



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.017

祁靓雯, 钱会, 高盼盼. 可利用降雨量 Z 指数法的西安市气象干旱特征[J]. 2016, 14(2): 93-98, 124.

QI Jing wen, QIAN Hui, GAO Pan pan. Drought characteristics of Xi'an city based on Z index of available rainfall[J]. 2016, 14(2): 93-98, 124. (in Chinese)

可利用降雨量 Z 指数法的西安市气象干旱特征

祁靓雯^{1,2}, 钱会^{1,2}, 高盼盼^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 根据西安市 1951 年-2013 年气象资料确定可利用降雨量的 Z 指数以表征气象干旱强度, 并将干旱强度划分为 7 个等级。分析该地区的干旱特征, 发现: 从季节尺度的长期变化趋势来看, 干旱主要出现在春、夏、冬三季, 四个季节均向干旱方向发展; 西安干旱强度在 63 年中总体呈上升趋势, 20 世纪 90 年代以后干旱频率和强度较之前均有较大提升; 从干旱趋势突变分析的结果来看, 突变年份为 1957 和 1958 年, 1965 年后只存在向偏旱方向发展的趋势并且在 1997 年之后更加显著。通过与 Palmer 指数法和传统 Z 指数法对西安典型干旱年份的评估结果对比, 认为可利用降雨量 Z 指数法对西安市气象干旱特征的分析具有较强的客观性。

关键词: 可利用降雨量; 干旱强度; Z 指数; 干旱特征; 西安市

中图分类号: P462.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0093-06

Drought characteristics of Xi'an city based on Z index of available rainfall

QI Jing wen^{1,2}, QIAN Hui^{1,2}, GAO Pan pan^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the meteorological data of Xi'an city from 1951 to 2013, the Z index of available rainfall was calculated to propose the characterization of drought strength, which was divided into 7 levels. From the results of the drought characteristics analysis, we found that: (1) Drying appeared in spring, summer and winter, and every season showed a drying trend according to seasonal difference of drought. (2) The annual Z index showed an increasing trend in the last 63 years. The frequency and strength of drought had increased remarkably since 1990s. (3) Mann-Kendall test showed that the sudden change years were 1957 and 1958, and drying trend had been existing since the year of 1965 and became more significant since 1997. By comparing with the Palmer index and traditional Z index assessments of the typical years' drought period, the analysis results were certified objectively.

Key words: available rainfall; drought strength; Z index; drought characteristic; Xi'an city

西安市是中国西北最大的中心城市, 地处西北地区东部、关中盆地中部, 属于暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候区。由于地处内陆, 南部又受到秦岭山脉的屏障作用, 致使降水不丰且年内分布极不

均匀, 再加上区内水源有限, 旱灾在西安各类自然灾害中位居首位。在 380 年-1983 年共 1 604 年中, 共计发生干旱 529 次, 大旱 127 次^[1], 基本符合农谚“十年一大旱, 三年一小旱”的规律。近年来, 在全球

收稿日期: 2015-03-16 修回日期: 2015-08-02 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1458.023.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301084)

Fund: Public Welfare Industry Special Funds for Scientific Research Projects of Ministry of Water Resources(201301084)

作者简介: 祁靓雯(1991-), 女, 河南郑州人, 主要从事水资源及水利工程方面的研究。E-mail: qjw2907100117@163.com

气候变暖的大背景下,西安气候呈现出向暖干化发展的趋势^[2],干旱灾害日趋严重。

影响西安市干旱程度的因素很多也很复杂,而由于降水量的减少造成的气象干旱是其中最重要的因子。近年来,学者们就西安降水特征做了大量的研究工作^[3-6],如党碧玲等分析了西安 1951 年-2000 年降水资料,发现降水长期变化和汛期降水变化均呈减少趋势;周正朝等分析了西安市 1961 年-2000 年的月平均气温和降水资料,发现西安市年平均气温呈上升趋势,降水在波动中呈下降趋势,其中 20 世纪 70 年代、20 世纪 90 年代降水量锐减,低于平均值。这些研究基本都可以得出西安市降水有减少的趋势,但对于由此带来的西安市气象干旱的研究,目前仍然较少。

