



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.010

徐盼盼, 张奇莹, 钱会, 等. 宝鸡地区降水特征分析及降水量预测[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 63-69. XU Panpan, Zhang Qiying, Qian Hui, et al. Precipitation characteristics analysis and precipitation forecast in Baoji region[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 63-69. (in Chinese)

宝鸡地区降水特征分析及降水量预测

徐盼盼^{1,2}, 张奇莹^{1,2}, 钱会^{1,2}, 林涛^{1,2}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 基于宝鸡气象站 1961 年-2015 年降水实测数据, 利用线性拟合、模比系数积差曲线、Mann-Kendall 检验法、云模型和滑动平均-马尔可夫模型对该地区降水变化特征和降水量预测进行了全面分析。结果表明: 宝鸡地区年降水量、丰水期和枯水期降水量的线性变化率分别为 $-11.9 \text{ mm}/(10\text{a})$ 、 $2.6 \text{ mm}/(10\text{a})$ 和 $-14.5 \text{ mm}/(10\text{a})$, 且枯水期降水量的减少趋势显著。宝鸡地区年际与年内降水量分配极不均匀, 不均匀性为全年 > 丰水期 > 枯水期; 降水量不均匀性的稳定程度为丰水期 > 全年 > 枯水期。丰、枯期滑动平均降水量预测值的总和较年尺度的预测值更为准确, 且 2016 年-2020 年的年降水量预测值分别为 613.1 mm、727.0 mm、632.0 mm、457.2 mm 和 876.7 mm。研究结果可为该地区旱涝灾害的防治提供科学依据。

关键词: 降水特征; 云模型; 预测; 滑动平均-马尔可夫模型; 宝鸡地区

中图分类号: P332; P426.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0063-07

Precipitation characteristics analysis and precipitation forecast in Baoji region

XU Panpan^{1,2}, Zhang Qiying^{1,2}, Qian Hui^{1,2}, Lin Tao^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the measured data of precipitation in Baoji meteorological station from 1961 to 2015, we analyzed the variation characteristics of precipitation and precipitation forecast using the linear fitting, ratio coefficient difference curve, Mann-Kendall test, cloud model, and moving average Markov model. Results showed that the rates of linear change of the annual precipitation, precipitation in wet period, and precipitation in dry period in Baoji region were $-11.9 \text{ mm}/(10\text{a})$, $2.6 \text{ mm}/(10\text{a})$ and $-14.5 \text{ mm}/(10\text{a})$, respectively. The precipitation in dry period tended to decrease significantly. The intra-annual and inter-annual precipitation distribution was very uneven. The inhomogeneity of precipitation was ranked as follows: a whole year > wet period > dry period. The stability of the precipitation inhomogeneity was ranked as follows: wet period > a whole year > dry period. The sum of precipitation forecast values based on moving average in wet and dry periods was more accurate than the forecast value on one-year scale, and the annual precipitation forecast values of 2016-2020 were 613.1 mm, 727.0 mm, 632.0 mm, 457.2 mm and 876.7 mm, respectively. The research results can provide scientific basis for prevention of drought and flood disasters in the region.

Key words: precipitation characteristics; cloud model; forecast; moving average Markov model; Baoji region

水资源是人类赖以生存的宝贵资源, 是维持生态系统健康发展的重要因素。大气降水作为水资源

收稿日期: 2016-08-16 修回日期: 2017-03-22 网络出版时间: 2017-08-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1922.010.html>
基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301084)

Fund: Project of Special Funds for Public Welfare Research of Ministry of Water Resources(201301084)

作者简介: 徐盼盼(1993-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: xupanpan0212@163.com

通讯作者: 钱会(1963-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 博士, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

的重要补给源,其量的多少与一个地区水资源的丰富程度密切相关,也影响该地区水资源开发利用的程度,更是决定旱涝等自然灾害发生的重要气象因子^[1]。雨水的资源化利用不仅可以缓解局部地区水资源供需不均衡的矛盾,也可以有效地控制旱涝等灾害的影响程度,减少灾害造成的各种损失,而一个地区降水量的变化特征分析及其科学预测是这一系列工作的基础^[2]。

