

基于空间自回归和地理加权回归模型的佛山市中心城区河网水系演变驱动分析

胡家昱¹, 刘丙军^{1,2,3}

(1.中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2.华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275; 3.广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州 510275)

摘要:为定量探究城市河流变化驱动成因,以2005~2010年佛山市中心城区为例,分析了河网水系演变及其驱动因子,根据河网水系变化与其驱动因子间一对多的映射关系,借助空间自回归和地理加权回归模型,分别从整体和局部分析了两者间的统计关系,结果表明:(1)末级河流长度减少量占各级河流总变化量约92.3%,变化最为显著,而城镇用地对水田、工业用地对水域的侵占以及农业活动则是影响末级河流的主要驱动因子;(2)整体来看,末级河流受建设用地扩张,尤其是工业用地扩张的负面影响程度最大;局部来看,各驱动因子的负面影响程度在不同空间位置上存在差异,以水田-城镇用地因子为例,其在罗村、老城区和桂城的交界区域以及南庄、罗村和老城区的交界区域负面影响程度较大;(3)空间自回归模型对区域河网水系变化与其驱动因子间的关系有整体、直观的把握,地理加权回归模型则能够描述驱动因子影响的空间非平稳性,有利于获取局部信息,结合两种模型的特点能够更加全面地刻画河网水系演变的驱动成因。

关键词:驱动分析;河网水系演变;空间自回归模型;地理加权回归模型;末级河流

中图分类号:P344

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)02-0007-07

1 引言

河网水系是生态系统的重要组成部分,是水资源形成与演化的主要载体,是社会经济发展的重要支撑^[1]。近几十年来,以城市化为代表的高强度人类活动使河网的形态、数量显著改变,水系结构普遍呈现由复杂到简单的变化趋势^[2]。研究表明,城市化已使全球60%的河流水系形态参数发生适应性变化^[3]。随着中国城市化的不断发展,建设用地规模剧烈扩张,“与水争地”矛盾日益凸显。河网水系迅速消亡,导致河流系统的调蓄、纳污功能也随之发生改变,洪涝灾害与水环境问题频繁出现,严重制约着社会的可持续发展^[4]。因此,研究城市化对河网水系的影响,已成为社会关注的重点问题。

国外关于城市化对河网水系的影响研究始于

1960s,早期研究发现城市化通过改变水文过程使河道宽深度扩大、断面面积增加^[5],对较小河流的填埋、管道化改造使河网密度急剧减少^[6]。近期国外对城市化下的河流演变模式进行了大量研究,Stammler等^[7]研究了加拿大安大略省西南部河流在不同景观特征下的填埋程度,Julian等^[8]总结了Lake Thunderbird流域内与各种土地利用变化相关联的河流损失时空模式。国内相关研究则起步较晚,始于20世纪末期,起初大多是对流域天然河流的结构特征演变情况进行讨论^[9-10],近年来出于防洪减灾和水生态环境保护等目的也开始对城市河网水系演变规律进行研究,且主要集中在长三角^[11]和珠三角^[12]等经济发达的城市群平原河网地区。总体而言,国内学者通过构建水系结构和连通性评价体系,在城市水系的时空演变规律研究方面陆续取得了显著成果,为区域防洪减灾等工作提供了重

收稿日期:2017-11-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405905,2016YFC0401305);国家自然科学基金项目(91547108,91547202);水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金项目([2017]KJ07);高校基本科研业务费中山大学青年教师重点培育项目

作者简介:胡家昱(1995-),男,广东揭阳人,硕士研究生,主要从事河口动力学研究。E-mail: hujy36@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:刘丙军(1976-),男,湖南益阳人,教授,博士,从事水资源系统分析研究。E-mail: liubj@mail.sysu.edu.cn

要理论依据,但在揭示城市化与河网水系演变间的驱动响应方面仍需进一步加强。目前为止,专门针对河网水系演变驱动成因的定量化研究较少,有关研究多是基于图像叠加分析的定性探究^[13-14],有必要对河网水系演变与其驱动因子间的关系作进一步探讨。

河网水系演变与驱动因子间存在着一对多的映射关系,可以通过多变量回归分析两者之间的统计关系,找出河网水系变化的驱动成因。基于此,本文以佛山市中心城区为例,结合区域河网水系演变特点,借助空间自回归模型和地理加权回归模型,从整体和局部的角度探究河流变化与其驱动因子的统计关系,并为定量探究河流变化驱动成因提供一种参考途径。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

