DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.01.18

SPI 和 SPEI 在阿克苏河流域的适用性分析

李思诺[1,2], 翁白莎[2], 严登明[2,3], 王建伟[1,2]
(1. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056006; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 3. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘 要: 干旱区常年降水稀少,生态环境脆弱,是干旱评价中相对特殊的区域,一般适用性较好的干旱指数在这里仍需进一步论证才能应用于干旱监测中。根据阿克苏河流域 DEM、土地利用现状,将流域进行细化,最终形成 4 个山区、2 个荒漠区和 5 个绿洲区共 11 个分区的阿克苏河流域干旱评价单元。以流域内 6 个气象站 1961-2011 年逐月平均气温和降水资料计算研究区过去 51 年各评价分区的标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸发指数(SPEI),并将所得干旱状况与历史旱情进行对比分析。结果表明:在平原区,短时间尺度(1、3、6 月)的 SPEI 较 SPI 更能表达干旱演变趋势,但在旱情表达的时间精度上仍有些欠缺,而长时间尺度(12、24 月)的 SPI 和 SPEI 基本可以表达出干旱年;在山区的表达精度需要进一步求证。

关键词: 干旱指标; 标准化降水指标; 标准化降水蒸发指标; 干旱区; 阿克苏河流域
中图分类号:P333.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2016)01-0101-07

Applicability analysis of SPI and SPEI in Aksu River basin

LI Sinuo[1,2], **WENG Baisha**[2], **YAN Dengming**[2,3], **WANG Jianwei**[1,2]
(1. *College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan* 056006, *China*;
2. *Institute of Water Resources, China Water Resources and Hydropower Research Institute, Beijing* 100038, *China*;
3 *Department of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai* 201620, *China*)

Abstract: The arid area is a very special zone for arid evaluation because of little rain and fragile environment. The general drought index of better applicability need further argument so as to apply to the drought monitoring. This study region is first divided into districts such as the sub-region, including 4 mountain areas, 2 desert areas and 5 oasis areas, which are delineated for the Aksu River basin based on the DEM and land use types. In this study, the monthly precipitation and temperature data from 1961 to 2011 were used to analyze and compare the applicability of standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in each study area. It analyzed the gotten situation of drought and historical drought. The results show that SPEI with short time scale(1、3、6 months) can more exactly express the arid tendency than SPI, but it still have errors in expressing the real historical drought change. The SPI and SPEI with long time scale (12 or 24 months) can basically express the drought year, but the precision of two standardized drought indices in mountains still need further validation.

Key words: drought index; standardized precipitation index; standardized precipitation evapotranspiration index; arid area; Aksu River basin

干旱是全球最严重的自然灾害之一,发生频率高、影响范围广、持续时间长,是国民经济发展尤其是农业发展的重要挑战之一[1-2]。因此干旱监测与预估的准确性在很多以农业为主的区域至关重要。在干旱的监测中,选取一个适用于当地的干旱指数进行旱情监测无疑是最简单有效的办法。目前,常

收稿日期:2015-08-13; **修回日期**:2015-12-09
基金项目:国家科技支撑计划(2012BAC19B03、2013BAC10B01)
作者简介:李思诺(1989-),女,河北辛集人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源方面的研究。
通讯作者:翁白莎(1986-),女,福建泉州人,博士,工程师,主要从事水文学及水资源方面的研究。

用的干旱监测指数有 Palmer 干旱指数(PDSI)、Z 指数、植被覆盖指数(NDVI)及标准化降水指标(SPI)和标准化降水蒸发指标(SPEI)等[3-8]。但是针对不同区域,干旱的定义与成因都不尽相同,影响因素复杂,造成的后果程度不一。在气候变化的背景下,不同干旱指标在表达精度上也不尽相同[9]。许多干旱指标都是针对某种特定的研究目的而设,很难做到所有的干旱指标均可适用于不同的地域、不同的气候条件[10-11],或者适用于当地的指标由于监测项目过多,计算过于繁杂而实用性不高,这些都会造成干旱监测中的误差加大,进而影响到当地的经济可持续发展。我国地域辽阔,下垫面条件复杂,这无疑为干旱的统一监测又增加了一重难度。在众多区域中干旱区又是其中最为特殊的区域。

干旱区位于我国西部,欧亚大陆深处,海洋水汽无法抵达,常年降水稀少,生态环境脆弱,一直是干旱分析中较为特殊的区域。在本区域内,降水与消耗的负均衡是常态,但在国际上应用很广泛的干旱监测指标大多都是以降水和消耗的均衡为前提制定的,在一般地区适用性较好,可以反映出其研究区域内真实旱情变化,但是当仅针对干旱区时,这些监测指数的适用性仍需进一步分析论证。阿克苏河流域位于新疆南部,干旱区西部,常年降水稀少,下垫面条件复杂,可作为干旱区的典型代表对在我国应用最为广泛的两种标准化干旱指数(SPI 和 SPEI)在本区域内的适用性进行分析。本文通过编写程序计算出阿克苏河流域 1961 -2011 年不同下垫面条件下 6 个代表站的逐月动态干旱监测指数,并将最终模拟结果同《中国气象灾害大典(新疆卷)》[12]和《新疆统计年鉴》[13]中记载的阿克苏地区历史旱情进行对比,分析出不同时间尺度下这两种标准化干旱指标在不同下垫面条件的适用性情况。

