

# 天津市干旱时空变化特征研究<sup>\*</sup>

曹燕燕, 冯平

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 基于天津市13个行政区域测点1961–2010年逐月降水资料的基础上, 利用不同时间尺度下的标准化降水指数 *SPI* 分析了天津市干旱变化的时空特征, 并运用 *k-means* 聚类理论对天津市进行了干旱分区。研究得出天津市干旱情况逐渐严重, 季节性干旱比较明显; 各区县整体干旱情况类似, 但发生不同等级干旱的时间不太相同; 并将天津市分为6个干旱特征类似的地区, 为分区域研究干旱特征提供了基础。

**关键词:** 干旱; 标准化降水指数 *SPI*; 时空变化; 干旱分区; *k-means* 聚类

**中图分类号:** S423; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)02-0040-06

## 0 引言

干旱通常指淡水总量少, 不足以满足人的生存和经济发展的气候现象, 一般是长期的现象。尤其值得注意的是, 随着人类的经济发展和人口膨胀, 水资源短缺现象日趋严重, 这也直接导致了干旱地区的扩大与干旱化程度的加重, 干旱化趋势已成为全球关注的问题。

在国内外研究方面, 刘昌明<sup>[1]</sup>等采用降水距平百分率指标分析了海河流域的水旱情况。McKee<sup>[2]</sup>等在评估美国科罗拉多干旱状况时提出了基于降水量的标准化降水指数 *SPI* (*Standardized Precipitation Index*)。标准化降水指数是近20年来国际上最流行的干旱指标之一。Santos J F<sup>[3]</sup>等人运用 *SPI* 分析了葡萄牙大陆的干旱特征, 并用主成份分析对其进行了分区。袁文平<sup>[4]</sup>等研究了 *SPI* 的应用特性及其在我国的适用性, 发现 *SPI* 在我国不同气候区域都具有良好的计算稳定特性, 其多时间尺度应用特性可以满足不同地区、不同应用的需求。李斌<sup>[5]</sup>等利用多时间尺度下的 *SPI* 分析了澜沧江流域干旱变化的时空特征, 并利用 *k-means* 聚类的多元统计方法对该流域进行了干旱分区。谢五三<sup>[6]</sup>等利用安徽省78个气象台站49年的逐日气温和降水资料, 采用综合气象干旱指数计算每个干旱过程, 通过趋势分析、*EOF* 分析、功率谱及小波分析、滑动 *T* 检验等方法系统分析了近50年安徽省干旱时空特征。张凌云<sup>[7]</sup>等利用广西具有气候代表性的32个站点1961–2007年逐日降水量资料, 引入季节无雨日作为划分干旱的标准, 采用 *EOF* 分析等方法, 分

析了广西春旱的时空分布特征; 并用 *NCEP* 再分析资料、*NOAA* 海温资料、国家气候中心的74项环流特征量资料等, 对广西春旱的成因进行了分析。

天津市位于我国旱涝灾害频繁的华北平原地区, 干旱是制约天津市经济社会发展的自然灾害之一。因此, 研究该地区的干旱时空分布规律, 对减轻其干旱灾害损失, 保障其经济社会发展有着重要的意义。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

#### 1.1.1 研究区域概况

天津市位于38°34′~40°15′N, 116°43′~118°04′E之间, 总面积11 919.7 km<sup>2</sup>, 地处华北平原东北部, 海河流域下游, 东临渤海, 北依燕山, 是海河5大支流南运河、子牙河、大清河、永定河、北运河的汇合处和入海口, 素有“九河下稍”之称。地势西北高, 东南低, 有山地、丘陵和平原三种地形。

天津市主要受季风环流的支配, 是东亚季风盛行的地区, 属于大陆性气候, 四季分明。年均气温在11.4°~12.9°, 年平均降水量为520~650 mm, 降水日数为63~70 d。

#### 1.1.2 数据来源及研究区域划分

天津市共13个区县, 进行天津市区域干旱特征分析时主要按行政区划进行, 并且每个区域选择一个代表雨量站, 降雨量资料1961–2010年共50年的各代表站月平均降雨量。具体的雨量站点空间分布如图1所示。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-09-26 修回日期: 2012-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51179117)

