

Research on Spatial-Temporal Characteristics of Runoff Distribution Based on Cloud Model in West River Basin

Ming Zhong^{1,2}, Tianyao Qi^{1,2}

¹Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou

Email: zhongm37@mail.sysu.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Copyright © 2014 Ming Zhong, Tianyao Qi. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Ming Zhong, Tianyao Qi. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Runoff is one of the most important hydrological and meteorological factors with randomness and regularity. In order to illustrate the uncertainty of runoff in the West River Basin, based on the monthly observation data of 21 hydrological stations from 1956-2000, cloud model is used in characteristics analysis of seasonal runoff distribution, annual runoff distribution and spatial runoff distribution. Results showed: runoff is the most in summer, and the least in winter; in winter, runoff presents the best stability, then in spring; compared with the seasonal runoff distribution, annual runoff distribution is more uncertain; compared with the temporal runoff distribution, spatial runoff distribution is more unstable and with more uncertainty. Uncertainty in temporal and spatial runoff distribution is quantified by the numerical characteristic index of cloud model, which makes the characteristics analysis more comprehensive and intuitive.

Keywords: Runoff; Spatial-Temporal Characteristics; Cloud Model; West River Basin; Uncertainty

西江流域径流时空分布特性的云模型分析研究

钟 鸣^{1,2}, 祁添焱^{1,2}

¹中山大学水资源与环境系, 广州

²华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州

Email: zhongm37@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

摘 要: 流域径流量是兼具随机性和规律性的重要气象水文要素之一。为了阐明西江流域径流分布的不确定性, 本文将云模型引入到径流季节分布特性、年际分布特性和空间分布特性研究中, 并对西江流域 1956-2000 年间 21 个水文站的逐月径流资料进行了分析研究。研究表明: 西江流域的径流量在夏季最充沛, 在冬季最少; 径流量在冬季最为稳定, 春季次之; 与不同季节径流分布特性相比, 流域径流量的年际分布的不均匀性较大; 与径流量在时间尺度上的分布特性相比, 流域径流量在空间上的分布具有较大的不均匀性和不稳定性。通过期望、熵、超熵三个数字特征对径流时空分布的不确定性进行量化, 可全面直观地研究径流量的分布特性。

关键词: 径流量; 时空分布; 云模型; 西江流域; 不确定性

1. 引言

近五十年来,受全球气候和人类活动的双重驱动,高温、干旱、暴雨及洪涝等极端气候事件的发生呈迅速增多的趋势,给社会、经济和人类生活造成了严重的影响和损失。降水是重要的气象、水文因子之一,也是水文循环中最活跃的因子。降水对河川径流会产生直接影响,特别是在我国南方地区,径流受降水、蒸发、水文下垫面环境、流域水资源利用等因子的综合影响^[1,2],而降水是河川径流量发生剧烈变化的主要来源。因此,探讨流域径流在时空上的变化特性,对分析极端气候事件的成因机理、变化趋势和洪旱灾害评估具有重要的科学意义。西江是珠江流域的重要水系之一,它起源于云南,流经广西、贵州、广东,干流长 2214 公里,流域面积达 36 万平方公里。西江流域水资源丰富,平均径流量仅此于长江,但地区分布不均,随着城市经济、社会的快速发展和气候的变化,流域水资源问题日益突出。据相关数据统计表明,西江流域主要控制站实测径流量呈现显著减少趋势,极端降水事件等发生频率显著增加,径流锐减、洪涝、干旱等自然灾害及其导致的有关社会事件已经引起了政府决策部门和公众的广泛关注。

自从径流时空分布理论^[3]提出后,国内外对径流时空变化特性开展了大量研究,目前的成果主要是围绕以随机统计学为基础的相关理论而开展的,包括累积距平曲线^[4]、Mann-Kendall 检验法^[5]、小波分析法和年内变化指标法^[6](包括不均匀性、集中期和集中度、变化幅度等),另外还有基于混沌理论、模糊聚类等方法的应用。人们对径流量分布不确定性的处理,习惯于沿用以往人工智能的成果,用概率统计法、模糊集合论等方法来解决。然而,事物的不确定性主要是由模糊性和离散性两个不同的方面来表现,在客观世界存在着许多复杂问题,最直接有效的知识表示方法还是自然语言^[7],因此本文在阐述云模型理论的基础上,以西江流域径流量分布为例,分析基于云模型描述的径流时空变化的不确定性。

