

文章编号: 1004-4574(2007)05-0030-07

# 甘肃黄土高原气象旱度模式研究

杨小利<sup>1,2</sup>, 杨兴国<sup>1</sup>

(1 中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2 甘肃省平凉市气象局, 甘肃 平凉 744000)

**摘要:** 干旱是限制甘肃黄土高原农业可持续发展最主要的自然灾害之一, 研究适合该区的干旱指标, 是进行有效干旱监测的基础。为了制定出考虑因素较全面、具有时空可比性的适合甘肃黄土高原情况的干旱指标, 依据帕默尔旱度模式的基本原理和方法, 针对甘肃黄土高原的实际情况, 从建模资料长度、站点密度、可能蒸散计算、土壤田间持水量和径流计算等几个方面对原有模式进行了修正, 用甘肃黄土高原 12 个代表站的资料, 建立了旱度模式, 并确定了权重因子。在此基础上, 计算了 20 个代表站点的气象旱度值, 并与实际旱情记载进行了对照检验。结果表明, 用该模式计算的旱度值与实际灾情吻合得较好, 能够反映出该区干旱程度的变化情况, 特别是对一些重大旱段。通过修正后的甘肃黄土高原的气象旱度模式与原美国帕默尔旱度模式和中国 1985 年修正的帕默尔旱度模式的比较, 进一步说明该模式适合应用于干旱评估和监测业务。

**关键词:** 甘肃黄土高原; 气象; 旱度模式

中图分类号: P426.616 文献标识码: A

## Research on meteorological drought severity model for Loess Plateau in Gansu

YANG Xiao-li<sup>1,2</sup>, YANG Xing-guo<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2 Pingliang Meteorological Bureau, Pingliang 744000, China)

**Abstract** Drought is one of the most important natural disasters that restricts the sustainable development of agriculture in Gansu Loess Plateau. A drought severity index is the foundation of monitoring drought disaster. In order to develop a meteorological drought severity index that considers meteorological factors more comprehensively and is comparable in space and time, a further modified meteorological drought severity model for Gansu Loess Plateau was developed on the basis of fundamentals and method of the Palmer Drought Severity Model. Stations, calculation of potential evapotranspiration and runoff etc. were revised in this model. The monthly meteorological index was computed at 20 representative stations from 1961 to 2000 by using the modified meteorological drought severity model for Gansu Loess Plateau, and the computed drought index was compared with the recorded drought situation. The result shows that the computed drought severity value is coincident with the practical drought situation, and can reflect the drought severity well, especially for those severe drought periods. The comparison was also made with the American PDSI and the China PDSI modified in 1985, which further indicates the reliability of this model.

**Keywords** Gansu Loess Plateau; meteorology; drought severity model

收稿日期: 2006-12-10 修订日期: 2007-10-20

基金项目: 中国气象局新技术应用推广项目 (CMATG2005M22); 兰州干旱气象研究所基金资助项目 (IAM200508)

作者简介: 杨小利 (1967-), 女, 高级工程师, 主要从事应用气象研究。E-mail: pylx1@sohu.com

甘肃黄土高原地处黄土高原西侧, 面积约为  $11.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 以陇山为界分为陇西黄土高原和陇东黄土高原, 该区远离海洋, 为典型的大陆性季风气候, 区域内 90% 以上的农田为雨养农田, 年平均降水量约为 185 ~ 630mm, 降水时空分布不均, 年际变率大。这里又是全国水土流失最严重的地区之一, 水热资源得不到充分利用, 不同时间尺度干旱频繁发生, 粮食产量低而不稳, 干旱成为困扰农业可持续性发展的主要限制因素。因此, 迫切需要研究适合本区的干旱指标, 以进行有效的干旱监测。

