

# 1962—2010 年甘肃省黄土高原区干旱时空动态格局<sup>\*</sup>

张调风<sup>1</sup> 张 勃<sup>1\*\*</sup> 张 苗<sup>2</sup> 刘秀丽<sup>1,3</sup> 孙力炜<sup>1</sup> 安美玲<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; <sup>2</sup>甘肃农业大学林学院, 兰州 73007; <sup>3</sup>忻州师范学院地理系, 山西忻州 034000)

**摘 要** 借助 ArcGIS 9.3 和 SPSS 软件平台, 根据甘肃省黄土高原区 33 个气象站 1962—2010 年气象资料, 利用综合气象干旱指数(CI)从干旱率、干旱强度和干旱频率三方面对甘肃省黄土高原区近 50 年的干旱时空变化特征进行了分析。结果表明: 春、秋季干旱率呈现显著增加趋势, 夏、冬季干旱率呈略微增加趋势; 夏季干旱频率最大, 春季、秋季次之, 冬季最少; 春、秋季干旱以 2000 年来最为严重, 夏季干旱以 2000 年以来、20 世纪 70 年代和 90 年代均较严重, 冬季干旱以 20 世纪 80 年代最为严重; 甘肃省黄土高原区逐年干旱持续日数和干旱强度存在明显的年际波动, 线性变化趋势明显; 从空间分布来看, 春、夏和秋季干旱多发区主要集中在甘肃省黄土高原区西北部, 而 106°E 以西“临洮-通渭-天水”一线和庆阳东南部是干旱多发区变幅最大的地方, 冬季干旱多发区主要集中在甘肃省黄土高原区南部。

**关键词** 综合气象干旱指数(CI); 干旱频率; 干旱强度; 时空格局; 黄土高原

**中图分类号** P426.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)8-2066-09

**Spatiotemporal pattern of drought in Loess Plateau of Gansu Province, Northwest China in 1961–2010.** ZHANG Tiao-feng<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1\*\*</sup>, ZHANG Miao<sup>2</sup>, LIU Xiu-li<sup>1,3</sup>, SUN Li-wei<sup>1</sup>, AN Mei-ling<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*School of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*; <sup>2</sup>*College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China*; <sup>3</sup>*Department of Geography, Xinzhou Teachers University, Xinzhou 034000, Shanxi, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 2066–2074.

**Abstract:** Drought, one of the most severe hazards resulting in significant economic losses in agriculture and industry, is a natural phenomenon caused by the imbalance between the input of and the demand for water. As a major grain production zone in Gansu Province, the Loess Plateau of the Province shows great vulnerability in drought. In this paper, the characteristics of inter-annual and seasonal droughts in the Loess Plateau of Gansu Province were analyzed in terms of drought rate, drought intensity, and drought frequency, and by using the compound index of meteorological drought (CI) and the data of daily precipitation, air temperature, wind speed, relative humidity, and sunshine duration from 33 weather stations during the period from 1962 to 2010. Kriging interpolation was also applied to calculate the CI value for each station, so that all the CI values could be spatially and temporally comparable. In the Plateau of the Province, drought rate showed a significant increasing trend in spring and autumn but a slight increasing trend in summer and winter, and drought frequency was the most in summer, followed by in spring and autumn, and in winter. The 50-year average drought rate in spring, summer, autumn, and winter was 53.26%, 65.18%, 42.2%, and 44.16%, respectively. Over the past 50 years, the most serious inter-decadal drought in the Plateau of the Province occurred in spring and autumn since 2000, and in winter in the 1980s. In the 1970s and 1980s and since 2000, summer drought was more serious. There was a notable inter-annual fluctuation in the average annual lasting days and annual occurrence severity of meteorological droughts in the whole

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40961038)、生态经济学省级重点学科项目(5001-02)和西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJCXGC-03-66)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2011-11-15 接受日期: 2012-04-09

region, and their linear change tendency was obvious. Spatially, in spring, summer, and autumn, the drought-prone area was mainly located in the northwest of the region. Meanwhile, in the districts of “Lintao-Tongwei-Tianshui” and southeast of Qingyang, the change range was the largest. The drought-prone area in winter was mainly located in south of the region. In order to well prevent and mitigate the drought in the Loess Plateau of Gansu Province, government and agricultural managers should pay more attention to the droughts that occur from spring to autumn, especially in summer.

**Key words:** compound index of meteorological drought (CI); drought frequency; drought intensity; spatiotemporal pattern; Loess Plateau.

干旱是区域范围内因长期无降水或降水异常偏少而造成空气干燥土壤缺水甚至干涸的现象 (Woodhouse & Overpeck, 1998), 是中国主要的自然灾害之一 (叶笃正等, 1996)。如 2006 年重庆发生百年一遇旱灾、2008 年 11 月—2009 年 1 月, 30 年未遇的秋冬连旱袭击中国北方冬麦区、2009 年秋季以来到 2010 年初西南地区遭受几次异常严重的夏秋连旱, 都给农业生产、生活和社会经济造成了严重的影响 (刘晓云等, 2012)。干旱灾害的损失之所以如此严重正是由于干旱发生的频率高、影响范围广、持续时间长、后延影响大 (宋连春等, 2003; 白开旭等, 2012)。基于干旱标准、干旱的强度和持续时间可以用干旱指数来表达, 干旱指数是综合表征了地表干湿状况的一个简单数值 (侯英雨, 2007)。目前已有很多专家和学者从降水、蒸发等方面运用气象干旱指数对各地情况进行干旱发生及分布特征的分析, 主要有两类: 一类是通过气象学方法研究降水量的统计分布规律, 反映干旱的强度, 以  $Z$  指数和  $SPI$  指数为代表 (袁文平和周广盛, 2004), 另一类是通过研究干旱机理, 反映干旱涉及的各个物理过程, 以帕默尔干旱指数 ( $PDSI$ ) 与相对湿度指数 ( $MI$ ) 为代表 (卫捷和马柱国, 2003; 姚玉璧等, 2007)。但是一些学者经过研究证明其有一定的局限性 (张存杰等, 1998; 刘庚山等, 2004; 张永等, 2007)。综合气象干旱指数 (compound index of meteorological drought,  $CI$ ) 鉴于两类指标的优点, 将近 30 d (月尺度) 和近 90 d (季尺度) 降水量标准化降水指数, 以及近 30 天相对湿度指数进行综合而得, 该指标既反映短时间尺度 (月) 和长时间尺度 (季) 降水量气候异常情况, 又反映短时间尺度 (影响农作物) 水分亏欠情况, 适合实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估 (张强等, 2006)。前人对全国 (邹旭恺等, 2010) 及江苏省 (包云轩等, 2011)、河南省 (李树岩等, 2009)、辽宁省 (曹永强等, 2012) 和安徽省 (谢五三

