

# 京津冀城镇体系与水系结构的时空关系研究

张 凤<sup>1,2</sup>, 陈彦光<sup>2\*</sup>, 刘 鹏<sup>1</sup>

(1. 中国城市规划设计研究院, 中规院(北京)规划设计公司, 北京 100044;  
2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘 要:**京津冀地区人水关系矛盾突出, 分形可以有效描述城镇体系和水系时空演化特征, 从而揭示两者演化关系, 为城市问题的解决提供一些理论和经验依据。论文采用分形理论中的网格维数和多分维谱, 首先分别刻画了两者的时空演化特征, 其次探讨了城镇体系和水系结构之间的时空关系, 最后探究了水系结构退化的影响因素。主要结论有: ① 1990—2010年, 京津冀地区建设用地的网格维数升高、自相似性增强、从集聚向分散转变, 意味着建设用地朝着空间填充程度增强、有序、分散的方向发展, 而水系反之, 证明两者具有不同的时空演化方向; ② 21世纪10年代, 京津冀的人水关系十分紧张, 南水北调虽然缓和了京津冀用水问题, 改善了大尺度上的水系结构, 但在小尺度上改善有限; ③ 越靠近城市中心, 建设用地分形形态发育越成熟, 结构越有序, 越靠近外围越混乱无序; ④ 京津冀地区水系退化, 由自然和人为两方面因素造成, 21世纪以后人为因素的影响较为显著。针对京津冀地区水系退化, 提出如下政策建议: 在城市建设过程中, 一方面科学规划城市水系, 重视低等级水系的保护; 另一方面节约集约利用水资源, 完善水资源管理机制。未来, 需要进一步探索城市发展和水系的非线性关系, 为城市可持续发展提供依据。

**关键词:** 网格维数; 多分形; 城镇体系; 水系; 京津冀

改革开放以后, 中国的城市迎来了高速发展, 伴随而来的是多方面的环境问题, 尤其是在特大城市群地区, 人地关系矛盾突出。要想解决城市环境问题, 首先需要理清城市发展和自然环境之间的关系。城市系统和自然系统均错综复杂, 本文选取城镇体系和水系为代表, 城镇体系是人类集聚的显著结果, 水系是自然的重要构成因素, 通过研究城镇体系和水系空间结构的时空演化关系, 探讨城市发展和环境的相互作用。

空间形态研究一般都基于欧式几何, 但传统欧式几何在研究复杂系统时具有一定的局限性, 本文将利用新兴的分形学方法对城镇体系和水系的空间形态进行刻画。城镇体系与水系的关系一直是学术界非常感兴趣的问题。从20世纪60年代起,

学者们就开始探讨两者之间的关系<sup>[1-2]</sup>, 直到21世纪仍在继续, 并且有了新的研究方法, 那就是分形。分形自20世纪80年代创立以来<sup>[3-4]</sup>, 在医学、地质、物理等各领域发挥了重要作用, 也逐渐成为地理学的重要工具。由于地理系统是复杂系统, 利用传统测度研究空间形态时, 一定会遇到尺度问题。而分形是专门描述无尺度现象的, 因此是城镇体系和水系研究的有效工具。已有研究表明, 城镇体系和水系都具有显著的分形特征<sup>[5-9]</sup>, 并且城镇体系和水系具有相似的分形结构<sup>[10-11]</sup>。但在目前的分形相关文献中, 城镇体系或水系单方面的研究较多, 两者关系的探讨较少<sup>[12-13]</sup>。在两者关系的研究中, 理论研究较多<sup>[1, 14]</sup>, 实证研究较少。因此, 本文的研究将有助于填补城镇体系和水系关系分形实证研究的空缺。

收稿日期: 2019-02-28; 修订日期: 2019-06-18。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590843); 国家自然科学基金项目(41671167)。[Foundation: Major Program of National Natural Science Foundation of China, No. 41590843; National Natural Science Foundation of China, No. 41671167.]

第一作者简介: 张凤(1993—), 女, 江苏南通人, 硕士生, 主要从事城市地理和城市规划研究。E-mail: zhangfeng6322@qq.com

\*通信作者简介: 陈彦光(1965—), 男, 河南罗山人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地理空间分析与计算地理学。

E-mail: chenyg@pku.edu.cn

引用格式: 张凤, 陈彦光, 刘鹏. 京津冀城镇体系与水系结构的时空关系研究 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 377-388. [Zhang Feng, Chen Yanguang, Liu Peng. Spatiotemporal relationships between urban system and water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Progress in Geography, 2020, 39(3): 377-388.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.003

在中国3大城市群中,京津冀地区的人水关系矛盾最突出。2000—2014年,京津冀水资源总量不到全国的1%,却承载着占全国约8%~10%的人口和GDP,人均水资源量仅为全国平均水平的9.14%<sup>[15]</sup>。2013年的京津冀蓝皮书指出,水资源缺乏问题已成京津冀发展最大“短板”<sup>[16]</sup>。因此,对京津冀地区城镇体系和水系关系进行探讨,有重要的理论和现实意义。

综上,本文将利用分形方法,以京津冀为研究区,探讨城镇体系和水系的时空演化关系,进而研究人与环境之间的相互作用,为城市群病理分析提供一些可能的理论或者经验依据,并提出相关的政策建议。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

本文使用的主要数据有基础地图数据、遥感数据、降水量和地下水埋深数据。基础地图数据为2014年京津冀地区行政区划边界和区县、乡镇点数据。遥感数据为30 m分辨率的Landsat 5和Landsat 8卫星遥感影像,来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),年份为1990、1995、2000、2005、2010和2015年共6个年份。本文利用ENVI

软件结合指数提取法和决策树法解译出京津冀地区的建设用地和水体<sup>[17-19]</sup>,解译结果如图1所示。降水量数据来自中国气象科学数据共享服务平台。地下水埋深数据为京津冀平原地区浅层地下水埋深,来源于水资源公报及文献研究结果<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究方法

本文的主要研究方法是网格维数法和多分维谱。网格维数法是通过划分均匀网格,测量研究区内标度不变性的方法,属于单分形范畴。单分形是简单分形,其分形元均匀分布,因此用单一的网格维数就可以描述。借助网格维数,可以考察研究区域内地理对象在空间上的填充程度以及分布的均衡程度。网格维数法比较简单,方便理解和计算,但对于城市这样的复杂系统来说,不同分形元特征不同,用多分维谱进行刻画能够揭示更多信息<sup>[21-22]</sup>。

#### 1.2.1 网格维数法

计算网格维数,首先需要将研究区划分成网格,用 $r$ 来定义网格的边长,如图1a所示。之后,改变网格的大小,计算出被占据网格数 $N_r$ 。如果该形态符合分形特征,那么 $r$ 和 $N_r$ 满足以下模型:

