

# 潮白河流域气象水文干旱特征及其响应关系

许怡然<sup>1,2</sup>, 鲁帆<sup>2</sup>, 谢子波<sup>1,2</sup>, 朱奎<sup>1</sup>, 宋昕熠<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

**摘要:**利用潮白河流域7个气象站1960–2011年逐月降水以及密云水库同时期入库流量数据,分别以SPI和SDI两个干旱指标表征气象、水文干旱,采用游程理论、M-K检验、滑动 $t$ -检验、Spearman秩相关检验等方法研究了该流域气象水文干旱特征,并探求水文、气象干旱的响应关系。结果表明:研究期内潮白河流域气象干旱多以短历时干旱事件为主,历时1–2个月的干旱事件达研究期内气象干旱事件总次数的67.18%;但是气象干旱的年干旱烈度及其历时未通过MK趋势显著性检验,其线性斜率值仅为-0.025和-0.005,变化趋势不明显。而水文干旱存在极长历时重烈度干旱事件,历时达4个月以上的干旱事件达研究期内水文干旱事件总次数的46.54%,最长干旱历时达45个月;且研究期内水文干旱的年干旱烈度及其历时均通过显著性检验,线性斜率值达-0.419和0.228,变化显著;二者均在1980年和1998年出现突变现象。自20世纪90年代末以来,潮白河流域水文干旱频繁发生,且多为长历时连续干旱。研究期内水文干旱滞后气象干旱约1个月。

**关键词:**水文干旱;气象干旱;游程理论;干旱响应关系;潮白河流域

**中图分类号:**S423 **文献标志码:**A

## Characteristics and responses of hydrological and meteorological drought in Chaobai River Basin

XU Yi-ran<sup>1,2</sup>, LU Fan<sup>2</sup>, XIE Zi-bo<sup>1,2</sup>, ZHU Kui<sup>1</sup>, SONG Xinyi<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

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

**Abstract:** Based on the monthly precipitation data from 7 meteorological stations in the Chaobai River Basin and monthly inflow data of the Miyun reservoir from 1960–2011, the Standard Precipitation Index (SPI) and the Streamflow Drought Index (SDI) were used to represent meteorological and hydrological drought, respectively. We analyzed the variation of hydrological and meteorological drought by using the run theory, moving  $t$ -test technique and the Mann-Kendall test method. The Spearman correlation test was further applied to explore the lead-lag relationship between both indices. The results indicated that: most of the meteorological drought events in the study period did not last long, and the meteorological drought events lasted for 1–2 months that accounted for 67.18% of the total amount of drought events in the study period. Additionally, the trend of drought intensity and drought duration in meteorological drought was not apparent, and the linear slope values of the two were only -0.025 and -0.005, respectively. Unlike meteorological droughts, the hydrological droughts had significant increasing trends in both drought intensity and duration with linear slope values of -0.419 and 0.228 respectively. We also found some hydrological drought events with long drought duration and greater drought intensity, the drought events lasting over 4 months accounted for 46.54% of the total amount in the study period, and the longest drought lasted 45 months. Both meteorological and hydrological drought showed abrupt changes in 1980 and 1998. Since the end of 1990s, long-lasting hydrological drought events occurred frequently. Analysis of the relationship between meteorological and hydrological drought indices showed that the occurrence of a hydrological drought event could be about 1 month be-

hind a meteorological drought event.

**Keywords:** hydrological drought; meteorological drought; the run theory; drought response relationship; the Chaobai River Basin

干旱作为一种频繁发生且最具破坏力的自然灾害之一,几乎发生在全球范围内所有气候区,并深刻影响当地的生态与社会环境。随着现代社会的高速发展以及人口的快速膨胀,水资源短缺日益严重,在全球气候变暖的背景下,更突出了干旱问题的严重性。干旱指某个时间段内某地由于水分入不支出,不足以满足人类生存发展的现象。Wilhite D A 等于 1985 年提出干旱可以细分成气象、农业、水文和社会经济 4 类干旱<sup>[1]</sup>。其中气象干旱强调由于持续性的异常气象如降水不足等导致的干旱现象,一般以降雨量和蒸发量为指标,而水文干旱则强调河流、地下含水层等水体中含水量过低所导致的干旱,一般以径流量为指标。从发生时间来看,水文干旱处于干旱发展的次级阶段,被认为是联系其余 3 种干旱类型的纽带<sup>[2]</sup>。国内外对气象干旱的研究较多,且已经形成了评估气象干旱影响的客观指标和干旱事件鉴别方法。但水文干旱由于其形成机制和发展过程非常复杂,虽然近年来对水文干旱指数的构建及其过程识别和频率与重现期的分析已成为热点研究,但仍没有满足客观准确评估水文干旱的现实需求。目前已有包括地表供水理论<sup>[3]</sup>、地下水亏缺指数<sup>[4]</sup>等在内的多种水文干旱指标,但这些方法数据要求高,计算复杂。相较而言,由 Shukla S 等人开发的标准径流指数(The Standardized Runoff Index, SRI)<sup>[5]</sup>和 Nalbantis 为分析希腊 the Evinos River 流域水文干旱情况而开发的径流干旱指数(The Streamflow Drought Index, SDI)<sup>[6]</sup>更为简单有效,二者均是基于标准降水指数(SPI)发展而来。Majid K 等采用 SDI 分析了伊朗西南部水文干旱特征<sup>[7]</sup>。Liu L, Christopher N B 等人基于 SRI、PDS 和 SPI 构建模型评估美国俄克拉何马州 the Blue River 流域未来干旱风险<sup>[8]</sup>。

