

华山地区降水特征分析与年降水量预测

屈文岗^{1,2}, 徐盼盼^{1,2}, 钱会^{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:该文依据华山地区 1953—2013 年降水资料, 利用 Mann-Kendall 检验方法、有序聚类法、云模型等方法, 结合滑动马尔可夫预测模型分析并预测了华山地区的降水特征。结果表明: 华山地区月降水分布极度不均, 主要集中在 7 月、8 月、9 月。冬春季降水量少, 分布均匀, 稳定性高; 夏秋季节降水量多, 分布不均匀, 稳定性低; 夏秋两季降水量的变化直接导致年降水量的分布不均。年降水量与 3 a 滑动平均年降水量均呈递减趋势, 通过了 99% 显著性检验。滑动马尔可夫预测模型预测未来 10 年降水量呈增加趋势, 2014—2023 年预测降水量均值 767.32 mm, 增加幅度为 29.3 mm/10 a, 2019 年预测值最小, 为 634.3 mm; 2023 年预测值最大, 为 883.31 mm。该研究可为华山地区水土流失、滑坡等自然灾害防治提供指导性建议。

关键词:降水特征分析; 预测; 滑动马尔可夫预测模型; 云模型; 华山地区

中图分类号: P426.61⁺4; TV125

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0128-07

Analysis of Precipitation Characteristics and Forecast of Annual Precipitation in Huashan Region

QU Wengang^{1,2}, XU Panpan^{1,2}, QIAN Hui^{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: The precipitation data from 1953 to 2013 in Huashan station were used in this paper, and the Mann-Kendall test method, ordered clustering method, cloud model and the moving average Markov prediction model were used to analyze and predict the precipitation characteristics of Huashan region. The results showed that monthly precipitation distribution was extremely uneven, mainly concentrated in July, August and September in Huashan region. The precipitation in winter and spring was small, the distribution was uniform, and the stability was high, but in summer and autumn, the precipitation was more, the distribution was uneven, and the stability was low. The changes of precipitation in summer and autumn directly lead to the uneven distribution of annual precipitation. The annual precipitation and the 3-year moving average annual precipitation showed the decreasing trend, and they all passed the 99% significance test. The trend of precipitation over the next 10 years will increase based on the prediction by the moving average Markov prediction model. The mean precipitation in 2014—2023 is 767.32 mm, the linear change rate is 29.3 mm/decade, and the forecast of 2019 is the smallest, 634.3 mm, the forecast of 2023 is the largest, 883.31 mm. This study can provide guidance for the prevention and control of natural disasters such as soil erosion and landslide in Huashan region.

Keywords: precipitation characteristics analysis; forecast; moving average Markov prediction model; cloud model; Huashan region

收稿日期: 2018-08-27

修回日期: 2018-10-12

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301084); 重点科研平台条件建设项目“微尺度水文生态研究”(310829173306); 创新团队支持项目(学科建设)“旱区一半干旱区干旱预警及水资源配置研究”(310829173701); 高新技术研究培育项目(学科建设)“高新技术研究培育项目(学科建设)“基于水文循环的水资源管理研究”(310829172202)

第一作者: 屈文岗(1993—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: wengang_qu@163.com

通信作者: 钱会(1963—), 男, 陕西泾阳人, 教授, 博士, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

华山地区的生态环境有着脆弱易破坏且难恢复的特点^[1]。由于水土流失造成的山区生态环境问题具有分布广和危害高的特征,易造成土壤退化,粮食减产,严重时还可能造成河道堵塞、水库淤积等严重后果,对经济社会持续稳定的发展造成威胁^[2]。研究表明,降水是水土流失的第一主导因素,其分布情况的差异性造成水土流失的规律具有多变性^[3]。陕西华阴县自古以来就有“三年一小旱,十年一大旱”的规律,除此之外,受地形和气流的影响,华阴县水涝灾害也比较严重,位于华阴县内的华山自然深受其害。恶劣天气条件尤其是极端降水会对山体稳定性造成威胁,极易引发滑坡、泥石流等自然灾害。因此,研究华山地区的降水分布特性及预测未来走势对该地区水土流失防治,防灾减灾项目实施和山区资源综合利用具有指导性的意义。

