

近 50 年云南省怒江、澜沧江流域气象干旱研究

徐娟

保山学院资源环境学院, 保山 678000; E-mail: xjuane@163.com

摘要 基于怒江、澜沧江云南段31个气象站点1965—2013年的月降水、气温资料, 计算两个流域各生物气候区的标准化降水蒸散指数(SPEI)。分析近50年的年、季节、月尺度的干旱过程、干旱发生频率及强度, 揭示怒江、澜沧江云南段干旱发生的时空和强度演变特征。结果表明, 自20世纪70年代后期以来, 研究区季节、月尺度干旱整体上呈显著增加趋势, 尤其是冬季; 两个流域内各气候区干旱特征的空间分异不明显, 干旱发生与全省性的大范围干旱发生较为一致; 近50年来, 研究区气温的显著升高可能比降水的微弱减少对其干旱变化贡献更大。

关键词 标准化降水蒸散指数(SPEI); 气象; 干旱; 怒江; 澜沧江

中图分类号 K903

A Study of Metro-Drought in Nujiang and Lancang River Basins in Yunnan Province during Recent 50 Years

XU Juan

School of Resources and Environment, Baoshan University, Baoshan 678000; E-mail: xjuane@163.com

Abstract The observed precipitation and temperature data of 31 meteorological stations from 1965 to 2013 in Nujiang and Lancang river basins in Yunnan Province were collected and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was employed to analyse the drought processes of each bio-climate zone in the two basins. The occurrence frequencies and severities of the meteorological droughts were computed in annual, seasonal and monthly scale. The spatial and temporal change and the intensity of drought occurrence in the study area were revealed. The results show that there was a significant increasing trend in seasonal and monthly drought since the late 1970s; the drought occurred without obvious spatial distinction among the bio-climate zones. In the recent 50 years, the significant increase of drought in the study area may be attributed to the significantly raising in temperature, rather than the lightly decline of the precipitation.

Key words standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); meteorological drought; Nujiang river; Lancang river

干旱是一种自然现象, 指水分长期低于正常状态, 其供给不能满足需要的状态。干旱是生态系统初级生产力变化的重要驱动因素^[1], 影响自然生态及经济社会的发展, 受到国际社会的广泛关注。近几十年来, 干旱现象在全球尺度上呈现增加趋势, 非洲、欧洲南部、亚洲东部和南部、大洋洲等受干旱影响面积增加^[2], 有关干旱的研究逐渐增多。除

少数研究认为近年来干旱变化没有趋势, 且与气温升高无关外^[3], 大多数研究认为干旱的增加与全球气候变化关系密切^[4]。孙永罡等^[5]通过对中国东北部近几十年来的干旱发展趋势研究, 认为温度升高是该地区干旱发展总趋势的控制因素, 而降水变化在干旱的年际变化中起重要作用。在不同流域和地区, 干旱变化特征及表现会因为降水、气温、土壤

水文等因素的空间分异而存在较大差异,所以急需加强区域尺度的相关研究^[6]。

干旱指数是表征干旱特征的重要参数,对干旱问题的定量化研究起到极大的推动作用。目前各国学者广泛采用的气象干旱指数包括相对湿润指数、降水距平百分率、标准化降水指数(SPI)和 Palmer 干旱指数(PDSI)等^[7-8]。Palmer 干旱指数通过基于土壤水平衡的指标综合反映降水和蒸发对气候干湿变化的作用,其固有的缺陷在于自回归特征使指数受前 4 年数值的影响较大,且干旱评估尺度仅为 9~12 个月^[9]。SPI 是一种能进行多时空尺度干旱分析的指数,它在半年至一年的时间尺度上与 PDSI 有较高的可比性。然而, SPI 未考虑影响干旱的蒸发因素。

为了弥补 PDSI 和 SPI 指数的不足, Vicente-Serrano 等^[10]在 SPI 的基础上,提出标准降水蒸散指数(SPEI)。该指数综合考虑影响干旱发生的两个主要因素——降水和蒸发,在反映地表水分收支变化的同时,保持 SPI 指数的多时间尺度特征,能够反映干旱持续时间及其累积情况。近几年来,很多中国学者开始大范围尝试应用 SPEI 进行气象干旱的评价。例如,刘珂等^[11]通过对中国 1948—2007 年以来干湿变化的研究,发现内蒙古中部、华北、东北以及四川东部显著变干,而新疆北部和西部显著变湿。在显著变干的区域中,20 世纪中后期至 21 世纪初期是中等和极端干旱发生最多的时期^[12-13]。

高原山地流域生态系统脆弱^[14],是环境变化的敏感地区。例如,在中国西南山地,不仅有大面积区域属于国际生态保护的热点,还集中分布着怒江、澜沧江、红河等重要的国际河流。受纵向河谷“通道”及山脉的“阻隔”作用,该区域生态变化具有广泛的扩散效应。21 世纪以来,中国在澜沧江、红河上游进行水电开发,引起流域水文过程的变化。在自然环境变化与水电工程影响的交互作用下,本区域跨境水资源与生态安全问题突出,成为各方关注的焦点^[15-16]。目前,在该区域开展的相关研究主要以水文、气象要素变化为主^[17-18],对干旱的研究较少^[19]。从云南省范围来看,怒江、澜沧江流域虽然在全省属于干旱发生频率中等的地区,但进入 21 世纪以来,受西南地区干旱扩大趋势的影响^[20],这一地区的干旱问题也比较突出^[21-22]。揭示并量化表达该地区干旱变化特征及其影响因素,有助于厘