潮白河流域属海河水系,流域内建有两座大型水库——密云水库和怀柔水库,其中密云水库是北京唯一的饮用水源供应地。近几十年来,该流域年降水量下降趋势明显,同时密云水库的入库流量也随之减少<sup>[9-10]</sup>,且地处我国大型干旱区之一的黄淮海干旱区。与此同时,随着北京市经济发展与人口增长,蓄水量需求不断增大,使得北京市用水形势较为严峻,人水矛盾突出。因此针对潮白河流域干旱研究就显得极其重要且迫切。前人的研究主要

集中在潮白河流域水文气象要素变化和气象干旱特征等方面,对于该流域的水文干旱以及水文、气象干旱响应关系的分析较少。本文基于 SDI 和 SPI 量化潮白河流域的水文、气象干旱,采用游程理论分析干旱过程,提取干旱特征,采用 Mann-Kendall 法分析干旱特征趋势,并探求水文气象干旱响应关系,以期为潮白河流域的干旱应对工作提供一定的依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况与数据来源

潮白河流域位于华北平原北部,地处 115°25′~117°35′E,40°20′~41°37′N,上游有潮河和白河两大支流,控制面积分别为 4 854.5 km<sup>2</sup>和 9 006.5 km<sup>2</sup>,两河在下游均流入密云水库,整个潮白河流域均为密云水库的集水区。流域年平均降水量 660 mm,季节变化明显,主要在 6-8 月份。1960-2000 年密云水库平均入库流量 10.434 亿 m<sup>3</sup>,2001 年以来为 3.893 亿 m<sup>3</sup>。

降水数据来源为 1960-2011 年中国地面气象资料日值数据集(<http://data.cma.cn>),站点包括丰宁、赤城、佛爷顶、汤河口、滦平、密云上甸子和兴隆七站(如图 1 所示)。径流水文数据采用密云水库实测入库流量数据,潮河和白河在流域下游均汇入密云水库,故选取密云水库同期各月来水量,时间年限为 1960-2011 年。

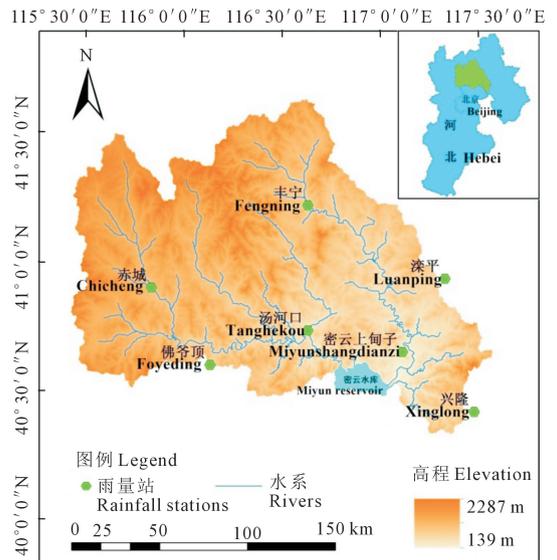


图 1 潮白河流域及研究站点位置

Fig.1 Location of the Chaobai River Basin and distribution of research stations

## 1.2 研究方法

基于潮白河流域 1960–2011 年逐月降水、径流数据,分别采用标准化降水指数(SPI)和径流干旱指数(SDI)划分该流域气象、水文干旱等级;并采用游程理论识别干旱过程,提取干旱特征要素——干旱历时与干旱烈度;采用 Mann-Kendall 趋势检验法分析水文干旱与气象干旱要素的趋势性;采用 Spearman 秩相关检验分析 SPI 和 SDI 的相关性,并探求水文干旱对气象干旱的滞后时间,为该地区的水资源管理和旱灾应对提供一定的根据。

(1)基于 SPI 和 SDI 的气象、水文干旱等级划分。标准化降水指数(SPI)在我国应用较多,是我国气象干旱等级划分标准推荐方法之一<sup>[11]</sup>。而径流干旱指数(SDI)是 Nalbantis I 和 Tsakiris G 在分析希腊 the Evinos River 流域水文干旱情况时提出<sup>[12]</sup>,计算与 SPI 类似,计算数据为实测河流径流数据,适用多种时间尺度的水文干旱,以评估流域水文干旱严重程度。其干旱等级划分也与 SPI 类似,如表 1 所示。

表 1 径流干旱指数(SDI)及标准化降水指数(SPI)干旱等级划分

Table 1 Drought classification of the Streamflow Drought Index (SDI) and the Standardized Precipitation Index (SPI)

类型 Category	SDI 值 SDI value	SPI 值 SPI value
无旱 No drought	$-0.5 \leq \text{SDI}$	$-0.5 < \text{SPI}$
轻旱 Light drought	$-1.0 \leq \text{SDI} < -0.5$	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$
中旱 Moderate drought	$-1.5 \leq \text{SDI} < -1.0$	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$
重旱 Severe drought	$-2.0 \leq \text{SDI} < -1.5$	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$
特旱 Extreme drought	$\text{SDI} < -2.0$	$\text{SPI} \leq -2.0$

(2)基于游程理论的干旱过程识别。游程理论是一种分析时间序列的方法,能十分有效地对旱涝事件过程进行识别,并提取干旱事件的干旱历时和干旱烈度。干旱历时指单次干旱所持续的时间,干旱烈度指单次干旱事件中指标值与临界值差值的累和,平均干旱强度表征单次干旱事件的平均缺水量。以上三个特征要素已知其中两个,均可以求出另外一个,因此本文主要采用干旱历时和干旱烈度作为干旱事件的特征要素。

在对干旱过程的识别中,需要对小干旱事件进行过滤以及对多个干旱事件进行合并,方法如下<sup>[13]</sup>:设定 3 个临界值  $X_0$ 、 $X_1$  和  $X_2$  ( $X$  表示 SPI 或

