

城市化进程下南昌市城区水系格局与连通性分析^{*1}

傅春^{1, 2} 李云翊² 王世涛³

(1. 南昌大学管理学院, 江西南昌 330031;

2. 南昌大学建筑工程学院, 江西南昌 330031;

3. 杭州水利水电勘测设计院有限公司丽水分院, 浙江丽水 323000)

【摘要】:针对当前城市化引起的水系结构单一化、河流连通性减弱以及水生态环境等问题,以南昌市城区为例,选取1990年、2000年、2010年3期遥感影像图像,分析城市化影响下土地利用的变化;基于1958年地形图与2010年江西省水系图,通过GIS提取两期南昌市城区水系图,选取数量特征和结构特征指标进行水系格局分析,并引入图论理论讨论两时期的水系连通性。结果表明:(1)20a间城镇用地面积增加174.73km²,水域面积减少34.04km²。研究区水域面积随城镇用地增加而缩减;(2)城市化进程中,研究区河流水面率、河网密度和河频率均下降,支流发育薄弱,河网复杂度下降;(3)赣江以北水系连通度降低,赣江以南区域水系连通度提升。该研究将为城市化地区河流水系保护提供支持与参考。

【关键词】:水系格局;连通性;城市化;指标体系;南昌市

【中图分类号】:TV213.4 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)07-1042-07

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201707010

自改革开放以来,全面推进城市化进程,城市化率由1978年的18%上升到2012年的52.6%,人类活动日益频繁,人为改造自然成为必然性。全球60%的河道因城市化发生了深刻的变化^[1],快速城市化进程下的河网水系结构受到严重的人为干扰,城市河网的自然性造成毁坏,引发城市内涝^[2],严重危及市民人身安全和财产安全。因此探讨城市化进程对水系结构以及连通性的影响,是实现人水和谐的需要。

城市化作用下水系结构及河网连通性的变化在各国之间都引起关注,各国学者对城市化水系结构的变化作出了较丰富的研究和探讨。Smart^[3]导出随机链长模式,解释了不同级别河流长度的变化规律。Jordan^[4]以美国加利福尼亚州圣克拉拉古为例,用城市集水区与其相邻水系的稳定性作比较,研究结果表明,城市基础设施的建设破坏了河道沉积物的稳定性,使得河道降级和自我修复能力下降。国内学者黄奕龙等^[5]对深圳市1982和2002年的水系结构进行了探讨,研究发现河道长度、密度、分维

¹收稿日期:2016-11-14; 修回日期:2017-02-15

基金项目:教育部重点人文社科重点课题“中国地区生态文明建设领先路径研究”(15JJD790040) [The Ministry of Education of Humanities and Social Science Project(15JJD790040)]

作者简介:傅春(1966~),女,教授,博士生导师,研究方向为资源与环境管理. E-mail:ccfu@ncu.edu.com

数减小, 河流多元化减弱; 目前, 国内外运用较多的河网连通性定量评价方法有水文和水利学模型、连通性函数、图论等, 景观生态学等。Meerkerk 等^[6]采用连通性函数分析半干旱流域阶地的减少和消失对水文连通性和洪峰量变化的影响。Cui^[7]利用图论和最短路径算法描述了高流量和低流量两种情况的河网设计。国内对水系连通的研究成果较之国外要少一些, 徐慧^[8]采用景观生态学方法, 将河流廊道理论和景观空间结构分析方法应用于城市的水系规划工作中去。

以南昌市城区为例, 对城市化进程下土地利用的变化进行分析, 建立了水系格局与连通性指标体系对研究区域水系特征变化与河流连通性进行初步探讨。该研究对于水资源可持续利用、河流健康有积极作用。

1 研究区城市化进程

南昌市位于江西省中部偏北, 赣江、抚河下游平原, 滨临鄱阳湖西南岸。地处北半球亚热带, 属亚热带季风气候。主要河流有赣江、抚河及玉带河。境内湖泊星罗棋布, 主要的湖泊有军山湖、金溪湖、青岚湖、瑶湖, 以及市区内的青山湖、艾溪湖、象湖、黄家湖、东湖、西湖、南湖、北湖。本文选取南昌市城区为研究区。该区域目前总面积约 509km², 目前河道总长约 164.80km, 密度为 0.32km/km²(图 1)。南昌市城区近 50a 经济发展迅速, 城市化程度较高。伴随着城市化进程, 人类活动对土地的利用变化也日益频繁, 而城镇用地的明显扩张直接反映了这一现象。