1 研究区概况

1.1 流域概况

阿克苏河流域位于天山中段西部南麓地区,塔里木盆地北缘,地理位置 75°35′ ~ 80°59′E,40°17′ ~42°27′N。流域总面积 7.0 万 km^2,其中境内面积 5.1万 km^2,境外面积 1.9 万 km^2。阿克苏河是新疆的三大国际河流之一,也是唯一能全年供给塔里木河水源的支流,发源于吉尔吉斯斯坦境内,于喀拉都维由库玛拉克河和托什干河汇流而成阿克苏河。阿克苏河流域垂直地带性特征非常明显,为山区荒漠与平原绿洲混合型区域,其中,绿洲是研究区内人类主要的生产生活之地,对于当地人类的生存和发展有至关重要的意义。阿克苏河流域分区及气象站点分布见图 1,阿克苏河流域分区及各分区内气象站点信息分别见表 1,表 2。

1.2 评价单元划分

研究区内下垫面因素(地形、土壤类型、植被覆盖等)和气象因素的空间非均匀性非常明显,为了反映这些因素的影响以及人类活动对流域水循环过程的干扰,基于流域内水文地质条件、土地利用现状,将流域进行细化,形成阿克苏河流域干旱评价单元。主要包括 3 个步骤:

(1)利用 DEM 数据在 ArcGIS 中提取地形起伏度,直观反映地形起伏特征。根据地形起伏度 < 30 m 为平原,30 m < 起伏度 < 200 m 为丘陵,起伏度 > 200 m 为山地,将阿克苏流域划分为平原区和山丘区,为第 1 层评价单元;

(2)根据流域地形分区和行政分区确定第 2 层评价单元,其中,山丘区结合县级行政边界进行划分,对于平原区结合流域土地利用类型划分为农田域和生态域;

(3)根据阿克苏河流域干流闸口以及绿洲分布情况,细化农业域;根据流域水文地质条件和地下水分布情况,细化生态域,进而确定第 3 层评价单元。

最终,将阿克苏河流域划分为 4 个山区、2 个荒漠区和 5 个绿洲区共 11 个分区,其中,山区面积 3.78 万 km^2,荒漠区为 0.74 万 km^2,绿洲区为 0.58 万 km^2。

由于荒漠区内并没有符合条件的气象站点和长期观测资料,且荒漠区内人烟稀少,对于当地生产生活影响不大,因此本文研究主要针对山区和绿洲区。

2 数据与方法

2.1 基础数据

本文利用阿克苏河流域 500m * 500m 的 DEM 数据(邻域的类型为矩形,邻域的大小为)、水利工程渠系分布网和土地利用数据进行评价单元分区。以 6 个气象站 1961 -2011 年逐月平均气温和降水资料,计算阿克苏流域过去 51 年各评价分区的 SPI 和 SPEI 指数,并对干旱状况进行对比分析。其中,为保证数据的完整性和准确性,位于平原区的温宿站只截取 1966 -2011 年数据进行分析。

2.2 研究方法

标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸发指数(SPEI)是应用较为广泛的干旱指数,两者均有可表征多时间尺度干旱演变特征。

SPI 指数是 McKee 等[14]在评估美国科罗拉多州干旱状况时提出的。以某地区确定时段的多年平均降水量为基准,评定时段内降水量的多寡。若该时段降水量大于多年平均降水量到一定程度则认为发生洪涝,反之,则为干旱[15]。假定降水量的变化服从 Gamma 分布,在计算出某时段内降水量的 Γ 分布概率后,进行正态标准化处理,最终以标准化降水累积频率分布来划分干旱等级,这可以对不同时段内降水量的缺乏程度进行定量化表征。不同时段的选择则可以反映出干旱对不同水资源可用量(土壤墒情、地下水、河川径流及水库的水体储量)的影响。具体计算步骤见文献[14-16]。

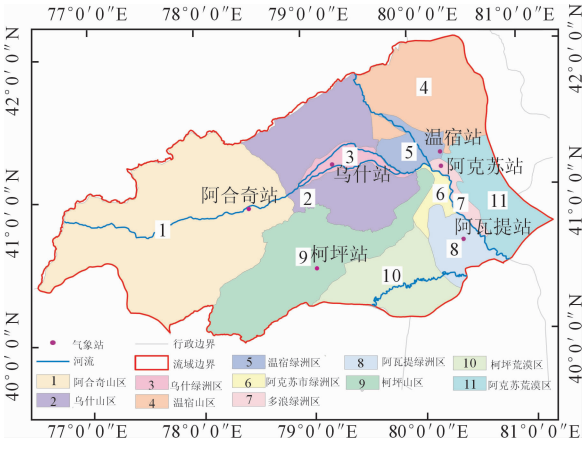


图 1　阿克苏河流域分区及气象站点分布

表 1　阿克苏河流域分区及各分区内气象站点

分　区	细化分区	分区内气象站点
山　区	阿合奇山区;乌什山区;温宿山区;柯坪山区	阿合奇站;柯坪站
绿洲区	乌什绿洲区;温宿绿洲区;阿克苏市绿洲区;多浪绿洲区;阿瓦提绿洲区	乌什站;温宿站;阿克苏站;阿瓦提站
荒漠区	柯坪荒漠区;阿克苏荒漠区	

