

豫南丘陵山区农村居民点用地分布影响因素及时空异质性分析

佟艳, 牛海鹏, 樊良新, 林华

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要:为探究城镇化进程中农村居民点格局演变特征及其影响因素,以豫南丘陵山区光山县为例,采用空间自相关分析和局部线性地理加权回归模型(LLGWR)分析了农村居民点用地分布的集聚特征及其影响因素的时空异质性。结果显示:光山县农村居民点主要集聚于县域的中北部,其影响因素存在着显著的时间和空间非平稳性,在不同区位对农村居民点分布的作用强度不同。1985 年农村居民点分布的影响因素包括地理地貌因素和距离交通条件,分别为海拔高度、距最近国道、省道、水系距离和距最近县城距离。到了 2015 年,地理地貌因素的影响作用有所减弱,除海拔高度、距最近国道、省道距离外,农村居民点分布影响因素还包括城镇化率和农户密度。总体而言,适宜的海拔高度、通达的道路交通、较高的城镇化率和人口密度对农村居民点分布具有促进作用。

关键词:农村居民点; 空间异质性; 局部线性地理加权回归模型; 空间集聚

中图分类号:F301.2; K901.8

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0387-07

Factors Affecting Rural Settlements Distribution and Their Temporal and Spatial Heterogeneity in Hilly Region of Southern Henan Province

TONG Yan, NIU Haipeng, FAN Liangxin, LIN Hua

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: In order to reveal the spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors on rural settlements in hilly region of southern Henan Province in the process of urbanization, spatial autocorrelation analysis and local linear geographically weighted regression were used to analyze aggregation characteristics of the rural settlements and their driving factors. The results show that rural settlements of Guangshan were aggregated in north and central of the county, and its affecting factors show strongly non-stationary across spatio-temporal scales; in different regions, the strength and intensity of the effects were different; in year of 1985, the distribution of rural settlements was affected by geographical and geomorphic factors, and traffic factors which included altitude, distance to nearest river, distance to nearest county, distance to nearest national road and distance to nearest provincial road; by year of 2015, the strengthen of geographical and geomorphic factors effect on rural settlements distribution reduced; meanwhile, beside previous factors (i. e. altitude, distance to nearest national road and distance to nearest provincial road), other new factors i. e. rate of urbanization and density of rural households had shown significantly effects on density of the settlements. Suitable altitude, convenience roads, high rate of urbanization and density of rural population can increase the density of rural settlements.

Keywords: rural settlements; spatial heterogeneity; local linear geographically weighted regression; spatial agglomeration

收稿日期: 2021-05-31

修回日期: 2021-06-18

资助项目: 河南省软科学(202400410285); 河南理工基本科研业务费(SKJZD2020-04, NSFRF210430); 河南理工大学博士基金(B2020-16)

第一作者: 佟艳(1981—), 女, 江苏徐州人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用与信息化管理研究。E-mail: tongyan08@126.com

通信作者: 牛海鹏(1974—), 男, 河南南阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地整治、土地复垦和土地生态研究。E-mail: niuhaipeng1974@126.com

农村居民点是乡村三生空间中的生活、生产空间的主要组成^[1]。其空间布局对于土地资源高效利用和乡村空间优化具有重要意义^[2-3]。目前我国处于城镇化快速提升阶段,农村常住人口不断流失,城乡一体化发展持续推进,农村居民点布局演变加快^[4]。因此,探明农村居民点用地布局及其影响因素,对于乡村国土空间优化具有重要意义。

国内外学者对农村居民点布局的相关研究由来已久。欧美发达国家关于农村居民点的相关研究起源较早^[5-6]。近年来,发展中国家的农村居民点研究逐渐受到重视,比如中国、乌兹别克斯坦、缅甸等国家均开展了大量相关研究^[7-9]。在农村居民点分析方法上常采用常规的统计分析^[10]、核密度分析^[11]、缓冲区分析性^[12-13]、景观指数分析法^[14]、空间自相关分析^[15-16]和可达性分析等^[17]研究方法;在影响因素研究中主要采用的均质性的多元线性回归模型^[14],非均质研究方法,如地理加权回归(GWR)等^[18]分析方法则较为少见。

