
武汉市生态系统服务功能 对城市用地扩张的响应机理

朱晓南^{1, 2} 刘艳中¹ 汪樱³ 陈勇^{1, 2} 张祚⁴ 宋改凤^{1, 21}

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 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, 湖北 武汉 430081;

3. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 湖北 武汉 430074;

4. 华中师范大学 公共管理学院, 湖北 武汉 430079)

【摘要】: 针对当前生态系统服务功能对城市用地扩张过程响应机理研究的不足, 以武汉市为例, 定量计算区域重要生态系统服务功能价值, 探究城市用地扩张过程对生态系统服务的影响机理。结果表明: (1) 1990~2015年, 除水文调节的价值在 2000~2005年略有增长, 其余生态系统服务功能价值均呈负增长, 降幅最大的是食物供给; (2) 人口增长带来的生态系统服务功能的需求压力远远大于城市用地扩张对生态系统服务的直接破坏; (3) 城市用地扩张对食物供给的破坏程度最大, 对水文调节能力的破坏程度次之, 对生物多样性和土壤保持的破坏程度相对较低。武汉市在未来的城市用地扩张中, 应禁止侵占水域和森林的面积, 调整农田的侵占结构, 提高建设用地集约利用水平。

【关键词】: 生态系统 服务功能价值 城市用地扩张 响应机理

【中图分类号】: F301 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)07-1515-10

生态系统服务是指“人类从生态系统中获得的惠益”, 是达成区域可持续发展目标的重要基础^[1]。而随着经济的持续高速发展, 我国城市用地规模迅速扩张, 造成了一系列生态问题, 如生物多样性降低^[2], 环境污染严重^[3]等, 直接导致生态系统服务能力下降。因此, 探究生态系统服务功能对城市用地扩张的响应机理, 有利于减少城市用地扩张造成的生态系统服务破坏, 对促进城市用地的合理扩张具有重要意义。

生态系统服务价值(Ecosystem Services Values, ESV)是从自然生态的角度出发, 运用生态学和经济学研究方法, 对自然资源或生态系统的服务功能进行价值量化^[4]。目前, 关于ESV的核算方法主要包括物质质量评估法、价值量评估法、能值分析法和生态模型法^[5], 其中由Costanzo等^[6]提出的基于单位面积价值当量因子的物质质量评估方法(以下简称当量因子法)受到学界的普遍认可

作者简介: 朱晓南(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事土地资源和生态安全. E-mail:1102014634@qq.com; 刘艳中, E-mail:Liuyanzhong@wust.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971237;71774066);中央高校基本业务经费项目(CCNU20TS038)。

和运用^[7]。由于 Costanzo 等^[6]计算得到的全球生态系统服务当量因子表与我国的实际情况不符,谢高地等计算得到的中国生态系统服务当量因子^[8,9],在国内的 ESV 评估研究中得到了普遍应用。随着国内相关研究的深入开展,动态因子逐渐被纳入评估体系,实现了当量因子的动态评估^[5]。如李俊翰和高明秀^[10]、刘海等^[11]及张瑜等^[12]分别测算了滨州市、丹江口水源区及黄土高原的 ESV。但动态的当量因子法在计算时受到通货膨胀等经济因素的影响,不能准确地体现同一地块的生态系统服务功能在不同时期的差异性。针对此问题,赵育恒等^[13]和王航等^[14]分别采用 GDP 和居民消费价格指数(consumer price index, CPI)对 ESV 进行了时间修正。因为资金的时间价值可以反映通货膨胀水平^[15,16],且比 GDP 和 CPI 更加稳定。所以采用资金的时间价值对 ESV 进行时间修正,使生态系统服务功能在不同时间上的 ESV 更加准确。