清流域水资源演变规律。

本研究利用 SPEI 指数,对位于中国云南境内的怒江、澜沧江流域进行干旱变化过程的时空分异分析。根据区域的地形、气候、生态系统的组合特点,将流域按不同生物气候类型区进行研究。利用 SPEI 多时间尺度分析的特点,研究该区域年际、季节干旱的空间特征及其变化趋势,为系统地认识该区干旱时空特征,同时为干旱监测和生态管理、农业生产以及国际河流跨境水资源合作管理等提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

怒江和澜沧江是东南亚重要的国际河流(图 1),是中国西南山区典型的大型山地流域。在中国云南境内,怒江和澜沧江两个流域的面积分别为 $3.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $9.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[23]。该区整体上属于典型的亚热带湿润气候类型,雨季、旱季分明。一般每年 5—10 月为雨季,降水量占全年的 80%以上;11 月至次年 4 月为旱季。由于海拔高差巨大和流域跨度大的特点,年降水量的空间分布十分不均,从 400~3000 mm 不等,大部地区在 1000~2000 mm 之间。降水分布总体上从南向北、从西向东递减,河谷降水少而山地降水多^[24]。本区工业相对落后,农业、林业和水电等是主要的经济部门和生产活动,对气象和水文条件依赖性较大。2009 秋季以来,在中国西南地区严重干旱的同时,湄公河次区域相关国家也出现严重旱情^[25]。据报道,澜沧江—湄公河下游流域在 1992, 1993, 1998, 1999 和 2003—2005 年发生多次干旱,造成较大经济损失,引起流域所在国的极大关注^[26]。

1.2 数据及处理

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。选取怒江和澜沧江流域云南境内资料相对完整的 31 个气象站点 1965—2013 年的月降水量及月均气温。考虑到研究区降水区域分异及干旱变化具有明显气候分区的特点^[22],本文将气象站分别划分到流域的各气候分区中进行研究。流域气候区的划分主要依据全球生物气候类型图^[27],将气象站 1 km 半径范围内所占面积最大的气候类型作为气象站所代表的气候类型,将 31 个气象站归入寒冷湿润型、温暖湿润型、温暖干旱型、湿热型和干热型等 5 个气候类型。对各个气候

区, 分别构建月平均降水与气温数据序列。流域的气象站点及生物气候类型分布如图 1 所示。

1.3 研究方法

1.3.1 SPEI 指数

SPEI 为降水量与潜在蒸散发量差值序列的累积概率做正态标准化后的指数^[10], 其计算过程与标准降水指数(SPI)相似, 不同之处在于, SPEI 还考虑了月潜在蒸散发(PET)对干旱的影响。计算时, 先按 Thornthwaite 法, 根据月平均气温估算潜在蒸散发; 再计算逐月降水量与潜在蒸散发量的差值, 并在不同时间尺度上构建累积序列; 接下来, 选取特定分布函数对序列进行拟合(一般采用 Log-logistic 概率分布), 进行序列的正态化, 得到不同时间尺度的 SPEI 值。有关 SPEI 指数计算的详细步骤, 可参见 Vicente-Serrano 等^[10]的研究。本文采用的 SPEI 程序从 <http://spei.csic.es/> 下载。

SPEI 是一个依赖时间尺度的指数, 不同时间尺度的 SPEI 能反映干旱过程的细节与总体特征^[28]。

本文分别以 1, 3 和 12 个月的时间尺度分析各个站点月尺度(SPEI-1m)、季节尺度(SPEI-3m)、年尺度(SPEI-12m)的干旱特征。以 1 月、4 月、7 月和 10 月作为冬季、春季、夏季和秋季的代表月份, 将各生物气候区所属台站在这 4 个月份的 SPEI 均值作为季节尺度的代表值。对干旱等级的划分参照国家气象局对 SPI 干旱等级的划分标准: $SPEI > -0.5$ 为无旱, $-1 \sim -0.5$ 为轻旱, $-1.5 < SPEI \leq -1$ 为中旱, $-2 < SPEI \leq -1.5$ 为重旱, $SPEI \leq -2$ 为特旱。

1.3.2 Mann-Kendall 趋势检验

SPEI 时间序列变化趋势采用世界气象组织推荐的非参数 Mann-Kendall 检验法(M-K 检验)^[29]做线性倾向估计。如果序列存在线性趋势, 用 Sen^[30]提出的斜率估计方法, 估算单调趋势的倾斜度 β (单位时间的变化量)。对有明显趋势的序列, 进一步检验其是否具有突变特征。M-K 检验的零假设为序列数据独立分布且无趋势, 通过计算统计量 Z 来判断趋势的显著性。当给定显著水平 α 时, 如果