作者简介: 曹燕燕(1988-), 女, 山东莱芜人, 硕士, 主要从事水文水资源问题的研究. E-mail: yan\_any@126.com

通讯作者: 冯平(1964-), 男, 黑龙江密山人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源问题的研究. E-mail: fengping@tju.edu.cn

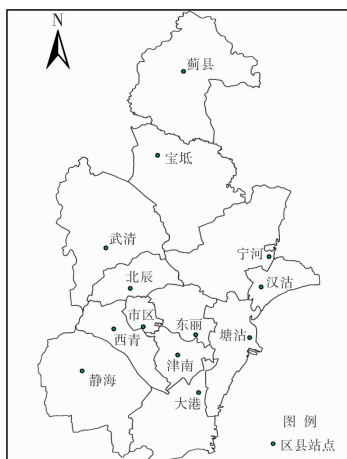


图1 天津市13个行政区及代表降雨站空间分布

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 干旱定义及其分类

《中华人民共和国抗旱条例》中将干旱灾害定义为由于降水减少、水工程供水不足引起的用水短缺, 并对生活、生产和生态造成危害的事件<sup>[8]</sup>。由于干旱涉及范围广泛, 时空分布多样, 研究者将干旱分成气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4类。本研究中主要考虑水文干旱, 即因降水长期短缺而造成某段时间内地表水或地下水收支不平衡, 出现水分短缺, 使河流径流量、地表水、水库蓄水和湖水减少的现象<sup>[8]</sup>。

### 1.2.2 干旱指标及其等级划分

干旱指标是表征干旱程度的特征量, 是旱情描述的数值表达, 选取适宜的干旱指标对分析其干旱变化规律具有重要的意义。比较常用的干旱指标有降水距平百分率、相对湿润度指数、标准化降水指数、土壤相对湿度干旱指数和降水Z指数等<sup>[9-10]</sup>。考虑到天津市的地理及气候条件, 选取降水距平百分率和标准化降水指数这两个指标来对天津市的干旱规律进行分析。

#### (1) 降水距平百分率 $P_a$

降水距平百分率是表征某时段降雨量较常年偏多或偏少的指标之一, 可直观反映降水异常引起的干旱, 在气象日常业务中常用评估月、季、年发生的干旱事件<sup>[9]</sup>。

降水距平百分率的计算公式为:

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_a$  为计算期内降水距平百分率;  $P$  为计算期内降雨量(mm);  $\bar{P}$  为计算期内多年平均降雨量(mm)。降雨距平百分率等级指标划分如表1所示<sup>[11-12]</sup>。

#### (2) 标准化降水指数 $SPI$

标准化降水指数  $SPI$  是近几年来国际上使用比较多的干旱指标之一, 它仅需要降水资料, 获取比较简单, 适用于多时间尺度, 由于是标准化数值, 可在不同地区开展比较<sup>[4-5]</sup>。

表1 降水距平百分率  $P_a$  干旱等级划分

等级	类型	月尺度	季尺度	年尺度
1	无旱	$-50 < P_a$	$-25 < P_a$	$-15 < P_a$
2	轻旱	$-70 < P_a \leq -50$	$-50 < P_a \leq -25$	$-30 < P_a \leq -15$
3	中旱	$-85 < P_a \leq -70$	$-70 < P_a \leq -50$	$-40 < P_a \leq -30$
4	重旱	$P_a \leq -85$	$P_a \leq -70$	$P_a \leq -40$

由于降水量分布一般不是正态分布, 而是一种偏态分布。所以在进行降水分析和干旱监测、评估中, 采用  $\Gamma$  分布概率来描述降水量的变化。 $SPI$  就是在计算出某时段内降水量  $\Gamma$  分布概率后, 再进行正态标准化处理, 最终用标准化累积频率分布来划分干旱等级。具体计算方法如下:

假设某时段降水量为随机变量  $x$ , 则其  $\Gamma$  分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta}, \quad x > 0. \quad (2)$$

式中:  $\beta > 0$ ,  $\gamma > 0$  分别为函数形状参数,  $\beta$  和  $\gamma$  可用极大似然估计方法求得:

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}, \quad \hat{\beta} = \bar{x}/\hat{\gamma}. \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i. \quad (4)$$