$$N_r \propto r^{-D} \quad (1)$$

式中: $D$ 是网格维数。

实际计算可以通过ArcGIS和Excel软件实现:首先,利用ArcGIS的create fishnet工具生成系列网

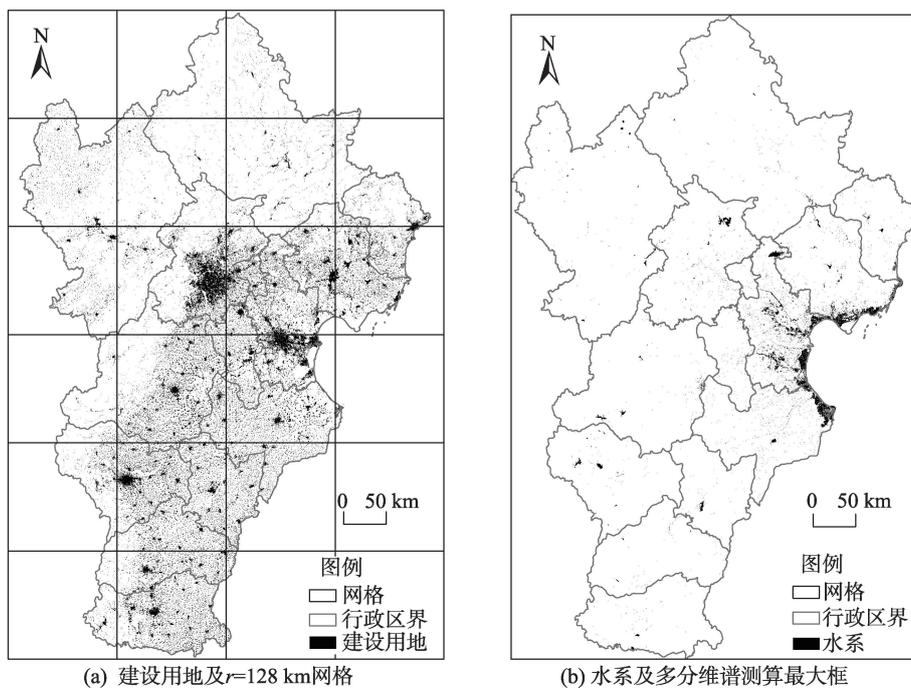


图1 京津冀建设用地和水系及网格示意图(2010)

Fig.1 Construction land and water system patterns in the Beijing-Tianjin-Hebei region and boxes for calculation, 2010

格, 网格边长  $r$  从 128000 m、64000 m、32000 m……500 m 共分为 9 个等级, 第一等级网格如图 1a 所示; 其次, 以土地利用形态数据为输入的值数据(value data), 以网格数据为输入的区数据(zone data), 通过 zonal statistics as table 工具统计被占据的网格数  $N_i$ ; 最后, 根据式(1), 在 Excel 中利用最小二乘法对  $\ln N_i$  和  $\ln r$  进行线性拟合, 斜率负值即网格维数。

### 1.2.2 多分维模型

多分维模型与网格维数的差异在于, 多分形模型可以通过改变  $q$  值反映不同密度区域的分形特征。 $q=1$  时, 反映原始形态的特征;  $q<1$  时, 密度低的区域会被放大,  $q$  值越小, 被放大的程度越高, 越能反映出低生长概率区域的特征;  $q>1$  时, 密度高的区域会被放大, 反映出高生长概率区域的特征<sup>[1]</sup>。因此, 通过多分维可以分别观测城市中心区和外围地区的空间分布情况,  $q$  值越大, 越反映城市中心区的特征,  $q$  值越小越反映城市外围地区的特征; 水系同样如此,  $q$  值越大, 越反映水系密集区的特征。

多分形模型包含 2 组参数: 一组是全局性参数, 即广义维数  $D_q$  和  $q$  阶质量指数  $\tau(q)$ ; 另一组是局部性参数, 即奇异性指数  $\alpha(q)$  和局部维数  $f(\alpha)$ 。

全局参数满足以下 2 个公式:

$$\sum_{i=1}^{N(r)} P_i^q r_i^{-\tau(q)} = \sum_{i=1}^{N(r)} P_i^q r_i^{(1-q)D_q} = 1 \quad (2)$$

$$\tau(q) = (q-1)D_q \quad (3)$$

式中:  $i$  是分形元的序号,  $r$  是尺度,  $N(r)$  是  $r$  尺度下的分形元数,  $P_i$  是第  $i$  个分形元的生长概率,  $r_i$  是第  $i$  个分形元的尺度,  $q$  表示  $q$  阶矩。

局部参数的公式是:

$$P_i(r_i) = r_i^{\alpha(q)}, \alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad (4)$$

$$N_i(\alpha, r_i) = r_i^{-f(\alpha)}, f(\alpha) = q\alpha(q) - \tau(q) \quad (5)$$

全局参数和局部参数的差别在于: 计算全局参数时, 所有区域都在测量范围; 而计算局部参数时, 仅测量某种密度的区域, 其他区域不在测量范围。

这些参数的计算方法如下。第一步, 盒子计数。将研究区划分为规则格网, 每一个被占据的格子都是一个分形元, 计算分形元生长概率  $P_i$ 。仍然以图 1a 为例, 对于第  $i$  个分形元来说, 其生长概率为:

$$P_i = \frac{A_i}{A} = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{N(r)} A_i} \quad (6)$$

式中:  $A_i$  是第  $i$  个格子里面的土地利用面积,  $A$  是全部土地利用面积,  $N$  是被占据的格子数。

第二步, 重构概率。引入  $\mu$  权重法<sup>[23]</sup>, 定义

$$\mu_i = \frac{P_i^q}{\sum_{i=1}^{N(r)} P_i^q} \quad (7)$$

根据不同的  $P_i$  和  $q$  值, 计算出相对应的  $\mu_i$ 。此时, 2 个局部参数可以通过  $\mu_i$  计算得到:

$$\alpha(q) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{\ln r} \sum_{i=1}^{N(r)} \mu_i \ln P_i \quad (8)$$

$$f(\alpha) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{\ln r} \sum_{i=1}^{N(r)} \mu_i \ln \mu_i \quad (9)$$

全局参数可以进一步借助 Legendre 变换求出, 即式(4)、式(5)右边的 2 个公式。

在技术方面, 具体计算步骤如下: 首先在 ArcGIS 中, 以覆盖京津冀行政区域的长方形为最大框, 如图 1b 所示, 将最大框一分为四、四分为十六……划分出 10 个网格等级; 其次测算出不同尺度下, 每个格子中土地利用面积与全区域土地利用面积之比  $P_i$ ; 最后利用 MATLAB 计算多分维谱, 先计算出  $\mu$  权重, 再依次计算出局部参数和全局参数。

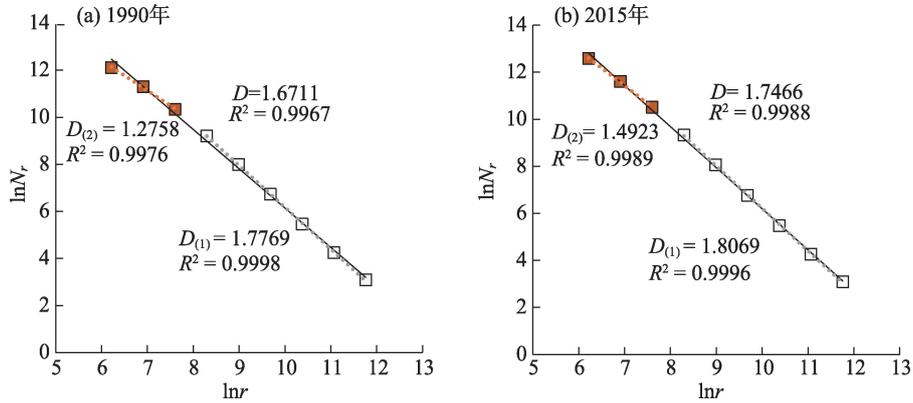
目前, 对于多分维谱的研究还处于发展阶段。本文的研究中, 主要使用到其中 2 个谱线图。① 广义维数  $q-D_q$  谱: 在  $q-D_q$  谱中, 谱线是一条单调递减的挤压曲线, 负无穷处代表生长概率最小的分形元, 正无穷处代表生长概率最大的分形元。② 局部参数  $\alpha-f(\alpha)$  谱: 其中  $\alpha(q)$  代表特定密度的分形元, 密度越小,  $\alpha(q)$  越大;  $f(\alpha)$  计算的是特定密度分形元的维数,  $f(\alpha)$  越大, 代表该密度的分形元在空间上的填充程度、均衡度越高。

