

doi: 10.13866/j.azr.2015.03.21

基于标准化降水指数与Z指数的洮河流域 干旱趋势分析^①

王帅兵^{1,2}, 李常斌^{1,2}, 杨林山^{1,2}, 杨文瑾², 樊小鹏¹

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 采用洮河流域22个站点1951—2010年的逐月降水资料,就标准化降水指数(standardized precipitation index, *SPI*)与Z指数在流域干旱趋势分析中的应用进行对比研究。结果表明:2种指数在12个月尺度旱情分析方面具有很高的-致性,在单月尺度上,*SPI*的干旱分析能力较强,对重旱的反映能力优于Z指数。应用*SPI*指数就洮河流域不同地理-生态区间干旱趋势进行研究,发现冬季是流域干旱的主要分布时段,黄土片区发生干旱的频率和持续的时间均高于青藏片区。1951—2010年,青藏片区总体趋于湿润,黄土片区干旱趋势加重。近30a,洮河青藏高原片区西部湿润趋势明显,东南部和下游黄土片区干旱趋势加重。近10a来,青藏片区东南部旋窝一带干旱范围有所减小,黄土片区中孚一带干旱范围有所扩大。研究结果可为大流域尺度干旱评估提供理论方法借鉴,也可为地方抗旱减灾措施的制定提供数据支撑。

关键词: 干旱; 标准化降水指数(*SPI*); Z指数; 洮河流域

随着人口增加和经济社会的发展,干旱所导致的水资源瓶颈效应日益严重,干旱与干旱化趋势的相关研究已成为诸多学科领域共同关注的问题^[1-2]。

气候是干旱发生的本底,也是造成干旱时空异质性的主要原因。在众多气候要素中,降水是区域干湿演替量化研究的重要依据。标准化降水指数(standardized precipitation index, *SPI*)和Z指数是以降水变化为依据进行干旱化趋势评判的常用指标。*SPI*被世界气象组织(WMO)推荐为宜用干旱指标^[3],在世界范围内得到广泛应用。Z指数在我国的应用较为广泛^[4]。袁文平等^[5]利用我国7个气象站在1991—1995年的降水资料,对*SPI*与Z指数进行应用和对比分析,发现2种指标都能很好地反映旱涝趋势;唐红玉等^[6]利用西北地区137个气象站1961—2003年的气象资料,就帕尔默干旱指数(palmer drought severity index, *PDSI*)与Z指数进行了对比研究;袁云等^[7]利用我国614个气象站的月降水资料,采用*SPI*研究了不同气候分区的旱涝程度;马明卫等^[8]对比分析了Z指数和*SPI*在渭河流域的适用性;马海娇等^[9]应用降水距平百分率、*SPI*、Z指数及径流距平百分率,评价了滦河流域的干旱

情况。

几种常见的干旱指数中,*PDSI*及其简化形式标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapo-transpiration index, *SPEI*)^[10]是基于水分平衡模式的综合指数,考虑了包括降水、蒸散发、径流和土壤有效水分存储在内的多个影响因素,干旱判断过程相对复杂。有研究表明,在6—12月的时间尺度上,*PDSI*与*SPI*的一致性很高^[11]。有效降水指数(rainfall-use efficiency, *RUE*)基于“地表净第一生产力(*NPP*)和降水的比值稳定”的假设^[12],在干旱引起的土地利用退化领域的应用较广泛,由于地面资料和遥感资料的时限性问题,该方法在长时间序列的分析中受到一定限制。*SPI*和Z指数仅需降水资料,不受地区、时间尺度的限制,应用方便,适合于不同类型和多种时间尺度的旱涝定量化研究^[13]。

洮河流域分属高寒半湿润气候和黄土高原半干旱气候,地理生态区间分异明显,是进行分布式干旱特征研究的天然平台。受水汽来源和地形等因素影响,该区雨量年内分布集中^[14-16],干旱具有明显的时空异质性^[17]。近几十年,在气候变化和人类活动的双重影响下,洮河流域的水文情势和干旱状况发

① 收稿日期: 2014-06-18; 修订日期: 2014-08-18

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(2011021110011); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2014-118); 国家自然科学基金项目(41001014)资助

作者简介: 王帅兵(1991-),女,满族,硕士研究生,主要从事生态水文方面的研究。E-mail: wangshb13@lzu.edu.cn

通讯作者: 李常斌。E-mail: lieb@lzu.edu.cn

生了明显变化^[18]。流域生态系统平衡和洮河向陇西黄土高原水资源配送的稳定性和持续性受到一定程度影响。这个背景下,洮河流域干旱演替的时空特征分析显得尤为重要。本文从SPI与Z指数的概念体系和2种指标对干旱的解释能力进行方法择优,在此基础上就洮河流域1951—2010年干旱演替的时空特征进行综合研究,为大流域尺度干旱判别及抗旱减灾措施的制定提供方法借鉴和数据支撑。

