应用生态学报 2020年3月 第31卷 第3期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Mar. 2020, 31(3): 987-998 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202003.016

基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素

刘彦文[1,2] 刘成武[3] 何宗宜[1*] 周 霞[2] 韩冰华[2] 郝汉舟[2]
([1]武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; [2]湖北科技学院资源环境科学与工程学院, 湖北咸宁 437100; [3]中南民族大学公共管理学院, 武汉 430074)

摘 要 生态用地对城市圈可持续发展至关重要。本研究以武汉城市圈32个研究单元生态用地为对象,采用土地利用转移矩阵、探索性回归分析和地理加权回归模型(GWR),首先利用遥感影像解译成果对2000—2005、2005—2010和2010—2015年各个单元生态用地的时空演变进行统计,然后利用公司企业、生活服务等点位及数量大数据完善传统影响因素指标体系,并进行探索性回归分析,精选最优回归模型,最后基于GWR模型对不同时期影响因素及空间分异规律进行分析。结果表明:2000—2015年,城市圈内生态用地非生态转化呈现先升后降的倒"U"形变化规律,空间上呈现由点到面的扩张趋势;城市圈内共有8.4%的土地利用类型发生了转化,其中,耕地、林地、草地、水体和未利用地向非生态用地转型量占41.9%;空间格局由武汉中心城区逐渐向市级次中心、县级城镇周边扩展。探索性回归分析3期的通过模型数为326个,对所有模型进行GWR和普通最小二乘法(OLS)回归比较分析,3期最优模型的调整R^2分别为0.83、0.91和0.76,前者较后者提高了0.02、0.03和0.02,AICc值分别减小2.88、3.42和0.83。GWR模型结果表明,武汉城市圈内生态用地转化影响因素的空间分异明显,影响模式在空间上以不同方向的逐渐过渡为主,兼有"V"形分布等其他模式。空间因素影响效果显著,空间数据潜在信息增强了城市圈内生态用地演化的解释力度。

关键词 生态用地; 时空演变; 地理加权回归; 武汉城市圈

Spatial-temporal evolution of ecological land and influence factors in Wuhan urban agglomeration based on geographically weighted regression model. LIU Yan-wen[1,2], LIU Cheng-wu[3], HE Zong-yi[1*], ZHOU Xia[2], HAN Bing-hua[2], HAO Han-zhou[2] ([1]*School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan* 430079, *China*; [2]*School of Resources and Environment Science and Engineering, Hubei University of Science and Technology, Xianning* 437100, *Hubei, China*; [3]*School of Public Management, South-Central University for Nationalities, Wuhan* 430074, *China*).

Abstract: Ecological land is essential to sustainable development of urban agglomeration. Based on the results of remote sensing image interpretation, we analyzed the spatial-temporal evolution of ecological land in 32 research units of ecological land in Wuhan urban agglomeration in 2000-2005, 2005-2010 and 2010-2015, using the land use transition matrix, exploratory regression analysis, the ordinary least squares (OLS) model, and geographically weighted regression (GWR) model. Then, the best regression model was selected after perfecting the traditional index system of influencing factors by data of the location and quantitative information of companies, enterprises and life services, *etc.*, and conducting exploratory regression analysis. Finally, we analyzed the influencing factors and spatial differentiation rules of different research periods with GWR model. The results showed that, from 2000 to 2015, the amount of transition from ecological land use to non-ecological land use in the urban agglomeration showed an inverted U-shaped change pattern, and the space

本文由国家社会科学基金项目(14BGL156)和湖北省哲学社会科学研究项目(19Q176)资助 This work was supported by the National Social Science Foundation of China (14BGL156) and the Philosophy and Social Science Research Project of Hubei Province (19Q176).
2019-10-21 Received, 2020-01-10 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zongyihe@tom.com

showing the expanding trend from point to surface. Land use patterns of 8.4% area had changed in the urban agglomeration, among which the conversion of cultivated land, forest land, grassland, water body and unused land to non-ecological land accounted for 41.9% of the total area. The spatial pattern gradually expanded from the central urban area of Wuhan to the periphery of the municipal sub-center and county-level towns. The total number of passing models in the three stages of exploratory regression analysis was 326. The GWR and OLS regression were used for comparative analysis of all models. The adjusted R^2 in the three stages of selected models were 0.83, 0.91 and 0.76, respectively. The former improved by 0.02, 0.03 and 0.02, and the AICc decreased by 2.88, 3.42 and 0.83, respectively. The results of GWR model showed substantially spatial differentiation of influencing factors of ecological land evolution in Wuhan urban agglomeration, and that the influence patterns was dominated by gradual transition in different directions in space, with other patterns such as "V" distribution. The effects of spatial factors were significant. The potential information of spatial data enhanced the interpretation of ecological land evolution within the urban agglomeration.

Key words: ecological land; spatial-temporal evolution; geographically weighted regression; Wuhan urban agglomeration.

土地利用/覆被变化(LUCC)是土地变化科学的关注焦点,在生态、社会和经济方面对区域以及全球的影响已引起学者们的高度关注[1],作为土地利用类型重要组成部分的生态用地是区域生态系统健康和区域生态承载能力的重要保障与载体[2]。生态用地变化与 LUCC 紧密相关、交织作用,LUCC 改变土地覆被状况的结果直接影响生态用地变化,而生态用地内在因素驱动作用下的变化又反馈回 LUCC。当前,快速的城市化进程使得城市及其周边的土地利用方式发生了显著变化,潜在影响区域的生态与环境[3]。城市化是人类文明发展的必然,城市建设用地的增加使具有独特生态价值的土地不断遭到侵占[4],现有生态用地的质量也急剧下降[5],如何实现城市化与生态环境的协调发展业已成为当前的热点问题[6]。城市圈是我国城市快速化发展的新特征[7],城市圈内生态用地对于改善居民居住环境质量[8]、提升城市综合竞争力[9]等具有正向作用,但快速的城市化进程使城市圈内生态用地的数量、格局都发生了很大变化。2018 年《中共中央国务院关于建立更加有效的区域协调发展新机制的意见》[10]指出,建立以中心城市引领城市群发展、城市群带动区域发展新模式是未来城市化发展的新趋势,研究协调城市群内部土地均衡利用、达到自然生态保护与社会经济发展的双赢[11],对城市圈内土地的可持续利用具有重要意义。

自董雅文等[12]提出"生态用地"概念以来,我国学者围绕生态用地分类、生态用地需求量测算与模拟、生态用地演变与驱动因素分析进行了深入研究,相关学者从国家层面、区域尺度、城市视角对生态用地类型进行细致划分[13-14],有对理论内涵的深入探讨,也有对具体区域的实证分析。从生态用地识别到生态用地生态服务价值定量测算[15-16]、从过去数据的演变分析到面向未来的规划模拟[17-18],对生态用地的认同感在不同层面上得以不断提升。针对生态用地空间格局演变研究,多借助各类转移概率矩阵等对地类转化性质和转化数量进行定性定量分析。对生态用地演变驱动力研究,一般从自然、社会和经济方面出发构建适宜的指标评价体系,随着研究的深入,政策因素、主体因素(政府、企业等)等也被引入综合指标体系。研究方法以 Logistic 回归[19]、系统动力学[20]、环境库兹涅兹曲线[21]、生态足迹模型[22]、元胞自动机[23]等为主,基于经典统计的生态用地研究对生态用地及其影响因素的空间信息考虑不足。地理加权回归模型(geographically weighted regression,GWR)自变量的回归参数随着空间位置的变化而变化,反映了不同因子随着距离变化对因变量作用程度有所不同,契合生态用地演变驱动因素中诸如距离公路、城镇中心的距离等因子的表达。GWR 已在影响因子空间分布相关研究中广泛应用,但在生态用地驱动因素研究中尚不多见。

