

松花江流域地表水系分形维及其影响因素分析

杜尚海^{1,2}, 苏小四^{1,2}, 朱琳³

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学水资源与环境研究所, 吉林 长春 130026;
3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037)

摘要: 应用分形理论, 以 DEM 数据为基础数据, 给出了以 ArcGIS 9.2 为研究平台的分形维数计算方法, 并将该方法应用于松花江流域地表水系的研究。结果表明松花江流域地表水系均处于发育的壮年期, 针对分形维数影响因素的复杂性, 探讨了松花江流域地表水系分形维数的影响因素, 认为地貌、土壤、植被和降水量是分形维数的主要影响因素, 且部分地区降水量的影响作用被地形作用所屏蔽, 并讨论了线性拟合过程中无标度区间数据选择问题, 认为选在栅格尺寸大小水平即可得到较好的结果。

关键词: 分形; 分数维; 松花江; 无标度区间

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2009)05-0030-06

1 引言

自从 B.B.Mandelbrot 于 1975 年提出“分形(fractal)”这一概念以来, 分形论为描述复杂物体的组织形态提供了一种崭新的学术思想和研究思路, 从而为从极端有序到真正混沌都提供了一种定量描述的可能。自然界的许多系统、现象和过程都具有分形特征^[1-6], 其中地表水系的各级分支结构分形特征尤为典型, 国内外学者也针对水系分形开展了大量研究^[7-12]。基于统计意义上的 HORTON 定律表明看似纷繁复杂的河网具有自组织性, 不同级别河流的特征值存在幂律关系, 一定意义上揭示了复杂而有序的地表水系的分形特征^[13-17]。

受下垫面条件的影响, 各地理系统要素存在地域差异, 在水系分维方面体现尤为明显, 由于不同地区下垫面条件组合差异, 其地表水系的分形维数往往是各异的^[18]。为了总结地表水系分维数的空间分布规律及其与地理环境的数理关系, 有必要“对大范围内各种条件下小流域的 HORTON 参数与分维数进行系统研究”, 有助于揭示水系分形演化的某些时空规律及其与各地理因素之间的关系, 进而对地表水系发育的影响因素进行定量分析^[18-20]。

虽然地表水系分形的研究已经取得丰硕成果, 但仍存在一些有待探索的问题, 如在广泛使用的计盒维数法计算过程中, 无标度区间问题容易被忽略, 使得计算结果存在偏差; “大范围内小流域研究”中小流域的选取问题, 有的学者选取的是行政分区而不是自然地理分区, 得到的结论也缺乏合理依据; 当前的研究多集中在分形的计算方法和理论探讨上, 对水系分形维数大

小差异产生的影响因素和内在原因未作深入的探讨。基于此, 本文选取松花江流域的地表水系作为研究对象, 以 DEM 数据为基础, 结合 GIS 技术, 对地表水系分形维数的影响因素进行初步探讨。

2 研究区概况

松花江是我国七大江河之一, 流经区域是我国重要的商品粮基地和能源基地, 流域内的水旱自然灾害频发使得掌握该区域地表水系的发育特征显得尤为重要。松花江流域东西长约 920 km, 南北宽约 1 070 km, 流域面积约为 55.68 万 km²; 松花江由东、西两源汇合而成, 东源为发源于长白山天池的第二松花江, 西源为发源于大兴安岭的嫩江, 二江在三岔河地区汇合成松花江干流, 最终在同江地区汇入黑龙江(见图 1)。

3 分形维数的计算方法与无标度区间

3.1 基于 GIS 的计算方法

数盒子法是由 Tel 提出^[21], 后经过 Vicsek 等人的发展逐渐完善的一种快速、有效的计算方法^[22-24]。Cheng Q 给出了基于 GIS 技术和数盒子法来计算地表水系分形维数的方法, 并指出计算过程中需要注意的问题^[22]。具体做法为: 取边长为 r 的小盒子去覆盖分形体, 将盖有分形体的盒子计为非空, 否则计为空, 然后统计非空盒子数 N , 随后不断改变盒子的边长, 得到一系列相应的非空盒子数 N 。当 $r \rightarrow 0$ 时, 可以得到其分形维数 D :

$$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N}{\lg r}$$

收稿日期: 2009-01-11

基金项目: 十一五国家科技支撑计划重点课题(2006BAB14B04)与首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室开放基金联合资助

