

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221159

# 城镇扩张背景下湘江中游水系变化及其响应研究

宣润泽<sup>1</sup>, 杨柳<sup>1,2,3</sup>, 冯畅<sup>1,2,3</sup>, 詹琴<sup>4</sup>, 庾艳花<sup>1</sup>, 吕凌<sup>5</sup>

(1. 衡阳师范学院地理与旅游学院, 湖南 衡阳 421002; 2. 湖南省环境教育与可持续发展研究基地, 湖南 衡阳 421002; 3. 古村古镇文化遗产数字化传承协同创新中心, 湖南 衡阳 421002; 4. 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000; 5. 湖南省水文水资源勘测局衡阳分局, 湖南 衡阳 421099)

**摘要:** 鉴于城镇扩张使大量水域被挤占压缩甚至消失, 导致洪涝风险剧增。以湘江中游典型城市衡阳为例, 基于2001~2016年研究区水系特征数据与城镇化数据, 构建了水系变化与多维城镇发展评价体系, 剖析了城镇扩张背景下水系变化响应。结果表明, 湘江中游地区城镇发展可分为三阶段, 城镇扩张呈现速度先快后慢、强度相对较低的特征; 研究期内水系数量总体呈衰减趋势, 河道形态整体呈萎缩状态, 水系数量少、结构单一的流域衰减剧烈; 城镇扩张与水系变化关系紧密, 其对水系数量变化影响大于结构变化, 且与水系数量少、结构单一的流域关联度高。由此可见, 城镇建设与扩张等人类活动要尽可能减少对此类流域的不良影响。

**关键词:** 城镇扩张; 水系变化; 响应研究; 湘江流域中游

**中图分类号:** F299.23; TV82

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)05-0030-04

## 1 概况

衡阳作为湘江中游流域典型区, 其位于湖南省中南部(26. 12°~27. 46°N、110. 53°~113. 28°E), 面积15 310 km<sup>2</sup>。湘江在境内长226 km, 占总里程的39. 7%<sup>[1]</sup>, 呈S型贯穿其中。区内主要支流有洙水、蒸水、耒水、舂陵水, 水系形态呈向心型树枝状辐聚式<sup>[2]</sup>。区内降水集中于春夏季, 多年平均降水量1 698. 6 mm<sup>[3]</sup>, 属亚热带季风气候。以盆地地形为主, 地势西南高东北低。衡阳为环长株潭都市圈的重要城市, 城镇快速扩张, 城镇化率从2000年的29. 60%增长到2021年的55. 23%<sup>[4]</sup>。城镇扩张大量侵占林地、水域等蓄水面积, 极端强降水事件频发, 使区内洪涝风险剧增。现有研究表明<sup>[5]</sup>, 湘江中游为洪水灾害高风险区, 其危险度与易损度均较高, 因此开展城镇扩张背景下湘江中游水系变化及其响应研究具有现实意义和迫切性。为此, 本文基于2001~2016年水系特征数据与城镇化数据, 构建了水系

变化与多维城镇发展评价体系, 剖析了湘江中游城镇扩张与水系变化的联动关系, 旨在为推进“绿色城镇化”和防洪减灾提供科学支撑。

## 2 数据来源、处理及研究方法

### 2.1 数据来源和处理

水系数据源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>), 2001、2006、2011年Landsat4-5 TM影像分辨率为30 m, 2016年Landsat 8OLI-TIRS影像分辨率为15 m。城镇发展数据来自《湖南统计年鉴》。城镇新增面积主要指实际城乡、工矿、居民用地面积, 来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)土地利用现状遥感监测数据。

为获取科学准确、可对比的水系数据, 对所获取的影像进行大气校正、辐射定标、镶嵌裁剪等预处理。运用最邻近分配法<sup>[6]</sup>将2016年15 m分辨率影像重采样为30 m, 统一遥感影像分辨率。

采用监督分类最大似然法<sup>[7]</sup>提取水系数据。

**收稿日期:** 2022-05-31, **修回日期:** 2022-08-14

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41901026, 42001024); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ40015, 2021JJ40011); 湖南省教育厅科学研究项目青年项目(21B0625, 21B0646); 教育部大学生创新创业训练计划项目(S202010546025)

