

文章编号:0559-9350(2019)06-0670-09

淮河流域水系盒维数与连通度相关性研究

窦明^{1,2}, 于璐³, 靳梦⁴, 李桂秋^{1,2}

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水科学研究中心, 河南 郑州 450001;

3. 郑州航空港经济综合实验区城市管理局, 河南 郑州 450019; 4. 郑东新区管理委员会水务局, 河南 郑州 450000)

摘要: 在自然演变和人工干预双重影响下, 河湖水系的发育程度和连通效果在不断变化, 进而影响到流域水资源的合理开发利用。本文以淮河流域作为研究对象, 从数字高程模型中提取了全流域水系结构图, 并根据其他资料对结果进行修正; 基于当地人工水系建设背景, 运用分形理论计算了全流域13个水资源三级分区有、无人工水系情况下的水系分形盒维数; 基于河道闸坝工程建设背景, 运用图论方法计算了全流域13个水资源分区有、无闸坝工程情况下的水系连通度; 最后, 采用统计学方法研究了淮河水系盒维数指标与水系连通度指标之间的联系。结果显示, 剔除人工水系后的各分区水系盒维数有不同程度的下降, 且下降程度与区域水系个数、面积一定程度上成正比关系; 考虑有无人工水系、闸坝工程影响的各分区水系连通度, 有的增大, 有的减小; 水系盒维数与连通度间大体上呈现正相关的趋势关系。研究成果可为有关部门开展淮河流域水系建设工作提供理论支撑, 为摸清自然规律和人类活动对水系形态结构、发育情况和连通性的影响提供技术支持。

关键词: 水系盒维数; 水系连通度; 分形; 图论; 淮河流域**中图分类号:** P343.1**文献标识码:** A**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.201811150

1 研究背景

河湖水系的发育程度、形态结构和连通情况决定了区域水资源的空间分布, 对水资源配置和供水保障、生态系统稳定、经济社会发展等有着不可替代的作用^[1]。作为我国七大流域之一, 淮河流域是水资源开发利用程度较高的地区, 流域内河网交错、水系结构复杂、水利工程众多。研究水系形态结构、发育情况与连通状况, 对进一步加强江河湖库的治理和管理、优化水资源配置格局具有重要指导作用。近年来, 有关水系连通方面的研究成为国内外学者关注的热点。Ward^[2]提出了河流连接度的概念, 将其作为度量水资源在河流景观内相互传递能力大小的指标, Brierley等^[3]、Bracken等^[4]、Tetzlaff等^[5]、Ali等^[6]先后对水系连接度的概念、方法和应用进行了探讨, 并将其引入到景观生态学、水文学和地形学等学科领域。2005年, 水系连通性作为健康长江指标体系中一个重要的指标在国内被首次提出^[7], 张欧阳等^[8]分析了影响水系连通的原因, 此后, 唐传利^[9]、李原园等^[10]、王中根等^[11]、窦明等^[12]、周振民等^[13]、崔广柏等^[14]、夏继红等^[15]、高玉琴等^[16]、陈星等^[17]分别就水系连通的概念内涵、驱动因素、案例分析、城市化影响、水环境效果评估、机制及计算方法等进行了探讨。但是, 以上研究多聚焦于对水系连通概念特征的研讨, 在对水系连通作用机制的定量描述方面研究成果较少, 特别在水系形态结构、发育情况与水系连通格局的联系方面还缺乏系统性的研究。

基于以上认识, 本文综合运用分形理论、图论、统计分析等方法, 开展淮河流域水系盒维数与连通度相关性研究, 力图对水系格局的合理构建和水系功能的发挥提供决策依据。

收稿日期: 2018-12-27; 网络首发时间: 2019-06-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190624.1028.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679218, 51779230, 51879239, U1803241); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(17HASTIT031); 郑州大学优秀青年教师发展基金项目(1521323001)

作者简介: 窦明(1975-), 教授, 博士, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: douming@zzu.edu.cn

2 研究方法

本文的研究思路为：首先，基于30 m精度的淮河流域DEM数据，对淮河水系进行了提取和修正，并对在人类活动干预下形成的人工水系进行剥离；其次，以淮河流域水资源三级分区为单元，运用分形理论和网格覆盖法对各单元考虑和剔除人工水系的盒维数进行计算；再次，采用图论法建立各单元的水系图模型，利用图模型的邻接矩阵对各水资源分区的连通性进行判别，并以图论中的边连通度表征水系连通度，进而对各单元的水系连通度进行了评价；最后，运用双变量相关分析方法，借助SPSS软件对景观生态学指标和水系盒维数、连通度进行相关性检验，并对水系盒维数和水系连通度进行相关性分析，以分析淮河水系发育状况和连通程度之间的联系。

