

分形在水文水资源水环境中的应用研究与展望

谢云霞, 靳玉芝

(四川理工学院理学院, 四川 自贡 643000)

摘要:较系统的论述了当前分形理论在水文水资源水环境中的应用,主要有:水文现象中分形特征的分析计算;分形在水文水资源评价、分类中的应用;分形在水文水资源水环境的预测中的应用。总结了分形理论在水文中应用存在的问题:分形特征分析较多,但应用到评价、分类中较少,特别是在水文预测上应用较少。提出了未来研究的展望:将分形理论应用到评价、预测中,并加强分形理论与其它理论、方法的比较和结合,为水文评价、预测提供一种新思路。

关键词:分形;水文;水资源;水环境

中图分类号:0415

文献标识码:A

引言

自然界存在大量分形现象。水文水资源水环境系统由于受到各种复杂因素的影响,具有复杂性、不确定性。很多水文现象比如降雨、径流、河网结构等,都具有自相似性,具有分形特征。据此,可以用分形理论对具有分形特征的水文现象进行评价、分类,并进一步的进行预测。所以,将分形理论应用到水文水资源水环境中来,必将为探索水文现象提供一种新方法、新途径,从而促进水文水资源水环境科学的发展。同时,分形水文的发展,也反过来丰富了分形理论的内容,成为分形理论应用的一个重要分支。

对于分形,目前还没有一个统一的定义。分形原意是破碎的、不规则的、复杂的。分形体的重要特征是具有自相似性,存在无标度区间,维数是分数。分形维数(分维)是描述分形集几何特征的定量参数,Mandelbrot首次给分形下定义就是从其维数开始的: Hausdroff 维数大于拓扑维数的集合,称为分形。围绕 Hausdroff 维数,引申出很多新的维数概念,主要有盒子维数(网格维数、容量维数)、信息维数、谱维数、关联维数等。这些分维从不同的角度反映了研究对象的属性。

水文现象的自相似性给分形理论研究提供了课题,另一方面分形又会促使地理水文科学理论研究的发展。因此通过河流形态及水文现象时空变化的分形研究,无

疑会对解决水文尺度、水文趋势预测、分类评价、区域划分,以及整个地理水文科学研究提供一条新的途径。分形在水文水资源水环境中的应用主要包括:水文现象的分形特征的分析、计算;分形评价、分类;分形预测等。

1 水文现象分形特征的分析、计算

1.1 流域地貌、水系的分形特征

分形理论在水文学中的早期应用,主要是分析流域地貌、水系的分形特征(空间分形)。分形分析为流域水文学提供了新的研究方法。许多学者研究了流域形态的分维,比如:傅军^[1]等对嘉陵江流域形态及流量过程分维进行了研究。冯平^[2]等运用分形的基本定义及河系定律探讨了河长和河网结构的分维。海河水系河长的分维在 1.01 ~ 1.14 之间,河网的分维在 1.50 ~ 1.69 之间。随着其它学科的发展,分形的应用也不断被更新。王秀春^[3]等应用地理信息系统(GIS)提取河流信息,并在此基础上改进了传统的计盒方法,将其应用于径河流域水系分形分析。分析表明水系分维反映了水系分布的复杂程度,它与研究区域的环境状况有很大关系。基于 GIS,有人给出水系分维的一种新算法:矢量计盒维数法。沈中原^[4]等应用分形布朗运动(FBM)理论,建立了流域地貌形态 FBM 分维数的计算模型。以大理河流域六条子流域为例进行计算,利用这个方法可以进行不同像元尺度下地貌形态特征的比较与评价。

1.2 降雨和径流的分形特征

大量的研究表明,降雨的时空分布具有分形特征。Lovejoy 和 Schertzer^[5]用计盒维数法计算了降雨场的分维。Svensson^[6]等计算了淮河和瑞典两个不同气候条件下日降雨过程的多重分形谱。常福宣^[7]等以四川成都站的长期暴雨资料按分形理论作了分析,结果表明:暴雨强度随历时变化具有多标度性质。张建龙^[8]等运用分形理论的盒子维数,对湖北荆州市的多年月降水进行了分形研究,利用维数的大小来衡量流域降雨的丰枯特征。

