

# 径流量 Z 指数与 Palmer 指数对河西干旱的监测<sup>\*</sup>

王劲松<sup>1)</sup> 黄玉霞<sup>2)</sup> 冯建英<sup>1)</sup> 王宝鉴<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (中国气象局兰州干旱气象研究所 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

<sup>2)</sup> (兰州中心气象台, 兰州 730020)

## 摘 要

利用河西内陆河水文代表站 1959—2004 年逐月径流量资料、内陆河流域灌溉区 1949—2001 年耕地面积及代表站 1961—2005 年的气象资料, 通过对径流量进行正态化处理来确定径流量 Z 指数, 并以径流量 Z 指数作为径流干旱指数, 对旱涝等级进行划分; 考虑径流量 Z 指数的旱涝等级与农业灌溉用水实际情况之间的关系, 给出了径流量 Z 指数的灌溉指标。将径流量转化为降水量, 改进 Palmer 旱度模式, 且在作改进后, 又将潜在蒸散量的算法由利用桑斯威特公式改为利用彭曼公式。结果表明: 将径流量考虑到 Palmer 干旱指数中并改变蒸散量的算法, 使得该指数对河西灌溉区干旱情况的监测均有所改善。对照河西地区的干旱事件, 径流量 Z 指数监测到的干旱情况, 比 Palmer 干旱指数改进前、后监测到的干旱情况效果更佳。径流量 Z 指数能更真实地反映河西灌溉区干旱状况。

**关键词:** 河西灌溉区; 内陆河径流量; 径流量 Z 指数; Palmer 干旱指数

## 引 言

河西地区是介于祁连山和马鬃山之间的一条狭长地带。尽管这一地区常年少雨, 年平均降水量为 100~150 mm, 最少的地方甚至不足 40 mm, 但这里却是西北干旱区重要的绿洲之一, 还是甘肃省主要的商品粮基地。如果仅依靠自然降水来维持该地区农业生产需求, 是远远不够的, 这里农业生产主要得益于其境内 3 条内陆河的灌溉, 这 3 条内陆河从西到东分别属于疏勒河流域、黑河流域和石羊河流域。

由于内陆河的水资源状况对农业生产起到至关重要的作用, 因此对内陆河径流量的研究也就十分重要。已有研究曾探讨了气候因子与流量之间的关系<sup>[1-5]</sup>, 揭示了流量的影响因子及其变化特征, 但对由于气候因子影响造成流量的变化程度没能给出一个明确划分, 而流量变化程度对农业灌溉用水有重要影响, 为了对径流量变化程度与农业灌溉的关系作一定量描述, 王劲松等<sup>[6]</sup>通过对河西 3 条内陆河月径流量变化程度的分析, 确定了对农业生产有直接影响的径流量干旱指数——径流量 Z 指数, 并对

其进行了等级划分。本文就是利用径流量 Z 指数对河西地区干旱进行监测, 并与改进前后的 Palmer 干旱指数(Palmer drought severity index, 简称 PDSI) 监测结果进行对比分析。用以监测干旱的指数很多<sup>[7-9]</sup>, 这里之所以选用 PDSI 对干旱的监测结果与径流量 Z 指数的监测结果进行比较, 是充分考虑了 PDSI 在干旱监测应用中的广泛性<sup>[10-11]</sup>。本文的 PDSI 是利用安顺清等<sup>[12-13]</sup>修正的适合我国的气象旱度模式。同时, 考虑河西地区的灌溉特点, 将径流量转化为降水量加入到 PDSI 中, 以体现灌溉区的实际情况。此外, PDSI 中对潜在蒸散量的计算采用桑斯威特方法<sup>[14]</sup>, 该方法在计算中考虑的因素只有温度, 且假设当温度低于 0℃ 时没有蒸散, 而本文采用彭曼公式<sup>[15]</sup>来计算潜在蒸散量。

