

# 基于降水平均等待时间指数的西北绿洲 干旱时空变化研究

陈丽丽, 刘普幸, 姚玉龙

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070)

**摘要:** 根据西北绿洲 1960—2011 年 86 个气象站点的日降水资料, 基于降水平均等待时间指数(AWTP)转化而来的相当干期(EDP), 利用线性回归和反距离插值(IDW)等统计方法分析了西北绿洲的干旱时空变化。结果表明, 西北绿洲的相当干期年变化总体呈下降趋势, 其倾向率为  $-1.109/10$  a。在 52 a 中, 1991 年的相当干期最大, 达到了 108.9 d。西北绿洲相当干期季节变化均呈降低趋势, 春季减小最明显。突变分析表明, 1976 和 1996 年为相当干期的突变年。周期分析表明, 西北绿洲的 5 个分区分别存在 13, 12, 9, 13, 10 a 的主周期。西北绿洲相当干期呈以塔里木盆地的西北部 and 新疆地区吐鲁番盆地—塔里木盆地的东南部以及柴达木盆地西部组成的区域为两个中心向四周呈减小的半环状分布特征。

**关键词:** 西北绿洲; 相当干期; AWTP 指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0220-06

中图分类号: K903

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.057

## A Study on Temporal and Spatial Change of Drought in Northwest Oasis Based on Averaged Waiting Time for Precipitation Index

CHEN Li-li, LIU Pu-xing, YAO Yu-long

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** Based on the daily precipitation data from 86 meteorological stations in northwest oasis during 1960—2011, using the methods of equivalent dry period(EDP) and inverse distance weighted interpolation (IDW), the variation characteristics of drought in northwest oasis was analyzed. The results indicated as follows: the annual EDP in northwest oasis presented a decreasing trend, and the change tendency of EDP being  $-1.109/10$  a. In 52 years, the maximum value of EDP presented in 1991, and it reached 108.9 d. The seasonal EDP in northwest oasis presented a decreasing trend, and spring was the most significant. The abrupt change of EDP happened in 1976 and 1996, respectively. Morlet wavelet analysis of EDP in northwest oasis showed that there were periods of 13, 12, 9, 13, 10 a in five regions of northwest oasis. The difference of spatial distribution of drought in northwest oasis area is obvious, AWTP index and quite dry period both show that the drought centers are in northwest of Tarim basin and Turpan basin—southeast of Tarim basin—west of Tsaidam basin, and it was decreased from the two centers to the surrounding.

**Keywords:** northwest oasis; equivalent dry period; AWTP index

干旱作为最严重的自然灾害之一, 其发生频率高, 影响范围大, 持续时间长, 因而成为近年来的一个热点问题<sup>[1]</sup>。干旱是西北干旱区最常见的一种气象灾害, 随着经济、社会的快速发展, 人口的不断增长, 干旱灾害的影响已经从传统的农业领域扩展到了工业、城市、生态等多个领域, 旱灾的损失也越来越大<sup>[2]</sup>。研究干旱的重要前提是干旱指数的确定, 在这方面国内外学者已经取得了很多重要的成果和突

破<sup>[3-11]</sup>。然而这些干旱指数均是基于某段时间的累计降水量, 计算干旱指数后再判断干旱发生情况及确定干旱等级。但实际上, 降水量的时空分布不均匀, 也就导致降水量较多的年份也可能出现严重的干旱; 反之, 降水量的时空分布较均匀, 降水偏少的年份也会出现无干旱。因此, 利用这些干旱指数来分析干旱的时空变化存在一定的局限性。而降水的平均等待时间 (averaged waiting time for precipitation,

收稿日期: 2013-08-22

修回日期: 2013-09-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“河西绿洲天然胡杨林生长的水盐过程和衰退机制研究”(40961035); 甘肃省科技计划基金项目(0803RJZA094); 甘肃省级重点学科自然地理学项目

作者简介: 陈丽丽(1987—), 女(汉族), 甘肃省庄浪县人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区域环境与绿洲建设。E-mail: feiba\_1987@126.com。