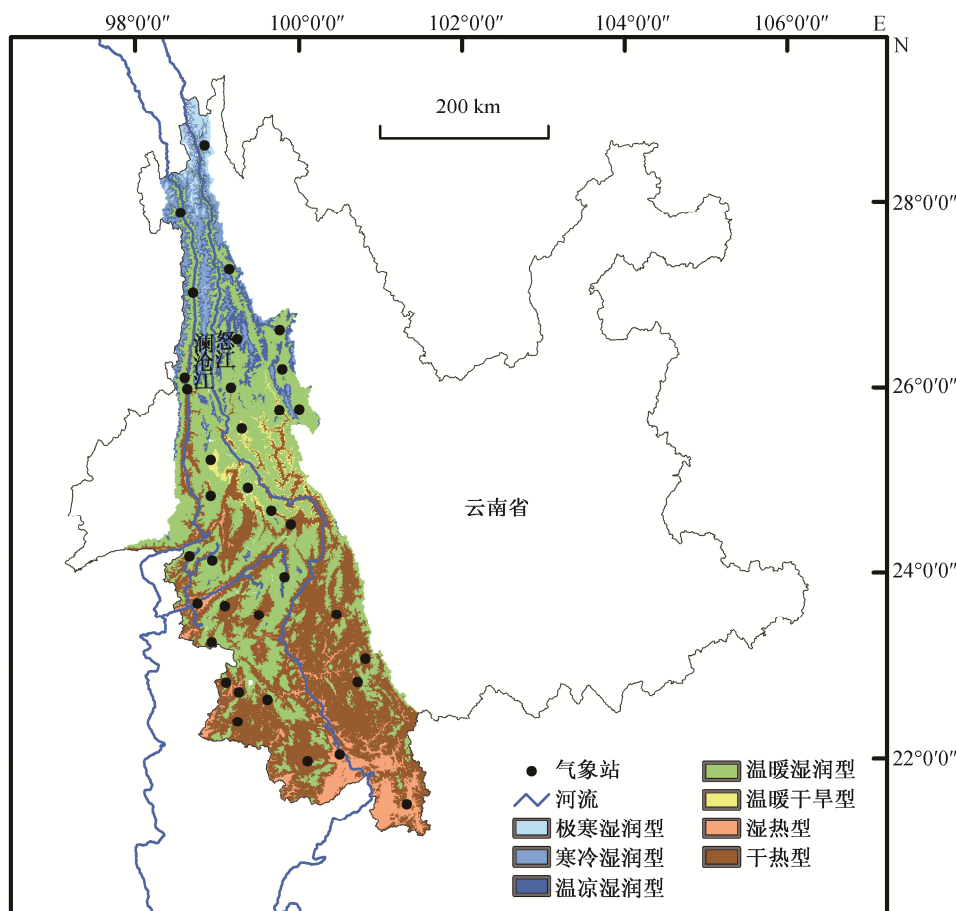


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Geographical location of study area

$|Z| > Z(1-\alpha/2)$, 则认为序列的趋势具有显著性。例如, $\alpha=0.05$ 时, $Z(1-\alpha/2)=1.64$; $\alpha=0.01$ 时, $Z(1-\alpha/2)=2.32$ 。

1.3.3 干旱频率(P_i)

干旱频率表示观测年限内干旱发生的比例, 计算公式为

$$P_i = (n_i/N) \times 100\%, \quad (1)$$

n_i 为序列中发生相应等级干旱的年数, N 为总观测年数。根据各气候区 1965—2013 年的 SPEI 值, 分别计算在不同时间尺度的干旱频率。

1.3.4 干旱发生强度

定义连续 3 个月发生轻度及以上等级干旱的过程为一次连续干旱^[31]。从月尺度的 SPEI 序列中提取符合上述定义的 SPEI 值。在一次连续干旱过程中各月的 SPEI 均值为该过程的 SPEI 值, 根据周丹等^[32]对干旱等级和概率的划分, 计算各气候区的干旱发生强度。

1.3.5 降水气温异常分析

对降水、气温单项因素的异常情况进行分析,

有助于理解 SPEI 的变化规律。对降水和气温异常采用其距平绝对值与标准差的关系来表达, 当距平绝对值大于标准差 2 倍以上时, 认为降水和气温出现异常^[33]。

$$K_i = (X_i - X)/S, \quad (2)$$

K_i 为变量(降水、气温)的异常指数, X_i 为变量年(季)值, X 为变量平均值, S 为标准差。当 $|K_i| \geq 2$ 时, 表示变量出现异常; 当 $1.5 < |K_i| < 2$ 时, 表示接近异常。 K_i 为负值时, 变量偏低异常; 反之为偏高异常。

2 结果与讨论

2.1 研究结果

2.1.1 SPEI 指数总体变化特征

图 2 显示在不同时间尺度下, 怒江和澜沧江流域 1965—2013 年间 SPEI 值的总体变化。可以看出, 其数值波动规律在不同时间尺度上明显不同, 随着时间尺度减小, 总的波动频率逐渐增加。年尺度 SPEI-12m 的波动相对稳定(图 2(a)), 季节尺度 SPEI-3m 的波动周期比 SPEI-12m 稍长(图 2(b)), 月

