

利用广义加性模型解析长江中游 城市群城镇用地扩展驱动力

王海军^{1, 2} 任经纬¹ 张彬¹ 徐姗³ 黄鑫鑫¹ 洪松¹¹

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

2. 武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079;

3. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193)

【摘要】: 研究城镇用地扩展的时空驱动机制对城市群的科学可持续发展与国土空间规划具有重要意义。利用广义加性模型(General Additive Model, GAM), 选取社会经济因子、自然因子和邻域因子, 解析长江中游城市群 1990~2015 年城镇用地扩展驱动力的时空分异特征, 挖掘各子城市群的核心驱动力并对其进行功能识别。结果表明: (1) 25 年间, 长江中游城市群驱动因子时空差异显著。核心城市武汉、长沙、南昌极化效应明显, 涓滴效应逐渐显现, 但城市群仍未打破行政区划壁垒。(2) 三大子城市群的核心驱动因子差异显著。其中, 人口和地均 GDP 对各子城市群城镇用地扩展影响最大, 武汉城市圈和环鄱阳湖城市群的空间溢出效应高于长株潭城市群, 且城镇用地扩展模式渐由单核驱动发展为双核驱动。(3) 核心驱动因子与城市群城镇用地扩展之间具有显著的非线性关系, 且呈现地域性和阶段性特征。(4) GAM 模型能够解释城镇用地扩展过程中各因子之间的非线性关系, 较 Logistic 和 Nonlinear-Logistic 模型具有更高的拟合优度和验证精度, 表明了其探索非线性驱动力的优势。

【关键词】: 城镇用地扩展 驱动力 广义加性模型 非线性

【中图分类号】: F299.27 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)01-0032-12

改革开放以来, 我国城市化进程加快, 人口城镇化率已由 1978 年的 17.92% 增长至 2018 年的 59.58%^[1]; 近年来, 随着新型城镇化和“一带一路”等国家重大发展战略的实施, 城市群作为区域国土空间规划核心载体, 逐渐成为地理学研究的热点^[2~5]。城镇用地扩展作为工业化和城镇化的直观表现, 在新时代中国经济转型期揭示其时空驱动规律, 对推进城市群协同发展和国土空间优化有着重要意义。

自 20 世纪 90 年代, 土地利用/覆被变化(LUCC)计划被提出后, 学界针对城镇用地扩展的驱动机制做了广泛而深入的研究, 相关研究方法和模型层出不穷。纵观已有研究, 学者指出城市群系统演变是融合多驱动因子共同作用的复杂非线性变化过程^[6], 在此过程中驱动因子的影响并非单调线性变化。基于这一规律, 国内外学者对城市群城镇用地扩展驱动机制的研究方法大致可分为线

作者简介: 王海军(1972~), 教授, 研究方向为地理模拟、城市规划和土地资源评价. E-mail: landgiswhj@163.com

徐姗 E-mail: xushan86@cau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41571384); 国家自然科学基金重点项目(71433008); 国土资源部土地资源调查评价项目(DCPJ161207-01)

性模型和非线性模型两类^[7]。常见的线性模型主要包括多元线性回归模型^[8]、多维灰色模型^[9]、关联性分析^[10]、主成分分析^[11]、Logistic 回归模型^[12]、GWR 模型^[13]等,以上模型虽然能有效量化城镇用地扩展及其驱动因子间的相关关系,但是通常无法有效消除变量间多重共线性的负面影响,且不能准确解释自变量和因变量间的非线性特征^[14]。随着计算机科学的兴起,学者们开始采用人工智能算法解决地理学中的非线性问题,神经网络^[15,16]、随机森林^[6]、支持向量机^[7]、核学习机^[17]等方法被广泛用于城市扩展模拟研究。人工智能算法能够建立城市扩展与影响因素间非线性关系,取得了良好的模拟精度,但存在忽视线性关系、过度学习和参数物理意义不明确等问题,结果有一定局限性^[18]。不同阶段的城镇用地和驱动因子相互影响,其中存在着线性和非线性交错的复杂联系,而现有组合模型主要为机械的线性组合和非线性组合,单一类型模型的组合往往追求精度的提高,而忽视了线性和非线性关系的有机融合,导致模型存在失效现象^[7]。

如何耦合城镇用地扩展过程中的线性和非线性特征,对深入理解城镇用地扩展时空机制的演变规律具有重要意义。广义加性模型(General Additive Model, GAM)因其能很好地处理上述问题而逐渐受到关注^[19]。该模型利用非固定的平滑函数刻画自变量与因变量之间的线性和非线性关系^[20,21],能够灵活地识别每个驱动因子的作用强度和优劣排序,对复杂的城市时空演变系统有较强的分析能力。目前, GAM 模型由于其高精度、高灵活性和过学习风险小的优良特性^[22],已在生态学物种分布模拟^[23]、气象影响因子识别^[24,25]、降水特征分析^[26]、城市演变模拟^[14,27,28]等领域得到了广泛应用。

鉴于此,本文利用 GAM 模型,分析城镇用地扩展与多维驱动变量间的线性与非线性关系,识别驱动因子作用强度,探究城镇用地扩展驱动机制的时空分异特征,并解析核心驱动因子及其非线性特征。此研究深入挖掘了长江中游城市群及其内部各子城市群的发展规律和差异,以期在城市群区域协同发展、空间开发格局优化和资源配置提供决策支持。

1 研究区域

长江中游城市群位于我国中部长江中游一带,由武汉城市圈、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体,包括湖北、湖南、江西 3 省 31 市的国家级特大型城市群,区域面积约为 31.7 万 km²。本文的研究范围为 2015 年国务院批准的《长江中游城市群发展规划》中划定的区域,具体城市群区位见图 1。