1 研究区概况

洮河是黄河上游右岸最大的一级支流,发源于青海省西倾山,由西向东至岷县北转,穿九甸峡和海甸峡,经茅龙峡注入黄河刘家峡水库。流域位于101°36′~104°20′E、34°06′~36°01′N,总面积25 527 km²,海拔1 730~4 560 m,干流全长673 km(图1)。洮河流域横跨青藏高原和黄土高原两大地貌单元。海甸峡以上为青藏高原东缘,属洮河青藏片区;海甸峡以下为黄土高原西缘,属洮河黄土片区。洮河青藏片区岷县以上主要分布有河谷开阔的草原,属高寒湿润气候,岷县至海甸峡主要为岷山山地和太子山林区;海甸峡以下的黄土片区植被较差,水土流失较严重,属温带半干旱气候区。洮河流域多年平均气温从1℃递增至9℃,多年平均降水量由超过600 mm递减至300 mm^[19]。洮河径流以降水补给为主,冰雪融水补给为辅,主要来自上、中游地区^[20]。每年12—2月为枯水期,3—6月降水逐渐增加,7—9月西南季风气流越过青藏高原顶部抵达甘南高原,与西北方向来的冷气团遭遇,形成降雨

概率增大,降水较多。夏季(6—8月)降水占全年降水的50%;秋季(9—11月)降水占全年降水的25%。

2 资料与方法

2.1 资料

系统收集洮河流域及周边22个降水观测站点降水资料,并进行整编。其中,气象系统降水数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>);水文系统降水数据来自洮河干流水文测站观测资料;水利系统数据来自各期流域生态治理或水利规划项目配置的长期测站资料。不同来源的降水资料,采用双累积曲线进行临近站点数据的一致性检验,并由水文比拟法进行缺测资料的插补展延,所有站点数据统一到1951—2010年进行干旱指数序列分析^[19]。洮河流域降水观测站点地理位置、高程及观测数据起讫时间见表1。

2.2 研究方法

2.2.1 SPI SPI由McKee等^[3]在评估美国科罗拉多干旱状况时提出,是一种基于降水量的干旱指数。该指数能有效反应干旱的强度和持续的时间,

表1 洮河流域降水观测站点

Tab. 1 List of the precipitation gauge stations in the Tao River Basin

站点	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	开始年份
河南 ^a	101.60	34.73	3 350	1951
临夏 ^a	103.18	35.58	1 917	1951
玛曲 ^a	102.08	34.00	3 471	1951
李家村 ^b	103.82	35.27	1 916	1947
碌曲 ^b	102.43	34.60	3 202	1967
尧甸 ^c	104.05	35.30	2 371	1963
合作 ^a	102.90	35.00	2 911	1951
临洮 ^a	103.87	35.40	1 894	1966
下巴沟 ^b	103.00	34.72	2 796	1960
潘家庄 ^c	103.83	35.52	1 838	1956
多坝 ^c	103.58	34.57	2 608	1958
沙塄 ^c	103.73	35.67	1 819	1935
旋窝 ^c	104.05	34.28	2 539	1959
中孚 ^c	103.73	35.78	2 011	1965
岷县 ^a	104.07	34.47	2 315	1948
红旗 ^b	103.57	35.80	1 768	1954
冶力关 ^c	103.67	34.97	2 213	1953
榆中 ^a	104.15	35.87	1 874	1951
景古城 ^c	103.68	35.13	2 183	1953
七道梁 ^c	103.78	35.90	2 389	1967
会川 ^c	103.98	35.12	2 249	1956
兰州 ^a	103.88	36.05	1 517	1951

a 为气象系统; b 为水文系统; c 为水利系统。

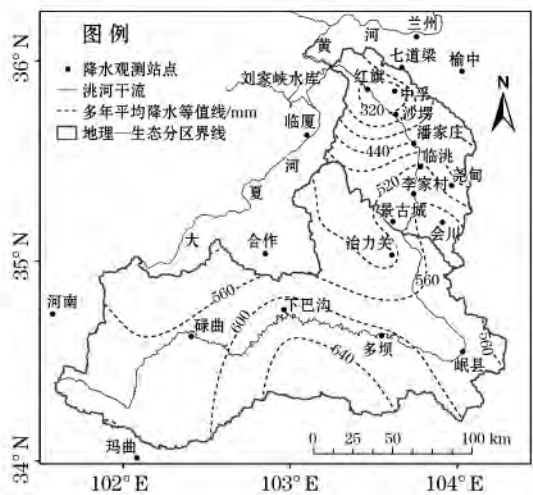


图1 洮河流域多年平均降水量及地理—生态分区示意图
Fig. 1 Schematic of mean annual precipitation distribution and eco-geographical zoning in the Tao River Basin

成为继 $PDSI^{(21)}$ 之后又一被学界广泛认可的干旱指数。在《中华人民共和国国家标准—农业干旱预警等级》(GB-4-2)⁽²²⁾ 中 SPI 指数为评价干旱的标准指标。 SPI 对应的旱涝等级见表 2⁽²³⁾。