本研究从土地生态功能视角出发,采用 4 期遥感影像解译的土地利用成果,将来源于公共地图服务的 14 类空间要素点位和数量等大体量数据纳入影响因素的 GIS 基础数据库,采用探索性回归分析、GWR,分析武汉城市圈 2000—2015 年生态用地的演变规律和主导影响因素,以期为研究区生态用地保护、生态服务价值提升、统筹区域协调发展、优化区内国土格局提供相关决策参考。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

武汉城市圈地处长江中游、湖北省东部，位于28°50′—31°57′ N，112°22′—116°22′ E（图 1）。城市圈以武汉市为龙头，囊括了周边 100 km 以内的黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、潜江、天门 8 个中等城市，是中部最具发展潜力和活力的城市群。区内初步形成了“一核一带三区四轴”的城市化发展框架和“一环两翼”的生态区域保护格局。2016 年，城市圈总面积 58052 km^2，占全省的 31.2%，常住人口 3144.81 万，占全省的 53.4%，GDP 为 20147.78 亿元，占全省的 62.4%。武汉城市圈不仅是国家“十三五”规划、长江经济带规划和全国主体功能区规划等国家重大规划确定的重点发展区域、长江经济带的重要节点区域，也是湖北省产业和生产要素最密集、最具活力的地区，是湖北经济发展的核心增长极和国家中部崛起的重要战略支点。

1.2　数据来源与处理

2000、2005、2010 和 2015 年 4 期 30 m×30 m 栅格土地利用现状数据以 Landsat TM/ETM、OLI 影像为主要数据源，通过人工目视解译获得，来源于中国科学院资源环境科学数据中心，解译成果精度达到 90%以上。在 ArcGIS 中按本研究生态用地分类标准，对原数据进行分类合并处理。电子地图兴趣点（POI）等空间数据来源于高德地图、百度地图、实地调查测量等，统一采用 Krasovsky_1940_Albers 投影。统计数据来源于 2005—2015 年《中国城市统计年鉴》[24]、《湖北统计年鉴》[25]、《武汉城市圈年鉴》[26]及湖北省统计局官方网站（http://www.stats-hb.gov.cn）等。武汉城市圈生态用地 32 个分析单元以县级为主，部分区域有合并，将所有数据按各研究区建立对应记录，建成 GIS 基础信息数据库。

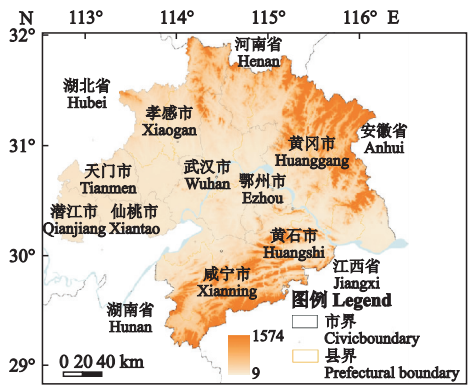


图 1　研究区位置示意图

Fig.1　Skecth of the location of study area.

1.3　生态用地界定

国外土地分类中没有将生态用地作为一项独立类型提出，国内虽然明确提出了这一概念，但还没有达成统一认识。由于研究的切入角度、分析尺度等不同，致使现实中存在从土地覆被类型划分、从土地利用程度划分，以及二者结合的综合划分 3 种主要分类方式。结合学者们普遍认同的“能够提供重要生态服务功能”为确定生态用地的基本准则[27]，由于耕地与生态环境背景（温度、湿润度、地形等）有密切关系，耕地生态系统业已演变为具有高度耦合性的社会-经济-生态复合系统，对区域生态贡献不容忽视，而林地涵养水源、固碳释氧等功能是区域生态安全的天然保障，城市及其周边的草地生态系统、水域生态系统所提供的休闲文化娱乐、改善人类生活环境等服务功能是城市生态系统不可或缺的重要组成部分。长期未直接为社会经济服务的土地被边缘化为未利用地，然而，正是它们为部分珍稀动植物提供了良好的生存之地，并使得自然生态系统能够健康发展。对城市圈而言，任何能够提供净化空气、调节气温、吸尘杀菌、保持水土等改善区域生态环境的地类都尤为重要。根据已有研究，本研究将生态用地划分为耕地、林地、草地、水域和未利用地 5 个二级地类，其他为非生态用地。

1.4　影响因素指标获取与处理

土地消费对我国经济增长至关重要，经济建设活动空间幅度变大与时域频率增强是其重要体现。从土地利用变化内外驱动机制出发，学者们选择人口、经济建设成效（如国民生产总值、第一、二、三产业相关数据）、自然区位（如交通条件、地形条件）等经济建设活动相关指标，对二者关系进行定性定量刻画与分析。POI 数据位置和数量信息在空间分布和密度频率上与区域土地利用、区域经济发展紧密相关，对人地关系研究具有重要的革新意义[28]，已在土地利用空间格局识别、城市中心演变分析等方面有诸多应用。生态用地空间分布受到自然、经济、人口、社会等多方面因素的共同制约[29]。在综合前人研究成果（选择道路信息、城镇化率、全社会固定资产投资等相关指标）的基础上，补充各研究单元中公司企业、旅游景点、休闲娱乐等 14 项空间分布与数量指标，构建综合影响因素指标体系，并运用 ArcGIS 建立研究区 32 个研究单元对应的基础地理信息数据库，其中包括 16 个属性指标（户籍人口、常住人口、城镇人口、乡村人口、城镇化率、地区生产

总值、第一产业、第二产业、第三产业、人均地区生产总值、地区生产总值增长速度、第三产业增加值占GDP比重、固定资产投资、全社会固定资产投资增长速度、工业总产值、社会消费品零售总额)和14个空间指标(道路密度、水域面积、餐饮、宾馆、金融点、购物点、商务大厦、公司企业、地产小区、医疗服务、汽车服务、休闲娱乐、旅游景点、村级行政区的数量)。

1.5 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是马尔可夫模型在土地利用变化方面的应用。它对两个不同时期、同一空间位置、不同地类的转换情况进行了转移方向和转移性质的描述[30]。

1.6 探索性回归分析

探索性回归是一种数据挖掘工具,当影响因素较多时,通过设定评估指标阈值条件,用探索性回归尝试影响因素的所有可能组合,辅助找到最佳模型。本研究在ArcGIS中依据已经建立的空间及属性系列指标,并结合不同时期生态用地转化量,根据设置的不同诊断条件,利用该工具依次找出所有正确指定的普通最小二乘(ordinary least squares regression, OLS)模型。在多次试验、专家咨询等基础上,诊断条件中设定解释变量最小数量和最大数量分别为4和6,可接受的最小调整R^2、最大P值系数临界值、最大方差膨胀因子(VIF)临界值、可接受的最小Jarque-Bera P值和可接受的最小空间自相关P值分别采用默认阈值0.5、0.05、7.5、0.1和0.1。对符合以上条件的模型,ArcGIS会对残差运行空间自相关工具,空间自相关的Moran I统计表达式如下[31]:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_{ij}\cdot(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \quad (1)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_{ij} \quad (2)$$

