*J. Lake Sci.*(湖泊科学), 2008, **20**(4): 514-519
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
©2008 by *Journal of Lake Sciences*

# 太湖流域南河水系无尺度结构*

苏伟忠, 杨桂山
(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘　要**: 基于图论和无尺度结构视角及节点度指标初步探讨太湖流域南河水系结构的数量特征和空间秩序, 为辨识和模拟流域水文情势提供重要参数. 主要结论如下: 太湖流域南河水系结构的数量节点度不符合幂次分布, 而长度和等级节点度符合无尺度结构; 南河水系结构符合 Horton 第一定律和第二定律, 同时此类特征亦符合无尺度结构, 但指数函数回归模拟的 $R^2$ 相比乘幂函数回归模拟的 $R^2$ 较低; 由幂次定律所支配的这种水系网络特征状况是由地区地形、农业灌溉、圩区建设和城市化过程共同推动; 从节点度角度看, 南河下游圩区使得河网数量节点度增加, 等级节点度和长度节点度降低.
**关键词**: 水系结构; 无尺度结构; 节点度; 南河水系

## Scale-free structure of the Nanhe drainage of Lake Taihu watershed

SU Weizhong &YANG Guishan
(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *P.R.China*)

Abstract: On the base of Graph Theory, free-scale structure viewpoint and vertex degree indices, the paper describes and analyzes numeral and spatial characteristics and their urbanization relationships of drainage structure within the Lake Taihu watershed. Numeral degree of Nanhe drainage structure in Lake Taihu watershed does not accord with power function distribution, but length and rank degrees represent the characteristics of scale-free structure. Additionally Nanhe drainage structure is appropriate for not only Horton First Law and Second Law but also scale-free structure. Scale-free structure really fits a power function, which reflects an imbalance-structure system controlled by few gathered nodes and provides some key methods for identifying and modeling hydrology index of watershed. Lastly the power law behind the drainage structure shows the human disturbance difference exerted on drainage structure. In the highly urbanized area of Nanhe middle stream and downstream numeral and rank vertex degrees are both high, but length degree is low and in the less urbanized area, the area rank vertex degree is also very low. In the upstream area, urbanization level is low and length vertex degree is high, but rank vertex degree is low. The numeral vertex degree of most of nodes is low and has no clear relationship with urbanization.
Keywords: Drainage structure; scale-free structure; vertex degree; Nanhe drainage

水系结构是分析河流形态和功能的重要基础. Horton 定律常用来描述水系结构特征, 国内外学者已经对许多流域的水系结构进行了 Horton 定律检验, 结果表明水系具有和谐的等级和空间秩序[1]. 20 世纪 70 年代分形几何学产生, 地貌学家和数学家便致力于寻求 Horton 水系定律和分形思想的内在联系. 20 世纪 80 年代末经 Roth 和 Barbera 等的深入探讨 Horton 定律以及 Hack 定律隐含的分形性质比较明确地显示出来[2], 继此之后国内外学者对分形水系进行了大量研究[3-5]. 水系也是受人类改造最为深刻的自然生态系统之一, 其中城市化的影响最为显著, 杨凯等采用水面率、分枝比、分维数等描述了上海平原水系结构特征及其城市化关联性[1]. 可见, 大部分的水系结构研究集中于自然状态的流域, 主要是 Horton 水系结构定律和分形的应用, 着眼于水系“边”即河道数量和空间的测度. 1999 年 Barabasi 和 Albert 基于因特网的网页连结的物理统计学分析提出无尺度网络(scale-free networks), 认为这种结构由少数集散节

* 国家自然科学重点基金项目(40435013)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-331)联合资助. 2007−05−22 收稿; 2007−07−22 收修改稿. 苏伟忠, 男, 1977 年生, 博士, 助理研究员; E-mail: wzsu@niglas.ac.cn.

