

DOI: 10.5846/stxb201809081922

欧阳晓,朱翔,贺清云.城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例.生态学报,2019,39(20):7502–7513.

Ouyang X, Zhu X, He Q Y. Spatial interaction between urbanisation and ecosystem services: A case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7502–7513.

城市化与生态系统服务的空间交互关系研究 ——以长株潭城市群为例

欧阳晓^{1,2,3}, 朱翔^{1,3,*}, 贺清云¹

1 湖南师范大学资源与环境科学学院,长沙 410081

2 国土资源评价与利用湖南省重点实验室,长沙 410007

3 湖南师范大学地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室,长沙 410081

摘要: 探索生态系统服务与城市化的空间交互关系为城市发展和保护提供新的视角。以长株潭城市群为例,以其 2015 年的土地利用、经济社会等数据为基础,利用格网分析和空间自相关模型解析城市化与生态系统服务的空间交互规律。结果表明:(1)长株潭城市群城市化水平空间分布区域差异性显著,城市化水平由高到低依次为城市化地区、正在城市化地区和生态绿心保护区,表现出从城市化地区向周边地区依次递减的态势。(2)受城市化水平和土地利用变化等影响,生态系统服务空间分布具有明显的差异性,并呈现出“中心-外围”逐步升高的趋势。(3)长株潭城市群城市化与各项生态系统服务之间呈显著负相关,由于驱动机制的不同,城市化地区、正在城市化地区和生态绿心保护区的城市化对生态系统服务的影响存在显著差异。(4)长株潭城市群的各项生态系统服务与城市化之间存在四种空间相关类型。高高集聚区和低低集聚区零散分布在研究区域,面积较小;高低集聚区分布在湘潭县西南部、株洲县东南部,面积较大;低高集聚区分布集中在城市化地区,呈现块状分布,面积较大。

关键词: 生态系统服务;城市化;空间自相关;长株潭城市群

Spatial interaction between urbanisation and ecosystem services: A case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China

OUYANG Xiao^{1,2,3}, ZHU Xiang^{1,3,*}, HE Qingyun¹

1 College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2 Hunan Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Utilization, Changsha 410007, China

3 Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application of Hunan Province, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract: Exploring the spatial interaction between Ecosystem Services (ESs) and urbanisation can provide a new perspective for urban development and protection. Taking the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan (CZT) urban agglomeration as a case study, with reference to its land use and social economy in 2015, this paper employs grid analysis and a spatial autocorrelation model to analyse the spatial relationships between urbanisation and ESs. The results show that: (1) The spatial distribution of the levels of urbanisation are characterised by evident regional differences within the CZT urban agglomeration, with the level of urbanisation decreasing from urbanised areas to urbanising areas and to ecological conservation areas. (2) The spatial distribution pattern of ESs, influenced by the level of urbanisation and land use change, showed a obvious difference, with the values associated to ESs gradually increasing from the urban centres to the

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41601143); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B296); 国土资源评价与利用湖南省重点实验室开放课题(SYS-ZX-201902)

收稿日期: 2018-09-08; 网络出版日期: 2019-08-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuxiang882000@aliyun.com

<http://www.ecologica.cn>

peripheries. (3) Urbanisation and individual ESs show significant negative correlation. Due to the different driving mechanisms, urbanisation in urbanised areas, urbanising areas, and ecological conservation areas had significantly different impacts on the individual ESs. (4) Four spatial correlation types between individual ESs and urbanisation levels in the CZT urban agglomeration are identified. High-High areas and Low-Low areas are scattered throughout the study area, but cover only a small portion of it; High-Low areas are concentrated in the southwest of Xiangtan County and southeast of Zhuzhou County, and cover a larger proportion of the study area; Low-High areas are concentrated in the cities within the urban agglomeration, and as such they are widespread and cover large areas.

Key Words: ecosystem services; urbanisation; spatial autocorrelation; Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

城市化推动经济、社会、文化等要素全面发展,同时,城市化和人类活动也逐步改变了生态系统的结构(如:植被覆盖、土地利用等)和过程(如:物种减少),使自然生态系统转变为以人为主导或人与自然相耦合的生态系统^[1-4]。目前,生态系统正面临日益加剧的城市化压力,如何降低城市化对生态系统服务的影响,实现城市可持续发展,已成为世界各地城市规划者和决策者关注的热点问题^[5-7]。

生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)是人类直接或间接从生态系统中获得的商品和服务,是连接生态系统和人类福祉的纽带^[8]。ESs 可以分为四大类:供给服务(粮食生产、原材料生产等)、调节服务(气候调节、气体调节等)、支持服务(生物多样性维护、土壤保护等)和文化服务(户外娱乐、美学景观等)^[9]。由于 ESs 能够表征生态要素和功能,使得 ESs 成为研究生态环境问题的重要指标^[10-11]。随着生态系统功能的退化,城市化如何对 ESs 产生影响成为了生态学和地理学等学科研究的重要课题^[12-15]。目前,形成了两大方面的研究成果:(1) 利用线性回归模型表征城市化与 ESs 之间的关系。Wan 等^[15]利用曲线回归研究城市化对 ESs 的影响,发现 ESs 与城市化水平呈现不规则的倒“U”形,即随着城市化的推进,ESs 先增加后减少;Peng 等^[14]利用线性回归研究 ESs 与三个城市化指标的线性关系,进一步确定了 ESs 对三个城市化指标的响应阈值。(2) 利用空间分析模型解析城市化与 ESs 空间交互的关系。Li 等^[12]认为不同程度的城市化与 ESs 两者的空间关系存在差异;Su 等^[16]从地理视角探讨了 ESs 对城市化的响应,研究结果表明它们之间存在非平稳依赖关系。现有关于城市化与 ESs 二者关系的研究,主要集中在区域尺度上,无法反映局部空间变化。其次,缺乏在局部尺度上的 ESs 与城市化空间交互规律和聚类模式研究,将会限制 ESs 在城市发展规划中的实际适用性。因此,需要构建一种有效的模型来量化 ESs 与城市化两者的空间关系,为研究城市化对 ESs 的影响提供新方法。

