

基于SPEI和SDI指数的云南红河流域 气象水文干旱演变分析

李运刚, 何娇楠, 李 雪

(云南大学云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091)

摘 要: 本文基于红河流域43个气象站1961-2012年逐月降水、气温数据以及干支流2个水文站1956-2013年逐月流量数据, 采用标准化降水蒸散指数(SPEI)和径流干旱指数(SDI)分析流域气象水文干旱的演变特征, 并探讨水文干旱对气象干旱的响应。结果表明: ①1961-2012年期间, 流域总体上表现出干旱化的趋势, 季节变化上春季有变湿的趋势, 而夏、秋、冬三季有变干的趋势, 但趋势并不显著。干旱频率季节空间分布差异较大, 春旱和冬旱发生频率较高。从干旱范围来看, 春旱范围呈缩小的趋势, 夏旱、秋旱和冬旱范围表现出不同程度的增大趋势; ②1956-2013年期间, 流域水文干旱表现出加剧的趋势, 其中1958-1963、1975-1982、1987-1993、2003-2006和2009-2013年为水文干旱多发期, 近10年来频率明显增加; ③流域水文干旱滞后于气象干旱1~8个月, 气象和水文干旱事件的干旱历时、严重程度和强度之间具有紧密的相关性, 流域气象干旱是水文干旱的主要驱动力。

关键词: 气象干旱; 水文干旱; 标准化降水蒸散指数; 径流干旱指数; 红河流域; 云南省

1 引言

全球气候变化和水资源需求增加的背景下, 干旱成为制约社会经济可持续发展的重要因素之一, 受到国内外科学家的广泛关注(Mishra et al, 2010)。研究表明: 自1950s以来, 全球干旱面积持续增加, 尤其以非洲、欧洲南部、亚洲东部和南部、大洋洲东部地区最为突出(Dai, 2011)。近50年来, 中国也呈现出干旱化的趋势, 北方地区、东北地区和西北西部地区的干旱变得频繁(Yu et al, 2014), 而且表现出从北方地区向西南地区蔓延趋势(熊光洁等, 2013)。西南地区分布有怒江、澜沧江、红河等重要国际河流, 近年来受极端干旱事件的影响, 跨境水安全与纠纷问题日益突出(He et al, 2014)。因此, 迫切需要开展国际河流区干旱变化研究, 为跨境水资源利用和管理提供科学依据。

美国气象学会将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种类型(Mishra et al, 2010)。气象干旱主要指大气降水和蒸发不平衡所造成的水分短缺现象。国内外学者利用Palmer干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)等, 从全球、洲际、国家到流域等多个尺度开展了大量气象干旱变化研究(Mishra et al, 2010; Dai, 2013)。水文干旱是指径流低于正常值或含水层水位降落的现象, 通过构建干旱指数(如径流距平指数、Palmer水文干旱指数(PHDI)、地表供水指数(SWSI)、标准径流指数(SRI)和径流干旱指数(SDI)等)进行水文干旱研究是目前简单有效的方法(胡彩虹等, 2013)。国内学者采用水文干旱指数在长江、黄河、渭河、海河等流域开展了许多研究(Hong et al, 2014; 何福利等, 2015; 翟家齐等, 2015; 赵安周等, 2015)。尽管目前采用气象、水文干旱指

收稿日期: 2016-03; 修订日期: 2016-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301099, 41561063); 云南省应用基础研究计划项目(2012FD007) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41301099, No.41561063; Applied Basic Research Program of Yunnan Province, No.2012FD007]。

作者简介: 李运刚(1983-), 男, 云南大理人, 博士, 副研究员, 主要从事水文水资源研究, E-mail: ygli@ynu.edu.cn。

引用格式: 李运刚, 何娇楠, 李雪. 2016. 基于SPEI和SDI指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J]. 地理科学进展, 35(6): 758-767. [Li Y G, He J N, Li X. 2016. Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan Province based on SPEI and SDI Indices[J]. Progress in Geography, 35(6): 758-767.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.06.009

数的研究有很多,但是同时利用2种指数从大气与水体的角度来反映干旱,并分析气象干旱和水文干旱之间关系的研究不多(蒋亿文等, 2014)。

红河流域位于印度季风和东亚季风的交汇区,流域内岭谷地形对水汽输送具有“南北通道”和“东西阻隔”效应(Li et al, 2008)。不同年份季风强弱、雨季开始时间变化加之地形作用,造成流域水热条件时空分布不均,导致干旱频繁发生(谢明恩等, 2004)。21世纪以来,中国在红河上游进行梯级水电开发,导致流域水文过程发生变化。自然变化与工程驱动的交织,加剧了跨境水问题的复杂性(柳江等, 2015)。在此背景下,红河上游发生气象、水文干旱造成河川径流量减少时,经常引起下游国家的误解和指责。目前,在红河流域开展的研究以水文气象要素变化方面居多,而对于干旱方面的研究较少(叶长青等, 2008; 李运刚等, 2012)。因此,本文将采用SPEI和SDI指数分析红河流域气象、水文干旱的演变特征,并探讨水文干旱对气象干旱的响应,为流域干旱监测与评估、水资源管理提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

红河是东南亚重要的国际河流,主要流经中国、越南和老挝三国(图1)。中国境内干流全长677 km,流域面积约 $7.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域属于典型的亚热带季风气候,具有明显的干湿季特征,5-10月为湿