作者简介: 杜尚海(1986-), 男, 安徽萧县人, 博士研究生, 主要从事多维地学数据的分析与处理研究。

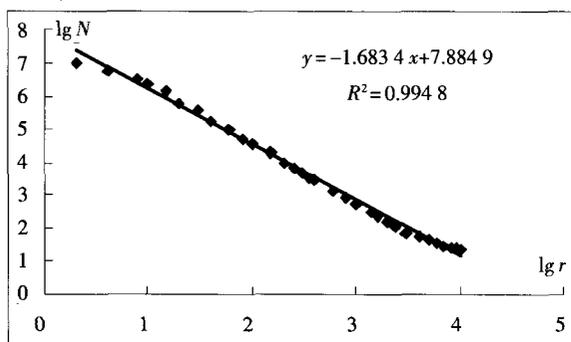


图2 不考虑无标度区间的拟合效果
Fig. 2 Fitting results without non-scale interval

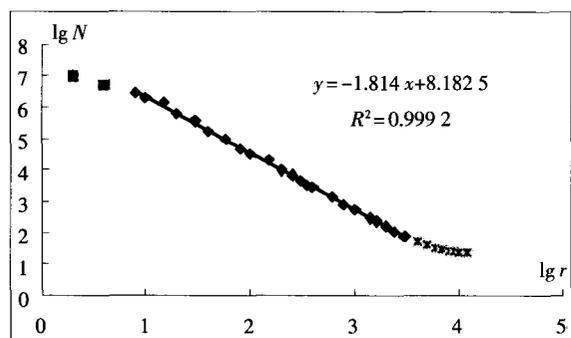


图3 考虑无标度区间的拟合效果
Fig. 3 Fitting results with non-scale interval

4 松花江流域水系分形维数总体特征

为了更好地反映流域地表水系发育特征,并探讨其主要影响因素,从松花江地表水系(包括嫩江、第二松花江和松花江干

流)一级支流中选取了10条流域面积大于10 000 km²的地表水系,分别计算了它们的分形维数,结果如表1所示。从结果中可以看出,相关系数均在0.99以上,具有较好的线性拟合效果。

地表水系的分形维数大小反映流域地貌发育程度,河网密度越大,河流发育越成熟,分形维数值就越高^{[6][18]}。由表1可以看出:所选10条水系的分形维数在1.71~1.86之间,其中饮马河、辉发河等两条河流分形维数在1.85左右,霍林河等五条水系的分形维数在1.80左右,诺敏河等三条水系有较小的分形维数。根据何隆华给出的流域地貌发育阶段的划分方法^[9],可以得到所选取的10条水系均处于发育的壮年期,其中处于低山、平原区的饮马河和辉发河处于壮年期晚期,向老年期过渡。

5 影响因素分析

地表水系的发育主要是受气候因素、地质构造、岩性土壤、地形地貌、植被条件、土地利用类型以及人类活动等因素的共同作用^[31-32]。倪晋仁在研究我国地表水系发育特征后认为,我国东北地区的地表水系发育程度主要受到气候因素、土壤、地貌、植被条件等因素的影响^[32],陈彦光的研究成果也证实了这一点^[16]。下面分别讨论降水量、土壤、地貌以及植被条件对松花江水系发育以及分形维数的影响效果。

从松花江流域降水量分区、土壤类型分区、植被分区和地貌分区中地表水系分形维数(见表2,图4)计算结果可以看出:

(1)地貌分区。由基岩山区(T1、T3区)到平原区(T2)水系的分形维数增大。一般来说,山区河流河道比降大,大多束狭,河床的纵切能力较强,河流和岔河相对不发育;平原地区地表组成物质较松散,河流摆动相对容易,河道多弯曲,其分形维数也将增大。从西部的大兴安岭、北部的小兴安岭(T1区)到中部的松嫩平原(T2区)再到东部长白山区(T3区),计算得到的分形维数