点支配, 其节点的连接边数符合幂次分布, 对自 1959 年以来科学家惯于把复杂网络看作随机网络(random networks)[6], 即节点的连结边数遵循钟形分布提出了挑战[7-8]. 目前国内外众多领域进行了相关研究, 例如光纤连结的路由器网络、生物的细胞代谢网络、电子邮件连结的人际网络、科学论文引用关系连结的网络、美国生物技术产业联盟网络均证实属于无尺度结构[9-16]. 河流的交汇点是在地貌、水文上均有重要意义的特殊地段, 在 GIS 中又融合了大量的时空信息. 因此, 本文借助 RS 和 GIS 平台, 基于无尺度结构方法及节点度初步探讨太湖流域南河水系结构的数量特征和空间秩序, 为辨识和模拟流域水文情势提供重要参数.

## 1 研究方法

太湖流域是我国著名水网地区, 境内河道纵横交错, 河网密度 3.2km/km$^2$, 上游水系为树枝状排列的河流, 下游为扇形排水系统. 近年在自然及人为因素影响下, 太湖水系出现了水资源不足及水质污染等一系列功能性变化[17]. 流域上游包括苕溪水系、南河水系及洮滆水系, 其中南河水系发源于宜溧山地和茅山丘陵, 主流由东坝以下的南河、宜溧河、北溪组成, 经西氿、团氿、东氿于太浦口注入太湖.

### 1.1 水系网络建立

基于ERDAS和ARCMAP水文分析模块, 将分辨率为25m的DEM数据GRID, 以试误法筛选适当门槛值提取水系. 下游平原河流流动的随机性大, 人工开挖的河流渠道改变了河流的自然分布状态, 由描述地表起伏的DEM提取的流域自然水系就与实际河网也不相符. 把研究区地形坡度图与由DEM中提取的流域自然水网相叠加, 发现与实际河网不符的河流大都处在平均地形坡度不大于3的区域. 由此采用主干河道和平原水系约束法解决这一问题. 南河流域经主干河道和平原河网数字化技术处理后生成的河网(图1). 进一步根据图论方法建立水系网络图: 根据上述生成的河网矢量图, 在ArcMap平台下人工建立河网节点, 其原则是两条及其以上河流的交汇点处建立河流节点; 最后生成节点与河流的拓扑关系. 根据Strahler原则划分了河流等级.

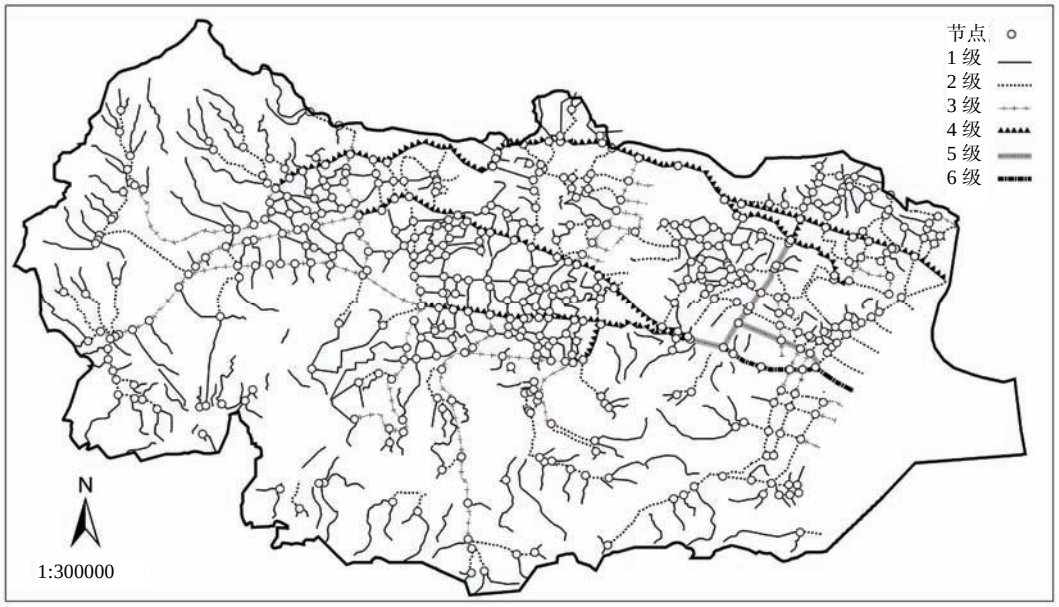



图1 水系网络

Fig.1 Drainage network graph

### 1.2 节点度

从图论视角河流网络图由节点和连结节点的边组成, 节点代表河流交汇点; 边代表河道. 网络图表

示为G(*V*, *E*), *V*为节点集, *E*为边集. 每个网络图均有三种共同指标: 边数、节点数、网络中亚图的数, 在网络图中节点的边数为该节点度*D*[18]. 可见, 随机网络和无尺度网络属于*D*的不同分布类型. 幂次分布不似钟形曲线具有峰值, 而是连续递减函数, 描述的是由少数有众多连结(*D*大)的节点(集散节点)主控的系统.