季,降水量占全年的85%以上;11月-次年4月为干季,降水量不及15%。中国境内流域降水量时空分布不均,从700~3200 mm不等,大部地区介于1000~1600 mm。降水空间分布由南向北递减,河谷地区降水稀少,山区降水丰富。降水为河川径流补给的主要来源,受降水变化的影响,径流年内分配极不均匀。汛期径流量占年径流量的80%以上,枯水期径流量小于年径流量的20%。受气候变化的影响,近年来极端水文事件频发,给流域社会经济造成巨大损失。2009-2012年流域遭遇4年连续严重干旱,导致红河源头出现断流现象,越南河内的红河水位则创下了1902年以来的最低记录,引发了下游国家的关注。

2.2 研究数据

气象数据为红河流域及周边43个气象站1961-2012年逐月降水、气温数据。水文数据为元江出境控制站——蛮耗水文站1956-2013年逐月流量数据和李仙江出境控制站——李仙江水文站1957-2013年逐月流量数据。由于李仙江站2007年开始受到梯级电站回水影响,为保持数据年限的一致性,采用下游客卡河站2007-2013年数据进行插补。气象站和水文站点地理位置如图1所示。

2.3 研究方法

2.3.1 标准化降水蒸散指数

Vicente-Serrano 等(2010)在标准化降水指数(Standard Precipitation Index, SPI)的基础上提出标准化降水蒸散指数(Standard Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),该指数具有SPI指数多时间尺度特征,并考虑了温度变化的影响,因此在许多国家和地区得到了广泛应用。SPEI是对降水量与潜在蒸散量的差值序列的累积概率值进行正态标准化后的指数。首先采用Thorntwaite方法计算逐月潜在蒸散量;然后计算逐月降水与蒸散量的差值,构建不同时间尺度的累积序列;最后采用Log-logistic分布对数据序列进行拟合,并对序列进行标准化转化,获得不同时间尺度的SPEI指数。本文以1、3、6和12个月时间尺度的SPEI指数表征不同时间尺度(月、季节、干湿季和年)的气象干旱,利用泰森多边形方法获得流域平均SPEI值。根据中国气象局制定的SPEI干旱等级划分标准对流域干旱等级进行划分: $SPEI > -0.5$ 为无旱; $-1 < SPEI \leq -0.5$ 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。

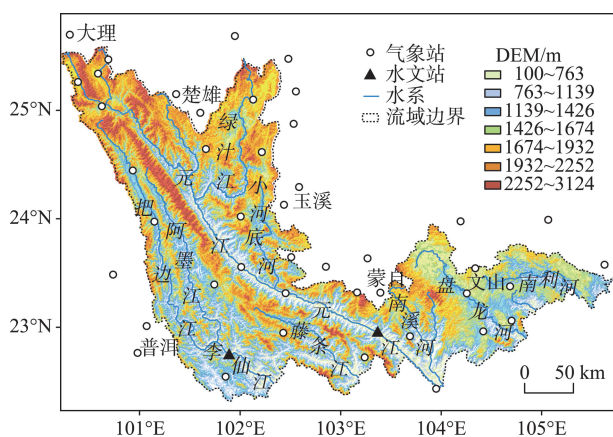


图1 红河流域地理位置及气象、水文站点分布图

Fig.1 Location of the Red River Basin and distribution of meteorological and hydrological stations

2.3.2 径流干旱指数

径流干旱指数(Streamflow Drought Index, SDI)以观测径流数据为基础,可以计算不同时间尺度的水文干旱情况,也能反映由于季节变化引起的滞后而导致干旱事件变化的情况,在国际上应用广泛(Tabari et al, 2013; Hong et al, 2014),其计算方法见文献(Nalbantis et al, 2009)。根据SDI指数,可将水文干旱划分为5个等级: $SDI \geq 0$ 为无旱; $-1.0 \leq SDI < 0$ 为轻旱, $-1.5 \leq SDI < -1$ 为中旱, $-2 \leq SDI < -1.5$ 为重旱; $SDI < -2$ 为特旱。

2.3.3 干旱指标

(1) 干旱频率(P_i)。根据干旱发生的年数计算相应等级的干旱发生频率,计算公式为:

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

式中: n 为站点*i*发生干旱的年数; N 为降水资料年数。基于1961-2012年各站点SPEI值,分别计算各站点不同季节的干旱频率,在ArcGIS 10.0软件中利用反距离加权插值法绘制干旱频率分布图。

(2) 干旱站次比(P_j)。 P_j 是指区域内干旱发生站数与站点总数的比例,表达式为:

$$P_j = (m/M) \times 100\% \quad (2)$$

式中: m 为发生干旱的站点数; M 为研究区域内总气象站点数; j 为不同年份。当 $P_j \geq 50\%$ 时,为全域性干旱;当 $33\% \leq P_j < 50\%$ 时为区域性干旱;当 $25\% \leq P_j < 33\%$ 时为部分区域性干旱;当 $10\% \leq P_j < 25\%$ 时为局域性干旱; $P_j < 10\%$ 时无明显干旱发生。

(3) 游程理论。干旱通常可用干旱历时、干旱严重程度和干旱强度3个特征来表示。基于游程理论对干旱事件进行识别,首先参考相关研究(Hong et al, 2014),选择0作为游程的截断水平,当SPEI/SDI值小于截断水平时表示发生干旱事件。干旱历时为游程长度,干旱严重程度为游程中累积的SPEI/SDI值与截断水平的亏缺值,干旱强度为干旱严重程度与干旱历时的比值。

2.3.4 Mann-Kendall 趋势检验法

采用世界气象组织建议的非参数Mann-Kendall趋势检验分析法(简称M-K法)研究干旱指数的变化趋势和突变点检测(Li et al, 2008)。M-K趋势检验法通过统计量Z值来确定变化趋势。当显著性水平为0.05时, $Z > 1.96$ 表示时间序列呈显著上升的趋势; $Z < -1.96$ 表示时间序列呈显著下降的趋势。

