

基于 SPI 指数与 R/S 分析的曲靖市干旱特征研究

龚艳冰^{1,2}, 张继国², 刘高峰², 胡娜²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 河海大学水利信息统计与管理研究所, 江苏 常州 213022)

摘要: 利用云南省曲靖市典型水文站 1960—2009 年的月平均降水量数据资料, 计算多时间尺度标准化降水指数(SPI)值, 分析了曲靖市近 50 a 的干旱分布和干旱等级的时空变化特点。在此基础上, 利用重标极差分析法(R/S 分析法)计算 Hurst 指数, 对曲靖市发生干旱灾害的规律进行研究。研究表明, 曲靖市是干旱频发地区, 全年平均至少有 1/3 的月份会发生不同程度的干旱灾害, 不同时间尺度 SPI 指数的 H 值均大于 0.5, 说明曲靖市干旱灾害具有长期记忆性, 且时间尺度越大, 这种长期记忆性越强。因此, 曲靖市干旱未来的总体趋势将与过去特征相关, 具有自相似性并且发生干旱灾害的周期在 15~17 a 之间, 这与曲靖市的实际情况基本一致。

关键词: 水资源; 干旱特征; 标准化降水指数(SPI); R/S 分析

中图分类号: S161.6 文献标志码: A

Research on the drought characteristics in Qujing City base on the SPI and R/S analysis

GONG Yan-bing^{1,2}, ZHANG Ji-guo², LIU Gao-feng², HU Na²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Huan, Hubei 430072, China;

2. Institute of Hydraulic Information Statistic and Management, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

Abstract: Using the monthly mean rainfall data during 1960 to 2009 from typical hydrological station in Qujing City, Yunnan Province, calculated the multi time scale standardized precipitation index(SPI) and analyzed the temporal and spatial change characteristics of drought distribution and drought grade in recent 50 years in Qujing City. On this basis, using the rescaled range analysis method (R/S) calculated the Hurst index and researched the rule of drought disaster in Qujing City. The research showed that: The Qujing City was the drought frequently occurred region, in whole year at least one - third of the months will be occurred different degree drought disaster. The H values at different time scale of SPI index were total greater than 0.5. It explained that the drought disaster in Qujing City had long period memory, and the greater time scale, the stronger long term memory. Therefore, the overall trend of drought in future in Qujing City will be associated with the past characteristic, had the self similarity and the cycle of drought disaster was 15 to 17 years. It was the basic consistent with the actual situation in the Qujing City.

Keywords: water resources; drought characteristic; standardized precipitation index; R/S analysis

近年来,我国干旱灾害已经从传统的干旱半干旱地区转移到气候相对湿润的南部、西南地区,成灾频率大幅增加。云南省由于特殊的地形环境和气候条件,近年来旱灾频发。从 2009 年到 2012 年史无前例的连年旱灾,严重干旱造成云南省 742 万人、459 万头牲畜饮水困难。在干旱重灾区曲靖市,旱情造成曲靖市 348.28 万人受灾,94.34 万人饮水困难,农作物受灾面积 453 628.9 hm²,绝收面积

71 577.5 hm²。因此,开展干旱灾害的特征分析、评估与监测研究,已成为政府和学术界高度重视的热点问题,具有重大现实意义。造成曲靖市大范围旱灾的原因是多方面的,其中全球气候变暖,太平洋厄尔尼诺现象加剧,海洋季风无法登陆形成降雨,人为破坏环境等导致曲靖市的干旱形成原因异常复杂,影响因素很多。

许多干旱指标都是针对具体的研究目的而设

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目(2013B107); 江苏省自然科学基金项目(BK20130242); 国家自然科学基金项目(71303074)

作者简介: 龚艳冰(1979—),男,江苏靖江人,副教授,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail: yanbg79@sina.com。