土地利用覆盖变化(Land Use/Cover Change, LUCC)引起的土地面积、类型及格局的变化直接影响生态系统服务价值的多少^[17]。城市用地扩张作为 LUCC 之一,已有大量研究表明其是生态系统服务功能下降的主要原因^[18~22]。且部分学者进一步分析了城市用地扩张对生态系统服务的影响程度和特征。如付梦娣等^[23]通过分析 LUCC 变化和 ESV 变化,讨论了城市用地扩张对生态系统服务的影响程度;李嘉译等^[24]量化识别了城市用地扩张及 ESV 的时空特征。但上述研究未揭示城市用地扩张对 ESV 的影响规律;黄日鹏等^[25]、荣益等^[26]和朱志州等^[7]利用土地利用转移矩阵,定量分析了城市用地扩张变化与 ESV 变化之间的联系,但研究期较少,未能总结出影响规律;高原等^[27]通过数据挖掘模型分析了城市用地扩张与 ESV 变化的关系,定性地揭示了城市用地扩张对 ESV 的影响规律,但未考虑城市用地扩张侵占不同地类对 ESV 造成的影响,所得影响规律较为粗略,不够细化。总之,目前城市用地扩张对 ESV 的影响研究,大多局限于城市用地扩张变化对 ESV 变化的影响程度和特征的分析,少量研究对影响规律进行了定性分析。但这些研究未能进一步定量地研究影响规律,无法深入揭示生态系统服务功能对城市用地扩张的响应机理,无法为城市用地扩张提供更加精准的科学决策。

以武汉市为研究对象,采用动态计算方法定量计算研究区不同时期的 ESV,并以资金的时间价值进行修正,使 ESV 在不同时间具有更强的可比性;以城市用地扩张侵占不同地类对生态系统服务造成的不同影响为切入点,定量地揭示生态系统服务功能对城市用地扩张的响应机理,为城市用地的合理扩张提供科学依据和决策支持,也为城市化对生态系统影响的相关研究提供参考。

1 研究区概况与数据来源

武汉市位于江汉平原东部,长江和汉江交汇处,全市总面积 8494.41km²,是湖北省省会,也是长江经济带的核心城市、中部崛起的重点城市。一直以来,武汉市建设用地不断扩张,2004~2008 年期间,扩张强度达全国第四^[28]。同时,武汉市的生态环境日益恶化,环境问题不断突出。探究更加科学合理的城市用地扩张方案从而降低对生态系统服务的影响,已成为武汉市进一步发展面临的当务之急,刻不容缓。

本文采用的主要数据包括:1990、1995、2000、2005、2010、2015 年 6 个时期武汉市土地利用数据,源自中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>);全国粮食的播种面积源自于《中国统计年鉴》;武汉市 1990~2015 年 6 个时期的人口数量和粮食单位面积产量来源于武汉市统计年鉴。

2 研究方法

2.1 生态系统服务功能选取

研究表明^[29~34],武汉市的生态系统服务功能中,生物多样性、食物供给、土壤保持和水文调节对区域的生态系统服务和可持续发展具有重要作用。因此,以武汉市生物多样性、食物供给、土壤保持、水文调节 4 种生态系统服务功能和区域整体生态系统服务功能为研究对象。

2.2 生态系统服务功能价值计算

2.2.1 当量因子价值量的核算

参考刘海等^[11]计算的全国当量因子(表 1),根据银行年利率对其进行时间修正^[35],修正模型见公式(1):

表 1 中国生态系统当量因子

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

$$D_{Tn} = D_n + D_n \times \sum_{m=n}^{2014} \gamma_m \quad (1)$$

式中: D_m 为时间修正后的第 n 年全国 1 个标准当量因子的价值量(元/ hm^2); D_n 为第 n 年的全国 1 个标准当量因子的价值量(元/ hm^2); γ_m 为第 m 年的银行一年定期利率(%)。当 m 大于 2014 时, $\sum_{m=n}^{2014} \gamma_m$ 为 0。

由于武汉市的种植结构和粮食产量与全国平均数据有所差异,需对武汉市当量因子进行区域修正^[11]。修正模型见公式(2):

$$D_{wn} = D_{Tn} \times \frac{P_{wn}}{P_n} \quad (2)$$

式中: P_n 为全国第 n 年主要农作物单位面积产量(kg/hm^2); P_{wn} 为武汉市第 n 年主要农作物单位面积产量(kg/hm^2); D_m 为第 n 年武汉市 1 个标准当量因子的生态系统服务功能价值量(元/ hm^2)。修正结果见表(2)。

表 2 武汉市当量因子

年份	全国	时间修正	武汉
1990	356.74	770.95	724.70
1995	383.24	654.38	682.34
2000	404.80	567.93	644.21

