

文章编号:1000-5641(2015)03-0124-12

# 基于空间自回归模型的景观格局变化 对河网水系连通性影响分析

沈洁<sup>1</sup>, 赵军<sup>2</sup>, 尚钊仪<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241;  
2. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444)

**摘要:** 针对快速城市化导致的河网水系连通性削弱问题, 以上海市原浦东新区为例, 利用 ArcGIS 网格化技术, 分析了 1989 年、2010 年土地利用和河网水系连通性的时空变化特征, 并利用空间自回归模型分析影响连通性的城市景观格局指标。结果表明: ①浦东新区土地利用总体表现为农业用地和水域向建设用地转变, 河网水系连通性表征指标连接率  $\beta$  和实际结合度  $\gamma$  的平均值分别由 1989 年的 0.80 和 0.30 降低为 2010 年的 0.72 和 0.25, 东南部与西部地区存在空间差异; ②空间自回归模型拟合结果表明公共建筑用地斑块数 (NP) 与水域平均斑块面积 (AREA\_MN) 是影响河网水系连通性变化的主要因素, 道路交通用地平均斑块面积 (AREA\_MN)、工业用地最大斑块指数 (LPI), 以及城市工业用地、居住用地和水域的散布与并列指数 (IJI) 对连通性变化也有一定影响。

**关键词:** 河网水系连通性; 城市化; 景观格局变化; 空间自回归; 浦东新区

**中图分类号:** X321 **文献标识码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-5641.2015.03.015

## Analysis of the impact of landscape pattern change on the river network connectivity based on the spatial auto-regression model

SHEN Jie<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, SHANG Zhao-yi<sup>1</sup>

(1. Department of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;  
2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Aiming at the situation that rapid urbanization had weakened river network connectivity, taking Pudong New Area as an example, and applying gridding method of ArcGIS software, this paper analyzes the temporal and special variations of land use and river network connectivity from 1989 to 2010, and detects the indexes of urban landscape pattern that affected river network connectivity using spatial auto-regression model. The results are: ① From 1989 to 2010, agricultural land and water area of Pudong New Area were mainly transformed to built-up land. The average values of  $\beta$  dropped from 0.80 to 0.72 while that of  $\gamma$  declined from 0.30 to 0.25. And there existed notable spatial differences between the northeastern and western regions

收稿日期:2014-05

基金项目:水利部公益性行业专项经费项目子课题(201201072-04);上海市环保局、水务局科研项目

第一作者:沈洁,女,硕士研究生,研究方向为区域水资源与水环境。

通信作者:尚钊仪,女,博士研究生,研究方向为区域水资源与水环境。E-mail: shangzhaoyi@live.cn.

both in land use and river network connectivity. ② The model shows that number of patches (NP) for public building land and mean of patches area (AREA\_MN) for water area are the most significant factors that influence river network connectivity. Besides, mean of patches area (AREA\_MN) for road and traffic land, largest patch index (LPI) for industrial land, and inter-spersion juxtaposition index (IJI) of industrial land, residential land and water area also affect the change of river network connectivity.

**Key words:** river network connectivity; urbanization; landscape pattern change; spatial auto-regression; Pudong New Area

## 0 引 言

河网水系是水资源形成和演化的主要载体,是生态环境的重要组成部分,是经济社会发展的重要支撑<sup>[1]</sup>.伴随近年来快速城市化进程,人类活动对河网的干扰日趋严重.由于人河争地以及河流廊道对区域景观在扩展过程中的切割阻碍,大量河道被城市建设、工业用地取代,低等级、末端河道不断减少,其直接后果就是河网水系连通性逐渐变差<sup>[2-4]</sup>.

保持河网水系较好的连通性是提高区域水资源配置能力、改善水生态环境状况、降低洪涝灾害风险的重要基础.因此,研究影响河网水系连通性的因素,并提出相应的建议措施以维持或是改善河网水系连通性显得十分必要.针对河网水系连通性影响因素的研究,国外起步较早,并取得了一些量化研究成果. Lesschen 等<sup>[5]</sup>采用 LAPSUS 模型模拟分析了径流过程和沉积运动,认为在流域尺度上,植被斑块和农业梯田的空间分布对河流水文连通影响很大. Meerkerk 等<sup>[6]</sup>通过连通性函数分析了半干旱流域影响水系连通性的变量,包括土地利用状况、暴雨特征和地形.国内对河网水系连通性的研究近些年才逐步展开,且有关河网水系连通性的影响因素分析尚局限于定性描述.张欧阳<sup>[7]</sup>归纳了长江水系连通状况,得出长江中下游河湖连通性较差主要受围垦和大堤的阻隔影响;夏军<sup>[8]</sup>、汪恕诚<sup>[9]</sup>认为,从地质历史时期及人类历史时期的时间尺度看,新构造运动、气候变化等自然因素是阻碍水系连通的主导因子,但从年时间尺度上看,特别是近百年来,人类活动如建闸筑堤、围垦等对水系连通起决定性的作用.

