

DOI: 10.5846/stxb201712042177

柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响——以湖北省为例.生态学报,2019,39(2): - - .

Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - - .

城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响

——以湖北省为例

柯新利*, 唐兰萍

华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070

摘要:城市扩张对生态系统的影响可以分为城市扩张对生态用地的直接挤占以及为补充城市扩张占用的耕地对生态用地二次挤占两个连锁的过程。以往的研究大多只关注城市扩张对生态系统的直接影响,忽略了城市扩张与耕地保护耦合的间接影响。针对这一问题,采用 GIS 空间分析方法和 InVEST 模型定量评估了 2000 年至 2015 年湖北省城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响。结果显示:(1)城市扩张与耕地保护耦合导致湖北省陆地生态系统碳储量减少 40.90 Tg;(2)由城市扩张与耕地保护耦合导致的陆地生态系统碳储量的减少量中,耕地保护传导作用间接导致的占比 31%。结果表明,城市扩张与耕地保护的耦合是导致生态系统碳储量减少的主要原因之一。忽视城市扩张通过耕地保护的传导作用对生态系统碳储量的间接影响,会导致城市扩张对陆地生态系统碳储量的影响被严重低估。

关键词:城市扩张;耕地保护;生态系统碳储量;InVEST 模型

Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei, China

KE Xinli*, TANG Lanping

College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: Urban expansion has an impact on ecosystems and results in the loss of ecological lands. The occupation of ecological lands includes two processes: directly by urban expansion, and indirectly because of the compensation for croplands that are lost during urbanization. Many researches have discussed the direct impact of urban expansion on ecosystems; however, most of them have ignored the impacts of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation. Therefore, we have explored the impacts of the cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei during 2000—2015 by means of the GIS spatial analysis method and InVEST model. The results show that during 2000 and 2015: (1) the reduction of carbon storage resulting from the impacts of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation was 40.90 Tg; (2) the indirect impact from cropland reclamation accounted for 31% of reduction of carbon storage. Our study indicates that the main cause of carbon storage decrease is the impact of the cascading processes of urban expansion and cropland reclamation. Furthermore, ignoring the impact of cropland reclamation can lead to an underestimation of the decrease of carbon storage.

基金项目:国家社会科学基金(13CGL092);国家自然科学基金(41371113,41101098);中央高校基本科研业务费专项基金(2662017PY063)

收稿日期:2017-12-04; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kexl@mail.hzau.edu.cn

Key Words: urban expansion; cropland reclamation; carbon storage of ecosystems; InVEST model

陆地生态系统碳储量是全球碳储量的重要组成部分之一,对减缓全球气候变化具有至关重要的作用^[1]。土地利用变化会影响陆地生态系统的结构和功能,引起植被和土壤的改变,而植被、土壤是陆地生态系统碳储量的主要形式^[2-3],不同土地利用类型的碳密度存在显著差异^[4-5],因此土地利用变化是陆地生态系统碳储量变化的主要驱动因子^[6-12]。在城市化迅速发展的时代背景下,我国的土地利用方式、土地覆被类型不断发生变化,城市扩张导致大量碳密度较高的林地、草地、耕地等转化为碳密度较低的城市建设用地,从而使得陆地生态系统碳储量呈现净减少趋势^[13-14]。

城市扩张对生态系统碳储量的影响是当前土地利用变化与全球变化研究的热点问题^[15-24]。国内外大量研究已经证明城市扩张对生态系统碳储量具有重要影响^[15-20]。同时,近几年研究发现城市扩张是导致区域碳储量减少的重要原因^[21-24],对生态系统服务造成了严重影响。这些研究关注的主要是城市扩张本身对生态系统碳储量的影响。

为保障国家粮食安全,我国实行了世界上最严格的耕地保护政策^[25-28]。在此背景下,城市扩张与耕地保护两者的耦合会加剧生态系统碳储量的流失。城市扩张与耕地保护耦合包括两个连锁过程:①城市扩张侵占大量的耕地、林地、湿地、草地等;②城市扩张造成的耕地流失对粮食安全产生威胁^[29-30],为保障粮食安全,我国实行了最严格的耕地保护政策,这些政策要求开垦新的耕地以补充城市扩张过程中流失的耕地。而新开垦的耕地大多来源于林地、草地、湿地等生态服务功能较强的土地^[31-32]。所以,除了城市扩张直接对生态系统碳储量的影响之外,城市扩张通过耕地保护的传导作用会导致对生态系统碳储量的间接影响。因此,我国城市扩张与严格耕地保护政策耦合加剧了对陆地生态系统碳储量的影响。已有的大量研究仅仅关注城市扩张本身对生态系统碳储量的直接影响或者仅仅关注城市扩张对耕地流失和粮食安全的威胁,忽略了城市扩张与耕地保护耦合下耕地补充过程对生态系统碳储量的间接影响,未能形成城市扩张对生态系统碳储量影响的全面认识。

本文依托湖北省土地利用数据以及碳密度数据,采用 InVEST 模型碳储量测算模块,测算 2000—2015 年湖北省城市扩张通过直接占用耕地、林地、湿地、草地等对生态系统碳储量的影响以及为执行严格的耕地保护政策补充新的耕地对生态系统碳储量的间接影响,以揭示城市扩张与耕地保护耦合对生态系统碳储量的影响,为科学认识城市扩张、耕地保护和生态保育的关系提供新的视角。

1 研究区域

湖北省位于我国中部(29°05'—33°20'N, 108°21'—116°07'E),地处亚热带与暖温带衔接地带的气候区^[33],是对全球气候变化反应最为敏感的区域之一^[34]。全省大部分为亚热带季风性湿润气候,光能充足,热量丰富,无霜期长,降水充沛,雨热同季。全省年平均气温 15—17℃,各地年平均降水量在 800—1600 mm 之间。湖北省土壤类型复杂多样,水稻土、潮土、黄棕壤等 8 个土类占全省总耕地面积的 98.65%。植被主要为亚热带常绿阔叶林、亚热带常绿、落叶阔叶混交林、亚热带竹林、亚热带针叶林等植被类型^[35-37]。

