

# 基于云推理的年降水量预测

高盼盼<sup>1,2</sup>, 钱会<sup>1,2</sup>, 乔亮<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 预测未来年的降水量是对旱情做出预警并采取合理抗旱措施的重要前提, 但如何获得准确的预测值一直是研究的热点。降水随时间的变化通常具有随机性和模糊性, 而云模型是在传统模糊数学和概率统计的基础上建立起来的, 能够实现不确定概念与定量数值之间的自然转化, 通过年降水量历史数据及当前趋势挖掘并制定出相应规则, 从而推理获得未来年份的降水量。在此基础上, 提出了基于小波消噪预处理和理论频率曲线修正的云推理预测模型, 并将其运用到了西安市年降水量的预测当中。从所得结果来看, 降水量预测值能较好的反映其年际变化规律, 模型预测精度得到了很大提高, 基本可将误差控制在 30% 以内。

**关键词:** 云推理; 小波消噪; 理论频率曲线; 年降水量预测

中图分类号: P426.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-0852(2016)03-0029-05

年降水量是衡量干旱程度的一个重要指标, 可在很大程度上反映旱情的动态变化。西安市地处我国内陆, 属温带半湿润半干旱季风气候, 常出现干旱状况, 且近年来人类活动不断加剧, 水资源受到了一定程度的污染, 工农业的发展和人们的生活也受到了很大影响。大气降水作为水资源的重要补给来源之一, 其丰枯程度将直接影响到水资源总量。因此对该地区降水量进行预测对缓解旱情及合理利用降水具有重大意义。

目前, 已有许多学者就降水量的预测做了大量研究, 如李永华<sup>[1]</sup>、Antil et al.<sup>[2]</sup>采用了 BP 人工神经网络, 徐文霞等<sup>[3]</sup>、罗耀军<sup>[4]</sup>采用了时间序列分析, 钱会等<sup>[5]</sup>、吴健华等<sup>[6]</sup>、王涛等<sup>[7]</sup>采用了马尔科夫链分别对降水量进行了预测。近年来, 由李德毅院士提出的云模型<sup>[8]</sup>在信息挖掘<sup>[9]</sup>、交通流预测<sup>[10]</sup>、图像处理<sup>[11]</sup>等众多领域得到了成功应用, 在水文预测<sup>[12-14]</sup>中也有备受人们青睐。然而, 就降水预测而言, 该模型虽能从不确定性语言值中挖掘出相邻年份降水的关联规则, 但所得预测结果并不理想。因此, 本文在云推理预测技术的基础

上, 对该方法进行了优化, 即: 首先对西安市的年降水序列进行小波消噪处理, 使其中的随机干扰成分得以去除, 从而提取出能反映降水变化趋势的消噪信号作为云推理预测的建模序列; 随后通过降水的理论频率曲线对所得结果进行校正, 即重新对其加噪, 进而获得最终的降水量预测值。经验证, 在小波消噪预处理和理论频率曲线校正后的云推理模型, 其预测精度有了很大提高, 对西安市年降水量的预测具有很好的适用性。

## 1 云的相关概念

### 1.1 云的定义

设  $U$  是一个用精确数值表示的论域,  $C$  是  $U$  上对应的定性概念, 若论域中任一元素  $x$  都存在一个有稳定倾向的随机数  $\mu(x) \in [0, 1]$ , 即  $x$  对  $C$  的确定度, 则  $x$  在  $U$  上的分布称为云, 每一个  $x$  称为一个云滴。云滴越多, 越能反应概念的整体特征; 云滴出现的概率越大, 对应的确定度就越大, 对概念的贡献也

收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201301084)

作者简介: 高盼盼 (1991-), 女, 陕西延安人, 硕士, 主要从事水文方面的研究。E-mail: pppfdm@163.com

就越大。

### 1.2 云的数字特征

云用期望  $E_x$ 、熵  $En$ 、超熵  $He$  三个数值来表征。

期望  $E_x$ : 云滴在论域空间分布的期望, 即最能代表定性概念的点, 或者说是这个概念量化的最典型样本。

熵  $En$ : 反映定性概念的不确定性, 主要体现在模糊性和随机性两方面, 即论域空间中可被概念接受的云滴的范围和其所能代表的概念的概率密度。

超熵  $He$ : 是熵的不确定性度量, 即熵的熵, 反映了云滴的离散程度。超熵越大, 云滴离散度越大, 隶属度的随机性越大, 云的“厚度”也越大。

### 1.3 云模型

将云的三个数字特征组合到一起即构成云模型  $(E_x, En, He)$ , 它是云的具体实现方法, 也是云计算、云推理等的基础。由于现实生活中很多现象服从或近似服从正态分布, 因此本文将正态云模型作为预测手段对西安市的年降水量进行预测。该正态云模型具体可分为两种正态云发生器, 其中正向云发生器是从定性概念到定量值的映射, 逆向云发生器是将精确数值转换为定量概念的模型, 详细算法可参考文献[12]。