对于气象干旱的研究主要采用的是干旱指数法,比较常见的有 Palmer 干旱指数、标准化降水指数、降水距平百分率、Z 指数法等等。这些研究方法各有优缺点,但在具体区域的干旱分析方面存在比较大的差异。张存杰等对西北地区的旱涝指标做了研究,认为修正后的 Z 指数法更适合于西北地区单站旱涝级别的划分^[7]。传统的 Z 指数法对干旱强度的定义是以降雨量为基础的,随着近年来全球气

温的增高,在运用 Z 指数法定义干旱强度指数时,有少数学者考虑到了增暖对加大蒸发的作用,如魏凤英在分析 1951 年-2001 年华北地区降水量、气温及蒸发量变化特征的基础上,利用降雨量与蒸发量之差的 Z 指数作为干旱强度指标,较好地表征了华北地区干旱强度状况^[8]。本文综合以上研究成果采用西安市 1951 年-2013 年月降雨量与平均气温资料,将可利用降雨量作为确定西安市干旱强度的衡量指标,应用 Z 指数法划分出干旱等级,并在此基础上分析了西安市气象干旱的季节性及年际变化。

1 数据来源及验证

本文的气象数据来源于中国气象科学共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的西安站 1951 年-2013 年逐月平均气温和降水资料,并利用西安市气象局整编的长安站 1959 年-2013 年逐月平均气温和降水资料对所采取的气象资料进行验证。

分析西安站和长安站 1959 年-2013 年 1 月-12 月平均气温和降雨量的相关关系,从表 1 中可以看出,两站点月平均气温和降雨量均达到了 99.9% 的相关水平,表明两站点每个月平均气温和降雨量的年际变化具备很好的一致性。

表 1 西安站和长安站间相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient between Xi'an station and Chang'an station

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
月平均气温相关系数	0.858	0.948	0.870	0.827	0.895	0.811	0.891	0.880	0.858	0.833	0.623	0.863
月降雨量相关系数	0.828	0.942	0.914	0.918	0.886	0.910	0.813	0.889	0.921	0.921	0.939	0.860

为进一步分析两站点间气象资料的一致性,计算出两站点间年降水量的相关系数为 0.836,达到了 99.9% 的相关性水平,从两个站点年降雨量距平变化(图 1)中可以看出,各时段年降雨量变化趋势基本一致。

通过对比西安站和长安站的气象资料可以看出,本文所采取的西安站气象资料与邻近的长安站较为一致,确定性强,可以准确地反应西安市区的气象特征。

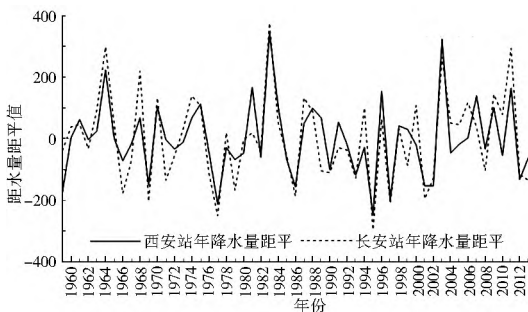


图 1 西安站和长安站年降水量距平变化

Fig. 1 Variation of Rainfall Departure of Xi'an station and Chang'an station

2 研究方法

2.1 西安市可利用降雨量的计算

从气象的角度考虑,降雨量减去陆面蒸发量在一定程度上反映了该地区的水资源净补给量,即可利用降雨量^[9],计算公式可以表示为:

$$F = P - E \quad (1)$$

式中: F 为月可利用降雨量; P 为月降雨量; E 为月蒸发量。

目前,根据月降水量和月平均气温对陆面蒸发量进行估算的计算公式较多,其中高桥浩一郎根据一定的物理机制和观测结果提出的计算陆面蒸发的公式^[9]应用较为广泛,主要适用于我国北方地区的陆面,其计算公式为:

$$E = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp\left(-\frac{34.4T}{235 + T}\right)} \quad (2)$$

式中: T 为月平均温度;其余符号意义同前。

从气候的角度考虑,可利用降雨量可以代表局地的干旱程度,故本文将作为表征西安市干旱程度的物理量。

2.2 Z 指数的计算与干旱等级的划分

Z 指数法考虑了降雨量服从偏态分布的实际,并对其进行了正态标准化处理,消除了不同时期的气候差异,在降雨量偏态系数比较大的情况下,能比较客观地反映历史情况^{[10][11]}。这里假定某时段可利用降雨量 F 服从 Person 0 型分布,通过对其进行正态化处理来确定干旱指数^[12]。具体计算公式为:

