

# 近55年以来漳卫河流域干旱演变特征

王刚<sup>1,2</sup>, 严登华<sup>1,2</sup>, 申丽霞<sup>3</sup>, 翁白莎<sup>1,2</sup>, 汤欣钢<sup>3</sup>, 王金红<sup>4</sup>

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038;  
3. 水利部海委漳河上游管理局, 河北 邯郸 056006; 4. 中国水利水电科学研究院 水利史研究所, 北京 100038)

**摘要:** 以漳卫河流域11个气象基准站1957年-2011年降水日值资料为基础, 基于标准化降水指数选取干旱发生频次、干旱影响范围、干旱强度与历时、干旱重心等指标, 分析了流域降水突变前后气象干旱演变特征。结果表明: 流域降水在1976年发生突变, 降水突变前后, 年尺度干旱发生频次和影响范围显著增加, 分别由20%、23.2%增加到40%、34.1%; 在季尺度上, 春旱发生频次和影响范围均有较大程度减少, 夏旱和秋旱的发生频次和影响范围有所增大, 冬旱的发生频次和影响范围分别有小幅度的增大和减少; 年尺度和季尺度干旱的平均干旱历时和强度增加显著, 而月尺度干旱的干旱历时和强度略有下降; 流域干旱重心在降水突变前后未发生明显的变化。

**关键词:** 标准化降水指数; 降水突变; 干旱演变; 漳卫河流域

**中图分类号:** P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0001-05

## Drought Evolution Characteristics in the Zhangwei River Basin in Recent 55 years

WANG Gang<sup>1,2</sup>, YAN Deng hua<sup>1,2</sup>, SHEN Li xia<sup>3</sup>, WENG Bai sha<sup>1,2</sup>, TANG Xin gang<sup>3</sup>, WAN Jir hong<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;

2. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Upper Zhanghe Water Resources Administrative Bureau, Haihe River Commission of the Ministry of Water Resources, P. R. C, Handan 056006, China; 4. Water History Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Based on the daily precipitation data at 11 meteorological stations in the Zhangwei River Basin during the period from 1957 to 2011, several SPI based indices, including drought frequency, drought affected area, drought severity and duration, and drought barycentric coordinates, have been selected to analyze the meteorological drought evolution before and after the precipitation mutation. The results showed that (1) precipitation mutation occurred in 1976, and the frequency and affected area of drought in the year scale have increased significantly from 20% and 23.2% to 40% and 34.1% before and after precipitation mutation, respectively; (2) in the season scale, drought frequency and affected area decreased to some extent in the spring but increased greatly in both summer and autumn, and the drought frequency increased while affected area decreased in the winter; (3) the average drought duration and severity increased significantly in both the year and season scales, but decreased in the month scale; and (4) the drought barycentric coordinates showed insignificant change before and after the precipitation mutation.

**Key words:** SPI; precipitation mutation; drought evolution; Zhangwei River Basin

## 1 研究背景

随着气候变化影响的深入, 气候和水循环系统的稳定性显著降低, 干旱事件在全球范围内呈现出广发和频发态势,

且时间节律和空间分布特性也发生了显著变化<sup>[1]</sup>。我国位于亚洲季风气候区, 加之三级阶梯的地形结构和多样的地貌特征, 从根本上决定了旱涝事件广发、频发的特征。全面认识流域干旱的整体特征及其时空演变规律, 是进行干旱风险

收稿日期: 2014-02-25 修回日期: 2014-03-17 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.001.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估”(2010CB951102); 国家自然科学基金面上项目“基于水资源系统的广义干旱风险评价与风险区划研究”(51279207)

作者简介: 王刚(1985-), 男, 河南平顶山人, 博士研究生, 主要从事气候变化下水资源综合应对研究。E-mail: Gangwan@163.com

通讯作者: 严登华(1976-)男, 安徽太湖人, 教授级高级工程师, 主要从事气候变化下水资源综合应对、生态水文学及地理信息技术应用等研究。E-mail: denghuay@gmail.com