通信作者: 刘普幸(1964—), 女(汉族), 山西省平遥县人, 教授, 博士, 主要从事干旱区域环境与绿洲建设、树轮水文学研究。E-mail: fmlpx@nwnu.edu.cn。

AWTP)指数可以通过持续无降水日的分析,更能较好地反映干旱状况<sup>[2]</sup>。目前,AWTP指数在我国的应用还比较少<sup>[2,12-15]</sup>。西北绿洲位于中国西北干旱区,主体在新疆、甘肃河西走廊、青海的柴达木盆地等地区,土地总面积约 $2.48 \times 10^6 \text{ km}^2$ <sup>[16]</sup>。西北绿洲地处亚欧大陆的腹地,四周距海均比较遥远,气候干燥,自然降水稀少,因此干旱频繁发生,对当地的农业生产和生态环境的影响非常大,据统计,1950—1994年西北地区发生旱灾24年次,重大灾害有8年次,其中特大农业灾害发生率20%,大旱灾发生率33%,一般灾害发生率48%<sup>[17]</sup>。降水量的丰缺严重影响着绿洲农业的发展,因而分析降水量与干旱状况的关系是研究绿洲形成、发展及建设的最基本的内容<sup>[18]</sup>。绿洲的建设与发展其核心在绿洲农业,而干旱是制约农业发展的重要影响因素。加之近年来西北绿洲人口迅速增长,生态恶化加重,并且正面临着大面积的衰退、消失<sup>[19-22]</sup>,因此对绿洲资源的科学利用和改造已成为亟待解决的问题。本研究选用AWTP指数转化而来的相当干期分析西北绿洲的干旱时空变化特征,以期为西北绿洲的抗旱工作提供参考依据。

## 1 研究区概况

西北绿洲位于亚欧大陆的腹地,高山与盆地相间分布,气候干燥,年平均降水量小于200 mm,冬季寒冷,夏季炎热,气温变化剧烈,年较差和日较差大。西北绿洲的光热资源非常丰富,太阳总辐射平均大于 $5.04 \times 10^5 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ,年日照时数大于2800 h,大于等于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的积温在 $2600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,无霜期约为140 d<sup>[16]</sup>。西北绿洲的地带性植被主要以荒漠和荒漠草原为主,土壤以棕漠土、灰棕漠土和风沙土为主。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料来源

采用西北绿洲中的气象站,并经过了严格的筛选,具体的筛选过程是将资料缺测的剔除掉,如一年中有一个月缺测,则该年为缺测<sup>[9]</sup>,以及观测年限不足52 a(1960—2011年)的也剔除掉,最终得到了86个气象站点1960—2011年逐日降水量资料。

### 2.2 AWTP指数

AWTP指数由Cubasch等<sup>[7]</sup>提出,它不仅考虑无降水日(干日,指日雨量 $<0.1 \text{ mm}$ )的总天数,而且也考虑雨日(日雨量 $\geq 0.1 \text{ mm}$ )的随时间分布情况。给定某时间长度为 $L$ 天的时间序列,其AWTP指数定义为:

$$\text{AWTP} = \sum_{I=1}^N [F(I) \times \sum_{J=1}^L (J \times \frac{1}{L})] \quad (1)$$

式中: $L$ ——研究时间序列长度(d); $J$ ——该时间序列中某相邻两次降水(雨日)日间干期(连续干日)的天数(d); $I$ ——研究时间序列中某相邻两次降水日间干期的总天数; $N$ ——研究时间序列中出现的最长干日的天数; $F(I)$ ——在研究时间序列内出现上述长度为 $I$ 天的干期的次数。为了比较方便,可以将AWTP值转换为一次等效的连续干期 $I$ ,即一次持续无雨时段的天数,即相当干期(equivalent dry period, EDP),则有

$$\text{AWTP} = [(I+1) \times I/2]/L$$

因此,可通过求解一元二次方程得到 $I$ 值:

$$\text{EDP} = I = -\frac{1}{2} + \sqrt{1 + (\text{AWTP} \times 2 \times L)} \quad (2)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 年际及年代际干旱变化