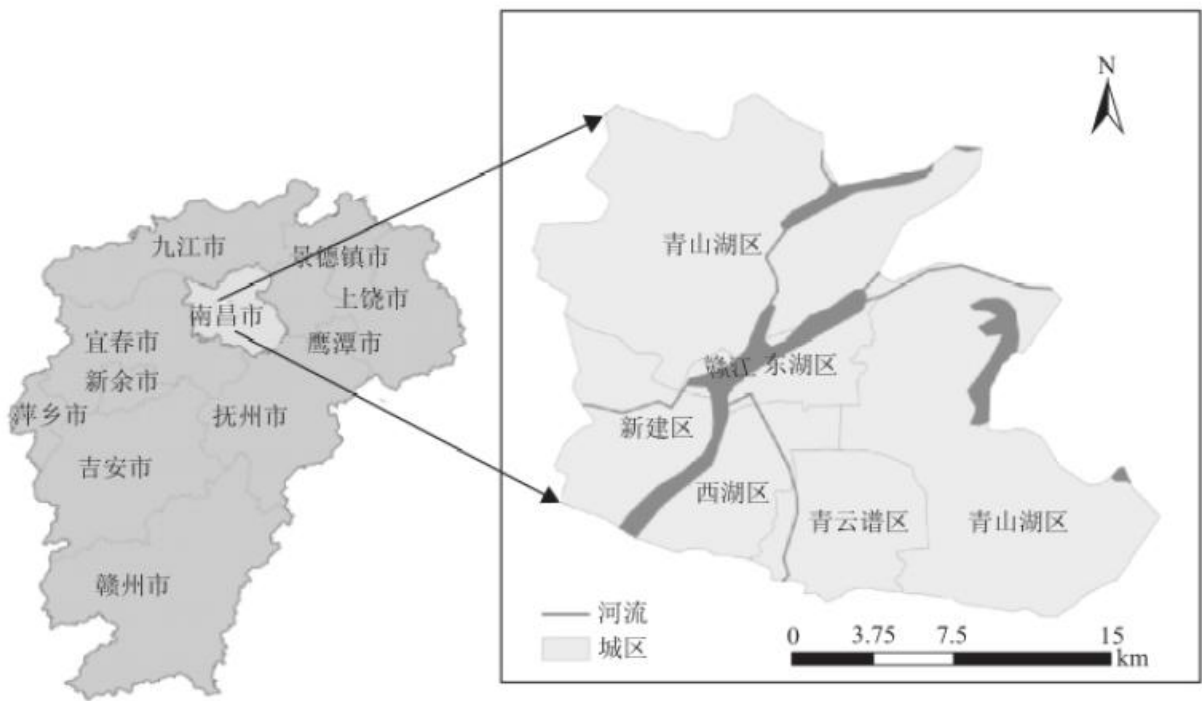


图 1 研究区示意图
Fig. 1 Overview of the Study Area

分析城市化进程下研究区土地利用变化, 选取 Landsat5 卫星携带的传感器 Landsat TM 于 1990、2000 年和 2010 年 3 个时段拍摄的具有代表性的遥感影像 21 景, 包括 1990 年 7 景、2000 年 7 景和 2010 年 7 景, 分辨率均为 30m 的遥感资料, 对研究区的土地利用进行解译, 得到土地利用的总量变化和占比情况, 于表 1 列出。

表 1 南昌市城区 1990~2010 年三期土地利用类型面积
Tab. 1 Area of Land Use Type in the Center of Nanchang City During the 1990–2010

	面积 (km ²)			占比 (%)		
	1990 年	2000 年	2010 年	1990 年	2000 年	2010 年
耕地	256.26	240.46	135.39	50.35	47.24	26.60
森林	39.41	36.27	25.36	7.74	7.12	4.98
草地	8.57	8.01	1.79	1.68	1.57	0.35
水体	103.61	102.11	69.57	20.36	20.06	13.66
居民地	101.16	122.16	275.89	19.87	24.00	54.35

