基于RS和GIS的城市化进程中河道时空演变分析 ——以深圳市布吉河为例

刘泽星, 陈洋波*

(中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275)

摘要:为研究城市化对城市河道的影响, 论文选择处于粤港澳大湾区的典型高度城市化流域布吉河流域为研究区, 基于1988—2015年10期Landsat系列遥感影像、2003—2017年9期Google Earth高分辨率遥感影像、2019年深圳市水系图以及1980年以来的河道整治相关文献, 应用RS和GIS技术, 构建城市河道演变特征参数, 探讨了城市化进程中河道时空格局演变规律。结果表明: ① 1988—2015年布吉河流域土地利用/覆被类型发生剧烈变化, 流域城市化率由24.55%增至61.78%, 城市化总体上表现出“先快后慢”“下游向上游”“河道两岸向周边”的时空发展特征。伴随着城市化的发展, 布吉河整治经历了“整治前一防洪措施—防洪与生态措施—清淤措施”4个阶段。②河道时空格局特征受城市化影响, 人口和GDP的发展对河道时空格局的演变具有驱动作用。不同地点不同城市化进程对城市河道影响不同, 城市化对布吉河干支流河道影响程度存在差异。③整体上, 2003—2017年布吉河地表河道比例、地表河道弯曲系数、河面率分别减少了19.06%、9.63%、1.79%, 各参数与城市化均呈负相关; 河床硬化率增长了6.47%, 与城市化呈正相关。该研究可为中国城市化地区河道保护及防洪减灾提供参考与理论支撑。

关键词: 卫星遥感; 城市化; 土地利用/覆被变化; 河道演变; 布吉河流域

河流水系是城市生存发展的重要因素^[1], 其已成为当前受人类活动影响最为强烈的生态系统^[2]。世界上大约60%的河流因城市化而发生改变^[3], 城市化对河流水体的改造, 包括掩埋、覆盖、排干和重塑, 使城市河流功能发生明显变化^[4-5], 导致城市化地区洪涝频发, 生态环境恶化, 给社会及城市的可持续发展带来重大挑战。

随着城市化的不断推进, 越来越多的学者开始关注城市化对河流水系的影响研究。Napieralski等研究了高度城市化的Rouge River流域, 发现河网数量减少, 河网密度降低, 城市中出现了无地表河道的区域, 并将其定义为“城市河流沙漠”^[6]; 之后发现拥有美国79%的人口的11个大区中城市河流沙漠面积达到研究区面积的6.2%, 且在北加州和五大湖区的大城市最为普遍^[7]。Steele等^[8]对美国100个城市与其周围未开发的土地进行了对比, 发现与未

开发的土地相比, 城市地区的水面率、水体数量和河网密度分别降低了89%、25%和71%。国内相关研究主要集中在长三角地区^[3,9-12]、京津冀地区^[13]、珠三角地区^[14]、江西^[15]、河南^[16]等区域, 研究结果也表明城市化会导致河流数量锐减, 结构趋于简化。以上研究多从较大区域或城市尺度选取传统的形态学指标来分析河网水系的变化, 而受基础研究数据的限制, 定量反映城市化进程下河道时空格局演变特征的研究较少。

粤港澳大湾区城市化起步较早, 城市化程度高, 处于大湾区核心地带的深圳市, 城市化速度十分迅猛, 城市化率居全国之冠^[17]。近几十年来城市化进程高速发展, 区域内土地利用/覆被类型剧烈变化, 河道遭受数次整治, 亟需定量探讨城市化对城市河流系统的影响。同时, 当前遥感数据集已经成为识别河网形态、了解河道时空行为的强有力资

收稿日期: 2020-07-08; 修订日期: 2020-10-09。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502702)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1502702.]

第一作者简介: 刘泽星(1992—), 男, 硕士生, 从事水文水资源研究。E-mail: liuzx39@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介: 陈洋波(1964—), 男, 教授, 博士, 从事水文水资源研究。E-mail: eescyb@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 刘泽星, 陈洋波. 基于RS和GIS的城市化进程中河道时空演变分析: 以深圳市布吉河为例[J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 693-702. [Liu Zexing, Chen Yangbo. Spatiotemporal change of urban river in urbanization process based on remote sensing and GIS: A case study of the Buji River in Shenzhen City. Progress in Geography, 2021, 40(4): 693-702.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.013