佛山市位于广东省中南部,全境介于 $22^{\circ}38'N \sim 23^{\circ}34'N$, $112^{\circ}22'E \sim 113^{\circ}23'E$ 之间(见图1)。大部分地区以平原为主,境内河涌纵横交织,其中内河约 2 800 条,总长超过 5 000 km。根据《广东省佛山市土地利用总体规划(2006~2020 年)》,该市划定的中心城区总面积约 361.66 km^2 ,包括了祖庙、罗村等 7 个镇、街道。其中,祖庙、张槎和石湾镇共同组成佛山的老城区。

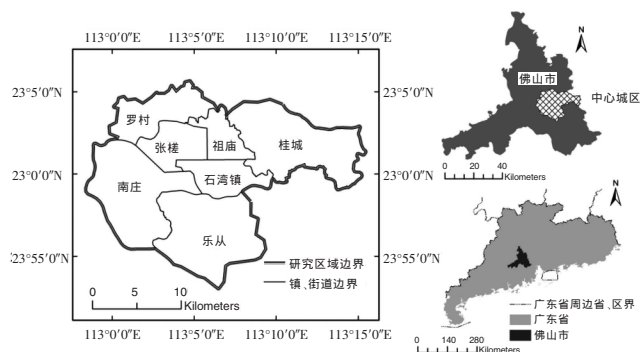


图1 佛山中心城区示意图
Fig.1 Location of Foshan central urban district

2.2 数据来源与处理

本文所用土地利用数据为 2005 和 2010 年的 30m 栅格数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心。结合土地类型组成情况,可将研究区划分为水田、旱地、林地、水域、城镇用地、农村居民点和工业用地 7 类。由土地利用栅格数据得到 38 种土地转移类型及其面积,计算各土地转移类型的转移比例 C_i 值并从小到大排序,筛选出累积之和大于 80% 的前几种土地转移类型,得到研究区 6 种主要土地转移类型(见表1)。

表1 研究区主要土地转移类型
Table1 The main types of land-use changes

序号	转移类型	面积/ km^2	$C_i/\%$
1	水域-水田	60.03	38.03
2	农村居民点-城镇用地	30.27	19.17
3	水田-城镇用地	12.99	8.23
4	水域-城镇用地	10.71	6.78
5	水域-工业用地	7.61	4.82
6	城镇用地-工业用地	6.72	4.26
累计值		128.33	81.29
其它(32 类)		29.53	18.71
总变化(38 类)		157.86	100

平原河网区河流交错密布,分级难度大,参照国内目前公开的相关文献^[15],本文按照河流宽度及其社会功能将研究区水系划分为 4 级。其中 I、II 级为干流,III、IV 级为支流,干流主要起行洪排涝作用,支流主要起调蓄灌溉作用。各级特点如下:(1) 级干流平均宽度在 100m 以上,主要为天然大型河道;(2) 级干流平均宽度为 20~100m,主要为大型田间河流和人工河渠;(3) 级支流平均宽度为 10~20m,包括大型农渠、环城河等;(4) 级支流平均宽度在 10m 以下,包括小型农渠、河渠,以及大多数断头河。

所用河网水系数据来源于佛山市 2005、2010 年 Quickbird 高清卫星地图,分辨率达 1.1m。对河流进行数字化,过程如下:对各级河流进行描绘,其中 I、II 级干流采用双线描绘,得到面状数据,III、IV 级支流采用单线描绘,得到线状数据。为减少数字化过程中由主观因素带来的描绘误差,两个年份间不发生明显变化的河段采用相同的描绘结果。最后借助 ARCGIS 自动捕捉栅格中心线功能提取干流面状数据中心线,与支流线状数据进行拼接,得到概化的河网水系数据(见图2)。

