

刘敏,秦鹏程,刘可群,等. 2013. 洪湖水位对不同时间尺度 SPEI/SPI 干旱指数的响应研究. 气象, 39(9):1163-1170.

# 洪湖水位对不同时间尺度 SPEI/SPI 干旱指数的响应研究<sup>\*</sup>

刘 敏 秦鹏程 刘可群 夏智宏 王 苗

武汉区域气候中心, 武汉 430074

**提 要:** 流域洪涝与干旱对流域水资源利用及生态平衡具有重要影响。探讨流域水文要素与气候因子的关系,是应用气候指数进行流域旱涝监测和影响评估的重要前提。基于四湖流域 8 个气象站及洪湖湖区水位代表站逐月观测资料,从月、季及连续时间序列月平均标准化水位距平与不同时间尺度 SPEI/SPI 干旱指数的相关分析,研究洪湖水位对不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的响应。结果表明:四湖流域洪涝与干旱主要受降水控制,洪湖水位与 SPEI/SPI 干旱指数具有较好的相关性,但其相关程度因不同月份和季节及干旱指数的时间尺度存在一定差异,总体上洪湖水位与 4~6 个月时间尺度 SPEI/SPI 干旱指数相关性最为密切,表明洪湖水位对降水及蒸散发导致的水分盈亏的响应具有时滞效应和累积效应,当前月洪湖水位受当月及前 3~5 个月水分盈亏的共同影响。基于 5 个月时间尺度的 SPEI/SPI 干旱指数监测历史时期洪湖水位变化具有很好的一致性。研究结果为基于常规气象观测资料进行四湖流域旱涝监测提供了理论依据,同时可为其他流域旱涝监测与评估提供借鉴。

**关键词:** 洪湖, 水位, SPEI, SPI, 时间尺度

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.09.011

## Response of Lake Water Level of Honghu Lake to SPEI/SPI Drought Indices at Different Time Scales

LIU Min QIN Pengcheng LIU Kequn XIA Zhihong WANG Miao

Wuhan Regional Climate Centre, Wuhan 430074

**Abstract:** Drought and flood have significant impacts on catchment water use and ecological balance. To develop practical drought/flood monitoring indicators that only need a few climate variables, it is fundamentally necessary to explore the relationship between hydrology variables and climate variables for the specific catchment. This study investigates the correlations between lake water level and various time-scale climatological indices according to the standardized precipitation index (SPI) and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), based on the monthly water level records from Honghu Lake representative gauging stations and the monthly observations of 8 meteorological stations in the Four-Lake Basin. The results showed that extreme droughts and floods are primarily controlled by precipitation variability over the Four-Lake Basin, and both SPEI and SPI are well related with lake water level of Honghu Lake while the degree of the correlation varies between different seasons and SPEI/SPI time scales, with the highest correlations for rainy summer and autumn months. Generally, the 4–6 month scale SPEI/SPI drought index is most closely correlated with lake water level of Honghu Lake, showing an apparent response of lake water level to the current and former months' water surplus and deficiency. When compared

\* 中国气象局气候变化专项(CCSF201205)资助

2012 年 11 月 1 日收稿; 2013 年 3 月 25 日收修定稿

第一作者: 刘敏, 主要从事气候变化和生态与农业气象研究. Email: liuminccg@sohu.com

通信作者: 秦鹏程, 主要从事应用气象研究. Email: qinpengcheng09@mails.gucas.ac.cn

with the historical time series of monthly average lake water level of Honghu Lake, the 5 month scale SPEI/SPI agrees well with the variability of the lake water level. The response relationship found during the study can not only aid the monitoring and forecasting of flood and drought conditions in the Four-Lake Basin based on conventional weather data, but also provides some references for other places of China.

**Key words:** Honghu Lake, lake water level, SPEI, SPI, time scale

## 引 言

洪湖位于长江中游四湖流域下区,是江汉平原调蓄、灌溉、渔业、居民用水等的重要水源,也是洪湖湿地生态系统的重要组成部分(王学雷等,2002)。在近百年以全球变暖为主要特征的气候变化影响下,洪湖湿地气候与生态出现了显著的变化(王慧亮等,2010)。极端旱涝事件对湖泊湿地造成严重威胁、破坏(吴秀芹等,2005)。1998 和 2010 年的洪涝以及 2011 年的冬春连旱,使洪湖湿地及其生态系统遭受极大危害,已经引起当地政府及有关学者的关注。

