

城市化背景下嘉兴市河流水系的时空变化

邓晓军^{1,2}, 许有鹏¹, 韩龙飞¹, 李 广¹, 王跃峰¹, 项 捷¹, 徐光来^{1,3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 广西师范大学环境与资源学院, 桂林 541004;
3. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241000)

摘要: 基于1960s、1980s和2010s的三期水系数据, 通过构建定量描述河流水系变化特征的指标体系, 对嘉兴市河流水系的时空变化特征及其与城市化的关系进行研究。结果表明: ①近50年来, 嘉兴市的河流水系呈现出剧烈衰减的趋势, 其中河流发育系数、河网密度和水面率分别减少了58.91%、28.49%和14.09%, 但在城市化不同阶段, 河流水系衰减的程度并不完全一致。②在整个城市化进程中, 河流发育系数和干流面积长度比变化的空间差异非常大, 河网密度和水面率变化的空间差异相对较大, 而盒维数和河流曲度变化的空间差异相对较小。③河流发育系数、盒维数和河网密度的衰减趋势为城区>近郊>远郊, 水面率的衰减趋势为远郊>近郊>城区, 河流曲度的衰减趋势为近郊>城区>远郊, 但干流面积长度比的空间变化趋势不明显。④城市化对河流水系变化的影响十分显著, 且城市化水平越高的地区河流水系的变化越剧烈, 而城市化对干流面积长度比与河流曲度的影响大于其对河流发育系数与河网密度的影响。

关键词: 河流水系; 时空变化; 城市化; 嘉兴

DOI: 10.11821/dlxb201601006

1 引言

近几十年来, 随着城市化进程的快速推进, 流域土地利用的类型发生了剧烈的变化。许多河道被淤积和填埋, 导致快速城市化地区河流水系的数量明显减少^[1]。与此同时, 为了城市防洪和环境整治等需求, 人类对河流水系的形态进行大幅度的改变。这些数量、形态和结构方面的变化使得河流水系的生态完整性遭到严重破坏^[2], 导致其生态系统服务功能急剧退化甚至丧失^[3], 并引发了水环境恶化和生物多样性降低等众多生态环境问题, 从一定程度上制约了区域的可持续发展。因此城市化等人类活动影响下河流水系的时空变化及其环境效应已成为地理、水文、生态和环境等学科领域的研究热点之一^[4-6]。

尽管河流水系是自然作用的产物, 但其演化过程却与人类活动密切相关^[7]。国外的相关研究表明, 河流水系已成为当前受人类活动影响最为强烈的生态系统^[8]。在这些诸多人类活动中, 城市化对河流水系的影响最为明显, 它使得全球范围内60%的河流水系的形

收稿日期: 2015-11-16; 修订日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371046, 41301029); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201072, 201301075); 江苏自然科学基金项目(BK20131276) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371046, No.41301029; Commonwealth and Specialized Program for Scientific Research, Ministry of Water Resources of China, No.201201072, No.201301075; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No.BK20131278]

作者简介: 邓晓军(1981-), 男, 江西吉安人, 博士, 讲师, 主要研究方向为流域水资源与水环境。E-mail: mijun45@163.com

通讯作者: 许有鹏(1956-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 主要研究方向为流域水文水资源评价与防洪减灾。

E-mail: xuy305@163.com

态参数发生了适应性变化^[9-10]。国内相关研究始于20世纪末期,起初主要是从地貌学的角度探讨河流水系的自然演化过程^[11-13],近年来也开始基于防洪减灾和生态环境保护的目的分析高强度人类活动干扰下河流水系的变化特征及其生态环境效应^[14-15]。总体看来,国内相关研究主要集中在长江、珠江和海河等大江大河下游的平原河网地区,研究结果也表明了城市化等人类活动会使得河流水系的数量锐减、结构简化和功能下降,并导致洪涝灾害和水环境恶化的风险增加等诸多后果^[16-18]。这些研究成果一方面使人们对城市化背景下河流水系变化的特征有了更深的认识,另一方面也为流域的防洪减灾和水环境治理提供了有益的参考。但是,由于河流水系的形成和演化过程所依存的流域地理环境存在较大的差异,所以河流水系的变化具有明显的区域特征。同时,通过构建多角度反映河流水系变化特征的指标体系对其时空变化过程进行的研究较为少见,尤其是城市化等人类活动与河流水系变化之间的定量关系研究更是鲜见。因此,开展城市化背景下多角度的区域河流水系变化研究显得很有必要。

嘉兴市地处中国城市化发展速度最快的太湖流域腹心地带,属典型平原河网地区。然而,快速发展的城市化不仅促进了区域经济的高速发展,还导致河流水系发生剧烈的变化,并由此引发了洪涝灾害加剧等一系列生态环境问题。这些问题引起了部分学者的重点关注,并从太湖流域和杭嘉湖区等宏观尺度上分析了河流水系变化的总体趋势^[19-21]。但是,对具体区域而言,中微观尺度上的相关研究有助于更为客观地反映河流水系变化的区域特征,并可为区域的防洪减灾和水生态环境保护提供更为有力的基础支持,具有重要的研究价值和实践意义。为此,本文选取1960s、1980s和2010s三期水系数据,通过构建反映河流水系变化特征的指标体系,分析了近50年来嘉兴市河流水系的时空变化特征,并基于灰色关联分析方法揭示了城市化与河流水系变化之间的定量关系。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

