

中国水系的盒维数及其关系

朱晓华^{1,2}, 蔡运龙^{1,2}

(1. 北京大学资源环境地理学系, 北京 100871; 2. 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 应用分形理论, 系统地探讨了整个中国水系及其各组成流域水系的分形结构特征。通过研究, 得出主要结论如下: (1) 整个中国水系及其各组成流域水系的分形结构特征是客观存在的; (2) 应用网格法系统地计算出了中国各流域水系的盒维数值: 整个中国水系的盒维数值为 1.4189, 中国外流区水系的盒维数值为 1.4305; (3) 中国平原地区水系的盒维数值一般较大; (4) 整个中国水系盒维数值与组成它的各个层次流域水系的盒维数值的平均值并不相等, 一般而言, 不同层次流域水系盒维数值的平均值小于整个水系盒维数值。

关键词: 分形; 盒维数; 水系; 中国

中图分类号: P343.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2003)06-731-05

分形理论产生之后, 已在许多领域里取得了较为广泛的应用, 这一点对于进行水系结构的分形研究来说也莫不如此。对于水系分形结构的研究, 国内一些学者在此方面已经进行了一定程度的研究^[1-5], 其中洪时中等曾进行了我国一些中小流域的分形研究, 李后强等曾导出了水系分维与水系级别的关系等, 但是总体而言, 对于我国水系的分形研究还比较初步, 还缺乏对我国水系分形结构的系统探讨以及对中国各流域水系盒维数的全面计算, 本文则是在此方面进行了初步探索, 以期对深化相关研究有所裨益。

1 研究方法 with 资料来源

1.1 研究方法

文中采用了常用的网格法(Box counting method)^[6]来进行中国水系盒维数的计算, 其基本思路是使用不同长度的正方形网格去覆盖被测水系, 当正方形网格长度 ε 出现变化时, 则覆盖有被测水系的网格数目 $N(\varepsilon)$ 必然会出现相应地变化, 根据分形理论有式(1)成立:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D} \quad (1)$$

当正方形网格长度为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_k$ 时, 则覆盖有被测水系的正方形网格数目相应为 $N(\varepsilon_1), N(\varepsilon_2), N(\varepsilon_3), \dots, N(\varepsilon_k)$, 两边同取双对数可得:

$$\lg N(\varepsilon) = -D \lg \varepsilon + A \quad (2)$$

式中 A 为待定常数; D 为被测水系的分维, 其值等于该式斜率值的绝对值。

另外, 文中对于中国水系图形的处理和对有关数据的提取与分析, 都是借助于 GIS 等软件来完成的, 这样既提高了工作效率也提高了研究精度。具体的技术路线如图 1 所示。

1.2 数据来源

文中使用的中国水系数据来自于《陆地卫星影像中国地学分析图集》^[7], 其比例尺为 1:120 万。图 2 为中

收稿日期: 2002-09-28; 修订日期: 2003-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171004); 教育部“教育振兴计划”青年教师奖励基金资助项目(2001DLX SBJBC12)