流域水文状况是流域下垫面物理特性、气候环境,以及人类活动综合影响的结果,其中气候因子是影响流域水文循环最基本和最重要的因素,也是时间和空间变化最大的因素(王鸣远等,2008,赵琳娜等,2012)。降水经过截流、入渗、径流等过程进入流域水文循环需要一定的时间,因此,水文要素对气候因子的响应通常在特定的时间尺度表现最为明显(张士锋等,2004;McDonnell et al,2010;刘可群等,2009)。Szalai 等(2000)在欧洲匈牙利境内各流域的研究表明,河川径流响应于 2~3 个月时间尺度的 *SPI* 指数,而地下水位则响应于 5~24 个月较长时间尺度的 *SPI* 指数,Vicente-Serrano 等(2005)在西班牙比利牛斯山中部阿拉贡河流域的研究显示,1~3 个月时间尺度的 *SPI* 指数可以较好地反映阿拉贡河流域地表径流的变化,而 7~10 个月时间尺度的 *SPI* 指数可以较好地反映阿拉贡河流域水库的蓄水量。可见,不同流域及不同水文要素对不同时间尺度干旱指数的响应并不一致,这主要是由流域大小、地形、土壤、植被、水文过程、流域管理等因素的差异造成的。

有关我国各流域水文要素与气候因子的响应时间尺度尚鲜见报道。本文以四湖流域为例,通过洪湖水位与流域 SPEI(*SPI*)干旱指数的 pearson 相关分析,探讨流域水文要素对不同时间尺度干旱指数的响应,以期利用常规气象观测资料进行流域旱涝监测提供理论依据。

## 1 研究区域概况

长江中游四湖流域(29°21′~31°00′N、112°00′~114°05′E)位于湖北省江汉平原腹地,境内湖泊甚多,水道密布,地势平坦,地面高程 34.0 m 以下的地区约占全流域总面积的 75%。本地区气候类型属典型亚热带季风气候,雨热同季,四季分明,年均降水量 1174 mm,年均蒸发量 1354 mm,降水主要集中在 5—9 月的汛期,最大降水量月份为 6 月,最小降水量月份为 12 月(图 1)。洪湖位于四湖流域下游入口,是四湖流域最大的调蓄湖泊,年平均水位 24.6 m,最高和最低月平均水位分别为 8 和 2 月,分别滞后于最大降水月份两个月。

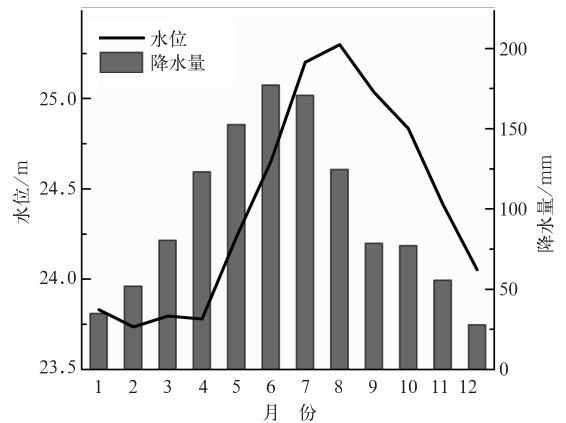


图 1 流域平均降水量与洪湖水位的年变化

Fig. 1 Annual variations of basin average precipitation and Honghu lake water level

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

洪湖水位资料采用洪湖湖区水位代表站挖沟咀水位站月平均观测资料,资料长度为 1964 年 1 月至 1977 年 12 月(1974 年资料缺失)、1997 年 4 月至 2011 年 12 月。为消除年周期及长期趋势,对原始

资料进行了标准化预处理。

流域气候要素采用流域内洪湖、公安、石首、潜江、荆门、荆州、嘉鱼和监利 8 个气象站月平均观测资料,要素包括降水量、最高气温、最低气温、日照时数、风速、相对湿度等,资料长度为 1961 年 1 月至 2011 年 12 月。

## 2.2 SPEI/SPI 干旱指数

采用具有多时间尺度特征的标准化降水指数(SPI)及在 SPI 基础上考虑蒸散发影响的标准化降水-蒸散指数(SPEI)作为气候干湿状况的表征。不同时间尺度干旱指数的第一个月对应的是当前月,对  $n$  个月的时间尺度,从时间上自当月向前延续  $n-1$  个月。SPI 指数是表征某时段降水量出现概率多少的指标之一,该指标适合月以上尺度相对于当地气候状况的干旱监测与评估。SPI 指数的构建过程如下(McKee et al,1993):

(1) 假设某一时段的降水量为  $x$ ,则其  $\Gamma$  分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad x > 0 \quad (1)$$