式中:  $x_i$  为降水量资料样本;  $\bar{x}$  为降水量均值。

确定概率密度函数中的参数后, 对于某一年的降水量  $x_0$ , 可求出随机变量  $x$  小于  $x_0$  事件的概率为:

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx. \quad (5)$$

上式中不包括  $x=0$  的情况, 而实际降水量可以为0, 降水量为0时的事件概率为:

$$F(x=0) = m/n \quad (6)$$

式中:  $m$  为降水量为0的样本数;  $n$  为总样本数。对  $\Gamma$  分布概率进行正态标准化处理, 近似求解可得:

$$SPI = s \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0}. \quad (7)$$

式中:  $t = \sqrt{\ln 1/F^2}$ ,  $F$  为式(5)、(6)求得的概率, 并当  $F > 0.5$  时,  $F = 1.0 - F$ ,  $s = 1$ ; 当  $F \leq 0.5$  时,  $s = -1$ 。  $c_0 = 2.515\ 517$ ;  $c_1 = 0.802\ 853$ ;  $c_2 = 0.010\ 328$ ;  $d_1 = 1.432\ 788$ ;  $d_2 = 0.189\ 269$ ;  $d_3 = 0.001\ 308$ 。  $S$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) 均为计算时的过程参量<sup>[5]</sup>。

$SPI$  指标不仅考虑了降水服从偏态分布的实际, 而且又进行了正态标准处理, 消除了降水量的时空分布差异, 从而使  $SPI$  适合确定不同时间尺度的干旱监测评价, 具有相同干旱等级划分标准, 能进行多时间尺度旱涝等级对比分析, 是一种较好的气候干旱指标, 其不足是没有考虑影响干旱发生的其他因子<sup>[12-14]</sup>。 $SPI$  值等级划分指标如表2所示<sup>[13]</sup>。

表 2 SPI 指数干旱等级划分

等级	类型	SPI
1	无旱	$-0.5 < SPI$
2	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
5	特旱	$SPI \leq -2.0$

## 1.2.3 干旱分区研究方法—K-means 快速聚类法

K-means 是样本聚类方法,可快速进行分类并实现类内差异最小化和类间差异最大化<sup>[7]</sup>。主要过程为:首先从  $n$  个数据对象任意选择  $k$  个对象作为初始聚类中心,而对于所剩下的其它对象,则根据它们与这些聚类中心的相似度(距离),分别将它们分配给与其最相似的(聚类中心所代表的)聚类,然后再计算每个所获新聚类的聚类中心(该聚类中所有对象的均值),不断重复这一过程直到标准测度函数开始收敛为止<sup>[15]</sup>。一

般都采用均方差作为标准测度函数。基于这种方法,将各站 SPI 变化具有相似性的站点分为一类,实现空间分析。

## 1.3 资料分析与计算

分别估算这 13 个区域的降水距平百分率和标准化降水指数指标。根据得出的数值及相应的干旱等级划分表判断各区域的干旱年等级及相应的干旱年份。从依照  $P_a$  值和 SPI 值识别出的干旱年份与实际情况对比可得出, SPI 值识别出的干旱年份及干旱等级较  $P_a$  更合理一些。