2017 年,长江中游城市群以占据全国仅 3.4%的土地面积和 9.0%的人口数量创造了 9.6%的经济总量。长江中游城市群肩负着我国中西部区域协同发展的伟大使命,被定位为中国经济新增长极、“两型”社会建设引领区,是长江经济带的重要组成部分,在促进中部崛起和全面深化改革进程中占据重要的战略地位。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究所使用的数据主要包括来源于中国科学院资源环境科学数据中心提供的覆盖长江中游城市群的 1990、1995、2000、2005、2010、2015 年 6 个时期的土地利用栅格数据集(30m×30m)、人口和地均 GDP 公里网格数据(1km×1km)、DEM 数据(1km×1km)以及长江中游城市群矢量路网数据和行政区划矢量数据。本文利用 6 期城镇用地数据进行叠置分析,获取 25 年间武汉、长沙、南昌的城镇扩展变化图(图 1)。参考已有研究经验^[29,30],并考虑数据的可获取性和科学性原则,选取 3 类要素 9 种驱动因子进行城镇用地扩展驱动力分析。①社会经济要素:人口空间分布数据(V_1)、GDP 空间分布数据(V_2);②自然要素:DEM(V_3)、坡度(V_4);③邻域要素:距城市中心距离(V_5)、距高速距离(V_6)、距国道距离(V_7)、距铁路距离(V_8)、距水域距离(V_9)。将城镇用地扩展状态作为因变量(扩展用 1 表示,未扩展用 0 表示),驱动因子作为自变量,系统随机抽样选取 0、1 值相同的约 25 万个数据点^[31],并将各个自变量的属性值提取至样本点中,进行极差标准化的无量纲处理,构建模型所需的样本数据集。1990~2015 年所有变量经过计算均通过 p 值小于 0.05 的显著性检验。

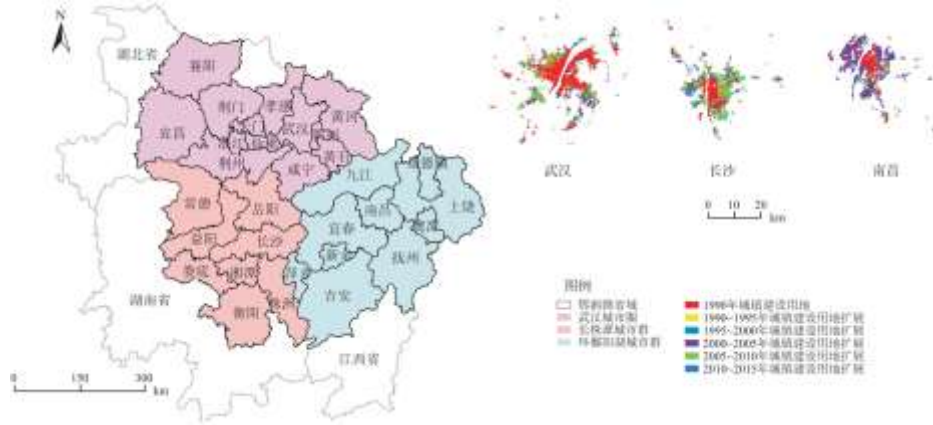


图 1 长江中游城市群城镇用地扩展

2.2 研究方法

广义加性模型 (GAM) 是广义线性模型 (GLM) 的扩展, 是将广义线性模型和可加模型结合的非参数回归模型。与常见的统计模型不同, GAM 模型由数据驱动, 利用“后项拟合算法”计算每个样条函数, 并自动选择合适的函数对自变量进行拟合^[32, 33]。传统的 Logistic 回归、多元线性回归等模型在分析城镇用地扩展过程的前提是自变量与因变量线性相关^[14], 未考虑城镇用地扩展系统的非线性机制, 从而导致模型之间的数据冗余和整体精度下降。而 GAM 模型克服了上述模型的缺点, 降低了线性假定带来的模型风险, 能较好表征城镇用地扩展时空过程中的线性与非线性特征, 更加全面地探究城市群城镇用地扩展的时空驱动机制, 模型的基本形式为:

$$g(E(Y | X_1, X_2 \cdots X_n)) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n f_i(X_i), \quad (1)$$

$$\forall E f_i = 0$$

式中: g 是连接函数; β_0 为截距项, $f_1, \dots, f_n$ 表示连接自变量的平滑函数, 本文采用惩罚 3 次回归样条函数来刻画变量间的非线性响应关系。此处, 由于因变量 Y 为离散的 0, 1 值, 因此使用 Logit 连接函数 $\text{Logit}(y) = \ln \frac{y}{1-y}$, 由此可以进一步推导模型为:

$$\text{Logit}(Y_i) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n f_i(X_i) + \epsilon_i \quad (2)$$

式中: Y_i 为城镇用地扩展状态; X_i 为各驱动因子; ϵ 为误差项。

3 结果与分析

3.1 模型结果

为了检验 GAM 模型在城镇用地扩展驱动力研究中的适用性和准确性, 本文将所有样本数据点代入模型进行参数计算, 并将模型运算结果与 Logistic 模型、Nonliner-Logistic 模型进行精度对比, 见表 1。

表 1 GAM 模型与 Logistic、Nonliner-Logistic 模型准确性对比

模型	R ²	平均残差	残差平方和	莫兰指数	赤池信息准则
Logsitic	48.2%	0.97	182350	0.41	182370
Nonlinear-Logistic	49.1%	0.54	26607	0.75	140860
GAM	60.5%	0.50	24663	0.28	130586

可以看出,GAM 模型的平均残差、残差平方和、莫兰指数及 AIC 值均显著低于其他 2 个模型,且有着更高的拟合优度,证明顾及了变量之间非线性关系的 GAM 模型能够较为准确地揭示城镇用地扩展的驱动因素^[34]。

本文首先对单个驱动因子与城镇用地扩展关系进行检验,结果表明:所有驱动因子的自由度均大于 1,证明城镇用地扩展是受驱动因子影响的非线性的动态过程^[35],其中,地均 GDP 和人口解释偏差百分比^[28]最高,分别为 50.03%和 49.08%,即其对城镇用地扩展的作用强度最为显著;而多因子组合结果表明:包含所有驱动因子的模型性能最优,故选择 9 个驱动因子进行多因子 GAM 模型构建。