长株潭城市群作为湖南省的政治、经济、文化中心,是长江中游城市群的重要组成部分,正处于快速的城市化、工业化发展阶段,必然导致对 ESs 的需求大幅增加,对生态空间和资源环境的侵占加剧。与其他城市群一样,长株潭城市群面临着实现可持续发展的挑战,需要平衡城市化和 ESs 的空间异质性。因此,本文以长株潭城市群为研究对象,选取土地利用、经济社会等数据对 ESs 和城市化进行量化和映射,利用格网分析和空间自相关模型,深入解析 ESs 和城市化的空间关系,以揭示两者的空间交互特征和集聚规律,旨在为城市群的可持续发展规划提供理论依据。

1 研究区概况

2000—2015 年期间,长株潭城市群经历了快速的城市化进程,人口数量增长 15.19%,从 1237.61 万人增加到 1425.60 万人;国内生产总值(GDP)增长 970.11%,从 1172.60 亿元增加到 12548.34 亿元;建成区面积增长 88.49%,从 537.59 km²增加到 1013.36 km²。本文以最新的城市群区域规划以及相关城市群城镇密集区的研究成果^[17-18]为依据,结合区域的完整性,选取城市群的都市区为本文的实证研究区,都市区包括长沙、株洲、湘潭三市的市区以及长沙县、株洲县、湘潭县。2015 年,该区域行政区划面积为 8629 km²,人口数量为 823.68 万人,GDP 为 9175.78 亿元,建成区面积为 771.63 km²,是整个城市群中城市化和生态环境变化最显著

的区域,能够更好地反映城市化对生态系统服务的影响。同时,根据最新的空间发展规划以及城市化水平,将该都市区分为三大功能区:城市化地区、正在城市化地区以及生态绿心保护区,如图1。

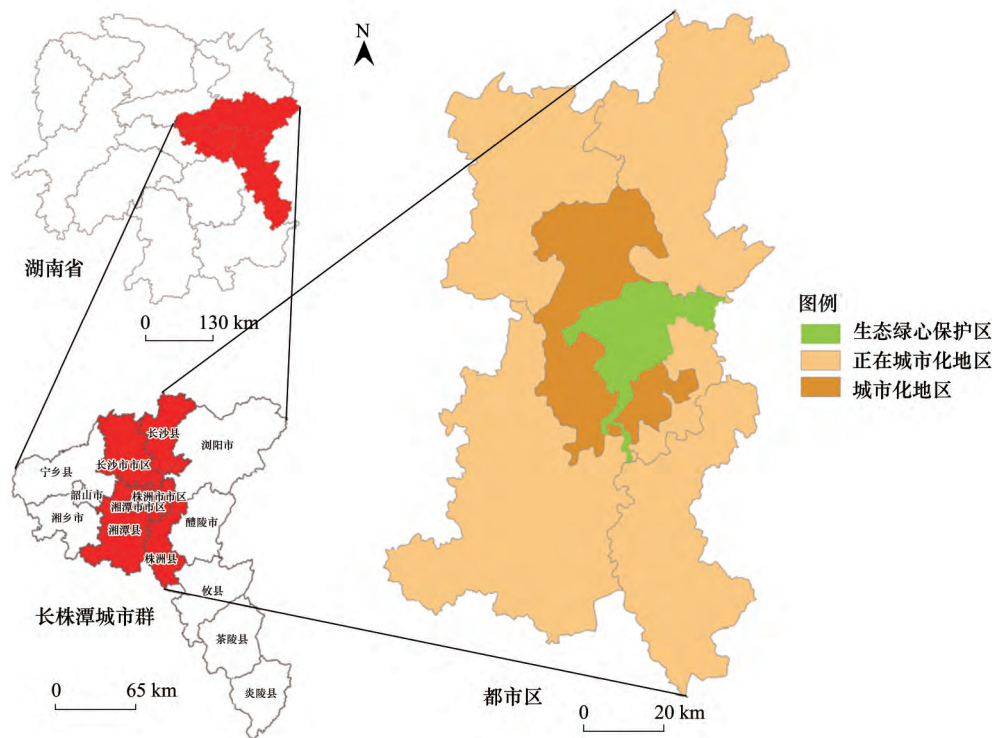


图1 研究区
Fig.1 Study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本文采用土地利用、经济社会等数据,基于对数据可用性、计算效率、最小单位的异质性等方面考虑,将所有的数据分布到公里网格上实现数据空间化。数据主要包括:(1)土地利用数据,比例为1:10000,由湖南省国土资源厅提供。(2)公里网格数据集,综合考虑土地利用、夜间灯光指数和其他遥感信息后,将人口密度和GDP密度两项区域统计数据通过插值降尺度到1 km×1 km的网格上。(3)归一化植被指数(NDVI),来源于MODIS遥感卫星MOD13Q1数据集,采用最大值合成法得到的植被指数数据集,分辨率为1 km。(4)净初级生产力数据(NPP),来源于MODIS遥感卫星MOD17A3数据,分辨率为1 km。(5)2016年的《湖南省统计年鉴》、《长株潭城市群统计年鉴》以及长沙市、株洲市、湘潭市的统计年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值计算方法

本文采用谢高地等^[19]制定的中国生态系统单位面积的生态系统服务价值(Ecosystem Service Values, ESV)当量,根据区域之间的差异性和湖南省区域的ESV修正参数(1.95)^[20-23],制定了长株潭城市群地区不同地类单位面积的单项生态系统服务(Individual Ecosystem Service, IESs)价值系数表(表1),根据表1对研究区的ESV进行计算。ESV当量因子的价值量计算公式如下:

$$VC_k = \frac{1}{7} \times P \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