为了分析西北绿洲干旱的时间变化趋势,将西北绿洲逐年平均AWTP值转化为EDP,得到了西北绿洲年平均相当干期的逐年变化特征(图1)。从图1可以看出,西北绿洲年平均相当干期总体呈缓慢下降趋势,相当干期的倾向率为 $-1.109/10 \text{ a}$ ,表明西北绿洲的降水呈现增加趋势,干旱状况有微弱的缓解但不显著,与施雅风<sup>[23]</sup>对西北地区气候研究由暖干向暖湿转变的资料一致。在52 a中,1991年的相当干期最大,为108.9 d,干旱程度最强;而1970年最小值,仅为34.9 d,干旱程度最小,最高值和最低值相差74 d,说明了年相当干期的极端变化较大。从5 a滑动平均曲线来看,西北绿洲的相当干期变化大致可分为2个阶段:1960—1964年、1979—1990、2002—2011年为平缓时期,相当干期小于多年平均值(60.9 d);1965—1978年、1991—2001年为剧烈时期,相当干期大于多年平均值,平均周期为10 a左右。

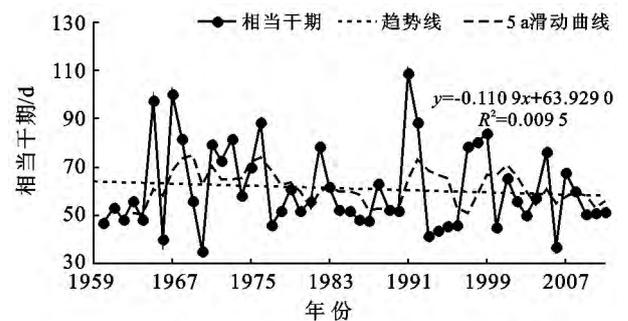


图1 西北绿洲相当干期年际变化趋势

西北绿洲相当干期的年代际变化也比较明显(图2)。1960s至1970s年均相当干期呈现逐渐增加的

趋势,增加幅度较小,但都高于多年平均相当干期 60.9 d,与中国气候的干湿变化资料一致<sup>[24]</sup>。1970s 至 1980s 年均相当干期呈减小趋势,比 1960s 和 1970s 分别减小了 6.5 和 8.1 d,减幅较小。1980s 至 1990s 年均相当干期迅速增加,比 1980s 增加了 10.6 d,增幅较大,1990s 是 52 a 以来相当干期最大的时期,与程国栋<sup>[25]</sup>对西北干旱在 1990s 最严重的研究结论一致。1990s 到 2001—2011 年的年均相当干期又迅速减小并低于多年平均值(60.9 d)。1960—1990 年相当干期的平均值为 60.8 d,1991—2011 年相当干期的平均值为 61 d,20 世纪 90 年代相当干期增加了 0.2 d,说明了 1990 年之后西北绿洲的干旱发生较之前呈现增加的趋势,21 世纪以来,相当干期的变化较缓和。已有研究表明,1981 年以来西北地区整体上呈现出干旱增加的趋势,西北西部转湿区域在 1991 年以后又出现了干旱化的趋势,这与气温持续升高有密切的关系<sup>[26]</sup>的结论一致。

### 3.2 干旱指数的季节变化

为了更好地分析西北绿洲干旱的空间分布特征,首先根据传统气候学中季节的划分方法,将四季划分为:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 至翌年 2 月为冬季。