目前关于驱动因素的研究主要采用 OLS 模型,集中于平面数据,缺少对因素的空间非均衡性的探讨。近年来部分学者已尝试采用基于核估计的、非均衡的 GWR 分析驱动因素,对于影响因素的非均衡性研究取得了一定成果。但该研究方法难以避免边界效应,造成结果的部分失真^[19-20]。局部线性地理加权回归模型(LLGWR)是基于 GWR 的改进模型,兼具分析空间异质性和避免边界效应的优势。该方法已

应用于房价^[21]、人口^[19]和景观质量等^[22]驱动因素的研究,罕见于农村居民点研究领域。

豫南丘陵山区,地形复杂多变,土地利用程度高,农村居民点布局分散。近年来,伴随着城镇化进程,农村居民生计分化迅速,加剧了农村居民点的空心化和演变,对当地城乡统筹发展提出了新的考验。本文以豫南丘陵山区 1985 年和 2015 年的 Landsat TM 影像,解译获得农村居民点矢量数据,采用自相关模型和 LLGWR 研究农村居民点用地空间特征及其影响因素的空间异质性。

1 研究区概况

豫南丘陵山区位于淮河以南、南阳盆地以东,主要包括大别-桐柏山区共 14 个县(市)。该地位于河南省南部亚热带向暖温带过渡地带,光照充足,气候较湿润,年均降雨量达 1 027.6 mm。该地区总面积为 26 078 km²,区内地形复杂,包括平畝区(6 340.6 km²)、岗地区(5 524.3 km²)、丘陵山地(13 125.9 km²)及水域(1 087.5 km²)。该地区土壤肥沃,是重要的粮食生产基地。光山县位于豫南丘陵山区东北部(114°32'—115°10'E, 31°42'—32°11'N),为粮食生产大县,面积 1 829 km²,耕地面积 812.4 km²,户籍人口 92 万人,农村居民人均纯收入 9 715 元,人口城镇化率为 34.4%(2015 年)。该县域共有农村居民点 1 280 个,总面积达 12 142.07 hm²,平均规模 9.49 hm²。1985 年和 2015 年的农村居民点空间分布见图 1。

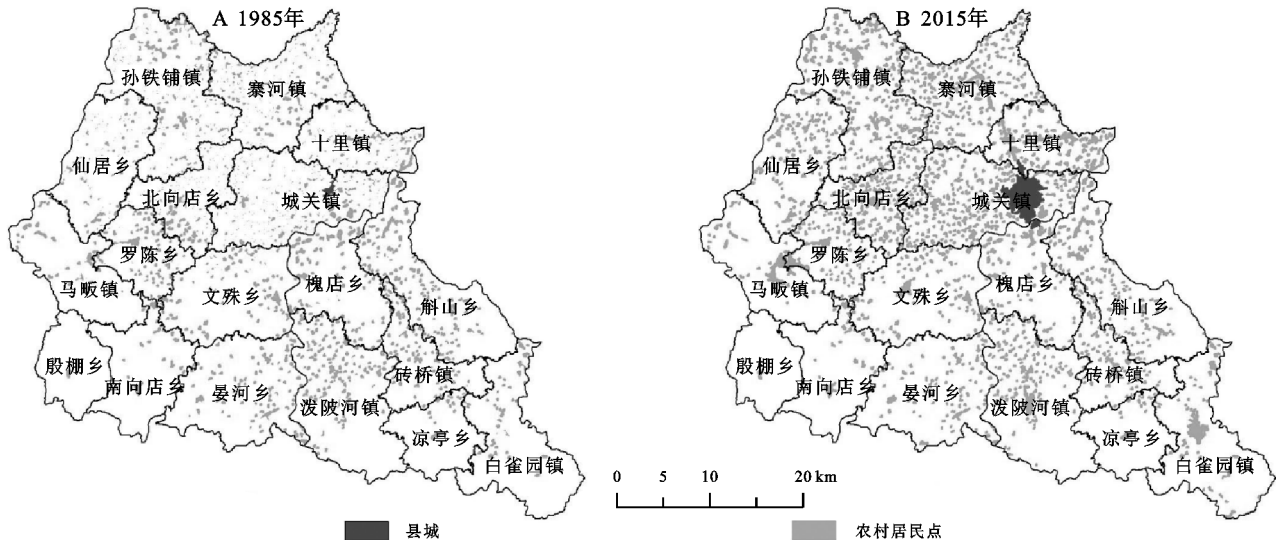


图 1 光山县农村居民点空间分布

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

所使用数据包括:Landsat TM 影像(1985 年, 2015 年,分辨率 30 m),DEM 数据(2008 年,分辨率

30 m)、河南省基础地理数据、光山县社会经济统计数据(1985 年)及光山县统计年鉴(2015 年)等。数据处理过程如下:(1) 将 TM 影像在 ENVI 5.0, ArcGIS 10.2 平台下进行校正、镶嵌、裁剪等处理,而后采用人机交互的方式利用 ArcGIS 10.2 参照土地利用分