式中, $\beta$  和  $\gamma$  分别为尺度和形状参数,可用极大似然

估计方法求得:  $\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}$ ,其中

$$A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i$$

$$\hat{\beta} = \bar{x} / \hat{\gamma}$$

确定概率密度函数中的参数后,对于某一年的降水量  $x_0$ ,可求出随机变量  $x$  小于  $x_0$  事件的概率为:

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \quad (2)$$

(2) 降水量为 0 时的事件概率由下式估计:

$$F(x = 0) = m/n \quad (3)$$

式中, $m$  为降水量为 0 的样本数, $n$  为总样本数。

(3) 对  $\Gamma$  分布概率进行正态标准化处理,即将式(2)、(3)求得的概率值代入标准化正态分布函数,即:

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-z^2/2} dx \quad (4)$$

对式(4)进行近似求解可得:

$$SPI = S \left[ t - \frac{(c_2 t + c_1)t + c_0}{[(d_3 t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \right] \quad (5)$$

其中  $t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}}$ ,  $F$  为式(2)或式(3)求得的概率;并当  $F > 0.5$  时,  $S = 1$ ,当  $F \leq 0.5$  时,  $S = -1$ 。  $c_0 = 2.515517$ ,  $c_1 = 0.802853$ ,  $c_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.43278$ ,  $d_2 = 0.189269$ ,  $d_3 = 0.001308$ 。据此可求得 SPEI。

SPEI 指数(Vicente-Serrano et al,2010)的计算与 SPI 指数类似,计算时首先以某以时段降水量与潜在蒸散的差值替代降水量,然后进行正态标准化,潜在蒸散采用 FAO56 Penman-Monteith 公式(Allen et al,1998)计算。

## 2.3 分析方法

水文要素与洪湖水位的响应关系采用 pearson 相关分析,并采用  $t$  检验进行相关系数显著性检验(Dillon et al,2003),其中月尺度相关分析样本量为 28,0.01 显著性水平对应的相关系数临界值为 0.48,季节尺度相关分析样本量为 82,0.01 显著性水平对应的相关系数临界值为 0.28,连续时间序列相关分析样本量为 320,0.01 显著性水平对应的相关系数临界值为 0.14。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同时间尺度 SEPI(SPI)指数特征

干旱与洪涝的发生和发展往往表现在不同的时间尺度上(张强等,2011;侯威等,2012),这一特点在 SPEI/SPI 干旱指数的时间序列上具有明显的体现。图 2 以洪湖气象站为例分别给出了洪湖 1961—2011 年 1、3、6 和 12 个月 4 个时间尺度的 SPEI 指数时间变化序列,从图中可以看出,不同时间尺度 SPEI 指数在发生频率和过程持续时间上具有明显差异。短时间尺度 SPEI 指数洪涝和干旱事件发生频率高,过程时间短,较长时间尺度的 SPEI 指数旱涝事件发生频率低,通常持续时间较长。

对四湖流域 8 个气象站 1961—2011 年不同时间尺度 SPEI 及 SPI 指数进行区域平均表征流域不同时间尺度的干湿状况如图 3 所示,从图中可以看出,近 50 年来四湖流域短时间尺度的旱涝事件几乎每年都有发生,而大于 6 个月时间尺度的长期干旱发生频率较低,典型的干旱年份有 1966、1972、1974、1976、1978、1984、1999、2000、2001 和 2011 年。