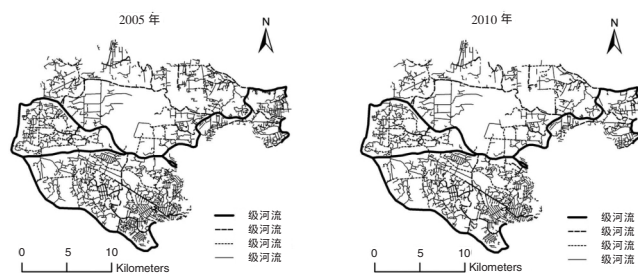


图2 研究区河网水系分布图
Fig.2 The spatial distribution of the river network

3 研究方法

河网水系具有空间自相关性的特点,若将传统回

归方法(普通最小二乘回归模型,即 OLS 模型)直接用于驱动分析,将忽略其存在的空间自相关性,从而导致估计偏误。Anselin^[16]提出了适用于分析空间数据的空间自回归模型,在土地利用、经济研究等领域得到广泛应用^[17-18]。空间自回归模型属于全局模型,不考虑驱动因子对河网水系影响的空间不均匀性;地理加权回归模型作为局部模型,估计参数随空间位置的不同发生改变,可用于反映驱动因子影响的空间非平稳性。本文首先分析河网水系的演变特征,再经回归变量选取及空间自相关检验,最后基于空间自回归和地理加权回归模型探讨河网水系变化与其驱动因子间的统计关系。

3.1 河网水系结构与连通性参数

本文通过水系结构与连通性参数来描述河网水系的演变特征^[15],其中水系结构参数有河网密度、盒维数、支流发育系数和水系面积 4 个指标,连通性包括连接率和实际结合度 2 个指标。

3.2 空间自相关检验

空间自相关是指某一区域样本的观测值与另一区域的观测值相关,是进行空间自回归和地理加权回归分析的前提条件。常用全局莫兰指数(global moran's I,以下简称 Moran's I)确定其是否具有空间相关性。

3.3 空间自回归模型

空间自回归模型的通用表达式^[16]如下:

$$Y = \rho w_{ij}^{(1)} Y + \beta X + \mu, \mu = \lambda w_{ij}^{(2)} \mu + \varepsilon \quad (1)$$

式中: Y 为因变量观测值; X 为自变量观测值; β 为自变量估计系数; ρ 和 λ 分别为空间滞后项和空间误差项,一般应有 $0 \leq \rho < 1$, $0 \leq \lambda < 1$; μ 为误差项; ε 为符合正态分布的随机误差项; $w_{ij}^{(1)}$ 、 $w_{ij}^{(2)}$ 分别为区域 i, j 之间的二进制空间邻接权重矩阵。参数不同时可得到不同模型:当 $\rho, \beta \neq 0, \lambda = 0$ 时,为空间滞后模型(spatial lag model, SLM);当 $\beta, \lambda \neq 0, \rho = 0$ 时,为空间误差模型(spatial error model, SEM)。

选择模型时,首先不考虑空间相关影响,采用 OLS 模型估计受约束模型,再在此基础上通过空间自相关检验确定使用的模型。构建 2 个拉格朗日乘数检验项 $LMlag$ 、 $LMerr$ 及其稳健值 $R-LMlag$ 、 $R-LMerr$;首先比较统计量 $LMlag$ 、 $LMerr$ 何者显著,若为 $LMlag$ 则选用 SLM 模型,反之选用 SEM 模型;若两者均为显著,则进一步比较稳健统计量 $R-LMlag$ 、 $R-LMerr$ 何者较为显著来判断,若为 $R-LMlag$ 则选用 SLM 模型,反之选用

SEM 模型^[19]。

3.4 地理加权回归模型

地理加权回归模型(geographic weighted regression model, GWR)实质是一种局部加权最小二乘法,由传统线性回归方法演化而来。它通过引入位置权重,可用来反映变量间关系在空间上的差异。基本的 GWR 模型表达式如下所示:

$$y_i = \gamma_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_{i=1}^p \gamma_n(\mu_i, \nu_i) \xi_{in} + \delta_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: (μ_i, ν_i) 为第 i 个样本数据的位置; $\gamma_n(\mu_i, \nu_i)$ 为第 i 个样本数据中的第 n 个估计参数,是能够反映不同地理位置的函数项; $\gamma_0(\mu_i, \nu_i)$ 为估计方程的常数项; ξ_{in} 为第 i 个样本数据的第 n 项解释变量; $\delta_i \sim N(0, \sigma^2)$; $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 (i \neq j)$ 。选择一个合适的最优带宽是构建高质量 GWR 模型的关键,通过对比验证,本文使用固定距离法构成核函数,并选择最小信息准则 AIC 指标来决定最优带宽。该准则^[20]公式如下:

$$AIC = -2n \ln L(\hat{\sigma}) + n \ln(2\pi) + n \left[\frac{n + tr(S)}{n - 2 - tr(S)} \right] \quad (3)$$