### 1.4 云推理

由前件和后件云发生器连接而成的基于云模型的定性规则可描述为: If  $A$  then  $B$ , 式中  $A, B$  为定性概念, 如“If 海拔高, then 人口密度小”, 其原理如图 1 所示。由于生成的云滴不是唯一的, 终端输出也将因继承此随机性和模糊性而实现基于云模型的不确定性推理。具体算法如下:

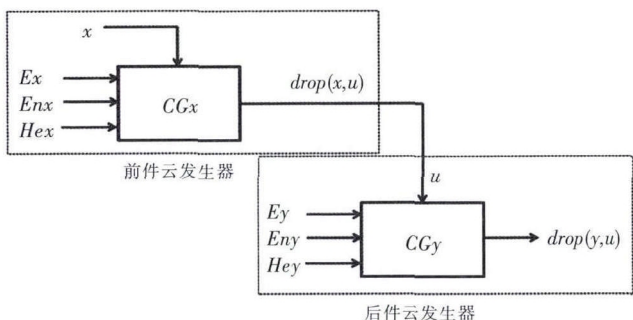


图 1 一维单条件单规则发生器

Fig.1 The generator of the one-dimensional single rule with one condition

①输入前件云模型  $(E_x, En_x, He_x)$  求得到正态随机数  $Ennx = \text{normrnd}(En_x, He_x^2)$ ;

②根据样本数据  $x$  的输入求其隶属度  $u = \exp(-(x - E_x)^2 / 2 * Ennx^2)$ ;

③输入后件云模型  $(E_y, En_y, He_y)$  生成正态随机数  $Enny = \text{normrnd}(En_y, He_y^2)$ ;

④若输入  $x \leq E_x$ , 则输出  $y = E_y - Enny * \text{sqrt}(-2 * \log(u))$ , 反之  $y = E_y + Enny * \text{sqrt}(-2 * \log(u))$ 。

## 2 年降水量预测

### 2.1 小波消噪

小波消噪<sup>[15]</sup>主要是通过低通滤波器将年降水序列中的高频成分予以去除, 即排除水文序列中的随机干扰成分, 从而提取出更能反映降水变化趋势的低频部分进行分析计算和推估模型的建立。本文针对西安站 1955~2006 年间共 52 年的降水序列采用 Stein 无偏风险软阈值消噪方法进行了预处理, 其具体操作方法可参考文献[16]和[17]。所得消噪结果与原始值的对照情况如图 2 所示。

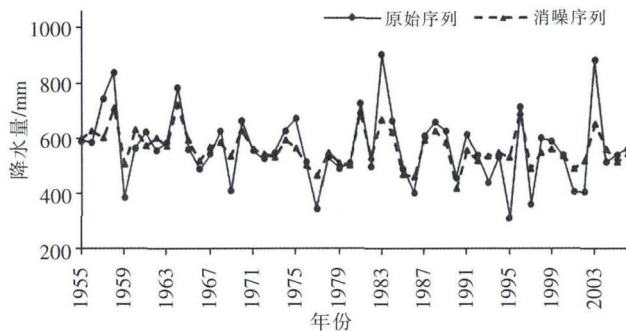


图 2 西安站 1955~2006 年间年降水消噪序列与真实值的对照情况  
Fig.2 The comparison between de-noise and real values of the annual precipitation at the Xi'an station during 1955~2006

### 2.2 云推理预测

训练集合: 经预处理后 1955~2006 年间的降水消噪序列。将消噪序列归一化至  $[0.1, 0.9]$  之间, 生成数据集  $U = [0.4775, 0.4698, 0.6834, 0.8131, 0.1977, \dots]$ 。