图 3 为西北绿洲各季节相当干期的时间变化曲线。由图 3 可以看出,近 52 a 来,西北绿洲四季的相当干期变化均呈现出微弱的降低趋势,表明西北绿洲

四季的干旱状况整体上有所缓解,干旱程度降低。其中,以春季的相当干期变化倾向率最小,为  $-0.970/10$  a,干旱程度减小对春季农作物播种及发芽等具有重要的现实意义;而夏季最小,为  $-0.283/10$  a,说明夏季的相当干期减小趋势最微弱,秋季和冬季的变化相类似。有研究<sup>[27]</sup>表明,西北地区春、夏季的气温增加较小,大部分的地区不到  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;春季降水量虽然少,但增加却最大,而夏季降水占全年的 50%,因此得出以上结果与以往资料一致。从四季平均相当干期天数来看,春夏秋冬平均相当干期为分别为 14.9, 1.4, 21.1 和 37.9 d,其中冬季的相当干期最长;其次是秋季、春季,而夏季最短。因此,西北绿洲秋、冬季的相当干期比春、夏季平均长 20~30 d 左右,说明西北绿洲秋、冬两季发生干旱的可能性最大,干旱的累积效应也较春、夏季更显著。

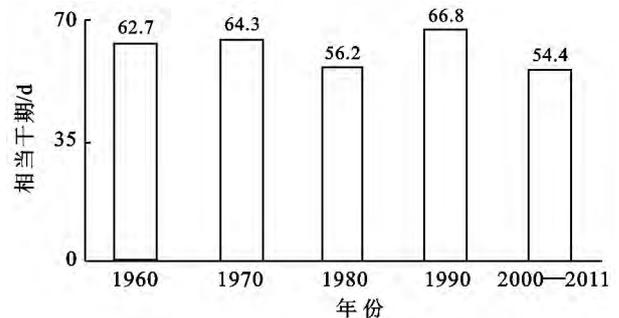


图 2 西北绿洲各年代平均相当干期

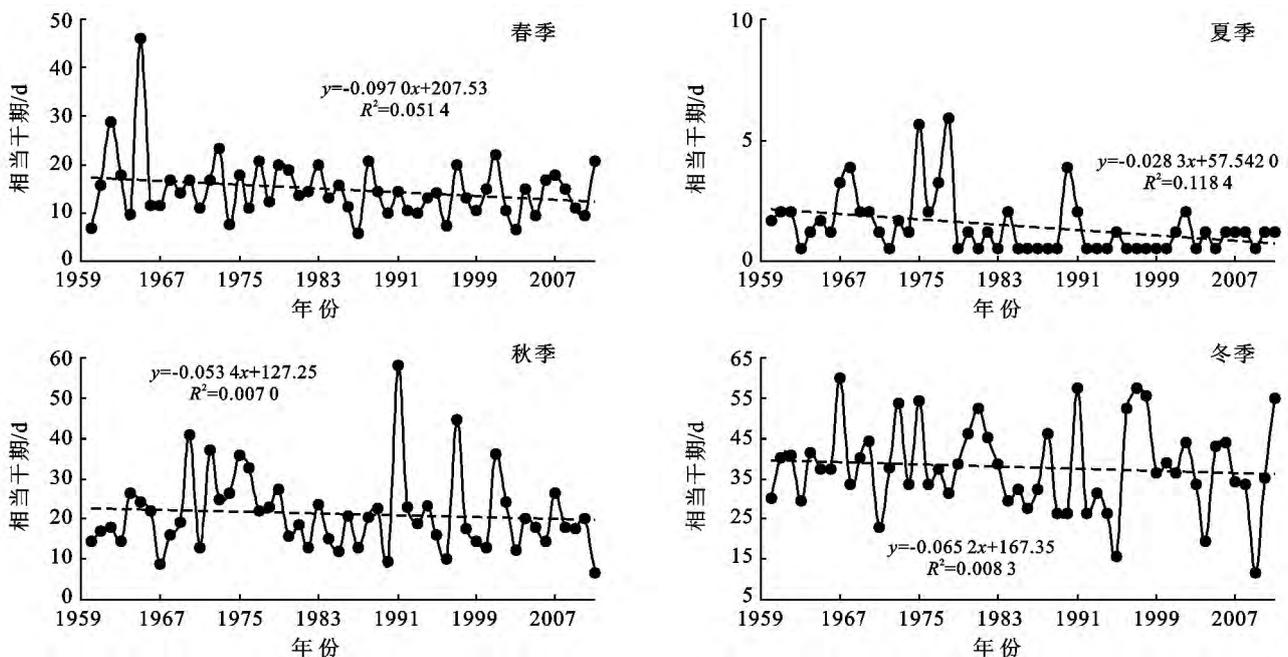


图 3 西北绿洲相当干期季节变化趋势

### 3.3 西北绿洲相当干期的突变检验

采用  $t$  滑动检验和累计距平法对 1960—2011 年

西北绿洲年相当干期进行了突变分析(图 4),通过两种方法的比较来确定比较可靠的突变年份。由图 4

可以看出,西北绿洲相当干期的  $t$  滑动检验表明突变年份在 1976 和 1996 年,而累计距平则表明西北绿洲相当干期的突变年份为 1976,1990 和 1996 年,1976 年之后相当干期呈现减少趋势,而 1996 年之后呈现逐渐增加的趋势。比较得出,西北绿洲相当干期的突