2.1 基于DEM数据的淮河水系提取 淮河流域河网水系信息是开展本次研究的基础数据，常用的水系提取手段有基于遥感影像图、基于数字高程模型(DEM)、通过扫描和矢量化实际水系地形图等。笔者在考虑现有资料精度以及实际情况，通过30 m精度的DEM数据对淮河流域水系进行了提取。此外，由于受到提取方法、数据精度等原因的限制，从DEM数据直接提取出来的河网水系可能与淮河流域实际河网水系间存在一定程度的差距。在DEM提取水系基础上，再将水系图与淮河水利委员会提供的淮河流域实际水系图进行对比、叠加和校核，存在差异的地方通过查阅资料进行修正和统一。最终，可得到较为准确的淮河流域水系如下图1所示。从DEM数据中提取出来的淮河流域水系，既包括天然水系也包括受人类活动干扰形成的人工水系。通过查阅《淮河流域水利手册》等相关历史资料，获得各人工河流、水道的详细信息，并叠加淮委提供的淮河流域实际水系图进行校核，剔除相应人工水系(如人工修建的运河、水道等)。剔除人工水系后的水系，即为天然水系(如图1)。

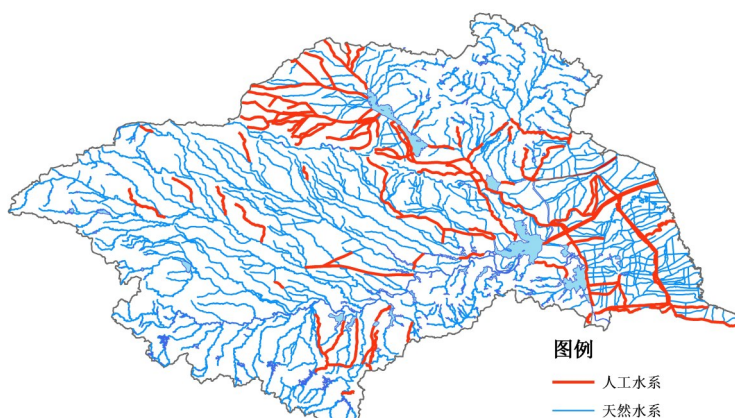


图1 淮河流域水系

2.2 基于分形理论的水系盒维数计算方法 河网水系形态结构具有明显的自相似性以及不平滑性，因此可采用分形理论对水系形态结构、发育程度等进行描述。分形理论属于现代数学的其中一个分支，它是从分数维度的视角来描述和研究具有自相似性的、不规则的几何图形(如树木、山脉、河流等)问题。近年来，一些学者先后开展了有关水系分形方面的研究工作，其中水系分形维数的确定方法主要有基于水系总长度、基于网格覆盖法、基于主河道长度-流域面积关系、基于Horton定律的计算方法等^[18-19]。结合以上各种方法的优缺点以及淮河流域水系的实际情况，本文选取计算水系盒维数最常用的方法——网格覆盖法。该方法是采用长度、宽度均为 r 的正方形网格来覆盖被测水系，再求出覆盖整个水系的所有正方形网格数目 $N(r)$ 。当不断改变网格边长 r ，网格数目 $N(r)$ 也随着它发生改变，由一系列的 r 和 $N(r)$ 作双对数图，并运用最小二乘法对相关性较好的直线进行拟合，拟合出直线的斜率即是所要求的盒维数值。盒维数 D_f 的一般表达式为：

$$D_f = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{-\ln r} \quad (1)$$

考虑到工作量和计算精度,本文以淮河流域13个水资源三级分区为计算单元,对淮河流域水系盒维数进行计算测定:(1)水系图像的二值化。首先,利用ArcGIS软件将各水资源分区的水系从淮河流域水系图中裁剪出来。其次,对剪裁出来的有、无人工水系的各水资源分区水系图进行投影转换,矢量图转栅格图处理,并导出成数字图像。最后,对各水资源分区的水系图进行灰度调整、特征检测、边界识别等操作,进行图像二值化处理。(2)动态网格覆盖。根据网格覆盖方法计算盒维数的原理,通过MATLAB程序实现不同大小的网格对各水资源分区水系图的动态覆盖,并对网格边长和网格数目分别进行统计。(3)数据对数拟合。在统计覆盖水系所需网格数目和网格边长的基础上,对二者进行对数拟合,所拟合出图形斜率的绝对值就是盒维数大小。

2.3 基于图论理论的水系连通度计算方法 现实世界中的许多事物都可以用“图”来形容、描绘,用两个点来表征事物,而两事物之间的二元关系则可以用点与点之间的连线来表示。这种由点以及这些点之间的连线(边)所组成的图模型就是图论中所研究的图。水系是由干流、支流、天然河道以及人工河道交织组成的网状水系统,因此可借助图论理论建立图模型来描述水系的连通情况,计算水系连通度。

