

西北地区气象干旱监测指数的研究和应用

杨小利^{1,2}

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,兰州,730020; 2. 甘肃省平凉市气象局)

提 要: 为了更有效地监测西北地区干旱,综合西北地区广泛应用的 Z 指数方法和帕默尔气象干旱指数基本原理的优点,选取西北地区 138 个代表站 1961—2000 年 40 年逐月降水量资料,分东、西两片分别建立了西北地区东部和西部的单站气象干旱监测指数。在此基础上建立了区域干旱指数,确定了区域旱涝等级的划分标准。以计算得到的干旱指数与历史旱情记录进行了对比验证,并对计算结果做了进一步的统计分析。结果表明:干旱指数对西北地区旱情的反映符合历史实际;西北地区东部近几十年来干旱发生的次数和强度较西部更重;从长期演变趋势看,西北地区东部干旱发生频率呈现出上升的趋势,尤其是 1990 年代中期后上升趋势更为明显,而西北地区西部则呈现下降趋势;西北地区东部 3、4、5、6 月份的区域干旱均具有 5~10 年的周期,而西北地区西部区域干旱的周期性不明显。这些指数的建立,将为更好地开展西北地区的干旱监测、诊断业务提供气象意义明显且应用简便的气象干旱指数。

关键词: 干旱指数 旱涝等级 干旱监测

Research and Application of Meteorological Drought Monitoring Indexes in Northwest China

Yang Xiaoli^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration; Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730020; 2. Pingliang Meteorological Office, Gansu)

Abstract: To monitor drought in Northwest China more effectively, the drought monitoring index for east and west part of NW China was established respectively based on the principles of Z index and Palmer index. The monthly precipitation data in 138 representative stations of NW China (1961~2000) were used as basic data. A regional drought monitoring index was further developed, and the grades for regional drought were also determined. Comparing the computed

基金项目,科技部科研院所社会公益研究专项“中国干旱气象灾害监测预警方法研究”(编号:2005DIB5J192)

收稿日期:2006 年 7 月 18 日; 修定稿日期:2007 年 6 月 4 日

drought index with some recorded drought situation, it is found that these indexes can reflect the severity of meteorological drought in NW China. Furthermore, the drought characteristics were analyzed by using some statistical methods. The result shows that the drought in the east part was more severe than in the west in recent decades. In a long term, the drought frequency shows an increasing trend in the east part while a decreasing trend in the west. The meteorological drought in the east part from March to June has a period of 5 to 10 years, while the periodicity isn't evident in the west. These indexes have an obvious meteorology meaning and can be applied simply in the drought monitoring practices of NW China.

Key Words: drought monitoring indexes drought grade drought monitoring

引 言

西北地区地处内陆,是我国主要的干旱半干旱区。干旱是影响该区最主要的气象灾害。由于地域广阔,境内自然条件差异显著,东、西、南、北气候差异明显。以乌鞘岭为界(约 103°E),将西北干旱、半干旱区粗分为东、西两部分^[1],东部受海洋影响大一些,以半干旱气候为主,农业生产以雨养农业为主,更易受到降水条件的制约。西部受高原影响大一些,以干旱气候为主,农业生产以绿洲灌溉农业为主,但山区降水是河流的主要水源补给,而山区降水与平原降水之间有着密切关系^[2],因此,无论东西部,降水均是影响旱涝的最主要因素。

在对西北地区干旱研究的过程中,人们制定了许多干旱指数来对干旱进行监测,张存杰等^[3]通过调整 Z 指数的旱涝等级界限值,确定了西北地区大气干旱指数,宫德吉^[4]通过分析降水应时性,有效性,大气温湿状况等,给出了评价短期气候干旱状况的干旱实时监测和预警指数,王劲松等^[5]确定了甘肃河西地区径流量的干旱指数,黄妙芬^[6]应用帕默尔旱度模式的基本原理,建立了黄土高原西北部的帕默尔旱度模式。这些干旱指数大致可归纳为单要素指数和多要素指数,前者考虑因素少,但计算和所需资料简单,便于