通过上表,可以看出研究区土地利用类型发生显著的变化,城镇用地占优的格局越来越明显。1990~2010 年间,城镇用地面积出现逐期扩张的态势,占比由 1990 年的 19.87%扩张到 2010 年的 54.35%,年均增长高达 8.74km²。水体面积逐年缩小,同期减小量为 34.04km²,减小率达 32.85%。除水体面积外,耕地和森林面积也存在大幅度的减少。耕地、森林面积在 1990 年分别为 256.26、39.41km²,到 2010 年分别减少到 135.39、25.36km²,减少了 47.17%、35.65%。草地的面积也存在一定幅度减少。城镇面积大幅增加,水体、耕地、森林以及草地面积均大幅度减小。说明城市化进程中,人们通过填埋河流、占用河湖、侵占林草地等方式进行城市扩张,导致水体等其它土地类型面积减少。

2 数据基础与研究方法

2.1 数据来源

进行水系结构和连通性分析,获取的数据资料为中国 1958 年 1:50000 纸质地形图、江西省 2010 年 1:50000 电子水系图。对 1958 年中国地形图进行栅格转化、地理配准,再以南昌市城区面要素把该地形图中研究区范围进行裁剪,将其中面状河湖以及线状河流用面要素和线要素分别勾勒出,得到南昌市 1958 年水系图。对于 2010 年江西水系图,用面要素裁剪出南昌市城区范围,将面状河湖用面文件进行描绘,得到 2010 年研究区水系图。其中,线河流根据地形图中及水系图中单线描绘,面河流包括双线河河面及湖面。

2.2 研究方法

参考专家学者有关研究成果并结合数学统计方法构建水系格局与连通性指标体系(表 2),以此对区域内水系特征以及河流连通性进行分析^[9]。

表 2 水系格局与连通性指标体系
Tab. 2 Water System Pattern and Connectivity Index System

目标层	准则层	指标层
水系格局	数量特征	水面率
		河网密度
		河频率
	结构特征	河网复杂度
		河网发育系数
连通性	河网连通度	河链数
		节点数
		河网通达度

2.2.1 水系格局评价指标

将水系格局评价指标计算方法汇总于表 3。

表 3 水系格局评价指标计算方法
Tab. 3 Calculation Method of Water System Landscape Evaluation Index

指标名称	计算公式	备注	物理意义
水面率 (W_p)	$W_p = (A_w/A) \times 100\%$	A_w : 水域面积 A : 研究区总面积	表示河流面积发育
河网密度 (R_d)	$R_d = L/A$	L : 河网总长度	表示河流长度发育
河频率 (R_f)	$R_f = N/A$	N : 区域内河流数量	表示河网数量发育
河网复杂度 (CR)	$CR = N_0 \times (L/L_m)$	N_0 : 河流等级数 L_m : 干流河长	表示河网层次复杂程度
河网发育系数 (K_w)	$K_w = L_w/L_m$	L_w : w 级河流长度	表示河网各级支流的发育

2.2.2 基于图论的连通性评价指标

本文利用图论作为分析河网连通度的方法。将河网中河流交汇的点定义为节点，将连接两个这样的节点的边称为河链，将河网概化成由节点和河链组成的图形^[10]。如图 2 所示。



图 2 河网中河链、节点示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of River Chain and Node

借鉴景观生态学中河流廊道连通性的分析方法^[11]，选取河网通达度 β 来计算和评价研究区河流结构的连通性。计算公式为：

$$\beta = l_e / N \quad (1)$$

式中： l_e 是河网中河链数； N 为河网中节点个数。以此对区域内水系特征以及河流连通性进行分析。

3 结果与分析

通过对 1990、2000、2010 年的遥感影像图进行解译，将各类土地利用类型的变化情况作出对比分析，说明了水域面积在 3 期中逐期减少，城镇化过程中不断对水域进行侵占和利用。基于得出的城市化进程中城镇用地对水域侵占明显的结论，对 1958 年和 2010 年研究区水系进行分析，对比观察南昌水系在经历城市化发展导致的城镇用地对水域的扩张和城市建设对水系的改造后，发生的水系格局和河网连通性的变化情况。

