

甘肃省季节性干旱综合指数的特征

郭小芹¹,李 广²,罗永忠²

(1.武威市气象局,甘肃 武威 733000;2.甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:利用甘肃省 71 个气象站 1971–2013 年月降水量资料,借助 Z 指数构建了基于干旱频率、干旱强度的干旱综合指数评价指标,从季节性干旱以及季节性连旱着手分析了不同时间尺度的干旱特征。结果表明:研究区季节性趋旱程度($MK<0$)和趋旱范围($DR, \%$)差异显著,其中春季陇东高原为 $-0.154(100\%)$,重旱为灵台(-0.238^*)、宁县(-0.180)、镇原(-0.178);夏季河西走廊为 $-0.081(73.7\%)$,重旱为马鬃山(-0.271^*)、安西(-0.255^*)、敦煌(-0.171);秋季陇中高原为 $-0.017(50.9\%)$,重旱在会宁(-0.186)。季节性干旱综合指数重旱时段显示,春季为 1995 年(陇东 0.481),夏季为 1997 年(陇南 0.405),秋季为 1972 年(甘南 0.366),冬季为 1998 年(陇东 0.586)和 2009 年(甘南 0.449)。两季连旱高值区在白银、会宁、古浪、玛曲、灵台、永登、华池、静宁等地(>0.030),其中秋冬连旱最为严重(0.0274);三季连旱高值区为会宁、古浪、静宁、白银、永登等地(>0.020),其中夏秋冬连旱最为显著(0.017 5);四季连旱高值区为会宁、古浪、西峰、灵台、泾川等地(>0.015),即除了冬春夏秋连旱外,其余季节性连旱程度均比较显著(>0.009)。

关键词:干旱综合指数;季节性干旱;标准化 Z 指数;干旱强度;甘肃省

中图分类号:S426.6 **文献标识码:**A

The characteristics of seasonal drought's comprehensive index in Gansu Province

GUO Xiao-qin¹, LI Guang², LUO Yong-zhong²

(1.Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei, Gansu 733000;2.Gansu Agricultural University, College of forestry, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract: Based on the annual and monthly precipitation of 71 meteorological stations in Gansu province from 1971 to 2013, with the help of the Z index, the drought comprehensive index was constructed as the evaluation index based on the drought frequency and the drought intensity. The drought characteristics at different time scales were analyzed based on the seasonal drought and the seasonal continuous drought. The results showed significant difference in seasonal drought degree ($MK<0$) and drought range ($\%$). In spring, the Longdong plateau is $-0.154(100\%)$, and the heavy drought areas are Lingtai (-0.238^*), Ningxian (-0.180), and Zhenyuan (-0.178); in summer, Gansu corridor is $-0.081(73.7\%)$, and the heavy drought areas are Mazongshan (-0.271^*), Anxi (-0.255^*) and Dunhuang (-0.171); in autumn, Longzhong plateau is $-0.017(50.9\%)$, and the heavy drought area is Huining (-0.186). The seasonal drought comprehensive index of heavy drought period showed spring in 1995 (Longdong, 0.481), summer in 1997 (Longnan, 0.405), autumn in 1972 (Gannan, 0.366), winter in 1998 (Longdong, 0.586) and in 2009 (Gannan, 0.449). The high value areas of the continuous drought in two seasons were in Baiyin, Huining, Gulang, Maqu, Lingtai, Yongden, Huachi, Jingning, etc (>0.030), with the most severe drought in autumn and winter (0.0274). The high value areas of the continuous drought in three seasons were Huining, Gulang, Jingning, Baiyin and Yongdeng, etc (>0.020), among which, the drought degree of summer-autumn-winter is severest (0.017 5). The high value areas of the continuous drought in four seasons were Huining, Gulang, Xifeng, Lingtai, Jingchuan, etc (>0.015). All the seasonal continuous drought were significant (>0.009) except the winter-spring-summer-autumn drought. The research results of the seasonal drought compre-

hensive index can provide scientific basis for regional drought assessment and disaster prevention and reduction.