式中: VC_k 为ESV当量因子的价值量(元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); P 为全国平均粮食价格(元/kg); Q 为研究区平均粮食产

量(kg/hm^2); n 为年份数。

ESV 的计算公式如下:

$$ESV = \sum A_k \cdot VC_k \quad (2)$$

式中: ESV 为生态系统服务价值; A_k 是第 k 类土地利用类型的面积(hm^2); VC_k 为 ESV 当量因子的价值量(元 $hm^{-2} a^{-1}$)。

从生态系统服务自身考虑, 生境质量对其功能发挥具有重要作用, 植被覆盖度和净初级生产力影响相应的生态系统服务^[24]。因此, 对 ESV 进行生境质量修正, 公式如下:

$$H_i = \left(\frac{NPP_i}{NPP_{mean}} + \frac{f_i}{f_{mean}} \right) / 2 \quad (3)$$

$$f_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (4)$$

$$ESV' = ESV \times H_i \quad (5)$$

式中: H_i 为生境质量系数; NPP_i 和 f_i 分别为第 i 个网格的净初级生产力和植被覆盖度, NPP_{mean} 和 f_{mean} 分别为研究区域内净初级生产力的均值和植被覆盖度的均值, $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为研究区内归一化植被指数的最大值和最小值; ESV' 为根据生境质量进行调整后的生态系统服务价值量。

表 1 各地类生态系统单位面积服务价值系数/(元 $hm^{-2} a^{-1}$)

Table 1 Ecosystem services value coefficients per unit area of land use types

生态系统服务功能 Ecosystem services function	土地利用类型 Land use type				
	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water body	未利用地 Unused land
气体调节 Gas regulation	2773.58	16641.50	5778.30	1964.62	231.13
气候调节 Climate regulation	3736.63	15678.45	6009.43	7935.53	500.79
水源涵养 Water conservation	2966.19	15755.50	5855.34	72305.78	269.65
土壤形成与保护 Soil formation and protection	5662.73	15485.84	8628.93	1579.40	654.87
废物处理 Waste treatment	5354.56	6625.78	5084.90	57205.16	1001.57
生物多样性保护 Biodiversity protection	3929.24	17373.42	7203.61	13213.04	1540.88
食物生产 Food production	3852.20	1271.23	1656.45	2041.67	77.04
原材料 Raw materials	1502.36	11479.55	1386.79	1348.27	154.09
娱乐休闲 Recreational culture	654.87	8012.57	3351.41	17103.77	924.53
合计 Sum	30432.38	108323.85	44955.17	174697.25	5354.56

城市化可以通过人口增长、经济发展、生活方式改变和城市用地扩张四个方面综合评价^[25]。人口增长和经济发展是城市化的基础, 生活方式改变和城市用地扩张分别是城市化的社会和空间表现^[26]。

由于获取和空间化社会数据困难, 本文从人口增长、经济发展和城市用地扩张三个方面选取指标来表征城市化。其中: 人口密度量化人口城市化、GDP 密度量化经济城市化、城市用地比例量化土地城市化, 由于人口密度、GDP 密度、城市用地比例的空间分布高度相似, 对每个网格内的三个指标进行标准化, 将三个标准化后的指标整合为一个综合指标, 即城市化综合水平(Comprehensive Urbanisation Level, CUL)。标准化公式如下:

$$U'_{ij} = \frac{U_{ij} - U_{i\min}}{U_{i\max} - U_{i\min}} \quad (6)$$

式中: U_{ij} 为第 i 个城市化指标在 j 网格中的原始值; U'_{ij} 为 U_{ij} 标准化后的值; $U_{i\min}$ 和 $U_{i\max}$ 分别表示第 i 个城市化指标在所有网格中的最小值和最大值。

2.2.2 生态系统服务与城市化的空间相关性分析

利用双变量 Moran's I 描述 IESs 与城市化之间的空间聚类(空间正相关) 和空间离散(空间负相关)。双

变量 Moran's I 方法,包括全局的双变量 Moran's I 和局部的双变量 Moran's I。全局双变量 Moran's I 用于检验 IESs 与城市化之间是否存在空间相关性,以及存在多大程度的相关,而局部双变量 Moran's I 用于检验不同网格单元之间是否存在空间相关性^[27]。公式如下:

$$I_{eu} = \frac{N \sum_i \sum_{j \neq i}^N W_{ij} z_i^e z_j^u}{(N-1) \sum_i \sum_{j \neq i}^N W_{ij}} \quad (7)$$

$$I'_{eu} = z_i^e \sum_{j=1}^N W_{ij} z_j^u \quad (8)$$

式中: I_{eu} 和 I'_{eu} 分别代表 IESs 与城市化的全局双变量 Moran's I 和局部双变量 Moran's I; W_{ij} 是一个 $n \times n$ 的空间权重矩阵; z_i^e 是第 i 个网格的生态系统服务标准化的值; z_j^u 是第 j 个网格的城市化综合水平标准化的值。

3 结果分析

3.1 城市化的空间分布格局

从城市化的空间分布格局(图 2)可以看出,长株潭城市群的城市化水平空间分布区域差异性明显。城市化地区的城市化水平最高,平均 CUL 为 0.49。正在城市化地区的城市化水平低于城市化城区,平均 CUL 为 0.19。生态绿心保护区的城市化水平最低,平均 CUL 为 0.05。GDP 密度、人口密度以及城市用地比例三个城市化指标的空间分布与 CUL 的空间分布非常相似,呈现出从城市化地区向周边地区依次递减。城市群的城市化水平不均衡主要是由于区位、生态环境以及区域政策等发展要素差异化导致。具体而言,过去城市群的城市化地区城市规模、投入资本和发展政策等方面优势明显,促使各类要素资源向其高度集聚,经济发展和人口集聚速度快。正在城市化地区以农业生产为主,自身特色资源未能充分开发导致城市化水平相对落后,同时,正在城市化地区相对于城市化地区来说,在发展基础及发展机遇上处于劣势。生态绿心保护区以生态保护为主,作为长株潭城市群禁止开发区,城市化水平最低。