和田红, 2011) 等局部地区分别用  $CI$  指数对其干旱特征进行分析, 研究结果证明了  $CI$  指数的优势。鉴于此, 本文引入  $CI$  指数, 从干旱强度、干旱持续时间和干旱频率等方面系统地分析了 1962—2010 年甘肃省黄土高原区干旱发生的时空动态格局。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

甘肃黄土高原区 (图 1) 东连陕西黄土高原, 西达乌鞘岭, 是西北地区和黄土高原的交集。水分供给主要依靠大气降水, 该区域水资源和农业生产对气候变化依赖性强, 特殊的地理条件和气候特征决定了甘肃黄土高原区是一个干旱频繁发生的地区 (蒲金涌等, 2010)。降水和蒸发历年来都是该区域主要研究的热点课题。干旱使生态系统生产力下降, 生态系统功能减弱, 降低了其抵抗自然灾害的能力 (刘晓梅等, 2009), 尤其是近 50 年, 受全球气候变暖的影响, 降水明显减少, 暖干化过程加剧, 根据王兴梅等 (2011)、姚玉璧等 (2011) 研究该区极端降水和地表湿润状况结果推断, 干旱有增加现象。应对频繁发生的干旱, 减少旱灾损失, 是目前必须面对和解决的问题。深入研究该区域干旱的时空分布特

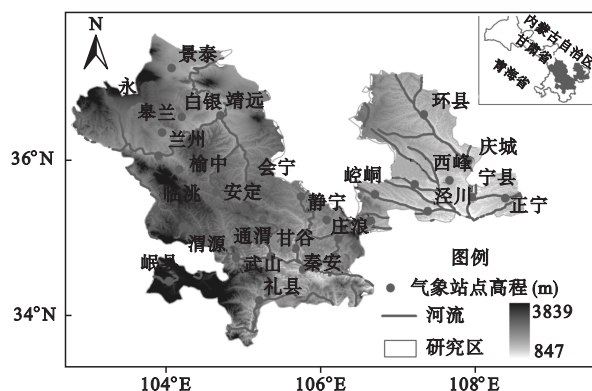


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

征对于全面了解干旱的发生、发展趋势,及时调整区域农业等人工管理生态系统管理方式和实现农业的可持续发展具有十分重要的意义(万信等,2007)。

1.2 材料来源

本文采用中国气象局 1962—2010 年的 42 个国家标准气象站点的逐日常规观测数据,包括日平均气温(℃)、10 m 处风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、日照时数(h)和相对湿度(%)等资料。为保证数据的可靠性,对研究期多年逐日数据进行严格的质量控制和筛选,对部分缺测数据和不合理值根据数据说明文件进行了必要的插补延长,最终选取了 33 个站点作为本文的研究对象,建立了气象要素的时间序列。文中所用空间化方法采用 ArcGIS 9.3 中空间分析模块的 Kring 插值法实现了 CI 栅格数据的干旱区域面积提取和统计,空间分辨率为  $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ ,Kring 法基于对空间分布的数据线性最优、无偏内插估计,是当前应用最为广泛、插值结果较为准确的插值方法之一(Goovaerts,2000)。

1.3 研究方法

1.3.1 综合气象干旱指数计算方法 CI 指数是基于标准化降水指数(SPI)、相对湿润指数(MI)而建立的一种综合指数(张强,2006),计算公式为:

$$CI=aZ_{30}+bZ_{90}+cM_{30}$$
 (1)

式中, $Z_{30}$ 、 $Z_{90}$ 分别为近 30 d 和近 90 d 的标准化降水指数 SPI 值, $M_{30}$ 为近 30 d 的相对湿润度指数 MI, $a$ 、 $b$ 均取 0.4, $c$ 取 0.8。

标准化降水指数 SPI 的计算如下:

在 McKee 等(1993)提出的标准化降水指数(SPI)计算中,假设某一时段的降水量  $x$  服从  $\gamma$  分布,其  $\Gamma$  分布的概率密度函数为:

$$G(x)=\frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}e^{-x/\beta}(x\geqslant 0)$$
 (2)

$$\Gamma(\alpha)=\int_0^\infty x^{\alpha-1}e^{-x}dx$$
 (3)

式中, $\alpha$  为形状参数, $\beta$  为尺度参数, $\Gamma(\alpha)$  为 gamma 函数,将其计算得到累积概率密度函数  $G(x)$ ,通过下式对  $G(x)$  进行转化:

$$H(x)=q+(1-q)G(x)$$
 (4)

式中, $q$  为降水序列中 0 值出现的频率。并通过高斯函数将  $H(x)$  标准化后得到最终的 SPI 值, $\alpha$ 、 $\beta$  的估计方法参照文献(张强等,2006)。