表 2　气象站点信息

气象站点	编号	经度	纬度	高程	所在分区
阿合奇站	51711	78.45	40.93	1984.9	山　区
柯坪站	51720	79.05	40.50	1161.8	
乌什站	51627	79.23	41.22	1396.7	绿洲区
温宿站	51629	80.23	41.27	1133.0	
阿克苏站	51628	80.23	41.17	1103.8	
阿瓦提站	51722	80.40	40.65	1045.8	

本文计算了 1、3、6、12 和 24 个月的 SPI 值,分别用 SPI(1)、SPI(3)、SPI(6)、SPI(12)、SPI(24)表示。

SPEI 指数是 Vicente-Serrano 等[17-18]提出的计算方法,以 SPI 为基础,简单水循环为支撑,充分考虑了蒸散对水分通量的影响。其计算原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区干旱。该指标的计算方法是首先计算潜在蒸散发量,然后计算降水与蒸散发量差值,再通过差值的分布概率密度函数求累积概率,然后转化为标准正态分布而得到。正态标准化处理消除了时空分布上的差异,使得 SPEI 能够适用于反映不同地区、不同时间尺度的旱涝情况。

$$D_i = P_i - PET_i \tag{1}$$

式中:D_i 为降水与蒸散量差值,mm;P_i 为月降水量,mm;PET_i 为月蒸散量,mm。

其中,潜在蒸发量 PET_i 是利用 Thornthwaite 方法[19]计算所得,只需要站点温度资料以及地理位置。

建立不同时间尺度的水分盈/亏累积序列,即

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}) \quad n \geqslant k \tag{2}$$

式中:D_n^k 为不同时间尺度下的水分累积盈/亏,mm;P_{n-i} 为 $n-i$ 个月的降水量,mm;PET_{n-i} 为 $n-i$ 个月的蒸散量,mm。

最后,如同 SPI 方法,对 D_i 数据序列进行正态化,计算每个数值对应的 SPEI 值。具体计算步骤见文献[20-23]。SPEI 同样具有多时间尺度的特征。本文计算了 1、3、6、12 和 24 个月的 SPEI 值,分别用 SPEI(1)、SPEI(3)、SPEI(6)、SPEI(12)、SPEI(24)表示。

根据国家气象干旱等级标准,将 SPI/SPEI 划分为 5 个等级,并确定相应界限值,SPI 和 SPEI 干旱等级划分见表 3。

3　两种标准化干旱指数与历史事件的对比分析

要利用两种标准化干旱指数对阿克苏河流域干旱进行分析,首先需要明确的就是这两种指标能否对发生在流域内的旱情有再现能力。

在历史旱情的提取中主要采用《中国气象灾害大典(新疆卷)》[12]的记录。该大典系统记载了新疆维吾尔自治区干旱、寒潮、雪灾、霜冻、冻害、低温冷害、风灾、洪水、冰雹等气象灾害,客观分析了这些灾害发生、演变、分析及经济损失等特点,资料翔实准确,是具有史志性质的典籍,可为当地干旱历史的再现提供可靠依据。大典记录上溯灾害记载初始

年,下断于 2000 年,本文截取其中 1961 – 2000 年干旱灾害记录。2000 年之后出现的旱情则以《新疆统计年鉴》[13] 中记载为准,但并没有具体旱情描述。根据大典中关于历史旱情的具体描述可分别定位受灾地区、受灾季节和受灾区域,如表 4,并进一步确定其受灾等级。从记录结果来看,阿克苏河流域绿洲区径流补给来源主要为高山冰雪融水,因此,受径流影响,阿克苏河流域旱情多集中于春夏两季,尤其是在一年中农耕最为重要的春耕时期,旱情发生频率最高,影响力最甚。

表 3 SPI 和 SPEI 干旱等级划分

等级	类型	SPI 和 SPEI
0	无旱	> –0.5
1	轻旱	–1.0 ~ –0.5
2	中旱	–1.5 ~ –1.0
3	重旱	–2.0 ~ –1.5
4	特旱	≤ –2.0

将大典和年鉴中受旱严重的年份投影于 SPI 和 SPEI 指数中,可以看出在平原区四个代表站中这两种标准化指数可以表现出干旱趋势,但无法精确表达旱情等级。SPI 仅以降水量为参考依据表达研究区内旱情变化,对于西部干旱区来说过于片面,而 SPEI 以简单水循环为基础,考虑了对西部干旱区比较重要的蒸发量,从结果可以看出,1 – 6 月时间尺度的 SPI 指数较 SPEI 指数表达的旱情更为严重,在一些并不干旱的年份 SPI 指数仍显示为中旱程度以上,与实际旱情不符,而 SPEI 指数则相对较好。12 和 24 个月时间尺度时两者对于干旱趋势的描述均相对准确。