嘉兴位于太湖流域东南部,位置介于30°21′~31°02′N、120°18′~121°16′E之间,陆地面积3915 km²,其中平原3477 km²,包括2个市辖区(南湖区、秀洲区)、3个县级市(海宁市、平湖市、桐乡市)和2个县(嘉善县、海盐县),共有43个镇和28个街道。在本研究中,为了分析不同城市化水平地区河流水系的变化特征,把嘉兴市主城区和各市县县政府所驻街道作为城区,把与各城区接壤的街道和乡镇作为近郊,其余与城区不直接相邻的乡镇作为远郊(图1)。

嘉兴市地处北亚热带南缘,年平均气温15.9℃,年平均降水量1168.6 mm。境内地势地平,为浅碟形洼地,地面高程一般在3.2~3.6 m之间。境内河网密布,湖荡众多,河道总长约1.38×10⁴ km,河网密度超过3 km/km²,湖荡数量为145个,面积约42.22 km²。嘉兴市域河道上游来水,主要有来自境外天目山地区的客水以及来自境内南部高地和诸山集水。另外,汛期太湖水位高涨时,也有部分水流倒灌入境。而下游泄水去路,经数千年演变,至今形成杭嘉湖北排通道、嘉北入浦河道、路南入浦河道和南排河道共4个排水系统。特殊的自然地理条件决定了嘉兴是一个洪涝和台潮灾害频发以及渍害严重的地区,但近几十年来快速城市化进程中剧烈的水系变化和严重的地面沉降使得该地区的防洪减灾形势更加严峻。

2.2 数据来源及处理

水系数据来源于嘉兴市1960s(1960-1963年)和1980s(1983-1985年)的1:50000纸

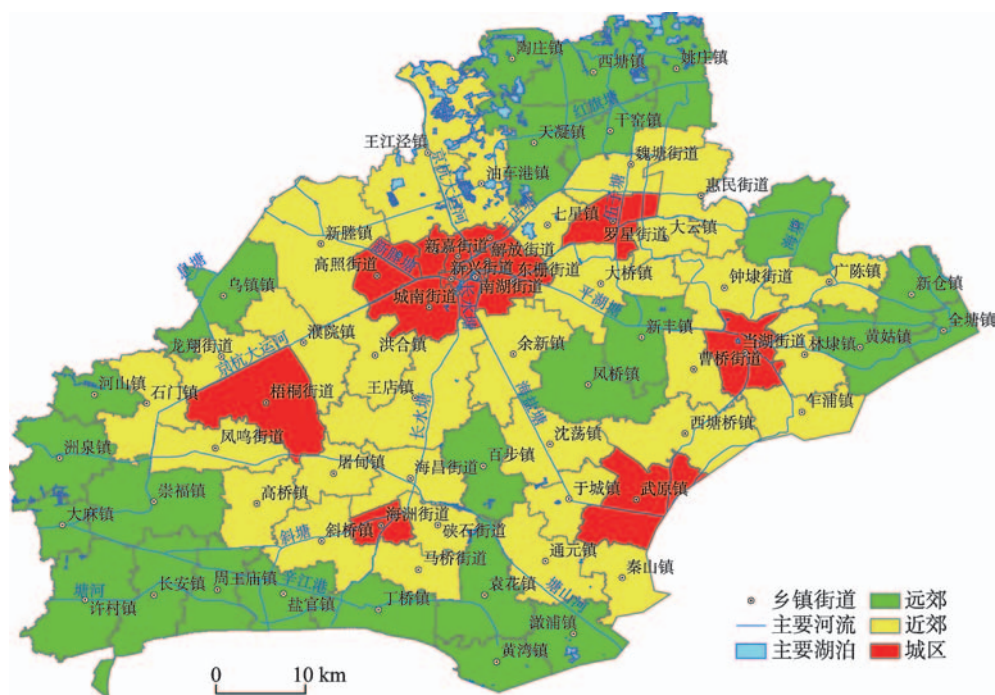


图1 嘉兴市示意图

Fig. 1 Sketch of Jiaxing

质地形图, 以及2010s的1:50000数字线划地图(2009年制图, 并基于2014年的遥感影像进行校核)。参考Strahler的河流分级方法^[22], 并结合研究区河流水系的自然特征及其社会属性, 将嘉兴市的河流水系分为三级: 线状的支渠为三级河流, 线状的地面河流和干渠为二级河流, 面状的运河、地面河流和干渠为一级河流。其中, 二、三级河流为支流, 一级河流为干流。社会经济数据主要来源于嘉兴市下属各乡镇(街道)的人口和经济统计资料, 以及2014年研究区TM遥感影像解译得到的土地利用数据。

2.3 指标体系

城市化背景下河流水系的变化主要体现在其数量、形态和结构等方面。因此, 在参考国内外相关研究常用的水系特征参数与表征指标的基础上^[14-21], 本研究选用河网密度、水面率、河流发育系数、河流曲度、干流面积长度比和盒维数共6个指标来定量描述河流水系变化的特征。另外, 一般认为, 城市化一个由农村向城市改变的复杂进程, 主要表现为非农业人口增长、非农业经济发展和城市建设用地扩张^[23]。因此, 本研究建立人口城市化、经济城市化和空间城市化共3个指标来定量描述区域的城市化水平(表1)。