作者简介: 朱晓华(1972-), 男, 安徽郎溪人, 北京大学博士后, 主要从事分形地学综合研究。E-mail: zhxh_973@263.net

国水系分布略图。

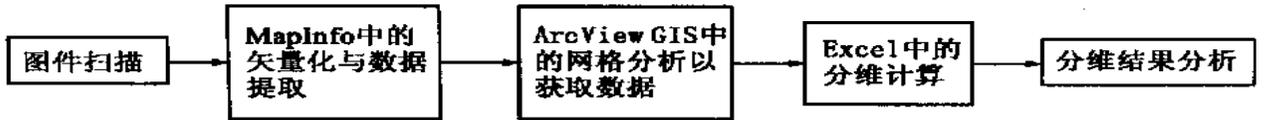
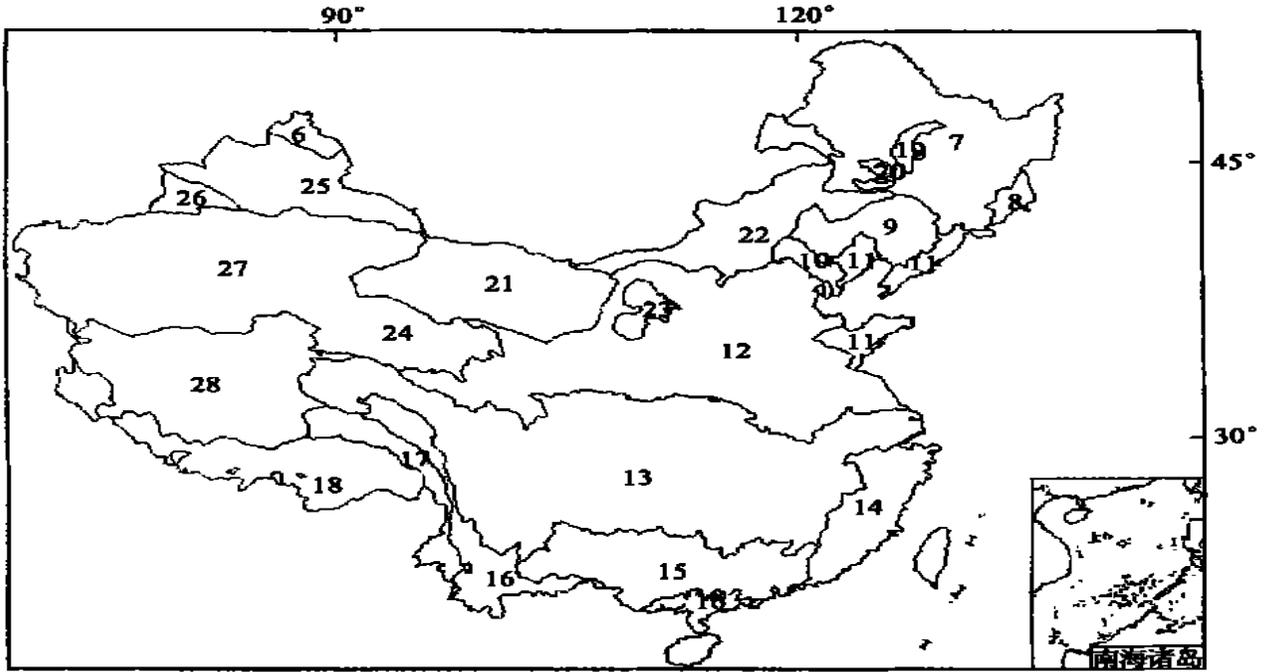


图1 技术流程图

Fig. 1 Map showing of technological flow



6. 北冰洋流域; 7. 黑龙江流域; 8. 日本海沿岸诸河流域; 9. 辽河流域; 10. 滦河流域; 11. 黄海与渤海沿岸诸河流域; 12. 黄淮海流域; 13. 长江流域; 14. 东南沿海诸河流域; 15. 珠江流域; 16. 南海沿岸诸河流域; 17. 怒江、伊洛瓦底江流域; 18. 恒河、印度河流域; 19. 乌裕尔河内流区; 20. 白城内流区; 21. 河西走廊-阿拉善内流区; 22. 内蒙古内流区; 23. 鄂尔多斯内流区; 24. 柴达木内流区; 25. 准噶尔内流区; 26. 伊犁河内流区; 27. 塔里木内流区; 28. 青藏高原内流区

图2 中国水系分布略图

Fig. 2 Map showing of river basins of China

2 数据结果分析

2.1 中国水系盒维数分析

应用网格法, 文中首先计算出了中国水系的盒维数 D_1 、中国外流区水系的盒维数 D_2 、中国内流区水系的盒维数 D_3 、中国的太平洋流域水系盒维数 D_4 、中国的印度洋流域水系盒维数 D_5 、中国的北冰洋流域水系盒维数 D_6 。鉴于篇幅, 文中仅给出了中国水系应用网格法的计算图, 图3中散点为应用网格法计算中国水系盒维数所得到的网格长度与网格数目的双对数散点, 而图3中的直线则为对该图中散点进行线性回归分析所得到的直线。