湖北省总面积为 $1.86 \times 10^5 \text{ km}^2$,主要地类是林地与耕地,其中林地 $5.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、耕地 $3.90 \times 10^4 \text{ km}^2$,湖泊总面积 $0.30 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[38]。湖北省东、西、北三面环山,主要为林地;中间低平,主要为耕地、湿地、建设用地、河流(图 1)。湖北省城市扩张迅速:根据中国科学院资源环境数据中心的土地利用数据(<http://www.resdc.cn/>),2000—2015 年湖北省城市建设面积由 $1.49 \times 10^3 \text{ km}^2$ 扩张到 $4.52 \times 10^3 \text{ km}^2$,新增数量达到 $3.03 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 研究技术路线

本文以湖北省土地利用数据、碳密度数据为依托,分别求取城市扩张直接作用及其通过耕地保护传导作

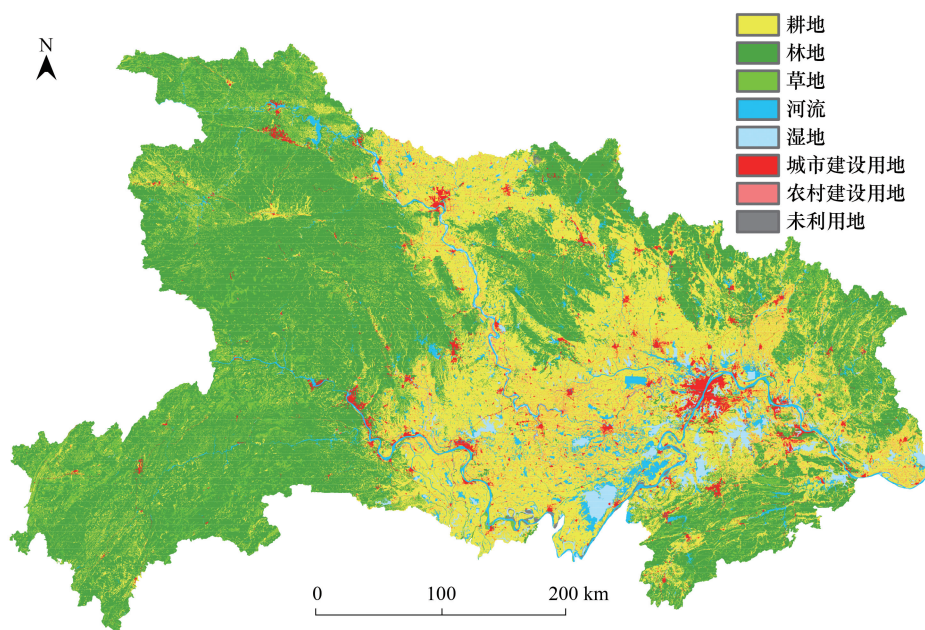


图 1 2015 年湖北省土地利用图

Fig.1 Land use map of Hubei Province in 2015

用两个连锁过程对生态系统碳储量的影响,最终得到城市扩张和耕地保护耦合对生态系统碳储量的影响(图 2)。

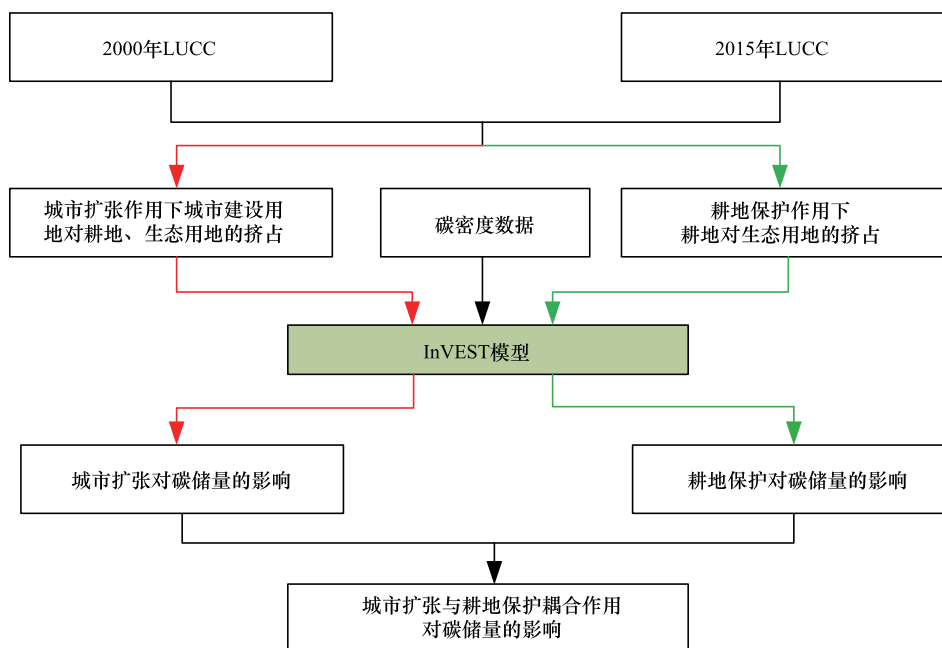


图 2 研究技术路线

Fig.2 Research technical route

首先,依托湖北省 2000 年和 2015 年土地利用数据,采用 GIS 空间分析方法提取湖北省城市扩张对耕地、林地、草地等挤占的空间格局,据此测算得到城市扩张直接导致的生态用地流失;在此基础上,结合各地类的碳密度数据,采用生态系统服务和交易的综合评估模型 InVEST 模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs),定量评估城市扩张对生态系统碳储量的直接影响。采用同样的方法,从 2000 年和

2015 年土地利用数据中提取湖北省耕地对林地、草地、湿地等挤占的空间格局,再将形成的空间格局与 2000 年湖北省土地利用图进行叠加分析得到城市扩张通过耕地保护间接引起的土地利用变化空间格局,结合各地类的碳密度数据,使用 InVEST 模型定量评估城市扩张通过耕地保护的传导作用引起的生态系统碳储量的变化。最后,基于上述结果,测算得到城市扩张与耕地保护耦合对生态系统碳储量的影响,剖析城市扩张的直接影响和耕地补充的间接影响对生态系统碳储量变化的贡献。