3 结果与分析

3.1 SPEI指数的适用性

已有研究对比分析了SPEI指数、湿润指数H、PDSI指数和SPI指数在中国干旱监测中的效果,结果表明:SPEI指数具有较强的适用性(王林等, 2014)。为分析SPEI指数在红河流域干旱监测中的效果,计算了1961-2012年12个月尺度的SPEI指数(图2),并与气象灾害统计年鉴的记录进行比较。根据SPEI指数计算结果,干旱总月数为168个,干旱频率为27.4%。其中轻旱、中旱、重旱、特旱月数分别为123、34、10和1个。SPEI为低值的典型干旱年份,如1963、1979、1987、1992、1998、2003、2006、2009、2010和2012年,与《中国气象灾害大典·云南卷》和《云南减灾年鉴》记录的干旱年份具有一致性,说明SPEI指数能够客观反映实际干旱情况。由于SPEI能反映增温引起的干旱程度变化,更加精确地刻画干旱,因此本文将采用SPEI指数进行红河流域气象干旱时空变化特征的分析。

3.2 气象干旱的时间变化特征

3.2.1 年际变化

对1961-2012年红河流域年尺度的SPEI值进行M-K趋势检验发现,Z值为-1.69,说明流域表现出干旱化的趋势。由图3可知,红河流域有6个时段发生连续干旱,其中1962-1963、1979-1980、1992-1993年为2年连旱,1987-1989年为3年连旱,2003-2006年和2009-2012年为4年连旱。干旱严重的1980年和2012年为中旱,2009年为重旱。在0.05显著性水平的临界线内,UF、UB曲线相交于2009年,但未通过0.05的显著性水平检验,表明红河流域年尺度SPEI指数在研究时段内不存在显著突变点。从年尺度的SPEI指数的变化来看,2002年以后干旱的年份明显偏多,10年中有6年发生干旱,

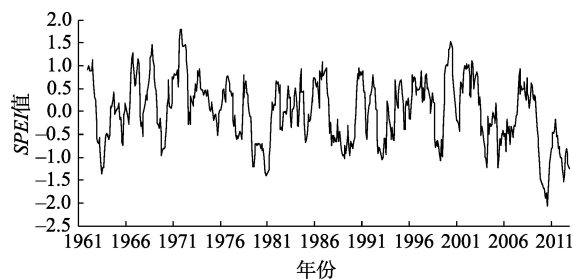


图2 红河流域SPEI-12指数变化特征

Fig.2 SPEI-12 time series of the Red River Basin

而且出现2009-2012年连续干旱,表明近10年来红河流域气象干旱频率明显增加。

3.2.2 季节变化

图4为不同季节红河流域SPEI指数的年际变化及其M-K检验。红河流域春、夏、秋、冬季SPEI指数的Z值分别为1.05、-1.72、-1.71和-0.85,未能通过0.05的显著性水平检验,说明变化趋势并不显著。其中夏、秋两季SPEI值下降的变率较大,平均每10年分别下降0.116和0.117。由图4a可知,自1961年以来,春季SPEI指数呈波动上升,说明春季有变湿的趋势。在0.05显著性水平的临界线之间,UF和UB曲线相交于1967年,春季经历了由干变湿的转变。由图4b可知,1960s夏季是相对湿润时期,1974年由湿向干转变,之后UF值一直小于0,说明夏季呈现出变干的态势。由图4c可知,在0.05显著性水平的临界线之间,UF和UB曲线相交于2000年,说明从2000年开始秋季有干旱化的趋势。由

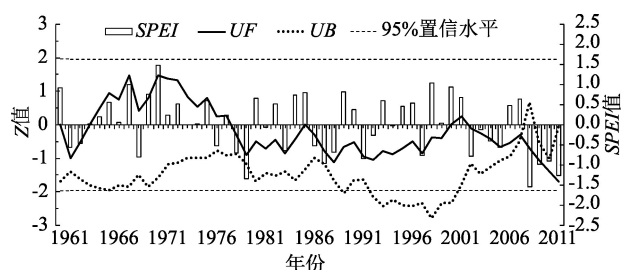


图3 红河流域年尺度SPEI值变化特征及M-K突变检验
Fig.3 Annual SPEI time series and Mann-Kendall abrupt test