根据图3, 对图中散点进行线性回归分析可以得到:

$$\lg N = 1.4189 \lg r + 10.062 \quad (3)$$

$$R = 0.9930$$

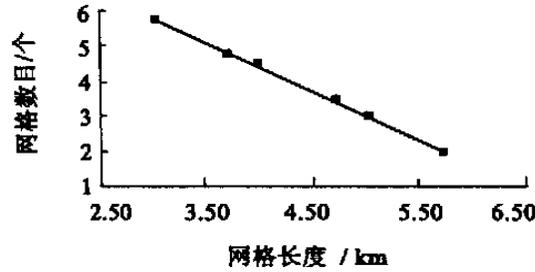


图 3 中国水系网格法计算

Fig. 3 Calculating based on the box counting method for river basins of China

式中 r 为覆盖被测水系的正方形网格长度; N 为覆盖被测水系的正方形网格数目; R 为相关系数。该式斜率值的绝对值即为中国水系的盒维数值。

采取与上述过程相同的方法, 可以得到中国水系的盒维数 D_1 与中国外流区水系的盒维数 D_2 等值, 结果见表 1。

由表 1 可见, 表 1 中各盒维数值的相关系数均在 0.99 以上, 均能通过 F 显著性检验, 所以, 中国水系的统计分形结构特征是客观存在的, 盒维数是表征中国水系自相似特征的良好参数。

根据表 1 可见, 整个中国水系的盒维数值为 1.4189; 而就中国

表 1 中国水系盒维数值

Table 1 Box dimensions of river basins of China

水系	盒维数值	相关系数
D_1	1.4189	0.9930
D_2	1.4305	0.9935
D_3	1.2615	0.9959
D_4	1.4433	0.9932
D_5	1.2029	0.9961
D_6	1.1029	0.9976

外流区与内流区的盒维数值比较而言, 中国外流区水系的盒维数值较大, 为 1.4305, 较后者增大了 13.4%; 而就中国的太平洋等三大流域水系的盒维数值比较而言, 太平洋流域水系的盒维数值相对最大, 为 1.4433, 而以北冰洋流域水系的盒维数值相对最小, 为 1.1029, 前者较后者增大了 30.86%。

2.2 中国外流区、内流区各流域水系盒维数分析

应用网格法, 文中进一步计算出了中国外流区与内流区各流域水系的盒维数值, 具体结果见表 2。表 2 中 $D_7 \sim D_{28}$ 与图 2 中相应流域对应。

表 2 中国外流区、内流区各流域水系盒维数值

Table 2 Box dimensions of different river basins of exdorthic region of China

外流区	盒维数值	相关系数	内流区	盒维数值	相关系数
D_7	1.2760	0.9937	D_{19}	1.0041	0.9995
D_8	1.1300	0.9976	D_{20}	1.0022	0.9999
D_9	1.2918	0.9943	D_{21}	1.1841	0.9971
D_{10}	1.1405	0.9972	D_{22}	1.0633	0.9993
D_{11}	1.1864	0.9970	D_{23}	1.0065	0.9999
D_{12}	1.3352	0.9935	D_{24}	1.1681	0.9965
D_{13}	1.3292	0.9928	D_{25}	1.1644	0.9975
D_{14}	1.2863	0.9941	D_{26}	1.1758	0.9961
D_{15}	1.2684	0.9945	D_{27}	1.1744	0.9975
D_{16}	1.1935	0.9966	D_{28}	1.1442	0.9961
D_{17}	1.1588	0.9977			
D_{18}	1.2021	0.9962			

根据表 2, 表中各值的相关系数均在 0.99 以上, 所以, 中国各流域水系的统计分形结构特征也是客观存在的, 盒维数是表征中国各流域水系自相似特征的良好参数。

根据表 2, 在中国外流区各流域水系中, 黄淮海流域水系盒维数值相对最大, 为 1.3352, 长江流域水系盒维数值次之, 为 1.3292, 辽河流域水系盒维数值位居第 3 位, 为 1.2918, 而以日本海沿岸诸河流域水系盒维数值相对最小, 为 1.1300, 表 2 中的流域水系盒维数相对最大值与相对最小值之间相差 0.2052, 相对最大值较相对最小值增大了 18.16%。在中国内流区各流域水系中, 河西走廊-阿拉善内流区水系盒维数值相对最大, 为 1.1841, 而以伊犁河内流区水系盒维数值次之, 为 1.1758。在中国各流域水系中, 还是以黄淮海流域水系、长江流域水系与辽河流域水系的盒维数值相对为大。

2.3 结果分析

结合表 2 中中国各流域水系盒维数值的比较可以发现, 在中国平原地区的水系盒维数值一般较大, 例如位于东北平原的黑龙江流域水系与辽河流域水系, 位于华北平原的黄淮海流域水系, 位于长江中下游平原的长江流域水系。黑龙江流域水系的盒维数值为 1.2760, 辽河流域水系的盒维数值为 1.2918, 黄淮海流域水系盒维数值为

