

新乡市近 60 年降水序列变化规律及干旱预测

夏 露¹,宋孝玉¹,马细霞²

(1.西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048;

2.郑州大学水利与环境学院,河南 郑州 450001)

摘 要:新乡市属严重缺水地域,近年来干旱的加剧使水资源短缺问题更加突出,严重制约了区域社会经济的发展。因此,对该地区进行降水序列的分析以及干旱的预测显得尤为重要。利用新乡市 1953—2010 年的年降水量资料,采用一元线性回归法和 Mann—Kendall 法分析新乡市降水的时间变化规律,结果表明:该地区近 60 年来年降水量呈减少的趋势,干旱发生频率有增加的趋势。以 1953—2000 年的年降水量资料为建模数据,2001—2010 年的年降水量资料为检验数据,运用灰色系统的灰色预测方法,建立新乡市的灰色预测 GM(1,1)模型,对该地区未来一定时期内干旱发生的时间进行预测,经检验该预测模型精度高,检验结果与实际相符,故可用该模型对新乡市未来的干旱进行预测。预测结果显示,新乡市将在 2012—2013、2020—2021、2028—2029 年期间发生干旱。

关键词:降水量;干旱预测;灰色系统;GM(1,1)模型

中图分类号: S165+.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)05-0014-05

Precipitation change in recent 60 years and drought prediction in Xinxiang

XIA Lu¹, SONG Xiao-yu¹, MA Xi-xia²

(1. Key Lab. of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450001, China)

Abstract: Xinxiang City in He'nan Province is a region with a serious water shortage. Recently, the problem of water shortage has become even more outstanding due to the aggravation of drought, which has seriously restricted the social and economic development. Thus it is important to analyze the trend of precipitation change and to conduct drought forecasting in this region. Based on the annual precipitation in Xinxiang during 1953 to 2010, the temporal variation of precipitation was analyzed by using linear regression equation and Mann-Kendall method. The results showed that the precipitation tended to decrease and the drought frequency tended to increase in Xinxiang in current 60 years. With the observed values of annual precipitation during 1953 to 2000 as modeling data and those during 2001 to 2010 as testing data, and by using gray system technique, the gray prediction model GM(1,1) of Xinxiang was established, the time of drought occurrence in the future was forecasted. The testing results showed a good precision and were consistent well to the actuality. Therefore, this model could be used to predict the years of drought. It was indicated that the drought would take place in the period of 2012—2013, 2020—2021 and 2028—2029.

Keywords: precipitation; drought prediction; gray system; GM(1, 1) model

从全球范围看,旱灾影响面积最广,造成经济损失最大,被认为是世界上最严重的自然灾害类型之一^[1]。干旱发生属于规律性不强且不连续发生事件,其预测有较大的难度,也是人们在不断探索的问题^[2]。目前,对于干旱趋势预测多采用回归方程和马尔可夫模型等,这些模型的预测结果存在预测精度不高的缺点^[3]。邓聚龙教授提出的灰色系统理

论^[4]是用来解决信息不完备系统的数学方法,由于它对时间序列短、统计数据少、信息不完全系统的建模与分析有独特的效果,因此已被广泛地应用于气象领域^[5-7],并得到了较好的效果。由于年降水量的多少与干旱的发生有直接而密切的联系,本文利用新乡市 1953—2010 年的降水资料,分析年降水量变化趋势,应用灰色预测 GM(1,1)模型对未来干旱

收稿日期:2013-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51239009,41171034);中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-5X1205)

作者简介:夏 露(1992—),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要从事水文学及农业水资源方向的研究。E-mail: wulingjiaolp@163.com。