应用,后者考虑因素多一些,但计算复杂,需要收集资料多,有些资料在实际应用中较难取得。因此,要制定一个适用于多种用途的干旱指数是很困难的。

干旱的形成和发展是水分亏缺缓慢积累的过程,一个好的干旱指数既要考虑某一段时间的水分亏缺量,又要考虑持续时间。目前较为流行的帕默尔气象干旱指数^[7]考虑因子较为全面,有较好的时空比较性,但该指数涉及参数多,计算过程尤其是水分平衡的计算过程复杂,限制了它在实际干旱监测中的应用;而当前在西北地区应用较广泛的 Z 指数只考虑降水一个因素,应用简便,但未考虑到前期天气条件的影响和干旱的累积性,且对于旱涝等级的划分人为性大,没有统一的标准。因此,尝试结合二者的优点,建立一个气象意义明显且应用简便的气象干旱指数,以服务于该区的干旱监测、诊断业务。

1 单站气象干旱指数的建立

1.1 资料处理

选取西北地区 138 个代表站 1961—2000 年 40 年逐月降水量资料,其中西北地区西部选用 73 个代表站的资料,西北地区东部选用 65 个代表站的资料,对于空缺资料按插值法进行插补。

1.2 水分异常指数 Z 的计算

造成干旱的最直接原因是水分与正常状况的偏差,为了反映出水分亏缺或盈余量的大小,采用标准化降水指数来表示降水异常指数 Z :

$$Z = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \varphi + 1 \right)^{1.6} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6}$$

式中 C_s 为偏态系数, φ 为标准变量,均可由降水资料序列计算求得,标准化降水指数假定降水量服从 p-III 分布,对降水资料进行了正态标准化处理,消除了不同地区和时期的气候差异,能够较客观地反映出降水量的正负异常状况。

1.3 干旱监测指数

计算西北地区各代表站点 1961—2000 年的标准化降水指数。依据帕默尔干旱指数的基本原理^[3],干旱强度是水分亏缺量与持续时间的函数,因此干旱指数应包括时间这个因子。分别选取两个区域历史时期中不同持续时期的最早时段的累积 Z 值(表 1),假定历史中的某些最早时段达到极端干旱。

表 1 西北地区历史最早时段持续时间及累积 Z 值

持续月数	东部		西部	
	累积 Z 值	起止时段	累积 Z 值	起止时段
2	-4.5783	1962.3—1962.4	-5.0407	1980.6—1980.7
3	-6.3896	1962.3—1962.5	-6.2932	1991.7—1991.9
4	-7.483	1969.7—1969.10	-7.4388	1991.8—1991.11
5	-8.0307	1995.3—1995.7		
6	-8.6393	1962.11—1963.4	-7.8405	1982.12—1983.5
7	-9.5816	1998.9—1999.3	-8.6097	1997.5—1997.11
8	-9.9468	1967.12—1968.7	-9.2348	1968.4—1968.11
9	-10.2711	1995.1—1995.9	-10.0394	1997.2—1997.10
10	-10.1416	1966.12—1967.9	-10.8706	1964.11—1965.8
11	-11.5029	1962.3—1963.1	-13.189	1997.2—1997.12
12	-14.143	1969.1—1969.12	-17.8346	2000.1—2000.12

将 Z 的累积值 $\sum Z$ (纵坐标) 与持续时段 t (横坐标) 点绘于图 1 中,得到回归直线(实线),表示各种时间尺度的极端干旱,根据帕默尔对干旱等级的划分(表 2),假定极端干

表 2 干湿等级划分标准

指数值(X)	等级
≥ 4.0	极端湿润
3.00~3.99	严重湿润
2.00~2.99	中等湿润
1.00~1.99	轻微湿润
-0.99~0.99	正常
-1.00~-1.99	轻微干旱
-2.00~-2.99	中等干旱
-3.00~-3.99	严重干旱
≤ -4.00	极端干旱