类标准进行土地利用分类,进而提取居民点空间数据信息,经过拓扑检验,分别生成 1985 年和 2015 农村居民点用地空间布局图。随后,以全国第二次土地调查数据中的农村居民点图斑为对照,构建混淆矩阵,计算 kappa 值为 0.727,大于 0.7,精度达标;(2) 因该

县农村居民点分散且面积较小,为更好地分析农村居民点的分布特征,在此将研究区域分割成 2 km×2 km 的网格面,以各网格中的居民点面积表征农村居民点用地分布(图 2);(3) 空间距离数据为各网格中心至各要素的最近距离。

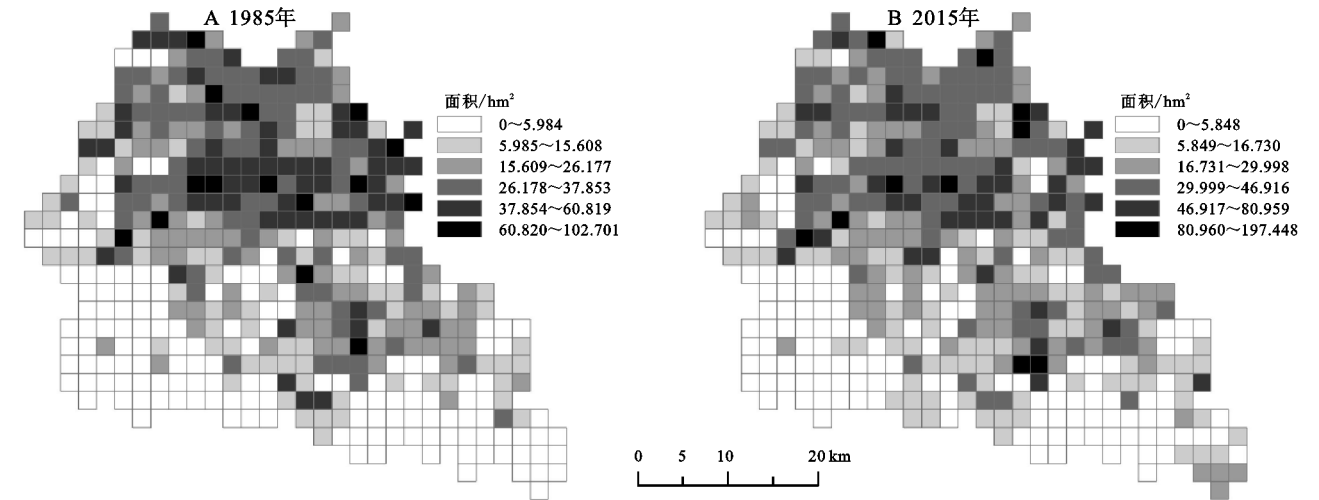


图 2 光山县农村居民点用地 2 km×2 km 网格分布

2.2 研究方法

在分析光山县的农村居民点用地的空间分布特征时,利用软件 Geoda(v1.14.0.0)开展全局自相关指数(Global Moran's *I*)和局部自相关指数(Local Moran's *I*)计算,用于分析该县域农村居民点整体和局部的空间集聚特征。

在影响因素分析时,利用 Arcgis10.2 和 SAM v4.0 分别构建地理加权回归模型(GWR)^[21]和局部线性地理加权回归模型(LLGWR)^[23-25],分析影响因素的空间异质性。

2.3 模型构建

2.3.1 变量选择 在 LLGWR 模型构建中,因变量为光山县农村居民点用地分布,参照相关文献,初选了 4 大类别(地理地貌特征、道路交通条件、社会经济属性和城镇化水平),共 15 个因素为自变量。初选因素为:海拔高度、坡度、坡向、距水系最近距离、距高速、国道、省道、县道最近距离、距县城中心、乡镇中心距离、乡村人均耕地面积、乡村人均收入、乡村人口密度、乡村农户密度和城镇化率。为检测因素的多重共线性,首先进行了 OLS 回归,筛选显著的自变量,并进行方差膨胀因素诊断(VIF)(表 1)。剔除了不显著的且 VIF 值超过 10 的因素。结果显示,不同年份可以纳入 LLGWR 模型的因素亦不相同。1985 年纳入 LLGWR 模型的因素包括海拔高度、距最近水系、国道、省道和县城中心距离 5 个因素;2015 年通过筛选并纳入模型的因素有海拔高度、距最近国道、省道距离、农户密度和城镇化率 5 个因素。