定,所以干旱指标具有明显的地域性和不同的时间应用尺度。目前,国内外学者对于干旱问题的研究主要采用 McKee 等^[1]在评价美国科罗拉多州干旱灾情时提出的基于降水量累计概率的标准化降水指数(SPI)。SPI 指数不涉及具体的干旱机理,计算简单、资料获取容易,可对不同时间尺度的干旱进行监测,已经广泛应用于国内外各种干旱灾害的分析^[2-9]。分形理论中的重标极差分析法(R/S 分析法)主要是研究事物的某种结构或过程的特征从不同的空间、时间尺度来看是否具有相似,或者局部结构与整体是否具有相似规律的理论。干旱灾害可以看成时间轴上的点状事件,所以干旱灾害的发生十分类似于局部与整体之间在一定时间尺度内是否具有自相似特征,目前,分形理论已经在我国多个地区的干旱特征分析中被应用^[10-14]。为了制订抗旱对策、减少旱灾损失,许多学者致力于区域干旱特征方面的研究,并取得了一系列的进展,如彭高辉等^[13]利用分形理论分析了黄河流域干旱特征及空间关系,严登华等^[15]以海河流域为例,分析了海河流域干旱时空变化特征,孙智辉、王莺、周扬等^[16-18]利用标准化降水指数分别研究了陕西黄土高原地区、甘肃省河东地区和内蒙古地区的干旱时空变化特征。本文以云南省曲靖市典型水文站 1960—2009 年的月平均降水量数据为基础,结合 SPI 指数和 R/S 方法分析曲靖市干旱时间序列分布特征和干旱等级情况,在此基础上对干旱的长期趋势周期性进行分析,定量地研究曲靖市干旱灾害的特征,有助于各级政府及时了解灾情发生的规律,科学指挥抗灾救灾。

1 研究方法

1.1 标准化降水指数(SPI)

由于不同地区和时间的降水量变化幅度很大,而且降水分布是一种偏态分布,不是正态分布,因此在降水分析中,通常采用 Γ 分布来描述降水量的变化,然后再经正态标准化求得 SPI 指数值^[3]。SPI 值的计算是以一个预期时段的降水量数据为基础,假设 x 为某一时段降水量,则其 Γ 分布概率的密度函数为:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} (x > 0) \quad (1)$$

其中, α 为形状参数, β 为尺度参数, x 为降水量, $\Gamma(\alpha)$ 为 gamma 函数,相应的累积概率(给定时间尺度)的公式为:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (2)$$

令 $t = x/\beta$, 上式就变为不完全的 gamma 方程:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\hat{\alpha}} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (3)$$

因为 gamma 方程不包含 $x = 0$ 的情况,而实际的降水量可能为 0,因此累积概率可表示为:

$$F(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (4)$$

其中, q 是降水量为 0 的概率,如果 m 表示降水时间序列中降水量为 0 的数量,则 $q = m/n$ 。累积概率 $H(x)$ 可以通过下式转换为标准正态分布函数:

$$SPI = s(t - \frac{25.2 + 0.80t + 0.01t^2}{1 + 1.43t + 0.19t^2 + 0.001t^3}) \quad (5)$$

式中,当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时, $s = -1$, $t = \sqrt{\ln[\frac{1}{F(x)^2}]}$; 当 $0.5 < H(x) < 1$ 时, $s = 1$, $t = \sqrt{\ln[\frac{1}{[1 - F(x)]^2}]}$, 这里的时间尺度 t 可取 3, 6, 9, 12 个月,代表不同的干旱情况。

1.2 重标极差分析法(R/S)

考虑一时间序列 $\{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, \tau$ 为时间间隔, $\bar{x} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_i$ 为该时间序列的平均值,在 τ 时刻,极差为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \tau = 2, 3, \dots \quad (6)$$

其中 x 相对于其平均值 \bar{x} 的累计离差为 $X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x})$, $1 \leq t \leq \tau$

标准差为:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

Hurst 等利用上式对许多自然现象进行研究后,发现大多数自然现象的记录结果满足下列近似公式:

$$R(\tau)/S(\tau) = (a \cdot \tau)^H \quad (8)$$

其中, H 为 Hurst 指数,可以通过最小二乘法回归得到:

$$\ln[R(\tau)/S(\tau)] = H \ln \tau + H \ln a \quad (9)$$

直线的斜率就是该时间序列的 Hurst 指数,时间序列的分维 $D = 2 - H$, 则有下列结论^[19]:

(1) 如果 $H = 0.5$ 时,表示时间序列是标准的随机游走,即过去与将来不存在相关性;如果 $0.5 < H \leq 1$ 时,表示未来的总体趋势将与过去特征相关,即时间序列具有长记忆性;当 $0 \leq H < 0.5$ 时,表示未来的总体趋势将与过去相反,即过去的减少趋势使未来可能出现增加趋势。

(2) V 统计方法。统计量 V 定义为:

$$V = \frac{(R/S)_\tau}{\tau^{0.5}} \quad (10)$$

由 $V_\tau \cdot \ln \tau$ 的图形可以判断长记忆性,当时间序列为独立随机过程时,该图形为平坦的直线,当时间序列具有长记忆性时,该图形为一向上倾斜的曲线,从图形的拐点坐标就可以求出长记忆性的周期长度。 V_τ 达到峰值后就开始变得平坦,这说明长记忆性过程开始耗散。

2 曲靖市干旱分析与讨论

2.1 数据来源和 SPI 等级分析

曲靖市是云南省第二大城市,是云南省重要工商城市,也是云南省“滇中城市群规划”区域中心城

市,下辖 1 区 1 市 8 县,为亚热带高原季风气候,年平均气温 14.5℃,年平均降水量在 1 000 mm 以上。本研究以曲靖市区域内的西桥站、盘溪站和南洞口站三个典型水文站为代表,选取 1959—2009 年的月平均降雨量数据,产生 1960—2009 年的多尺度 SPI 有效数据。

本文采用基于多时间尺度的 SPI 指数和 R/S 分析方法来研究曲靖市的干旱情况,限于篇幅我们以西桥站为例。首先利用 SPI 指数计算软件(可从相关网站免费下载),计算 1959—2009 年的月平均降雨量的 3 月、6 月、9 月和 12 月的多尺度 SPI 值(即 SPI3, SPI6, SPI9, SPI12),为了便于比较时间序列,我们剔除 1959 年不一致的数据,分别给出 1960—2009 年 SPI3、SPI6、SPI9 和 SPI12 的值,结果如图 1 所示。