3.2 城镇用地扩展驱动力分析

3.2.1 驱动因子作用强度时空分异特征

通过提取各驱动因子的 F 统计值判断对城镇用地扩展影响最大的驱动因子,F 统计值越大,其相对影响值越大^[36,37],采用自然断点分级法将作用强度划分为 5 个等级,由强到弱分别是 I、II、III、IV、V。城镇用地扩展驱动力空间分异特征结果见图 2、3、4。

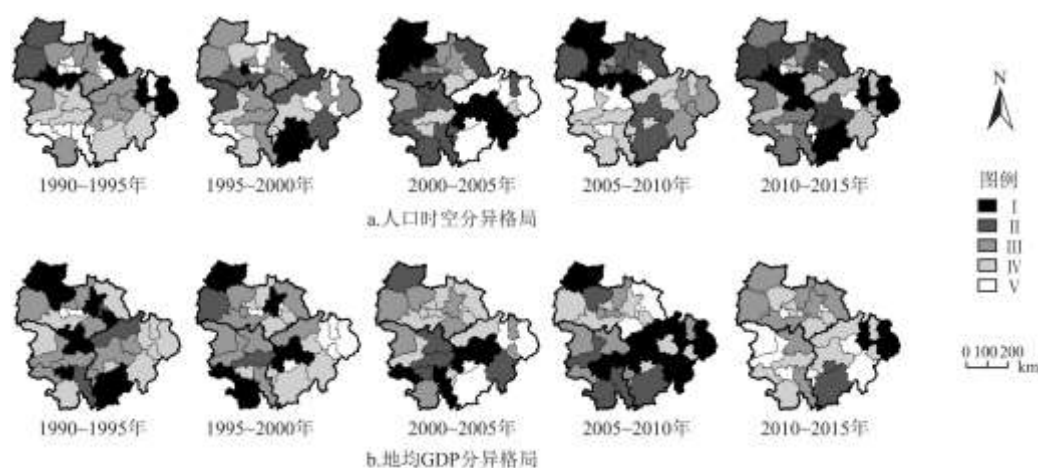


图 2 城镇用地扩展社会经济驱动因子作用强度时空分异格局

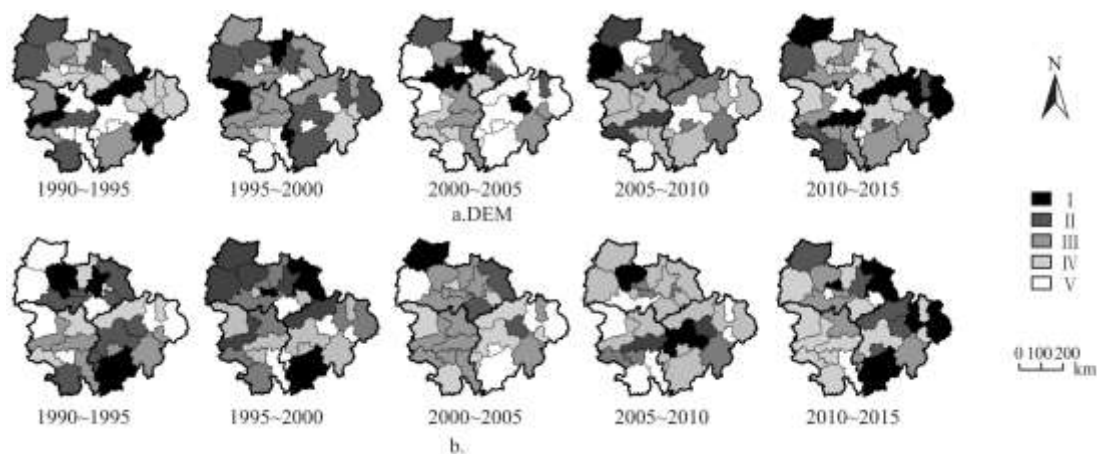


图3 城镇用地扩展自然驱动因子作用强度时空分异格局

人口因子作用强度分布较为均匀,围绕武汉、长沙、南昌三市呈先集聚后均匀辐射趋势。1990~1995年人口因子高强度区域主要集中于赣北及天门、潜江、仙桃外围。1995~2000年高强度区域向鄂湘赣三省交界区域以及吉安、抚州集聚;2000~2005年形成以长沙-南昌组成的环形高强度区域,2005~2010年高强度区域重心北移,分布于以武汉为中心的“C”字型区域;随后5年最终形成沿武汉—长沙—南昌三角形均匀分布格局。从全局演化特征来看,武汉、长沙和南昌是长江中游城市群的核心城市和重要增长极,在城市发展过程中逐渐演变为人口集聚中心。武汉城市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群的协同发展也使得三大核心城市周围出现多个城市功能核心组团,人口要素围绕三大核心城市表现出显著的极化作用。

地均GDP因子高强度区域重心先集聚在武汉周围,逐渐南移后呈均衡分布状态。1990~2000年地均GDP高强度区域主要集中于武汉—鄂州、湘潭—娄底—衡阳及赣南一带;2000~2010年高强度区域向南迁移趋势明显,地均GDP作用强度南北差异显著,形成了以长沙和南昌为核心的湘赣交界高值集聚区域。2010~2015年间因子作用强度除赣东南外基本趋于均衡。可以看出,以武汉为中心的武汉城市圈外溢效应明显弱于长株潭城市群及环鄱阳湖城市群,这得益于规模经济的发展和城市间联系的加强,尤其是长株潭一体化和南抚一体化进程加速。整体来看,长中游城市群经济要素涓滴效应初现,表现出较强的空间溢出特征,但仍未打破省级行政区划壁垒,经济协同一体化发展仍需加强。

自然因子中,高程因子的作用强度在各个阶段表现出不同的分布特征,高强度区域主要分布于武汉周围及其中西部的鄂西山脉,湘鄂交界处的武陵山脉和雪峰山脉以及湘鄂赣交界处的幕府山脉,这些地区城镇用地扩展受山地影响较大。坡度因子与高程因子略有不同,主要表现为随时间推移,高强度区域向东部大别山脉及武夷山脉迁移趋势。