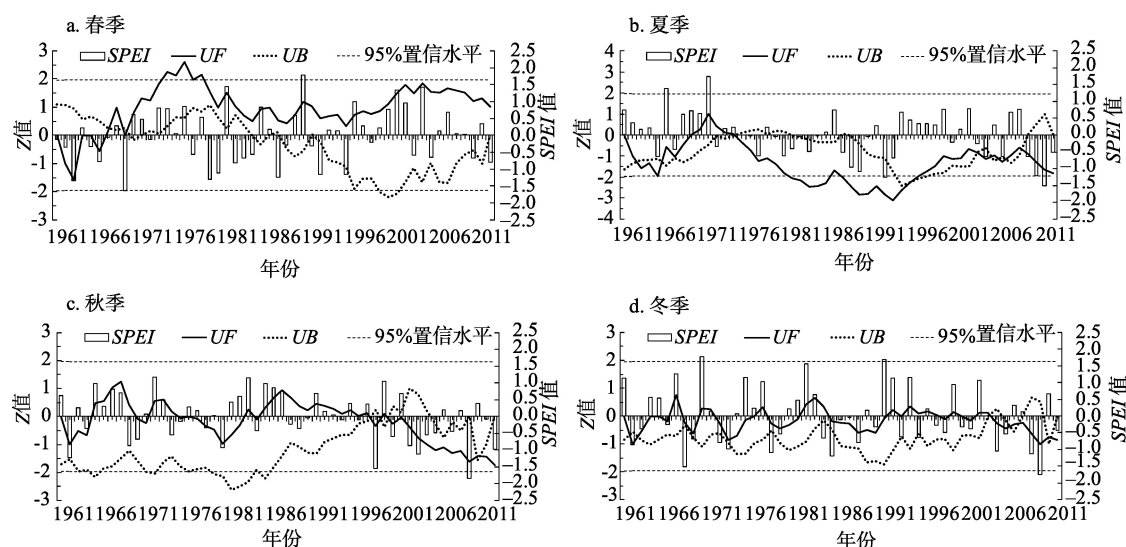


图4 红河流域春、夏、秋和冬季SPEI值变化特征及M-K突变检验

Fig.4 Seasonal SPEI time series and Mann-Kendall abrupt test

图4d可知,2003年以前冬季UF值在0附近上下波动,2003年开始UF值一直小于0,说明从2003年开始冬季有变干的趋势。综上所述,红河流域春季表现出变湿的趋势,夏、秋、冬季表现出变干的趋势,但上述趋势均未通过0.05的显著性水平检验,说明变湿/干趋势不显著。

3.3 气象干旱的空间分布特征

3.3.1 干旱趋势变化的空间格局

分别利用3、6和12个月尺度的SPEI指数来表示季节、干湿季和年尺度的干旱状况,并进行M-K趋势检验(图5)。从季节变化来看,春季普遍呈现出湿润化趋势(图5a),湿润化站点比例为79%,但仅有5%站点变化显著,主要分布在流域北部;干旱化的站点主要分布在流域东部地区。夏、秋、冬三季SPEI值变化整体以干旱化为主,干旱化显著站点分别占19%、23%和5%(图5b-5d)。由图5e和图5f可知,干季(11月-次年4月)大部分地区的SPEI值呈下降的趋势,但是趋势并不显著;湿季(5-10月)93%站点的SPEI值表现出下降的趋势,其中12%站点趋势显著。红河流域年尺度SPEI值变化普遍呈现出干旱化趋势,其中23%站点趋势显著,主要分布于流域东部地区及东南地区(图5g)。以上结果与王东等(2014)的研究结论“1960-2012年西南地区夏秋冬三季干旱化趋势明显、干旱化区域面积较大”相一致。

3.3.2 干旱频率空间分布特征

图6为红河流域1961-2012年不同季节干旱频

率的空间分布。由于受印度洋季风和东亚季风交汇影响,加之纵向岭谷地形的作用,使流域降水和气温分布具有局域性,从而导致不同季节干旱频率空间分布差异较大。春季干旱发生的频率在26.9%~42.3%之间,李仙江、元江上游以及南利河春旱频率较高,藤条江、元江下游和南溪河等地的春旱频率较低(图6a)。夏季干旱发生频率在23.1%~38.5%之间,夏旱高发区为流域南部地区,绿汁江等地频率较低(图6b)。秋季干旱发生频率在23.1%~40.4%之间,李仙江中下游、元江中下游及河南利河等地频率相对较高(图6c)。冬季干旱发生频率相对最高,介于25.5%~43.1%之间,除了盘龙河、南利河部分地区外,流域大部分地区冬季干旱发生频率都较

高(图6d)。

3.3.3 不同年代干旱影响范围变化

红河流域不同年代季节和年尺度干旱站次比统计结果如表1所示。由表1可知,春旱的范围呈缩小的趋势,夏旱、秋旱和冬旱的范围表现出不同程度的增大趋势。2000年以来秋旱发生站次比为51.52%,达到了全域性干旱水平。从多年平均水平来看,春、冬季的站次比(33.53%和33.95%)要高于夏、秋季(31.79%和31.47%),说明红河流域冬春季的干旱影响范围相对较大。年旱的多年平均站次比为33.28%,整体上呈增加的趋势。近52年来站次比超过50%的有18年,其中1980、1988、2003、2009、2010、2011和2012年尤为严重,站次比均大