1.335 2, 长江流域水系盒维数值为 1.329 2。在山地丘陵区的水系盒维数值一般相对较小, 例如日本海沿岸诸河流域水系盒维数值为 1.130 0, 黄海与渤海沿岸诸河流域水系盒维数值为 1.186 4, 怒江、伊洛瓦底江流域水系盒维数值为 1.158 8。从表 1 中中国外流区与内流区的盒维数值比较而言, 中国外流区水系的盒维数值相对较大; 从表 2 中可见, 黄淮海流域水系与长江流域水系盒维数值在中国各大流域水系中又相对较大; 中国内流区各流域水系的盒维数值相对较小。显然, 这些不同区域水系盒维数值的差异与中国东部地区降水以及地形、地质等因素是密切相关的。中国东部地区受季风气候的影响, 降水相对充沛, 而中国东部平原地区地层较为平展, 岩性较为均一, 土质较松, 故其水系相对较为发育, 所以其盒维数值也相对较大。所以, 水系的盒维数含有所受到的降水与地形、地质等多种因素的影响信息, 是表征水系在不同尺度下不变特征的良好参数。赵锐等曾在 1:250 万地图上分析了中国一些水系的分维关系^[3], 研究结论与本文在小尺度下所得结论是一致的。

2.4 各流域水系盒维数值之间的关系分析

从整个中国水系与各流域水系的组成关系来看, 整个中国水系由外流区、内流区的各流域水系组成, 外流区则又由在太平洋、印度洋、北冰洋三大流域水系所组成, 而太平洋流域水系则又由黑龙江流域水系、日本海沿岸诸

河流域水系、辽河流域水系、滦河流域水系、黄海与渤海沿岸诸河流域水系、黄淮海流域水系、长江流域水系、东南沿海诸河流域水系、珠江流域诸河流域水系以及南海沿岸诸河流域水系组成, 印度洋流域水系则是由怒江、伊洛瓦底江流域水系与恒河、印度河流域水系组成。表 3 给出了中国不同层次水系的组成结构状况。

表 3 中所列的层次结构, 第 1 层表明 D_1 表征的整个中国水系是由第 2 层 D_2 表征的外流区流域水系加上 D_3 表征的内流区流域水系所组成, 而第 2 层 D_2 表征的外流区流域水系则由第 3 层中 D_4 、 D_5 与 D_6 表征的太平洋、印度洋与北冰洋流域水系所组成, 第 3 层中 D_4 表征的太平洋流域水系则由第 4 层中 $D_7 \sim D_{16}$ 所表征的各流域水系所组成, 第 3 层中 D_5 表征的印度洋流域水系则由第 4 层中 D_{17} 、 D_{18} 所表征的各流域水系所组成。从表 3 中进一步分析可见, 整个中国水系的盒维数 D_1 为 1.4189, 与外流区水系盒维数 D_2 和内流区水系盒维数 D_3 的平均值 1.3460 并不相等, 所以, 从表 3 中可发现整个中国水系盒维数值与各个层次流域水系盒维数的平均值并不相等, 一般而言, 各个层次流域水系盒维数的平均值小于整个水系盒维数值。如果将表 3 第 3 层中的 D_3 换为具体的各内流区流域水系盒维数值 $D_{19} \sim D_{28}$, 则相应的水系盒维数均值变为 1.1412; 同理, 如果将第 4 层中的 D_3 换为具体的各内流区流域水系盒维数值 $D_{19} \sim D_{28}$, 则相应的水系盒维数均值变为 1.1734, 这就更进一步说明了水系盒维数值整体与部分之间所存在的上述规律。此规律对于水系盒维数及其形态的分形反演推理具有一定的实际应用价值。

3 讨 论

通过以上分析, 得出了一定的结论, 但是许多问题仍是值得探讨的:

(1) 流域水系盒维数的计算方法问题, 目前有数种计算水系盒维数的方法^[8], 同一研究对象利用不同的计算方法, 其计算结构是不尽相同的, 目前有一些研究中却往往笼统了分形的概念, 将不同方法计算所得的结果盲目比较。如果要进行水系盒维数横纵向比较的话, 则必须遵循相同的计算方法, 所以, 当务之急是探讨各种水系盒维数计算方法的异同, 以利于研究的深入。