变年份在 1976 和 1996 年比较显著,其中 1976 年与林学椿<sup>[27]</sup>对中国年代际气候跃变大都发生在 70 年代后期至 80 年代初的结论一致,而 1996 年的突变与贾文雄研究祁连山区气候变化的结论一致<sup>[28]</sup>。显然西北绿洲相当干期的变化对全球气候的变化非常敏感。

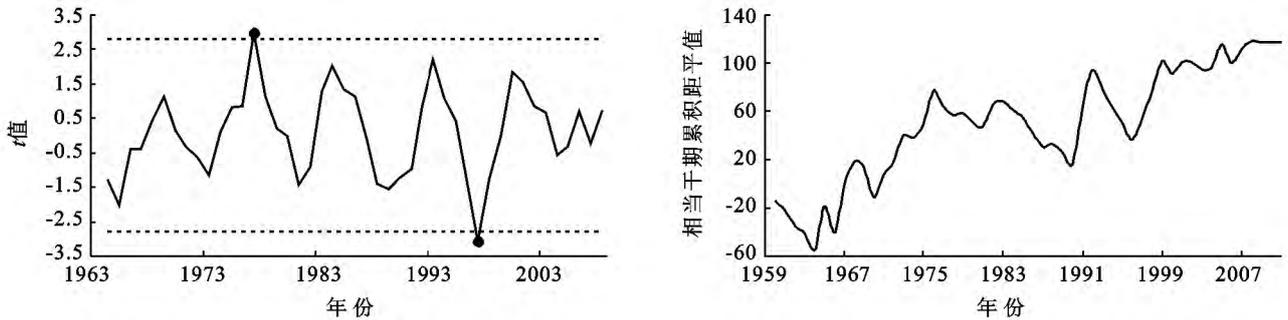


图4 西北绿洲相当干期的  $t$  滑动检验和累计距平图

### 3.4 西北绿洲相当干期的周期分析

为了进一步分析西北绿洲的干旱状况随时间的变化,将西北绿洲划分为5个区域,分别为北疆、南疆、青海柴达木盆地、河西走廊、宁夏平原,利用 Morlet 小波分析方法对5个分区 1960—2011 年相当干期的时间序列进行小波分析。结果表明,西北绿洲相当干期的年际及年代际变化存在不均匀、多尺度、多层次的周期变化结构特性。其中,北疆绿洲存在 2, 5, 13 和 26 a 的周期,其优势周期为 13 a;南疆绿洲存在 2, 5, 12 和 26 a 的周期,其优势周期为 12 a。通过比较南疆和北疆绿洲的周期变化得出,两者的短、中长周期变化几乎一致,这与南疆和北疆共同受西风控制的影响因素有关<sup>[29]</sup>。柴达木盆地绿洲存在 2, 5, 9, 16 和 26 a 的周期,其优势周期为 9 和 5 a;河西绿洲存在 2, 6, 13, 20 和 26 a 的周期,其优势周期 13 a;宁夏绿洲存在 2, 4, 10 和 26 a 的周期,但存在 20 及 26 a 的周期因时间序列短而不可靠,因此宁夏绿洲的主周期为 10 a。通过比较得出,西北绿洲具有共同的 2 a 周期,这与 2 和 4 a 左右的周期与副高脊线位置的准 3 a 的周期有关,其中 12 和 13 a 左右的周期与太阳黑子活动周期相关,5 a 左右的周期与厄尔尼诺现象有关<sup>[30-31]</sup>。

