

怒江流域下游地区气象与水文干旱特征研究

陈文华^{1,2} 徐娟^{2,†} 李双成³

1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 2. 保山学院资源环境学院, 保山 678000;
3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: xjuane@163.com

摘要 以怒江下游勐波罗河流域为例, 利用周边气象站点年的月降水量、月气温和流域出口水文站月径流数据, 计算气象干旱指标标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)和径流干旱指数(SDI), 分析该地区1966—2013年间不同参考期(12个月、6个月和3个月)的气象和水文干旱变化过程, 揭示流域水文干旱与气象干旱发生的关联。研究结果表明, 自21世纪初期以来, 流域各参考期干旱指数呈现减少趋势(干旱增加), 尤其是SPEI-6M(参考期为6个月的SPEI)和SPEI-3M(参考期为3个月的SPEI)。研究区气象与径流干旱均具有多尺度周期性特征: 在20世纪90年代中期之后, 25~30年大尺度周期的等值线中心逐渐下移, 时间尺度缩短为10~15年。进入21世纪以来, 径流干旱在25年以上的大尺度上演变为减弱的干旱期, 在10~15年中尺度上则处于由干旱向微湿润变化的过渡期。径流干旱与气象干旱关系密切, 通过气象干旱指数SPEI-6M, 可以较好地预测年径流干旱变化程度。

关键词 气象干旱; 水文干旱; 气候变化; 怒江下游

A Study on the Characteristics of Hydrological and Meteorological Droughts in the Lower Nu River

CHEN Wenhua^{1,2}, XU Juan^{2,†}, LI Shuangcheng³

1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091; 2. School of Resources and Environment, Baoshan University, Baoshan 678000; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: xjuane@163.com

Abstract Taken Mengboluo River, the major tributary in the lower reaches of Nu River as a case, the standard precipitation index (SPI), the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and the runoff drought index (SDI) were employed to analyse the change processes of meteorological and hydrological drought based on the monthly precipitation and temperature data of the surrounding meteorological stations from 1966 to 2013, and the monthly runoff of the outlet of the river. The drought indexes value in three reference periods (12 months, 6 months and 3 months) were calculated for each indexes, and the correlation between meteorological and hydrological drought in the basin were also analysed. The results show that there were increasing drought trend, especially, that represented by SPEI-6M and SPEI-3M since 2000s; the drought occurred with multi-scale periodic characteristics. After the mid-90s, the large-scale 25–30 years periodicity gradually moved down to the 10–15 years periodicity. After 2000s, the runoff drought has changed into a weakened drought period over 25 years; but on the mesoscale periodicity with 10–15 years, it is in a transition period from drought to semi humid. Runoff drought is closely related to meteorological drought. Meteorological drought index SPEI-6M could be used to predict annual runoff drought.

Key words meteorological drought; hydrological drought; climate change; lower Nu River

全球气候变化、气温升高以及各类极端气象状况严重地威胁着自然生态系统^[1]及人类社会生活和经济的发展。干旱对人类的影响比任何其他自然灾害都更为广泛而深远。在过去 10~20 年,全球受干旱影响的地区和面积呈增加的态势^[2]。

作为一种自然现象,干旱反映一个地区气候变化及水分长期处于较低水平的状态。气象因素中的长期降水不足通常是旱灾形成的主要原因。由于干旱的影响有时可能持续几个月^[3],有时可能持续数年,因此确定干旱发生和结束时间往往有一定的难度。干旱研究的另一个基本问题是确定其发生程度和严重性。为了对干旱程度进行量化,研究者提出多种干旱指数。如在气象干旱领域,有相对湿润指数、降水距平百分率、标准化降水指数(SPI)和 Palmer 指数(PDSI)等^[4-5]。还有一些研究者对这些干旱指数的算法进行改进和完善。Vicente-Serrano 等^[6]在 SPI 指数的基础上,增加对蒸发影响的考虑,提出标准化降水蒸散指数(SPEI)。另外,在以河川径流为指标描述干旱的指数中,有径流干旱指数(SDI)、标准径流指数(SRI)和标准水文指数(SHI)等^[7]。Tsakiris 等^[8]提出一种可以在流域尺度上系统地评价气象干旱和径流干旱与经济和环境影响之间相互作用的方法。

近十几年来,随着全球尺度干旱扩大的趋势,中国西南地区及周边国家也受到波及^[9]。特别是 2009 年秋季以来,连年干旱的叠加作用导致农作物大面积减产甚至绝收,很多水库坑塘处于干涸的边缘,山区群众生活及农业用水困难进一步加剧,生态环境受到较大的影响。

中国西南山地的怒江流域下游地区不仅是云南西部的重要粮食生产基地,而且很大一部分区域属于国际生态保护的热点地区。该区地形以南北向分布的河谷及山脉为主,受岭谷间的“通道、阻隔”等作用影响,气候环境变化复杂,是高原山地生态敏感脆弱区^[10]。对该流域附近的澜沧江、红河等流域的研究表明,在气候变化与人类活动交互影响下,流域的水文过程发生变化,引发一系列生态水文方面的问题,备受国际社会的广泛关注^[11-12]。目前,对怒江流域降水和径流等要素的变化特征方面有一些研究^[13-14],而专门针对干旱问题的研究较少^[15]。