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

式中: C_s 为偏态系数; φ_i 为月标准化变量。即有:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^3}{n\sigma^3} \quad (4)$$

$$\varphi_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\sigma} \quad (5)$$

式中:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (6)$$

经过计算可以得出西安市年可利用降雨量的 Z 指数和距平之间的相关系数为 0.984285, 相关关系较好,因而用可利用降雨量 Z 指数法来反映干旱程度是可行的。

由式(3)计算出西安市 1951 年-2013 年逐月的 Z 指数序列,根据 Z 变量的正态分布曲线将干旱强度划分为 7 个等级^[17](表 2)。

表 2 干旱强度等级标准

Tab. 2 The classification of drought intensities

等级	类型	Z 值	理论概论(%)
1	特涝	Z ≥ 1.645	5
2	大涝	1.0367 ≤ Z < 1.645	10
3	偏涝	0.5244 < Z < 1.0367	15
4	正常	-0.5244 ≤ Z ≤ 0.5244	40
5	偏旱	-1.0367 < Z < -0.5244	15
6	大旱	-1.645 < Z ≤ -1.0367	10
7	特旱	Z ≤ -1.645	5

2.3 旱涝趋势突变分析

Manir Kendall 是一种非常简便有效的非参数统计检验法,运用该方法时样本不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,检验范围宽、量化程度高^[13]。运用 Manir Kendall 法对西安市年干旱指数做突变趋势分析^{[14][16]},其检验统计量公式是:

$$Z_c = \begin{cases} (s-1)/\sqrt{\text{Var}(s)} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ (s+1)/\sqrt{\text{Var}(s)} & s < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: s = $\sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j)$, x_i、x_j 为要进行检验的随机变量; n 为序列长度;当 x 大于、等于或小于 0 时, sgn(x) 的值分别是 1, 0, -1; 方差 Var(S) = n(n-1)(2n+5)/18。

Z_c 为正值表示增加趋势, 负值表示减小趋势。Z_c 的绝对值在大于等于 1.28、1.64、2.32 时分别表示通过了置信度 90%、95%、99% 的显著性检验。

使用连续 Manir Kendall 检验可以清晰看到趋势随时间变化的过程。连续值 U(t) 为一标准化变量, 计算过程如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i < x_j \end{cases} \quad 1 \leq j \leq i \quad (8)$$

$$S_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad t = 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

$$E(S_t) = t(t-1)/4 \quad (10)$$

$$\text{Var}(S_t) = t(t-1)(2t+5)/72 \quad (11)$$

$$U(t) = \frac{S_t - E(S_t)}{\sqrt{\text{Var}(S_t)}} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

将时间序列分别按顺序和逆序排列,按以上公式计算统计量 U(t), 分别为 UF 和 UB。如果 UF 大于 0, 表明序列呈上升趋势, 否则为下降趋势; 当 UF 超过置信度线(u_{0.05} = ±1.96) 时, 表明上升或下降趋势明显, 如果在置信度之间, UF 与 UB 两条曲线有交叉点, 那么交叉点对应的时间是序列突变开始的时间。

3 西安市干旱特征分析

3.1 季节性干旱特征分析

为了便于分析,将一年中的 12 个月分为四个季节: 春季(3 月-5 月)、夏季(6 月-8 月)、秋季(9 月-11 月)和冬季(12 月-次年 2 月)。统计西安市各个季节各等级干旱强度所占的百分率(见表 2), 从中不难看出, 春季干旱现象最严重, 占 38%, 冬季则为特旱的高发季节。

表 3 四季各干旱强度等级百分率

Tab. 3 The percentages of drought intensities for seasons (%)

等级	春季	夏季	秋季	冬季
1 级	3	6	11	5
2 级	10	6	22	13
3 级	24	13	30	13
4 级	25	52	37	40
5 级	19	14	0	6
6 级	17	6	0	2
7 级	2	2	0	21

从图 1—图 4 可见,四个季节的干旱强度均为增加趋势,但特征各不相同。春季 Z 指数的下降速率最大,为 0.121/(10a),旱情发展态势最明显,尤其是进入 21 世纪以后,6 级以上干旱明显增多。夏季、秋季、冬季干旱的发展较为平稳,Z 指数下降速率分别为 0.044/(10a)、0.046/(10a)、0.042/(10a)。夏季 6 级以上干旱较少,轻旱频发。秋季没有发生过干旱,但由于 Z 指数为下降趋势,不排除未来发生干旱的可能性。冬季为特旱的高发季节,时间特征十分明显:其中四次集中发生在 1959 年—1964 年,另外 8 次集中在 1979 年—1998 年,进入 21 世纪以后,冬季特旱较以往减少,仅在 2006 年发生过一次。