2.1.2 InVEST 模型

InVEST 模型是由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发的生态系统服务工具^[39]。InVEST 模型克服了传统碳储量估算研究方法的测算结果呈静态、成本高、所需数据繁多等缺点,其具有使用简单、参数灵活、评估结果的空间可视化等优点,在城市扩张对碳储量影响评估方面得到了广泛的应用^[39-42]。本文运用 InVEST 碳储量评估模型(Carbon Storage and Sequestration: Climate Regulation)对生态系统碳储量进行评估。InVEST 碳储量模型中考虑了 4 种类型的碳库:地上生物碳库、地下生物碳库、死亡有机质碳库、土壤有机质碳库。地上生物碳库包括地表以上所有活的植被的碳储量;地下生物碳库包括植物活的根系系统的碳储量;死亡有机质碳库包括枯立木、凋落物和倒木中的碳储量;土壤碳库包括土壤有机碳和矿质土壤有机碳形成的碳储量^[35]。

InVEST 碳储量评估模型以土地利用类型为评估单元,利用区域土地利用/覆被信息、碳密度数据,通过栅格叠加评估陆地生态系统碳储量。

首先,各地类碳密度计算公式如下:

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_dead} + C_{i_soil} \quad (1)$$

式中, C_i 为第 i 种地类的碳密度; C_{i_above} 为第 i 种地类地上生物的碳密度; C_{i_below} 为第 i 种地类地下生物的碳密度; C_{i_dead} 为第 i 种地类的死亡有机质碳密度; C_{i_soil} 为第 i 种地类的土壤有机质碳密度。

然后,基于各地类的碳密度和土地利用数据,计算生态系统碳储量:

$$C_{i_total} = C_i \times A_i \quad (2)$$

式中, C_{i_total} 为区域内第 i 种地类总的碳储量; C_i 为第 i 种地类的碳密度; A_i 为第 i 种地类的面积。

最后,将各地类的碳储量加总,得到区域内总的生态系统碳储量。

2.2 数据来源

本文利用的数据包括土地利用数据集和各种土地利用类型的碳密度数据。

2.2.1 土地利用数据

本文采用的土地利用数据包括湖北省 2000 年、2015 年 2 期的土地利用数据,该土地利用数据集来源于中国科学院资源环境数据中心的土地利用数据库(<http://www.resdc.cn/>),该数据库由 Landsat TM/ETM 影像解译得到,空间分辨率为 30 m×30 m。该土地利用数据集将区域土地利用类型分为 6 大类 25 小类^[42]。本文根据研究需要,对原始数据的 25 小类进行合并,得到耕地、林地、草地、河流、湿地、城市建设用地、农村建设用地、未利用地 8 类用地类型:(1)耕地(水田、旱地等);(2)林地(包括有林地、灌木林、疏林地及其他林地等);(3)草地(灌丛草地、稀疏草地等);(4)河流(天然形成或人工开挖的河流及主干渠常年水位以下的土地等);(5)湿地(湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地等);(6)城市建设用地(大、中、小城市及县镇以上建成区用地、其他建设用地等);(7)农村建设用地(农村居民住宅用地、农村公共设施用地等);(8)未利用地(沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石砾地等)。

2.2.2 碳密度数据

碳密度数据是根据不同地类的植被覆盖状况与植被碳密度、土壤碳密度获得。本文碳密度数据通过已经公开发表的文献^[5,43-60],并且结合湖北省实际修正获得。Chuai 等^[5]研究表明,湖北省耕地、林地、草地的碳密度分别为 105.30、139.10、120.90 t/hm²;刘刚和陈利^[44]、田应兵^[45]、郇继承等^[46]的研究显示,湖北省湿地碳密度为 140.68 t/hm²;奚小环等^[47]的研究指出,湖北省建设用地土壤有机质碳密度为 34.33 t/hm²、未利用地土

壤有机碳密度为 34.42 t/hm²;Zhang 等^[18]的研究则认为,河流的碳密度可以忽略不计。根据以往研究中对各地类的植被碳密度(包括地上生物量、地下生物量碳密度)、土壤有机质、死亡有机质的碳密度数据以及这 4 类碳库生物量的比值—碳转换率等研究结果^[5,43-56],换算出各种地类的碳密度(表 1)。

(1)湿地:总碳密度=植被碳密度(7%)+土壤有机质碳密度(90%)+死亡有机质碳密度(3%);其中植被碳密度:地下生物量/地上生物量=1.8

(2)城市建设用地、农村建设用地:总碳密度=植被碳密度(21%)+土壤有机质碳密度(79%);其中植被碳密度:地下生物量/地上生物量=0.2

(3)其他土地类型:总碳密度=植被碳密度(26%)+土壤有机质碳密度(72%)+死亡有机质碳密度(2%);(其中耕地、林地、草地、未利用地植被碳密度:地下生物量/地上生物量的值分别为 0.66、0.2、1.20、0.2)。

表 1 湖北省各土地类型碳密度/(t/hm²)

Table 1 The carbon density of each land type in Hubei Province					
土地利用类型 Land use type	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Belowground biomass	死亡有机质 Dead biomass	土壤有机质 Soil	参考文献 References
耕地 Cropland	16.49	10.89	2.11	75.82	Chuai 等 ^[5] ;梁萌杰等 ^[50] ;Zhang 等 ^[51]
林地 Forest	30.14	6.03	2.78	100.15	Chuai 等 ^[5] ;刘刚和陈利 ^[44] ;刘兆丹等 ^[49] ;梁萌杰等 ^[50] ;李斌等 ^[52] ;丁访军等 ^[53] ;荣月静 ^[55]
草地 Grassland	14.29	17.15	7.28	87.05	Chuai 等 ^[5] ;刘刚和陈利 ^[44] ;王亮等 ^[48]
河流 River	0.00	0.00	0.00	0.00	Zhang 等 ^[18]
湿地 Wetland	10.83	19.18	3.98	106.70	刘刚和陈利 ^[44] ;田应兵 ^[45] ;邵继承等 ^[46] ;朱耀军等 ^[56]
城市建设用地 Urban land	7.61	1.52	0.00	34.33	奚小环等 ^[47] ;Zhang 等 ^[51]
农村建设用地 Rural construction land	7.61	1.52	0.00	34.33	奚小环等 ^[47] ;Zhang 等 ^[51]
未利用地 Unused land	10.36	2.07	0.96	34.42	奚小环等 ^[47] ;Zhang 等 ^[51]

