

武汉市城市用地扩张对生态系统服务的时空影响

朱晓南^{1,2}, 刘艳中¹, 陈勇^{1,2}, 张祚³, 宋改凤^{1,2}

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 武汉 430081;

2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 武汉 430081; 3. 华中师范大学 公共管理学院, 武汉 430079)

摘要:针对城市用地扩张对生态系统服务影响研究缺乏空间影响因素(坡度、高程、梯次)的分析,而导致无法以改变城市用地扩张的空间分布来减少 ES 损失的问题,以武汉市为例,定量计算区域各生态系统服务功能价值及城市用地扩张的时空变化特征,探究了城市用地扩张对生态系统服务的时空影响特征。结果表明:武汉市 ESV 高值和极低值区域在武汉市中部交错分布,受城市用地扩张影响最高,ESV 极低值区域不断扩大,逐渐扩散至西部和东部区域;近 25 年来,城市用地扩张面积不断增加,在 1990—2005 年扩张速度较为稳定,在 2005—2015 年扩张速度迅速增加。研究认为武汉市城市用地扩张面积对各生态系统服务功能均起主要影响作用,城市扩张侵占地利变化起次要影响作用,扩张高程影响程度较大,扩张距离影响程度较低,扩张坡度仅影响食物生产和保持土壤。武汉市在未来的城市用地扩张中,应控制中心城区的范围,在距市中心较远的地区建立新的卫星城。

关键词:生态系统服务;城市用地扩张;时空影响分析;武汉市

中图分类号:F301.2; X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0288-07

Effect of Urban Land Expansion on Spatiotemporal Ecosystem Service in Wuhan

ZHU Xiaonan,², Liu Yanzhong¹, Chenyong^{1,2}, ZHANG Zuo³, SONG Gaifeng^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory of High-Efficiency Utilization and Agglomeration of Metallurgical mineral Resources, Wuhan 430081, China; 3. College of Public Administration, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In view of the problem that the loss of ecosystem service cannot be reduced by changing the spatial distribution of urban land expansion, because the study on the influence of urban land expansion on ecosystem services lacks of spatial factors (slope, elevation and echelon), we selected Wuhan as a case example to calculate the value of important ecosystem services and the temporal and spatial variation characteristics of urban land expansion, and explore the spatial and temporal influence feature of urban land expansion on ecosystem services. The results were as follows. The regions with high ecosystem service value (ESV) or low ESV staggered in the central part of Wuhan, which was most affected by urban land expansion, and the area with extremely low value of ESV was expanding and gradually spreading to the western and eastern regions. In the past 25 years, the area of urban land expansion had continued to increase. In the period 1990—2005, the urban land expansion rate was relatively stable. In the period 2005—2015, the urban land expansion rate increased rapidly. It can be seen that the urban expansion area has played a major role in the ecosystem service. Urban expansion category has a secondary impact. The degree of expansion elevation has a greater impact, and the degree of expansion has a lower degree of influence. The degree of expansion elevation is greater, and the degree of expansion distance is less affected. The expansion slope only affects food production and soil conservation. In the future expansion of urban land use in Wuhan, the scope of the central urban area should be controlled and new satellite cities should be built in the area far from the city center.

Keywords: ecosystem service value; urban expansion; spatial analysis; regression analysis; Wuhan City

收稿日期:2019-11-08

修回日期:2019-11-18

资助项目:国家自然科学基金“矿区重金属污染农地农户利用行为机理与风险管控:以大冶市典型矿区为例”(41971237);国家自然科学基金“基于互联网搜索的住房价格公众关注度:城际网络特征与内在机理”(71774066)

第一作者:朱晓南(1995—),男,湖北十堰人,硕士研究生,主要从事土地资源和生态环境安全.E-mail:1102014634@qq.com

通信作者:刘艳中(1979—),男,山西吕梁人,博士,教授,主要从资源环境与区域可持续发展等研究.E-mail:Liuyanzhong@wust.edu.cn

生态系统服务(Ecosystem Service, ES)指人类从生态系统中直接或间接获得的各种惠益^[1],对维持人类生存具有十分重要的作用^[2]。目前,我国处于城镇化快速发展阶段,城市用地迅速扩张。而城市用地扩张属于土地利用/覆盖变化(Land Use/Cover Change, LUCC)之一,其通过改变土地面积、类型及格局直接影响生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)的多少^[3],是区域 ES 水平不断下降的主要原因^[4-8]。因此,定量研究城市用地扩张对 ES 的影响,有利于全面正确认识城市用地扩张带来的负面生态效应,为城市用地的合理扩张提供参考依据,对减少城市用地扩张造成的 ES 损失具有重要意义。