春夏为农作物生长发育的关键时期,干旱现象的发生将使农作物生长受损害,粮食减产^[17]。同时,夏季为城市用水高峰,干旱现象将对居民生活造成极大影响。综合来看,西安春季干旱较为严重,夏季干旱程度虽然较轻,但造成的危害十分紧迫,应当引起相关部门的重视并采取相应措施。

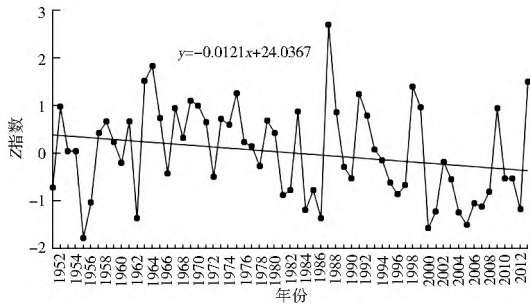


图 2 西安春季 Z 指数演变

Fig. 2 Variation of spring season Z index in Xi'an

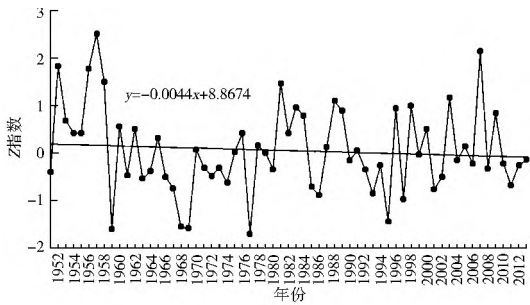


图 3 西安夏季 Z 指数演变

Fig. 3 Variation of summer season Z index in Xi'an

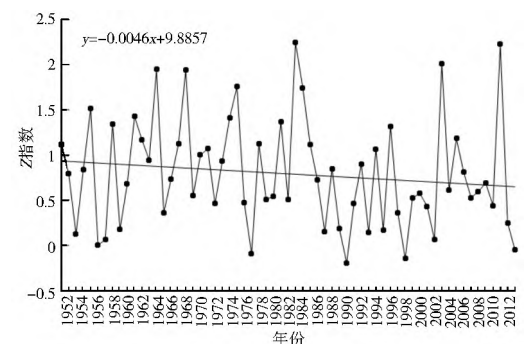


图 4 西安秋季 Z 指数演变

Fig. 4 Variation of autumn season Z index in Xi'an

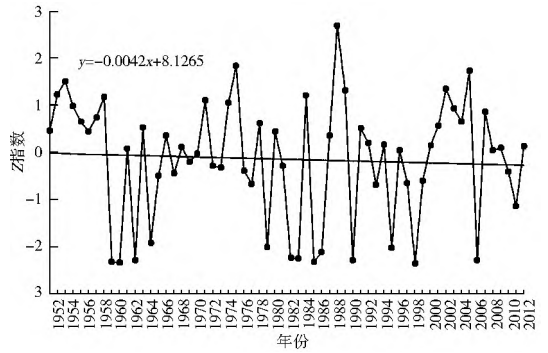


图 5 西安冬季 Z 指数演变

Fig. 5 Variation of winter season Z index in Xi'an

3.2 年际干旱特征分析

根据西安 1951 年—2013 年的降水资料与月平均气温,计算出每一年的 Z 指数(图 5),从线性趋势中可以看出,西安年可利用降雨量 Z 指数呈显著下降趋势,线性速率为 0.131/(10a),说明近 63 年来西安干旱呈现出逐渐加重的态势。具体来说:63 年中,共计发生干旱 17 次,平均每 3.7 年发生一次,其中最严重的年份是 1995 年,其次是 1977 年,其它如 1997 年、2001 年、2012 年的干旱也较为严重。另外,干旱的发生还表现出了一定的阶段性:1951 年—1989 年间干旱发生的频率较低,为 1~2 次/10a;20 世纪 90 年代发生 4 次干旱,且均为大旱或特旱,干旱频率和强度均明显增加;2000 年—2013 年间发生 6 次干旱,其中 3 次为六级以上干旱,2001 年—2002 年甚至出现连续大旱现象。