2. 数据及研究方法

2.1. 数据来源

本文选取 1956 至 2000 年西江流域 21 个水文站的实测径流量数据为基础,如图 1 所示。根据时间的

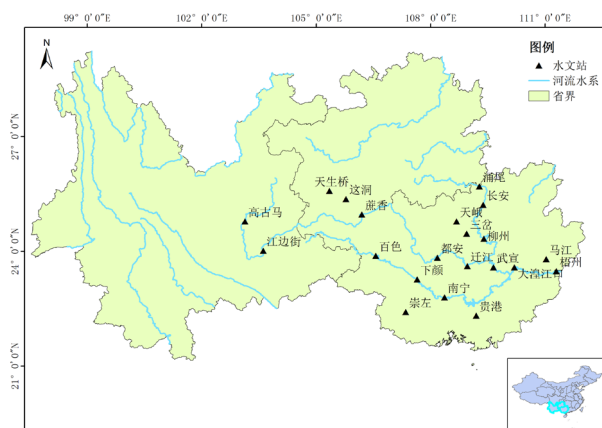


Figure 1. Study region and hydrological stations
图 1. 研究区域水文站点分布图

季节划分准则,以各水文站在不同季节的实测径流量作为输入,分析径流的季节分配特性;以各水文站的年径流总量作为输入,分析径流的年际分配特性;以多年径流量的平均值作为输入,分析不同水文站的径流分配特性。从而构建了不同时间尺度和不同空间条件下的西江流域径流分布特性格局。

2.2. 云模型理论

2.2.1. 云的定义

云是一种用于描述某个定性概念与定量表述之间不确定性转换的模型^[8]。在人类语言描述中,不可避免地存在的边界模糊性和重叠性等现象,因此我们可引入云的概念来表述。设 U 是一个定量论域, C 是 U 上的定性概念,某一定量值 $x \in U$, x 对 C 所表示的定性概念的隶属度为 $\mu_C(x)$,隶属度在论域 U 上的分布称为隶属云,简称云。 $\mu_C(x)$ 在 $[0,1]$ 中取值,云是从论域 U 到区间 $[0,1]$ 的映射,即

$$\mu_C(x): U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu_C(x)$$

2.2.2. 云的数字特征

云的数字特征用期望值 Ex 、熵 En 、超熵 He 来表征,云模型用符号 (Ex, En, He) 表示,如图 2 所示是期望为 10,熵为 2,超熵为 0.1 的云模型示意图。

1) 期望值 Ex : 是定性概念在定量论域中的中心值,它最能够代表这个定性概念,反映了概念的云滴群的重心位置。

2) 熵 En : 是定性概念模糊度的度量,反映了定性概念的不确定性和模糊性。熵越大,表示这个定性

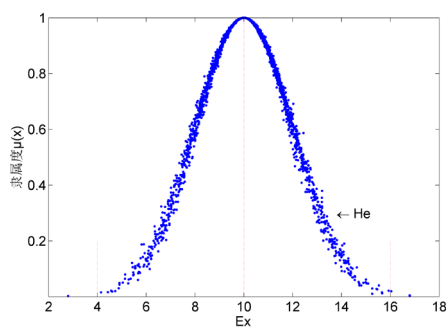


Figure 2. Cloud model
图 2. 云模型示意图

概念越宏观, 可接受的数值范围越大, 概念越模糊。

3) 超熵 He : 是熵的不确定性的度量, 可认为是熵的熵, 反映了云滴的离散程度。超熵越大, 云的厚度越大, 云滴的离散度越大。

2.2.3. 正态云模型

正态云模型是指在论域空间中, 云模型中的某一点的确定度分布符合统计学中的正态分布规律, 由期望和熵可确定具有正态分布形式的云期望曲线方程为:

$$\mu_c(x) = e^{-\frac{(x_i - Ex)^2}{2(En_i)^2}} \quad (1)$$

正态云模型是最基本的云模型。在概率论中我们知道, 在大量的社会科学和自然科学现象中, 它们的期望曲线都近似服从正态分布^[9]。因此, 本文中的所有云模型都是基于正态云模型构建的。

2.2.4. 云模型的 $3En$ 准则

对于定量论域 U 中的定性概念 C , 有贡献的定量值主要落在区间 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$ 内, 在区间外的云滴元素为小概率事件, 可忽略不计, 此规则被称为云模型的 $3En$ 规则。通过云模型进行不确定性概念表示时, 应运用此准则, 忽略区间外的输入, 从而增加知识表达的有效性。