SDI 值),当干旱指标值  $X$  小于  $X_1$  时,则初步认为此月为干旱月。若某干旱事件干旱历时为 1 且  $X$  大于  $X_2$ ,则此月为小干旱事件,可认为没有发生干旱;在完成小干旱事件过滤的基础上,若两次干旱过程间隔仅为 1,且间隔期的  $X$  值小于  $X_0$ ,那么可以将二者合一,看作单次干旱事件。且干旱历时为第 1 次事件始至第 2 次事件终(包括间隔期),其干旱烈度为两次事件烈度之和。本文中将 3 个临界值分别设定为  $X_0=0$ 、 $X_1=-0.3$ 、 $X_2=-0.5$ 。

(3)基于 Mann-Kendall 检验的干旱特征要素趋势分析。Mann-Kendall 检验是分析时间序列变化趋势的常用方法,通过统计值  $Z_s$  的正负性来确定变化趋势。

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } x_k - x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_k - x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_k - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (4)$$

式中,  $x_k$  和  $x_i$  为连续的样本数据值,  $n$  为样本总长度,  $t$  为数据中存在相等值的个数。为确定趋势变化程度,需对  $Z_s$  进行显著性检验,在置信水平  $\alpha$  上,当  $|Z_s| > Z_{1-\alpha/2}$ ,原假设被拒绝,时间序列存在明显的趋势性。确定置信水平  $\alpha = 0.05$ ,当  $|Z_s| \leq 1.96$  时接受原假设(即无变化趋势);反之,说明序列具有明显的上升( $Z_s > 1.96$ )或下降( $Z_s < -1.96$ )趋势<sup>[14]</sup>。

(4)基于滑动  $t$ -检验的干旱特征要素突变分析。滑动  $t$ -检验可用来检验 2 个随机样本平均值的显著性差异,是气象水文序列突变检验的常用方法。对于 1 个具有  $n$  样本量的时间序列,人为设置某一时刻为基准点,基准点前后 2 个子序列样本长度分别为  $n_1$  和  $n_2$ ,子序列均值、方差分别为  $x_1$  和  $x_2$ 、 $s_1^2$  和  $s_2^2$ 。定义统计量:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}}} \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (6)$$

为避免子序列时段选择的人为性,需反复变动子序列长度,以提高突变检验结果的可靠性。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱过程识别

根据潮白河流域 7 个研究站点 1960–2011 年的逐月降雨数据,利用 ArcGIS 软件实现对各站点的泰森多边形的划分,基于面积计算研究区面雨量,并以此计算流域 1 个月、3 个月、6 个月以及 12 个月时间尺度 SPI。以密云水库 1960–2011 年逐月入库流量计算流域相应时间尺度的 SDI。图 2 是研究区多时间尺度的 SPI 和 SDI 指数变化曲线图(时间尺度分别是 1 个月、3 个月、6 个月、12 个月)。

基于研究区月尺度的 SPI 及 SDI,采用游程理论对潮白河流域研究期内主要气象干旱和水文干

旱事件进行识别,提取其干旱历时、干旱烈度、平均干旱强度以及各干旱事件的起止年月,并统计干旱事件不同历时频次频率(图 3)。

结果表明,气象干旱在 1960–2011 年间共发生 128 次,历时大多为 1 或 2 个月,占到总干旱事件次数的 67.18%;历时达 4 个月及以上的干旱事件较少,仅占总干旱事件次数的 18.75%。52 a 间气象干旱最长历时为 10 个月,起止时间为 1967 年 9 月至 1968 年 6 月,据相关文献记载<sup>[15]</sup>,1967 年和 1968 年河北省长期少雨,部分地区自 1967 年 9 月至 1968 年 7 月 288 d 未落透雨,地面水枯竭,几条主要河流断流,地下水位显著下降。但从平均干旱强度角度来看,1967–1968 年的气象干旱并非研究期内最严重的气象干旱,平均干旱强度仅为-1.077,与平均强度达-3.533 的 1975 年 9–10 月干旱事件相差较远,但因其极长的持续时间,所引起的灾害后果不容小觑。

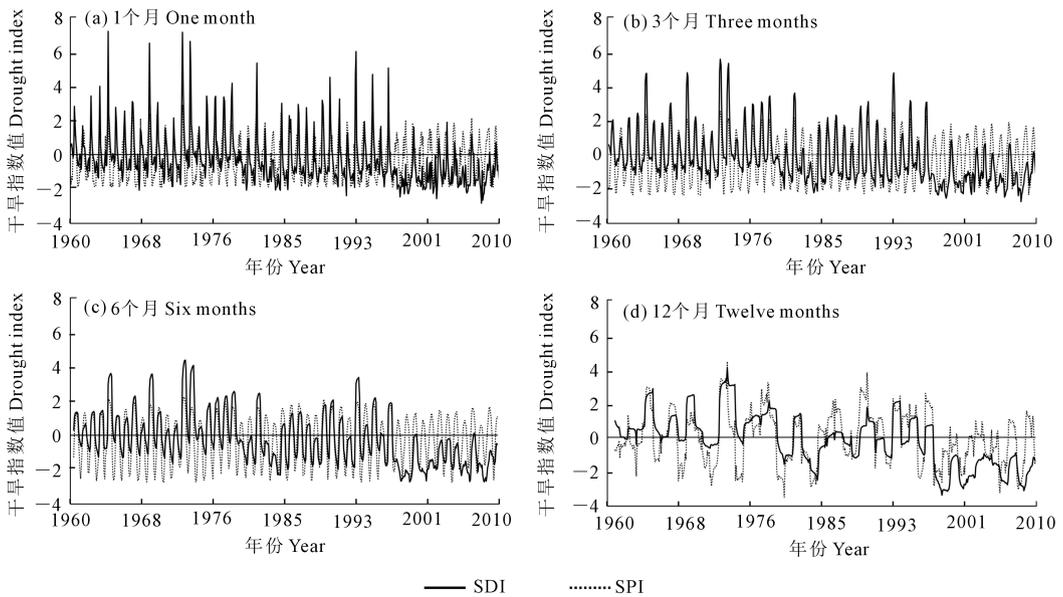
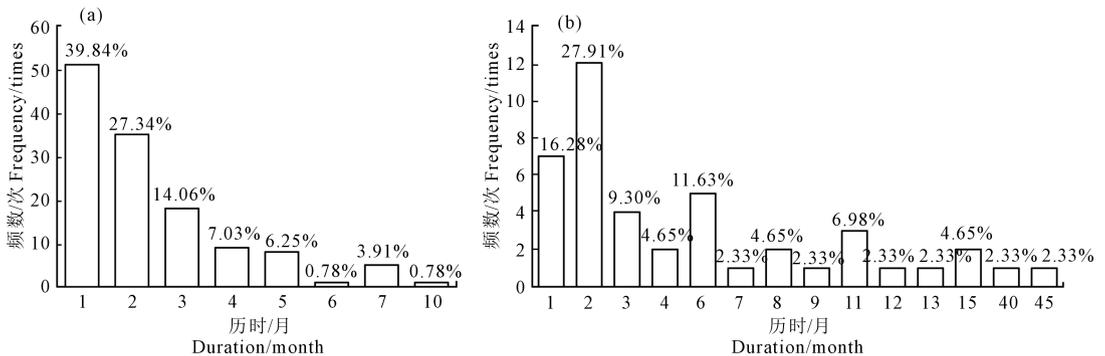