源^[18-20]。故本文选择流经深圳市中心城区的高度城市化流域——布吉河流域为研究区,针对布吉河流域的典型性,采用人工目视解译方法,基于RS和GIS技术,定量分析不同城市化阶段河道时空格局演变规律,为中国城市化地区河道保护及防洪减灾提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

布吉河发源于深圳市布吉北部,上游有水径、塘径、大芬3条支流,在牛岭下汇合成布吉河干流,上游位于龙岗区,下游位于罗湖区和福田区,在罗湖商业区汇入深圳河,流域面积60.75 km²,河流长度为50.78 km(图1)。深圳市多年平均气温23.0℃,年降水量平均为1935.8 mm,全年86%的雨量出现在汛期(4—9月)。1988年以来,布吉河流域经历了剧烈的城市化进程,剧烈的人类活动对布吉河产生了较为深刻的影响。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 土地利用数据

本文土地利用数据摘录自Dou等^[21]基于Landsat系列遥感影像解译的1988—2015年的深圳市土地利用数据。Dou等采用从美国地质勘探局

(USGS, <http://glovis.usgs.gov/>)下载的1988—2015年间的Landsat系列遥感影像,对Landsat影像进行特征增强后,基于C4.5决策树的AdaBoost分类方法对遥感影像进行了自动分类,并采用人机交互的方式对结果进行了纠正等后处理,制备了深圳市1988—2015年共11期的土地利用数据,平均每3 a一期,土地利用类型分成林地、草地、耕地、建成区、水体和裸地6种,总体分类精度达到90.04%,Kappa系数为0.89^[21]。

1.2.2 河道整治工程

本文以地方志、水利志、水务志、相关文献及报道为依据^[22-29],搜集整理了布吉河历史河道整治工程,其工程名称、起始时间、工程位置及主要内容如表1所示,可见布吉河的河道整治工作基本上始于城镇化刚刚起步的20世纪80年代,至2020年,布吉河共经历了10次不同程度的河道整治。

1.2.3 河道水系数据

河道水系数据包括:①根据深圳市水文分局提供的深圳市1:13500水系图,通过数字化将地图转换为数字矢量形式,制备布吉河流域数字水系图(图1);②对获得的高分辨率Google Earth遥感影像进行空间校正、多时相影像配准等处理,采用人工目视解译方法对处理后的Google Earth遥感影像进行河道提取,并与深圳市1:13500水系图进行对比修正等后处理,制备了布吉河不同年份的地表河道图(以河道两岸堤防为界限,采用双线表示)。以制备的布吉河数字水系图为基础,综合不同年份的布吉河地表河道图(图2),分析布吉河河道的时空格局演变特征。各期Google Earth遥感影像的详细信息如表2所示。

1.3 城市河道演变特征参数

鉴于传统的河网形态学指标无法真实反映城市化对城市河流的影响,本文参考河网结构研究相关文献^[3,9-16,30],综合城市化及河流演变特点,构建城市河道演变特征参数,对各城市化阶段河道时空格局演变特征进行定量感知,包括地表河道比例、地表河道弯曲系数、河床硬化率、河面率4个参数。

计算公式如下:

$$R_s = (L_s / L) \times 100\% \quad (1)$$

$$S_{ka} = L_s / I_s \quad (2)$$

$$R_h = (L_h / L) \times 100\% \quad (3)$$

$$R_p = (A_r / A) \times 100\% \quad (4)$$

图1 布吉河流域示意图

Fig.1 Location and surface water system of the study area

表1 1980—2020年布吉河河道整治工程汇总
Tab.1 Improvement projects of the Buji River, 1980–2020

序号	工程名称	开始年份	结束年份	工程位置	具体河段	工程内容
1	深圳河及布吉河治理	1980	1985	下游	笋岗滞洪区、笋岗滞洪区泄洪闸至蔡屋围	滞洪区建设；河道截弯取直、拓宽
2	笋岗泄洪区及排沙道建设及整改	1981	1991	下游	笋岗泄洪区	泄洪区及排沙道建设及整改
3	布吉河河段整治	1987	—	下游	草埔铁路桥至笋岗滞洪区	—
4	布吉河蔡屋围水闸拆除工程	1993	—	下游	蔡屋围	拆除水闸、拓宽河段
5	布吉河下游清淤工程	1993	1996	下游	草埔北桥至笋岗泄洪闸段	河道截弯取直
6	罗湖小区治涝工程	1995	—	下游	河口	建设泵站、挡潮闸、河口堤防
7	布吉河(龙岗段)综合整治工程	2006	2006	上游	龙岗区河段	河堤修复、治理沿河污染源
8	布吉河(特区内)水环境综合整治工程	2009	2016	下游	罗湖区河段	水质改善、防洪、生态、景观等，综合治理
9	布吉河(龙岗段)“EPC+O”项目	2017	2021	上游	龙岗区河段	河道防洪、水质改善及水生态修复
10	布吉河泥岗桥至河口段(罗湖段)清淤工程	2018	2018	下游	罗湖区河段	河道清淤