$$v_j = \alpha D_i^{-\beta};$$
$$v_{ri} = \alpha D_{ri}^{-\beta};$$
$$v_{li} = \alpha D_{li}^{-\beta}$$

式中, $D_i$是节点度, $V_j$是对应 $D_i$的节点数, $\alpha$、$\beta$是常数. 基于 *D* 提出考察节点河流连结等级的等级节点度 $D_r$及河流长度的长度节点度 $D_l$: 连接某节点的上游河流级别的最大等级表示该节点的等级节点度 $D_r$, 长度节点度 $D_l$表示连接该节点的上游分支河流的总长度. 从无尺度结构视角刻画区域尺度水系网络图的异质结构, 阐述水系网结构特征的城市化关联. 城镇化水平指标等于各城镇非农业人口比重.

## 2 结果与讨论

### 2.1 节点度空间分布差异

南河水系网络节点的河流连接数、长度及等级节点度(表 1).

表 1 河流网络图的节点度

Tab.1 Vertex degrees of river network graph

| 节点度($D_i$) | | | 长度节点度($D_{li}$) | | | 等级节点度($D_{ri}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 节点类型 | 河流数 | 节点数 | 节点类型 | 长度(km) | 节点数 | 节点类型 | 等级 | 节点数 |
| $D_1$ | 2 | 17 | $D_{l1}$ | 1.5 | 244 | $D_{r1}$ | 1 | 216 |
| $D_2$ | 3 | 299 | $D_{l2}$ | 2.5 | 92 | $D_{r2}$ | 2 | 113 |
| $D_3$ | 4 | 160 | $D_{l3}$ | 3.5 | 65 | $D_{r3}$ | 3 | 76 |
| $D_4$ | 5 | 5 | $D_{l4}$ | 5 | 56 | $D_{r4}$ | 4 | 61 |
| | | | $D_{l5}$ | 8 | 24 | $D_{r5}$ | 5 | 10 |
| | | | | | | $D_{r6}$ | 6 | 5 |

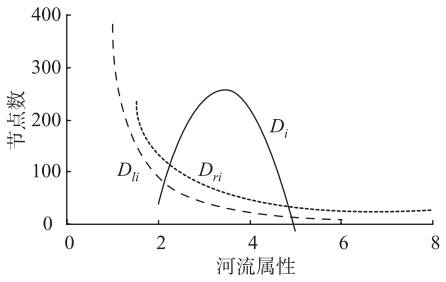



图 2 河流网络图的节点度分布

Fig.2 Vertex degree distribution curves of river network graph

2.1.1 数量节点度 河网数量节点度的回归模拟模型符合二次函数, 其分布曲线为倒“U”或钟形曲线, 不存在少数“集散”节点, 即不存在拥有很多分支河流连接的少数节点, 而拥有较多和较少河流连接的节点数差不多(图 2). 根据模拟公式 $V_i$=−109.25($D_i$−3.43)$^2$−257.37($R^2$=0.8542): 研究区节点连接的平均河流数在 3–4 之间, 对应的结点数约为 257, 根据数量节点度 $D_1$、$D_2$、$D_3$、$D_4$, 其对应的节点分别为 $V_1$、$V_2$、$V_3$、$V_4$.