图 2 不同时间尺度下 SPI 和 SDI 变化曲线

Fig.2 Time series of SPI and SDI at different time scales



注:图中百分数表示不同干旱事件历时所出现的频率。

Note: The percentages in the figure indicate the frequency of each drought duration time.

图 3 气象干旱(a)与水文干旱(b)历时统计

Fig.3 Drought duration of meteorological (a) and hydrological (b) droughts

水文干旱在 1960–2011 年间共发生 43 次,既有 1–2 个月的短历时干旱,也有长达 40 个月以上的长历时干旱。与气象干旱不同的是,水文干旱历时达 4 个月以上的事件占总干旱次数的 46.54%;存在 2 次 40 个月以上超长历时干旱,起止时间分别是 1999 年 6 月至 2003 年 2 月、2005 年 5 月至 2008 年 8 月,均在 1999 年以后,即 90 年代末以后,潮白河流域水文干旱频繁发生且多为长历时连续干旱,这与相关论文研究结果一致<sup>[16–17]</sup>。与气象干旱不同的是,这 2 次历时达 40 个月以上的干旱事件,其平均干旱强度亦在研究期内水文干旱事件的前列,如 1999–2003 年长达 45 个月的干旱事件,其平均干旱强度达 -2.055,仅次于 2009–2010 年的 15 个月的干旱事件。

## 2.2 干旱烈度与历时的趋势与突变分析

在进行水文气象干旱演变分析前,需对基于游程理论的干旱识别结果进行一定的处理,统计年干旱烈度和年干旱历时。本文将年干旱烈度定义为按水文年(6 月至次年 5 月)划分所得该年中各月干旱烈度累积和,其值越小表明干旱越严重;年干旱历时定义为该年中干旱月数。

采用 M-K 趋势检验法分别对气象、水文干旱的年干旱烈度和年干旱历时进行趋势分析(图 4),气象干旱的年干旱烈度和年干旱历时的  $Z_t$  值分别是 -1.45 和 -0.36,均小于 0,有略微下降的趋势,即研究期内气象干旱的烈度有所增强但干旱历时却有所缩短,但是未达到 0.05 显著性水平,二者趋势均不明显。与气象干旱不同的是,水文干旱的年干旱烈度和年干旱历时的  $Z_t$  值高达 -8.53 和 8.42,即烈度存在显著的增强趋势且历时也有极为明显的延长趋势。由图 4 也可知气象干旱烈度与历时线性趋势斜率仅为 -0.025 和 -0.005,趋势均不明显,而水文干旱则达到 -0.419 和 0.228,与 M-K 趋势检验得到的存在显著变化趋势的结果一致。

气候突变常表现为气候从一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)跳跃式地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)<sup>[18]</sup>,一般我们可以采用气候的特征平均值来衡量,即气候若是从一个平均值急剧变化至另一个平均值,可称为均值突变。采用滑动  $t$ -检验法可较好地检测均值突变,确定子序列  $n_1 = n_2 = k$  ( $k = 3, 5, 8$ ),显著性水平  $\alpha = 0.01$  和 0.05。当  $k = 3$ ,按  $t$  分布自由度  $\nu = n_1 + n_2 - 2 = 4$  时,  $t_{0.01} = 4.604$ ,  $t_{0.05} = 2.776$ ;当  $k = 5$ , $\nu = n_1 + n_2 - 2 = 8$  时,  $t_{0.01} = 3.355$ ,  $t_{0.05} = 2.306$ ;当  $k = 8$ , $\nu = n_1 + n_2 - 2 = 14$  时,  $t_{0.01} = 2.977$ ,  $t_{0.05} = 2.145$ 。结果如图 5~图 7 所示。图中(a)均为气象干旱历时的滑动  $t$ -检验结果,从上至下分别为  $K = 3, 5$  和 8 三种情况,以避免人为设置子序列长度的随意性。(b)、(c)、(d)分别为气象干旱烈度、水文干旱历时和水文干旱烈度的检验结果。