出现的时间进行预测,期望为该地区的水资源利用、管理和规划以及防旱抗旱的规划建设提供参考。

1 研究区概况

新乡市位于河南省北部,黄河中下游地区,属温带大陆性季风型气候,年平均气温 14℃,无霜期 210 天左右,多年平均降水量 573.4 mm。全市分属海河、黄河两大流域,西北部为山丘区,中部为卫河冲积平原,南部东部为黄河冲洪积平原。新乡市属严重缺水地域,本地人均水资源量仅 380 m³,旱灾较为严重,影响和制约了该地区经济和农业的发展。新乡市水资源在时空分布上存在着两大不利因素:一是年内分配不均,年际变化幅度大。新乡市汛期降雨一般占全年降水的 70% 以上,而冬春两季一般降雨很少,尤其是 4—5 月份,农作物耗水强度大,降雨与需水极不适应。另外,不同年份降水差异也很大,最大年降水量可达最小年降水量的 3.4 倍。二是地域分布不均。西北山区,降水量大,但农业及生活需水有限,海河流域平原区,水需求量大,但水资源非常短缺,这造成了水土资源组合不相匹配的状况。水资源的时空分布不均,加上近年来全球气候变化的异常,加剧了新乡市的干旱灾害程度。

2 资料来源与研究方法

2.1 资料来源

本文所用资料为新乡市气象站 1953—2010 年的年降水量资料。其中,利用 1953—2010 年的年降水量数据建立了该地区年降水变化序列;采用 1953—2000 年的年降水量数据建立了干旱灾变序列,用于干旱预测研究;使用 2001—2010 年的年降水量数据用于模型预测检验。

2.2 研究方法

灰色系统指既含有已知信息,又含有未知信息的系统。可以认为,气候变化过程是一类灰色系统,因而灰色系统理论适用于气候变化过程的研究。灰色系统理论已被广泛地运用于某种事件发生的预测,如数列预测、灾变预测、拓扑预测等,都收到了较好的效果^[8-11]。GM 模型泛指灰色模型(Gray Model),而 GM(1,1)模型是用单个变量进行预测的一阶微分方程模型,故记为 GM(1,1),它是灰色系统预测模型的核心。灰色系统 GM(1,1)预测模型是将随机数据经生成后变为有序的生成数据,然后建立微分方程,寻找生成数据的规律,再将运算结果还原的一种方法^[12]。GM(1,1)模型的建模过程如下:

设给定原始序列 $X^{(0)}(t) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2),$

$\dots, X^{(0)}(n)\} (t = 1, 2, \dots, n)$, 对其进行一次累加,组成新序列,累加公式为:

$$X^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^t X^{(0)}(i) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

新序列为:

$$X^{(1)}(t) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(1) + X^{(0)}(2), \dots, \sum_{i=1}^n X^{(0)}(i)\} \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

用 $X^{(1)}(t)$ 序列建立白化方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (3)$$

式中, a 称为发展灰数; b 称为内生控制灰数参数; a 、 b 由最小二乘法求得^[13]。

式(3)的离散型解为:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] \cdot e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (4)$$

式中: $t = 1, 2, \dots$; e 为自然对数的底,取值为 2.7182。

由式(4)可得灰色预测 GM(1,1) 预报模型:

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(0)}(t+1) &= \hat{X}^{(1)}(t+1) - \hat{X}^{(1)}(t) \\ &= (1 - e^a) \left[X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] \cdot e^{-at} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $t = 1, 2, \dots$; 模型规定 $\hat{X}^{(0)}(1) = X^{(0)}(1)$ 。

3 年降水序列的基本变化规律

趋势分析的方法有很多,常用的方法有一元线性回归法、滑动平均法、累积距平法、Mann—Kendall 法等等。到目前为止,趋势分析应用于水文、气候、水质以及其他自然时间序列已有三十多年了,在世界上许多国家及地区得到广泛应用^[14-15]。本文用一元线性回归法和 Mann—Kendall 法来分析新乡市年降雨量的变化趋势。