本文利用气象干旱指数(SPI 和 SPEI)和径流干旱指数 SDI 的多时间尺度特点,探讨云南省境内怒江下游地区近 50 年的气候、水文变化特征。采用

Mann-Kendall 趋势检验及 Meyer 小波分析法,针对该地区年、季节尺度干旱变化趋势及周期性进行研究,揭示该区域气象和水文干旱的变化特征和规律以及两者之间的关系,为进一步研究流域水资源变化动态以及区域产业结构的调整提供科学资料,同时为区域干旱监测和生态水文管理以及国际河流跨境水资源变化研究提供一定的科学依据。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

研究区勐波罗河流域位于中国云南省境内,是怒江下游一级支流(图 1)。流域面积为 6646.4 km²,河长 193 km,总落差达 2280 m^[16]。该流域属亚热带湿润气候类型,四季分明。流域上游的保山市年均气温为 15.6℃,下游旧城年均气温为 21.2℃。多年平均降水量为 1160 mm,每年 5—11 月为汛期,降水量占全年的 85%。该流域山地间分布多个坝子,是云南省重要粮食生产基地,山地也种植咖啡、茶叶、核桃等经济作物^[17-18]。这些产业的发展均对流域气象和水文条件有较大依赖。

据《云南省减灾年鉴》记载,近年来保山地区发生重大旱灾的年份有 2005 年和 2009—2012 年。特别是 2009 年秋至 2012 年,受偏西气流控制,全区雨季降雨显著偏少,受旱灾影响范围较广,严重程度较高。其中,保山隆阳区 2012 年秋季降雨量为 100 mm,比历年同期减少 91 mm。由于降雨区域和时段分布不均以及三年降水偏少的影响效应累积叠加,旱情较严峻,达到重旱气象干旱标准。

1.2 数据及处理

从云南省气象局获得研究区涉及的 3 个国家气象站(保山站、昌宁站和永德站)1966—2013 年的月降水量和月平均气温数据。水文数据为云南省水文水资源局提供的 1966—2014 年勐波罗河中游柯街站和下游旧城站的月径流量。根据李斌等^[19]对云南省降水量空间分异特征的研究,同时与 Metzger 等^[20]划分的全球生物气候区进行对照,保山、昌宁和永德 3 个气象站点分别处于温暖干旱型、干热型、温暖湿润 3 个生物气候类型。

首先对这 3 个站点的降水和气温序列进行初步分析,发现各站点之间降水与气温的相关性(相关系数达 0.87 以上)和一致性均较好。因此,根据各站点的月数据构建平均降水序列和气温序列,以代表流域气象的整体变化情况。