研究降水演变规律的方法众多,如滑动平均法、有序聚类分析法、Man-Kendall 非参数方法以及云模型等。滑动平均法是数据处理方法中非常重要的方法,它主要是对观测数据资料进行分段拟合,以达到减少或消除随机误差的目的^[4]。孙乐强等^[5]通过分析滑动平均马尔可夫模型不同步长下年降水量预测精度,得出在一定的范围内,模型的预测精度会随着步长的增加而提高,且 3 a 滑动平均提高预测精度效果最好。有序聚类分析法具有公式简单易懂,计算精确的优点,在突变点识别中应用广泛^[6]。唐共地等^[7]利用有序聚类分析法,得出潜山水文站流域 1996 年是输沙量系列中的突变点。Man-Kendall 非参数方法是世界气象组织推荐并广泛运用的非参数检验方法^[8]。徐泽华等^[9]在使用 Man-Kendall 对降水趋势进行研究时发现,山东地区降水近 30 a 呈现上升趋势。云模型建立于传统模糊数学与概率统计交叉的基础之上,能实现定性定量之间的转化^[10],其主要运用于电子软件,仿真方面^[11],在降水特征分析的领域亦有应用。徐盼盼等^[12]基于云模型研究了宝鸡地区降水分布特征,发现枯水期降水量少,不均匀性低,稳定性高;丰水期分布离散且稳定性最低;全年降水量分布最离散且稳定性较小。加权马尔科夫链预测模型被广泛应用在降水量预测中,且预测精度较高^[13]。钱会等^[14]利用此预测模型来预测宁夏石嘴山地区年降水量,得出 2009 年和 2010 年的年降水量分别为 135.11 mm 和 146.88 mm。吴林川等^[15]运用加权马尔科夫链模型预测榆林地区年降水量范围,2014 年、2015 年年降水量范围分别为 457.52~521.32 mm 和 351.19

~457.52 mm。张杰等^[16]运用加权马尔科夫链预测济南市 2015 年和 2016 年降水量状态为平水年,年降水量分别为 691.21 mm 和 645.28 mm。

刘政鸿等^[17]研究了陕西省 1961—2010 年降水量年际变化规律,发现降水量存在明显的“增多—减少—增多—减少—增多”的特征,且总体呈现减少趋势。田中伟等^[18]依据 1962—2011 年秋季渭南市的气象数据,发现秋季渭南市降水具有纬向分布的特点。刘全玉等^[19]根据华山地区 400 年的降水序列,结合奇异谱分析未来 30 a 华山地区降水变化趋势,预测在 2010—2039 年,华山地区降水略有增加。

本文采用华山地区 1953—2013 年逐日降水资料,利用 Mann-Kendall 检验方法、有序聚类法、云模型等方法,深入分析华山地区降水变化的月、季节和年际变化特征,并结合滑动马尔可夫预测模型预测华山地区 2014—2023 年未来 10 a 的年降水量,其成果不仅可以增加华山地区气候、水资源保护与配置研究的内容,而且为华山地区水利设施建设、蓄洪抗旱提供依据,更重要的是为该区域水土保持方案规划,自然灾害预防与处理措施的开展,自然资源合理配置等提供指导性意见。

1 研究区概况

华山位于陕西省华阴市正南方,处于 109°57′—110°05′E,34°25′—35°00′N,属大陆季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,春季温暖多风,秋季温凉湿润,四季分明。年均气温 13.7℃,月平均气温 1 月最低为 -0.6℃,7 月最高为 23.7℃。年降水量 476.8~862.2 mm,东西长约 15 km,南北宽约 10 km。

2 资料与方法

2.1 降水资料的收集

华山站 1953—2013 年的逐日降水资料,来源于中国气象科学共享服务网。经统计得出 61 a 月降水量、季节降水量和年降雨量数据。

2.2 分析方法

2.2.1 降水量趋势分析与突变分析 降水虽然是一种非平稳的随机现象,但其时间序列有一定的趋势性^[20]。本文使用 Mann-Kendall 检验法、有序聚类法对华山地区降水趋势和突变进行深入研究。其中 Mann-Kendall 检验法用于分析降水序列的变化趋势,其属于非参数检验方法,具有对样本要求少,抗干扰能力强,计算简便等特点^[21];有序聚类法用于分析

降水序列的突变分析,其核心是离差平方和,根据离差平方和的大小找出突变点^[22]。这两种方法在相关文献^[21-22]有详细介绍,这里不再赘述。

2.2.2 降水量分布特征云分析 设 U 是一个定量论域,这个论域用精确数值表示, C 是关于 U 的一个定性概念,对于 U 中任意一个元素 x ,都存在一个随机数 $\mu(x) \in [0,1]$,这个 μ 叫做 x 对 C 的隶属度,而 x 在 C 上的分布称为云,且 x 称为云滴^[23]。云的数字特征用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 来表征^[23-24]。本文采用正态云模型来分析降水量特征,其算法步骤参见相关文献^[12,25]。