根据新乡市年降水序列,利用公式 $P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\%$ (P 为某年年降水量; $\bar{P}$ 为序列平均年降水量),计算各年份年降水量距平百分率 P_a 的大小。图 1 为新乡市近 58 年的年降水量距平百分率序列。图中距平百分率趋势线的一元线性回归方程为: $y = -0.3101x + 9.1401$, 降水倾向率为 $a_1 = dx/dt \times 10 = -3.101$, 可见,近 58 年来降水量呈减少的趋势,但是变化幅度不明显。从降水量距平百分率低于 -20% 的年发生频率来看,降水量异常少的发生频率有增加的趋势,1953—1970 年间发生了 3 次,1971—1990 年间发生了 5 次,1991—2010 年间发生了 5 次,这标志着干旱发生频率有增加的趋势,应该引起人们的重视。

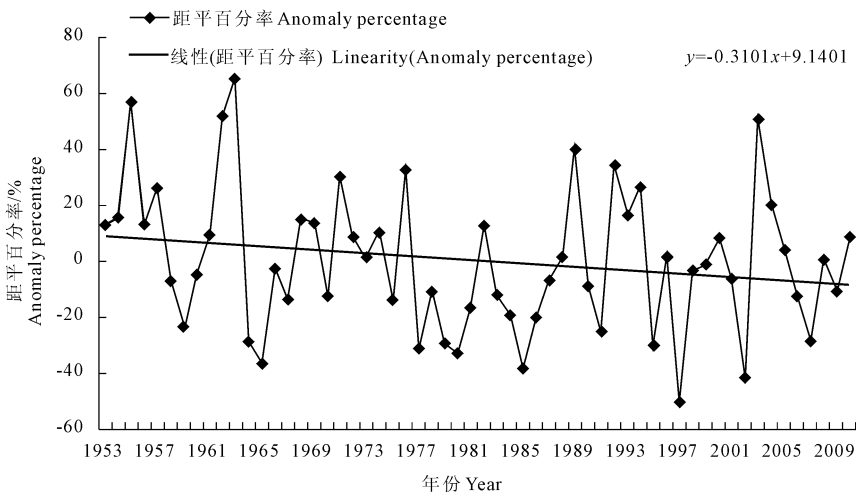


图 1 1953—2010 年新乡市年降水量距平百分率序列

Fig.1 The anomaly percentage sequence of annual precipitation in Xinxiang from 1953 to 2010

为进一步分析新乡市年降水量的变化趋势,现采用 Mann-Kendall 法对其进行验证。基于秩的非参数 M-K 统计检验方法常用来预测如水质、径流、温度、降水等水文气象时间序列资料的长期变化趋势,其特点是不必事先假定样本的统计分布,因此在趋势分析中具有广泛的应用,且达到了很好的效果^[16-18]。

对新乡市降水系列进行计算,计算结果为: $U = -1.412$, U 为负值。在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下,对计算统计量 $U = -1.412$ 进行检验。查标准正态分布表得 $U_{\alpha/2} = 1.96$, 则 $|U| = 1.412 < U_{\alpha/2} = 1.96$ 。这表明新乡市降水序列存在统计意义上的单调趋势,58 年来降水量呈减少趋势,但是趋势不显著,这与一元线性回归方法得出的结论一致。这意味着新乡市的旱情正在加重,有关部门应该作出相应的措施来积极应对这一形势。

4 新乡市干旱 GM(1,1)灰色预测模型的建立及应用

4.1 GM(1,1)模型的建立

4.1.1 干旱年阈值的确定

判断一个地区某一年

份是否为干旱年,可由参数 I_p 决定:

$$I_p = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \tag{6}$$

式中, P 为某年年降水量; $\bar{P}$ 为多年平均年降水量。

一般把某一地区 $I_p \leq -20\%$ 作为判别干旱的标准^[19],把符合这一标准的年份挑选出来,定为干旱年,再将筛选出的干旱年份编号组成干旱灾变序列 $X^{(0)}(t)$ 。利用新乡市 1953—2000 年的年降水量资料,根据式(6)可以求得干旱年降水量阈值为 450.4 mm,即年降水量小于 450.4 mm 的年份为干旱年,由此可以建立干旱灾变序列:

$$\begin{aligned} X^{(0)}(t) &= \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(11)\} \\ &= \{7, 12, 13, 25, 27, 28, 33, 34, 39, 43, 45\} \end{aligned} \tag{7}$$