## 1 资 料

选取昌马堡、莺落峡、九条岭分别为疏勒河、黑河、石羊河 3 条内陆河流域的水文代表站; 选取酒泉、张掖、武威分别为 3 条流域所辖灌溉区的气象代表站。所用资料包括昌马堡、莺落峡、九条岭

\* 科技部科研院所社会公益研究项目“中国干旱气象灾害监测预警方法研究”(2004DIB5J192)和甘肃省气象局“十人计划”共同资助。  
2008-06-11 收到, 2009-05-26 收到再改稿。

1959—2004年逐月径流量;疏勒河、黑河、石羊河流域灌溉区1949—2001年耕地面积资料;酒泉、张掖、武威1961—2005年逐月降水量、气温、相对湿度、小型蒸发量、风速、日照百分率。

## 2 干旱指数的确定

### 2.1 灌溉区的径流量干旱指数——径流量Z指数

因为疏勒河、黑河、石羊河3条内陆河的汛期径流量均能占各自年径流量的75%以上,其中石羊河达到了80%以上<sup>[6]</sup>,所以内陆河汛期径流量的多寡可以代表年径流量的丰枯情况,利用1959—2004年昌马堡、莺落峡和九条岭逐月径流量资料,对这3条内陆河汛期径流量进行分析和计算。

由于径流量遵循Pearson III型分布<sup>[16]</sup>,因而可通过对径流量进行正态化处理来确定径流量干旱指数,具体公式为:

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

式(1)中, $C_s$ 为偏态系数, $J_i$ 为径流量的标准化变量,二者均可由径流量资料序列计算得出:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{nS^3}, \quad (2)$$

$$J_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (3)$$

其中, $S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ 为均方差。

于是根据径流量Z指数的理论频率分布,以径流量Z指数作为一种径流干旱指数,对旱涝等级进行划分(表1)。

表1 径流量Z指数旱涝等级标准

Table 1 Runoff-denoted Z index dry/wet grades

等级	累积频率	Z值	旱涝类型	理论频率分布/%
1	>95%	$Z > 1.6448$	涝	5
2	70%~95%	$0.5244 < Z \leq 1.6448$	偏涝	25
3	30%~70%	$-0.5244 \leq Z \leq 0.5244$	正常	40
4	5%~30%	$-1.6448 \leq Z < -0.5244$	偏旱	25
5	<5%	$Z < -1.6448$	旱	5

根据径流量干旱指数Z的旱涝等级,可以判断径流量的丰欠。这里将径流量旱涝等级划分成5级,仅表明了内陆河径流量的大小情况,而在实际应用中,可根据Z指数的旱涝等级作具体的农业灌溉

安排。只要径流量的旱涝等级为1,2,3级,就能够满足农业灌溉的正常需要。考虑到农业灌溉是人为进行的过程,因而来水的丰沛并不意味着农田会出现涝的情况,人们对充沛的内陆河水可以合理利用,所以,径流量的涝、偏涝和正常的等级,对于农业灌溉来说可合并为一级,记为正常。

而当径流量旱涝等级为4,5级,即偏旱、旱时,说明内陆河径流量欠缺,将对农业灌溉的正常用水有影响。就径流量的旱等级而言,表明内陆河的径流量确实不能满足农业用水的需要,这时可考虑为极端干旱。当径流量为偏旱等级时,说明内陆河径流量不足以满足农业用水,这时对偏旱的程度作如下规定:在偏旱等级中,取Z指数的中间值,即-1.0846。当 $-1.0846 < Z < -0.5244$ 时,认为径流量的偏旱程度较重,为中旱。当 $-1.6448 \leq Z \leq -1.0846$ 时,认为径流量的偏旱程度很重,为重旱。

综上所述,在同时考虑干旱指数的旱涝等级和农业灌溉用水的实际情况后,径流量Z指数值在实际农业灌溉应用中,可分为如下4个等级,I级: $Z \geq -0.5244$ ,正常;II级: $-1.0846 < Z < -0.5244$ ,中旱;III级: $-1.6448 \leq Z \leq -1.0846$ ,重旱;IV级: $Z < -1.6448$ ,极旱。