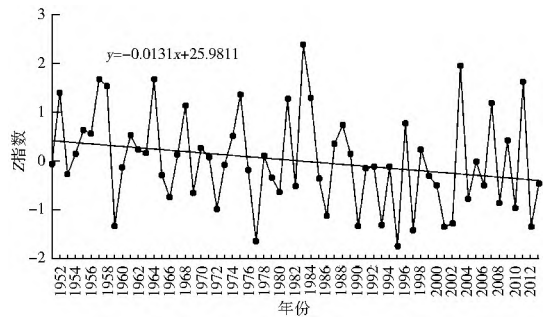


图 6 西安 1962 年—2012 年 Z 指数演变

Fig. 6 Variation of Z index (1951—2013) in Xi'an

3.3 干旱趋势突变分析

从图 6 给出的 Z 指数 Mann-Kendall 检验结果可以看出,突变年份为 1957 年和 1958 年,并且旱涝趋势表现出明显的阶段性:在 1951 年—1965 年间,西安向偏涝发展的趋势显著;但在 1965 年—2013 年间,只有向偏旱方向发展的趋势,其中达到显著性水平的年份有 1980 年、1995 年和 1997 年—2013 年。值得注意的是,1997 年之后 UF 均达到了显著性水平,对应了上文中 20 世纪 90 年代以后干旱发

生频率和强度增加的分析结果,这可能是对全球气候变暖和西安城市化发展的一种响应。

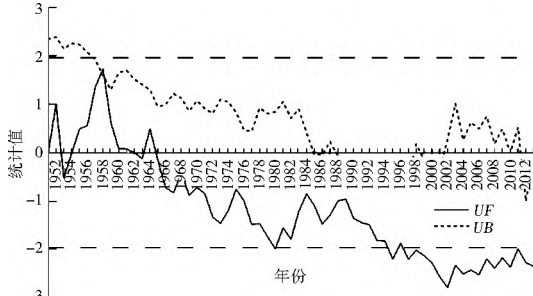


图7 西安 Z 指数的 Mann Kendall 检验
Fig.7 The Mann Kendall test of Z index in Xi'an

4 分析结果的评价

为了说明本文中可利用降雨量 Z 指数法对西安市干旱特征分析结果的客观性,运用该方法对西安市典型干湿时段旱涝情况进行评估,并与其它方

法的评估结果作比较。

Palmer 干旱指数是在综合考虑了前期降水、水份供给、水份需求、实际蒸散量、潜在蒸散量等要素的基础上,以水分平衡为基础而建立的一个气象干旱指标,是迄今为止公认程度较高的干旱指标^[18]。王越等基于西安站 1961 年-2000 年月平均气温、月降水量、100 cm 深土壤饱和和有效含水量 *Awc* 资料,运用 Palmer 指数法评价西安旱涝情况,并与传统 Z 指数法的评价结果相比较,发现 Z 指数有减少旱情而扩大涝情的趋势,而 Palmer 指数法的评价结果与实际情况较为一致^[19]。现将可利用降雨量 Z 指数法对典型干湿时段的评价结果与王越等人的评价结果做详细的对比分析(表 3),为保证结果的客观性和真实、有效,在评价时选择了与王越等人相同时间序列的气象资料。

表 4 西安市 Palmer 指数、传统 Z 指数与基于可利用降雨量 Z 指数旱涝评估结果

Tab.4 Evaluated results of dryness/wetness for *I_{PMA}* index, traditional Z index, and Z index of available rainfall