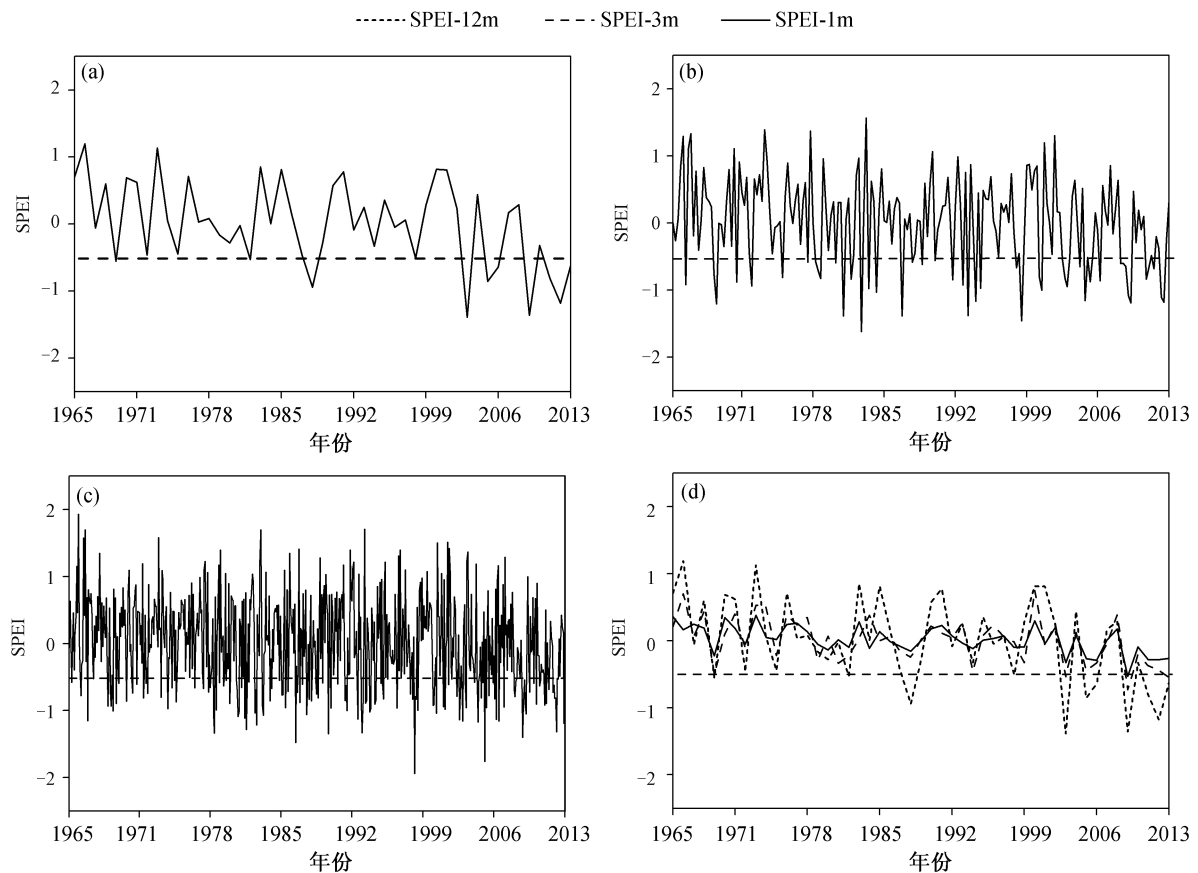


图 2 1965—2013 年研究区年尺度(a)、季节尺度(b)、月尺度(c)的 SPEI 及其均值(d)

Fig. 2 The SPEI at annual scale (a), seasonal scale (b) and monthly scale(c), and mean value (d) from 1965 to 2013 in study area

尺度 SPEI-1m 波动幅度最大, 且波动最频繁(图 2(c))。

研究区不同时间尺度历年 SPEI 均值的变化趋势见图 2(d)。可以看出, 三者表现出较为一致的下降趋势。其中, SPEI-12m 低值反映的年际干旱情况与《云南省减灾年鉴》记录的历史干旱年份较为一致。例如, 流域中等干旱发生的年份为 2003, 2009 和 2012 年, 中度-轻度干旱主要发生在 1988, 2005—2006 和 2011 年。中度干旱发生的频率为 6.12%, 轻度干旱发生的频率为 16.33%。在季节尺度, 研究区发生干旱的频率为 20.4%~30.6%, 春旱发生频率最高。

对研究区年、季节和月尺度的 SPEI 均值进行 M-K 趋势检验显示, SPEI-12m 值、年均 SPEI-3m 值和年均 SPEI-1m 值均呈显著减小趋势(M-K 检验

统计量 Z 值分别为-2.3, -3.08 和-3.59, Sen 斜率估计值分别为-0.015, -0.012 和-0.008)。进一步的 M-K 突变检验显示, 全区季节、月尺度的 SPEI 均值在 1965—2013 年间有显著突变(图 3(b)和(c))。大部分年份 UF 值小于 0, UF 曲线总体上呈波动中缓慢下降趋势, 在 1978 年发生下降突变。