对 1958 年和 2010 年南昌市城区水系进行描绘，得到两幅水系图(图 3、图 4)。

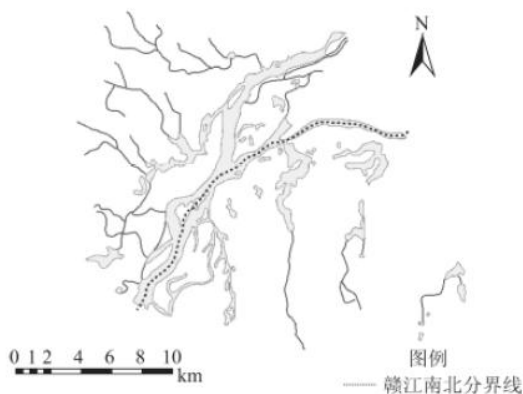


图 3 1958 年南昌市城区水系结构图

Fig. 3 Water System Structure in the Center of Nanchang City in 1958

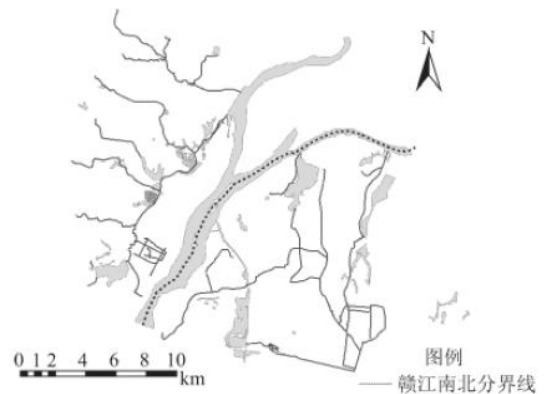


图 4 2010 年南昌市城区水系结构图

Fig. 4 Water System Structure in the Center of Nanchang City in 2010

从两幅图中可看出，2010 年水域范围相比 1958 年有明显变化，以赣江(图 3、图 4 黑色虚线所示)为中心线，赣江以北区域的河流在近 50a 中，自然性受到了人为的破坏。赣江以南的区域，由人工开挖出河流，水系显得比往期更丰富，但原来的自然河流也遭到填埋。

3.1 水系格局变化

据 Horton 河流分级法则，将河流分为一级河流、二级河流、三级河流…以及干流。对于城区人工开挖的互通的人工河道，将其作为一个整体算作一级河流。依此对二期水系图中各级河流做出长度统计。并依据河流实际宽度，结合 Arc-GIS，对水系图中各级河流水面面积进行计算。将计算结果汇总于表 4。

表 4 不同时期不同等级水域变化
Tab. 4 Different Levels of Water Changes in Different Periods

	长度 (km)		面积 (km ²)		条数	
	1958 年	2010 年	1958 年	2010 年	1958 年	2010 年
一级河流	82.79	99.05	0.74	0.86	23	15
二级河流	41.35	28.40	0.78	0.52	16	7
三级河流	14.96	0	3.42	0	3	0
干流	33.47	37.35	25.52	26.42	1	1
湖泊			17.37	16.89		

结合南昌市水系特点，选取数量特征(河网密度、水面率、河频率)和结构特征(河网复杂程度、河网发育系数)水系格局进行连通性定量评价，基于表 4 结果进行指标计算，并将结果列于表 5 中。

表 5 研究区水系格局评价对比
Tab. 5 Comparison of Water System Pattern Evaluation in Study Area

年份	数量特征			结构特征			
	河网密度 (km/km ²)	水面率 (%)	河频率 (条/km ²)	河网复杂程度	河网发育系数		
					K ₁	K ₂	K ₃
1958	0.34	9.5	0.085	20.64	2.53	1.24	0.44
2010	0.32	8.8	0.045	13.24	2.65	1.06	0