旱涝样本时间	旱涝灾情描述	<i>I_{PMA}</i> 值 (等级)	<i>I_{PMA}</i> 旱涝型	<i>Z₀</i> 值 (等级)	<i>Z₀</i> 旱涝型	<i>Z₁</i> 值 (等级)	<i>Z₁</i> 旱涝型
1977 06 10	西安 1977 年降雨量,是 1932 年以来 45 a 中最少的一年,比大旱的 1936 年和 1959 年还少 33 mm,发生严重的夏秋连旱。	- 3.21(7)	特旱	- 1.0352(5)	偏旱	- 2.914(7)	特旱
1994 05 09	西安 5 月份降雨量仅为 1.8 mm,为 65 a 来同期降雨量最少的一年,气温持续偏高,同时出现干热风,7、8 两个月持续高温,降水偏少。	- 3.2(7)	特旱	- 0.5378(5)	偏旱	- 1.139(6)	大旱
1995 05 09	1994 年大旱之后,又一特大干旱年,西安市地下水水位下降最大幅度为 7.89 m。	- 3.31(7)	特旱	- 1.0397(6)	大旱	- 1.818(7)	特旱
1997 05 08	1997 年 5、6 月少雨干旱,7 月下旬至 8 月雨水奇缺,西安夏季大于等于 35℃ 的高温日数为 61 d,全省秋粮大减产。	- 3.48(7)	特旱	- 1.0940(6)	大旱	- 1.3514(6)	大旱
1987 05 06	西安旱情严重,至 1987 年 4 月仍未缓解。1987 年 5、6 月西安降水持续偏多,土壤墒情明显改善,大部分田块旱情得以解除,但无积水现象。	2.48(3)	偏涝	1.8977(1)	特涝	2.535(1)	特涝
1989 01 02	西安 1、2 月雨雪繁多,土壤水分获得较好的补充。由于 1988 年秋冬连旱,土壤墒情严重,1、2 月的雨雪使西安旱情得到进一步缓解,但未达到彻底解除。	2.42(3)	偏涝	2.4304(1)	特涝	2.611(1)	特涝

注:1.表中用 *Z₀* 代表传统 Z 指数法,*Z₁* 代表可利用降雨量 Z 指数法。2.表中 Palmer 指数与传统 Z 指数的评估结果来自文献[19],在旱涝类型的描述上依照表 3 进行了统一。

表 3 中所列典型时段都属西安市历史上的极度干旱或偏湿润时段^[19-20]。从评估结果可以看出,可利用降雨量的 Z 指数法虽然未能改进传统 Z 指数法容易扩大涝情的缺点,但在旱情的评估方面,与 Palmer 指数法的评估结果较一致,比传统 Z 指数法更接近于实际情况。这是因为两种 Z 指数评估体系都是建立在降雨量或可利用降雨量标准差基础上

的相对评估体系,如果样本均值较小,将会出现涝情偏重的结果,但由于可利用降雨量 Z 指数法考虑了蒸发对旱情的影响,使得评价结果不再仅仅依赖于降雨量,从而避免了传统 Z 指数法可能减少旱情的缺点。虽然可利用降雨量 Z 指数法不如 Palmer 指数法对涝情的评估准确,但在对西安市旱情的评估方面具有较强的客观性,适用于干旱半干旱地区旱

情的分析评价,而且所需资料更少,计算更为简便,具有不可替代的优势。

5 结论

(1) 分析西安市季节性干旱特征发现,每个季节都有向干旱发展的趋势,其中春季、夏季和冬季干旱现象较为严重。春旱和夏旱对农作物的生长发育和居民用水影响较大,应当引起重视。

(2) 西安市年际干旱整体呈逐渐加重趋势,20 世纪 90 年代以后干旱发生的频率和强度较之前增大,干旱最严重的年份为 1995 年。

(3) 从干旱趋势突变分析的结果可以看出,突变年份为 1957 和 1958 年,1965 年后只存在向偏旱方向发展的趋势,并且在 1997 年之后,趋势更加明显。

(4) 可利用降雨量 Z 指数法对西安市典型干旱时段的评估的结果与 Palmer 干旱指数法的评估结果较为一致,改进了传统 Z 指数法可能减少旱情的缺点,对西安市气象干旱特征的分析结果具备较强的客观性。

参考文献(References):