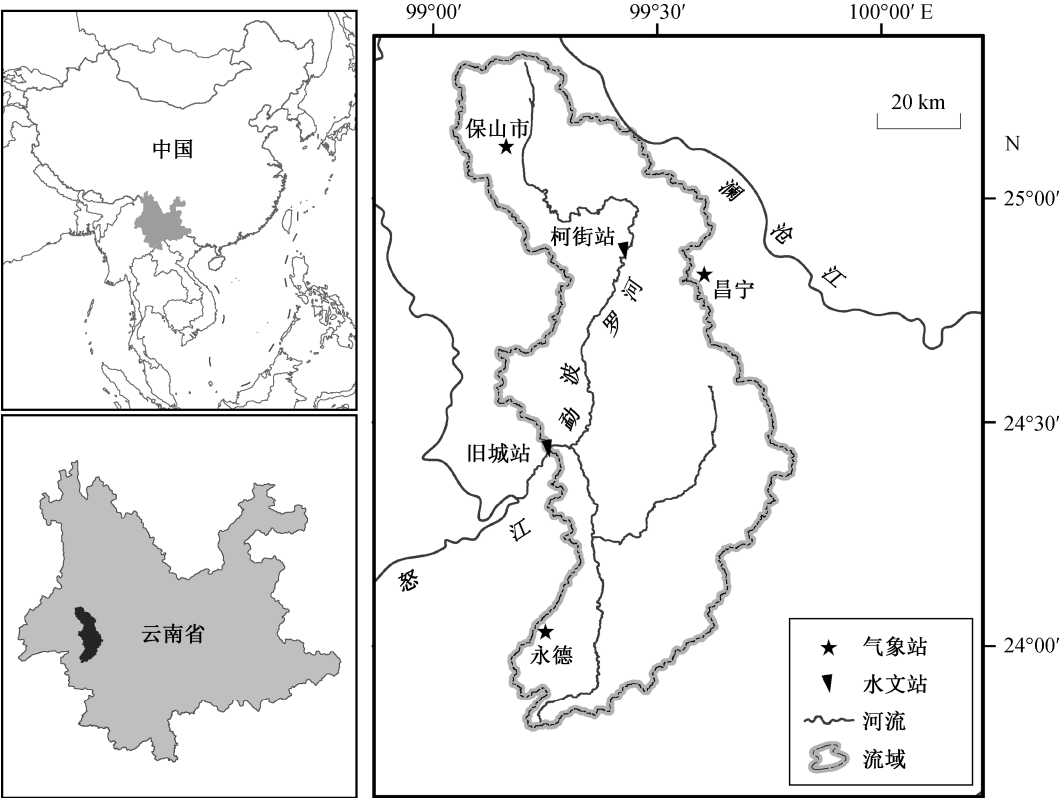


图 1 研究区示意图
Fig. 1 Location of the study area

相关气象站点和水文站的分布见图 1。

2 研究方法

2.1 干旱指数

2.1.1 SPI 与 SPEI 指数

SPI 指数是世界气象组织推荐的干旱计算指标之一。它首先计算出特定时间段降水的 T 分布概率,再通过 Log-normal 函数对降水累积频率做正态标准化处理^[21]。SPEI 指数的计算过程与 SPI 指数类似,主要区别在于增加了蒸散发量对干旱影响的考量^[6]。

2.1.2 SDI 指数

SDI 指数的计算过程与 SPI 完全相同,以径流

观测数据代替降水数据执行相应的计算,在水文干旱研究方面有广泛的应用^[22-23]。具体计算方法参照 Nalbantis 等^[24]的研究。

本文分别以 12、6 和 3 个月为参考期^[25-27],分析研究区年、干湿季以及四季的干旱特征。在季节变化分析中,按习惯以 1 月、4 月、7 月和 10 月干旱指标均值作为冬、春、夏和秋四季的代表值。参照《气象干旱等级》(GB/T20481—2006)中的 SPI 干旱等级以及相关研究成果^[28],本文对各指标反映的气象和水文干旱等级做如表 1 所示的划分。

2.2 干旱变化

2.2.1 干旱趋势分析

本研究采用世界气象组织(WMO)推荐的非参

表 1 SPI, SPEI 以及 SDI 干旱指标等级划分
Table 1 Drought index ranks of SPI, SPEI and SDI

| 干旱指标 | 无旱 | 轻旱 | 中旱 | 重旱 | 特旱 |
|------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| SPI | $-0.5 < \text{SPI}$ | $-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$ | $-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$ | $-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$ | $\text{SPI} \leq -2.0$ |
| SPEI | $-0.5 < \text{SPEI}$ | $-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$ | $-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$ | $-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$ | $\text{SPEI} \leq -2.0$ |
| SDI | $0 \leq \text{SDI}$ | $-1.0 \leq \text{SDI} < 0$ | $-1.5 \leq \text{SDI} < -1.0$ | $-2.0 \leq \text{SDI} < -1.5$ | $\text{SDI} < -2.0$ |

数 Mann-Kendall 方法(M-K 趋势检验)^[29], 对年、干湿季和四季 3 个参考期代表月份的 SPI, SPEI 和 SDI 指数序列进行趋势分析。如果 M-K 趋势检验发现时间序列具有显著变化趋势, 则进一步检验序列的突变特征。突变检测采用 Mann-Kendall 突变检测法和变点分析软件(V2.3, Taylor Enterprises Inc, <http://www.variation.com>)进行分析。

2.2.2 干旱周期分析

小波分析是在傅里叶分析的基础上发展起来的一种多分辨率的时频局部化分析方法, 能够较准确地揭示信号序列中频率结构随时间尺度的变化规律, 近年来在气象和水文序列的周期性规律研究中有较多的应用^[30-33]。小波函数 $\Psi(t)$ 指具有振荡特性并能迅速衰减为零的一类函数。如果该函数的傅里叶变换满足条件 $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\omega)^2 d\omega < \infty$, 则称其为基本小波或母小波。通过对 $\Psi(t)$ 的伸缩和平移, 衍生出函数 $\Psi_{a,b}(t)$:

$$\Psi_{a,b}(t) = a^{1/2} \Psi(t-b/a), \quad (1)$$

式中, $\Psi_{a,b}(t)$ 为连续小波, a 为尺度系数, b 为时间系数。

本研究选用 Morlet 小波^[34], 该函数的定义为

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad (2)$$

式中, ω_0 为常数, i 代表小波的虚部。其傅里叶变换可表示为

$$\psi(\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-(\omega-\omega_0)^2/2}. \quad (3)$$

利用 Matlab 软件的 Morlet 复小波工具对研究区的 SPI, SPEI 和 SDI 序列进行连续小波变换, 将小波系数实部矩阵投影到以尺度(年)为纵坐标, 时序(年份)为横坐标的平面上, 生成小波变换系数等值线图, 用于反映干旱指数的周期性、周期变化的强弱及相位。