应对和干旱管理的基础性工作之一。国内学者分别从不同的角度研究了区域干旱演变特征。比如陈小凤等<sup>[2]</sup>以淮河流域近60年干旱灾害统计资料为基础,探讨了流域各行政区季尺度旱灾发生频次及分布;闵寿和闵聃<sup>[3]</sup>利用水位站长系列资料,分析了鄱阳湖区水文干旱演变特征及早期的供水情势;黄晚华等<sup>[4]</sup>利用我国南方15个省区的气象台站降水资料,以标准化降水指数(SPI)为干旱指标,分析了年尺度及季尺度干旱发生频次、范围和强度的变化及其对农业生产的不利影响。由于降水减少是干旱发生的最根本的原因,气象干旱是水文干旱和农业干旱形成的唯一外在驱动力<sup>[5]</sup>,因此本文从气象干旱的角度,以流域降水资料为基础,采用标准化降水指数SPI来分析流域干旱特征及其演变。SPI指数最早由McKee等<sup>[6]</sup>提出,由于其仅需要降水资料,而且可以采用变时间尺度,所以在干旱监测、评价中得到广泛的应用<sup>[7,8]</sup>,并且成为我国气象干旱等级国家标准中推荐的干旱评价方法之一<sup>[9]</sup>。

漳卫河流域位于海河流域南部,属于南运河水系的一部分,流域多年平均降水量562.8 mm。在历史上,旱灾一直是该地区最主要的自然灾害之一,近年来区域暖干化趋势明

显<sup>[10]</sup>。本文首先对流域年降水序列进行突变检验,确定降水发生突变的年份,然后通过分析降水突变前后两个时段流域干旱发生频次、干旱影响范围、干旱历时与强度、干旱重心等干旱特征变量的变化,来研究漳卫河流域近55年来干旱演变特征,以期气候变化背景下流域水资源综合管理和抗旱减灾对策的制定提供支撑。

## 2 数据与方法

### 2.1 资料选取与处理

本文所使用的降水原始资料长度为1957年1月1日至2011年12月31日,来自中国地面气候资料日值数据集,由中国气象局国家气象信息中心提供。可利用气象站点共11个,其中流域内5个,流域周边6个,见表1。需要指出的是,流域内晋东南站点自1986年起停测,被长治站代替,且两个站点位置不在一处,造成降雨资料的不一致现象,严格意义上应该剔除,但考虑到流域内站点较稀少,且周围没有其它可用站点,所以将两站资料合并为一个数据系列。

将各站点长系列逐日降水资料按月统计,生成逐月降水数据信息,以便应用SPI指数进行干旱评价分析。

表1 各气象站点主要信息

Table 1 General information of selected meteorological stations

台站号	名称	所在省	资料长度	经度(°)	纬度(°)	海拔/m	年均降水量/mm	标准差/mm
53787	榆社	山西	1957. F 2011. 12	112. 98	37. 07	1 041. 4	541. 0	126. 6
53887	晋东南	山西	1957. F 1985. 12	113. 12	36. 20	926. 5	601. 5	123. 7
53882	长治	山西	1986. F 2011. 12	113. 07	36. 05	991. 8	552. 8	111. 2
53986	新乡	河南	1957. F 2011. 12	113. 88	35. 32	73. 2	573. 5	165. 6
53898	安阳	河南	1957. F 2011. 12	114. 40	36. 05	62. 9	569. 2	170. 0
53782	阳泉	山西	1957. F 2008. 12	113. 55	37. 85	741. 9	540. 4	139. 1
54808	莘县	山东	1957. F 2011. 12	115. 67	36. 23	37. 8	442. 6	140. 6
57071	孟津	河南	1961. F 2011. 12	112. 43	34. 82	333. 3	622. 2	147. 5
57083	郑州	河南	1957. F 2011. 12	113. 65	34. 72	110. 4	642. 9	153. 6
53798	邢台	河北	1957. F 2011. 12	114. 50	37. 07	77. 3	516. 3	171. 6
53975	阳城	山西	1957. F 2011. 12	112. 40	35. 48	659. 5	602. 5	135. 8

