

# 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征

姚小微<sup>1</sup>, 曾 杰<sup>2\*</sup>, 李旺君<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;  
3. 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070)

**摘 要:**为促进新型城镇化进程下区域生态环境质量提升和土地资源可持续利用, 该文基于武汉城市圈 2010 年土地利用数据, 计算不同地域空间的生态系统服务价值; 运用空间计量方法, 分析研究区人口城镇化、空间城镇化、经济城镇化、生活城镇化和生态系统服务价值的空间分异特征, 进而运用双变量空间自相关分析探讨不同城镇化水平对生态系统服务价值空间分异的影响。结果显示: 除经济城镇化外, 人口城镇化、空间城镇化和生活城镇化均与生态服务价值存在空间负相关关系, 其中人口城镇化与生态服务价值的空间负相关性较强, 其次分别为空间城镇化和生活城镇化。具体的, 空间城镇化和生活城镇化与原材料生产价值之间的负相关性最强, 人口、空间和生活城镇化与大气调节和保持土壤之间也分别存在明显的负相关性。不同城镇化水平与生态服务价值的双变量 LISA 图也具有相似的空间特征, 高-低聚集区多分布于武汉城市圈经济水平相对发达的中部地区, 而低-高聚集区主要分布在南部幕阜山区和北部的大别山一带。该研究能够为区域新型城镇化和生态环境管护提供决策参考。

**关键词:** 土地利用; 生态; 相关理论; 生态系统服务价值; 城镇化; 双变量空间自相关; 武汉城市圈

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.038

中图分类号: F291.1; S181; F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0249-08

姚小微, 曾 杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 249—256.

Yao Xiaowei, Zeng Jie, Li Wangjun. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 249—256. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

中国正处于城镇化快速发展阶段。为应对城镇化过程中日趋严重的生态环境问题, 中国提出了走“新型城镇化”道路的重大战略举措, 强调要“将城市放在大自然中”, 把“保护青山绿水”作为新型城镇化建设的重要目标。在此背景下, 积极推进城镇化与生态环境的关系及其协调可持续发展研究成为学术界的共识<sup>[1]</sup>。目前, 相关研究已十分丰富。在宏观层面, 国内外学者相继提出城市经济水平与生态环境质量的环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC)假设<sup>[2]</sup>, 构建了城市社会生态系统多尺度驱动-变化和响应框架<sup>[3]</sup>, 并对城市化过程的资源与生态环境效应<sup>[4]</sup>及其对生态系统服务功能的影响机制<sup>[5]</sup>进行了深入探讨。在微观层面, 城镇化对生态景观格局、生物多样性、生物地球化学循环的影响等研究大量开展<sup>[6-9]</sup>, 部分学者还对快速城市化地区生

态生态系统服务价值变化趋势<sup>[10]</sup>、城镇化与生态环境之间的耦合关系<sup>[11-13]</sup>和土地利用规划的生态效应<sup>[14]</sup>进行了探讨。

生态系统服务价值作为衡量区域生态环境质量的重要指标, 已成为当前社会各界关注的热点和焦点。虽然目前关于生态系统服务价值的量化方法仍存在分歧<sup>[15-16]</sup>, 但并不影响其为区域生态环境保护 and 土地资源可持续利用提供参考依据。研究城镇化与生态服务价值的空间相关特征, 不仅能进一步充实城镇化与生态环境关系的研究, 也能为快速城镇化过程中的区域土地利用结构和功能优化、以及生态系统保育和生态安全维护提供科学依据, 但目前相关研究仍不多见。

本研究选取武汉城市圈为研究区域, 运用空间计量方法分析该地区城镇化与生态系统服务价值空间分异特征, 并对两者之间的双变量空间相关关系进行探讨, 旨在揭示武汉城市圈城镇化发展对生态服务价值空间异质性的影响, 从而为区域新型城镇化和生态环境管护提供决策参考。

## 1 研究区概况

武汉城市圈位于湖北省中东部、长江中游, 地处 112°30'~116°07'E, 29°05'~31°51'N, 由湖北省省会武汉及其周边 100 km 内的黄石、鄂州、孝感、黄冈、咸宁、仙桃、天门、潜江等 8 个城市构成。区域土地总面积为 5.79×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 地貌类型多样, 平原(含岗地)、丘陵、山地(中低山)分别占区域总面积的 50%、30%和 20%

收稿日期: 2015-03-03 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M521503); 中国地质大学(武汉)中央高校新青年教师科研启动基金(CUG120861)

作者简介: 姚小微, 女, 湖北武汉人, 讲师, 博士, 研究方向为土地利用评价与规划、土地利用变化等。武汉 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 430074。Email: yaowxcug@hotmail.com

\*通信作者: 曾 杰, 男, 湖北钟祥人, 讲师, 博士, 主要从事国土资源调查评价等方向研究。武汉 中国地质大学(武汉)资源学院, 430074。

Email: cugjay@gmail.com

左右。地势总体为北部、东北和南部高,逐渐向中部和西部降低;北部属秦岭向大别山的过渡地带桐柏山系,东北部为大别山脉,南部为幕阜山系余脉,西部和中部为开阔的江汉平原和鄂东沿江平原。区域水热资源丰富,地理区位优势突出,是中国重要的农产品生产区和中部经济最为发达的地区之一,也是以长江经济带为轴线的中国东、中、西部协调发展的关键接力点之一。2010年,区域常住人口3024万人,地区生产总值9 635.76亿元,分别占湖北省的52.83%和60.35%,人口、产业和城镇聚集程度相对较高。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