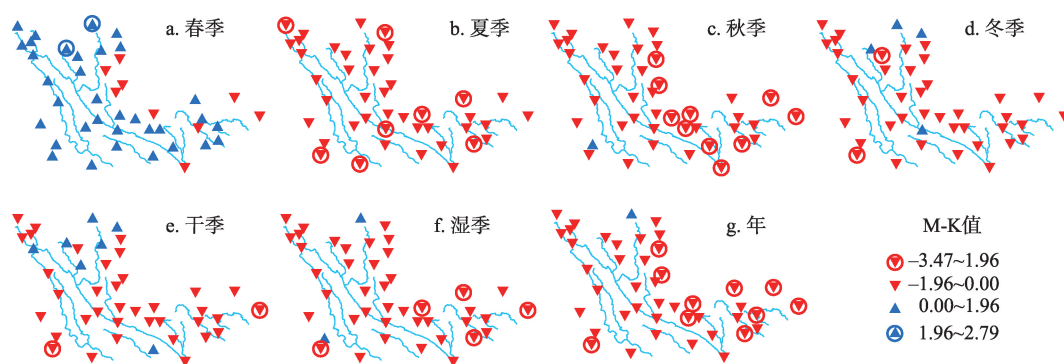


图5 红河流域不同时间尺度SPEI值趋势变化M-K检验

Fig.5 Mann-Kendall trend test of SPEI series at different temporal scales

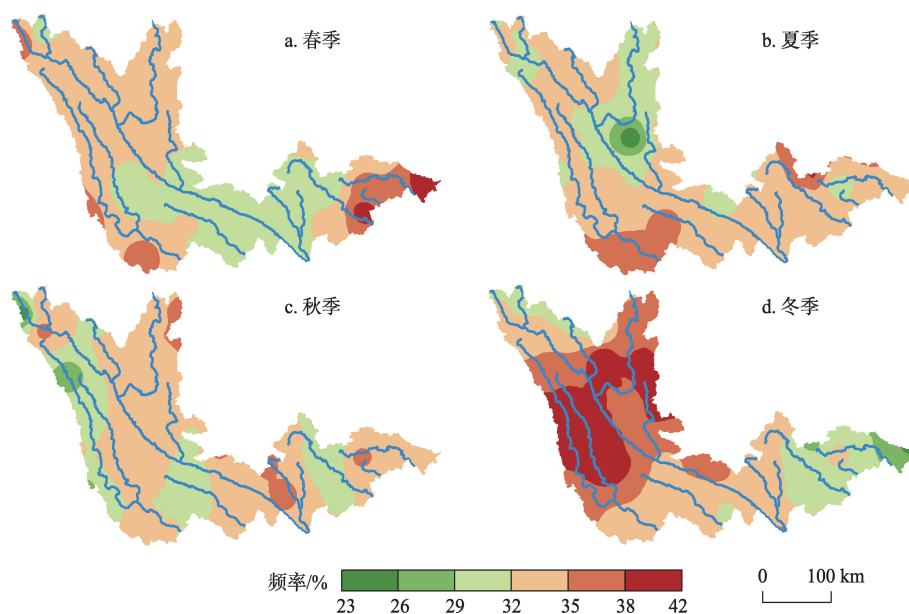


图6 红河流域季节干旱频率空间分布

Fig.6 Spatial distribution of drought frequency for the spring, the summer, the autumn, and the winter

于80%。从年旱的年代变化来看,1960s为部分区域性干旱,1970s和1990s为局域性干旱,1980s和2000s为区域性干旱,说明红河流域干旱影响范围较为严重。

3.4 水文干旱的演变特征

对元江和李仙江年尺度的SDI指数进行M-K趋势检验发现,Z值分别为-1.48和-2.44,说明流域水文干旱有加剧的态势,其中李仙江SDI值变化通过0.05的显著性水平检验。由图7可知,元江和李仙江5个时段为水文干旱多发期,分别为1958-1963、1975-1982、1987-1993、2003-2006和2009-2013年。元江UF、UB曲线在0.05显著性水平的临界线内相交于2009年,但未通过0.05的显著性水平检验。李仙江UF曲线从1975年开始呈现出下降的趋势,且在2010年以后超过了0.05显著性水平的临界线,说明下降趋势显著。由UF、UB曲线交点可知,李仙江年尺度SDI指数在2000年以后经历了下降的突变。从年尺度的SDI指数的变化来看,元江和李仙江2002年以后水文干旱的年份明显偏多,2003-2013年中就有9年发生干旱,而且出现2009-2013年连续干旱,表明近10年来红河流域水文干旱频率明显增加。

表1 红河流域不同年代年、四季干旱站次统计
Tab.1 Decadal average proportion of stations with annual and seasonal droughts since 1960 in the Red River Basin

	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	1961-2012年
春旱	42.89	21.4	43.95	31.16	28.26	33.53
夏旱	18.60	25.35	44.65	27.44	42.93	31.79
秋旱	25.58	27.21	26.05	26.98	51.52	31.47
冬旱	31.98	35.35	33.26	28.37	40.79	33.95
年旱	29.97	23.49	41.40	24.65	46.87	33.28

3.5 水文干旱对气象干旱的响应

分别计算元江流域和李仙江流域不同时间尺度的SPEI和SDI指数,并进行相关分析。结果显示,元江流域1、3、6和12个月时间尺度的SPEI和SDI指数的相关系数分别为0.64、0.73、0.80和0.86;李仙江流域则分别为0.51、0.66、0.78和0.83,以上相关系数均通过0.01的显著性水平检验,说明红河流域气象干旱和水文干旱在12个月时间尺度的相关性最好。已有研究表明,12个月尺度的SPI/SPEI通常与河川径流量、地下水含量和水库蓄水量密切相关(World Meteorological Organization, 2012)。由图8可知,元江和李仙江出现水文干旱时都会有气象干旱发生,但是在气象干旱的历时较短或强度较小的情况下,气象干旱并不一定会引发水文干旱。另外,元江和李仙江水文干旱相对于气象干旱有一定的滞后性。通过分析典型气象干旱和水文干旱事件的发生时间,发现元江水文干旱滞后于气象干旱1~6个月,而李仙江则介于1~8个月之间。为进一步探讨水文干旱与气象干旱的时滞性,分别取同期、滞后1个月、滞后2个月……12个月作为时间梯度,计算SDI-12和SPEI-12相关系数,取最大相关系数对应的时间梯度作为滞后时间。结果表明,元江和李仙江的最大相关系数出现在时滞1个月的时间尺度上,说明红河流域水文干旱对气象干旱的响应在滞后1个月的时候最为敏感。

为进一步探讨气象干旱和水文干旱之间的关系,基于12个月尺度的SPEI和SDI指数,利用游程理论分别统计元江和李仙江的典型气象干旱事件和水文干旱事件的历时、干旱严重程度和干旱强度。以2009-2012年的干旱事件为例,元江气象干旱的历时、严重程度、强度分别为43月、52.87和1.23,对应的水文干旱特征分别为41月、77.65和

