

1960-2005年澜沧江流域极端降水变化特征

李斌^{1,2}, 李丽娟¹, 李海滨³, 梁丽乔¹, 李九一^{1,2}, 柳玉梅^{1,2}, 曾宏伟^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 普林斯顿大学, 新泽西州, 08540)

摘要: 极端降水事件是气候变化的一个重要方面。澜沧江流域纵贯13个纬度, 最大相对高差近5000 m, 跨6种气候带, 是全球少见的南北向大江, 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。自1960年以来, 流域经历了显著的气温上升。探讨在气候变暖背景下这一复杂流域的极端降水变化具有重要意义。本文利用澜沧江流域及其周边35个气象站1961-2005年的日降水资料, 分析了小于5 mm、5~10 mm、10~50 mm以及大于50 mm 4个不同量级降水的降水量、降水日数和日平均降水强度的变化趋势。并计算了每种量级降水占总降水量的百分比及降水频率。结果表明, 各量级各项指标均存在明显的区域变化特征, 流域总体上极端降水频率的增加态势明显。对典型地区站点分析表明, 极端降水的增加可能与气候系统随机性变强有关。

关键词: 降水; 强度; 趋势; 澜沧江流域

1 引言

极值事件是气候变化的一个重要方面。许多情况下, 它既是气候系统对自然生态改变最敏感的反应, 也是造成气候系统改变的驱动力^[1]。根据现有的气候模型计算结果, 随着气候变暖, 极端降水事件将更为频繁, 而过去几十年的研究也的确发现在全球大部分陆地表面都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雨事件被许多学者归因于气候变暖^[2-4]。其根据是按照克劳修斯-克拉珀龙方程(Clausius-Clapeyron equation, 简称为C-C), 大气对流层变暖将使其持水量以7% K⁻¹的速率增加, 这一点已为近几十年的观测所证实^[5]。

澜沧江流域纵贯13个纬度, 最大相对高差近5000 m, 跨6种气候带, 是全球少见的南北向大江, 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, 自1960年以来, 流域也经历了显著的气温上升^[5-6], 按照现有的基于C-C的解释, 区内也应出现极端降水增多的情况, 但目前很少有专门针对本区极端降水的相关研究, 已有的覆盖这一地区的研究多是基于全国尺度, 进而划分大区^[7-9],

然而澜沧江地理地形复杂, 在过大的空间尺度上处理难以反映其真实的变化情况, 更缺乏完整的流域层面的考虑。因此, 本文拟针对这一问题就此作一些探讨。

2 数据和方法

本文资料来源于中国气象局国家气象信息中心, 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1960-2005年。流域多年平均降水量分布情况及各站点位置如图1。研究中首先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, 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, 其中第一个和第二个常俗称“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。

研究中计算的基本参量有: 降水量(mm)、降水日数(d)、日平均降水强度(mm/d)、降水频率(%)、降水量百分比(%)。其中日平均降水强度定义为降水

收稿日期: 2010-04; 修订日期: 2010-07.

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2008FY110300-01); 欧盟第六框架项目(SWITCH-018530).

作者简介: 李斌(1982-), 男, 博士生, 主要从事水文水资源研究. E-mail: lib.07b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 李丽娟(1961-), 女, 吉林人, 研究员, 主要从事水文水资源研究. E-mail: lilj@igsrr.ac.cn

日的平均降水量;降水频率定义为每年各量级降水日数占年降水日数的百分比;降水量百分比定义为各量级降水量占年总降水量的百分数^[10]。考虑到降水量的局地变化较大,不同地区降水量趋势值无可比性,因此分析中采用相对趋势 $(\%/10a)$,其定

义为降水量趋势占多年平均降水量的百分比,具体计算式为 $B=10b/X_{ave}$,本文中 b 为最小二乘法估算的趋势斜率, X_{ave} 为某站1960-2005年降水量的平均值,计算出各站的趋势值后,经Kringing插值得到流域面上分布的情况,其他相关参量的趋势分析方