式中:x_i和x_j分别为要素i和j的属性值;$\bar{x}$为n个样本属性的平均值;ω_{ij}是空间权重矩阵;S_0是所有空间权重的聚合。

空间自相关结果中,只有回归残差在空间上随机分布的模型才是合格模型。对正确指定的所有OLS模型,结合Arcpy和Pyhton筛选所有可能的GWR模型,并结合解释变量意义与区域实际、OLS模型与对应GWR模型逐一对比分析,最终再次确定最优GWR模型。

1.7 GWR模型和OLS模型

OLS是全局线性回归模型,模型分析结果中各类因子具有相同的系数。生态用地转化同时受到至城镇中心、公路、水域的距离等诸多环境因子影响。这类因子对生态用地转化的影响在空间上具有高度异质性,但各因子OLS全局回归系数无法表示各因子局部影响程度的差异,使得相关环境因子空间变异信息对生态用地转化不同局部影响力不同的表达受到了较大限制。GWR是考虑变量空间异质性的局性线性回归模型。它将样点位置信息加入到了回归参数之中,变量间关系可以随着空间位置的变化而不同,对空间非平稳性进行了较好处理[32]。由于GWR模型在诊断方面较弱,一般在GWR分析前需进行OLS回归以确保模型的准确性,GWR和OLS回归表达式分别如式3、式4所示。

$$y_i = \beta_0(u_i,v_i) + \sum_{j=1}^{k}\beta_j(u_i,v_i)x_{ij} + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k}\beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中:x_i、y_i分别指回归自变量和因变量;β_0、$\beta_0(u_i, v_i)$分别是全局和第i个样本常数项;$\beta_j(u_i,v_i)$指第i个样本第j个参数的回归系数,反映了不同参数对样本影响的空间分异情况,系数正、负号分别表示参数与空间位置的正、负相关性质,大小表示相关程度的强弱;(u_i,v_i)指第i个样本空间坐标;x_{ij}指第i个样本第j个参数值;ε_i代表随机误差项;k代表自变量个数。

GWR回归的关键在于空间权重矩阵,一般选择高斯函数作为空间权重函数,其表达式如下:

$$\omega_{ij} = \exp(-(d_{ij}/b)^2) \quad (5)$$

式中:ω_{ij}是位置i处的观测权重;d_{ij}是回归点i与数据点j之间的距离;b是带宽,为非负参数,表示权重与距离之间的函数关系。

相对于核函数的选择,GWR模型对带宽选择相当敏感,带宽过大或过小都会对模型拟合精度产生影响。基于ArcGIS,选择赤池信息量准则(Akaile information criterion, AIC)法确定最优带宽,当模型的AICc值最小时,即可确定最优带宽和GWR模型[33]。

1.8 数据处理

运用GIS对不同时期遥感影像解译成果进行叠加运算,进而求解土地利用转移矩阵。运用ArcGIS对遥感影像解译数据进行分区裁剪,导出分区成果表,在Excel中分层次进行统计,最终汇总得到

2000—2005、2005—2010、2010—2015 年 3 个时段武汉城市圈内生态用地转移矩阵。

2　结果与分析

2.1　武汉城市圈生态用地的时间演变

由表 1 可以看出，2000—2005 年间，武汉城市圈城市化进程开始加快，城市建设用地在空间上扩张了 226.31 km^2。从城市建设用地转移来源看，耕地的转化量最大，为 150.90 km^2，占生态用地转化总量的 66.7%；草地、水域、林地的转化面积分别为 27.99、27.99 和 17.51 km^2，分别占生态用地转化总量的 12.4%、12.4% 和 7.7%；未利用地转化面积较小，只有 1.94 km^2。不同生态用地内部也存在相互转化利用的情况，其中，未利用地向水域的转化面积较大，为 28.16 km^2。2000—2005 年间，生态用地共转化 621.13 km^2，其中，耕地、林地、草地、水域和未利用地的转化比例分别为 74.1%、4.7%、3.8%、12.2%和 5.2%。生态用地不同用地类型之间相互转换量占 64%，生态用地向非生态用地净转化量占 36%。总的来看，这一时期城市空间扩张以耕地转化为主。

2005—2010 年间，耕地向城市建设用地转化的数量很大，达 1219.47 km^2，占城市建设用地扩张总面积（1599.95 km^2）的 76.2%；林地、草地、水域和未利用土地向建设用地的转化量分别为 162.94、105.21、105.21 和 7.12 km^2；除耕地外，其他生态用地总转化量只占城市建设用地扩张总面积的 23.8%。不同生态类型用地内部也发了明显的转化，最大值发生在耕地与林地之间，前者向后者转换了 1153.88 km^2，后者向前者转换了 1024.98 km^2；最小值发生在未利用地向草地的转化中，其值仅有 1.12 km^2，草地向未利用地转化的面积也较小，只有 1.18 km^2。2005—2010 年间，生态用地共转化 5964.55 km^2，其中，耕地、林地、草地、水域和未利用地的转化比例分别为 55.9%、24.1%、4.0%、14.0%和 2.0%。生态用地不同用地类型之间相互转换量占 73%，生态用地向非生态用地净转化量占 27%。

2010—2015 年间，城市建设用地面积扩张 822.89 km^2，其中，耕地、林地、草地、水域和未利用地的转化量分别为 600.12、102.66、58.30、58.30 和 3.51 km^2，各不同地类向城市建设用地转化比例分别为 72.9%、12.5%、7.1%、7.1%和 0.4%。生态用地共转化 981.57 km^2，其中，耕地、林地、草地、水域和未利用地的转化比例分别为 75.3%、11.2%、2.6%、10.0%和 0.9%。生态用地不同用地类型之间相互转换量占17%，生态用地向非生态用地净转化量占

表 1　2000—2015 年生态用转移矩阵

Table 1　Ecological land transfer matrix from 2000 to 2015 (km^2)

时段 Period	地类 Land type	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	总计 Sum	减少 Decrease
2000—2005	耕地 Cropland	29441.85	9.85	1.20	297.63	150.90	0.91	29902.34	460.49
	林地 Forest	0.80	17533.25	0.38	10.04	17.51	0.16	17562.14	28.89
	草地 Grassland	0.11	8.78	1414.59	11.44	27.99	0.00	1438.37	23.78
	水域 Water	22.03	0.39	3.20	5660.50	27.99	22.15	5736.26	75.76
	未利用地 Unused land	0.43	0.04	1.65	28.16	1.94	210.84	243.05	32.21
	总计 Sum	29465.22	17552.30	1421.02	6007.78	226.31	234.06	54882.15	–
	新增 Increase	23.37	19.05	6.43	347.28	226.31	23.22	–	–
2005—2010	耕地 Cropland	26122.55	1153.88	70.78	866.02	1219.47	26.63	29459.34	3336.79
	林地 Forest	1024.98	16096.07	143.12	104.89	162.94	2.01	17534.02	1437.95
	草地 Grassland	44.61	155.27	1182.39	17.99	105.21	1.18	1418.34	235.95
	水域 Water	594.53	91.89	11.26	5174.51	105.21	31.66	6009.06	834.55
	未利用地 Unused land	23.20	3.28	1.12	84.60	7.12	116.37	235.68	119.31
	总计 Sum	27809.87	17500.39	1408.67	6248.02	1599.95	177.84	54656.44	–
	新增 Increase	1687.32	1404.32	226.28	1073.51	1599.95	61.47	–	–
2010—2015	耕地 Cropland	27682.48	14.64	4.65	119.41	600.11	0.39	28421.68	739.20
	林地 Forest	4.96	17447.84	1.02	1.11	102.66	0.12	17557.71	109.87
	草地 Grassland	12.28	2.44	1389.17	1.94	58.30	0.01	1414.25	25.08
	水域 Water	35.83	1.50	0.95	6217.50	58.30	1.95	6316.02	98.52
	未利用地 Unused land	0.58	0.34	0.00	4.47	3.51	170.25	179.15	8.90
	总计 Sum	27736.13	17466.74	1395.80	6344.42	822.89	172.72	53888.81	–
	新增 Increase	53.65	18.90	6.63	126.92	822.89	2.47	–	–