为阐明数据资料的适用性,本文对文献使用的方法进行列表比较,如表 2 所示,各文献使用的方法以及数据来源具有一定可靠性和科学性。

表 2 碳密度文献汇总

Table 2 Summary of carbon density literatures		
作者 Authors	研究方法 Study methods	适用性 Reliability
Chuai 等 ^[5] ;田应兵 ^[45] ;黄麟等 ^[54]	运用文献法对与植被和土壤碳密度有关的研究结果进行整理汇总	数据来源可靠,采用的方法科学
梁萌杰等 ^[50] ;李斌等 ^[53]	在研究区域的样地进行野外调查,并对样本进行实验。本研究所采用的基本数据来源于第八次全国森林资源清查(2009-2013 年)和实地样地调查数据(2011 年和 2012 年)。清查资料包括森林资源(幼龄林、中龄林、成熟林)的分布面积等数据	
Zhang 等 ^[18]	主要运用了文献法,并且依托土地利用数据以及碳密度数据,运用 GIS 空间分析方法与 InVEST 模型进行测算。数据来源:2010 年全球土地利用数据(GlobeLand30)	
刘刚和陈利 ^[44] ;丁访军等 ^[53]	采用外业调查和遥感解译估测相结合的方法,开展区域的土壤及植被有机碳含量、碳密度、碳储量研究	

续表

作者 Authors	研究方法 Study methods	适用性 Reliability
邵继承等 ^[46]	调查采集研究区域湿地围垦农田土壤的表土样品,实验室分析总有机碳(SOC)、热水溶性有机碳(HWEC)、颗粒态有机碳(POC)、易氧化有机碳(LOC)及“有机碳键合”组分含量特征。	
奚小环等 ^[47]	依据多目标区域地球化学调查双层网格化土壤测量方法,取得高精度的有机碳数据,按照“单位土壤碳量”方法计算土壤碳储量,可以在高精度数据平台上研究整个中东部地区土壤有机碳分布规律与变化特征,结合第二次土壤普查资料研究土壤有机碳的变化趋势	
朱耀军等 ^[56]	取样进行沉积柱取样分析,通过重铬酸钾氧化-外加加热法测定有机碳含量,基于放射性同位素 ²¹⁰ Pb 定年推演沉积率,并对湿地有机碳密度和埋藏率进行计算	

3 研究结果

3.1 城市扩张对陆地生态系统碳储量的影响

采用 GIS 空间分析方法得到 2000—2015 年湖北省城市建设用地对生态用地挤占的空间格局(图 3)。总体而言,湖北省中部、东部地区耕地被侵占比例较高。省会城市武汉市城市用地规模扩张最明显,城市用地对耕地的侵占也是湖北省最严重的。其次是武汉市周边的黄冈市、孝感市。而位于湖北省西部的十堰市、宜昌市、恩施市等地区,耕地被侵占的比例相对较低,城市建设用地主要侵占的是林地、草地等生态用地。城市扩张所导致的耕地减少的总量与比例在湖北省不同区域表现出显著的空间差异,主要因为湖北省各个地区的耕地资源禀赋、经济发展水平、城市扩张等存在区域差异。

结果显示:2000—2015 年,湖北省城市用地扩张规模达到 $3.23\times10^3\text{km}^2$;湖北省城市用地扩张以占用耕地为主,占用耕地面积达 $2.18\times10^3\text{km}^2$,达到新增城市用地的 67%;林地也是城市扩张挤占的重要对象,流失面积为 $0.68\times10^3\text{km}^2$,达到新增城市用地的 21%。可见,城市扩张的过程中,碳密度较高的林地、耕地等转化为碳密度较低的城市建设用地,导致生态系统碳储量减少。

采用 InVEST 模型定量评估湖北省城市扩张对生态系统碳储量的直接影响(图 4)。结果表明:湖北省城市扩张通过直接挤占耕地、林地等生态用地导致生态系统碳储量减少了 28.36 Tg。城市扩张导致湖北省各区域的生态系统碳储量都呈现减少趋势。省会城市武汉市生态系统碳储量损失最严重,其次是黄冈市、宜昌市,这些地区经济发展较快、城市扩张明显;生态系统碳储量流失较为严重的地区还包括湖北省西部的十堰市、襄阳市、随州市等地区。

3.2 耕地保护对陆地生态系统碳储量的影响

运用 GIS 空间分析方法得到 2000—2015 年湖北省城市扩张通过耕地补充对生态用地挤占的空间格局(图 5)。湖北省西部地区的新增耕地数量最多,如十堰市、襄阳市、宜昌市、恩施市。由于该区域林地较多,因此新增耕地以侵占林地为主。而中部地区地势低平,属于平原地带,湿地、河流较为集中,耕地补充以侵占湿地为主。东部地区耕地补充以侵占林地和湿地为主,但耕地补充数量不及西部地区。可见,耕地补充对其他生态用地的侵占受区域土地资源禀赋影响较大,存在明显的区域差异。

结果显示:湖北省耕地补充数量达到 $4.04\times10^3\text{km}^2$,以占用林地为主,占用林地面积达 $2.57\times10^3\text{km}^2$,占耕地补充面积的 64%;湿地也是耕地挤占的重要对象,同期湖北省耕地补充造成的湿地流失达 $0.61\times10^3\text{km}^2$,占耕地补充面积的 15%。可见,耕地补充过程中,主要是碳密度较高的林地和湿地被耕地挤占,导致生态系统碳储量减少。

采用 InVEST 模型定量评估湖北省城市扩张通过耕地保护传导作用对生态系统碳储量的影响(图 6)。结果表明:湖北省城市扩张通过耕地保护传导作用导致生态系统碳储量减少了 12.54 Tg,除中部地区的碳储量呈增加趋势外,其他地区碳储量均呈减少趋势。耕地保护导致生态系统碳储量减少的区域主要集中在林地、