相对湿润指数 MI 的计算如下:

$$MI=\sum P/\sum ET_o$$
 (5)

式中, $\sum ET_o$  为近 30 d 潜在蒸散发(mm), $\sum P$  为近 30 d 降水量(mm)。

根据联合国粮农组织(FAO)推荐的基于 Penman-Monteith 公式的参考蒸散发计算方法可以近似为潜在蒸散发的估计,如下式:

$$ET_o=\frac{0.408\Delta(R_s-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(VP_s-VP)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)}$$
 (6)

式中, $ET_o$  为参考蒸散发量( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $R_n$ 、 $G$  分别为净辐射和土壤热通量( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $\gamma$ 、 $\Delta$  分别为干湿常数与饱和水汽压曲线斜率( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ); $U_2$  为 2 m 处风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $VP_s$  和  $VP$  为饱和水汽压和实际水汽压(kPa)。计算过程用到的各项参数计算均采用 FAO 推荐标准(Allen *et al.*,1998;刘昌明和张丹,2011)。

利用(1)式滚动计算出逐日的综合气象干旱指数 CI,跟踪干旱发生过程。根据气象干旱等级(表 1)对 CI 值划分后进行干旱分析评估。根据 CI 值可以判断干旱过程及开始和结束日期,其中  $CI_{CI0}$  表示连续 10 d CI 值, $CI_{FI}$  表示第一个 CI 值, $CI_{PI0}$  表示前 10 d CI 值, $CI_{LI}$  表示最后一个 CI 值。具体见表 2。干旱过程开始到结束期间的时间为干旱持续时间。当某一时段内至少出现 1 次干旱过程,并且累积干旱持续时间超过所评价时段的 1/4 时,则认为该时段发生干旱事件,其干旱强度由时段内 CI 值为轻旱以上的干旱等级之和确定。本文分别以年和季节作为研究时段,季节定义为 1、2 月和上年的 12 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季。

1.3.2 干旱发生频率计算 利用公式(7)计算干旱发生频率

表 1 综合气象干旱指数(CI)的干旱等级划分  
Table 1 Levels of compound index of meteorological drought (CI)

等级	类型	CI
1	无旱	$-0.6 < CI$
2	轻旱	$-1.2 < CI \leqslant -0.6$
3	中旱	$-1.8 < CI \leqslant -1.2$
4	重旱	$-2.4 < CI \leqslant -1.8$
5	特旱	$CI \leqslant -2.4$

表 2 干旱过程判断标准

Table 2 Standards of drought processes

干旱过程	标准
干旱发生	$0 < CI_{C10} \leq -1.2$ $CI_{F1} \leq -0.6$ 的日期为干旱开始日期
干旱发展	$CI_{F1} - CI_{P10} < -0.6$
干旱持续	$ CI_{F1} - CI_{P10}  < 0.6$
干旱缓解	$CI_{F1} - CI_{P10} > 0.6$
干旱解除	达不到干旱解除标准 $CI_{C10} > -0.6$ 且 $CI_{L1} < -0.6$ 的日期为结束日期

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{7}$$

式中, $n$  为实际有干旱事件发生的年数, $N$  为资料年代序列数,1961—2010 年共 50 a 数据,但由于  $CI$  指数的计算是向后滚动的,带入资料计算所得的  $CI$  值是从 1962 年开始,所以  $N$  取 49。

1.3.3 干旱率计算 讨论各干旱长期变化时,采用了格点化和面积加权的计算方法,在一定程度上有助于增加区域平均时间序列的可靠性(邹旭凯等,2010)。

$$\theta_d = \frac{S_d}{S_l} \times 100\% \tag{8}$$

式中, $\theta_d$  为干旱率, $S_d$  为干旱面积( $\text{km}^2$ ), $S_l$  为总面积( $\text{km}^2$ )。

2 结果与分析

2.1 干旱的时间变化特征

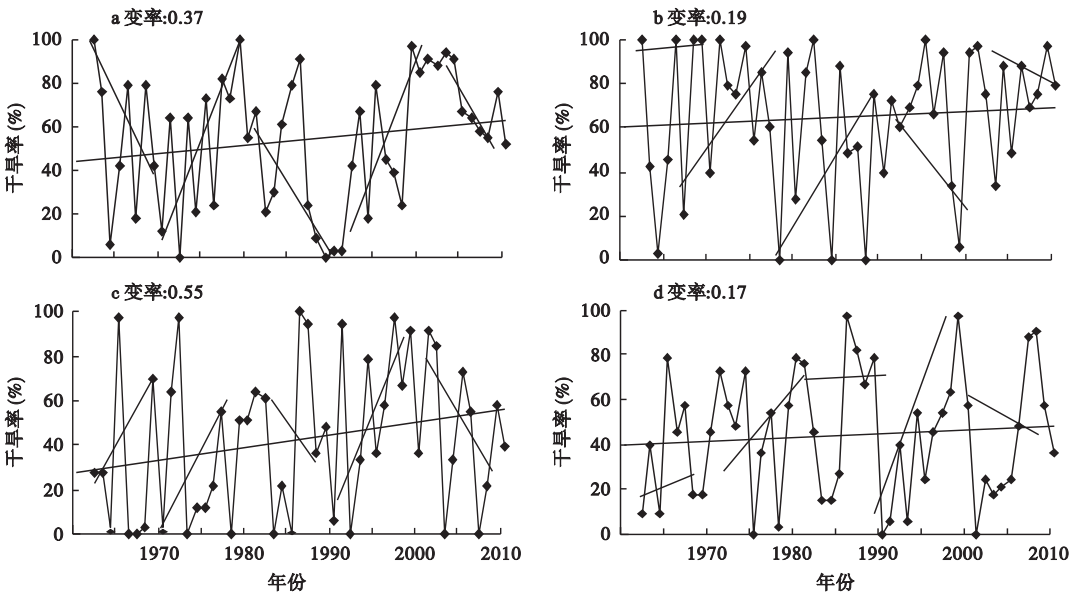


图 2 1962—2010 年季节性干旱率变化  
Fig. 2 Change of seasonal drought rates from 1962–2010  
折线表示年代变化;直线表示年代线性变化趋势;短线表示年代际线性变化趋势。