### 2.2 PDSI

干旱是指在数月或数年内,水分供应持续低于气候上所期望的水分供给。干旱指数是水分亏缺量与持续时间的函数。具体的计算方法和等级引自安顺清等<sup>[12-13]</sup>的研究成果。

在计算灌溉区的PDSI时,考虑将灌溉区的径流量转化为流域的降水量,再加入到原来计算PDSI时包含的降水量一项中。径流量转化为降水量的算法为:由径流量转化得到的降水量=径流量/耕地面积。

PDSI计算潜在蒸散量采用的是桑斯威特方法,本文对潜在蒸散量的计算采用改进的彭曼公式<sup>[17-18]</sup>:

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} [R_a(1-r)(0.29\cos\Phi + 0.52n/N)] - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} [\delta T_a^4(0.10 + 0.90n/N)(0.56 - 0.08\sqrt{e_d})] + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} [0.26(1+h/20000) \times (1+u/100)(e_a - e_d)] \quad (4)$$

式(4)中, $\Delta$ 为温度 $T_a$ 时的饱和水汽压曲线斜率; $\gamma$ 为干湿球温度公式常数; $R_a$ 为无大气时达到单位面积地面上的太阳总辐射量; $r$ 为下垫面反射率; $\Phi$ 为

纬度; $n/N$  为日照百分率; $e_d$  为实际水汽压; $e_s$  为温度  $T_s$  时的饱和水汽压; $h$  为海拔高度; $u$  为 2 m 高度处的风速。该方法在计算  $\gamma$  时采用了海拔高度对气压数值的变化以及在计算辐射量时  $R_a$  采用纬度,因而可适用于任何海拔高度与纬度地区。

### 3 径流量 Z 指数与 PDSI 监测结果对比分析

#### 3.1 径流量 Z 指数的监测结果

依据 2.1 节所给出的径流量 Z 指数灌溉等级,

计算 3 条内陆河历年来的灌溉等级值,从而可判断灌溉区的干旱状况,实现对灌溉区的干旱监测。图 1 为 1959—2004 年 3 条内陆河历年径流量 Z 指数灌溉等级的演变情况。可以看出,总体上来说,疏勒河和黑河近 46 年来,Z 指数值呈下降趋势,表明干旱状况有所缓解,其中疏勒河流域 Z 指数值下降趋势更为明显,黑河流域 Z 指数值的下降趋势不明显,而石羊河的情况不容乐观,近 46 年来 Z 指数值呈上升趋势,是趋于向干旱化发展的。