研究采用的土地利用数据来源于2010年研究区域土地利用更新调查数据,城镇化相关数据来源于2011年《湖北统计年鉴》,粮食产量数据来源于2011年《湖北农村统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。为便于研究,以县级单元作为基本分析尺度,并分别对武汉和黄石的主城区作适当归并,共划分出39个地域单元。结合研究区域自然条件和土地利用特征,将武汉城市圈土地利用划分为耕地、园地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地等7种类型,汇总各地域单元土地利用结构数据,并根据统计数据汇总城镇化相关数据;在此基础上,基于ArcGIS10平台建立数据库。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 城镇化水平的表征指标确定

一般认为<sup>[17]</sup>,城镇化主要包括人口增长、经济发展、空间扩张和生活水平提高等4层含义,其中人口增长和空间扩张是表象,经济发展是基础,城镇生活水平的提高则是城镇化的终极目标。新型城镇化作为城市化发展的新阶段,仍是从人口聚集、非农产业增长、城镇空间扩张、城镇意识转变等方面加以体现,但其在诉求居民生活水平提高的同时,更为注重可持续发展和人与自然的和谐共处<sup>[18-19]</sup>。为全面反映武汉城市圈城镇化发展水平,本文采用城镇常住人口比例、建设用地比例、非农产业比例和城镇居民可支配收入等指标分别衡量武汉城市圈的人口城镇化、空间城镇化、经济城镇化和生活城镇化水平。

### 2.2.2 生态系统服务价值估算

研究以“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”<sup>[20]</sup>为参照,将耕地、水域和未利用地与农田、河流/湖泊和荒地的生态服务价值系数相对应,以森林和草地的价值系数平均值作为园地的价值系数,并根据前人研究<sup>[20-21]</sup>假定建设用地的价值系数为0。基于湖北省农业生产投入产出情况<sup>[22]</sup>,以地均粮食产量水平对武汉城市圈单位面积生态服务价值当量进行系数修正<sup>[23]</sup>,确定其单个生态当量的价值为516.78元/hm<sup>2</sup>。武汉城市圈单位面积土地生态系统服务价值如表1。

表1 武汉城市圈单位面积生态系统服务价值

生态系统服务价值 Ecosystem service value	耕地 Cultivated land	园地 Garden land	林地 Forests	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	水域 Water bodies	未利用土地 Unused land
食物生产 Food production	516.78	196.38	170.54	222.22	0	273.89	10.34
原材料生产 Raw materials	201.54	863.02	1540.00	186.04	0	180.87	20.67
气体调节 Gas regulation	372.08	1503.83	2232.49	775.17	0	263.56	31.01
气候调节 Climate regulation	501.28	1457.32	2103.29	806.18	0	1064.57	67.18
水文调节 Water regulation	397.92	1452.15	2113.63	785.51	0	9699.96	36.17
废物处理 Waste treatment	718.32	785.51	888.86	682.15	0	7674.18	134.36
保持土壤 Soil conservation	759.67	1617.52	2077.46	1157.59	0	211.88	87.85
维持生物多样性 Biodiversity maintenance	527.12	1648.53	2330.68	966.38	0	1772.56	206.71
休闲娱乐与文化 Leisure	87.85	764.83	1074.90	449.60	0	2294.50	124.03
合计 Total	4082.56	10289.09	14531.85	6030.82	0	23435.97	718.32

运用 Costanza 等<sup>[21]</sup>给出的方法计算武汉城市圈生态系统服务价值,公式如下:

$$ESV = \sum A_k \cdot VC_k \quad (1)$$

式中:ESV 是生态系统服务价值,元; $A_k$ 是第  $k$  种土地利用类型的面积,hm<sup>2</sup>;  $VC_k$ 为生态系统服务价值系数,元/hm<sup>2</sup>。

### 2.2.3 双变量空间自相关分析

空间自相关分析包括全局空间自相关和局部空间自相关。全局空间自相关用来描述整个研究区域上所有对象之间的平均关联程度、空间分布模式及其显著性;局部空间自相关统计变量可以识别不同空间位置上可能存在的空间关联模式,从而发现空间局部不平稳性,更为准确地把握局部空间要素的聚集性和分异特征,为分类和决策提供依据<sup>[24-25]</sup>。一般,多采用 Moran's I 和 Local Moran's I 指数来描述全局空间自相关和局部空间自相关性。其中,Moran's I 指数的计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} \cdot (Y_i - \bar{Y}) \cdot (Y_j - \bar{Y})}{S^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}} \quad (2)$$

对单个空间单元  $i$ ,其 Local Moran's I 指数为:

$$I_i = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_i^2} \cdot \sum_{j \neq i}^n W_{ij} \cdot (Y_j - \bar{Y}) \quad (3)$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$ ;  $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ ;  $Y_i$ 和  $Y_j$ 分别表示单元  $i$ 和单元  $j$ 的属性值; $n$ 是空间单元数量(本研究中划分为39个评价单元); $W_{ij}$ 是基于空间邻接关系建立的权重矩阵。

为了刻画多个变量之间的空间相关性,相关学者<sup>[26-27]</sup>在 Moran's I 指数的基础上进一步拓展了双变量全局自相关和局部自相关,为揭示不同要素空间分布的相关性提供了可行方法<sup>[28]</sup>。其定义为:

$$I_{lm}^p = z_l^p \cdot \sum_{q=1}^n W_{pq} \cdot z_m^q \quad (4)$$

式中:  $z_l^p = \frac{X_l^p - \bar{X}_l}{\sigma_l}$ ;  $z_m^q = \frac{X_m^q - \bar{X}_m}{\sigma_m}$ ;  $X_l^p$  是空间单元  $p$