由于自然因素难以人为控制,因此定量研究人类活动,特别是土地利用变化对河网水系连通性的影响对于区域土地利用规划和河网水系连通保护具有一定的现实意义.土地利用变化作为影响水系连通性的一大因素,其作用最终体现在不同用地类型的景观格局变化上.金妍<sup>[10]</sup>曾利用逐步回归分析法探讨了影响河流连通性及河流形态的主要景观格局指标.使用这种传统线性回归模型的前提条件是数据在统计上独立并且分布均匀,然而景观格局指数具有空间属性,对于空间数据来说,如果忽略变量之间这种空间相关性而采用传统回归模型来分析变量之间的关系,会导致模型估计错误.空间自回归模型则可以克服这个缺点,这一模型最早由 Cliff 和 Ord<sup>[11]</sup>提出,此后在区域经济发展、能源消费、土地利用变化等方面得到广泛应用<sup>[12-17]</sup>.本文以上海市原浦东新区(不含南汇区)为研究对象,利用 1989 年和 2010 年的土地利用和河网水系数据,通过 GIS 网格化功能将研究区域划分为 100 个单元格,在时间和空间尺度上,分析研究区域河网水系连通性和土地利用类型变化,并通过空间自回归模型,评估城市景观格局变化对河网水系连通性的影响,以期对未来城市土地利用规划和水系格局修复提供科学参考.

### 1 研究区域及数据来源

本文的研究区域选择原浦东新区行政区划范围,总面积 569.57 km<sup>2</sup>,包括陆家嘴、金桥、张江、外高桥、川沙、三林等六大功能区.研究数据包括 1989 年和 2010 年浦东新区土地利用及河网水系线状解译数据(见图 1 和图 2).土地利用数据主要通过 1989 和 2010 年两个时期分辨率分别为 2 m 和 1 m 的航空遥感数据(彩红外图像)进行解译得到,并参照上海市土地利用分类标准分为 9 类土地利用类型,分别为城市工业用地、道路交通用地、城市公共建筑用地、居住用地、城市绿地、市政设施用地、农业用地、水域和其他用地.河网水系线状数据是借助 ArcGIS 9.2,通过几何校正和查阅历史资料,对两个年份的河网水系面状数据进行线状解译获得.其中,1989 年土地利用及河网数据来源于华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室;2010 年数据来源于上海市城市信息中心上海市生态环境调查与评估课题组.

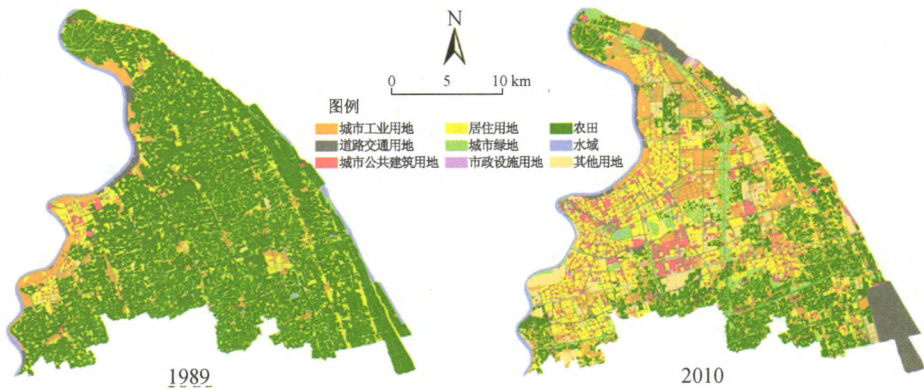


图 1 1989 年和 2010 年研究区域土地利用

Fig. 1 Land use/cover of study area in 1989 and 2010

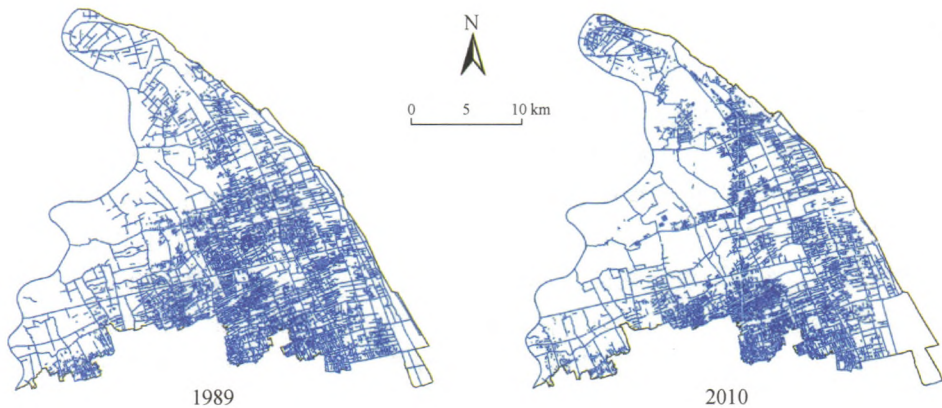


图 2 1989 年和 2010 年研究区域水系

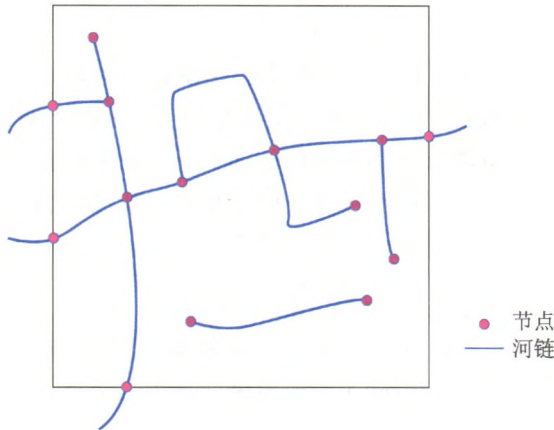
Fig. 2 River system of study area in 1989 and 2010

## 2 研究方法

### 2.1 河流连通性变化研究方法

借鉴景观生态学中河流廊道连通性的分析方法,并参考河网连通性评价实例,本文选取连接率 $\beta$ 和实际结合度 $\gamma$ 两个指标来表征河网水系连通性状况<sup>[18-21]</sup>,具体计算公式为 $\beta=L/V$ , $\gamma=L/[3(V-2)]$ .式中, $L$ 是河网中的河链数(两个节点之间的河段), $V$ 是河网节点数(河链交汇处)(见图3).