表 2 SPI 旱涝等级Tab. 2 Classification of SPI drought-flood criterion

等级	类型	SPI 值
1	特涝	$2 \leq SPI$
2	重涝	$1.5 \leq SPI < 2$
3	中涝	$1 \leq SPI < 1.5$
4	轻涝	$0.5 \leq SPI < 1$
5	正常	$-0.5 < SPI < 0.5$
6	轻旱	$-1 < SPI \leq -0.5$
7	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
8	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
9	特旱	$SPI \leq -2.0$

SPI 指数假设降水 x 服从 Γ 分布, 其概率密度函数为:

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

式中: α 为形状参数; β 为尺度参数; $\Gamma(\alpha)$ 为 gamma

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), & t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{H(x)^2}\right]}, \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \\ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}, & t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(1-H(x))^2}\right]}, \quad 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $c_0 = 2.515\ 517$; $c_1 = 0.802\ 853$; $c_2 = 0.010\ 328$; $d_1 = 1.432\ 788$; $d_2 = 0.189\ 269$; $d_3 = 0.001\ 308$ 。

2.2.2 Z 指数 Z 指数假设某时段的降水量服从 Person III 型分布, 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta}{\Gamma(\alpha)} (x - \alpha)^{\alpha-1} e^{-(x-\alpha)\beta} \quad (x > \alpha) \quad (9)$$

对降水量进行正态化处理, 转换为以 Z 为变量的标准正态分布:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left| \frac{C_s}{2} \Phi_i + 1 \right|^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (10)$$

式中: $C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n\delta^3}$, 为偏态系数; $\Phi_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\delta}$, 为

标准变量; $\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$, 为序列均方差; \bar{X}

$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, 为序列均值。

Z 指数对应的旱涝等级见表 3⁽⁶⁾。

函数, 可分别由式 (2) ~ (4) 计算:

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (3)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4)$$

式中: $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ 分别为采用极大似然估计方法对 α 和 β 的估计值, 且:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x)}{n} \quad (5)$$

式中: n 为计算序列的长度。累积概率为:

$$G(x) = \int_0^x g(s) ds = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x s^{\alpha-1} e^{-s/\beta} ds \quad (6)$$

由于上式中不包含 $x=0$ 的情况, 而实际降水量可以为 0, 所以, 定义累积概率为:

$$H(x) = q + (1-q) G(x) \quad (7)$$

式中: $q = m/n$ 表示降水量为 0 的概率; m 表示降水为 0 的数量。将累积概率化为标准正态分布函数如下:

表 3 Z 指数干旱等级Tab. 3 Classification of Z -index drought criterion

等级	类型	Z 值
1	重涝	$1.645 < Z$
2	中涝	$1.037 < Z \leq 1.645$
3	轻涝	$0.642 < Z \leq 1.037$
4	正常	$-0.642 \leq Z \leq 0.642$
5	轻旱	$-1.037 \leq Z < -0.642$
6	中旱	$-1.645 \leq Z < -1.037$
7	重旱	$Z < -1.645$

3 SPI 和 Z 指数的验证对比

由洮河流域历史旱情资料验证 SPI 和 Z 指数关于干旱情势判断的效果。1951 年以来, 洮河流域下游干旱频发, 有记录的较严重的 2 次旱情发生在 1966 年和 1997 年。1966 年 5 月下旬降水极少, 岷县、临洮等地 7—8 月的降雨量与历年同期相比处于较低水平, 年径流量减少 17%; 1997 年流域中下游部分地区旱情严重。2 次旱灾造成大面积农作物绝