2.1.2 不同气候分区的干旱特征

轻度以上干旱发生频率情况的统计结果列于表 1。总体上, 各气候类型区干旱发生频率的差异并不显著。在季节尺度上, 寒冷湿润区发生干旱的频率为 28.6%~34.7%, 秋旱发生频率最高; 温暖湿润区干旱发生的频率为 24.5%~32.7%, 春旱发生频率最高; 温暖干旱区发生干旱的频率为 28.6%~36.7%, 冬旱发生频率最高; 湿热区的干旱发生频率为 28.6%~32.7%, 冬旱发生频率最高; 干热区发

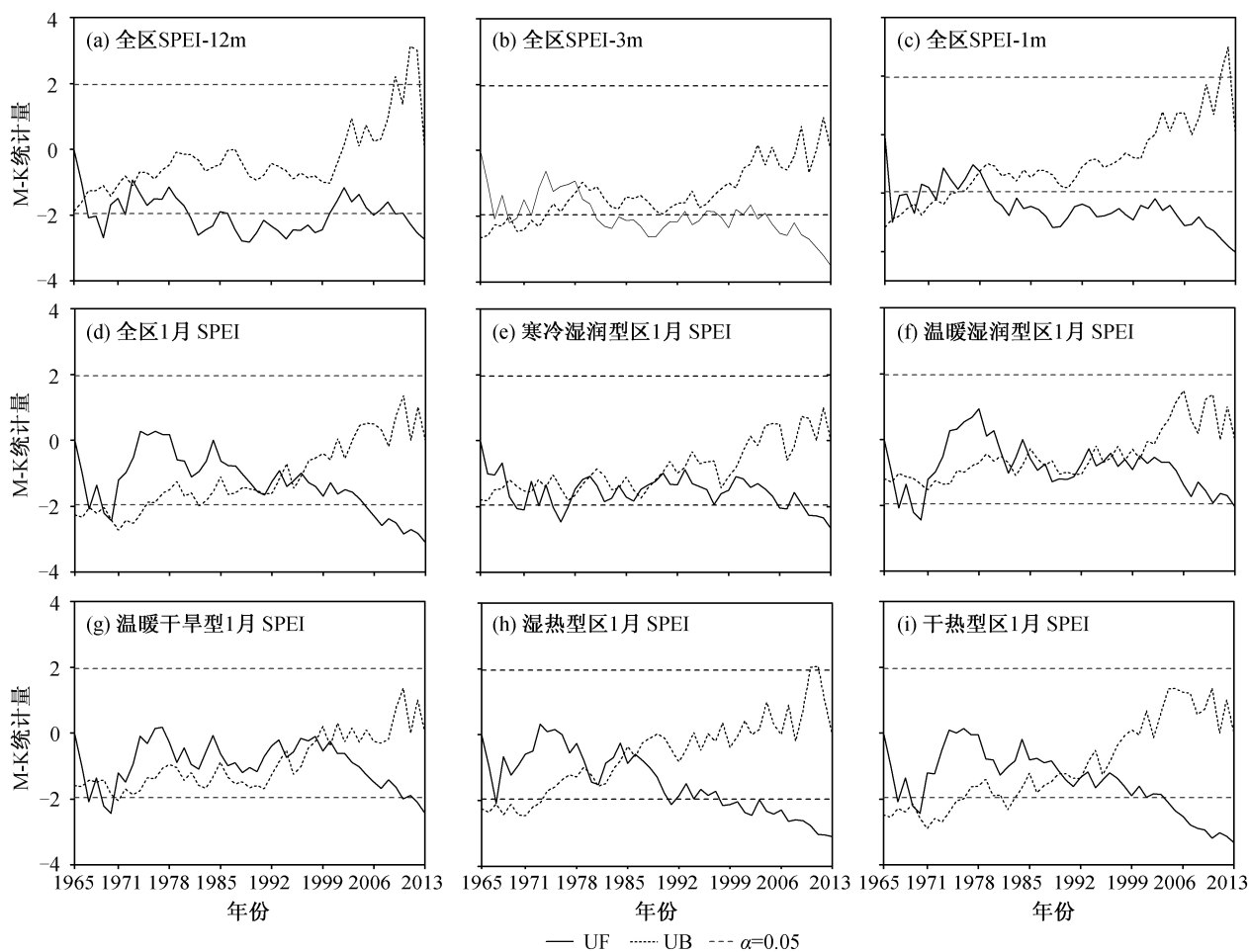


图 3 1965—2013 年 SPEI 序列 M-K 突变检测

Fig. 3 Tipping point detection of SPEI series by M-K method from 1965 to 2013

表 1 各气候区年、季节、月尺度干旱发生频率(%)

Table 1 The frequency of drought occurrence at annual scale, seasonal scale and monthly scale in different climate zones (%)

气候类型区	年尺度	季节尺度				月尺度
		春季	夏季	秋季	冬季	
寒冷湿润区	32.7	28.6	30.6	34.7	30.6	33.2
温暖潮湿区	26.5	32.7	24.5	24.5	30.6	30.8
温暖干旱区	28.6	34.7	30.6	28.6	36.7	32.5
湿热区	30.6	28.6	30.6	30.6	32.7	29.8
干热区	22.5	30.6	30.6	24.5	26.5	27.0