的属性  $l$  的值;  $X_m^q$  是空间单元  $q$  的属性  $m$  的值;  $\bar{X}_l$  和  $\bar{X}_m$  分别是属性  $l$  和  $m$  的平均值;  $\sigma_l$  和  $\sigma_m$  分别是属性  $l$  和  $m$  的方差。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城镇化空间分异特征

为刻画研究区城镇化水平空间分异格局,采用自然间断点分级法(Jenks)对各单元值进行划分(图1)。可以看出,武汉城市圈存在明显的城镇化空间分异特征。总体上,武汉城市圈城镇化水平表现出以武汉为中心、黄石为副中心的“双中心”逐渐向外递减的空间分异特征,且西部地区城镇化水平总体比东部地区高,但在人口、空间、经济和生活城镇化4个方面呈现不同的空间

分布格局。其中,在人口城镇化方面,武汉和黄石分别达到95.50%和82.48%;而大别山地区的团风、罗田、英山、蕲春等县市人口城镇化率均不足25%,说明该地区人口聚集水平较低。空间城镇化方面,除梁子湖区以外,中西部的江汉平原腹地及鄂东沿江平原地区出现了集中连片的高水平空间城镇化格局,其中武汉最高达到48.07%,北部、东北和南部山区则形成了相对集中的低水平空间城镇化格局。经济城镇化方面,位于区域中部的武汉和黄石及其周边部分郊区、以及黄冈、鄂州、咸宁等城市市区围绕梁子湖形成了一个高经济城镇化组团,组团内各地区非农产值比例达到85%以上;随着中心向外围扩展,各地区非农产业比例逐渐降低,经济城镇化水平明显减弱。生活城镇化方面,总体呈现出西高东低、北强南弱的空间分异格局,南部幕阜山区的崇阳、通山、阳新等地区生活城镇化水平最低,城镇居民人均可支配收入分别为10902、10687和11028元,与生活城镇化水平最高的武汉城区相比,相差近50%。