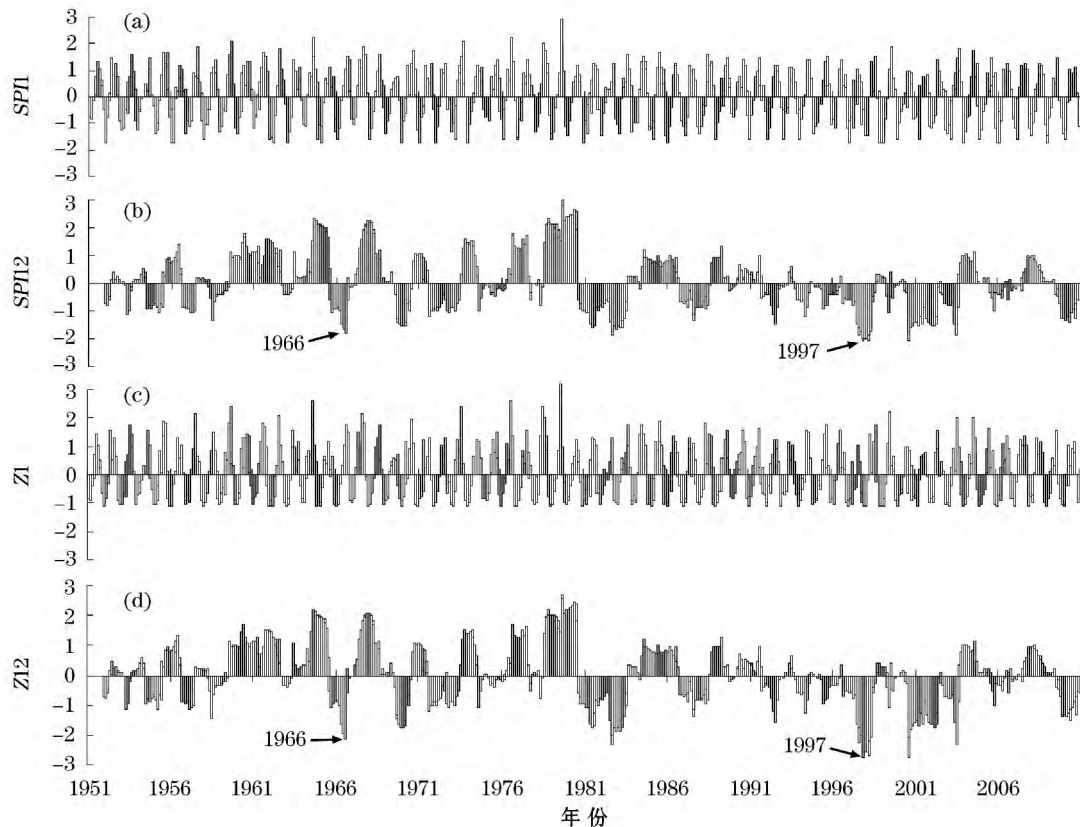


图2 1951—2010年洮河流域代表站(临洮)1个月和12个月尺度SPI和Z指数序列

Fig.2 Series of SPI and Z index at time scales of 1 month and 12 months from 1951 to 2010 at the representative station (Lintao) in the Tao River Basin

收,对于流域环境和农业生产造成很大影响^[24]。以流域下游临洮站为代表,分别计算单月和12个月的SPI和Z指数值(图2)。

图2以SPI1、Z1和SPI12、Z12分别表示2种指数在单月和12个月尺度的变化序列。SPI1和Z1只考虑当月降水情况,不考虑降水累积效应,正负波动明显,时间持续性弱;SPI12和Z12考虑降水的累积效应,表达了较长时期降水丰欠状况,可反映干旱的持续性。

从SPI1和Z1序列对比来看,尽管2种指数序列均显现出较强的波动,但在指数所能反映的干旱程度方面,SPI1指数波动大,对于干旱特别是重旱的反映能力强于Z1。Z1对单月尺度的湿润情况表现敏感,和SPI1类似,但最小负值的差异较小,对重旱的反映能力不足。从SPI12和Z12序列对比来看,2个指数与几次大的干旱都有较好的对应关系,流域1966年3—7月的中旱和1997年的重旱,均可由SPI12和Z12指数序列中读出,表明2个指数在12个月尺度的干旱程度判别上具有很好的一致性。由上述分析可知,SPI在不同时间尺度均能对干旱

情势做出良好判断,文章采用SPI就洮河流域干旱发生及演变的时空特征进行综合研究分析。

4 SPI在洮河流域的应用

4.1 干旱发生的时间特征

4.1.1 月特征 以干旱发生频率表示某个时间尺度干旱发生的频繁程度,可由某等级干旱发生次数和干旱发生总次数计算确定^[25-26]。本文对洮河流域青藏片区和黄土片区22个降水观测站点进行SPI1序列统计。1951—2010年,2个片区各月轻、中、重旱的发生频率如表4所示。

由表4可知,黄土片区和青藏片区的干旱频率具有趋同性,即2个区在11月至次年3月发生干旱的频率较高,4—10月发生干旱的频率则很低,表明洮河流域2个片区的干旱以秋末至初春为多发,特别是冬季干旱频发,是年内干旱分布的主要时段。

对干旱持续的时间进行统计,发现黄土片区存在从每年秋季到次年春季的较长干旱历时,若旱情在夏季未得到缓解,干旱一般会持续整个水文年;青

表 4 洮河流域不同地理—生态区间月、季干旱频率

Tab. 4 Monthly and seasonal drought frequency in different eco-geographic zone of the Tao River Basin

/%

干旱等级		冬季			春季			夏季			秋季		
		12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
青藏片区	轻旱	19.1	38.3	49.4	25.8	8.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	1.2	52.0
	中旱	52.7	46.4	36.8	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	27.7
	重旱	27.4	11.2	5.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9
黄土片区	轻旱	27.9	44.4	48.7	29.0	7.0	3.8	0.0	0.0	1.4	2.1	4.7	39.0
	中旱	44.1	36.1	30.5	5.8	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.8	3.0	31.0
	重旱	23.3	11.5	6.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8	0.8	6.8