### 2.2 分析方法介绍

#### 2.2.1 标准化降水指数

标准化降水指数采用伽马分布概率描述降水量的变化,在计算出某一时段降水量的伽马分布概率以后,再进行正态标准化处理,最终应用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级。有关SPI详细的计算步骤可参考文献[9],这里不再赘述,只给出SPI干旱等级划分标准见表2。

表2 标准化降水指数干旱等级划分

Table 2 Drought classification of standardized precipitation index

等级	干旱类型	SPI 值
1	无旱	- 0. 5 < SPI
2	轻旱	- 1. 0 < SPI ≤ - 0. 5
3	中旱	- 1. 5 < SPI ≤ - 1. 0
4	重旱	- 2. 0 < SPI ≤ - 1. 5
5	特旱	SPI ≤ - 2. 0

本文在应用SPI指数时采用的四个时间尺度:1个月、3个月、6个月和12个月,其中3个月时间尺度SPI指数用于

分析季尺度干旱特征,12个月时间尺度用于分析年尺度干旱特征。

#### 2.2.2 干旱发生频次与影响范围

主要通过分析干旱发生频次、干旱影响范围等来描述流域干旱整体特征。

干旱发生频次表征流域内干旱发生的频繁程度,用式(1)计算。

$$P = n/N \times 100\% \quad (1)$$

式中: $n$ 为研究时段内发生干旱的年数; $N$ 为研究时段的总年数。

干旱影响范围表征流域内发生干旱的面积大小,用式(2)计算。

$$A = S_d/S_t \times 100\% \quad (2)$$

式中: $S_d$ 为发生干旱的面积; $S_t$ 为流域总面积。当干旱影响范围大于50%时,可以认为发生了区域性干旱。

在统计干旱面积时,需要先通过泰森多边形方法得到每个站点所控制的流域面积。按照SPI的干旱划分等级,若某

个站点的 SPI 值达到轻度干旱及以上等级,则认为该站点控制的流域范围内均发生了干旱。漳卫河流域气象站点泰森多边形见图 3。

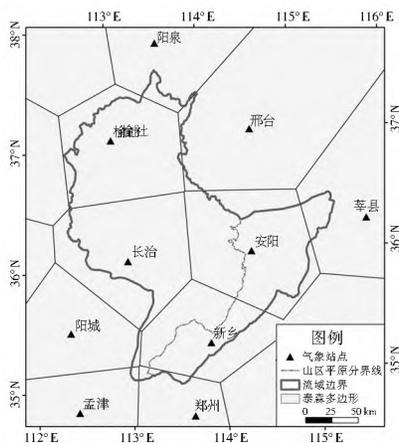


图 1 气象站点泰森多边形

Fig. 1 Thiessen polygons of meteorological stations

各站点所控制的流域面积占整个流域面积的比例见表 3。其中榆社、长治、安阳、新乡 4 站控制流域面积的总和占流域总面积的比例超过 90%。另外,流域的总体降水序列也由各个站点的降水序列通过面积加权获得。

表 3 各站点控制面积占流域总面积比例

Table 3 Percentages of control area among total area at each meteorological station

站名	控制面积占流域总面积比例 (%)	站名	控制面积占流域总面积比例 (%)
榆社	24.1	莘县	2.3
长治	24.8	孟津	0.2
新乡	16.4	郑州	1.8
安阳	26.5	邢台	0.6
阳泉	2.9	阳城	0.2