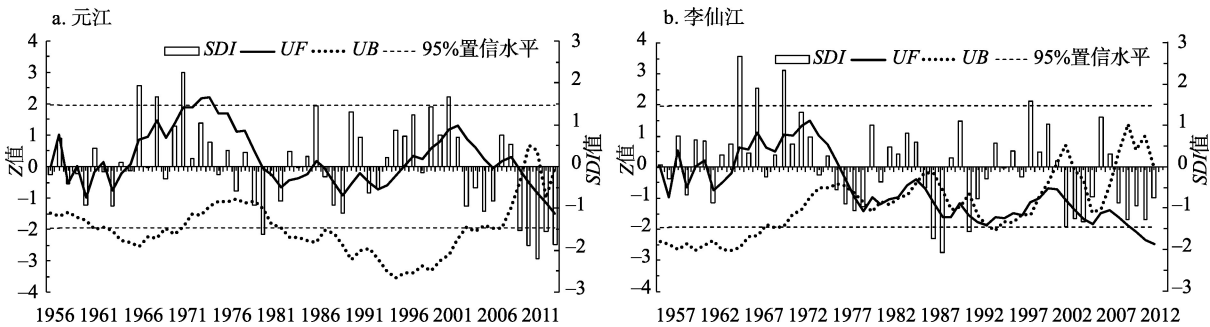


图7 元江和李仙江SDI指数变化趋势M-K检验

Fig.7 Annual SDI time series and Mann-Kendall abrupt test for the Yuanjiang River (a) and the Lixianjiang River (b)

1.89。由图9可知,元江与李仙江气象干旱和水文干旱的历时、严重程度和强度之间具有明显的相关性($P<0.05$),说明水文干旱和气象干旱关系密切。两者的干旱历时相关性最好,干旱严重程度次之,干旱强度最小。

红河流域受印度洋季风、东亚季风和高原季风的影响,不同年份季风强弱、影响范围和雨季开始迟早是决定干旱的主要气候背景。降水减少和气温升高加剧了流域干旱发展。研究表明,1961年来红河流域气温呈显著增加趋势($0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),降水则呈不显著的减少趋势($14\text{ mm}/10\text{a}$),连续最大无雨日数增加和降水集中度加剧(Li et al, 2015)。地形也是造成流域干旱发生的主要因素。流域内岭谷交错,垂直变化较大,南北向山脉对气流的阻隔作用导致焚风效应明显,河谷地区干热少雨,干旱较为严重。从水文干旱形成机制来看,大气环流异常导

致降水减少引发气象干旱,气象干旱引起土壤含水量降低和包气带水分消耗加快,进而影响地表水和地下水的补给,诱发水文干旱。除气象干旱外,人类活动也是水文干旱的驱动因素之一。人类活动通过干扰下垫面,改变了水循环过程,影响水文干旱形成过程的水分收入和支出项(裴源生等, 2013)。目前红河流域水资源开发利用程度总体尚低,元江、李仙江、盘龙河2013年水资源开发利用率仅为8.5%、2.9%和5.9%。随着流域社会经济发展,下垫面受到不同程度的干扰,对流域水文过程有一定的影响。如上游干支流梯级电站在一定程度上改变了天然径流的时间分布规律,不过由于目前已建梯级电站库容较小,调节能力有限,对水文干旱影响不大。综上所述,气象干旱是红河流域水文干旱的主要驱动力,人类活动对水文干旱的影响相对次要。

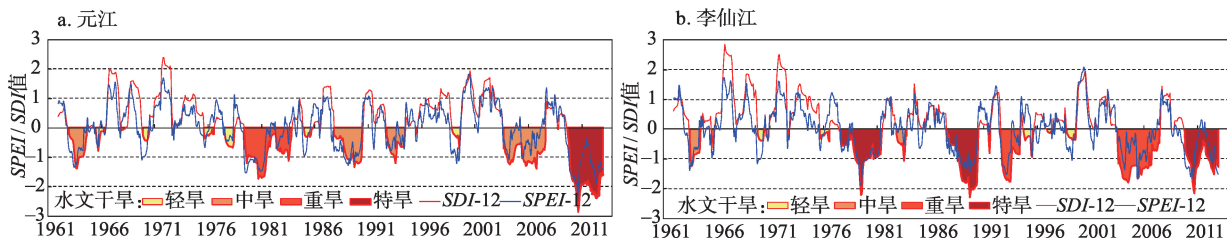


图8 元江和李仙江SDI-12和SPEI-12变化比较

Fig.8 Comparison of SDI-12 and SPEI-12 variations for the Yuanjiang River (a) and the Lixianjiang River (b)