3 结果与分析

3.1 河流水系的总体变化

基于ArcGIS对嘉兴市三期地形图进行数字化提取, 并计算各水系指标(表2)。可以看出, 近50年来各水系指标均呈现出衰减的趋势, 即水系变化主要表现为数量急剧减少、形态均一化明显以及结构逐步简单化。其中, 河流发育系数衰减了58.91%, 河网密度和水面率也分别衰减了28.49%和14.09%, 其余的指标也减少了4%~9%。这不仅与上海、苏州、无锡、宁波和深圳等国内经济发达的平原河网地区的相关研究结果基本一

表 1 水系变化特征与城市化水平指标体系

Tab. 1 Indicator systems of change characteristics of river systems and urbanization level

类别	指标	计算方法
水系变化特征	河网密度(D_r)	河流总长度与流域总面积的比值
	水面率(W_p)	河流与湖泊等水体面积与流域总面积的比值
	河流发育系数(K_o)	支流长度与干流长度的比值
	河流曲度(S_r)	河流起点与终点之间的直线距离与河流长度的比值
	干流面积长度比(R_m)	干流的面积与长度的比值
	盒维数(D_o)	不同比例尺与其测量得到的河网数量的对数关系的直线斜率
城市化水平	人口城市化(U_p)	非农业人口数量与区域人口总量的比值
	经济城市化(U_e)	非农业 GDP 与区域 GDP 的比值
	空间城市化(U_s)	城市建设用地面积与区域总面积的比值

表 2 1960s-2010s 嘉兴市河流水系的总体变化

Tab. 2 Total changes of river systems in Jiaxing during the 1960s to 2010s

水系指标	1960s	1980s	2010s	变化率(%)		
				1960s-1980s	1980s-2010s	1960s-2010s
D_r (km/km ²)	4.41	3.64	3.15	-17.48	-13.34	-28.49
W_p (%)	8.59	7.64	7.38	-10.96	-3.51	-14.09
K_o	5.8	4.11	2.39	-29.17	-41.98	-58.91
S_r	1.14	1.09	1.08	-3.80	-0.29	-4.08
R_m (km ² /km)	40.56	40.02	38.62	-1.32	-3.50	-4.78
D_o	1.61	1.55	1.47	-3.73	-5.33	-8.86

致^[17, 24]，而且符合全球范围内快速城市化地区河流水系演变的一般规律^[10]。

总的来说，河流水系的自然发育过程因强烈人类活动干扰而遭到破坏（如自然发育的平原河网地区盒维数应为 $1.89 < D_o \leq 2.00$ ，但现在一般只有 1.50 左右）^[25]，并沿着适应人类活动需求的方向发展。究其原因，主要有以下两个方面：一方面，城市化进程中因河道淤积以及建设用地侵占水面等造成河网密度、水面率、河流发育系数和盒维数的剧烈衰减。例如，三级河道长度由 1960s 的 5751.58 km 减少为 2010s 的 3395.56 km、共减少了 40.96%，湖泊面积由 1960s 的 69.94 km² 减少为 2010s 的 51.46 km²、共减少了 26.42%；另一方面，随着城市化的快速发展，为了满足人类的调水、防洪和生态需求而实施的河道主干化工程建设导致河流曲度和干流面积长度比的急剧减小。例如，1960s-2010s 一级河道长度从 2534.24 km 逐渐增加至 3642.92 km，共增加了 43.75%。

根据国内外常见的城市化发展阶段划分方法^[26]，可将嘉兴市的城市化进程分为两个阶段，即城市化率（一般指人口城市化水平）低于 30% 的缓慢城市化时期（1960s-1980s）和 30%~70% 的快速城市化时期（1980s-2010s）。尽管在过去 50 年中，嘉兴市河流水系均呈现出衰减的趋势，但是在城市化不同阶段，河流水系衰减的程度并不完全一致（表 2）。其中，河网密度、水面率和河流曲度在缓慢城市化时期的衰减率高于快速城市化时期，而河流发育系数、干流面积长度比和盒维数在快速城市化时期的衰减率高于缓慢城市化时期。

上述这些嘉兴市河流水系的总体变化特征，与实际情况是相符的。新中国成立以来，嘉兴市实施了大规模的农田水利工程建设。这一时期的主要工作是疏浚淤积的河道、整合零散的圩垸、新开挖灌溉沟渠、以及围湖造田和荡地改田等，主要目标是治理农田内涝、增加农田面积、保障农业高产。与此同时，这些水利工程建设也使得许多未

端河流被填埋、湖荡面积急剧萎缩、河道普遍被截弯取直, 最终导致河网密度、水面率和河流曲度剧烈衰减。然而, 改革开放以来, 嘉兴市社会经济的快速发展也使其城镇面临的洪涝灾害趋于严重。尤其是1991年太湖流域的特大洪涝灾害, 促使嘉兴市加大了骨干排涝工程建设的步伐。其中, 杭嘉湖南排工程还被列为治理太湖十项骨干工程的“重中之重”。在这一时期, 嘉兴市的水利建设目标主要是缓解洪涝灾害对城镇的威胁。这不仅使得该地区骨干河道的长度大规模增长, 还因城镇面积快速扩张使得低等级河道被大量填埋, 并最终导致河流发育系数、干流面积长度比和盒维数剧烈衰减。与此同时, 为了改善调蓄洪水的能力, 许多原本被改造成农田与鱼塘的湖泊边缘地带纷纷被退回湖泊, 这一措施有效地遏制了湖泊面积锐减的趋势。但受到气候变化与泥沙淤积等自然因素的影响, 湖泊的天然萎缩也导致了这一时期水面率的减少。