### 2.2.3 干旱强度与历时

基于 SPI,结合游程理论确定干旱过程及每次干旱过程的历时和强度。定义连续的  $SPI \leq -1.0$  (即中等干旱及以上)的时段为一次干旱过程,将一次干旱过程中的 SPI 值累加起来表征该次干旱的强度。为便于表达,干旱强度取正值,即:

$$S = \sum_{i=1}^D SPI_i \quad (3)$$

式中:  $D$ 、 $S$  分别表示一次干旱过程的历时和强度。

### 2.2.4 干旱重心

通过比较分析降水突变前后流域干旱发生频次重心和干旱强度重心的移动,研究流域干旱的空间变化特征。流域干旱重心用下式计算<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i B_{t,i} X_i)}{\sum_{i=1}^n (A_i B_{t,i})} \\ Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i B_{t,i} Y_i)}{\sum_{i=1}^n (A_i B_{t,i})} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $X_t$ 、 $Y_t$  分别为  $t$  时段流域干旱重心的经度和纬度坐标 ( $^{\circ}$ );  $X_i$ 、 $Y_i$  分别为流域的第  $i$  分区重心的经度、纬度坐标 ( $^{\circ}$ );  $A_i$  为  $i$  分区的面积;  $B_{t,i}$  为  $t$  时段第  $i$  分区的干旱指标,本文为干旱发生频次和干旱强度;  $n$  为流域内分区总个数,本文

根据泰森多边形共划分 10 个分区。

### 2.2.5 降水突变检验

本文采用 Mann Kendall 法和滑动  $t$  检验两种方法进行降水突变检验。Mann Kendall 法是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要假定样本服从一定的分布,且不受少数异常值的干扰,计算也相对简便,是世界气象组织推荐的应用于环境数据时间序列分析的方法。假定时间序列  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  随机独立,按时间序列顺序  $x_1, x_2, \dots, x_n$  计算统计量序列  $UF_k$ ,再按时间序列逆  $x_n, x_{(n-1)}, \dots, x_1$  重复相应计算过程,同时使  $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \dots, 1$ 。给定显著性水平,如本文选择  $\alpha = 0.05$ ,则临界值  $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。若  $UB_k$ 、 $UF_k$  两条曲线在临界线之间出现交点,则交点对应的时刻就是突变发生的时间。具体计算过程参考文献[12]。

滑动  $t$ -检验是考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变,当两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平,可以认为有突变发生。检验方法详细介绍可参考文献[13]。本文令基准点前后两个子序列的长度均为 10 年,给定显著性水平  $\alpha = 0.05, U_{0.05} = \pm 2.1$ 。根据计算结果,滑动统计量  $t$  在 1976 年的值为 2.48,超出给定的显著性水平对应的临界值,则可以确定 1976 年为漳卫河流域年降水发生突变的时间。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域整体干旱特征

从漳卫河流域年降水 SPI 指数可知(图 2),在 1957 年-2011 年的 55 年中,有 18 年发生干旱,其中轻度干旱 12 次,中度干旱 3 次,重度干旱 1 次,特大干旱 2 次,轻度及以上等级干旱的发生频次约为 32.7%。从四季降水 SPI 指数可知(图略),55 年时间序列中,发生春旱、夏旱、秋旱和冬旱的次数分别为 18 次、17 次、15 次和 15 次。进一步统计季节连旱的情况,发现发生春夏连旱、夏秋连旱、秋冬连旱和冬春连旱的次数分别为 3 次、5 次、3 次和 4 次,因此,发生春夏连旱、夏秋连旱、秋冬连旱和冬春连旱的概率分别为 16.7%、29.4%、20%、26.7%。从干旱发生频次上看,漳卫河流域平均每 3 年就要发生一次干旱,并且 SPI 值有减小趋势,也即干旱发生频次有增大趋势;流域季节连旱特征显著,尤其是夏秋连旱、冬春连旱的概率较大,由于漳卫河流域实行的是冬小麦-夏玉米的农作模式,夏秋连旱不仅会影响夏玉米的生长,而且对于冬小麦的播种也会产生不利影响,而冬春连旱对处于返青期的冬小麦正常生长极为不利。