Key words: drought comprehensive index; seasonal drought; standardized Z -index; drought intensity; Gansu Province

作为影响农业生产最为敏感的气象灾害,干旱具备发生频率高、影响范围广、持续时间长、预防难度高、灾损评定难等特点,对社会经济发展及人民生活带来严重威胁,历来成为专家学者以及灾害学领域关注的焦点^[1-5]。伴随全球气候变暖,极端天气事件与气象灾害频繁发生,干旱频率与干旱烈度呈显著增加趋势^[6-7],比如 2004 年南方特旱、2005 年云南 50 年大旱、2006 年重庆百年大旱、2007—2009 年遍布多省市的严重干旱、2013 年南方重旱。研究显示,旱灾损失占气象灾害损失的 55%。甘肃省东西绵延 1 600 多 km,覆盖亚热带季风、温带季风、温带大陆性、高原高寒多种气候类型,干旱形成原因与表现方式呈现多样性特征。尽管干旱研究已经成为热门话题,但随着研究目的不同其侧重点差异很大^[8-9],给实际应用带来极大的不便。

降水量是干旱形成的直接因素,气象评估常使用连续无雨日数、降水距平百分率、SPI 标准化指数、PDSI 干旱指数、湿润度与干燥度等指标^[10-12]来度量干旱程度,由于干旱形成机理异常复杂,许多干旱指标设计都具有明显的地域性特征,利用不同评价指标对同一干旱背景进行评价必然会得出不同结论。针对甘肃省地域特点,本文利用基本气象站降水量标准化资料,设计了干旱综合指数以评价研究区域干旱分布特征,不仅充分发挥了 Z 指数时空适应性强以及干旱机理简单化的优点,还能真实反映多时间尺度上干旱强度与范围的变化趋势,评估方法具有良好的稳定性,可为区域干旱评估决策与防灾减灾提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域与数据来源

按照中国气象地理区划以及农业布局特点,将研究区域划分为 5 个相对独立的片区:河西走廊含酒泉、张掖、武威、金昌,陇中高原含兰州、白银、定西、天水、临夏和平凉西部,陇东高原含庆阳和平凉大部分地区,甘南草原与陇南山地基本以行政单位为边界。分析数据源于甘肃省基本气象站点 1971—2013 年日降水量数据,其中河西走廊 19 个、陇中高原 26 个、陇东高原 13 个、甘南草原 5 个、陇南山地 8 个,共计 71 个站点,所选站点资料序列连续,站点布局在农业主产区呈密集化。数据处理工具为 SPSS

13.0、Minitab Ver 8.02。

1.2 Z 指数与阈值分级指标

长时间序列的降水量因其变异性强、偏度大而具备典型的非正态分布性质,按照文献[13—14]方法,假定季节性降水量遵循 P—Ⅲ型分布,在对降水量进行正态化处理后将概率密度函数作 Z 转化,使其满足正态分布特征,从而使不同区域降水在时空上具备可比性,进而能客观地反映不同地域的干旱状态。其转换公式为:

$$Z_I = \frac{6}{C_s} \sqrt{\frac{C_s}{2} \varphi_I + 1} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \tag{1}$$

其中: φ_I 为降水标准化变量($I = 1, 2, \cdots, n$); C_s 为时间序列的偏态系数。分析显示, Z 指数与降水量呈显著性相关,表明用 Z 指数可以充分反映研究区域的降水特征。根据 Z 变量正态分布曲线和研究区域干旱特征,可将 Z 值划分为 4 个等级(见表 1),其中 Z 指数的负值越小,干旱等级越高,干旱程度愈加严重。

表 1 甘肃省季节性干旱 Z 指数阈值指标

Table 1 Threshold indicators of Z -index for seasonal drought in Gansu Province

等级 Grade	Z 值区间 Range of Z	干旱等级 Grade of drought	理论频率分布/% Theoretical frequency distribution
1	$Z > -0.84$	无旱 No-drought	70
2	$-1.44 < Z \leq -0.84$	轻旱 Mild-drought	15
3	$-1.96 < Z < -1.44$	中旱 Moderate-drought	10
4	$Z < -1.96$	重旱 Severe-drought	5

1.3 干旱特征变量的提取

季节性干旱是甘肃省农业生产主要限制因子,将春夏秋冬划分为 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12 月到翌年 2 月,按照季节性尺度定义以下特征变量:

干旱频率(DF_i)是以 Z 指数评价某地干旱发生的频繁程度,即该地发生某一干旱等级的次数占统计时段总次数的百分比,本文将轻旱、中旱、重旱作为评价对象。

干旱强度(DI_i)是用 Z 指数评价干旱严重程度的重要指标,区域干旱强度是指评价时段内某一干旱等级站点数占区域内总站点数的百分比,也可定义为区域干旱烈度(SI_i)。

最能反映干旱强度本质特征的是一次干旱过程持续时间(DD_i),它是构成干旱强度与灾情程度

的根本原因。本文按照持续性的两季连旱、三季连旱、四季连旱 3 个时间段分别进行旱情评价,从而形成揭示干旱等级程度最重要的特征量。

Mann-Kendall 特征值(简称 MK 值)是基于非参数统计检验方法的重要参量,优点是样本不必遵从某一特定分布规律,不受少数异常值干扰,能很好表征时间序列趋势变化。统计方法见文献[15]。

1.4 干旱综合指数的构建

在区域干旱特征研究中本文引入一种评价指标即干旱综合指数。按照信息熵理论对研究区域轻旱(LD)、中旱(MD)、重旱(SD) 频率进行数理赋权,赋予 3 个等级干旱权重 α 、 β 、 γ 以实现对于旱强度的综合评价,定义其为干旱综合指数(CI),用公式表示为:

$$CI_i = \alpha LD_i + \beta MD_i + \gamma SD_i \tag{2}$$

权重是在整体评价中考量某一指标重要程度的一种方法,实践中常用专家打分、层次分析、经验判定等以确定各个指标的分量,但这些方法在比较和判断上尚存在一些缺陷。信息熵理论不仅有效规避了干扰项,还使得熵权赋值过程精度更高、客观性更强,按照文献[16-17] 中依据阈值指标变异程度确定各指标熵权,即对 m 个待评项目、 n 个评价指标构建矩阵 $R = (y_{ij})_{m \times n}$,令 $E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$,

其中 $p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij}$, 计算各指标信息熵 $E_1, E_2, \dots, E_k$,应用信息熵公式 $W_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum E_i} (i = 1, 2, \dots, k)$ 求得不同干旱等级下的指标权重,即轻旱 $\alpha = 0.1711$ 、中旱 $\beta = 0.2433$ 、重旱 $\gamma = 0.5856$ 。

2 结果与分析

2.1 季节性干旱趋势变化特征

对研究区域 1971-2013 年季节性 Z 指数进行

mann-kendall 非参数检验,当特征值 $MK < 0$ 时表征区域存在干旱,MK 值越小,表明干旱趋势越强或趋旱程度越高。以研究时段平均 Z 指数变化特征为评价对象,从表 2 可以看出,春季 MK 值分别为陇东高原(-0.154)、陇中高原(-0.043)和陇南山地(-0.039),陇东高原干旱趋势十分显著,而且还成为全区域典型趋旱季节;夏季除了陇东高原外其余各地均趋旱,其中河西走廊为-0.081、陇中高原为-0.065,甘南草原为-0.039,趋旱程度比较明显;秋季仅陇中高原有轻微干旱(-0.017),其余地方干旱程度普遍较弱;冬季研究区域几乎无干旱发生,全域普遍趋于湿润,尤以河西走廊(0.258*)为显著。总体看在研究时段内春夏两季干旱特征趋于显著。在地域分布上河西走廊夏季趋旱特征十分明显,陇中高原夏春两季趋旱显著增强且具备三季连旱特征;陇东高原春季干旱非常显著,且干旱趋势显著增加;甘南草原夏季趋旱明显且强度不容忽视;陇南山地春季干旱明显,其余季节基本不存在干旱。

以区域单站点 $MK < 0$ 为研究对象,将该站点视为干旱点并进行频率统计,其结果用区域干旱范围 DR 来表示,并定义 $DR > 50\%$ 为典型干旱评价标准。从表 2 可以看出,在研究区域中春旱范围约为 80%,干旱特征非常显著,具体表现在陇东高原(100%)、陇南山地(75.0%)、陇中高原(65.4%)、甘南草原(60.0%),其中陇东高原成为全域极端性干旱区域;夏旱范围约为 60%,涵盖河西走廊(73.7%)、陇中高原(61.5%)、甘南草原(60.0%),其中河西走廊成为夏季干旱典型区域;秋季干旱范围约为 20%,其中陇中高原为秋季干旱典型区域(50.9%),其余区域干旱均不明显;在季节性干旱中冬季干旱特征最不明显。从区域 DR 分布看,季节性典型干旱主要表现在河西走廊夏季、陇中高原春夏秋三季、陇东高原春季、甘南草原夏季、陇南山地春夏二季。总体看甘肃省干旱趋势以春夏两季为主,干旱范围显著。