干旱的发生包含许多复杂过程和条件, 提出精确而普遍适用于本区的干旱指标有很大难度。张存杰<sup>[1]</sup>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标; 刘德祥<sup>[2]</sup>利用前期底墒和当时降水、气温确定了甘肃省服务干旱指标; 詹志明等<sup>[3]</sup>采用田间持水量差额与土壤最大有效含水量的比值作为干旱指数, 描述了黄土高原的干旱规律; 郭江勇等<sup>[4]</sup>利用甘肃黄土高原春季降水、气温资料, 计算了春季干湿指数, 划分了春旱标准, 分析了其时空分布特征和变化规律。这些指标在具体应用时均有其针对性和实用性, 但考虑因素较少, 缺乏时空可比性, 局限性较大。因此, 有必要利用较为成功的帕默尔旱度模式的原理, 建立适合本区的气象旱度模式。

## 1 帕默尔旱度模式在甘肃黄土高原的进一步修正

### 1.1 帕默尔旱度模式的基本原理和思路

干旱的形成和发展是水分亏缺缓慢累积的过程, 所以干旱强度应是水分亏缺量及其持续时间的函数。确定一个地区需要多少降水量才能保持与已确定的水分利用相适应的水资源后, 将它与实际降水量进行比较, 产生一个与气候适宜的水分供给距平。这个水分供给距平值在不同地区由于气候和土壤等条件的不同所代表的意义也不同。为了得到一个时空相对独立的干旱指数, 必须研制一个权重因子, 使水分距平值经权重后成为水分异常的可比较指标。

根据以上原理及思路, 1965 帕默尔<sup>[5]</sup>提出了“对当前情况气候上适应的降水”即 CAFEC (climatically appropriate for existing conditions) 降水的概念, 推导出一套分析计算干旱严重程度的完整方法 (PDSI 方法)。帕默尔认为, 实际降水与 CAFEC 降水的差值, 在某种程度上反映了天气中水分因素与正常情况时的偏差大小, 当对这一偏差加以适当地限制时, 就得到了可以进行时空对比的干旱严重程度指标。帕默尔还认为, 干旱不仅仅是水分短缺的气象现象, 它还表现为一个持续的时期。干旱严重程度是干旱持续时间长短和水分短缺大小的函数, 干旱取决于前期的和现在的气候条件, 即取决于降水、蒸发、径流和前期土壤含水量。

帕默尔干旱指标 (Palmer drought severity index, PDSI) 考虑因子全面, 水分亏缺量由水分平衡方法得到, 除降水外, 还考虑了蒸散 (发) 量、径流量、土壤含水量等因素, 并引入了气候适宜值的概念, 而不是采用简单的时段平均, 因此它的计算结果与实际基本吻合。是迄今为止应用较广泛和较成功的干旱指标之一。

帕默尔气象旱度模式的计算步骤大致可分两步: 一是根据水分平衡原理, 考虑蒸散 (发)、径流和土壤含水量等因素, 计算得出气候适宜降水量, 进而计算出水分距平指数, 二是再考虑时间持续因子的影响, 最后综合得出旱度模式。

### 1.2 帕默尔旱度模式应用于甘肃黄土高原时存在的问题

和其他干旱指标一样, 帕默尔旱度模式 (Palmer drought severity model, PDSM) 也存在一些不足, 原有的帕默尔旱度模式和我国 1985 年修正的帕默尔旱度模式<sup>[6]</sup>应用于甘肃黄土高原这一特定区域时, 存在以下几个方面的问题:

(1) 帕默尔旱度模式和我国修正的帕默尔旱度模式, 均适用于较大范围的干旱, 且站点密度太小, 资料年代仅延续至 20 世纪 80 年代, 对于甘肃黄土高原这一较小的区域和 90 年代以后的干旱, 其应用会受到限制。

(2) 在计算可能蒸散时原有模式采用的是桑斯威特方法, 这种方法只考虑了温度因素, 且假设温度低于零度时没有蒸散, 这种假设存在争议且不符于本区实际。

(3) 田间持水量的划分上过于粗糙, 仅以一个较大的范围来假定一个值, 如安顺清假设所有站的上层土壤田间有效持水量为 25mm, 下层只分为 175mm 和 125mm 两种, 这也与本区各站的实际田间持水量出入较大。

(4) 径流的处理上, 人为性较大, 均假定当土壤水达到饱和时即上、下层均达到田间持水量时才有径流

产生, 而本区的实际是当降水强度大于入渗速度时即有径流产生, 因此在径流的处理上要考虑本区实际进行修正。

### 1.3 修正方案

考虑以上问题, 在建立甘肃黄土高原气象旱度指标时做以下修正:

(1) 依据旱情记录、地理分布、土壤常数资料及气候资料全面性的原则, 选取西峰、平凉、定西、天水等 4 个站进行建模, 又选取环县、正宁、泾川、静宁、华家岭、通渭、秦安、清水等 8 站修正权重因子, 资料年限均由 1961 年至 2000 年, 资料选取的密度加大, 年限延长。

(2) 可能蒸散的计算采用了目前国际上通用的 FAO Penman-Monteith 公式进行计算<sup>[7]</sup>:

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{1}$$

式中  $E_{T0}$  ——参考蒸散量 ( $\frac{mm}{d}$ );

$R_n$  ——作物表面净辐射 ( $\frac{MJ}{m^2 \cdot d}$ );

$G$  ——土壤热通量 ( $\frac{MJ}{m^2 \cdot d}$ );

$U_2$  ——2m 高度处 24h 平均风速 ( $\frac{m}{s}$ );

$e_s$  ——饱和水汽压 (kPa);

$e_a$  ——实际水汽压 (kPa);

$\Delta$  ——饱和水汽压斜率 ( $\frac{kPa}{C}$ );

$\gamma$  ——干湿球常数 ( $\frac{kPa}{C}$ )。

(3) 尽量以各站的土壤水文常数的实测值代替原有的估计值, 对于没有测定的站或测定深度不够 1 m 的站, 根据其土壤质地性质和就近的实测站进行比较, 较准确地估计其水文常数值。将土壤分为 0~ 20 cm 和 20~ 100 cm 上、下两层, 对于各站的初始土壤有效含水量 (1960 年 12 月) 根据有关文献假定上层为 25mm, 下层为 125 mm。

(4) 采用  $R_0 = \rho P$  计算径流, 其中  $\rho$  为径流系数,  $P$  为降雨量。影响径流形成的主要因素有降雨强度, 持续时间和下垫面状况等。梁季阳认为<sup>[8]</sup> 由于黄土高原气候较干旱, 地表覆盖黄土厚达数米至数十米, 小强度降水往往不产流, 只有大强度暴雨才能产生径流, 产流方式为超渗产流。综合黄土高原地区径流系数的研究<sup>[9-10]</sup>, 按日降水量大于 39.9 mm 开始  $\rho$  为 0.1, 日降水量每增加 10 mm,  $\rho$  增加 0.05, 即逐日径流量  $R_0 = P \times [0.1 + 0.05 \times (P - 39.9) / 10]$ , 月径流量值为逐日径流量的合计值。

## 2 甘肃黄土高原气象旱度模式的建立

### 2.1 资料来源及处理

建模及修正时所用站点信息资料, 包括各站经度、纬度、海拔高度资料, 所用的气象资料, 包括日平均气温、日平均风速、日平均日照时数、日平均水汽压、日降水量、可能日照时数、日最高气温和日最低气温的逐日资料, 来源于甘肃气象局气象档案馆; 进行水分平衡计算时所用的土壤水文常数 (包括土壤质地、田间持水量、凋萎湿度) 及土壤湿度资料 (0~ 50cm 土壤湿度百分率) 来源于各农业气象试验站的观测数据。在进行资料处理时将日资料进行转换, 处理为逐月资料, 对空缺资料按内插法进行插补。

### 2.2 甘肃黄土高原气象旱度模式

应用帕默尔旱度模式的基本原理和思路, 在进行以上修正后, 建立了甘肃黄土高原的气象旱度模式即:

$$X_i = Z / 59.32 + 0.8619 X_{i-1} \tag{2}$$

式中  $X_i$  为本月旱度值,  $Z$  为本月水分异常指数,  $X_{i-1}$  为上月旱度值。而

$$Z = Kd \quad (3)$$

$$d = P - P' \quad (4)$$

式中  $d$  为水分距平值,  $P$  为本月的实际降水量,  $P'$  为气候适宜降水量, 因此  $d$  即为实际降水量和气候适宜降水量的差值, 它能够反映当前实际天气情况下和正常天气下的水分差额, 而