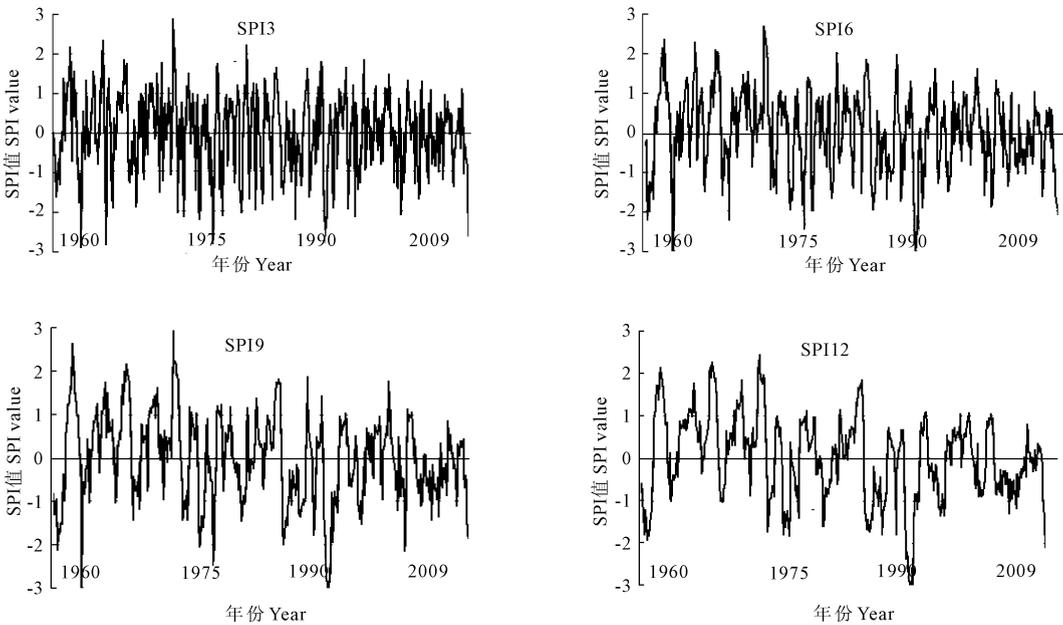


图 1 西桥站多时间尺度 SPI 分析

Fig.1 Multiple time scale SPI analysis for the Xiqiao Station

依据国家 GB/T20481 - 2006《气象干旱等级标准》,对西桥站 1960—2009 年的各时间尺度 SPI 值进行干旱等级划分,结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,在 1960—2009 年的 600 个月中, SPI3 指数值中有 20 个月发生特旱(3.33%), 25 个月处于严重干旱(4.17%), 60 个月处于中度干旱状态(10%), 75 个月处于轻度干旱(12.5%), 干旱出现频率占 30%; SPI6 指数值中有 14 个月发生特旱(2.33%), 34 个月处于严重干旱(5.67%), 52 个月处于中度干旱状态(8.67%), 85 个月处于轻度干旱(14.17%), 干旱出现频率占 30.8%; SPI9 指数值中有 14 个月发生特旱(2.33%), 26 个月处于严重干旱

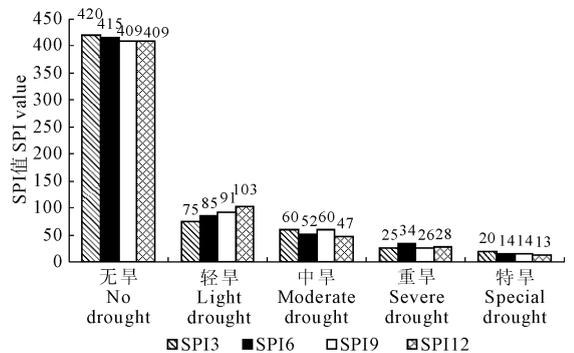


图 2 多时间尺度 SPI 指数干旱等级

Fig.2 The drought grade of multiple time scale SPI index

(4.33%), 60 个月处于中度干旱状态(10%), 91 个月处于轻度干旱(15.17%), 干旱出现频率占 31.8%; SPI12 指数值中有 13 个月发生特旱(2.17%), 28 个月处于严重干旱(4.67%), 47 个月处于中度干旱状态(7.83%), 103 个月处于轻度干旱(17.17%), 干旱出现频率占 31.8%。由以上数据我们可以看出, 曲靖市是干旱频发地区, 至少有 1/3 的月份会发生不同程度的干旱灾害。

2.2 R/S 分析

通过多时间尺度 SPI 分析可知曲靖市的干旱时空分布特征, 下面将研究干旱的长期周期性, 即研究干旱发生是否具有规律性。利用 Matlab 软件对多尺度时间 SPI 数据进行 R/S 分析, 将计算结果用最

小二乘法进行回归, 得到相应的 H 指数、回归系数 (a) 和相关系数 (r), 结果表 1 所示。

表 1 多时间尺度 SPI 指数的计算结果

干旱指数 Drought index	Hurst 指数 H Hurst index	回归系数 a Regression coefficient	分维 D Fractal dimension	相关系数 r Correlation coefficient
SPI3	0.6700	0.7962	1.3300	0.9680
SPI6	0.7266	0.7466	1.2734	0.9436
SPI9	0.8390	0.5993	1.1610	0.9090
SPI12	0.9294	0.4994	1.0706	0.8645