2.2.5. 隶属云发生器

隶属云发生器(Membership Cloud Generation, 简称 MCG)分为正向隶属云发生器和逆向隶属云发生器两类^[10]。

1) 正向隶属云发生器

正向隶属云发生器是根据已知正态隶属云的期

望值 x_0 、带宽 b 和方差 σ_{\max} , 产生满足正态隶属云分布规律的云滴 $\zeta(x, \mu)$, 表示定性概念在数值空间映射的定量位置, 每个云滴代表该概念的确定度。

正向隶属云发生器是用语言值描述的某个基本概念与其数值表示之间的不确定性转换模型, 实现了从语言值表达的定性信息中获得定量数据的范围和分布规律。

2) 逆向隶属云发生器

逆向隶属云发生器是已知隶属云中若干数量的云滴分布, 确定正态隶属云的期望值 x_0 、带宽 b 和方差 σ_{\max} 。逆向隶属云发生器主要是通过统计分析等知识获得, 其实现算法如下:

a) 计算已知云滴的平均值, 即为逆向隶属云模型的期望值:

$$Ex = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

b) 计算隶属云模型的熵:

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i - Ex| \quad (3)$$

c) 计算隶属云模型的超熵:

$$He = \sqrt{S^2 - En^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - En^2} \quad (4)$$

逆向云发生器算法是基于数理统计的方法, 求出的数字特征是一种估计值, 特别是当云滴数较少时, 误差可能比较大, 随着云滴数的增加, 误差将减小。云滴数目越大, 算法越精确, 知识的不确定性表达越准确。

3. 径流量的时空分布特性分析

3.1. 基于云模型的径流量季节分布特征

以 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12~次年 2 月为冬季, 以各水文站在不同季节的实测径流量的平均值作为输入, 利用逆向云发生器算法, 分别计算出不同季节的径流分布云模型, 如表 1 所示。根据正向云发生器算法, 绘制各隶属云图, 如图 3、图 4、图 5、图 6 所示。

由表 1 中径流分布隶属云的三个数字特征计算, 充分考虑了径流分布的模糊性和离散性: 云模型的期望 Ex 表示径流量大小的平均值, 反映了在某个季节

内, 21 个水文站点的总径流量的平均水平; 熵 En 表示径流量相对于平均值的均匀性程度, 反映了在某个季节内, 径流分布的不确定性和模糊性, 熵值越大,

Table 1. Membership cloud of runoff distribution in different seasons (Unit: $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$)

表 1. 各季节的径流分布隶属云(单位: $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$)

季节	Ex	En	He
春季(3~5月)	167.93	49.33	14.56
夏季(6~8月)	519.40	128.96	35.11
秋季(9~11月)	219.83	68.41	28.95
冬季(12~2月)	72.68	12.46	3.91