式中: S 为帽子矩阵; $tr(S)$ 为矩阵的迹; $\hat{\sigma}$ 为随机误差项方差的极大似然估计。Fotheringham 等^[21]提出了判断准则:最优的带宽是当 AIC 值最小时所对应的带宽。

3.5 模型拟合度比较方法

经典拟合度 R^2 可用于对比 OLS 模型和 GWR 模型的拟合度。最大似然对数值(maximum likelihood logarithm, LIK)、最小信息准则(Akaike information criterion, AIC)和 Schwartz 指标(Schwartz criterion, SC)则可用于对比评价各模型的拟合度。若模型的 LIK 越大(AIC 、 SC 越小),则模型的拟合优度越高。

4 结果与分析

4.1 河网水系演变特征

计算得到各年份研究区整体水系结构和连通性参数(见表 2)。5 年间河网密度、盒维数和支流发育系数 3 个结构参数分别减少了 8.8%、1.2%、12.7%,表明研究区河流发育趋向主干化,河网复杂程度减小,水系结构简单化;水系面积则由 22.29 km² 降至 21.39 km²,减少了 4%,其中 I、II 级干流面积约减少了 0.46 km²,这与近年来研究区域河道断面由“宽浅”趋向于“窄深”变化有关。连接率和实际结合度 2 个连通性参数在 5 年间均增加,据统计,研究区河网的河链数由 2005 年的 3 336 条减至 2010 年的 2 688 条,其中 IV 级河流的河链数减少占比达 96%,由于区域内的断头河主要为 IV 级

表2 研究区水系结构、连通性参数与河流长度统计

Table2 The parameters of river system structure, connectivity and lengths of all-order rivers

年份	结构参数				连通性参数		各级河流长度			
	河网密度	盒维数	支流发育系数	水系面积	连接率	实际结合度	I 级	II 级	III 级	IV 级
2005	2.96	1.44	5.11	22.29	1.071	0.357	86.1	89.0	164.1	731.2
2010	2.70	1.42	4.46	21.39	1.085	0.362	86.1	92.8	168.8	628.3

注:河网密度、水系面积和河流长度单位分别为 km/km^2 、 km^2 、 km 。

河流,其大量的填埋消失反而增加了连通性。

统计研究区各级河流长度(见表2),分析其变化发现:IV级支流作为末级河流,其长度明显减少,5年间由731.2km减至628.3km,变化幅度超过14%,长度变化占各级河流总变化(按变化的绝对值进行累计)约92.3%,变化最为显著。其它各级河流变化则相对不明显,I级干流主要为大型天然河流,其长度不发生变化,II级干流和III级支流长度均呈现逐年增加趋势,变化幅度依次为4.4%和2.9%。

4.2 空间自回归与地理加权回归模型构建

4.2.1 因变量选取与空间自相关性检验

研究区末级河流对下垫面变化的响应最剧烈,因此本文对末级河流的驱动成因进行定量研究。将研究区划分为若干 $2\text{km}\times 2\text{km}$ 单元网格,与末级河流数据叠加,统计末级河流在每个网格中的长度变化值,作为回归模型的因变量(见图3)。

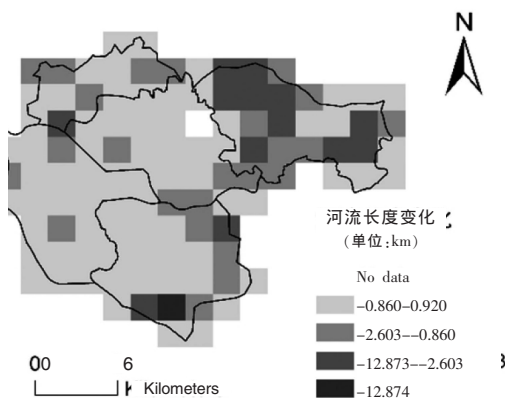


图3 末级河流变化的空间分布

Fig.3 The spatial distribution of changes of IV-order rivers

末级河流长度变化值在空间上的分布有正有负(见图3),可得到2005~2010年因变量的Moran's I值为0.1990,经计算,Moran's I值的Z值检验为3.20,并在1%极显著水平上通过检验($Z>2.58$),说明末级河流长度变化在空间上的分布存在一定的空间正相关,聚集特征(高-高或低-低)较为明显。因此,有必要借助空间自回