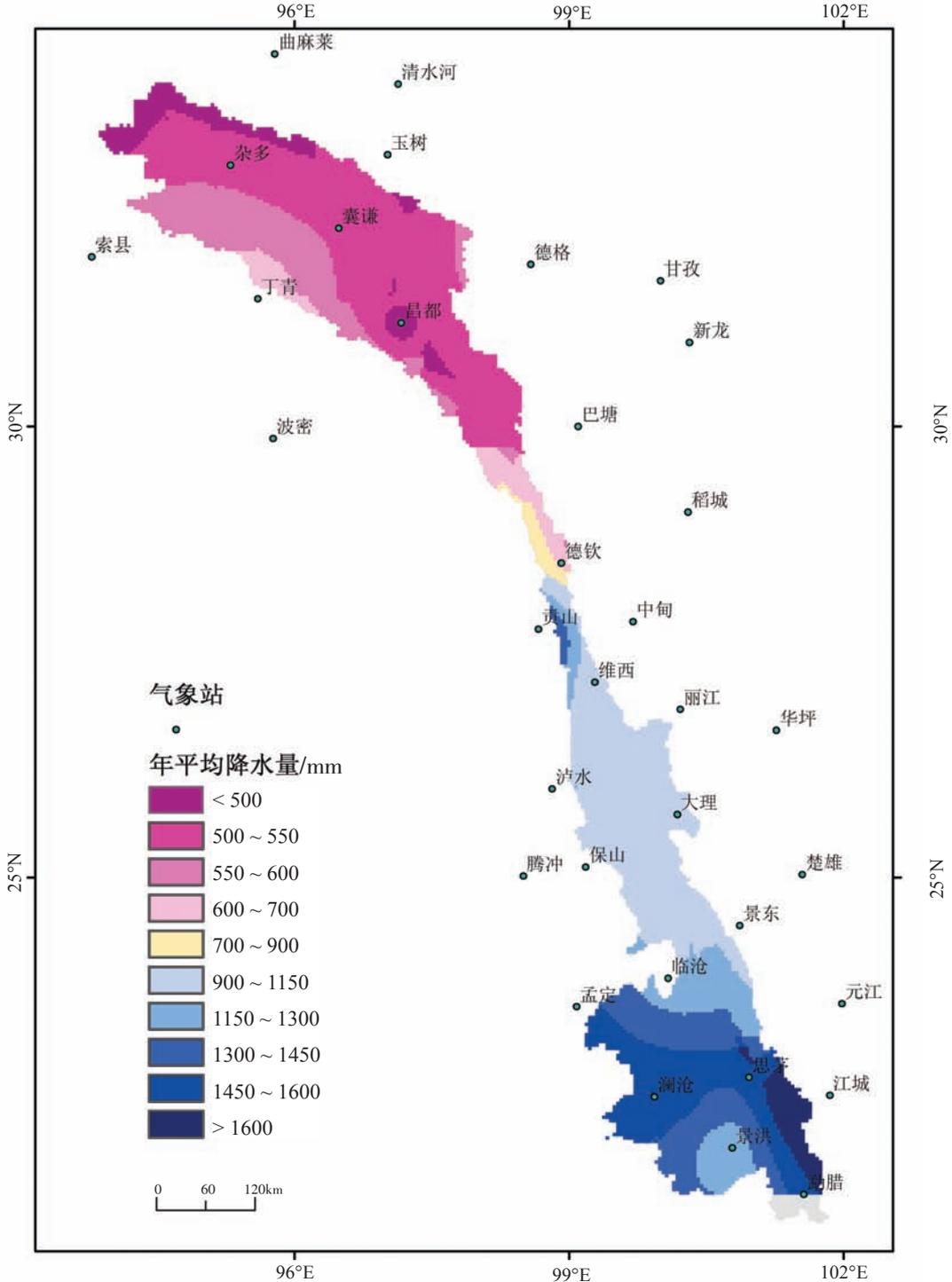


图1 澜沧江流域降水及气象站点分布

Fig.1 The sketch map of the Lancang River basin and locations of meteorological stations

法相同。降水量受降水日数及日平均降水强度共同决定,通过分析三者变化趋势,本文对每一量级的降水探讨了主导其变化的因子。同时还计算了各量级降水的降水频率和降水量百分比的趋势,以体现其对区域总降水量贡献大小的变化。

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),对景东站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]。本文分析了分解得到的各 IMF 分量变化趋势,讨论了年际及十年际以上的长周期变化特征,从而揭示了伴随景东及其周边地区小雨减少、暴雨增多的不利趋势,可能还有气候系统自身的随机性也在增强。

3 结果分析

从降水量的变化看(图 2),在小于 5 mm 量级,降水量的变化可以保山到丽江一线为界分析,以北地区为全部为增加趋势,大部分地区增幅在 1.43%/10a ~ 3.63%/10a 之间,部分地区小于 1.40%/10a。以南地区以减少趋势为主,其中思茅附近地区减幅最大,可达 7.36%/10a。同时,在该区西部的孟定,临沧一带,有一个显著增加区域,其最高增幅可达 10%/10a 以上,在一个纬距左右的范围内增减有如此强烈反差,体现本区降水分异性的确十分明显。

在 5 ~ 10 mm 量级,全流域降水量变化的主要特征为增加趋势,其中,昌都以上的澜沧江上游地区增幅最大,一般在 1.61%/10a 以上。与全流域大部分地区变化趋势相反,在景洪,思茅,景东一带,存在一个降水量的减小地带,最大减幅能够达到 3.76%/10a。

在 10 ~ 50 mm 量级,降水量变化趋势的分布体现出明显的纬向分异性,囊谦以北为减小趋势,最大减幅 3.06%/10a,囊谦往南至临沧/景东一带为增加趋势,除小范围地区增幅达到 6%/10a 以上外,大部分地区小于 3%/10a,临沧、景东以南,以孟定为中心,有一个明显的降水减小区域,其最大减幅可以达到 3.06%/10a。此区以南的流域最南端,则又出现了一个降水量增加地区,但其增幅都不大,小于 1.59%/10a(表 1)。