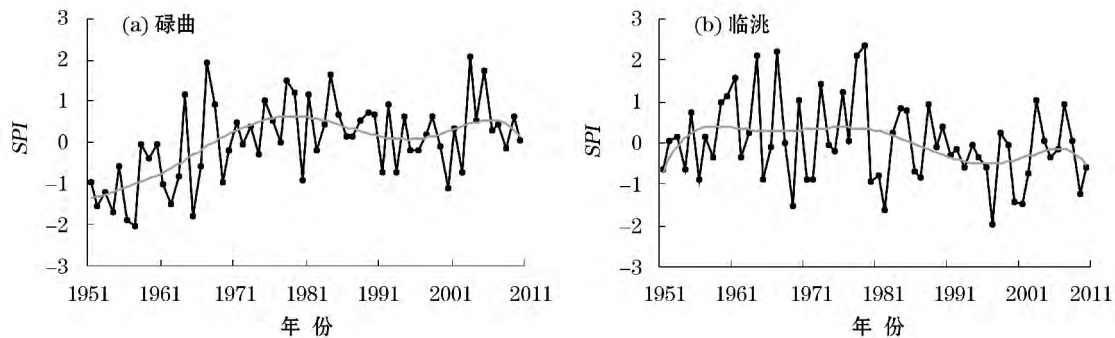


图 3 1951—2010 年代表站点 SPI 序列变化

Fig. 3 The SPI series variation from 1951 to 2010 at the representative stations

藏片区干旱集中在冬季,春季至秋季干旱少,持续时间也短。对比而言,洮河黄土片区和青藏片区干旱的月份基本一致,前者干旱历时长于青藏片区,发生重旱的频率也相对较高。

4.1.2 年际特征 以上游碌曲站和下游临洮站为代表性站点,在年降水量统计的基础上,就洮河流域青藏片区和黄土片区 1951—2010 年的年尺度 SPI 序列进行计算,并对 2 个片区干旱的年际特征进行分析。期间,洮河上游碌曲站 SPI 表现为总体增加(图 3a),表明洮河青藏片区趋向于湿润化;洮河下游临洮站 SPI 表现为总体减少,表明洮河黄土片区气候趋向于干旱化(图 3b)。

4.1.3 年代特征 以干旱站次比为评价指标,分析 2 个区不同年代干旱的严重程度^[26]。如图 4 所示,洮河青藏片区在 1950's—1980's 干旱程度依次减弱,1990's 干旱加重,到 2000's 又有所减轻;1990's 干旱最为严重,1950's 年代次之,1980's 干旱程度最轻,未发生重旱和特旱。洮河黄土片区在 1950's—1990's,干旱站次比相差不大,介于 25%~30%;1950's 干旱程度最弱,并无中旱以上等级的干旱发生,1990's 出现特旱,2000's 干旱程度最为严重,干旱站次比达到 50%。

4.2 干旱演变的空间特征

为了更加直观地反映洮河流域干旱的空间演变

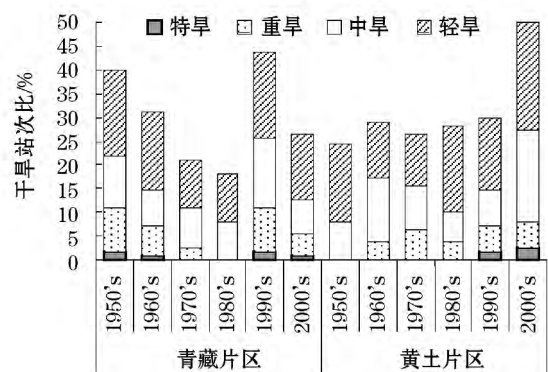


图 4 青藏片区和黄土片区不同年代干旱站次比

Fig. 4 Drought occurrence of gauge stations in different eras in Qinghai-Tibet zone and Loess zone

趋势,由基于干旱站次比(P_i)的干旱发生范围定义:无明显干旱($P_i < 10\%$)、局部地区干旱($10\% \leq P_i < 30\%$)、部分地区干旱($30\% \leq P_i < 50\%$)、区域性干旱($50\% \leq P_i < 70\%$)和全域性干旱($P_i \geq 70\%$)。

统计得到洮河流域青藏片区和黄土片区在不同年代干旱发生的范围(表 5),经空间差值得到洮河流域近 30 a 和近 10 a SPI 均值分布(图 5)。

由表 5 可知,洮河青藏片区各年代无干旱次数明显多于各级别干旱次数,1950's—2000's 局部地区干旱发生 10 次,其余级别干旱发生均小于 10 次,

表 5 青藏片区和黄土片区不同等级干旱发生次数

Tab.5 Statistics of different level droughts in Qinghai-Tibet zone and Loess zone

发生范围	1950's	1960's	1970's	1980's	1990's	2000's	合计
青 无明显干旱	3	4	5	4	3	6	25
藏 局部地区干旱	1	3	2	3	1	0	10
片 部分地区干旱	2	0	1	2	1	2	8
区 区域性干旱	3	1	2	1	2	0	9
全域性干旱	1	2	0	0	3	2	8
黄 无明显干旱	6	5	6	5	2	3	27
土 局部地区干旱	1	1	1	2	5	1	11
片 部分地区干旱	0	2	0	0	1	1	4
区 区域性干旱	1	0	1	1	1	1	5
全域性干旱	2	2	2	2	1	4	13