如图 2(a),3(a),4(a),5(a),6(a)和 7(a),1 个月时间尺度的 SPI 和 SPEI 指数变化最为灵活,可以表示出大部分资料记载中的干旱事件,但是在以往的研究中普遍认为在年均降水量小于 200 mm 的干旱区短时间尺度的累积水分亏缺量序列概率分布不服从 log – logistic 概率分布[20-21],因此传统的短时间尺度的 SPEI 分布不能应用于干旱区。而改进的 SPEI[24] 虽然在一定程度上可以提升部分干旱区的适用性,但在主要依靠积雪融雪和河道来水缓解旱情的干旱区西部,仍无法满足检测需求。同样,在年降水量偏少为常态的干旱区只考虑降水影响的 SPI 指数也不能满足干旱监测的需求。而且从所得结果来看,1 个月时间尺度指数计算结果由于仅受本月内降水和气温影响,随机性较大,不符合干旱区成灾机理,因此 1 个月时间尺度的 SPI 和 SPEI 均不适用于干旱区干旱分析。

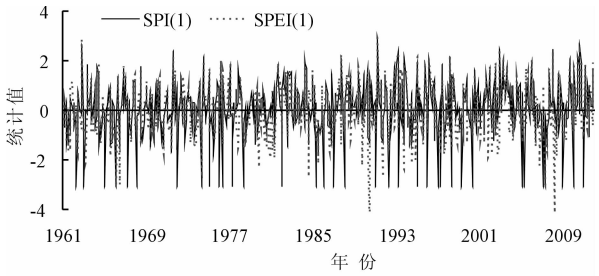
如图 2(b),3(b),4(b),5(b),6(b)和 7(b),3 – 6 月时间尺度的干旱指数兼顾灵活性和稳定性,一般可应用于季节性干旱的监测。在阿克苏河流域春季降水量仅占全年降水量的 10% ~ 20%,而且气温尚未回升积雪融雪尚未达到峰值,使得春耕需水量无法满足,因此旱情多集中于此季。从图 4(b),5(b),6(b)和 7(b)中与真实旱情对比可以看出,基于降水量多寡的 SPEI 和 SPI 对于春旱的描述,往往略有提前,而本该处于旱情内的季节却多处于旱情缓和期,而对于部分年份出现的秋旱(1991 年、1993 年)则可以有很好的描述。这也与以阿克苏河流域为代表的干旱区西部供水特点相符。对于干旱区西部,用水主要依靠于积雪融雪,冬季的降水量少会影响到当年的积雪量,进而导致第二年春季气温回暖后的融雪量,就会导致春耕用水高峰期的干旱缺水出现。但是表示在指数变化上只能看到上一年冬季处于干旱状态,本年度存在春旱风险,但无法表示出本年度是否发生干旱。

如图 2(c),3(c),4(c),5(c),6(c),7(c),12 个月时间尺度及以上的 SPEI 对于干旱年的描述一般可达到预期[20-21]。从与历史旱情的对比分析中可以看出(图 4(c),5(c),6(c),7(c)),12 和 24 个月时间尺度的 SPI 和 SPEI 依赖于长序列降水总量的变化,虽然同样存在旱情估计误差,但确实好于其他短时间尺度。

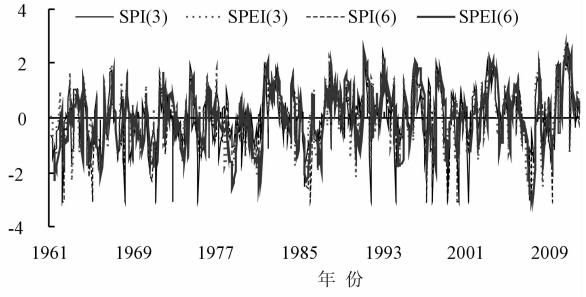
在图 2 ~ 图 7 中,2000 – 2005 年,各站点的指数变化均表明当地在经历着干旱的考验,但从资料记载中却并没有相关的描述,表明研究区内并没有相应的旱灾发生,说明区域内合理的水库调度和地下水开发利用使得旱灾风险大大降低。2006 年之后阿克苏河流域陷入长时间的地区性缺水,但在指数表达上却不明显,这是因为当地的经济社会持续发展,需水量不断上升,流域内水资源储备无法满足生产生活需求而造成的干旱缺水状况。

由于大典的记载多集中于平原区和荒漠草场区域,对于山区的旱情并没有详细的记录,因此无法确定作为山区代表站的阿合奇站和柯坪站在用这两种标准化干旱指数进行干旱监测时是否存在同样的误差。但在研究区内山区为河源区,降水量多少直接影响着河流水源补给,因此山区旱情与降水量有更直接的关系,以降雨和气温为主要依据的 SPI 和 SPEI 指数应该能更准确的表示山区的旱情变化,但