目前,国内外众多学者开展了 LUCC 对生态系统服务的影响研究,初步揭示了城市用地扩张对生态系统服务造成的影响。如,刘晓等^[9]、张志强等^[10]、王宽等^[11]、Yi 等^[12]、Fu 等^[13]、邵小云等^[14]通过分析土地利用与 ESV 的变化,初步揭示了城市用地扩张导致区域 ESV 不断下降;虎陈霞等^[15]、王雅等^[16]、孟悦^[17]等应用相关性分析法对城市面积和 ESV 进行分析,定性揭示了城市用地扩张对 ESV 造成的影响;刘亚茹等^[18]、荣益等^[19]构建了 LUCC 对 ESV 影响程度的评估模型,定量评价了城市用地扩张对 ESV 的影响。但上述研究较多的关注了城市用地扩张面积变化对 ESV 的影响,未揭示出城市用地扩张的空间变化(梯度、高程、坡度)对 ESV 造成的不同影响。虽有部分学者^[20-21]对城市用地比例和 ESV 进行了空间自相关分析,体现出了城市用地与 ESV 相关性的空间分布特征,但其实质上是城市用地与 ESV 的相关性研究,未能定量揭示城市用地扩张的空间特征变化对 ESV 造成的影响。这些研究均只能从限制城市用地扩张的角度来保护 ES,与城市发展需求所冲突,未能以改变城市用地扩张空间分布的角度来减少 ES 的损失。

武汉市位于汉江和长江交汇之处,是长江经济带重要的生态节点,维持武汉市的生态环境对保护长江中下游地区的生态安全具有重要意义。而在快速城镇化的背景下,武汉市城市用地不断扩张,生态环境日益恶化。如何实现经济与环境的协调可持续发展,成为武汉市面临的巨大挑战。因此,以武汉市为例,定量化评价武汉市城市用地扩张的时空变化特征;基于动态的当量因子法,逐地块的计算 ESV,分析武汉市 ESV 的时空动态特征。进一步利用回归分析建立城市用地扩张变化与 ESV 变化的联系,揭示城市用地扩张对生态系统服务的时空影响特征。从改变城市用地扩张空间分布的角度减少 ES 的损失,在保障城市扩张面积的基础上减少城市用地扩张对 ES 造成的破坏,以期对武汉市的国土空

间规划提供参考,为促进武汉市经济与环境的协调可持续发展提供一定的理论支撑和科学依据。

1 研究区概况与数据来源

武汉地处长江中下游平原,江汉平原东部,是国家区域中心城市(华中)、副省级市和湖北省省会。位于东经 113°41′—115°05′,北纬 29°58′—31°22′,境内水系丰富,对维持长江流域的生态环境具有重要作用。同时,武汉市作为长江经济带的核心城市、中部崛起的重点城市,城市规模不断扩大,2004—2008 年期间,扩张强度达全国第四^[22]。而城市的快速发展导致武汉市的生态环境日益恶化,环境问题不断突出,如水土流失程度不断加重^[23],湖泊湿地的减少导致城市内涝频发^[24]。

本文采用的主要数据包括:1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 6 个时期武汉市土地利用数据和武汉市高程数据,源自中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>);1990—2015 年武汉市 NPP 数据,来源于国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn>)和中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>);武汉市粮食单位面积产量来源于武汉市统计年鉴;农产品收益价值来源于《全国农产品成本收益资料汇编》。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值计算

ESV 计算方法主要为物质量评估法、价值量评估法、能值分析法和生态模型法^[25]。由 Costanzo 等^[1]提出当量因子法作为物质量评估法之一,具有易于计算、标准化的优点^[26],被广泛应用于 LUCC 与 ES 联系的相关研究^[27]。因此,本文采取当量因子法对武汉市的 ES 进行量化分析。