归模型构建末级河流变化与其驱动因子间的回归关系。

4.2.2 自变量选取

从下垫面环境影响的角度探究末级河流演变的驱动原因,首先考虑的潜在驱动因子为研究区6种主要土地转移类型(见表1)。然而,未发生转移土地上的河流也会受到人类活动的干扰,如农业活动往往会改变田间的水系微结构,故所选潜在驱动因子还包括了7种未发生转移的土地(即水田-水田、旱地-旱地、林地-林地、水域-水域、城镇用地-城镇用地、农村居民点-农村居民点、工业用地-工业用地)。各潜在驱动因子的基本统计单元与因变量网格在空间上对应,尺寸同为 $2\text{km}\times 2\text{km}$ 。

对上述13种潜在驱动因子进行逐步回归分析,剔除非显著因子(P 值 $>5\%$),得到3种显著驱动因子(见图4),分别为:水田-城镇用地、水域-工业用地、水田-水田。

相关研究表明^[22],受国家宏观经济的影响,2005~2006年佛山市各类工业园区和城镇建设大量扩张,新增建设用地占用耕地达6120ha;同时在2006~2010年期间,全市农业现代化建设加快,并完成了60%的耕地标准化改造。研究区的耕地、鱼塘、水域等用地分布着大量末级河流如沟渠河汉,建设用地剧烈增加侵占了水田、水域用地,导致末级河流被大量填埋,另一方面,农业用地改造将许多河汉、洼潭、渠道推倒填平,形成格式良田,使得未发生土地转移的水田上河流遭受严重干扰。因此,本文筛选所得变量一定程度上能够客观解释研究区末级河流的变化原因。最后经共线性诊断,所得3种显著驱动因子间不存在明显的共线性($VIF<10$),可作为回归模型自变量。

4.2.3 末级河流变化的整体驱动分析

采用空间自回归模型对末级河流变化整体驱动原因进行分析,模型选取判断结果表明 $LMlag$ 、 $LMerr$ 值均为显著,但 $R-LMerr$ 较 $R-LMlag$ 更为显著,故宜选用空间误差模型。对比OLS模型可发现(见表3),空间误差模型的 LIK 值增加, AIC 和 SC 值均减少,有效降

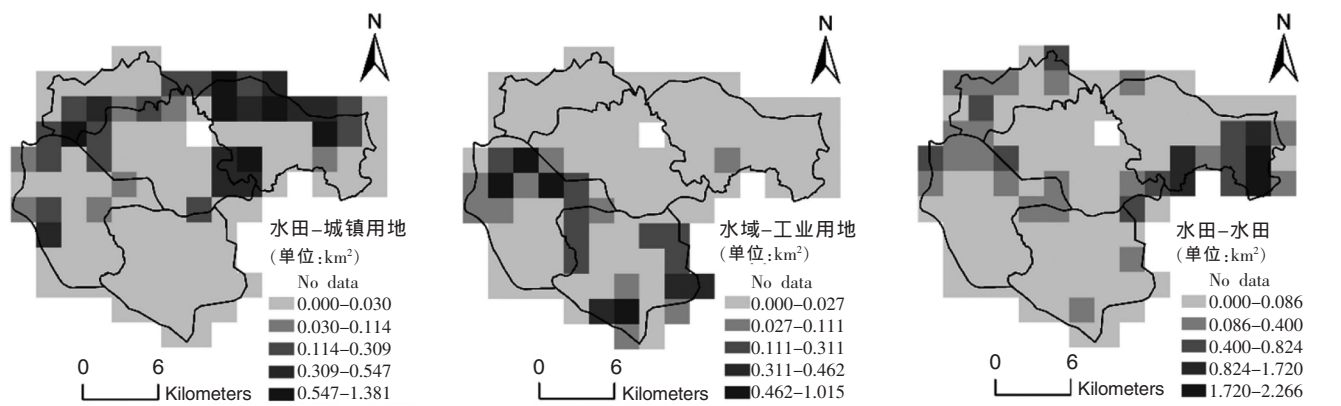


图 4 末级河流变化主要驱动因子的空间分布
Fig.4 The spatial distribution of the main driving factors for IV-order rivers changes