在大于 50 mm 量级,降水量变化幅度普遍较大,在巴塘-波密一线以南至临沧以北,主要为增加趋势,大部分地区增幅在 3.25%/10a ~ 11.57%/10a 之间,泸水、保山周围部分地区增幅明显,可达 15.74%/10a。临沧以南地区主要为减小趋势,其中变化最强烈的是景洪周边地区,最大减幅可达 13.41%/10a。从降水强度的变化趋势看,在小于 5 mm 量级,全流域均为增加趋势,且增幅自北向南逐渐变大,局部地区增幅可达 20%/10a 以上,孟定、澜沧、勐腊是几个变幅最明显的地区。

在 5 ~ 10 mm 量级,全流域的降水强度以减小为主,但变化幅度极小,最大减幅仅为 0.50%/10a,流域南端以景东-澜沧为界,此线东部地区为增加趋势,但增幅也不大,小于 0.32%/10a。

在 10 ~ 50 mm 量级,昌都以北以减小趋势为主,昌都以南以增加趋势为主,但在孟定-澜沧-思茅一带,有一个明显变小地区,最大减幅近 2%/10a。

在大于 50 mm 量级,巴塘-波密一线至丽江以减小趋势为主,丽江以南至思茅降水强度增加,思茅以南又以减小趋势为主。高强度的降水对山区的危害是显然的,在坡度较大的陡坡山地和向下深切的峡谷地带,短时间内的大量降水会迅速导致洪涝灾害发生,同时由于许多山地还是当地农民以落后的传统方式经营的农田,因此土表疏松,使得强降水也常常伴随着滑坡泥石流等自然灾害。

从降水日数的变化趋势看,在小于 5 mm 量级,德钦以北地区呈较弱增加趋势,增幅小于 2.26%/10a。德钦以南降水日数全部减小,且越往南减幅

表 1 各量级降水量、平均降水强度及降水日数变化趋势

Tab.1 Trends of amount, intensity and the number of days with precipitation for all the 4 categories

降水分类	降水量	强度	降水日数
<5 mm	德钦以北↗, 丽江以南、孟定以东↘	全流域↗	德钦以北↗, 德钦以南↘
5~10 mm	景洪-景东一线↘, 流域其他↗	景东-澜沧一线以东↗, 其余大部↘	景洪-景东一线↘, 流域其他↗
10~50 mm	昌都-景东↗, 其余大部↘	昌都-景东↗, 其余大部↘	昌都-景东略北↗, 其余大部↘
>50 mm	德钦-孟定↗, 孟定以南↘	丽江-孟定↗, 其余↘	德钦-孟定↗, 孟定以南↘