图模型是以图的形式来表示研究对象之间关系的数学模型,包含两个基本要素,即研究对象、研究对象中的二元关系。定义图 H 是指一个有序三元组 (P, Q, f_H) ,其中 P 表示的是一个非空的顶点的集合; Q 表示的是图 H 中边的集合,其内部的元素由图 H 的边所组成; f_H 代表是一个关联函数,它的存在使图 H 的每条边与图 H 中的一对顶点对呈一一对应关系。图的储存方法多种多样,其中一种较为简单的就是运用矩阵储存,最常用的矩阵表示形式有关联矩阵和邻接矩阵。

(1)图的连通性判定准则。

$$L = (L_{ij})_{n \times n} = \sum_{k=1}^{n-1} M^k \quad (k=1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (2)$$

对于矩阵 L ,如果其元素都不为零,则判定图 H 是一个连通图。对于无向图 H 来说, M 为其邻接矩阵;对于有向图 H , M 为其所对应的无向图的邻接矩阵。

(2)图的连通度。设图 H 是 p 阶连通图,令:

$$\kappa(H) = \min |P'| \quad (P' \text{是} H \text{的顶点割}) \quad (3)$$

则 $\kappa(H)$ 称作图 H 的点连通度,有时候常常省略“点”字,简称其为图的连通度。由定义可知,一个连通图的连通度就是使这个图从连通图变成非连通图,需要删除的最少顶点数。

设图 H 是 p 阶连通图,令:

$$\lambda(H) = \min |Q'| \quad (Q' \text{是} H \text{的边割}) \quad (4)$$

则 $\lambda(H)$ 称作图 H 的边连通度。由边连通度的定义可知,一个连通图的边连通度就是使这个图从连通图变成非连通图,所需删除的最少边数^[13]。由(点)连通度和边连通度的定义可知,二者定量描述图的连通性的基本思想是一致的,即使连通图变成非连通图所需要去掉的最小点数或边数。每个图的连通度是通过该图唯一确定的,可以借助其去衡量图的连通程度强弱。

对于水系河网,用图论中的顶点去概化水系中的河流起点、汇入点、主支流交叉点;用顶点之间的连线去概化河段,而水系中水流的流向就是图的方向,从而建立起淮河流域各水资源分区的水系图模型。但流域中的闸坝工程不能单纯类同天然水系交汇点被完全概化成顶点,因此本文在计算中将根据各闸坝工程的实际情况进行考虑。

2.4 指标相关性分析方法 双变量相关分析法是用来研究两个变量之间的相关关系程度,避免其他变量干扰的经典方法。进行双变量相关分析的具体步骤为:首先,利用散点图对变量之间的相关趋势进行初步判断;其次,对变量进行正态分布检验,这两个步骤的目的是为了选取合适的相关系数。再次,对变量进行双变量分析,本文通过把变量数据导入SPSS软件中实现变量间的双变量分析。最后,依据相关系数 r 和显著性系数 α 对变量间的相关性进行判定。

一般地,如果相关系数 $r>0$,变量间的相关关系为正相关;如果 $r<0$,变量间的相关关系为负相关;如果 $r=0$,变量间不相关。其中,如果 $r \leq 0.3$,那么判定变量间表现出微弱相关的关系;如果 $0.3 < r \leq 0.5$,那么判定变量间表现出低度相关的关系;如果 $0.5 < r \leq 0.8$,那么判定变量间表现出显著

相关的关系；如果 $0.8 < r \leq 1$ ，那么判定变量间表现高度相关的关系。而显著性系数则用于判断变量间的相关性是否处于显著状态，如果 $\alpha < 0.05$ ，就可以说明变量之间的相关关系是显著的。

3 应用研究

淮河流域地处我国东部，介于长江和黄河两流域之间，总面积为27万 km^2 。淮河流域由淮河水系和沂沭泗水系两大水系组成，其中淮河水系主要由洪河、颍河、涡河、史河和淝河等组成，流域面积19万 km^2 ，集水面积大于1000 km^2 的一级支流有21条；沂沭泗水系主要由沂河、沭河和泗河等组成，流域面积近8万 km^2 ，集水面积大于1000 km^2 的一级支流有12条^[20-21]。除了天然河道外，淮河流域内还存在着许多受人类活动干扰所形成人工运河，如茨淮新河、怀洪新河、新汴河、泰州引江河、通榆河、东鱼河、淮沭新河和梁济运河等。同时，流域内分布有数量繁多的水利工程，统计资料显示目前全流域建成水库数量约5670多座、水闸5400多座，其中大中型水库200多座、大中型水闸600多座。人工河道的修建以及闸坝等水利工程的建设和调度调控，均对流域水系的发育状况和连通性存在一定程度的影响。将淮河水系作为研究河湖水系发育状况和连通性研究的目标，具有显著的代表性。

3.1 淮河流域水系盒维数计算 根据全国水资源分区成果，本文以淮河流域13个水资源三级分区为单元进行淮河流域水系形态结构、发育情况的分析对比，主要考虑到三级分区划分单元大小适中，分区内水系结构较为完整，且各分区内水资源开发利用程度、水系发育条件、经济社会发展水平相近或基本一致，便于开展基础数据之间的共享和增强研究成果之间的对比(表1)。