83%。伴随着我国土地管理制度对耕地、生态用地重视程度的日益加强,生态用地转化总量明显锐减,但生态用地的非生态转化率却明显提升,较初期的36%增长了 2.31 倍。耕地仍是该时期转化量最大的生态地类,结合转化空间布局可知,城市周边耕地转化为建设用地概率最大。城市化进程加快、建成区范围在空间上连续扩张,客观上占用了大量优质耕地。除耕地外,其他生态用地共转化 222.78 km^2,转化占比为 27.1%。不同生态类型用地内部转化最大值发生在耕地与水域之间,前者向后者转化 119.41 km^2,后者向前者转化 35.83 km^2。其他生态用地类型间的转化量较小。

2.2 武汉城市圈生态用地的空间演变

2000—2015 年间,武汉城市圈生态用地空间演变总体呈现出零星稀疏分布、全面延伸扩展、典型区域增长的规律(图 2)。2000—2005 年间,除武汉市中心生态用地演变分布十分明显外,城市圈内其他生态用地演变主要以零星方式散布在武汉市周边和长江沿线;2005—2010 年间,生态用地演变分布迅速在城市圈内呈面状延伸拓展开来;2010—2015 年间,由于土地利用政策宏观调控的影响,粗放式的生态用地转化向武汉市中心城区、各市级与县级城镇周边局部区域收缩,县级生态用地的非生态转化量明显增加。

2000—2005 年,武汉城市圈土地利用变化整体上较为稳定,生态用地转化剧烈区主要分布在各市中心区及其邻近周边地区,但不同城市之间差异较为明显。武汉市作为城市圈的中心城市,生态用地转化最剧烈,武汉市中心和江夏北部以耕地非生态化转化为特征,武汉市中心北部与黄陂区南部交界地带的土地利用转型也较为明显,耕地与水体湿地的非生态化转型比较剧烈。武汉周边的 8 个城市,生态用地转化以城镇为中心,呈点状零星分布,其中,仙桃市的土地利用转换量较大。

2005—2010 年,耕地非生态转化面积较大,尤其是武汉市范围的耕地非生态化转化较为剧烈,以中心城区为核心形成了一个环状高转化地带。这与武汉市各个区(县)在这一时期加快经济开发区和房地产业发展有关。长江沿线综合了自然、人文、社会、经济等优越的区位优势,相关生产建设活动在其周边一定缓冲范围内集聚,耕地与其他生态用地由于较低的成本和理想的地势,历来成为建设活动的首选[34],生态用地转化自江汉平原沿长江向东绵延形成了一个高能聚集地带。武汉城市圈的其他 8 个城市。以城市建成区为中心,也出现城市建设用地扩张而侵占原有耕地、林地、草地和水体湿地等生态用地的情况。其中,黄冈市和孝感市的生态用地转化较为剧烈,黄石市与大冶市交界处也是转化较为剧烈的地区。

2010—2015 年,各地类转换空间范围扩大,以武汉市为核心区域的生态用地转化边界向外继续扩展,向东与鄂州交界处、向北与黄陂区交界处、向南与江夏交界处,成为生态用地转化最剧烈的地区,大量耕地向非生态用地转化,城区内水体的非生态转化也较明显。城市圈内的其他周边县(市)基本以县城为中心,成为生态用地转化的热点区域。这一时期,咸宁市林地的非生态转化、黄冈市水体湿地的非生态转化,以及红安县和麻城市草地的非生态转化较为显著。

对比 2000—2005 年、2005—2010 年的生态用地转化可知,生态用地转化呈现由点向面的扩展趋势,前期转化集中在武汉市中心、江夏区北部、仙桃

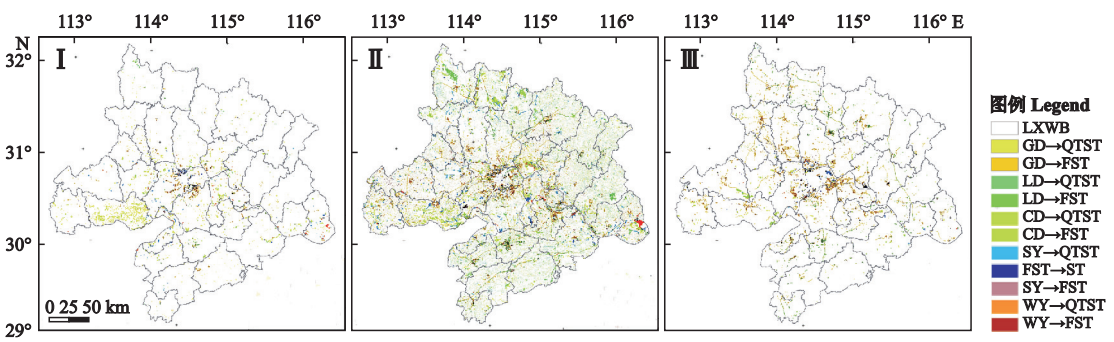


图 2 2000—2005(Ⅰ)、2005—2010(Ⅱ)、2010—2015 年(Ⅲ)生态用地转化格局

Fig.2 Ecological land transfer pattern from 2000 to 2005 (Ⅰ), 2015 to 2010 (Ⅱ), 2010 to 2015 (Ⅲ).

GD: 耕地 Cropland; LD: 林地 Forest; CD: 草地 Grassland; SY: 水域 Water; WY: 未利用地 Unused land; QTST: 其他生态用地 Other ecological land; FST: 非生态用地 Non-ecological land; LXWB: 用地类型未变 Unchanged.