气象干旱年干旱烈度序列呈现连续性变化,在  $\alpha = 0.01$  和  $\alpha = 0.05$  显著性水平时均未检验出突变年份,其年干旱历时序列在  $K = 3$  时检验出 1977 年左右和 1998 年左右存在突变,在  $\alpha = 0.05$  达显著性水平,但随着子序列长度的增加,该两处突变年份均消失,故推定气象干旱的年干旱烈度和历时在研究期内均无突变现象。与气象干旱不同的是,水文干旱年干旱烈度与历时均存在突变年份,虽然由于子序列的不同,突变年份有所漂移,但是可大致判断出 2 个干旱特征要素均在 1980 年和 1998 年左右存在突变现象(1980 年在  $\alpha = 0.05$  达到显著水平,1998 年在  $\alpha = 0.01$  达到显著水平)。年干旱烈度统计值在 1980 年和 1998 年两处突变年份都为正值,即烈度在该两处均有显著减小的突变现象;而年干旱历时均为负值,即历时在该两处均有显著的增加趋势。该结论在图 4 也可以看出,图 4 中的黑实线分别为突变点前后的均值,水文干旱年干旱烈度在 1980 年前后分别为 -1.21 和 -7.51,降幅超过 500%,

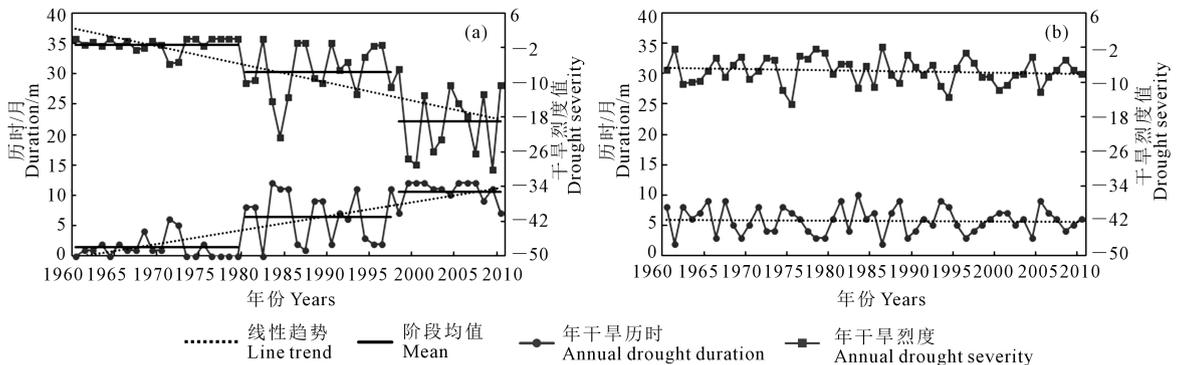
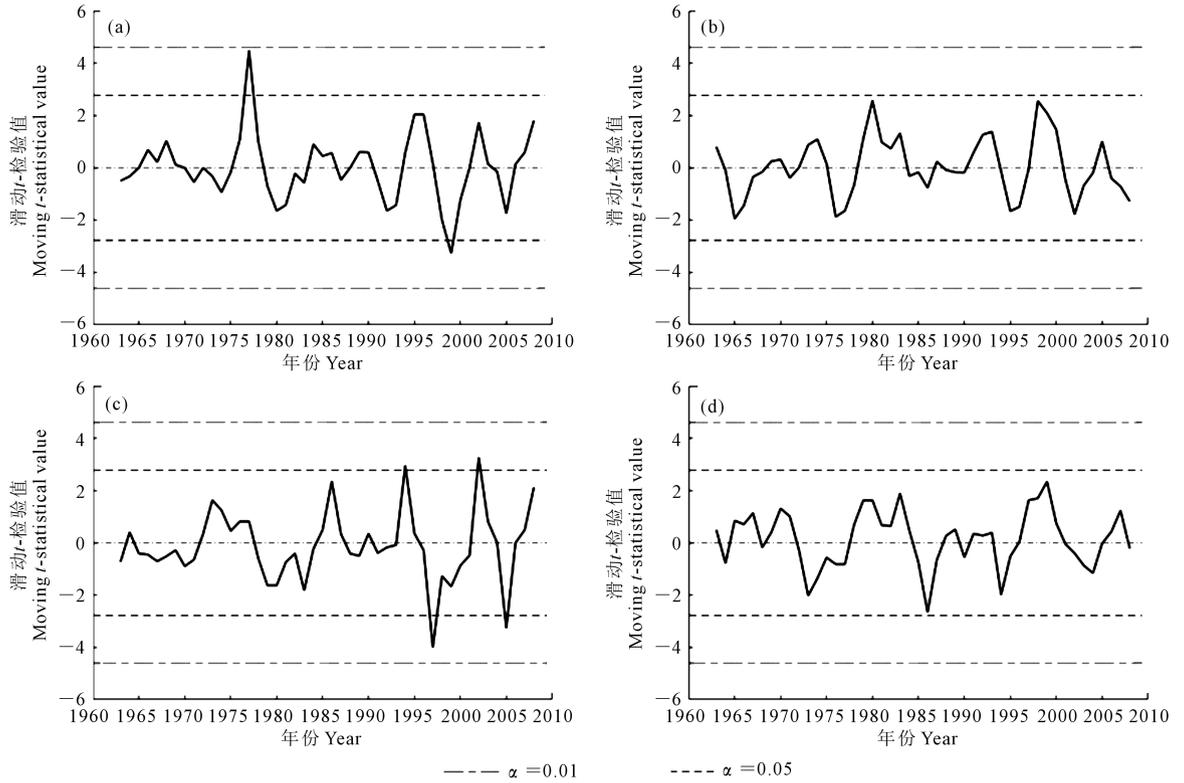


图 4 水文干旱(a)、气象干旱(b)的干旱烈度与历时

Fig.4 Drought duration and drought severity of hydrological drought (a) and meteorological drought (b)



注: a、b、c、d 分别为气象干旱历时、烈度和水文干旱历时、烈度。下同。

Note: a, b, c, and d represent meteorological drought duration, severity and hydrological drought duration, severity, respectively. The same below.