降水的时序分布特性分析对管理部门的科学用水、农业生产的发展以及相关部门制定各项政策与措施具有指导性的意义^[3-4]。目前,研究降水时序特征的常用方法有小波分析法^[5]、累积距平法^[6]、Mann-Kendall 法^[7],这些方法共同的不足之处在于难以实现对降水时间分布的均匀性和稳定性进行量化。云模型可以实现降水定性分布与定量分布的转换,并能弥补其它方法未能对均匀性和稳定性进行准确量化的缺点^[8]。因此,基于云模型对宝鸡市年降水和丰枯期降水的时序分布特征进行深入研究,以全面掌握宝鸡市降水量的分布情况,可为其水资源评估、降水动态变化的监测及其影响提供科学依据。

降水量预测是降水资源潜力计算的基本工作,也是水资源管理规划和水文预报的重要环节^[9-11]。目前,常用于降水量预测的方法有多元统计法、蒙特卡罗模拟法、频谱分析及基于灰色和模糊数学的预测方法^[12],但由于降水过程受海陆位置、地理位置、大气环流等因素的影响,使得降水量的不确定性和随机性极为复杂。因此,这些方法很难满足水文序列长期预报的精度^[13-14]。滑动平均-马尔可夫模型可以弥补以上方法的不足并充分利用原始数据信息,使得降水量的预测值具有较强的可靠性和准确性^[1,12,13]。

作为陕西省第二大城市的宝鸡市地处我国东南季风性气候与西北温带大陆性气候的过渡带。由于降水量分布的不均匀性,使得旱涝等气象灾害频发,水资源供需矛盾突出^[15]。因此,本文基于宝鸡气象站 1961 年-2015 年的降水资料,应用云模型和滑动平均-马尔可夫模型对宝鸡市降水特征进行分析并对降水量进行预测,为该区域降水时序演变规律的研究和水资源管理与规划等提供依据,为水文预报提供一种定性定量相结合的分析方法。

1 研究区概况与资料来源

1.1 研究区概况

宝鸡地处 107°03′-107°18′E、33°35′-35°06′N 之间,位于关中平原西部,南临秦岭,北依黄土源,渭河自西向东纵贯其间,属于暖温带半湿润气候,季风

盛行,四季分明。冬季干冷少雪,夏季炎热干燥和温热多雨交替出现,春季升温迅速而气候多变,秋季降温快且多连阴雨。宝鸡地区光、热、水资源较为丰富,多年平均气温 12.9℃,极端最高气温 41.6℃,极端最低气温为-17℃;年平均日照时数达 1904 h,无霜期 217 d,多年平均风速 1.2 m/s;多年平均降水量为 666.1 mm,主要分布在 5 月-10 月,由西向东逐渐增加,由南向北逐渐减少。

1.2 资料来源

本文选用宝鸡气象观测站(中央气象城市站号 57016、位置 107°08′E、34°21′N、海拔 612.4 m) 1961 年-2015 年逐月降水资料,该数据来源于中国气象科学数据共享服务网^[16]和陕西省统计年鉴。基于月降水数据,采用统计学方法可得到逐年丰水期(5 月-10 月)、枯水期(11 月至翌年 4 月)和全年的降水资料。

2 研究方法

2.1 云模型

2.1.1 概念

云是由许多云滴组成,云的整体形状与云滴分别反映了定性的概念和定量的描述,产生云滴的过程就是定性和定量之间的不确定性映射^[17]。因此,基于传统模糊数学和概率统计交叉渗透基础上建立的云模型可以实现不确定性语言与定量数值的转化^[18]。云的 3 个数字特征分别为期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ,其中,期望 E_x 是论域的中心值,表示云的“最高点”;熵 E_n 表示一个定性概念可被度量的范围,即该定性概念的不确定性,又称模糊性,表示云的“跨度”,即熵越大,云的“跨度”越大;超熵 H_e 表示熵的不确定性,即云图上云滴的离散程度,反映云的“厚度”,超熵越大,云越“厚”^[19]。云模型有不同类型的云,如梯形云、正态云、半降云等^[20],本文以正态云模型为基础对宝鸡地区降水特征进行研究。