其中全域性干旱发生 8 次,以 1990's 最多;近 10 a,无干旱次数明显增加,表明该区气候的湿润化趋势。与青藏片区相比,洮河黄土片区部分地区干旱和区域性干旱次数较少,局部地区干旱和全域性干旱较多。近 10 a,洮河黄土片区发生 4 次全域性干旱,表明该区干旱范围有所扩大,干旱程度更为严重。

由图 5 可知,近 30 a 洮河青藏片区西部碌曲等地 SPI 值较高,表明该区气候的湿润化趋向,青藏片区东南部旋窝等地 SPI 值较低,表明这一地区干旱化程度有所加剧;下游黄土片区 SPI 值基本为负,表明该区气候总体朝干旱化方向发展。近 10 a,洮河青藏片区西部碌曲等地湿润化范围有轻微缩减,东南部旋窝等地的干旱范围也在缩小;黄土片区中孚

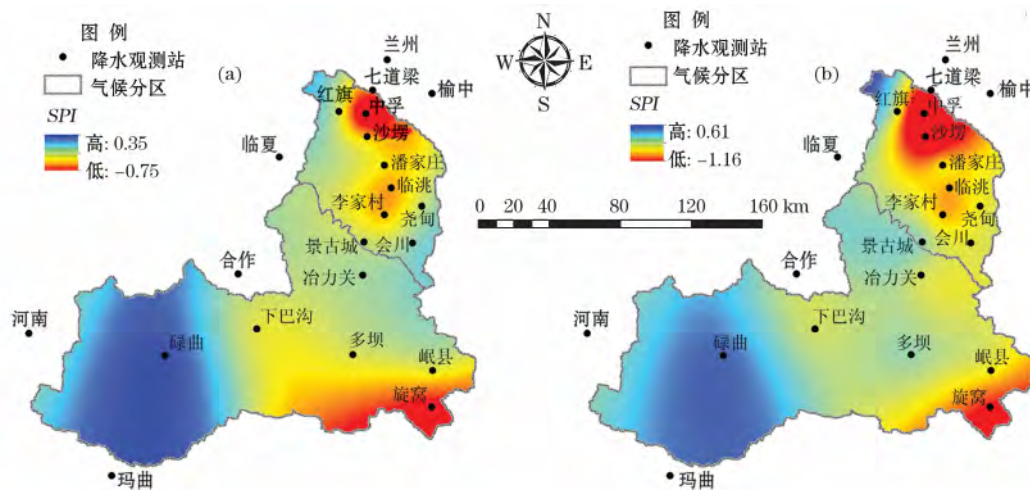


图 5 洮河流域近 30 a (a) 和近 10 a (b) 干旱趋势空间示意图

Fig. 5 Drought trend space diagram in recent 30 years (a) and 10 years (b) in the Tao River Basin

等地干旱范围则有所扩大,干旱趋势加重。

洮河流域干旱发生及演变的总体趋势与降水关系密切。基于 Mann-Kendall (M-K) 的降水变化趋势分析表明⁽¹⁹⁾,上游碌曲等地的降水在 1951—2010 年总体呈增加趋势,特别是 1967 年以后显著上升;下巴沟至岷县区间以及黄土片区均经历先增后减的变化。上述降水变化格局决定了洮河流域干旱演变的总体趋势,与图 5 所示近 30 a 及近 10 a 流域干旱演变的空间特征相一致。

5 结论

SPI 和 Z 指数在 12 个月尺度的干旱程度判别上具有很好的一致性,单月尺度 SPI 反映重旱的能力强于 Z 指数。基于 SPI 的洮河流域不同地理—生态区间的干旱趋势判别分析表明,洮河青藏片区和

黄土片区在 11 月至次年 3 月发生干旱的频率较高,4—10 月发生干旱的频率则很低。2 个片区干旱以秋末至初春为多发,特别是冬季为年内干旱分布的主要时段。1951—2010 年,洮河流域干湿演变特征主要表现为青藏片区的湿润化和黄土片区的干旱化,青藏片区在 1990's 干旱最为严重,黄土片区在 1990's 出现特旱,2000's 干旱发生最为普遍,干旱站次比达到 50%。近 30 a,洮河青藏片西部呈湿润化趋向,东南部旋窝等地干旱化程度有所加剧;黄土片区气候总体朝干旱化方向发展。近 10 a,洮河青藏片西部湿润化范围有轻微缩减,东南部干旱范围也有缩小;黄土片区干旱范围有所扩大,干旱趋势加重。洮河流域干旱演变的总体趋势与降水变化关系密切。青藏片区西部降水在 1951—2010 年总体呈增加趋势,青藏片区东部以及洮河黄土片降水均经

历先增后减的变化,上述降水变化格局决定了洮河流域干旱演变的总体趋势。

参考文献(References):