2005	449.10	579.29	650.52
2010	481.19	550.96	609.29
2015	530.46	530.46	597.77

2.2.2 生态系统服务功能价值估算模型

武汉市生态系统服务功能价值估算模型见公式(3)：

$$ESV_j = \sum_{i=1}^n (S_i \times VC_{ij}) \quad (3)$$

式中： ESV_j 为第 j 种服务功能价值； ESV_s 为城市扩张破坏值(元)； S_i 为武汉市第 i 类土地利用类型面积(hm^2)； VC_{ij} 为第 i 类土地利用类型的第 j 种服务功能的当量因子价值量(元/ hm^2)。

2.3 城市用地扩张对生态系统服务影响分析

城市用地扩张对生态系统服务的影响包括直接影响和间接影响。直接影响即通过土地利用变化,将其他地类转化为建设用地,直接对区域生态系统服务造成负面影响。但由于土地利用变化涉及多种地类,每种地类对生态系统服务功能的影响不同,无法简单地使用地类变化面积进行综合定量分析。考虑到不同地类拥有不同的单位面积生态系统服务功能价值,由城市用地扩张直接导致的生态系统服务功能价值量的减少(以下简称“城市扩张破坏值”)可在一定程度上反映出地类变化,即当城市扩张面积一定时,城市扩张破坏值越大,侵占高生态价值的地类比例越大。为避免相同地类在不同时期的单位面积生态系统服务价值发生变化,采用静态方法计算城市扩张破坏值作为分析地类比例的权重指标,估算模型见公式(4)：

$$ESV_s = \sum_{i=1}^n (SC_i \times VC_i) \quad (4)$$

式中： ESV_s 为城市扩张破坏值(元)； SC_i 为武汉市城市用地扩张侵占第 i 类土地利用类型面积(hm^2)。

间接影响即城市用地扩张往往伴随着人口增长^[36~38],从而对生态系统服务功能造成更大的需求压力,间接影响区域生态系统服务水平。以武汉市人均 ESV 损失值表征间接影响。

在量化表达城市用地扩张面积、城市用地扩张过程以及生态系统服务水平的基础上,使用多因素回归分析法,探究生态系统服务功能对城市用地扩张过程响应机理。

2.4 多因素回归分析

采用 SPSS22.0 的 Logistic 回归模型定量分析城市扩张与区域生态系统服务功能价值下降的关系,显著性检验结果小于 0.05 时具有意义。

由于各服务功能总价值不同,相同价值量的损失对各服务功能的破坏性不同。因此,为判断城市扩张对不同生态系统服务功能的破坏性,各模型的回系数(以下简称“破坏系数”)按照其在2015年生态系统服务功能价值中的价值比例进行修正,修正模型见公式(5):

$$\mu_{jk} = \tau_{jk} \times \frac{ESV}{ESV_j} \quad (5)$$

式中: μ_{jk} 为第j种生态系统服务功能变化模型中的第k个自变量修正后系数; τ_{jk} 为第j种生态系统服务功能变化模型中的第k个自变量修正前系数。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务功能价值变化趋势分析

为剔除通货膨胀对当量因子的影响,以银行利率计算的ESV时间价值对当量因子进行修正。修正后的当量因子除2000~2005年略有增长,其余随时间的增长不断下降,与赵育恒等^[13]采用GDP修正得到的结果相似。通过中国统计年鉴发现,全国第一产业总值占比在1990~2000年急剧下降,由26.6%下降至14.7%,而修正后的当量因子也由1990年的770.95元急剧下降至567.93元。而2000~2010年第一产业总值比例缓慢下降,同时时间修正后的当量因子总体也为缓慢下降,这是由于在1990~2000年间,农业的增长幅度远小于经济的发展速度,导致农产品收益的增长速度远小于银行利率带来的时间价值。而2000~2010年间,农业的发展速度略小于经济的发展速度,时间修正后的当量因子变化不大。

通过公式(3)求得武汉市各阶段各生态系统服务功能价值,可知过去25年间武汉市生态服务功能价值从116.65亿元减少至86.3亿元,降幅显著。就各阶段而言,ESV整体呈线性递减过程,减少量在2005~2010年最大,其次分别是1990~1995、1995~2000、2010~2015年,2000~2005年最小。降幅在各阶段分别为7.47%、6.87%、0.28%、9.08%和5.3%,表明ESV整体经历了“快速—缓慢—快速—缓慢”的降低过程。