(1)数量特征

河网密度反映了区域河流的长度发育。结合表 4 与表 5 发现河网密度指数后期比前期略小，河流总长度减少 8.06km。河网总长度减少并不大主要与人工开挖河道密切有关，如南昌市城区人工开挖的玉带河全长有 7.5km，在河网密度方面，贡献了 4.6% 的数值。

从图 3、图 4 对比发现，1958 年南昌城区水域面积比 2010 年更广。1958 年水面率为 9.5%，2010 年为 8.8%。随时间的推移，研究区水域面积占研究区总面积的比重呈下降的趋势。根据表 4 结果，近 50a 来水域面积缩减了 6.7%，城市化建设对水域形成了占用，水体在城镇化进程中受到人类活动干扰。

河频率 1958 年为 0.085，到 2010 年下降到 0.045，下降了 47%。1958 年研究区水系一级河流条数比 2010 年多 38%，二级河

流多 56%。2010 年三级河流数为 0。近 50a 来，南昌城市水系的自然性遭到了破坏，河流分支数急剧下降。

河网密度、水面率和河频率指标后期均小于前期，受城市化影响，河流长度数量、面积以及发育呈减弱趋势。

(2) 结构特征

河网复杂度的大小可以直接对比得出河网层次的丰富与否。对比 1958 年和 2010 年两期河网复杂度计算结果，后期比前期减小了 35.8%，前期的河网层次更为丰富，更近于自然水系的状态。河网层次的大幅减小同样与城市化进程中人类对自然河流水系的占用相关联。

一级河网发育系数由 1958 年的 2.53 增加到 2010 年的 2.65，而二级和三级河网发育系数均比前期下降。城市化进程中，人们对支流水域进行了填埋和占用，河流结构趋于简单化，难以提升河流的等级，使得原来的二级河流降为一级河流。三级河流则由于人类对河流的干扰而完全退化。此外，干流长度所占比重由 60 年代的 19.3% 增加到 2010 年的 22.7%，河流有主干化趋势。

研究区支流水系数目减少、等级降低；支撑主干河道的支流水系发育越发薄弱，河网呈主干化趋势；河网复杂程度降低，河流构成层次趋于简单化。

3.2 河网连通性变化

为了避免将 1958 年和 2010 年水系连通性一概而论导致分析结果缺乏客观性，本文将赣江为界，利用图论的方法对 1958 年及 2010 年二期水系图进行赣江以南及赣江以北两部分的水系连通性分析。

在 1958 年及 2010 年水系图的基础上，利用 ArcGIS 软件对水系的河链与节点进行提取，总结两期水系图中河链数及节点数，汇总于表 6，根据公式 (1) 进行连通度计算。

表 6 不同时期南昌市河网连通度计算结果
Tab. 6 River Network Connectivity Calculation Results of Nanchang City in Different Periods

	河链数		节点		河网通达度	
	1958 年	2010 年	1958 年	2010 年	1958 年	2010 年
赣江南昌段以南	5	30	4	21	1.25	1.43
赣江南昌段以北	27	10	24	11	1.08	0.91

2010 年赣江以南河流水系多为纵横交错、形成多条回路的人工河，但 1958 年对应的区域河流较少且多为连通度较小的支流，因此 2010 年赣江以南水系连通度是 1958 年的 1.14 倍，河流水系分布数量也增大了。

2010 年赣江以北比 1958 年相应区域连通度减小 16%，河链数减少 63%。观察两期水系图可以看出，1958 年赣江以北区域部分支流水系与干流形成回路而增大连通性，而 2010 年相应区域与干流的连通河流数量由于人类活动影响而减少，因此水系连通度也就随之下降，河链数大幅减小。

研究区赣江以南水系连通度比较:2010 年比 1958 年增大 14.4%，河链数增加 25 条，增加速度为 0.48 条/a。赣江以北水系连通度比较:2010 年比 1958 年减小 16%，河链数减少 17 条，减少速度为 0.33 条/a；结果表明，随着城市化进程的发展，研究区赣江以北水系连通度呈下降趋势，河网水系的网络结构趋向简单化。但赣江以南由于人工河的挖建，且与河流之间形成回路，