$\beta$ 指数计算了河网中河链数与节点数的比值,反映每个节点平均连接的河链数,可衡量一个节点与其他节点联系的难易程度,其值介于0到3之间, $\beta<1$ 时,水系网络为树枝状结构, $\beta>1$ 时,水系网络为回路结构或格状结构. $\gamma$ 指数计算了河网中实际连接数量占可能存在的最大连接数量的比值,反映水网的实际结合水平,用以描述河网各节点连接程度,其值介于0到1之间,0表示节点间没有连线,1表示每个节点间都相互连通,当 $\gamma$ 接近1/3时,网络呈树状<sup>[3,22]</sup>.



注:此网格中节点数为14,河链数为13

图3 研究区域某网格河网水系节点、河链示意图

Fig. 3 Sketch map of rivers links and vertices in a grid of study area

利用网格化技术,将浦东新区划分为 $2\ 700\text{ m} \times 2\ 700\text{ m}$ 的100个单元格,在ArcGIS 9.2软件中建立河道之间的拓扑关系,根据相关功能模块识别提取各个单元格内的河道节点数和河链数,分别计算每个单元格在1989年和2010年的河流连通性,并分析它们在时间和空间上的变化特征.

### 2.2 城市景观格局变化研究方法

斑块类型水平的指标计算主要用以描述同一类型斑块的空间结构,即某种土地利用类型的景观格局.在ArcGIS 9.2软件环境中,将1989年和2010年两个时相的土地利用矢量数据经过栅格化,转换成像元大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ .采用FRAGSTATS 4.1软件,选取NP、LPI、AREA\_MN、ED、IJI等5个斑块类型水平指标,计算1989—2010年间浦东新区100个单元格内景观格局指标变化(见表1).

表1 斑块类型水平景观格局指数

Tab. 1 Landscape indices at the patch level

景观指标	缩写	指标类型	指标含义
斑块数	NP	密度指标	区域同一类型斑块数量
最大斑块指数	LPI	面积指标	同一类型斑块中面积最大斑块与该类型斑块总面积的比例
平均斑块面积	AREA_MN	面积指标	区域同一类型斑块的平均面积
边界密度	ED	形状指标	单位面积的斑块边界长度,与斑块形状有关
散布与并列指数	IJI	结构指标	景观要素在研究区域内在异质斑块间的分布状况

### 2.3 景观格局变化对河网水系连通性影响研究方法

空间结构的存在一般有两个原因:第一原因是由于因变量  $Y$  依赖于一个或几个有空间结构的自变量  $X$  造成的,这种格局反作用于其他变量;第二个原因是当产生  $Y$  值的过程本身具有空间性且样点间相互作用时空间结构也会出现,实际中某一个地区的观测值会表现出与其他地区的观测值相关.因此,在建立模型时,需要考虑将地区间的交互关系引入模型,即通过空间权重矩阵来对基本的线性模型进行修正<sup>[23]</sup>.

#### (1) 全局空间自相关指数

全局空间自相关指数 Moran' $I$  用来从整体上反映研究区域的空间关联和空间差异程度,即指出区域观测值的分布是集聚、分散还是随机分布.其值介于  $-1$  和  $+1$  之间:大于  $0$  表示正相关,即空间位置相似的单元具有相似的属性;小于  $0$  表示负相关,即空间位置相似的单元具有不同的属性;等于  $0$  表示不存在空间自相关.其计算公式为

$$I = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n}, \quad i \neq j.$$

式中,  $x_i$  和  $x_j$  是变量  $x$  在相邻配对空间单元区域的值,  $\bar{x}$  为  $n$  个位置的属性值的平均值,  $w_{ij}$  为二进制邻接矩阵中的元素. Moran' $I$  的检验统计量为

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}},$$

其中,  $E(I)$  为理论数学期望,  $\text{Var}(I)$  为理论方差.在给定显著水平时,如果 Moran' $I$  的正态统计量的  $Z$  值大于正态分布函数在  $0.05$  水平下的临界值  $1.65$ ,则表明观测值在空间分布上具有明显的正相关关系,代表区域的类似特征值出现集群趋势<sup>[24]</sup>.

#### (2) 空间自回归模型及其分类

Anselin<sup>[25]</sup> 给出了空间自回归模型的通用表达式为  $y = \rho W_1 y + X\beta + \mu, \mu = \lambda W_2 \mu + \epsilon$ . 其中,  $y$  为  $n \times 1$  被解释向量,  $X$  为  $n \times k$  为解释变量矩阵,  $\beta$  为  $k \times 1$  回归系数向量,  $u$  为  $n \times 1$  误差向量,  $\rho$  为空间相关系数,  $\lambda$  为残差空间相关系数,  $\epsilon$  为  $n \times 1$  随机误差向量,其元素相互独立同分布,且零均值,方差  $\sigma^2$  有限,  $W_1, W_2$  为  $n \times n$  非随机空间权重矩阵.

通过对模型参数的不同设定,可以导出不同的模型:① 当  $\rho \neq 0, \beta = \lambda = 0$  时,为纯空间自回归模型或一阶空间自回归模型;② 当  $\rho \neq 0, \beta \neq 0, \lambda = 0$  时,为空间滞后模型;③ 当  $\rho = 0, \beta \neq 0, \lambda \neq 0$  时,为空间误差模型.

选择模型时,首先在不考虑空间相关影响的情况下,运用 GeoDa 软件,采用经典 OLS 回归法估计受约束模型,然后在此基础上进行空间相关性检验确定该选择哪一种模型.检验统计量为两个拉格朗日乘数 LMerr、LMlag 及其稳健的 R-LMerr、R-LMlag 统计量.