2.1.1 当量因子计算 谢高地等^[28]通过专家知识法将 1 hm² 农田食物生产能力为一个标准当量因子,以各地类各生态系统服务功能对农田食物生产功能的相对重要性为当量因子,构建了中国生态系统当量因子表(表 1)。参考谢高地等^[29]的处理方法,将单位面积农田粮食生产经济价值的 1/7 作为 1 个标准当量因子的价值量,计算公式如式(1):

$$D_j = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n S_{ij} \quad (1)$$

式中: D_j 为第 j 年 1 个武汉市标准当量因子的价值量(元/hm²); S_{ij} 为第 j 年 第 i 类农作物武汉市单位面积平均生产价值(元/hm²)。

为消除货币通货膨胀等经济因素对 ESV 的影

响^[30-31],本文以 2015 年 ESV 为基线,根据货币的时间价值对当量因子进行修正^[32],修正模型见公式(2):

$$DT_j = D_j + D_j \times \sum_{m=j}^{2014} \gamma_m \tag{2}$$

式中:DT_j为时间修正后第 j 年武汉市 1 个标准当量因子的价值量(元/hm²);γ_m为第 m 年银行一年定期利率(%),当 m 大于 2014 时,γ_m为 0。

2.1.2 生态系统服务价值计算模型 由于同种生态系统的 ESV 具有空间差异性^[26],而传统的当量因子法按生态系统类型进行 ESV 的核算,无法体现出各生态系统内的空间差异性,需按地块进行微观空间尺度上的 ESV 核算。通常,植被净初级生产力(NPP)

能体现出 ESV 的大小^[26],因此,以各地块的单位面积 NPP 与该地块所属类型的生态系统平均单位面积 NPP 的比值为修正系数,修正模型见公式(3—4):

$$\chi_{ij} = \frac{NPP_{ij}}{NPP_{ij}} \tag{3}$$

$$ESV_{jk} = \sum_{i=1}^n (F_{ik} \times DT_j \times \chi_{ij} \times S_{ij}) \tag{4}$$

式中:χ_{ij}为修正系数;NPP_{ij}为第 i 个空间单元第 j 年的单位面积 NPP 值;ESV_{jk}为生态系统服务功能价值(元/hm²);F_{ik}为生态系统服务功能当量;S_{ij}为面积(hm²);i 为地块;j 为年份;k 为生态系统服务功能。(由于水域 NPP 值为 0,修正系数均设为 1)。

表 1 生态系统当量因子

一级类型	供给服务		调节服务				支持服务		文化服务
二级类型	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	废物处理	保持土壤	维持生物多样性	美学景观
农田	1.00	0.39	0.72	0.97	0.77	1.39	1.47	1.02	0.17
森林	0.33	2.98	4.32	4.07	4.09	1.72	4.02	4.51	2.08
草地	0.43	0.36	1.50	1.56	1.52	1.32	2.24	1.87	0.87
湿地	0.36	0.24	2.41	13.60	13.44	14.40	1.99	3.69	4.69
荒漠	0.02	0.04	0.06	0.13	0.07	0.26	0.17	0.40	0.24
河流/湖泊	0.53	0.35	0.51	2.06	18.77	14.85	0.41	3.43	4.44

注:来源于参考文献[28]。

2.2 城市用地扩张分析

2.2.1 城市用地扩张地类分析 由于城市用地扩张侵占不同地类对 ES 造成的影响不同,仅使用城市用地扩张面积无法全面体现城市用地扩张的负面生态效应,需根据各地类各生态系统服务功能的相对重要性(当量因子)赋予权重。同时为体现同种地类不同地块的时空差异性,采取 NPP 对当量因子进行修正,修正模型见公式(5—6):

$$\beta_{ij} = \frac{NPP_{ij}}{NPP_i} \tag{5}$$

$$UGD_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{ik} \times S_{ij} \times \beta_{ij}) - \sum_{l=1}^m (F_{lk} \times S_{l(j+5)} \times \beta_{l(j+5)})}{\sum_{i=1}^n S_{ij} - \sum_{l=1}^m S_{l(j+5)}} \tag{6}$$

式中:β_{ij}为权重修正系数;UGD_{jk}为城市用地扩张对生态系统服务功能的单位面积平均破坏权重(以下简称“扩张破坏权重”);S_{ij}为城市用地扩张面积;S_{l(j+5)}为城市用地转化为其他地类面积。扩张破坏值可在一定程度上表示城市用地扩张侵占地类的比例变化,如食物生产扩张破坏值增大可表示出农田被城市用地侵占比例增大。