### 3.5 相当干期的空间分布

通过计算西北绿洲 86 个气象站点的平均 AWTP 值转化为 EDP 指数,并以此为参数,基于 ArcGIS 的 IDW 插值方法计算得出 52 a 来研究区 AWTP 和 EDP 指数的空间分布图(图 5)。干旱指数的大小决定了干旱的严重程度,指数值越大,表明干旱程度越严重;指数值越小,表明干旱程度较轻。

从图 5 可以看出,西北绿洲的 AWTP 变化的等值线梯度比较大,空间分布不均匀,高低值的分布比较集中,整个区域的干旱发生具有区域特性。西北绿洲的空间变化整体上呈现出两个特征:(1)自东南向西北增加;(2)自山区向塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地和河西走廊增加,与塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地和河西走廊是西北地区降水最少的资料一致<sup>[32]</sup>。

由图 5 得出,相当干期的高值区域分为两部分:(1)塔里木盆地的西北部,即柯坪、阿拉尔地区;(2)新疆吐鲁番盆地、塔里木盆地的东南部和柴达木盆地西部围成的区域,表明这两个地区发生农业干旱的频次要比其他地区多并且更明显,然后以此为中心向四周减小。

从图 5 可以看出,新疆地区北部及河西走廊中西部的干旱指数减小最显著,河西走廊东部和宁夏绿洲减小幅度不显著。研究<sup>[33]</sup>资料表明,西北西部降水呈增加趋势,其中天山地区增加最多,则有利于准格尔盆地绿洲荒漠化的逆转;而东部季风边缘区、西南部的塔里木盆地随着气温的升高而降水量呈减少趋势,将加剧土地荒漠化的迅速发展和干旱事件的发生。从图 5 可以看出,塔里木盆地西北部的柯坪和阿拉尔地区最为干旱,就平均角度而言,该区的干旱累计状况为一个 450 d 的干旱期的后果,其次为新疆吐鲁番盆地—塔里木盆地的东南部—柴达木盆地西部围成的区域。综合分析得出,西北绿洲的干旱空间分布呈现出明显的空间差异性,整体上空间分布以塔里木盆地的西北部、新疆吐鲁番盆地—塔里木盆地的东南部—柴达木盆地西部围成的区域为两个中心向四周减小的半环状分布特征。