## 2 结果与分析

## 2.1 天津市干旱时间变化特征

图 2 是天津各区域 SPI 值 50 年的变化趋势图。由图 2 可知,天津市各区域干旱随时间的变化规律大致相同。

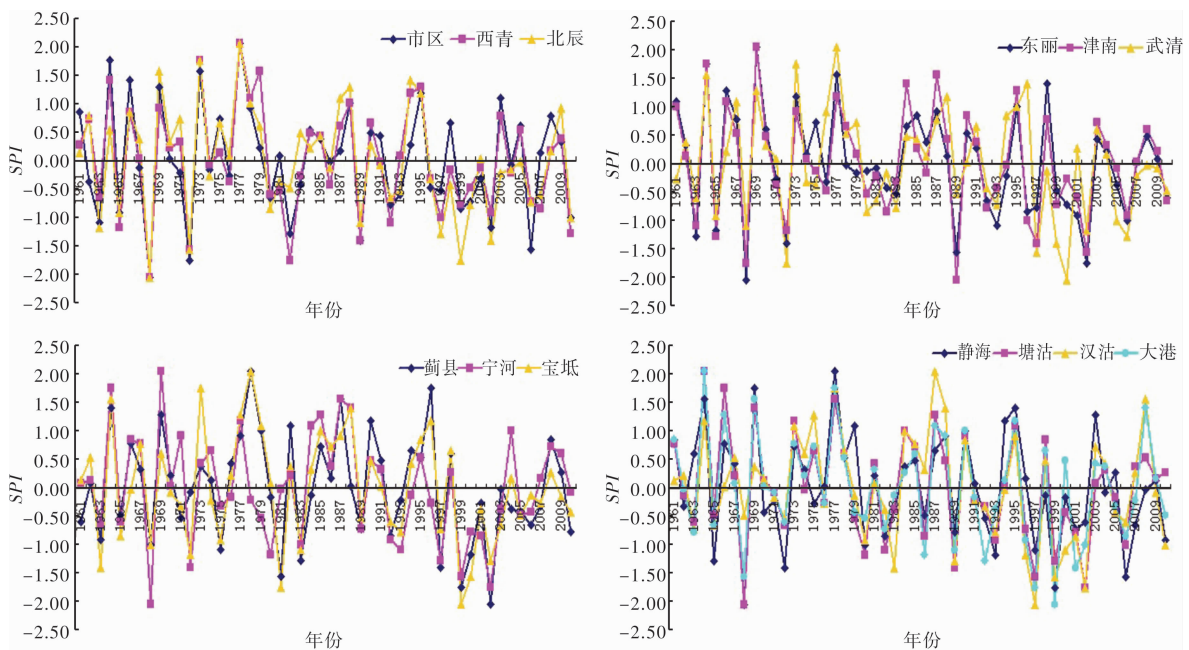


图 2 天津市各测点标准化降水指数 SPI 趋势图

在 1961—2010 年的 50 年间,天津市共发生 14 次轻旱、5 次中旱、2 次重大干旱,还有 1 次特大干旱。具体干旱年份见表 3。天津市比较严重的干旱为 1960 年代末、1990 年末和 21 世纪初,代表年份有 1968、1999、2002 年等,尤其是 1968 年大范围的特大干旱。在 1960 年代中期、1970 年代末、1980 年代初期和中期、1990 年代初和 21 世纪初,主要表现为轻旱和中旱,代表年份为 1963、1965、1980、1992、1997、2001、2006 年等。

图 3 所示为逐年的干旱等级的月数统计曲线。由图 3 看出,天津市平均每年的干旱月数为 3.5 个月。1960 年代,主要以轻旱为主,轻旱月数比较多,也有少数月份为中旱;1970 年代,中旱月份

增加,有的月份出现重大干旱的情况,主要以轻旱和中旱为主;1980—1990 年代,轻旱月份逐年减少,中旱月份逐年增加;到 21 世纪初期,发生重大干旱的月份增多,干旱等级演变为以中旱和重旱为主。在这 50 年间,天津市只有 1985 年没有发生干旱,无干旱月;干旱时长最长的是 1968 和 1993 年,一年中有 7 个月份发生不同等级的干旱情况。

图 4 为季尺度标准下不同年代的干旱次数统计图。由图 4 看出,1961—1970 年间,发生春旱和冬旱的次数较少,主要以夏旱为主;1971—1980 年与 1981—1990 年干旱情况类似,发生夏旱的次数较少,主要以春旱、秋旱和冬旱为主;1991—2000 年间,干旱次数较多,以春旱和夏旱为主;2001—2010 年

间, 发生春旱的次数最少, 冬旱的次数最多, 夏旱和秋旱与其他年代相比也相对较多。

表 3 1961—2010 年间干旱年份统计表

干旱类型	年份
轻旱	1963 1965 1979 1980 1981 1982 1986 1992 1993 1996 2000 2001 2006 2007
中旱	1972 1983 1989 1997 2010
重旱	1999 2002
特旱	1968