从其空间分布来看(图 3a): 节点 $V_4$和 $V_5$主要分布在沿太湖和沿鬲湖河网, 以及南河、中河和北河中下游的干流上. 节点 $V_2$和 $V_3$分布相对分散, 前者分布上游一些支流地区, 后者主要分布在区域主要河流上, 无论下游还是中上游均有分布. 与城市化水平的关联来看(图 3a 灰色梯度区, 单位%): 节点 $V_4$和 $V_5$几乎都在城镇化水平大于 20%的地区, 即形成两个核心地区, 一是溧阳城区附近, 包括天目湖景区的城镇, 二是宜兴城区附近; 节点 $V_2$和 $V_3$分布相对分散, 与城市化水平的关系不大. 可见, 城市化发展基础好的地区水网密度高, 人工开挖河流分布密集, 河流形态一般呈现方格网状, 节点的河流连接数一般都在 3–4 之间. 而位于山地丘陵的河流形态一般呈现树枝状, 节点的河流连接数一般在 2–3 之间.

2.1.2 长度节点度 河网长度节点度结构回归模拟模型符合是一幂函数 $V_{li}=382.04D_{li}^{-2.0558}$($R^2$=0.8961), 符合无尺度结构特征, 存在少数集散节点, 即存在所连接的分支河流长度超过 8km 的少数节点, 仅有 24 个, 而大部分节点的河流连接长度都低于 3.5km, 且仅一半的节点的河流连接长度低于 1.5km(图 2). 根据长度节点度 $D_{l1}$、$D_{l2}$、$D_{l3}$、$D_{l4}$、$D_{l5}$, 其对应的节点分别为 $V_{l1}$、$V_{l2}$、$V_{l3}$、$V_{l4}$、$V_{l5}$.

其空间分布来看(图 3b): 节点 $V_{l5}$ 分布在几条主要干流的上游地区, 坡度大于 3 度, 连接的多数为较长的自然型河流. 节点 $D_{l4}$ 也主要分布在主要干流的上游地区, 但连接的河流中长度相对节点 $V_{l5}$ 较短, 并且也有部分节点连接的河流分布平原河网地区; 节点 $V_{l1}$、$V_{l2}$、$V_{l3}$ 则分布干流的中下游地区, 以及沿湖河网密集地区. 与城市化水平的关联来看: 节点 $V_{l5}$ 和 $V_{l4}$ 几乎排除在城市化水平大于 20%地区之外; $V_{l1}$、$V_{l2}$、$V_{l3}$ 则大部分集中在上述地区, 分布密集, 均匀布局成点阵格局; 但也有一部分位于该区之外的河流上游地区, 但分布分散, 整体呈现与河流形态相一致的树枝状格局.

2.1.3 等级节点度 河网等级节点度结构回归模拟模型是一幂函数 $V_{ri}=362.39D_{ri}^{-1.2879}$($R^2$=0.9621), 符合无尺度结构特征, 存在少数集散节点, 即存在所连接的分支河流等级大于等于 5 级的的少数节点, 仅有 15 个, 而大部分节点的河流连接长度都低于 5 级, 且近三分之二的节点的河流连接等级低于 3 级(图 2). 根据等级节点度 $D_{r1}$、$D_{r2}$、$D_{r3}$、$D_{r4}$、$D_{r5}$、$D_{r6}$, 其对应的节点分别为 $V_{r1}$、$V_{r2}$、$V_{r3}$、$V_{r4}$、$V_{r5}$、$V_{r6}$.