预测集合: 未来 7 年(2007~2013 年)的降水量。与真实值比较, 验证精度。

制定规则: 为挖掘相邻年份间降水量的不确定关系, 将数据集  $U$  中 1955~2005 年的数据作为输入  $X$ , 1956~2006 年的数据作为输出  $Y$ 。通过 K-means 聚类将  $X$  分为 5 类,  $Y$  做相应于  $X$  的分类, 并通过无需确定度的逆向云算法分别得到各类  $X$  和  $Y$  的云模型, 即前件云模型和历史云模型, 见表 1。

表1 年降水消噪序列归一化后的云推理规则集  
Table1 The cloud reasoning rule set after normalization for de-noise series of annual rainfall

	前件云模型 ( $E_x, E_{nx}, H_{ex}$ )	历史云模型 ( $E_{y1}, E_{ny1}, H_{ey1}$ )	趋势云模型 ( $E_{y2}, E_{ny2}, H_{ey2}$ )	后件云模型 ( $E_y, E_{ny}, H_{ey}$ )
规则 1	(0.4986,0.0255,0.0102)	(0.4813,0.1480,0.0392)		(0.4689,0.1773,0.0354)
规则 2	(0.1992,0.0517,0.0111)	(0.5043,0.1607,0.0853)		(0.4892,0.1899,0.0746)
规则 3	(0.8306,0.0700,0.0190)	(0.3956,0.1392,0.0738)	(0.4064,0.0292,0.0158)	(0.3975,0.1684,0.0638)
规则 4	(0.3878,0.0395,0.0090)	(0.4096,0.1602,0.0835)		(0.4091, 0.1894,0.0730)
规则 5	(0.6133,0.0526,0.0224)	(0.4290,0.1723,0.1031)		(0.4257, 0.2015,0.0904)

预测模型:采用被预测年份的前3年数据建立趋势云模型( $E_{y2}, E_{ny2}, H_{ey2}$ ),并将其与历史云模型( $E_{y1}, E_{ny1}, H_{ey1}$ )进行合并,构成后件云模型( $E_y, E_{ny}, H_{ey}$ ),以用于后续预测(见表1)。云模型的合并运算如下:

$$\begin{cases} E_y = (E_{y1} * E_{ny1} + E_{y2} * E_{ny2}) / (E_{ny1} + E_{ny2}) \\ E_{ny} = E_{ny1} + E_{ny2} \\ H_{ey} = (H_{ey1} * E_{ny1} + H_{ey2} * E_{ny2}) / (E_{ny1} + E_{ny2}) \end{cases}$$

预测结果:将  $X$  输入到由前件云模型和后件云模型构成各条规则中,根据极大判定法则,选取最大隶属度所对应的一条规则为激活对象,通过云推理算法和反归一化处理,从而输出消噪序列的预测值,所得结果见表2。

### 2.3 理论频率曲线修正

根据水文频率曲线相关知识<sup>[18]</sup>,分别对1955~2006年间的年降水原始序列和消噪序列做降序排列,利用经验频率公式  $p = m / (n + 1) \times 100\%$  计算其分布频率(式中  $m$  代表降水系列中的序号,  $n$  表示降水序列的总

长度);选用皮尔逊型分布线型,通过离差平方和最小的准则优化相关参数( $C_v, C_s$  值),绘制出1955~2006年间原始序列和消噪序列的理论频率曲线(图3);从消噪序列的理论频率曲线上读取某一频率下的降水量(或某一降水量对应的频率),将该降水量的值修正为原始序列在这一频率下的降水量作为相应年份的降水预测结果(见表2)。

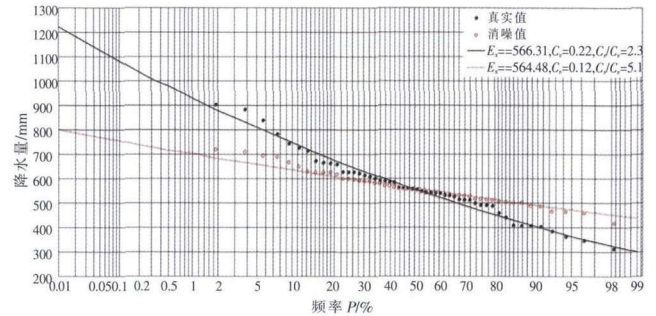


图3 理论频率曲线  
Fig.3 The theoretical frequency

表2 消噪序列和经理论频率曲线修正后的年降水量预测值 (mm)  
Table2 The forecasted values of the de-noise sequence and revised annual precipitation (mm)