市、黄梅县、新洲区、孝感市、汉川市、阳新县等稀疏零星点状区域，城市圈内 70%左右的区域生态用地转化不明显。但后一时期生态用地转化激增，各县市都有不同程度转化，转化呈规模化面状铺开，如距离武汉市中心较近的新洲区，转化范围由原偏于西南角一隅的零星点状迅速向东、向北扩散，并且连接成片；远离武汉市中心的红安县、大悟县，由前一期几乎转化空白至后一期迅速在全区展开，前者在县域北部的草地转化最典型，后者在县域南部的草地+水域转化较为明显。

对比 2005—2010 年、2010—2015 年的生态用地转化可知，生态用地转化总体呈收缩趋势，随着经济与生态协调发展理念的深入推广以及生态红线等政策的落地实施，生态用地转化在一定程度上得到了抑制。不管是区域核心地带、区域次中心地带，还是县城快速发展区，生态用地转化数量、转化组合结构等都呈现出不同规模的缩减。如位于城市圈南部的咸宁市，由前一时期面状扩展转化迅速向中心区域压缩收紧，除城市建设过程中非占不可的生态用地转化利用外，其他生态用地转化得到了有效抑制；咸宁市下辖的嘉鱼县，前一时期区内自牌洲湾向南、以及潘家湾镇、渡普镇、新街镇、高铁岭镇等都有不同规模转化，但后一时期仅在县城所在鱼岳镇与管桥镇交界处有明显转化。该区域是武深高速、县城三环线所在地。

2.3　生态用地变化影响因素的探索性回归

分别以 2000—2005、2005—2010、2010—2015 年生态用地非生态转化量为因变量，以 GIS 基础信息数据库中每个研究期前后属性指标和空间指标为自变量，在 ArcGIS 中设置自变量最小数量和最大数量分别为 4 和 6 个，最小校正 R^2 为 0.5、系数 P 值为 0.05、最大方差膨胀因子（VIF）值为 7.5、最小 Jarque-Bera P 值为 0.1 和最小空间自相关 P 值为0.1 进行探索性回归分析。

由表 2 可以看出，2000—2005、2005—2010、2010—2015 年分别采用 4 个变量、5 个变量和 6 个变量时，不同研究时段探索性回归分析结果中合格模型数目不同，3 个研究时段共有 326 个合格模型。生态用地转化是自然、人文、社会、经济等多因素交互作用的结果，大多数影响因素随时间变化而变化，不同变量组合的模型从不同方面反映了生态用地转化的主要影响因素。326 个合格模型的调整 R^2 算术平均值是 0.78，间接反映了不同变量组合的模型对生态用地转化的解释均在 78%以上，最大方差膨胀因子小于 7.5、最小 Jarque-Bera P 值和最小空间自相关 P 值都显著大于 0.1，说明模型解释指标不存在共线性、回归模型残差呈正态分布、空间模式呈随机状态，模型效果较好。

2.4　GWR 模型与 OLS 模型回归比较

在探索性回归基础上，在 326 个合格 OLS 模型中依据解释变量意义与区域实际、AICc、R^2 等指标的最大差值，2000—2005、2005—2010、2010—2015 年分别精选出第 86 号、第 164 号和第 12 号模型进行 GWR 与 OLS 回归比较。

OLS 模型结果表明，不同研究时段影响生态用地变化的主要因素不同，模型标准化系数进一步揭示了其作用性质和强度（表 3）。2000—2005 年间，基期乡村人口、医疗服务点数量与分布是首要影响因素，在其他因素不变时，二者分别增加 1 个单位，生态用地转化系数将分别减少 0.61 和增加 0.79。2005—2010 年间，随着经济快速发展，武汉城市圈内道路交通、公司企业数量增加较快，二者对生态用地变化影响显著。2010—2015 年间，对生态用地转化影响较大的变量依次为 2015 年人均 GDP>公司企业>2015 年城镇化率>道路交通。OLS 模型从总体上较好地反映了城市圈内生态用地的转化，人文经济因素对生态用地的影响程度随着时间的推移在不断增大。

表 2　不同变量组合的探索性回归分析

Table 2　Exploratory regression of different variable combinations

研究时段 Study period	自变量总数 Total number of independent variables	4 变量模型数 Model number of 4 independent variables	5 变量模型数 Model number of 5 independent variables	6 变量模型数 Model number of 6 independent variables	最大调整 R^2 Maximum of adjusted R^2	赤池信息量准则 Akaiker's information criterion (AICc)	雅克-贝拉 P 值 Jarque-Bera P value (JB)	科恩可统计量 P 值 Koenker statistic P value (BP)	最大方差膨胀因子 Maximum variance inflation factor (VIF)	全局莫兰指数 P 值 Total Moran's I P value (SA)
2000—2005	36	60	44	31	0.94	623.78	0.23	0.38	5.68	0.53
2005—2010	35	133	31	3	0.89	691.39	0.97	0.39	2.93	0.93
2010—2015	34	21	3	0	0.78	693.73	0.63	0.36	6.26	0.29

表 3 优选模型的 OLS 回归结果
Table 3 OLS regression results of the optimal model

研究时段 Study period	指标 Index	数值 Value
2000—2005	2000 年乡村人口 Rural population of 2000	−0.61 *
	餐饮服务点数量 Number of catering service points	−0.28 *
	医疗服务点数量 Number of medical service points	0.79 *
	行政机构数量 Number of administrative agency	0.50 *
	截距 Intercept	−2593.43
	调整 R^2 Adjusted R^2	0.83
2005—2010	公司企业数量 Number of company	0.26 *
	生活服务点数量 Number of social amenity points	0.15
	道路密度 Road density	0.55 *
	水域面积 Water area	0.15
	截距 Intercept	−6334.14
	调整 R^2 Adjusted R^2	0.89
2010—2015	2015 年城镇化率 Urbanization rate of 2015	−0.44 *
	2015 年人均 GDP Per capita GDP of 2015	0.56 *
	公司企业数量 Number of company	0.45 *
	道路密度 Road density	0.36 *
	截距 Intercept	24321.04
	调整 R^2 Adjusted R^2	0.72

* $P<0.01$.

影响因素在空间上存在异质性和非平稳性是地理加权回归区别于全局最小二乘回归分析的基础。本研究 32 个研究区在自然资源禀赋、人文经济基础等方面不尽相同,如 2015 年人均 GDP 中心城市、次中心城市、一般县级区域相差 4~11 倍,这些差异为 GWR 模型运行提供了现实基础。

由表 4 可以看出,GWR 模型拟合效果较 OLS 模型有所提高,2000—2005、2005—2010、2010—2015 年的 AICc 值分别减小 2.88、3.42 和 0.83,调整 R^2分别提高 0.02、0.03 和 0.02。为了进一步验证 GWR 模型回归结果在空间上的分异性,对各研究时段 GWR 的回归结果进行统计分析,回归条件数均值最大为 17.76、最小为 10.10,方差均值为 0.81,说明回归结果稳定,不存在局部多重共线性。局部 R^2 均值和标准差分别为 0.87、0.93、0.76 和 0.02、0.01、0.01,说明模型局部拟合度高、局部回归效果良好。对各区 GWR 模型回归标准化残差进行空间自相关分析,其 Moran I 和 Z 得分分别为−0.02、0.09、0.03 和 0.11、1.07、0.60,Z 得分在[−1.65,1.65],说明分析结果在 0.10 水平显著,Moran I 值越小空间差异越大,分析结果中 Moran I 接近 0 值说明残差时空间分布呈随机模型。GWR 模型相关残差显著随机分布说明其表达了因素的空间分异性,因此,GWR 模型相对 OLS 模型可以较详细地分析不同因素在不同地理位置上对生态用地转化的影响。

表 4 GWR 模型与 OLS 模型拟合效果比较
Table 4 Comparison of fitting effect between GWR model and OLS model