图 5 气象、水文干旱突变检验 ( $k=3$ )

Fig.5 Abrupt test of hydrological and meteorological drought,  $k=3$

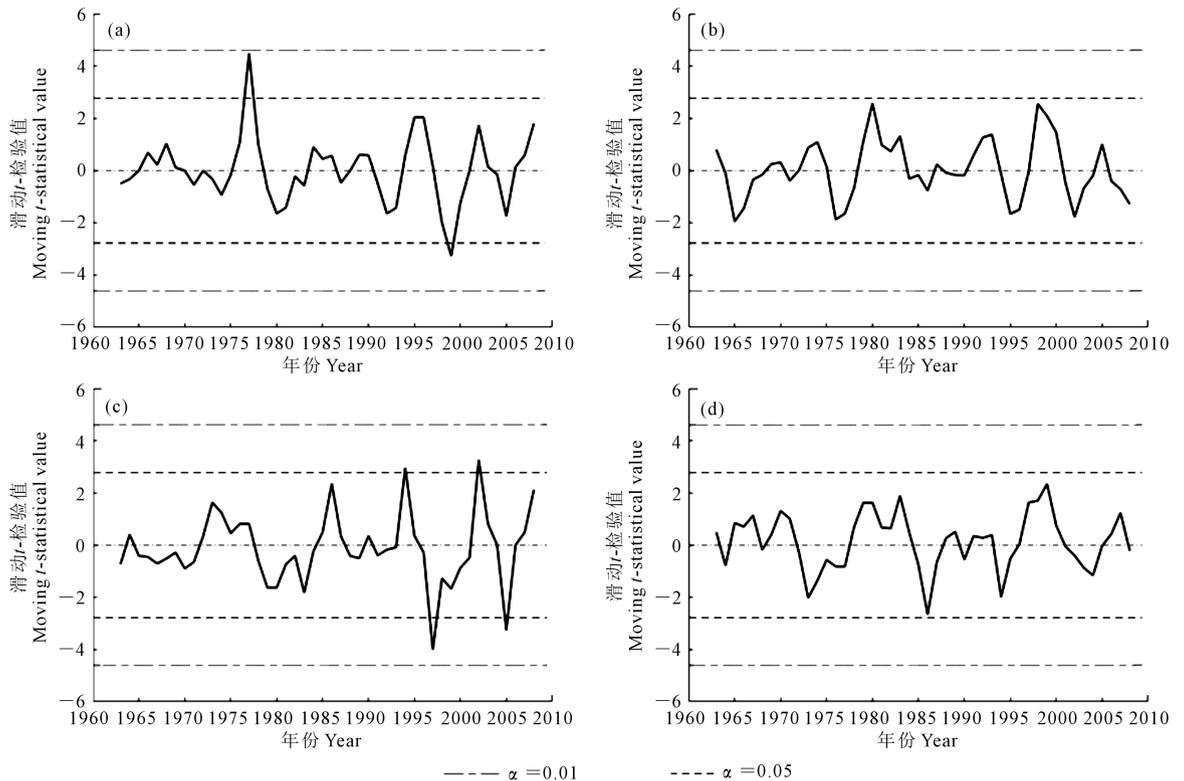


图 6 气象、水文干旱突变检验 ( $k=5$ )

Fig.6 Abrupt test of hydrological and meteorological drought,  $k=5$

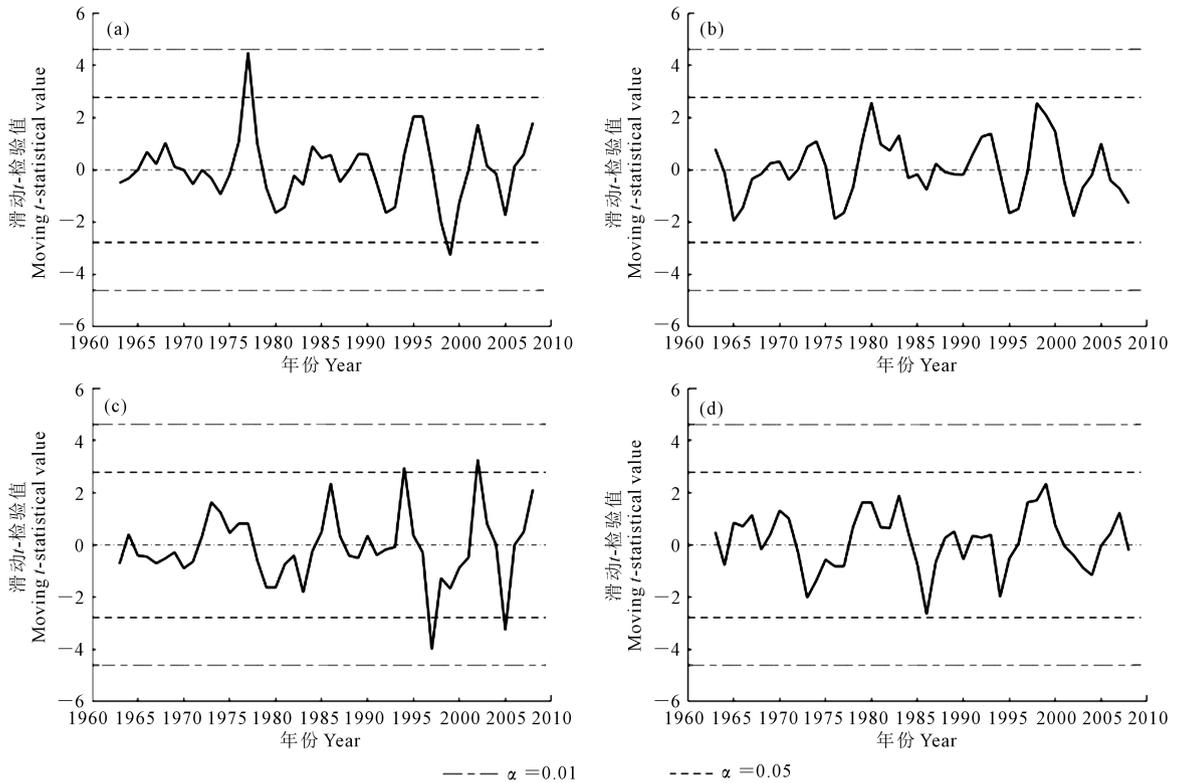


图 7 气象、水文干旱突变检验 ( $k=8$ )