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
真实值	698.50	525.20	660.30	504.40	723.60	426.70	497.50
消噪序列预测值	603.27	559.64	593.93	552.08	572.87	523.29	439.53
修正后的预测值	639.84	564.28	623.05	546.20	584.70	492.06	323.41
相对误差/%	8.40	7.44	5.64	8.29	19.20	15.32	34.99

### 3 结果与分析

从表2的预测结果可以看出,经修正处理后的年降水量相对真实值误差较小,平均相对误差仅为14.18%,其中误差在10%以内的占4/7,在20%以内的占6/7。误差在2013年达到最大,为34.99%。总体来讲,所得预测结果能较好的反映降水变化过

程,模型预测精度较高,基本可将误差控制在30%范围以内。

在此,将云推理模型直接应用于西安市年降水量的预测当中,所得结果列于表3。由表3可知,降水量预测值相对同期真实值而言,误差较大,平均相对误差为36.31%,其中误差在10%以内的概率为0,在20%以内的为3/7,其余年份,误差均在30%以上。

表3 直接采用云推理模型得到的年降水量预测值 (mm)  
Table3 The forecasted values of the annual rainfall received by cloud reasoning model alone (mm)

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
真实值	698.5	525.2	660.3	504.4	723.6	426.7	497.5
预测值	569.70	684.84	528.38	779.47	392.65	735.18	433.91
相对误差%	18.44	30.40	19.98	54.53	45.74	72.29	12.78

由此可见,经过小波消噪→云推理预测→理论频率曲线修正的预测模型对于年降水量的预测具有很好的适用性,其预测精度相对直接采用云推理预测模型得到了很大提高,这主要是由于以下两个方面的原因:第一,小波消噪技术使得降水序列本身趋于平稳,降低了模型对异常值的预测难度;第二,由于降水往往服从偏态分布,而云推理是基于正态分布的预测模型,采用呈皮尔逊型分布的理论频率曲线,从某种程度上能够对预测结果进行校正,即再次对消噪信号进行加噪,以还原出原始降水序列。

#### 4 结语

本文在充分考虑降水随机性的基础上,提出了基于小波消噪和理论频率曲线修正的云推理预测模型。通过比较发现,该模型所得预测结果能较好的反映年降水量的变化规律,其预测精度相对直接采用云推理预测模型有了很大提高,所得结果能够为旱情预报及水资源的合理配置提供一定的数据支撑。在今后的研究当中,可进一步通过某种计算机语言,将该方法包装成一个简单、便捷的软件系统,从而更易于用户操作和使用,实现其在水文预测中的应用和推广价值。

参考文献:

- [1] 李永华. 基于BP神经网络的汛期降水预测模型研究[J]. 气象科学, 2002,22(4):29-34. (LI Yonghua. Study on rainfall prediction model in rain season based on BP neural network[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2002,22(4):29-34. (in Chinese))
- [2] Anctil F, Tape DG. An exploration of artificial neural network rainfall-runoff forecasting combined with wavelet decomposition[J]. Journal of Environment Engineering Science, 2004,(35):121-S128.
- [3] 徐文霞,林俊宏,廖飞佳,等. 基于时间序列分析的降雨量动态预测[J]. 安徽农业科学, 2009,37(36):18099-18100. (XU Wenxia, LIN Junhong, LIAO Feijia, et al. Dynamic forecast of precipitation based on time series analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009,37(36):18099-18100. (in Chinese))
- [4] 罗耀军. 降水时间序列挖掘模型的建立和应用 [J]. 水电能源科学, 2009,27 (4):19-21. (LUO Yaojun. Establishment and application of rainfall time-series mining model [J]. Water Resources and Power, 2009,27(4):19-21. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 吴建华,李培月,钱会. 西安市气象要素变化特征及可利用降雨量预测模型[J]. 南水北调与水利科技, 2013,11(1):50-54. (WU Jianhua, LI Peiyue, QIAN Hui. Variation characteristics of meteorological elements and prediction model of available precipitation in Xi'an city [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(1):50-54. (in Chinese))
- [7] 王涛,钱会,李培月. 加权马尔可夫链在银川地区降雨量预测中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2010,8(2):78-81. (WANG Tao, QIAN Hui, LI Peiyue. Prediction of precipitation based on the weighted Markov chain in Yinchuan area [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010,8(2):78-81. (in Chinese))
- [8] Li Deyi. Knowledge representation and discovery based on linguistic atoms [A]. Proceedings of the 1st Pacific-Asia Conference, Singapore, 1997:3-20.
- [9] I.V. Bychkov, V.N. Oparin, V.P. Potapov. Cloud technologies in mining geoinformation science [J]. Journal of Mining Science, 2014,50 (1):142-154.
- [10] Ming-Wei Li, Wei-Chiang Hong, Hai-Gui Kang. Urban traffic flow forecasting using Gauss-SVR with cat mapping, cloud model and PSO hybrid algorithm[J]. Neurocomputing, 2013,(99):230-240.
- [11] 田淑娟. 正向云模型在图像分割中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013. (TIAN Shujuan. The Study of Image Segmentation Application Based on the Forward Cloud Model[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese))
- [12] 李德毅, 杜鹄. 不确定性人工智能 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (LI Deyi, DU Yi. Artificial Intelligence with Uncertainty[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2005. (in Chinese))
- [13] 高文荣,段春青,陈晓楠,等. 基于云推理的年降水预测模型[J]. 中国农村水利水电, 2009,(3):32-35. (GAO Wenrong, DUAN Chunqing, CHEN Xiaonan, et.al. Prediction of annual precipitation based on the cloud model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009,(3): 32-35. (in Chinese))
- [14] 刘睿,梁川. 基于云模型的非一致性年径流预测[J]. 水利与建筑工程学报, 2012,10(3):106-110. (LIU Rui, LIANG Chuan. Prediction for non-compliance annual runoff based on cloud model [J]. Journal of Water Resources Architectural Engineering, 2012,10(3):