3.2 河流水系变化的时空差异

为了分析嘉兴市河流水系变化在时空上的差异, 以乡镇(街道)为基本单元, 分别计算其1960s-1980s(缓慢城市化时期)、1980s-2010s(快速城市化时期)和1960s-2010s(整个城市化进程)的变化率(图2)。在缓慢城市化时期, 各水系指标变化的空间差异较大。其中, 河流发育系数和干流面积长度比的变化差异非常大(最小变化率不足1%, 最大变化率接近100%)、河网密度和水面率的变化差异也比较大(最大变化率达50%左右), 而盒维数和河流曲度的变化差异相对比较小(最大变化率只有20%左右)。在快速城市化时期, 河流发育系数的变化差异仍然非常大(0.33%~84.63%), 水面率、干流面积长度比和河网密度的变化差异也比较大(最大变化率达40%左右), 而盒维数和河流曲度的变化差异仍然相对比较小(最大变化率只有10%左右)。在整个城市化进程中, 河流发育系数变化的差异最大(4.54%~97.54%), 干流面积长度比变化的差异也很大(0.91%~84.89%), 河网密度和水面率变化的差异相对较大(约0.10%~60.00%), 而盒维数和河流曲度变化的差异相对较小(约0.01%~20.00%)。从空间看, 南部水系的变化幅度最大, 东部和北部水系的变化幅度比较小。

在整个城市化进程中, 嘉兴市水系变化的时空差异非常明显。原因主要有三个方面: 一方面, 在不同时期或不同地区, 人类改造河流的目的并不相同。在缓慢城市化时期, 人类改造河流的主要目的是为了保障农业高产。同样, 远郊地区主要是以农业生产为主, 其河流水系被动发生变化也是为了适应人类发展农业的需求, 如为了增加可利用的土地面积、当地居民可能将末级河道进行填埋^[27-28]。然而, 在快速城市化时期, 人类改造河流的主要目的是为了保障城市防洪安全。同样, 城区的水系变化主要是为了满足不断增长的建设用地需求; 另一方面, 不同地区的水系特征指标原始值差距较大。一般而言, 城区经过数百年甚至数千年的建设, 其河流水系特征的原始值往往低于近郊更低于远郊。例如, 1960s处于城区的解放街道的河流发育系数仅为0.82, 而处于近郊的通元镇的河流发育系数为8.33, 但处于远郊的河山镇的河流发育系数高达35.11。显然, 通元镇和河山镇的河流发育系数减少了0.82之后其数值仍然较大, 但解放街道的河流发育系数不可能从0.82减少为0; 此外, 城市化发展的速度和水利工程建设力度并不一致。受到区域政策的影响, 尽管嘉兴市地处杭州与上海和苏州之间, 但其发展的主要方向还是趋向于与杭州连为一体。加上南部沿海特殊的地理优势, 使得嘉兴市南部地区城市化发展的速度普遍高于北部和东部地区, 并最终导致南部地区水系变化的幅度高于北部和东部地区。同时, 尽管嘉兴市的泄洪排涝有北排、东排和南排三个方向, 但其主要方向还是往南排入杭州湾。这也导致南部地区的骨干水系工程建设力度大于北部和东部地区。