SPI 指数与 SPEI 指数在近 50 年时间序列上的演变基本一致,表明四湖流域蒸散发的时间变化相对稳定,流域洪涝和干旱主要受控于降水的强度及

时间分布。总体上,SPEI 指数表征的干湿状况略微偏重于 SPI 指数,表明 SPEI 指数对洪涝和干旱的响应相对于 SPI 指数更为敏感。

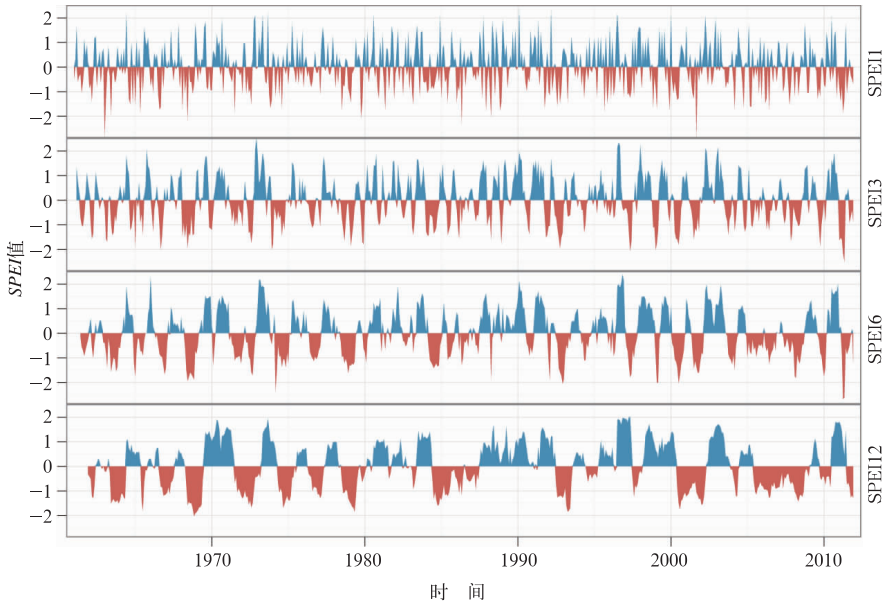


图 2 1961—2011 年洪湖气象站不同时间尺度 SPEI 指数时间序列变化  
 Fig. 2 Time evolution of the SPEI at different time scales at Honghu Weather Station from 1961 to 2011

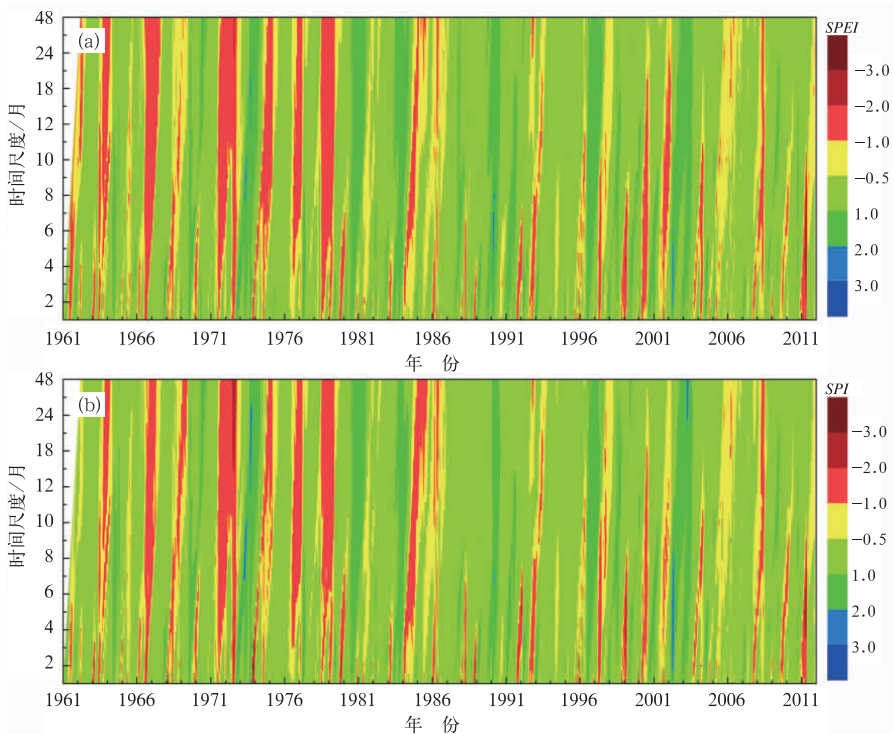


图 3 1961—2011 年流域平均 SPEI(a) 及 SPI(b) 指数时间序列演变  
 Fig. 3 Time evolution of the valley average SPEI (a) and SPI (b) at different time scales from 1961 to 2011

### 3.2 洪湖水位对不同时间尺度 SPEI/SPI 干旱指数的响应

为考查洪湖水位对不同时间尺度气候干旱指数的响应,分别分析了月、季及连续时间序列的月平均标准化水位距平与不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关性。

(1) 各月洪湖水位与不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关性

图 4 所示为各月份洪湖水位与不同时间尺度

SPEI 指数和 SPI 指数的相关系数,从图中可以看出,不同月份洪湖水位与 SPEI 指数的相关性存在明显差异,其中相关性较高的月份集中在汛期的 5—10 月,相关性较为密切的 SPEI 指数时间尺度为 2~12 个月,降水较少的 11 月至次年 4 月洪湖水位与 SPEI 指数相关性相对较弱,且相关性较密切的 SPEI 指数时间尺度主要为 2~6 个月的短时间尺度。洪湖水位与 SPI 指数的相关性同与 SPEI 指数的关系基本一致。