表1 淮河流域水资源三级分区的水系盒维数

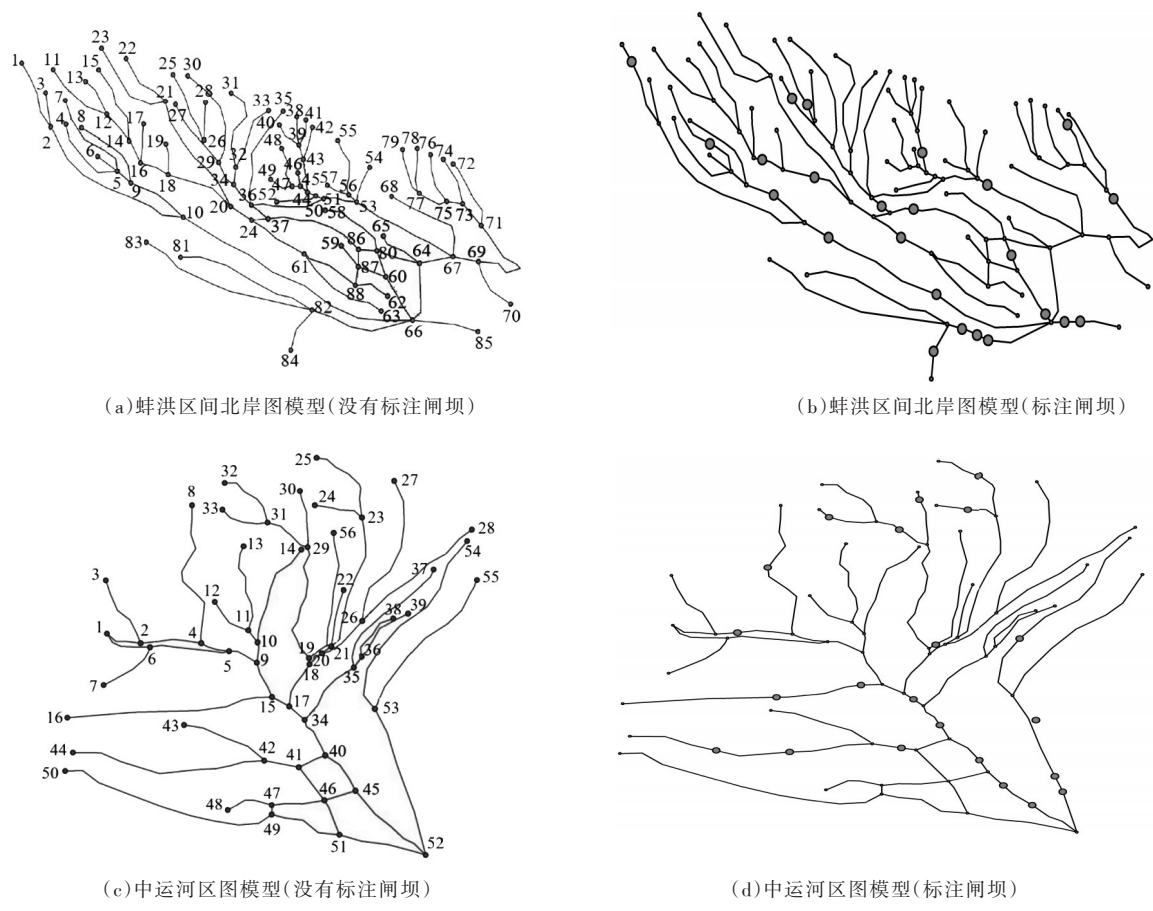
水资源分区	考虑人工水系		剔除人工水系	
	分维值	相关系数	分维值	相关系数
王家坝以上北岸	1.3201	0.9977	1.3201	0.9977
王家坝以上南岸	1.3468	0.9985	1.3468	0.9985
王蚌区间北岸	1.3040	0.9982	1.2934	0.9986
王蚌区间南岸	1.3797	0.9981	1.3667	0.9980
蚌洪区间北岸	1.4519	0.9984	1.4172	0.9967
蚌洪区间南岸	1.3345	0.9981	1.3345	0.9981
高天区	1.5067	0.9970	1.1922	0.9987
里下河区	1.3878	0.9977	1.3214	0.9988
湖东区	1.3686	0.9965	1.3379	0.9971
湖西区	1.4930	0.9927	1.1963	0.9974
中运河区	1.3854	0.9979	1.3193	0.9976
沂沭河区	1.3837	0.9978	1.4047	0.9977
日赣区	1.2278	0.9987	1.2278	0.9987
全流域	1.4645	0.9997	1.3996	0.9994