Anselin 和 Florax 给出了如下判别准则:如果 LMlag 较 LMerr 显著, R-LMlag 显著而 R-LMerr 不显著,则使用空间滞后模型,反之,如果 LMerr 较 LMlag 显著, R-LMerr 显著而 R-LMlag 不显著,则使用空间误差模型<sup>[26]</sup>.

### 3 结果分析

#### 3.1 土地利用变化

浦东新区自 1990 年进入开发的实质阶段后,土地利用经历了明显的城市化发展历程,大面积的农业用地、水域被工业用地、居住用地和道路交通用地等建设用地上所取代(见图 4). 1989 年至 2010 年,研究区域农业用地面积由 327 km<sup>2</sup> 变为 98 km<sup>2</sup>,下降了 70%;水域面积由 51 km<sup>2</sup> 变为 41 km<sup>2</sup>,下降了约 20%;而建设用地面积由 149 km<sup>2</sup> 变为 330 km<sup>2</sup>,上升近 120%(建设用地包括工业用地、道路交通用地、公共建筑用地、居住用地、城市绿地和市政设施用地).

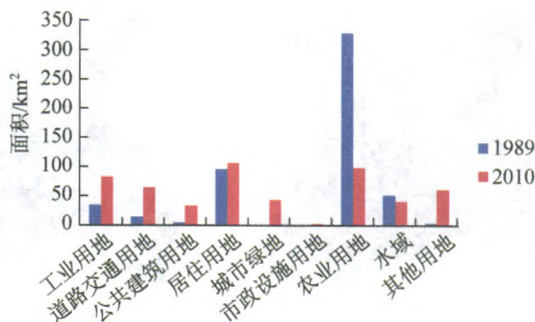


图 4 1989 年和 2010 年 9 种土地利用类型面积分布

Fig. 4 Area of nine land use patterns in 1989 and 2010

图 5 显示了 1989 年和 2010 年浦东新区土地利用变化空间分布情况. 从空间分布看,浦东新区西部地区农业用地面积大幅度下降,水域面积变化很小,建设用地面积的增幅显著;东南部水域面积下降较多,农业用地有一定程度的下降,城市建设用地面积有显著增长. 浦东新区西部和东南部不同用地类型面积变化上的差异与浦东新区由西向东的城市化发展进程以及功能区定位有一定联系. 1990 年西部外高桥保税区、陆家嘴金融贸易区、金桥出口加工区率先成立,新兴工业和金融行业的蓬勃发展使工业、道路广场和公共基础设施等建设用地面积迅速增加. 东南部地区主要包含川沙,川沙距离中心区陆家嘴较远,以居住区为功能定位,城市化进程相对缓慢. 因此,浦东新区西部农业用地面积降幅比东南部更为明显,建设用地比东南部增加的更多. 与此同时,西部的高度城市化促进了开挖人工河湖,注重水面率维持等河流保护工作的开展,因而浦东新区西部水域变化较东南部不明显.

#### 3.2 河流连通性变化

浦东新区两个不同时相的河网水系连接率和实际结合度的空间分布如图 6 所示. 2010 年与 1989 年相比,所有空间单元格的连接率  $\beta$  平均值由 0.80(标准差  $\sigma = 0.15$ ) 下降到 0.72 ( $\sigma = 0.19$ ),实际结合度  $\gamma$  平均值由 0.30( $\sigma = 0.08$ ) 下降到 0.25( $\sigma = 0.10$ ),73% 单元格的连接率  $\beta$  和 75% 单元格的实际结合度  $\gamma$  都有所减少. 但是,部分单元格内的  $\beta$  和  $\gamma$  指标在 1989—2010 年间有一定程度上升(见图 7). 单元格 D01、C08 连接率的增加, D09、F08 实际

结合度的增加主要由于单元格内小支流和零散河道被填埋. 在 1989 年时, K07、F10、G09-10、H10、J09、K11 和 L11 这些单元格内连接率  $\beta$  值大于 1, 说明其水系网络为回路结构或格状结构; 而在 2010 年时, 仅 C08 单元格内连接率  $\beta$  值大于 1. 1989 和 2010 年的实际结合度  $\gamma$  值大部分集中在 1/3 左右, 表明单元格内水系以树状结构为主.