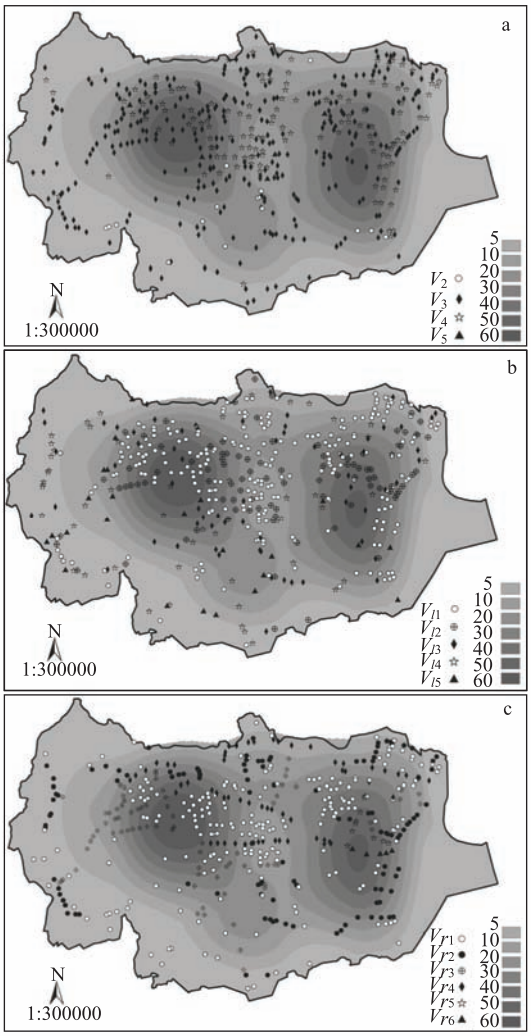



图 3 节点度及其城市化关联

Fig.3 Vertex degree and its relationship with urbanization

从其空间分布来看(图 3c): 节点 $V_{r6}$、$V_{r5}$ 位于南河主干流的下游入太湖地区; 节点 $V_{r4}$ 位于南河、中河和北河主干流的中游地区; 节点 $V_{r3}$、$V_{r2}$、$V_{r1}$ 分布分散, 但又集中在两类地区, 一类是河流的上游地区, 地形较陡, 源于山区的支流水系连接; 二类是平原水网地区, 人工开挖河流较多, 多数联系主要湖泊和主干河道, 河网密集, 河流级别相对较低. 与城市化水平的关联来看: 节点 $V_{r6}$、$V_{r5}$ 位于城市化水平较高的地区; 节点 $V_{r4}$ 基本位于溧阳和宜兴城区的连接地带, 与城市化水平关系不大; 节点 $V_{r3}$ 集中分布溧阳城区附近以及南河等上游干流城市化较高的地区; 节点 $V_{r2}$、$V_{r1}$ 则分布分散, 分布在低城市化水平地区的节点属于河流上游地区, 空间整体分布带状且不均匀; 分布在城市化水平较高的河流中下游地区的节点, 空间整体分布密集且均匀.

## 2.2 讨论

2.2.1 水系结构幂定律 Horton 定律是对河网水系结构秩序的一种定量表述. 首先对南河流域河网的 Horton 第一定律和第二定律进行检验, 并将其与无尺度结构特征进行比较研究. Horton 第一定律即河流数目定律认为在一个给定流域内, 连续地从较低等级向较高等级变化的河道总数目服从于 $L_{ri}=L_i a^{M-i}$ 的降低原则, 式中 $i$ 为河道级别, $M$ 为最高河道级别, $L_{ri}$ 为第 $i$ 级河道的数目, $a$ 为分枝比; Horton 第二定律即

河流长度定律认为在一个给定流域内, 不同等级序列河道中的每一个等级河道的累积平均长度, 随着河道等级序列的提高而服从于 $L_{li}=L_1a^{i-1}$ 的增加原则, 式中 $L_{li}$ 为第 $i$ 级河道的累积平均长度, $L_1$ 为系数, 在理论上为最低级河道的平均长度, $a$ 为长度比. 首先对南河流域河流的 6 个级别及其河道数目之间的关系分别进行指数和乘幂函数回归模拟, 为便于与 Horton 定律进行比较, 改变本文自高至低河道等级序列 6–1, 即河道等级自高至低的等级序列改为 1–6, 河道最高等级为 1. 模拟的两类函数公式分别为:

$$L_{ri}=1973.2\,\mathrm{e}^{-0.384i}\,(R^2=0.7543) \qquad L_{li}=2246.8i^{-1.1072}\,(R^2=0.9954)$$

同理, 然后对南河流域河流的 6 个级别及其河道累积平均长度之间的关系分别进行指数和乘幂函数回归模拟. 模拟的两类函数公式分别为:

$$L_{ri}=587.02\,\mathrm{e}^{-0.752i}\,(R^2=0.7543) \qquad L_{li}=361.76i^{-1.9591}\,(R^2=0.8845)$$

由此来看, 南河水系河网对 Horton 定律指数函数回归模拟的 $R^2$ 较高, 但相比对乘幂函数回归模拟的 $R^2$ 较低, 该流域河网结构符合 Horton 一、二定律, 同时符合无尺度结构特征. Horton 理论认识到流域河流网络有一种内部的严格组织有序性. 可见, 无尺度结构也是对水系网络结构的一种表达. 无尺度结构是许多自然和人文事象的本质特征, 这种特征就是一种幂次函数; 这种函数反映的是由少数集散节点所支配的、非均衡结构的系统, 即结构幂定律.