模型 Model	指标 Index	2000—2005	2005—2010	2010—2015
GWR	AICc	656.12	682.24	699.36
	R^2	0.89	0.94	0.80
	调整 R^2 Adjusted R^2	0.85	0.92	0.74
OLS	AICc	659.00	685.66	700.19
	R^2	0.85	0.91	0.76
	调整 R^2 Adjusted R^2	0.83	0.89	0.72
GWR 与 OLS 模型的差值 Difference between GWR and OLS model	AICc	−2.88	−3.42	−0.83
	R^2	0.04	0.03	0.04
	调整 R^2 Adjusted R^2	0.02	0.03	0.02

2.5 生态用地演变影响因素的空间分异

GWR 模型在不同研究区的回归系数不同,反映出不同因素在不同研究区域的作用强度存在差别。由图 3 可以看出,乡村人口对生态用地变化的影响呈现“西高东低”,餐饮服务呈现“南高北低”的空间分布特征,二者均与生态用地变化呈负相关关系。乡村人口对第一产业影响明显,城市圈西部位于江汉平原,农业人口增加影响耕地面积,使生态用地非生态化降低。医疗服务和行政机构(如各级财政所、金融服务工作站、村委会等)作用偏向于服务型,其空间点位和数量对生态用地转化的影响分别自西北向东南和自西南向东北从大到小过渡。此时段影响因素的共同作用西部较东部明显。

东南部的公司企业对生态用地非生态化的影响高于西北部。东南部位于幕阜山脉,主体咸宁市因生态环境良好素有“武汉后花园”之称,此间经济发展对工业用地需求由点至面逐渐扩展,银泉大道、金桂路、十六潭路等沿线产生大量工业用地,咸宁高新技术产业园区已落户 1 亿元以上项目 24 个,陡增的工业用地在小区域大生态背景上凸显,指标单位变化量对生态用地非生态化的影响是西北部的 2.28 倍。学校、医药、维修、会所等生活服务因素对城市圈西部的影响明显高于东部,单因素显著性级差近 100 倍。西部由位于平原区的天门市、潜江市、仙桃市、汉川市、应城市等组成,东部英山县、罗田县、蕲春县、黄梅县等寄隅大别山下,服务型经济发展区域差异明显。道路交通对城市圈内生态用地转化影响总体呈自东向西由高到低的规律,但区域差异不如前述因素明显。武汉素有九省通衢之称,铁路、高速公路、主要道路、二级道路等在城市圈内互有弥补,

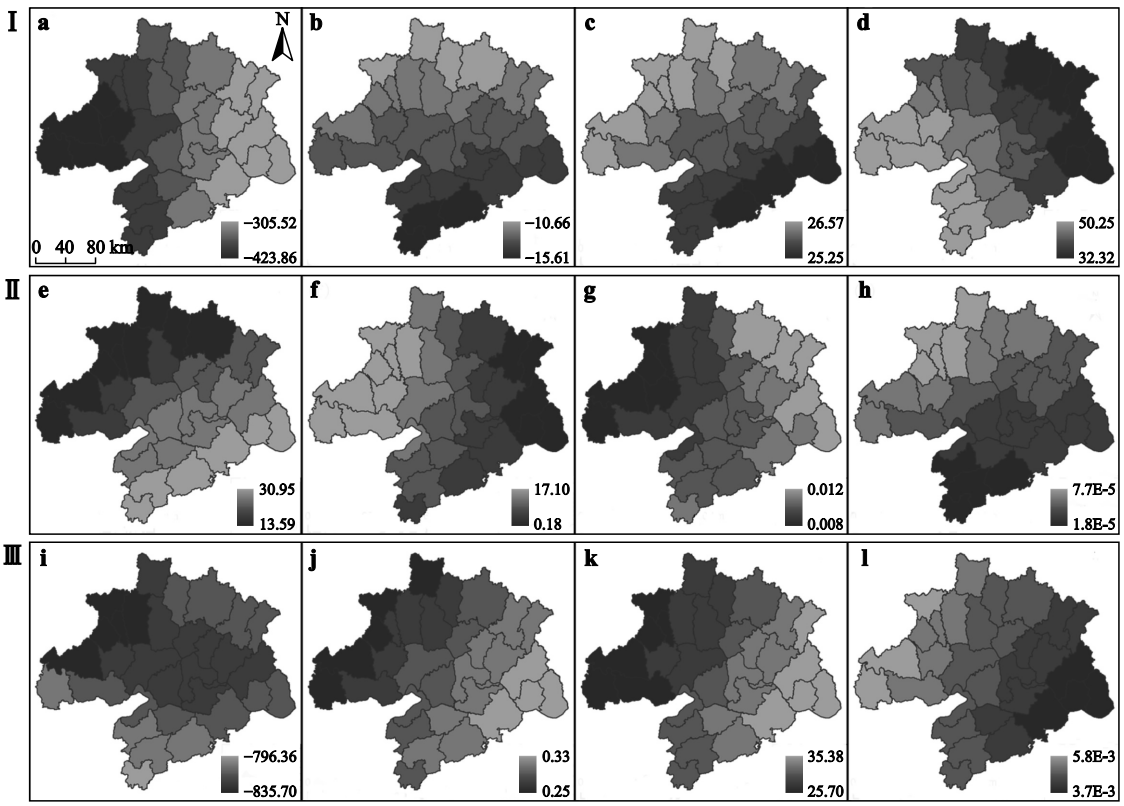


图 3　GWR 模型回归系数的空间分异

Fig.3　Spatial variability of regression coefficients in GWR model.

Ⅰ：2000—2005；Ⅱ：2005—2010；Ⅲ：2010—2015. a）乡村人口 Rural population；b）餐饮服务点数量 Number of catering service points；c）医疗服务点数量 Number of medical service points；d）行政机构数量 Number of administrative agency；e）公司企业数量 Number of company；f）生活服务点数量 Number of social amenity points；g）道路密度 Road density；h）水域面积 Water area；i）2015 年城镇化率 Urbanization rate of 2015；j）2015 年人均 Per capita GDP of 2015；k）公司企业数量 Number of company；l）道路密度 Road density.

区域差异不明显，加之分析时未对不同道路权重进行区别，致使最大级差仅 1.5 倍左右。城市圈内整体密集发达的水网在探索性回归分析中有高达 79.7%的显著意义，水域因素区域差异呈现“西北高、东南低”的规律。

随着城市圈经济持续快速发展，影响生态用地转化的主要因素也变得更加复杂，人文经济因素影响比重增加，城镇化率、GDP 等代表区域城市化水平和经济发展总量的指标上升为主要影响因素。城市化率对生态用地的影响大体呈现东尖西宽的“V”字形横跨全区，西部平原开口处影响较大，两边幕阜山脉、大别山脉影响较小；人均 GDP 对城市圈内生态用地转化影响自黄梅县、武穴市、蕲春县、阳新县向潜江市、天门市、应城市、安陆市由高到低逐渐过渡，公司企业对全区的影响趋势与人均 GDP 对生态用地转化的影响基本相似。利用二者在各个不同区域内的回归系数进行相关分析，结果显示，在 99%置信度时相关系数值为 0.98。道路交通对各个区域生态用地转化的影响差别依旧不甚明显，但总体呈现出自西向东由高到低的变化趋势。土地利用的空间格局是自然、人文、社会、经济等影响因素综合作用的结果，空间因素的单独影响及其耦合影响短期内在小尺度范围表现明显，如道路交通因素对生态用地转化的影响短期内主要集中分布在交通便利的主要道路等沿线，国家重大战略、区域发展战略等所引发的城市圈土地利用变化的极化效应在短期内往往表现不明显。