2.1.2 云发生器

云发生器就是云生产算法,包括逆向正态云发生器(CG⁻¹)和正向正态云发生器(CG)。根据逆向正态云发生器统计出降水数据所对应的数字特征(E_x , E_n , H_e)作为云模型的定性概念,其算法如下^[17]。

$$\text{样本均值: } X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\text{一阶样本绝对中心距: } a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - X| \quad (2)$$

$$\text{样本方差: } s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2 \quad (3)$$

$$\text{期望: } E_x = X \quad (4)$$

$$\text{熵: } E_n = \sqrt{\pi/2} a \quad (5)$$

$$\text{超熵: } H_e = \sqrt{s^2 - E_n^2} \quad (6)$$

式中: x_i 为样本值; n 为样本数量; X 为样本均值; a 为一阶样本绝对中心距; s 为样本方差。

运用正向正态云发生器产生一系列云滴并绘制云图,其算法为^[19]:生成期望值为 E_x 、标准差为 E_n 的正态随机数 x_i ;生成期望值为 E_n 、标准差为 H_e 的正态随机数 E_{ni}^2 ;计算 $\mu_i = \exp[-(x_i - E_x)^2 / 2E_{ni}^2]$,令 (x_i, μ_i) 为云滴;重复以上步骤,直到 n 个云滴生成为止。云模型流程图见图 1。

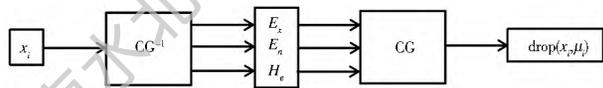


图 1 云模型流程图

Fig. 1 Flow chart of cloud model

2.2 滑动平均-马尔可夫模型

利用宝鸡地区降水量的实测数据,对其进行 3 年滑动平均处理,将得到的滑动平均序列作为新的研究对象。滑动平均处理后的马尔可夫模型降低了偶然因素的影响,能更好的反应数据的规律性。具体步骤如下^[12-13,21]。

(1) 根据水利部颁布的《地表水资源调查和统计分析技术细则》^[21]中规定的降水频率划分的丰枯等级标准,确定各时段所对应的状态,并进行统计得到不同时滞马尔可夫链的转移概率矩阵。

(2) 计算各种步长的马尔可夫链的权重,并得到降水量所处状态的加权预测概率如下:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - x)(x_{t+k} - x) \prod_{i=1}^{k-1} (x_{t+i} - x)^2}{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - x)^2} \quad (7)$$

表 1 宝鸡地区 1961 年-2015 年降水量基本统计特征

Tab. 1 Basic statistical characteristics of precipitation in Baoji region during 1961-2015

项目	最大值/mm	最小值/mm	极值差/mm	极值比	平均值/mm	占全年比例(%)	变差系数 C_v	偏态系数 C_s
丰水期	910.1	265.9	644.2	3.42	547.2	82.38	0.256	0.323
枯水期	208.3	51.7	156.6	4.03	117.2	17.62	0.216	0.318
全年	1025.6	378.3	647.3	2.71	664.4	100	0.294	0.412

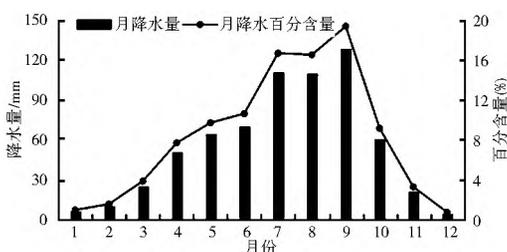


图 2 宝鸡地区 1961 年-2015 年月平均降水量及其百分含量

Fig. 2 Average monthly precipitation and its proportion in Baoji region during 1961-2015

$$\omega_k = |r_k| \prod_{k=1}^n |r_k| \quad (8)$$

$$P_i = \sum_{k=1}^m \omega_k P_i^{(k)} \quad (9)$$

式中: x_t 为第 t 时段的滑动平均降水量; \bar{x} 为滑动平均降水量序列的均值; n 为滑动平均降水序列长度; k 为自相关系数的阶数;对于降水序列最大为 5 阶即可。

(3) 计算级别特征值和降水量预测值,公式如下:

$$H = \sum_{i=1}^m i \times \left(P_i^Z \prod_{i=1}^m P_i^Z \right) \quad (10)$$

式中: Z 为最大概率的作用系数,一般取 2 即可, H 为级别特征值。确定最大概率状态 i 后,根据式(11)确定该模型在预报时段的预测值为

$$X_{\text{预报}} = \begin{cases} T_i H / (i + 0.5) & H > i \\ B_i H / (i - 0.5) & H < i \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_i 、 B_i 分别为状态 i 区间的上限与下限。