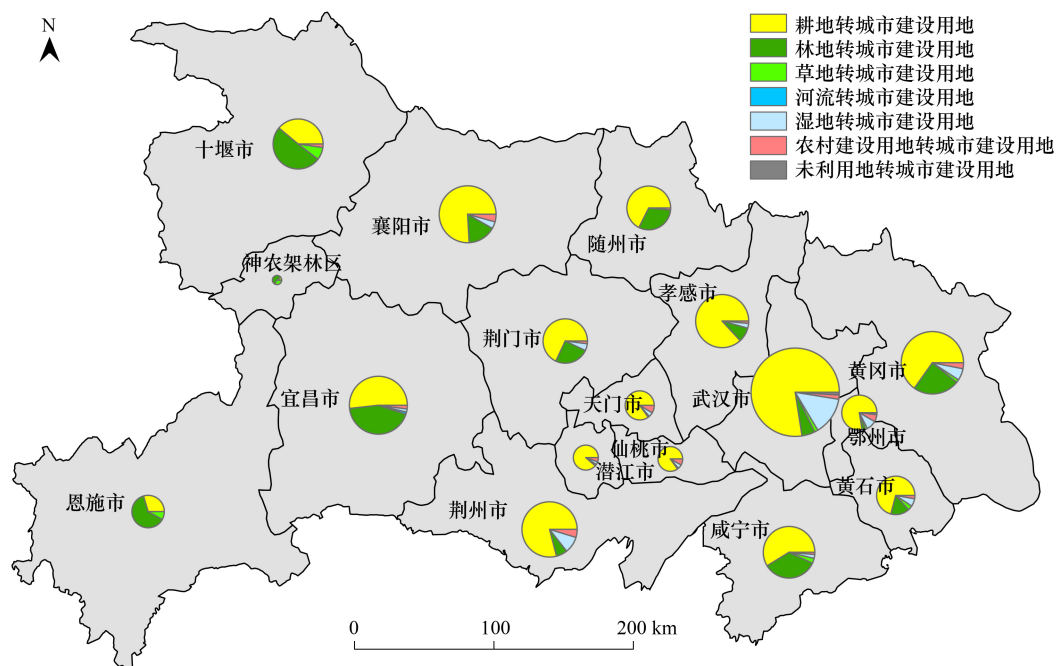


图3 湖北省新增城市建设用地

Fig.3 New urban land in Hubei Province

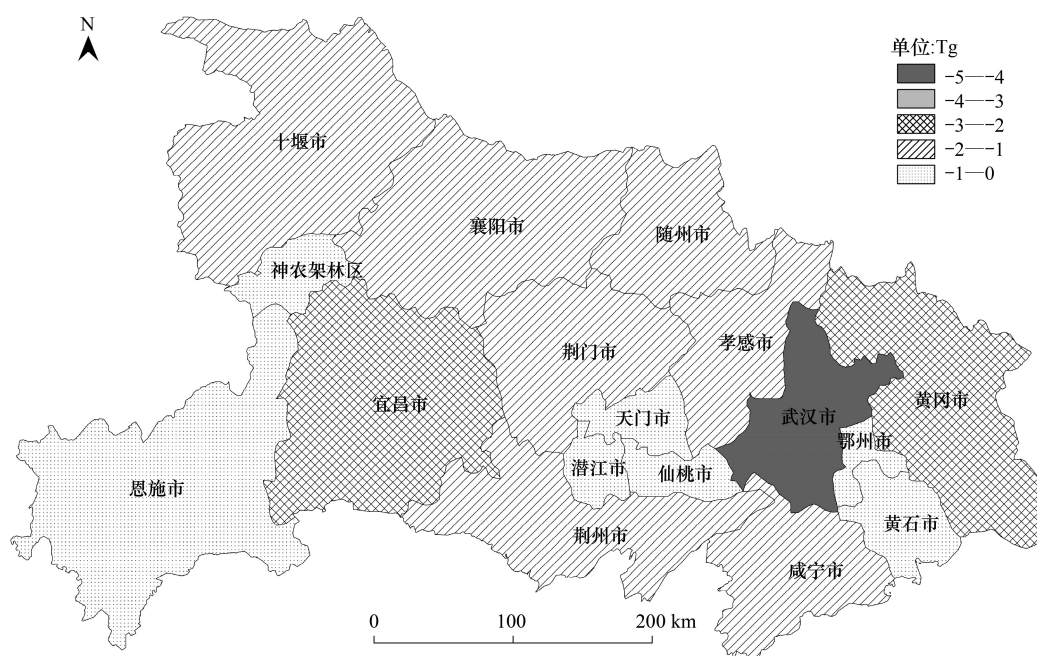


图4 湖北省城市扩张作用下的碳储量变化图

Fig.4 Change of carbon storage caused by urban expansion in Hubei Province

草地较多的西部、北部地区,如十堰市、恩施市、宜昌市、襄阳市。这些地区的耕地补充往往通过挤占林地、草地来实现。经济比较发达的武汉市及其周边城市,耕地补充以挤占湿地、林地为主。同时,生态系统碳储量增加的区域主要集中在湖北省中部的城市,主要原因是由于该区域的耕地补充主要由未利用地开发而来,而未利用地的碳密度比耕地的碳密度低。因此,湖北省中部地区生态系统碳储量呈现增加趋势。但是与碳储量损失的数量相比,碳储量增加的数量较小,所以总体上补充耕地导致生态系统碳储量呈现减少趋势。可见,城市