## 2 结果和分析

### 2.1 京津冀城镇体系时空演化特征

首先测算京津冀地区建设用地的网格维数。图 2 是京津冀建设用地 1990、2015 年的双分形关系拟合图。可以看到, 拟合曲线具有斜率不同的 2 个标度区, 呈双标度结构<sup>[24-25]</sup>。标度区是“自相似性存在的范围”, 现实世界中没有标准分形, 分形特征只存在于一定的尺度范围, 这个尺度范围就称作标度区<sup>[26]</sup>。

由京津冀建设用地 6 个年份的网格维数计算结果可见(表 1), 1990—2015 年,  $D_{(1)}$  -  $D_{(2)}$  逐渐减小, 说明京津冀建设用地双分形结构逐步向单分形结构演变, 暗示京津冀建设用地结构在优化。双分形结构暗示自仿射性<sup>[27-28]</sup>, 即在不同的扩展方向, 用地形态



注:实线表示整体,虚线表示分段; $D_{(1)}$ 为第一标度区网格维数(图中后6个点为第一标度区), $D_{(2)}$ 为第二标度区网格维数(图中前3个点为第二标度区), $D$ 为整体网格维数。图4同。

图2 京津冀建设用地1990和2015年的双分形关系拟合

Fig.2 Bi-fractal patterns of construction land in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 1990 and 2015

表1 京津冀建设用地6个年份的网格维数计算结果

Tab.1 Grid dimension of construction land in the Beijing-Tianjin-Hebei region

年份	整体网格	第一标度区	第二标度区	标度区网格
	维数 $D$	网格维数 $D_{(1)}$	网格维数 $D_{(2)}$	维数差值 $D_{(1)} - D_{(2)}$
1990年	1.6711 (0.9967)	1.7769 (0.9998)	1.2758 (0.9976)	0.5011
1995年	1.6957 (0.9973)	1.7905 (0.9997)	1.3311 (0.9979)	0.4594
2000年	1.71 (0.9976)	1.7992 (0.9997)	1.3641 (0.9983)	0.4351
2005年	1.7161 (0.9979)	1.7998 (0.9997)	1.3872 (0.9985)	0.4126
2010年	1.7235 (0.9982)	1.8006 (0.9997)	1.4158 (0.9986)	0.3848
2015年	1.7466 (0.9988)	1.8069 (0.9996)	1.4923 (0.9989)	0.3146

注:括号内为决定系数 $R^2$ 。

生长的分形特征不同。城市从自仿射分形演化为自相似分形,体现了城市的自组织优化过程<sup>[29]</sup>。因此可以说明,京津冀建设用地结构在随时间优化。

其次,计算京津冀建设用地的多分形谱,将广义维数 $q-D_q$ 谱和局部维数 $\alpha-f(\alpha)$ 谱绘制在图3中。根据 $q-D_q$ 谱, $q<0$ 时 $D_q$ 收敛较慢, $q>0$ 时收敛较快,说明建设用地密集地区的分形结构发育可能更完善。为了验证这个结果,绘出不同 $q$ 值的 $\ln r-I_q(r)$ 坐标图(图略), $I_q(r)$ 是Renyi信息熵,该坐标图中趋势线的斜率的负值就是广义维数 $D_q$ <sup>[30]</sup>。根据 $\ln r-I_q(r)$ 坐标图,当 $q \geq 0$ 时,散点拟合直线效果很好,这说明在建设用地密度较高的地区,自相似分形特征明

显。当 $q<0$ 的时候,散点比较散乱,大致分成了2个标度区, $q$ 越小,双分形结构越明显, $D_q$ 拟合效果越差,这说明建设用地密度越低,越呈现出自仿射分形的特征,分形发育越不足。换言之,越接近城市中心区,自相似性越好,空间结构越合理有序;越接近郊区或农村,建设用地自相似性越差,空间结构越杂乱无章。

根据 $\alpha-f(\alpha)$ 谱,1990—2015年,京津冀建设用地的空间分布特征从集聚分布转变为分散分布,用地的扩张方式从内涵发展转变为外延扩张。 $\alpha-f(\alpha)$ 谱收敛时的高度差 $R_f$ 能够反映空间集聚特征, $R_f = f(\alpha_{+x}) - f(\alpha_{-x})$ <sup>[31-32]</sup>,这里用 $f(\alpha_{+40}) - f(\alpha_{-40})$ 计算。当 $R_f > 0$ ,即 $\alpha-f(\alpha)$ 谱线形态左高右低时,用地呈分散分布特征,当 $R_f < 0$ 时,用地呈集聚分布特征,即前者的生长模式是外延扩张式,后者是内涵提升式<sup>[11]</sup>。6个年份京津冀建设用地的 $R_f$ 分别为-0.521、-0.450、0.088、0.104、0.133、0.074。1990年和1995年 $R_f < 0$ ,说明这一时期京津冀建设用地扩张以内涵发展为主;2000—2015年, $R_f > 0$ ,以外延扩张为主。20世纪90年代初期,快速城镇化刚开始起步,城市中心区用地尚有空间,城镇化以内部填充为主;进入21世纪后,中心区已经填满,城市发展走向外延扩张。但2010—2015年 $R_f$ 减小,说明2010年以后,建设用地往外扩张的趋势有所收敛。

最后,计算京津冀地区的城镇点分布的网格维数。本文计算了2组城镇点网格维数,分别是区县点和乡镇点,其中区县共205个点,乡镇共2339个点。具体测算方法与建设用地网格维数相同。计算得到区县点网格维数是1.469,乡镇点网格维数是

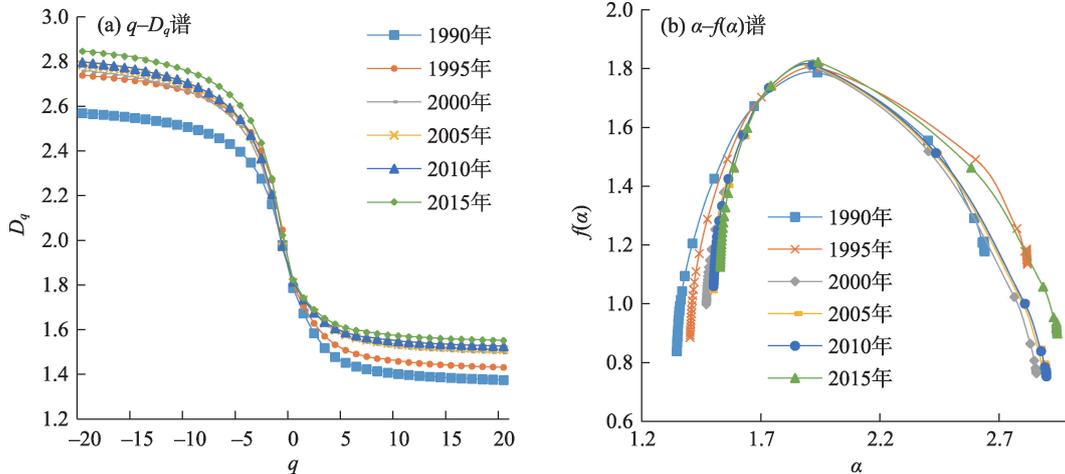


图3 京津冀建设用地多分形结构的 $q-D_q$ 谱和 $\alpha-f(\alpha)$ 谱

Fig.3 Multifractal dimension spectrums of construction land in the Beijing-Tianjin-Hebei region