图2 不同年份布吉河地表河道
Fig.2 Surface channel of the Buji River in different years

式中： R_s 为地表河道比例，表示城市河流被覆盖变为地下河(暗渠)的程度； L 为河流长度(m)； L_s 为地表河道长度(m)； S_{ka} 为地表河道弯曲系数，表示城市河流被截弯取直的程度； I_s 为地表河道直线长度(m)； R_h 为河床硬化率，表征城市河道表面覆盖物变化程度； L_h 为河床硬化河段包括地下河(暗渠)河段及地表河床硬化河段长度(m)； R_p 为河面率，表示城市河道断面变化程度； A_r 为河道两岸堤防之间的河道面积(m^2)； A 为流域总面积(m^2)。

2 结果与分析

2.1 城市化进程

近30 a来，迅猛的城市化进程导致布吉河流域土地利用/覆被类型发生剧烈变化(图3)，本文以城市建成区面积来衡量城市化发展水平。考虑到原深圳特区范围不包括流域上游的龙岗区，导致研究区内土地利用/覆被类型空间差异较大，故将研究区以罗湖区和龙岗区行政分界线划分为上下游，进一

表2 Google Earth 遥感影像
Tab.2 Google Earth remote sensing images
used in this study

序号	级别	日期	分辨率/m
1	18	2003-02-17	0.55
2	19	2010-04-30	0.28
3	19	2011-80-31	0.28
4	19	2012-11-06	0.28
5	19	2013-11-01	0.28
6	19	2014-11-17	0.28
7	19	2015-04-14	0.28
8	19	2016-07-29	0.28
9	19	2017-02-18	0.28

步分析布吉河流域城市化发展情况。如表3所示, 1988—2015年上下游地区城市建成区面积总体上均处于增长趋势, 其中上游区域增长速度更快, 增幅更大。1988—1993年主要是上游的建成区在原有基础上向周边略有扩展; 1993—1999年各区建成区面积增长较多, 上游由5.27 km²增至13.35 km², 下游由12.33 km²增至17.08 km², 建成区在向周边扩展的同时, 沿布吉河河道向上游发展, 且发展力度更大; 1999—2015年建成区面积增速放缓, 上游地区建成区占用河道两侧耕地后, 继续向周边拓

展, 面积增长了6.38 km², 下游地区由于自身城市化程度较高, 建成区面积波动发展, 16 a间仅增长了0.72 km²。

布吉河流域城市化进程总体上表现出“先快后慢”“下游向上游”“河道两岸向周边”的时空发展特征。图4为1988—2015年布吉河流域城市化率变化情况。1988年下游地区城市化率较高(39.72%), 上游地区城市化率仅有9.38%。1993—1999年期间上下游地区城市化高速发展, 上游地区城市化进展更为迅猛, 城市化率年均增加4.44%。1999年进入后城市化阶段, 城市化主要靠上游地区带动。2005年之前上游地区城市化推进仍较快, 之后发展速度放缓; 下游地区城市化程度已经很高, 城市化进程波动发展, 至2015年流域整体城市化率达到61.78%。

2.2 河道整治工程特征

根据布吉河河道整治工程内容, 河道整治可分为3类: 第一类以提高河道行洪能力为主的防洪工程, 如河道截弯取直、河道拓宽等; 第二类为以治理污染源、提升水质为目的的生态措施; 第三类为以维护为主的清淤措施。

布吉河流域河道整治工程具有典型特征, 随着城市化发展, 河道整治可划分为4个阶段: ① 当城

图3 1988—2015年布吉河流域土地利用/覆被类型

Fig.3 Land use/land cover of the Buji River Basin, 1988–2015

表3 不同时期布吉河流域建成区面积

Tab.3 Built-up area of the Buji River Basin in different years										(km ²)
地区	1988年	1993年	1996年	1999年	2001年	2005年	2008年	2011年	2013年	2015年
上游地区	2.85	5.27	9.28	13.35	14.06	17.01	17.14	17.84	19.13	19.73
下游地区	12.06	12.33	15.43	17.08	16.15	15.03	16.07	16.79	17.86	17.80
总计	14.91	17.60	24.71	30.44	30.21	32.04	33.21	34.63	36.99	37.53