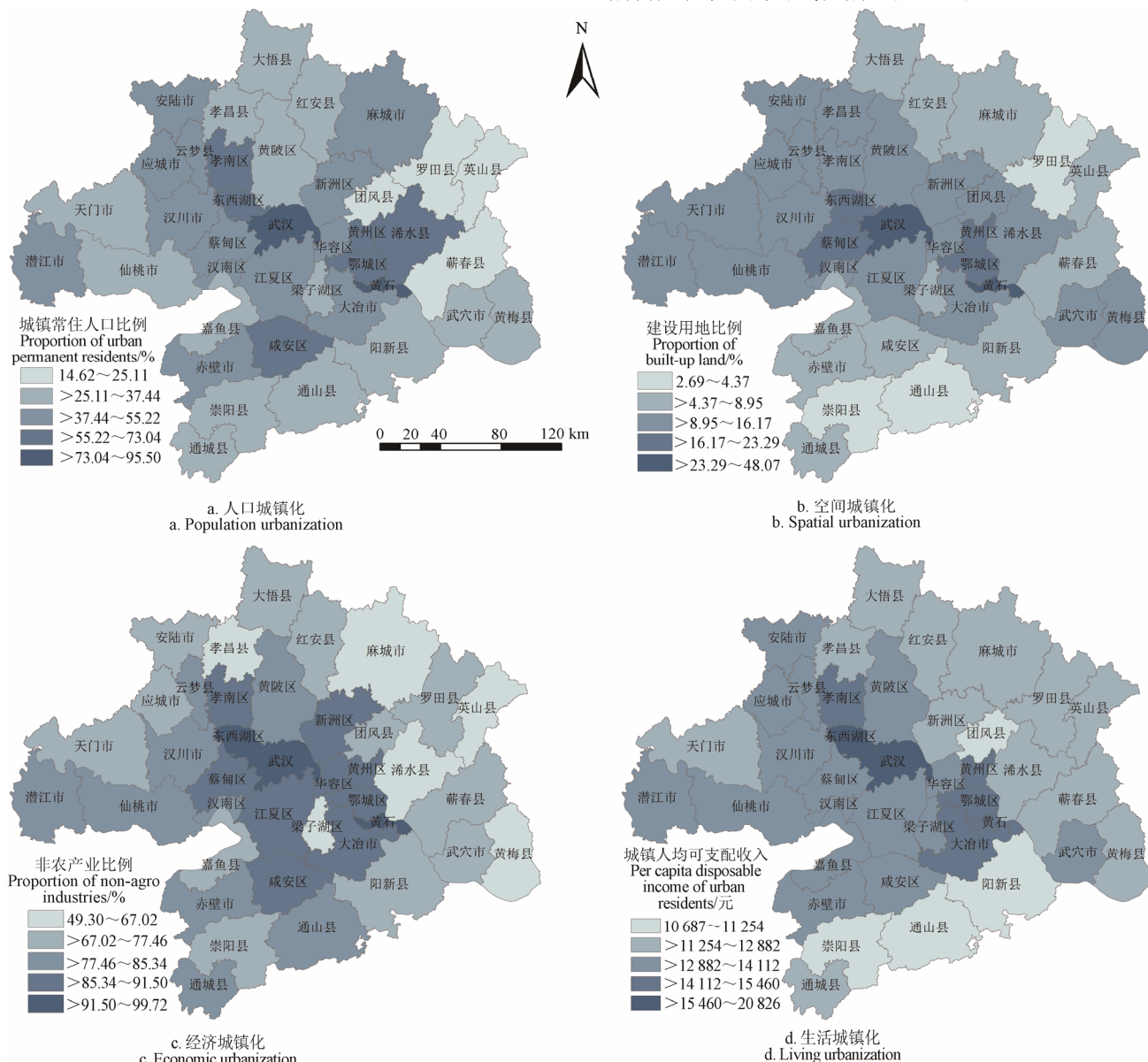


图1 武汉城市圈城镇化空间分异

Fig.1 Spatial distribution of urbanization in Wuhan Urban Agglomeration

### 3.2 生态服务价值空间分异特征

运用式(1)核算各地区的生态系统服务价值,可知2010年武汉城市圈生态系统服务的总价值达到577.25亿元。由于用地结构和地域面积的不同,各地区生态服务价值差距明显。其中,麻城市的生态服务价值最高为37.15亿元,价值量最低的黄石市仅为2.02亿元,两地相差近20倍。根据自然间断点分级结果(图2a),东北部的麻城市 and 东南部的阳新县和通山县等3个山区县(市)价值量为区域最高水平;江夏区等7个县(市、区)价值量处于区域较高水平,且在东、南、西、北和中部各有分布;处于中等水平的有汉川市等11个县(市、区),是分布最为广泛的区间;此外武汉城区等10个地区和鄂州全域等8个地区的生态服务价值分别处于较低水平和低水平。

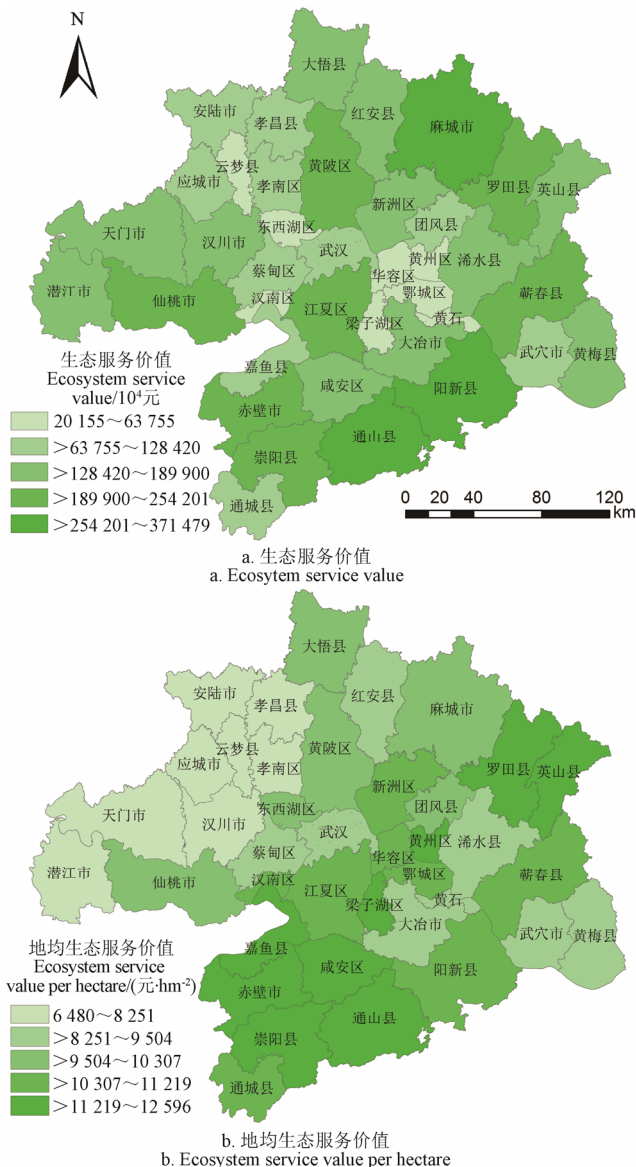


图2 武汉城市圈生态服务价值空间格局

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration

为消除生态服务价值的面积依赖性<sup>[29]</sup>,本文进一步考察区域各单元地均生态服务价值空间特征(图2b),

发现:武汉城市圈生态服务价值总体呈现出南部高、西北低的空间分异格局。在南部幕阜山区以及东北部大别山区,分别形成以嘉鱼、咸安、赤壁、通山、崇阳为组团和以罗田、英山为组团的高价值聚集区,而在西部江汉平原腹地及其辐射区域形成低价值组团。从武汉城市圈不同地域空间的土地利用特点来看,东北部和南部山地丘陵区林地面积比例大,普遍占相应地区土地面积的50%以上,其中通山县林地面积占全县面积的70%以上,较高的森林覆盖率和优良的生态资源造就了该区域相对较高的生态系统服务价值。而在西部江汉平原地区,地势地平,适宜农业耕作,是华中地区重要的粮食主产区,但森林覆盖率相对较低,且与中东部鄂东沿江平原地区相比没有明显的水域覆盖优势,因此客观上降低了区域的生态系统服务价值。