$$P = E_T + R + R_0 - L \quad (5)$$

其中  $E_T$  为气候适宜蒸散量,  $R$  为气候适宜补水量,  $R_0$  为气候适宜径流量,  $L$  为气候适宜失水量。

$$E_T = \alpha E_P \quad (6)$$

$$R = \beta R_P \quad (7)$$

$$R_0 = \gamma R_{P0} \quad (8)$$

$$\hat{L} = \delta L_P \quad (9)$$

式中  $E_P$ 、 $R_P$ 、 $R_{P0}$ 、 $L_P$  分别为可能蒸散、可能补水量、可能径流量、可能失水量。  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  分别为蒸散系数、补水系数、径流系数、失水系数, 其计算公式如下:

$$\alpha = \bar{E}_T / \bar{E}_P \quad (10)$$

$$\beta = \bar{R} / \bar{R}_P \quad (11)$$

$$\gamma = \bar{R}_0 / \bar{R}_{P0} \quad (12)$$

$$\delta = \bar{L} / \bar{L}_P \quad (13)$$

式中  $\bar{P}$ 、 $\bar{E}_T$ 、 $\bar{E}_P$ 、 $\bar{R}$ 、 $\bar{R}_P$ 、 $\bar{R}_0$ 、 $\bar{R}_{P0}$ 、 $\bar{L}$ 、 $\bar{L}_P$  分别为月平均降水量、月平均蒸散量、月平均可能蒸散量、月平均补水量、月平均可能补水量、月平均径流量、月平均可能径流量、月平均失水量、月平均可能失水量。式

(3)中的  $K$  为经过反复修正后的权重因子, 其表达式为:

$$K' = 2.0049 \lg \left( \frac{\bar{E}_P + \bar{R} + \bar{R}_0}{(P + L)D} \right) + 4.03 \quad (14)$$

$$K = \frac{433.26}{\sum_1 DK'} K' \quad (15)$$

式中,  $D$  为水分距平绝对值的平均值。故经最后权重的  $z$  值写为  $Z$

$$Z = Kd \quad (16)$$

即为最后所用的水分距平指数值。

### 2.3 干(湿)期开始和结束的确定

在应用式(2)计算旱度值时, 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干旱段或湿润段的严重程度等几个方面的信息, 当旱度值达到  $-0.5$  时, 认为干旱开始, 旱度值恢复到  $-0.5 \sim +0.5$  时, 就认为干旱结束。令  $X_i = -0.5$  可得

$$Z_e = -51.127 X_{i-1} - 29.66 \quad (17)$$

$Z_e$  即为某个月内使干旱减轻到正常状态的  $Z$  值。

如果天气比正常略干一点, 也可使干旱结束, 即有一个最小的  $Z$  值, 连续出现, 使  $X$  达到  $-0.5$  这时  $\Delta X_i = 0$   $X_{i-1} = -0.5$ , 则由(2)式得到  $Z = -4.1$  即结束干旱的水分距平指数应为

$$U_w = Z + 4.1 \quad (18)$$

$U_w$  为“有效增湿量”, 是使干旱严重程度减轻的  $Z$  值。使干旱结束的湿量应为该月湿量与前期湿量的累积和, 即

$$Z = Z_e + \sum_{j=0}^i U_{i-j} - U_j \quad (19)$$

式中  $U = U_w$ , 下标  $i$  是所考虑的月份,  $j$  表示干旱滞后的月份,  $j^*$  为出现湿期的第一个月;  $U_{i-j}$  表示将  $U$  从时间上向后加到第  $j^*$  个月, 并包括第  $j^*$  个月。