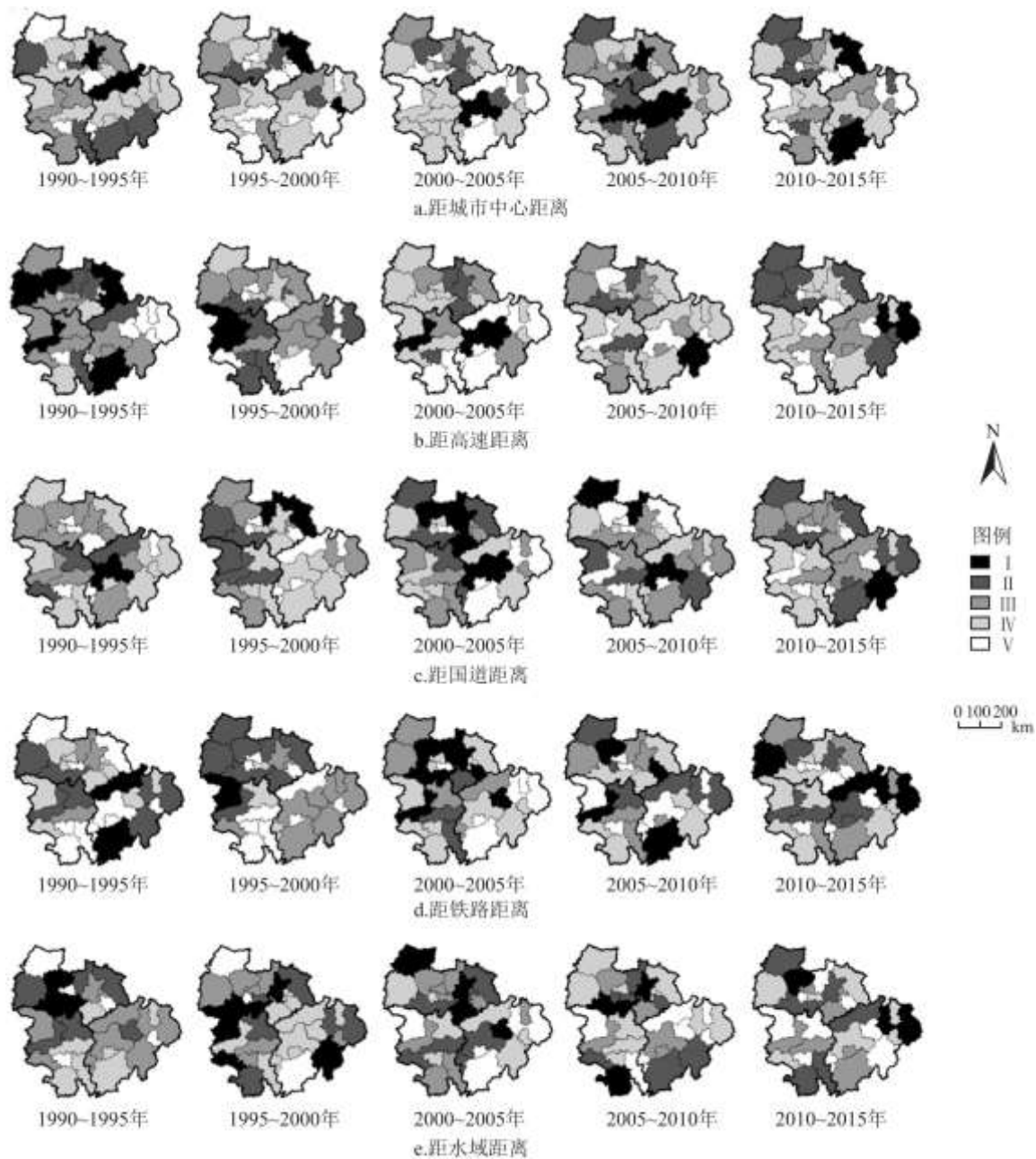


图4 城镇用地扩展邻域驱动因子作用强度时空分异格局

邻域因子中,距城市中心距离因子的高强度区域在1990~2005年间主要集中于武汉—仙桃—荆州、九江—岳阳—益阳以及吉安—株洲三块平行带状区域;2005~2010年形成了以武汉—长沙—南昌为支点的三角形核心集聚区,随后再次向外扩散。距高速公路因子和距国道距离因子作用强度空间分布格局演变趋势大体相同,集中呈现两个特征:一、高强度区域围绕武汉—长沙—南昌先收缩后扩散并渐趋稳定;二、公路对城镇用地扩展的影响重心由西向东逐渐迁移。距铁路距离因子作用强度时序变化较为明显,1990~1995年高强度区域分布较为分散,此后10年间以天门—潜江—仙桃为中心向内收缩,2005年后高强度区域多集中于中部九江—岳阳—益阳区域。距水域距离因子高强度区域总体呈中间高,南北低的空间分布格局,长江流域的沿江城市带宜昌—荆州—武汉—黄石—鄂州构成的带状区域受水域影响显著。

3.2.2 子城市群城镇用地扩展驱动力差异对比

(1) 核心驱动因子时序变化

为了进一步探析武汉城市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群在城镇用地扩展进程中核心驱动因子的变化差异, 本文分别统计三大子城市群各阶段驱动因子 F 统计值, 并结合图 5 从宏观视角识别各阶段核心驱动因子。

由图 5 可知, 25 年间三大子城市群核心驱动因子时序变化存在显著的多样化和差异化特征。其中, 人口因子和地均 GDP 是对 3 个子城市群城镇用地扩展影响最大的驱动因子, 其作用强度在 25 年间呈现先降后升的阶段特征。人口因子作用强度表现为: 武汉城市圈>环鄱阳湖城市群>长株潭城市群, 地均 GDP 因子作用强度表现为: 长株潭城市群>武汉城市圈>环鄱阳湖城市群。人口增长和经济发展必然导致对建设用地需求的增加, 进一步提高了城市群城镇化水平。高程和坡度在各子城市群的作用强度最不显著。邻域因子对各子城市群城镇用地扩展的影响差异略有不同, 距水域距离整体作用强度变化不大, 而距城市中心距离、距国道距离和距铁路距离是武汉城市圈和环鄱阳湖城市群主要驱动因子, 且作用强度在 25 年间表现出波动上升趋势。至 2010~2015 年, 距城市、国道、铁路、高速距离已成为三大子城市群核心驱动因子, 说明城市中心的辐射效应和道路的通达作用已逐渐成为推动城市发展新的增长极。