- (1) 刘德祥,董安祥,陆登荣. 中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响(J). 干旱地区农业研究 2005 23(2): 195 - 201. (Liu Dexiang ,Dong Anxiang ,Lu Dengrong. Climatic change of northwest China and its influence on agricultural production in recent 43 years (J). Agricultural Research in the Arid Areas , 2005 23(2): 195 - 201.)
- (2) 王喆,安如,梁欣,等. 基于 TRMM 的三江源区 8 月份干旱特征(J). 干旱区研究 2013 30(4): 719 - 727. (Wang Zhe ,An Ru ,Liang Xin et al. August drought in the three-river headwaters region based on TRMM data (J). Arid Zone Research 2013 30(4): 719 - 727.)
- (3) McKee T B ,Doesken N J ,Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales (C) // Paper Presented at 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society ,Anaheim C A ,1993.
- (4) 蔡敏,黄艳,朱育峰,等. Z 指数方法在小流域洪涝灾害预警技术研究中的应用(J). 气象科技 2010 38(4): 418 - 422. (Cai Min ,Huang Yan ,Zhu Xiaofeng ,et al. Application of Z index in flood disaster prewarning for small drainage areas (J). Meteorological Science and Technology 2010 38(4): 418 - 422.)
- (5) 袁文平,周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析(J). 植物生态学报 2004 28(4): 523 - 529. (Yuan Wenping ,Zhou Guangsheng. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China (J). Acta Phytocologica Sinica , 2004 28(4): 523 - 529.)
- (6) 唐红玉,王宏伟,史津梅,等. PDSI 和 Z 指数在西北干旱监测应用中差异性分析(J). 干旱区农业研究 2009 27(5): 6 - 11. (Tang Hongyu ,Wang Zhiwei ,Shi Jinmei ,et al. Analysis of different dryness/wetness index in Northwest China (J). Agricultural Research in the Arid Areas 2009 27(5): 6 - 11.)
- (7) 袁云,李栋梁,安迪. 基于标准化降水指数的中国冬季干旱分区及气候特征(J). 中国沙漠 2010 30(4): 917 - 925. (Yuan Yun ,Li Dongliang ,An Di. Winter aridity division in China based on standardized precipitation index and circulation characteristics (J). Journal of Desert Research 2010 30(4): 917 - 925.)
- (8) 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. (Ma Mingwei ,Song Songbai. Study on spatial distribution of drought indices in the Weihe River Basin (J). Arid Zone Research 2012 29(4): 681 - 691.)
- (9) 马海娇,严登华,翁柏沙,等. 典型干旱指数在滦河流域的适用性评(J). 干旱区研究 2013 30(4): 728 - 734. (Ma Haijiao ,Yan Denghua ,Weng Baisha ,et al. Applicability of typical drought indexes in the Luanhe River Basin (J). Arid Zone Research 2013 , 30(4): 728 - 734.)
- (10) Vicente-Serrano S M ,Beguería S ,López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index (J). Journal of Climate 2010 23 (7): 1 696 - 1 718.
- (11) 李伟光,易雪,侯美亭,等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究(J). 中国生态农业学报 2012 20(5): 643 - 649. (Li Weiguang ,Yi Xue ,Hou Meiting ,et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China (J). Chinese Journal of Eco-Agriculture 2012 20(5): 643 - 649.)
- (12) Le Houérou H N. Rain use efficiency: A unifying concept in arid-land ecology (J). Journal of Arid Environments ,1984 ,7: 213 - 247.
- (13) Gholami A ,Shamsnia S A ,Shahidi N ,et al. The analysis of the frequency of occurrence ,and drought severity in selected stations in Fars province using standardized precipitation index (C) // Proceedings of International Conference on Environmental Engineering and Applications (ICEEA 2011) 2011.
- (14) 钱正安,吴统文,宋敏红,等. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题(J). 地球科学进展 2001 ,16(1): 28 - 38. (Qian Zhengang ,Wu Tongwen ,Song Minhong ,et al. Arid disaster and advances in arid climate researches over Northwest China (J). Advance in Earth Sciences 2001 ,16(1): 28 - 38.)
- (15) 张存杰,高学杰,赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响(J). 冰川冻土 2003 25(2): 157 - 164. (Zhang Cunjie ,Gao Xuejie ,Zhao Hongyan. Impact of global warming on autumn precipitation in Northwest China (J). Journal of Glaciology and Geocryology 2003 25(2): 157 - 164.)
- (16) 张强,邓振镛,赵映东,等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响(J). 生态学报 2008 ,28(3): 1 210 - 1 218. (Zhang Qiang ,Deng Zhenyong ,Zhao Yingdong ,et al. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China (J). Acta Ecologica Sinica 2008 28(3): 1 210 - 1 218.)
- (17) 孔祥伟,陶健红. 近 51 a 甘肃夏季气温和降水极端事件变化(J). 干旱区研究 2012 29(6): 965 - 971. (Kong Xiangwei ,Tao Jianhong. Change of extreme temperature and precipitation events in Gansu Province in summer in recent 51 years (J). Arid Zone Research 2012 29(6): 965 - 971.)
- (18) 姚玉璧,张秀云,王润元,等. 洮河流域气候变化及其对水资源的影响(J). 水土保持学报 2008 22(1): 168 - 173. (Yao Yubi ,Zhang Xiuyun ,Wang Runyuan ,et al. Impact of climate changing to water resource in Taohe River Valley (J). Journal of Soil and Water Conservation 2008 22(1): 168 - 173.)
- (19) 李常斌,王帅兵,杨林山,等. 1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征(J). 冰川冻土 2013 35(5): 1 259 - 1 266. (Li Changbin ,Wang Shuaibing ,Yang Linshan ,et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe River basin from 1951 to 2010 (J). Journal of Glaciology and Geocryology 2013 35(5): 1 259 - 1 266.)
- (20) 张济世,康尔泗,蓝永超,等. 50 a 来洮河流域降水径流变化趋势分析(J). 冰川冻土 2003 25(1): 77 - 82. (Zhang Jishi ,Kang Ersi ,Lan Yongchao ,et al. Trend Analysis of the precipitation and runoff in the Taohe River Watershed during the past 50 years (J). Journal of Glaciology and Geocryology 2003 25(1): 77 - 82.)