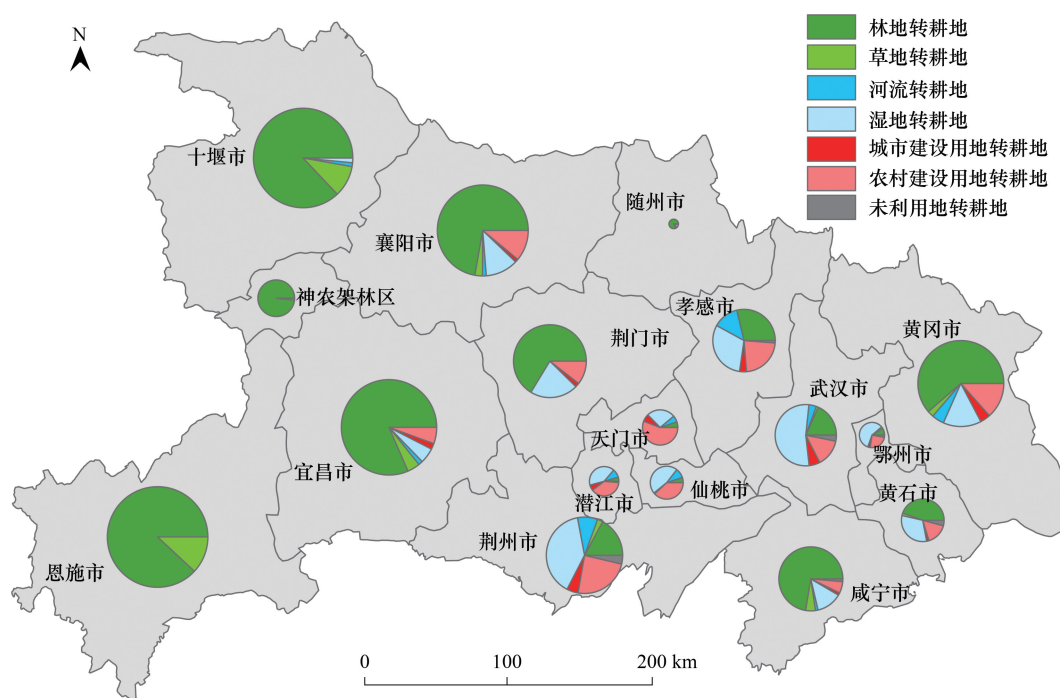


图5 湖北省新增耕地

Fig.5 New cropland in Hubei Province

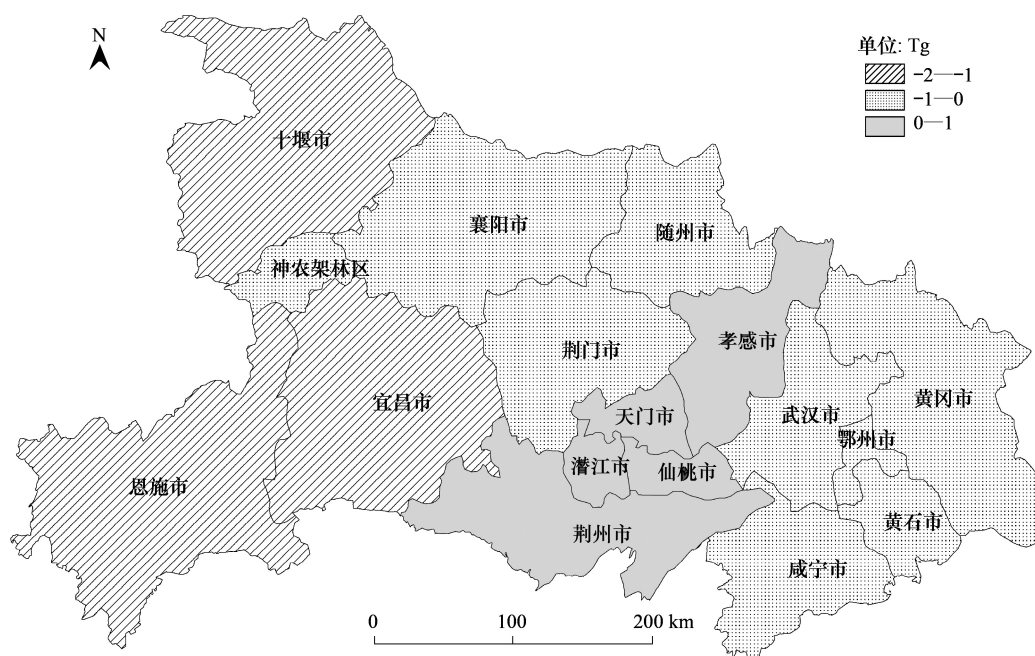


图6 湖北省耕地保护传导作用下的碳储量变化图

Fig.6 Change of carbon storage caused by cropland protection in Hubei Province

扩张通过耕地保护传导作用对碳储量影响不容忽视。

3.3 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响

2000 年到 2015 年湖北省城市扩张直接导致生态系统碳储量减少 28.36 Tg, 城市扩张通过耕地保护传导作用导致碳储量减少 12.54 Tg。因此, 城市扩张与耕地保护耦合导致生态系统碳储量共减少 40.90 Tg。此外,

城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响存在区域差异性(图7)。在城市扩张与耕地保护耦合下,生态系统碳储量损失最严重的地区是武汉市,主要原因是武汉市城市扩张幅度最大,耕地保护也较为严格。其次是位于湖北省西部的十堰市、宜昌市、襄阳市等,主要原因是该区域林地较为集中,城市扩张和耕地补充均以挤占林地为主。位于湖北省中部、东部的小城市以及西部受保护的神农架林区生态系统碳储量变化较小,主要原因是这些区域城市扩张幅度较小、耕地补充数量不多并且补充耕地以侵占碳密度较低的地类为主。结果表明:城市扩张导致生态系统碳储量损失十分明显,而城市扩张与耕地保护耦合导致碳储量的损失也不容忽视。目前大多数研究只是评估了城市扩张本身对生态系统碳储量的直接影响,忽略了城市扩张通过耕地保护传导作用对生态系统碳储量的间接影响,本文研究结果显示,耕地保护传导作用导致生态系统碳储量减少 12.54 Tg,占城市扩张与耕地保护耦合作用导致生态系统碳储量减少量的 31%。