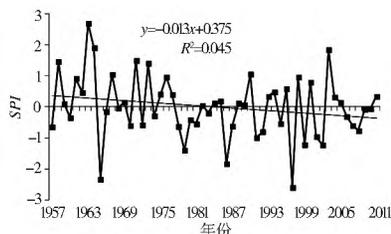


图 2 漳卫河流域年降水 SPI 序列

Fig. 2 SPI series of annual precipitation in Zhangwei River Basin

从干旱影响范围上看,见图 3,55 年时间序列中,漳卫河流域年均干旱影响范围约为流域总面积的 30.1%。春旱、夏

旱、秋旱、冬旱的面积差异不显著,平均分别占流域总面积的 28%、30.4%、30%、27.9%。干旱影响范围整体上有增加的趋势,20 世纪 50-60 年代,除个别年份外,干旱影响范围均未超过全流域面积的 50%,而近年来区域性的干旱比较普遍,部分年份(如 1997 年、1999 年)干旱影响范围几乎覆盖全流域。

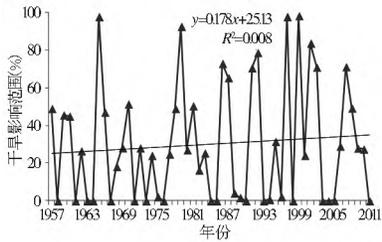


图 3 漳卫河流域 1957 年-2011 年干旱影响范围

Fig. 3 Drought affected area in Zhangwei River Basin from 1957 to 2011

### 3.2 流域干旱演变特征

#### 3.2.1 年降水突变点

Manr Kendall 法计算结果见图 4 显示,两条统计量曲线在临界线以内存在交点,说明年降水序列存在突变点,但交点个数不唯一,只能判定在 1975 年附近发生突变。因此,需要结合滑动  $t$  检验方法确定突变发生的确切时间。

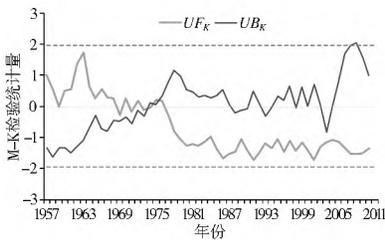


图 4 漳卫河流域年降水序列 M-K 曲线

Fig. 4 M-K analysis of annual precipitation in Zhangwei River Basin

根据  $t$  检验计算结果,滑动统计量  $t$  在 1976 年的值为 2.48,超出给定的显著性水平对应的临界值,则可以确定 1976 年为漳卫河流域年降水发生突变的时间见图 5。通过比较突变前后 1957 年-1976 年和 1977 年-2011 年两个时段的平均年降水量(见图 6),可以发现,突变前后年均降水量由 611.6 mm 减少为 535.1 mm,减幅为 12.5%。

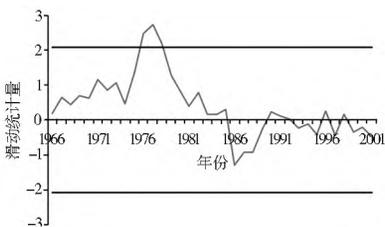


图 5 漳卫河流域年降水滑动  $t$  统计量曲线

Fig. 5 Moving  $t$  statistic curve of annual precipitation in Zhangwei River Basin