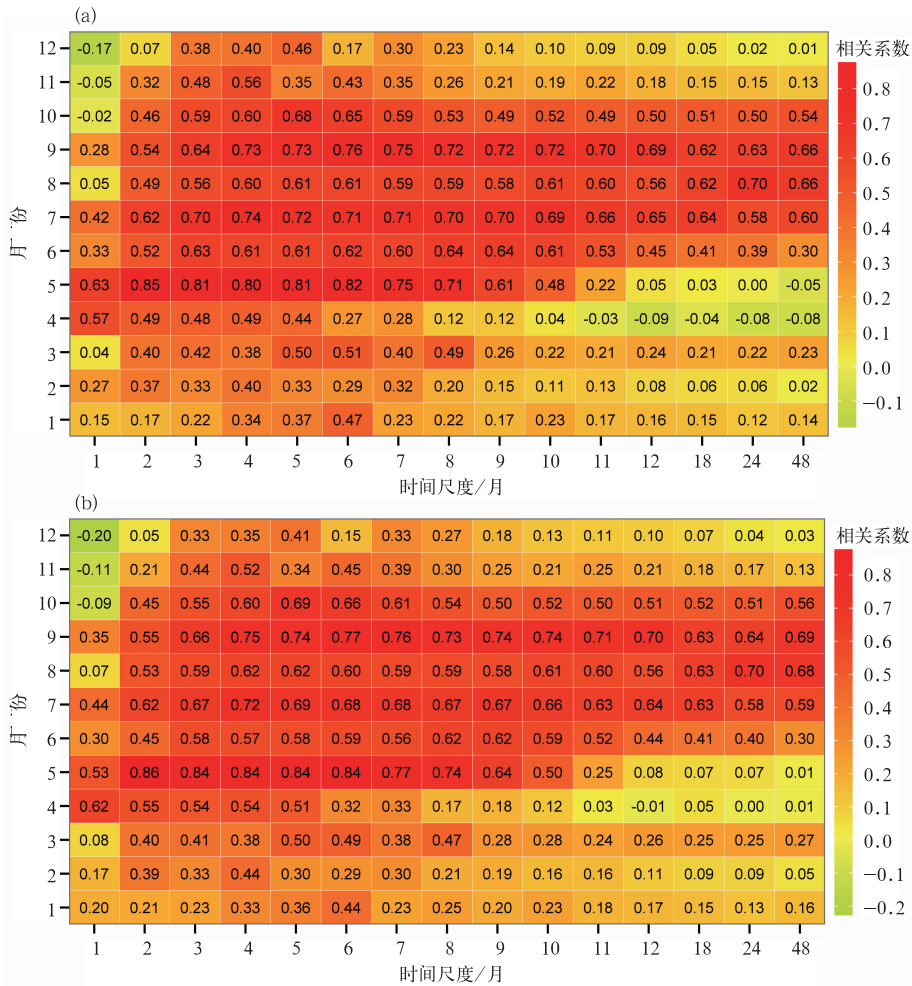


图 4 各月不同时间尺度 SPEI(a)及 SPI(b)指数与洪湖水位的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients between lake water level and SPEI (a) and SPI (b) at different time scales for each month

(2) 各季节洪湖水位与不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关性

洪湖水位与不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关性差异在季节上体现更为明显(图 5),从图 5 中可以看出,秋季(9、10 和 11 月)洪湖水位与 SPEI/SPI

指数的相关性最为密切,其中与 3~48 个月时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关系数均在 0.6 以上,而与 1~2 个月短时间尺度的 SPEI/SPI 指数相关性略低,夏季(6、7 和 8 月)洪湖水位与 SPEI/SPI 指数的相关性仅次于秋季,其中与 2~8 个月时间尺度

SPEI/SPI 指数相关系数均在 0.5~0.65 之间,随着 SPEI/SPI 指数时间尺度的增加,相关性逐渐减弱,冬、春季洪湖水位与 SPEI/SPI 指数的相关性相对较弱,且相关性较密切的 SPEI/SPI 指数时间尺度主要为 2~6 个月。

总体上,在降水集中的汛期月份(5—9 月),洪湖水位与 SPEI/SPI 指数的相关性较好,这可能是由于该阶段内自然降水对于洪湖水位的贡献突出,相对于灌溉等人为调控措施的影响降水处于主导地位,而在非汛期洪湖处于枯水期时,因降水等气候因