表 2 1971-2013 年研究区域季节性 Z 指数 Mann-Kendall 特征值(DR,%)

Table 2 Mann-Kendall value and DR-value of seasonal Z-index in Gansu Province during 1971-2013

季节 Season	河西走廊 Hexi corridor	陇中高原 Longzhong plateau	陇东高原 Longdong plateau	甘南草原 Gannan grassland	陇南山地 Longnan mountain
春季 Spring	0.099(10.5%)	-0.043(65.4%)	-0.154(100%)	0.045(60.0%)	-0.039(75.0%)
夏季 Summer	-0.081(73.7%)	-0.065(61.5%)	0.048(15.4%)	-0.039(60.0%)	-0.003(37.5%)
秋季 Autumn	0.090(15.8%)	-0.017(50.9%)	0.076(15.4%)	0.054(20.0%)	0.023(25.0%)
冬季 Winter	0.258*(5.3%)	0.085(30.8%)	0.023(30.8%)	0.123(0.0%)	0.090(25.0%)

注: * 表示 $P < 0.05$ 下显著性水平; $DR = (\text{区域干旱点} / \text{区域总站点}) \times 100\%$ 。
Note: * indicates significance at $P < 0.05$; $DR = (\text{regional drought points} / \text{regional total site}) \times 100\%$.

对区域单站点 MK 值进行分析,可以揭示研究时段典型干旱区域特征。以春季为例,典型趋旱区域集中在陇中高原之陇西 (-0.138)、武山 (-0.129)、秦安 (-0.102), 陇东高原之灵台 (-0.238^*)、宁县 (-0.180)、镇原 (-0.178), 陇南山地之宕昌 (-0.123);而在夏季则集中在河西走廊之马鬃山 (-0.271^*)、安西 (-0.255^*)、敦煌 (-0.171), 陇中高原之会宁 (-0.136)、靖远 (-0.123), 甘南草原之夏河 (-0.103) 以及陇南山地之文县 (-0.141), 其趋旱程度不仅代表季节性趋旱特征,也代表全域干旱极端值的分布特征。

2.2 季节性干旱综合指数变化特征

干旱综合指数 (CI) 与其他干旱特征变量相比具有明显优势,该指标既可以对区域逐站点同一时段不同干旱特征进行综合评价,也可以对同一区域不同时间段干旱特征进行综合评价,评价结果能够客观准确地描述区域干旱深度与广度,其中重旱频率不仅决定了区域的干旱强度,也决定着极端干旱事件的强度。

从图 1 可以看出:(1)春季重旱发生在 1995 年

(陇东 0.481、陇中 0.269)、1979 年(陇中 0.325、陇南 0.298、甘南 0.297)、2000 年(陇东 0.304)、2004 年(陇南 0.289)以及 2008 年(甘南 0.254),其中 1995 年范围最广且影响最重,2000 年以来干旱频率增多,强度明显;(2)夏季重旱依次为 1997 年(陇南 0.405、陇东 0.272)、1982 年(陇中 0.338)、1991 年(陇南 0.332、陇东 0.321)以及 1974 年(甘南 0.312、陇东 0.308),河西走廊在 2001 年(0.266)和 2010 年(0.245)出现显著干旱,在 2008–2010 年出现持续性干旱,其中 1997 年是干旱强度最为严重的时段;(3)秋季重旱发生在 1972 年(甘南 0.366、陇中 0.347)、1986 年(陇中 0.274、陇东 0.265)和 1987 年(陇南 0.271)、1995 年(陇东 0.257)、1998 年(陇东 0.236 和 陇南 0.232),其中 1972 年干旱最重(0.263),1986–1998 年干旱频率明显集中,2003 年后干旱强度明显减弱。(4)冬季重旱出现在 1998 年陇东(0.586)、陇中(0.348)、陇南(0.268),其中陇东、陇中还成为研究时段全域干旱的极端值;2009 年甘南草原(0.449)不仅成为重旱区域,还成为年度季节性干旱之最。