图4 不同时期内各区域城市化率

Fig.4 Urbanization rate of different regions in different years

市化水平较低时,主要任务是推进城市化,未涉及河道整治;② 在城市化快速推进阶段,河道整治以防洪工程为主;③ 在后城市化阶段,河道整治兼顾防洪工程措施和生态景观措施;④ 随着防洪、生态措施基本完善,河道整治转向以维护为主的清淤措施,即“整治前—防洪措施—防洪与生态措施—清淤措施”4个阶段。

2.3 河道水系时空格局演变

随着城市化发展,2003—2017年,布吉河部分河段被掩埋而消失或被覆盖变为地下河(暗渠),河床硬化及河道断面发生改变(图5),且河道变化表现出一定的阶段性,结合 Google Earth 历史影像时期,本文选出2003、2010、2017年布吉河地表水系图对河道水系时空格局演变特征进行分析。

(1) 总体特征

2003—2017年布吉河受城市化发展影响,地表河段空间分布趋于破碎,2003—2010年趋势最为明显(图5)。如表4所示,2003—2017年间地表河道比例和弯曲系数均处于减少趋势,其中地表河道比例变化最为剧烈,累计减少19.06%;河床硬化率处于持续增长态势,2003—2017年增长6.47%;河面率在2010—2017年减少1.79%,2003—2010年无变化,其余参数均在2003—2010年期间变化最剧烈。整体上,城市化进程中布吉河地表河道呈现逐渐减少、破碎、顺直的趋势,河床趋于硬化,河道宽度略有收缩。

图5 2003—2017年布吉河河道变化位置示意图

Fig.5 Change of the Buji River, 2003-2017

(2) 分区特征

为探讨不同城市化历程中河道时空格局演变规律,进一步对布吉河流域内上、下游地区的河道演变特征进行分析。地表河道比例方面(图6a),上游地区比例较大,在40.65%~54.88%之间,地表河道覆盖程度较低。从时期上看,2003—2010年地表河道比例均减少,其中上游地区变化较剧烈,相对减少22.28%,下游地区略减少0.65%;2010年后上游地区地表河道继续衰退,但程度减轻,至2017年减少4.69%,下游地区比例未发生变化。城市化的发展导致地表河道趋于减少。

如图6b所示,相对于下游地区,上游地表河道弯曲系数同样较大,河道蜿蜒性较好,但变化较剧烈,2003年为1.42,到2017年降至1.29,下降了9.15%,其中2003—2010年减幅较大,为7.04%。下游地区河道弯曲系数由2003年的1.09均速降至2017年的1.07。随着城市化推进,上下游地区地表河道趋于顺直,蜿蜒性降低。

表4 布吉河流域河道演变特征

Tab.4 Characteristics of river channel change in the Buji River Basin

特征参数	2003年	2010年	2017年	变化幅度/%		
				2003—2010年	2010—2017年	2003—2017年
地表河道比例/%	41.29	34.22	33.42	-17.12	-2.34	-19.06
地表河道弯曲系数	1.35	1.24	1.22	-8.15	-1.61	-9.63
河床硬化率/%	86.84	91.72	92.46	5.62	0.81	6.47
河面率/%	0.56	0.56	0.55	0	-1.79	-1.79

图6 布吉河流域各区河道演变特征

Fig.6 Characteristics of river channel change in different regions of the Buji River Basin

对于河床硬化率而言(图6c),下游地区高于上游,下游河道自2003年起就全部硬化,至2017年一直维持在100%。上游地区河床硬化率持续增长,由2003年的76.14%升至2017年的86.42%,增长了13.50%,其中2003—2010年增幅最大,为11.01%。城市化河道河床硬化率较高,并且随着城市化发展呈增长趋势。

河面率方面,为去除地表河道变为地下河(暗渠)带来的影响,只计算至2017年一直为地表河流河段的河面率。如图6d所示,上下游地区河面率均较小,相对于上游地区,下游河面率较大,河道断面较宽,行洪能力较强。2003—2010年间仅上游地区河面率略增加2.86%,2010年后上下游河面率均减小,上游地区衰减至2003年水平,下游地区略减少