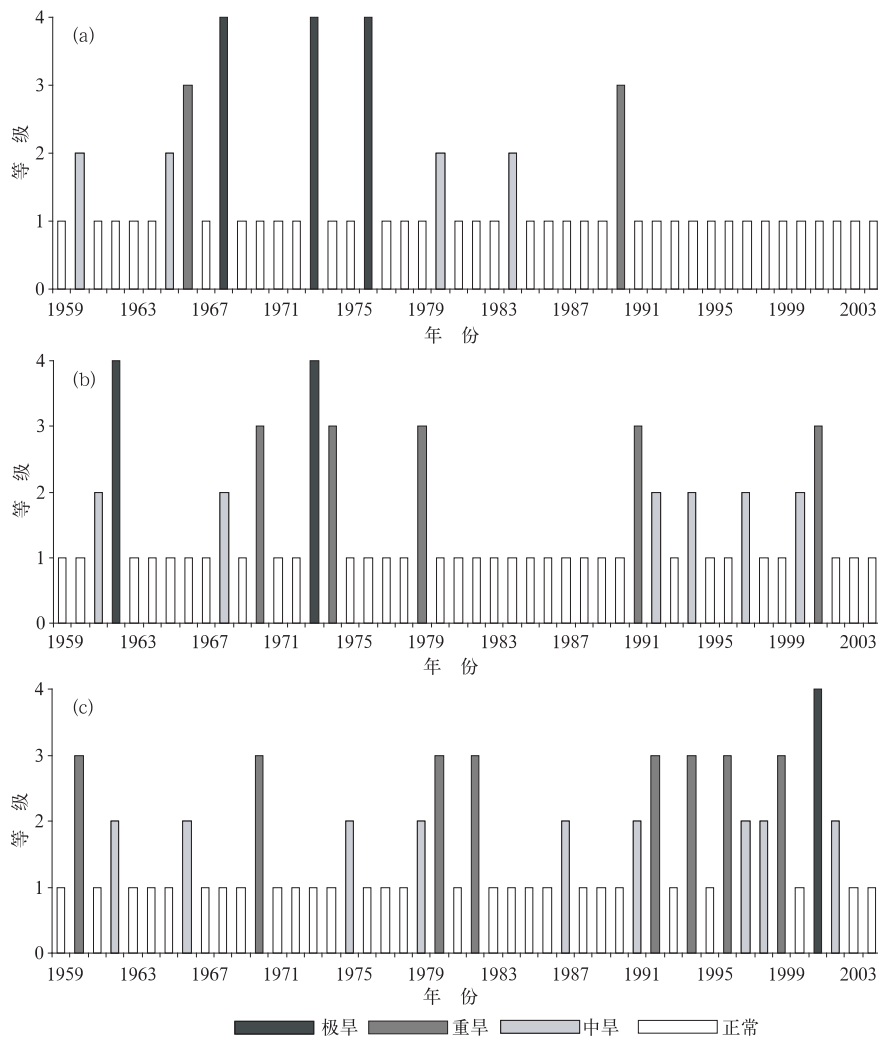


图 1 1959—2004 年 3 条内陆河流域径流量 Z 指数灌溉等级演变

(a) 疏勒河, (b) 黑河, (c) 石羊河

Fig. 1 The evolution of runoff-denoted Z index irrigation grades of three inland rivers during 1959—2004 (a) Shule River, (b) Hei River, (c) Shiyang River

#### 3.2 PDSI 的监测结果

对疏勒河、黑河和石羊河流域的 PDSI 分 3 种

方案进行计算:① 仅考虑降水量的原始的 PDSI;② 加入径流量计算得到的 PDSI;③ 在加入径流量的

基础上对潜在蒸散量的计算采用彭曼方法得到的PDSI。相应地,得到3种方案下的监测结果。由于在计算径流量转为降水量时要用到耕地面积,而收集到的耕地面积资料距今最近的年限为2001年,因此计算1961—2001年的PDSI。

疏勒河流域:由3种方案计算得到的疏勒河近41年PDSI均呈增加趋势,即干旱状态在减轻,在逐渐向湿润状态转变。

黑河流域:由方案1计算得到的年PDSI在近41年呈略增加趋势;由方案2得出的PDSI在近41年呈线性下降趋势;方案3中近41年PDSI无明显的线性增减趋势。

石羊河流域:由方案1计算得到的年PDSI在近41年中呈增加趋势;由方案2和方案3计算得到的石羊河流域年PDSI在1961—2001年中均呈下降趋势,即干旱状态在加重,在逐渐向干旱化转变。

### 3.3 径流量Z指数、PDSI与实际旱情对照

根据3.1和3.2节的分析,从总体趋势上来看,径流量Z指数和PDSI对灌溉区干旱趋势的监测结果一致,即疏勒河流域有干旱趋于减弱的趋势;黑河流域的干旱变化趋势不明显;而石羊河流域有干旱趋于加重的趋势。但上面仅从趋势变化上来讨论,下面通过河西地区实际旱情的记载,来对指数监测的干旱结果进行逐年比较。

根据《中国气象灾害大典·甘肃卷》<sup>[19]</sup>记载,1961,1962,1966,1970,1974,1979,1981,1984,1985,1987,1990,1991,1992,1994,1998年和1999年,在河西地区出现了不同程度的干旱。