2.1.1 干旱率变化 从图 2 可以看出,甘肃省黄土高原区干旱在时间分布特征方面主要表现为春、夏、秋、冬四季均有发生,其中夏旱最为严重,春季次之,秋季和冬季也较为严重;在年代际变化上,自 2000 年以来发生干旱最为严重,平均干旱率为 58.9%,其次为 20 世纪 80 年代,平均干旱率为 53.4%,60 年代、70 年代和 90 年代的干旱发生也处于十分严重的水平,平均干旱率都>40%。

春季(图 2a),干旱率表现出显著的增加趋势[3.7%(10a)<sup>-1</sup>],多年平均干旱率为 53.26%。近 50 年来干旱率大于 80% 的有 10 年,其中 1962 年和 1979 年春旱最为严重,干旱率达 100%;其次为 1986 年、2001 年、2003 年和 2004 年,干旱率均在 90% 以上。1972 年和 1989 年未发生干旱。从年代际变化看,自 2000 年以来春旱明显加重,平均干旱率为 79.5%,全部发生干旱;60 年代和 80 年代也是干旱率较大的时期,平均干旱率大于 50%;70 年代和 90 年代相对其他时期春旱较轻,平均干旱率分别为 42.4% 和 37.1%。

夏季(图 2b),干旱率呈逐渐增加的趋势[1.9%(10a)<sup>-1</sup>],多年平均干旱率为 65.18%,是发生干旱最为严重的季节。近 50 年来干旱率大于 90% 的有 13 年,其中 1962 年、1966 年、1968 年、1969 年、1971 年、1982 年和 1995 年夏季干旱最为严重,干旱率均达到 100%,出现了罕见的连年大范围干旱。在年



代际变化方面,研究区夏季 70 年代、90 年代和自 2000 年以来夏旱较严重,平均干旱率大于 70%;60 年代次之,平均干旱率为 64%;80 年代夏旱仍较为严重,平均干旱率为 56.8%。

秋季(图 2c),干旱率的增加趋势最大[5.5% (10a)<sup>-1</sup>],但多年平均干旱率在四季中最小为 42.2%。其中最大值出现在 1986 年(100%),其次为 1965、1972、1997、1987、1991、1999 和 2001 干旱率均大于 90%;50 年中有 9 年未发生干旱。年际变化幅度较大,从 60 年代的 28.4% 递增到 2000 年以后的 46.6%。

冬季(图 2d),干旱率有弱的增加趋势[1.7% (10a)<sup>-1</sup>],多年平均干旱率为 44.16%。其中干旱率最大的前 3 名分别为 1986(97%)、1999(96.8)和 2008(90.9%),均出现在 20 世纪 80 年代以后。80 年代为干旱率最大时期,平均干旱率为 54.5%,90 年代最小,平均干旱率为 28.8%,60 年代、70 年代和 2000 年平均干旱率均>30%。

**2.1.2 干旱持续日数和干旱强度变化** 近 50 年来甘肃省黄土高原区历年平均干旱持续日数呈波动式变化(图 3a),年干旱持续日数最多的达 230 d,出现在 1986 年,最少的只有 10 d,出现在 1964 年。大部分年份持续日数都在 100 d 以上,1986 年以后历年平均干旱持续日数呈增长趋势,这与前人研究得出 1986 是西北地区气候发生变化的转折点一致(施雅风等,2003),变率为 0.46,  $P<0.01$ 。

由图 3b 可以看出,近 50 年来该区域逐年平均干旱强最大值出现在 1999 年,为-349.62;次大值出现在 1986 年,为-332.48;最小值出现在 1964 年,为-8.19,最大值为最小值的 43 倍。有 13 个年份的干旱强度超过-200。变率为-0.53,  $P<0.05$ 。从图 3c 可以看出,历年干旱发生期内的日旱强度变化趋势,1999 年的 CI 年绝对值比 1986 年大,1986 年的日旱强度为-1.45,达中旱程度;1999 年约为-1.56,也达中旱程度;而从早期持续天数来看,1986 年早期长为 230 d,1999 年为 225 d,后者的累积效应明显比前者大。1962 年 CI 值不是最大,为 321.32,持续天数为 163 d,但日干旱强度达到-1.98,为重旱程度。1994、2002 年的 CI 值属居中值,分别为-177.29、-166.29,但这 2 年的日旱强分别达到了-1.30、-1.39,为中旱程度,同样有些年份的 CI 值不是很大,但日干旱强度都达到了中旱程度。由此可见,干旱持续日数和日干旱强度都对干旱发生程度有着极