2.2.2 城市用地扩张空间分析 为探讨武汉市城市用地扩张的空间分布特征,引入梯度分析、高程分析和坡度分析。以武汉市 1990 年城市用地的几何中心为原点,以 1 km 为间距设置缓冲区,各地块所属缓

冲区编号即为距武汉市中心的距离。通过城市用地扩张地块距市中心的单位面积平均距离、高程和坡度(以下分别简称“扩张距离”、“扩张高程”和“扩张坡度”)分析城市用地扩张的空间变化特征。

2.3 城市用地扩张影响分析

为定量分析城市用地扩张对区域各生态系统服务功能的影响,采用 SPSS 22.0 线性回归分析中的逐步分析法和显著性检验剔除不显著的变量,构造最优的回归方程^[33]。并通过各方程的非标准化系数分析各影响因素对生态系统服务功能的实际影响,标准化系数分析各因素对生态系统服务功能的影响程度。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值变化分析

3.1.1 生态系统服务价值时间变化分析 通过公式(4)求得 1990—2015 年武汉市各生态系统服务功能价值(图 1);1990—2015 年武汉市生态服务功能价值从 99.34 亿元减少至 82.98 亿元,降幅为 16.47%,年平均减少率为 0.66%。其中降幅最大的时间段为 2010—2015 年,降幅为 6.67%;降幅最小的时间段为 2000—2005 年,降幅为 1.77%。ESV 整体呈线性递减过程,经历了“快速—缓慢—快速”的降低过程。

从各生态系统服务功能来看,水文调节和废物处理构成了武汉市 ESV 的主体,二者的减少值也最大,但水

文调节的降幅仅高于美学景观,降幅为 13.71%,其次是废物处理,降幅为 15.49%;食物生产的降幅最高,达 26.19%,其次保持土壤,降幅为 23.44%;原材料生产、气体调节和维持生物多样性降幅略高于 ESV 整体降幅,降幅分别为 18.03%,19.26%和 17.51%。就各阶段而言,各生态系统服务功能均呈线性递减过程,水文调节、废物处理、保持土壤、维持生物多样性和美学景观在 1990—2000 年,减少速度逐渐加快;在 2000—2005 年,减少速度变缓;在 2005—2015 年减少速度又逐渐加快,与 ESV 整体变化相似;原材料生产和气体调节在 1990—2015 年,减少速度不断加快;气候调节在 1990—2005 年,减少速度逐渐变缓,在 2005—2015 年,减少速度迅速加快;食物生产在 1990—1995 年,2000—2005 年,减少速度较缓慢,在 1995—2000 年,2005—2015 年,减少速度较迅速。

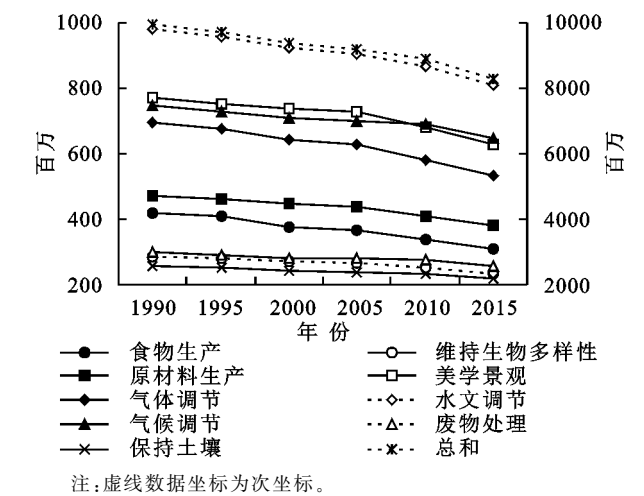


图 1 武汉市生态系统服务功能价值

3.1.2 生态系统服务价值空间变化分析 在 ArcGIS 软件中,将单位 ESV 分为 6 类,得到 ESV 分布图(图 2)。由图 2 可知,武汉市 ESV 分布较为复杂,中部地区 ESV 极高和极低地区交错分布;东北部地区 ESV 较低;正北地区除在最北边 ESV 较高外,其余地区 ESV 较低;西部地区 ESV 极高和较低地区交错分布;南部地区 ESV 普遍较高。生态系统价值高值的区域与水域分布较为一致,主要位于中部和南部地区。生态系统价值极低值的区域与建设用地分布较为一致,主要分布在中部地区;ESV 较低值区域与农田分布一致,遍布武汉市境内,在中部和南部与水系交错分布,在北部分布较为集中。由于建设用地不断扩张,中部地区的极低值区域不断扩大,在 2005—2015 年,建设用地扩张进一步加剧,东部地区,北部地区和东北部地区的极低值区域迅速增加,较低值区域不断减少。