因此干旱结束的概率  $P_e$  可用下式表示

$$P_e = \frac{\sum_{j=0}^* U_{i-j}}{(z_e + \sum_{j=1}^* U_{i-j})} \tag{20}$$

$$V^* = \sum_{j=0}^* U_{i-j} \tag{21}$$

$$Q^* = \sum_{j=1}^* U_{i-j} \tag{22}$$

同样, 对于湿期, 令  $X_i = 0.5$  得到

$$Z_e = -51.127 X_{i-1} + 29.66 \tag{23}$$

有效增干量为

$$U_d = Z - 4.1 \tag{24}$$

### 3 甘肃黄土高原进一步修正的帕默尔旱度模式的验证

利用以上建立的甘肃黄土高原的帕默尔旱度模式计算了本区 20 个代表站 1961-2000 年逐月的帕默尔旱度值, 为了检验该模式的可靠性, 收集了 40 a 本区旱情记录的有关资料, 将各站计算结果与实际旱情进行对比, 结果表明进一步修正的甘肃黄土高原的气象旱度模式能较好地反映该区的实际旱情, 适用于甘肃黄土高原地区。以平凉 40 a 来持续时间较长的旱段和 1995 年全省性的大旱为例。

从计算的 1961 至 2000 年 40 a 逐月旱度值看, 平凉出现持续 10 个月以上的旱段共有 10 个, 依次是 1969 年 6 月 - 1970 年 7 月、1972 年 8 月 - 1973 年 7 月、1977 年 5 月 - 1980 年 6 月、1982 年 5 月 - 1983 年 3 月、1986 年 1 月 - 1987 年 5 月、1991 年 7 月 - 1992 年 5 月、1993 年 5 月 - 1994 年 5 月、1995 年 3 月 - 1996 年 5 月、1997 年 5 月 - 1998 年 2 月、1999 年 8 月 - 2000 年 12 月, 其中 1977 年 5 月 - 1980 年 6 月持续干旱 38 个月, 最早强度为 -4.6 (1979 年 6 月), 为极端干旱。而实际旱情是, 1977 至 1980 年, 平凉连年干旱, 其中从 1978 年 11 月至 1979 年 6 月长达 6 个多月降水偏少, 严重影响了小麦的生长和大秋作物的播种及出苗, 全区实种玉米 48 700  $hm^2$ , 其中有 9 300  $hm^2$  出苗不好, 有 1 700  $hm^2$  严重缺苗需翻种, 8 700  $hm^2$  高粱有一半出苗不好, 有 2 500  $hm^2$  需改种。18 700  $hm^2$  洋芋大面积没有出苗, 12 100  $hm^2$  谷子严重缺苗, 16 000  $hm^2$  糜子大部分因旱没有种上。经济作物面积为 21 900  $hm^2$ , 其中严重缺苗需改种的 7 800  $hm^2$ , 另有 5 300  $hm^2$  失种。

1995 年秋冬春夏四季连旱, 是有气象记录以来范围最大, 旱情最重的一年, 主要为春旱和春末初夏旱, 甘肃黄土高原 6 月份 20 个站中达中等或中等以上干旱的有 20 个站, 为 100%, 其中有 8 个站达极旱, 占 40%, 7 个站达重旱, 达 35%, 有 3 个站旱度达到 -5.0 (西峰 -6.14, 定西 -5.21, 静宁 -5.21), 最大旱度值出现在西峰 (-6.14), 图 2 为甘肃黄土高原 1995 年 6 月份的旱度值分布情况。实际旱情是, 1995 年的全省大旱以地处甘肃黄土高原的甘肃中