#### 3.2.2 时间变化特征

(1) 干旱发生频次与影响范围变化。根据表 5 统计结果,降水突变前后,漳卫河流域在年尺度上发生干旱的频次

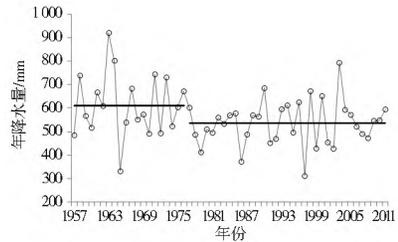


图 6 漳卫河流域年降水量序列

Fig. 6 Annual precipitation series in Zhangwei River Basin from 1957 to 2011

由 20% 增加到 40%,增长了一倍。从干旱的季节变化特征看,除了春旱的发生频次有所下降外,其它季节均有不同程度的增加,其中夏旱和秋旱增加幅度较大,分别由 20% 增加为 34.3% 和 31.4%;冬旱由 25% 增加到 28.6%。降水突变前后,漳卫河流域在年尺度上的干旱影响范围由 23.2% 增加到 34.1%。春旱的影响范围减小明显,由 36.4% 减少为 23.2%;冬旱略有减少,由 31.1% 减少为 27.5%;夏旱和春旱则有较大幅度增加,分别增加 10.4 和 10.7 个百分点。

表 5 降水突变前后干旱发生频次与干旱影响范围变化

Table 5 Variations of drought frequency and affected area before and after precipitation mutation

时间尺度	统计时段	干旱发生次数	干旱发生频次 (%)	干旱影响范围 (%)
全年	1957-1976	4	20.0	23.2
	1977-2011	14	40.0	34.1
春	1957-1976	8	40.0	36.4
	1977-2011	8	22.9	23.2
夏	1957-1976	4	20.0	25.0
	1977-2011	12	34.3	35.4
秋	1957-1976	4	20.0	23.2
	1977-2011	11	31.4	33.9
冬	1957-1976	5	25.0	31.1
	1977-2011	10	28.6	27.5

(2) 干旱强度、历时。以流域月降水序列为基础,分别计算 1 月、3 月、6 月、12 月尺度的  $SPI$  指数,按照上述方法可得到以月为单位的若干干旱过程,再分别统计 1957 年-1976 和 1977 年-2011 两个时段的干旱事件次数、每次干旱平均历时及平均强度,结果列于表 6。对于 1 月、6 月时间尺度干旱,干旱事件次数略有增加,干旱历时略微变短,干旱强度有所下降,但对于季尺度(3 个月)和年尺度(12 个月)干旱而言,干旱事件次数减少,平均干旱历时显著变长,干旱强度显著增大,尤其是年尺度干旱,平均干旱历时由 2 个月延长为 4 个月,平均干旱强度由 3.68 增加至 6.48。

#### 3.2.3 空间变化特征

根据流域 10 个气象站点的年降水  $SPI$  序列,统计各站点在降水突变前后两个时段的平均干旱强度和干旱发生频次,作为其所控制的流域分区的干旱指标。利用 ArcGIS 的几何统计(Calculate Geometry)功能可统计出各个流域分区的面积及重心坐标,然后按照式(4)计算降水突变前后流域平均干旱强度和干旱发生频次的重心坐标,结果见表 7。

表 6 降水突变前后干旱历时、强度变化

Table 6 Variations of drought duration and severity before and after precipitation mutation

SPI 时间尺度	1957 年- 1976 年			1977 年- 2011 年		
	干旱过程/(次·年 <sup>-1</sup> )	平均干旱历时/月	平均干旱强度	干旱过程/(次·年 <sup>-1</sup> )	平均干旱历时/月	平均干旱强度
1 月	1.65	1.21	1.84	1.71	1.13	1.72
3 月	1.15	1.65	2.51	0.94	2.00	3.14
6 月	0.65	2.77	4.33	0.69	2.50	4.00
12 月	0.50	2.00	3.68	0.43	4.00	6.48

表 7 降水突变前后流域平均干旱强度和干旱发生频次的重心坐标

Table 7 Barycentric coordinates of drought severity and frequency before and after precipitation mutation

时段	平均干旱强度		干旱发生频次	
	东经(°)	北纬(°)	东经(°)	北纬(°)
1957 年- 1976 年	113.608	36.295	113.651	36.181
1977 年- 2011 年	113.648	36.224	113.624	36.244