对于径流序列的分形研究也是很多的。很多种分形维数的计算方法被用于分析径流序列等的分形特征。比如:傅军^[1]利用 G-P 算法计算了日流量过程的分形维数。刘德平^[9]运用分形理论研究了长江汉口站 4 个大洪水年份的逐日平均水位、流量过程线形态特征。运用分形理论中的分维数 D 和引入的形状因子 a 来描述水文过程线形态特征,并分析了各大洪水年份上述特征的差异。丁晶^[10]等用盒子维数法计算了汛期日流量过程线的分形维数。王文圣^[11]等用小波分析方法计算了水文序列的分形维数。张晓伟^[12]等运用 R/S 分析法,分析了和田绿洲的水文气象要素的分形特征,用分形维数来描述水文要素时间尺度上的复杂性。

1.3 分形理论在水文尺度变换中的应用

丁晶^[13]讨论了水文尺度分析的主要新途径:以分形理论为基础的尺度分析。王卫光^[14]分析了不同时间尺度降雨量间的分解系数序列的关联维数,实现了降雨量降尺度分析。周玉良^[15]为建立不同时空尺度降雨间的联系,研究了基于多重分形的降雨时空解集模型。

此外,分形理论在水文的其它方面也有比较广泛的应用。在对地下水、土壤水、下渗现象的研究当中,分形理论发挥了积极的作用。现在分形理论在生态水文学中的应用也日渐成为一个新的分支。

2 分形在评价、分类当中的应用

分维作为复杂程度的定量描述,将分维应用于评价、分类中的例子还是不少。分形理论在水文水资源水环境评价中的应用近年也开始发展起来。

根据应用的情况,大体可以分为三种情况。一种情况就是直接根据某个指标的分维进行分类。比如:吴佳鹏^[16]等求出了雅砻江锦屏二级电站猫猫滩闸址处典型年天然月平均流量和人工调节下泄的月平均流量过程线的分维,分析了不同典型年天然和人工调节二者流量过程的特征差异,由此来评价工程建设对水文情势的影响;庞大鹏^[17]等通过岩体结构面网络的分维值来评价岩

体的质量;李林兵^[18]等用尺度变换法求容量维数,将年内河流生态径流过程一共分为六个分期。由生态径流法来分析人类活动和气候变化,导致径流过程改变对生态系统影响的程度。

还有一种情况是先计算各指标分维,再利用模糊理论等进行评价,如:刘光萍^[19]等通过计算单个水质指标的分维数,由最大似然分类原则确定单个水质指标的评价分维指数,并采用加权平均法求算湖泊富营养化多个水质指标的综合评价级别;孙顺利^[20]等将生态系统划分为不同的子系统,计算各指标的分维,按照评价指标隶属度计算方法,采用三层次模糊综合评价方法对生态系统健康现状进行评价。谢云霞^[21]等计算了城市洪涝易损性各指标因子的分维,再以此为权重,结合模糊集对分析法对湖南省 29 个城市进行了洪涝易损性评价,取得了较好的结果。

还有另一种情况是先构建评价指标体系,然后根据分维来进行评价,比如:陈康宁^[22]等首先构建了区域水资源系统脆弱性评价指标体系,然后运用分形理论找出反映系统整体演化趋势的序参量,对河北省区域水资源系统的脆弱性进行了评价;郑淑蓉^[23]等也是首先建立虚拟商店绩效评价指标体系,然后采用分形理论方法,来研究虚拟商店绩效评价的模型。

还有人通过计算容量维数将分形理论用于洪水分期^[24-25]等。总之分形理论在分类、评价中的应用很广。但是各种评价使用的具体方法又各不相同,有的是通过计算关联维数,有的通过计算盒维数,也有的通过建立分形评价指标。

以上各种分形评价的方法,都还缺乏足够的依据。总的来说,分形评价还处于探索阶段,究竟那种方式更好,还有待进一步分析,检验。可根据不同的评价对象,选用不同的分形评价方法。所以将分形用于水文水资源评价还有很多工作可做。

3 分形预测

预测是水文科学中的一个重要问题。目前用于预测的方法很多,有模糊预测、灰色预测、神经网络预测、混沌预测等,但是各种方法预测结果差别很大。相比其他各种预测方法而言,分形用于水文预测并不多。但是,也有不少人利用分形的自相似性,在其它预测领域进行了不懈的探索。目前,将分形应用于预测主要有这 3 种情况:

一是直接根据分维进行预测预报,比如庞大鹏^[17]等通过岩体结构面网络的分维值来预测岩体质量;李仓松^[26]等为进一步提高岩溶地质预报的准确性,将分形理

论应用于岩溶地质预报,将岩溶元概念用于描述岩溶发育的分形生长过程,计算了岩溶元的分形生长维数和岩溶发育的分形评价指数,据此对岩溶发育程度进行判别效果较好。研究成果为应用分形理论进行岩溶地质预报奠定了理论基础。