2.2.3 滑动平均马尔可夫模型 本文用到的滑动平均马尔可夫模型建立步骤见文献[12]。建模过程中所用到的公式(1—5):

$$r_k = \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) / \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})^2 \tag{1}$$

$$\omega_k = |r_k| / \sum_{k=1}^n |r_k| \tag{2}$$

$$P_i = \sum_{k=1}^m \omega_k P_i^{(k)} \tag{3}$$

式中: x_t 是第 t 时段的滑动平均降水量; \bar{x} 是序列均值; n 为序列长度; k 是自相关系数的阶数,一般取 5。

$$H = \sum_{i=1}^m i \times (P_i^Z / \sum_{i=1}^m P_i^Z) \tag{4}$$

式中: Z 值一般取 2,表示最大概率的作用系数。

$$X_{\text{预测}} = \begin{cases} \frac{T_i H}{i + 0.5} & H > i \\ T & H = i \\ \frac{B_i H}{i - 0.5} & H < i \end{cases} \tag{5}$$

式中: i 为预测状态。

3 结果与分析

3.1 降水特征分析

3.1.1 年内变化分析 图 1 为华山地区 61 a 月平均降水量柱状图,由图可知:多月平均降水量呈单峰型,年内降水分布极度不均,主要集中在 7 月、8 月、9 月,占年均降水量的 48.46%,其中以 7 月和 8 月最多,降水量为 160.2 mm 和 126.5 mm,分别占年均降水量的 20.30%,15.24%。12 月最少,降水量为 11.3 mm,占年均降水量的 1.4%。

表 1 给出了华山地区季节降水量的统计信息,可知,夏季降水占全年降水的比例最大,为 44.90%,秋季次之,为 27.51%,春季和冬季分别为 22.52%和 5.07%。可见年内季节降水分布不均匀,夏秋两季降水量决定了年降水量的多寡。图 2 为华山地区季节

降水趋势变化图,由图可知春夏秋冬四季降水量均呈下降趋势,递减率分别为 -11.84 mm/10 a, -18.94 mm/10 a, -12.90 mm/10 a, -2.33 mm/10 a。其中,夏季降水量下降趋势最明显,冬季降水量下降趋势最小。经 Mann-Kendall 检验得到华山地区春、夏、秋、冬四季降水量的 Z 值分别为 -4.26, -6.07, -8.34, -1.44,见表 1。比较可知,四季降水量趋势检验结果与线性趋势分析结果一致。

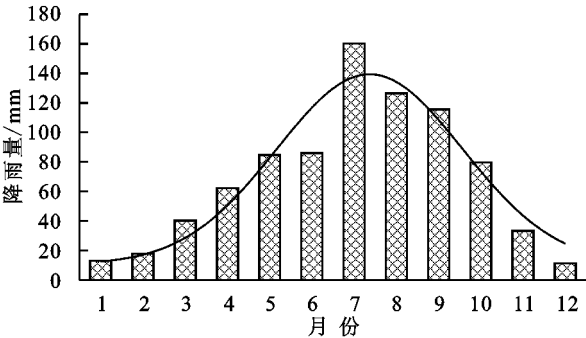


图 1 华山地区 1953—2013 年月平均降水量柱状图

表 1 华山地区季节降水量统计

| 季节 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
|--------|----------|----------|----------|--------|
| 降水量/mm | 11397.3 | 22725.9 | 13926.6 | 2564.9 |
| 降水量/% | 22.5 | 44.9 | 27.5 | 5.1 |
| Z | -4.26*** | -6.07*** | -8.34*** | -1.44* |