水系连通度增大。

4 结论

城市化进程对土地利用影响显著，南昌市城市扩张，水域面积减少。城镇用地对水域的侵占和城市建设对水系的改造导致研究区河网水系结构与连通性发生相应的改变：近 50a 来南昌城区河流长度、面积及条数减少；支撑主干河道的支流级数降低、发育薄弱；河网的复杂度下降，构成层次简化；赣江南昌段以南河链和节点数增加，水系连通度提高，赣江南昌段以北水系连通度则下降，人工挖建河流可提升水系连通度。

本文考虑到南昌市水系的特殊性，以赣江中心线为南北分界线，区分南北区域水系因人工河流造成的水系连通性变化，避免了将水系连通性一概而论导致分析结果缺乏客观性；国内学者对城市水系结构及连通性的研究多数集中在东部沿海城市，中部城市却鲜少涉及。对南昌市这样一个典型的水系发达的中国中部城市进行水系变化的探讨在我国城市水系的研究工作中属于特例，并且对于今后城市河流治理、景观建设、水资源合理利用、城市防洪等工作都具有参考意义。本文的研究只是一个初步结果，如何更加全面地开展河流水系与连通性变化规律研究，还有待进一步探索分析。

参考文献：

- [1] 谢琼,王红瑞,柳长顺,等. 城市化快速进程中河道利用与管理存在的问题及对策[J]. 资源科学,2012,34(3): 424—432.
- 【XIE Q, WANG H R, LIU C S, et al. The problems and countermeasures of the channel utilization and management in the process of rapid urbanization [J]. Resource Science, 2012, 34(3): 424—432. 】
- [2] 韩龙飞,许有鹏,邵玉龙,等. 城市化对水系结构及其连通性的影响——以秦淮河中、下游为例[J]. 湖泊科学,2013,25(3): 335—341.
- 【HAN L F, XU Y P, SHAO Y L, et al. The influence of urbanization on the structure and connectivity of river system—Taking the middle and lower reaches of the Qinhuai River as an example [J]. Lake Science,2013,25(3): 335—341. 】
- [3] SMART J S. Statistical Properties of Stream Lengths [J]. Water Resources Research, 1968, 4(5): 1001—1014.
- [4] JORDAN B A, ANNABLE W K, WATSON C C, et al. Contrasting stream stability characteristics in adjacent urban watersheds:santa clara valley, California [J]. River Research and Application, 2010, 4(26): 1218—1297.
- [5] 黄奕龙,王仰麟,刘珍环,等. 快速城市化地区水系结构变化特征——以深圳市为例[J]. 地理研究,2008,27(5):1212—1220.
- 【HUANG Y L, WANG Y L, LIU Z H, et al. The change of water system structure in rapid urbanization area—a case study of Shenzhen City [J]. Geographic Research, , 2008, 27 (5):1212—1220. 】
- [6] MEERKERK A L, WESEMAEL B V, BELLIN N. Application of connectivity theory to model the impact of terrace

failure on runoff in semi-arid catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(19) : 2792—2803.

[7] CUI B, WANG C, TAO W, et al. River channel network design for drought and flood control: A case study of Xiaoqinghe River basin, Jinan City, China [J]. *Journal of Environment Management*, 2009, 90(11) : 3675—3686.

[8] 徐慧, 徐向阳, 崔广柏. 景观空间结构分析在城市水系规划中的应用 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(1) : 108—113.

【XU H, XU X Y, CUI G B. Application of landscape spatial structure analysis in urban water system planning [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1) : 108—113. 】

[9] 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.

【ZHOU Z M, LIU J X, GUO W. Evaluation of water system structure and connectivity in Zhengzhou City [J]. *Yellow River*, 2015, 37(10) : 54—57. 】

[10] 徐俊明. 《图论及其应用》课程建设探索 [J]. *教育与现代化*, 1997, 8 (43) : 41—46.

[LIU J M. Exploration on the course construction of <graph theory and its application > [J]. *Education and Modernization*, 1997, 8 (43) : 41—46. 】

[11] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价 [J]. *地理研究*, 2009, 28(2) : 284—292.

【WANG Y C. The connectivity evaluation of Shanghai urban landscape eco-network [J]. *Geographic Research*, 2009, 28(2) : 284—292. 】