表 1 因子显著性及共线性检验

大类	因子	1985 年		2015 年	
		<i>p</i>	VIF	<i>p</i>	VIF
地理地貌特征	海拔高度	0.002 **	1.713	0.049 **	2.673
	坡度	0.126	1.617	0.521	1.662
	坡向	0.257	1.011	0.765	1.043
	距水系距离	0.000 **	1.222	0.621	2.169
道路交通条件	距最近高速路距离			0.125	2.509
	距最近国道距离	0.000 **	1.202	0.004 **	2.130
	距最近省道距离	0.016 *	1.234	0.000 **	1.625
	距最近县道距离	0.110	1.235	0.207	1.296
	距县城中心距离	0.000 **	1.951	0.643	3.193
	距镇中心距离	0.328	1.457	0.540	1.219
社会经济属性	人均耕地	0.183	3.681	0.228	2.349
	人均收入	0.338	1.081	0.193	2.211
	农村人口密度	0.489	1.451	0.977	1.861
城镇化水平	农户密度	0.801	1.251	0.003 **	3.070
	城镇化率	0.082	1.370	0.001 **	3.979

注: * 代表 $p < 0.05$; ** 代表 $p < 0.01$ 。

2.3.2 模型诊断 以光山县(1985 年、2015 年)农村居民点用地分布为因变量,以 OLS 模型回归中显著的因素为自变量,运用 ArcGIS 10.2 和 SAM v4.0 分别构建 GWR 和 LLGWR 模型(表 2)。统计结果显示,LLGWR 回归模型的解释度(R^2_{adj})显著高于 OLS 模型和 GWR 模型,信息准则(AICc)值显著下降(>3),残差平方和亦显著下降,说明模型相对更优。 p 值均小于 0.01,模型均显著。此外,LLGWR 模型对 1985 年的农村居民点用地布局的解释度高于 2015 年。

表 2 模型诊断结果

年份	模型	AICc	Res.Sum.Sq.	R^2	R^2_{adj}	p 值
1985	LLGWR	3718	63653.240	0.626	0.565	<0.001
	GWR	3759	91862.036	0.455	0.433	<0.001
	OLS	3803	105137.200	0.377	0.371	<0.001
2015	LLGWR	4056	125233.61	0.498	0.410	<0.001
	GWR	4061	184113.192	0.279	0.272	<0.001
	OLS	4062	184636.520	0.277	0.271	<0.001

3 结果与分析

3.1 农村居民点用地的集聚特征分析

空间关系存在非平稳性是使用 LLGWR 模型的基础。在此,首先分析光山县的农村居民点用地的空间分布特征。选取了全局自相关指数(Global Moran's I)和局部自相关指数(Local Moran's I)来分析该县域农村居民点整体和局部的空间集聚特征。结果显示,Global Moran's I 由 1985 年的 0.531(p 值<0.01; Z 值=20.42)下降至 2015 年的 0.391(p 值<0.01; Z 值=12.45),表明县域内农村居民点用地分布呈显著的正相关,且相对于 1985 年而言,光山县农村居民点用地在 2015 年的集聚程度有所降低。局部自相关分析结果见图 3,该县域内农村居民点主要为高一高聚集和低一低聚集的分布模式,高一高聚集区为城关镇、寨河镇、十里堡镇和北向店乡等乡镇;低一低集聚区主要位于南向店乡、殷棚乡、白雀园镇和凉亭镇等乡镇。