2.2.2 水系结构幂定律的解释及水文意义 空间关联是地理现象客观存在的本质特征. 美国科学院院士 Tobler 非常强调它的重要性, 称之为地理学的第一定律[19]. 在水系网络背后由幂次定律所支配的这种状况是地区地形、农业灌溉、圩区建设和城市化过程共同推动的. (1)南河流域中下游城市化水平高的地区河网数量节点度高、长度节点度低、等级节点度也高, 但同时在该区城市化水平低的乡镇河网等级节点度也低. 这些地区城镇发展历史非常悠久, 农业垦殖水平高, 大部分属于平原地区, 地形坡度低于 3 度, 湖荡水系密集, 为了防洪需要, 圩区建设人工开挖了许多河流. 东西横向的河流包括胥溪、南溪、中河、北河, 南北纵向河流包括丹金溧漕河、武宜运河等等, 以格状河网形态为主, 主要以工农业服务功能为主, 因而河网格子较小, 所以形成的河网节点一般具有 3–4 个河流连接, 河流连接长度较小. 许多源自山区和湖荡的各级支流逐渐汇集到主要干流, 如南河等级节点度较高, 但处于农业区, 城镇化水平较低的地区, 河流大都源自周边湖荡以及联系周边各支流, 等级较低. (2)南河流域上游地区, 城市化水平低, 长度节点度高, 但等级节点度低, 而大部分节点的数量节点度较低, 但总体与城市化水平关系不大. 地形坡度大部分高于3度, 以自然型河流为主, 河流形态基本呈树枝状, 分布稀疏, 按照Straller原则属于等级较小的源头河流为主, 但这些河流长度相对较大. 在这些地区台地前的近山坡洼, 沿河低洼地也修建了圩堤.

确定系统是否为无尺度结构, 对了解系统行为特征十分重要. 一旦这种等级序列被确定就可以比较方便地拟定地理系统所涉及的范围、要素和内容, 同时也可以确定应当采取的比例尺大小, 确定所要采集的地理信息量, 进行研究结果的精度分析, 并对所得结论实行评价, 分析它与目标函数之间的弥合程度等. 对流域水系结构而言, 河流的交汇点是在地貌、水文上均有重要意义的特殊地段, 无尺度则体现了所有交汇点在某些属性上的不平衡结构. 以防洪为目标, 确定与防洪有关的节点属性, 分析节点度的空间差异, 从而拟定防洪调控的范围、重点对象(集散节点)和内容. 洪水除了与降水强度有关外, 水系结构也是重要的决定因素, 在同样情况下水系结构改变将产生完全不同的水情. 南河水系下游及山丘台地前大量兴建圩区, 圩区水网成为南河水系的基本单元. 圩区建设使得河网密度增加, 河流节点的连接数增加, 但这些河流依附于地区性河流, 地区性河流又依赖于主干河流, 即河流等级低, 使得流域整体调蓄洪水的能力降低, 并使流域排水条件恶化, 同时也侵占了大量湖荡, 堵断或控制河道. 从节点度角度分析来看, 圩区使得河网数量节点度增加, 等级节点度和长度节点度降低: 河流交汇点连接的河流数量增加, 但这些河流属于人工开挖的低级河流且长度小, 把历史上形成的排水系统, 层层堵塞; 如果遭遇降雨集中季节, 来自山区的洪水难以顺利下泻, 造成严重的洪涝灾害. 山区树状河流节点的等级和长度节点度是河流对地形第一性原则的表现形式, 下游平原人为活动, 如农业灌溉、防洪和城市化过程改变了水网结构, 河网节点度发生变化, 进而也改变了水系的水文特征. 选择建立和设计一些集散节点, 维护这些集散节点的节点度不受人类活动的影响而发生大的改变, 是减少洪涝灾害的一种新思路.