表1 各支流水系的分形维数计算结果
Table 1 Calculated dimension results of tributaries

水系名称	面积 km ²	栅格总数	分形维数	相关系数	区域地貌特征
讷谟尔河	14 061	5 624 400	1.7905	0.999 5	山区、丘陵区
诺敏河	25 966	10 386 400	1.7769	0.999 1	山区
霍林河	37 655	15 062 000	1.8033	0.999 3	低山、丘陵区
洮儿河	28 843	11 537 200	1.7979	0.999 6	低山、丘陵区
饮马河	16 869	6 747 600	1.8557	0.998 9	丘陵、平原区
辉发河	14 896	5 958 400	1.8545	0.999	丘陵、平原区
头道松花江	7 927	3 170 800	1.753	0.999 2	山区
呼兰河	30 977	12 390 800	1.7939	0.998 9	山区、丘陵区
牡丹江	37 600	15 040 000	1.7122	0.999 5	山区
拉林河	19 215	7 686 000	1.8034	0.999 1	山区

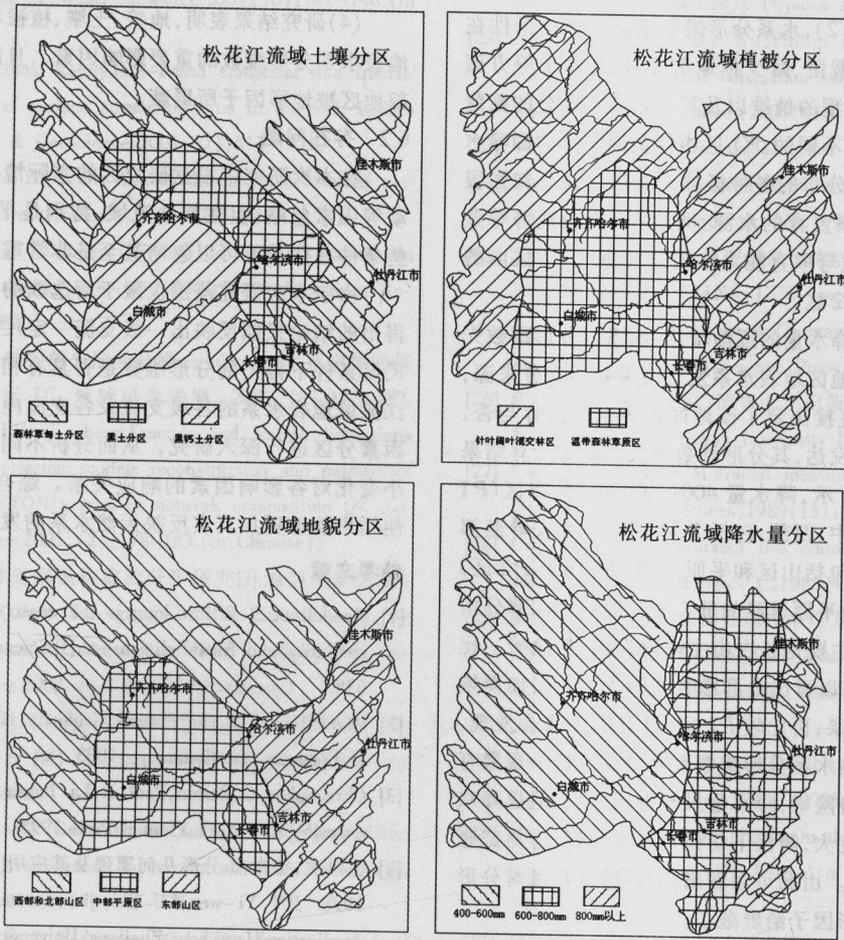


图4 松花江流域土壤、植被、地貌和降水量分区示意图

Fig. 4 The Distribution of soil, vegetation, geomorphology and precipitation in Songhua River Basin

表2 各影响因素分区及其分形维数计算结果

Table 2 Distributions of factors and calculated dimension results

影响因子	各影响因子分区	分形维数	相关系数
土壤	森林草甸土分布区(S1)	1.798 8	0.999 6
	黑土分布区(S2)	1.807 2	0.999 4
	黑钙土分布区(S3)	1.816 2	0.999 7
植被	针阔混交林分布区(V1)	1.788 7	0.999 3
	森林草甸农作物分布区(V2)	1.827 5	0.999 7
地貌	西部、北部山区(T1)	1.787 9	0.999 3
	中部平原区(T2)	1.850 9	0.999 1
	东部山区(T3)	1.792 4	0.999 6
降水量	400~600 mm 分布区(P1)	1.795 8	0.999 7
	600~800 mm 分布区(P2)	1.830 8	0.999 4
	800 mm 以上分布区(P3)	1.782 4	0.999 2