1.699。区县点网格维数的标度区范围是16000~512000 m,共5个点;乡镇点网格维数的标度区范围是8000~512000 m,共6个点。网格维数拟合的决定系数 $R^2$ 均超过0.996,表明京津冀地区城镇点分布符合分形特征。

### 2.2 京津冀水系时空演化特征

这一部分主要分析京津冀地区水系的网格维数和多分维谱。网格维数计算结果见表2,双对数坐标图见图4。在图4中可以看到,水系网格维数的拟合曲线也呈双标度结构。由表2和图4可知,京津冀水系空间分布结构具有如下分形特征:

(1) 京津冀水系的分形发育不足,且分形结构

随着时间的推移逐步退化,说明水系的时空结构在退化。首先是整体网格维数 $D$ 的拟合效果不佳。根据Benguigui等<sup>[8]</sup>的研究,网格维数拟合的 $R^2$ 大于0.996可以判断形态是分形的。而根据表2,6个年份整体网格维数的 $R^2$ 都低于0.996。这说明京津冀全区域水系形态的分形结构发育不足。其次是自仿射性越来越强。京津冀水系的双标度结构随着时间的推移,越来越明显。1990—2015年, $D_{(1)}$ 、 $D_{(2)}$ 的差值分别为0.524、0.501、0.584、0.565、0.573、0.625,显著增大。这说明,京津冀地区水系的分形结构在逐步退化。

(2) 1990—2010年,京津冀地区水系的网格维数 $D$ 、 $D_{(1)}$ 、 $D_{(2)}$ 均呈降低趋势,但2010—2015年, $D_{(1)}$ 有较大提高, $D_{(2)}$ 变化不明显,说明1990—2010年,京津冀水系在空间上的填充程度降低,2015年由于南水北调,京津冀水系分布在大尺度上有所改善,在小尺度上改善有限。6个年份整体拟合的网格维数 $D$ 分别为1.537、1.554、1.491、1.494、1.482、1.541,趋势不是很明显,但是剔除2015年数据后,网格维数呈显著降低的特征。第一标度区网格维数 $D_{(1)}$ 分别为1.721、1.732、1.714、1.707、1.705、1.760,同样,剔除2015年数据之后,网格维数减小的趋势很明显。第二标度区网格维数 $D_{(2)}$ 的变化特征和 $D$ 、 $D_{(1)}$ 不同,在纳入了2015年数据的情况下, $D_{(2)}$ 仍然呈逐渐降低的变化趋势。可以看出,1990—2010年,水系在空间的填充程度呈显著降低的趋势,而2015年水系在大尺度上填充程度有大幅提高,其第一标度区网格维数达到了1990—2015年的最高值,在小尺度上变化不明显。究其原因,主要是南水北调中线

表2 京津冀水系6个年份的网格维数计算结果

Tab.2 Grid dimension of water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

年份	整体网格维数 $D$	第一标度区网格维数 $D_{(1)}$	第二标度区网格维数 $D_{(2)}$	标度区网格维数差值 $D_{(1)}-D_{(2)}$
1990	1.5365 (0.9933)	1.7213 (0.9999)	1.1969 (0.9943)	0.5244
1995	1.5541 (0.9940)	1.7317 (0.9999)	1.2304 (0.9960)	0.5013
2000	1.4911 (0.9913)	1.7135 (0.9998)	1.1300 (0.9971)	0.5835
2005	1.4942 (0.9919)	1.7072 (0.9999)	1.1424 (0.9972)	0.5648
2010	1.4819 (0.9914)	1.7054 (0.9998)	1.1323 (0.9968)	0.5731
2015	1.5414 (0.9907)	1.7598 (0.9998)	1.1350 (0.9949)	0.6248

注:括号内为决定系数 $R^2$ 。

工程于2014年12月正式通水,供给京津冀豫4地,通水之后,在大尺度上改善了京津冀的水系分布情况,但在小尺度上并没有明显的提升。

进一步计算水系多分维谱,将 $q-D_q$ 谱和 $\alpha-f(\alpha)$ 谱绘制在图5中。因南水北调问题,暂时剔除2015年数据不作分析。根据广义维数 $q-D_q$ 谱,发现1990—2010年,越是水系稀疏的地区,水系分布填充程度下降越明显。广义维数反映地理对象在空间的填充程度, $q$ 越小越反映低密度区域的信息。1990—2010年, $D_{q=2}$ 几乎没有趋势性, $D_{q=1}$ 有比较弱的下降趋势, $D_{q=0}$ 则明显下降。这表明,1990—2010年,水系分布越是稀疏的地方,降低的趋势越明显。根据局部维数 $\alpha-f(\alpha)$ 谱,水系的空分布具有明显的集聚特征,且集聚特征日益突出。静态地看,水系的 $R_i$ 始终小于0,说明空分布呈明显的集聚模式,低密度区包围高密度区。动态地看,6个年份水系的

$R_i$ 分别是-0.771、-0.731、-0.759、-0.739、-0.829、-0.828,呈减小趋势,代表集聚特征更加突出。

### 2.3 京津冀城镇体系和水系结构的关系分析

这一部分从多个角度、多个方面对京津冀城镇体系和水系结构进行比较分析。首先从单分形的角度比较建设用地、城镇点网格维数与水系网格维数的关系,其次从多分形角度比较建设用地与水系的多分维谱,最后纳入降水量、地下水埋深数据探讨水系网格维数降低的影响因素。

首先是单分形角度的比较,在图6中绘制了京津冀地区建设用地和水系网格维数4个参数的时间变化。

根据图6,建设用地和水系具有不同的演化方向,一方面,建设用地的网格维数逐渐增大,水系的网格维数波动降低;另一方面,建设用地的自仿射性降低,水系的自仿射性增强。图6a、6b、6c反映了

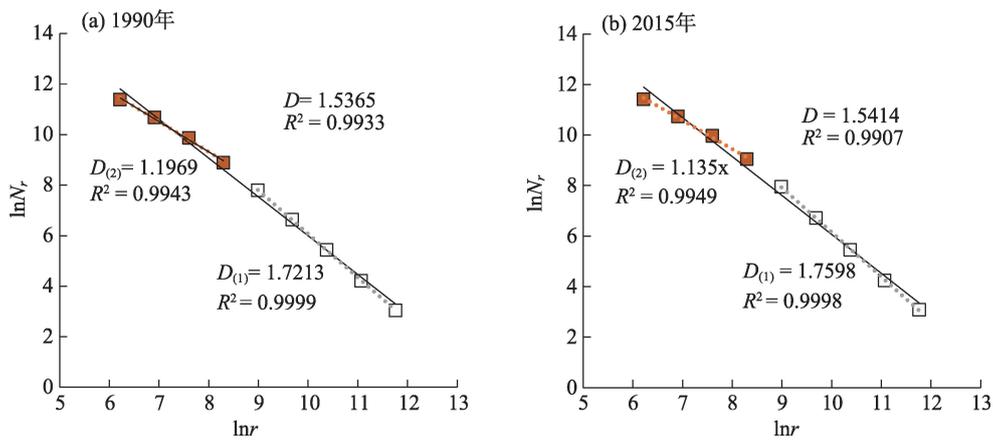


图4 京津冀水系1990年和2015年的双分形关系拟合

Fig.4 Bi-fractal patterns of water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1990 and 2015