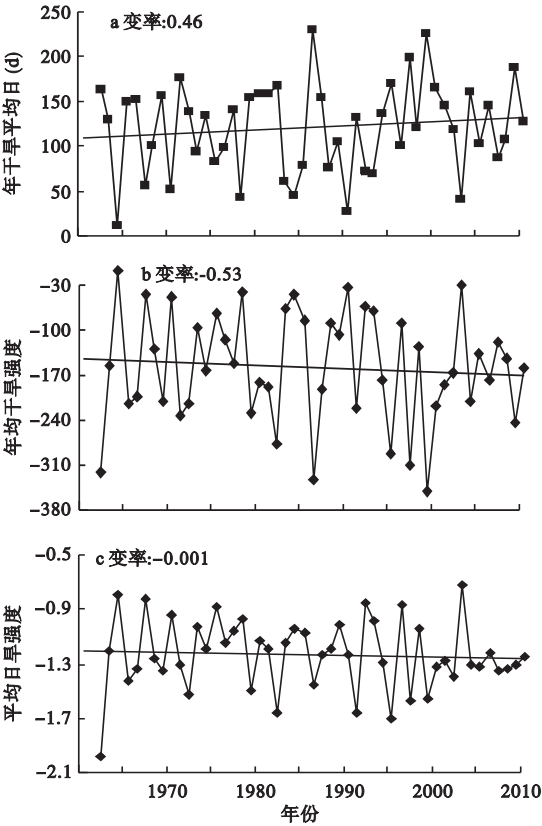


图 3 1962—2010 年平均干旱持续日数、平均干旱强度和早期平均日旱强度变化趋势  
Fig. 3 Variation of annual average drought duration, annual average drought severity and daily average drought severity during drought that occurred from 1962 to 2010

其重要的影响。

**2.2 干旱的空间分布特征**

甘肃省黄土高原区降水降水量时空变化上均存在不平衡性,加之受到地貌类型的影响,其干旱发生在空间分布上也表现出一定的复杂性。图 4 表明在不同季节研究区干旱高发区在空间分布上表现出较大的差异。最大值基本达到最小值的 2 倍,说明空间差异较大。兰州、靖远一带和庆阳北部地区的变幅较小而频率高。白肇烨等(1988)研究发现,在 700 hPa 上兰州附近有长驻小高压,小高压影响兰州-榆中-靖远,更容易使这一带干旱加剧;临洮-通渭-天水一带、庆阳东南部变幅较大频率低,李耀辉等(2000)研究这些区域是西北地区四季气候异常的最敏感区域,这种敏感变化受区域气候要素变率影响较大,可能是因为受到黄土高原中部的六盘山阻挡东南季风影响所致。

春旱发生频率分布呈现出明显的北高南低特点。发生频率最大值出现在景泰县、靖远县,达

65% 以上;陇中地区和陇东地区北部春旱频率在 50% ~ 60%,庄浪、天水、渭源、临洮一线在 40% ~ 50%;宁县、岷县的干旱频率在 30% ~ 40% (图 4a)。这与郭江勇等(2004)的研究结果一致。

夏旱发生的频率较春旱大幅度增加,整个黄土高原区的平均干旱频率为 62%,南北与东西都有很大差异。最大频率区域是景泰县、白银区、环县,大于 75%,靖远、兰州一带和陇东地区夏旱频率在 60% ~ 70%,临洮、渭源、天水、平凉、庄浪一带,夏旱频率介于 40% ~ 60%,这与夏季这些地区的降水总量比其他地区多有关 (图 4b)。这与王兴梅等(2011)的研究结果一致。

秋旱发生频率较夏旱低,但南北差异较春季大,秋旱频率最大值出现在靖远县,达 63.27%。乌鞘岭以东景泰、兰州一带秋旱频率达到 45% 以上;陇东地区、通渭、渭源一带秋旱发生频率在 35% ~ 45%;秋旱的低频区出现在平凉、庄浪、天水一线,均在 20% ~ 35% (图 4c)。

冬旱发生频率较其他任何季节都低,全区冬旱分布规律极为显著。冬旱发生频率达到 50% 以上的站点均集中在武山、秦安一带,除此而外,泾川、临洮的冬旱频率也较高;兰州、景泰一带、陇东西北部冬旱发生频率在 40% ~ 50%,陇东东南部、华亭—张家川一线、渭源—定西一带冬旱发生频率在 22% ~ 40% (图 4d)。

农业由于受自身生产特点的制约而极易受旱灾影响,不同作物在不同时空条件下对水分亏缺的敏感性存在较大的差异 (闫峰,2010)。近年研究区主要作物有冬小麦、玉米、大豆等,水热条件的季节性差异使农作物熟制、布局、结构也发生很大变化 (张凯,2012)。春季至秋季处于作物生长期,地面蒸发和作物蒸腾比较旺盛,作物对水分需求较多,该阶段发生的干旱将直接影响到作物的生长状况和产量 (王位泰等,2006,2008)。根据干旱的时间变化特征来看,近 50 年来夏季干旱发生概率和平均干旱率均处于年内最严重水平,而秋旱增长的幅度最大,因