2.3 气象-水文干旱关联分析

气象干旱与水文干旱之间具有一定的因果关系, 我们希望通过计算较短参考期(3 个月或 6 个月)的气象干旱指标, 对年尺度上的径流变化进行预测:

$$SDI = cD_i + d, \quad i = 3, 6, \quad (4)$$

式中, SDI 为年尺度径流干旱指数估计值, D_i 为气象干旱指数(SPI 或 SPEI), c 和 d 分别为系数。

将研究时段以趋势或突变检验的变点为界分为两段, 前一段用于预测方程的构建, 后一段用于检

验。分别计算两个时段 SDI 模拟值与实际值之间的 Pearson 相关系数。

3 结果

随着计算参考期的减小, 干旱指标值的波动频率会增加, 难以对不同参考期的干旱指标进行直接比较, 故将参考期为 6 个月(干湿季)、3 个月(四季)的典型月份的干旱指标求平均后, 统一生成年尺度序列, 逐一进行趋势和周期的分析。

3.1 干旱变化的趋势特征

表 2 及图 2 显示勐波罗河流域 1966—2013 年间, 在年、干湿季及四季 3 个参考期, 以不同干旱指数表征的干旱趋势分析结果。从图 2 可以看出, 3 项指数反映的流域干旱变化趋势基本上相同, 均呈现干旱增加的趋势(干旱指标数值呈减小趋势)。其中, SPEI-6M 和 SPEI-3M 序列的趋势分别达到 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 的显著水平(表 2)。

对 SPEI-6M 和 SPEI-3M 序列进一步做突变检验。结果显示: 1966—2013 年间, 大部分年份中 SPEI-6M 与 SPEI-3M 序列的 UF 值小于 0, UF 曲线在 1970s 为一个上升期, 在 1970s 末期到 1990s 表现为波动中缓慢下降, 从 2000s 初期开始明显下降(图 3(a)和(b))。结合变点分析软件(V2.3)的检验, 未发现显著突变($\alpha=0.05$)。

3.2 干旱变化的周期特征

图 4 为 SPI, SPEI 和 SDI 序列小波变换的时频分布, 可以看到气象和径流干旱指数序列均存在明显的年代际和年际尺度周期性。SPI 和 SPEI 年代际变化以 10~15 年尺度的信号最为明显, 年际变化则以 3~5 年尺度的信号较强。SDI 除 3~5 年周期的年际变化外, 在年代际的变化上呈现 25~30 年以上及 10~15 年两个周期的强信号(图 4(g)~(i))。

从图 4(a)~(f)中, 还发现气象干旱指数 10~15 年尺度的年代际周期振荡突出表现在 1966—1999

表 2 研究区 12, 6 和 3 个月参考期的干旱趋势 M-K 检验
Table 2 M-K test of drought trend under reference period of 12, 6 and 3 months

| 时间尺度/月 | SPI (10 年) | SPEI (10 年) | SDI (10 年) |
|--------|------------|-------------|------------|
| 12 | -0.04 | -0.15 | -0.11 |
| 6 | -0.09 | -0.16* | -0.11 |
| 3 | -0.07 | -0.12** | -0.05 |