## 3 结论

太湖流域南河水系结构的数量节点度不符合幂次分布, 而长度和等级节点度符合无尺度结构; 南河水系结构符合 Horton 第一定律和第二定律, 同时此类特征符合无尺度结构, 但其对 Horton 定律指数函数回归模拟的 $R^2$ 相比对无尺度结构幂次函数回归模拟的 $R^2$ 低.

在水系网络背后由幂次定律所支配的这种状况是地区地形、农业灌溉、圩区建设和城市化过程共同推动的: 南河流域中下游城市化水平高的地区河网数量节点度高、长度节点度低、等级节点度也高, 但同时在该区城市化水平低的乡镇河网等级节点度也低. 这些地区城镇发展历史非常悠久, 农业垦殖水平高, 地形坡度低于 3 度, 圩区建设人工开挖了许多河流; 南河流域上游地区, 城市化水平低, 长度节点度高, 但等级节点度低, 而大部分节点的数量节点度较低, 但总体与城市化水平关系不大, 地形坡度大部分高于 3 度, 以自然型河流为主, 河流形态基本呈树枝状, 属于等级较小的源头河流.

确定与防洪有关的节点属性, 分析节点度的空间差异, 从而拟定防洪调控的范围、重点对象(集散节点)和内容. 南河水系下游及山丘台地前大量兴建圩区, 圩区水网成为南河水系的基本单元. 从节点度角度分析来看, 圩区使得河网数量节点度增加, 等级节点度和长度节点度降低: 河流交汇点连接的河流数量增加, 但这些河流属于人工开挖的低级河流且长度小, 把历史上形成的排水系统, 层层堵塞; 如果遭遇降雨集中季节, 来自山区的洪水难以顺利下泻, 造成严重的洪涝灾害.

## 4 参考文献


[1] 杨 凯, 袁 雯, 赵 军等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应. 地理学报, 2004, **59**(4): 557-564.

[2] Roth G, La Barbera P. On the description of the basin effective drainage structure. *J of Hydrology*, 1996, **187**: 119-135.

[3] Veltri M, Veltri P. On the fractal description of natural channel networks. *J of Hydrology*, 1996, **187**: 137-144.

[4] 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. 地球科学进展, 2001, **16**(2): 178-183.

[5] 何隆华, 赵 宏. 水系的分形维数及其含义. 地理科学, 1996, **19**(2): 124-128.

[6] Erdos P, R'enyi A. On random graphs-I. *Publicationes Matematicae*, 1959, (6): 290-297.

[7] Albert R, Jeong H, Barabasi AL. Diameter of the World-Wide-Web. *Nature*, 1999, **401**: 130-131.

[8] Barabasi AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, **286**: 509-512.

[9] Girvan M, Newman MEJ. Community structure in social and biological networks. *PNAS*, 2002, **99**: 7821-7826.

[10] Govindan R, Tangmunarunkit H. Heuristics for Internet Map Discovery. In: Proceedings of IEEE INFOCOM 2000. *Tel Aviv Israel* (IEEE, Piscataway, N.J.), 2000, **3**: 1371-1380.

[11] Liljeros F, Edling CR, Amaral LAN *et al*. The Web of Human Sexual Contacts. *Nature*, 2001, **411**: 907-908.

[12] Jeong H, Mason SP, Oltvai ZN *et al*. Lethality and centrality in protein networks. *Nature*, 2001, **411**: 41-42.

[13] Jeong H, Tombor B, Albert R *et al*. The large-scale organization of metabolic networks. *Nature*, 2000, **407**: 651-654.

[14] Sidney R. How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution. *Eur Phys J B*, 1998, (4): 131-134.

[15] Barabasi AL, Jeonga H, Neda Z *et al*. Evolution of the social network of scientific collaborations. *Physica A*, 2002, **311**: 590-614.

[16] Broader AZ, Kumar SR, Maghoul F *et al*. Graph structure in the web. *WWW9/Computer Networks*, 2000, **33**(1-6): 309-320.

[17] 韩昌来, 毛 锐. 太湖水系结构特点及其功能的变化. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 300-306.

[18] 卢开澄. 图论及其应用(第2版). 北京: 清华大学, 2002.

[19] Tobler W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, **46**(supp l): 234-240.