4.1.2 建立干旱年累加新序列 对 $X^{(0)}(t)$ 作一次累加生成,得到 $X^{(1)}(t)$, 其中 $X^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^t X^{(0)}(i)$ 。其相应 $X^{(0)}(t)$ 和 $X^{(1)}(t)$ 见表 1。

表 1 $X^{(0)}(t)$ 一次累加序列

Table 1 The first accumulative sequence of $X^{(0)}(t)$

序号 Number	年份 Year	$X^{(0)}(t)$	$X^{(1)}(t)$	序号 Number	年份 Year	$X^{(0)}(t)$	$X^{(1)}(t)$
1	1959	7	7	7	1985	33	145
2	1964	12	19	8	1986	34	179
3	1965	13	32	9	1991	39	218
4	1977	25	57	10	1995	43	261
5	1979	27	84	11	1997	45	306
6	1980	28	112				

4.1.3 最小二乘法求解参数 a 、 b 构造累加矩阵 B 和常数向量矩阵 Y_N ,即:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(10) + X^{(1)}(11)] & 1 \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} -13 & 1 \\ -25.5 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -283.5 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$Y_N = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), L, X^{(0)}(11)\}^T$$
$$= \{12, 13, 25, 27, 28, 33, 34, 39, 43, 45\}^T \tag{9}$$

用最小二乘法求解灰参数 $\hat{a}$:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \tag{10}$$

运用 matlab 软件来计算矩阵,将式(8) 和式(9) 代入式(10) 得:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} -0.1161 \\ 15.2259 \end{bmatrix}$$

由此得 $a = -0.1161, b = 15.2259$ 。

4.1.4 求取预报模型 将参数 a 、 b 带入式(5),可得新乡市灰色预测 GM(1,1) 预报模型:

$$\hat{X}^{(0)}(t + 1) = 15.1407e^{0.1161t} \tag{11}$$

式中, $t = 1, 2, \cdots$ 。

4.2 GM(1,1) 模型的检验

为了检验本文建立模型的可靠性,必须对模型进行精确度的检验,灰色预测模型的检验一般采用残差检验、关联度检验和后验差检验。残差检验是模型精度按点检验,是一种直观的算术检验;后验差检验是按残差的概率分布进行的检验,是统计学检验;关联度检验是根据模型曲线与数据曲线的几何相似程度进行的检验,是几何检验。为了更精确地验证预测结果的合理性,本文将三种方法相结合从不同层次来进行检验。

4.2.1 残差检验 残差检验是计算相对误差,预测值与实际值不会完全一致,把 $X - \hat{X}$ (X 为实际值, $\hat{X}$ 为预测值) 的差值称为残差,即 $E(t) = X^{(0)}(t) - \hat{X}^{(0)}(t), t = 1, 2, \cdots$,以残差的大小来判断模型的精度高低,计算结果见表 2。其中, $|5(t)|$

$$= \left| \frac{E(t)}{X^{(0)}(t)} \times 100\% \right|$$

模型平均相对误差 $\bar{E} = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} |5(t)|$,由表 2 可以得出模型平均相对误差为