1.32%。整体上来说,后城市化阶段河面率已处于较低水平,河道断面形态相对稳定。

(3) 分级特征

已有研究表明,城市化对流域内不同等级河流影响程度存在较大差异^[11-12]。为评估城市化对布吉河不同等级河道的影响,本文进一步对布吉河干流河道和支流河道的时空演变特征进行分析,支流河段包括上游的水径、塘径和大芬水及其他支流,其余为干流河段。如图7a所示,相对于支流河段,干流地表河道比例较高,在66.34%~83.29%之间。从时期上看,2003—2010年地表河道均减少,其中支流河道变化较剧烈,相对减少18.61%,降至34.22%;2010年后支流地表河道比例已经很低,变化不大,干流地表河道继续衰退,但程度减轻,至

图7 布吉河各级河道演变特征

Fig.7 Characteristics of river channel change at different orders of the Buji River

2017年相对减少6.81%。可见,城市化河流支流地表河道比例较小,且地表河道衰退程度较严重,并在衰退至一定程度后逐渐趋于稳定。

地表河道弯曲系数方面(图7b),支流河道高于干流河道,河道蜿蜒性较好。时期变化与地表河道比例相似,2003—2010年地表河道弯曲系数均减少,支流变化较剧烈,相对减少5.23%,降至1.30;2010年后支流地表河道弯曲系数保持稳定,干流持续减小,至2017年相对减少3.97%。城市化的发展导致干支流地表河道趋于顺直,干流河道由于防洪压力大,地表河道顺直趋势更为明显。

如图7c所示,干流河道河床硬化率高于支流河道,并在2003年就达到95.71%,2010年增至100%,至2017年一直保持稳定。支流河道河床硬化率2003—2017年持续增长,2017年增至91%,其中2003—2010年增幅最大,为5.89%。河床硬化可提高河道行洪能力,干流河道中河床硬化较早,且硬化程度较高。

对于河面率而言(图7d),干支流河道河面率均较小,相对于支流河道,干流河面率较大,河道断面较宽,行洪能力较强。2003—2010年干流河道河面率略减少0.94%,支流河面率增长3.16%;2010年后,干、支流河面均减小,分别相对减少1.19%和1.17%。如前所述,后城市化阶段干支流河道断面形态相对稳定。

2.4 城市化对河道时空格局的影响

近几十年来,布吉河流域所在的深圳市经历了剧烈的城市化进程。根据《深圳市统计年鉴》,2018年深圳市的GDP和人口分别为1979年的12344倍和41倍,其中1979—1995年深圳市GDP年均增长率在20%以上,人口年均增长率在10%以上。由于前期GDP和人口迅猛发展,城市化进程飞速推进,土地利用/覆盖类型发生了巨大变化,大量城市河道生存空间被侵占,直接消失或变为地下河(暗渠),导致流域调蓄能力下降,产生了一系列的城市洪涝问题。Shi等^[31]研究发现,布吉河流域在1980—2000年间径流历时明显缩短,洪水位显著提高,洪峰流量平均增加了12.9%。为了解决这一问题,保障城市社会、人口和经济安全,人们采用拓宽河道、截弯取直等防洪措施对河道进行整治,以期提高河道行洪能力。随着人口和GDP增速放缓,土地利用/覆盖类型趋于稳定,河道整治开始注重生态修复措施,河道生态功能逐渐恢复,城市河流与城市化发

展逐渐相互适应。可见,人口和GDP的发展影响着城市化的进程以及人类整治河道的目标,对河道时空格局的演变具有驱动作用。

总体来看,城市化的不断发展导致布吉河地表河道逐渐减少,空间分布趋于破碎,形态呈顺直趋势,地下河(暗渠)比例不断上升,河床硬化程度越来越高。

上下游地区因城市化进程不同河道变化程度不一。上游地区城市化起步较晚,但发展迅猛,城市化对布吉河的影响也更为剧烈,1988—2015年上游地区城市化率年均增加2.06%,2003—2017年城市化率平均每增加1%,地表河道比例减少0.50%,河床硬化率增加0.35%。下游地区城市化进程起步较早,1988—2015年城市化波动发展,年均增加0.7%,早期的城市化进程导致下游地区地表河道比例较低,河道几乎呈直线状态,河床硬化率较高。相对上游地区,2003—2017年城市化对布吉河下游的影响较小,地表河道比例年均减少0.01%。