旱情况下的旱度值 $X = -4.0$,图中右侧的纵坐标也可从正常到极端分成 4 等份。在图 1 中做出三条处于实线上方的直线(虚线),分别代表了轻微、中等和严重干旱的上限,旱度值 X 分别为 -3.0 、 -2.0 、 -1.0 。

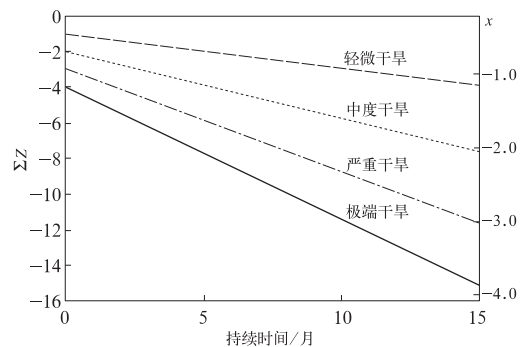


图 1 西北地区东部干旱指数与水分异常累积值和持续时间关系图

由图建立干旱指数 X_i 与累积 Z 值和时间 t 的关系式,建立干旱指数模式:

西北地区东部:

$$x_i = \sum_{t=1}^i z_t / (0.1865t + 0.9835) \quad (1)$$

西北地区中西部:

$$x_i = \sum_{t=1}^i z_t / (0.2463t + 0.6363) \quad (2)$$

方程(1)、(2)仅是不同时期指数值 Z 的代数和,这种线性关系并不能真正代表持续时间 t 和旱度值 x_i 之间的关系,为了考虑每个月对干旱严重程度的贡献,对上式进行变换得到:

西北地区东部:

$$X_i = 0.8547Z_i + 0.8406X_{i-1} \quad (3)$$

西北地区西部:

$$X_i = 1.133Z_i + 0.7209X_{i-1} \quad (4)$$

方程(3)、(4)即分别为西北地区东、西部干旱指数的计算公式,其中 X_{i-1} 为上月干旱指数,间接反映了时间因子的作用。

1.4 干旱指数的计算

根据公式(3)、(4)计算干旱指数时,要确定系列当中每个月当月结束旱段或湿润段的可能性,当月旱段或湿润段开始的可能性以及已经开始的旱段或湿润段的严重程度等几个方面的信息,帕默尔以量化的方式来确定旱段或湿润段的开始和结束,即当旱度值达到 -0.5 时,认为干旱期开始,旱度值恢复到 $-0.5 \sim +0.5$ 时,就认为干旱结束,从而可以得到某月内使干旱减轻到正常状态所需的水分即 Z_e 、使干旱严重程度减轻的 Z 值即“有效增湿量” U_w :

西北地区东部:

$$Z_e = -0.9835X_{i-1} - 0.5850 \quad (5)$$

$$U_w = Z_i + 0.0933 \quad (6)$$

西北地区西部:

$$Z_e = -0.6363X_{i-1} - 0.4413 \quad (7)$$

$$U_w = Z_i + 0.1231 \quad (8)$$

计算干旱(湿润)结束的概率 P_e 为:

$$P_e = \frac{V^*}{Q^*} = \frac{\sum_{j=0}^{j^*} U_{i-j}}{Z_e + \sum_{j=0}^{j^*} U_{i-j}} \quad (9)$$

