.
- [7] 王铮,彭涛,魏光辉,刘啸雷.近40年来中国自然灾害的时空统计特征.自然灾害学报,1994,3(2):16-21.
- [8] 龚道溢. 1880年以来中国季平均降水资料. http://adrem.org.cn/Faculty/GongDY/
- [9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999.
- [10] 龚志强, 邹明玮, 高新全, 董文杰. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究. 物理学报, 2005, 54(8): 3947-3957.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shin H H, Zheng Q A, Yen N C, Tung C C, Liu H H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [12] Rilling G, Flandrin P, Gonçalvès P. On Empirical Mode Decomposition and its algorithms // Proceedings of the 6th IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. Grado, Italy, 2003.
- [13] 朱锦红, 王绍武, 慕巧珍. 华北夏季降水 80 年振荡及其与东亚夏季风的关系. 自然科学进展, 2003, 13(11): 1205-1209.

http://www.ecologica.cn

- [14] 王绍武, 赵宗慈. 中国旱涝 36 年周期及其产生机制. 气象学报, 1979, 37(1): 64-73.
- [15] 莫如平. 中国降水、气温的年际振荡及其与埃尔尼诺的联系. 海洋学报, 1989, 11(2): 143-149.
- [16] 左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析.高原气象, 2004, 23(2): 238-244.
- [17] 叶笃正,黄荣辉.长江黄河流域旱涝规律和成因研究.济南:山东科学技术出版社,1996:15-16.
- [18] 郑双治. 我国洪涝灾害分布的对比分析. 中国减灾, 1995, 5(3): 32-35.
- [19] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, Pan X H. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [20] Liu B H, Xu M, Henderson M, Qi Y. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960-2000. Journal Geophysical Research, 2005, 110(D08): D08103, doi: 10.1029/2004JD004864.
- [21] 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇.1951-2002年中国平均最高、最低气温及日较差变化. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 728-735.
- [22] 谈建国,黄家鑫. 热浪对人体健康的影响及其研究方法. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 680-686.
- [23] 任福民, 翟盘茂. 1951-1990年中国极端气温变化分析. 大气科学, 1998, 22(2): 217-226.