

分形理论在水文水资源中的应用

张少文^{1,3}, 王文圣¹, 丁晶¹, 常福宣²

(1 四川大学水电学院, 四川 成都 610065; 2 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 3 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要: 较系统地论述了分形理论在水文水资源中的应用。主要包括: 水系河网结构和流域地形地貌及其演变, 河床表面形态, 降水时空分布, 洪水时空变化, 径流过程和土壤水下渗等。概括了当前在应用中的特点: 活跃思想和方法创新, 同时指出值得注意的问题: 在大量资料基础上进行深入分析和充分论证。

关键词: 分形理论; 分形方法; 水文水资源

中图分类号: P343; S152.7; TV211

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2005)01-0141-06

分形理论是一种新兴理论, 具有较大的应用潜力, 在自然科学和社会科学领域均有不同程度的应用^[1]。本文重点论述分形理论在水文水资源中的应用。分形理论在水文水资源中的应用主要包括: 水系河网结构和流域地形地貌及其演变; 河床表面形态; 降水时空分布; 径流过程分形特征; 暴雨时空分布; 洪水时空变化; 土壤水下渗等。

1 水系河网结构和流域地形地貌及其演变

Horton^[2,3]定律表明流域的河网是一个自相似的分形集。因此, 近二三十年来一大批水文学家运用分形理论对流域河网结构和流域地形地貌进行研究^[4~9]。20世纪60年代以来, 水系的定量研究十分活跃, Leopold、Langbein、Shreve、Smart 和 Scheidegger 等工作, 使水系性质的研究取得了长足进展, 新成果、新方法不断出现^[9]。1989年, Gupta 对 Shreve 等提出的水系形成与发展的随机过程进行了分析, 从数学上证明了在一定尺度上可能存在自相似性^[10]。罗文峰等研究了分枝结构的分形特征, 讨论了在河网中的意义^[11]。Hjelmfelt 从 McDeermott 关于主河道长度与流域面积比的经验公式推出了长度与面积之间的分形幂率关系^[9]。Robert 和 Roy 对23个小流域的资料分析表明, 地图扭曲影响和河道分形结构均对 b 值有贡献^[12]。Barbera 等假设 Horton 长度比和分枝比在所有尺度上保持不变, 推出了一个理论上的河道分维公式^[5], 洪时中等也导出类似的公式^[13]。Rosso 等从 Mandelbrot 模型推出了主河道长度与流域面积的分形关系^[14]。Nikora 认为 Hack 定律中幂指数 b 与气候、地质条件、流域形状、集水区宽度的非线性特征有关^[15]。李后强等给出了一个联系水系级别与分形维数的关系式^[16]。冯平等分析了海河水系的分形特征^[17]。傅军等研究了嘉陵江流域河网的分形特征^[18]。Rodriguez-Iturbe 等运用矩法研究了意大利北部一个 $2\,200\text{ km}^2$ 的流域, 计算了其多重分形谱^[8]。Manani 等研究了水系结构、地貌与流域水文响应之间的关系, 把水系、流域面积和分维结合起来描述流域的几何特性, 用一个基于 Peano 构造的严格自相似理想水系的水文响应给出了水系多重分形实例。

Rodriguez-Iturbe、Rinaldo 等根据能量最小原理, 通过极小化流域系统整体和部分的能量消耗率得到的模拟水系称为最优河道网络(Optimal channel network, OCN), 把 OCN 与天然流域的 DEM 进行了对比研究, 通过模拟形象地说明 OCN 将自动地从任意初始条件演化到具有分形特征的网络^[2]。这隐含着临界自组织(Self-Organization Criticality, SOC)可能刻画了天然河网形成的动力学。水流侵蚀在河流形成过程中起着重要作用, 可以用 SOC 的概念来描述流域地貌的形成与演化^[3], 因此水系河网结构和流域地貌表现出分形特征^[2~10, 20~25]。由于

收稿日期: 2003-11-25; 修订日期: 2004-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271024; 50249024; 50239050)

作者简介: 张少文(1960—), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水利水电工程的规划与设计工作。