- 106–110. (in Chinese))
- [15] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:63–66. (WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing. Hydrology Wavelet Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:63–66. (in Chinese))
- [16] Donoho, D.H. De. Noising by soft–thresholding[J]. IEEE Transactions on Inform Theory, 1995,41(3):613–617.
- [17] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 Matlab 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. (HU Changhua, ZHANG Junbo, XIA Jun, et al. System Analysis and Design Based on Matlab—Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. (in Chinese))
- [18] 魏永霞,王丽学. 工程水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005:73–78. (WEI Yongxia, WANG Lixue. Hydrology Engineering [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005:73–78. (in Chinese))

## Prediction of Annual Precipitation Based on Cloud Reasoning Model

GAO Panpan<sup>1,2</sup>, QIAN Hui<sup>1,2</sup>, QIAO Liang<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Annual precipitation forecast is necessary for drought early warning and taking effective measures to defend drought happen, but how to get more accurate predictive information is still the hotspot. As we known, precipitation often contains randomness interferential with the change of time, while cloud model could realize the transformation between uncertain concept and quantitative values, which is built up on the basis of traditional fuzzy mathematics and probability statistics, thus the volume of precipitation in the future can be achieved through mining association rules from historical and current data. From this, this paper put forward an improved cloud reasoning model to predict annual precipitation which is based on the pretreatment of wavelet de–noise technique and revise of theoretical frequency curve. After that, the predictive results can reflect inter–annual variation of precipitation better in Xi'an, and its accuracy has been greatly improved, the error can be maintained basically less than 30%.

**Keywords:** cloud reasoning; wavelet de–noise; theoretical frequency curve; precipitation forecast

(上接第 83 页)

- fault handling of DT3X0 data capture system [J]. Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, 2003,(4). (in Chinese))
- [3] 程时宏,阳新峰. 二滩水电站水情自动测报系统通信方式改造[J]. 四川水力发电, 2007,26(3). (CHENG Shihong, YANG Xinfeng. Rebuilding the communication of water regimen automatic measuring and reporting system for Ertan hydropower station [J]. Sichuan Water Power, 2007,26(3). (in Chinese))
- [4] 瞿富强,李志宏. 水情自动测报系统遥测终端的开发与应用[J]. 水电厂自动化, 2009,30(2). (QU Fuqiang, LI Zhihong. Development and application of of water regimen automatic measuring and reporting system telemetric terminal [J]. Hydropower Plant Automation, 2009,30(2). (in Chinese))

## Modifying JDZ–type Chip–storage Raingauge to Realize Automatic Precipitation Data Recording and Reporting

MU Zhongping

(Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Shanxi Province, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** The JDZ–type chip–storage raingauge has characteristics of stable and reliable operating and accurate data recording. It plays an important role in the precipitation data regulating and normalizing. But it does not have function of remote data transferring. It can not realize automatic information reporting. By the technological modification, with the original feature and function unchanged, the automatic information–reporting can be realized.

**Key words:** raingauge; modification; realization; automation; information–reporting