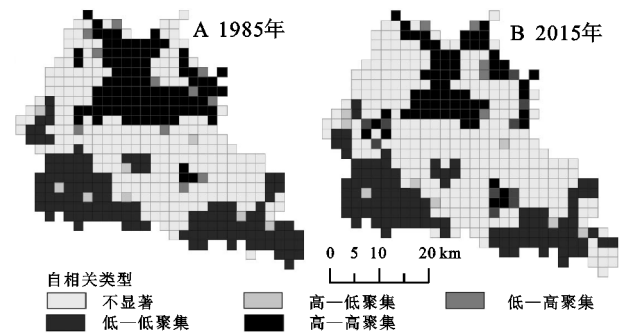


图 3 光山县农村居民点用地分布 LISA 聚类

3.2 影响因素的时空异质性分析

LLGWR 模型中每个样点的计算均包含一组参数,本文选取了影响因素回归系数的最小值、下四分位数、中位数、上四分位数和最大值等参数及其空间分布图对影响因素的时空不均衡性进行分析(表 3—4,图 4—5)。结果显示,地理地貌特征、道路交通条件类因素在 1985 年对农村居民点分布有显著影响,包括海拔高度和距最近水系、国道、省道、县城中心的距离。其中与海拔高度、距最近水系、省道距离整体呈正相关,与距最近国道、县城中心距离整体呈负相关;而 30 a 后(2015 年),社会经济和城镇化的影响更加显著,除海拔高度、距最近国道、省道距离 3 个与

1985 年相同的因素外,具有显著作用的因素还包括了城镇化率和农户密度。其中,农村居民点分布整体上与海拔高度、距最近国道、省道距离呈负相关;而与城镇化率和农户密度呈正相关。

表 3 光山县 1985 年 LLGWR 回归系数描述性统计

变量	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	最大值
海拔高度	-0.8011	-0.088	0.009	0.200	0.778
距最近国道距离	-0.00716	-0.00132	-0.000	0.0007	0.009
距最近省道距离	-0.010	-0.002	0.000	0.001	0.005
距最近水系距离	-0.019	-0.001	0.000	0.001	0.013
距县城中心距离	-0.018	-0.002	-0.000	0.001	0.020

表 4 光山县 2015 年 LLGWR 回归系数描述性统计

变量	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	最大值
海拔高度	-0.988	-0.213	-0.030	0.191	1.187
距最近国道距离	-0.011	-0.002	-0.001	-0.000	0.010
距最近省道距离	-0.014	-0.003	-0.000	0.001	0.008
城镇化率	-4189.768	-143.793	262.575	583.848	7073.000
农户密度	-277.953	-13.329	4.659	39.589	274.468

3.2.1 地理地貌特征对农村居民点用地分布的影响

LLGWR 模型可以在空间上表现回归系数的空间异质性(图 4—5)。结果显示,在丘陵山区,海拔高度与农村居民点用地分布在两个时间节点(1985 年和 2015 年)均显著相关(图 4A、图 5A),且呈现空间异质性。在不同的地区,海拔高度对农村居民点用地分布的影响随着区位的改变而改变。例如,沿竹竿河和泼河两岸,农村居民点用地分布与海拔高度呈正相关,形成正向高值区。在十里堡、北向店镇、白雀园镇和斛山镇等浅山区乡镇,二者呈负相关,形成负向高值区。水系与该县域居民点分布在 1985 年主要呈正相关,其高值区域主要集中于潢河中段,低值区位于斛山乡(图 4D)。到了 2015 年,水系的作用不再显著。

3.2.2 道路交通因素对农村居民点用地分布的影响

1985 年和 2015 年,距最近国道、省道距离两个因素与农村居民点用地分布均呈显著相关,且呈现出较强的空间非均衡性(图 4B—C、图 5B—C),其与农村居民点用地分布主要呈负相关。通达的道路系统对农村居民点分布具有集聚作用,随着距离道路系统距离的增加,居民点分布逐渐稀疏。其回归系数的负向高值区集中在马畈、北向店镇等地;正向高值区位于在十里镇等地附近。尽管十里铺镇距离主干道路体系较远,但由于受到合适的海拔高度、县城中心和水系的综合影响,居民点分布依然较密。相对于 1985 年,道路交通因素在 2015 年的集聚作用更强。县城对农村居民点分布具有凝聚作用,距离县城中心距离在 1985 年与农村居民点分布整体呈负向相关(图 4E),但到了 2015 年,其不具备显著性。