从表 7 可以看出,降水突变前后,流域平均干旱强度重心坐标向东偏移 0.04°,向南偏移 0.071°,干旱发生频次向西偏移 0.026°,向北偏移 0.063°,即干旱强度重心坐标向东、向南移动约 4.5 km、7.9 km;干旱频次重心向西、向北移动约 2.9 km、7.0 km。整体上依据干旱强度和干旱发生频次定义的流域干旱重心在降水突变前后未发生明显的移动,大致位置在山西省长治市平顺县东北部见图 7。

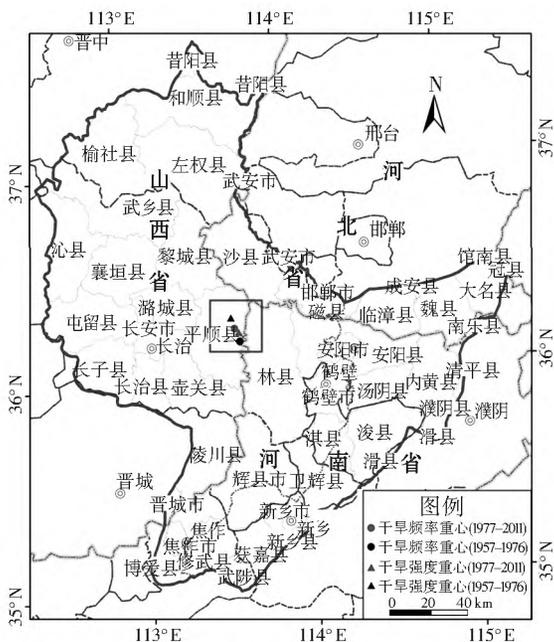


图 7 流域干旱重心及其变化

Fig. 7 Drought barycenters and their changes in Zhangwei River Basin

## 4 结论

(1) 根据漳卫河流域近 55 年降水 SPI 指数序列,轻度及以上等级干旱的发生频次约为 32.7%,流域季节连旱特征显著,尤其是夏秋连旱和冬春连旱的概率较大,对农业生产影响较大。流域年均干旱影响范围约为流域总面积的

30.1%,干旱影响范围整体上有增加的趋势,近年来经常发生区域性的干旱。

(2) 干旱发生频次总体显著增加,干旱影响范围总体扩大。春旱影响有减少趋势,发生频次和影响范围都有较大程度的减少;夏旱和秋旱影响增大,发生频次和影响范围均显著增大;冬旱的影响变化相对不显著。从干旱强度和历时看,季、年尺度干旱历时和强度均有明显增加趋势,短时间尺度干旱历时、强度变化不显著。

(3) 对比降水突变前后两个时段,流域平均干旱强度和干旱发生频次的重心分别向东南、西北方向有小幅移动,但总体变化不显著。

## 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, 2007.
- [2] 陈小凤,王再明,胡军,等.淮河流域近 60 年来干旱灾害特征分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(6):20-24. (CHEN Xiaofeng, WANG Zaiming, HU Jun, et al. Analysis of Drought Characteristics in the Huaihe River Basin in Recent 60 Years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 20-24. (in Chinese))
- [3] 闵寿,闵昞.鄱阳湖区干旱演变特征与水文防旱对策[J].水文,2010(1):84-88. (MIN Qian, MIN Dan. Drought Change Characteristics and Drought Protection Countermeasures for Poyanghu Lake Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2010(1): 84-88. (in Chinese))
- [4] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J].农业工程学报,2010(7):50-59. (HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, LI Maosong, et al. Evolution Characteristics of Seasonal Drought in the South of China During the Past 58 Years Based on Standardized Precipitation Index [J]. Transactions of the CSAE, 2010(7): 50-59. (in Chinese))
- [5] 裴源生,蒋桂芹,翟家齐.干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J].水科学进展,2013,24(003):449-456. (PEI Yuan sheng, JIANG Guiqin, ZHAI Jiaqi. Theoretical Framework of Drought Evolution Driving Mechanism and the Key Problems [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(003): 449-456. (in Chinese))
- [6] McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society: Anaheim, CA, 174-184.