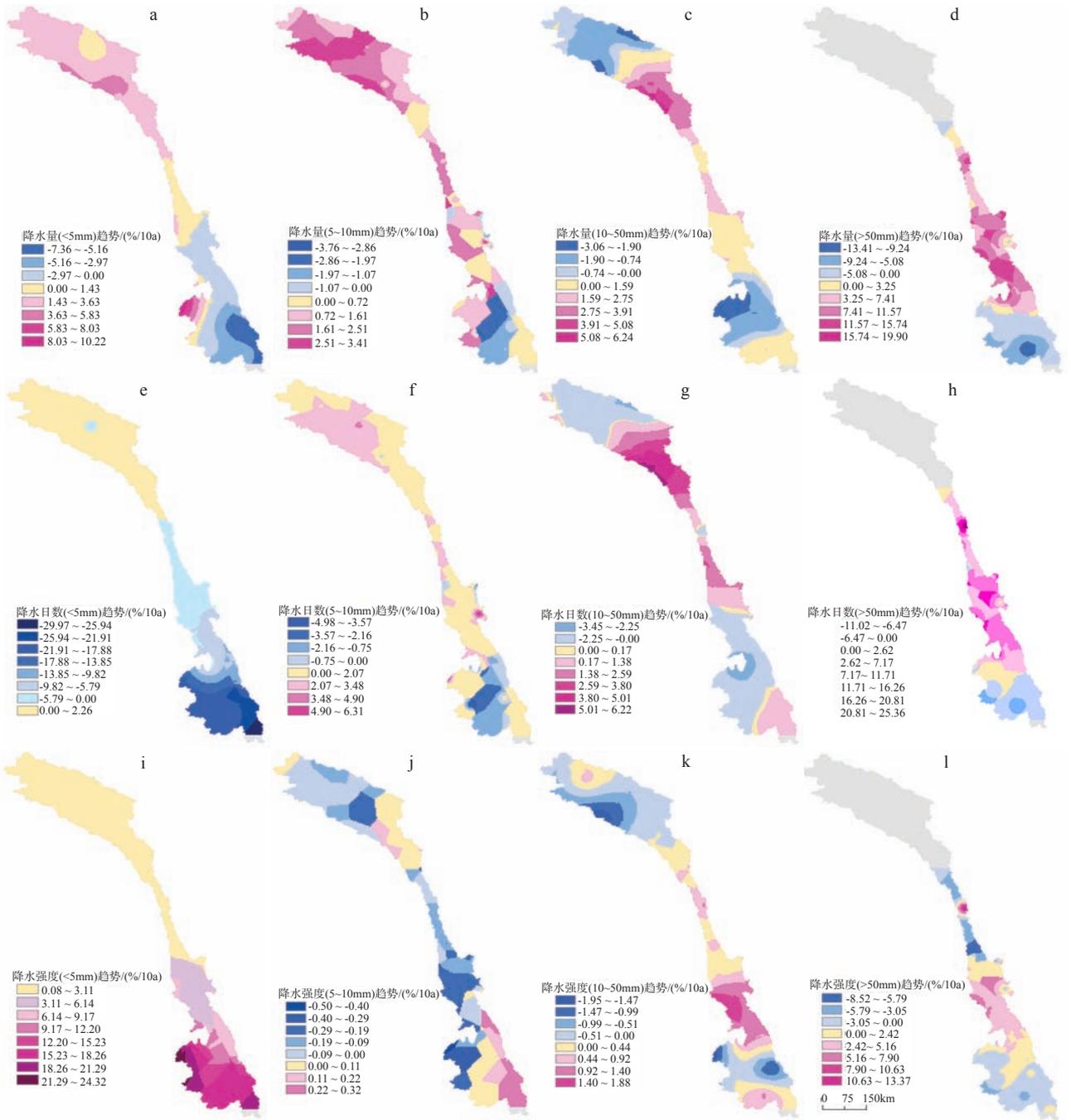


图2 流域各量级降水量、降水日数及降水强度趋势(灰色区数据为空,下同)

Fig.2 Trends of amount, intensity and the number of days with precipitation for all the 4 categories

越大,减幅大于17.88%/10a的地区面积较大,表明该地区小雨的降雨日数的存在强烈的减小化特征。

在5~10mm量级,全流域的降水日数以增加为主,但大部分地区增幅小于2.07%/10a,景东-思茅-景洪一带呈现减小趋势,最大减幅可达到4.98%/10a。而此地带东部及西部地区,降水日数仍以增加为主,从而体现了降水变化强烈的空间分

异性,其纵向条带分布的特征正是“纵向岭谷地区”地理条件的直观反映^[6]。

在10~50mm量级,囊谦以北为减小趋势,囊谦以南至大理为增加趋势,大理以南以减小趋势为主,其中东南端的勐腊周围地区,又呈较弱的增加趋势。

在大于50mm量级,巴塘-波密一线至思茅为

增加趋势,最高增幅在25%/10a以上,以南为减小趋势,最大减幅可达11%/10a以上。

从流域总体来看,对各不同降水量级,比较流域降水量、降水日数、降水强度分布可以看到,对小于5 mm降水,德钦以北降水量的增加与降水强度及降水日数变化趋势一致,因此受两者共同影响。丽江以南降水量则减少,由于该区该量级降水的强度增加,因此可以推断降水日数的变化趋势起了决定性影响。

对5~10 mm量级,对景东-景洪这一纵向地带,降水量及降水日数均减少,而降水强度微弱增加;对于流域其他的大部分地区,降水量及降水日数增加,降水强度减少,因此降水日数的变化是决定要素。

对10~50 mm量级,全流域降水量与降水强度、降水日数变化趋势均基本一致,因此前者变化趋势受后两者的同向影响,放大了降水量的变化。

对大于50 mm量级,德钦~孟定降水量增加,降水日数也增加,而降水强度变化趋势则大致以丽江为界分不同趋势,丽江以北减小为主,以南从丽江至孟定呈增加趋势,因此可以推断德钦-丽江降水量变化趋势主要受降水日数主导,而丽江-孟定则受两者同向作用。对孟定以南地区,降水量、降水强度及降水日数均呈减小态势,也受同向影响。

各量级降水的降水频率和降水量百分比的趋势,体现了其对区域总降水量贡献大小的变化。从降水频率的变化趋势看,在小于5 mm量级,除北部部分地区呈微弱增加趋势外,流域其他地区均为减小趋势,临沧以南地区减幅较大,最大可达12%/10a以上。在5~10 mm量级,全流域的降水频率以增加为主,临沧以南地区增幅较大,最大可达到13%/10a以上。

在10~50 mm量级,昌都以北为减小趋势,昌都以南全部为增加趋势,临沧以南增幅最大,大部分地区在7%/10a~12%/10a之间,勐腊周边地区最高可达14.67%/10a。

在大于50 mm量级,全流域均以增加趋势为主,增幅较大的地区集中在大理-保山-景东一带,最高可达17.32%/10a。

从降水量百分比的变化趋势看,在小于5 mm量级,德钦以北地区主要为增加趋势,但增幅极小,德钦以南主要为减小趋势,减幅分布兼具纬向及经向特征,即向东或向南,减幅变大,极值区出现在东