子的贡献相对较小,农业用水及人为调控的影响更加突出,致使洪湖水位与气候因子的相关性下降。

(3) 连续时间序列洪湖水位与不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关性

为探索基于 SPEI/SPI 指数进行水位变化动态监测的可能性,分析了连续时间序列的月平均标准化水位距平与不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关性,如图 6 所示。从图中可以看出,连续时间序列的标准化水位距平对不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的响应呈单峰型,洪湖水位与 SPEI/SPI 指数相关性

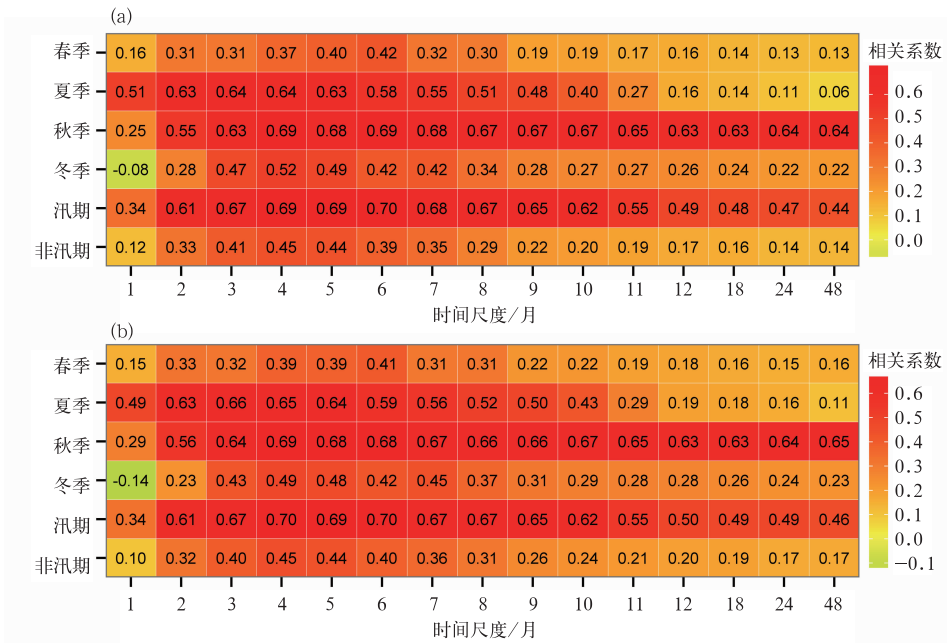


图 5 各季节不同时间尺度 SPEI(a) 及 SPI(b) 指数与洪湖水位的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between lake water level and SPEI (a) and SPI (b) at different time scales for each season

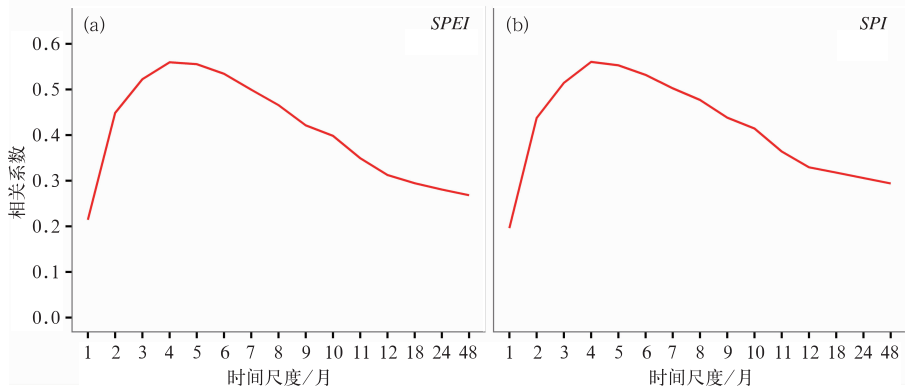


图 6 连续时间序列的不同时间尺度 SPEI(a) 及 SPI 指数 (b) 与洪湖水位的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between the continuous monthly lake water level series and the monthly (a) SPEI and (b) SPI series at different time scales for all months

最为密切的时间尺度为 4~6 个月, 大于或小于该时间尺度范围相关性均有减弱。这一结果与以上基于月及季节的分析结果基本一致。

以上对洪湖水位与不同时间尺度 SPEI/SPI 指数的相关性分析结果表明, 洪湖水位对 SPEI/SPI 指数具有明显的响应, 且夏秋季及汛期月份响应较强, 冬春季及相应月份响应较弱。在不同月份或季节响应最强的 SPEI/SPI 指数对应的时间尺度存在差异, 但均在 1 个月以上, 表明洪湖水位对降水及蒸散发导致的水分盈亏的响应具有时滞效应和累积效应, 滞后的时间因所处的季节而不同。总体上, 洪湖水位表现出对 4~6 个月时间尺度的 SPEI/SPI 指数最好的响应关系, 即洪湖水位受当月及前 3~5 个月累积时间的水分盈亏影响最大。