3.2 生态系统服务的空间分布格局

从生态系统服务的空间分布格局(图 3)可以看出,长株潭城市群各单项生态系统服务的空间分布等级差异明显。气体调节和气候调节的服务价值分别为 0 到 2.93×10^6 元和 0 到 2.76×10^6 元,两者的高服务价值区域主要集中在长沙县的北部植被区、株洲县的东南部植被区以及湘潭县的南部植被区;水源涵养、废物处理和娱乐休闲的服务价值分别为 0 到 8.33×10^6 元、0 到 6.32×10^6 元以及 0 到 2.29×10^6 元,三者的高服务价值区域主要集中在水域和水域周围。土壤形成与保护、生物多样性保护、食物生产以及原材料的服务价值分别为 0 到 2.73×10^6 元、0 到 3.06×10^6 元、0 到 0.57×10^6 元以及 0 到 2.02×10^6 元。总体而言,生态系统服务在空间格局方面呈“中心-外围”分布,且表现出向外递增的空间分布趋势,低值的生态系统服务主要分布在城市化地区,而高值的生态系统服务主要集中在正在城市化地区和生态绿心保护区。造成这种空间分布格局的主要原因是城市群的城市化发展是由中心向外围扩散,且城市化地区由于城市用地比例高,而本文设定城市用地的生态系统服务价值为 0,因此,城市化地区形成了生态系统服务的低值集聚区。而生态系统服务的高值集聚区主要集中在分布在正在城市化地区和生态绿心保护区的水域区域和植被区域,该区域城市用地比例低。所以,生态系统服务的空间分布格局受城市化水平和土地利用类型影响较大。

3.3 城市化与生态系统服务之间的空间相关性

从全局二元空间自相关分析结果可以看出,IESs 与城市化之间存在显著的空间负相关性(所有的双变量 Moran's I < 0,如图 4),即城市化会导致 IESs 下降。城市化地区的城市化与 IESs 之间的负相关关系最强,由于人口集聚和城市用地扩张推动了土地利用的频繁变化,城市用地侵占了生态用地导致 IESs 明显的下降。正在城市化地区的城市化与 IESs 之间的负相关弱于城市化地区,由于人口、GDP、城市用地等方面的变化主要集中在城市化地区,而导致正在城市化地区的产业集聚、城市用地扩张、人口集聚等发展受到限制,区域内的土地利用变化强度弱于城市化地区,所以 IESs 下降幅度小于城市化地区。生态绿心保护区的城市化与 IESs