南边缘带。与周边形成强烈反差的是以孟定为中心的一个降水百分比增加地区,最大增幅在10%/10a以上。

在5~10 mm量级,昌都以北以增加为主,昌都以南至景东,主要为减小趋势,景东以南大部地区为增加趋势,增幅一般在1%/10a~3%/10a左右。

在10~50 mm量级,昌都以北为减小趋势,昌都以南至丽江主要为增加趋势,丽江以南至孟定-元江一线呈减小趋势,孟定-元江以南为增加趋势,增幅一般小于2%/10a。

在大于50 mm量级,巴塘-波密一线到丽江主要为减小趋势,丽江至澜沧为增加趋势,澜沧东南地区又为减小,减幅最大在7%/10a以上。

从流域总体来看,降水量小于5 mm的“毛毛雨”和大于50 mm的暴雨的两种极端降水变化形势均不允乐观,以降水频率而言,前者在流域范围内普遍减小而后两者则普遍增加,降水量百分比虽略有不同,但总的趋势也是一致的。这以景东周边的澜沧江流域表现的尤为明显(图3),从而成为极端气候潜在危害突出的地方。因此本文以景东为例,深入探讨其降水变化。

根据对景东1960-2005年降水时间序列的置信度95%的滑动T检验表明,1981年是该站年降水存在的一个突变点(图4)。另外,20世纪70年代末到80年代初左右之后,也被认为是人类活动对气候变化影响度变强的阶段^[4],因此本文据此将研究时段划分为1981年前后两个阶段。采用EMD分解其年降水序列(Obs.),得到5个IMF分量和一个余项(Res.),首先计算出各分量的平均周期,将平均周期大于等于10年的IMF分量相加,代表10年际以上的长时段滤波(Inter-decadal Filter,简称为INTER-F),将平均周期小于10年的分量相加,代表较短时段的滤波(Intra-decadal Filter,简称为INTRA-F),前者可体现气候系统长期变化特征,而后者则主要体现年际或数年际变异。

由图5及表2可以看到,IMF1、IMF4、IMF5三个分量解释方差最多,但后两者存在明显的反相(Out-of-phase),而使INTER-F曲线变得平缓。对观测值、INTRA-F、INTER-F计算1981年前后序列方差,统计方差比(1981年后序列的方差/1981年前序列的方差,通过置信度95%的双边F检验),比较其与1的大小,等于1表示前后序列方差无变化。可以看到前两者都高达2以上,而INTER-F仅为

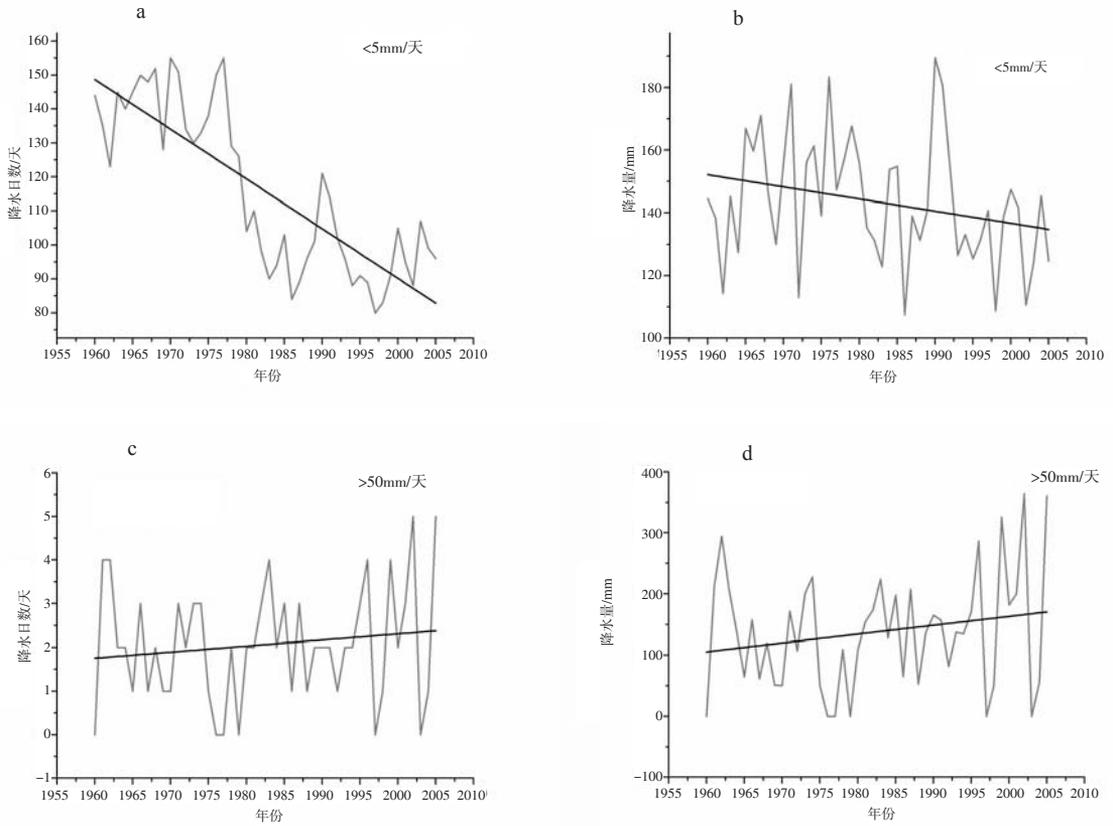


图3 景东小于5mm及大于50mm降水量及降水日数变化

Fig.3 Trends of precipitation amount and the number of days with precipitation in two extreme cases