流域形成的分形特征, 流域的流量和能量也表现出分形特征, 其分布形式为幂律形式的双曲型分布^[26~28]。

2 河床表面形态

在河床表面形态方面, 金德生等采用分形粗视化对黄河下游及长江中下游深泓纵剖面进行了研究, 发现其具有分形特征, 分维与河床纵坡降和能量有关, 分维可以刻画河流纵剖面发育的复杂程度^[29]。王协康等在分析非均匀沙河床颗粒随机分布基础上对床面颗粒暴露度函数关系进行分析, 通过简化颗粒的排列方式, 研究了非均匀沙河床的分形特征^[30]。Nikora 研究了地貌齐性河段(MHRS)平面形态的分形特征^[15], Nikora 和 Sapozhikov 提出了分析河道自相似性和自仿射性质的新方法^[31, 32], 并用这一方法来研究辫状河道的平面形态^[33~36]。同样地, 针对河道表面形态的分形特征, 自组织临界性思想被引入其演变过程来解释其分形特征^[37]。Murray 从水流与泥沙输移的角度提出辫状河流元胞自动机模型^[9], 并对阿拉斯加的 Aichilik 河进行了研究, 通过理论与实验对照, 比较了河流泥沙输移时间序列的功率谱, 两者十分相似且与自组织临界过程一致。姚令侃、方铎讨论了非均匀沙河床的自组织临界性, 应用重正化群理论对形成河床抗冲粗化临界覆盖面积率进行了推导^[38]。

3 降水的时空分布

研究降水时空分布的一个方面是对其进行分形分析, 计算其分形维数或多重分形谱。1987 年, Lovejoy 等用计盒数法计算了降水场(空间分布)的盒子维数^[39]。运用这一方法, 其他一些学者计算了降水在时间或空间上分布的分形维数^[40~42], 对降水时空分布的分形性质作了更深入的研究。通过研究发现, 仅仅用一个维数来刻画复杂的降水在时间上或空间上的分布是不够的, 因为分布表现出多重分形的特征, 需要进一步计算多重分形谱来刻画复杂精细结构^[40~42]。Svensson 等计算了在季风气候地区(中国淮河)和温带地区(瑞典)两个不同气候条件下日降水过程的多重分形谱^[43]。Lima 等计算了半干旱地区(葡萄牙)日降水过程和 15 min 分辨率下的降水过程多重分形谱^[44]。针对降水时空分布的分形特征, Waymire 讨论了降水场的尺度问题与自相似性^[45]。Lovejoy 和 Schertzer 讨论了天气中的广义标度不变性和降水分形模型^[47]。Rodriguez-Iturbe 等研究了尺度对降水过程的影响并讨论了降雨过程的标度性质^[28, 47~50]。此外, Kumar 等还将分形方法与小波方法结合起来, 分析了降水场中不同尺度分量的自相似性^[51, 52]。

此外, 对降水极值量(暴雨)分形性质进行研究。1997 年 Koutsoyiannis 和 Foufoula-Georgiou 建立了暴雨过程的单标度模型来研究暴雨的时间分配性质^[53]。对暴雨强度与时间尺度的关系(即暴雨强度-历时-频率关系, 或暴雨公式), 1996 年 Burland 和 Kosso 将标度不变性的假设引入暴雨公式, 并建立了对数正态分布模型^[54]。1999 年 Menabde 等又建立了暴雨公式的极值分布模型^[54]。2002 年常福宣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, 传统的暴雨公式是暴雨在时间尺度上标度特性的表示^[55]。Michele 等在分形理论的基础上, 结合动力相似的原理推导出暴雨随面积而变的折减系数公式^[56]。

4 洪水时空变化

在空间分配上, 主要集中于极值量(洪水)的研究, 即洪水区域分析。1990 年 Gupta 和 Waymire 将标度不变性的假设引入了洪水区域分析^[57]; 1992 年, Smith 建立了对数正态分布模型来表示洪水分布与流域尺度之间的关系^[58]; 1994 年, Gupta 等更进一步建立了适用范围更广的对数 Levy 分布(对数正态为其特例)模型^[59~61]。针对洪水空间分布的分形特征, 影响因素(如气候、地形)的作用也是研究的一个内容^[62, 63]。关于洪水在时间上的分配, 即洪水随历时变化规律的研究, 常福宣等作了开创性的工作, 获得了有意义的结果, 在一定的历史范围内, 大流域洪水的洪量具有单标度性质, 由洪量随历时变化的标度性质, 建立了洪水强度历时公式^[64]。此外侯玉等首次尝试将分形理论用于洪水分期的研究^[65]。