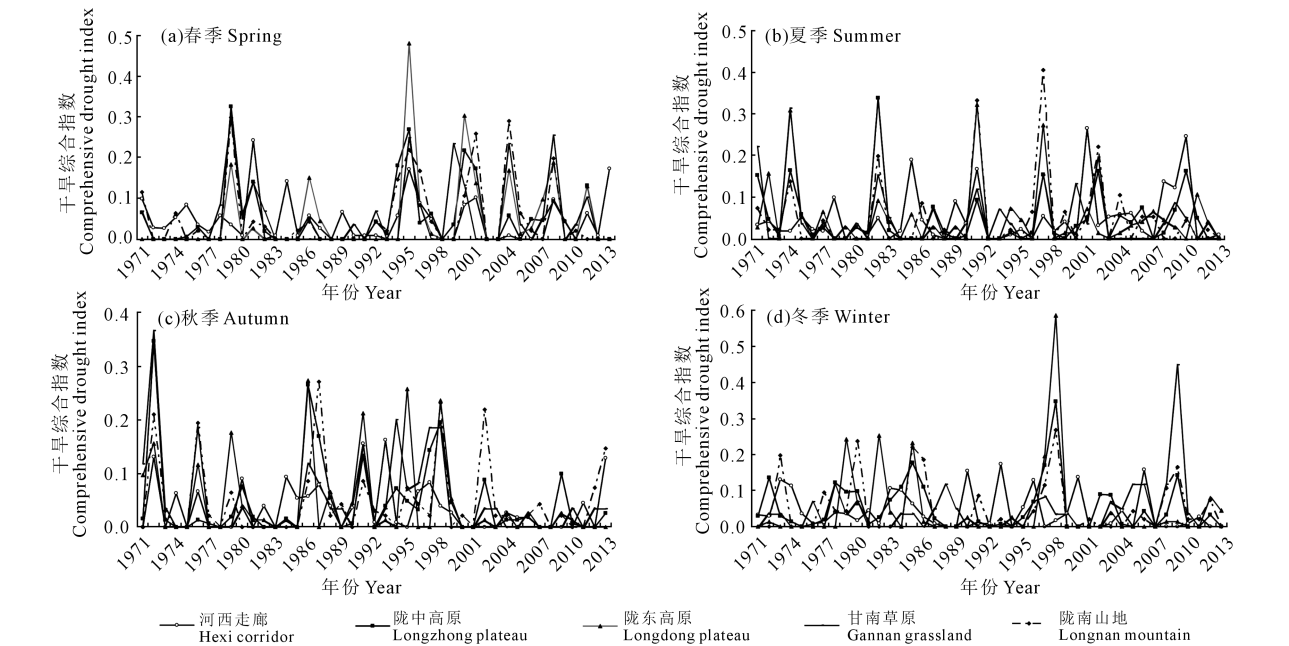


图 1 甘肃省不同区域季节性干旱综合指数时间变化特征

Fig.1 Temporal variation characteristics of seasonal drought comprehensive index in different regions of Gansu Province

季节性干旱综合指数地域性分布差异显著。以干旱综合指数 ≥ 0.05 为单站点典型干旱评价标准,分析区域干旱强度。以春季为例,重旱区域依次为鼎新(0.127)、华池(0.072)、兰州、康县、秦安、岷县、天水 (≥ 0.06),典型干旱范围占比 39.4%,为季节性干旱范围之最;夏季重旱为安西(0.072)、玉

门(0.066)、西和(0.061),河西走廊重旱集中且强度显著,全区域典型干旱范围为 29.6%;秋季重旱分布在灵台(0.061),典型干旱范围为 26.8%;冬季重旱集中在白银(0.103)、乌鞘岭(0.70)、古浪(0.68),典型干旱范围为 23.9%;总体上看春季干旱范围最为显著,其次为夏季。

2.3 季节性连旱综合指数变化特征

季节性连旱综合指数是表征在多个连续性季节内区域逐站点在同一时段内不同程度的干旱特征,也表征同一区域在不同时间段内的干旱特征,其中区域干旱深度(SI_t)是指在统计时段区域内单站点干旱综合指数的平均值,用以代表区域持续性干旱强度水平。按照全省干旱特质,本文对三类季节性干旱进行分析,不仅有助于解析干旱时段基本特征以及区域干旱程度,还有助于深度揭示全省干旱的趋向特征。