表 2 景东降水序列的 EMD 分析结果

Tab.2 EMD analysis results for the precipitation series at Jingdong

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	Res	Obs	INTRA-F	INTER-F
Var/%	21.6	11.7	3.5	27.4	30.7	5.2			
VarRatio							2.12	2.37	0.27

注: VarRatio(方差比)=(方差 \geq 1981)/(方差 $<$ 1981)

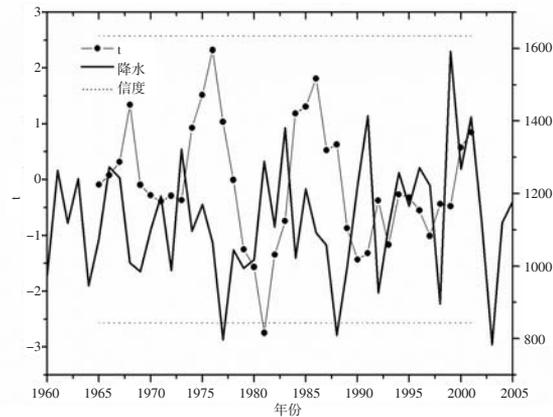


图 4 景东降水序列的滑动 T 检验($p < 0.05$)

Fig.4 Moving T-test for the precipitation series at Jingdong 0.27, 这一结论在图 5 上也得到直观反映。此外, INTER-F 的减少也与全球的总趋势一致^[15], 尽管这

种减少究竟是气候变化的信号抑或只是代表系统本身的长周期变化仍无定论, 然而却的确可能是气候系统的随机度增强的一个佐证^[16-17], 它让可使系统相对稳定的自忆性(Long-term Memory)减小^[15]。从这点上讲, 景东的计算结果对澜沧江流域及其周边气候变化的研究可能具有更大的意义。

4 结论

研究发现, 就降水频率而言, 澜沧江小于 5 mm 量级的降水在全流域都呈减小趋势, 而大于 50 mm 的大暴雨则为增加趋势(图 6)。这证实了 Trenberth 等依据 C-C 方程作出的判断, 即气候变暖强化这两种不同量级降水变化趋势的分异。根据 Trenberth 等^[4]的观点, 大气对流层变暖将使其持水量增加, 由于降水速率主要决定于底层大气中水分的集聚, 因此降水强度增加的速率应与大气湿度增加的速