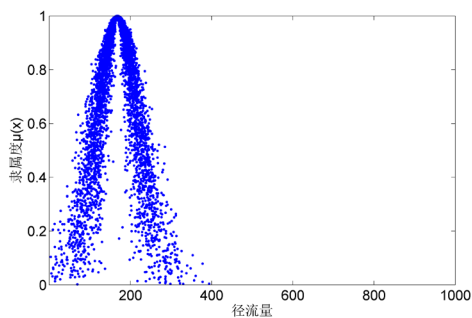


Figure 3. Membership cloud of runoff distribution in spring
图 3. 流域春季径流分布隶属云图

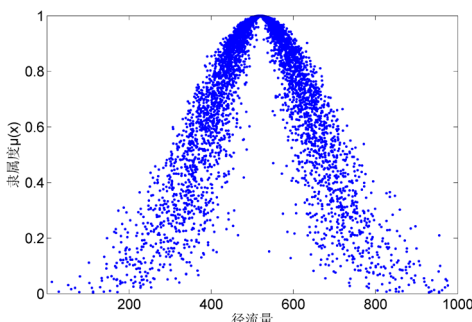


Figure 4. Membership cloud of runoff distribution in summer
图 4. 流域夏季径流分布隶属云图

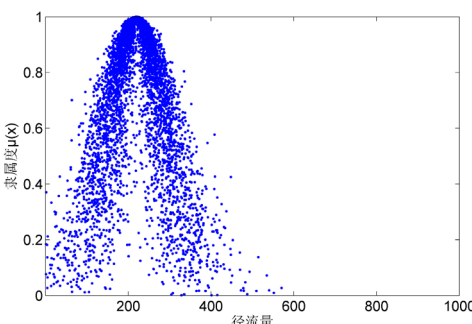


Figure 5. Membership cloud of runoff distribution in autumn
图 5. 流域秋季径流分布隶属云图

说明径流分布在该季节内的模糊性越大; 超熵 He 反映了在某个季节内, 径流分布的离散特性, 超熵越大, 说明径流分布的离散度越大, 即不均匀的稳定程度越低。

通过径流分布的隶属云图, 也可直观地认识不同季节的径流量分布特性。在四个季节中, 夏季的径流量明显多于其他季节, 且径流的不均匀性较大, 离散程度也较大。冬季的径流量最少, 且径流的不均匀性和离散程度也相对较小。春季与秋季相比, 径流量均值相当, 但从隶属云图看到, 春季的径流分布图中的云滴分布比较集中, 因此春季径流明显要比秋季径流稳定。因此, 在不同季节下, 夏季和秋季的径流量分布较为不均匀, 需要相关管理决策部门给予更多关注, 提高夏季和秋季的水资源管理和水灾害防御能力。

3.2. 基于云模型的径流量年际分布特征

以各水文站的年径流总量作为输入, 利用逆向云发生器算法, 计算径流量的年际分布云模型, 如表 2 所示。利用正向云发生器, 绘制相应的隶属云图, 分析径流年际分配特性, 如图 7 所示。

为了进一步分析径流量的多年分布特性, 从径流年际分布隶属云图可知, 以所选的 21 个水文站数据为基础, 年径流量的均值为 $979.54 \text{ m}^3/\text{s}$; 年际分布隶属云图中云滴分布较分散, 所覆盖的阈值较大, 一定程度上反映了径流年际分布的不均匀性特征。

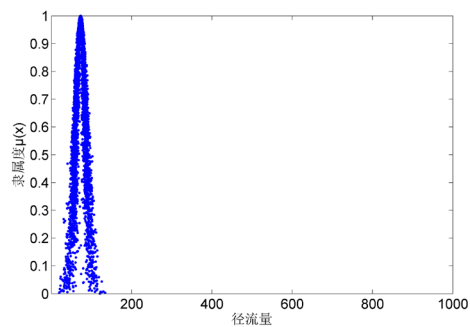


Figure 6. Membership cloud of runoff distribution in winter
图 6. 流域冬季径流分布隶属云图

Table 2. Membership cloud of annual runoff distribution (Unit: $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$)

表 2. 径流量的年际分布隶属云(单位: $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$)

时段	Ex	En	He
全年	979.54	171.06	64.79

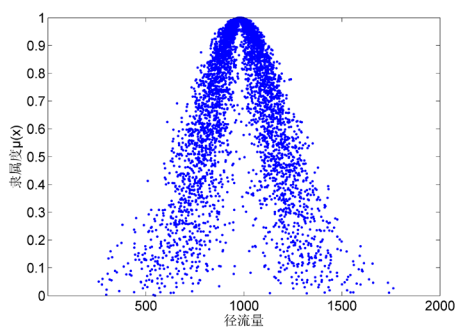


Figure 7. Membership cloud of annual runoff distribution
图 7. 流域径流年际分布隶属云图

3.3. 基于云模型的径流量空间分布特征

由本文所选 21 个水文站点(如图 1)的空间分布为基础, 以多年年径流量的平均值作为输入, 利用逆向云发生器算法, 计算年径流量的空间分布云模型, 如表 3 所示。利用正向云发生器, 绘制相应的隶属云图, 分析不同水文站的年径流量空间分布特性, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 在隶属云图中, 云的厚度较厚, 云滴分布非常离散, 因此径流量在空间上的分布具有更显著的非均匀性, 径流量在空间上的分布具有较大的不稳定性, 增加了在空间条件下水资源管理的难度。

4. 结论

探讨流域径流量在时空上的变化特性, 不仅是水资源利用管理的重要研究之一, 还对分析极端气候事件的变化趋势、洪旱灾害风险评估和水资源可持续利用等具有重要的科学意义。本文以 1956 至 2000 年西江流域 21 个水文站的实测径流量数据为基础, 利用云模型理论, 分析了西江流域径流量时空分布特性, 得出以下几个重要结论:

1) 夏季径流量较多, 径流分布最不均匀, 离散性最大; 冬季径流量最少, 而冬季径流分布较为稳定, 离散性最小。秋季径流量略多于春季, 但秋季径流量分布的模糊性和离散性都大于春季。

2) 与不同季节径流量分布特性相比, 流域径流量的年际分布的不均匀性较大, 云滴分布较分散。

3) 径流量空间分布隶属云图的云滴分布离散程度远大于时间尺度上的径流量分布隶属云图, 因此, 与径流量在时间尺度上的分布特性相比, 流域径流量

Table 3. Membership cloud of spatial runoff distribution in different stations (Unit: $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$)