在淮河流域13个水资源分区中，除了王家坝以上北岸、王家坝以上南岸、蚌洪区间南岸和日赣区4个分区外，其他9个水资源分区中均存在人工水系。从表1可看出，剔除人工水系后，整个淮河流域的水系盒维数由1.4645降低为1.3996；含有人工水系的各水资源分区中，除了沂沭河区外，其他分区的水系盒维数也均有不同程度的降低。另外，王蚌区间北岸、王蚌区间南岸、蚌洪区间北岸、湖东区的人工水系个数相对较少、面积相对较小，其水系盒维数下降程度也较小；湖西区、里下河区、中运河区和高天区中分布的人工水系个数比较多、面积比较大(如湖西区中分布有鲁西南地区最大的人工运河东鱼河，京杭大运河的也流经这几个分区)，其水系盒维数下降程度也较大。

这反映出水系盒维数下降程度与水系个数、水系面积在一定程度上成正比例关系。人工运河、

水道的修建,增加了区域水系个数,扩大了区域水系面积,改善了区域地表水资源状况,对水系盒维数的增加起到了一定促进作用。至于出现剔除人工水系后,分区水系盒维数变大的情况,分析其原因可能是水系盒维数受很多因素的影响,如数据精度、图像质量、实际水系河网密度等。就沂沭河区而言,可能由于该分区内的人工水系分布比较独立,剔除人工水系后,反而增大了其河网密度,造成其水系盒维数的增大。

3.2 淮河流域水系连通度计算 淮河流域各水资源分区水系图模型(图2)建立好后,对水系图模型中的顶点进行编号,建立各分区水系图模型的邻接矩阵。在邻接矩阵运算的基础上,根据图的连通性判定准则实现淮河流域各水资源分区水系连通性的判别。笔者选用 MATLAB 软件编写程序,实现对淮河流域各水资源分区水系连通性的快速判断。经计算,淮河流域的13个水资源分区的连通性判别矩阵 L 中均不存在零元素,即这13个水资源分区的水系图是连通的。



注:右图中标注的黑点,即为闸坝点。
图2 淮河流域主要水资源分区图模型

在各水资源分区水系连通性判别的基础上,根据图的连通度概念,并借助于邻接矩阵的循环计算,以求得个水资源分区的水系连通度,从而对淮河流域水系连通性的定量评价提供数据。而实际操作中发现,淮河流域的水资源分区水系图中,均存在悬挂点(河网水系中仅与一条水系河道相连的点)。如果将该悬挂点所连接水系河道的边所删除,那么水系图就变成了不连通图,按照连通度的定义,即每个水资源分区水系图的整体连通度均为1。但实际上,各水资源分区的水系连通度强弱还是有所差异的,王家坝以上北岸水资源分区、蚌洪区间北岸水资源分区、高天区、湖西区等水资源分区局部连通度为2,沂沭河水资源分区局部连通度达到3,里下河水资源分区局部连通度甚至高达5。为了对各水资源分区水系连通程度进行判断,笔者决定利用水系图割点(在一个连通的图 H 中,如果它其中一个顶点被删除掉后,原来的图就从连通状态变成非连通状态,这个顶点就叫作原图的一个割点)的个数对其连通度进行评估,并以某一水资源分区内割点与总顶点的个数比作为该水资源分区

的水系连通度。本研究借助 MATLAB 程序，求出各水资源分区水系图割点的集合，在得到各水资源分区水系图割点集的基础上，依照本文对连通度的定义，可求得各水资源分区的水系连通度。

在进行考虑闸坝工程影响下的各水资源分区水系连通度计算时，根据各闸坝工程的过水流量、调控能力、对水系连通影响的贡献情况等，对各大小类型闸坝进行了割点系数规定：流域中的大型水库、大型水闸过水流量、调控能力、对水系连通影响程度比较大，规定其割点系数为 0.8，即在计算中被视作 0.8 个割点来看；规定流域中的中型水库、中型水闸的割点系数为 0.5；规定流域中的小型水库、小型水闸的割点系数为 0.2。顶点总个数为各水资源分区原水系图模型顶点和分区内所选取的闸坝数量之和，割点总个数为各水资源分区原水系图模型割点和分区内所选取的闸坝割点系数之和，割点总个数与顶点总个数的比即为闸坝影响下各水资源分区的水系连通度，计算结果见表 2。

表 2 淮河流域水资源三级分区的水系连通度

水资源分区	顶点数	割点数	闸坝选取数量	未考虑闸坝阻隔		考虑闸坝阻隔	
				考虑人工水系	剔除人工水系	考虑人工水系	剔除人工水系
王家坝以上北岸	38	18	29	0.4737	0.4737	0.5030	0.5030
王家坝以上南岸	43	21	49	0.4884	0.4884	0.5109	0.5109
王蚌区间北岸	169	86	99	0.5089	0.4966	0.5201	0.5140
王蚌区间南岸	72	34	45	0.4722	0.4754	0.4906	0.4942
蚌洪区间北岸	88	40	24	0.5000	0.4615	0.4750	0.4753
蚌洪区间南岸	40	20	14	0.4545	0.5000	0.5056	0.5056
高天区	29	13	16	0.4483	0.4000	0.4800	0.4513
里下河区	169	94	44	0.5562	0.5694	0.5531	0.5663
湖东区	29	14	22	0.4828	0.4722	0.5922	0.4982
湖西区	56	30	22	0.5357	0.4063	0.4717	0.4500
中运河区	143	72	80	0.5035	0.5333	0.5333	0.5321
沂沭河区	85	47	28	0.5529	0.5039	0.5211	0.5234
日赣区	12	5	12	0.4167	0.4167	0.4958	0.4958