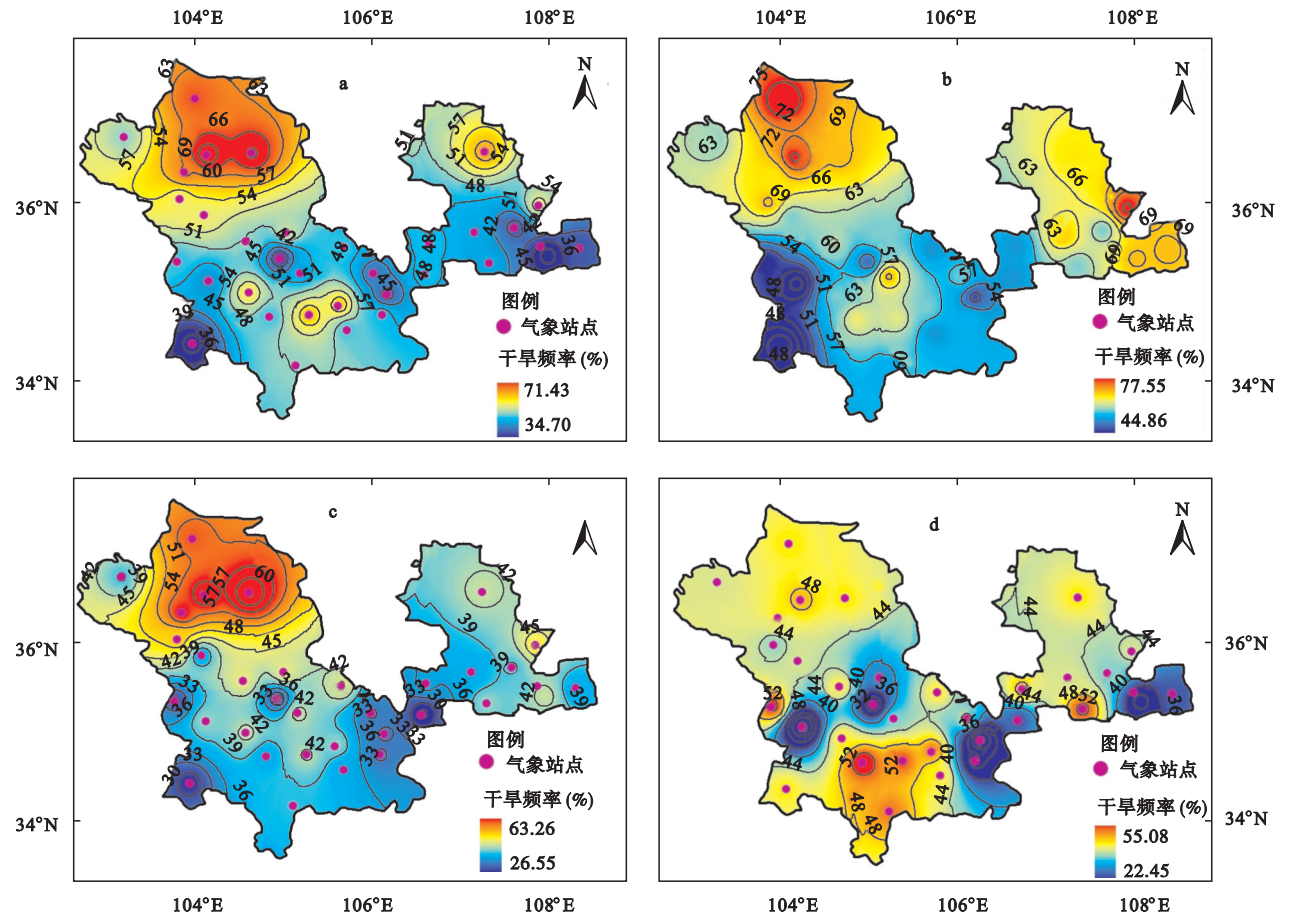


图 4 1962—2010 年四季干旱发生频率分布示意图  
Fig. 4 Spatial distribution of drought occurrence frequencies for each season in 1962–2010

表 3 甘肃省黄土高原区典型干旱年春/夏/秋季干旱指数检验  
Table 3 Test of spring/summer/autumn drought index typical case of drought in Loess Plateau of Gansu Province

站名	等级	1972	1978	1986	1991	1994	1995	1997	2000	2003	2004	2008
兰州	SPI	无/无/无	无/无/无	无/无/无	无/无/无	重/无/无	重/重/重	无/无/中	无/无/无	无/无/无	特/特/无	轻/无/无
	K	适/轻/轻	适/适/湿	适/湿/轻	适/适/轻	重/适/适	重/重/湿	中/中/中	重/轻/湿	适/轻/轻	轻/轻/中	轻/轻/适
	CI	无/无/轻	轻/中/无	重/中/无	轻/轻/轻	中/中/无	中/重/中	轻/轻/轻	中/中/无	轻/无/轻	轻/轻/轻	轻/轻/无
临洮	SPI	无/无/无	无/无/无	无/无/无	无/无/无	重/无/无	无/无/无	中/特/特	中/无/无	无/无/无	轻/轻/无	轻/无/无
	K	适/适/轻	轻/适/湿	适/湿/轻	适/适/轻	中/适/轻	中/中/适	轻/中/中	中/中/适	适/轻/适	轻/轻/适	轻/轻/适
	CI	无/无/轻	轻/轻/无	中/轻/无	无/无/无	无/轻/无	中/中/轻	轻/中/轻	中/中/轻	无/轻/轻	轻/轻/无	轻/轻/无
西峰	SPI	轻/无/无	无/无/无	中/无/无	无/无/无	轻/无/无	中/中/中	中/重/重	中/无/无	无/无/无	中/重/无	重/中/无
	K	适/轻/适	轻/适/适	轻/轻/轻	适/湿/中	轻/轻/中	重/重/轻	轻/重/中	中/轻/适	适/适/适	中/中/轻	中/中/中
	CI	轻/轻/中	中/中/无	轻/轻/轻	无/无/无	无/中/轻	重/重/重	无/中/中	中/轻/轻	无/轻/无	轻/轻/无	中/中/轻
天水	SPI	轻/无/无	无/无/无	中/无/无	无/无/无	重/无/无	轻/中/轻	中/中/中	重/中/无	无/无/无	特/特/无	特/无/无
	K	轻/轻/轻	适/轻/湿	轻/轻/轻	适/轻/中	轻/轻/中	轻/中/轻	轻/中/轻	轻/中/湿	适/适/湿	中/中/适	中/中/适
	CI	轻/轻/轻	轻/轻/无	轻/中/轻	无/无/轻	轻/轻/轻	无/轻/轻	轻/轻/中	轻/中/无	无/轻/无	中/轻/轻	轻/轻/轻

此,农业生产中对夏、秋旱必须给予最充分的重视和对待。农业生产部门在指导干旱防控时,应在充分利用当前灌溉设施的基础上,进一步加强中、小型水库等水利配套设施建设,做好冬季和春季水库蓄水工作;水利设施和农业结构也会影响干旱发生,陇东地区水利灌溉设施不足,难以发挥应有的抗旱作用,因此,优化农业种植结构,调整夏收与秋收作物的种植比例,并及时灌溉从而整体上提高全区的干旱防控水平(王静和尉元明,2006)。