值很好得反映山区的分形维数要小于平原区河流的分形维数这一规律。

(2)土壤分区。从东部和东北部的森林草甸土分布区(S1)到中北部黑土分布区(S2)再到中部黑钙土分布区(S3),水系分形维数逐渐增大。森林草甸土多分布在山区坡面上,具有有机质含量高,腐殖质层厚,土壤团粒结构较好,水稳性团粒结构可以达到70%~80%,部分地区含多棱角状碎石,成土作用弱;黑土是温带森林土壤向草原土壤过渡的一种土壤类型,土壤母质粘重,夏秋季多雨时常形成上层滞水,当开垦后腐殖质含量下降,土壤易被侵蚀;黑钙土是松嫩中部平原和农作物分布区的主要土壤类型,土壤上层有意黑色腐殖质,层下有一石灰富集的钙积层,当水分充足时,易发生侵蚀。比较三种土壤特性可以看出,森林草甸土具有最好的稳定性,且分布地区地势险峻,地表水系少弯曲,沉积作用弱,分形维数较小;黑土虽然也具有较好的稳定性,但随着人类活动的影响,腐殖质含量减少,土壤易腐蚀,使得河流的泥沙含量增加,堆积作用加强,河流出现蛇曲现象;黑钙土处于平原区,水流缓慢,钙积层易被腐蚀,加之地表植被条件差,水土流失严重,河流中泥沙大量堆积,河道多弯曲,分形维数也相应的增大。

(3)植被分区。从山区针阔混交林分布区(V1)到低山、丘陵

平原区森林草甸分布区(V2),水系分形维数增大。植被条件在水文循环,特别是在水分截留、减少林地蒸发、保持水土等方面起到重要作用,且不同类型的植被以及其覆盖率对水分的截留和水土保持的效果往往是不同的。V1区内针阔混交林的涵养水源能力比中V2区内主要分布的各种栎林、农作物和草甸强很多,减少了V1内地表水系发育的水源,同时V1区内地势等条件也决定了地表水系的截弯取直能力比较强,使得V1区内的地表水系分形维数小于V2区。

(4)降水量分区。随降水量的逐渐增加,水系的分形维数先增大后减小。降水是一个地区地表水系发育最主要的水分来源,一个地区的降水量大小直接决定了该地区地表水系发育与否,降水量越大,地表水系越发达,其分形维数越大。但是计算结果并非如此,如表2、图4所示,降水量400~600mm分布区(P1区)主要分布在研究区的中、西部,包括大兴安岭、小兴安岭西部和松嫩平原的大部,地貌包括山区和平原,600~800mm(P2区)分布区包括长白山向松嫩平原过渡的低山、丘陵地区和部分山区,800mm以上(P3区)主要是长白山主峰附近,地势险峻。比较P1与P2计算结果,可以看出分形维数随降水量的增加而增大,比较符合理论分析结果;再比较P2和P3计算结果会发现,随着降水量的增加其地表水系分形维数反而减少,这一现象有可能是因为该地区的地势险峻,降水量虽然有所增大,但是降水形成的地表径流水力梯度大,河流下切作用非常明显,容易截弯取直,因此分形维数减小。由此可以看出,该地区降水量对分形维数大小影响作用被地形因子给屏蔽了。

地表水系的发育是受到多种影响因素综合作用的结果,各影响因素之间相互影响、相互制约。不同地貌条件决定了不同的植被类型和土壤类型,同时地形条件也对降水产生影响,而植被、降水等条件又对地貌产生反作用。如研究区东部长白山区,地势险峻,河流水力梯度大,有利于河流的下切作用,容易截弯取直,加上植被条件较好,森林草甸土具有良好的水稳性,水中含沙量相对较小,河流的堆积作用不明显,降水量虽然相对较大,但是其对地表水系发育的促进作用被被地貌、植被和土壤等因素削弱甚至屏蔽。