在 ArcGIS 软件中,根据武汉市高程(图 3),通过

坡度分析得到武汉市坡度图(图 4)。由图 3 可知,武汉市 ESV 高值区域分布与水域和林地相同,分布位于武汉市高程极低和极高区域,ESV 低值区域和极低值区域均分布于高程较低区域。由图 4 可知,武汉市坡度较为平坦,除北部和中南部坡度较高之外,其余地区坡度均较低。

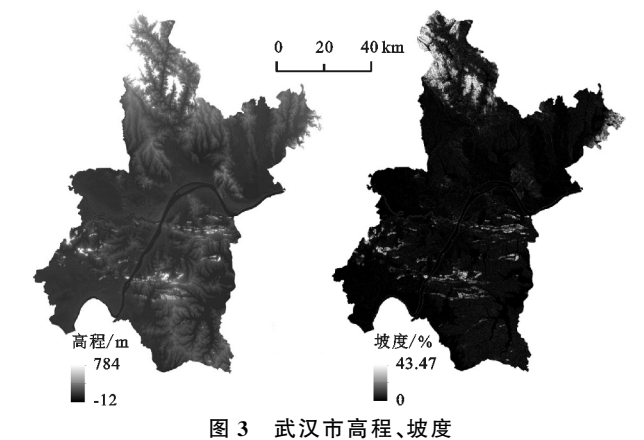
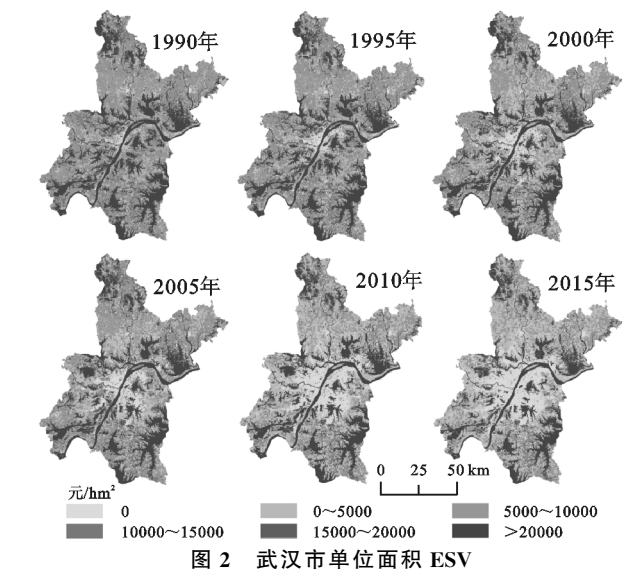


图 3 武汉市高程、坡度

3.2 城市用地扩张变化分析

武汉市城市用地扩张变化如表 2 所示:过去 25 a 武汉市建设用地扩张量显著,增加了 4 倍。就发展阶段而言,1990—2005 年武汉城市扩张面积缓慢增长,在 2005—2015 年迅速增长;但就增加速率而言,在 1990—1995 年,增长速率最大,为 50.92%,2000—2005 年最小,为 31.27%。在空间形态上,在 1990—2010 年,武汉市扩张距离稳定在 20~25 km 内,而在 2010—2015 年,迅速扩散至 30 km 以上;在坡度上则变化不大,城市用地扩张的地形较为平坦;在高程上,1990—1995 年,扩张高程最高,平均达 35 m 以上,在 1995—2000 年,扩张高程最低,平均为 25 m,在 2000—2015 年,扩张高程较为稳定,平均为 30 m;扩张破坏权重呈“W”波动变化,在 1990—1995 年,

2010—2015 年最大,1995—2000,2005—2010 年最小,证明武汉城市用地扩张侵占的地类在 1990—1995 年,2010—2015 年,高生态价值地类(水域、林地)的比例较大,对生态的破坏性相对较高。