城市化对布吉河流域内干支流河道影响程度存在差异。城市化的发展导致布吉河干支流的地表河道趋于减少,但支流地表河道衰退程度更为严重。城市进程中干支流地表河道趋于顺直,河床趋于硬化,但干流河道由于行洪任务重、防洪压力大,地表河道顺直趋势更为明显,河床硬化时期较早且程度更高。

城市化发展到一定阶段,城市水文效应愈加明显,人类采用防洪措施对河道进行整治,以提高河道行洪能力。后城市化阶段,随着城市化进程放缓,防洪、生态措施逐渐完善,河道整治转向以维护为主的清淤措施,河道断面形态较稳定。城市化发展的速度对河道时空格局也产生一定影响,城市化发展快的时期河道变化较剧烈,地表河道减少较多,空间形态愈加破碎、顺直,硬化河床增长较快。

3 结论与讨论

本文以处于粤港澳大湾区的典型高度城市化流域布吉河流域为例,重点探讨了城市进程中河道时空格局演变规律。研究表明:

(1) 1988—2015年布吉河流域城市化进程迅猛,土地利用/覆被类型发生剧烈变化,流域城市化率由24.55%增至61.78%,城市化总体上表现出“先快后慢”“下游向上游”“河道两岸向周边”的时空发

展特征。伴随着城市化的发展,布吉河河道整治经历了“整治前—防洪措施—防洪与生态措施—清淤措施”4个阶段。

(2) 河道时空格局特征受城市化影响,人口和GDP的发展对河道时空格局的演变具有驱动作用。随着城市化的发展,地表河道逐渐减少,空间形态趋于破碎、顺直,地下河(暗渠)比例不断上升,河床硬化程度越来越高。城市化发展早的地区或发展速度快的时期,河道变化较剧烈,地表河道减少较多,且破碎、顺直趋势较明显,硬化河床增长较快。城市化对干支流河道影响程度存在差异,支流地表河道衰退较为严重,干流地表河道顺直趋势更为明显,河床硬化时期较早且程度更高。

(3) 整体上,城市河流地表河道比例、地表河道弯曲系数、河面率与城市化均呈负相关,河床硬化率与城市化呈正相关。

理解城市化发展对城市河流的影响,对于统筹规划城市发展与水资源管理和水灾害防御具有重要意义。相对于国外,近几十年来中国城市化快速崛起,特别是粤港澳大湾区、京津冀都市圈、长三角等区域城市化高度发展,亟需开展城市化对城市河流的影响评估等一系列的城市水文课题的研究。当前探究城市化进程中城市河道演变规律的研究不多,主要是因为城市下垫面异常复杂,长时间序列的、具有一定精确的河道数据难以获得,详细的河道整治工程资料难以收集。借助各类型的卫星遥感数据和RS/GIS技术,尽管数据时间序列相对不长,本文的方法和结论对于相关问题的研究和理解仍具有一定的意义。在今后的工作中,还需要进一步研究构建更科学的城市河道演变特征参数,运用水文水动力模型对城市河道变化引起的洪水效应进行模拟和预测。

参考文献(References)