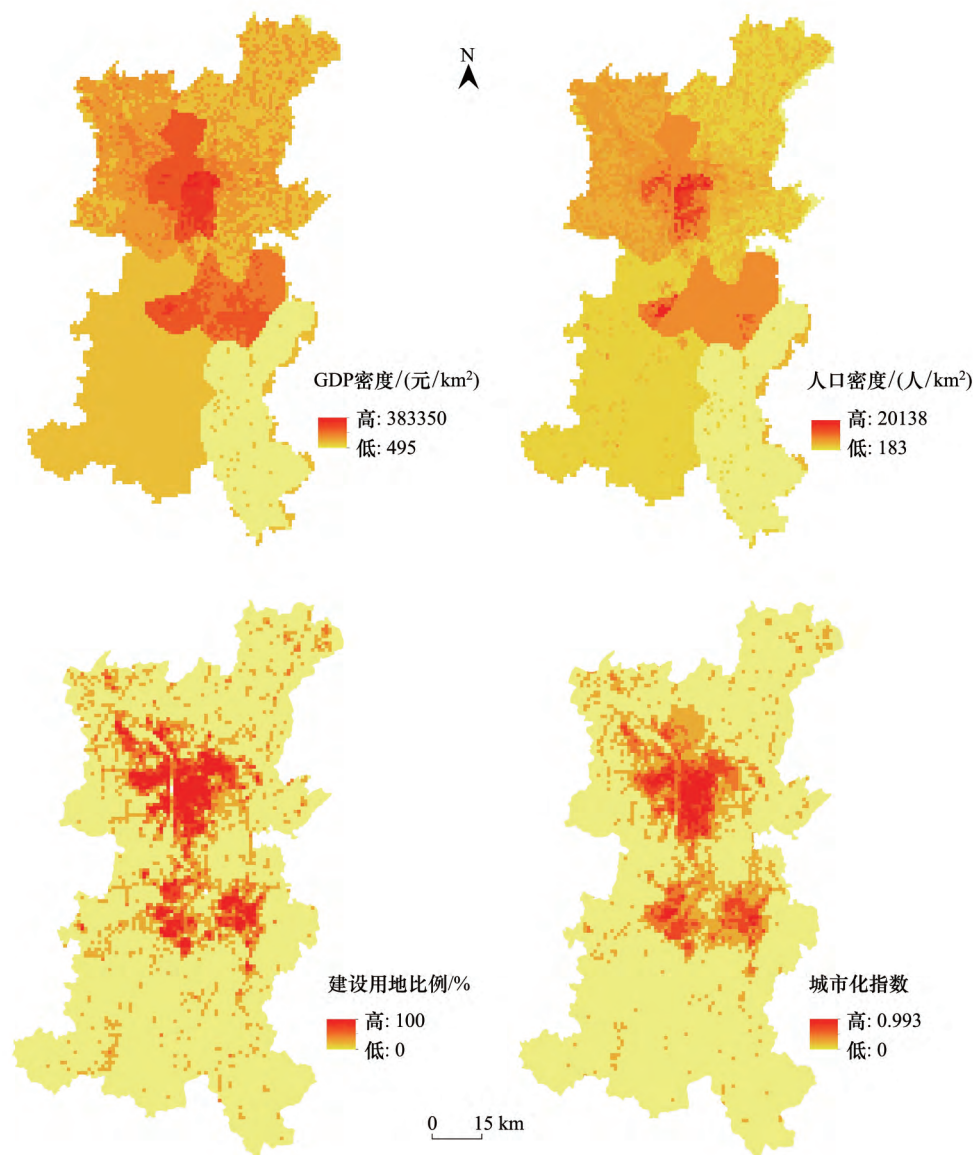


图2 长株潭城市群城市化的空间格局

Fig.2 Spatial patterns of urbanization in CZT urban agglomeration

之间的负相关关系最弱,生态绿心保护区作为城市群生态系统服务功能的主要提供者,受到城市化的影响较小,但由于经济利益的驱动,以及保护区范围内的乡镇对发展的诉求,导致 IESs 有所减少。整体而言,IESs 与城市化之间的负相关程度随不同程度的城市化而不同。

从局部二元空间自相关分析结果可以看出,IESs 与城市化之间的空间自相关可以分为四种类型(高高集聚区、高低集聚区、低高集聚区、低低集聚区),并且 IESs 与城市化之间的相关性在空间分布上有明显的相似性(如图5)。(1)高高集聚区零散分布在城市化地区,该地区经济得到了良好的发展,也承担了保护生态的重要任务。(2)高低集聚区分布面积较大,集中在湘潭县西南部、株洲县东南部,该地区具有巨大的生态优势,森林资源丰富,IESs 的价值较高;同时,该区域城市化程度较低。(3)低高集聚区呈现块状分布,集中在城市化地区,该地区人口密度和 GDP 密度较大,城市用地比例高,生态资源被占用和破坏的现象较为严重,导致 IESs 的价值降低。(4)低低集聚区零散分布在整個研究区域,该地区生态条件差,城市化程度低。