### 3.3 双变量全局空间自相关

采用GeoDa空间分析工具,建立空间权重矩阵,计算不同城镇化水平与生态服务价值之间的全局空间自相关指数Moran's I(表2)。从表2可以看出,4项城镇化指标与生态服务价值的双变量Moran's I均小于0,其中人口城镇化、空间城镇化和生活城镇化与生态服务价值的双变量空间相关通过了显著性检验,说明这3类城镇化发展与生态服务价值之间存在显著的空间负相关关系。其中,人口城镇化与生态服务价值负相关性较强,其Moran's I值为-0.2065,表明非农人口逐步向城镇地区聚集的过程,是造成区域生态系统服务价值亏损的主导因素。由于城镇人口聚集是造成城镇居住、交通、公共服务设施需求增长的根本原因,势必驱动区域土地利用发生较为剧烈的变化,造成耕地、林地、草地、水域等高生态服务价值的土地类型向生态价值较低的建设用地转变。一定程度上,人口城镇化带动了空间城镇化,而城镇各类服务设施的建设进一步改善和提高了城镇居民的生活水平,进而促进了生活城镇化水平的提升。与此同时,经济城镇化与生态服务价值的双变量Moran's I指数未通过假设检验,说明其与生态服务价值之间没有显著的空间相关关系。这是由于经济城镇化是对非农产业发展状况的综合,虽然产业人口聚集和土地资源利用对其具有一定的影响,但决定区域经济发展水平的主要因素是产业结构、资本投入、生产效率和科技进步等,因此与生态系统服务价值之间不存在直接的相关关系。

从城镇化与不同类型生态服务价值量的双变量空间自相关性上看,不同城镇化水平与水文调节、废物处理价值之间均不存在明显的相关关系,与原材料生产、大气调节、保持土壤等价值的负相关性要普遍强于与粮食生产、气候调节、维护生物多样性和休闲娱乐与文化等功能价值的负相关性,其中粮食生产价值仅与人口城镇化水平表现出较弱的空间负相关性,休闲娱乐与文化价值仅与人口城镇化和空间城镇化存在一定的负相关性。具体而言,空间城镇化和生活城镇化与原材料生产价值之间的相关性较强,其Moran's I分别达到-0.2834和-0.3001;说明在城镇建设用地规模较大和居民生活水平



相对较高的地区，生态系统转化太阳能为生物质能的能力丧失明显，生物原材料的生产极大减少。人口、空间和生活城镇化与生态系统大气调节与保持土壤价值的负相关性均处于 0.27 以上，明显高于经济城镇化与之的相

关水平，说明大气环境与土壤质量对人口聚居、城镇扩张的敏感性更强，区域人口越密集、城镇扩张越强烈，土壤质量和土地生产能力下降越明显，生态系统的大气交换和净化作用也相对较低。

表 2 城镇化与生态服务价值的双变量空间自相关结果

Table 2 Results of bivariate spatial correlation between urbanization and ecosystem service value

城镇化 Urbanization	粮食生产 Food production	原材料生 产 Raw materials	大气调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	水文调节 Water regulation	废物处理 Waste treatment	保持土壤 Soil conservation	维持生物 多样性 Biodiversity maintenance	休闲娱乐 与文化 Leisure	生态服务 价值 Ecosystem service value
人口城镇化 Population urbanization	-0.1542*	-0.2698**	-0.2702**	-0.2591**	-0.0663	-0.0008	-0.2727**	-0.2489**	-0.1782*	-0.2065*
空间城镇化 Spatial urbanization	-0.0842	-0.2834**	-0.2813**	-0.2607**	-0.0365	0.0456	-0.2716**	-0.2480**	-0.1695*	-0.1925**
经济城镇化 Economic urbanization	-0.0937	-0.1457*	-0.1468*	-0.1363*	0.0059	0.0387	-0.1518*	-0.1267*	-0.0673	-0.0933
生活城镇化 Living urbanization	-0.0870	-0.3001**	-0.2985**	-0.2724**	-0.0054	0.0812	-0.2894**	-0.2560**	-0.1527*	-0.1883**

注：\*\*和\*分别表示置信度为99%和95%时，相关性是显著的。Moran's I指数的数学期望E[I] 为-0.0263。  
Note: \*\* and \* means that the correlation is significant when confidence interval is at 99% and 95%, respectively. The mathematical expectation of Moran's I is -0.0263.

3.4 双变量局部空间自相关

在 z 检验的基础上 ( $P=0.05$ ) 绘制双变量局部空间自相关 LISA 聚集图 (图 3)，用于表征区域城镇化水平与其邻域生态服务价值均值之间是高-高 (High-high) /低-低 (Low-low) 的空间正相关，或者低-高 (Low-high) /高-低 (High-low) 的空间负相关、或者无显著的空间相关性 (即空间随机模式)。由图 3 可知，人口城镇化与生态服务价值成高-高相关的地区是咸安区，呈低-低相关的区域为华容区和云梦县，呈现低-高相关的区域最多，有红安县、英山县、武穴市和通山县，而在江夏区和鄂城区两者呈高-低相关。空间城镇化与生态服务价值的 LISA 聚集图中，只有低-高和高-低两类聚集区达到 95% 置信度水平，其中呈高-低相关的地区与人口城镇化相同，为江夏区和鄂城区，进一步证实了该地区城镇化与生态服务价值存在较强的空间异质性；红安县、英山县、武穴市、咸安区和通山县呈低-高相关，是被生态服务价值较高的县 (市、区) 所围绕的空间城镇化水平较低的地区。虽然经济城镇化与生态服务价值的全局自相关未通过假设检验，但其 LISA 聚集图表明经济城镇化与生态服务价值之间存在 4 种局部空间异质特征：咸安区和通山县呈高-高聚集，安陆市为低-低聚集，红安县和武穴市呈低-高相关，梁子湖流域周边的江夏、华容和鄂城区组成了高-低聚集区。生活城镇化与生态服务价值的高-高聚集区为咸安区，低-高聚集区分布于红安、英山和通山县，低-低聚集区和高-低聚集区则与经济城镇化相同。