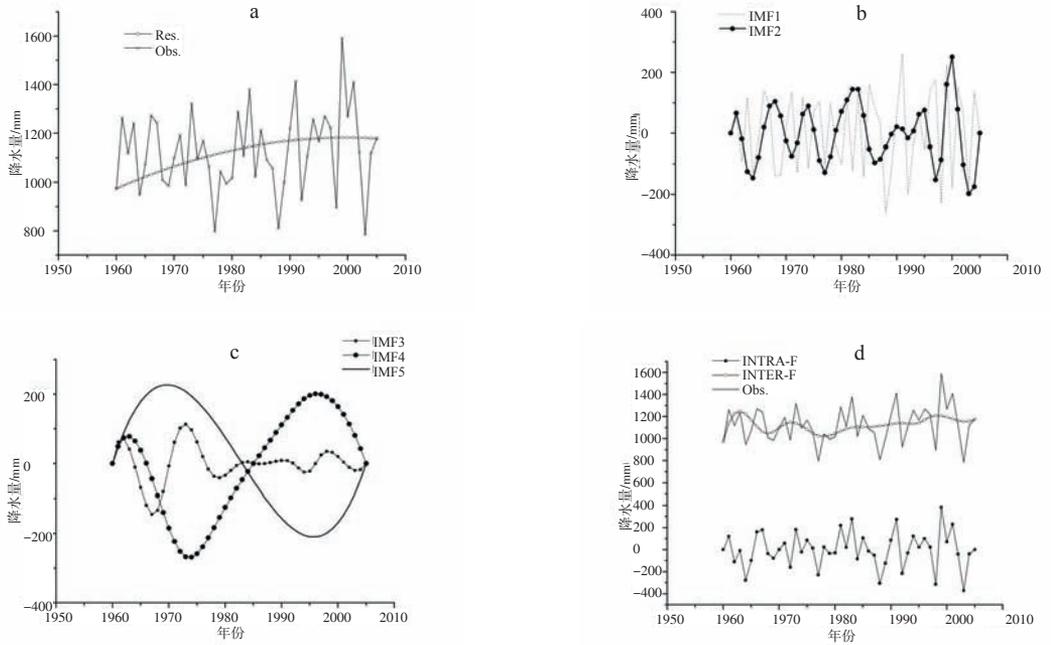


图 5 景东降水序列的EMD分析

Fig.5 EMD analysis results for the precipitation series at Jingdong

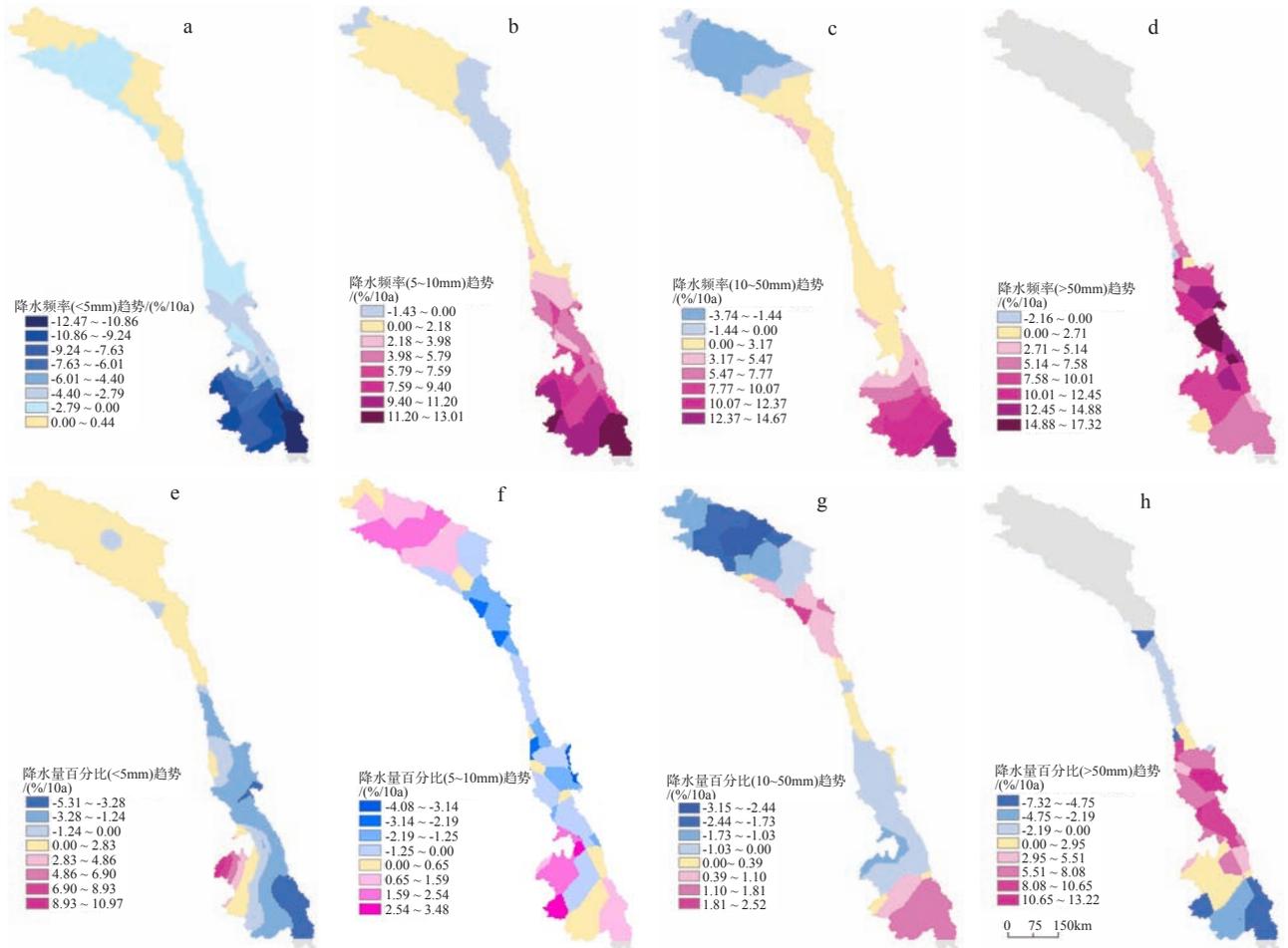


图 6 澜沧江流域各量级降水频率及降水量百分比趋势

Fig.6 Trends of precipitation frequency and proportion of precipitation amount for each precipitation class