从表 2 中可以看出：未考虑闸坝阻隔情况下，人工水系的建设使王蚌区间北岸、高天区、湖东区、湖西区和沂沭河区的水系连通度增加，王蚌区间南岸、蚌洪区间南岸、里下河区和中运河区的水系连通度减小。这说明人工水系的修建对天然河道的水系连通性存在一定影响，布局合理的疏浚开挖工程可以促进水系连通性，反之可能会对水系连通性产生反面影响。

人工水系河道中，闸坝工程的修建使王家坝以上北岸、王家坝以上南岸、王蚌区间北岸、王蚌区间南岸、蚌洪区间南岸、高天区、湖东区、中运河区和日赣区的水系连通度增加，蚌洪区间北岸、里下河区、湖西区和沂沭河区的水系连通度减小。天然水系河道中，闸坝工程的修建使王家坝以上北岸、王家坝以上南岸、王蚌区间北岸、王蚌区间南岸、蚌洪区间北岸、蚌洪区间南岸、高天区、湖东区、湖西区、沂沭河区和日赣区的水系连通度增加，里下河区和中运河区的水系连通度减小。这说明闸坝工程的建设、调度运行与水系连通程度之间确实存在一定联系，有的可以增强河湖水系之间的水力联系，增加水系的连通程度，有的却对河湖水系的连通起到了阻碍作用。而这种调节程度的大小，与水库本身建设的特征参数和水库运行调度的方式、调度方案有关。

3.3 淮河水系盒维数与连通度相关性分析 选取景观生态学中的能反映水系发育状况和形态结构特征的河网密度、水系环度两个指标与水系盒维数进行相关分析，结果表明水系盒维数与景观生态学两指标间均呈显著的相关关系；选取景观生态学中的能有效反映出水系之间连通程度以及能有效反映出水系中节点连接、交换能力的水系连通度、节点连接率两个指标与基于图论的水系连通度进行相关分析，基于图论的水系连通度与节点连接率呈显著的相关关系，与景观生态学指标水系连通度间呈高度相关的关系。因此，笔者选用水系盒维数去反映水系发育状况和水系形态结构特征，选用水系连通度去反映水系连通程度好坏是合理的。

最后，为了探究水系盒维数和水系连通度二者之间的关系，本文做了如下研究。首先，对淮河流域 13 个水资源分区的考虑人工水系的水系盒维数和连通度，剔除人工水系的水系盒维数和连通度绘制散点图，然后读取到 SPSS 软件中进行双变量相关性分析，结果见表 3 所示。

表 3 水系盒维数与水系连通度相关性分析

相关性验证		水系连通度		
		考虑人工水系	剔除人工水系	考虑人工水系(剔除干扰点后)
水系盒维数	相关系数 r	0.282	0.603 ¹⁾	0.780 ²⁾
	显著性系数 α	0.350	0.029	0.005

注：¹⁾ 为两个指标在 0.05 置信水平上是呈现相对显著的相关关系，即这两个指标之间存在相关关系的可能性高达 95%；²⁾ 为两个指标在 0.01 置信水平上是呈现相对显著的相关关系，即这两个指标之间存在相关关系的可能性高达 99%。

从表 3 可以看出，考虑人工水系情况下，水系盒维数与连通度间的相关系数 r 为 0.282，大于 0 小于 0.3，说明二者间呈微弱相关的关系；水系盒维数与连通度间的显著性系数为 0.350，大于 0.05，说明二者相关性不显著。而剔除人工水系情况下，水系盒维数与水系连通度间的相关系数 r 为 0.603，数值均大于 0.5 而小于 0.8；显著性系数为 0.029，小于 0.05 这表明二者之间呈显著的相关关系。再观察考虑人工水系情况下的散点图(图 3)，可以看到两组数据(1.4519, 0.4545)、(1.5067, 0.4483)与图的整体趋势分离较大。