注: **和*分别代表 0.01 和 0.05 显著水平。

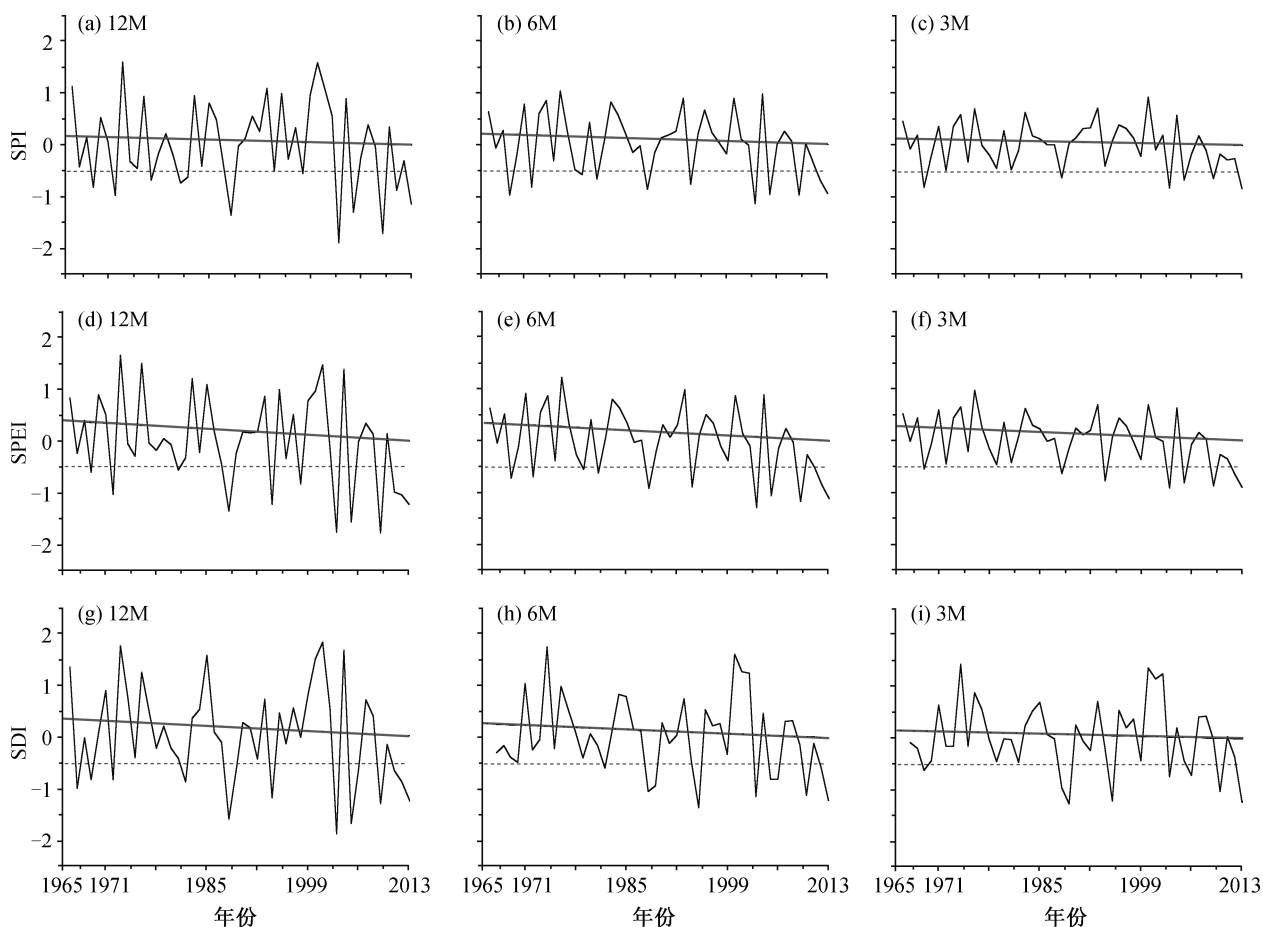


图2 研究区12、6和3个月参考期干旱趋势(1966—2013年)

Fig. 2 Drought trend under reference period of 12, 6 and 3 months in the Mengboluo River Basin (1966–2013)

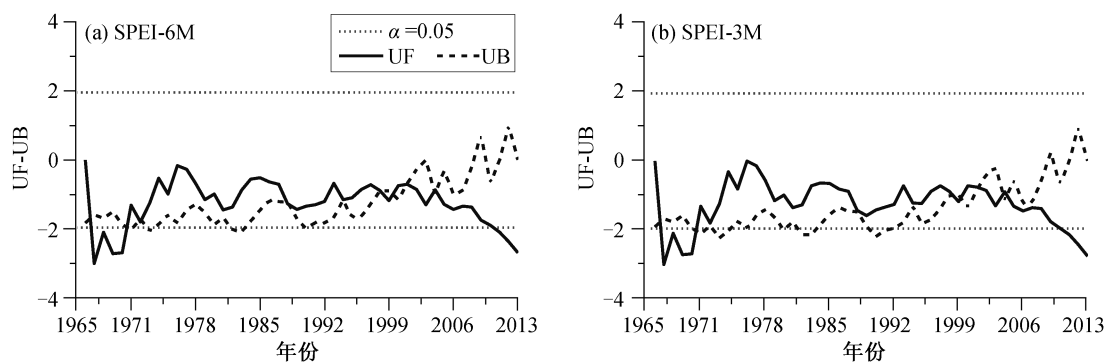


图3 SPEI序列M-K突变检测(1966—2013年)