虽然不同城镇化水平与生态服务价值的局部空间联系各有特点，但总体而言，存在一定的空间相似性。高-低聚集区基本都位于武汉城市圈的中部地区，多为省会武汉市的远城区或相邻区域，经济水平在武汉城市圈相对靠前，其周边相邻地区的经济发展也具有一定的趋同性；由于其人口密度相对较大、城镇体系相对发达，对

生态资源的占用与破坏现象更为严重，导致了区域生态系统服务价值大量流失。低-高聚集区主要分布在武汉城市圈南部和北部的幕阜山区和大别山一带，这些地区森林资源丰富，生态优势明显。由于山多地少、交通相对闭塞，在一定程度上也限制了此类区域人口、产业的大规模聚集和城镇建设用地的进一步扩张，客观上影响了地区经济的快速发展。因此，其在空间上表现出较为明显的低城镇化-高生态服务价值的聚集形态。

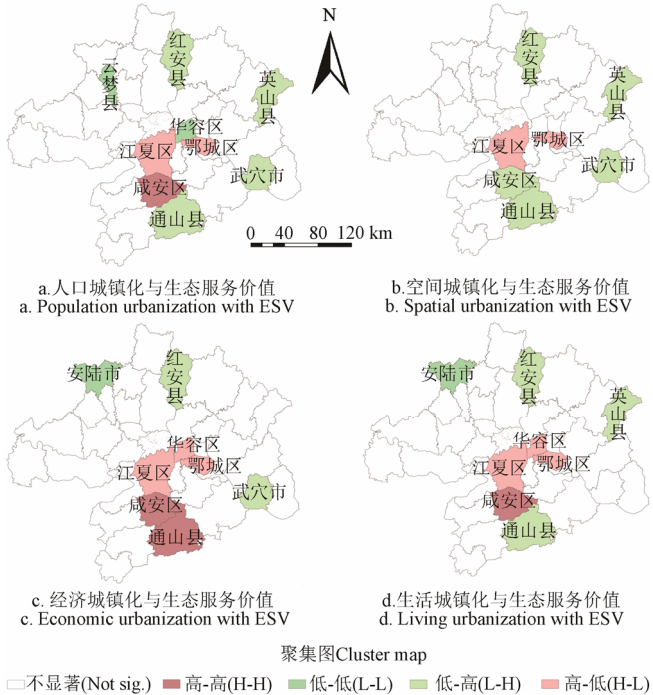


图 3 城镇化与生态服务价值的双变量 LISA 聚集图  
Fig.3 Bivariate LISA cluster map of urbanization with ESV

3.5 讨论

本文采用城镇常住人口比例、建设用地比例、非农

产业比例和城镇居民可支配收入等指标,较为直观的反映出区域人口、空间、经济和生活城镇化的水平。但随着城镇化的内涵日益丰富,尤其是“新型城镇化”发展理念的逐渐深入,仅采用单一指标已经难以准确反映区域城镇化发展的全貌。因此,有必要对城镇化的综合测度指标<sup>[30]</sup>进行研究,从而更全面、完整地反映区域城镇化水平。

由于生态系统具有异质性、复杂性和动态性特征,其服务功能也表现出明显的空间尺度差异性<sup>[31]</sup>,在不同尺度下,相同生态服务功能被赋予不同的价值。因此, Costanza 和谢高地等<sup>[20-21]</sup>提出的估算方法,虽然为大尺度的生态系统服务价值估计提供了可行参考,但仍存在一定的局限性<sup>[32-33]</sup>。本文虽然对“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”进行了系数修正,为武汉城市圈生态服务价值与城镇化相关关系探讨提供了可行途径,但单就生态系统服务价值的估算而言,仍需研究更为科学、准确的方法。尤其是在生态系统服务价值的空间转换和尺度效应方面,迫切需要开展更为系统、深入的研究。

双变量空间自相关分析揭示了城镇化水平与生态系统服务价值之间的空间负相关关系,为武汉城市圈土地利用决策、城镇化建设与生态系统管护提供了科学依据。由于人口非农化趋势不可逆转,在不影响城镇居民生活水平的前提下,严格控制建设用地规模,提高土地集约节约利用水平,成为武汉城市圈改善生态环境质量,提高区域生态系统服务功能的最可行途径。而在推进武汉城市圈新型城镇化建设的进程中,应更加关注人口快速集聚所导致的原材料生产能力下降和土壤流失与质量退化问题,以及伴随着建设用地扩张和现代城市功能提升原生生态系统破坏的现象。此外,基于不同层次的城镇化与生态服务价值的空间局部异质性特征,中东部平原地区应严格控制城镇建设扩张速度和规模,加大生态治理力度,着力提升城镇化质量,逐步实现城镇与生态系统的协调发展;在南、北部山地丘陵地区,要在大力保护现有的生态优势的基础上,平稳、有序的推进城镇化建设,最大限度的减少城镇化发展对生态系统的扰动和破坏。该空间异质性特征是区域实施差异性城镇化和生态管护措施的重要依据,能够为国土空间功能区划提供参考,但本文限于篇幅,难以系统讨论区域功能分区与规划管治,这也是今后有待进一步深入研究的方向。

## 4 结 论

本文基于城镇化发展内涵,从人口、空间、经济和生活 4 个角度揭示武汉城市圈城镇化发展格局,采用双变量空间自相关方法分析城镇化与生态服务价值的空间关联特征,研究主要结论如下:

1) 武汉城市圈城镇化水平呈现出以武汉为中心、黄石为副中心的“双中心”逐渐向外递减的空间特征,且西部地区城镇化水平总体高于东部地区;区域城镇化与生态系统服务价值之间存在明显的空间负相关关系,中西部平原地区城镇化水平相对较高,但生态服务价值明显偏低;南北两翼山地丘陵区生态优势突出,单位面积