Fig.7 Abrupt test of hydrological and meteorological drought,  $k=8$

而 1998 年之后为 -19.08, 降幅超过 150%; 而年干旱历时在 1980 年和 1998 年前后的升幅也分别达到 370% 和 66%, 因此水文干旱在 1980 年和 1998 年存在突变现象。

研究期内水文干旱烈度和历时分别存在增强和延长的趋势, 整体趋于严重, 且水文干旱存在突变现象, 而气象干旱特征的变化并不明显。为何气象、水文干旱变化不一致? 由于本研究分别采用以降水为输入数据的 SPI、以径流为输入数据的 SDI 表征气象、水文干旱, 所以可以从研究区的降雨、径流着手分析原因。

任涵璐<sup>[19]</sup>在分析下垫面变化对潮白河流域地表径流影响时发现研究区降水径流关系发生了明显的变化, 1990 年前与 1990 年后两个不同时间段内, 相同的年降水量产生的径流量变小, 甚至出现年降水量增加而年径流量减少的现象。高迎春、姚治君、王纲胜<sup>[20-22]</sup>等也通过不同的方法证明人类活动是引起潮白河流域径流减少的主要因素, 其次才是气候变化因素。李子君<sup>[23]</sup>认为研究区人类活动的影响可具体分为: (1) 水资源的开发与利用, 流域内赤城县、丰宁县和滦平县三县农业用水量增加, 使得部分径流被引出河道; (2) 土地利用的变化, 流域内林地面积的快速增加和耕地、草地面积的大量

减少在一定程度上截留了降雨; (3) 水库及跨流域引水的影响, 水库拦蓄部分径流, 且每年白河堡水库向流域外调水。这印证了本文得出的气象干旱和水文干旱的变化并不完全一致的结论。

另外, 本文也得出水文干旱的年干旱烈度与历时均存在突变现象的结论, 突变时间分别为 1980 年和 1998 年。徐华山<sup>[24]</sup>在研究海河流域径流变化时也发现类似的突变现象, 突变时间与本文结论基本一致。他认为第一次突变时间与我国农田联产承包责任制实施时间基本吻合, 农业用水的剧增对径流减少有着重要影响, 从而导致水文干旱特征的突变。另外潮白河流域位于 1979 年开始实施的三北防护林工程的治理区域中, 故推断第二次突变与研究区的土地利用变化存在极强的联系。

### 2.3 水文和气象干旱的响应关系

水文干旱处在自然干旱发展次级阶段, 在发生时间上来说, 一般滞后于气象干旱, 滞后时间一般取决于研究区的产流过程、地表水体蓄水作用等因素。为具体探求水文、气象干旱的响应关系, 采用 Spearman 秩相关检验分别对 1、3、6 和 12 个月尺度的 SPI 和 SDI 指数进行相关分析, 相关系数分别为 0.433、0.556、0.640 和 0.648, 以上相关系数均通过  $\alpha=0.01$  显著性水平检验, 故研究期内潮白河流域水

文、气象干旱在 12 个月尺度上相关性较为显著。从图 2,尤其是其中 12 个月时间尺度的曲线图可证实水文、气象干旱相关性较好以及二者之间的滞后性。

进而分析研究区水文干旱相对于气象干旱的滞后时间,分别取 12 个月尺度的 SDI 和 SPI 序列,组合成无滞后期、滞后 1、2、3、...12 个月共 13 组序列,分别进行 Spearman 秩相关检验(表 2),最大相关系数所对应的时间梯度即为水文气象干旱之间的滞后期。结果表明当滞后期为 1 个月时,SDI-12 与 SPI-12 相关系数达 0.671,具有最高的相关性,在 12 个月滞后期时,相关系数仅为 0.181,相关性最低,即潮白河流域在研究期内以 SDI 表征的水文干旱相对于以 SPI 表征的气象干旱的滞后期约为 1 个月。

水文干旱作为气象干旱进一步发展的次级阶段,必然滞后于气象干旱。滞后期的长短则取决于研究区域的降水径流关系、蒸发强度等自然因素,当然人类活动的影响也不可忽略,研究区土地利用情况以及用水强度等均会影响滞后期。研究区气象干旱发生后,地表、地下水之间的补给关系受到何种影响,并如何进一步引发水文干旱,这一点本文所计算的滞后期并未从机理上作出解释,仅仅根据 SPI 和 SDI 的秩相关程度得到,大大降低了水文气象干旱响应关系分析的难度,但是其准确性也随之降低,仅可作为流域水文干旱早期预警的参考。

表 2 水文、气象干旱的响应关系

Table 2 Relationships between meteorological and hydrological droughts

滞后期 Lag period	相关系数 Correlation coefficient	滞后期 Lag period	相关系数 Correlation coefficient
无滞后 No lag	0.648	7 个月 7 months	0.465
1 个月 1 month	0.671	8 个月 8 months	0.415
2 个月 2 months	0.654	9 个月 9 months	0.364
3 个月 3 months	0.626	10 个月 10 months	0.309
4 个月 4 months	0.590	11 个月 11 months	0.247
5 个月 5 months	0.553	12 个月 12 months	0.181
6 个月 6 months	0.511		

注:以上相关系数均通过  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验。

Note: All correlation coefficients passed the significant level test at  $\alpha=0.01$ .