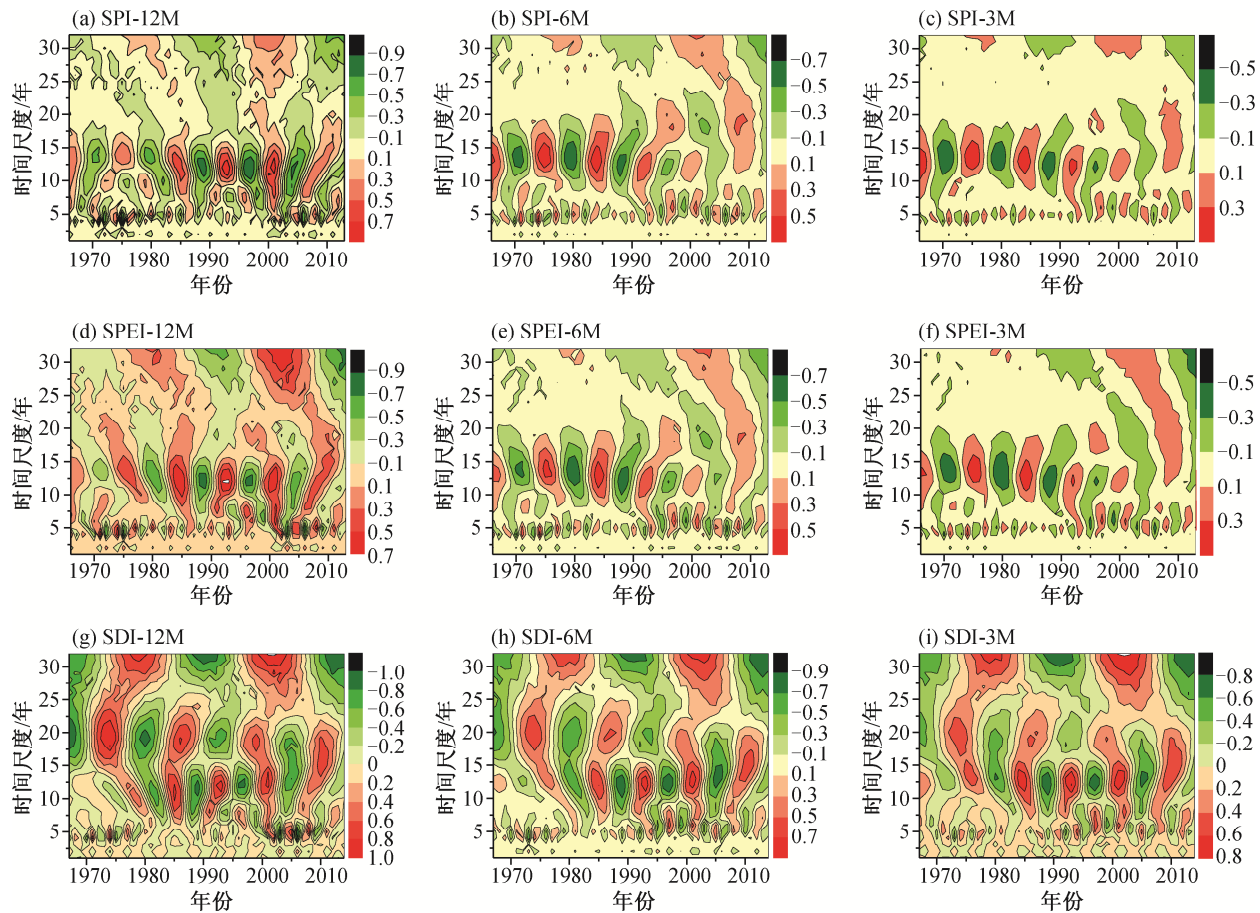
Fig. 3 Abrupt change detection for SPEI time series by M-K method (1966–2013)

年。1999年后,该尺度的小波系数等值线变稀疏,正、负位相交替变化及周期中心均不明显,尤其是在干湿季(图4(b)和(e))以及四季(图4(c)和(f))。径流干旱指数25年以上尺度的年代际周期主要在20世纪90年代中期之前,在90年代中期之后,周期的等值线中心下移,时间尺度缩短为10~15年,在

该尺度内,干湿交替比较频繁。另外,进入21世纪以来,径流干旱在25年以上的大尺度演变为减弱的干旱期,在10~15年尺度变化中则处于由干旱向湿润过渡的时期。

3.3 干旱强度特征

不同指标反映的干旱次数有一定的差异(表3),



图中不同颜色表示复小波系数的实部

图 4 研究区 12, 6 和 3 个月参考期干旱周期的小波分析

Fig. 4 Periodicity analysis of drought under reference period of 12, 6 and 3 months by wavelet method

表 3 勐波罗河流域各级干旱发生年数统计(1966—2013 年)

Table 3 Statistics of drought ranks in the River Basin Mengboluo (1966-2013)

| 等级 | SPI-12M | SPEI-12M | SDI-12M |
|----|---------|----------|---------|
| 轻旱 | 7 | 3 | 17 |
| 中旱 | 3 | 6 | 3 |
| 重旱 | 2 | 3 | 3 |
| 特旱 | 0 | 0 | 0 |

尤其是在轻度干旱发生次数的判定方面。在轻旱次数判定中, SPI, SPEI 和 SDI 分别为 7 次、3 次和 17 次。在中旱次数判定中, SPI 与 SDI 均为 3 次, SPEI 为 6 次。重度干旱判定次数差异不大, SPEI 和 SDI 均为 3 次, SPI 为 2 次。3 项指数均未指示特大干旱发生。

3.4 气象-水文干旱关联

对 1966—1999 年 SPI, SPEI(12M, 6M 和 3M)与 SDI(12M)指数分别进行回归分析。其中, SPI(12M,

6M 和 3M)与 SDI(12M)之间的线性回归关系见图 5((a)~(c))。将 SPEI(12M, 6M 和 3M)与 SDI(12M)之间的线性回归关系绘制于图 6(a)~(c)中。对比所构建的一系列回归方程, 发现除 SPI(3M)-SDI(12M)之间的相关关系外, 其余均通过 0.01 显著水平检验。其中, 以考虑了气温影响的 SPEI-12M 与 SDI-12M 的相关性为最高, 相关系数达 0.69; SPEI-6M 与 SDI-12M 的相关性次之, 为 0.63。通过分析, 我们认为随着干旱计算参考期月份的增加, 有更多的数据(特别是气温的数据)包含在水文-气象干旱的关联中, 使其相关系数增大。另外, 由图 6 可见, 当气象干旱指数 SPEI 计算的参考期从 12 个月减小到 6 个月, 其与 SDI 指数的相关系数仅下降 0.06, 而参考期从 6 个月减小到 3 个月时, 其与 SDI 指数的相关系数下降较明显, 达到 0.38。