将3种方案计算得到的PDSI、径流量Z指数所指示的干旱等级,与通过文献[19]记载的河西地区的实际干旱状况进行对比(表2)。

表2 3种方案计算得到的PDSI、径流量Z指数所指示的干旱等级及其与实际旱情的对比  
Table 2 The dry grades calculated by the PDSI with three schemes and runoff-denoted Z index and their comparison to actual drought situation

流域	干旱等级	PDSI			径流量Z指数
		方案1	方案2	方案3	
疏勒河	极旱	1965,1966,1967,1968,1977,1978,1979,1980,1990,1991,1992	1976	1961	1968,1973,1976
	重旱		1961,1962,1965		1966,1990
	中旱	1969,1976	1963,1977,1991,1995	1962,1965,1997	1965,1980,1984
黑河流域	极旱	1966,1967,1968,1978,1979,1980,1990,1991,1992,2001	1973,1974		1962,1973
	重旱	1965	1992		1970,1974,1979,1991,2001
	中旱	1977	1991,1997,2001	1961,1962,1984,1985,1991,1997,2001	1961,1968,1992,1994,1997,2000
石羊河流域	极旱	1965,1966,1967,1968,1977,1978,1979,1980,1990,1991,1992,2001	1991		2001
	重旱	1981,1989			1970,1980,1982,1992,1994,1996,1999
	中旱		1981,1987,1999	1981,1991	1962,1966,1975,1979,1987,1991,1997,1998

注:加下划线年份表示利用干旱指数监测到的干旱年份与实际一致,其余为干旱指数监测到有干旱但实际并没有出现干旱的年份(可视为空监测年份)。

对照实际的干旱年份,表3给出用不同干旱指数漏监测的干旱年份(即实际出现了干旱的年份,但用干旱指数未监测出来)。由表3可以看到,用径流量Z指数方法监测干旱,漏监测的年份最少。

文献[19]记载了出现较为明显干旱事件的年份共16年。下面对不同方案下PDSI、径流量Z指数监测干旱的优缺点做定性的评价:

$$\text{监测的正确性} = \frac{\text{监测正确的年数}}{(16 + \text{空报年数})} \times 100\%$$

将3条内陆河视为一个整体来考虑,即当同一指数监测到2条或3条内陆河出现相同的干旱年份(无论是空报还是漏报),都只记为1个年次。图2为不同方案下PDSI、径流量Z指数监测干旱的对比,从监测的正确性来看,以径流量Z指数的监测效果最佳,而改进前的PDSI(即方案1)的监测效果最差,方案2 PDSI的监测效果要稍好于方案3 PDSI,但方案3 PDSI的空监测次数要明显少于方案2 PDSI。

表 3 3 种方案计算得到的 PDSI 以及径流量 Z 指数漏监测的干旱年份

Table 3 The excluding drought years by using the PDSI with three schemes and runoff-denoted Z index to monitor

文献[19]记载 的干旱年份	PDSI			径流量 Z 指数
	方案 1	方案 2	方案 3	
1961	×			
1962	×			
1966		×	×	
1970	×	×	×	
1974	×		×	
1979		×	×	
1981				×
1984	×	×		
1985	×	×		×
1987	×		×	
1990		×	×	
1991				
1992			×	
1994	×	×	×	
1998	×	×	×	
1999	×		×	

注:×表示漏监测的干旱年份。

### 3.4 径流量 Z 指数空监测的原因分析

从图 2 看到,径流量 Z 指数的空监测次数最多,分析其原因,与所用划分干旱事件的标准应该有很大关系,本文的前述分析是以《中国气象灾害大典·甘肃卷》<sup>[19]</sup>记载的干旱事件作为标准,但确切地说,该文献记载的河西地区的干旱只代表了比较强的并造成了灾害的干旱事件,这势必会遗漏一些强度较弱的干旱事件。这里再利用甘肃省灾害普查数据<sup>[20]</sup>(普查年限为 1983—2008 年)对河西干旱的普查结果,该数据集的资料显示,在径流量 Z 指数