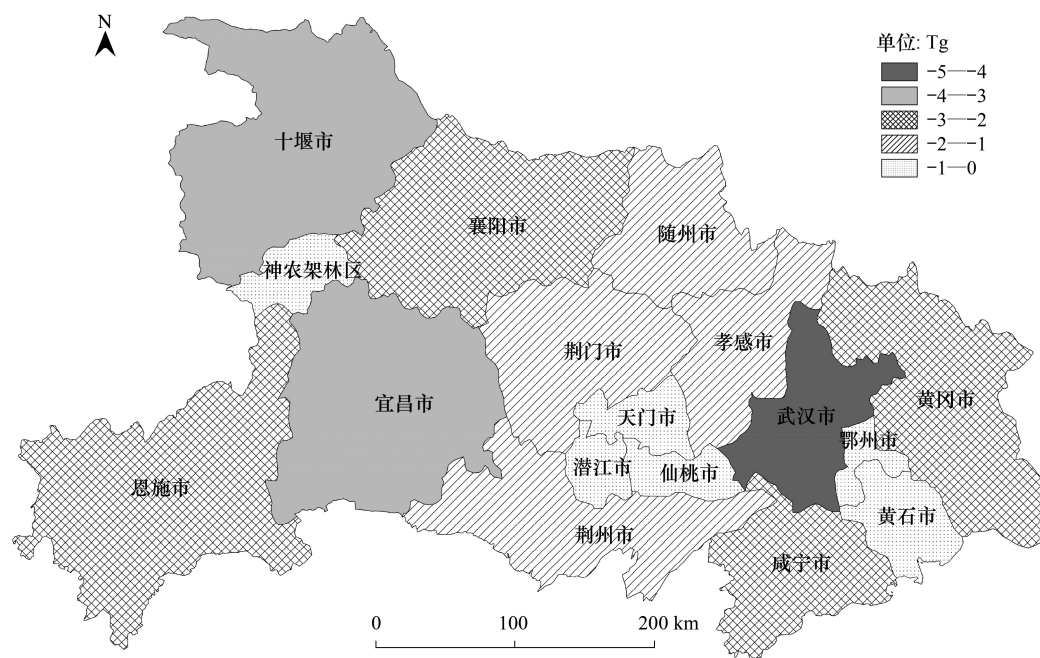


图7 湖北省城市扩张与耕地保护耦合下的碳储量变化图

Fig.7 Change of carbon storage caused by the impacts of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation in Hubei Province

4 结论与讨论

在研究城市扩张对生态系统碳储量的影响时,既要评估城市扩张本身对碳储量的直接影响,又不能忽视城市扩张通过耕地保护的传导作用对碳储量的间接影响。不同于以往大多数研究只是评估了城市扩张对碳储量的直接影响,本文还考虑了城市扩张与耕地保护耦合对生态系统碳储量的间接影响,评估了城市扩张过程中严格耕地保护政策的执行对生态系统碳储量流失的影响程度,揭示了城市扩张对生态系统碳储量影响被低估的事实。弥补了以往研究的不足,为全面认识严格耕地保护政策背景下城市扩张对生态系统碳储量的影响提供借鉴。本文的主要结论有:

(1)城市扩张与耕地保护耦合是导致碳储量减少的主要原因之一

随着我国城市化的快速发展,城市扩张不断推进,导致耕地面积大量减少,林地、草地、湿地等生态用地也被侵占。而在我国严格的耕地保护政策背景下,为补充被城市扩张挤占的耕地,林地、草地等其他生态用地又进一步被耕地补充侵占,城市扩张通过耕地补充对生态系统服务功能产生次生影响。湖北省的研究表明,城市扩张与耕地保护耦合对生态用地的挤占往往造成较高碳密度的地类转化成较低碳密度的地类,从而导致陆

地生态系统碳储量减少。通过 InVEST 模型测算得到 2000 年至 2015 年湖北省陆地生态系统碳储量减少总量为 94.74Tg,其中城市扩张与耕地保护耦合导致生态系统碳储量减少 40.90 Tg,为湖北省陆地生态系统碳储量减少总量的 43%,对陆地生态系统碳储量造成了重要的影响^[61],是导致碳储量降低的重要原因^[20,62]。

(2) 城市扩张通过耕地保护传导作用会对陆地生态系统碳储量产生间接影响

由于我国实行最严格的耕地保护政策,城市扩张对土地利用变化的影响包括两个过程:城市扩张的直接作用和耕地保护的间接影响。第一个过程主要是碳密度较高的耕地、林地、草地、湿地等转化成碳密度较低的城市建设用地,导致陆地生态系统碳储量减少,是城市扩张本身对碳储量产生的直接影响;第二个过程主要是林地、湿地、草地等具有较高碳密度的地类转化成碳密度较低的耕地,导致陆地生态系统碳储量减少,是城市扩张通过耕地保护传导作用对碳储量产生的间接影响。本研究证实了城市扩张通过耕地保护传导作用会对陆地生态系统碳储量产生间接影响。

(3) 忽略耕地保护的间接影响会导致城市扩张对生态系统碳储量的影响被严重低估

2000—2015 年,湖北省城市扩张导致陆地生态系统碳储量减少了 40.90 Tg,其中城市扩张本身导致碳储量减少了 28.36 Tg,是碳储量减少量的 69%;城市扩张通过耕地保护的传导作用间接导致生态系统碳储量减少了 12.54 Tg,是碳储量减少量的 31%,忽略耕地保护对陆地生态系统碳储量的影响会导致城市扩张对陆地生态系统碳储量影响被严重低估。

(4) 城市扩张与耕地保护耦合对生态系统碳储量的影响存在显著的区域差异

由于湖北省各个地区土地资源禀赋、经济发展水平、城市扩张等的区域差异,各地区生态系统碳储量受城市扩张与耕地保护耦合的影响存在一定的差异性。湖北省的研究显示,城市扩张与耕地保护耦合对生态系统碳储量影响比较严重的区域主要集中在经济较为发达的武汉市及其周边地区,以及林地等生态用地较为丰富且承担较多耕地补充任务的鄂西地区。而位于江汉平原的地区,则由于城市扩张幅度较小、耕地补充数量较少并且补充耕地以侵占碳密度较低的地类为主等原因,城市扩张与耕地保护耦合对生态系统碳储量的影响并不明显。

陆地生态系统碳储量在生态系统中发挥着重要的作用,而土地利用变化对陆地生态系统碳储量产生重要影响已经形成了共识^[20,62-65]。本文主要从城市扩张与耕地保护耦合的角度讨论了土地利用变化对生态系统碳储量的影响,采用 InVEST 模型并参考已发表文献的碳密度数据对湖北省生态系统碳储量进行了近似的估算。实际上,生态系统碳储量受环境水热状况、人类活动、植被生长情况等多方面因素的影响,较为复杂。本文采用的生态系统碳储量评估方法无法考虑所有影响因素,因而无法实现精确评估,仅能揭示趋势性的规律。

参考文献 (References):