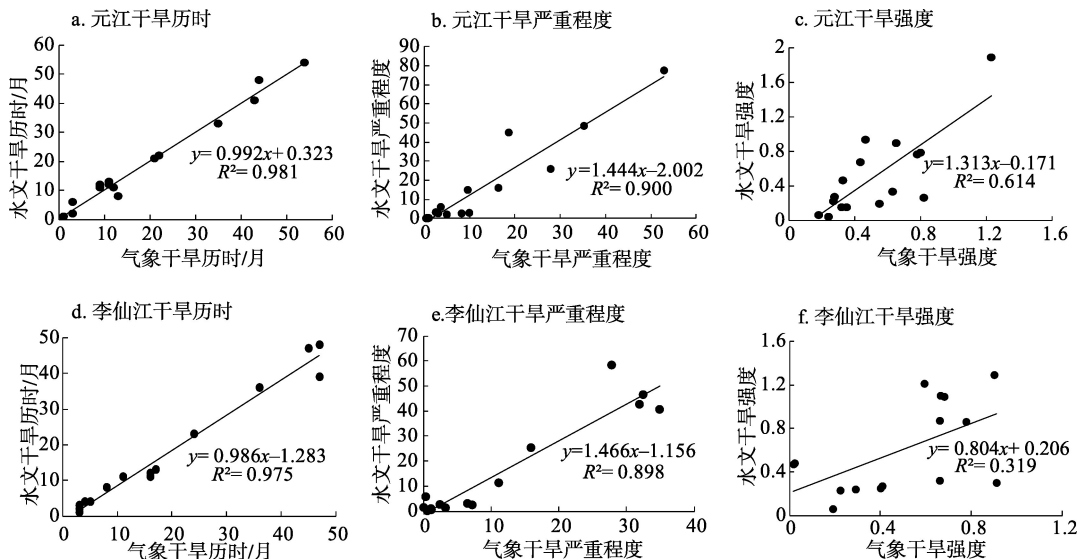


图9 元江和李仙江典型气象干旱和水文干旱事件的历时、严重程度和强度的相关性

Fig.9 Relationship between durations, magnitudes, and intensities of meteorological and hydrological droughts of the Yuanjiang River and the Lixianjiang River

4 结论与讨论

4.1 结论

本文采用标准化降水蒸散指数(SPEI)和径流干旱指数(SDI)分析红河流域气象干旱和水文干旱的演变特征,并探讨水文干旱对气象干旱的响应。主要结论如下:

(1) 1961-2012年期间流域整体上表现干旱化的趋势。从季节上看,大部分地区春季有变湿的趋势,而夏、秋、冬三季有变干的趋势,但趋势均不显著。干旱频率季节空间分布差异较大,春旱和冬旱发生频率较高。春旱影响范围呈缩小的趋势,夏旱、秋旱和冬旱影响范围表现出不同程度的扩大趋势。

(2) 1956-2013年期间流域水文干旱表现出加剧的趋势。其中1958-1963、1975-1982、1987-1993、2003-2006和2009-2013年为水文干旱多发期,近10年来水文干旱出现频率明显增加。

(3) 流域水文干旱滞后于气象干旱1~8个月。典型气象、水文干旱事件的历时、严重程度和强度之间具有紧密的相关性;流域气象干旱是水文干旱的主要驱动力,人类活动对水文干旱的影响相对较小。

4.2 讨论

红河流域是干旱频率发生较高的区域,近年来愈加严重。由于越南约2/3的水资源依赖于邻国,水资源对外依赖度较高,因此对跨境水资源变化尤为关注。中国出境径流量约占红河径流总量的39%,受气候变化的影响,近50年来河川径流变化呈减少的趋势。加之径流年内分配不均,旱季径流量仅占20%,加剧了水资源供需矛盾。在此背景下,流域遭遇气象水文干旱造成径流减少,将加剧水资源短缺。如2010年全流域遭遇严重干旱,越南红河水位降至百年最低,对红河三角洲的农业灌溉、渔业、航运等产生巨大影响,有越南学者认为中国上游的梯级水电开发加剧了下游的干旱(Giang et al, 2013)。因此,有必要从全流域尺度出发,开展极端水文事件对气候变化的响应与预测研究,为国际河流跨境水资源合作管理等提供科学依据。

参考文献(References)

何福力, 胡彩虹, 王纪军, 等. 2015. 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[J]. 地理

与地理信息科学, 31(3): 69-75. [He F L, Hu C H, Wang J J, et al. 2015. Analysis of meteorological and hydrological drought in the Yellow River Basin during the past 50 years based on SPI and SDI[J]. Geography and Geo-Information Science, 31(3): 69-75.]

胡彩虹, 王金星, 王艺璇, 等. 2013. 水文干旱指标研究进展综述[J]. 人民长江, 44(7): 11-15. [Hu C H, Wang J X, Wang Y X, et al. 2013. Review on research of hydrological drought index[J]. Yangtze River, 44(7): 11-15.]

蒋忆文, 张喜凤, 杨礼箫, 等. 2014. 黑河上游气象与水文干旱指数时空变化特征对比分析[J]. 资源科学, 36(9): 1842-1851. [Jiang Y W, Zhang X F, Yang L X, et al. 2014. Analysis and comparison of spatial and temporal patterns of meteorological and hydrological drought indices in the upper reach of the Heihe River watershed, Northwest China[J]. Resources Science, 36(9): 1842-1851.]

李运刚, 何大明, 胡金明, 等. 2012. 红河流域1960-2007年极端降水事件的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 27(11): 1908-1917. [Li Y G, He D M, Hu J M, et al. 2012. Spatial and temporal variations of extreme precipitation events in the Red River Basin during 1960-2007[J]. Journal of Natural Resources, 27(11): 1908-1917.]

柳江, 武瑞东, 何大明. 2015. 地缘合作中的陆疆跨境生态安全及调控[J]. 地理科学进展, 34(5): 606-616. [Liu J, Wu R D, He D M. 2015. Transboundary eco-security regulation for geopolitical cooperation in land border areas[J]. Progress in Geography, 34(5): 606-616.]

裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 2013. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 24(3): 449-456. [Pei Y S, Jiang G Q, Zhai J Q. 2013. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems[J]. Advances in Water Science, 24(3): 449-456.]