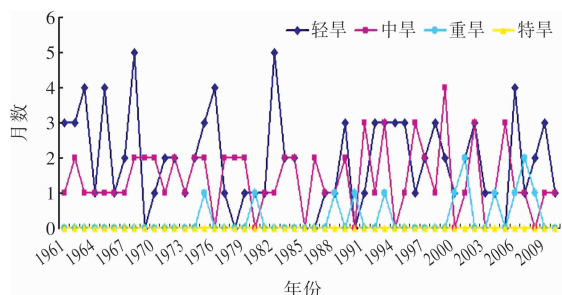


图 3 天津市各干旱等级月数逐年趋势曲线图

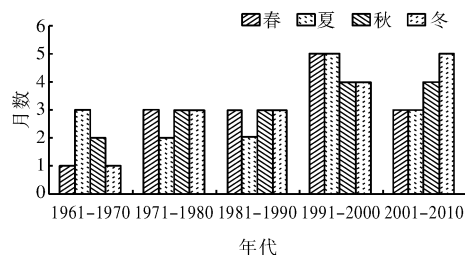


图 4 季尺度标准下不同年代干旱次数统计图

从上述分析可见, 1960—1970 年代, 干旱次数较少, 并且以轻旱居多。季节性干旱也比较明显, 1960 年代以夏旱为主, 1970 年代则以春旱、秋旱和冬旱为主。而从 1980 年代开始到 21 世纪初, 干旱次数逐年增多, 干旱等级也逐渐以中旱和重旱为主, 季节性干旱发生的次数也有所增多。

## 2.2 天津市干旱空间变化

对所得干旱年份绘制等值线图, 可以看出干旱的空间变化特征。图 5 为发生干旱区域较多的年份等值线图。

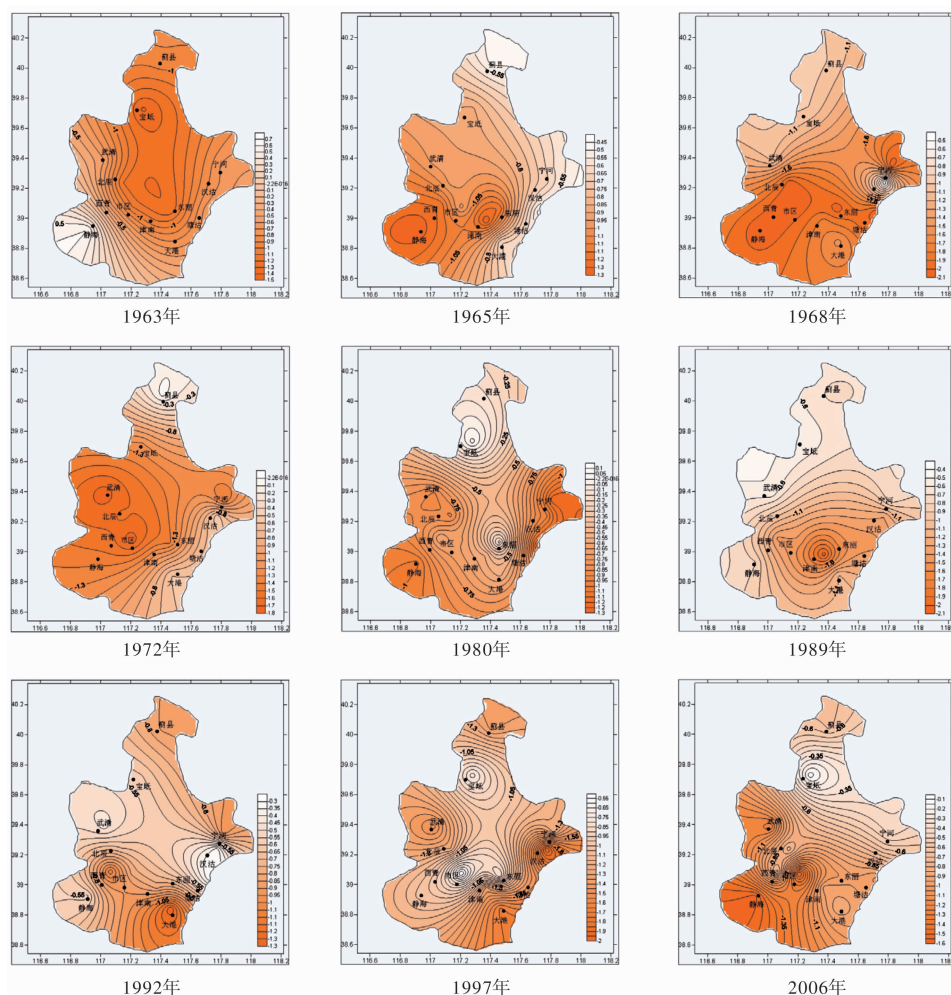


图 5 干旱代表年份等值线图

1960 年代初期, 天津中西部大部分地区发生轻旱, 宝坻、蓟县南部以及宁河西部干旱等级为中旱, 干旱主要集中在东部和北部的大部分地区;