生干旱的频率为 24.5%~30.6%，春旱和夏旱发生频率最高。月尺度各气候区干旱发生频率普遍较高，除干热区在 27% 左右外，其余 4 个类型区均高于 30%。年尺度干旱发生频率略低于季节尺度，其中，干热区最低(22.5%)，寒冷湿润区最高(32.7%)。

对两个流域各气候区季节尺度干旱过程的 M-K 趋势分析显示，所有气候区在冬季 SPEI 值呈显著下降趋势。据 Sen 斜率估计，冬季 SPEI 值在寒冷湿润区的变化率为 $-0.026/a$ (Z 值为 -2.26)，温暖湿润区为 $-0.016/a$ (Z 值为 -1.71)，温暖干旱区为 $-0.021/a$ (Z 值为 -2.04)，湿热区为 $-0.028/a$ (Z 值为 -2.78)，干热区为 $-0.027/a$ (Z 值为 -2.98)。

由于其他季节各区的 SPEI 变化趋势未通过显著性检验，因此，仅对各区冬季 SPEI 值进一步做突变检验(图 3(d)~(i))。结果显示，多数气候类型区 SPEI 发生下降突变的时段大致在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初，具体突变年份略有差异。其中，暖温干旱区的突变年份比较靠后，在 1998 年前后。

2.1.3 干旱强度特征

表 2 为不同气候区连续 3 个月以上干旱次数的统计。持续干旱达到 3 个月以上且发生次数最多的

是在寒冷湿润型和湿热型区域，49 年内出现 16 次，温暖湿润区为 15 次、其余两类区域为 13 次。以变化最显著的湿热区为例，M-K 检验发现，SPEI 发生下降突变的年份大致为 1985 年(图 3(h))，统计显示，1985 年以前，平均每 10 年发生 3 个月以上持续干旱 1 次，1985 年后增加到每 10 年发生 5 次。

在整个研究时段，干旱最长持续时间为 7 个月，出现过 2 次，分别发生在 2009—2010 年的温暖干旱区和 2010—2011 年的湿热区。干旱持续月数超过 5 个月的出现 10 次，有 2 次发生在 20 世纪 80 年代初，3 次分别发生在 1971，1998—1999 和 2003 年，其余 5 次发生在 2009—2012 年期间。由此可见，21 世纪以来干旱持续时间长，且波及范围较广。

根据干旱发生强度计算方法，计算各气候区干旱发生强度。结果显示，研究区干旱发生强度最低是在温暖湿润区，累积概率为 27%；其次是干热区，累积概率为 26%；再次是寒冷湿润区及湿热区，这两个区域的干旱发生累积概率约在 24% 左右；最高的是温暖干旱区，累积概率不到 20%。

2.1.4 降水气温异常

为探讨气温、降水对于干旱发展影响的相对重要性，对流域近几十年降水、气温的异常情况进行分析。根据式(2)计算流域内各气候区季节降水和气温异常指数，分别统计降水接近偏低异常和气温接近偏高异常的出现次数(表 3)。从表 3 可见，各气候区降水仅在春季和秋季出现 1~3 次接近负异常的情况。从各区降水接近异常的年代来看，并不集中。全区年尺度及季节尺度降水序列的 M-K 趋势检验 $|Z|$ 值均小于 1.64 (表 4)，说明整个区域降水变化的趋势不显著。气温出现正异常的情况比降水负异常的情况明显，且集中在 21 世纪 90 年代中后期。年尺度和季节尺度气温 M-K 趋势检验 Z 值均

表 2 流域各气候区干旱持续时间统计

Table 2 The statistics of drought duration in different climate zones

气候类型区	连续干旱发生次数					合计
	连续 3 个月干旱	连续 4 个月干旱	连续 5 个月干旱	连续 6 个月干旱	连续 7 个月干旱	
寒冷湿润区	12	1	2	1	0	16
温暖湿润区	10	3	1	1	0	15
温暖干旱区	3	6	1	2	1	13
湿热区	10	5	0	0	1	16
干热区	11	2	0	0	0	13

表 3 各气候区降水、气温异常(降水负异常,气温正异常)次数统计
Table 3 The statistics of precipitation and temperature anomalies in different climate zones

气候类型区	春季		夏季		秋季		冬季	
	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温
寒冷湿润型	0	3	0	4	1	3	0	3
温暖湿润型	2	4	0	4	0	3	0	4
温暖干旱型	2	4	0	2	0	2	0	3
湿热型	1	2	0	1	3	1	0	4
干热型	2	0	0	0	0	0	0	1

表 4 研究区季节尺度降水、气温序列 M-K 趋势检验结果
Table 4 M-K trend test for precipitation and temperature series at seasonal scale in study area

气象因子	年尺度		春季		夏季		秋季		冬季	
	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β
降水	-0.36	-0.32	0.68	0.12	-1.45	-0.32	-1	-0.27	-1.36	-0.11
气温	5.43**	0.025	4.59**	0.025	5.29**	0.023	3.49**	0.018	5.27**	0.032