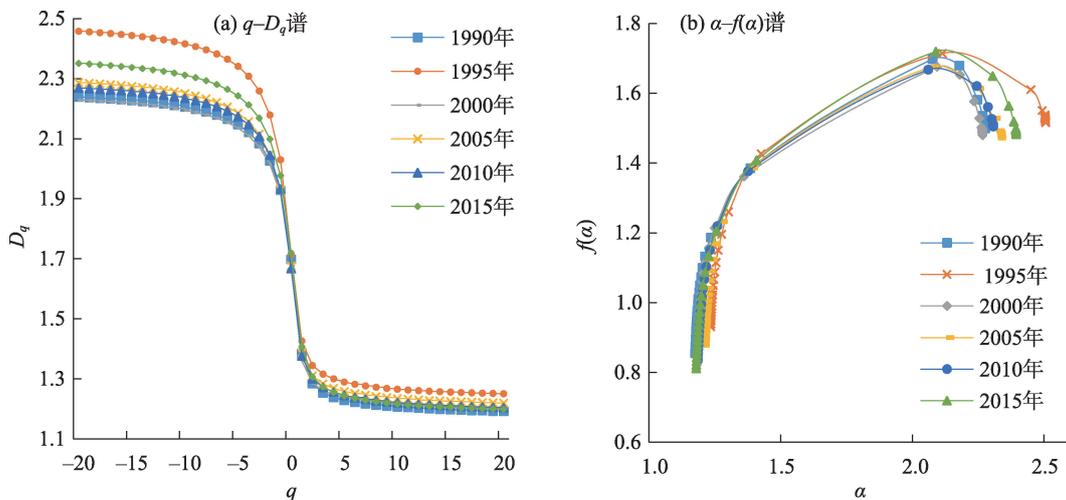


图5 京津冀水系多分形结构的 $q-D_q$ 谱和 $\alpha-f(\alpha)$ 谱

Fig.5 Multifractal dimension spectrums of water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

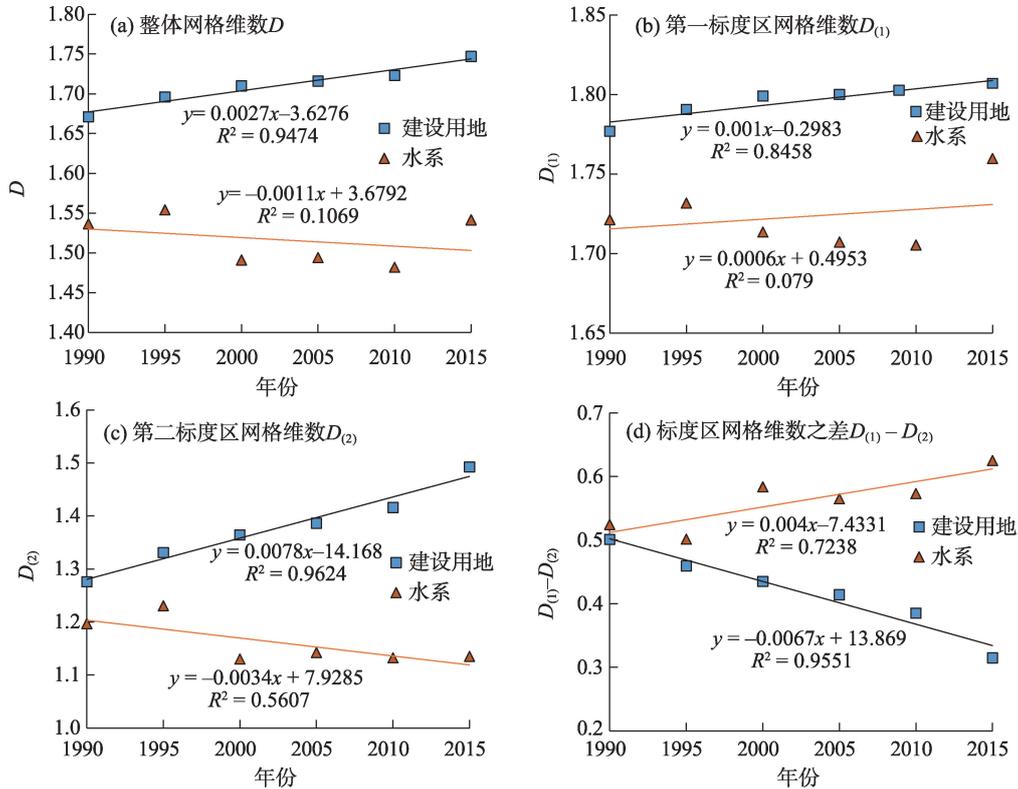


图6 京津冀全区域建设用地和水系网格维数

Fig.6 Grid dimension of construction land versus water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

不同尺度下网格维数的变化趋势。图6d反映了自仿射性,建设用地  $D_{(1)} - D_{(2)}$  值随时间减小,水系  $D_{(1)} - D_{(2)}$  值随时间增大。网格维数和自仿射性的变化趋势说明:一方面,建设用地的空间填充程度提高,水系的空间填充程度降低;另一方面,建设用地的空间结构随时间优化,水系的空间结构随时间退化。

根据城镇点和水系网格维数的比较,我们发现如果按1990—2010年的发展趋势,2015年京津冀水系网格维数将低于区县点网格维数。研究表明<sup>[30]</sup>,区县点网格维数不宜高于水系的网格维数,否则会导致水资源不能有效利用以及一些城市水源短缺。根据相关研究,自1997年开始,京津冀地区的水资源就面临供不应求的情况<sup>[33]</sup>。1956—2000年京津冀地区的年均水资源总量为258亿  $m^3$ ,2000—2014年降至184亿  $m^3$ <sup>[15]</sup>。超采地下水和跨区域调水成为解决京津冀地区用水缺口的主要途径,目前地下水超采面积已经达到平原区的90%以上。

下面分析多分形结构。为了简明起见,仅绘制出一个年份的建设用地和水系的广义维数  $q - D_q$  谱、局部维数  $\alpha - f(\alpha)$  谱,如图7所示。根据图7a,无论是在密集地区还是稀疏地区,建设用地的分维都要大于水系。根据图7b,建设用地的分散性更强,水系

的集聚性更强。如前所述,京津冀建设用地的  $R_f$  呈增大趋势,水系的  $R_f$  呈减小趋势。说明伴随着建设用地的外延扩张,建设用地密集区域越来越多,导致其空间分布整体呈分散特征,而水系越稀疏的地区,减少得越厉害,导致其空间分布越来越集中。在苏州、深圳等地,研究也得出了类似的结论,如吴雷等<sup>[34]</sup>研究城市化对河流水系影响时,发现20世纪80年代至21世纪10年代,苏州市支流河网密度大幅度减少,土地城市化过程中,越低等级的河流衰减越厉害;周洪建等<sup>[35]</sup>研究发现改革开放后近30 a,深圳市河网趋于主干化,区/街道办驻地附近2 km范围内是河网萎缩、消失的主要区域。

最后,利用逐步回归探究京津冀地区1990—2010年水系网格维数变化的影响因素。水系的变化会受到自然条件的极大影响,最主要的因素就是降水。将京津冀水系网格维数以及年降水量数据进行标准化,绘制在图8中。根据图8,1990—2000年,降水量与水系  $D$ 、 $D_{(1)}$ 、 $D_{(2)}$  有相同的趋势,2000—2005年,在降水量增加的情况下,  $D_{(1)}$  减小;2005—2010年,在降水量增加的情况下,分维值  $D$ 、 $D_{(1)}$ 、 $D_{(2)}$  全部减小。由此可以推断:首先,1990—2010年降水量具有降低趋势,导致水系分维降低,这是自然