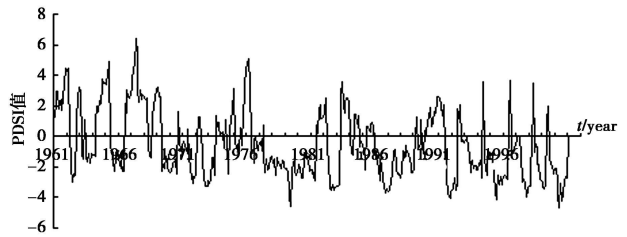


图 1 平凉 1961-2000 的逐月旱度值变化

Fig 1 Monthly change of PDSI value in Pingliang from 1961 to 2000

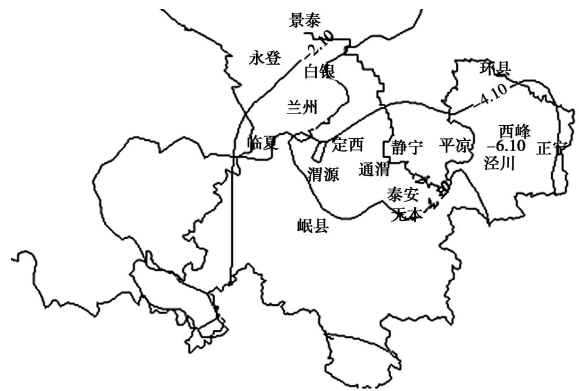


图 2 1995 年 6 月甘肃黄土高原旱度值分布

Fig 2 Distribution of PDSI value in Gansu Loess Plateau in June 1995

部最重, 3-6月全省降水普遍偏少 3~8成, 其中陇东及中部降水偏少 5~8成, 其降水量为有气象记录以来的最小值或次小值, 加之气温持续偏高, 蒸散量大, 土壤墒情极差, 干土层普遍有 8~20 cm, 不少地方干土层达 30cm 左右, 到 7月上旬全省有 73个县严重受旱, 受旱面积达  $208.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 全省减产粮食  $150\,000 \times 10^4 \text{ kg}$  是近 50a 来因旱减产粮食最多的年份。

用修正后的甘肃黄土高原的气象旱度模式所计算的其它站点的和时段的旱度值与实际旱情的对照也很相符, 表明修正后的旱度模式计算出的旱度值与历史旱情能较好地吻合, 对各个时期的旱情变化规律反应明显, 尤其是对一些重大的旱段反应明显, 能客观反映出本区的旱情的变化情况。

### 4 甘肃黄土高原修正的帕默尔旱度模式与原美国帕默尔旱度模式和我国 1985年修正的旱度模式计算结果的比较

用甘肃黄土高原修正后的帕默尔旱度模式、原美国的帕默尔旱度模式以及 1985年中国修正的帕默尔旱度模式计算的 1961-2000年平凉逐月旱度值的结果做出旱度值随时间变化图对 3种模式进行比较 (图 3), 图 4为 1961-2000年平凉逐月降水量距平百分率随时间变化图。

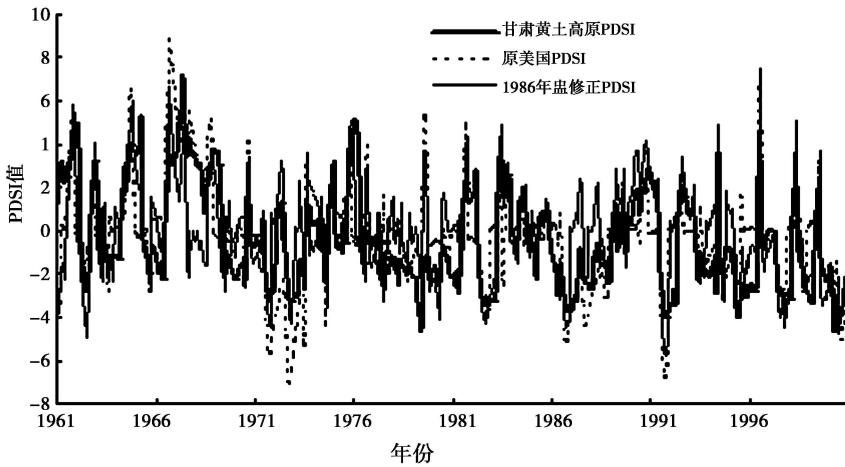


图 3 甘肃黄土高原 PDSI与原美国 PDSI和中国 1985年修正的 PDSI的比较 (平凉, 1961-2000年)

Fig 3 Comparison of newly modified value of PDSI for Gansu Loess Plateau with that of American PDSI and of Chinese PDSI modified in 1985 (Pingliang 1961-2000)

从图 3可以看出, 3种模式所计算的旱度值随时间变化在总的变化趋势上基本一致, 其中我国 1985年修正的帕默尔旱度模式和甘肃黄土高原帕默尔旱度模式的变化趋势更为接近, 但 3种模式所计算的旱度值在细节变化和变幅方面有较大差别, 三者所计算的旱度值随时间的变幅美国旱度模式 > 中国 1985年修正的模式 > 甘肃黄土高原的修正模式, 前两者出现明显的过大或过小值, 突变性特点也较明显, 而修正的甘肃黄土高原气象旱度模式的变幅相对要平缓一些。对帕默尔旱度模式修正的主要目的就是要使其取值更加接近  $\pm 4.0$  的范围, 因而修正后的甘肃黄土高原的气象旱度模式取值范围相应地更加合理一些。