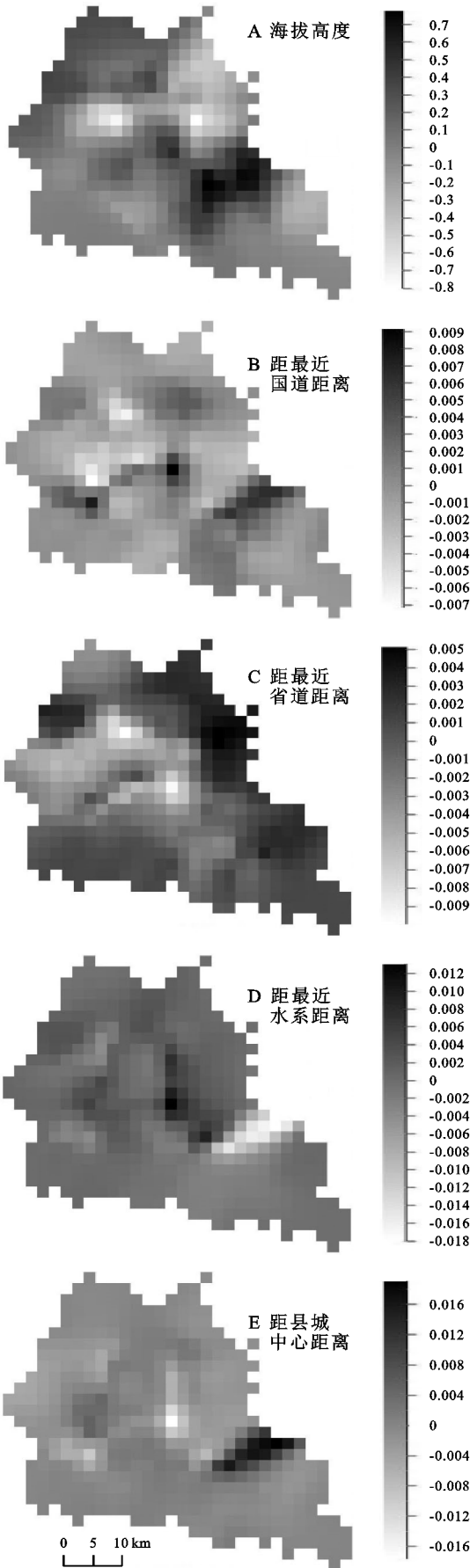


图 4 1985 年光山县农村居民点用地分布 LLGWR 模型
回归系数空间分布

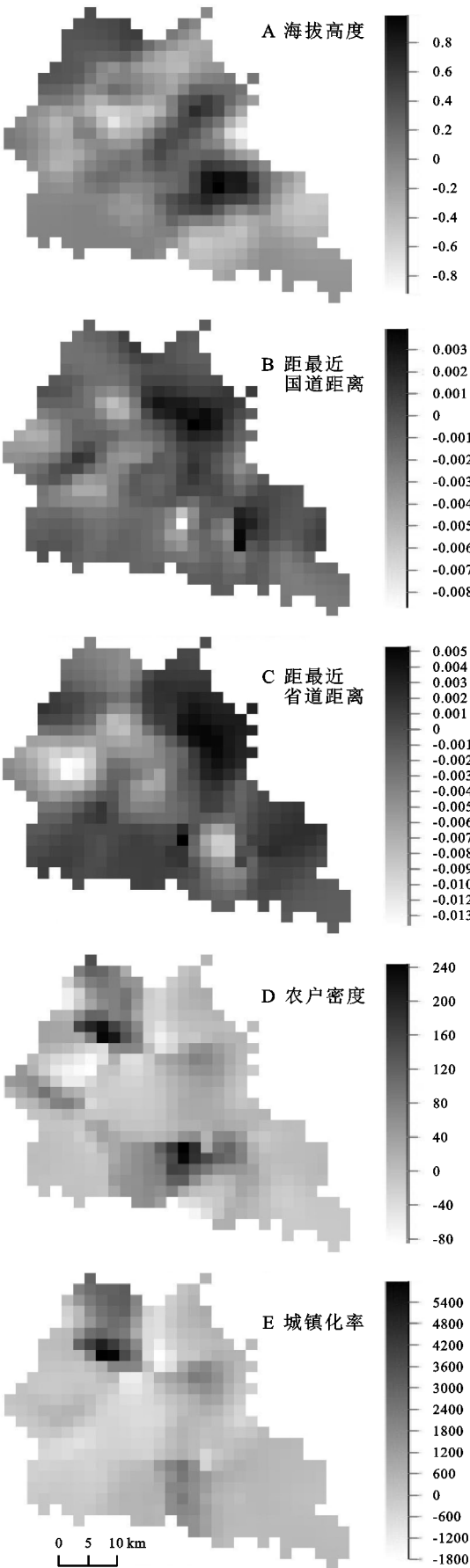


图 5 2015 年光山县农村居民点用地分布 LLGWR 模型
回归系数空间分布

3.2.3 社会经济因素对农村居民点用地分布的影响

到2015年,地理地貌特征类因素和道路交通类因素依然是农村居民点用地分布的主导,其中,海拔高度、距最近国道、省道距离3个因素依然与农村居民点用地显著相关(图5A—C),但水系和县城的影响作用不再显著。究其原因是近30a来豫南丘陵山区农村交通和基础设施得到了很大的提升,水系和县城的服务功能不再突出,凝聚力下降。此时,农户密度与农村居民点用地分布的相关性逐渐凸显,与农村居民点分布呈正相关(图5D)。宅基地的增加是农村居民点面积扩张的直接原因,2015年,光山县农村人口相对于1985年增长了约20%,新立户的农户的宅基地造成了农村居民点面积的扩张。

3.2.4 城镇化水平对农村居民点用地分布的影响

2015年,城镇化率成为农村居民点分布增长新的因素,其作用系数在孙铁铺镇、城关镇、陂泼河镇等地形成数个高值区。相对较高的城镇化率一定程度体现了该乡镇社会经济发展水平,较高的经济条件是农村居民点分布增加的基础(图5E)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

豫南丘陵山区居民点布局分散,且空心化严重。造成了资源的浪费和基础设施的重复建设。结果显示,随着豫南丘陵山区社会的发展和城镇进程推进,农村基础设施得到不断加强,农村居民点用地布局对地理地貌的依赖程度有所降低,社会经济因素和城镇化水平对居民点用地布局的影响有所增强,该结果与杨斌等^[26]学者的关于高山贫困地区农村居民点的研究结果相似。与此同时,农户分化加快,农村居民便捷出行的需求更加迫切,因此,道路交通条件与农村居民点用地分布显著相关。增长的城镇化率和农户密度也不断提升着农村居民点布局聚集度。综上,根据豫南丘陵山区农村居民点用地的空间布局特征以及影响因素的空间异质性,提出优化农村居民点布局的建议:(1)依据农村居民点集聚趋势合理规划农村居民点。在规模较大,交通条件较好或地势优越的农村居民点,进一步优化基础设施,提升该类农村居民点的凝聚力;(2)对于空心化严重,规模较小、地势不佳的居民点,可引导居民主动向交通条件好,人口集中的较大规模的居民点迁移。

研究表明社会经济和城镇化等因素对农村居民点的分布影响逐渐加强,但是由于数据获取的限制,此处初选的社会经济和城镇化因素有限,未来研究可增加该类因素的选择。

4.2 结论

(1)农村居民点用地在空间上存在显著的集聚特征。农村居民点分布全局自相关指数由0.531(1985年)下降到0.391(2015年),整体呈现空间正相关,但其集聚强度在减弱。局部自相关分析结果显示,农村居民点的高—高集聚区域主要位于光山县的中北部,低—低集聚区域主要位于县域的西南和东南部。