3.3 城市用地扩张影响分析

由 SPSS 22.0 逐步回归分析可得城市用地扩张对生态系统服务功能的影响系数如表 3 所示:ESV 整体受城市扩张面积、扩张高程、扩张距离和扩张破坏权重影响,其中 ESV 受扩张面积和扩张破坏权重负面影响,即扩张面积和扩张破坏权重分别每增加 1 hm²,1 单位,ESV 减少值分别增加 51 573,88 351 543 元;ESV 受高程权重和距离权重正面影响,这是由于武汉市高 ESV 区域主要分布于低高程地区和武汉市中南部,而武汉市城市扩张主要集中在中部和中北部区域,因此 ESV 减少值会

随着城市扩张高程和距离的增多而减少;而坡度高值区域和低值区域均主要为高 ESV 区域,坡度中值区域则为低 ESV 区域,因此,城市用地扩张的坡度变化对 ESV 整体影响较低。进一步通过标准化系数分析各因素对生态系统服务功能的影响程度,扩张面积的影响程度最大,其次是距离权重,高程权重的影响程度相对最低,但除坡度外,影响程度相差不大。

表 2 城市用地扩张变化

年份	坡度/%	高程/m	梯次/km	面积/hm ²
1990—1995	2.11	35.52	20.74	19905.42
1995—2000	1.76	25.69	22.39	22316.34
2000—2005	1.92	30.50	24.30	25425.34
2005—2010	1.90	31.20	24.14	38977.75
2010—2015	1.78	30.40	32.55	50934.65

表 3 城市用地扩张影响系数

生态系统 服务功能	扩张面积		坡度权重		高程权重		距离权重		扩张破坏权重	
	非标准化	标准化	非标准化	标准化	非标准化	标准化	非标准化	标准化	非标准化	标准化
ESV	51573**	3.997	—	—	-182133572**	-2.314	-52698634**	-3.009	88351543**	2.516
食物生产	633**	0.686	89418433**	0.283	—	—	—	—	42185798**	0.754
原材料生产	328**	0.997	—	—	—	—	—	—	—	—
气体调节	937**	1.332	—	—	-1072743*	-0.250	-635392**	-0.665	25204302*	0.413
气候调节	2876**	1.982	—	—	-537783*	-0.169	-264705**	-0.344	18378773*	0.333
水文调节	3762*	0.875	—	—	-20546228*	-0.784	—	—	22010865*	0.860
废物处理	17285**	4.833	—	—	-58501957**	-2.682	—	—	92794888**	2.953
保持土壤	684**	0.567	137162637**	0.332	—	—	—	—	53810029**	0.557
维持生物多样性	3291**	2.67	—	—	-10407750**	-1.385	-3125142**	-1.868	63255131**	1.530
美学景观	888**	0.840	—	—	-3984759*	-0.618	—	—	19864899**	0.825

注: * 代表在 0.05 水平上该系数显著, ** 代表在 0.01 水平上该系数显著,—代表该系数不显著。

就各生态系统服务功能而言,气体调节、气候调节、维持生物多样性受城市用地扩张的影响与 ESV 整体较为相同,但由于各地类的气体调节能力和气候调节差值不大,导致气体调节和气候调节主要受扩张面积影响;而各地类的维持生物多样性能力构成与 ESV 整体构成相似,所以各因素对维持生物多样性影响程度与 ESV 整体相似。食物生产和保持土壤受城市用地扩张影响相同,均受扩张面积、坡度权重、扩张破坏权重负面影响,且扩张面积和扩张破坏权重的影响程度均较高,坡度权重的影响程度稍弱。这是由于食物生产主要由农田提供,保持土壤主要由农田和森林提供,但由于武汉市森林面积较少且变化不大,所以食物生产和保持土壤主要受农田变化影响,扩张破坏权重影响程度较高;食物生产和保持土壤高值区域主要分布于中低坡度地区,低值区域则分布于低坡度地区,所以食物生产和保持土壤减少值随城市用地扩张的坡度增加而增加。除森林外,各地类的单位面