二是根据变维分形进行预测,比如付显华^[27]用分段变维分形方法分析了西北太平洋某处月平均海面水温资料,给出各年分形分布的平均分维。并给出了某些情况下适用的,根据任一点处 1~8 月月平均水温预测 9~12 月月平均海面水温的方法;王英华^[28]等建立改进的变维分形预测模型,并以白莲崖拱坝温度监测数据为例进行分析、预测。结果证明,这种模型能较好应用于小数据量监测数据的预测,精度较高,有着良好的抗噪性;Jun Wu^[29]等应用变维分形对水质时间序列进行了预测,结果表明这种方法优于 AR 模型和灰色模型。

三是用分形插值方法进行预测,该方法根据分形拼贴定理,求取一个与历史记录相近的吸引子的迭代函数系统来求取分形插值函数;通过分形插值函数的迭代生成建立预测模型。这也是应用最广的分形预测方法。比如 Smith K T^[30]等讨论了分形插值方法在降雨实时预测中的应用;梁平^[31]、李翔^[32]等分别用分形插值方法对电力负荷进行预测;张东明^[33]等对用分形插值函数法来预测预报地表下沉进行了研究;陈鹏^[34]等构造了具有外推功能的分形插值算法,实现交通事故预测;刘起方^[35]等通过组织历史数据建立 IFS 迭代函数系统,经分形插值方法求取吸引子并在吸引子基础上进行延拓,建立了基于分形插值的径流预测模型。通过实际验证表明该预测模型取得了较好的结果,满足实际应用要求。也还有人提出了基于分形拼贴定理和分形插值函数迭代生成过程的需水量预测方法。

4 问题和展望

(1) 各种分维的定义不同,因此算出来的维数值不同。可以进一步研究各种维数之间的联系、区别。讨论能否找出一个普适的公式,这个公式包含了所有分维。还可以进一步改进计算分维的方法,比如与其它方法相结合来找出更方便、快捷、物理意义更明确的分维计算方法。

(2) 从前面分形在水文中的应用来看,大多应用只是根据单一分形(简单分维)来计算、分析、评价等。但是这种单一分形,只是对具有分形结构的复杂体的一个简单的、整体上的、平均程度的描述。仅从单一分维无法得知研究对象的精细结构,可以将多重分形的思想更多的应用起来,对水文现象等进行更精确的描述、处理。

(3) 分形在水文分析中的应用较多,但是用于水文评价却较少。根据水文现象的自相似性,可以进一步探索分形在水文水资源评价中的应用。

(4) 分形在预测方面的应用还不是很多,可以多开展一些这方面的工作。比如说和其它预测方法进行比较、和其它方法耦合。

参考文献:

- [1] 傅军,丁晶,邓育仁.嘉陵江流域形态及流量过程分维研究[J].成都科技大学学报,1995(1):74-79.
- [2] 冯平,冯炎.河流形态特征的分维计算方法[J].地理学报,1993,52(4):324-330.
- [3] 王秀春,吴姝,毕晓丽,等.泾河流域水系分维特征及其生态意义[J].北京师范大学学报:自然科学版,2004,40(3):364-368.
- [4] 沈中原.流域地貌形态分形布朗运动(FBM)分维数研究[J].西安建筑科技大学学报,2007,39(5):711-714.
- [5] Lovejoy S, Schertzer D, Tsonis A A. Functional box-counting and multiple elliptical dimensions in rain[J]. Science,1987,235:1036-1038.
- [6] Svensson C, Olsson J, Berndtsson R. Multifractal properties of daily rainfall in two different climates[J]. Water Resour Res,1996,32(8):2463-2472.
- [7] 常福宣,丁晶,姚健.降雨随历时变化标度性质的探讨[J].长江流域资源与环境,2002,11(1):79-83.
- [8] 张建龙,韩宇平,申瑜.分形理论在降雨研究中的应用[J].东北水利水电,2007,25(7):6-9.
- [9] 刘德平.分形理论在水文过程形态特征分析中的应用[J].水利学报,1998(2):20-25.
- [10] 丁晶,刘国东.日径流过程分维估计[J].四川水力发电,1999,18(4):74-76.
- [11] 王文圣,向红莲,赵东.水文序列分形维数估计的小波方法[J].四川大学学报:工程科学版,2005,37(1):1-4.
- [12] 张晓伟,沈冰,孟彩侠.和田绿洲水文气象要素分形特征与 R/S 分析[J].中国农业气象,2008,29(1):12-15.
- [13] 丁晶,王文圣,金菊良.论水文学中的尺度分析[J].四川大学学报,2003,35(3):9-13.
- [14] 王卫光,张仁铎.基于混沌理论的降雨量降尺度方法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(6):129-132.
- [15] 周玉良,陆桂华,吴志勇,等.基于多重分形的降雨时空解集研究[J].四川大学学报:工程科学版,2010,