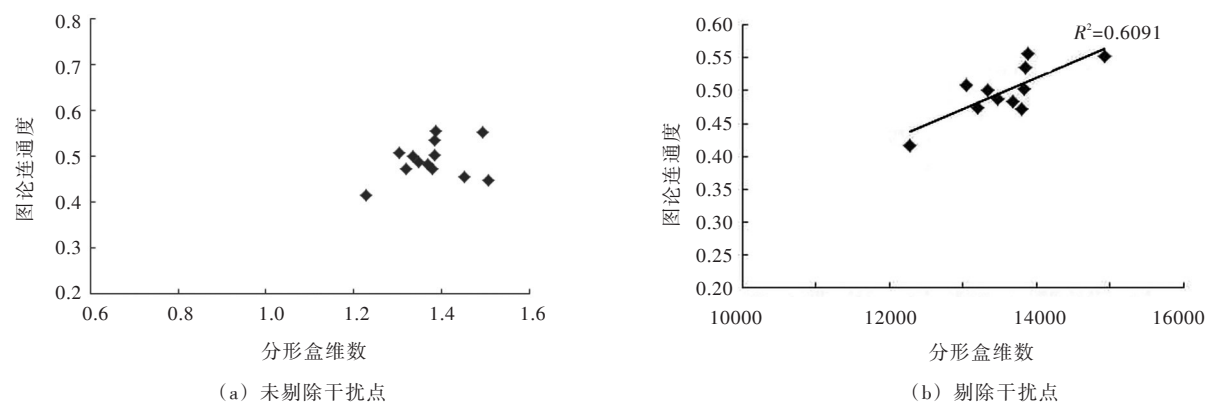


图 3 考虑人工水系情况下水系盒维数与连通度相关关系

去掉分离较大的两组数据，对余下的 11 组数据再次做相关性分析，结果如下：水系盒维数与连通度间的相关系数 r 为 0.780，显著性系数为 0.005，小于 0.01，更加印证了二者相关关系显著，相关的可能性高达 99%。去除的两组数据所对应分区为蚌洪区间北岸和高天区，图 3 中偏离整体趋势主要是由于两点的横坐标数值较大，即水系盒维数偏大。从数据中可以看出，蚌洪区间北岸的水系盒维数 1.4519 和高天区的水系盒维数 1.5067，在淮河流域 13 个水资源分区水系盒维数排序中位于第一和第三，而其水系连通度数值却排序靠后。分析两分区水系盒维数较大的原因，主要是因为这两个分区水体中湖泊面积所占比例较大(如洪泽湖、高邮湖等较大湖泊)，由此采取网格法计算出的盒维数数值就会很大。而在水系连通度计算时，湖泊或被概化成图模型中的点或没有概化进图模型，即湖泊面积大小对水系连通度数值影响很小。综上，去除这两个点，对水系盒维数和水系连通度进行相关性分析也是合理的。

根据以上相关性分析结果可见，淮河水系盒维数与连通度相关性较好，大体上可能呈现正相关的线性趋势关系。水系的盒维数越大、连通度越高，换言之，水系河网的结构越趋于复杂化，水系之间的连通性变得越好，水系发育更加完善和成熟。结论在一定程度上也较符合河流水系发育的客观规律。水系最初的形态就是一条条相对独立、长度较短、水域面积较小的河沟，水系形态结构较单一，发育程度较低，此时的水系盒维数、连通度均较小；在水文、气象、下垫面条件的综合作用下，小河沟的集水量不断增多、河流长度不断增长、河流的水域面积也在不断扩宽，水系形态结构

也开始变复杂,水系得到进一步成长和发育,此时的水系盒维数、连通度也随之增大;接着随后原本不连接彼此独立的小河流开始发生交汇,汇集成一条条较大的河流,较大的河流再不断发展和汇流,成为更大更广阔的河流,如此反复,水系拓扑结构变得更加复杂,水系发育更加成熟,即此时的水系盒维数、连通度也已经变得很大。另外,从结果分析中看到,相比剔除人工水系情况,考虑人工水系情况下二者相关性更好,这说明人类活动在一定程度上促进了水系结构的重塑和改善。

总之,水系的发育程度与水系间的连通情况是密不可分的,水系的不断发育、壮大和交汇,水系形态结构由单一向复杂发展,无疑促进了水系间的连通;而水系间连通程度的增加,不同河流的连通交汇,也对水系河网形成和扩大发育起了很大的推动作用。因此可以说,河湖水系形态结构、发育情况和河湖水系连通性之间相互联系,相互促进。

4 结语

本文基于分形理论,且充分考虑到人工水系的建设情况,对盒维数进行研究以用来定量描述淮河流域的水系发育情况,分析结果显示:人工水系的建设对水系盒维数的增加起到了促进作用,且人工水系的个数越多、面积越大,促进作用越明显。基于图论理论,且充分考虑到人工水系和闸坝工程建设的影响,对连通度进行研究以用来定量评价淮河流域的水系连通程度,分析结果显示:不考虑闸坝工程影响的情况下,人工水系的建设对天然河道的水系连通性存在一定影响,布局合理的疏浚开挖工程可以促进水系连通,反之可能会产生反面影响;考虑闸坝工程影响的情况下,人工、天然河道中的各分区水系连通度均存在增加和减小的现象,因此只能表明闸坝工程与水系连通程度存在一定联系。初步分析了水系盒维数指标与连通度指标之间的相关关系,结果显示:二者相关性较好,大体上可能呈现正相关的线性趋势关系;另外,二者在考虑人工水系情况下相关性更好,也说明人类活动在一定程度上促进了水系结构的重塑和改善。