不同地类在不同生态系统服务功能的贡献存在差异性,导致各生态系统服务功能在各阶段的变化特征不同(图1)。食物供给、保持土壤和维持生物多样性均呈线性递减过程,但变化程度较低。而食物供给和保持土壤的降幅变化相似,均经历了“缓慢—快速—缓慢—快速—缓慢”的降低过程。但保持土壤的降幅在各时期均略低于食物供给的降幅。维持生物多样性的降幅变化与ESV整体降幅变化相同,但在各时期均略高于ESV整体的降幅。而水文调节在2000~2005年略有增加,且在其他时期的降幅均低于其余生态系统服务功能。提供武汉市水文调节的主要地类为水域,近年来,武汉市一直重视水域保护,制定了严格的湖泊保护政策,遏制了湖泊填埋^[39,40],因此水文调节的降幅低于其他生态系统服务功能。由于2005年的当量因子大于2000年,所以水文调节在2000~2005年略有增加,这也是其他生态系统服务功能在2000~2005年降幅降低的主要原因。

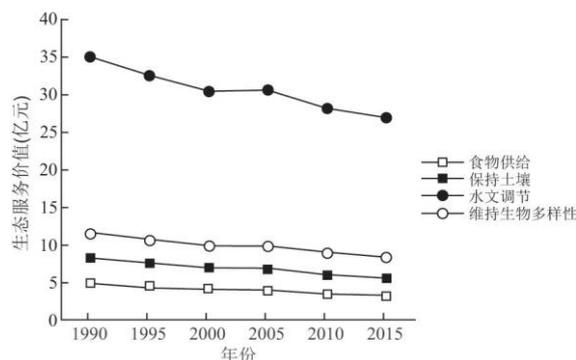


图 1 生态系统服务功能价值

1990~2015 年武汉市各生态系统服务功能人均价值变化如图(2)。整体上看,各生态系统服务功能人均变化幅度显著大于各生态系统服务功能的直接变化,说明武汉市急剧增加的人口对生态系统服务造成了巨大的需求压力。除人均水文调节能力在 2000~2005 年变为略有下降外,其他生态系统服务功能的人均变化与直接变化相同。

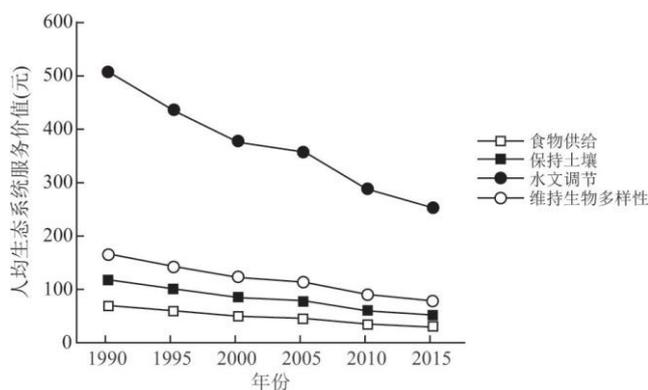


图 2 人均生态系统服务功能价值

3.2 生态系统服务功能对城市用地扩张响应

3.2.1 城市用地扩张变化分析

根据各时期武汉市土地利用空间格局(图 4),求得武汉市 1990~2015 年城市扩张破坏值和城市用地扩张面积(图 3)。可知:过去 25 年武汉市建设用地扩张量显著,增加了 1.47 倍。就发展阶段而言,1990~2010 年武汉城市扩张量呈增长趋势,在 2010~2015 年略有下降。增加速率在 2005~2010 年达到最大,在 1990~2000 年变化不大,表明城市扩张经历了“缓慢—快速—减速”的扩张过程。城市扩张破坏值则呈线性增加,并在 1990~2010 年增长速率变化不大,在 2010~2015 年略有减小。对比城市扩张面积,以 1990~1995 年为基础,1995~2000 年、2000~2005 年和 2010~2015 年城市扩张破坏值的增加速率大于城市扩张速率,2005~2010 年小于城市扩张速率,表明城市扩张侵占高生态系统服务功能价值的地类比例在 2010~2015 最大,其次是 2000~2005 年,1995~2000 年较小,其次是 1990~1995 年,最小的是 2005~2010 年。