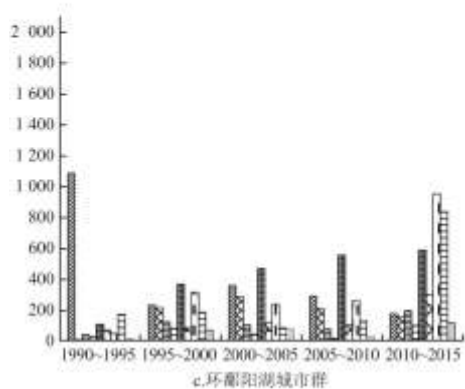
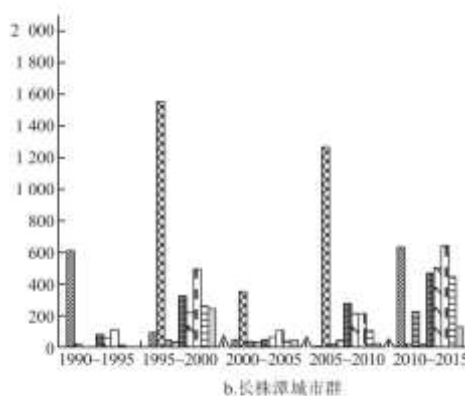
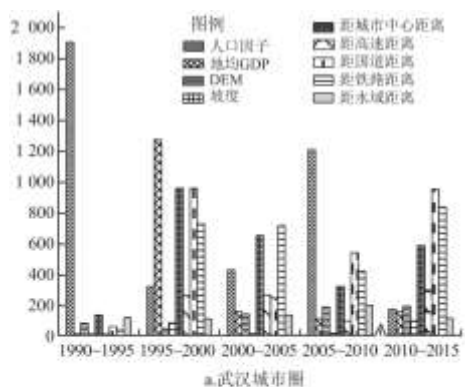


图 5 三大子城市群城镇用地扩展驱动力差异对比

(2)子城市群发展功能核心识别

将人口因子 (V_1)、地均 GDP (V_2)、距城市中心距离 (V_3) 和距各级道路距离 (V_6 、 V_7 、 V_8) 分别表征为人口规模、经济水平、经济区位及地理区位四大功能核心,根据功能核心的数量将城市群扩展驱动类型分为单核、双核和多核驱动^[8],结果见表 2 所示。1990~1995 年,三大子城市群的核心驱动因素均为人口规模,说明在这一时期人口规模增长,城镇用地扩展进程加速。1995~2005 年,武汉城市圈呈现经济水平、经济区位、地理区位、人口规模多功能核心交替主导城镇用地扩展的格局;环鄱阳湖城市群由经济区位和地理区位双核心主导变为多核心驱动城镇用地扩展;而长株潭城市群则呈现经济水平单核心驱动扩展的持续性特征,说明这一时期经济的快速发展加速了城市化进程,也为后期城市群发展注入了强劲的动力。2005~2010 年,随着“中部崛起”战略目标的制定以及“两型社会”试验区的相继批复,各子城市群有了清晰的城市发展功能定位,城镇用地扩展核心驱动力也随之明确,三大子城市群扩展均呈单核驱动格局。2010~2015 年,在长江中游城市群一体化发展的导向下,各子城市群间联系日益密切,城镇化发展质量和水平全面提高,城镇用地扩展主导因素也表现出多极化和均衡化的趋势。武汉城市圈以及环鄱阳湖城市群属于地理区位和经济区位双核驱动城市群,长株潭城市群则属于人口规模和地理区位双核驱动。

表 2 三大子城市群城市发展核心驱动力

	1990~1995 年	1995~2000 年	2000~2005 年	2005~2010 年	2010~2015 年
武汉城市圈	人口规模	经济水平 经济区位 地理区位	地理区位 经济区位 人口规模	人口规模	地理区位 经济区位
长株潭城市群	人口规模	经济水平	经济水平	经济水平	人口规模 地理区位
环鄱阳湖城市群	人口规模	经济区位 地理区位	经济区位 人口规模 经济水平	经济区位	地理区位 经济区位

(3)核心驱动因子非线性诊断

为深入挖掘三大子城市群核心驱动因子与城镇用地扩展的线性及非线性作用关系,将多变量 GAM 模型进一步处理,利用核心驱动因子的平滑回归函数,制作城镇用地扩展影响效应图,见图 6、图 7、图 8。其中,实线表示核心驱动因子对城镇用地扩展的平滑拟合曲线,虚线表示拟合的加性函数的逐点标准差(置信区间的上、下限)。横轴为自变量的实际值,纵轴为核心驱动因子对城镇用地扩展的平滑拟合值,纵轴括号内数值则代表函数的估计自由度。