(2) 对于计算过程中使用图源比例尺差异的问题, 结合已有的相关研究可以发现, 对于同一流域, 利用不同比例尺图源计算所得的结果是有一定的差异的。例如, 赵锐曾在 1:250 万图源上计算出长江水系盒维数值为 1.314, 内蒙古内流区水系盒维数值为 1.237^[3], 它们就与本文的计算结果有差别, 所以, 系统探讨水系盒维数值随图源比例尺的变化规律也是促进相关研究深入的紧迫任务之一。

表 3 中国水系的层次构成

Table 3 Hierarchy of river basins of China

第 1 层	D_1			水系盒维数均值
第 2 层	D_2		D_3	1.3460
第 3 层	D_4	D_5	D_6	1.2526
第 4 层	$D_7 \sim D_{16}$	$D_{17}、D_{18}$	D_3	1.2259

(3) 能否简单地用盒维数来进行流域水系发育程度的判断, 不仅涉及到盒维数的计算方法问题, 而且涉及到所使用的图源比例尺的大小问题, 同时更为重要的是用一个简单的盒维数是否会将本来复杂的现象过于简单化, 例如, 中国水系的盒维数为 1.4189, 这能否判断出中国水系的发育程度, 显然这一指标是不够的, 所以, 相关研究是值得继续深入的。

(4) 关于水系具有分形性质的物理机制问题。研究表明^[1~5,8], 无论是单一河道还是河流网络, 水系的分形性质在一定的标度区间都是客观存在的, 并且是自发形成的, 因而是一种自组织结构, 汪富泉等认为水系分形自组织结构的形成、维持和演化的物理机制在于地貌内外营力及其相关作用、系统的开放性、非线性、随机性以及耗散性^[9], 这虽然高度概括了水系具有分形性质的物理机制之所在, 但是较为宏观, 缺乏区域性的实际例证, 显然这也是进行水系分形研究的最大难点所在。结合分形理论在诸多领域之中的应用现状^[10,11], 笔者认为, 目前应大力进行流域水系分形性质的普遍确定与分维的普遍测算, 在此基础上遵循现象与本质之间的辩证关系, 渐进进行水系分形机制的研究。

参考文献:

- [1] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 124-128.
- [2] 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, 1997, 52(2): 154-160.
- [3] 赵锐, 何隆华. 中国水系湖泊分形研究[J]. 地球信息, 1997(增刊): 50-54.
- [4] 梁虹, 卢娟. 喀斯特流域水系分形、熵及地貌意义[J]. 地理科学, 1997, 17(4): 310-315.
- [5] 冯金良, 张稳. 海滦河流域水系分形[J]. 泥沙研究, 1999(1): 451-455.
- [6] Grassberger P. On efficient box counting algorithms[J]. International Journal of Modern Physics C, 1983, 4(3): 515-523.
- [7] 国家遥感中心研究发展部, 中国科学院遥感应用研究所编. 陆地卫星影像中国地学分析图集[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 184-187.
- [8] 冯平, 冯炎. 河流形态特征的分维计算方法[J]. 地理学报, 1997, 52(4): 343-351.
- [9] 汪富泉, 曹叔尤, 丁晶. 河流网络的分形与自组织及其物理机制[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 367-375.
- [10] Jay G, Xia G G. Fractals in physical geography[J]. Progress in Physical Geography, 1996, 20(2): 178-191.
- [11] 朱晓华, 杨秀春. 分形论、界壳论及其与地理学的发展[J]. 科技导报, 2000(5): 20-23.

On box dimensions of river basins of China^{*}

ZHU Xiaohua^{1,2}, CAI Yurong^{1,2}

(1. Department of Resource & Environment & Geography, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Key Laboratory for Earth Surface Processes under the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The fractal theory is used to study systematically the fractal character of the river basins of China in this paper. Some significant conclusions are drawn as follows: (1) The fractal character exists objectively in the river basins of China. (2) The fractal dimensions of the river basins of China are calculated. The box dimension of the whole river basins of China is 1.4189, and that of the exorheic region of China is 1.4305, etc. (3) The box dimensions of river basins in plain regions of China are larger than those in mountain regions. (4) The box dimension of the whole river basins of China is different from the average dimension of all its parts. The more the parts of the river basins, the larger the difference between the box dimension of the original river basins and the average fractal dimension of all parts.

Key words: fractal; box dimension; river basin; China

* The project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40171004).