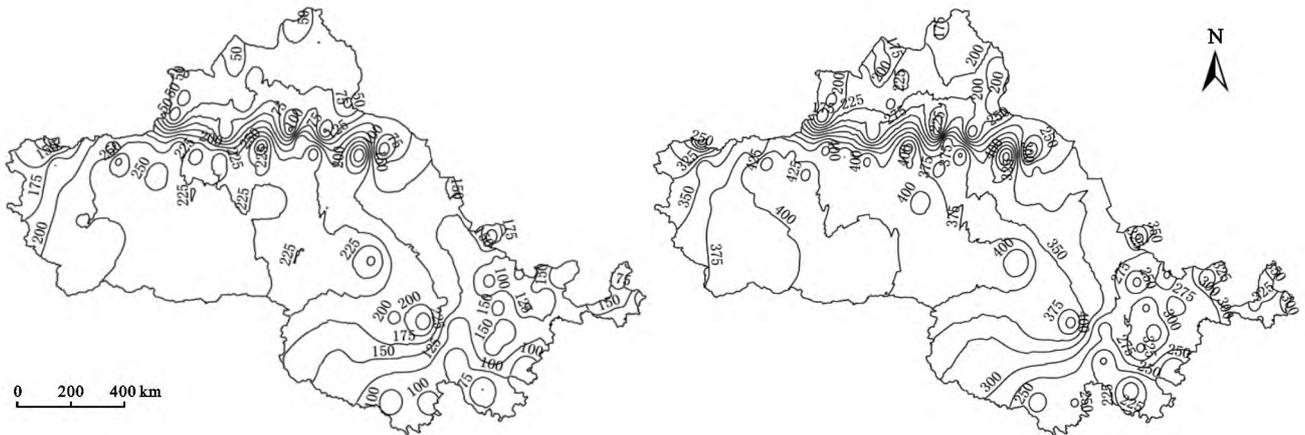


图 5 西北绿洲区 AWTP(左)和相当干期(右)的空间分布

## 4 结论

(1) 西北绿洲相当干期年变化总体呈现下降趋势,其变化倾向率为 $-1.109/10\text{ a}$ 。在年际变化的同时还叠加着明显的年代际变化,20世纪60年代初期,相当干期的变化较平缓,而进入60年代中后期,相当干期的变化波动比较大,而70—80年代处于震荡的时期,90年代为明显波动幅度剧烈时期,21世纪以来,相当干期的变化较缓和。

(2) 西北绿洲四季的相当干期变化均呈降低趋势,春季降低趋势最明显,而夏季降低趋势最小。从四季平均相当干期天数来看,冬季最长,夏季最短。

(3) 近52 a来,西北绿洲相当干期的变化存在明显的突变现象,突变点在1976和1996年,1976年之后相当干期呈现减少趋势,而1996年之后呈现逐渐增加的趋势。

(4) Morlet小波分析表明,北疆绿洲的相当干期存在13 a左右的主周期,南疆绿洲存在12 a左右的主周期,柴达木盆地绿洲存在9和5 a左右的主要周期,河西绿洲存在13 a左右的主周期,宁夏绿洲存在10 a左右的主周期。

(5) 西北绿洲的干旱空间分布呈明显的区域差异性,AWTP指数和相当干期的空间格局整体上均以塔里木盆地的西北部和新疆吐鲁番盆地—塔里木盆地的东南部—柴达木盆地西部围成的区域为两个中心向四周减小的半环状分布特征。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王劲松,任余龙,宋秀玲. K 干旱指数在甘肃省干旱监测业务中的应用[J]. 干旱气象,2008,26(4):75-79.
- [2] 曹永强,苏阳,张兰霞,等. 基于 AWTP 指数的浙江省干旱规律时空分析[J]. 自然资源学报,2012,27(7):1233-1240.
- [3] Palmer W C. Meteorological Drought[R]. U S; Weather Bureau,1965.
- [4] Gerald D B, John E J. Atmospheric circulation associated with the midwest flood of 1993[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1995,76(5):681-695.
- [5] Kite G W. Frequency and Risk Analysis in Hydrology[M]. Colorado: Water Resources Press, 1997.
- [6] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceeding of 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston: Massachusetts,1993:179-184.
- [7] Cubasch U, Waszkewitz J, Hegerl G, et al. Regional climate changes as simulated in time-slice experiments [J]. Climatic Change,1995,31(2/4):273-304.
- [8] 陈丽丽,刘普幸,姚玉龙,等. 1960—2010年甘肃省不同气候区 SPI 与 Z 指数的年及春季变化特征[J]. 生态学杂志,2013,32(3):704-711.
- [9] 邹旭恺,张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究[J]. 应用气象学报,2008,19(6):679-687.
- [10] 曾红丽,宋开山,张柏,等. 1960年以来松嫩平原生长季干旱特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(9):114-122.
- [11] 刘晓云,李栋梁,王劲松. 1961—2009年中国区域干旱状况的时空变化特征[J]. 中国沙漠,2012,32(2):473-483.
- [12] 梁巧倩,简茂球. 干旱指数 AWTP 在广东冬半年干旱分析中的应用[J]. 广东气象,2001,23(2):7-9.
- [13] 梁巧倩,梁玉琼,纪忠萍,等. 广东秋冬春旱的时空变化及环流演变特征[J]. 热带气象学报,2009,25(1):123-128.
- [14] 周明森,简茂球. 广东近46年秋季干旱特征分析[J]. 中山大学学报:自然科学版,2009,48(S):197-200.
- [15] 张凌云,简茂球. AWTP 指数在广西农业干旱分析中的应用[J]. 高原气象,2011,30(1):133-141.