(2)对比分析所构建的农村居民点用地分布OLS,GWR和LLGWR模型,结果显示LLGWR模型解释度和精度更高,更适宜对于豫南丘陵山区的农村居民点用地分布研究。

(3)农村居民点用地分布影响因素随时间变化。1985年,与农村居民点用地分布作用显著的因素为海拔高度、距最近河流、国道、省道、县城距离5个因素;而到了2015年,影响因素纳入了社会经济和城镇化水平指标,包括了海拔高度、距最近国道、省道距离、农户密度和城镇化率5个因素。

(4)影响农村居民点用地分布的因素作用强度均随空间转移而变化,呈现显著的空间异质性。海拔高度在竹竿河和泼河两岸形成正向高值区域。而在海拔相对较高的浅山区,农村居民点用地分布与海拔呈负相关;距离河流的距离在潢河中段形成正向高值区;距主要道路的距离与农村居民点分布主要呈负相关,距离越远,居民点分布越稀疏。至2015年,农户密度和城镇化率与农村居民点分布主要呈正向相关,其作用在孙铁铺镇、城关镇和陂泼河镇尤为凸显。

参考文献:

- [1] 韦江伟,赵锐锋,李玲慧,等.干旱区三生用地时空演变特征及空间冲突研究:以黑河中游地区为例[J].水土保持研究,2021,28(4):284-292,419.
- [2] 张贵军,朱永明,臧亮,等.新型城镇化背景下昌黎县农村居民点空间重构评价与分区[J].农业工程学报,2016,32(12):237-246.
- [3] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
- [4] 金贵,邓祥征,张倩,等.武汉城市圈国土空间综合功能分区[J].地理研究,2017,36(3):541-552.
- [5] Williams M. Settlements in rural areas: Planned landscapes and unplanned changes in south Australia[J]. Landscape Planning,1977,4:29-51.
- [6] Haggett P. Howard Bracey: pioneer in rural settlement studies[J]. Journal of Rural Studies,1996,12(4):329-330.
- [7] Long H, Liu Y, Wu X, et al. Spatio-temporal dynamic patterns of farmland and rural settlements in Su-Xi-Chang region: Implications for building a new countryside in coastal China[J]. Land Use Policy,2009,26(2):322-333.