同样地, 对多时间尺度 SPI 数据进行 V 统计量分析, 得到 $V_\tau \sim \ln \tau$ 的关系如图 3 所示。

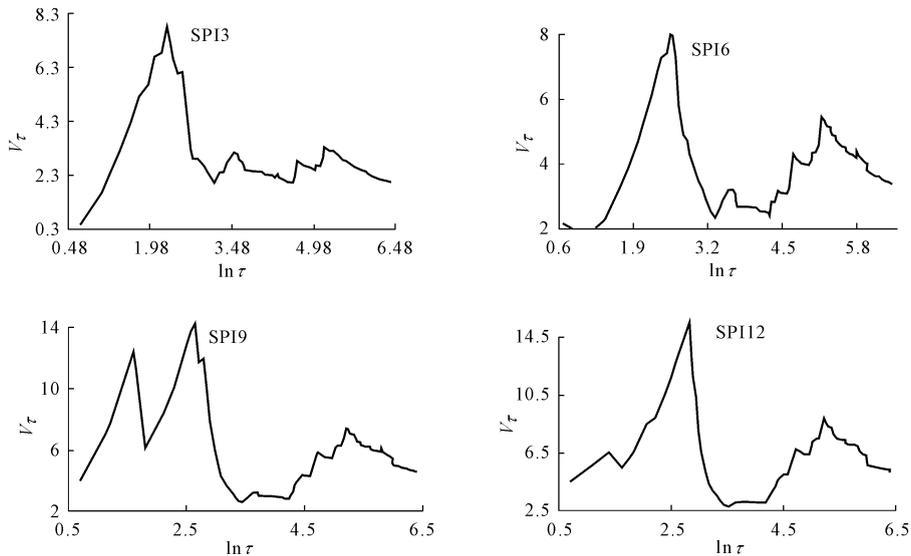


图 3 多时间尺度 SPI 指数的 V 统计量关系

Fig.3 The V statistic relationship of multiple time scales of SPI index

2.3 结果分析

从上述实证分析可以得出如下两点结论:

(1) 由表 1 可知, 不同时间尺度 SPI 的 Hurst 值都大于 0.5(0.6700 ~ 0.9294), 即具有长程相关性, 这表明曲靖市干旱灾害具有分形特性, 分析结果只说明在 SPI3/6/9/12 的时间尺度上干旱情况存在分形特性。对于采用其它时间尺度的情况有待进一步研究, 目前, 关于城市干旱预测周期也主要集中于 SPI3、SPI6、SPI9、SPI12。

(2) 由曲靖市多时间尺度 SPI 指数的 V 统计量关系图可知, 4 种时间尺度 SPI 的图线都为一直向上倾斜的曲线, 从图形可以估计出曲靖市干旱灾害波动的周期长度。SPI3 指数(时段长度为 3 m)干旱灾害发生周期为 17 a(拐点处 $\ln \tau = 2.8332$); SPI6、SPI9 和 SPI12 指数(时段长度为 6、9、12 m)干旱灾害发生的周期为 15 a(拐点处 $\ln \tau = 2.7081$), 即曲靖市平均发