低了模型估计偏误,更好地拟合了各因子间的关系。

空间误差模型拟合结果如表 3 所示,空间误差项 λ 的估计系数为 0.2666,且在 5%水平上显著,表明空间扰动相关对末级河流长度变化影响显著。观察驱动变量的 P 值,进入模型的 3 种驱动变量 P 值均小于 0.05,其中水田-城镇用地、水域-工业用地在 1%水平上极显著,可认为建设用地扩张因素是更重要的驱动因子。观察驱动变量的估计系数,各估计系数均为负,表明整体上各驱动变量对末级河流均呈负面影响;比较估计系数绝对值大小发现,水域-工业用地(3.5171) > 水田-城镇用地(2.4633) > 水田-水田(0.7393),结合上述 P 值检验结果表明,5 年间末级河流受建设用地扩张,尤其是工业用地扩张的负面影响程度最大,受农业活动因素的最小。

总体来说,通过构建空间自回归模型可以整体、直观地把握整个区域的信息,明确了影响佛山市中心城区末级河流长度变化的各个驱动因子的整体影响力。

4.2.4 末级河流变化的局部驱动分析

由 OLS 模型和空间误差模型得出的估计系数为全局系数(见表 3),其大小在空间上不变,而事实上各驱动因子对河流演变的影响程度在空间上不同位置并不一致,因此需构建 GWR 模型以分析河流变化与驱动因子间的空间非平稳性。所得 GWR 模型的 R^2 和 AIC 值分别为 0.799、335.756,其拟合度 R^2 较高,相对表 3 中 OLS 模型的明显增加, AIC 值则明显下降,表明考虑了空间局部信息的 GWR 模型拟合效果优于 OLS 模型。

由 GWR 模型得出的驱动因子估计结果如图 5 所示,与空间误差模型的全局系数不同,GWR 模型所得估计系数随空间位置不同发生变化,其值有正

表3 末级河流变化的两类回归估计结果				
Table3 The different results of the regression models for IV-order rivers changes				
变量	OLS 模型		空间误差模型	
	估计系数	P 值	估计系数	P 值
λ	--	--	0.2666*	0.0209
Constant	-0.2787	0.1354	-0.2688	0.2187
水田-城镇用地	-2.6593**	0.0001	-2.4633**	0.0002
水域-工业用地	-3.1273**	0.0003	-3.5171**	0
水田-水田	-0.8075*	0.0251	-0.7393*	0.0490
经典拟合度 R^2	0.231		--	
最大似然对数值 LIK	-198.430		-195.712	
最小信息准则 AIC	404.861		399.424	
Schwartz 指标 SC	415.663		410.226	

注:“*”标记表示 P 值小于 5%,为显著;“**”表示 P 值小于 1%,为极显著。

有负。正值表明驱动因子与末级河流在局部区域为正相关,这与全局系数为负不存在矛盾,恰好反映了河流演变的复杂性;负值的局部估计系数越小,则说明驱动因子对末级河流的负面作用越明显。对估计系数为负值的区域进行观察(见图 5),可直观获取不同位置驱动因子影响作用的差异性,以水田-城镇用地因子为例,2005~2010 年间该因子估计系数在罗村、老城区和桂城的交界区域以及南庄、罗村和老城区的交界区域为-4.427~-2.719,表明在这些区域水田-城镇用地转移的负面影响程度较大,并有呈向四周辐射减弱的趋势。同理可获取其它因子影响的空间分布。

上述分析表明,GWR 模型考虑了河流演变与驱动因子间的空间非平稳性,其分析结果较为直观地反映了局部信息,结合空间自回归模型所反映的整体信息,可为区域河流保护管理提供重要参考依据。