3.3 河流水系变化的类型及分布

嘉兴市河流水系在时间上和空间上的变化并不一致。为此, 根据近50年来各水系指

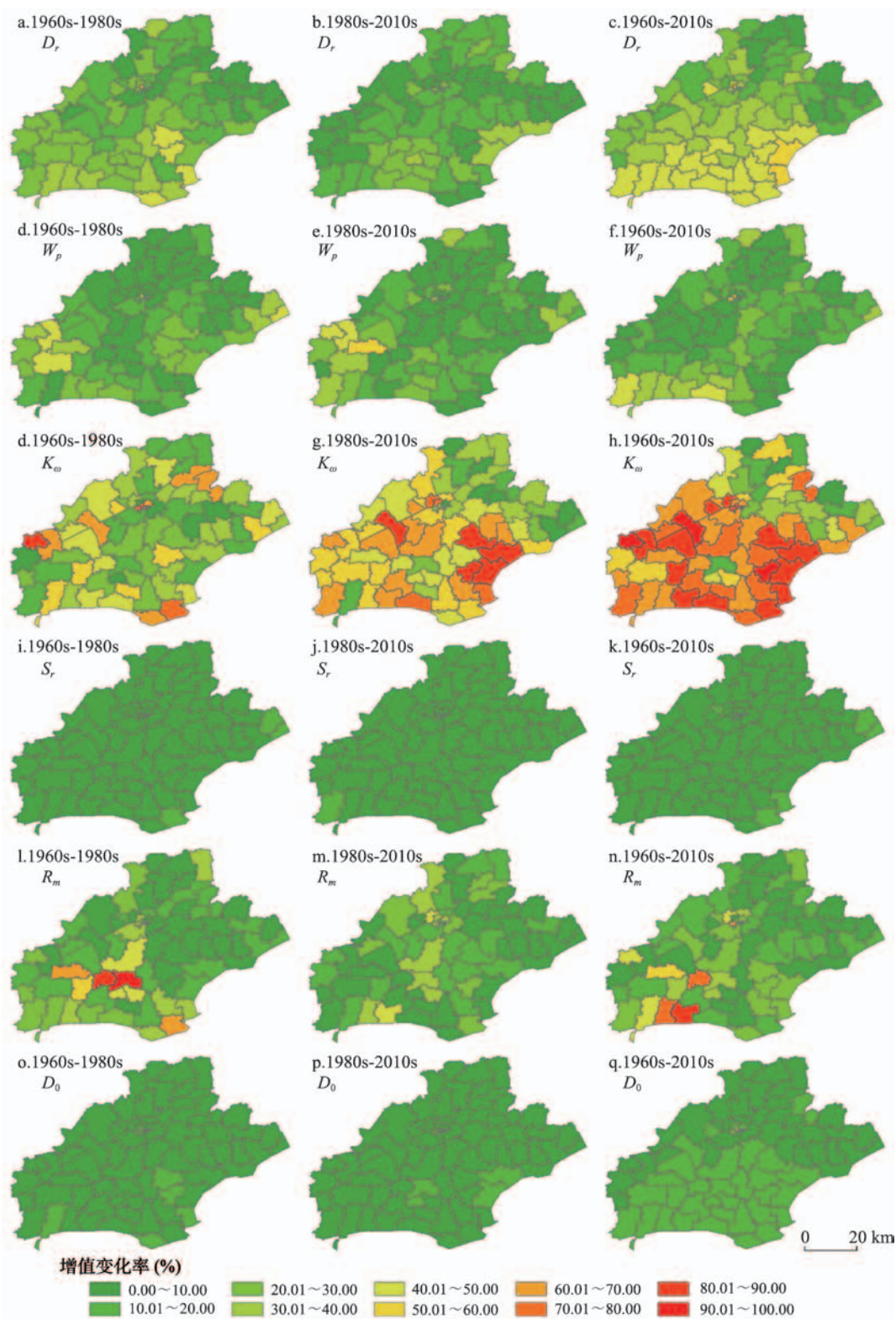


图2 1960s-2010s 嘉兴市河流水系变化的时空差异

Fig. 2 Spatial and temporal differences of river systems changes in Jiaxing from the 1960s to 2010s

标的变化情况, 将其分为逐渐减少、先减少后增加总体减少、先增加后减少总体减少、逐渐增加、先减少后增加总体增加和先增加后减少总体增加6种变化类型(图3)。

可以看出, 河网密度、河流发育系数和盒维数的变化类型分布基本一致, 除了北部和东部部分乡镇呈现先减少后增加总体减少和先增加后减少总体增加类型之外, 绝大部分乡镇属于逐渐减少类型且其分布非常集中。同时, 水面率和河流曲度的变化类型分布也比较接近, 均是以先减少后增加总体减少和逐渐减少这两种类型为主且其分布比较集中。然而, 干流面积长度比的变化类型分布比较分散, 且各种变化类型均有分布。相对而言, 干流面积长度比还是以先增加后减少总体增加和先增加后减少总体减少这两种变化类型为主, 而先减少后增加总体减少和先减少后增加总体增加这两种变化类型分布较少。此外, 干流面积长度比呈现增加变化类型的乡镇主要位于西部和南部。

分别统计3种不同城市化水平地区的河流水系变化类型(表3)可看出, 3种地区的河流发育系数、盒维数和河网密度均是以逐渐减少类型为主, 且这种类型的所占比例即其衰减趋势为城区>近郊>远郊。这与城镇建设用地扩张的方向基本一致, 主要是由于城区的建设用地扩张主要来源于低等级河道的填埋和转入地下, 近郊的建设用地扩张主要是来自侵占大量的农田, 而远郊的建设用地相对较少, 主要是以牺牲部分农田为代价来修建道路等基础设施。

同时, 这3种地区的水面率和河流曲度变化均是以减少为主, 但水面率的衰减趋势为远郊>近郊>城区, 而河流曲度的衰减趋势为近郊>城区>远郊。经实地调查, 尽管许多低等级河道消失导致城区的水面率有一定的下降, 但随着城市环境建设的力度不断加大, 城区的湖泊逐渐得到保护使其水面率减小的速度不断放缓。与此同时, 近郊地区一般多为开发区所在地, 其土地扩张不仅侵占了大量的农田还有部分池塘等水面, 但远郊地区的水面率锐减可能是由于大规模的围湖造田和荡地改田等活动造成的。与水面率的变化趋势不同, 城区的低等级河道填埋导致其河流曲度明显减小, 但近郊的低等级河道填埋与大规模的骨干河道建设同时共存导致其河流曲度衰减更为剧烈, 而远郊的低等级河道相对变化较小导致其河流曲度变化的幅度最小。