- [1] 李兆元,李莉,全小伟. 西安地区(380—1983 年)旱涝气候变化[J]. 地理研究, 1988, 7(4): 65-66. (LI Zhao yuan, LI Li, QU AN Xiao wei. Climatic changes of drought wet in Xian region of China during the last 1604 years[J]. Geographical Research, 1988, 7(4): 65-66. (in Chinese))
- [2] 万红莲. 全球气候变化下西安地区的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 102-105. (WAN Hong lian. Global climate change response of Xi'an area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(1): 102-105. (in Chinese))
- [3] 党碧玲,任志远,张翀. 西安地区近 50 年降水量的统计分析[J]. 西北大学学报, 2003, 22(6): 139-144. (DANG Bi ling, REN Zhi yuan, ZHANG Chong. Statistical analysis on precipitation in Xi'an region during the last 50 years[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(1): 139-144. (in Chinese))
- [4] 廖光明,延军平,胡娜娜,等. 西安市近 58 年雨涝事件时间序列特征研究[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 65-69. (LIU Guang ming, YAN Jun ping, HU Na na et al. Analysis on the temporal characteristics of waterlogging about the recent 58 years in Xi'an[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2): 65-69. (in Chinese))
- [5] 吴健华,李培月,钱会. 西安市气象要素变化特征及可利用降雨量预测模型[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 50-51. (WU Jian hua, LI Pei yue, QIAN Hui. Variation characteristics of meteorological elements and prediction model of available precipitation in Xian City[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 50-51. (in Chinese))
- [6] 周正朝,胡娜娜,周华. 西安市气温和降水变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 27-33. (ZHOU Zheng chao, HU Na

- na, ZHOU Hua. Analysis on the change trend of temperature and precipitation in Xi'an during the period of 1961-2009[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 27-33. (in Chinese))
- [7] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 西北地区旱涝指标的研究[J]. 高原气象, 1998, 17(4): 381-389. (ZHANG Cun jie, WANG Bao ling, LIU De xiang, et al. Research on drought and flood indices in the Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 1998, 17(4): 381-389. (in Chinese))
- [8] 魏凤英. 华北地区干旱强度的表征形式及其气候变异[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 32-35. (WEI Feng ying. Characterization of drought strength in North China and its climatic variation[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(2): 32-35. (in Chinese))
- [9] 高桥浩一郎. 根据月平均气温、月降水量推算蒸散量[J]. 天气(日文), 1979, 26(12): 759-763. (Takahashi Koi chiro. Based on monthly mean air temperature and monthly precipitation, evapotranspiration was calculated. [J] Weather (Japanese), 1979, 26(12): 759-763. (in Chinese))
- [10] 杨晓花,杨小利. 基于 Z 指数的陇东黄土高原干旱特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 248-251. (YANG Xiao hua, YANG Xiao li. Aridity characteristics in east Gansu's loess plateau area based on Z index analysis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 248-251. (in Chinese))
- [11] 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[J]. 应用气象学报, 1997, 8(1): 26-29. (JU Xiao sheng, YANG Xian wei, CHEN Li juan, et al. Research on determination of station indexes and division of regional flood drought grades in China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, 8(1): 26-29. (in Chinese))
- [12] 屠其璞,王俊德,丁欲国. 气象应用概率统计学[M]. 北京: 气象出版社, 1984. (TU Qi pu, WANG Jun de, DING Yu guo. Probability Statistics of Meteorological Application[M]. Beijing: Meteorological Press, 1984. (in Chinese))
- [13] 郭小芹,刘明春,钱莉,等. 从 Mann Kendall 特征看石羊河流域降水量的演变规律[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 594-596. (GUO Xiao qin, LIU Ming chun, QIAN Li, et al. Evolution regularity of precipitation in the Shiyang River Basin on Mann Kendall features[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(4): 594-596. (in Chinese))
- [14] 霍正文,陈文,凡炳文. 近 54 年定西市降水趋势及突变分析[J]. 水文, 2012, 32(3): 89-91. (HUO Zheng wen, CHEN Wen, FAN Bing wen. Analysis of precipitation tendency and sudden change of Dingxi City in recent 54 years[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(3): 89-91. (in Chinese))
- [15] Claudia Libiseller. A program of multivariate and partial Mann Kendall test[R]. 2002.
- [16] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [17] 刘晓琼,赵景波. 关中地区旱涝灾害研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 102-106. (LIU Xiao qiong, ZHAO Jing bo. Research on drought/flood in Guanzhong region[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2002, 30(4): 102-106. (in Chinese))

(下转第 124 页)