生态系统服务价值较高,但城镇化发展相对滞后。

2) 区域不同层面城镇化水平与生态系统服务价值的空间异质性不尽相同。人口城镇化与生态服务价值的空间负相关性最强,其次为空间城镇化和生活城镇化,经济城镇化与生态服务价值之间不存在明显的空间相关关系。

3) 各层面城镇化水平与水文调节和废物处理价值之间均不存在空间相关性,与原材料生产、大气调节、保持土壤等价值的负相关性要普遍高于与粮食生产、气候调节、维护生物多样性和休闲娱乐等功能价值的相关性;空间城镇化和生活城镇化与原材料生产价值之间的负相关性最强,人口、空间和生活城镇化与大气调节和保持土壤之间也分别存在明显的负相关性。

4) 不同城镇化水平与生态服务价值的双变量 LISA 图各具特点,但总体上具有一定的空间相似性。高-低聚集区多分布于武汉城市圈经济水平相对发达的中部地区,均为武汉市远郊及其相邻区域;而低-高聚集区主要分布在南部幕阜山区和北部大别山一带,区域植被丰富,生态优势明显。

## [参 考 文 献]

- [1] 中国科学院生态与环境领域战略研究组. 中国至 2050 年生态与环科技展路线[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] Grossman G, Krueger A. Economic growth and the environment[J]. Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353—377.
- [3] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319(5864): 756—760.
- [4] 李双成, 赵志强, 王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 63—70. Li Shuancheng, Zhao Zhiqiang, Wang Yanglin. Urbanization process and effects of natural resource and environment in China: research trends and future directions[J]. Progress in Geography, 2009, 28(1): 63—70. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周忠学. 城市化对生态系统服务功能的影响机制探讨与实证研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 32—38. Zhou Zhongxue. Conceptual mechanism model of impact of urbanization on ecosystem service and case study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(5): 32—38. (in Chinese with English abstract)
- [6] 任文韬, 彭少麟, 周婷, 等. 东江流域集水区城市化差异及其对景观格局的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2680—2686. Ren Wentao, Peng Shaolin, Zhou Ting, et al. Differences in urbanization process of catchments in Dongjiang watershed and their effects on landscape pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12): 2680—2686. (in Chinese with English abstract)
- [7] Li Cheng, Li Junxiang, Wu Jianguo. Quantifying the speed, growth modes, and landscape pattern changes of urbanization: A hierarchical patch dynamics approach[J]. Landscape Ecology, 2013, 28(10): 1875—1888.
- [8] Meyer J L, Paul M J, Taulbee W K. Stream ecosystem function in urbanizing landscapes[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(3): 602—612.

- [9] de Jesus-Crespo R, Ramirez A. Effects of urbanization on stream physicochemistry and macroinvertebrate assemblages in a tropical urban watershed in Puerto Rico[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, 30(3): 739—750.
- [10] 郭荣中, 杨敏华. 长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(5): 238—246.  
Guo Rongzhong, Yang Minhua. Ecosystem service value analysis and trend prediction in Chang-Zhu-Tan region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(5): 238—246. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 105—112.  
Liu Yaobin, Li Rendong, Song Xuefeng. Analysis of coupling degrees of urbanization and ecological environment in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(1): 105—112. (in Chinese with English abstract)
- [12] 方创琳, 杨玉梅. 城市化与生态环境交互耦合系统的基本定律[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(1): 1—8.  
Fang Chuanglin, Yang Yumei. Basic laws of the interactive coupling system of urbanization and ecological environment[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [13] 聂艳, 雷文华, 周勇, 等. 区域城市化与生态环境耦合时空变异特征——以湖北省为例[J]. *中国土地科学*, 2008, 22(11): 56—62.  
Nie Yan, Lei Wenhua, Zhou Yong, et al. Research on spatio-temporal variation characteristic of regional urbanization and eco-environment coupling: A case of Hubei province[J]. *China Land Science*, 2008, 22(11): 56—62. (in Chinese with English abstract)
- [14] Feng Yingbin, He Chunyan, Yang Qingyuan, et al. Evaluation of ecological effect in land use planning using ecosystem service value method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(9): 201—211.  
冯应斌, 何春燕, 杨庆媛, 等. 利用生态系统服务价值评估土地利用规划生态效应[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 201—211. (in English with Chinese abstract)
- [15] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 346—356.  
Zhao Jun, Yang Kai. Valuation of ecosystem services: Characteristics, issues and prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 346—356. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J]. *地理学报*, 2011, 66(12): 1618—1630.  
Li Shuangcheng, Liu Jinlong, Zhang Caiyu, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(12): 1618—1630. (in Chinese with English abstract)
- [17] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. *地理研究*, 2003, 22(2): 212—220.  
Huang Jinchuan, Fang Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 212—220. (in Chinese with English abstract)
- [18] 沈清基. 论基于生态文明的新型城镇化[J]. *城市规划学刊*, 2013(1): 29—36.  
Shen Qingji. Study on new urbanization based on ecological civilization[J]. *Urban Planning Forum*, 2013(1): 29—36. (in Chinese with English abstract)
- [19] 单卓然, 黄亚平. “新型城镇化”概念内涵、目标内容、规划策略及认知误区解析[J]. *城市规划学刊*, 2013(2): 16—22.  
Shan Zhuoran, Huang Yaping. An analysis of the concept, goals, contents, planning strategies and misunderstandings of New Urbanization[J]. *Urban Planning Forum*, 2013(2): 16—22. (in Chinese with English abstract)
- [20] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911—919.  
Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911—919. (in Chinese with English abstract)
- [21] Costanza R, d'Arge R, de Groot, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253—260.
- [22] 胡瑞法, 冷燕. 中国主要粮食作物的投入与产出研究[J]. *农业技术经济*, 2006(3): 2—8.  
Hu Ruifa, Leng Yan. A study on input and output of main grain crops in China[J]. *Technological Economics of Agriculture*, 2006(3): 2—8. (in Chinese with English abstract)
- [23] 曾杰, 李江风, 姚小薇. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 883—891.  
Zeng Jie, Li Jiangfeng, Yao Xiaowei. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 883—891. (in Chinese with English abstract)
- [24] Anselin L. The local indicators of spatial association——LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93—115.
- [25] Ord J K, Getis A. Local spatial auto correlation statistics: Distributional issues and application[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(4): 286—306.
- [26] Wartenberg D. Multivariate spatial correlation: A method for exploratory geographical analysis[J]. *Geographical Analysis*, 1985, 17(4): 263—283.
- [27] Anselin L, Syabri I, Smirnov O. Visualizing multivariate spatial correlation with dynamically linked windows[C]// Anselin L, Rey S. *New Tools for Spatial Data Analysis: Proceedings of the Specialist Meeting*. Santa Barbara, University of California, 2002.
- [28] 陆汝成, 黄贤金. 基于省级和市级层次的违法占用耕地与经济发展的空间计量分析[J]. *中国土地科学*, 2012, 26(7): 60—66.  
Lu Rucheng, Huang Xianjin. Spatial analysis on the relation between illegal cultivated land occupation and economic development at provincial and municipal levels[J]. *China Land Sciences*, 2012, 26(7): 60—66. (in Chinese with English abstract)