(下转第 29 页)

- [13] 闫宝伟, 郭生练, 肖义, 等. 基于两变量联合分布的干旱特征分析[J]. 干旱区研究, 2007(4): 537-542. (YAN Bao wei, GUO Sheng lian, XIAO Yi, et al. Analysis on Drought Characteristics Based on Bivariate Joint Distribution[J], Arid Zone Research, 2007(4): 537-542. (in Chinese))
- [14] 陆桂华, 闫桂霞, 吴志勇, 等. 基于 copula 函数的区域干旱分析方法[J]. 水科学进展, 2010(2): 188-193. (LU Gui hua, YAN Gui xia, WU Zhi yong, et al. Regional Drought Analysis Approach Based on Copula Function[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 188-193. (in Chinese))
- [15] 周玉良, 袁满晨, 金菊良, 等. 基于 Copula 的区域水文干旱频率分析[J]. 地理科学, 2011(11): 1383-1388. (ZHOU Yu liang, YUAN Man chen, JIN Ju liang, et al. Regional Hydrological Drought Frequency Based on Copulas[J], Scientia Geographica Sinica, 2011(11): 1383-1388. (in Chinese))
- [16] Pasquale STEDUTO, Theodore C HSIAO, Dirk RAES, et al. Aquacrop the Fao Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 426-437.
- [17] Theodore C HSIAO, Lee HENG, Pasquale STEDUTO, et al. Aquacrop the Fao Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Iii. Parameterization and Testing for Maize[J], Agronomy Journal, 2009, 101(3): 448-459.
- [18] Pasquale STEDUTO, Theodore C HSIAO, Elias FERERES, et al. Crop Yield Response to Water [M]. Fao Irrigation and Drainage Paper, 2012.
- [19] D RAES, P STEDUTO, TC HSIAO, et al. Aquacrop Reference Manual[J]. Fao Land and Water Division, Rome, Italy, 2009.
- [20] 梁忠民, 郗建强, 常文娟, 等. 抗旱能力研究理论框架[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 23-28. (LIANG Zhong min, LI Jian qiang, CHANG Wen juan, et al. Research on the Theoretical Framework of Drought Resistance Capacity[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 23-28. (in Chinese))

(上接第 5 页)

- [7] Potop V, MoňnÖM, Soukup J. Drought Evolution at Various Time Scales in the Lowland Regions and Their Impact on Vegetable Crops in the Czech Republic[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, (156): 121-133.
- [8] Gebrehiwet T, van der Veen A, Maathuis B. Spatial and Temporal Assessment of Drought in the Northern Highlands of Ethiopia[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(3): 309-321.
- [9] GB/T 20481-2006, 气象干旱等级[S]. GB/T 20481-2006, Classification of Meteorological Drought[S]. (in Chinese)
- [10] 蔡锡填, 徐宗学, 李占玲. 漳卫南运河流域水文气象要素长期变化趋势分析[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 363-370. (CAI Xi tian, XU Zong xue, LI Zhan ling. Analyzing Long Term Trend of Hydrological and Meteorological Changes in Zhangwei South River Basin[J]. Resources Science, 2008, 30(3): 363-370. (in Chinese))
- [11] 周婷, 李传哲, 于福亮, 等. 澜沧江-湄公河流域气象干旱时空分布特征分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 4-7. (Zhou Ting, Li Chuan zhe, Yu Fu liang, et al. Spatial and Temporal Distribution Characteristics Analysis of Meteorological Drought in Lancang Mekong River Basin[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 4-7. (in Chinese))
- [12] 王刚, 严登华, 黄站峰, 等. 近 52 年来滦河流域气候变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 134-139. (Wang Gang, Yan Deng hua, Huang Zhan feng, et al. Climate Change Characteristics in Recent 52 Years in Luan River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(7): 134-139. (in Chinese))
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. (Wei Feng ying. Contemporary Climate Statistics Diagnosis and Forecast Technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007. (in Chinese))