积原材料生产价值变化不大,而森林面积较少且变化不大,导致原材料生产受城市用地扩张的影响与其余生态系统服务功能均不相同,其仅受扩张面积影响。水文调节、废物处理和美学景观构成较为单一,主要由水域和湿地构成,且两者的单位面积水文调节和美学景观价值远大于其余地类,也主要分布于低高程区域,导致扩张破坏权重的影响程度与扩张面积相同,高程的影响程度略低于扩张面积。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究定量化评价了武汉市城市用地扩张的时空特征,利用回归分析建立起城市用地扩张变化与 ESV 变化的联系,定量化表达了城市用地时空变化因素对各生态系统服务功能的影响程度,揭示了城市用地扩张对 ES 的时空影响特征,可为武汉市更加科学合理的空间规划提供依据,也可为 LUCC 对 ES 影

响的相关研究提供空间分析上的参考。但城市用地扩张对ES造成的影响不仅有城市用地扩张侵占地类所造成的直接影响,还应包括城市用地扩张侵占地类引起的其他地类的转化而造成的间接影响,如城市用地扩张侵占基本农田,导致其他地类转化为基本农田以补充基本农田的损失,如何量化分析间接影响有待进一步研究。

ESV的计算方法尚未统一,采用不同标准计算得到的价值量往往存在差异,但并不影响其为区域生态环境保护 and 可持续发展提供参考依据^[21]。目前,动态的当量因子法由于其体现出同一地块同一地类的ESV在不同时间上的差异性,逐渐被采用^[34-35],但由于受通货膨胀等经济因素的影响,其当量因子随时间增大而增大,且差值往往较大,导致ESV往往偏大。因此,部分学者^[30-31]对当量因子进行了时间修正,以期剔除通货膨胀等对ESV的影响。本文以货币的时间价值对当量因子进行时间修正,既体现出同一地块同一地类的ESV在不同时间上的差异性,又使当量因子受经济因素影响较小,使ESV在时间上的变化分析更加准确,为ESV时间变化上的研究提供了参考。但时间修正的方法也尚未统一,可表示通货膨胀的指标较多,采用不同指标的修正结果存在差异,如何更加准确的在时间上修正ESV有待进一步探索。

本研究采用NPP对各地块的ESV进行逐一修正,体现出了同种地类ESV的空间差异性,使ESV在空间上的分布更为细致,为ESV在空间上的研究提供了参考。但水域的NPP往往为0,无法对其进行空间上的修正,而河流和海洋的其他ESV计算方法^[36-37]均无法体现出ESV的空间差异性。因此,未能分析水域的ESV的空间分布特征,城市用地扩张对ES的时空影响研究不够细化,需进一步研究。

根据武汉市城市用地扩张对生态系统服务的影响分析结果,武汉市侵占高程较高的、较远的地块对生态系统服务破坏较小,侵占农田对食物生产和保持土壤的破坏性较大,但对其余生态系统服务功能破坏较小。在满足城市用地扩张需求的条件下,可适当牺牲食物生产和保持土壤能力换取对其余生态系统服务功能的保护。因此,武汉市在未来的城市用地扩张中,应控制中心城区的范围,通过挖掘存量建设用地的内部潜力,逐步提高建设用地集约利用水平;在距市中心较远、高程较高的地区建立新城,从而在城市扩张面积不变的基础上减少ES的损失。同时,该建议与《武汉市城市总体规划(2017—2035年)》所提

出的主城+新城+3副城+3组团的格局相符合。

4.2 结论

(1) 1990—2015年,武汉市ESV不断下降。其中,食物供给的降幅最大,保持土壤次之,水文调节和美学景观的降幅最小。在空间分布上,中北部和东北部ESV较低,受到城市用地扩张的影响较高;极北地区ESV较高,受到城市用地扩张的影响最低;ESV高值区域和低值区域在武汉市南部交错分布,该区域受武汉市城市用地扩张的影响较低,变化不大;ESV高值和极低值区域在武汉市中部交错分布,该区域受城市用地扩张影响最高,ESV极低值区域不断扩大,逐渐扩散至西部和东部区域。

(2) 武汉市在1990—2015年的城市用地扩张面积不断增加,在2005—2015年扩张速度迅速增加。扩张破坏权重变化幅度不大,城市用地扩张侵占的地类比例构成相对较稳定,主要为农田,次要为水域;而水域和农田的坡度均较平缓,所以扩张坡度变化不大;由于农田在高程上分布并不规律,高程权重呈波动变化;扩张距离在1990—2010年缓慢增加,稳定在20~25 km,该阶段城市用地扩张主要聚集在城市中心附近,在2010—2015年,扩张距离迅速增加,上一阶段将市中心25 km范围内可供开发地块基本开发完毕,所以该阶段城市边界迅速向外扩张。