- [1] 王雪,田涛,杨建英,等.城市河道生态治理综述[J].中国水土保持科学,2008,6(5): 106-111. [Wang Xue, Tian Tao, Yang Jianying, et al. Summary on ecological treatment of urban river. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(5): 106-111.]
- [2] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. Science, 2005, 308: 405-408.
- [3] Yang L, Xu Y P, Han L F, et al. River networks system changes and its impact on storage and flood control capacity under rapid urbanization [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(13): 2401-2412.
- [4] Steele M K, Heffernan J B. Morphological characteristics of urban water bodies: Mechanisms of change and implications for ecosystem function [J]. Ecological Applications, 2014, 24(5): 1070-1084.
- [5] Chin A. Urban transformation of river landscapes in a global context [J]. Geomorphology, 2006, 79: 460-487.
- [6] Napieralski J, Keeling R, Dziekan M, et al. Urban stream deserts as a consequence of excess stream burial in urban watersheds [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2015, 105(4): 649-664.
- [7] Napieralski J A, Carvalhaes T. Urban stream deserts: Mapping a legacy of urbanization in the United States [J]. Applied Geography, 2016, 67: 129-139.
- [8] Steele M K, Heffernan J B, Bettez N, et al. Convergent surface water distributions in US cities [J]. Ecosystems, 2014, 17(4): 685-697.
- [9] Lin Z X, Xu Y P, Dai X Y, et al. Changes in the plain river system and its hydrological characteristics under urbanization: Case study of Suzhou City, China [J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(16): 2068-2079.
- [10] Deng X J, Xu Y P. Degrading flood regulation function of river systems in the urbanization process [J]. Science of the Total Environment, 2018, 622/623: 1379-1390.
- [11] 林芷欣,许有鹏,代晓颖,等.城市化对平原河网水系结构及功能的影响:以苏州市为例[J].湖泊科学,2018,30(6): 1722-1731. [Lin Zhixin, Xu Youpeng, Dai Xiaoying, et al. Effect of urbanization on the river network structure and functions: A case study in Suzhou City. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1722-1731.]
- [12] 吴雷,许有鹏,徐羽,等.平原水网地区快速城市化对河流水系的影响[J].地理学报,2018,73(1): 104-114. [Wu Lei, Xu Youpeng, Xu Yu, et al. Impact of rapid urbanization on river system in a river network plain. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 104-114.]
- [13] 张凤,陈彦光,刘鹏.京津冀城镇体系与水系结构的时空关系研究[J].地理科学进展,2020,39(3): 377-388. [Zhang Feng, Chen Yanguang, Liu Peng. Spatiotemporal relationships between urban system and water system in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Progress in Geography, 2020, 39(3): 377-388.]
- [14] 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 Yilong, Wang Yanglin, Liu Zhenhuan, et al. Stream construction characteristics in rapid urbanization area: Shenzhen City as a case. Geographical Research, 2008, 27(5): 1212-1220.]
- [15] 傅春,李云翊,王世涛.城市化进程下南昌市城区水系

- 格局与连通性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(7): 1042-1048. [Fu Chun, Li Yunyi, Wang Shitao. Analysis of water system structure and connectivity in the center of Nanchang under the urbanization process. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(7): 1042-1048.]
- [16] 郭科, 王鸿翔, 郭文献, 等. 郑州市水系结构特征演变趋势分析[J]. 河南科技, 2018(5): 80-83. [Guo Ke, Wang Hongxiang, Guo Wenxian, et al. Analysis on evolution trend characteristics of river system in Zhengzhou City. Henan Science and Technology, 2018(5): 80-83.]
- [17] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于“功能节点—关键廊道”的市生态安全格局构建: 以深圳市为例[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1663-1671. [Wu Jiansheng, Ma Hongkui, Peng Jian. Improving urban ecological security pattern based on functional nodes- key corridors: A case study of Shenzhen City. Progress in Geography, 2018, 37(12): 1663-1671.]
- [18] Langat P K, Kumar L, Koech R, et al. Characterisation of channel morphological pattern changes and flood corridor dynamics of the tropical Tana River fluvial systems, Kenya [J]. Journal of African Earth Sciences, 2020, 163: 103748. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103748.
- [19] 廖小罕. 地理科学发展与新技术应用[J]. 地理科学进展, 2020, 39(5): 709-715. [Liao Xiaohan. Advance of geographic sciences and new technology applications. Progress in Geography, 2020, 39(5): 709-715.]
- [20] 史卓琳, 黄昌. 河流水情要素遥感研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 670-684. [Shi Zhuolin, Huang Chang. Recent advances in remote sensing of river characteristics. Progress in Geography, 2020, 39(4): 670-684.]
- [21] Dou P, Chen Y B. Dynamic monitoring of land-use/land-cover change and urban expansion in Shenzhen using Landsat imagery from 1988 to 2015 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(19): 5388-5407.
- [22] 王若兵. 深圳市水利志[M]. 广州: 广东科技出版社, 1990. [Wang Ruobing. Water conservancy of Shenzhen. Guangzhou, China: Guangdong Science and Technology Press, 1990.]
- [23] 王若兵. 深圳市水务志[M]. 深圳: 海天出版社, 2001. [Wang Ruobing. Shenzhen water affairs. Shenzhen, China: Haitian Press, 2001.]
- [24] 贾保安. 深圳市罗湖区志[M]. 北京: 方志出版社, 2013. [Jia Baoan. Records of Luohu District, Shenzhen. Beijing, China: Fangzhi Press, 2013.]
- [25] 应恩宇, 付涛, 张纯权. 深圳城市河道综合整治工程水土流失及防治研究: 以布吉河(龙岗段)河道综合整治工程为例[J]. 南昌工程学院学报, 2017, 36(6): 52-56. [Ying Enyu, Fu Tao, Zhang Chunquan. Study on soil and water erosion and its prevention in Shenzhen Urban River Comprehensive Improvement Project: Taking comprehensive rehabilitation project of Buji River (Longgang Section) as example. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2017, 36(6): 52-56.]
- [26] 谢能标. 布吉河泥岗桥至河口段清淤工程施工难点与应对措施[J]. 中国水运, 2018, 18(12): 171-172. [Xie Nengbiao. Construction difficulties and countermeasures of dredging project from Nigang Bridge to estuary of Buji River. China Water Transport, 2018, 18(12): 171-172.]
- [27] 毕国学. 龙岗区众志成城“铁腕治污”[N/OL]. 深圳商报, 2006-09-26 [2020-05-08]. <http://news.sina.com.cn/o/2006-09-26/001210108271s.shtml>. [Bi Guoxue. Longgang District united as one "Iron fist to control pollution". Shenzhen Business Daily, 2006-09-26 [2020-05-08]. <http://news.sina.com.cn/o/2006-09-26/001210108271s.shtml>.]
- [28] 夏凡. 深圳布吉河(龙岗段)2018年底前完成综合整治[N/OL]. 深圳晚报, 2017-10-25 [2020-05-08]. <http://sz.people.com.cn/n2/2017/1025/c202846-30855709.html>. [Xia Fan. Shenzhen Buji River (Longgang section) to be completed by the end of 2018. Shenzhen Evening News, 2017-10-25 [2020-05-08]. <http://sz.people.com.cn/n2/2017/1025/c202846-30855709.html>.]
- [29] 深圳市(特区内)水环境综合整治工程(第二阶段)[N/OL]. 深圳新闻网, 2018-10-20 [2020-05-08]. <http://mini.eastday.com/a/181020080318883.html>. [Shenzhen Buji River (within the special zone) water environment comprehensive improvement project (phase II). Shenzhen News, 2018-10-20 [2020-05-08]. <http://mini.eastday.com/a/181020080318883.html>.]
- [30] 黄静. 城市水景观体系规划研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013. [Huang Jing. Theoretical study on the urban landscape river system planning. Nanjing, China: Nanjing Forestry University, 2013.]
- [31] Shi P J, Yuan Y, Zheng J, et al. The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China [J]. Catena, 2007, 69(1): 31-35.