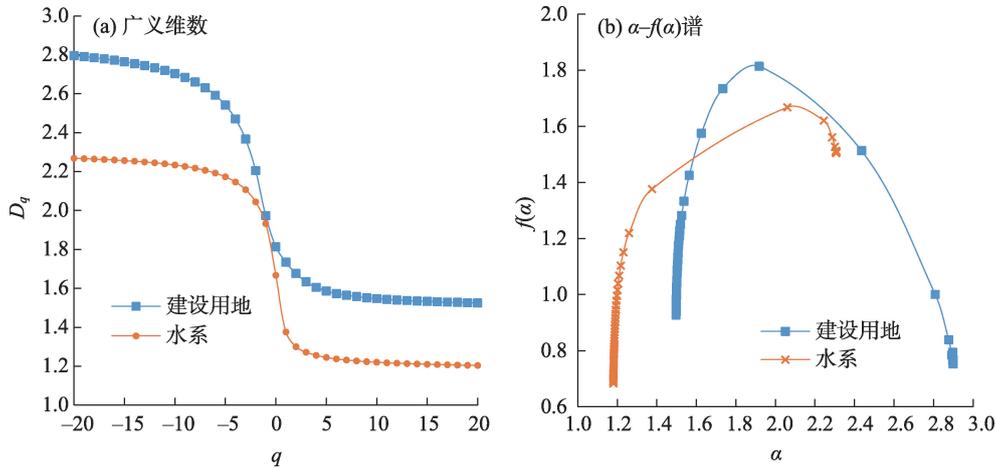


图7 2010年京津冀建设用地区和水系多分形结构的广义维数和 $\alpha-f(\alpha)$ 谱

Fig.7 Multifractal dimension spectrums of construction land versus water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2010

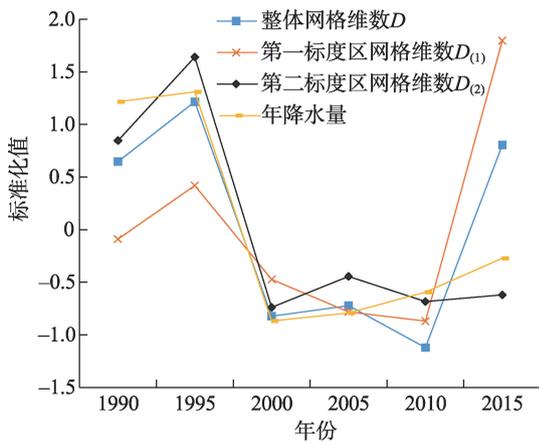


图8 京津冀水系网格维数以及年降水量的标准化值

Fig.8 Standardized grid dimension of water system versus standardized annual precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region

因素对水系网格维数的影响;其次,21世纪后人为因素对水系的影响较为突出,因为水系分维在降水量增加的情况下仍然在下降。导致水系分维降低的人为因素主要有建设用地扩张侵占水系、总用水量增加、超采地下水导致地下水位下降等。分别看这3个因素:第一,建设用地侵占水系前文已有说明,此处不再赘述,纳入该因素;第二,根据1995—2010年的水资源公报,京津冀的用水量逐渐减少,故剔除用水量因素;第三,京津冀地区大量开采地下水,会造成地表水衰减,李雪等<sup>[36]</sup>针对近50 a来京津冀地区的研究表明,人类活动对地下水水位下降的影响占主导地位,其贡献度达到60.6%,因此纳入地下水因素。

以1990—2010年5个年份的水系网格维数为

因变量,以对应年份建设用地网格维数、降水量、浅层地下水埋深为自变量,进行逐步回归分析。当步进概率为0.1、剔除概率为0.2时,模型只引入了降水量,剔除了地下水埋深和建设用地网格维数。3个自变量具有较强的共线性,单独进行回归分析时,降水量、地下水埋深和建设用地网格维数的置信度分别达到0.991、0.948、0.891。考虑到3个自变量中只有降水量有上下波动,可以推断降水量对水系造成了波动性的影响,且改变快速,因此降水量置信度最高,而人为因素对水系的影响是趋势性的,改变缓慢,因此置信度低于降水量,其中地下水埋深变化的影响可能大于建设用地变化的影响。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

在引言中,曾提出对城镇体系和水系两者演化关系的疑问。根据对京津冀地区的探讨,发现京津冀城镇体系(全区域建设用地)和水系演化的方向有显著的差异性,这些差异包括维数的变化、自仿射性的变化、集聚特征等。京津冀地区城镇体系和水系相反的分形演化趋势,符合前人理论研究的结果。自然地理系统的热力学熵的演化方向与人文地理系统相反,自然地理系统的熵增(从有序到无序演化)是以人文地理系统的熵减(从有序到无序演化)为代价的<sup>[37]</sup>,而分维和熵具有等价性<sup>[38]</sup>,因此从熵的角度可以判定两者的分形演化关系是相反的<sup>[39]</sup>。这种相反的演化关系,暗示着一种共变反应:人类活动在导致城市发展的同时,对水系具有一定的负面

影响,这种影响包括建设用地扩张侵占水系、开采地下水导致地表水衰减等<sup>[34-36]</sup>。根据2.3节的分析结果,京津冀地区水系退化受自然和人为2个方面的影响,进入21世纪后,人为因素的影响比较显著。因此,协调城市和水系的关系需要我们进一步探索城市发展与水系深刻的非线性关系和演化机制,以便为制定合理、可持续的城市发展政策提供依据。

此外,本文验证了利用区县点网格维数与水系网格维数进行比较的合理性。刘继生等<sup>[30]</sup>曾探讨河南省城镇体系空间结构和水系分布的关系,认为水系分维应该大于城镇体系分维,否则将违背空间优化原则,导致水资源不能有效利用。刘继生等比较时利用的是县级以上城镇点网格维数,本文将建设用地、区县点、乡镇点这3种网格维数和水系网格维数都进行了比较,其中建设用地和乡镇点网格维数都显著大于水系网格维数,唯独利用区县点网格维数和水系网格维数进行比较最为合理。究其原因,中国的城镇绝大多数具有悠久的历史基础,城镇依赖于河流发育,因此水系分维原则上必须大于城镇体系分维<sup>[39]</sup>。如果城镇体系分维高于水系分维,说明城镇点的空间填充程度和均衡程度高于水系,那么就有城镇不能有效地利用到水源(不够用)或发生关于水源的竞争(不均衡)。至于利用区县点比较更为合理的原因,是由于上规模的城镇与上规模的河流进行比较,如果聚落比较小,小溪也可以支撑,但是规模大的城镇依赖于上规模的河流。

结合分析结果,本文对京津冀地区建设用地的发展和人水关系的协调,提出如下建议:京津冀地区建设用地整体粗放增长,外围无序蔓延,应结合空间规划改革,科学制定城镇开发边界,提高建设用地效率,改善空间结构。根据2.1节中的研究结果,一方面,1990—2015年,京津冀建设用地的扩张方式从内涵发展转变为外延扩张,城市摊大饼式的扩张带来了环境污染、交通拥堵等城市病。建设用地处于低效利用状态,1990年京津冀地区人均建设用地面积为436 m<sup>2</sup>,2015年为343 m<sup>2</sup>,远高于城市/乡村人均建设用地指标。另一方面,京津冀城市中心区的空间结构相对合理有序,越接近郊区或农村,建设用地空间结构越杂乱无章。说明城市规划管理的过程中,往往主要关注城市中心区的建设,忽视了对外围建设用地的管理,以至于郊区/农村的建设用地更加无序发展。现阶段的国土空间规划改革,将城镇开发边界列入严格管控要求,目的正

是限制城市无序蔓延和低效扩张。对于京津冀地区而言,应该结合城镇开发边界的制定和管理,提高建设用地效率,推动城市发展由外延扩张向内涵提升转变,不仅要关注城市中心区的空间结构,也要注意控制城市外围地区建设用地的扩张。