此外, 干流面积长度比的变化类型在这3种城市化地区的分布比较均匀, 但城区和

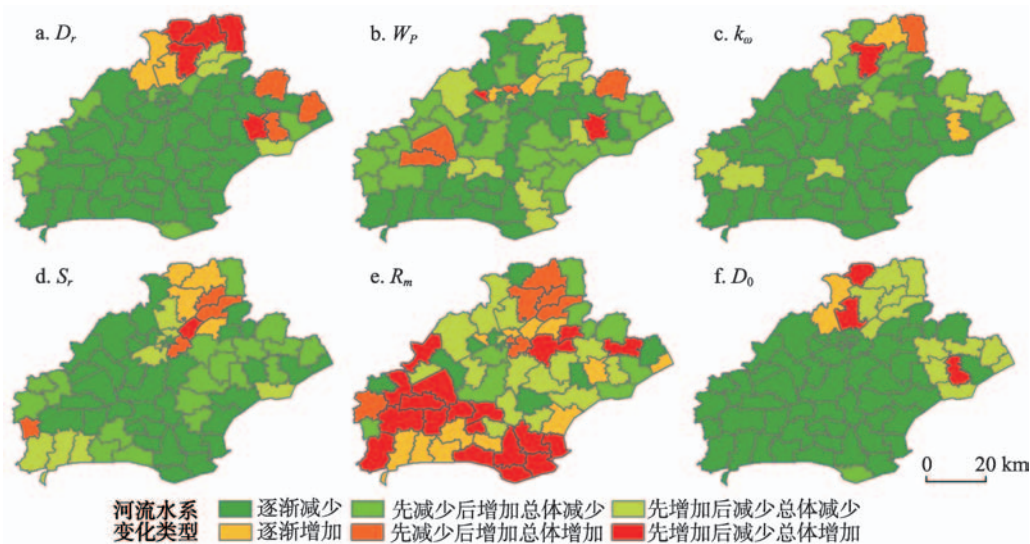


图3 1960s-2010s 嘉兴市河流水系的变化类型及其分布

Fig. 3 Types and distributions of river system changes in Jiaxing from the 1960s to 2010s

表3 嘉兴市不同城市化地区河流水系的变化类型分布

Tab. 3 Distributions of change types of river systems in different urbanization regions in Jiaxing

城区	$D_r(\%)$	$W_r(\%)$	$K_r(\%)$	$S_r(\%)$	$R_m(\%)$	$D_h(\%)$
逐渐减少	81.25	37.5	93.75	56.25	25	93.75
先减后增总体减少	12.5	12.5	0	6.25	6.25	0
先增后减总体减少	0	18.75	6.25	25	12.5	6.25
逐渐增加	0	6.25	0	6.25	31.25	0
先减后增总体增加	0	12.5	0	6.25	12.5	0
先增后减总体增加	6.25	12.5	0	0	12.5	0
近郊	$D_r(\%)$	$W_r(\%)$	$K_r(\%)$	$S_r(\%)$	$R_m(\%)$	$D_h(\%)$
逐渐减少	80.65	35.48	74.19	58.06	9.68	74.19
先减后增总体减少	3.23	35.48	12.90	29.03	9.68	0
先增后减总体减少	6.45	22.58	9.68	6.45	35.48	16.13
逐渐增加	6.45	3.23	3.23	0	9.68	3.23
先减后增总体增加	3.23	3.23	0	3.23	3.23	0
先增后减总体增加	0	0	0	3.23	32.26	6.45
远郊	$D_r(\%)$	$W_r(\%)$	$K_r(\%)$	$S_r(\%)$	$R_m(\%)$	$D_h(\%)$
逐渐减少	48	48	60	32	12	68
先减后增总体减少	24	36	20	36	16	4
先增后减总体减少	4	12	8	12	12	24
逐渐增加	0	0	4	12	16	0
先减后增总体增加	8	4	4	8	16	0
先增后减总体增加	16	0	4	0	28	4

远郊的变化以增加略占优势，近郊的变化以减少略占优势。这可能跟城区的建设用地扩张侵占了部分河道，而远郊的干流不仅被延伸还被大幅拓宽，但近郊的干流受土地限制其长度增加幅度远大于其宽度有关。

3.4 河流水系变化与城市化的关系

河流水系变化是流域地质、地形、气候和人类活动综合作用的结果。在短时间内河流水系的变化主要受到人类活动的影响^[17]。但其不确定因素仍然很多，很难建立一个精确的模型来表达其映射关系。此外，由于河流水系变化具有明显的连续性，而受到数据获取困难和工作量巨大的限制，本研究实际拥有的数据非常有限，难以满足大样本量的要求。为了克服上述不足和局限，本研究运用灰色关联分析方法^[29-30]计算城市化水平与水系特征指标变化之间的关联度，其中灰色关联分析分辨率的取值为0.5。对2014年嘉兴市TM遥感影像进行解译，并根据同期各乡镇（街道）的人口和经济统计资料，可计算得出各乡镇的人口、经济 and 空间城市化水平。在此基础上，结合1960s-2010s各乡镇的各类水系指标变化率，计算出河流水系变化与城市化水平的灰色关联度（表4）。

表4中所有的灰色关联度均为正值且大于灰色关联分析的分辨系数0.5，说明河流水系的变化受到城市化的显著影响，且城市化水平越高的地区河流水系的变化越剧烈。总体看来，各类水系特征变化的平均关联度由大到小依次为：干流面积长度比>河流曲度>水面率>盒维数>河网密度>河流发育系数。这说明干流面积长度比与河流曲度受到的城市化影响相对较大，而河流发育系数与河网密度受到的城市化影响相对较小。然而，相比干流面积长度比与河流曲度的变化（4.08%~4.78%），近50年来嘉兴市的河流发育系数与河网密度的变化更为显著（28.49%~58.91%）。说明除了城市化等人类活动的影响之外，河流水系的变化还受到气候变化等自然因素的影响。