**作者简介:** 宣润泽(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为城镇化下水系适应性, E-mail: xrz263@163.com

**通讯作者:** 杨柳(1986-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水文与水资源环境、防灾减灾等, E-mail: palapalayl2006@126.com

但拓扑检查和实地调查发现该结果存在河流不连续、边界移位等错误。同时较多湖泊因云层、建筑等阴影及水体质量产生颜色差异被误判、漏判。故以 1 : 1 000 同时期 Google Earth 高清影像为底图,在 ArcMap 中调整河道边界、连接断裂处,手动增添可见河流与湖泊等水体,删减非湖泊斑块。最终得到经反复校准后的高精度水系数据。并用 30 m DEM 数据提取了湘江中游及四大子流域边界线。

表 1 水系与城镇化定量表达的指标体系

Tab. 1 Index system for quantitative expression of river network system and urbanization

目标层	准则层	指标与计算方法	含义
水系变化	1 水系数量 变化特征	①水面率 $W_p = W_{p1} + W_{p2}, \%$	各河流面积 $S_a, \text{km}^2$
		②河面率 $W_{p1} = (S_a/A)100\%, \%$	区域面积 $A, \text{km}^2$
		③湖面率 $W_{p2} = (A_w/A)100\%, \%$	湖泊总面积 $A_w, \text{km}^2$
		④河网密度 $D_r = L/A, \text{km}/\text{km}^2$	河流总长度 $L, \text{km}$
2 水系结构 变化特征	①河网复杂度 $C_R = NL/L_m$	$N$ 河道等级数 河流主干道长度 $L_m, \text{km}$	
	②支流发育系数 $K = L_n/L_m$	各级支流总长度 $L_n, \text{km}$	
	③河网结构稳定度 $S_{R_t} = (L_t/R_{A_t}) / (L_{t-n}/R_{A_{t-n}}) (n > 0, t > n)$	$S_{R_t}$ : 第 $t$ 年河网过去 $n$ 年的稳定度 $L_t, R_{A_t}, L_{t-n}, R_{A_{t-n}}$ 分别为第 $t$ 年、第 $t-n$ 年河流总长度(km)、总面积( $\text{km}^2$ )	
城镇发展	1 人口城镇化 定量表达	①人口结构城镇化率/ $\%$	城镇人口占总人口的比重
		②生活质量:城镇居民人均可支配收入,元	居民全部现金收入中用于安排家庭日常生活的那部分收入
	2 经济城镇化 定量表达	①产业结构:第三产业占 GDP 比重, $\%$	第三产业占 GDP 比重
		②经济状况:国内生产总值,亿元	一定时期内,生产出的全部最终产品和劳务的价值
	3 空间城镇化 定量表达	① $\Delta U_i$ :城镇新增面积, $\text{km}^2$	实际城乡、工矿、居民用地所达到的范围
		②城镇扩张速度指数 $M_i = 100\Delta U_i / (\Delta t U_{LA_i})$	$\Delta U_i$ :时段内扩张数量 $U_{LA_i}$ :时段初期面积
		③城镇扩张强度指数 $L_i = 100\Delta U_i / (\Delta t T_{LA_i})$	$\Delta U_i$ :时段内扩张数量 $T_{LA_i}$ :区域土地总面积

灰色关联度法可用于分析两种动态事物发展的相关性,探索系统内部发展的主要影响因素。本文选择 2001、2006、2011、2016 年的衡阳段全域与各子流域的河面率( $X_1$ )、河网密度( $X_2$ )、河网复杂度( $X_3$ )、支流发育系数( $X_4$ )、湖面率( $X_5$ )和城镇扩张指数( $Y$ )组成数列,计算关联度,分析城镇化与水系的联动关系。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 城镇扩张与发展水平分析

图 1 为多维城镇发展水平测度(图例后所标数字为权重)。图 1 中,湘江中游城镇发展分为三个阶段:①2006 年前,多维城镇发展水平较低,经济城镇化水平高于空间、人口城镇化,且人口与空间城镇化发展趋势拟合度高。②2006~2014 年,多维城镇发展水平提高,空间城镇化增速快,处领先地位,经济城镇化落后。③2014 年后,多维城镇发展水平高且速度快,经济城镇化反超。

为进一步评价湘江中游空间城镇化水平在中部地区的地位,参照文献[9]研究增加 2006~2016

### 2.2 研究方法

为多维度展现水系变化特征,在湘江中游衡阳段全域基础上进一步细分子流域(洙水、蒸水、耒水、舂陵水)。城镇发展水平选择人口城镇化、经济城镇化和空间城镇化三个维度表征,并用熵值法确定各指标权重[8],探究三者的贡献率及其相互作用关系。着重分析城镇新增面积、城镇扩张速度和强度三个指标,进一步评价城镇空间扩张水平。表 1 为水系与城镇化定量表达的指标体系。