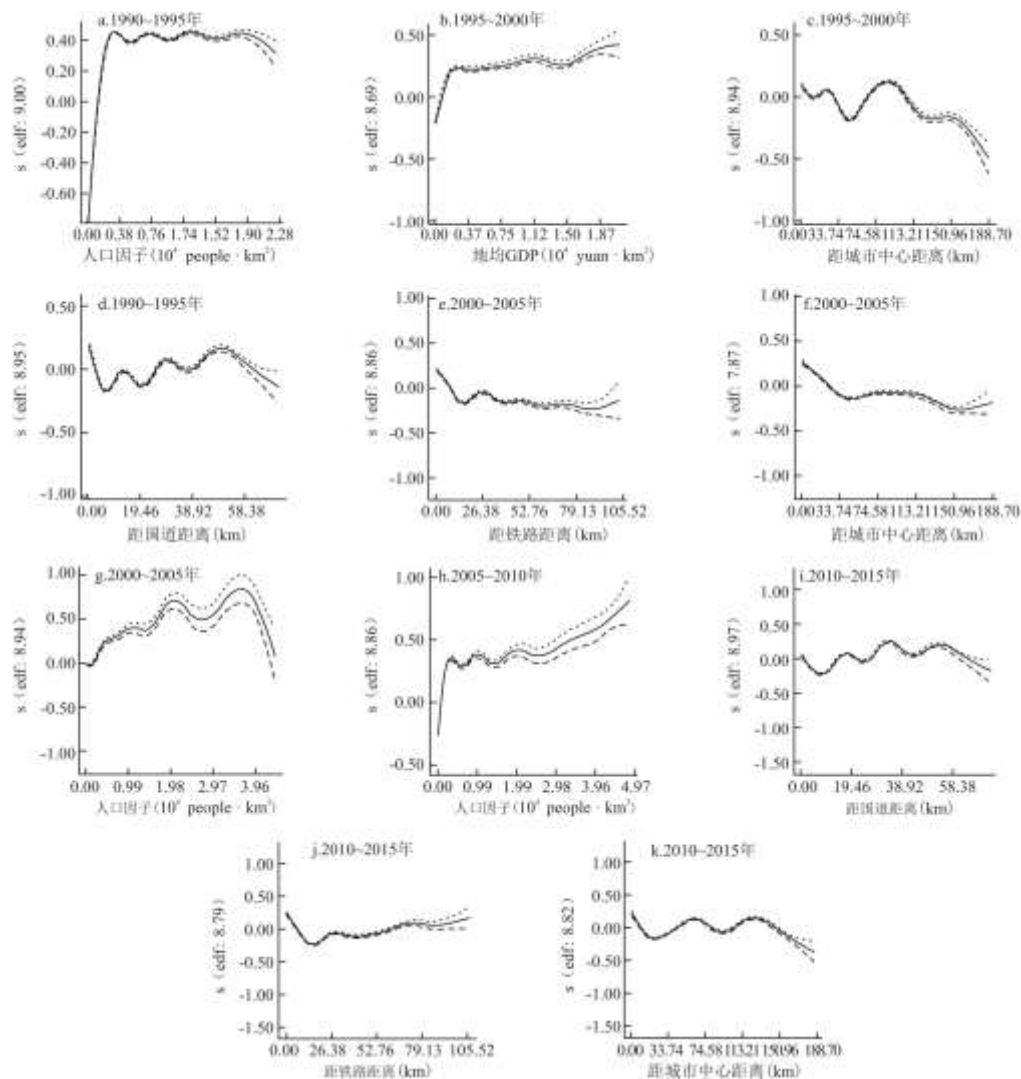


图6 武汉城市圈核心驱动因子对城镇用地扩展影响效应

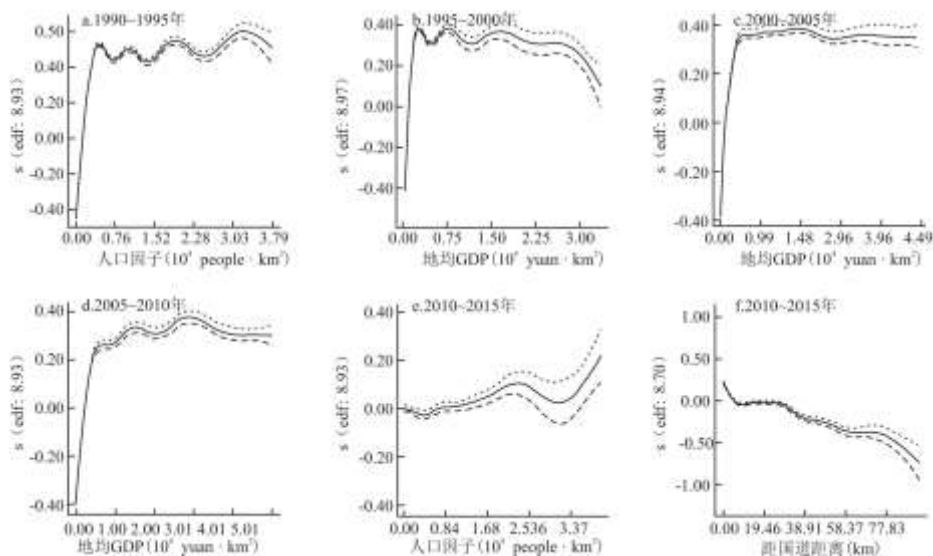


图 7 长株潭城市群核心驱动因子对城镇用地扩展影响效应

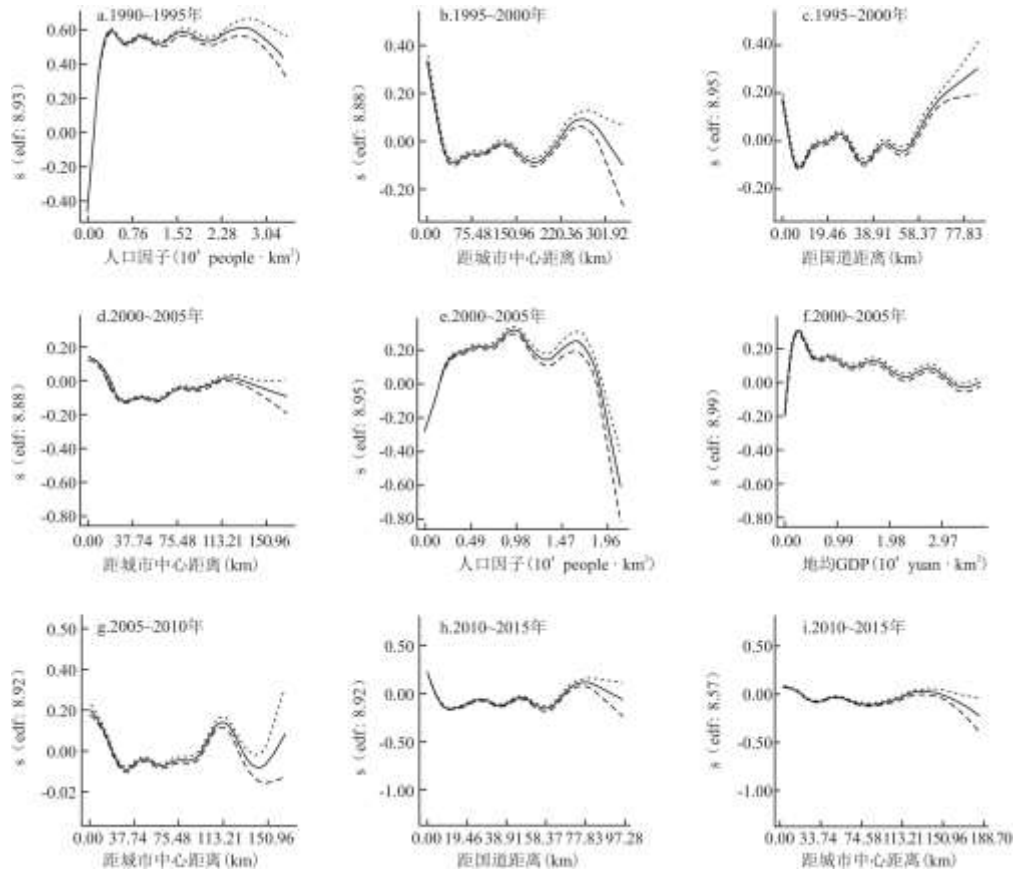


图 8 环鄱阳湖城市群核心驱动因子对城镇用地扩展影响效应

由图 6、图 7、图 8 可知,各核心驱动因子与城镇用地扩展均表现出显著的非线性关系,且在一定程度上呈现地域性和阶段性的波动特征。人口分布因子在 1990~1995 年与三大子城市群的城镇用地扩展呈显著正相关,在人口因子小于 0.4 万人/ km^2 时,表现为迅速单调递增,随着人口密度的增加,城镇扩展呈现上下波动趋势。武汉城市圈和环鄱阳湖城市群城镇用地扩展概率在 2000~2005 年间随人口密度增加表现为先增后减趋势,说明城镇用地扩展开始受到人口增长的抑制作用。随着新型城镇化的推进,此后 10 年城镇用地扩展趋于平缓。地均 GDP 因子在 1995~2000 年间对武汉城市圈和长株潭城市群城镇用地扩展均表现为显著正向作用,而环鄱阳湖城市群在 2000~2005 年间则呈现增加后波动下降的特征。距城市中心距离对城镇用地扩展的影响表现为随着距离的增加先抑制后促进的特征,这与李春林等^[38]的研究结果一致。根据中心地理论,城市中心为周围区域发展提供资源,而中心地的作用强度随距离增加而衰减。武汉城市圈城镇用地扩展在 1995~2005 年受中心地作用强度极大值点约为距城市中心 80km 处,至 2010~2015 年出现多中心共同作用格局,而环鄱阳湖城市群这一数值在 2000~2010 年约为 115km。距国道距离和距铁路距离对城镇用地扩展的影响,随着距离的增加整体呈现大幅上下波动,且最后收敛于零的趋势。城市建设的推进使得交通设施日益完善,依靠传统公路和铁路运输的城际联系将促进周边区域的城市发展。

4 结论与讨论

本文以长江中游城市群为例,通过 1990~2015 年 6 期土地利用数据对 25 年间城镇用地时空演变格局进行分析,选取社会经济、自然因子以及邻域因子构建广义加性模型探究了城镇用地扩展驱动因子的时空格局分异特征及其演变机制。根据城镇用地时空分异格局与核心因子的驱动机制,对长中游城市群的发展进行功能核心识别,结论如下:

(1) 25 年间,长江中游城市群驱动因子时空分异格局差异性较强。总体来看,武汉、长沙、南昌的核心城市极化效应显著,涓滴效应逐渐显现,但仍未打破省级行政区划壁垒。

(2) 三大子城市群核心驱动因子存在显著的异质性特征,其中人口因子和地均 GDP 因子对城市群城镇用地扩展的影响最大。随着城市中心辐射效应的加强和基础设施的完善,邻域因子作用强度逐渐凸显。自然因子对城镇用地影响强度不大。武汉城市圈和环鄱阳湖城市群较长株潭城市群发展空间溢出效应明显,城市群发展由人口规模单核驱动逐渐转向地理区位和经济区位双核驱动。