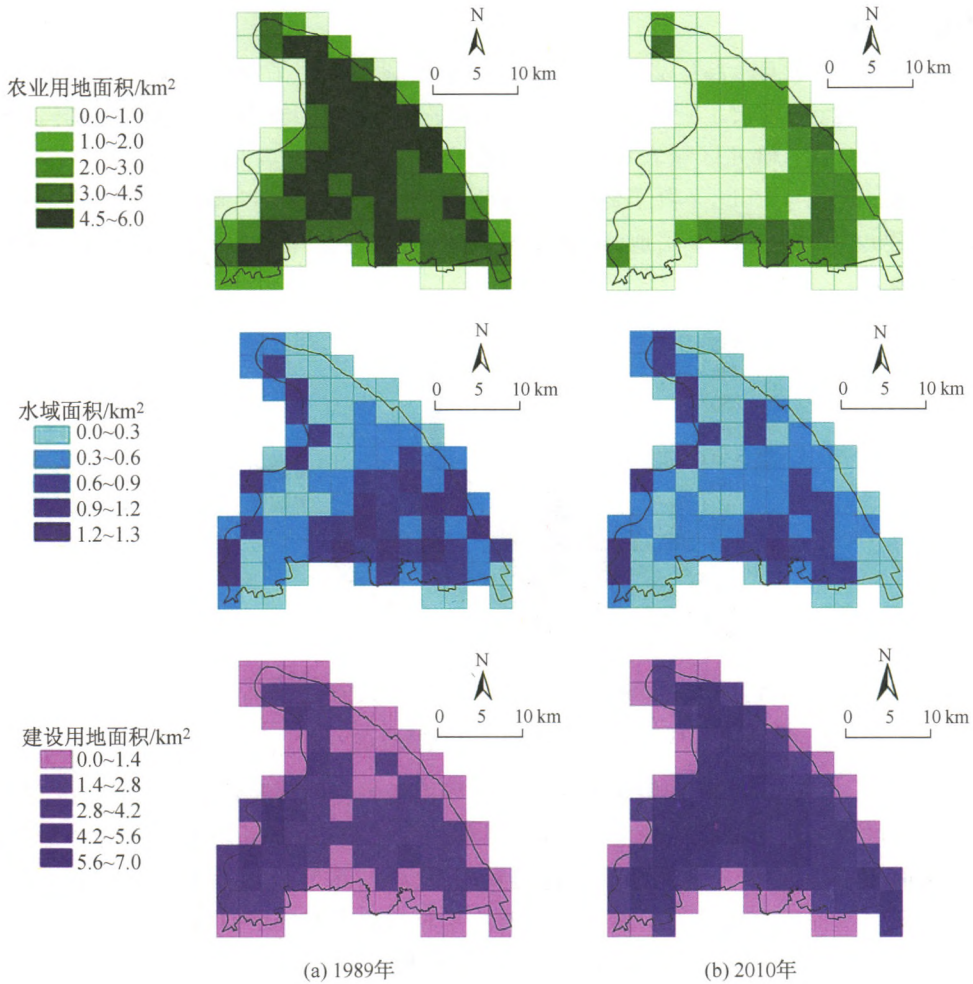


图 5 1989 年和 2010 年 3 种土地利用类型面积空间分布

Fig. 5 Total area of three land use patterns in each spatial unit of 1989 and 2010

从空间差异上看, 2010 年浦东新区东南部地区河流连通状况明显好于西部地区, 但东南部地区 1989 年至 2010 年间河流连通性下降程度也较其他部分更为显著, 这与不同功能区域的自然本底及经济发展状况有一定关系. 东南部川沙地区河流密布, 且发展相对缓慢, 低等级河道得以保留, 因此连通性较好; 西部地区河道数量较少, 且开发后集中了外高桥、金桥、陆家嘴等发展迅速的功能区, 受人类活动的影响较大, 中低等级河道被填埋、阻隔, 因而连通性受影响显著. 但是, 由于西部地区发展时间较长, 城市化水平较高, 对河流保护的意识也较高, 所以 1989 年至 2010 年间西部地区河流连通性变化比东南部小, 部分单元格连通性反倒有所提高.



### 3.3 区域景观格局变化对连通性影响的空间分析

#### 3.3.1 全局空间自相关分析

计算得到 1989 年与 2010 年连接率  $\beta$  和实际结合度  $\gamma$  变化值的全局 Moran'I 估计值分别为 0.280 2 和 0.164 9, 检验的 Z 值分别为 3.974 7 和 2.390 6. 在 5% 的显著性水平上通过了检验 ( $Z > 1.96$ ), 说明空间单元格之间存在空间自相关, 浦东新区河网连通性变化空间正相关(高一高或低—低)特征比较明显.