12.1%,平均精度为 87.8%,用于预测原点的精度为 92.6%。其精度较高,残差检验通过,说明该模型可用于新乡市干旱预测。

表 2 模型残差检验计算

Table 2 Residual test of the model

序号 Number	$X^{(0)}(t)$	$\hat{X}^{(0)}(t)$	$E(t)$	$ 5(t) $	$1 - 5(t) $
1	7	7	0	0	100
2	12	17.0046	- 5.0046	41.7049	58.2951
3	13	19.0979	- 6.0979	46.9071	53.0929
4	25	21.4490	3.5510	14.2042	85.7958
5	27	24.0894	2.9106	10.7799	89.2201
6	28	27.0549	0.9451	3.3753	96.6247
7	33	30.3855	2.6145	7.9227	92.0773
8	34	34.1261	- 0.1261	0.3708	99.6292
9	39	38.3271	0.6729	1.7253	98.2747
10	43	43.0454	- 0.0454	0.1055	99.8945
11	45	48.3445	- 3.3445	7.4321	92.5679

4.2.2 关联度检验 关联度是用来描述各变化过程之间的差别,通过对时间序列数据进行几何关系比较,用关联系数反映两个被比较序列预测值序列和实际值序列在某一时刻的紧密程度。关联系数越大,说明预测值和实际值越靠近^[20]。关联度 C 大小在 0 到 1 之间, $C = 1$ 时,两序列完全重合,精度最高; $C = 0$ 时,精度最差。一般 $C \geq 0.6$ 时,就可满足精度要求。

该模型原始数据序列 $X^{(0)}(t)$ 和 $\hat{X}^{(0)}(t)$ 经均值化变换后,由公式(12) 可求得关联度 $C = 0.6572$ 。

$$C = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n L_o(t) \tag{12}$$

其中,关联度系数 $L_o(t) = \frac{E_{\min} + QE_{\max}}{|E(t)| + QE_{\max}}, E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别表示所有比较序列中各个时刻绝对差中的最小值和最大值, $E_{\min} = 0, E_{\max} = 6.0979; Q$ 为分辨系数,其意义是消弱因最大绝对差数值太大引起的失真,提高关联系数之间的差异显著性, Q 取 0.5。

根据经验,当 $Q = 0.5$ 时,该模型关联度大于 0.6 是可以接受的,因此模型预测是可信的。

4.2.3 后验差检验 后验差检验是根据预测模型的检验指标和等级标准对模型作出合理评价,按照后验比 C 和小误差概率 P 两个指标进行评定,其等级标准见表 3。

表 3 预测精度等级
Table 3 The grade of forecast precision

精度等级 Precision grade	<i>P</i>	<i>C</i>
好 Good	> 0.95	< 0.35
合格 Qualified	> 0.80	< 0.50
勉强 Reluctantly qualified	> 0.70	< 0.65
不合格 Unqualified	≤0.70	≥0.65

原始观察数据的均值为 $\bar{X}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X^{(0)}(t)$
= 27.82;

原始观察数据的标准差为 $S_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [X^{(0)}(t) - \bar{X}^{(0)}]^2} = \sqrt{147.97} = 12.16$;

残差的均值为 $\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n E(t) = -0.36$;

残差的标准差为 $S_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [E(t) - \bar{E}]^2} = 3.03$;

后验比 $C = \frac{S_2}{S_1} = 0.25$;

小误差概率 $P = \{ |E(t) - \bar{E}| < 0.6745 S_1 \} = 1$ 。

通过以上计算 $P = 1 > 0.95$; $C = 0.25 < 0.35$ 。由此可见预测模型精度为好,预测模型精度能满足预报需要,并且无需继续用残差进行修正。

4.3 GM(1,1)模型的应用

通过以上计算,模型经残差检验、关联度检验和后验差检验均符合标准,预测模型精度能满足预报需要,可用于长期预测。通过检验的灰色预测模型可以结合实际进行应用研究,并与实测结果进行比较,进一步验证模型的正确性。现将不同 t 值带入式(5)中,对新乡市 2001—2030 年期间可能出现干旱的年份进行检验与预测,结果见表 4。

表 4 新乡市 2001—2030 年干旱年预测结果
Table 4 The forecast results of drought years in Xinxiang from 2001 to 2030