到 1960 年代中期和末期, 天津市干旱情况趋于严重, 尤其是 1968 年, 除天津西北小部分地区外, 其余地区均以中旱和重大干旱为主, 如市区、西



青等西南部地区发生特大干旱。

1970 年代初期, 干旱仍然以西部地区较为严重, 西部大部分地区发生重旱, 宝坻以南的大部分地区均以轻旱为主; 到 1970 年代末, 干旱情况有所缓解, 只有汉沽、塘沽等东部沿海的一小部分地区发生轻旱的情况。

1980 年代, 除 1982 年集中在南部地区外, 1980 年代初期干旱主要集中在北部和东部的蓟县、宝坻、汉沽等地; 末期, 干旱情况逐渐向南部扩展, 如 1989 年, 津南发生特大干旱。

1990 年代, 天津发生大范围干旱, 初期南部西青、市区等地发生中度干旱, 中期主要集中在东部沿海地区, 到末期, 以津南、东丽为中心, 向四周干旱等级逐渐增加, 均以中旱和重旱为主。

21 世纪初, 大部分地区主要以轻旱和中旱为主。2002 年, 从西南部往东北干旱等级由轻旱逐渐演变为中旱和重旱; 2006 年, 蓟县发生中旱, 从宝坻区往东南干旱情况逐渐严重, 尤其静海县发生重大干旱。

### 2.3 干旱分区

结合 k-means 聚类中的方差分析和干旱的空间变化特征, 天津市各区县干旱特征变化相似的归为一类, 可将天津市 13 个区县分为 6 个干旱区。具体分类情况见表 4 和图 6。

表 4 天津市干旱区县分类综合表

分区结果	区县名称
I 区	市区、东丽、津南、塘沽、大港
II 区	西青、静海
III 区	北辰、武清
IV 区	蓟县、宝坻
V 区	宁河
VI 区	汉沽

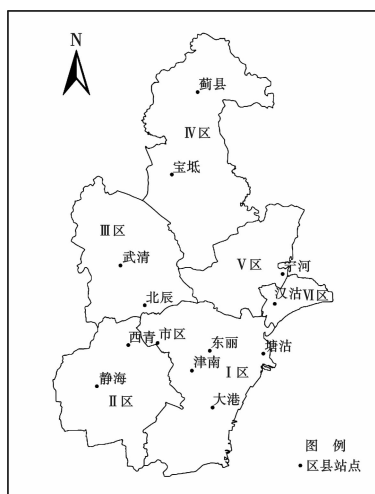


图 6 天津市干旱聚类分区图

所得到的 6 个分区基本上与天津市 13 个区县的地理、气候以及土壤等情况相符。I 区包括市区、东丽、津南、塘沽和大港, 位于天津市的东南沿海地区, 该区地势低平, 以平原为主, 属于

暖温带大陆性季风气候, 年均降水量约为 560 mm, 土壤以潮土、盐碱土为主。II 区包括西青和静海, 位于天津市西南部。该区地形平缓但多洼地, 地势南高北低, 西高东低; 气候为暖温带半湿润大陆性季风气候, 海洋气候影响不大; 土壤均为潮土类型, 大部分土地可耕性好。III 区包括北辰和武清, 位于天津的中西部, 地势坦荡低平, 其中武清位于华北冲积平原下端; 均属于温带半湿润大陆性季风气候; 土壤以砂性土、壤质土和粘性土为主。IV 区包括蓟县和宝坻, 位于天津北部。该区年均降水量在 600 mm 以上, 土壤以普通潮土、盐化潮土和粘质土居多; 气候同属于暖温带半湿润大陆性季风气候。V 区为宁河, 该区水资源丰富, 属于海积、冲积平原区, 地势北高南低、低平开阔; 年均降水量 642 mm, 虽濒临渤海, 但属内陆海湾, 仍属大陆性季风气候。土壤疏松湿润, 土层深厚。VI 区为汉沽, 位于天津东部沿海地区, 华北沉降带东北部, 属于温带季风气候, 土质以粘土为主。