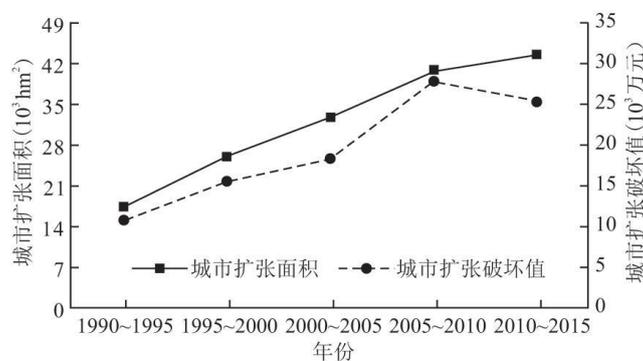


图 3 武汉市城市用地扩张变化

3.2.2 生态系统服务功能响应机理分析

应用 SPSS 多因素线性回归分析,得出生物多样性、食物供给、土壤保持、水文调节和 ESV 整体与城市用地扩张面积和城市扩张破坏值的回归方程分别为:

$$ESVP_B=0.0023 \times SC-0.0032 \times ESV_s+28.584$$

$$ESVP_F=0.0010 \times SC-0.0014 \times ESV_s+12.395$$

$$ESVP_S=0.0016 \times SC-0.0022 \times ESV_s+20.686$$

$$ESVP_W=0.0074 \times SC-0.0104 \times ESV_s+86.093$$

$$ESVP=0.0244 \times SC-0.0341 \times ESV_s+2894.966$$

式中:ESVP 代表人均减少价值(元);B、F、S、W 分别代表生物多样性、食物供给、土壤保持和水文调节;ESV_s 为城市扩张破坏值(万元);SC 为城市扩张面积。由表(3)可知,各回归方程的 T 检验值和 F 检验值均小于 0.05,表明各方程的回归系数及回归效果均显著。

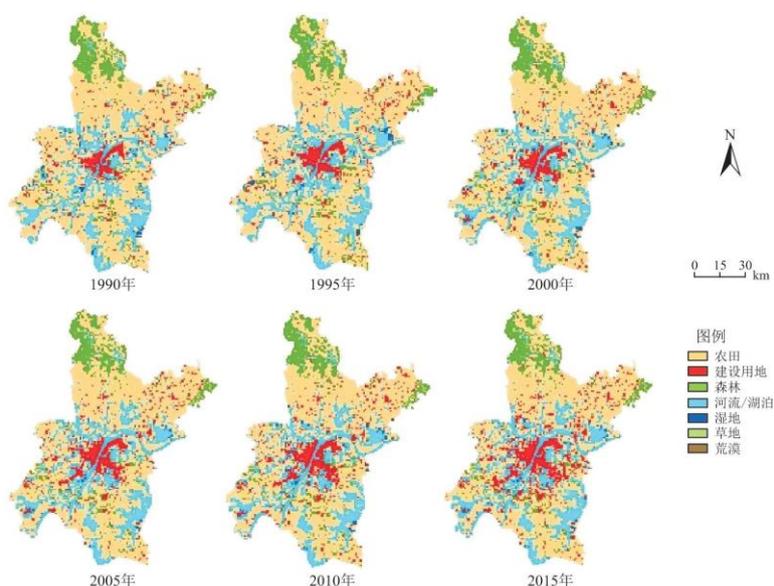


图 4 武汉市土地利用空间格局

通过回归模型发现,城市用地扩张面积每增加 1hm^2 ,生物多样性、食物供给、土壤保持、水文调节和生态系统服务人均价值分别减少 0.0023、0.001、0.0016、0.0074 和 0.0244 元。而城市扩张破坏值每增加 100 万元,生物多样性、食物供给、土壤保持、水文调节和生态系统服务人均价值分别增加 0.32、0.14、0.22、1.03 和 3.41 元。在城市用地扩张面积不变的情况下,人均生态系统服务功能价值减少量随城市用地扩张侵占的水域、森林比例的增加而减少。这是因为武汉市城市用地扩张侵占的水域、湿地及森林,通常开发为高档住宅区以及游乐区^[41],既不能承载大量的人口,也不能吸引外来人口,对人口增加的影响极低,对生态系统服务的间接影响较低;而具有低生态价值的草地和农田具有便利的交通、优良的地势以及较低的开发成本,多数被开发为商业区、住宅区和开发区^[41],可承载大量的人口,导致人口增长对生态系统服务功能带来的间接影响超过了土地利用变化对生态