另外从上文的分析已知潮白河流域干旱的变化趋势极为明显,且刘佳凯等<sup>[25]</sup>分析潮白河流域降水径流关系时发现该流域降水径流关系受人类活动的影响较大,如何在非一致性条件下研究水文气象干旱的滞后关系以及气象干旱转变为水文干旱的临界条件,是亟待研究的问题。

### 3 结 论

利用潮白河流域 1960-2011 年 7 个气象站逐月降雨以及同期密云水库入库流量数据,基于游程理论和 Mann-Kendall 检验法分析水文、气象干旱要素特性,并探求了水文、气象干旱的响应关系。通过上述分析,可得到如下结论:

1) 研究期内潮白河流域以 SPI 表征的气象干旱多以短历时干旱事件为主,历时 1-2 个月的干旱事件达研究期内气象干旱事件总次数的 67.18%,但是年干旱烈度和年干旱历时的变化趋势不明显。

2) 以 SDI 所表征的水文干旱存在极长历时重烈度干旱事件,历时达 4 个月以上的干旱事件达研究期内水文干旱事件总次数的 46.54%,最长干旱历时达 45 个月,在研究期内年干旱烈度存在增强趋势,同时其干旱历时亦有增长趋势,且 20 世纪 90 年代末以来,水文干旱频繁发生且多为长历时连续干旱;研究期内水文干旱特征要素均存在突变现象,突变年份为 1980 年和 1998 年。

3) 研究期内以 SDI 表征的水文干旱相对于以 SPI 表征的气象干旱的滞后期约为 1 个月。

### 参 考 文 献:

- [1] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions[J]. *Water International*, 1985, 10(3): 111-120.
- [2] 胡彩虹, 金星, 王艺璇, 等. 水文干旱指标研究进展综述[J]. *人民长江*, 2013, 44(7): 11-15.
- [3] Garen D C. Revised surface water supply index for western United States[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993, 119(4): 437-454.
- [4] Mendicino G, Senatore A, Versace P. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 357(3): 282-302.
- [5] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): 226-236.
- [6] Nalbantis I, Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(5): 881-897.
- [7] Kazemzadeh M, Malekian A. Spatial characteristics and temporal

- trends of meteorological and hydrological droughts in northwestern Iran [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(1): 1-20.
- [8] Liu L, Hong Y, Yong B, et al. Hydro-climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in blue river basin, oklahoma[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(10): 2761-2779.
- [9] 钟永华, 鲁帆, 易忠, 等. 密云水库以上流域年径流变化趋势及周期分析[J]. *水文*, 2013, 33(6): 81-84.
- [10] 赵阳, 余新晓, 郑江坤, 等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 252-260.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T20481-2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] Nalbantis I, Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(5): 881-897.
- [13] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 206-214.
- [14] Silva R M D, Santos C A G, Moreira M, et al. Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River Basin [J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(2): 1205-1221.
- [15] 温克刚. 中国气象灾害大典. 河北卷[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 56-75.
- [16] 张婧, 梁树柏, 许晓光, 等. 基于 CI 指数的河北省近 50 年干旱时空分布特征[J]. *资源科学*, 2012, 34(6): 1089-1094.
- [17] 张金龙, 刘学锋, 于长文. 河北省干旱分布特征和变化规律分析[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 41-46.
- [18] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.
- [19] 任涵璐, 刘江侠, 曹阳. 流域下垫面变化对潮白河密云水库上游径流影响分析[J]. *水利规划与设计*, 2017, (11): 92-94.
- [20] 高迎春, 姚洽君, 刘宝勤, 等. 密云水库入库径流变化趋势及动因分析[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 546-553.
- [21] 姚洽君, 管彦平, 高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 599-606.
- [22] 王纲胜, 夏军, 万东晖, 等. 气候变化及人类活动影响下的潮白河月水量平衡模拟[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 86-91.
- [23] 李子君, 李秀彬. 潮白河上游 1961-2005 年径流变化趋势及原因分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 82-87.
- [24] 徐华山. 海河流域径流与水环境变化特征及成因分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- [25] 刘佳凯, 张振明, 鄢鄂馨, 等. 潮白河流域径流对降雨的多尺度响应[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(4): 50-59.

(上接第 219 页)

- [20] 林超文, 庞良玉, 陈一兵, 等. 不同耕作方式和雨强对紫色土坡耕地降雨有效性的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(3): 381-385.
- [21] 郑江坤, 杨帆, 王文武, 等. 不同降雨等级下耕作措施对坡地径流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(1): 38-45.
- [22] 王鹏飞, 郑子成, 张锡洲. 玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 30-34.
- [23] 梁心蓝, 赵龙山, 吴佳, 等. 地表糙度与径流水力学参数响应规律模拟[J]. *农业工程报*, 2014, 30(19): 123-131.
- [24] 郑子成, 吴发启, 何淑勤. 耕作措施对产流作用的研究[J]. *土壤*, 2004, 36(3): 327-330.
- [25] 赵龙山, 侯瑞, 吴发启, 等. 水蚀过程中裸露陡坡耕地土壤侵蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 74-79.
- [26] 王治国, 魏忠义, 段喜明, 等. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀的研究(I)——影响细沟侵蚀因素的综合分析[J]. *水土保持学报*, 1995, (2): 51-57.
- [27] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 水土保持耕作措施强化入渗速率模型的探讨[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(2): 103-105.
- [28] 陈晓燕, 王茹, 卓素娟, 等. 不同降雨强度下紫色土陡坡地侵蚀泥沙养分特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 1-5.
- [29] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析[J]. *中国水土保持*, 1997, (4): 21-23, 5.
- [30] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5514-5521.
- [31] 刘俊体, 孙莉英, 张学培, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育阶段的影响因素及其效应分析[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 53-57.