- (21) Palmer W C. Meteorological Drought (M). Washington DC ,USA: US Department of Commerce ,Weather Bureau ,1965: 45 – 58.
- (22) 国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准农业干旱预警等级(GB – 4(3) [Z]. 2007 ,11 ,10. (The State Administration of Quality Supervision. The National Standard of the People's Republic of China about the agricultural drought warning level(GB – 4(3) [Z]. 2007 ,11 ,10.)
- (23) 邵进 李毅 宋松柏. 基于 SPI 模型的江汉平原旱涝分布及其变化规律的研究 (J). 水文 2012 ,32(2) : 34 – 39. (Shao Jin ,Li Yi ,Song Songbai. Distribution and variation law of drought/waterlog in Jianghan plain based on SPI (J). Journal of China Hydrology 2012 ,32(2) : 34 – 39.)
- (24) 董安祥 王鹏祥 林彬. 中国气象灾害大典: 甘肃卷 (M). 北京: 气象出版社 ,2005. (Dong Anxiang ,Wang Pengxiang ,Lin Bin. China's Meteorological Disaster ,the Volume of Gansu Province (M). Beijing: China Meteorological Press ,2005.)
- (25) 黄晚华 杨晓光 李茂松 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征 (J). 农业工程学报 ,2010 ,26(7) : 50 – 59. (Huang Wanhua ,Yang Xiaoguang ,Li Maosong ,et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index (J). Transactions of the CSAE 2010 ,26(7) : 50 – 59.)
- (26) 孙智辉 王治亮 曹雪梅 等. 基于标准化降水指数的山西黄土高原地区 1971—2010 年干旱变化特征 (J). 中国沙漠 ,2013 ,33(5) : 1 560 – 1 567. (Sun Zhihui ,Wang Zhiliang ,Cao Xuemei ,et al. Characteristics of drought change in the Loess Plateau area of Shanxi based on the standardized precipitation index during 1971 – 2010 (J). Journal of Desert Research 2013 ,33(5) : 1 560 – 1 567.)

Drought Trend Analysis Based on Standardized Precipitation Index and the Z index in the Tao River Basin

WANG Shuai-bing^{1 2} , LI Chang-bin^{1 2} , YANG Lin-shan^{1 2} , YANG Wen-jin² , FAN Xiao-peng¹

(1. College of Earth and Environment Science ,Lanzhou University ,Lanzhou 730000 ,Gansu ,China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education) ,Lanzhou University ,
Lanzhou 730000 ,Gansu ,China)

Abstract: In this study , we used a monthly mean precipitation dataset from 22 gauge station observations since 1951 to 2010 to detect the applicable efficiency by a comparative utilization of the Standardized Precipitation Index and the Z index on regional drought assessment in the Tao River Basin (TRB) . The two indexes featured determinable consistency at a time scale of 12-month drought discrimination , while at a time scale of one month , the SPI was more sensitive to reflect the severe drought than the Z index. Then the SPI was used to illustrate drought involvement in the two eco-geographical zones respectively locating in the eastern Tibetan Plateau (ETP) and south-western Loess Plateau (SLP) , representing very different regional geomorphology and climate , across the TRB. SPI results showed a higher frequency in both regions from November to the following March , although from April to October , the drought occurred seldom , indicating that there would be some consistence of drought occurrence in a year in the ETP and the SLP. Seasonal drought from the end of autumn to the beginning of next spring , especially in the winter , was the dominating drought period in the study area. Statistics also pointed to longer drought with higher frequency of severe ones in the SLP than in the ETP. From 1951 to 2010 , the interannual variation of drought in the two regions was different. There has been an overall humidification trend in the ETP while an obvious drought trend in the SLP. Spatially , humidification in the west part of the ETP along with a drought trend in the southeast of that made it a regional heterogeneity of drought involvement there , while a general drought trend was found in almost the whole SLP during the recent 30 years. In recent 10 years , humidification and acidification in wet and southeast , respectively , in the ETP , have become lightening in both frequency and intensity , while drought occurrence in the SLP kept increasing in both scopes and levels. The research results can provide theory and method reference for large river basin scale drought assessment , and provide data support for the establishment of the local drought relief measures.

Key words: drought; standardized precipitation index(SPI) ; Z-index; Tao River Basin