根据上述分析, 选择其中相关系数最高的两个预测方程, 将 2000—2013 年段的相关数据代入其中

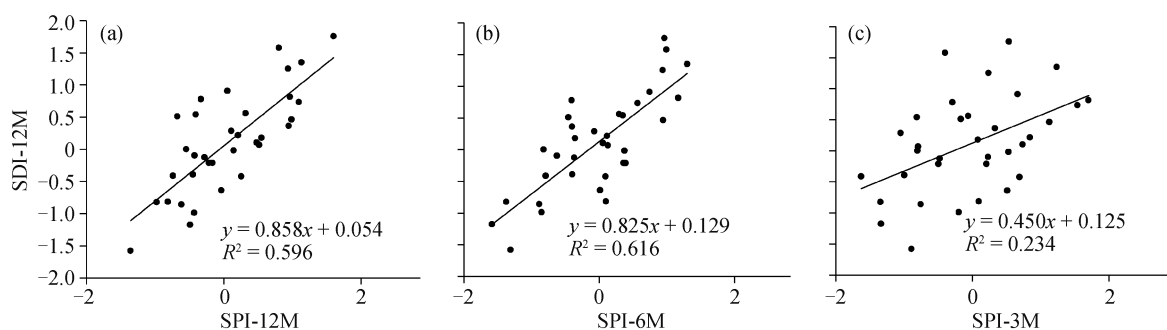


图 5 基于 SPI 指数 12M (a)、6M (b)和 3M (c)的 SDI-12M 预测方程

Fig. 5 Liner regression between SDI-12M and SPI-12M (a), SPI-6M (b), SPI-3M (c)

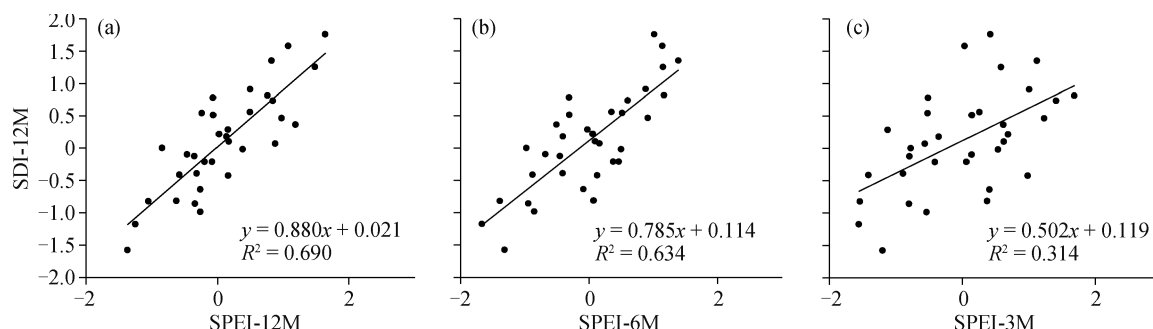


图 6 基于 SPEI 指数 12M (a)、6M (b)和 3M (c)的 SDI-12M 预测方程

Fig. 6 Liner regression between SDI-12M and SPEI-12M (a), SPEI-6M (b), SPEI-3M (c)

进行验证。结果表明：2000—2013 年 SPEI(12M)-SDI(12M)预测方程和 SPEI(6M)-SDI(12M)预测方程得到的 SDI(12M)与由径流计算得到的 SDI(12M)间的 Pearson 相关系数均达到 0.78 以上。

据计算得到的 SDI(12M)值判断，21 世纪初以来，径流干旱发生的年份有 2003，2005，2009 和 2012 年，与《云南省减灾年鉴》记录的该地区实际气象干旱发生时间基本上一致。

4 讨论

中国西南山地区的气候受季风环流影响，季风活动强弱以及持续时间的年际变化是其干旱过程变化的大气候背景。本研究组前期对怒江、澜沧江云南段近几十年的干旱过程进行分析^[15]，认为怒江地区降水在近十几年的微弱减少和气温的显著增加是本区气象干旱增加的主要原因，与前人研究结论^[35]相似。

在此基础上，本文进一步在中小流域尺度上对该地区的气象干旱指数 SPI 和 SPEI 以及径流干旱指数 SDI 的变化，特别是周期性以及水文—气象干旱的关联方面进行研究。这些干旱指数反映的流域干

旱等级和频次不尽相同，干旱变化也具有一定的复杂性。指标数值序列变化不仅表现出单纯的趋势性，而且具有一定的周期性变化特征，主要表现在大尺度、中小尺度周期控制下的干旱增加趋势。大尺度周期为 25~30 年，中小尺度周期为 10~15 年。其中，21 世纪以来，径流干旱在 25 年以上的大尺度上演变为减弱的干旱期，10~15 年的中尺度变化则处于由干旱向微湿润过渡的时期，这与刘瑜等^[36]认为云南省在近几十年整体上由冷湿气候向暖干气候转变的结论较为一致。