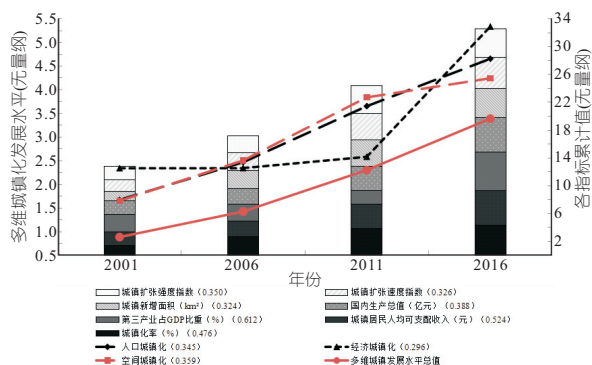


图 1 多维城镇发展水平测度

Fig. 1 The level of urbanization

年数据(表 2)进行比较分析,发现湘江中游城镇扩张面积、速度、强度呈正相关;空间城镇化先快后慢的发展趋势与南昌一致。在中部六省中,湘

表 2 湘江中游城镇的空间变化

Tab. 2 The spatial expansion of urban of Xiangjiang Rive midstream

年份	城镇新增 面积/ $\text{km}^2$	扩张速 度指数	扩张强 度指数	年份	城镇新增 面积/ $\text{km}^2$	扩张速 度指数	扩张强 度指数
2001~2006	17.266	1.83	0.02	2006~2016	234.930	10.36	0.14
2006~2011	126.098	12.23	0.16	2001~2016	252.196	8.90	0.33
2011~2016	108.832	6.55	0.14				

江中游城镇扩张面积仅小于郑州、合肥,城镇扩张速度仅小于合肥,扩张强度略弱于武汉、长沙、太原,仅强于南昌。可见,湘江中游的城镇扩张速度快但强度低。

### 3.2 水系变化特征规律研究

研究区内蒸水、耒水、舂陵水、洙水子流域面积分别占总面积的 18.94%、18.53%、8.33%、7.05%。图 2 为湘江中游水系数量、结构指标变化率。由图 2 可知,2001~2016 年湘江中游水系变化显著,不同时段各流域差异大。

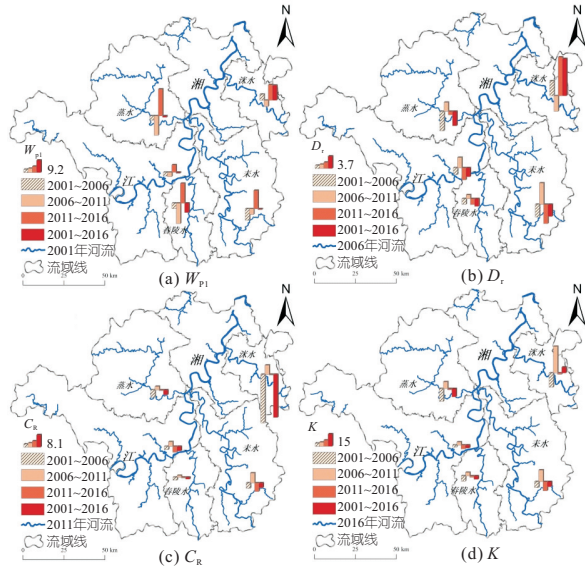


图 2 湘江中游水系数量、结构指标变化率

水流域外,各子流域  $D_r$  均呈“减—增—减”的趋势  $D_r$  最高的耒水流域在 2006~2011 年时段增长 7.98%,变化最为显著者为蒸水,研究期内减少 5.31%。

从结构变化看,研究期内河道形态整体呈萎缩状态,  $C_R$ 、 $S_R$ 、 $K$  分别减小 3.35%、10.56%、4.04%。耒水流域面积广阔,拥有的支流数量多、等级高,流域系统复杂,研究期内平均河网复杂度(5.87)、支流发育系数(0.96)最高。但舂陵水、洙水因流域面积较小,各结构特征指标均较小。