解决京津冀水系退化问题,不能仅仅依靠南水北调,还需从保护和节水入手。国家对于生态文明建设的重视,提升了水系保护的地位,但形势依然严峻。第一,很多城市管理者为了追求经济效益,目前仍停留在轻生态、重发展的阶段。第二,很多城市规划者在城市水系的处理上,存在着盲目截弯取直、就河流论河流缺乏整体性、过度填埋河流尤其是低等级河流等问题<sup>[34]</sup>。小尺度水系在城市规划建设过程中往往被忽视,导致汇水通道被填埋,产生城市内涝问题<sup>[40]</sup>,2012年北京发生“7·21”特大暴雨,79人遇难,就是城市内涝的典型表现。因此,在城市规划管理过程中,需要在严格保护大的河流湖泊的前提下,重视对低等级河流水系的保护。第三,京津冀地区超采地下水的根源是供水存在缺口,目前依靠南水北调缓解了供水问题,但节水仍需贯彻。节约用水仅靠公民的自觉是不够的,必须靠机制体制约束。中国的《水资源法》至今尚未出台,水资源所有权不明确,导致地方政府水资源费征收差异大,水价难以体现资源稀缺性<sup>[41]</sup>。因此,必须完善水资源管理的机制,明确水资源所有权,实现最大化保护水资源的目标。

本文的研究还存在以下不足。第一,时间尺度较短,水系网格维数拟合效果及逐步回归置信度不高。希望未来能进行更长时间跨度的研究。第二,在空间尺度上,本文的研究限制在行政边界范围内,未来可以考虑从流域的角度出发,进行更大空间尺度的研究。第三,由于遥感数据的局限性,本文对水系的分析只包含地表水,未考虑地下水。另外,在提取水系的过程中,由于使用的遥感影像是30 m分辨率,会导致一些河道无法被提取出来,可能会低估水系分维值。未来可以考虑使用分辨率更高的数据进行研究。

### 3.2 结论

通过对京津冀城镇体系和水系空间结构的分析,得到了京津冀城镇体系和水系空间结构的演化特征,两者有相同之处,也有不同之处。通过两者之间的比较,得到了京津冀城镇体系演变和水系演变的相互关系。主要结论如下:

(1) 京津冀建设用地和水系具有不同的时空演

化方向。根据网格维数,1990—2010年,京津冀地区建设用地的空间填充程度逐渐增加,水系的空间填充程度波动降低。根据自仿射性,京津冀建设用地形态由自仿射结构向自相似结构转变,水系反之,表明京津冀城镇体系空间结构随时间优化,水系空间结构随时间退化。根据多分维谱,建设用地扩张从内涵向外延转变,建设用地空间分布越来越分散,而水系越是稀疏的地区,密度减少得越是厉害,导致水系的空间分布越来越集中。建设用地和水系的相反演化方向暗示一种共变反应:人类活动在导致城市发展的同时,对水系具有一定的负面影响。需要我们进一步探索城市发展与水系之间深刻的非线性关系和演化机制,以便为制定合理、可持续的城市发展政策提供依据。

(2) 南水北调工程缓解了京津冀用水的燃眉之急,但是在小尺度上改善有限。城镇体系(区县点)的网格维数不宜高于水系网格维数,如果没有南水北调,2015年区县点网格维数将高于水系网格维数,对于城市发展必然会造成很大的不利影响。南水北调使得水系整体网格维数和第一标度区网格维数显著上升,但是第二标度区上升不明显,说明小尺度水系结构的改善情况不明显。

(3) 1990—2010年京津冀的水系网格维数降低是自然条件和人为因素两方面造成的。自然条件是降水量减少,人为因素包括建设用地扩张和超采地下水导致地下水位下降等。相比于自然降水对水系面积的快速改变,人为因素对水系的改变是缓慢的,进入21世纪后,人为因素的影响比较显著,导致水系网格维数在降水量增加的情况下仍然在下降。其四,越接近城市中心区,建设用地空间结构越合理;越接近郊区或农村,空间结构越混乱。在 $\ln r - I_q(r)$ 坐标图中,当 $q > 0$ 时,10个散点几乎在同一直线上;而当 $q < 0$ 时,散点比较散乱,大致分成2个标度区。说明城市中心区分形结构较成熟,城市外区分形发育不足。

针对以上结论,对京津冀的发展提出如下政策建议:① 提升城市管理者 and 规划者的水系保护意识和科学理念,在城市规划管理过程中,多考虑城市发展和水资源利用之间的协调关系,在严格保护大的河流湖泊的前提下,重视对低等级河流水系的保护。此外,进一步推进节约用水,完善水资源管理机制;② 结合城镇开发边界的制定和管理,提高建设用地效率,推动城市发展由外延扩张向内涵提升转变,

不仅关注城市中心区的空间结构,也要注意控制城市外围地区建设用地的扩张,避免郊区无序蔓延。

## 参考文献(References)

- [1] Woldenberg M J, Berry B J L. Rivers and central places: analogous systems? [J]. *Journal of Regional Science*, 1967, 7(2): 129-139.
- [2] Krugman P. Confronting the mystery of urban hierarchy [J]. *Journal of the Japanese and International economies*, 1996, 10(4): 399-418.
- [3] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. *Science*, 1967, 156: 636-638.
- [4] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature* [M]. New York, USA: W. H. Freeman and Company, 1983.
- [5] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. The fractal nature of river networks [J]. *Water Resources Research*, 1988, 24(8): 1317-1322.
- [6] La Barbera P, Rosso R. On the fractal dimension of stream networks [J]. *Water Resources Research*, 1989, 25(4): 735-741.
- [7] 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. [Li Houqiang, Ai Nanshan. Fractal geomorphology and fractal models of landform evolution. *Nature Magazine*, 1992(7): 516-519.]
- [8] Benguigui L, Czamanski D, Marinov M, et al. When and where is a city fractal? [J]. *Environment & Planning B Planning & Design*, 2000, 27(4): 507-519.
- [9] Frankhauser P, Tannier C, Vuidel G, et al. An integrated multifractal modelling to urban and regional planning [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018, 67: 132-146.
- [10] Chen Yanguang. Analogies between urban hierarchies and river networks: Fractals, symmetry, and self-organized criticality [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2009, 40(4): 1766-1778.
- [11] Chen Yanguang. Multifractals of central place systems: Models, dimension spectrums, and empirical analysis [J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, 402: 266-282.
- [12] 岳文泽, 徐建华, 颀耀文. 甘肃城镇体系结构及其分形模型研究 [J]. *地域研究与开发*, 2004, 23(1): 16-20. [Yue Wenzhe, Xu Jianhua, Xie Yaowen. A study on urban system structure and its fractal model in Gansu Province of China. *Area Research and Development*, 2004, 23(1): 16-20.]
- [13] 周峰, 吕慧华, 许有鹏. 城镇化下平原水系变化及河网连通性影响研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 402-409. [Zhou Feng, Lv Huihua, Xu Youpeng. Change of river structure and river network connectivity