项目 Item	<i>t</i>			
	11	12	13	14
模型预测值 Model prediction	54.2959	60.9799	68.4868	76.9178
未来干旱年 Drought year	2006—2007	2012—2013	2020—2021	2028—2029

预测结果表明,新乡市将在 2006—2007、2012—

2013、2020—2021、2028—2029 年期间发生干旱。事实上,新乡市 2006 年实测年降雨量为 490.1 mm, 2007 年实测年降雨量为 399.5 mm,均低于新乡市多年平均年降雨量,属于枯水年份,与灰色模型预测出的干旱发生时间相吻合,这说明该模型预测精度较高,预测结果合理可信,可以为新乡市农业生产和抗旱减灾提供科学指导。

5 结论与讨论

1) 新乡市近 60 年来降水量呈现波动下降趋势,降水异常少年发生频率增加,即干旱发生的可能性增大,有关部门应该做出相应的措施来积极应对这一形势。

2) 采用 1953—2000 年新乡市的降水资料,根据灰色系统理论建立了灰色预测 GM(1,1)模型,并用 2001—2010 年的降水资料对该模型进行了验证。验证结果表明,模型预测的干旱发生年份与实测资料相吻合,说明所建立的预测模型预测精度高,该预测结果具有一定的可信度,可为该地区的抗旱决策管理提供参考。

3) 根据建立的 GM(1,1)模型对新乡市未来 20 年的干旱发生年份作出预测,该地区在 2012—2013、2020—2021、2028—2029 年期间极有可能发生干旱。

4) 灰色系统 GM(1,1)模型预测干旱灾害效果较好。但应当注意,灰色预测方法也有自身的局限性,一般来说它只适合于短期预测,不能用于较长时间的预测,否则会产生较大的偏差。为了对较长时间的趋势值进行预测,可以引入新的参数,这样可以确保预测的可靠性。另外原始序列本身规律的好坏,也将影响预测模型的预测能力。为了提高预测结果的准确性,在实际应用中应尽量采取多种预测方法,相互验证,才能取得更好的效果。

参 考 文 献:

[1] 郑远长.全球自然灾害概述[J].中国减灾,2000,10(1):14-19.
[2] 刘俊民,苗正伟,崔娅茹,等.宝鸡峡灌区气象干旱预测中的应用[J].水资源研究,2007,28(4):4-6.
[3] 张建兴,马孝义,赵文举,等.黄土高原地区干旱长期变化趋势及预测[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):1-6.
[4] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990:175-264.
[5] 梁红梅,刘会平,宋建阳,等.广东农业旱灾的时间分布规律及重灾年份预测[J].自然灾害学报,2006,15(4):79-83.
[6] 陈亚宁,杨思全.新亚欧大陆桥新疆段暴雨灾变事件的灰色预测[J].干旱区地理,1999,22(4):77-82.

3 小 结

- 1) 近 60 年来石羊河流域气温呈现上升趋势;从空间上,由北向南、从西往东气温升温速度加快,永昌的升温幅度最大,南部的山区升温幅度最小。
- 2) 月、季、年平均降水增量不同程度地增(减),并且降水时空分布不均的现象日趋明显,整体表现出由南向北、由西往东降水量减少。
- 3) 气候变化显著周期分别为:平均气温 3~5 a,降雨量 1~3 a。
- 4) 分析不同气象因子对春小麦、玉米关键生育期的影响发现,从整体上看,降水是影响春小麦乳熟期长短的主要气象因素,而气温和降水与玉米关键生育期的相关性不显著。

参 考 文 献:

[1] 熊 伟,冯颖竹,高清竹,等.气候变化对石羊河、大凌河流域灌溉玉米生产的影响[J].干旱区地理,2011,34(1):150-159.

[2] 孙 佳.47 年来石羊河流域气候变化趋势及突变分析[D].兰州:兰州大学,2008.

[3] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,2007.

[4] 张克新,刘普幸,霍华丽,等.石羊河流域近 50 a 来日照时数的时空变化特征分析[J].中国沙漠, 2011,31(2):517-520.