生干旱灾害的周期为 15 a 至 17 a 之间, 这与历史上曲靖市干旱灾害发生的周期性基本吻合。

3 结论

干旱灾害受到许多不确定因素的影响, 主要包括全球气候变暖, 太平洋厄尔尼诺现象加剧, 海洋季风无法登陆形成降雨, 人为破坏环境等因素的综合影响。标准化降水指数(SPI)计算简单, 资料容易获取, 可以反映不同时间尺度、不同地区的干旱状况。通过对云南省曲靖市 50 a 降水量数据不同时间尺度 SPI 指数的计算, 分析了曲靖市干旱灾害发生的时空分布特征, 进而通过 R/S 分析发现干旱指数在时间序列上具有自相似性。在此基础上, 利用 H 指数和 V 统计量分析干旱灾害发生的变化周期, 这对城市干旱灾害的特征分析、评估与监测研究具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//The 8th conference on applied climatology, American Meteorological Society, 1993.
- [2] 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.
- [3] 冷明珠,李 林,王振宇.SPI 指数在青海东部地区干旱监测中的应用及检验[J].青海气象,2007,(4):21-24.
- [4] 韩 萍,王鹏新,王彦集.多尺度标准化降水指数的 ARIMA 模型干旱预测研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(2):212-218.
- [5] 袁 云,李栋梁,安 迪.基于标准化降水指数的中国冬季干旱分区及气候特征[J].中国沙漠,2010,30(4):917-925.
- [6] 林盛吉,许月萍.基于 Z 指数和 SPI 指数的钱塘江流域干旱时空分析[J].水力发电学报,2012,31(2):20-25.
- [7] 罗艳青,邹 滨,邱永红.华东地区干旱灾害时空演化特征研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):58-64.
- [8] 付丽娟,曹 杰,德勒格日玛.三种气象干旱指标在内蒙古地区的适用性分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(2):108-113.
- [9] 马海娇,严登华,翁白莎.典型干旱指数在滦河流域的适用性评价[J].干旱区研究,2013,30(4):728-734.
- [10] 李 伟,黎洪德.旱涝灾害的分形研究方法[J].灾害学,2000,15(2):17-22.
- [11] 李海毅,汤 洁,斯 嵩.分形理论在吉林西部干旱指数预测中的应用[J].东北师范大学学报(自然科学版),2007,39(1):126-130.
- [12] 丁贤法,李巧媛,胡国贤.云南省近 500 年旱涝灾害时间序列的分形研究[J].灾害学,2010,25(2):76-80.
- [13] 彭高辉,马建琴.黄河流域干旱时序分形特征及空间关系研究[J].人民黄河,2013,35(5):38-40.
- [14] 陈社明,卢文喜,罗建男.吉林西部气象干旱的多尺度分形特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(1):245-250.
- [15] 严登华,袁 喆,杨志勇.1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J].水科学进展,2013,24(1):34-41.
- [16] 孙智辉,王治亮,曹雪梅.基于标准化降水指数的陕西黄土高原地区 1971—2010 年干旱变化特征[J].中国沙漠,2013,33(5):1560-1567.
- [17] 王 莺,李耀辉,胡田田.基于 SPI 指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J].中国沙漠,2014,34(1):244-253.
- [18] 周 扬,李 宁,吉中会.基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J].自然资源学报,2013,28(10):1694-1706.
- [19] Kabondan M A. Diagnosing time-series dynamical structures[J]. Chaos, Solution & Fractals, 1996,7(7):977-990.
- [10] 郑冰婵.气候变化对中国种植制度影响的研究进展[J].中国农学通报,2012,28(2):308-311.
- [11] 周曙东,周文魁,林光华,等.未来气候变化对我国粮食安全的影响[J].南京农业大学学报(社会科学版),2013,13(1):56-65.
- [12] 普宗朝,张山清,李景林,等.近 48 年新疆乌鲁木齐地区气候变化[J].干旱区研究,2010,27(3):422-432.
- [13] 普宗朝,张山清,宾建华,等.新疆乌鲁木齐地区热量资源精细化时空变化分析[J].中国农业气象,2011,32(4):598-606.
- [14] 普宗朝,张山清.近 49 年乌鲁木齐地区农业热量资源时空变化[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):243-252.
- [15] 王胜兰,张山清,冯志敏,等.乌鲁木齐地区热量资源时空变化分析[J].沙漠与绿洲气象,2011,5(5):24-29.
- [16] 范文波,江 煜,吴普特,等.新疆石河子垦区 50 年气候变化对棉花种植的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):244-248.
- [17] 王 健,吕 新,王江丽,等.石河子市近 57 年积温变化趋势特征研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(6):154-159.
- [18] 丁 虎.石河子地区热量条件的气候特征和变化规律分析[J].安徽农业科学,2011,39(29):18154-18157.
- [19] 蒲云锦,赵桢柳,韩春光.新疆石河子近 40a 气候变化特征[J].干旱气象,2008,26(4):56-60.
- [20] 李玉波,李晓东,谢国辉.天山北坡植被生长季气候因子变化特点[J].东北林业大学学报,2010,38(2):16-19.
- [21] 陈俊杰,周跃志,张 燕,等.天山北坡经济带 42a 来气温和降水变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(10):72-77.
- [22] 苏里坦,宋郁东,张展羽.近 40a 天山北坡气候与生态环境对全球变暖的响应[J].干旱区地理,2005,28(3):342-346.
- [23] 陆 峰.天山北坡中段气候变化特征浅析[J].新疆水利,2010,(3):11-14.
- [24] 李瑞雪.中国天山山区气候变化的时空分布特征[D].兰州:西北师范大学,2010.
- [25] 胡 刚,宋 慧.基于 Mann-Kendall 的济南市气温变化趋势及突变分析[J].济南大学学报(自然科学版),2012,26(1):96-101.
- [26] 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.
- [27] 钱锦霞,张 霞,张建新,等.近 40 年山西省初终霜日的变化特征[J].地理学报,2010,65(7):801-808.
- [28] 王立祥,李 军.农作学[M].北京:科学出版社,2003.
- [29] 蔡 福,明惠青,纪瑞鹏.辽宁地区近 50 年无霜期时空演变特征[J].中国农业气象,2010,31(2):188-193.

(上接第 259 页)