(3) 各核心驱动因子与城市群城镇用地扩展均表现出显著的非线性关系,且在一定程度上呈现地域性和阶段性的波动特征。人口因子起初与三大子城市群的城镇用地扩展呈显著正相关,随着人口的饱和增长,城镇用地扩展开始受到抑制作用。地均 GDP 因子与城镇用地扩展的正相关关系较为显著。距城市中心距离因子与城镇用地扩展的非线性关系符合中心地理论学说。

(4) 广义加性模型顾及了城镇用地扩展过程中各因子之间的非线性关系,与传统的 Logistic 回归和非线性 Nonliner-Logistic 模型相比具有更高的拟合优度和验证精度,验证了其在城镇用地扩展驱动力研究中的适用性。

在长江经济带协调发展的宏观背景下,长江中游城市群应当进一步强化武汉、长沙、南昌的中心城市地位,通过强化发展轴线功能,依托沿江、沿路等重点发展轴线,打破行政区划限制,促进省级毗邻城市组团发展,构建多中心协调发展模式。本文关于该区域核心驱动因子的研究结论与胡昕利等^[39]研究结果一致,证实了李春林等^[38]、车通等^[40]关于区位距离对城市扩展影响的研究结论,并进一步探究了子城市群核心因子的驱动机制,弥补了传统模型对非线性规律考虑不足的问题。但还有诸多不足之处以待研究,诸如 GAM 模型样条函数不定参带来的模型估计偏差、融合面板数据的多维度驱动因子体系构建、县域层面城镇用地扩展异质性分析等问题还需进一步探究。

参考文献:

- [1] KUANG W H. Mapping global impervious surface area and green space within urban environments [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(10): 1591-1606.
- [2] 方创琳,王振波,马海涛. 中国城市群形成发育规律的理论认知与地理学贡献 [J]. 地理学报, 2018, 73(4): 651-665.
- [3] 王海军,王惠霞,邓羽,等. 武汉城市圈城镇用地扩展的时空格局与规模等级模式分异研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 272-285.
- [4] 方创琳. 中国城市群形成发育的政策影响过程与实施效果评价 [J]. 地理科学, 2012, 32(3): 257-264.
- [5] 王海军,张彬,刘耀林,等. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析 [J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1076-1092.
- [6] 陈凯,刘凯,柳林,等. 基于随机森林的元胞自动机城市扩展模拟:以佛山市为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 937-946.
- [7] 张豪,罗亦泳,张立亭. 基于遗传支持向量机的城市扩张非线性组合模型 [J]. 地理学报, 2010, 65(6): 656-664.
- [8] 李进涛,刘彦随,杨园园,等. 1985~2015 年京津冀地区城市建设用地时空演变特征及驱动因素研究 [J]. 地理研究, 2018, 37(1): 37-52.