3 降水特征分析

3.1 降水基本特征

通过对宝鸡地区 1961 年-2015 年降水量基本统计特征进行分析可知^[22], 12.5%、37.5%、62.5%、和 87.5% 降水频率对应的年降水量分别为 824.5 mm、701.2 mm、609.7 mm 和 490.6 mm。宝鸡地区全年降水量分布最离散,丰水期次之,枯水期分布最集中;丰、枯水期和全年的降水量都处于正偏的状态,即主要处于小于均值的状态;且年降水量和丰水期、枯水期降水量年际分布不均匀,降水量极差大,极端降水现象明显,易引起旱涝灾害发生,详见表 1。结合图 2 可知,宝鸡地区年内降水分配不均匀,主要集中在丰水期,其中 7 月-9 月所占比例最大,为 51.45%,而 12 月-2 月所占比例最小,为 3.23%。

由图 3 可知,年降水量与枯水期降水量呈减少趋势,递减率分别为 12.4 mm/(10a)、12.9 mm/(10a);丰水期降水量呈增加趋势,递增率为 2.6 mm/(10a)。可见,全年降水的减少量集中在枯水期。基于 Mann-Kendall 检验法^[23]得到宝鸡地区年、丰水期和枯水期的降水量 Z 值分别为 -1.060、0.073 和 -4.247,年降水量和丰水期降水量的变化趋势不显著,而枯水期降水量通过 99% 的显著性检验,减少趋势显著。

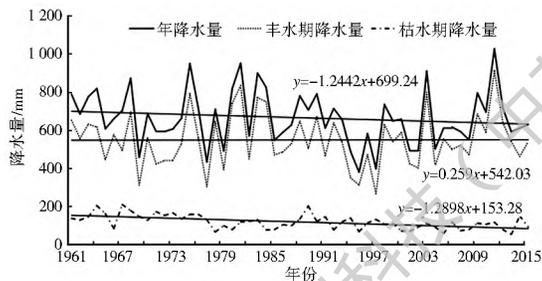


图 3 宝鸡地区 1961 年-2015 年降水量变化曲线

Fig. 3 Variation curve of precipitation in Baoji region during 1961-2015



图 4 宝鸡地区 1961 年-2015 年降水量模比系数积差曲线

Fig. 4 Ratio coefficient difference curve of precipitation in Baoji region during 1961-2015

3.2 云模型分析

以宝鸡地区丰水期、枯水期和全年降水量为研究对象,依据逆向云发生器得到各自隶属云的数字特征(表 2),然后依据正向云发生器绘制隶属云图(图 5)。期望 E_x 表示降水量的平均值;熵 E_n 反映了降雨量相对平均值的离散程度,值越大,分布越不均匀;超熵 H_e 表示熵的离散程度,值越大,不均匀性的稳定性越低。由表 2 和图 5 可知:枯水期降水量少,但分布的不均匀性低,稳定性高;丰水期降水量远大于枯水期,但分布较为离散且稳定性最低;全年降水量分布最离散且稳定性较小;这与该地区降

降水量模比系数差积曲线法能较好地反应降水量多寡的周期变化^[6]。由图 4 可知,宝鸡地区年降水量与丰水期降水量的周期变化基本一致,20 世纪 70 年代、90 年代和 2008 年-2015 年为降水的偏丰期,20 世纪末和 2001 年-2008 年为降水的偏枯期,80 年代呈多寡交替的变化现象;枯水期降水量基本呈先增后减的周期变化,1961 年-1975 年为降水偏多期,1975 年-2015 年为降水偏少期。

水量变差系数 C_v 和偏态系数 C_s 分析得到的结论具有一致性。由此可见,在丰水期和全年的时间尺度上,降水量的不确定性高,增加了该时期水资源管理和水文预报的难度。

表 2 宝鸡地区丰、枯水期及全年降水量隶属云的数字特征

Tab. 2 Digital features of cloud model of precipitation in wet period, dry period, and a whole year in Baoji region

时段	(E_x, E_n, H_e)
全年	(664.40, 140.87, 25.69)
丰水期	(547.23, 137.56, 26.91)
枯水期	(117.17, 37.90, 2.69)