2 区域干旱指数的建立

公式(3)、(4)是计算单站干旱指数的模式,要反映区域旱涝情况,就要建立区域干旱指数。通常情况下对于降水分布均匀的一个较小的区域,某月的旱涝状况的分布相对也

较均匀,其干旱指数的计算公式为:

$$X = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{ij} \quad (10)$$

式中, X 为某月区域干旱指数, X_{ij} 为 i 月 j 站干旱指数, m 为区域内的站点数。

西北地区地域广阔,地形复杂,即使在一个条件相似的区域,其降水条件和干旱状况的分布也有差别,同一时段中,同一区域内某些地方干旱,某些地方却很可能不旱甚至偏涝,尤其是近年来随着气候变化,这种不均匀性愈加突出,采用简单的指数平均无法反映出干旱的空间范围和强度,因此建立以下区域干旱指数:

$$L = \frac{4n_1 + 3n_2 + 2n_3 + n_4}{n} \quad (11)$$

$$H = \frac{4n_5 + 3n_6 + 2n_7 + n_8}{n} \quad (12)$$

L 、 H 分别为区域内涝指数和旱指数, n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别为区域内旱度值为极端湿润、严重湿润、中等湿润、轻微湿润的站点个数; n_5 、 n_6 、 n_7 、 n_8 则为旱度值为极端干旱、严重干旱、中等干旱、轻微干旱的站点个数。区域旱涝等级不仅与旱、涝的站数有关,也与单站的旱涝等级有关,由于旱、涝等级愈大,其对区域旱涝的影响愈大,因此对不同旱涝等级站点数加以不同的权重系数用以强调不同旱涝等级对区域旱涝的作用。计算西北地区各代表站 1961—2000 年逐月旱涝指数 L 、 H 、 $L-H$, 涝指数 L 反映了涝的范围和程度,旱指数 H 反映了旱的范围和程度,二者之差反映了旱涝的相对严重程度,根据涝指数 L 、旱指数 H 和二者之差的分布情况确定了西北地区区域旱涝的划分标准(表 3)。

表 3 西北地区区域旱涝等级划分标准

旱(涝)指数	旱(涝)指数差	旱(涝)性质
$L \geq 80$	$L-H \geq 65$	重涝
$80 > L \geq 60$	$65 > L-H \geq 25$	偏涝
$L(H) < 60$	$ L-H < 25$	正常
$H \geq 80$	$L-H \leq -65$	重旱
$80 > H \geq 60$	$-25 \geq L-H > -65$	偏旱

3 结果验证和干旱特征分析

为使旱涝等级更能真实地代表一个区域的旱涝状况,仍按照东、西两部分分别对其区域旱涝等级进行计算。由旱度值变化图(图2)看出,西北地区东部的区域旱度值在1961—2000年的40年中旱涝交替,波动性比较大,1990年代中期以后基本为负的旱度值。以西北地区东部1995—2000年各月的区域旱涝指数为例(表4),对计算的旱涝指数进行验证。1995年西北地区东部发生了较大范围的干旱,此后的5年中又有4年干旱,特别是以1997年的干旱较为严重。1995

年4—6月甘肃全省广大地区降水量较常年偏少4~9成,出现了近70年来罕见的严重春旱和春末初夏旱,与甘肃旱区相连的青海东部和陕西旱区也出现了罕见的春旱和春末初夏旱,9—11月降水量又较常年偏少,出现了明显秋旱,农田受灾减产,河流来水量减少,水库干涸,库塘蓄水减少,部分地方人畜饮水极度困难。1997年西北地区东部发生不同程度的春旱、夏秋连旱,甘肃陇东、陇南旱情较严重,是近60年来干旱范围最大、旱情最重的一年。大部分地方粮食减产,特别是秋粮减幅较大^[8]。从计算的旱度值来看,1995年6月西北地区东部65个站中有56个站的旱度值小于-1.0,有21个站小于-3.0,