5 径流过程

径流在时间分配上,一个方面计算径流过程的分形维数,另一方面从时间序列的角度建立时间序列模型。1999年,丁晶和刘国东用盒子数法计算了汛期日流量过程线的分形维数^[69]。1998年,刘德平用盒子数法计算了日流量过程线的分形维数,并讨论了分维与形状因子的关系^[67]。1995年,傅军等针对径流过程的混沌特征用G-P算法计算了日流量过程的分形维数^[68]。1998年,李贤彬用小波分析法计算了汛期日流量过程的分形维数^[69]。径流时间序列模型的研究最早可追溯到1981年分形理论的创始人Mandelbrot对于Hurst现象的解释^[70,71],并将布朗运动进行扩展,建立了分数布朗运动随机模型来模拟年径流序列。1997年,日本的Tokinaga等将分形与小波方法结合起来对具有分形特征的时间过程进行预报^[72],李贤彬将之运用于汛期日径流过程的预报^[69]。常福宣利用金沙江屏山站和岷江紫坪铺站日径流资料,全面分析了日径流过程的分形特性。结果发现,单一的分形维数不能完全描述日流量在时间上的分布特性,必须应用多重分形法来研究径流过程特征^[73]。另外,冯平、王利华等就径流长期过程,探讨了水文干旱的分形特征^[74,75]。

6 土壤水和下渗

土壤水和下渗中的分形问题也是目前研究的一个热点。这包括湿地的分布、土壤分形结构和水分在分形介质中的运动等方面。2000年,Tchigurinskaia等分析了湿地地形的单分形和多分形性质,并用对数Levy串级倍增模型来进行模拟^[76]。1997年,Molz等对水力传导度(渗透系数)的空间分布的分形性质进行了研究^[77]。1998年,Lovejoy等研究了多重分形介质中的扩散运动^[78]。徐永福等研究了土壤的分形结构及其性质^[78,79]。此外,Loague、Grayson、Molz和Merz等还研究了土壤水、下渗和地下水的尺度对产汇流过程的影响^[79-84]。

7 结 论

分形理论在水文水资源中的应用是相当广泛的,但归结起来有下述特点:随着分形理论的引入,出现了一些新的分析思路和与传统迥异的计算方法,活跃了水文水资源界的学术思想。例如,分维数的引入,以定量指标客观地表征水文过程线的变化特征,从而改变了传统分析中对过程线无法定量只能作定性分析的观点。又如在分形理论基础上尝试崭新水文预测法和分期洪水分析法。显然,新思路和新方法丰富了学科的内容,促进了学科发展。随着分形理论的引入,对传统的计算方法和公式有了新的认识。在水文水资源中有不少计算公式是建立在大量资料基础上的经验性公式。由于分形理论的应用,人们以新思维寻求某些经验公式的分形理论基础,结果不仅加深了对这些公式的认识而且提高了实用性。例如,长期使用暴雨随历时递减的暴雨计算公式一直是源于实测资料的分析、计算和拟合。但在分形理论的指导下,推导出暴雨计算公式并最终发现暴雨衰减指数实际上就是分形理论中的标度指数。类似的例子还可举出洪峰随面积变化的经验公式。

从总体而言,尽管分形理论在水文水资源中的应用相当广泛,但是在深度上是远远不够的,这方面值得注意的几个问题是:

(1) 当前,应用的主要特点是简单地将分形分析技术和方法移用于研究水文水资源问题。对于移用条件,适用范围和结果合理性等方面,分析不够完善和深入。

(2) 在应用中虽然注意以实际水文资料作为分析的依据;但应用资料数量有限,代表性不够。获得的结论不可避免带有一定的局限性。

(3) 在将分形技术和方法用于水文水资源现象分析和计算的合理性方面,一般而言,都是定性分析辅以定量说明,迄今缺乏通过水文水资源现象的成因机制从物理基础角度进行完善论证。

总之,为了进一步推广分形理论在水文水资源中的应用,不断提高实用性,在这一领域进行深入研究是非常必要的。可以预见,随着研究成果的不断丰富,和实际应用的逐步普遍,一门新兴的分支学科——分形水文水资源,可能会问世。

参考文献:

- [1] 李后强, 程光钺. 分形和分维[M]. 成都: 四川教育出版社, 1990. 5—8.
- [2] Rodriguez-Iturbe Rinaldo A. Fractal river basins: Charge and self-organization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 99—190.
- [3] Book review: Scale dependence and scale invariance in hydrology[J]. Hydrological Sciences Journal, 2000, 45(1): 164—165.
- [4] Fiedler D, Zhang Y. Fractal aspects of swiss landscape[J]. Physica A, 1992, 191: 213—219.
- [5] Barbera L, Rosso R. On fractal geometry of river networks[J]. Water Resour Res, 1989, 25(4): 735—741.
- [6] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. The fractal nature of river networks[J]. Water Resour Res, 1989, 24(8): 1317—1322.
- [7] Mccherhar A I, Ibbitt R B, Brown S L R, *et al.* Data for Ashley river to test channel network and river basin heterogeneity concepts[J]. Water Resour Res, 1998, 34(1): 139—142.
- [8] Rodriguez-Iturbe M, Marani R, Rigon A Rinaldo. Self-organized river basin landscapes: fractal and multifractal characteristics[J]. Water Resour Res, 1994, 30(12): 3531—3539.
- [9] 汪富泉. 泥沙运动及河床演变的分形特征与自组织规律研究[D]. 成都: 四川大学, 1999. 9—110.
- [10] Gupta V K. Statistical self-similarity in river networks parameterized by elevation[J]. Water Resources Bulletin, 1989, 25(3): 72—75.
- [11] 罗文锋, 李后强, 丁 晶, 等. Horton 定律及枝网络结构的分形描述[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 118—123.
- [12] Robert A, Roy A G. On the fractal interpretation of the main-stream length-drainage area relationship[J]. Water Resour Res, 1990, 26(9): 839—842.
- [13] 洪时中, 洪时明. 地质领域中的分维研究: 水系、地震及其他[J]. 大自然探索, 1998, 7(2): 90—98.
- [14] Rosso R, Bacchi B, Barbera P L. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks[J]. Water Resour Res, 1991, 27(3): 381—387.
- [15] Nikora V. Fractal structures of river plan forms[J]. Water Resour Res, 1991, 27(6): 1327—1333.
- [16] 李后强, 艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模型[J]. 自然杂志, 1992(7): 516—519.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Marani A, Rigon R, Rinaldo A. A note on fractal channel networks[J]. Water Resour Res, 1991, 27(12): 3041—3049.
- [20] Rigon R, Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I, *et al.* Optimal channel networks: a framework for the study of river basin morphology[J]. Water Resour Res, 1993, 29(6): 1635—1646.
- [21] Howard A D. Theoretical model of optimal drainage networks[J]. Water Resour Res, 1990, 24(9): 2107—2117.
- [22] Rigon A, Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I. On landscape self-organization[J]. J Geophys Res, 1994, 99(11): 993—998.
- [23] Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I, Rigon R, *et al.* Self-organized fractal river network[J]. Phys Rev Lett, 1992, 70(1): 822—826.
- [24] Sun T, Meadek P, Jossang T. A minimum energy dissipation model for river basin geometry[J]. Phys Rev E, 1994, 49(6): 4865—4872.
- [25] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. Scaling and elevation in river networks[J]. Water Resour Res, 1989, 25(9): 3037—3039.
- [26] de Vries H, Becher T, Echhardt B. Power law distribution of discharge in ideal networks[J]. Water Resour Res, 1994, 30(12): 3541—3543.
- [27] Rodriguez-Iturbe I, Ijjasz-Vasquez E, Bras Tarboton D G. Power law distribution of discharge and energy in river basins[J]. Water Resour Res, 1992, 28(4): 1089—1093.
- [28] Wharton G, Tomlinson. Flood discharge estimation from river channel dimensions: results of application in Java, Burunda, Ghana and Tanzania[J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(1): 97—110.
- [29] 金德生, 陈 浩, 郭庆伍. 河道纵剖面分形—非线性形态特征[J]. 地理学报, 1993, 52(2): 154—161.
- [30] 王协康, 方 铎, 姚令侃. 非均匀沙床面粗糙度的分形特征[J]. 水利学报, 1999(7): 70—74.
- [31] Nikora V I. Fractal structures of river plan forms[J]. Water Resour Res, 1991, 27(6): 1327—1333.
- [32] Nikora V I, Sapozhnikov V B, Noever D A. Fractal geometry of individual river channels and its computer simulation[J]. Water Resour Res, 1993, 29(10): 3561—3568.
- [33] Nikora V I, Sapozhnikov V B. River network fractal geometry and its computer simulation[J]. Water Resour Res, 1993, 29(10): 3569—3575.
- [34] Sapozhnikov V B, Foufoula-Georgiou E. Self-affinity in braided rivers[J]. Water Resour Res, 1996, 32(5): 1429—1439.
- [35] Foufoula-Georgiou E, Sapozhnikov V B. Anisotropic scaling in braided rivers: an integrated theoretical framework and results from application to an experimental river[J]. Water Resour Res, 1998, 34(4): 863—867.