系统造成的直接影响。

表 3 回归模型显著性检验

关系式	显著性检验			
	F 检验	T 检验		
		扩张面积	破坏值	常量
生物多样性	0.009	0.006	0.005	0.003
食物供给	0.007	0.004	0.004	0.017
土壤保持	0.006	0.003	0.003	0.001
水文调节	0.013	0.008	0.009	0.004
生态系统服务	0.011	0.006	0.006	0.003

为判断城市扩张对各生态系统服务功能的破坏性,通过公式(5)对各回归方程的破坏系数进行修正(表4)。在城市用地扩张面积的系数中,食物供给的系数最大,超过了综合水平,表明武汉市城市用地扩张对食物供给能力的破坏性较大;生物多样性和土壤保持的系数低于综合系数,表明武汉市城市用地扩张对生物多样性和土壤保持的破坏性相对较小;而水文调节的系数则趋近于综合水平,破坏性适中。城市扩张破坏值系数中,由于共同受到人口的间接影响,均呈负值。所有生态系统服务功能均会从提高城市扩张破坏值中受益,但其中仅有食物供给的系数小于综合水平,受益程度最大,原因在于在当前城市用地扩张破坏水平下,城市用地扩张的直接影响中仅有食物供给会随城市扩张破坏值的增加而受益。

表 4 生态系统服务功能破坏系数修正

服务功能	城市扩张面积	城市扩张破坏值
生物多样性	0.0237	-0.0330
食物供给	0.0270	-0.0377
土壤保持	0.0251	-0.0345
水文调节	0.0238	-0.0334
生态系统服务功能价值	0.0244	-0.0341

4 讨论

本文综合考虑城市用地扩张侵占不同地类对生态系统造成的不同影响,定量分析了城市用地扩张与生态系统服务功能之间的关系,初步揭示出生态系统服务功能对城市用地扩张的响应机理。为武汉市的城市用地合理扩张在侵占地类的选择上提供了理论依据,也为LUCC对ESV的影响研究提供了参考。但城市扩张破坏值指标仅能大致分析城市扩张侵占高生态价值地类和低生态

价值地类的比例变化,尚未能定量判断各地类变化的具体面积和比例。且城市用地扩张是一个复杂的地类变化过程,其在扩张规模、分形特征、扩张模式和空间分布上具有不同特征^[42],这些因素是否会影响生态系统服务功能还有待研究。因此,生态系统服务功能对城市用地扩张的响应机理还需进一步完善。

在研究方法上,本文采用了时间修正的动态计算方法,避免了经济影响下的ESV研究结果不尽一致的问题,提高了多时间序列生态系统服务评价的准确性和可比性,为ESV时间对比上的研究提供了参考。但仅采用一年定期的银行利率进行计算,其它利率是否更加适合ESV的时间修正有待进一步验证。就修正结果而言,本文的修正结果与赵育恒等^[13]采用GDP修正的结果相似,而与王航等^[14]采用CPI指数修正的结果相差较大。且银行利率、GDP和CPI均能在一定程度上反映出通货膨胀^[15,16],更能体现不同时间上ESV的真实价值的修正方法还需进一步探讨。

5 结论与建议

5.1 结论

本文采用动态的当量因子法,并结合资金的时间价值予以修正,核算了武汉市多个时期的ESV,研究了城市用地扩张对区域生态系统服务功能的直接影响和间接影响机理。

(1)1990~2015年,除水文调节的价值在2000~2005年略有增长,食物供给、土壤保持、维持食物多样性和ESV整体均呈负增长。其中,食物供给的降幅最大,土壤保持次之,水文调节的降幅最小。各生态系统服务功能的人均价值下降规律与直接下降规律相同,但人均降幅显著大于直接降幅。

(2)武汉市在1990~2010年间的城市用地扩张扩张速率不断增加,仅在2010~2015年有所降低。城市扩张侵占了大量的优质农田,对食物供给的破坏性最高;大量的填埋湖泊,不仅降低了水域的面积,而且增加了湖泊的破碎程度,极大地危害了水文调节和生物多样性。

(3)近25年来,武汉市扩张带来的人口增长,驱动着城市向农田等具有优良地势的地类扩张。在城市用地扩张面积一定时,向农田扩张降低了城市用地扩张对生态系统的直接破坏,但由于人口的增长增加了对生态系统服务功能的需求,对区域生态系统的不良影响远大于城市用地扩张直接破坏对生态系统的不良影响。因此,传统的以侵占农田换取生态用地保护的城市扩张模式,并不能降低城市用地扩张对区域生态系统的不良影响。