表4 嘉兴市河流水系变化与城市化水平的灰色关联度

Tab. 4 Grey relational degree between river systems changes and urbanization level in Jiaxing

	D_i	W_p	K_o	S_i	R_m	D_0
人口城市化	0.8291	0.8551	0.8523	0.8298	0.8491	0.8398
经济城市化	0.6526	0.7027	0.6310	0.6872	0.7373	0.7148
空间城市化	0.7001	0.7510	0.6820	0.7943	0.8238	0.6738
平均值	0.7273	0.7696	0.7218	0.7704	0.8034	0.7428

4 结论

- (1) 近50年来, 嘉兴市的河流水系呈现出剧烈衰减的趋势。其中, 河流发育系数、河网密度和水面率分别减少了58.91%、28.49%和14.09%。在城市化不同阶段, 河流水系衰减的程度并不完全一致。其中, 河网密度、水面率和河流曲度在缓慢城市化时期的衰减率高于快速城市化时期, 而河流发育系数、干流面积长度比和盒维数在快速城市化时期的衰减率高于缓慢城市化时期。这大致是由于缓慢城市化时期的水系改造活动是以农田水利工程建设为主, 而快速城市化时期是以缓解洪涝灾害和增加建设用地为主。
- (2) 在城市化不同阶段, 嘉兴市各水系指标变化的空间差异均较大。在整个城市化进程中, 河流发育系数变化的差异最大(4.54%~97.54%), 干流面积长度比变化的差异也很大(0.91%~84.89%), 河网密度和水面率变化的差异相对较大(约0.10%~60.00%), 而盒维数和河流曲度变化的差异相对较小(约0.01%~20.00%)。从空间上看来, 南部水系的变化幅度最大。究其原因, 主要是在不同时期和不同地区, 人类改造水系的目的是不相同, 水系变化之前的特征差距较大, 城市化发展的速度和水利工程建设的力度也不一致。
- (3) 在不同城市化地区, 河流发育系数、盒维数和河网密度的变化类型均是以逐渐减少为主, 但其衰减趋势为城区>近郊>远郊; 水面率和河流曲度也是以减少类型为主, 但水面率的衰减趋势为远郊>近郊>城区, 而河流曲度的衰减趋势为近郊>城区>远郊; 干流面积长度比的变化类型分布比较均匀, 但城区和远郊的变化以增加略占优势, 而近郊的变化以减少略占优势。这可能跟建设用地来源和水系改造方式不同有关。
- (4) 河流水系变化受城市化的影响显著, 城市化水平越高的地区河流水系的变化越剧烈。城市化对干流面积长度比与河流曲度的影响大于其对河流发育系数与河网密度的影响。但实际情况也不完全一致, 说明除了城市化等人类活动的影响之外, 河流水系的变化还可能受到气候变化等自然因素的影响。
- (5) 受到资料限制, 本研究并没有分析水系变化带来的后果, 也没有探讨其应对措施。然而, 随着嘉兴市海绵城市建设试点工作全面启动, 如何优化水系以更好地发挥其调蓄、净化和排泄等功能, 已成为该地区亟待解决的问题。因此, 定量模拟不同水系条件下河流功能的状况, 探讨各种水系特征指标的合理阈值, 还有待进一步深入研究。

参考文献(References)

[1] Elmore A J, Kaushal S S. Disappearing headwaters: Patterns of stream burial due to urbanization. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(6): 308-312.

[2] Dudgeon D. The impacts of human disturbance on stream benthic invertebrates and their drift in North Sulawesi, Indonesia. *Freshwater Biology*, 2006, 51(9): 1710-1729.

[3] Costanza R. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.

[4] Zawiejska J, Wyzga B. Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: Patterns, causes and