[8] Conrad C, Rudloff M, Abdullaev I, et al. Measuring rural settlement expansion in Uzbekistan using remote sensing to support spatial planning[J]. *Applied Geography*, 2015, 62: 29-43.

[9] Hoffman-Hall A, Loboda T V, Hall J V, et al. Mapping remote rural settlements at 30 m spatial resolution using geospatial data-fusion [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111386.

[10] 董光龙, 许尔琪, 张红旗. 华北平原不同乡村发展类型农村居民点的比较研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(11): 1-8.

[11] 佟艳, 牛海鹏, 樊良新. 不同城镇化进程农村居民点空间演变及影响因素研究[J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(1): 152-160.

[12] Cao Y, Bai Z, Sun Q, et al. Rural settlement changes in compound land use areas: Characteristics and reasons of changes in a mixed mining-rural-settlement area in Shanxi Province, China[J]. *Habitat International*, 2017, 61: 9-21.

[13] Yang R, Xu Q, Long H. Spatial distribution characteristics and optimized reconstruction analysis of China's rural settlements during the process of rapid urbanization[J]. *Journal of Rural Studies*, 2016, 47: 413-424.

[14] 师满江, 颜耀文, 曹琦. 干旱区绿洲农村居民点景观格局演变及机制分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 692-702.

[15] 姜广辉, 何新, 马雯秋, 等. 基于空间自相关的农村居民点空间格局演变及其分区[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 265-273.

[16] 宋文, 吴克宁, 刘浩然, 等. 基于地理空间适宜性指数自相关的农村居民点整理分区[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 249-257.

[17] 刘耀林, 范建彬, 孔雪松, 等. 基于生产生活可达性的农村居民点整治分区及模式[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 247-254.

[18] 郑文升, 姜玉培, 李孝环, 等. 公安县农村居民点用地分布影响因素评价: 基于 GWR 的空间异质性分析[J]. *人文地理*, 2015, 30(5): 71-76.

[19] Farber S, Páez A. A systematic investigation of cross-validation in GWR model estimation: Empirical analysis and Monte Carlo simulations[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2007, 9(4): 371-396.

[20] Wang N, Mei C L, Yan X D. Local linear estimation of spatially varying coefficient models: an improvement on the geographically weighted regression technique[J]. *Environment and Planning A*, 2008, 40(4): 986-1005.

[21] 王新刚, 孔云峰. 城市住房价格局部线性地理加权回归分析: 以湖北省黄石市为例[J]. *中国土地科学*, 2015, 29(3): 82-89.

[22] 任国平, 刘黎明, 卓东. 都市郊区景观生态质量空间差异及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 252-263.

[23] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots[J]. *J Amer Stat Assoc*, 1979, 74(368): 829-836.

[24] Bowman A W. An alternative method of cross-validation for the smoothing of density estimates [J]. *Biometrika*, 1984, 71(2): 353-360.

[25] Stephen A S, Wagner A K. Assessing the market value of real estate property with a geographically weighted stochastic frontier model[J]. *Real Estate Economic*, 2008, 36(4): 717-751.

[26] 杨斌, 王占岐, 张红伟, 等. 高山贫困地区农村居民点空间格局演变特征及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 285-293.



(上接第 386 页)

[23] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 592-602.

[24] 于媛, 韩玲, 李明玉, 等. 哈长城市群生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 293-300.

[25] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估: 以广东省为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 22-28.

[26] 申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 等. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 79-91.

[27] Jopke C, Kreyling J, Maes J, et al. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 49(2): 46-52.

[28] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 64-78.

[29] 吴晶晶, 田永中, 许文轩, 等. 基于 CA-Markov 模型的乌江下游地区土地利用变化情景分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 133-139.

[30] 徐彩仙, 巩杰, 李焱, 等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4291-4301.