表 3. 各站点年径流量空间分布隶属云(单位: $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$)

时段	E_x	E_n	H_e
全年	46.65	48.00	27.28

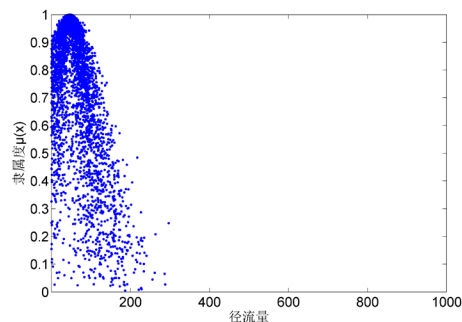


Figure 8. Membership cloud of spatial runoff distribution in different stations

图 8. 各站点年径流量空间分布隶属云图

在空间上的分布具有更大的不均匀性和不稳定性。

基于云模型的不确定性分析技术为气候水文要素的时空分布研究提供了一种新的方法与途径。通过一个具有期望、熵、超熵三个数字特征的云模型来表述径流量的时空分布特性, 综合考虑了径流量分布的平均值、模糊性和离散性, 使结果更加具有说服力, 同时决策者能更加客观地从多方面获得径流量分布不均匀性参数。本文对径流量在不同时空尺度下具有的不确定性进行了初步探讨, 通过云模型与流域水文要素的时空变化问题相结合, 对径流量在不同季节、不同年际、不同空间的分布特性进行了尝试应用。通过径流量云模型的熵值计算实现了对径流分布不均匀性的量化, 通过径流量云模型的超熵值计算实现了径流量分布稳定性的量化, 体现了基于云模型的径流量时空分布特性研究的优势所在, 从而提高了径流量时空分布特性研究的鲁棒性。

致谢

感谢第十一届中国水论坛推荐, 并感谢中山大学青年教师起步资助计划项目(项目编号: 37000-1188144)的支持。

参考文献 (References)

[1] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际

- 径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.
ZHANG Jianyun, ZHANG Silong, WANG Jinxing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese)
- [2] 张强, 孙鹏, 陈喜, 等. 1956~2000年中国地表水资源状况: 变化特性、成因及影响[J]. 地理科学, 2011, 31(12): 1430-1436.
ZHANG Qiang, SUN Peng, CHEN Xi, et al. Water resources in China from 1956 to 2000: Changing properties, causes and implications. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(12): 1430-1436. (in Chinese)
- [3] 王浩, 王成明, 王建华, 等. 径流时空分布理论及其在无定河流域的应用[J]. 中国科学, 2004, 34: 74-86.
WANG Hao, WANG Chengming, WANG Jianhua, et al. Temporal and spatial distribution law of runoff and the application in Wudinghe River Basin. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2004, 34: 74-86. (in Chinese)
- [4] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI Fengying. *Climatological statistical diagnosis and prediction technology*. Beijing: Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 汪丽娜, 陈晓宏, 李粤安, 等. 西江流域径流演变规律研究[J]. 水文, 2009, 29(4): 22-25.
WANG Lina, CHEN Xiaohong, LI Yuean, et al. Rules of runoff variation of Xijiang River Basin. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(4): 22-25. (in Chinese)
- [6] 冯国章, 李瑛, 李佩成. 河川径流年内分配不均匀性的量化研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(2): 50-53.
FENG Guozhang, LI Ying, LI Peicheng. Quantification of non-uniformity in annual distribution of stream flows. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2000, 28(2): 50-53. (in Chinese)
- [7] 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 Dedi, CHEN Xiaohong, LOU Zhanghua. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(7): 850-857. (in Chinese)
- [8] 李德毅, 杜鹄. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 4-11.
LI Deyi, DU Yi. *Artificial Intelligence with Uncertainty*. Beijing: Defense and Industry Press, 2005: 4-11. (in Chinese)
- [9] 钟鸣. 基于关联规则和云模型的水库诱发地震风险多层次模糊综合评价[D]. 博士学位论文, 华中科技大学, 2013.
ZHONG Ming. Multi-lever fuzzy comprehensive evaluation of reservoir induced seismic risk based on association rules and cloud model. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] 刘常昱, 李德毅, 杜鹄, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239.
LIU Changyu, LI Deyi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model. *Information and Control*, 2005, 34(2): 236-239. (in Chinese)