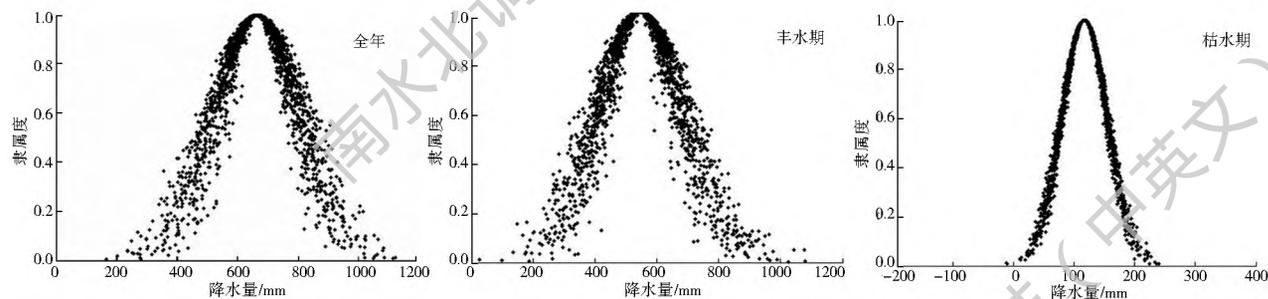


图 5 宝鸡地区降水量隶属云图

Fig. 5 Membership cloud of precipitation in Baoji region

4 降水量预测

4.1 模型检验

基于降水频率分级标准将宝鸡地区 1961 年-2013 年滑动平均降水序列划分为 5 个区间(表 3),确定各时段的具体状态,对 2012 年和 2013 年滑动平均降水量进行预测(表 4、表 5 和表 6),并通过模糊集理论的级别特征值进一步计算分析,对模型的精度进行检验(表 7)。

由表 7 可知,在中长期水文预报值相对误差小于 20% 的要求下^[24],宝鸡地区 2012 年和 2013 年丰水期、枯水期和全年的滑动平均降水量的预测结果均满足精度要求。对于全年滑动平均降水量的预测,将丰、枯水期的预测值相加与基于年尺度的预测值进行对比,前者 2012 年和 2013 年滑动平均年降水量的相对误差分别为 2.67% 和 5.09%,后者分别为 10.04% 和 4.25%,可见,丰、枯水期预测结果的相加值更为精准,可靠性更高。因此,对于宝鸡地区

2014年-2018年的滑动平均年降水量仅用丰、枯水期降水量预测值的总和进行预测。

表3 宝鸡地区1961年-2013年滑动平均降水量等级划分
Tab.3 Grades of moving average precipitation during 1961-2013 in Baoji region

状态	等级	分级标准(降水频率(%))	年降水量区间/mm	丰水期降水量区间/mm	枯水期降水量区间/mm
1	干旱	$P \geq 87.5$	$x \leq 575.2$	$x \leq 454.4$	$x \leq 86.2$
2	偏旱	$62.5 \leq P < 87.5$	$575.2 < x \leq 633.6$	$454.4 < x \leq 521.2$	$86.2 < x \leq 99.3$
3	正常	$37.5 \leq P < 62.5$	$633.6 < x \leq 693.8$	$521.2 < x \leq 567.5$	$99.3 < x \leq 116.9$
4	偏涝	$12.5 \leq P < 37.5$	$693.8 < x \leq 773.9$	$567.5 < x \leq 662.5$	$116.9 < x \leq 155.1$
5	雨涝	$P \leq 12.5$	$x > 773.9$	$x > 662.5$	$x > 155.1$

表4 宝鸡地区2012年-2013年滑动平均年降水量预测
Tab.4 Prediction of moving average annual precipitation in Baoji region in 2012 and 2013

初始年	状态	步长	权重	状态转移概率					初始年	状态	步长	权重	状态转移概率				
				1	2	3	4	5					1	2	3	4	5
2011	4	1	0.540	0	1/14	2/7	1/2	1/7	2012	3	1	0.557	1/12	7/12	1/4	1/12	0
2010	5	2	0.264	0	1/2	0	1/2	0	2011	4	2	0.314	1/14	1/7	2/7	3/7	1/14
2009	5	3	0.083	1/2	0	1/2	0	0	2010	5	3	0.025	1/3	0	2/3	0	0
2008	3	4	0.088	1/11	4/11	2/11	4/11	0	2009	5	4	0.077	0	1/2	1/2	0	0
2007	3	5	0.025	1/9	1/9	1/3	1/3	1/9	2008	3	5	0.027	1/12	1/4	5/12	1/4	0
P_i 加权求和				0.052	0.206	0.220	0.443	0.080	P_i 加权求和				0.079	0.415	0.295	0.188	0.022