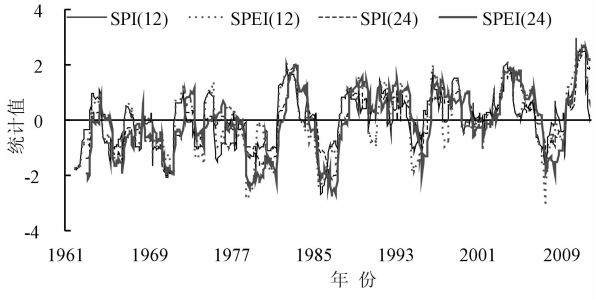
因为缺少资料,尚不能详细证明,这也是本文下一步的主要研究方向。



(a) 柯坪站1个月时间尺度SPI和SPEI统计值

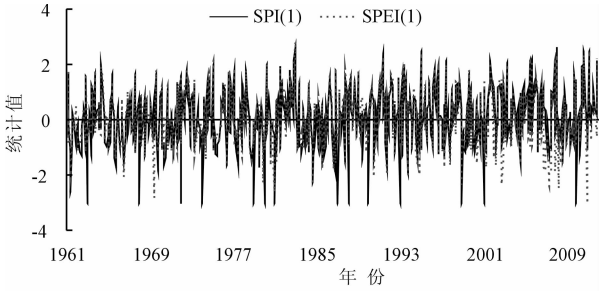


(b) 柯坪站3个月和6个月时间尺度SPI和SPEI统计值

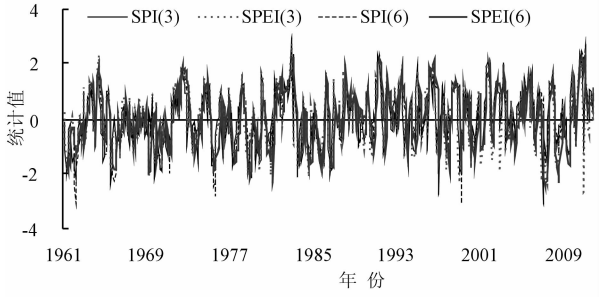


(c) 柯坪站12个月和24个月时间尺度SPI和SPEI统计值

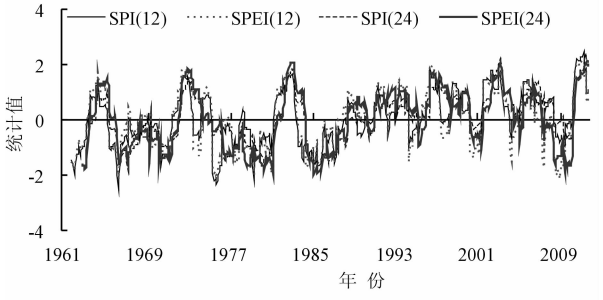
图 2　1961 – 2011 年山区柯坪站 SPI 和 SPEI 变化



(a) 阿合奇站1个月时间尺度SPI和SPEI统计值



(b) 阿合奇站3个月和6个月时间尺度SPI和SPEI统计值



(c) 阿合奇站12个月和24个月时间尺度SPI和SPEI统计值

图 3　1961 – 2011 年山区阿合奇站 SPI 和 SPEI 变化

4　结　论

应用阿克苏河流域 1961 – 2011 年近 51 年的降水量、气温计算出研究区内不同下垫面条件下 6 个代表站的两种标准化干旱指标(SPI 和 SPEI),并与实际旱情对比,分析干旱指数在干旱区的适用性。

(1)1 – 6 月时间尺度的旱情趋势表达上,SPI 在没有旱情记载的年份也会出现较重的旱情,为实际农业生产生活中的水资源配置产生困扰,从这方面来看,SPEI 优于 SPI;12 和 24 个月时间尺度上,两者均可表达干旱趋势。

(2)1 个月时间尺度的 SPI 和 SPEI 指数以短时间内的降水变化为依据,指数变化较为灵活,可以表达出旱情的出现,但是与干旱区成灾机理不符,不能表达真实旱情。

(3)3 – 6 月时间尺度的 SPI 和 SPEI 值在阿克苏河流域的季节性旱情监测中存在时间上的误差,春季的干旱多提前到上一年冬季,这与研究区内供水多依赖于积雪融雪有关。因此,短时间尺度的 SPI 和 SPEI 指数变化可以为流域内水资源调度提供依据,但无法准确反映真实旱情变化。

(4)12 个月及以上时间尺度的 SPI 和 SPEI 值在干旱年的表述上虽然仍有误差,但基本可以达到预期。

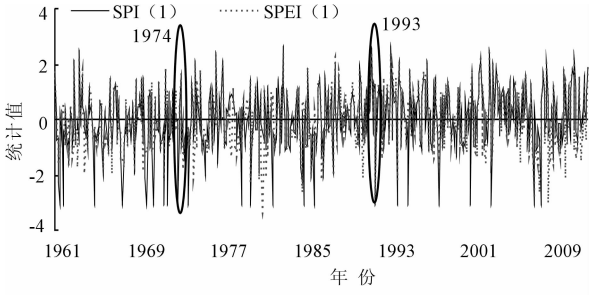
(5)两种标准化干旱指标对于平原区干旱可以大致表达出干旱趋势,但在时间精度表达上尚显不足,还有改进的余地;由于本次山区灾情资料不足,无法准确得出两种标准化干旱指标在山区是否可以精确表达干旱强度和干旱时间,但山区作为河源区,干旱状况受径流补给影响较小,理论上两种标准化