注:不同标记表示数据通过了不同可信度的显著性检,*,**和***分别表示通过的显著性检验可信度 90%,95%和 99%。

3.1.2 年际变化分析 华山地区 1953—2013 年年均降水量为 829.8 mm,降水量最大年份为 1964 年、1 262.3 mm,最小年份为 2013 年,561.9 mm。图 3 为华山地区年降水量变化趋势图。由图可知,年降水量一直处于波动状态,整体呈递减趋势。从局部来看,1953—1990 年,华山地区年降水量以 29.1 mm/10 a 的速率呈明显下降趋势,而 1991—2013 年,年降水量以 42.6 mm/10 a 的速率呈明显增加趋势。61 a 来,年降水量多于年均降水量的年份有 32 个,小于年均降水量的年份有 29 个。由 Mann-Kendall 检验法可得,华山地区年降水量的 Z 值为 -3.62,表示年降水量呈下降趋势,且通过了 99%的显著性检验,其结果与线性趋势分析结果一致。采用有序聚类法对年降水量序列进行突变分析,结果见图 3。可以看出 1987 年的离差平方和最小,说明在 1987 年降水量发生突变,1987 年以前年降水量均值为 906.7 mm,1987 年后至今,年降水量均值为 726.1 mm,前后相差 180.6 mm,可知年降水量呈减少的势态。

3.2 云模型分析

根据逆向云发生器得到华山地区四季及全年降

水量隶属云的数字特征(表 2),然后由正向云发生器绘制其隶属云图(图 4)。期望 E_x 表示降水序列各要素的均值;熵 E_n 反映了降水序列各要素相对均值的离散度,值越大,表示分布越不均匀;超熵 H_e 表示熵的离散程度,值越小,不均匀性的稳定性越高。由表 2 和图 4 可知:春冬季降水量少,分布均匀,稳定性

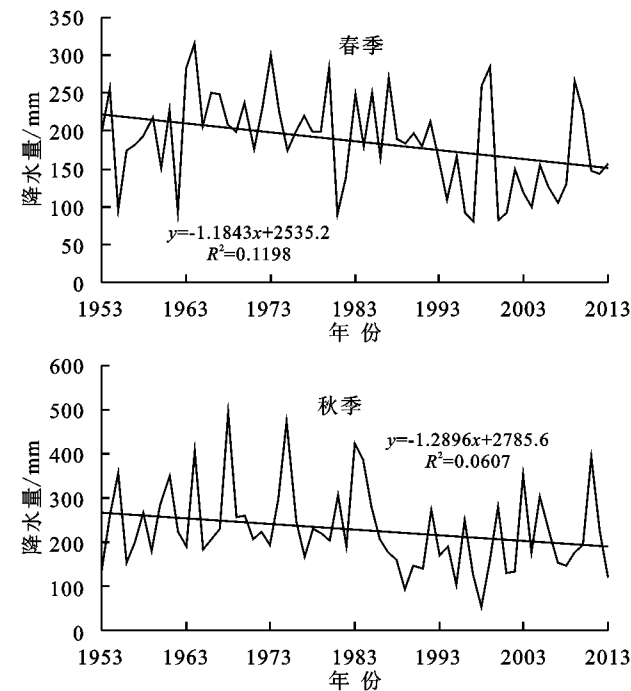


图 2 华山地区季节降水趋势变化

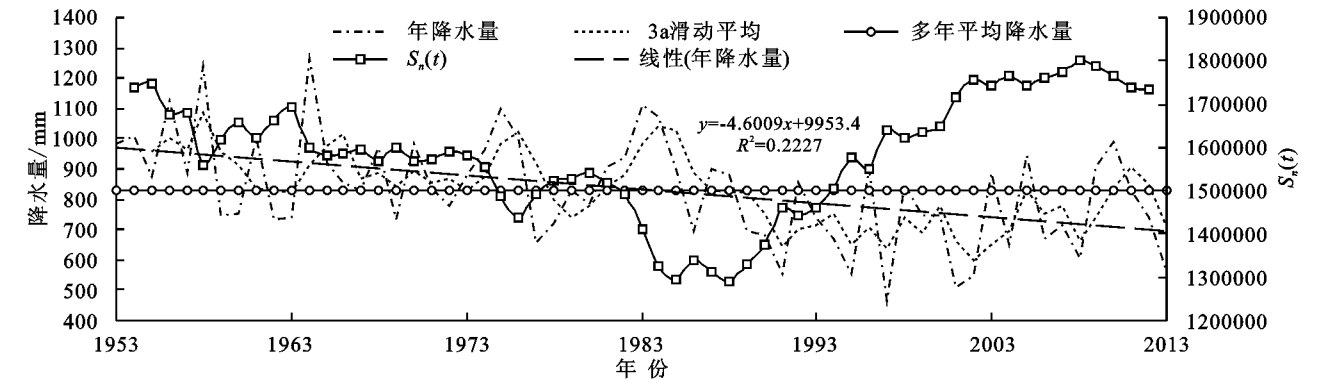


图 3 华山地区 1953—2013 年年降水量变化趋势及突变检验

| 表 2 华山地区四季及全年降水量隶属云数字特征 | | | | | |
|-------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 季节 | 全年 | 冬 | 春 | 夏 | 秋 |
| 期望 E_x | 829.75 | 42.05 | 186.84 | 372.56 | 228.30 |
| 熵 E_n | 170.78 | 19.50 | 61.23 | 118.86 | 89.65 |
| 超熵 H_e | 7.45 | 2.87 | 2.44 | 13.56 | 24.34 |