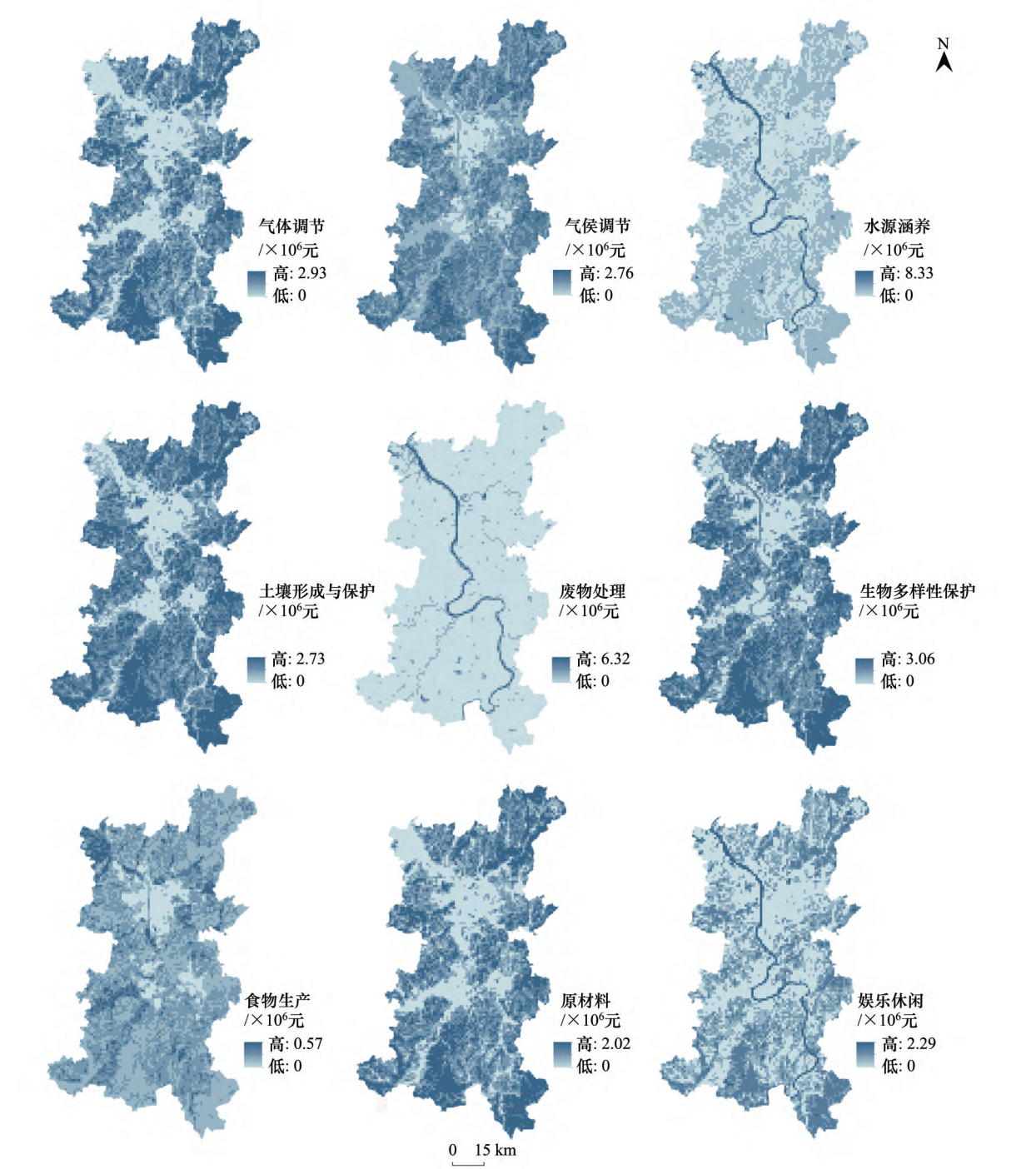


图 3 长株潭城市群生态系统服务空间格局

Fig.3 Spatial patterns of ecosystem services in CZT urban agglomeration

4 讨论

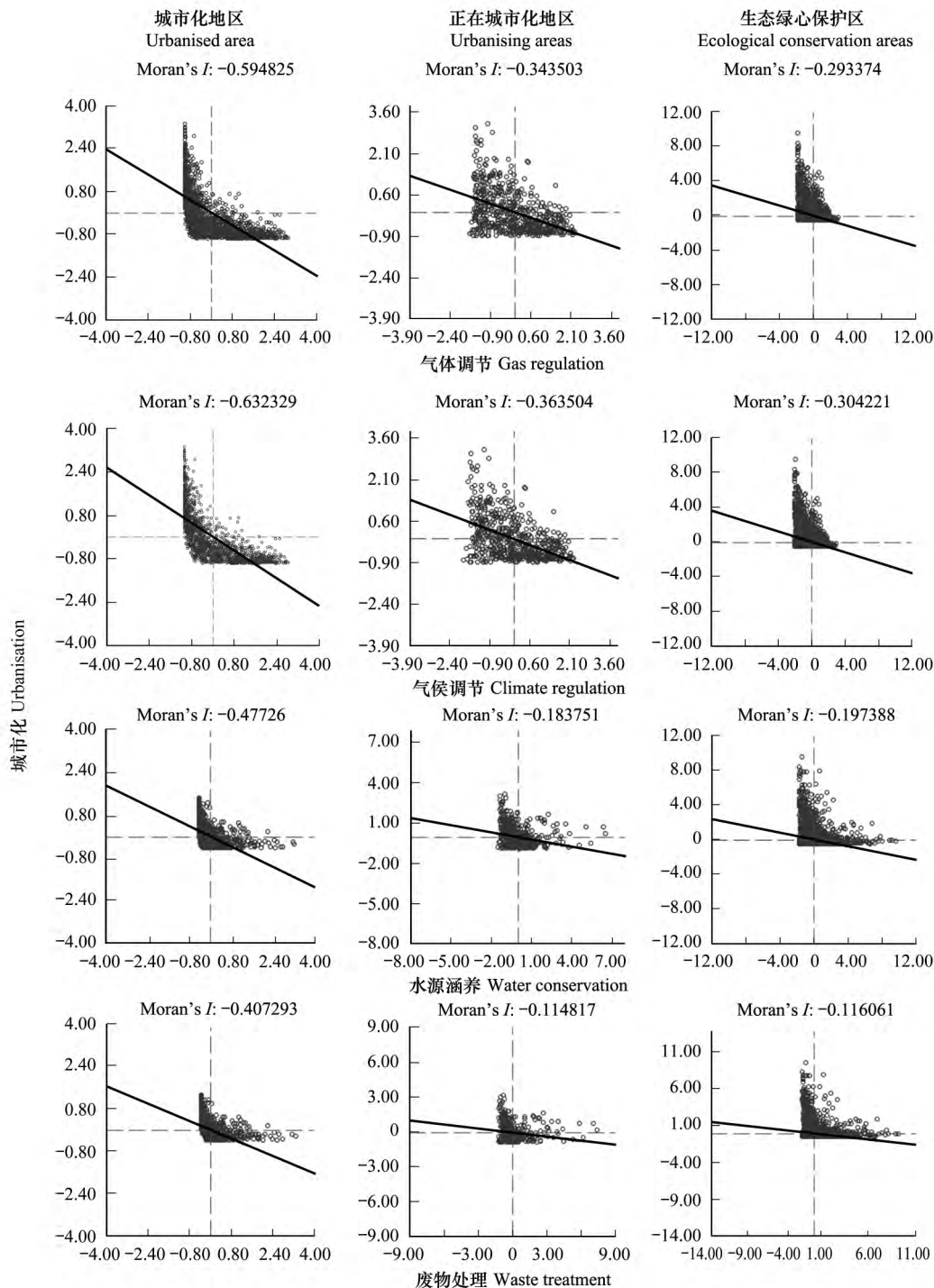
4.1 城市化影响生态系统服务的典型性

研究发现不同程度的城市化导致了生态系统服务表现出空间异质性(如图 3) 与生态系统服务沿城乡梯度变化相关研究结果一致,表明生态系统服务(如气候调节)随着距离城市地区的增加而增加^[28]。主要是因为城市化的过程是将自然景观转化为不透水表面,吸引人口流动进入城市地区^[29],降低了城市化地区的生态系统服务价值。城市与城市之间进行环境要素(如二氧化碳、二氧化硫等)的交换,通过自然过程之间的流动

(如大气运动、水文运动等)传递到周边地区,导致周边地区的生态系统服务发生变化。同时,在城市化过程中,可能存在其他的因素改变了生态系统服务,如植被覆盖率、地形、降水和土壤等因素。例如,在湘江穿过长沙市区、株洲市区、湘潭市区 3 个市区中心,沿河岸形成湿地和沙滩,虽然湘江周边地区高楼林立,人口密集,城市用地比例高,但由于水域、湿地的覆盖率高,在生物多样性保护和人类户外游憩方面仍具有很高的价值。

4.2 生态系统服务与城市化的空间关系对城市规划的启示

研究确定了生态系统服务与城市化之间存在四种空间自相关类型,高高集聚区具有较高的生态系统服务,应该考虑将高高集聚区划分为“生态功能区”,通过完善绿色基础设施和加强城市现代化功能,继续保持城市化发展与生态系统服务的平衡;高低集聚区作为生态优势地区,可以被认为是区域“生态保护区”,应当促进该区域的合理规划(减少城市用地面积,提高用地效率,发展不依赖自然资源的新产业),增加区域生态