3　讨　　论

利用 2000—2015 年 4 期遥感影像解译成果、官方统计数据、实地调查数据、百度与高德地图服务等空间大数据，精选年鉴属性指标与地图服务时空指标构建综合指标体系，采用土地利用转移矩阵、探索性回归分析、OLS 与 GWR 模型，对 2000—2005、2005—2010、2010—2015 年武汉城市圈 32 个县市级区域的生态用地进行时空演化及影响因素分析。结果表明：在快速城镇化背景下，2000 年以来，武汉城市圈内生态用地演化明显，建设用地在空间上快

速扩张,侵占了城市圈内大量生态用地,生态用地非生态转化呈先升后降的倒“U”形规律,空间上呈由点到面的扩张趋势。2000—2005 年至 2005—2010 年间,生态用地非生态化总量从 226.31 km^2 增至 1599.95 km^2,除耕地外,其他生态用地转化总量从 75.43 km^2 增加到 380.48 km^2,净增加 4.04 倍。这一期间的变化与武汉城市圈被国家正式设立为两型社会实验区后,整个城市圈城市化进程的增加紧密相关。2005—2010 年至 2010—2015 年间,生态用地转化总量从 1599.95 km^2 下降至 822.89 km^2,除耕地外,其他生态用地非生态化总量从 380.48 km^2 降至 222.78 km^2,降幅为 41.5%。这一期间的变化与经过前期快速发展后城市建设用地需求得到一定缓解,以及党的“十八大”以后生态文明建设开始受到重视,耕地红线与生态红线保护力度加大有关。

利用探索性回归分析不同变量组合的总体拟合效果良好,GWR 模型对各个研究区域相对 OLS 模型有更好的解释力。以各研究区 2000—2005、2005—2010、2010—2015 年生态用地非生态转化总量为因变量,以 GIS 基础数据库中属性和空间指标为自变量,探索性回归分析通过模型数分别为 135、167 和 24 个,最大调整 R^2 分别为 0.94、0.89 和 0.78。3 个时段分别优选第 86 号、第 164 号和第 12 号模型进行 GWR 与 OLS 回归对比分析,结果表明,相对于 OLS 模型,GWR 模型在局部层面对不同研究期生态用地变化影响因素的解释力更强,3 期 AICc 值分别减小 2.88、3.42 和 0.83,调整 R^2 分别提高 0.02、0.03 和 0.02。不同研究期生态用地变化主要影响因素不同,起初,乡村人口、行政机构(如各级财政所、村委会等)因素为生态用地转化的主要影响因素,随后,公司企业、生活服务(如学校、维修等服务业等)因素过渡为生态用地转化的主要影响因素,最后,城镇化率、人均 GDP 等因素上升为生态用地向非生态转化的主要影响因素。

生态用地演变影响因素的空间分异明显,公司企业、生活服务、道路交通等因素的数量、潜在位置信息补充完善了生态用地演化的解释力度。在多因素共同作用时,同类因素在不同研究时期影响趋势可能相同,也可能相异。各要素影响模式总体呈逐渐过渡的空间特征,过渡方向包括“西高东低”(如 2000 年乡村人口因素)和东窄西宽横向的“V”形(如 2015 年城镇化率因素等)分布。武汉城市圈的高质量发展离不开各个组成体的协调互助、长短互补,因素空间分异间接反映了次级区域发展的支撑优势。在制定区域发展政策时,应合理权衡相互利弊关系,并精准引导、鼓励与优势因素联系紧密的产业优先发展,政策红线应依据各区特点尝试设定不同临界评判标准。城市圈内耕地是非生态化流失最严重的土地类型之一,以区内耕地保护为例,考虑生态溢出效应对城市圈内的长效趋同支持,可以尝试跨区实行生态互补,将南部幕阜山脉的高效林地生态指标与江汉平原的高效耕地产出指标宏观统一协调,使各项指标效益最大化。合理利用影响因素的空间分异,有益于调控区内生态与经济共同发展,引导圈内城市综合发展水平均衡增长,实现城市圈的可持续发展。

参考文献

[1] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展. 地理学报, 2009, **64**(4): 456-468 [Tang H-J, Wu W-B, Yang P, *et al*. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) mdels. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(4): 456-468]

[2] 杨志峰, 隋欣. 基于生态系统健康的生态承载力评价. 环境科学学报, 2005, **25**(5): 586-594 [Yang Z-F, Sui X. Assessment of the ecological carrying capacity based on the ecosystem health. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(5): 586-594]

[3] 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. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(5): 1059-1069 [Huang L-Y, Liu S-H, Li J. Spatial and temporal dynamics of urban ecological land use and its related driving forces: A case study of Wuhan City. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(5): 1059-1069]

[4] 邓红兵, 陈春娣, 刘昕, 等. 区域生态用地的概念及分类. 生态学报, 2009, **29**(3): 1519-1524 [Deng H-B, Chen C-D, Liu X, *et al*. Conception and function classification of regional ecological land. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(3): 1519-1524]

[5] 管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 等. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报, 2018, **33**(2): 195-207 [Guan Q-C, Hao J-M, Shi X-J, *et al*. Study on the changes of ecological land and ecosystem service value in China. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(2): 195-207]

[6] Wang YT, Li X, Sun MX, *et al*. Managing urban ecological land as properties: Conceptual model, public perceptions, and willingness to pay. *Resources Conservation and Recycling*, 2018, **133**: 21-29

[7] 顾朝林. 城市群研究进展与展望. 地理研究, 2011, **30**(5): 771-784 [Gu C-L. Study on urban agglomeration: Progress and prospects. *Geographical Research*, 2011, **30**(5): 771-784]

[8] 张林波, 李伟涛, 王维, 等. 基于 GIS 的城市最小生态用地空间分析模型研究——以深圳市为例. 自然

资源学报，2008，**23**(1)：69-78［Zhang L-B，Li W-T，Wang W，*et al*. Research on space modeling for minimum urban ecological land based on GIS：A case in Shenzhen. *Journal of Natural Resources*，2008，**23**(1)：69-78］

［9］ 石忆邵. 城市生态用地与城市竞争力关系. 广东社会科学，2013(6)：5-11［Shi Y-S. The relationship between urban ecological land and urban competitiveness. *Social Sciences in Guangdong*，2013(6)：5-11］

［10］ 中共中央国务院. 关于建立更加有效的区域协调发展新机制的意见［EB/OL］.（2018-11-08）［2020-01-08］. http://www.gov.cn/zhengce/2018-11/29/content_5344537.htm［CPC Central Committee，State Council. Views on the Establishment of New Mechanisms for More Effective Coordinated Regional Development［EB/OL］.（2018-11-08）［2020-01-08］. http://www.gov.cn/zhengce/2018-11/29/content_5344537.htm］

［11］ 彭建，汪安，刘焱序，等. 城市生态用地需求测算研究进展与展望. 地理学报，2015，**70**(2)：333-346［Peng J，Wang A，Liu Y-X，*et al*. Research progress and prospect on measuring urban ecological land demand. *Acta Geographica Sinica*，2015，**70**(2)：333-346］

［12］ 董雅文，周雯，周岚，等. 城市化地区生态防护研究——以南京市为例. 城市研究，1999，**75**(2)：6-8［Dong Y-W，Zhou W，Zhou L，*et al*. Ecological protection in urbanization distinct：A case study of Nanjing City. *Urban Research*，1999，**75**(2)：6-8］