对 SDI(12M)与 SPI, SPEI(12M, 6M 和 3M)两套指数的相关性分析显示，考虑气温影响的 SPEI 指数与 SDI(12M)间的相关性在整体上高于仅考虑降水的 SPI 指数的相关性。将参考期从 12 个月降低至 6 个月时，SPEI 与 SDI 指数的相关系数变化不大。这说明利用前半年的气象干旱 SPEI(6M)指标，通过简单的回归关系，可以对全年水文干旱状况进行估计和预测。虽然利用回归方程估计的水文干旱指标数值具有一定的不确定性，但是，水文干旱强度主要通过指标等级而非通过指标绝对数值来表示，所以该预测方程具有一定的实用价值。

5 结论

本文利用 SPI、SPEI 及 SDI 指数, 分析 1966—2013 年怒江下游地区勐波罗河流域的年、干湿季和四季的干旱变化特征(趋势和周期), 揭示了该区径流干旱与气象干旱变化之间的关系, 得到如下结论。

1) 怒江下游地区以气象干旱指数 SPI 和 SPEI 及径流干旱指数 SDI 所表征的干旱状态变化趋势较为一致, 在所检验的参考期(3、6 和 12 个月)中均表现为指标数值减小(干旱的增加)的趋势; 其中, 以干湿季(6 个月)、四季(3 个月)的 SPEI 干旱增强趋势最为显著。

2) 怒江下游地区气象干旱与径流干旱均具有多尺度周期性特征。在 20 世纪 90 年代中期之后, 25~30 年的大尺度周期的等值线中心逐渐下移, 变为 10~15 年尺度。21 世纪以来, 径流干旱在 25 年以上的大尺度上演变为减弱的干旱期, 而在 10~15 年的中尺度上处于由干旱向微湿润变化的过渡期。

3) 径流干旱与气象干旱关系较为密切, 通过气象干旱指数 SPEI(6M)的变化, 可以较好地预测年径流干旱的情况。

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] 李鹏飞, 冯瑶, 赵昕奕. 2002—2011 年华北平原北部农田缺水时空分布特征研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(6): 1111–1118
- [4] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展. *生态学报*, 2014, 34(5): 1043–1052
- [5] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52–58
- [6] 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
- [7] Sharma T C, Panu U S. Modeling of hydrological drought durations and magnitudes: experiences on Canadian streamflows. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2014, 1: 92–106
- [8] Tsakiris G, Nalbantis I, Vangelis H, et al. A system-based paradigm of drought analysis for operational management. *Water Resources Management*, 2013, 27(15): 5281–5297
- [9] 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
- [10] Becker A, Bugmann H. Global change and mountain regions: the mountain research initiative [R]. Stockholm: IGBP Secretariat, 2001
- [11] 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(5): 1159–1168
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 徐娟. 近 50 年云南省怒江、澜沧江流域气象干旱研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 964–972
- [16] 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: 350
- [17] 蒋国安. 保山年鉴. 昆明: 云南民族出版社, 2006
- [18] 李明三, 刘世胤. 临沧地区志. 北京: 北京燕山出版社, 2004
- [19] 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
- [20] 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(5): 630–638
- [21] WMO. Standardized Precipitation Index User Guide [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2012
- [22] 何福力, 胡彩虹, 王纪军, 等. 基于标准化降水径流指数的黄河流域近 50 年气象水文干旱演变分析.

- 地理与地理信息科学, 2015, 31(3): 69–75
- [23] Rad A M, Khalili D, Kamgar-Haghighi A A, et al. Assessment of seasonal characteristics of streamflow droughts under semiarid conditions. *Natural Hazards*, 2016, 82(3): 1541–1564
- [24] Nalbantis I, Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour Manage*, 2009, 23(5): 881–897
- [25] Patel N R, Choprab P, Dadhwal V K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. *Meteorological Applications*, 2007, 14: 329–336
- [26] Tigkas D, Vangelis H, Tsakiris G. Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment*, 2012, 440: 33–41
- [27] 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
- [28] Soumyashri R, Nagraj S P. Drought analysis based on Streamflow Drought Index (SDI) in Bhima sub-basin. *International Journal of Advanced Engineering Research and Applications*, 2016, 2(3): 154–159
- [29] Kendall M, Gibbons J D. Rank correlation methods. 5th ed. London: Oxford University Press, 1990
- [30] 刘笑彤, 蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析——以通天河为例. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(3): 549–556
- [31] Figliola A, Seerano E. Analysis of physiological time series using wavelet transform. *IEEE Engineering in Medicine And Biology*, 1997, 16(3): 74–79
- [32] 张彦龙, 刘普幸, 王允. 基于干旱指数的宁夏干旱时空变化特征及其 Morlet 小波分析. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2373–2380
- [33] 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
- [34] 蔺秋生, 范北林, 黄莉. 宜昌水文站年径流量演变多时间尺度分析. *长江科学院院报*, 2009, 26(4): 1–3
- [35] 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
- [36] 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