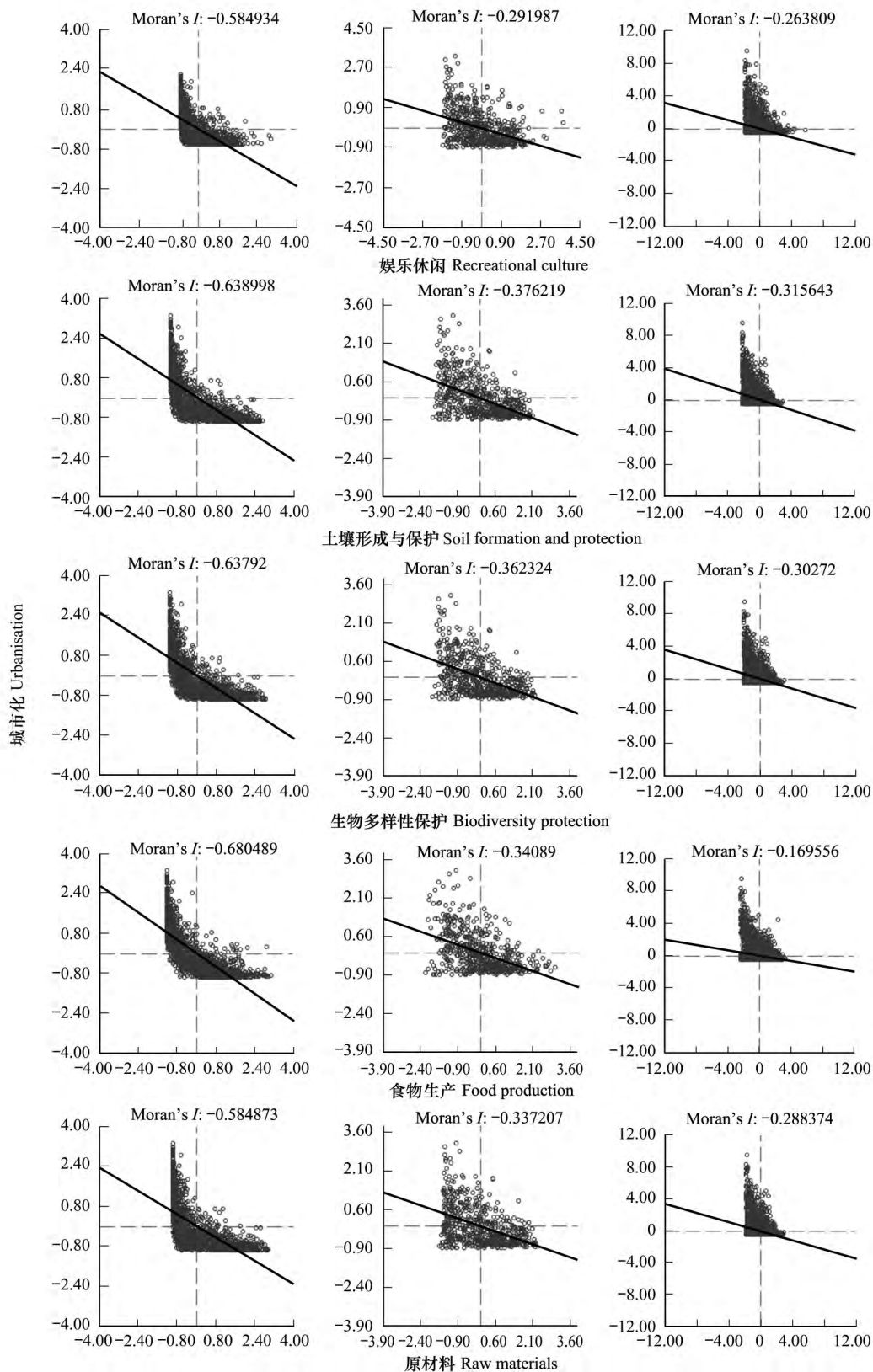


图 4 单项生态系统服务与城市化之间的 Moran's I 散点图

Fig.4 Moran's I scatter plot between IESs and comprehensive urbanization level



图 5 单项生态系统服务与城市化之间的 LISA 图

Fig.5 LISA cluster maps between IESs and comprehensive urbanization level

系统服务功能,提高生态环境质量;低高集聚区应该严格控制城市用地规模,创造绿色空间,降低建筑强度,提高土地集约利用水平,避免原有生态系统的破坏和城市用地的扩张;低低集聚区应考虑更多的生态修复项目(如造林和土地复垦),在保证区域生态环境安全的前提下,加大对土地整理和生态农业建设的投入。因此,在今后的城市规划中城市群应该加强区域协调发展,进一步挖掘不同区域自身优势,在区域内采取差异化的城市规划措施。具体而言,城市化地区应该提升区域创新能力,升级产业结构,以生态城市、智慧城市为建设目标,逐步增强对正在城市化地区的辐射带动作用。正在城市化地区应根据资源环境承载力,发展特色农业及旅游业、现代化服务业等第三产业,逐步提升城市化水平。生态绿心保护地区应该以生态保护为主,更好地发挥生态系统服务功能。

5 结论

本文基于土地利用、经济社会等数据,利用格网分析和空间自相关模型,分析了长株潭城市群城市化和生态系统服务的空间分布格局特征,并在此基础上深入解析生态系统服务和城市化的空间交互特征和集聚规律,得到以下结论:

(1) 由于区位、生态环境以及区域政策等发展要素的差异化影响,长株潭城市群的城市化水平空间分布区域差异性显著。在空间格局方面表现出从城市化地区向周边地区依次递减,城市化地区的城市化水平最高,正在城市化地区城市化水平低于城市化地区,而生态绿心保护区的城市化水平最低。

(2) 生态系统服务受城市化水平和土地利用等影响空间分布具有明显的差异性。在空间格局方面呈“中心-外围”分布,且表现出向外递增的空间分布趋势,低值的生态系统服务主要分布在城市化地区,而高值的生态系统服务主要集中在正在城市化地区和生态绿心保护区。

(3) 生态系统服务与城市化之间存在显著的空间负相关性。由于驱动机制的不同,城市化地区、正在城市化地区和生态绿心保护区对生态系统服务的影响存在显著差异。生态系统服务下降最快的发生在城市化地区,其次为正在城市化地区,而生态绿心保护区的下降幅度最小。