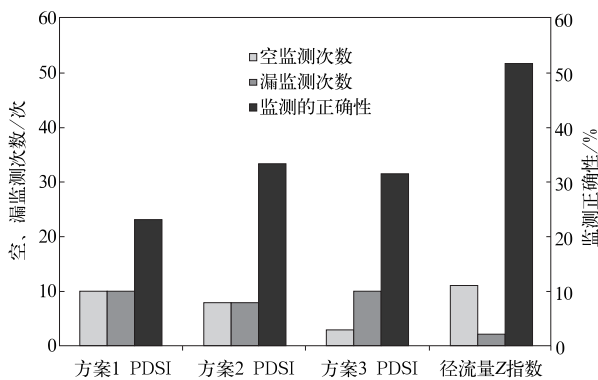


图 2 不同方案下 PDSI、径流量 Z 指数干旱监测结果比较

Fig. 2 The comparison of drought monitor correctness between PDSI with different schemes and runoff-denoted Z index

的空监测年份 1996,1997,2000 年和 2001 年,河西地区都有不同程度的干旱发生,也就是说,从实际调查的情况来看,径流量 Z 指数对这些年的干旱监测是正确的,并不是空监测。

从表 2 可以看到,径流量 Z 指数在极早年份的空监测较多,但值得注意的是,这些空监测的年份,主要发生在 20 世纪的 60 年代和 70 年代(如 1968,1973 年和 1976 年),文献[19]统计的干旱事件也只能以历史资料记载下来的灾情为依据,难免会有遗漏。

## 4 结论与讨论

为适应甘肃河西灌溉区干旱监测的需要,针对河西地区农业生产依赖于内陆河径流量的特点,本文通过分析径流量的演变,从而确定了径流量 Z 指数及其灌溉等级,应用 Z 指数来监测河西的干旱,并与改进前后的 Palmer 指数对河西干旱监测结果进行了比较,主要结论如下:

1) Z 指数与改进前 Palmer 指数的干旱监测结果在反映河西旱情方面有差异,Z 指数对河西干旱监测的效果比 Palmer 指数更接近实际。

2) 基于改进前的 Palmer 指数,并通过考虑将径流量转化为降水量以及改变计算潜在蒸散两种方法来改进 Palmer 指数。发现考虑了将径流量转化为降水量的方案 2 PDSI 的监测结果,要优于改变计算潜在蒸散量方法的方案 3 PDSI。改进后的 Palmer 指数在河西地区监测到的干旱情况较之改进前要好。

3) 比较径流量 Z 指数的干旱监测结果和改进后 Palmer 指数的监测结果,在反映河西旱情上,仍以 Z 指数的监测结果更接近实际。说明径流量 Z 指数的干旱监测结果更适合于对河西灌溉区的干旱监测。

Z 指数对河西干旱监测的效果比改进前后 Palmer 指数更接近实际。主要原因在于,河西地区的年平均降水量不足 150 mm,最少的地方甚至不足 40 mm,所以降水量的多少对判断河西的干旱而言,没有实际指示意义,影响河西农业需水和干旱与否的主要因子是内陆河的径流量。而 Z 指数是以径流量为变量的干旱指数,它直接考虑了径流量的变化对干旱带来的影响,从而抓住了主要原因;但 Palmer 指数则主要是以降水量为变量的干旱指数,