5.2 建议

(1)从控制城市用地扩张对区域生态系统服务直接影响的角度,武汉市应禁止侵占湿地、水域和森林的面积;可适度牺牲农田换取对水域和森林的保护,优化生态系统服务功能结构。

(2)为了减弱城市用地扩张对区域生态系统服务的间接影响,需减少斑块面积大、地势优良农田(通常为生产力较高的基本农田)的侵占面积,限制工业园区、商业区和住宅区的过度开发;需适度、按序增加对森林、水域周边农田(通常为地势复杂、生产力较低、开发成本较高)的开发;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。

参考文献:

[1]刘紫玟,尹丹,黄庆旭,等.生态系统服务在土地利用规划研究和应用中的进展——基于文献计量和文本分析法[J].地理科学进展,2019,38(2):236-247.

-
- [2] 范泽孟, 黄言, 岳天祥. 青藏高原维管植物物种丰富度分布的情景模拟[J]. 地理学报, 2018, 73(1):164-176.
- [3] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4):1585-1593.
- [4] 王小莉, 高振斌, 苏婧, 等. 区域生态系统服务价值评估方法比较与案例分析[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(2):212-220.
- [5] 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.
- [6] COSTANZO R, ARGE R, DE G R S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387:253-260.
- [7] 朱治州, 钟业喜. 长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7):1520-1530.
- [8] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8):1243-1254.
- [9] 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.
- [10] 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, 2019, 39(21).
- [11] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源地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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 崔百胜, 葛凌清. 中国货币政策对世界主要经济体溢出效应的异质性分析——基于 GVAR 模型的实证研究[J]. 华东经济管理, 2019, 33(8):83-94.
- [16] 胡久凯, 王艺明. 中国核心通货膨胀的指数测算、分类特征与冲击传导[J]. 统计研究, 2019, 36(5):31-44.
- [17] BRYAN B A, Ye Y Q, Zhang J E, et al. Land-use change impacts on ecosystem services value: Incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics[J]. Ecosystem Services, 2018, 32(2):144-157.
- [18] SONG W, DENG X Z. Land-use /land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576:705-719.
- [19] 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.

-
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] AROWOLO A O, DENG X Z, 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.
- [23] 付梦娣, 肖能文, 赵志平, 等. 北京城市化进程对生态系统服务的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):235-239.
- [24] 李嘉译, 匡鸿海, 谭超, 等. 长江经济带城市扩张的时空特征与生态响应[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10):2153-2161.
- [25] 黄日鹏, 李加林, 段义斌, 等. 快速城镇化对杭州湾南岸慈溪市土地利用及生态系统服务价值的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5):105-113.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. 生物多样性, 2018, 26(2):111-129.
- [30] 詹云军, 朱捷缘, 严岩. 基于元胞自动机的城市空间动态模拟[J]. 生态学报, 2017, 37(14):4864-4872.
- [31] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全:从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报, 2015, 70(12):1859-1869.
- [32] BREN D' A C, REITSMA F, BAIOCCHI G, et al. Future urban land expansion and implications for global croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(34):8939-8944.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 毛付根. 管理会计[M]. 高等教育出版社, 2007.
- [36] 冯兴华, 钟业喜, 吴巍, 等. 新型城镇化背景下江西省城市人口增长与土地扩张协调性研究[J]. 地理与地理信息科

学, 2016, 32(3):81-87.

[37]肖池伟, 刘影, 李鹏, 等. 基于城市空间扩张与人口增长协调性的高铁新城研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1440-1451.

[38]周艳, 黄贤金, 徐国良, 等. 长三角城市土地扩张与人口增长耦合态势及其驱动机制[J]. 地理研究, 2016, 35(2): 313-324.

[39]曾忠平, 卢新海. 城市湖泊时空演变的遥感分析——以武汉市为例[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 648-654.

[40]杨建新, 龚健, 高静, 等. 国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征: 以武汉市为例[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 701-716.

[41]马才学, 孟芬, 赵利利. 1990-2005 年武汉市土地利用时空变化及其政策驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 117-122.

[42]吴殿鸣, 邵大伟. 基于最佳尺度的城市扩张特征研究——以苏州中心城区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 1937-1946.