4 华山地区年降水量预测

4.1 年降水量分级标准及状态

本文年降水量分级标准见表 3,1955—2013 年 3 a 滑动平均降水系列状态见表 4。经计算,华山地区 3 a 滑动平均年降水量序列的 $\chi^2=34.29$,通过了显著水平 $\alpha=0.05$ 的 χ^2 检验,因此滑动平均年降水量序列具有马氏

性,可以使用该方法对华山地区降水量进行预测。高,夏秋季节降水量多,分布不均匀,稳定性低。综合来看,全年降水量主要由夏秋两季贡献而来,且夏秋两季降水量的分布变化直接导致年降水量的分布不均,此现象说明夏秋两季易发生短时极端降水天气,进而造成洪涝、泥石流、山体滑坡等自然灾害,易对生命财产安全造成威胁。

性,可以使用该方法对华山地区降水量进行预测。

| 表 3 1955—2013 年 3 a 滑动平均降水量等级划分 | | | |
|---------------------------------|----|----------------------|------------------------|
| 状态 | 等级 | 分级标准 (降水概率%) | 年降水量 区间/mm |
| 1 | 干旱 | $P \geq 87.5$ | $x \leq 666$ |
| 2 | 偏旱 | $62.5 \leq P < 87.5$ | $666 < x \leq 779.7$ |
| 3 | 平常 | $37.5 \leq P < 62.5$ | $779.7 < x \leq 867.2$ |
| 4 | 偏涝 | $12.5 \leq P < 37.5$ | $867.2 < x \leq 981.2$ |
| 5 | 水涝 | $P < 12.5$ | $x > 981.2$ |

4.2 模型的检验

分别应用 1955—2011 年和 1955—2012 年滑动平均降水量序列和其对应的概率转移矩阵对 2012 年

和 2013 年的滑动平均降水量进行预测(表 5,表 6)。表 7 是华山地区 2012 年、2013 年降水量预测结果及误差分析。可知,2012 年华山地区 3 a 滑动平均年降水量预测状态为 3,实测状态为 3。根据模糊集理论,计算得 2012 年 3 a 滑动平均年降水量预测值为 895.2 mm,实测值为 851.7 mm,相对误差为 5.1%。2013 年华山地区 3 a 滑动平均年降水量预测状态为 2,实测状态为 2。计算得 2013 年 3 a 滑动降水量预测值为 773.8 mm,实测值为 709.2 mm,相对误差为 9.1%。以上预测结果满足相对误差不超过 20% 的精度要求^[26],可见,滑动平均马尔可夫模型适用于华山地区降水量的预测。

4.3 降水量预测

基于滑动平均马尔可夫预测模型,对华山地区 2014—2023 年的降水量进行预测,预测值见表 8。未来 10 年华山地区降水量变化趋势与近 23 a(1991—2013)的年降水量变化趋势类似,均为增加趋势。此趋势符合前文描述的华山地区 61 a 来降水量变化特征,并且预测结果的变化趋势和刘全玉等^[19]的研究结果一致。1991—2013 年华山地区降水量增加幅度为 42.6 mm/10 a,2014—2023 年降水量增加幅度为 29.3 mm/10 a。由表 8 可知,在 10 年预测期内 2019 年预测值最小,为 634.3 mm,2023 年预测值最大,为 883.3 mm。