干旱指标的适用性应该大于平原区,但仍需进一步 求证。

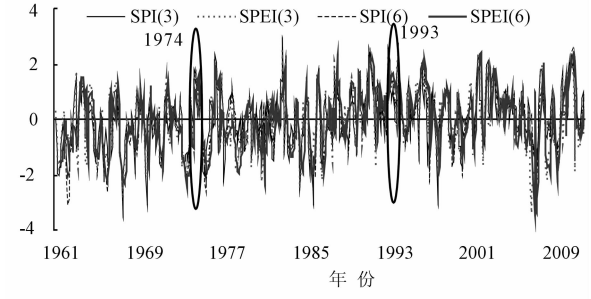
表 4 阿克苏河流域干旱灾害简表

时间	受灾地区	受灾季节	灾情描述	干旱区域
1968	阿瓦提	春、夏	阿瓦提县阿依库勒公社播种玉米到 7 月 15 日浇水时仅剩 3000 亩,占总播种面积的 17.1%	平原区
1974	乌 什	春	托什干河来水仅为历年同期 20%;5 万亩小麦受灾,水稻推迟播种,少种 1 万 ~5 万亩	平原区
1979	阿克苏市	春	阿克苏市 4、5 月正值春播季节出现严重春旱,水稻仅完成播种任务的 1/3	平原区
	阿瓦提	春	棉花播种前缺水无灌溉,缺苗减产	平原区
1980	柯 坪	夏	因干旱缺水减产 22 万 kg	
1981	柯 坪	春	草原牧场枯干,羊只渡春死亡 6002 只	荒漠区
1985	阿克苏市	春	播种面积减至 2.88 万亩,粮食作物播种面积减少近万亩	平原区
1991	草 场	春、秋	受旱 950 万亩	荒漠区
1993	乌 什	全年	牲畜需到 30 km 以外喝水	平原区

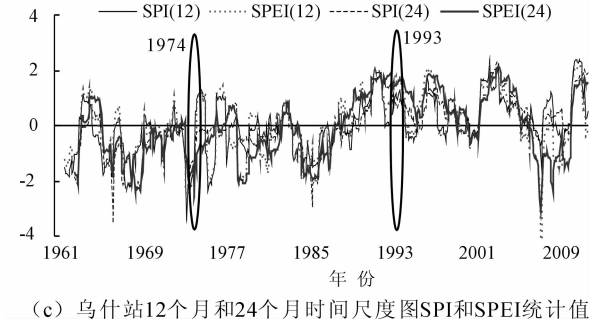
注:1993 年之后灾情描述并无具体记录,因此在此不再赘述;1993 – 2010 年的干旱年份有 1998,2000,2006,2007,2008,2009,2010;其中 2008 年发生在阿瓦提,2010 年在温宿。