洙水流域水系结构变化尤为显著。2001~2006 年该流域河网复杂度减小 36.22%,  $K$  减小 19.21%,2006~2011 年则增长 36.21%。究其原因主要在于洙水在研究区内的长度、流域面积均位列倒数,支流等级低、数量少,平均河网结构稳定度(0.953)最低。另外,该流域 2006 年影像时间为 6 月,其他年份及其他流域均为 7 或 9 月,使降水变率大。这一结论表明湘江中游水系数量越少、结构越单一的流域,水系变幅越大,两者呈负相关。

### 3.3 城镇扩张背景下水系变化的响应分析

本文得到的灰色关联度(表 3)均大于 0.5,说明湘江中游水系变化与城镇扩张关系紧密。从整体看,关系最密切的为洙水河面率和河网密度(0.759),最小为耒水湖面率(0.497);从水系指标看,城镇扩张与河网密度平均关联度最大(0.641),第二为河面率(0.623),两者均为水系数量指标,说明水系数量特征受城镇扩张的影响更大。

空间尺度上,洙水流域平均关联度为 0.671,另一流域面积较小的舂陵水流域,平均关联度 0.601,高于其他子流域。舂陵水流域河网复杂度与城镇扩张关联度位列第一,该流域河网等级数最少,河网构成简单,所以易受城镇扩张影响。结合流域水系指标变化发现,湘江中游水系数量越少、结构越单一的流域,水系变幅越大,受城镇扩张影响越大。

时间尺度上,联系多维城镇发展、城镇扩张与

从数量变化看,2001~2016 年湘江中游  $W_{p1}$ 、 $W_{p2}$ 、 $D_r$  总体呈衰减趋势,分别减少 0.78%、23.28%、3.11%,与长沙相比,变化趋势相同但衰减态势较弱<sup>[10]</sup>。变化最剧烈的  $W_{p2}$  研究期内从 0.99%持续减少到 0.76%,尤其在 2011~2016 年时段减少了 13.61%。各流域  $W_{p1}$  的减少以 2011 年为转折点,此年后增加;其中洙水涨幅最大,增长 12.60%。蒸水和舂陵水  $W_{p1}$  变化显著,2006~2011 年分别减少 16.31%、17.26%,2011~2016 年分别增加 22.53%、16.68%。除洙

表 3 湘江中游水系变化与城镇扩张的关联度及排名

Tab. 3 The correlation degrees of Xiangjiang River midstream and urban expansion

城镇化	流域与面积	水系指标										流域平均	
		$X_1$		$X_2$		$X_3$		$X_4$		$X_5$		关联度	排名
		关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名		
Y 城镇扩张指数	①湘江中游衡阳段全域(15 310 km <sup>2</sup> )	0.608	3	0.601	4	0.611	2	0.611	3	0.527	3	0.592	3
	③蒸水(2 899.50 km <sup>2</sup> )	0.560	4	0.613	3	0.607	3	0.607	4	0.506	4	0.579	5
	④耒水(2 836.31 km <sup>2</sup> )	0.677	2	0.579	5	0.580	5	0.580	5	0.497	5	0.583	4
	⑤舂陵水(1 275.41 km <sup>2</sup> )	0.510	5	0.653	2	0.637	1	0.637	2	0.569	2	0.601	2
	②洙水(1 078.75 km <sup>2</sup> )	0.759	1	0.759	1	0.604	4	0.662	1	0.570	1	0.671	1
	水系指标平均关联度	0.623	2	0.641	1	0.608	4	0.619	3	0.534	5	/	/

水系变化趋势有以下发现:①2006年前城镇经济发展吸引了农村人口的涌入,促进了湘江中游重工业的发展,同时也增加了基础设施的需求。致使2006年后城镇扩张迅猛,出现圈地扩容的“房地产业化”现象,水系空间被严重挤占。2006年前水系数量、结构指标虽有下降,但幅度不大,湘江 $W_{p1}$ 、 $W_{p2}$ 、 $D_r$ 分别减少3.17%、5.74%、2.31%,河网复杂度、支流发育系数分别减小2.36%、2.85%。但2006年后水系面积极速缩减,部分流域河网率减少率高达17.26%。而河道疏浚、清淤扩容等工程优化了水系结构,使其指标正向变化。②2014年城镇化进程已进入加速阶段,城镇扩张速度减缓,强度减小。此时基础设施已较完善,城镇化发展无需再依托面积的扩张。同时“新型城镇化道路”、“绿色城镇化”力求满足人们对高质量生活的需求,敦促政府在城镇建设过程中强调环境保护。因此,湘江中游水系数量恢复,结构单一问题有所缓和。可见,城镇扩张对水系的影响具有双面性,城镇化发展过程中要尊重自然、采取积极的措施保护自然,实现“人水和谐”。