6 主要结论与存在问题

6.1 主要结论

(1)对所选取的10条松花江支流的分形维数分析结果表明,各支流普遍处于地貌发育的壮年期,其中平原区河流处于壮年晚期;

(2)线性拟合过程中无标度区间问题值得重视,由于方法本身的特点以及考虑到其实用性,研究中多采用人工判定法,并认为只要能够找出足以进行线性拟合所需要的数据即可,且将盒子尺寸选在栅格分辨率尺寸水平基本可以得到较为满意的结果;

(3)利用DEM数据提取数字水系并进行其分形特征研究简捷、高效,而ArcGIS9.2更是提供了良好的研究平台;

(4)研究结果表明,地貌、土壤、植被和降水量是松花江流域地表水系分形维数的重要影响因素,且降水量的作用效果在东部地区被地形因子所屏蔽。

6.2 存在问题

在本次研究中根据研究区的实际情况,将土地利用、人类活动等因素忽略,但在其他流域,特别是平原区河流的研究中,这些条件往往是不可以忽略甚至是非常重要的影响因素。

由于本次研究范围仅限于所选取的10条较大的一级支流,得出的结论只能反映出一级支流一定尺度下的特征,对于各种尺度条件下得出的分形维数是否具有相同的特征,有待对松花江流域地表水系的各级支流及各支流内部进行分形维数的影响因素分区进行深入研究,从而分析不同尺度条件下分形维数大小变化对各影响因素的响应关系。综合使用遥感等技术手段,使结果能够更加真实反映天然水系的发育特征。

参考文献:

- [1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractal dimension [J]. *Science*(1967), 156(3775): 636-638.
- [2] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. New York: W H Freeman and Company, 1983.
- [3] Christopher C, Barton, Paul R, La Pointe. *Fractals in the Earth Sciences* [M]. New York: Plenum Press, 1995.
- [4] 金以文, 鲁世杰. 分形几何原理及其应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1998. JIN Yi-wen, LU Shi-jie. *Fractal Geometry Principles and Application*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1998. (in Chinese)
- [5] 马建华, 管华. 系统科学及其在地理学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003, 3. MA Jian-hua, GUAN Hua. *System Theory and Its Application in Geography* [M]. Beijing: Science Press, 2003, 3. (in Chinese)
- [6] Endre Dombradi, Gabor Timar, Gabor Bada. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian-Pannonian system [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, (58): 197-213.
- [7] D J Schuller, A R Rao, G D Jeong. Fractal characteristics of dense stream networks [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, (243): 1-16.
- [8] 芮孝芳. 水文学原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (RUI Xiao-fang. *Hydrology Principle* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [9] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义 [J]. *地理科学*, 1996, (5): 124-128. HE Long-hua, ZHAO Hong. The fractal dimension of river networks and its interpretation. *Scientia Geographica Sinica*. 1996, (5): 124-128. (in Chinese)
- [10] 王倩, 邹欣庆, 朱大奎. 基于GIS技术的秦淮河流域水系分维研究 [J]. *水科学进展*, 2002(11): 751-756. (WANG Qian, ZOU Xin-qing, ZHU Da-kui. On the dimensions of Qinhuai River networks based on the GIS technology [J]. *Advances in Water Science*. 2002, (11): 751-756. (in Chinese))
- [11] 张少文, 王文圣, 丁晶. 分形理论在水文水资源中的应用 [J]. *水科学进展*, 2005(16): 141-146. (ZHANG Shao-wen, WANG Wen-sheng, DING Jing. Application of fractal theory to hydrology and water