率大致一致。他们指出,由于水蒸汽增加释放的额外潜热可能激发暴雨,因此增加的暴雨甚至可能超过增加的水分。暴雨将携带水汽离开,从而减少了此后发生的降水的水汽含量。另外的多余的潜热将起到稳定大气的作用,从而减少了时间尺度长于单次降水的大气降水量^[18]。总的效果,就是气候变暖将使强降水增加,而弱或中等强度的降水减少。然而必须指出的是,影响降水变化的因素是极为复杂多样的,大气环流、气溶胶以及其他多种人类活动都可能促成它的改变^[19-21]。在澜沧江流域,问题尤为复杂,由于同时受青藏高原季风、南亚季风等本身多变的环流系统影响,加上高差悬殊、岭谷相间的复杂地形,仅仅考虑自然系统的研究已经非常困难了,因此,开展极端降水变化的研究、探讨其与气候变化的关联,特别是找到造成流域极端降水变化的原因,仍需研究者未来做大量的工作。

参考文献

- [1] Gallego M C, Garc'a J A, Vaquero J M. Changes in frequency and intensity of daily precipitation over the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, D24105, doi: 10.1029/2006JD007280.
- [2] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates with climate change. *Climate Change*, 1998, 39(4): 667-694.
- [3] Allen M R, Ingram W J. Constraints on the future changes in climate and the hydrological cycle. *Nature*, 2002, 419: 224-232.
- [4] Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M. The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1217.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Summary for policymakers, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*//Solomon S, et al. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K, 2007: 1-18.
- [6] 李少娟. 澜沧江-湄公河河川径流变化对气候及电站驱动响应[D]. 昆明: 云南大学, 2008.
- [7] Liu B, Xu M, Henderson M, et al. Observed trends of precipitation amount, frequency and intensity in China, 1960-2000. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D08103, doi:10.1029/2004JD004864.
- [8] Wang X L, Zhai P M. Changes in China's precipitation in various categories during 1957-2004. *Journal of Tropical Meteorology*, 2008, 24(5): 460-466.
- [9] Lin Y P, Zhao C S. Trends of Precipitation of Different Intensity in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(6): 995-1002.
- [10] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(2): 231-241.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. R. Soc., Ser. A*, 1998, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [12] Lin Z S, Wang S G. EMD analysis of northern hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(2): 90-96.
- [13] Liu H Y, Lin Z S. Analysis on the fluctuation of grain output in China and its causes at multi-time scale based on empirical mode decomposition method. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 745-751.
- [14] Liu S C, Fu C, Shiu C J, et al. Temperature dependence of global precipitation extremes. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L17702, doi:10.1029/2009GL040218.
- [15] Peel M C, McMahon T A. Recent frequency component changes in interannual climate variability. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L16810, doi:10.1029/2006GL025670.
- [16] Tsonis A A. Is global warming injecting randomness into the climate system, *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2004, 85(38): 361-364.
- [17] Tsonis A A, Elsner J B. Global temperature as a regulator of climate predictability. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1997, 108(1-2): 191-196.
- [18] O'Gorman P A, Schneider T. Scaling of precipitation extremes over a wide range of climates simulated with an idealized GCM. *Journal of Climate*, 2009, 22(21): 5676-5685.
- [19] Yang L M. Climate Change of Extreme Precipitation in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 577-583.
- [20] Hu H R, Mao X L, Liang L, Temporal and Spatial Variations of Extreme Precipitation Events of Flood Season over Sichuan Basin in Last 50 Years. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 278-288.
- [21] You Q L, Kang S C, Yan Y P. Trends in Daily Temperature and Precipitation Extremes over the Yarlung Zangbo River Basin during 1961-2005. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 592-600.

Changes in Precipitation Extremes in Lancang River Basin, 1960–2005

LI Bin^{1,2}, LI Lijuan¹, LI Haibin³, LIANG Liqiao^{1,2}, LI Jiuyi¹, LIU Yumei^{1,2}, ZENG Hongwei^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Princeton University, USA)

Abstract: Extreme precipitation is an important aspect of climate change. According to the estimation using the latest climate models, the extreme precipitation events will become frequent in a warming world. Significant increases of the very heavy precipitation and decreases of light and moderate precipitations have indeed been observed over most land areas of the globe in the last few decades. The Lancang River, with a relative altitude difference of about 5000 m, flows through 13 latitudes and 6 climatic zones. It is rarely seen in the world and has important scientific values for climatology, hydrology, geography and ecology. Since 1960, the basin has experienced a significant increase in temperature like most parts of the world. Studying the changes of extreme precipitation events in the basin in the context of global warming is of great importance.

Based on a daily precipitation dataset of 35 meteorological observation stations distributed in and around the Lancang River basin, trends of precipitation amounts, precipitation days and daily precipitation intensity during a 45-year period (1961-2005) of 4 different classes ranging from less than 5, 5-10, 10-50 and larger than 50 mm were analyzed, and the precipitation frequency and the proportion of precipitation amount of each precipitation class were calculated. The result showed that all the indexes varied spatially, and for the basin as a whole, the frequency of the extreme events increased obviously. Analysis of a typical station indicated that the increase of extreme precipitation and the randomness of the climatic system might be closely related with each other.

Key words: precipitation; intensity; trend

本文引用格式:

李斌, 李丽娟, 李海滨, 等. 1960-2005年澜沧江流域极端降水变化特征. 地理科学进展, 2011, 30(3): 290-298.