5 结 论

华山地区 1953—2013 年月降水分布极度不均,主要集中在 7 月、8 月、9 月,降水量分别为 160.16 mm,126.49 mm 和 115.55 mm。夏与秋降水量约占全年的 72.41%,其降水量决定了年降水量的多寡。华山地区春夏秋冬四季降水量变化均呈下降趋势,分别为-11.84 mm/10 a,-18.94 mm/10 a,-12.90 mm/10 a,-2.33 mm/10 a。经 Mann-Kendall 检验得到华山地区四季降水量变化趋势与线性分析一致,除冬季外均通过 99% 显著性检验。华山地区 1953—2013 年年均降水量为 829.75 mm,降水量最大值为 1 262.3 mm,最小值为 561.9 mm。年降水量年际变化较大,整体呈递减趋势。3 a 滑动平均年降水量变化也呈减小趋势,变化幅度相对于年降水量有所减小,且通过了 99% 的显著性检验。1987 年以前年降水量均值为 906.7 mm,1987 年后至今年降水量均值为 726.1 mm,前后变化达 180.6 mm,可知年降水量也呈明显的减少趋势,与上述研究结果一致。云模型结果表明,冬春季降水量少,分布均匀,稳定性高;夏秋季节降水量多,分布不均匀,稳定性低;夏秋两季降水量的变化直接导致年降水量的分布不均。