[5] 谷永利,林 艳,李元华.气温变化对河北省冬小麦主要发育期的影响分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(12):141-145.

[6] 郑景云,葛全胜,郝志新.气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响[J].科学通报,2002,47(20):1582-1587.

[7] 沙万英,邵雪梅,黄 枚.20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖

及其对自然区域界限的影响[J].中国科学,2002,32(4):317-326.

[8] IPCC. Climate change 2001: The Science Basis, Contribution of working Group I to the Third Assessment Report of the Inter government Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[9] 李万希,陈 雷,王润元,等.石羊河流域 1970—2009 年气候变化对农业生产结构的影响[J].农学学报,2012,2(3):25-30.

[10] 魏风英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:69-72.

[11] 张燕明,文 俊,王新华,等.基于 Mann-Kendall 分析的昆明降雨与气温变化趋势研究[J].安徽农业科学,2011,39(25):15755-15757.

[12] Yu P S, Yang T C, Wu C K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2002, 260: 161-175.

[13] Xu Z X, Takeu Chik, Ish Damh. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan[J]. Journal of Hydro science and Hydraulic Engineering, 2002,20(2):11-26.

[14] 刘叶玲,翟晓丽,郑爱勤.关中盆地降水量变化趋势的 Mann-Kendall 分析[J]. 人民黄河,2012,34(2):28-33.

[15] 程正兴.小波分析算法与应用[M].西安:西安交通大学出版社,1998:20-76.

[16] 贾文雄,何元庆,李宗省,等.近 50 年来河西走廊平原区气候变化的区域特征及突变分析[J].地理科学,2008, 28(4):525-531.

[17] 任国玉,郭 军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956.

[18] 张宝军,马金珠,赵 鑫,等.近 50 年来民勤县气温变化特征及其原因分析[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):226-234.

[19] 李玲萍,杨永龙,钱 莉.石羊河流域近 45 年气温和降水特征分析[J].干旱区研究,2008,25(5):705-710.

(上接第 18 页)

[7] 刘会平,梁红梅,倪研贤,等.广东农业水灾的年际分布规律及重灾年份预测[J].热带地理,2007,27(3):203-212.

[8] 陈兴芳,孙林海.我国年、季降水的年代际变化分析[J].气象,2002,28(7):3-9.

[9] 张 智,陈金锥.城市年用水量灰色预测研究[J].水资源与水工程学报,2006,17(5):9-11.

[10] 程桂福,付日辉,李兴云.水旱灾害发展趋势的灰色拓扑预测与应用[J].海岸工程,2001,60(4):56-62.

[11] 吉中礼.干旱趋势预报及监控[J].干旱地区农业研究,1995,13(2):119-125.

[12] 刘俊民.灌区地下水年最高水位的灰色预测[J].地下水,1993,15(3):93-96.

[13] 邱淑芳,王泽文.灰色 GM(1,1)模型背景值计算的改进[J].统计与决策,2007,(3):129-131.

[14] Douglas EM, Vogel RM, Kroll CN. Trends in flood and low flows in the United States: impact of spatial correlation[J]. Journal of Hydrol-

ogy,2000,240:90-105.

[15] Xu Z. X., Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279:144-150.

[16] Donald H. Burn, Mohamed A. Hag Elnur. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology,2002,255:107-122.

[17] Juraj M. C, Donald H. B. Non-stationary pooled flood frequency analysis[J]. Journal of Hydrology,2003,276:210-223.

[18] 蔡 霞,蔡 琳,李春华,等.晋北地区降水量时空变化及突变分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):247-253.

[19] 张遇春,张 勃.黑河中游近 49 年降水序列变化规律及干旱预测——以张掖市为例[J].干旱区资源与环境,2008,22(1):84-88.

[20] 张艳芳.基于 GM(1,1)的残差修正模型及应用[J].水利科学与工程技术,2005,(6):51-53.