（a）乌什站1个月时间尺度SPI和SPEI统计值

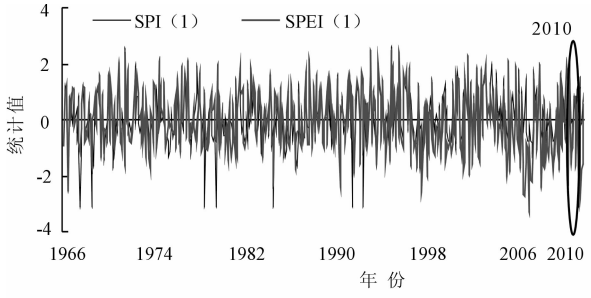


（b）乌什站3个月和6个月时间尺度图SPI和SPEI统计值

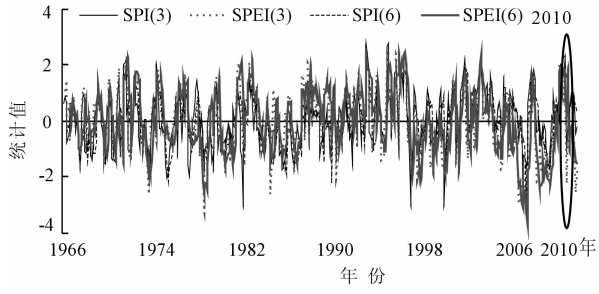


（c）乌什站12个月和24个月时间尺度图SPI和SPEI统计值

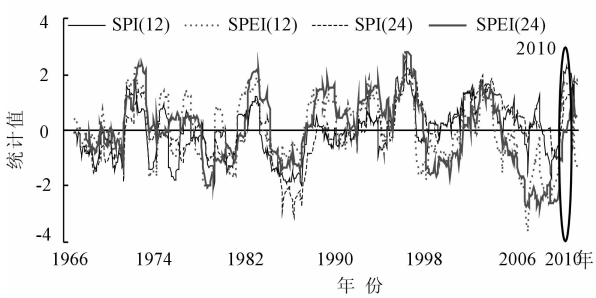
图 4 1961 – 2011 年平原区乌什站 SPI 和 SPEI 变化



（a）温宿站1个月时间尺度SPI和SPEI统计值

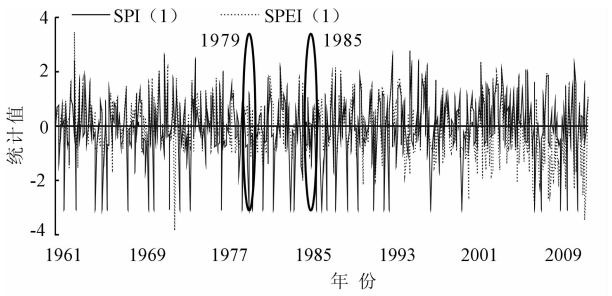


（b）温宿站3个月和6个月时间尺度SPI和SPEI统计值

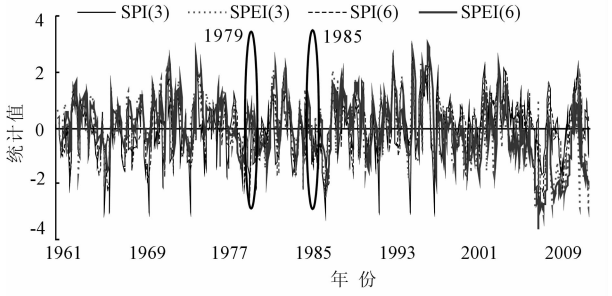


（c）温宿站12个月和24个月时间尺度SPI和SPEI统计值

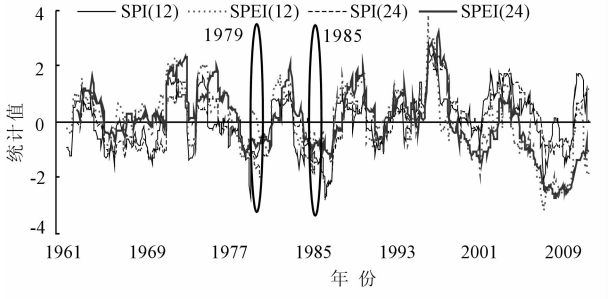
图 5 1961 – 2011 年平原区温宿站 SPI 和 SPEI 变化



（a）阿克苏站1个月时间尺度SPI和SPEI统计值

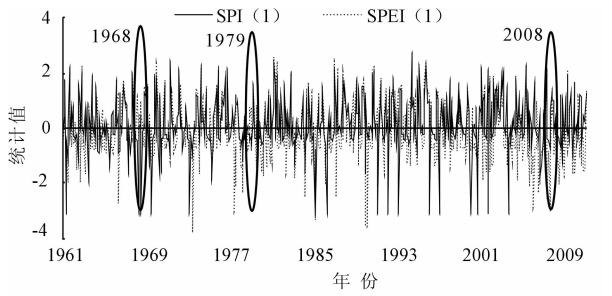


（b）阿克苏站3个月和6个月时间尺度SPI和SPEI统计值

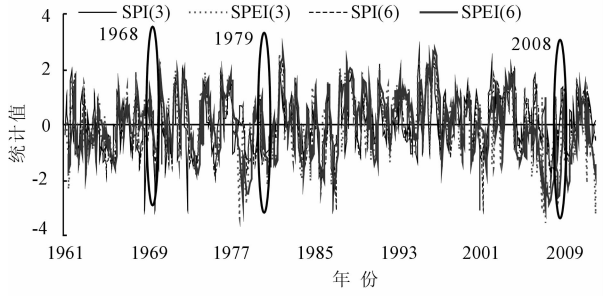


（c）阿克苏站12个月和24个月时间尺度SPI和SPEI统计值

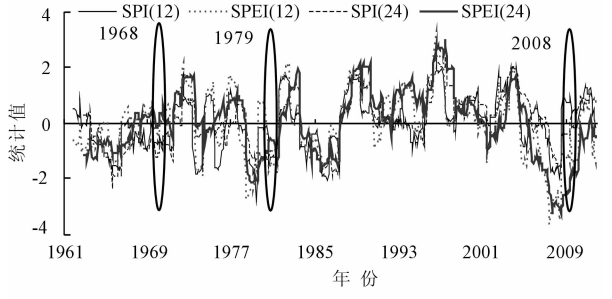
图 6　1961 – 2011 年平原区阿克苏站 SPI 和 SPEI 变化



（a）阿瓦提站1个月时间尺度SPI和SPEI统计值



（b）阿瓦提站3个月和6个月时间尺度SPI和SPEI统计值



（c）阿瓦提站12个月和24个月时间尺度SPI和SPEI统计值

图 7　1961 – 2011 年平原区阿瓦提站 SPI 和 SPEI 变化

(6)SPI 和 SPEI 指数虽然对于旱情的准确表达上尚有偏差,但结合水库调水和地下水开采数据,仍可以作为区域内制定合理水资源开采量的重要参考依据。

参考文献:

[1] Sruthi S, Aslam M A M. Agricultural drought analysis using the NDVI and land surface temperature data; a case study of Raichur District [J]. Aquatic Procedia. 2015 (4):258 – 1264.