全省两季连旱干旱深度为 0.024,高值区(>0.03)集中在白银、会宁、古浪、玛曲、灵台、永登、华池、静宁。从图 2 可以看出:春夏连旱以鼎新(0.049)、华池(0.045)、环县(0.039)为重旱中心,形成河西走廊西端、陇东中部为主的干旱特征;夏秋连旱以会宁(0.051)、灵台(0.043)为重旱中心,构成以陇中~陇东高原为重旱的基本特征;秋冬连旱以古浪和白银(0.060)为重旱中心,其次是灵台(0.049)、静宁、会宁及徽县(≥ 0.043),构成以甘肃中部为主兼具偏东南部的重旱特征;冬春连旱以白银(0.064)、玛曲(0.054)、古浪(0.053)为主,鼎新、华池为辅(≥ 0.041),形成了全省中部、甘南草原为典型特征的季节性重旱特征。在全域干旱深度中秋冬连旱为 0.027,重旱范围 0.85%,表征该时段旱情最重、范围最广。

三季连旱干旱深度为 0.014,高值区为会宁、古浪、静宁、白银、永登(>0.02),从图 2 可以看出:春夏秋连旱中心分布在会宁(0.031)、西峰(0.027)、鼎新、泾川、正宁、宕昌(0.026),即以全省中东部干旱为主;夏秋冬连旱集中在会宁(0.057),高值区在陇中高原与陇东高原东部一带,古浪、白银(>0.300)也具有明显的连旱特征;秋冬春连旱以古浪(0.043)、环县(0.031)两地为主,形成古浪~白银、环县~华池以及鼎新、会宁为中心的重旱特征;冬春夏连旱以会宁(0.035)、古浪~乌鞘岭(≥ 0.033)为重旱区域,形成了以河西走廊东部、陇中高原中部为典型分布特征的干旱范围。全域干旱深度显示,夏秋冬连旱为 0.017 5,重旱范围 0.32%,干旱范围与干旱深度非常显著。

四季连旱干旱深度为 0.007,高值区依然为会宁(0.027),其次为古浪、西峰、灵台、泾川(>0.160),从图 2 看到:春夏秋冬连旱突出体现在以泾川

(0.026)为代表的陇东高原区域,会宁、古浪、白银也有明显的干旱特征;夏秋冬春以会宁(0.022)、鼎新(0.020)、古浪和环县(0.019)、泾川(0.018)为主,灵台、康县、永登干旱特征比较明显;秋冬春夏以会宁(0.027)、高台(0.026)、古浪(0.025)、山丹(0.024)为主,形成以河西走廊东西向的间断性干旱以及以会宁为中心的陇中高原干旱的典型特征;冬春夏秋连旱干旱深度最为显著,形成以会宁(0.037)为主旱中心、以西峰~灵台~泾川为次中心的区域特征。总体上看,除了冬春夏秋外,其余季节性连旱的干旱深度均表现显著(>0.009),但重旱则还是以冬春夏秋最为典型。

3 结 论

本文通过干旱阈值 Z 指标构建了基于干旱频率、干旱强度的干旱综合指数,从季度性干旱、季节性连旱着手深入分析了研究区域干旱特征。

研究表明:季节性趋旱($MK<0$)差异显著。春季 MK 值依次为陇东高原-0.154、陇中高原-0.043、陇南山地-0.039,趋旱范围为陇东高原 100%、陇南山地 75.0%、陇中高原 65.4%、甘南草原 60.0%,其中陇东高原趋旱最为典型,具体表现在灵台-0.238*、宁县-0.180、镇原-0.178;夏季 MK 值为河西走廊-0.081、陇中高原-0.065、甘南草原-0.039,趋旱范围河西走廊 73.7%、陇中高原 61.5%、甘南草原 60.0%,其中河西走廊趋旱突出表现在马鬃山-0.271*、安西-0.255*、敦煌-0.171;秋季陇中高原 MK 值为-0.017,其中会宁为-0.186,陇中高原干旱范围为 50.9%;甘南草原夏季与陇南山地春季趋旱程度也比较明显。尽管在季节性趋旱程度上冬季表现尚不明显,但趋旱范围也不容忽视。