### 3.3 SPEI/SPI 干旱指数对洪湖水位的监测效果

依据上述分析结果, 采用 5 个月时间尺度

SPEI/SPI 指数对历史时期洪湖水位进行监测, 效果如图 7 所示, 从图中可以直观地看出, 5 个月时间尺度 SPEI/SPI 指数与洪湖水位总体波动基本一致, 个别年份和季节 SPEI/SPI 指数与水位波动的程度略有差异。在过去 28 年 321 个样本的历史序列中, 有 3 次偏高水位过程监测结果偏低(1964 年冬季至 1965 年春季、1999 年秋季、2006 年冬季), 有 3 次偏低水位过程监测结果偏高(1969 年夏季、2002 年秋季、2006 年夏季)。偏高水位监测效果较差的时段均出现在非汛期, 对于洪涝灾害的监测影响不大。考虑到 1949 年以来四河流域大规模水利工程的建设, 使得洪湖水位除受自然降水等气候因子变化的影响外, 人工调控的影响也非常显著(王学雷等, 2008; 金卫斌等, 2003; 郑绍伟等, 2010)。因此, 本文基于 5 个月时间尺度 SPEI/SPI 指数对历史时期洪湖水位的监测, 基本可以反映降水等气候要素异常导致的流域极端旱涝及洪湖水位的响应。

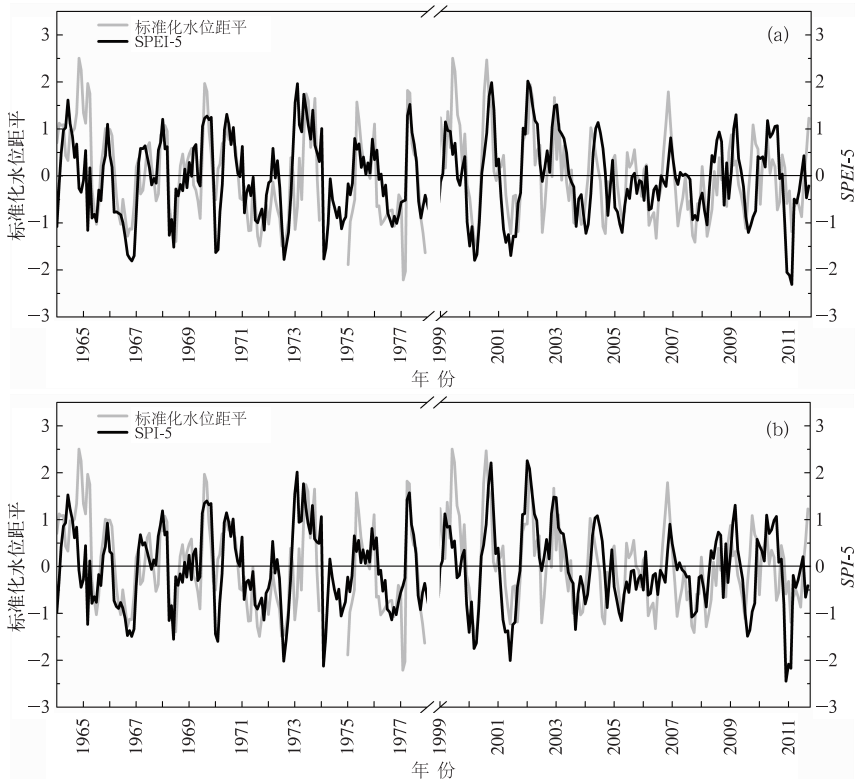


图 7 5 个月时间尺度 SPEI(a) 及 SPI 指数(b) 与洪湖水位时间序列对比 (1974 年 1—12 月水位资料缺失)

Fig. 7 Comparison of the monthly variation of (a) SPEI and (b) SPI at the time scale of 5 months and lake water level (without records of lake water level in 1974)