注: **表示通过 0.01 显著水平检验。

大于 2.32 (显著水平 0.01); Sen 斜率估计气温的增加率为: 春季 0.025°C/a, 夏季 0.023°C/a, 秋季 0.018°C/a, 冬季 0.032°C/a。结合气温异常分析结果, 说明 20 世纪 90 年代中期以后, 整个研究区的气温升高极为显著(年均温升高率为 0.25°C/10a)。全区各季节气温序列的 M-K 突变检测结果见图 4。除夏季气温突变未达到 0.05 显著水平外, 春、秋、冬三季气温序列的突变点基本上一致, 均在 20 世纪 90 年代初期出现显著的升高突变。其中, 冬季气温升高的突变与前面对冬季 SPEI 值所做的 M-K 突变检验表现出良好的对应关系。

2.2 讨论

怒江、澜沧江流域主要受季风环流影响, 旱季受到北半球中纬度西风带南支急流控制, 降水稀少; 雨季受来自印度洋西南季风的控制。不同年份季风活动强弱、持续时间及影响范围构成区域干旱过程的大气候背景。有研究认为, 受降水变化影响, 自 20 世纪 90 年代以后, 澜沧江流域旱季普遍出现变干趋势^[22]。这与本研究发现流域冬季 SPEI 值下降显著的结果较一致。但是, 李斌等^[22]的研究只考虑降水因素的 SPI 指标来分析流域干旱变化, 对气温在干旱过程变化中的影响未做讨论。本文对降水异常的分析发现, 研究区的降水仅有微弱的下降趋势

(-3.2 mm/10a), 并未达到“云南省降水平均每 10 年减少 12 mm”^[33]的程度。然而, 对气温异常情况的研究发现, 气温的增加极为显著, 从 1965 到 2013 年, 气温平均每 10 年增加 0.21°C。这与刘瑜等^[33]云南自 1990 年代中期以来气温呈明显上升趋势的结论较一致。

据本研究干旱指数 SPEI 值发生突变减少与气温突变升高有较好的对应关系这一结论来推测, 对于该区近 50 年的干旱变化, 冬季气温的显著升高可能比降水的微弱减少有更大的贡献。刘瑜等^[33]认为, 近几十年云南省整体上从冷湿型气候向暖干型气候转变。我们的研究发现, 怒江、澜沧江流域包括湿润型气候区(主要为寒冷湿润型、湿热型区域)在内的区域持续 3 个月干旱次数有增加的现象, 也表明该地区的整体干旱化趋势。

3 结论

本文利用 SPEI 指数分析了 1965—2013 年怒江、澜沧江云南段的月、季节和年 3 个时间尺度干旱发生频率和发生强度, 揭示了该区干旱发生的时空演变特征。主要研究结论如下。