表5 宝鸡地区2012年-2013年丰水期滑动平均年降水量预测
Tab.5 Prediction of moving average precipitation in wet period in Baoji region in 2012 and 2013

初始年	状态	步长	权重	状态转移概率					初始年	状态	步长	权重	状态转移概率				
				1	2	3	4	5					1	2	3	4	5
2011	4	1	0.595	0	2/7	2/7	3/14	3/14	2012	3	1	0.570	1/13	4/13	4/13	1/13	0
2010	5	2	0.332	0	1/4	0	1/2	1/4	2011	4	2	0.359	0	3/14	3/7	1/7	3/14
2009	5	3	0.033	0	0	1/2	0	1/2	2010	5	3	0.043	0	0	2/3	0	1/3
2008	4	4	0.017	1/5	2/5	1/5	2/5	0	2009	5	4	0.002	0	1/2	1/2	0	0
2007	3	5	0.023	2/9	1/9	1/3	1/9	2/9	2008	4	5	0.025	2/7	0	2/7	3/7	0
P_i 加权求和				0.009	0.261	0.198	0.301	0.232	P_i 加权求和				0.051	0.253	0.366	0.237	0.091

表6 宝鸡地区2012年-2013年枯水期滑动平均年降水量预测
Tab.6 Prediction of moving average precipitation in dry period in Baoji region in 2012 and 2013

初始年	状态	步长	权重	状态转移概率					初始年	状态	步长	权重	状态转移概率				
				1	2	3	4	5					1	2	3	4	5
2011	1	1	0.284	1/5	4/5	0	0	0	2012	2	1	0.280	5/13	5/13	3/13	0	0
2010	3	2	0.225	1/4	1/12	7/12	1/12	0	2011	1	2	0.225	0	3/5	2/5	0	0
2009	3	3	0.175	2/11	3/11	5/11	0	1/11	2010	3	3	0.175	1/6	1/3	5/12	0	1/12
2008	2	4	0.164	2/11	5/11	1/11	2/11	1/11	2009	3	4	0.165	3/11	2/11	6/11	0	0
2007	2	5	0.153	1/5	2/5	3/10	1/10	0	2008	2	5	0.155	2/11	5/11	3/11	1/11	0
P_i 加权求和				0.205	0.429	0.271	0.064	0.031	P_i 加权求和				0.210	0.402	0.360	0.014	0.015

表7 宝鸡地区2012年-2013年滑动平均降水量预测结果
Tab.7 Forecast results of moving average precipitation in Baoji region in 2012 and 2013

年份 (验证期)	全年				丰水期				枯水期				丰枯期降水量总和			
	实测	预测	绝对	相对	实测	预测	绝对	相对	实测	预测	绝对	相对	实测	预测	绝对	相对
	值	值	误差	误差	值	值	误差	误差	值	值	误差	误差	值	值	误差	误差
2012	638.4	702.5	64.1	10.04	545.7	570.4	24.7	4.53	92.7	85	7.7	8.31	638.4	655.4	17	2.66
2013	609.5	635.4	25.9	4.25	512.5	488.8	23.7	4.62	97	89.7	7.3	7.53	609.5	578.5	31	5.09

4.2 降水量预测

基于滑动平均-马尔科夫预测模型,利用丰、枯水期滑动平均降水量预测结果的相加值对宝鸡地区

2014年-2018年的滑动平均年降水量进行预测,进而依据三年滑动平均公式得出2016年-2020年降水量的预测值,见表8。

表8 宝鸡地区降水量预测结果

Tab. 8 Forecast results of precipitation in Baoji region

滑动平均预测年份 (预测期)	滑动平均预测值/mm			降水预测年份 (预测期)	预测值/mm		
	丰水期	枯水期	全年		丰水期	枯水期	全年
2014	518.3	98.9	617.2	2016	555.7	57.4	613.1
2015	567.4	88.9	656.3	2017	608.2	118.8	727.0
2016	570.2	87.2	657.4	2018	546.8	85.2	632.0
2017	519.7	85.7	605.4	2019	404.1	53.1	457.2
2018	571.2	84.1	655.3	2020	762.8	113.9	876.7