- [36] Nykane D K, Foufopula-Georgou E, Sapozhnikov V B. Study of spatial scaling in braided river patterns using synthetic aperture radar images [J]. *Water Resour Res*, 1998, 34(7): 1795—1807.
- [37] Foufopula-Georgou E, Sapozhnikov V B. Do the current landscape elevation models show self-organizaed criticality ? [J]. *Water Resour Res*, 1996, 32(4): 1109—1112.
- [38] 姚令侃, 方 铎. 非均匀自组织临界性及其应用研究 [J]. *水利学报*, 1997(3): 26—23.
- [39] Lovejoy S, Schertzer D, Tsonis A A. Functional box- counting and multiple elliptical dimensions in rain[J]. *Science*, 1987, 235: 1036—1038.
- [40] Olsson J, Niemczynowics J, Berndtsson R. Fractal analysis of high-resolution rainfall time series[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(12): 23265—23274.
- [41] Sivakumar B. A preliminary investigation on the scaling behaviour of rainfall observed in two different climates[J]. *Hydrological Sciences-Journal*, 2000, 45(2): 203—219.
- [42] Lin Shu-chen, Liu Chang-ling, Lee Tzong-yearng. Fractal of rainfall: identification of temporal scaling law[J]. *Fractals*, 1997, 7(2): 123—131.
- [43] Svensson C, Olsson J, Berndtsson R. Multifractal properties of daily rainfall in two different climates[J]. *Water Resour Res*, 1996, 32(8): 2463—2472.
- [44] de Lima M I B, grasman J. Multifractal analysis of 15-min and daily rainfall from a semi-arid region in Portugal[J]. *J Hydrol*, 1999, 217: 1—11.
- [45] Waymire E. Scaling limits and self-similarity in precipitation fields[J]. *Water Resour Res*, 1985, 21(8): 1272—1281.
- [46] Foufopula-Georgou E, Gupta V V K, Waymire E. Scaling considerations in the modeling of temporal rainfall[J]. *Water Resour Res*, 1984, 20(11): 1611—1619.
- [47] Lovejoy S, Schertzer D. Generalized scale invariance in the atmosphere and fractal models of rain[J]. *Water Resour Res*, 1985, 21(8): 1233—1256.
- [48] Keden B, Chiu L S. Are rain rate processes self-similar? [J]. *Water Resour Res*, 1987, 23(10): 1816—1818.
- [49] Zawadzki I. Fractal structure and exponential decorrelation in rain[J]. *J Geophys Res*, 1987, 92(8): 9586—9590.
- [50] Waymire E, Gupta V, Rodriguez-Iturbe I. A spectral theory of rainfall intensity at the meso- β scale[J]. *Water Resour Res*, 1984, 20(10): 1453—1465.
- [51] Kumar P, Foufopula-Georgou E. A Multicomponent decomposition of spatial rainfall fields 1. Segration of large- and small-scale features using wavelet transoms[J]. *Water Resour Res*, 1993, 29(8): 2515—2532.
- [52] Kumar P, Foufopula-Georgou E. A Multicomponent decomposition of spatial rainfall fields 2. Self-similarity in fluctuations[J]. *Water Resour Res*, 1993, 29(8): 2533—2544.
- [53] Koutsoyiannis D, Foufopula-Georgiou E. A scaling model of a storm hyetograph[J]. *Water Resour Res*, 1997, 29(7): 2345—2361.
- [54] Menabde M, Seed A, Pegram G. A simple scaling model for extreme rainfall[J]. *Water Resource Res*, 1999, 35(1): 335—339.
- [55] 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.
- [56] Michele C D, Kottegoda N T, Rosso R, *et al.* The derivation of areal reduction faciton of storm rainfall from its scaling properties[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(12): 3247—3252.
- [57] Gupta V K, Waymire E. Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions[J]. *J Geophys Res*, 1990, 95(3): 1999—2009.
- [58] Smith J A. Representation of basin scale in flood peak distributions[J]. *Water Resour Res*, 1992, 28(11): 2993—2999.
- [59] Gupta V K, Mesa O J, Dawdy D R. Multiscaling theory of flood peaks: Regional quantile analysis[J]. *Water Resour Res*, 1994, 30(12): 3405—3421.
- [60] Dawdy D R, Gupta V K. Multiscaling and skew separation in regional floods[J]. *Water Resour Res*, 1995, 31(11): 2761—2767.
- [61] Ouarada, T B M J, Bolfe B, Rasmussen P R, *et al.* Comment on “Multiscaling and skew separation in regional floods”[J]. *Water Resour Res*, 1997, 33(1): 271—272.
- [62] Bates B C, Rahman A, Mein R G, *et al.* Climated and physical factors that influence the homogeneity of regional floods in southeastem Australia[J]. *Water Resour Res*, 1998, 34(12): 3369—3381.
- [63] Robison J S, Sivapalan M. An investigation into the physical causes of scaling and heterogeneity of regional flood frequency[J]. *Water Resour*