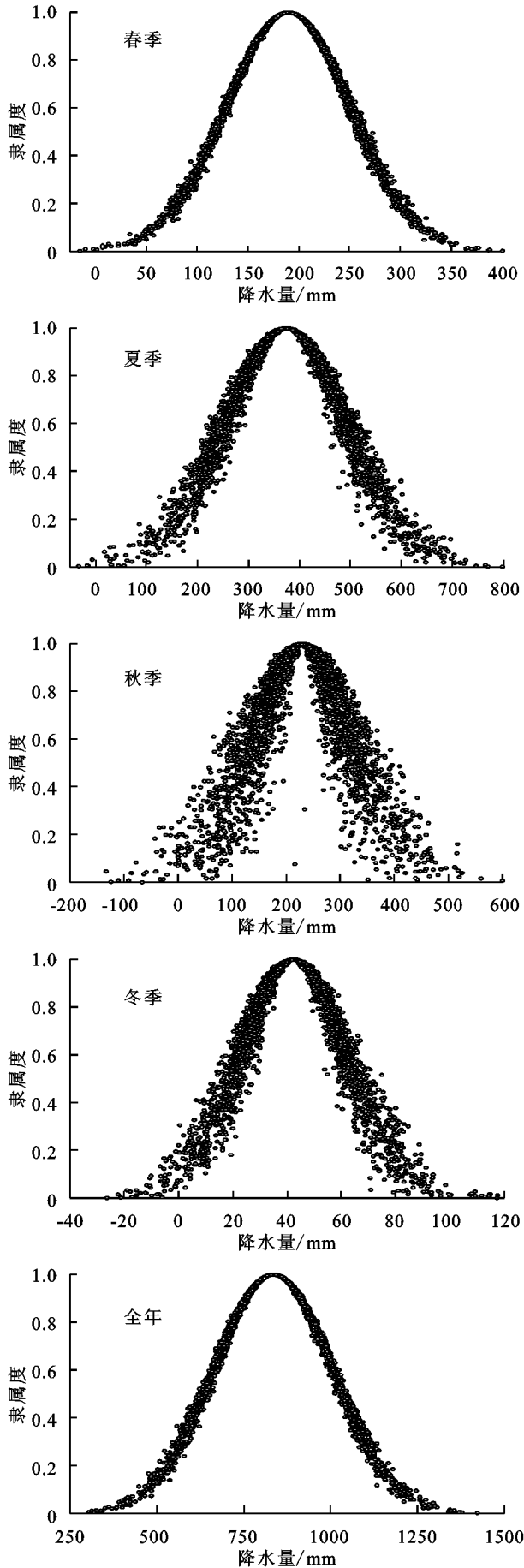


图 4 华山地区降水量隶属云图

表 4 1955 年—2013 年 3 a 滑动平均降水量及状态

| 年份 | 1955 年 | 1956 年 | 1957 年 | 1958 年 | 1959 年 | 1960 年 | 1961 年 | 1962 年 | 1963 年 | 1964 年 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3 a 滑动平均/mm | 955.6 | 1002.9 | 962.3 | 1085.4 | 958.5 | 913.5 | 833.2 | 828 | 823.8 | 911.2 |
| 状态 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 年份 | 1965 年 | 1966 年 | 1967 年 | 1968 年 | 1969 年 | 1970 年 | 1971 年 | 1972 年 | 1973 年 | 1974 年 |
| 3 a 滑动平均/mm | 974.3 | 1012.6 | 868.6 | 884.7 | 843.5 | 895.6 | 852.5 | 867.2 | 831.9 | 873.4 |
| 状态 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 年份 | 1975 年 | 1976 年 | 1977 年 | 1978 年 | 1979 年 | 1980 年 | 1981 年 | 1982 年 | 1983 年 | 1984 年 |
| 3 a 滑动平均/mm | 981.2 | 1022 | 920.6 | 794.7 | 736.8 | 779.4 | 841.5 | 878 | 985.8 | 1040.5 |
| 状态 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 |
| 年份 | 1985 年 | 1986 年 | 1987 年 | 1988 年 | 1989 年 | 1990 年 | 1991 年 | 1992 年 | 1993 年 | 1994 年 |
| 3 a 滑动平均/mm | 1028.1 | 889.3 | 832.5 | 825.1 | 824.7 | 752 | 644.1 | 698.3 | 716.4 | 753.3 |
| 状态 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 年份 | 1995 年 | 1996 年 | 1997 年 | 1998 年 | 1999 年 | 2000 年 | 2001 年 | 2002 年 | 2003 年 | 2004 年 |
| 3 a 滑动平均/mm | 652.9 | 705.9 | 638.7 | 737.7 | 687 | 779.7 | 666 | 600.5 | 648.3 | 694.5 |
| 状态 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 年份 | 2005 年 | 2006 年 | 2007 年 | 2008 年 | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | |
| 3 a 滑动平均/mm | 826.8 | 754.8 | 776.7 | 662.4 | 741.9 | 833.8 | 909.2 | 851.7 | 709.2 | |
| 状态 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 3 | 2 | |

表 5 华山地区 2012 年 3 a 滑动平均年降水量预测

| 初始年 | 状态 | 步长 | 权重 | 状态转移概率 | | | | |
|------|----|----|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2009 | 4 | 1 | 0.543 | 0 | 0 | 0.357 | 0.286 | 0.357 |
| 2008 | 3 | 2 | 0.350 | 0.077 | 0.231 | 0.308 | 0.308 | 0.077 |
| 2007 | 2 | 3 | 0.014 | 0.385 | 0.385 | 0.077 | 0.077 | 0.077 |
| 2006 | 1 | 4 | 0.065 | 0.286 | 0.571 | 0.143 | 0 | 0 |
| 2005 | 2 | 5 | 0.027 | 0.333 | 0.333 | 0.083 | 0.083 | 0.167 |

表 6 华山地区 2013 年 3 a 滑动平均年降水量预测

| 初始年 | 状态 | 步长 | 权重 | 状态转移概率 | | | | |
|------|----|----|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2010 | 3 | 1 | 0.011 | 0 | 0.214 | 0.429 | 0.357 | 0 |
| 2009 | 4 | 2 | 0.136 | 0 | 0.071 | 0.357 | 0.357 | 0.214 |
| 2008 | 3 | 3 | 0.198 | 0.154 | 0.154 | 0.154 | 0.308 | 0.231 |
| 2007 | 2 | 4 | 0.020 | 0.333 | 0.333 | 0.083 | 0.083 | 0.167 |
| 2006 | 1 | 5 | 0.635 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |

表 7 华山地区 2012—2013 年 3 a 滑动平均年降水量预测结果及误差

| 年份 | P_i 加权求和 | | | | | 预测值 | 实测值 | 绝对 误差 | 相对 误差 |
|------|------------|------|------|------|------|-------|-------|----------|----------|
| | 状态 1 | 状态 2 | 状态 3 | 状态 4 | 状态 5 | | | | |
| 2010 | 0.06 | 0.13 | 0.31 | 0.27 | 0.23 | 895.2 | 851.7 | 43.46 | 5.10 |
| 2011 | 0.35 | 0.37 | 0.09 | 0.11 | 0.08 | 773.8 | 709.2 | 64.60 | 9.11 |

表 8 华山地区 2014—2023 年降水量预测

| 预测年份 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 预测值 | 792.7 | 729.7 | 891.3 | 831 | 642.4 |
| 预测年份 | 2019 年 | 2020 年 | 2021 年 | 2022 年 | 2023 年 |
| 预测值 | 634.3 | 680.6 | 712.8 | 875.2 | 883.3 |

应用 2012 年、2013 年 3 a 滑动平均实测数据,验证了滑动平均—马尔科夫预测模型适用于华山地区。

运用该模型预测华山地区未来 10 a 年降水量,未来 10 a 降水量与 1991—2013 年降水量均呈增加趋势。1991—2013 年华山地区降水量均值为 734.8 mm,增加幅度 42.6 mm/10 a;2014—2023 年预测降水量均值为 767.3 mm,增加幅度为 29.3 mm/10 a。且在预测结果中,2019 年预测值最小,为 634.3 mm;2023 年预测值最大,为 883.3 mm。