-
- [9]王丽萍, 金晓斌, 杜心栋, 等. 基于灰色模型——元胞自动机模型的佛山市土地利用情景模拟分析 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(3):237-242.
- [10]李晓燕, 李慧颖, 满卫东, 等. 哈长城市群城镇用地扩展进程及其驱动因素研究 [J]. 地理科学, 2018, 38(8):1273-1282.
- [11]SON N T, CHEN C R. Urban growth mapping from Landsat data using linear mixture model in Ho Chi Minh City, Vietnam [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012, 6(1):100-106.
- [12]黄隆杨, 刘胜华, 李健. 城市生态用地时空动态及其相关驱动力——以武汉市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5):1059-1069.
- [13]陈万旭, 李江风, 熊锦惠, 等. 基于 GWR 的中国城市用地扩张驱动力差异性研究 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5):522-530.
- [14]FENG Y J, TONG X H. Calibrating nonparametric cellular automata with a generalized additive model to simulate dynamic urban growth [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(14), 1-15.
- [15]LI X, YEH A. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(4):323-343.
- [16]谢志文, 王海军, 张彬, 等. 城市扩展元胞自动机多结构卷积神经网络模型 [J]. 测绘学报, 2020, 49(3):375-385.
- [17]刘小平, 黎夏. 从高维特征空间中获取元胞自动机的非线性转换规则 [J]. 地理学报, 2006(6):663-672.
- [18]ABURAS M M, AHAMAD M S S, OMAR N Q, et al. Spatio-temporal simulation and prediction of land-use change using conventional and machine learning models:A review [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2019, 191(4):1-28.
- [19]WOOD S N. Thin plate regression splines [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B (Statistical Methodology), 2003, 65(1):95-114.
- [20]GAO Y, WANG Z Y, LU Q C, et al. Prediction of vertical PM_{2.5} concentrations alongside an elevated expressway by using the neural network hybrid model and generalized additive model [J]. Frontiers of Earth Science, 2017, 11(2):347-360.
- [21]PARK N W, CHI K H. Quantitative assessment of landslide susceptibility using high resolution remote sensing data and a generalized additive model [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(1):247-264.
- [22]王圆圆, 李贵才, 郭微, 等. 1979-2014 年三峡库区月平均气温的时空变化分析 [J]. 遥感学报, 2018, 22(3):487-496.
- [23]曹铭昌, 周广胜, 翁恩生. 广义模型及分类回归树在物种分布模拟中的应用与比较 [J]. 生态学报, 2005, 25(8):2031-2040.
- [24]焦利民, 金健飞. GAM 的区域 PM_{2.5} 浓度影响因子识别及关联关系分析 [J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12):123-128.

-
- [25] GONG X, HONG S, JAFFE D A. Ozone in China: Spatial distribution and leading meteorological factors controlling O₃ in 16 Chinese cities [J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2018, 18(9): 2287-2300.
- [26] 王圆圆, 郭微, 李贵才, 等. 基于广义加性模型估算 1979-2014 年三峡库区降水及其特征分析 [J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1207-1220.
- [27] BROWN D G, GOOVAERTS P. Stochastic simulation of land-cover change using geostatistics and generalized additive models [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, 68(10): 1051-1062.
- [28] FENG Y J, WANG J F, TONG X H, et al. Urban expansion simulation and scenario prediction using cellular automata: Comparison between individual and multiple influencing factors [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(5): 1-20.
- [29] 王海军, 刘艺明, 张彬, 等. 基于 Logistic-GTWR 模型的武汉城市圈城镇用地扩展驱动力分析 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(19): 248-257.
- [30] 黄焕春, 苗展堂, 运迎霞. 天津市滨海新区城市形态演化模拟及驱动力分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(12): 1453-1461.
- [31] 袁磊, 杨昆. 土地利用变化驱动力多尺度因素的定量影响分析 [J]. *中国土地科学*, 2016, 30(12): 63-70.
- [32] HASTIE T, TIBSHIRAN R. *Generalized Additive Models* [M]. California: Institute of Mathematical Statistics, 1986, 1(3): 297-310.
- [33] SHABANI S, NAJAFI A, MAJNONIAN B, et al. Spatial prediction of soil disturbance caused by forest logging using generalized additive models and GIS [J]. *European Journal of Forest Research*, 2019, 138(4): 595-606.
- [34] 闫东升, 王晖, 孙伟. 长江三角洲区域发展差距时空演变驱动因素研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 517-529.
- [35] 王新星, 陈涛, 李敏, 等. 珠江西部河口中华白海豚分布与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 934-944.
- [36] 胡成媛, 康平, 吴锴, 等. 基于 GAM 模型的四川盆地臭氧时空分布特征及影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(3): 809-820.
- [37] ANDERSON-COOK C M. *Generalized additive models: An introduction with R* [J]. *Publications of the American Statistical Association*, 2007, 102(478): 760-761.
- [38] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 [J]. *生态学报*, 2014, 34(3): 727-737.
- [39] 胡昕利, 易扬, 康宏樟, 等. 近 25 年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素 [J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 1877-1886.

[40]车通,罗云建,李成.扬州城市建设用地扩张的时空演变特征及其驱动机制 [J].生态学杂志,2019,38(6):1872-1880.