- controls. *Geomorphology*, 2010, 117(3): 234-246.
- [5] Junior O C, Guimaraes R, Freitas L, et al. Urbanization impacts upon catchment hydrology and gully development using multi-temporal digital elevation data analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(5): 611-617.
- [6] Deng X, Xu Y, Han L, et al. Impacts of urbanization on river systems in the Taihu Region, China. *Water*, 2015, 7(4): 1340-1358.
- [7] Gregory K J. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 172-191.
- [8] Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, 308(5720): 405-408.
- [9] Sear D A, Newson M D. Environmental change in river channels: A neglected element. Towards geomorphological typologies, standards and monitoring. *Science of the Total Environment*, 2003, 310(1): 17-23.
- [10] Chin A. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 460-487.
- [11] Feng Ping, Feng Yan. Calculation on fractal dimension of river morphology. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(4): 324-330. [冯平, 冯炎. 河流形态特征的分维计算方法. *地理学报*, 1997, 52(4): 324-330.]
- [12] Liu Huaixiang. Morphological feature and distribution of typical river networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(11): 1354-1357. [刘怀湘. 典型河网形态特征与分布. *水利学报*, 2007, 38(11): 1354-1357.]
- [13] Ming Qingzhong, Pan Baotian, Su Huai, et al. Study on the valley & drainage evolution and its effects on environment. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 33(2): 1-10. [明庆忠, 潘保田, 苏怀等. 山区河谷-水系演化及环境效应研究. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(2): 1-10.]
- [14] Yang Kai, Yuan Wen, Zhao Jun, et al. Stream structure characteristics and its urbanization responses to tidal river system. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 557-564. [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.]
- [15] 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, 63(9): 969-980. [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. *地理学报*, 2008, 63(9): 969-980.]
- [16] Yuan Wen, Yang Kai, Tang Min, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 717-724. [袁雯, 杨凯, 唐敏, 等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响. *地理研究*, 2005, 24(5): 717-724.]
- [17] Huang Yilong, Wang Yanglin, Liu Zhenhuan, et al. Stream construction characteristics in rapid urbanization area. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1212-1220. [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. *地理研究*, 2008, 27(5): 1212-1220.]
- [18] Zhou Hongjian, Wang Jing'ai, Yue Yaojie, et al. Assessment of flood hazard based on river network change. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(6): 45-49. [周洪建, 王静爱, 岳耀杰, 等. 基于河网水系变化的水灾危险性评价. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 45-49.]
- [19] Han Changlai, Mao Rui. The structure characteristics and the functional variation of the river systems in Taihu Lake catchment. *Journal of Lake Science*, 1997, 9(4): 300-306. [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.]
- [20] Xu Guanglai, Xu Youpeng, Wang Liuyan. Temporal and spatial changes of river systems in Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain during 1960s-2000s. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 966-974. [徐光来, 许有鹏, 王柳艳. 近50年杭—嘉—湖平原水系时空变化研究. *地理学报*, 2013, 68(7): 966-974.]
- [21] Han Longfei, Xu Youpeng, Yang Liu, et al. Temporal and spatial change of stream structure in Yangtze River Delta and its driving forces during 1960s-2010s. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 819-827. [韩龙飞, 许有鹏, 杨柳, 等. 近50年长三角地区水系时空变化及其驱动机制. *地理学报*, 2015, 70(5): 819-827.]
- [22] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [23] Antrop M. Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and urban planning*, 2004, 67(1): 9-26.
- [24] Xu Youpeng. Impacts of Urbanization of the Yangtze River Delta Region on River System in Basins and Hydrological Processes. Beijing: Science Press, 2012. [许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [25] He Longhua, Zhao Hong. The fractal dimension of river network and its interpretation. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(2): 124-128. [何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义. *地理科学*, 1996, 16(2): 124-128.]
- [26] Wang Jianjun, Wu Zhiqiang. Delimiting the stages of urbanization growth process: A method based on Northam's Theory and Logistic Growth Model. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(2): 177-188. [王建军, 吴志强. 城镇化发展阶

段划分. 地理学报, 2009, 64(2): 177-188.]

- [27] Sadler Richards J. A Review of the Enclosure of Watercourses in Agricultural Landscapes and River Headwater Functions. Sarnia, ON, Fisheries and Oceans Canada. Ref Type: Report, 2004.
- [28] Stammer K L, Yates A G, Bailey R C. Buried streams: Uncovering a potential threat to aquatic ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 114: 37-41.
- [29] Liu Sifeng. *Grey System Theory and Its Application*. 5th ed. Beijing: Science Press, 2010. [刘思峰. 灰色系统理论及其应用. 5 版. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [30] Wong H, Hu B Q, Ip W C, et al. Change-point analysis of hydrological time series using grey relational method. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1): 323-338.

Spatial-temporal changes of river systems in Jiaxing under the background of urbanization

DENG Xiaojun^{1,2}, XU Youpeng¹, HAN Longfei¹, LI Guang¹,
WANG Yuefeng¹, XIANG Jie¹, XU Guanglai^{1,3}

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. School of Environmental Science and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

3. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: Based on the river system data in the 1960s, 1980s and 2010s, the indicator system of quantitative description of river systems change characteristics was established, then the spatial-temporal changes of river systems and its relationship with urbanization in Jiaxing over the past 50 years was analyzed. Results indicated that: (1) Over the past half century, river systems of Jiaxing showed a decline trend. Specifically, the river development coefficient, river density and water surface ratio decreased by 58.91%, 28.94% and 14.09%, respectively. However, the degradation of the river systems varies in different urbanization stages. (2) In the whole urbanization process, the spatial differences of the changes of the river development coefficient and main river area length ratio were extremely large, and the spatial differences of the changes of the river density and water surface ratio were larger, but the spatial differences of the changes of the box dimension and river sinuosity were relatively small. (3) The decline trend of the river development coefficient, box dimension and river density was more significant in the urban area than that in the suburbs and outer suburbs, the decline trend of the water surface ratio was more significant in the outer suburbs than that in the suburbs and urban area, and the decline trend of the river sinuosity was more significant in the suburbs than that in the urban area and outer suburbs, but the spatial change trend of the main river area length ratio was insignificant. (4) The impacts of urbanization on river systems changes were extremely significant, and the changes of river systems were more drastic in higher urbanization level regions, but the impacts of urbanization on main river area length ratio and river sinuosity were larger than that on river development coefficient and river density.

Keywords: river systems; spatial-temporal changes; urbanization; Jiaxing