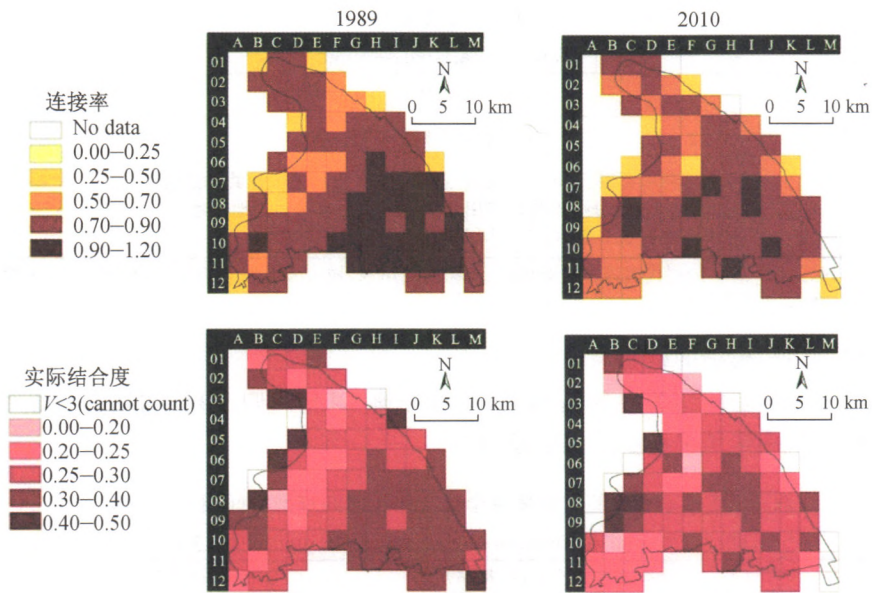


图 6 1989 年和 2010 年连接率和空间结合度空间分布

Fig. 6 River network connectivity indices in each spatial unit of 1989 and 2010

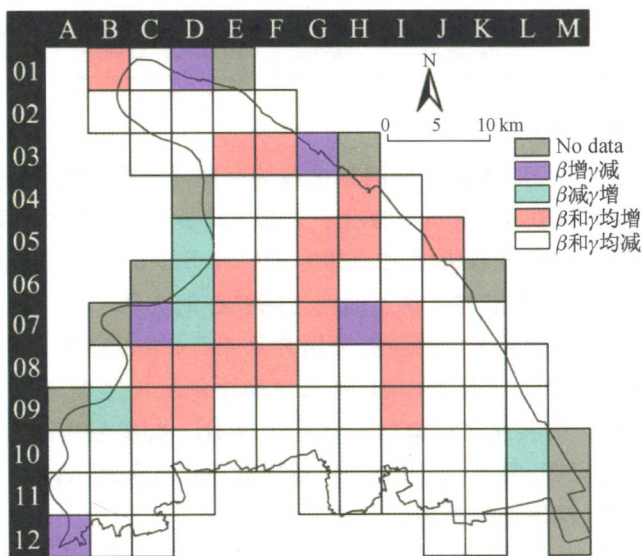


图 7 1989—2010 年间两项指标变化空间分布

Fig. 7 Variation of the two indices in each spatial unit from 1989 to 2010



### 3.3.2 空间自回归模型的建立和检验

#### (1) 变量选择

首先,利用逐步回归分析剔除 45 个变量中显著性大于 5% 的自变量(见表 3),最终确定连接率  $\beta$  选用道路交通用地 AREA\_MN、城市公共建筑用地 NP、居住用地 IJI、城市工业用地 IJI 这 4 个自变量建立模型;实际结合度  $\gamma$  选用水域 AREA\_MN、公共建筑用地 NP、水域 IJI、工业用地 LPI 这 4 个自变量建立模型。

表 3 变量设置

Tab. 3 Variable settings

变量类型	变量	数量
因变量	连接率 $\beta$ 、实际结合度 $\gamma$	2 个
自变量	9 种土地利用类型:城市工业用地、道路交通用地、城市公共建筑用地、居住用地、城市绿地、市政设施用地、农业用地、水域和其它用地; 5 个斑块类型水平指标: NP、LPI、AREA_MN、ED、IJI	45 个

注:下文以 1、2、3、4、5、6、7、8、9 分别代表城市工业用地、道路交通用地、城市公共建筑用地、居住用地、城市绿地、市政设施用地、农业用地、水域和其它用地

#### (2) 空间自回归模型的检验

首先,在不考虑空间相关性的基础上,运行经典 OLS 回归,得到的回归诊断结果见表 4. 根据判别准则,确定均选用空间滞后模型。

表 4 连接率与实际结合度两个经典线性回归模型空间相关性检验

Tab. 4 Spatial correlation test of two OLS models on  $\beta$  and  $\gamma$

检验量	空间相关性检验(连接率)			空间相关性检验(实际结合度)		
	MI/DF	VALUE	PROB	MI/DF	VALUE	PROB
Moran's I(error)	0.295 75	N/A	N/A	0.134 89	N/A	N/A
LMlag	1	19.820 724 0	0.000 008 5	1	0.526 3	0.468 1
R-LMlag	1	6.513 854 2	0.010 703 7	1	4.046 7	0.044 2
LMerr	1	13.851 902 5	0.000 197 8	1	0.320 7	0.571 2
R-LMerr	1	0.545 032 7	0.460 354 5	1	2.706 9	0.099 9

#### (3) 空间滞后模型结果解释

由估计结果(见表 5)可知,考虑了空间相关性的空间滞后模型的滞后项在 1% 的水平上高度显著,其他自变量系数在 1% 和 5% 的水平上都比较显著. 与经典线性回归模型相比,空间滞后模型拟合度上升,LIK 值有所增大,同时,AIC 和 SC 值都有所降低. 综合来看,空间滞后模型更好的拟合了景观要素和水系连通性之间存在的关系。

模型结果显示,空间滞后因变量的系数分别为 0.495 1 和 0.264 7,为高度显著,表明空间溢出效应对连通性变化产生了显著影响. 进入模型中的城市工业用地 IJI 和 LPI、道路交通用地 AREA\_MN、城市公共建筑用地 NP、居住用地 IJI、水域 AREA\_MN 和 IJI 是影响不同单元格连通性差异的原因. 其中,城市公共建筑用地 NP 与水域 AREA\_MN 高度显著,可以认为是主要影响因素. 具体结果分析如下:

① 公共建筑用地斑块数(NP3)系数大于 0 且高度显著,对连通性有正向影响. 通常, NP 越大,破碎度越高. 对于公共建筑用地来说,其斑块数较大分布较散时,干扰到水系的可能性相对越小。

② 道路交通用地平均斑块面积(AREA\_MN2)系数小于0且显著,说明道路交通建设对水系连通性产生了负向影响,即道路交通用地 AREA\_MN 值较大时,水系连通状况却相对较差. 水域平均斑块面积(AREA\_MN8)系数大于0且高度显著,对水系连通性有正向影响,即水域 AREA\_MN 值较大时,水系连通状况相应较好.

③ 工业用地散布与并列指数(IJI1)和居住用地散布与并列指数(IJI4)系数大于0且显著,对连通性有正向影响;水域散布与并列指数(IJI8)系数小于0且显著,对连通性有负向影响. 即工业用地和居住用地分布较散,水域相对集中时,水系连通状况较佳.

④ 工业用地最大斑块指数(LPI1)系数小于0且显著,说明其对连通性产生负向影响. 即当工业用地最大斑块的面积相对较大时,水系连通性状况相对较差,两者呈负相关关系.