2.3 CI 与 K、SPI 干旱指数的对比

根据前人(王劲松等,2007;瞿禄新和冯起,2011)的研究结果可知,K、SPI 和 CI 3 种指数在西北干旱区监测干旱的效果最佳。因此,为了进一步检验 CI 指数在甘肃省黄土高原区的监测效果,本文对这 3 种指数做了对比,但是由于文章篇幅有限,表 3 仅显示 4 个代表站典型干旱年春、夏、秋季干旱样本检验结果。

由表 3 可知,对兰州来说,SPI 定义为 1994 年春季干旱,1995 年春夏秋连旱;K 指数定义 1994、2000 年为春季干旱年,1995 年为春夏连旱,1997 年为春夏秋连旱,2004 年为秋旱;CI 指数定义 1986 年为春旱年,1994 和 2000 年为春夏连旱,1995 年为春夏秋连旱年。对临洮来说,SPI 将 1994、1997、2000 年定义为春旱年,其余年份和季节正常;K 指数定义 1994 年春旱,1997 年为夏秋连旱;CI 指数定义 1986 年为春季干旱,1997 年为秋季中旱,但二者同时定义 1995 和 2000 年为春夏季连旱。对西峰来说,SPI 将 1986 年定义为春旱年,1995 和 1997 年春夏秋连旱,2004 和 2008 年定义为春夏连旱;K 指数定义 1995 和 2004 年为春夏连旱,1991 和 1994 年为秋季中旱,1997 年为夏秋连旱,2008 年为三季连旱;CI

指数定义 1978 年和 2008 年为春夏季连旱,1995 年为春夏秋连旱,1997 年为夏秋连旱;对天水来说,SPI 将 1986、1994、1997、2000、2004、2008 年定义为春季旱年,1995 年、1997、2000、2004 年定义为夏季干旱年,1997 年为秋季重旱年,K 指数定义 1986 年、1997 年、2004 年为春季中旱,1995 年、2000 年为夏季的重旱,1997 年为秋季中旱,CI 指数定义 2004 年为春季中旱,1986、2000 年为夏季中旱,1997 年为秋季中旱。实际情况是,1972 年整个研究区为重旱年,秋旱严重,1978 和 1986 年陇东地区春夏连旱严重,1991 年陇东地区和水天地区秋旱,整个研究区 1994 年春旱,1995 年春夏连旱、1997 年夏秋连旱,夏旱严重,2000 年、2004 年和 2008 年春夏连旱。

从上述分析可知,SPI、K 和 CI 3 种指数监测到干旱等级与干旱实况相比,绝对一致率均不高,K 指数的相对一致率较高,能很好地体现干旱年份,尤其在特旱和重旱评估效果更好,而 SPI 干旱强度和面积缩小,K 和 CI 表现较为一致。但 SPI 指数主要考虑了降水因子,K 指数考虑了降水和蒸发影响,尽管 CI 指数在研究区反映效果不如 K 指数,但能反映逐日的干旱程度,本文计算时考虑了相对湿度、风速等因素,结合了 SPI 和 MI 两种指数的优势,具有一定的研究意义。

3 结 论

本文采用综合气象干旱指数(CI)作为干旱评价因子,对 1962—2010 年甘肃省黄土高原区干旱的时空变化特征进行了研究,得出以下主要结论:

(1) 季节变化上,甘肃省黄土高原区四季多年平均干旱率大小为夏季(65.18%)>春季(53.26%)>冬季(44.16%)>秋季(42.2%);四季干旱发生面



积均呈现出逐渐增加的趋势,其中秋季增加趋势最大为  $5.5\% (10a)^{-1}$ ,春季次之为  $3.7\% (10a)^{-1}$ ,夏季和冬季分别为  $1.9\% (10a)^{-1}$  和  $1.7\% (10a)^{-1}$ ;夏季干旱发生频率最高 ( $44.86\% \sim 77.55\%$ );春季次之 ( $34.70\% \sim 71.43\%$ ),冬季频率最低 ( $22.45\% \sim 55.08\%$ )。研究区以夏季干旱最为严重。

(2) 年代际变化上,春旱干旱率达到 100% 有 2 年,以 2000 年来最严重,平均干旱率为 79.5%;夏旱干旱率达到 100% 有 7 年,70 年代、90 年代和 2000 年以来干旱均较严重,平均干旱率大于 70%;秋旱干旱率达到 100% 有 1 年,平均干旱率从 60 年代的 28.4% 增加到 2000 年后的 46.6%;冬旱无干旱率达到 100% 年份,以 80 年代最为严重,平均干旱率为 54.5%。近 50 年来,黄土高原区逐年平均干旱持续日数和干旱强度虽然存在着明显的年际波动,但线性变化趋势较明显。这可能分别受太阳黑子和 ENSO 周期的影响,而 ENSO 通过影响东亚季风年代际周期来影响干旱。

(3) 空间变化上,甘肃省黄土高原区的干旱程度大体呈现北高南低的空间分布特征,  $106^{\circ}E$  以西“临洮-通渭-天水”一带和庆阳东南部是干旱变幅最大的地方;春、夏、秋季干旱发生频率高值区主要集中在乌鞘岭以东一带和陇东地区的西北部,不同的是夏季的低值区较集中在临洮-渭源一带,这三季的干旱对陆地生态系统的影响最大,探索干旱发生的规律可以为其做好防范工作,冬季频率较高的地区主要集中在武山-秦安一带。

CI 指数同时考虑了降水和蒸发能力因子,与单纯利用降水量的干旱指数比较具有较大的优越性,蒸发能力的计算也比较简便,但未考虑当地水地质条件、灌溉、耕作、社会经济等因素,因此不能完全反映实际干旱对当地农业生产、人民生活的影响。另外,本文只是应用气象观测资料对干旱率、干旱强度和干旱发生的频率进行了初步研究,需要进一步加强与实际干旱情况的对比研究,与多时相的遥感数据和相应的作物模型结合,为解除其他类型的干旱做好服务工作。

## 参考文献

白开旭,刘朝顺,施润和,等. 2012. 2010 年中国西南旱情的时空变化特征分析——基于 MODIS 数据归一化干旱指数. 地球信息科学学报, **14**(1): 32–48.