## 4 结论与讨论

多时间尺度是气候指数如 SPI、SPEI 等的显著特点,其优点是普适性强,可广泛应用于不同水资源系统,物理基础是不同水资源系统水循环过程差异导致的对水分盈亏响应的差异,例如土壤墒情对较短时间尺度的气候干旱较为敏感,而地下水位、水库蓄水通常受控于较长时间尺度的气候干旱。基于不同时间尺度干旱指数识别出的旱涝事件发生时间、频率及过程持续时间具有明显差异,短时间尺度干旱指数旱涝事件发生频率高、持续时间长;较长时间尺度干旱指数旱涝事件发生频率低、通常持续时间较长。因此,选择适当的时间尺度是进行不同水资源系统旱涝监测与评估的前提,也是能否取得较好监测效果的关键。

通常认为流域水文要素对气候因子的响应存在一定的滞后时间,但针对不同流域其滞后时间并不一致。本文针对亚热带季风气候背景下平原地区洪湖水位对 SPEI/SPI 指数响应关系的研究,得到的结论如下:

(1) 四湖流域蒸散发时间变化相对稳定,流域旱涝及洪湖水位变化主要受流域内降水变化的控制。

(2) 洪湖水位对 SPEI/SPI 干旱指数具有明显的响应,但其响应程度在不同月份、季节及 SPEI/SPI 指数所取的时间尺度存在显著差异,夏、秋季及汛期月份洪湖水位对 SPEI/SPI 指数的响应较强,洪湖水位受当月及前 1~11 个月累积时间的水分盈亏影响较大,冬、春季及相应月份洪湖水位对 SPEI/SPI 指数的响应相对较弱,且主要受当月及前 1~5 个月累积时间的水分盈亏的影响,总体上,洪湖水位对 4~6 个月时间尺度的 SPEI/SPI 指数响应最好。

(3) 以 5 个月时间尺度的 SPEI/SPI 干旱指数对历史洪湖水位变化的监测结果表明,SPEI/SPI 指数与洪湖水位的时间序列波动总体一致,5 个月时间尺度的 SPEI/SPI 指数可以反映洪湖水位变化状况,其中不考虑蒸散散的 SPI 指数与考虑蒸散散的 SPEI 指数监测效果基本一致,在资料缺乏的情况下可以采用 SPI 指数进行洪湖水位监测。

## 参考文献

金卫斌,胡秉民. 2003. 湖北四湖流域景观结构变化对汛期湖泊水位

- 影响的模拟分析. 生态学报, 23(4): 642-648.
- 刘可群,梁益同,黄靖,等. 2009. 基于卫星遥感的洞庭湖水体面积变化及影响因子分析. 中国农业气象, 30(S2): 281-284, 336.
- 王慧亮,王学雷,厉恩华. 2010. 气候变化对洪湖湿地的影响. 长江流域资源与环境, 19(6): 653-658.
- 王鸣远,杨素堂. 2008. 水文过程及其尺度响应. 生态学报, 28(3): 1219-1228.
- 王学雷,杜耘. 2002. 洪湖湿地价值评价与生物多样性保护. 中国科学院院刊, 17(3): 177-180.
- 王学雷,宁龙梅,肖锐. 2008. 洪湖湿地恢复中的生态水位控制与江湖联系研究. 湿地科学, 6(2): 316-320.
- 吴秀芹,龙花楼,高吉喜,等. 2005. 江汉平原湿地功能下降与洪涝灾害关系分析. 生态环境, 14(6): 884-889.
- 张强,张良,崔显成,等. 2011. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. 地球科学进展, 26(7): 763-778.
- 张士锋,刘昌明,夏军,等. 2004. 降雨径流过程驱动因子的室内模拟实验研究. 中国科学地球科学, 34(3): 280-289.
- 赵琳娜,包红军,田付友,等. 2012. 水文气象研究进展. 气象, 38(2): 147-154.
- 郑绍伟,慕长龙,陈祖铭,等. 2010. 长江上游森林影响流域水文过程模拟分析. 生态学报, 30(11): 3046-3056.
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, 300.
- Dillon P J, Somers K M, Findeis J, et al. 2003. Coherent response of lakes in Ontario, Canada to reductions in sulphur deposition: the effects of climate on sulphate concentrations. Hydrology and Earth System Sciences, 7(4): 583-595.
- McDonnell J J, McGuire K, Aggarwal P, et al. 2010. How old is stream water? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. Hydrological Processes, 24(12): 1745-1754.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 179-184.
- Szalai S, Szinel C, Zoboki J. 2000. Drought monitoring in Hungary // Wihite D A, Sivakumar M V K, Wood D A. Early warning systems for drought preparedness and drought management. World Meteorological Organization, 182-199.
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 23(7): 1696-1718.
- Vicente-Serrano S M, Lopez-Moreno J I. 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. Hydrology and Earth System Sciences, 9(5): 523-533.