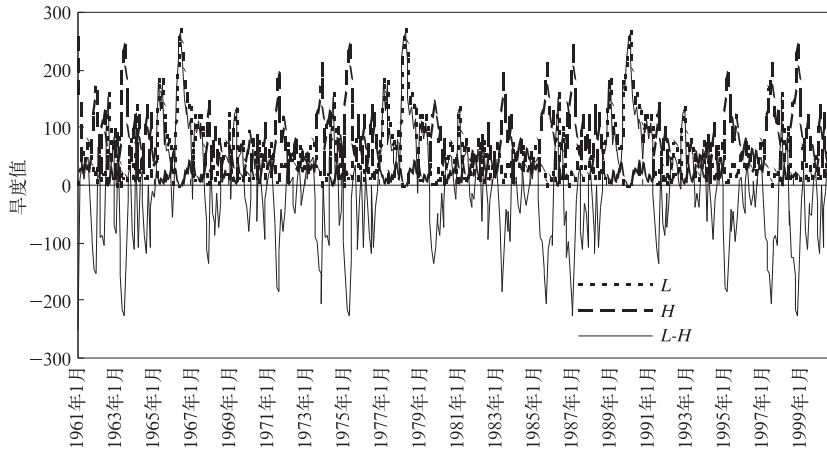


图2 西北地区东部1961—2000年区域旱涝值变化图

表4 西北地区东部1995—2000年各月区域旱涝等级

	L						H						L-H					
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	1995	1996	1997	1998	1999	2000	1995	1996	1997	1998	1999	2000
1月	44.62	50.77	44.62	20	20	46.15	12.31	50.77	33.85	107.7	176.9	40	32.31	0	10.77	-87.7	-157	6.15
2月	70.77	52.31	67.69	20	13.85	47.69	26.15	46.15	27.69	126.2	229.2	24.62	44.62	6.15	40	-106	-215	23.08
3月	53.85	56.92	75.38	55.38	12.31	24.62	56.92	44.62	32.31	9.23	240	52.31	-3.08	12.31	43.08	46.15	-228	-27.7
4月	26.15	35.38	70.77	98.46	9.23	12.31	92.31	70.77	23.08	1.54	138.5	100	-66.2	-35.4	47.69	96.92	-129	-87.7
5月	6.15	27.69	35.38	155.4	40	15.38	183.1	75.38	60	3.08	64.62	135.4	-177	-47.7	-24.6	152.3	-24.6	-120
6月	6.15	32.31	32.31	44.62	67.69	43.08	190.8	29.23	123.1	29.23	50.77	41.54	-185	3.08	-90.8	15.38	16.92	1.54
7月	16.92	67.69	26.15	64.62	78.46	13.85	130.8	30.77	124.6	12.31	44.62	123.1	-114	36.92	-98.5	52.31	33.85	-109
8月	35.38	32.31	20	98.46	13.85	23.08	78.46	44.62	166.2	13.85	95.38	63.08	-43.1	-12.3	-146	84.62	-81.5	-40
9月	33.85	24.62	6.15	12.31	9.23	33.85	115.4	60	160	83.08	120	43.08	-81.5	-35.4	-154	-70.8	-111	-9.23
10月	35.38	32.31	1.54	18.46	30.77	73.85	80	44.62	207.7	63.08	61.54	20	-44.6	-12.3	-206	-44.6	-30.8	53.85
11月	18.46	44.62	13.85	13.85	18.46	72.31	116.9	36.92	126.2	138.5	67.69	15.38	-98.5	7.69	-112	-125	-49.2	56.92
12月	26.15	20	24.62	18.46	13.85	69.23	86.15	56.92	120	144.6	67.69	23.08	-60	-36.9	-95.4	-126	-53.9	46.15

极端干旱出现在陇东。从计算的区域旱涝等级可以看出,1995 年 4—12 月连续 9 个月西北地区东部的区域旱涝指数均达到偏旱标准,其中 5—7 月、9 月、11 月达到重旱标准。1997 年 6 月份西北地区东部有 47 个站旱度值小于-1.0,有 3 个站小于-3.0,至 10 月份已有 56 个站旱度值小于-1.0,有 23 个站小于-3.0,1997 年 6—12 月连续 7 个月区域干旱指数达到重旱标准。对其他年份的干旱指数和区域旱涝指数与旱情记录进行对比分析,也均符合。