(4) 生态系统服务与城市化之间局部集聚类型有明显的相似性。高高集聚区零散分布在城市化地区,面积较小;高低集聚区分布在湘潭县西南部、株洲县东南部,面积较大;低高集聚区分布集中在城市化地区,呈现块状分布,面积较大;低低集聚区零散分布在整个研究区域,面积较小。

本文基于网格对生态系统服务和城市化进行评估,并对两者的空间关系进行分析,得到高分辨率的空间结果。然而,该方法仍然存在一些局限性。单一尺度分析可能会遗漏或扭曲生态系统服务与城市化之间的真实交互作用,而更精细或更大空间网格内指标的变化仍然是未知的。因此,在未来的研究中,需要使用多个尺度的网格来获得更可靠和全面的结果。

参考文献(References):

- [1] Li Y F, Li Y, Zhou Y, Shi Y L, Zhu X D. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment. *Journal of Environmental Management*, 2012, 98: 127-133.
- [2] Huang G L, London J. Mapping cumulative environmental effects, social vulnerability, and health in the San Joaquin Valley, California. *American Journal of Public Health*, 2012, 102(5): 830-832.
- [3] Qiu B K, Li H L, Zhou M, Zhang L. Vulnerability of ecosystem services provisioning to urbanization: A case of China. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 505-513.
- [4] Eigenbrod F, Bell V A, Davies H N, Heinemeyer A, Armsworth P R, Gaston K J. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 278(1722): 3201-3208.
- [5] Breuste J, Qureshi S. Urban sustainability, urban ecology and the Society for Urban Ecology (SURE). *Urban Ecosystems*, 2011, 14(3): 313-317.
- [6] Breuste J, Qureshi S, Li J X. Applied urban ecology for sustainable urban environment. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(4): 675-680.
- [7] Taylor L, Hochuli D F. Creating better cities: how biodiversity and ecosystem functioning enhance urban residents' wellbeing. *Urban Ecosystems*, 2015, 18(3): 747-762.

- [8] Costanza R , D'Arge R , De Groot R , Farber S , Grasso M , Hannon B , Limburg K , Naeem S , O'Neill R V , Paruelo J , Raskin R G , Sutton P , Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics* , 1998 , 25(1) : 3-15.
- [9] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*. Washington D C: Island Press , 2005: 77-101.
- [10] Alam M , Dupras J , Messier C. A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services. *Ecological Indicators* , 2016 , 60: 38-44.
- [11] Estoque R C , Murayama Y. Landscape pattern and ecosystem service value changes: Implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines. *Landscape and Urban Planning* , 2013 , 116: 60-72.
- [12] Li B J , Chen D X , Wu S H , Zhou S L , Wang T , Chen H. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: Case study of Nanjing City , China. *Ecological Indicators* , 2016 , 71: 416-427.
- [13] Zhang Z M , Gao J F , Fan X Y , Lan Y , Zhao M S. Response of ecosystem services to socioeconomic development in the Yangtze River Basin , China. *Ecological Indicators* , 2017 , 72: 481-493.
- [14] Peng J , Liu Y X , Wu J S , Lv H L , Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City , China. *Landscape and Urban Planning* , 2015 , 143: 56-68.
- [15] Wan L L , Ye X Y , Lee J , Lu X Q , Zheng L , Wu K Y. Effects of urbanization on ecosystem service values in a mineral resource-based city. *Habitat International* , 2015 , 46: 54-63.
- [16] Su S L , Li D L , Hu Y N , Xiao R , Zhang Y. Spatially non-stationary response of ecosystem service value changes to urbanization in Shanghai , China. *Ecological Indicators* , 2014 , 45: 332-339.
- [17] 贺艳华,唐承丽,周国华,何胜,邱永红,石亮,张浩中. 基于地理学视角的快速城市化地区空间冲突测度——以长株潭城市群地区为例. *自然资源学报* , 2014 , 29(10) : 1660-1674.
- [18] 贺艳华,周国华. 长株潭城镇密集区范围的界定. *热带地理* , 2007 , 27(6) : 521-525 , 547-547.
- [19] 谢高地,肖玉,甄霖,鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. *中国生态农业学报* , 2005 , 13(3) : 10-13.
- [20] 李涛,甘德欣,杨知建,王宽,齐增湘,李晖,陈希. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. *应用生态学报* , 2016 , 27(12) : 3787-3796.
- [21] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报* , 1999 , 19(5) : 607-613.
- [22] 马依拉·热合曼,买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,依克丽曼·阿布都米提,马春玥,依尔夏提·阿不来提. 基于遥感与 GIS 的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究. *生态学报* , 2018 , 38(16) : 5938-5951.
- [23] 景永才,陈利顶,孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. *生态学报* , 2018 , 38(12) : 4121-4131.
- [24] 许田,李政海,牛建明,鲍雅静,程岩,吕海燕,王海梅,高吉喜. 纵向岭谷区不同景观类型的服务价值. *应用生态学报* , 2008 , 19(9) : 2009-2015.
- [25] Bai X M , Shi P J , Liu Y S. Society: Realizing China's urban dream. *Nature* , 2014 , 509(7499) : 158-160.
- [26] Peng J , Tian L , Liu Y X , Zhao M Y , Hu Y N , Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *Science of the Total Environment* , 2017 , 607-608: 706-714.
- [27] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis* , 1995 , 27(2) : 93-115.
- [28] Larondelle N , Haase D. Urban ecosystem services assessment along a rural-urban gradient: A cross-analysis of European cities. *Ecological Indicators* , 2013 , 29: 179-190.
- [29] Du X J , Huang Z H. Ecological and environmental effects of land use change in rapid urbanization: The case of Hangzhou , China. *Ecological Indicators* , 2017 , 81: 243-251.