- [16] 刘普幸,陈仲全. 中国西北绿洲生态农业发展举措[J]. 宁夏大学学报:自然科学版,1999,20(2):140-150.
- [17] 翟禄新,冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J]. 自然资源学报,2011,26(5):847-857.
- [18] 申元村,汪久文,伍光和,等. 中国绿洲[M]. 河南开封:河南大学出版社,2000.
- [19] 王根绪,程国栋,徐中民,等. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J]. 自然资源学报,1999,14(2):109-116.
- [20] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 中国西北干旱区的荒漠化过程及其空间分异规律[J]. 中国沙漠,2011,31(1):1-8.
- [21] 龚斌,万力,胡伏生,等. 黑河下游额济纳旗绿洲退化规律及其控制因素[J]. 水文地质工程地质,2006,14(1):58-61.
- [22] 李小玉,肖笃宁. 石羊河流域中下游绿洲土地利用变化与水资源动态研究[J]. 水科学进展,2005,16(5):643-648.
- [23] 施雅风,沈永平,张栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究,2003,23(2):152-164.
- [24] 张庆云,陈烈庭. 近30年来中国气候的干湿变化[J]. 大气科学,1991,15(5):72-81.
- [25] 程国栋,王根绪. 中国西北地区的干旱与旱灾:变化趋势与对策[J]. 地学前缘,2006,13(1):3-14.
- [26] 王志伟,翟盘茂. 中国北方近50年干旱变化特征[J]. 地理学报,2003,58(S):61-68.
- [27] 于淑秋,林学椿,徐祥德. 我国西北地区近50年降水和气温的变化[J]. 气候与环境研究,2003,8(1):9-18.
- [28] 贾文雄,何元庆,李宗省,等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 地理学报,2008,63(3):257-268.
- [29] 张永,陈发虎,勾晓华,等. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布:基于 PDSI 数据[J]. 地理学报,2007,62(11):1142-1152.
- [30] 伍光和田连恕,胡双熙,等. 自然地理学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2000.
- [31] 林学椿,于淑秋. 中国干旱的22年周期与太阳地磁活动周[J]. 气象科学研究院院刊,1987,2(1):43-50.
- [32] 黄玉霞,李栋梁,王宝鉴,等. 西北地区近40年年降水异常的时空特征分析[J]. 高原气象,2004,23(2):245-252.
- [33] 靳立亚,符娇兰,陈发虎. 近44年来西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应[J]. 地理科学,2005,25(5):567-572.

(上接第219页)

[参 考 文 献]

- [1] 朱小康. 小流域综合治理与新农村建设[J]. (20110203) [20130506]. 中国水土保持评价网 <http://www.stbew.org/2011/0822/394.html>.
- [2] 谢松良,吴星中. 论庭院水保与社会主义新农村建设的关系[J]. 中国水土保持科学,2008,6(6):160-163.
- [3] 许志云. 浅谈小流域水土保持综合治理优化规划问题[J]. 水土保持通报,1996,16(1):97-101.
- [4] 王洪刚. 双山前小流域综合治理规划设计[J]. 水土保持研究,2001,9(3):6-8.
- [5] 翁伯奇,黄毅斌. 中国生态农业建设的基本理论、主要成效与发展趋势[J]. 福建农业学报,1999,14(S):226-236.
- [6] 蔡建勤. 从生态经济学角度谈小流域综合治理规划[J]. 中国水土保持,1991(4):40-44.
- [7] 李富佳,董锁成,等. 基于 AEP—SD 模型的生态农业系统模拟与优化调控:以平凉市峻峒区为例[J]. 地理研究,2012,31(5):840-852.
- [8] 祁生林. 生态清洁小流域建设理论及实践:以北京密云县为例[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [9] 文雅,宋桂琴. 系统动力学仿真方法在土地生态设计中的应用:以渭北高原沟壑区长武县为例[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,9(3):48-55.