根据区域旱涝标准,从 1961 年 1 月到 2000 年 12 月的 480 个月中,西北地区东部发生区域性干旱 175 个月,发生频率为 36.5%,其中重旱 122 个月,发生频率为 25.4%;西北地区西部发生区域性干旱 75 个月,发生频率为 15.6%,其中重旱 21 次,频率为 4.4%,可见西北地区东部近几十年来干旱发生的次数和强度较西部地区更重,这与西北地区东部降水变率大,以及近几十年来西北地区东部降水的减少趋势有关。

以 5 年为时段统计区域干旱和严重干旱的发生频率,分别做出西北地区东部(图 3)

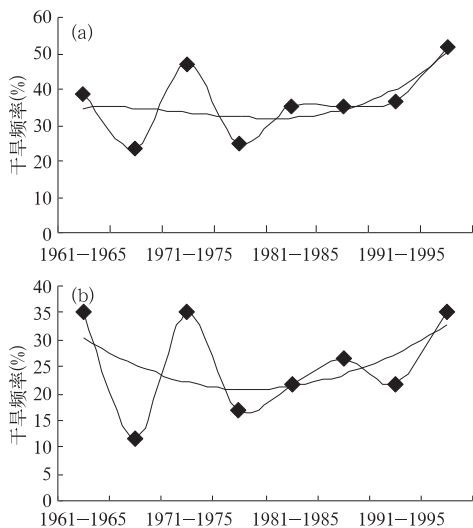


图 3 西北地区东部 5 年时段干旱频率(a)和严重干旱频率(b)变化图

和西部(图 4)1961—2000 年不同等级区域干旱频率随时间变化图,可以看出,西北地区东部 40 年来区域干旱频率和严重干旱频率较高的时段均为 3 个即:1961—1965 年、1971—1975 年、1995—2000 年。从长期演变趋势看,干旱和严重干旱频率都呈现出上升的趋势,尤其是 1990 年代中期后上升趋势更为明显。西北地区西部 40 年来区域性干旱频率有 2 个较高时段即:1961—1965 年和 1971—1975 年。而严重干旱发生频率的波动性较大,高值区仍出现在 1961—1965 年和 1971—1975 年,二者的长期演变均呈现出下降趋势。这些结果与近几十年来西北地区东部降水偏少而中西部地区降水量增加的趋势研究结果一致^[9]。

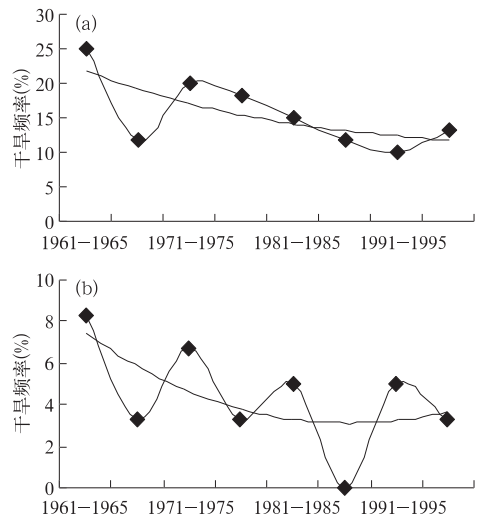


图 4 西北地区西部 5 年时段干旱频率(a)和严重干旱频率(b)变化图

应用功率谱方法进一步分析西北地区区域干旱发生的周期,结果表明西北地区东部 3、4、5、6 月份的区域干旱为典型的红噪音过程,且均具有 5~10 年的周期,西北地区西部区域干旱的周期性不明显。以西北地区东部 5 月份的区域干旱为例,以 40 年逐月的区域干旱指数时间序列资料做功率谱分析,取最大滞后时间 $m=10$,功率谱分析如图 5。可