Mann-Kendall 法,有序聚类分析法,云模型和滑动平均—马尔科夫模型等方法的有机结合,系统地研究了华山地区 61 a 来降水变化规律并预测了未来 10 a 降水量的变化情况。该研究结果不但丰富了华山地区气候研究的内容,而且对该地区水土保持方案规划与实施、自然灾害防治具有指导性。

参考文献:

- [1] 钟祥浩. 推动山地学学科建设促进山区可持续发展[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 14-19.
- [2] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 14-19.
- [3] 陈维杰. 降水变化对不同下垫面的水土流失之差异影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 73-75.
- [4] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001, 22(1): 21-23.
- [5] 孙乐强, 郝振纯, 王加虎, 等. 滑动平均处理对 Markov 年降水预测精度的影响[J]. 人民黄河, 2012, 34(5): 28-31.
- [6] 方开泰. 聚类分析(I)[J]. 数学的实践与认识, 1978, 31(2): 55-63.
- [7] 唐共地, 包赢. 基于有序聚类分析法和 Mann-Kendall 法的水沙系列突变点研究[J]. 江淮水利科技, 2015, 37(6): 35-37.
- [8] 汪峰. 长江安徽段径流演变规律分析[J]. 人民长江, 2015, 46(S1): 67-68.
- [9] 徐泽华, 韩美, 张广彩, 等. 山东降水时空分布变化及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 272-278.
- [10] 付斌, 李道国, 王慕快. 云模型研究的回顾与展望[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 420-426.
- [11] 杨洁, 王国胤, 刘群, 等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. 计算机学报, 2018, 41(3): 724-744.
- [12] 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.
- [13] 秦松. 基于加权的滑动平均—马尔科夫预测模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 185-188.
- [14] 钱会, 李培月, 王涛. 基于滑动平均—加权马尔科夫链的宁夏石嘴山市年降雨量预测[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2010, 31(1): 6-9.
- [15] 吴林川, 孔婴婴. 加权马尔种夫链在榆林市降水量预测中的应用[J]. 人民珠江, 2018, 39(2): 5-7, 13.
- [16] 张杰, 陶望雄, 王青. 加权马尔科夫链在济南市降水量预测中的应用[J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 13-16.
- [17] 刘政鸿. 陕西省近 50 年来降水量时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 107-112.
- [18] 田中伟, 尹贞铃, 许伟峰. 渭南市近 50 年秋淋气候特征分析[J]. 陕西气象, 2012, 55(6): 25-27.
- [19] 刘全玉, 易亮. 基于奇异谱分析的未来 30 年华山地区降水趋势预测[J]. 渭南师范学院学报, 2011, 26(2): 73-75.
- [20] 丁晶, 高荣松, 邓育仁. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [21] 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, 30(5): 35-37.
- [22] 袁满, 王文圣, 叶瀛麟. 有序聚类分析法的改进及其在水文序列突变点识别中的应用[J]. 水文, 2017, 37(5): 8-11.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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, 28(8): 15-21.

(上接第 127 页)

- [18] 隋娟, 龚时宏, 王建东, 等. 滴灌灌水频率对土壤水热分布和夏玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 148-152.
- [19] 李玉, 康晓明, 郝彦宾, 等. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳、水热通量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4400-4411.
- [20] 王润元, 刘宏谊, 张强, 等. 夏季草原与戈壁地表能量分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 642-648.
- [21] 王慧, 胡泽勇, 马伟强, 等. 鼎新戈壁下垫面近地层小气候及地表能量平衡特征季节变化分析[J]. 大气科学, 2008, 32(6): 1458-1470.
- [22] 闫人华, 熊黑钢, 冯振华, 等. 绿洲—荒漠过渡带芨芨草地 SPAC 系统蒸散与多环境因子关系分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 889-896.
- [23] 谢琰, 文军, 刘蓉, 等. 太阳辐射和水汽压差对黄河源区高寒湿地潜热通量的影响研究[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 614-625.
- [24] 龚婷婷, 雷慧闽, 焦阳, 等. 黄土高原农牧交错带稀疏自然植被生态系统的能量特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1625-1633.
- [25] 谭丽萍, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 华北人工林水热碳通量环境影响因子分析[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 773-784.