- [29] 谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞, 等. 中国的生态服务消费与生态债务研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1): 43—51.  
Xie Gaodi, Cao Shuyan, Lu Chunxia, et al. Human's consumption of ecosystem services and ecological debt in China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(1): 43—51. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 387—398.  
Chen Mingxing, Lu Dadao, Zhang Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4): 387—398. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的尺度特征[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1432—1437.  
Zhang Hongfeng, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua. Spatial scale characteristics of ecosystem services[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1432—1437. (in Chinese with English abstract)
- [32] Limburg K E, O'Neill R V, Costanza R, et al. Complex systems and valuation[J]. Ecological Economics, 2002, 41(3): 409—420.
- [33] Turner R K, Paavola J, Cooper P, et al. Valuing nature: Lessons learned and future research directions[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 493—510.

## Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration

Yao Xiaowei<sup>1</sup>, Zeng Jie<sup>2\*</sup>, Li Wangjun<sup>3</sup>

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. College of Public Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** As one of the largest developing countries in the world, China has entered an accelerating period of urbanization with significant growth of economy and population. However, the ecological and environmental issues have directly threatened the sustainability of social and economic development in the country. In order to promote ecosystem quality in the high-speed urbanization process as well as provide scientific and feasible basis for differentiated and sustainable land use, this paper tried to explore the spatial correlation between urbanization and ecosystem service value (ESV). In the research, a metropolitan region in Central China called Wuhan Urban Agglomeration was selected as the study area. Located in the middle reaches of the Yangtze River, it is one of the most important regions with abundant agricultural and industrial products. According to the 4 aspects of urbanization concept involved population growth, economic development, urban space expanding and life quality improvement, 4 indicators, including proportion of urban permanent residents, proportion of built-up land, output proportion of non-agro industries and per capita disposable income of urban resident, were adopted to measure the levels of population urbanization, spatial urbanization, economic urbanization and living urbanization respectively. These data were collected from Hubei Statistical Yearbook in 2011. The land use data were derived from land use survey in 2010 and the outputs of crops in the study area were also calculated based on statistical data. The ESV of each land use type in Wuhan Urban Agglomeration was evaluated based on Costanza's evaluation formula and "equivalent value of ecosystem services per unit area in China". Both the spatial characteristics of urbanization and the ESV of all the 39 units were analyzed at the county level. Then the correlation between urbanization and ESV was calculated by utilizing bivariate spatial autocorrelation method. The results showed that the levels of urbanization and ESV in the study area both varied obviously in different areas. Urbanization was characterized by a structure with double centers and decreasing outward from centers, where the western area was basically higher than the eastern area. As to the ESV per hectare, the counties in the south hilly region were clustered to be the highest group. However, the lowest group was the counties clustered in the west and northwest region in Jiangnan Plain, not the big cities such as Wuhan or Huangshi, probably because this area was located in a main crop production region with much lower forest coverage. According to the bivariate spatial autocorrelation analysis, population urbanization was discovered to have the strongest negative correlation with ESV, followed by spatial urbanization and then living urbanization. Specifically, spatial urbanization and living urbanization had the most significant negative correlations with raw materials value, and the negative impacts of population urbanization, spatial urbanization and living urbanization on gas regulation value and soil conservation value were also very obvious. What's more, the bivariate LISA figures between different urbanization indicators with ESV had similar spatial characters. The high-low clusters were located in the central part of Wuhan Urban Agglomeration, whose economy was more developed. The low-high groups mainly gathered in the southern mountainous areas and in the northern Dabie Mountain areas. The research can provide important decision-making basis for regional new-type urbanization and ecological protection in future.

**Key words:** land use; ecology; correlation theory; ecosystem service value (ESV); urbanization; bivariate spatial autocorrelation; Wuhan Urban Agglomeration