(3) 近25 a来,武汉市城市用地扩张面积对各生态系统服务功能均起主要影响作用;扩张坡度仅影响食物生产和保持土壤,且影响程度较低;扩张高程对气体调节、气候调节的影响较低,对ESV整体和维持生物多样性影响适中,对水文调节、废物处理和美学景观影响较高;扩张距离对气体调节和气候调节影响较低,对ESV整体和维持生物多样性影响适中;扩张破坏权重除对原材料生产无影响,对气体调节和气候调节影响较低之外,对其他生态系统服务功能影响较高。

参考文献

- [1] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Daily G C. *Nature's services*[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [3] Bryan B A, Ye Y, Connor J D. Land-use change impacts on ecosystem services value: Incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 32: 144-157.
- [4] Song W, Deng X. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. *Science of the*

- Total Environment, 2017, 576: 705-719.
- [5] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [6] 张丽琴, 渠丽萍, 吕春艳, 等. 基于空间格局视角的武汉市土地生态系统服务价值研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 1988-1997.
- [7] Vigl L E, Tasser E, Schirpke U, et al. Using land use/land cover trajectories to uncover ecosystem service patterns across the Alps [J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(8): 2237-2250.
- [8] Arowolo A O, Deng X, Olatunji O A, et al. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 597-609.
- [9] 刘晓, 张学霞, 徐新良, 等. 河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94-104.
- [10] 张志强, 陈鹏飞, 申维. 长武县土地利用/覆被演变规律及其影响下生态服务价值变化研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 219-226.
- [11] 王宽, 蔡正华, 齐增湘, 等. 2000—2013年衡阳市土地利用格局转变对生态系统服务的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1060-1070.
- [12] Yi H, Güneralp B, Filippi A M, et al. Impacts of land change on ecosystem services in the San Antonio River Basin, Texas, from 1984 to 2010 [J]. Ecological Economics, 2017, 135: 125-135.
- [13] Fu Q, Li B, Hou Y, et al. Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: a case study in Altay Prefecture, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607: 633-646.
- [14] 邵小云, 张则飞, 刘中, 等. 土地利用变化及规划结构对海岛生态系统服务价值的影响: 以舟山市普陀区为例[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 514-522.
- [15] 虎陈霞, 郭旭东, 连纲, 等. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以嘉兴市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 333-340.
- [16] 王雅, 蒙古军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207.
- [17] 孟悦. 宁波市城市化发展对区域生态系统服务价值的影响[J]. 地域研究与开发, 2016, 35(6): 81-86.
- [18] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟, 等. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响: 以河南省商丘市为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1597-1606.
- [19] 荣益, 李超, 许策, 等. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异: 以黄骅市为例[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1374-1381.
- [20] 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[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7502-7513.
- [21] 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.
- [22] 童陆亿, 胡守庚. 中国主要城市建设用地扩张特征[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 0050-0061.
- [23] 张永利, 王晖, 王留林, 等. 武汉市水土流失现状及综合治理对策[J]. 中国水土保持, 2015(8): 42-44.
- [24] 曾忠平, 彭浩轩. 城市湿地损失和内涝灾害响应的遥感分析: 以武汉市南湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 929-938.
- [25] 潘鹤思, 李英, 陈振环. 森林生态系统服务价值评估方法研究综述及展望[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(6): 72-78.
- [26] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系研究[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [27] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 等. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望[J]. 中国土地科学, 2018, 32(12): 82-89.
- [28] 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.
- [29] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [30] 赵育恒, 曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1426-1440.
- [31] 王航, 秦奋, 朱筠, 等. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1286-1296.
- [32] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 基于生态系统服务价值的湿地恢复工程效益分析: 以北京市延庆县蔡家河为例[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4287-4294.
- [33] 高原, 何青松, 张梦珂. 城市用地扩张与景观生态安全关联规律挖掘: 以武汉市为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(9): 5-9.
- [34] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. 生态学报, 2018, 39(21): 7815-7828.
- [35] 张瑜, 赵晓丽, 左丽君, 等. 黄土高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 132-139.
- [36] 沈满洪, 毛狄. 海洋生态系统服务价值评估研究综述[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2255-2265.
- [37] 王玲慧, 张代青, 李凯娟. 河流生态系统服务价值评价综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 10-14.