## 4 结论

a. 通过三维城镇化定量分析可知,湘江中游多维城镇发展可分为三个阶段,城镇扩张速度先快后慢,与其他中部城市相比扩张速度快但强度低。

b. 研究区水系演变研究显示,2001~2016年水系数量总体呈衰减趋势,河道形态整体呈萎缩状态,衰减态势弱于长沙。水系数量越少、结构越单一的流域,变化幅度越小。

c. 湘江中游水系变化与城镇扩张的关联度

均大于0.5,关系紧密。城镇扩张对水系数量的影响大于结构。从流域尺度看,水系数量越少、结构越单一的流域,变幅越大,受人为扰动越大,即洙水流域最易受城镇扩张影响。在城镇建设与扩张中须特别注意水系这类流域,尽可能减少人类活动对其不良影响。

d. 本文研究仅揭示过去城镇扩张与水系变化的内在关联,后续研究可从未来扰动的空间尺度深入分析两者的内在联系。

## 参考文献:

- [1] 高寇民, 窦秀英. 湖南自然地理[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1981.
- [2] 邹君, 傅双同, 毛德华. 中国南方湿润区水资源脆弱度评价及其管理——以湖南省衡阳市为例[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 76-80.
- [3] 龙晓琴, 廖春花, 谭诗琪, 等. 湘江流域面雨量气候特征分析[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(2): 8-12, 19.
- [4] 衡阳市统计局. 衡阳市 2021 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 衡阳, 2022.
- [5] 莫宏伟, 李少青, 陶建军, 等. 湘江湖南段洪水灾害综合风险区划[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11): 1405-1410.
- [6] 张周威, 余涛, 孟庆岩, 等. 空间重采样方法对遥感影像信息影响研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013, 47(3): 426-430.
- [7] 闫琰, 董秀兰, 李燕. 基于 ENVI 的遥感图像监督分类方法比较研究[J]. 北京测绘, 2011(3): 14-16.
- [8] 赵江辉, 岳钧. 基于熵权综合指数法的河流水质综合评价研究[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(2): 37-39.
- [9] 史滢宜. 中国省会城市 1995-2015 年建设用地扩张时空特征及评价[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [10] 蒋祺, 郑伯红. 城市用地扩展对长沙市水系变化的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1429-1439.

## Changes of River Network System in Midstream of Xiangjiang River and Its Response to Urban Expansion

XUAN Run-ze<sup>1</sup>, YANG Liu<sup>1,2,3</sup>, FENG Chang<sup>1,2,3</sup>, ZHAN Qin<sup>4</sup>, YU Yan-hua<sup>1</sup>, LV Ling<sup>5</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China;

2. Hunan Environmental Education and Sustainable Development Research Base, Hengyang 421002, China;

3. Cooperative Innovation Centre for Digitalization of Cultural Heritage in Ancient Villages and Town, Hengyang 421002, China; 4. College of Tourism and Geographic, Jilin Normal University, Siping 136000, China;

5. Hengyang Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hunan Province, Hengyang 421099, China)

**Abstract:** The expansion of cities and towns has caused a large amount of waters to be compressed, occupied or even disappeared, and the risk of floods in the region has increased sharply. This study is based on Hengyang, a typical city in midstream of Xiangjiang River. Based on expansion speed index and intensity index of Xiangjiang midstream from 2001 to 2016, the linkage relationship between the two is quantitatively analyzed, and the response of water system change under the background of urban expansion is analyzed. The results show that the urban development in midstream of Xiangjiang River can be divided into three stages. The urban expansion is characterized by a high speed and then a low intensity. During the study period, the total number of river systems showed a declining trend, and the channel morphology showed a shrinking state. The change of the structure of river systems was more severe than the change of the number. The basin with few river systems and single structure had a sharp decline. Urban expansion has a close relationship with the change of river system, and has a greater impact on the change of the number of river systems. And it is highly related to the basin with few water systems and single structure. It can be seen that human activities such as urban construction and expansion should minimize the adverse impact on such watersheds.

**Key words:** urban expansion; river network system change; response research; midstream of Xiangjiang River