- Res, 1997, 33(5): 1045—1059.
- [64] 常福宣, 丁 晶. 关于大流域洪量历时关系的探讨[J]. 水利水电技术, 2001, 32(6): 4—7.
- [65] 侯 玉, 吴伯贤, 邓国权. 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 李贤彬. 子波分析及其在水文水资源研究中的应用[D]. 成都: 四川大学, 1999. 9—98.
- [70] Mesa O J, Poveda G. The Hurst effect: the scale of fluctuation approach[J]. Water Resour Res, 1993, 29(12): 3995—4002.
- [71] Anderson P L, Meerschaert M M. Modeling river flows with heavy tails[J]. Water Resour Res, 1998, 34(9): 2271—2280.
- [72] Tokinaga S, Moriyasu H, Miyazaki A, *et al.* Forecasting of time series with fractal geometry by using scale transformations and parameter estimations obtained by the wavelet transform[J]. Electronics and Communications in Japan, Part 3, 1997, 80(9): 2054—2062.
- [73] 常福宣. 分形理论在水文水资源研究中的应用[D]. 成都: 四川大学, 2001. 40—45.
- [74] 冯 平, 王仁超. 水文干旱的时间分形特征探讨[J]. 水利水电技术, 1997, 28(11): 48—51.
- [75] 冯利华, 许晓路. 金衢盆地旱涝统计特征初步分析[J]. 水科学进展, 1999, 10(1): 84—88.
- [76] Tchiguinnskaia I, Lu S, Molz F J, *et al.* Multifractal versus monofractal analysis of wetland topography[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2000, 14(1): 8—32.
- [77] Liu H H, Molz F J. Multifractal analyses of hydraulic conductivity distributions[J]. Water Resour Res, 1997, 33(11): 2483—2488.
- [78] Lovejoy S, Schertzer D, Silas P. Diffusion in one-dimensional multifractal porous media[J]. Water Resour Res, 1998, 34(12): 3283—3291.
- [79] 徐永福, 田美存. 土的分形微结构[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(1): 25—29.
- [80] 徐永福, 孙婉莹, 吴正根. 我国膨胀土的分形结构的研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(1): 18—23.
- [81] Loague K, Kyriakidis. Spatial and temporal variability in the R-5 infiltration data set: rainfall-runoff simulations[J]. Water Resour Res, 1997, 33(12): 2883—2895.
- [82] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls[J]. Water Resour Res, 1997, 33(12): 2897—2908.
- [83] Merz B, Plate E J. An analysis of the effects of spatial variability of soil moisture on runoff[J]. Water Resour Res, 1997, 33(12): 2909—2922.
- [84] Dooge J C I, Bruen M. Scale effects on moisture fluxes at unvegetated land surfaces[J]. Water Resour Res, 1997, 33(12): 2923—2927.

Application of fractal theory to hydrology and water resources^{*}

ZHANG Shao-wen^{1,3}, WANG Wen-sheng¹, DING Jing¹, CHANG Fu-xuan²

(1. School of hydraulic Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

3. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper deals more systematically with the application of fractal theory in many aspects to hydrology and water resources, including the structure of river network, the topography of basin, the surface geometry of river bed, the distribution of rainfall in time and space, the variation of flood in time and space, the process of runoff, the movement of ground water and infiltration. The characteristics which occur in the practice of the application of the fractal theory to hydrology and water resources shows the activity thinking and the creation in methodology for hydrology. Attention should be paid to the verification of the reasonable basis for such application based on a great deal of data.

Key words: fractal theory; fractal method; hydrology and water resources

^{*} The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40271024, No. 50249024, and No. 50239050).