表5 浦东新区河网水系连通性变化的两种回归模型估计结果

Tab. 5 Results of two different regression models for river network connectivity variation in Pudong New Area

变量	经典线性回归模型		空间滞后模型	
	估计系数	P 值	估计系数	P 值
(A)连接率 $\beta$	LIK = 65.763 4 AIC = -121.527 SC = -108.705		LIK = 71.542 9 AIC = -133.086 SC = -120.253	
W- $\beta$			0.495 1	0
Constant	0.109 4	0	0.099 7	0.000 1
AREA_MN2	-0.018 2	0.041 4	-0.001 1	0.010 3
NP3	0.003 5	0.012 6	0.021 8	0
IJI4	0.001 2	0.035 1	0.000 3	0.040 1
IJI1	0.000 5	0.046 5	0.000 7	0.002 7
(B)实际结合度 $\gamma$	LIK = 146.368 AIC = -282.735 SC = -270.236		LIK = 147.415 AIC = -284.83 SC = -272.336	
W- $\gamma$			0.264 7	0
Constant	0.027 6	0.005 2	0.037 8	0.000 4
AREA_MN8	0.004 1	0	0.003 9	0
NP3	0.001 4	0	0.001 7	0
IJI8	-0.001 0	0.003 1	-0.001 1	0.001 0
LPI1	-0.006 5	0.017 1	-0.007 1	0.005 5

### 3.4 讨论与建议

1989至2010年间,浦东新区水面率和河网密度分别降低了29.5%和48.3%,连接率 $\beta$ 和实际结合度 $\gamma$ 分别降低10.0%和16.6%,河网水系呈简单化趋势,连通性显著降低. 已有研究表明,浦东新区近40年来水面率与河网密度分别下降了31.60%和50.64%,消失河道的50%集中于1000m以下中小河道,其中100~500m的河流长度减少了54.64%,数量减少了49.51%<sup>[27]</sup>. 区域河网水面率和密度降低,村镇等末端河道消失,使水系结构趋于简单,河流连通受阻,不仅会使得河网的调蓄能力下降,而且会导致暴雨洪水在河道中的停滞时间增加,从而导致区域防洪排涝能力下降,增大洪涝灾害发生的几率<sup>[28,29]</sup>. 近些年在浦东新区发生的暴雨,如2001年8月以及2009年9月的特大暴雨均给经济社会发展、城市正常运转和工农业生产造成了重大影响.

气候变化、河道槽蓄容量降低等引起洪涝灾害风险逐步升高,迫使浦东新区不断新建和改建雨水泵站以应对日益增加的排水压力. 比较浦东新区内环线以内、内外环间、外环外等3个不同城市化片区的雨水泵站建设和河网密度情况,可以发现,单位区域面积泵站数及泵

站排涝模数与河网密度之间存在一定的响应关系,这在一定程度上验证了浦东新区河流水系的消亡和变迁对城市防洪的影响(见表 6).

表 6 浦东新区不同城市化片区的泵站排涝模数与河网密度

Tab. 6 Pump station's drainage modulus and drainage density in different urbanization areas of Pudong

片区	区域面积/km <sup>2</sup>	泵站数/个	单位区域面积泵站数/(个·km <sup>-2</sup> )	汇水面积/km <sup>2</sup>	泵站排涝模数/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	河网密度/(km·km <sup>-2</sup> )
内环内	30	10	0.33	26.69	5.8	0.47
内环外环间	275	71	0.26	217.46	2.06	1.96
外环外	261	17	0.07	58.74	0.24	4.78

注:数据来源于上海市城市排水有限公司

根据模型结果分析并结合研究区域实际情况,有必要加强河网水系保护和提高水系连通性,从而增强浦东新区河湖调蓄能力,降低洪涝灾害风险.今后在进行城市规划建设时,为实现发展与保护河网水系双赢,应注意以下几点:可逐步实施退涵还桥,即实施拆坝(管涵)建桥,以沟通水系,调活水体,解决河道的坝基、管涵造成的水流不畅、水循环受阻等问题;对于确实有必要的道路建设,在遇到河流时,也应尽量多修建桥梁或隧道,而不是将河道隔断或填埋等;在建设居住区和工业区时,如果遇到河流,应将其保留成为工业片区或居住区的内河,此时虽然居住用地和工业用地分布较散,但其对连通性的影响却相对较低;未来要注重公共建筑地的规划,尽量使其形成面积较小的多斑块集聚区,营造公共建筑用地与河流水域相邻共存的景观格局.另外,支流有分流作用,可减少主干的洪水流量,还能使交汇口处产生紊流,使洪峰进一步消能<sup>[30]</sup>.因此,减少支流填埋问题、采取工程措施开挖断头浜使之与附近水体贯通等,也是保护水系连通性、保障河面率的相对有效途径.

#### 4 结论与展望

(1) 1989 年至 2010 年期间,浦东新区建设用地面积增长迅速,而农业用地和水域面积下降明显;河网水系连通性有一定程度的下降,所有空间单元格连接率  $\beta$  的平均值由 0.80 下降到 0.72,实际结合度  $\gamma$  的平均值由 0.30 下降到 0.25.东南部地区水域面积较高,连通性状况较好,但其在研究时期内的变化也相对显著.浦东新区西部地区发展已较为成熟,河网水系连通状况趋于稳定,今后应以恢复为主,如疏通零散河道与主干河道或周边河道之间的连接,减少支流被填埋数,提高连通率;而东南部地区川沙一带在进入新一轮快速城市化后,有必要加强对现有水系加强连通性保护,避免重复先破坏再保护的发展模式.