因此可以看到仅考虑降水量的方案 1 PDSI,在本文讨论的 4 种干旱指数对干旱的监测中,是效果最差的。

即便是考虑了将径流量转化为降水量,从而加入到 PDSI 计算公式中的方案 2 PDSI,以及在方案 2 的基础上又改变计算潜在蒸散量方法的方案 3 PDSI,也没有 Z 指数对干旱监测的效果好。本研究认为,在 PDSI 的计算中包含了诸如降水量、气温、土壤含水量、田间持水量等因素,并且还需要计算土壤水分平衡各分量及土壤上下两层间水分的交换,由于与土壤水分有关的数据目前还存在比较大的误差,况且对计算而言,公式中用到的要素越多,要素之间相互影响和反馈所带来的误差累积就可能越大。而无论是方案 2 还是方案 3 的 PDSI,都以 PDSI 的计算为基础,仍然包含了上述计算中存在的一些问题。所以实际的监测结果显示,考虑了较多要素的 PDSI 指数在河西地区的干旱监测中,不一定有它的实用价值。

**致 谢:** 感谢甘肃省气象局张强研究员和董安祥研究员在论文修改过程中给予的指导。

### 参 考 文 献

- [1] 胡天清. 黑河春末初夏径流量与气象要素的关系. 高原气象, 1988, 7(4): 374-376.
- [2] 李栋梁,陈丽萍. 河西走廊黑河流域的气候特征及其预报. 应用气象学报, 1991, 2(3): 319-324.
- [3] 孙国武,刘晓东,陈葆德. 夏季青藏高原地面热源对黄河上游流量及径流的影响. 应用气象学报, 1993, 4(1): 22-29.
- [4] 袁玉江,桑修诚. 甘肃省河西地区气候对流量影响的初步分析. 高原气象, 1998, 17(2): 211-216.
- [5] 冯建英. 河西内陆河春季流量变化特征的分析 and 预测. 甘肃气象, 1998, 16(4): 38-41.
- [6] 王劲松,冯建英. 甘肃省河西地区径流量干旱指数初探. 气象, 2000, 26(6): 3-7.
- [7] 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究. 应用气象学报, 1997, 8(1): 26-32.
- [8] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 西北地区大气旱涝指标的研究. 高原气象, 1998, 17(4): 381-389.
- [9] 邹旭恺,张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-687.
- [10] 王越,江志红,张强,等. 用 Palmer 湿润指数作西北东部冬小麦旱涝评估. 应用气象学报, 2008, 19(3): 342-349.
- [11] 郭安红,刘巍巍,安顺清,等. 基于改进失水模式和增加建站点的 Palmer 旱度模式. 应用气象学报, 2008, 19(4): 502-506.
- [12] 安顺清,邢久星. 修正的帕默尔干旱指数及其应用. 气象, 1985, 11(12): 17-19.
- [13] 安顺清,邢久星. 帕尔默旱度模式的修正. 气象科学研究所院刊, 1986, 1(1): 75-82.
- [14] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev*, 1948, 38: 55-94.
- [15] Penman H L. Evaporation over the British Isles. *Quar J Royal Meteor Soc*, 1950, 76: 372-383.
- [16] 屠其璞,王俊德,丁裕国,等. 气象应用概率统计学. 北京:气象出版社, 1984: 41-42; 203-206.
- [17] 张新时. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(1). 植物生态学与植物学学报, 1989, 13(1): 1-9.
- [18] 尚宗波. 中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析. 生态学报, 2001, 21(4): 528-537.
- [19] 董安祥. 中国气象灾害大典·甘肃卷. 北京:气象出版社, 2005: 82-119.
- [20] 兰州区域气候中心. 甘肃省灾害普查数据. 2008.

## The Drought Monitoring in Hexi Area Using the Runoff-denoted Z Index and the Palmer Index

Wang Jinsong<sup>1)</sup> Huang Yuxia<sup>2)</sup> Feng Jianying<sup>1)</sup> Wang Baojian<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Institute of Arid Meteorology of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020)

<sup>2)</sup> (Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020)

### Abstract

Hexi is a typical irrigation agricultural area, it is impossible to grow crops based on the natural precipitation, which is only 100—150 mm every year on average. The runoff of inland river is the main water resource for agriculture. That means the high/low runoff is the main determination of dry/wet condition in