5 结论

(1) 宝鸡地区降水量在年内、年际分配不均匀。年降水量和枯水期降水量分别以 11.9 mm/(10a) 和 14.5 mm/(10a) 的递减率变化,丰水期降水量以 2.6 mm/(10a) 的递增率变化;其中,枯水期降水量的减少趋势显著,且年降水量的减少基本都集中在枯水期。

(2) 宝鸡地区年降水量的分布最离散,稳定性较差;丰水期降水量的分布较分散,稳定程度最低;与丰水期降水量相差甚远的枯水期,其降水量的分布最为集中,稳定性也最好。

(3) 基于滑动平均-马尔可夫模型,对宝鸡地区全年、丰水期和枯水期的滑动平均降水量进行了预测,其结果均满足精度要求;对于全年滑动平均降水量的预测,丰、枯期滑动平均降水量预测值的总和较年尺度的预测值更为准确,预测2016年-2020年分别为平水年、偏丰水年、平水年、枯水年和丰水年。

(4) 通过对宝鸡地区降水特征分析和降水量预测,显示出云模型与滑动平均-马尔可夫模型两者结合在降水分析与预测中具有很强的适用性,因此,可将这两种模型相结合作为研究中长期水文序列的定性与定量综合分析的方法。

参考文献(References):

[1] 文彦君. 基于权马尔可夫链的宝鸡市年降水量状态预测[J]. 中国农学通报, 2012, 28(26): 272-276. (WEN Yair jun. Prediction of annual precipitation grade in Baoji City Based on Weigr ted Markov Chain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(26): 272-276. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6850. 2012. 26. 055

[2] 卫旭东, 刘引鸽, 缪启龙. 陕西省降水量变化及其影响分析[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4): 40-43. (WEI Xir dong, LIU Yir ge, MIAO Qi long. Influences On changes of precipitation in

Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(4): 40-43. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-288X. 2004. 04. 011

[3] Petts G E, Bickerton M. A, Crawford C, et al. Flow management to sustain groundwater dominated stream ecosystem[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(3): 497-513. DOI: 10. 1002/(SICI) 1099-1085(19990228) 13: 3< 497:: AID-HYP753> 3. 0. CO; 2 S

[4] 钱会, 李培月, 王涛. 基于滑动平均-加权马尔可夫链的宁夏石嘴山市年降雨量预测[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(1): 6-9. (QIAN Hui, LI Peiyue, WANG Tao. Precipitation prediction on Shizuishan City in Ningxia Province based on moving average and Weighted Markov Chain[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(1): 6-9. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2010. 01. 002

[5] 刘毅, 杨晓怡, 段相宏. 区域降水的多时间尺度特征[J]. 气象科技, 2005, 33(1): 37-40. (LIU Yi, YANG Xiaoyi, DUAN Xiang hong. Multiple time scale features of summer and autumn rainfall in Chongqing Region[J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(1): 37-40. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6345. 2005. 01. 008

[6] 徐盼盼, 王海科, 钱会. 宝鸡地区降水特征分析[J]. 水资源与水利工程学报, 2016, 27(2): 86-91. (XU Parr pan, Wang Hai ke, QIAN Hui. Characteristics analysis of precipitation in Baoji region[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(2): 86-91. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 02. 16

[7] 周文婧, 夏自强, 黄峰, 等. 巴尔喀什湖流域降水量及其年内分配的变化特征[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 10-13. (ZHOU Wen jing, XIA Zi qiang, HUANG Feng, et al. Variation characteristics of precipitation and its annual distribution in Balkhash Lake Basin[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(6): 10-13. (in Chinese))

[8] 刘睿, 陈晨, 林子伊. 基于云模型的金沙江流域年降水时空分布研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2): 201-206. (LIU Rui, CHEN Chen, LIN Zi yi. Analysis on characteristics of annual precipitation distribution in Jinsha River Basin based on