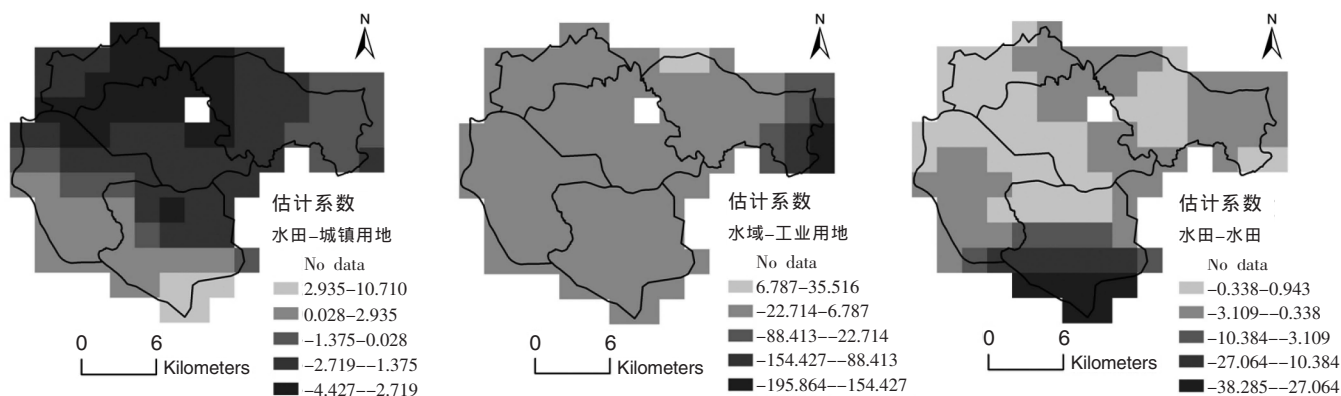


图5 末级河流变化主要驱动因子的估计系数空间分布

Fig.5 The spatial distribution of the regression coefficients of main driving factors for IV-order rivers changes

5 研究结论

本文分析了佛山市中心城区 2005~2010 年间河网水系演变情况, 并从下垫面土地转移及未转移类型中选取河流变化的驱动因子, 最后从整体和局部的角度分析了河网水系演变与其驱动因子间的统计关系以揭示河网变化的驱动成因, 结果表明:

(1)研究区末级河流长度由 731.2km 减至628.3km, 变化量占各级河流总变化约 92.3%, 为变化最显著的河流等级, 而城镇用地对水田、工业用地对水域的侵占以及农业活动则是末级河流长度变化的主要驱动因子。

(2)从整体来看, 各主要驱动因子的空间自回归估计系数均为负, 说明各因子对末级河流均呈负面影响, 其绝对值大小有水域-工业用地>水田-城镇用地>水田-水田, 说明末级河流受建设用地扩张, 尤其是工业用地扩张的负面影响程度最大, 受农业活动因素的最小; 从局部来看, 各主要驱动因子分布于空间上的地理加权回归估计系数均有正有负, 由系数的空间分布可直观获知不同空间位置驱动因子负面影响作用的差异性。

(3)空间自回归模型对区域河网水系变化与其驱动因子间的关系有整体、直观的把握, GWR 模型则能够描述驱动因子影响的空间非平稳性, 有利于获取局部信息, 结合两种模型的特点能够更加全面地刻画河网水系演变的驱动成因。

参考文献:

- [1] 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 (03): 386-391. (LI Yuanyuan, LI Jianqiang, LI Zongli, et al. Issues and challenges for the study of the

interconnected river system network[J]. Resources Science, 2011, 33 (03): 386-391. (in Chinese))

- [2] 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[J]. 地理学报, 2015, 70 (05): 819-827. (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[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70 (05): 819-827. (in Chinese))
- [3] Chin A. Urban transformation of river landscapes in a global context[J]. Geomorphology, 2006, 79(3): 460-487.
- [4] Shixia Zhang, Yakun Guo, Ziwen Wang. Correlation between flood frequency and geomorphologic complexity of rivers network - a case study of Hangzhou China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 113-118.
- [5] Hammer T R. Stream channel enlargement due to urbanization[J]. Water Resources Research, 1972, 8(6): 1530-1540.
- [6] Hirsch R M, Walker J F, Day J C, et al. The influence of man on hydrologic systems[J]. Geological Society of America, 1990, 329-359.
- [7] Stammler K L, Yates A G, Bailey R C. Buried streams: uncovering a potential threat to aquatic ecosystems [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 114: 37-41.
- [8] Jason P. Julian, Nicholas A. Wilgruber, Kirsten M. de Beurs, et al. Long-term impacts of land cover changes on stream channel loss [J]. Science of the Total Environment, 2015, 537: 399-410.
- [9] 冯平, 冯焱. 河流形态特征的分维计算方法[J]. 地理学报, 1997, 52 (4): 324-330. (FENG Ping, FENG Yan. Calculation on fractal dimension of river morphology [J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(4): 324-330. (in Chinese))
- [10] 刘怀湘, 王兆印. 典型河网形态特征与分布[J]. 水利学报, 2007, 38 (11): 1354-1357. (LIU Huaixiang, WANG Zhaoyin. Morphological feature and distribution of typical river networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1354-1357. (in Chinese))
- [11] 邓晓军, 许有鹏, 韩龙飞, 等. 城市化背景下嘉兴市河流水系的时空变化[J]. 地理学报, 2016, 71 (01): 75-85. (DENG Xiaojun, XU