(2) 基于 GeoDa 软件构建的空间滞后模型与普通回归模型相比,更好地估计了影响河网水系连通性变化的主要景观格局指标、影响系数及其显著性.模型结果显示,河网水系连通性主要受城市工业用地 IJI 和 LPI、道路交通用地 AREA\_MN、公共建筑用地 NP、居住用地 IJI、水域 AREA\_MN 和 IJI 影响,其中,公共建筑用地 NP 与水域 AREA\_MN 高度显著,是影响河网水系连通性变化的主要原因.浦东新区对川沙以及新近合并区域进行发展规划时,可以将这些因素考虑在内,如在道路建设过程中尽量修建桥梁或隧道,规划建设工业用地和公共建筑时时尽量形成平均斑块面积较小的集聚型片区等,以保护或改善河网水系连通状况.

(3) 影响河网水系连通性的因素复杂多样,本文仅考虑了景观格局变化对河网水系连通性的影响,未来研究应结合区域特点,确定影响水系连通的更为全面的因素,为保持和提

高河网水系连通性做好前期工作。另外,河网水系连通是防洪、水资源供应和生态环境安全的基础,其下降对调蓄能力和洪涝灾害等水环境效应的影响值得今后进一步探索分析。

致谢:感谢华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室吴健平教授在河网水系线状解译过程中给予的指导和帮助。

### [参 考 文 献]

- [1] 李原园, 酆建强, 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(3): 386-391.
- [2] 金妍, 车越, 杨凯. 基于最小累积阻力模型的江南水乡河网分区保护研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 8-14.
- [3] 赵军. 平原河网地区景观格局变化与多尺度环境响应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [4] 徐光来, 许有鹏, 王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 776-781.
- [5] LESSCHEN J P, SCHOORL J M, CAMMERAAT L H. Modelling runoff and erosion for a semi-arid catchment using a multi-scale approach based on hydrological connectivity[J]. Geomorphology, 2009, 109(3): 174-183.
- [6] MEERKERK A L, VAN WESEMAEL B, 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] 张欧阳, 熊文, 丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 1-5, 78.
- [8] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河网水系连通特征及其利弊[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 26-31.
- [9] 汪恕诚. 再谈人与自然和谐相处: 兼论大坝与生态[J]. 中国水利, 2004(8): 6-9.
- [10] 金妍. 基于最小累积阻力模型的江南水乡河网分区保护研究—以上海市青浦区为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [11] CLIFF A D, ORD J K. Spatial Processes: Models and Applications[M]. London: Pion, 1981.
- [12] 李序颖, 陈宏民. 居民收入与城市经济水平的空间自回归模型[J]. 系统工程理论方法应用, 2005, 14(5): 395-399.
- [13] 孙敬水, 马骊. 我国城镇居民消费与收入关系的空间自回归模型研究[J]. 数理统计与管理, 2009, 28(1): 117-121.
- [14] 邹艳芬, 陆宇海. 基于空间自回归模型的中国能源利用效率区域特征分析[J]. 统计研究, 2005(10): 67-71.
- [15] 吴玉鸣, 李建霞. 中国省域能源消费的空间计量经济分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2008, 18(3): 395-399.
- [16] 邱炳文, 王钦敏, 陈崇成, 等. 福建省土地利用多尺度空间自相关分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 311-320.
- [17] 赵永, 刘旭华, 孙腾达. 基于空间自回归模型的中国耕地面积变化预测[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 1-5.
- [18] 罗坤, 蔡永立, 郭纪光, 等. 崇明岛绿色河流廊道景观格局[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10): 908-913.
- [19] 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——以秦准河中、下游为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(3): 335-341.
- [20] HUANG S L, LEE Y C, WILLIAM W, et al. Analysis of changes in farm pond network connectivity in the peri-urban landscape of the Taoyuan Area, Taiwan[J]. Environmental Management, 2012, 49: 915-928.
- [21] 王柳艳. 太湖流域腹部地区水系结构、河湖连通及功能分析[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [22] 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.
- [23] 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(4): 389-400.
- [24] 王晓玲. 基于空间滞后模型的区域经济发展影响因素分析[J]. 山西大同大学学报: 自然科学版, 2013, 29(1): 6-9, 33.
- [25] ANSELIN L. Spatial Econometrics: Methods and Models[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988.
- [26] ANSELIN L, FLORAX R J. New Directions in Spatial Econometrics[M]. Berlin: Springer Verlag, 1995.
- [27] 白义琴. 上海浦东新区快速城市化进程中河网变迁特征及水系保护研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [28] 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[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 717-724.
- [29] 邵玉龙, 许有鹏, 马爽爽. 太湖流域城市化发展下水系结构与河网连通变化分析——以苏州市中心区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1167-1172.
- [30] 李娜, 卢培歌, 袁雯. 基于洪涝灾害控制目标的河网结构—调蓄能力情景模拟研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 46-51.

(责任编辑 李万会)



# 基于空间自回归模型的景观格局变化对河网水系连通性影响分析



作者: [沈洁](#), [赵军](#), [尚钊仪](#), [SHEN Jie](#), [ZHAO Jun](#), [SHANG Zhao-yi](#)  
作者单位: [沈洁, 尚钊仪, SHEN Jie, SHANG Zhao-yi \(华东师范大学生态与环境科学学院, 上海, 200241\)](#),  
[赵军, ZHAO Jun \(上海大学环境与化学工程学院, 上海, 200444\)](#)  
刊名: [华东师范大学学报 \(自然科学版\)](#)   
英文刊名: [Journal of East China Normal University \(Natural Science\)](#)  
年, 卷(期): [2015 \(3\)](#)

引用本文格式: [沈洁, 赵军, 尚钊仪, SHEN Jie, ZHAO Jun, SHANG Zhao-yi 基于空间自回归模型的景观格局变化对河网水系连通性影响分析 \[期刊论文\] - 华东师范大学学报 \(自然科学版\) 2015 \(3\)](#)