王东, 张勃, 安美玲, 等. 2014. 基于SPEI的西南地区近53a干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 29(6): 1003-1016. [Wang D, Zhang B, An M L, et al. 2014. Temporal and spatial distributions of drought in Southwest China over the past 53 years based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Natural Resources, 29(6): 1003-1016.]

王林, 陈文. 2014. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 33(2): 423-431. [Wang L, Chen W. 2014. Applicability analysis of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in drought monitor-

- ing in China[J]. Plateau Meteorology, 33(2): 423-431.]
- 解明恩, 程建刚. 2004. 云南气象灾害特征及成因分析[J]. 地理科学, 24(6): 721-726. [Xie M E, Cheng J G. 2004. Characteristics and formation mechanism of weather disasters in Yunnan Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 24(6): 721-726.]
- 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 2013. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961-2012 年干旱变化特征分析[J]. 气候变化研究进展, 9(3): 192-198. [Xiong G J, Zhang B K, Li C Y, et al. 2013. Characteristics of drought variations in Southwest China in 1961-2012 based on SPEI[J]. Advances in Climate Change Research, 9(3): 192-198.]
- 叶长青, 甘淑, 王文玲, 等. 2008. 元江—红河干流径流时序特性及突变分析[J]. 长江流域资源与环境, 17(6): 886-891. [Ye C Q, Gan S, Wang W L, et al. 2008. Analysis on the runoff distribution and the variability in the downstream of Honghe River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 17(6): 886-891.]
- 翟家齐, 蒋桂芹, 裴源生, 等. 2015. 基于标准水资源指数 (SWRI) 的流域水文干旱评估: 以海河北系为例[J]. 水利学报, 46(6): 687-698. [Zhai J Q, Jiang G Q, Pei Y S, et al. 2015. Hydrological drought assessment in the river basin based on Standard Water Resources Index(SWRI): A case study on the Northern Haihe River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 46(6): 687-698.]
- 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2015. 基于 SWAT 模型的渭河流域干旱时空分布[J]. 地理科学进展, 34(9): 1156-1166. [Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, et al. 2015. Spatiotemporal patterns of droughts based on SWAT model for the Weihe River Basin[J]. Progress in Geography, 34(9): 1156-1166.]
- Dai A G. 2011. Drought under global warming: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(1): 45-65.
- Dai A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 3(1): 52-58.
- Giang P Q, Toshiki K, Kunikane S, et al. 2013. Climate change challenges transboundary water resources management: Drawing from the case of vietnam[C]//Proceedings of the 3rd International conference on chemical, biological and environment science. Kuala Lumpur, Malaysia: PSRC.
- He D M, Wu R D, Feng Y, et al. 2014. Review: China's transboundary waters: New paradigms for water and ecological security through applied ecology research[J]. Journal of Applied Ecology, 51(5): 1159-1168.
- Hong X J, Guo S L, Zhou Y L, et al. 2014. Uncertainties in assessing hydrological drought using Streamflow Drought Index for the upper Yangtze River Basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 29(4): 1235-1247.
- Li Y G, He D M, Hu J M, et al. 2015. Variability of extreme precipitation over Yunnan Province, China, 1960-2012[J]. International Journal of Climatology, 35(2): 245-258.
- Li Y G, He D M, Ye C Q. 2008. Spatial and temporal variation of runoff of Red River Basin in Yunnan[J]. Journal of Geographical Sciences, 18(3): 308-318.
- Mishra A K, Singh V P. 2010. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 391(1-2): 202-216.
- Nalbantis I, Tsakiris G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited[J]. Water Resources Management, 23(5): 881-897.
- Tabari H, Nikbakht J, Talaei P H. 2013. Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on Streamflow Drought Index(SDI)[J]. Water Resources Management, 27(1): 137-151.
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. Journal of Climate, 23(7): 1696-1718.
- World Meteorological Organization. 2012. Standardized Precipitation Index user guide[M]. Geneva, Netherlands: WMO.
- Yu M X, Li Q F, Hayes M J, et al. 2014. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951-2010[J]. International Journal of Climatology, 34(3): 545-558.

Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan Province based on SPEI and SDI Indices

LI Yungang, HE Jiaonan, LI Xue

(Yunnan Key Lab of International Rivers and Transboundary Eco-Security, Yunnan University,
Kunming 650091, China)

Abstract: Based on the monthly precipitation and temperature data from 1961-2012 at 43 meteorological stations and discharge data from 1956-2013 at two hydrological stations on the Red River, we analyzed the variation of hydrological and meteorological droughts by using Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Streamflow Drought Index (SDI). The results show that: (1) Meteorological droughts presented an increasing trend at the annual scale in 1961-2012. At the seasonal scale, a wetting trend was detected in the spring in most areas, and a drying trend was observed in the summer, the autumn, and the winter seasons. Regional differences have been found in seasonal drought frequency, and high frequency droughts occurred in the spring and the winter. The influence areas of drought decreased in the spring. In contrast, increased trend was found in the summer, the autumn, and the winter. (2) Hydrological drought indicated an increasing trend in 1956-2013. There were more hydrological droughts during 1958-1963, 1975-1982, 1987-1993, 2003-2006, and 2009-2013. Hydrological droughts occurred most frequently in the last decade. (3) Analysis of the relationship between meteorological and hydrological drought indices shows that the occurrence of a hydrological drought event lagged a meteorological drought event by a variation of 1 to 8 months. The duration, magnitude, and intensity of meteorological droughts were well close to the characteristics of hydrological drought events. The most important factor that caused hydrological drought in the Red River Basin was meteorological drought.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI); Streamflow Drought Index(SDI); Red River Basin; Yunnan Province