Spatiotemporal change of urban river in urbanization process based on remote sensing and GIS: A case study of the Buji River in Shenzhen City

LIU Zexing, CHEN Yangbo*

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: To reveal the impact of urbanization on urban river systems, the Buji River Basin, a typical highly urbanized watershed in the Guangdong, Hong Kong and Macao Bay Area, was selected as the study area. Based on Landsat satellite images from 1988 to 2015, Google Earth high-resolution images from 2003 to 2017, the river system data in 2019, as well as literature on the river improvement projects of Shenzhen City since 1980, the characteristic indices of river channel change were constructed to evaluate the spatial and temporal evolution of the river in the process of urbanization using remote sensing data and GIS technology. The study shows that: 1) From 1988 to 2015, the land use/land cover types of the Buji River Basin changed dramatically, and the urbanization rate increased from 24.55% to 61.78%. Generally, the urbanization showed the spatial and temporal characteristics of "fast first, then slowed", "spreading from downstream to upstream", and "developing along the river then towards the periphery". With the development of urbanization, the improvement of the Buji River has gone through four stages: pre-improvement, flood control measures, flood control and ecological restoration measures, and dredging measures. 2) The spatial and temporal evolution of the river was affected by urbanization. The increase of population and GDP has a driving effect on the river channel change. Different urbanization processes in different places have had different impacts on the river system, and urbanization has had different impacts on the main stream and tributaries of the Buji River. 3) On the whole, from 2003 to 2017, the proportion of surface channel, bending coefficient of surface channel, and river surface rate of the Buji River decreased by 19.06%, 9.63%, and 1.79%, respectively, which were negatively correlated with urbanization level. The river bed hardening rate was positively correlated with urbanization level, with an increase of 6.47%. This study provides a reference and theoretical support for river improvement and flood control and disaster reduction in urbanized areas of China.

Keywords: satellite remote sensing; urbanization; land use/land cover change; river channel change; Buji River Basin