1) 怒江和澜沧江地区不同时间尺度的 SPEI 值波动规律不同。随着时间尺度减小, SPEI 值波动幅

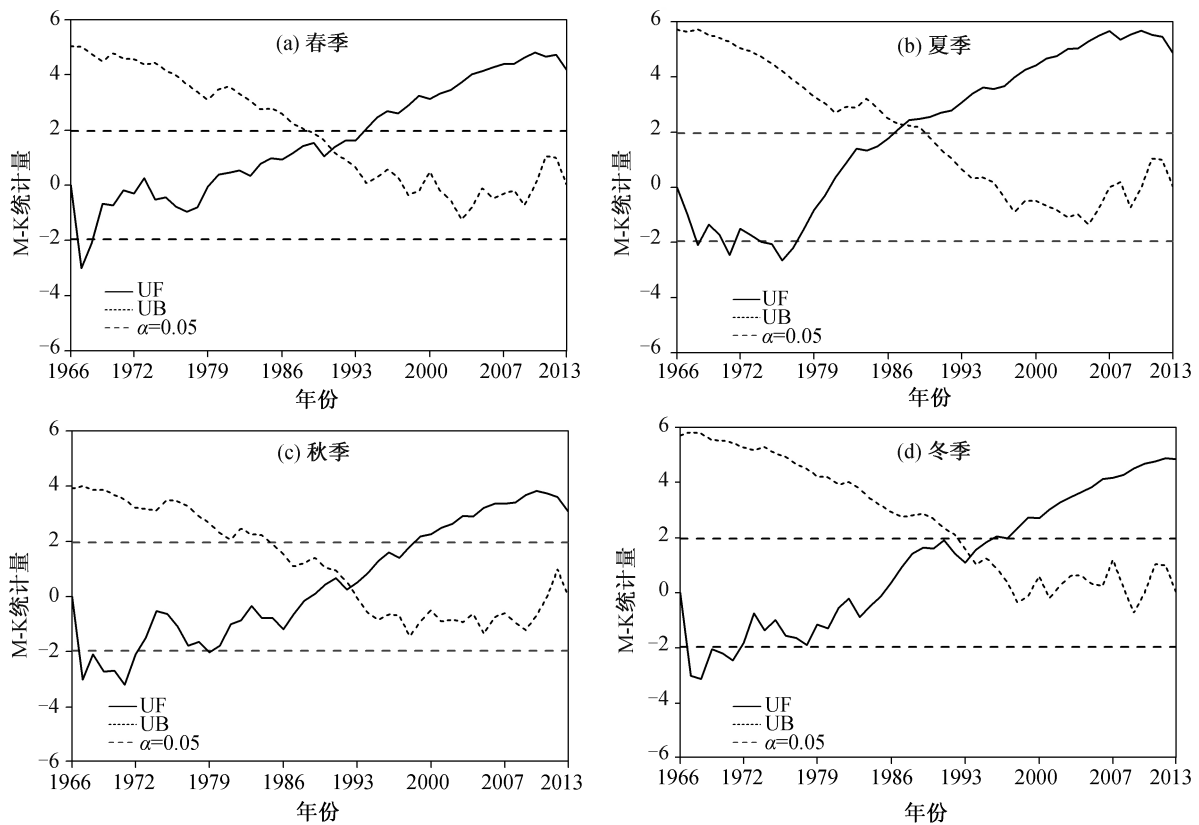


图 4 研究区 1966—2013 年四季气温序列 M-K 突变检测

Fig. 4 The tipping point detection of seasonal temperature by M-K method from 1965 to 2013

度和频次增加。M-K 突变检验表明, 20 世纪 70 年代后期以来, 由季节、月尺度 SPEI 表征的干旱增强趋势较为明显。

2) 按气候分区比较了不同时间尺度 SPEI 变化的空间分异。总体上, 整个研究区干旱变化的空间差异并不显著, 月尺度干旱发生频率普遍高于季节、年尺度。在季节尺度上, 冬、春两季干旱发生频率较高。在所有气候区, 除冬季以外的其他季节干旱增加趋势均不显著。

3) 各气候区持续 3 个月以上干旱发生次数及干旱强度略有差异。发生 3 个月以上干旱次数最多的是寒冷湿润、湿热区。干旱发生强度空间分布特征为温暖干旱区偏高, 累积概率不到 20%; 温暖湿润区偏低, 累积概率在 27% 左右。

4) 近 50 年来, 研究区气温的显著升高可能比降水的微弱减少对其干旱变化贡献更大。

致谢 北京大学城市与环境学院李双成教授对本文提出修改意见, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 110(1): 52–57
- [2] Dai A G. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2010, 2(1): 45–65
- [3] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 5–8
- [4] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391: 202–216
- [5] 孙永罡, 白人海, 谢安. 中国东北地区干旱趋势的年代际变化. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(5): 806–813
- [6] Mishra A K, Singh V P. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *Journal of Geophysi-*

- cal Research Atmospheres, 2009, 114(D6): 605–617
- [7] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52–58
- [8] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展. *生态学报*. 2014, 34(5): 1043–1052
- [9] Guttman N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*. 1998, 34(1): 113–121
- [10] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 2010, 23(7): 1696–1718
- [11] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析. *大气科学*, 2015, 39(1): 23–36
- [12] 王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于 SPEI 的西南地区近 53 a 干旱时空特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 1003–1016
- [13] 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. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 65–70
- [14] Becker A, Bugmann H. Global change and mountain regions: the mountain research initiative [R]. Stockholm: IGBP, 2001
- [15] He D M, Wu R D, Feng Y, et al. China's transboundary waters: new paradigms for water and ecological security through applied ecology. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51: 1159–1168
- [16] Giang P Q, Toshiki K, Kunikane S, et al. Climate change challenges transboundary water resources management: drawing from the case of vietnam // 3rd International Conference on Chemical, Biological and Environment Sciences (ICCEBS'2013). Kuala Lumpur, 2013: 48–52
- [17] 樊辉, 何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势. *地理学报*, 2012, 67(5): 621–630
- [18] 刘新有, 何大明. 怒江流域悬移质输沙时空分布特征及变化趋势. *地理学报*, 2013, 68(3): 365–371
- [19] 李运刚, 何娇楠, 李雪. 基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析. *地理科学进展*, 2016, 35(6): 758–767
- [20] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征. *地理学报*, 2011, 66(9): 1179–1190
- [21] 张雷, 王杰, 黄英, 等. 1961—2010 年云南省基于 SPEI 的干旱变化特征分析. *气象与环境学报*, 2015, 31(5): 141–146
- [22] 李斌, 李丽娟, 李海滨, 等. 澜沧江流域干旱变化的时空特征. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 87–92
- [23] 何大明, 汤奇成. 中国国际河流. 北京: 科学出版社, 2000
- [24] 中国河湖大典编纂委员会. 中国河湖大典: 西南诸河卷. 北京: 中国水利水电出版社, 2014
- [25] 周婷, 李传哲, 于福亮, 等. 澜沧江—湄公河流域气象干旱时空分布特征分析. *水电能源科学*. 2011, 29(6): 4–7
- [26] Te N. Drought management in the lower Mekong basin. Kuala Lumpur: Presentation at 3rd Southeast Asia Water Forum, 2007
- [27] Metzger M J, Bunce R G H, Jongman R H G, et al. A high-resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 22: 630–638
- [28] 史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征. *地理研究*, 2015, 34(8): 1547–1558
- [29] Kendall M, Gibbons J D. Rank correlation methods. 5th ed. London: Oxford University Press, 1990
- [30] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63: 1379–1389
- [31] 包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱时空分布规律. *地理学报*, 2011, 66(5): 599–608
- [32] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677–688
- [33] 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析. *灾害学*, 2010, 25(1): 39–44