［13］ 邓小文，孙贻超，韩士杰. 城市生态用地分类及其规划的一般原则. 应用生态学报，2005，**16**(10)：2003-2006［Deng X-W，Sun Y-C，Han S-J. General principles of urban ecological land classification and planning. *Chinese Journal of Applied Ecology*，2005，**16**(10)：2003-2006］

［14］ 喻锋，李晓波，张丽君，等. 中国生态用地研究：内涵、分类与时空格局. 生态学报，2015，**35**(14)：4931-4943［Yu F，Li X-B，Zhang L-J，*et al*. Study of ecological land in China：Conception，classification，and spatial-temporal pattern. *Acta Ecologica Sinica*，2015，**35**(14)：4931-4943］

［15］ 武爱彬，赵艳霞. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析. 农业工程学报，2017，**33**(2)：283-290［Wu A-B，Zhao Y-X. Analysis of ecological land pattern evolution and ecosystem service value in Bashang plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2017，**33**(2)：283-290］

［16］ 喻锋，李晓波，王宏，等. 基于能值分析和生态用地分类的中国生态系统生产总值核算研究. 生态学报，2016，**36**(6)：1663-1675［Yu F，Li X-B，Wang H，*et al*. Accounting of gross ecosystem product based on emergy analysis and ecological land classification in China. *Acta Ecologica Sinica*，2016，**36**(6)：1663-1675］

［17］ 刘建华，张启斌，Yang D，等. 基于 MCR-ANN-CA 模型的包头市生态用地演变模拟研究. 农业机械学报，2018，**50**(2)：1-13［Liu J-H，Zhang Q-B，Yang D，*et al*. Simulation of ecological land transition in Baotou based on MCR-ANN-CA model. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*，2018，**50**(2)：1-13］

［18］ 欧阳志云，李小马，徐卫华，等. 北京市生态用地规划与管理对策. 生态学报，2015，**35**(11)：3778-3787［Ouyang Z-Y，Li X-M，Xu W-H，*et al*. Ecological land use planning and management in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*，2015，**35**(11)：3778-3787］

［19］ Peng J，Zhao MY，Guo XN，*et al*. Spatial-temporal dynamics and associated driving forces of urban ecological land：A case study in Shenzhen City，China. *Habitat International*，2017，**60**：81-90

［20］ 韩成吉，张雪花，滑永胜. 基于 SD 的耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选——以天津市为例. 中国生态农业学报，2018，**27**(3)：1-14［Han C-J，Zhang X-H，Hua Y-S. Simulation and optimization of joint allocation strategy of cultivated land and ecological land based on SD model：A case of Tianjin. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*，2018，**27**(3)：1-14］

［21］ 安国强. 基于 EKC & Lorenz Curve 的山东省生态用地时空演变及保护区划研究. 中国土地科学，2018，**32**(9)：89-96［An G-Q. Spatio-temporal evolution and conservation zoning of ecological land in Shandong Province based on EKC & Lorenz curve. *China Land Sciences*，2018，**32**(9)：89-96］

［22］ 周朕，蒙吉军. 基于改进生态足迹模型与生态重要性识别的最小生态用地优化——黑河中游案例研究. 干旱区地理，2016，**39**(3)：513-520［Zhou Z，Meng J-J. Optimization of minimum ecological land based on modified ecological footprint model and ecological importance assessment：A case of middle reaches of Heihe River. *Arid Land Geography*，2016，**39**(3)：513-520］

［23］ 黄秀兰. 基于多智能体与元胞自动机的城市生态用地演变研究. 硕士论文. 长沙：中南大学，2008［Huang X-L. Study on the Evolution of Urban Ecological Land based on Multi-agent and Cellular Automata. Master Thesis. Changsha：Central South University，2008］

［24］ 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴. 北京：中国统计出版社，2005，2010，2015［Urban Socio-economic Survey Division of the National Bureau of Statistics. China City Statistical Yearbook. Beijing：China Statistics Press，2005，2010，2015］

［25］ 湖北省统计局，国家统计局湖北调查总队. 湖北统计年鉴. 北京：中国统计出版社，2005，2010，2015［Hubei Provincial Bureau of Statistics，Hubei Survey Team of National Bureau of Statistics. Hubei Statistical Yearbook. Beijing：China Statistics Press，2005，2010，2015］

［26］ 武汉地方志编纂委员会办公室. 武汉城市圈年鉴. 武汉：武汉出版社，2010，2015［Office of Wuhan Local Chronicles Compilation Committee. Wuhan Metropolitan Area Almanac. Wuhan：Wuhan Press，2010，2015］

［27］ 陈瑜琦，张智杰，郭旭东，等. 中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究. 中国土地科学，2018，**32**(2)：19-26［Chen Y-Q，Zhang Z-J，Guo X-D，*et al*. Spatial-temporal analysis on ecological land changes in the key ecological functional areas in China. *China*

Land Science, 2018, **32**(2): 19-26]

[28] 薛冰, 李京忠, 肖骁, 等. 基于兴趣点(POI)大数据的人地关系研究综述:理论、方法与应用. 地理与地理信息科学, 2019, **35**(6): 51-60 [Xue B, Li J-Z, Xiao X, *et al*. Overview of man-land relationship research based on POI data: Theory, method and application. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, **35**(6): 51-60]

[29] Xie HL, He YF, Xie X. Exploring the factors influencing ecological land change for China's Beijing-Tianjin-Hebei Region using big data. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**: 677-687

[30] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析. 地理学报, 2000, **55**(2): 151-160 [Shi P-J, Chen J, Pan Y-Z. Land use change mechanism in Shenzhen City. *Acta Geography Sinica*, 2000, **55**(2): 151-160]

[31] 袁兴伟, 刘尊雷, 金艳, 等. 基于空间自相关的东海带鱼聚集特征年代际变化. 应用生态学报, 2017, **28**(10): 3409-3416 [Yuan X-W, Liu Z-L, Jin Y, *et al*. Inter-decadal variation of spatial aggregation of *Trichiurus japonicus* in East China Sea based on spatial autocorrelation analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(10): 3409-3416]

[32] Nakaya T. Local spatial interaction modelling based on the geographically weighted regression approach. *GeoJournal*, 2012, **53**: 347-358

[33] 王海宾, 侯瑞萍, 郑冬梅, 等. 基于地理加权回归模型的亚热带地区乔木林生物量估算. 农业机械学报, 2018, **49**(6): 184-190 [Wang H-B, Hou R-P, Zheng D-M, *et al*. Biomass estimation of arbor forest in subtropical region based on geographically weighted regression model. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(6): 184-190]

[34] Cheng L, Jiang PH, Chen W, *et al*. Farmland protection policies and rapid urbanization in China: A case study for Changzhou City. *Land Use Policy*, 2015, **48**: 552-566

作者简介 刘彦文, 男, 1979 年生, 博士研究生。主要从事 3S 技术及其土地应用研究。E-mail: lhgyanzi@ whu.edu.cn

责任编辑 杨 弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



刘彦文, 刘成武, 何宗宜, 等. 基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 987-998

Liu Y-W, Liu C-W, He Z-Y, *et al*. Spatial-temporal evolution of ecological land and influence factors in Wuhan urban agglomeration based on geographically weighted regression model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3): 987-998