- cloud model[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(2): 201-206. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2015.02.042
- [9] 农吉夫. 马尔可夫链及其在旱涝预测中的应用[J]. 广西民族大学学报: 自然科学版, 2010, 16(1): 70-75. (NONG Ji fu. Markov Chain model and its application in drought and flood forecasting[J]. Journal of Guangxi University for Nationalities: Natural Science Edition, 2010, 16(1): 70-75. (in Chinese) DOI: 10.16177/j.cnki.gxmzkk.2010.01.003
- [10] 钱家忠, 朱学愚, 吴剑锋. 地下水资源评价中的时间序列-马尔可夫模型[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 350-356. (QIAN Jia zhong, ZHU Xue yu, WU Jian feng. Time Series Markov prediction model for precipitation in the course of evaluation of groundwater resources[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(4): 350-356. (in Chinese) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2001.04.011
- [11] 秦松. 基于加权的滑动平均-马尔可夫预测模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 185-188. (QIN Song. Markov prediction model and its application based on the weighted sliding average[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(1): 185-188. (in Chinese)
- [12] 马建琴, 富可荣, 冯启言. 滑动平均-马尔可夫链模型在降水预测中的应用[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2008, 28(1): 1-4. (MA Jian qin, FU Ke rong, FENG Qi yan. Application of sliding mean weighted Markov Chain model on rainfall prediction[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2008, 28(1): 1-4. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1008-536X.2008.01.001
- [13] 王蓓, 刘玉甫. 滑动平均-马尔可夫模型在降水预测中的应用[J]. 水资源研究, 2009, 30(2): 25-27. (WANG Bei, LIU Yu fu. Application of moving average Markov model in precipitation forecasting[J]. Water Resource Research, 2009, 30(2): 25-27. (in Chinese)
- [14] 张良, 郭世娟. 张家口市年降水量的加权马尔可夫链预测[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2014(3): 18-21. (ZHANG Liang, GUO Shi juan. Weighted Markov Chain prediction on annual precipitation in Zhangjiakou[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical college, 2014(3): 18-21. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1008-3782.2014.03.005
- [15] 刘战胜, 郭星火. 宝鸡市水资源特征[J]. 水利科技, 2008(4): 20-22. (LIU Zhan sheng, GUO Xing huo. Characteristics of water resources in Baoji[J]. Water Conservancy Science and Technology, 2008(4): 20-22. (in Chinese)
- [16] 中国气象科学共享服务网[EB/OL]. (China Meteorological Data Sharing Service System[EB/OL]. <http://cds.cma.gov.cn/>. (in Chinese)
- [17] 刘德地, 陈晓宏, 楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 850-857. (LIU De di, CHEN Xiaohong, LOU Zhanghua. Analysis on characteristics of spatio-temporal precipitation distribution based on cloud model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 850-857. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.07.012
- [18] 乔亮, 钱会, 高盼盼. 西安市降水量的时序特性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 16(3): 63-65. (QIAO Liang, QIAN Hui, GAO Pan pan. Analysis on the sequential characteristics of precipitation in Xi'an[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 16(3): 63-65. (in Chinese)
- [19] 叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(12): 4198-4201. (YE Qiong, LI Shaowen, ZHANG Youhua, et al. Cloud model and application overview[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(12): 4198-4201. (in Chinese) DOI: 10.16208/j.issn1000-7024.2011.12.033
- [20] 郭春梅, 陈海涛, 李阿龙. 云模型在中长期降水预测中的应用[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 1-4. (GUO Chun mei, CHEN Haitao, LI A long. Application of cloud model to medium and long term rainfall forecasting[J]. Yellow River, 2016, 38(7): 1-4. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.07.001
- [21] 李娟, 张维江, 马轶. 滑动平均-马尔可夫模型在降水预测中的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 196-198. (LI Juan, ZHANG Weijiang, MA Yi. Application of moving average markov chain in the prediction of precipitation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 196-198. (in Chinese)
- [22] 水利部水文局. 地表水资源调查和统计分析技术细则[EB/OL]. 1981. (Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources. Technical rules for investigation and statistical analysis of surface water resources[EB/OL]. 1981. (in Chinese)
- [23] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008(5): 35-38. (CAO Jie ping, CHI Dao cai, WU Li qiang, et al. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2008(5): 35-38. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1674-1161.2008.05.013
- [24] 陈守煜. 中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. 水利学报, 1997(4): 15-21. (CHEN Shou yu. Theoretical pattern of comprehensive analysis and method for mid and long term hydrology forecasts[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(4): 15-21. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.1997.08.003