- resources[J]. *Advances of Water Resource*.2005 (16):141-146. (in Chinese))
- [12] Cheng Q ,Russell, Frank Kenny.GIS-based statistical and fractal/multifractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridges Moraine[J].*Computers & Geosciences*2001(27):513 - 526.
- [13] La Barbera P, Rosso R.On the fractal dimension of stream networks[J].*Water Resources Research*,25(4):735~741.
- [14] Rosso R,Bacchi B,La Barbera P.Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks[J].*Water Resources Research* 27(3):381~387.
- [15] 陈彦光,刘继生.水系结构的分形和分维——Horton 水系定律的模型重建及其参数分析 [J]. *地球科学进展*. 2001, (2):178-183. (CHEN Yan-guang,LIU Ji-sheng.Fractals and fractal dimensions of structure of river systems: models reconstruction and parameters interpretation of HORTON's laws of network composition [J]. *Advance in earth Science*.2001, (2):178-183.(in Chinese))
- [16] 陈彦光,李宝林.吉林省水系构成的分形研究[J].*地球科学进展*, 2003 (4):178-184. (Chen Yan-guang,Li Bao-lin.Studies of the fractal network composition of rivers in Jilin Province,China.*Advance in earth Science*.2003(4):178-184. in Chinese)
- [17] 张济世.统计水文学[M].郑州:黄河水利出版社,2006.3.(ZHANG Ji-shi.Statistical Hydrology [M]. Zhengzhou:Huang River Conservancy Press.2006,3.(in Chinese))
- [18] Roberto Gaudio,Samuele G.De Bartolo,Leonardo Primavera.Lithologic control on the multifractal spectrum of river networks[J].*Journal of Hydrology*,2006(327):365-375.
- [19] Tarboton D G,Bras R L,Rodriguez-Iturbe.The fractal nature of river networks[J].*Water Resources Research*.1988, (24):1317-1322.
- [20] Nikora V.Fractal structures of river plan forms [J].*Water Resources Research*, 1991(6):1327-1333.
- [21] Tel.T,Fulop.A,Vicsek.T.Determination of fractal dimensions for geometrical multifractals[J]. *Physica A*, 1989(159):155-165.
- [22] Angeline wong ,leejay Wu,Phillip B.Gibbons. Fast estimation of fractal dimension and correlation integral on stream data[J].*Information Processing Letters*,2005(93):91-97.
- [23] Vicsek.T.Mass multifractals[J].*Physica A*,1990(168):490-497.
- [24] Vicsek.T,Family.F,Meakin.P.Multifractal geometry of diffusion-limited aggregates[J]. *Europhys. Lett*.1990(12):217-22.
- [25] 汤国安,杨昕.ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2006. (TANG GUO-an,YANG Xin.The Experimental guide to Spatial Analysis of Geographic Information System Based on ArcGIS[M]. Beijing:Science Press,2006.(in Chinese))
- [26] 张济忠.分形[M].北京:清华大学出版社,1995. (ZHANG Ji-zhong. *Fractals*.Beijing:Tsinghua University Press,1995.(in Chinese))
- [27] Longley P A,Batty M.Fractal measurement and line generalization [J].*Computer&Geosciences*.1989(15):167-183.
- [28] Grassberger P.On efficient box counting algorithms[J].*International Journal of Modern Physics C*,1983(4):515-523.
- [29] 杨毅恒. 多维地学数据处理技术与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.3. (YANG Yi-heng.The Treatment Technology and Methods of Multidimension Geo-data[M]. Beijing:Science Press,2002,3.(in Chinese))
- [30] James M,Lattin, J,Douglas Carroll.Analyzing Multivariate Data[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.4.
- [31] M. Veltri,P. Veltri, M. Maiolo.On the fractal description of natural channel networks [J]. *Journal of Hydrology*,1996,(187):137-144.
- [32] 倪晋仁,马蔼乃.河流动力地貌学[M].北京:北京大学出版社,1998. (NI Jin-ren, MA Ai-nai.*Dynamic Geomorphology of River*[M]. Beijing: Peking University Press,1998.(in chinese))

Fractal Dimension of Surface Water System in Songhua River and Analysis of Influencing Factors

DU Shang-hai^{1,2}, SU Xiao-si^{1,2}, ZHU Lin³

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130026, China;

3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: The fractal theory was used and the DEM data were taken as the base data to give the calculated method of fractal dimension based on ArcGIS 9.2, then the method was applied in making research on the fractal characteristics of the surface water system in the Songhua River Basin. The results show that the surface water system of the Songhua River Basin is in its prime stage of development. The factors influencing on the surface water system in the Songhua River Basin were discussed. The results show that the landform, soil, vegetation and precipitation are the main factors which affect the values of fractal dimension, but in part of the region the topographical action shields the precipitation's influence. The matter of data, selection in non-scale interval during the linear fitting process was also discussed, and the conclusion was made that there would be much better results when the length of box are chosen on the scale of grid.

Key words: fractal; fractal dimension; Songhua River; non-scale interval