白肇烨,徐国昌,陈 乾. 1988. 中国西北天气. 北京: 气象出版社.

包云轩,孟翠丽,申双和,等. 2011. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律. 地理学报, **66**(5): 599–608.

曹永强,张兰霞,张岳军,等. 2012. 基于 CI 指数的辽宁省气象干旱特征分析. 资源科学, **34**(2): 265–271.

郭江勇,李耀辉,王 文,等. 2004. 甘肃黄土高原春旱的气候特征及预测方法. 中国沙漠, **24**(2): 211–217.

侯英雨,何延波,刘钦火,等. 2007. 干旱监测指数研究. 生态学杂志, **26**(2): 892–897.

瞿禄新,冯 起. 2011. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化. 自然资源学报, **26**(5): 847–857.

李树岩,刘荣花,师丽魁,等. 2009. 基于 CI 指数的河南省近 40a 干旱特征分析. 干旱气象, **27**(2): 97–102.

李耀辉,李栋梁,赵庆云. 2000. 中国西北春季降水与太平洋秋季海温的异常特征及其相关分析. 高原气象, **19**(1): 100–110.

刘昌明,张 丹. 2011. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. 地理学报, **66**(5): 579–588.

刘庚山,郭安红,安顺清. 2004. 帕默尔干旱指数及其应用研究进展. 自然灾害学报, **13**(4): 21–27.

刘晓梅,李 晶,吕志红,等. 2009. 近 50 年辽宁省干旱综合指数的动态变化. 生态学杂志, **28**(5): 938–942.

刘晓云,李栋梁,王劲松. 2012. 1961–2009 年中国区域干旱状况的时空变化特征. 中国沙漠, **32**(2): 473–483.

蒲金涌,姚小英,马鹏里. 2010. 甘肃黄土高原地表湿润状况时空变化特征. 干旱区地理, **33**(4): 588–592.

施雅风,沈永平,李栋梁,等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转变的特征和趋势探讨. 第四纪研究, **23**(2): 152–164.

宋连春,邓振镛,董安祥,等. 2003. 干旱. 北京: 气象出版社.

万 信,王润元,李 宗. 2007. 陇东黄土高原塬区农业气象要素的变化特征. 生态学杂志, **26**(3): 344–347.

王 静,尉元明. 2006. 甘肃省农业生态系统健康评价. 生态学杂志, **25**(6): 711–715.

王劲松,郭江勇,倾继祖. 2007. 一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用. 自然资源学报, **22**(5): 709–717.

王位泰,张天峰,马鹏里,等. 2008. 甘肃陇东黄土高原秋季冬小麦异常旺长对气候变暖的响应. 生态学杂志, **27**(9): 1491–1497.

王位泰,张天峰,黄 斌,等. 2006. 甘肃陇东黄土高原冬小麦对气候变暖的响应. 生态学杂志, **25**(7): 774–778.

王兴梅,张 勃,戴声佩,等. 2011. 甘肃省黄土高原区夏季极端降水的时空变化. 中国沙漠, **31**(1): 223–229.

卫 捷,马国柱. 2003. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较. 地理学报, **58**(增刊): 117–124.



- 谢五三, 田红. 2011. 安徽省近50年干旱时空特征分析. 灾害学, **26**(1): 94-98.
- 闫峰, 王艳姣, 吴波. 2010. 近50年河北省干旱时空分布特征. 地理研究, **29**(3): 423-430.
- 姚玉璧, 董安祥, 王毅荣, 等. 2007. 基于帕默尔干旱指数的中国春季区域干旱特征比较研究. 干旱区地理, **30**(1): 22-29.
- 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 2011. 黄土高原陆地表层最大可能蒸散发量的变化特征. 生态环境学报, **20**(8): 1189-1195.
- 叶笃正, 黄荣辉. 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社.
- 袁文平, 周广胜. 2004. 干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, **19**(6): 982-991.
- 张凯, 李巧珍, 王润元, 等. 2012. 播期对春小麦生长发育及产量的影响. 生态学杂志, **31**(2): 324-331.
- 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 2006. 气象干旱等级 GB/T 20481-2006. 北京: 中国标准出版社.
- 张永, 陈发虎, 勾晓华, 等. 2007. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布: 基于PDSI数据. 地理学报, **62**(11): 1142-1152.
- 张存杰, 宝灵, 刘德祥. 1998. 西北地区旱涝指标的研究. 高原气象, **17**(4): 381-389.
- 邹旭恺, 任国玉, 张强. 2010. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究. 气候与环境研究, **15**(4): 371-378.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, *et al.* 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- Goovaerts P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, **228**: 113-129.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relation of drought frequency and duration to time scales// Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society: 179-184.
- Woodhouse CA, Overpeck JT. 1998. 2000 years of drought variability in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**: 2693-2714.
- 
- 作者简介** 张调风, 女, 1986年生, 硕士研究生, 主要从事农业气象遥感与GIS的应用. E-mail: ztfnwnu@163.com
- 责任编辑** 李凤芹
-