- 载传递机制分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013(04): 124-129. (NIAN Ting kai, LI Dong sheng, XU Hai yang, et al. Double row anti slide pile reinforced slope stability and load transfer mechanism analysis[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013(04): 124-129. (in Chinese))
- [10] 年廷凯, 徐海洋, 李东晨, 等. 超载作用下边坡抗滑桩体系稳定性及土拱效应研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014(02): 177-182. (NIAN Ting kai, LI Dong sheng, XU Hai yang, et al. Research on stability and soil arching effect of slope pile system under uniform surcharge[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014(02): 177-182. (in Chinese))
- [11] 文兴, 裴向军, 刘云鹏. 特殊截面抗滑桩受力特征与土拱效应分析[J]. 工程地质学报, 2013(05): 797-803. (WEN Xing, PEI Xiang jun, LIU Yun peng. Stress characteristics and soil arch effect analysis of anti slide piles with special cross section[J]. Journal of Engineering Geology, 2013(05): 797-803. (in Chinese))
- [12] 彭帅, 汪华斌, 周博, 等. 基于抗滑桩土拱效应形成的细观数值模拟[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1993-2000. (PENG Shuai, WANG Hua bin, ZHOU Bo, et al. Microscopic numerical modeling research based on the formation of soil arching effect[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 1993-2000. (in Chinese))
- [13] 杨雪强, 吉小明, 张新涛. 抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J]. 中国公路学报, 2014(01): 30-37. (YANG Xue qiang, JI Xiao ming, ZHANG Xin tao. Analysis of soil arching effect between anti slide piles and different arch body modes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014(01): 30-37. (in Chinese))
- [14] 李新哲, 王振强, 覃勤, 等. 悬臂式抗滑桩桩间垂直拱的拱形及力学分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, (02): 329-332, 339. (LI Xin zhe, WANG Zhen qiang, TAN Qin, et al. Analysis of arched and mechanical vertical arch cantilever anti slide piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014(02): 329-332, 339. (in Chinese))
- [15] 燕继宇, 陈剑平, 闫欢, 等. 砂粘土层桩间土拱效应的数值分析[J]. 中国水运: 下半月, 2014(04): 117-121. (YAN Ji yu, CHEN Jian ping, YAN Huan, et al. Sand clay interbedded between piles and numerical analysis of soil arching effect[J]. China Water Transport, 2014(04): 117-121. (in Chinese))
- [16] 赵鑫, 胡新丽, 范付松, 等. 抗滑桩护壁外壁形态对土拱效应影响的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2014(01): 57-60, 63. (ZHAO Xin, HU Xin li, FAN Fu song, et al. Numeric simulation of the influences of morphology of protecting wall of anti sliding pile on soil arching effect[J]. Coal Geology and Exploration, 2014(01): 57-60, 63. (in Chinese))
- [17] 上官云龙. 新岩滑坡成因机制及抗滑桩桩土效应研究[D]. 吉林大学, 2014. (SHANGGUAN Yun long. Study on genetic mechanism and pile soil contact effect of anti slide piles of Xinyan Landslide[D]. Jilin University, 2014. (in Chinese))
- [18] 许鹏. 汪延公路膨胀性软岩滑坡抗滑桩桩土效应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. (XU Peng. Study on pile soil contact effect of anti sliding piles in swelling soft rock landslide of Wangqing yanji Highway [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese))
- [19] 雍睿. 三峡库区侏罗系地层推移式滑坡—抗滑桩相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014. (YONG Rui. Interaction between Thrust Load Caused Landslide and Anti slide Pile in Jurassic Strata in Three Gorges Reservoir Region [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese))
- [20] 袁颖, 何国峰. 基于正交试验的抗滑桩的土拱效应研究[A]. // 力学与工程应用—第十五届北方七省市力学学会学术会议论文集[C]. 2014: 161-165. (YUAN Ying, HE Guo feng. Study of the Soil Arching Effect of Anti slide Pile Based on Orthogonal Test [A]. // Mechanics and Engineering Application The Fifteenth Conference Proceedings of Mechanics in Seven Provinces of Northern [C]. 2014: 161-165. (in Chinese))

(上接第 98 页)

- [18] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标的研究与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 61-62. (WANG Jin song, GUO Jiang yong, ZHOU Yue wu, et al. Progress and prospect on drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 61-62. (in Chinese))
- [19] 王越, 江志红, 张强, 等. 基于 Palmer 湿润度指数的旱涝指标研究[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 387-389. (WANG Yue, JIANG Zhi hong, ZHANG Qiang, et al. Comparative study of palmer's moisture anomaly index and Z index[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(3): 387-389. (in Chinese))
- [20] 李士高. 陕西省干旱灾害年鉴[M]. 西安: 西安地图出版社, 1999. (LI Shi gao. Yearbook of Shaanxi Drought Disaster. [M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House. (in Chinese))