季节性干旱综合指数(CI)时间变化特征显示,春季重旱在 1995 年陇东(0.481);夏季重旱为 1997 年陇南(0.405);秋季重旱在 1972 年(甘南 0.366、陇中 0.347);冬季重旱在 1998 年(陇东 0.586)且该时段为全域干旱的极端值,2009 年甘南草原(0.449)也非常明显。典型干旱($CI\geq 0.05$)显示,春季以鼎新(0.127)、华池(0.072)为重旱,典型干旱占比 39.4%;夏季以安西(0.072)、玉门(0.066)、西和(0.061)为重旱,典型干旱占 29.6%;秋季重旱在灵台(0.061),典型干旱为 26.8%;冬季集中在白银(0.103)、乌鞘岭(0.70)、古浪(0.68),典型干旱范围为

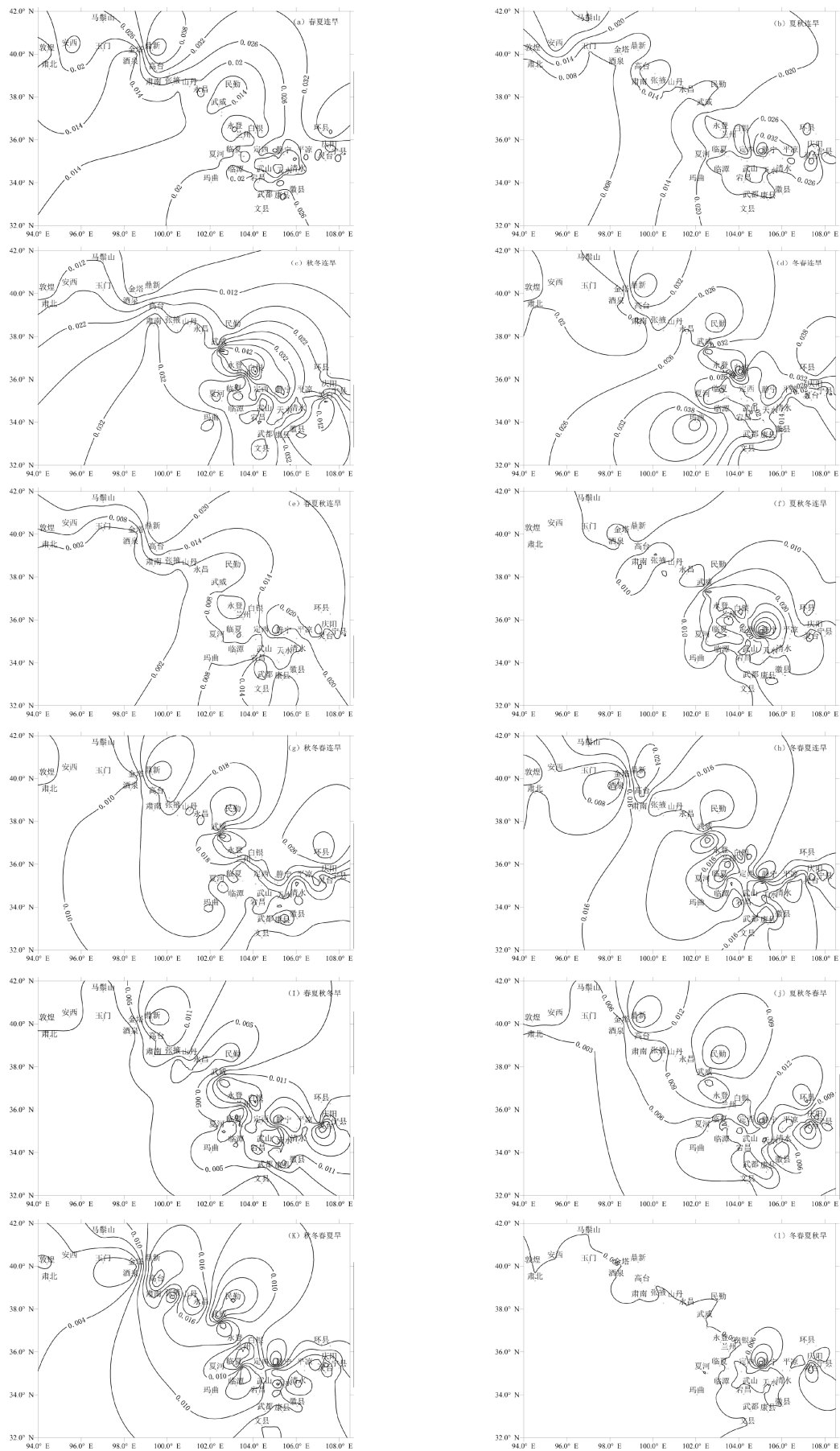


图 2 甘肃省季节性连旱的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of seasonal continuous drought in Gansu Province