- Youpeng, HAN Longfei, et al. Spatial-temporal changes of river systems in Jiaying under the background of urbanization [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(01): 75–85. (in Chinese))
- [12] 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. (ZHOU Hongjian, SHI Peijun, WANG Jing'ai, et al. River network change and its ecological effects in Shenzhen region in recent 30 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9): 969–980. (in Chinese))
- [13] 陈云霞, 许有鹏, 付维军. 浙东沿海城镇化对河网水系的影响[J]. *水科学进展*, 2007, (01): 68–73. (CHEN Yunxia, XU Youpeng, FU Weijun. Influences of urbanization on river network in the coastal areas of east Zhejiang province [J]. *Advances in Water Sciences*, 2007, 18(01): 68–73. (in Chinese))
- [14] 徐慧, 杨妹君. 太湖平原圩区河网演变模式探析 [J]. *水科学进展*, 2013, 24 (03): 366–371. (XU Hui, YANG Shujun. Exploring the evolution of river networks in plain polders of Taihu Lake basin [J]. *Advances in Water Sciences*, 2013, 24(03): 366–371. (in Chinese))
- [15] 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 Longfei, XU Youpeng, SHAO Yulong, et al. Effect of urbanization on the stream structure and connectivity—a case study in the mid-lower reaches of the Qinhuai River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(3): 335–341. (in Chinese))
- [16] Anselin Luc. *Spatial Econometrics: Methods and Models* [M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] 谢花林, 刘黎明, 李波, 等. 土地利用变化的多尺度空间自相关分析——以内蒙古翁牛特旗为例[J]. *地理学报*, 2006, 61(04): 389–400. (XIE Hualin, LIU Liming, LI Bo, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land-use changes: a case study in Ongniud Banner, Inner Mongolia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(04): 389–400. (in Chinese))
- [18] 陈刚强, 李映辉, 胡湘菊. 基于空间集聚的中国入境旅游区域经济效益分析[J]. *地理研究*, 2014, 33(1): 167–178. (CHEN Gangqiang, LI Yinghui, HU Xiangju. Regional economic effects of inbound tourism in China based on the perspective of spatial agglomeration [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(1): 167–178. (in Chinese))
- [19] Anselin L, Florax R J G M. *New Directions in Spatial Econometrics* [M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Geographically weighted summary statistics—a framework for localised exploratory data analysis [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2002, 26(6): 501–524.
- [21] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. *Geographically Weighted Regression: the Analysis of Spatially Varying Relationships* [M]. John Wiley & Sons, 2003.
- [22] 王秋香. 佛山市耕地变化驱动机理及空间布局优化研究[D]. 南京大学, 2011. (WANG Qiuxiang. Study on Cultivated Land Change Driving Mechanism and Spatial Distribution Optimization of Foshan [D]. Nanjing University, 2011. (in Chinese))

Analysis of River Network Changes Based on Spatial Auto-regression and Geographic Weighted Regression Model

HU Jiayu¹, LIU Bingjun^{1,2,3}

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou 510275, China;

3. Engineering Research Center for Water Security Regulation in Southern China of Guangdong Province, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to quantitatively explore the causes of urban river changes, this paper took the central urban district of Foshan as an example to analyze the evolution of river network and its driving factors. According to the one-to-many mapping relationship between the change of river network and its driving factors, the spatial auto-regression and geographic weighted regression models were used to analyze the statistical relationships wholly and partially. The results show that: (1) The IV-order rivers have the most dramatic changes and its length reduction account for about 92.3% of the total-order rivers changes. And the encroachment of urban land on paddy field and industrial land on waters, the agricultural activities are the major driving forces affecting the IV-order rivers. (2) As a whole, the IV-order rivers are deeply affected by the expansion of construction land, especially the expansion of industrial land. In the local view, the negative effects of each driving factor vary in different spatial positions. Taking paddy field and urban land-use factors as an example, its negative effects are significant on the border areas among Luocun, old town and Guicheng, as well as on the border areas among Nanzhuang, Luocun and old town. (3) The spatial auto-regression has advantage on the relationship between the changes of river network and its driving factors in a whole, while the geographic weighted regression model can describe the spatial nonstationarity of the influence of driving factors, and it is beneficial for obtaining local information. The two combined models can more fully reveal the causes of the evolution of river network.

Key words: driving analysis; river network change; spatial auto-regression model; geographic weighted regression model; IV-order rivers