以看出,在波数 2、3、4 时谱密度最大,用典型的红噪音过程检验,在波数 $I=2$ 时, $\alpha=0.05$ 的检验置信下限的红噪音谱 $S_K(2)=0.2709$,而平滑功率谱值 $S(2)=0.4268$, $S(2)>S_K(2)$,通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; $I=3$ 时, $S_K(3)=0.2709$, $S(3)=0.5776$, $S(3)>S_K(3)$,亦通过 $\alpha=0.05$ 信度的显著性检验; $I=4$ 时, $S_K(4)=0.216$, $S(4)=0.5071$, $S(4)>S_K(4)$,能通过显著性检验。因此,其周期 $T=2m/I$,存在 5~10 年的周期。

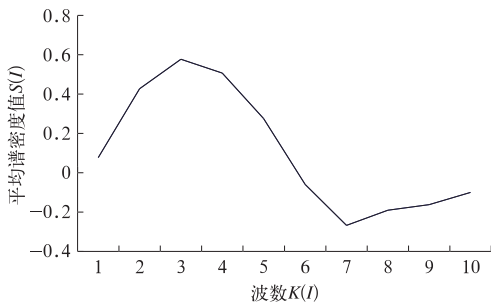


图 5 西北地区东部 1961—2000 年 5 月份区域干旱指数功率谱分析

4 小 结

(1) 单纯的 Z 指数虽然应用简便,但考虑因素过少,忽视了干旱的累积效应,帕默尔指数虽然考虑因子全面,但需要参数众多,计算过程繁琐,实用性受限,依据帕默尔干旱指数的基本原理和 Z 指数中水分异常指数的处理方法得到的干旱指数既考虑了前期降水的效应,又计算简便,旱涝等级的划分比较客观。

(2) 西北地区区域面积大,东西部条件差异显著,降水分布极不均匀,不考虑地域区别而仅采用一个干旱指数不符合本区实际。为此,将西北地区粗分为东西两部分,分别建立其干旱指数模式。

(3) 考虑到西北地区降水条件的不均匀性,简单的干旱指数平均不能真实反映区域的旱涝情况,因此在单站干旱指数的基础上,建立了区域干旱指数,在计算时将西北地区仍分为东西两部分,该指数既能反映出干旱范围大小,也能反映出干旱强度,适用于干旱监测的业务。

(4) 以西北地区东部为例,对干旱指数进行了验证,并进一步分析了西北地区的干旱特征,从长期演变趋势看,西北地区东部干旱和严重干旱的发生频率都呈现出上升的趋势,尤其是 1990 年代中期后上升趋势更为明显,而西北地区西部则呈现出下降趋势。西北地区东部 3、4、5、6 月份的区域干旱均具有 5~10 年的周期,而西北地区西部区域干旱的周期性不明显。

参 考 文 献

- [1] Yatagai A, Yasunari T. Variation of Summer Water Vapor Transport Related to Precipitation over and around the Arid Region in the Interior of Eurasian Continent[J]. Meteor Soc Japan, 1998, 76(5): 799-815.
- [2] 丁永建,叶佰生,周文娟. 黑河流域过去 40a 来降水时空分布特征[J]. 冰川冻土, 1999, 21(1): 42-48.
- [3] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 西北地区大气干旱指数的初步研究[J]. 高原气象, 1998, 17(4): 381-389.
- [4] 宫德吉. 干旱监测预警指数研究[J]. 气象, 1998, 24(8): 14-17.
- [5] 王劲松,冯建英. 甘肃省河西地区径流量干旱指数初探[J]. 气象, 2000, 26(6): 3-7.
- [6] 黄妙芬. 黄土高原西北部地区的旱度模式[J]. 气象, 1990, 17(1): 23-28.
- [7] 安顺清. 修正的帕默尔干旱指数及其应用[J]. 气象, 1985, 1(1): 17-19.
- [8] 瞿汶,刘德祥,杨苏华. 甘肃省 1994~2001 年极端干旱气候特征研究[J]. 甘肃气象, 2003, 21(1): 11-1.
- [9] 宋连春,张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143-148.