23.9%。总体上看,春季干旱特征最为显著,作为夏粮产量的关键影响因子,春季干旱已变成气候暖干化的重要标志^[18],不仅成为甘肃省最重要的农业气象灾害,还给现行农业结构调整提出了严峻的挑战。

季节性连旱更好地反映了区域持续性干旱强度。两季连旱综合指数高值区分布在白银、会宁、古浪、玛曲、灵台、永登、华池、静宁等地(>0.030),三季连旱在会宁、古浪、静宁、白银、永登等地(>0.020),四季连旱在会宁、古浪、西峰、灵台、泾川(>0.015)等地。两季连旱中秋冬连旱最重(0.0274),三季连旱以夏秋冬连旱最为显著(0.0175);四季连旱中除了冬春夏秋外,其余季节性连旱均表现显著(>0.009)。

季节性干旱分析结论与降水资源特征相一致^[19],当降水量增多时其干旱深度会有所减弱,重旱程度相应降低,这表明以干旱阈值指标和信息熵为基础的干旱综合指数能够客观而准确地反映研究区域干旱空间分布特征,相比传统权重设定方法其指标具备集成度、精算度的特点,从而为不同等级干旱强度与干旱评估提供了科学而精准的度量标准。另外,干旱持续时间越长,干旱累积效应越大,时间节点处的灾情程度就越为严重,因此分段式干旱特征的研究显得非常重要且具备深远的现实意义。

参 考 文 献:

[1] 刘莉红,翟盘茂,郑祖光,等.中国北方夏半年干旱的时空变化[J].地理科学进展,2011,30(11):1380-1386.

[2] 陈方藻,刘江,李茂松.60年来中国农业干旱时空演替规律研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(4):111-114.

[3] 叶敏,钱忠华,吴永萍.中国旱涝时空分布特征分析[J].物理学报,2013,62(13):139-203.

[4] Ashok K M, Vijia P S. Drought modeling-a review[J]. Journal of Hydrology,2011,40(3):157-175.

[5] 王明田,王翔,黄晚华.基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J].农业工程学报,2012,28(19):85-92.

[6] 许月萍,张庆庆,楼章华,等.基于 Copula 方法的干旱历时和烈度的联合概率分析[J].天津大学学报,2010,43(10):928-932.

[7] 王兆礼,李军,黄泽勤.基于改进帕默尔干旱指数的中国气象干旱时空演变分析[J].农业工程学报,2015,32(2):161-167.

[8] 王劲松,黄玉霞,冯建英,等.径流量 Z 指数与 Palmer 指数对河西干旱的监测[J].应用气象学报,2009,20(4):471-477.

[9] 杨晓华,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):248-253.

[10] 刘庚山,郭安红,安顺清,等.帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J].自然灾害学报,2004,13(4):21-27.

[11] 王劲松,郭江勇,周跃武,等.干旱指标研究的进展与展望[J].干旱区地理,2007,30(1):60-65.

[12] 卫捷,马柱国.Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J].地理学报,2003,58(Z1):117-124.

[13] 袁文平,周广胜.标准化降水指数与 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.

[14] 杨世刚,杨德保,赵桂香,等.三种干旱指数在山西省干旱分析中的比较[J].高原气象,2011,30(5):1406-1414.

[15] 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,2011,33(4):593-599.

[16] 郭小芹,罗永忠.河西东部日光温棚气象灾害保险理赔指数设计[J].灾害学,2017,32(1):137-141.

[17] 罗军刚,解建仓,阮本清.基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评判模型及应用[J].水利学报,2008,39(9):1092-1104.

[18] 林婧婧,申恩青,刘德祥.甘肃省近 58 年春旱的气候特征及其对农业的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):233-237.

[19] 黄晚华,隋月,杨晓光,等.基于连续无有效降水日数指标的中国南方作物干旱时空特征[J].农业工程学报,2014,30(4):125-135.