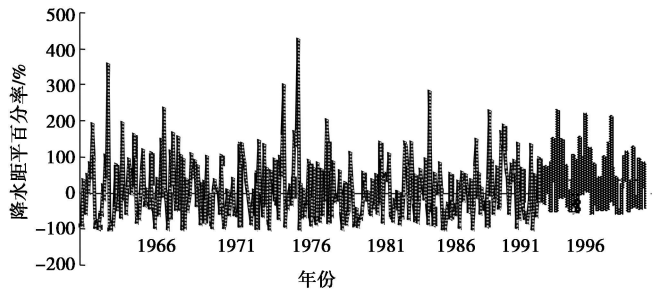


图 4 平凉 1961-2000年降水距平百分率变化

Fig 4 Change of anomaly percentage of precipitation in Pingliang from 1961-2000

与降水距平百分率的时间变化图 (图 4) 进行对比后发现, 原美国的旱度模式和我国 1985年修正的旱度模式对较短时期降水量变化的响应过于敏感, 在降水距平百分率短期内变大或变小时, 其旱度值即多发生相应变化, 这与干旱变化的渐进性和累积性不相符, 因而

用甘肃黄土高原的气象旱度模式计算的旱度值的变化更接近本区实际旱情的变化情况。

## 5 小结

帕默尔旱度模式是在半干旱半湿润地区气候干旱的背景下建立的,因而在理论上也应适用于本区,经过针对本区实际的本地化修正,得到适用于本区的旱度模式,用修正后的旱度模式的计算结果与历史旱情记录进行比较,发现具有较好的吻合性,尤其对一些重大旱段反映明显,而修正后的甘肃黄土高原的气象旱度模式与原美国的帕默尔旱度模式和1985年中国修正的帕默尔旱度模式计算结果的比较也进一步说明该模式的可靠性,能够应用于本区的干旱评估和监测的业务实际中去,为更好地防灾减灾提供了科学依据。

修正的甘肃黄土高原的气象旱度模式以单个站点的气象资料为基础,因而要用来评价区域干旱,就要应用区域内的平均气象要素,建立区域干旱指标。

虽然帕默尔干旱指标考虑了作物根层的水分平衡状况,在一定程度上具有农业意义,但没有与作物的供水特征联系,因而严格意义上仍是一个气象干旱指标,不能直接用来评价农业干旱。要将其应用于农业旱情的评估,就要建立逐日或逐旬的气象旱度模式,计算不同生育时段的旱度值,并结合作物对水分胁迫反应的敏感性及其它供水特征做进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 张存杰,王宝灵,刘德祥.西北地区大气干旱指标的初步研究[J].高原气象,1998,17(4):381-389.
- [2] 刘德祥,王宝灵,瞿汶.甘肃省服务干旱指标的初步研究[J].甘肃气象,1998,16(3):17-20
- [3] 詹志明,彭云秀,王凯胜,等.黄土高原干旱指数[J].地域研究与开发,1999,18(2):25-28
- [4] 郭江勇,李耀辉,王文,等.甘肃黄土高原春旱的气候特征及预测方法[J].中国沙漠,2004,24(2):211-217.
- [5] Palmer W C. Meteorological Drought[D]. NO. 45 Washington, D. C. U. S Weather Bureau, 1965
- [6] 安顺清,邢久星.修正的帕默尔干旱指数及其应用[J].气象,1985,1(12):17-19
- [7] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration[D]. Rome: FAO, 1998: 24
- [8] 梁季阳.黄土高原暴雨径流及产沙的分析与模拟[J].水土保持学报,1992,6(2):12-16
- [9] 刘静.宁南山区小麦干旱监测与灾损评估模型研究[J].中国生态农业学报,2003,11(4):143-147
- [10] 杨兴国.黄土高原雨养农业区雨水集蓄应用研究[J].自然资源学报,2004,19(3):300-306.