但研究工作也存在一些不足,如指标体系选取表征水系形态结构、水系连通指标较少,淮河流域研究区范围较小,只定性分析了水系盒维数、水系连通度二者相关关系等。下一步可从完善指标体系、扩大研究区范围、建立二者之间的定量关系、从水动力学的角度讨论不同水系盒维数对水流的影响等角度进行更加深入地研究。

参 考 文 献:

- [1] 靳梦, 奚明. 城市化对水系连通功能影响评价研究——以郑州市为例[J]. 中国农村水利水电, 2013(12): 41-44.
- [2] WARD J V. An expansive perspective of riverine landscapes: pattern and process across scales[J]. Gaia, 1997, 6(6): 52-60.
- [3] BRIERLEY G, FRYIRS K, JAIN V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications [J]. Area, 2006, 38(2): 165-174.
- [4] BRACKEN L J, CROKE J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding run-off-dominated geomorphic systems[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(13): 1749-1763.
- [5] TETZLAFF D, SOULSBY C, BACON P J, et al. Connectivity between landscapes and riverscapes—a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(10): 1385-1389.
- [6] ALI G V, ROY A G. Revisiting hydrologic sampling strategies for an accurate assessment of hydrologic connectivity in humid temperate systems[J]. Geography Compass, 2009, 3(1): 350-374.
- [7] 长江水利委员会. 维护健康长江促进人水和谐研究报告[R]. 武汉: 长江水利委员会, 2005.
- [8] 张欧阳, 熊文, 丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 1-5, 78.
- [9] 唐传利. 关于开展河湖连通研究有关问题的探讨[J]. 中国水利, 2011(6): 86-89.
- [10] 李原园, 郦建强, 李宗礼, 等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学, 2011, 33(3):

386-391.

- [11] 王中根, 李宗礼, 刘昌明, 等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 523-529.
- [12] 窦明, 靳梦, 张彦, 等. 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1089-1096.
- [13] 周振民, 刘俊秀, 郭威. 郑州市水系格局与连通性评价[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 54-57.
- [14] 崔广柏, 陈星, 向龙, 等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1429-1437.
- [15] 夏继红, 陈永明, 周子晔, 等. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 780-787.
- [16] 高玉琴, 汤宇强, 肖璇, 等. 基于改进图论与水文模拟方法的河网水系连通性评价模型[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 33-37.
- [17] 陈星, 许伟, 李昆明, 等. 基于图论的平原河网水系连通性评价: 以常熟市燕泾圩为例[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 26-29, 34.
- [18] 陈圣波, 胡郁. 水系分维模式研究[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(4): 44-48.
- [19] 聂笃宪, 曾文曲, 文有为. 分形维数计算方法的研究[J]. 微机发展, 2004, 14(9): 17-19, 22.
- [20] 张永勇, 李宗礼, 刘晓洁. 近千年淮河流域河湖水系连通演变特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 77-83.
- [21] ZHANG Y Y, XIA J, LIANG T, et al. Impact of water projects on river flow regimes and water quality in Huai River Basin[J]. Water Resources Management Hydrobiologia, 2010, 24(5): 889-908.

Study on relationship between box dimension and connectivity of river system in Huaihe River Basin

DOU Ming^{1, 2}, YU Lu³, JIN Meng⁴, LI Guiqiu^{1, 2}

(1. College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Water Science Research Center of Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. Zhengzhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Zhengzhou 450019, China;

4. Water Affairs Bureau, Zhengdong New District Management Committee, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Under the dual influence of natural evolution and artificial intervention, the development and connectivity degree of river and lake system are constantly changing, which affects the reasonable development and utilization of basin water resource. Taking the Huaihe River Basin as the research object, river system of the whole basin was extracted from DEM, and it was corrected with other data. Firstly, box dimensions of natural and artificial river system in 13 water resource divisions of the whole basin were calculated by application of the fractal theory in the context of local artificial river system construction. Secondly, the river system connectivity influenced by dams or not in 13 water resource divisions were calculated by the method of graph theory in the background of dam construction. At last, the correlation analysis between box dimensions and the river system connectivity were researched with the statistical method. The results show that the box dimension of river system in each water resource division decreases in different degree excluding artificial water system and the degree of decline is in proportion to the number and area of river systems to a certain extent. Some of the river system connectivity increase, but others decrease on the consideration of the impact of artificial river system and dam construction. The box dimension is positively correlated with the connectivity of river system in general. The research can provide theoretical support for relevant departments to carry out river system construction in the Huaihe River Basin, and technical support for finding out the influence of nature laws and human activities on river system form, structure and connectivity.

Keywords: box dimension of river system; connectivity of river system; fractal theory; graph theory; Huaihe River Basin

(责任编辑: 王成丽)