- in the plain river network area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 402-409. ]
- [14] 陈彦光, 刘继生. 中心地体系与水系分形结构的相似性分析: 关于人-地对称关系的一个理论探讨 [J]. *地理科学进展*, 2001, 20(1): 81-88. [Chen Yanguang, Liu Jisheng. Studies of analogies of fractal structure between river networks and systems of central places: A theoretical approach to the symmetry between physical and human geographical systems. *Progress in Geography*, 2001, 20(1): 81-88. ]
- [15] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 58-67. [Bao Chao, He Dongmei. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 58-67. ]
- [16] 文魁, 祝尔娟, 等. 京津冀发展报告: 承载力测度与对策 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013: 155-195. [Wen Kui, Zhu Erjuan, et al. Annual report on Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region development. Beijing, China: Social Sciences Academic Press, 2013: 155-195. ]
- [17] 徐涵秋. 基于压缩数据维的城市建筑用地遥感信息提取 [J]. *中国图象图形学报*, 2005, 10(2): 223-229. [Xu Hanqiu. Remote sensing information extraction of urban built-up land based on a data-dimension compression technique. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(2): 223-229. ]
- [18] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595. [Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595. ]
- [19] 徐涵秋, 杜丽萍. 遥感建筑用地信息的快速提取 [J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(4): 574-579. [Xu Hanqiu, Du Liping. Fast extraction of built-up land information from remote sensing imagery. *Journal of Geo-information Science*, 2010, 12(4): 574-579. ]
- [20] 刘志国, 王恩德, 付建飞, 等. 河北平原地下水水位的时空变异 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(5): 717-720. [Liu Zhiguo, Wang Ende, Fu Jianfei, et al. Spatio-temporal variability of groundwater level in China's Hebei Plain. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(5): 717-720. ]
- [21] Halsey T C, Jensen M H, Kadanoff L P, et al. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets [J]. *Physical Review A*, 1986, 33(2): 1141-1151.
- [22] Hentschel H G E, Procaccia I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1983, 8(3): 435-444.
- [23] Chhabra A, Jensen R V. Direct determination of the  $f(\alpha)$  singularity spectrum [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(12): 1327-1330.
- [24] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns [J]. *Environment and Planning A*, 1993, 25(8): 1175-1199.
- [25] White R, Engelen G. Urban systems dynamics and cellular automata: Fractal structures between order and chaos [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 1994, 4(4): 563-583.
- [26] 陈彦光, 刘继生. 城市形态分维测算和分析的若干问题 [J]. *人文地理*, 2007, 22(3): 98-103. [Chen Yanguang, Liu Jisheng. On fractal dimension calculation and analysis of urban form. *Human Geography*, 2007, 22(3): 98-103. ]
- [27] Chen Yanguang, Huang Linshan. A scaling approach to evaluating the distance exponent of the urban gravity model [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2018, 109: 303-313.
- [28] Chen Yanguang, Lin Jingyi. Modeling the self-affine structure and optimization conditions of city systems using the idea from fractals [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2009, 41(2): 615-629.
- [29] 赵静涵. 京津冀城镇用地形态的时空演化分析 [D]. 北京: 北京大学, 2017. [Zhao Jinghan. Analysis on spatio-temporal evolution of urban land-use in the region of Beijing, Tianjin and Hebei. Beijing, China: Peking University, 2017. ]
- [30] 刘继生, 陈彦光. 河南省城镇体系空间结构的多分形特征及其与水系分布的关系探讨 [J]. *地理科学*, 2003, 23(6): 713-720. [Liu Jisheng, Chen Yanguang. Multifractal measures based on man-land relationships of the spatial structure of the urban system in Henan. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(6): 713-720. ]
- [31] Sun Xia, Chen Huiping, Wu Ziqin, et al. Multifractal analysis of Hang Seng index in Hong Kong stock market [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2001, 291(1-4): 553-562.
- [32] Sun Xia, Chen Huiping, Yuan Yongzhuang, et al. Predictability of multifractal analysis of Hang Seng stock index in Hong Kong [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2001, 301(1-4): 473-482.
- [33] 封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力 [J]. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 689-699. [Feng Zhiming, Liu Dengwei. A study on water resources carrying capacity in Jingjinji region. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 689-699. ]
- [34] 吴雷, 许有鹏, 徐羽, 等. 平原水网地区快速城市化对河流水系的影响 [J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 104-114. [Wu Lei, Xu Youpeng, Xu Yu, et al. Impact of rapid urbanization on river system in a river network plain. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 104-114. ]
- [35] 周洪建, 史培军, 王静爱, 等. 近30年来深圳河网变化及其生态效应分析 [J]. *地理学报*, 2008, 63(9): 969-980.

- [Zhou Hongjian, Shi Peijun, Wang Jing'ai, et al. River network change and its ecological effects in Shenzhen region in recent 30 years. *Acta Geographica sinica*, 2008, 1 (9): 969-980. ]
- [36] 李雪, 叶思源, 宋凡, 等. 京津冀平原区地下水水位变化主导因素的定量识别研究 [J]. *水文*, 2018, 38(1): 21-27. [Li Xue, Ye Siyuan, Song Fan, et al. Quantitative identification of major factors affecting groundwater change in Beijing-Tianjin-Hebei Plain. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(1): 21-27. ]
- [37] Rifkin J, Howard T. *Entropy: A new world view* [M]. New York, USA: Viking Press, 1980.
- [38] Ryabko B Y. Noise-free coding of combinatorial sources, Hausdorff dimension and Kolmogorov complexity [J]. *Problemy Peredachi Informatsii*, 1986, 22(3): 16-26.
- [39] 陈彦光. 分形城市系统: 标度、对称和空间复杂性 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 281-373. [Chen Yanguang. *Fractal urban systems: Scaling, symmetry, spatial complexity*. Beijing, China: Science Press, 2008: 281-373. ]
- [40] 李婧. 海绵城市视角下城市水系规划编制方法的探索 [J]. *城市规划*, 2018, 42(6): 106-110. [Li Jing. Exploration on urban waterway planning methodology from the perspective of sponge city. *City Planning Review*, 2018, 42(6): 106-110. ]
- [41] 匡耀求, 黄宁生. 中国水资源利用与水环境保护研究的若干问题 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(4): 29-33. [Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng. Several issues about the research on the water resources utilization and water environment protection in China. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(4): 29-33. ]

## Spatiotemporal relationships between urban system and water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, CHEN Yanguang<sup>2\*</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>

(1. CAUPD Beijing Planning and Design Consultants Co., China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China;

2. Department of Urban and Economic Geography, College of Urban and Environmental Sciences,  
Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** With the rapid development of cities in China, urban environmental problems become increasingly more severe. Clarifying the relationships between urban development and the environment can help solve urban environmental problems. In this study, we took the Beijing-Tianjin-Hebei region as the research area and used fractal method to describe urban system and water system in the region, then to explore the interactions between urban and water systems. The main results and conclusions are: 1) From 1990 to 2010, the fractal dimension of construction land in the Beijing-Tianjin-Hebei region increased, while the fractal dimension of the water system decreased; the bi-fractal characteristic of construction land in the Beijing-Tianjin-Hebei region decreased, while the bi-fractal characteristic of the water system increased; the spatial structure of construction land changed from concentration to dispersion from 1990 to 2015 and the water system became more concentrated. These phenomena illustrate that the spatiotemporal change of construction land and water system had opposite trends in the Beijing-Tianjin-Hebei region. 2) The fractal structure of urban centers is more complete than suburbs. 3) In the second decade of the 21st century, the human-water relationship became tenser. The South-to-North Water Transfer Project eased the severe stress of water in the Beijing-Tianjin-Hebei region, which mainly improved the structure of water system at the large scale. 4) The degradation of water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1990 to 2010 was caused by both natural and human factors. In the 21st century, the influence of human factors is more significant. According to the results and conclusions, some policy recommendations are proposed: On the one hand, more consideration should be given to the role of water in the process of urban planning, especially the protection of small-scale water sources and saving water by improving the mechanism of water resources management. On the other hand, more attention should be paid to the improvement of suburban spatial structure by avoiding unlimited urban expansion.

**Keywords:** grid dimension; multifractal; urban system; water system; Beijing-Tianjin-Hebei region