## 3 结论

通过计算多时间尺度的标准化降水指数  $SPI$  值, 分析了天津市干旱变化的时空特征, 并用 k-means 聚类方法对天津市进行了干旱分区, 得出如下结论:

(1) 时间变化上, 1960 和 1970 年代, 干旱次数较少, 并且以轻旱居多, 季节性干旱也比较明显, 1960 年代以夏旱为主, 1970 年代则以春旱、秋旱和冬旱为主, 夏旱发生次数较少; 而从 1980 年代开始到 21 世纪初, 干旱次数逐年增多, 干旱等级也逐渐以中旱和重旱为主, 季节性干旱发生的次数也有所增多, 干旱情况逐渐严重。

(2) 空间变化上, 天津市各区县整体的干旱情况类似, 都是以轻旱和中旱为主, 每个区县均发生过一次特大干旱(大部分区县的特旱发生在 1968 年), 重旱的情况较少。主要是各区县发生不同等级干旱的时间不太相同。

(3) 在天津市干旱时间和空间变化特征的基础上, 运用 k-means 聚类分析方法对天津市各区县进行聚类, 将天津市各区县干旱特征变化相似的归为一类, 共分为 6 个分区, 对今后分区域研究天津市的干旱特征和整个天津市的干旱规划提供了相关基础。

(4) 需要说明的是考虑到天津市的水文数据资料, 选用  $P_d$  和  $SPI$  指数对天津市进行干旱分析。 $P_d$  可直观反映降水不足引起的干旱, 计算简单、所需资料容易获得, 但不能反应干旱的内在机理, 没有考虑前期干旱持续时间对后期干旱程度的影响。 $SPI$  指数适合多时间尺度的干旱分析, 并且能

够对多时间尺度旱涝等级进行对比分析, 其不足之处是没有考虑影响干旱发生的其他因素。而且本文没有考虑天津市各区县的地形、城市热岛、蒸发等因素, 对所得结果也会产生一定影响。

## 参考文献:

- [1] 刘昌明, 魏忠义. 华北平原农业水文及水资源[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [2] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//The Eighth Conference on Applied climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993: 179–184.
- [3] Santos J F, Pulido – Calvo I, Portela M M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal[J]. Water Resources Research, 2010, 46(3): 1–13.
- [4] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 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.
- [5] 李斌, 李丽娟, 李海滨, 等. 澜沧江流域干旱变化的时空特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 87–92.
- [6] 谢五三, 田红. 安徽省近 50 年干旱时空特征分析[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 94–98.
- [7] 张凌云, 简茂球. 广西春旱的时空分布特征及成因分析[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 48–54.
- [8] 张俊, 陈桂亚, 杨文发. 国内外干旱研究进展综述[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 65–69.
- [9] 冯平, 李绍飞, 王仲珏. 干旱识别与分析指标综述[J]. 中国农村水利水电, 2007(7): 13–15.
- [10] 谷亚超, 于利武, 代庆. 干旱分类及常用计算方法概述[J]. 东北水利水电, 2011(5): 37–39.
- [11] 高桂霞, 许明丽, 唐继业. 干旱指标及等级划分方法研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(9): 5301–5305.
- [12] 韩海涛, 胡文超, 陈学君等. 三种气象干旱指标的应用比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009(1): 237–241.
- [13] 国家质检总局. GB/T 20481–2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [14] 车少静, 李春强. 基于标准化降水指数的石家庄干旱时空特征[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 66–70.
- [15] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.

# Spatial and Temporal Variability of Droughts in Tianjin

Cao Yanyan and Feng Ping

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University,  
Tianjin 300072, China)

**Abstract:** By using 1961–2010 monthly precipitation data from 13 stations in Tianjin, the Standardized Precipitation Index (SPI) of different time scales was used to analyze the spatial and temporal variability of drought. The study area was divided into different regions according to the K-means clustering methods. The results show that the drought condition in Tianjin is more serious than ever before with obvious seasonal drought, each station has similar drought condition but the occurrence of different drought levels is different and Tianjin was divided into six different regions by similar features which would provide a foundation for sub-regional study in the future.

**Key words:** drought; Standardized Precipitation Index (SPI); spatial and temporal variability; sub-regional; K-means cluster