[2] 姚宇飞,周国良,宋建华,等. 论新疆干旱农业[J]. 新疆农业科学,2006,43(S1):46 – 48.

[3] 侯英雨,何延波,柳钦火,等. 旱监测指数研究[J]. 生态学杂志,2007,27(6) : 892 – 897.

[4] Dutta D, Kundu A, Patel N R, et al. Siddiqui. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2015,18(1):53 – 63.

[5] 杨小利. 西北地区气象干旱监测指数的研究和应用[J]. 气象,2007,33(8):90 – 96.

[6] 李丽华. 北疆地区干旱监测分析研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2010.

[7] 贺音,王钊,贺皓. 三种不同干旱动态监测指数在陕西省的适用性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 242 – 249 + 274.

[8] 李新周,刘晓东,马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2):97 – 103.

[9] Touma D, Ashfaq M, Nayak M A, et al. Diffenbaugh. A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526:196 – 207.

[10] Richard R., Heim Jr, 周跃武,等. 美国 20 世纪干旱指数评述[J]. 干旱气象,2006,24(1):79 – 89.

(下转第 113 页)

实例研究表明,考虑水文过程在不同时间尺度上序列变化的时频规律,建立可以反映水文变化机理的非线性水文预报模型,可提高模型模拟及预报精度,预报更加合理,且预报时长为模拟时段的 2 ~ 3 倍。可一定程度上减少过度模拟、预测预报精度降低较快等问题对水文预报结果的影响。

参考文献:

[1] 丁 晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1988.

[2] 李荣峰,沈 冰,张金凯. 基于相空间重构的水文自记忆预测模型[J]. 水利学报,2006,37(5):583 - 587.

[3] 王文圣, 金菊良, 李跃清. 水文随机模拟进展[J]. 水科学进展, 2007,18(5): 768 - 775.

[4] 李 强,王太勇,王正英,等. 基于 EMD 和支持向量数据描述的故障智能诊断[J]. 中国机械工程,2008,19(22):2718 - 2721.

[5] Alemu E T, Palmer R N, Polebitski A, et al. Decision support system for optimizing reservoir operations using ensemble streamflow predictions [J]. Journal of Water Resources Planning and Management - Asce, 2011,137(1): 72 - 82.

[6] Sajikumar N, Thandaveswara B S. A non-linear rainfall-runoff model using an artificial network [J]. Journal of Hydrology, 1999,216(1):32 - 55.

[7] Pal I, Lall U, Robertson A W, et al. Predictability of western himalayan river flow: melt seasonal inflow into Bhakra Reservoir in Northern India [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2012,9(7):8137 - 8172.

[8] Mitani Y, Tsutsumoto K, Kagawa N. Time series prediction of acoustic signals using neural network model and wavelet shrinkage [C]//. Processings of the 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden: IIAV, 2003:4189 - 4196.

[9] Boucher M A, Tremblay D, Delorme L, et al. Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems [J]. Journal of Hydrology, 2012,416 - 417:133 - 144.

[10] Liu Xingjie, Mi Zengqiang, Yang Qixun, et al. A novel multi - step prediction for wind speed based on EMD [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(4):165 - 170.

[11] 曹鸿兴,郑小康,杨志峰,等. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009,45(1):80 - 85.

[12] 郑红星,刘昌明. 黄河流域水资源演化模式分析[J]. 地理学报, 2004,59(2):267 - 273.

(上接第 107 页)

[11] 马海娇,严登华,翁白莎,等. 典型干旱指数在滦河流域的适用性评价[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4):728 - 734.

[12] 温克刚. 中国气象灾害大典(新疆卷)[M]. 北京:气象出版社, 2006.

[13] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社.

[14] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]. //Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. USA: American Meteorological Society, 1993.

[15] 王 莺,李耀辉,胡田田. 基于 SPI 指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J]. 中国沙漠,2014,34(1):244 - 253.

[16] 马明卫,宋松柏. 渭河流域干旱指标空间分布研究[J]. 干旱区研究, 2012,29(4):681 - 691.

[17] Vicente - Serrano S M, Beguería S, López - Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696 - 1718.

[18] Vicente - Serrano S M, Beguería S, López - Moreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901 - 2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index [J]. Journal of Hydrometeorology,2010,11(4): 1033 - 1043.

[19] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 1948, 38(1):55 - 94.

[20] 庄少伟,左洪超,任鹏程,等. 标准化降水蒸散指数在中国区域的应用[J]. 气候与环境研究,2013,18(5) : 617 - 625.

[21] 王 林,陈 文. 标准化降水蒸发指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014,33(2):423 - 431.

[22] 黎小燕,吴志勇,陆桂华. 三种干旱指数在西南地区的应用及相关性分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(5):1 - 5.

[23] 石 崇,刘晓东. 1947 - 2006 年东半球陆地干旱化特征——基于 SPEI 数据的分析[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1691 - 1701.

[24] 赵 静,严登华,杨志勇,等. 标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价[J]. 物理学报,2015,64(4):049202 - 1 - 049202 - 9.