- 42(2):26-33.
- [16] 吴佳鹏,陈凯麒.分形理论在水文情势影响评价中的应用[J].水电能源科学,2008,26(1):37-39.
- [17] 庞大鹏,陈剑平,丹微.节理网络分形在隧道超前地质预报中的应用[J].岩土力学,2009,30(5):1415-1420.
- [18] 李林兵,穆秀云,于国荣,等.径流过程改变对生态系统的影响[J].东北水利水电,2009,27(2):57-61.
- [19] 刘光萍,杜萍,王琨.分形理论在湖泊富营养化评价中的应用[J].江西农业大学学报,2005,27(6):925-930.
- [20] 孙顺利,周科平,胡小龙.基于分形理论的矿区生态系统稳定性评价[J].安全与环境工程,2007,14(4):1-4.
- [21] 谢云霞,王文圣.城市洪涝易损性评价的分形模糊集对评价模型[J].深圳大学学报:理工版,2012,29(1):12-17.
- [22] 陈康宁,董增川,崔志清.基于分形理论的区域水资源系统脆弱性评价[J].水资源保护,2008,24(3):24-27.
- [23] 郑淑蓉,马伟.基于分形理论的虚拟商店绩效评价研究[J].天津商业大学学报,2010,30(1):62-66.
- [24] 侯玉,吴伯贤,郑国权.分形理论用于洪水分期的初步探讨[J].水科学进展,1999,10(2):140-143.
- [25] 方崇惠,雒文生.分形理论在洪水分期研究中的应用[J].水利水电科技进展,2005,25(6):9-13.
- [26] 李苍松,高波,梅志荣.岩溶地质预报的分形理论应用基础研究[J].西南交通大学学报,2007,42(5):542-547.
- [27] 付昱华.分形方法分析和预测月平均海面水温[J].海洋预报,1995,12(1):49-54.
- [28] 王英华,秦鹏,陈斌.基于改进变维分形理论的拱坝温度监测数据预测模型[J].长江科学院院报,2009,26(12):33-35.
- [29] Wu Jun, Lu Jian, Wang Jiaquan. Application of chaos and fractal models to water quality time series prediction[J]. Environmental Modelling & Software, 2009(24):632-636.
- [30] Smith K T, Austin G L. Nowcasting precipitation — a proposal for a way forward[J]. Journal of Hydrology, 2000,239: 34-45.
- [31] 李翔,关勇,乔艳芬.基于分形理论的电力负荷持久性分析及预测[J].电网技术,2006,30(16):84-88.
- [32] 梁平,樊福梅,吕玉坤.电力系统负荷分形预测及R/S分析[J].华北电力大学学报,2004,31(4):32-35.
- [33] 张东明,尹光志,代高飞.地表下沉的分形特征及其预测[J].成都理工大学学报:自然科学版,2003,30(1):92-95.
- [34] 陈鹏,李旭宏,孙华灿.基于分形理论的交通事故分析[J].公路交通科技,2008,25(3):130-133.
- [35] 刘起方,马光文,刘群英,等.基于分形插值理论的径流预测探讨[J].水力发电学报,2008,27(4):20-25.

Application of Fractal Theory to Hydrology, Water Resources and Water Environment

XIE Yun-xia, JIN Yu-zhi

(School of Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: The application of fractal theory in many aspects to hydrology, water resources and water environment is discussed systematically. It includes the application of fractal theory in the analysis and calculations to hydrology, the application of fractal theory in the assessment, the application of fractal theory in the forecast. The problems of fractal applications in hydrology are summarized: more fractal analysis, but less application in evaluation and classification, especially application in the hydrological forecast fractal theory is seldom used. Prospects for future research are proposed: paying more attention to the study of application of fractal theory to the hydrological evaluation and prediction, and to strengthen the comparison and combination between fractal theory and other methods, providing a new idea of the hydrological assessment and prediction.

Key words: fractal; hydrology; water resources; water environment