- [1] 高扬,何念鹏,汪亚峰.生态系统固碳特征及其研究进展.自然资源学报,2013,28(7):1264-1274.
- [2] 裴凤松,黎夏,刘小平,夏庚瑞.城市扩张驱动下植被净第一性生产力动态模拟研究——以广东省为例.地球信息科学学报,2015,17(4):469-477.
- [3] 刘纪远,王绍强,陈镜明,刘明亮,庄大方.1990—2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化.地理学报,2010,59(4):483-496.
- [4] Cantarello E, Newton A C, Hill R A. Potential effects of future land-use change on regional carbon stocks in the UK. Environmental Science & Policy, 2011, 14(1):40-52.
- [5] Chuai X W, Huang X J, Lai L, Wang W J, Peng J W, Zhao R Q. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. Environmental Science & Policy, 2013, 25:50-61.
- [6] 薛志婧,马露莎,安韶山,王万忠.黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量.生态学报,2015,35(9):2917-2925.
- [7] Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice I C, Araújo M B, Arnell N W, Bondeau A, Bugmann H, Carter T R, Gracia C A, De La Vega-Leinert A C, Erhard M, Ewert F, Glendinning M, House J I, Kankaanpää S, Klein R J T, Lavorel S, Lindner M, Metzger M J, Meyer J, Mitchell T D, Reginster I, Rounsevell M, Sabaté S, Sitch S, Smith B, Smith J, Smith P, Sykes M T, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. Science, 2005, 310(5752):1333-1337.
- [8] Zhang M, Huang X J, Chuai X W, Yang H, Li L, Tan J Z. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a

- spatial-temporal perspective. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10233-10233.
- [9] Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate. *Climatic Change*, 2013, 119(3/4): 905-917.
- [10] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 梁地. 黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应. *生态学报*, 2015, 35(18): 6060-6069.
- [11] 常亚鹏, 李路, 许仲林. 天山北坡雪岭云杉林地开垦的土壤有机碳损失估算. *生态学报*, 2017, 37(4): 1168-1173.
- [12] Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, Peng J W. Carbon footprint of different industrial spaces based on energy consumption in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21: 285-285.
- [13] 胡欢, 章锦河, 熊杰, 周珣, 孙晋坤. 河北省碳源碳汇测算及碳减排压力分析. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(3): 61-67.
- [14] 赖力, 黄贤金. 中国土地利用的碳排放效应研究. 南京: 南京大学出版社, 2011.
- [15] Vasenev V I, Stoorvogel J J, Leemans R, Valentini R, Hajiaghayeva R A. Projection of urban expansion and related changes in soil carbon stocks in the Moscow Region. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 902-914.
- [16] 陆君, 刘亚风, 齐珂, 樊正球. 福州市森林碳储量定量估算及其对土地利用变化的响应. *生态学报*, 2016, 36(17): 5411-5420.
- [17] 郭旭东, 常青, 刘筱, 包慧敏, 孙艺, 吕春艳, 张衍毓. 基于碳储量视角的城镇土地利用模式与生态效益分异特征. *中国土地科学*, 2017, 31(4): 61-70.
- [18] Zhang C, Tian H Q, Chen G S, Chappelka A, Xu X F, Ren W, Hui D F, Liu M L, Lu C Q, Pan S F, Lockaby G. Impacts of urbanization on carbon balance in terrestrial ecosystems of the Southern United States. *Environmental Pollution*, 2012, 164: 89-101.
- [19] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, Lei X, Chen Z. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models. *Ecological Modelling*, 2017, 345: 30-40.
- [20] Golubiewski N E. Urbanization increases grassland carbon pools; effects of landscaping in Colorado's front range. *Ecological Applications*, 2006, 16(2): 555-571.
- [21] 闫涓涛, 王钧, 鲁顺子, 曾辉. 深圳市快速城市化对城市生态系统碳动态的影响研究. *生态环境学报*, 2017, 26(4): 553-560.
- [22] He C Y, Zhang D, Huang Q X, Zhao Y Y. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 44-58.
- [23] 安佑志, 张庆军. 快速城市化对上海地区植被和土壤碳储量时空变化的影响研究. *环境科学与管理*, 2016, 41(8): 152-155, 170-170.
- [24] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 陈逸敏. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估——以广东省为例. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 22-28, 36-36.
- [25] 马爱慧, 蔡银莺, 张安录. 耕地生态补偿实践与研究进展. *生态学报*, 2011, 31(8): 2321-2330.
- [26] 刘守英. 土地制度与农民权利. *中国土地科学*, 2000, 14(3): 1-9.
- [27] 张凤荣. 保护耕地须从提高农民种田积极性着手. *中国土地*, 2006, (10): 23-24.
- [28] 任平, 吴芬娜, 周介铭. 我国“两个最严格”土地管理制度: 理论矛盾与现实困境. *经济管理*, 2012, (8): 173-182.
- [29] 樊琦, 祁华清. 转变城镇化发展方式与保障国家粮食安全研究. *宏观经济研究*, 2014, (8): 54-60.
- [30] 何蒲明, 王雅鹏, 黎东升. 湖北省耕地减少对国家粮食安全影响的实证研究. *中国土地科学*, 2008, 22(10): 52-57, 63-63.
- [31] 田光进, 庄大方, 刘明亮. 近 10 年中国耕地资源时空变化特征. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 30-36.
- [32] 柯新利, 郑伟伟, 杨柏寒. 权衡城市扩张、耕地保护与生态保育的土地利用布局优化——以武汉市为例. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 9-13, 51-51.
- [33] 王晓荣, 张家来, 庞宏东, 郑兰英, 崔鸿侠. 湖北省森林生态系统碳储量及碳密度特征. *中南林业科技大学学报*, 2015, 5(10): 93-100.
- [34] 胡青, 汪思龙, 陈龙池, 张伟东, 官超. 湖北省主要森林类型生态系统生物量与碳密度比较. *生态学杂志*, 2012, 31(7): 1626-1632.
- [35] 王映明. 湖北植被区划(上). *武汉植物学研究*, 1985, 3(1): 61-73.
- [36] 王映明. 湖北植被区划(下). *武汉植物学研究*, 1985, 3(2): 165-176.
- [37] 谭景桑, 班继德, 王增学. 湖北植被区划. *华中师院学报*, 1982, (3): 102-127.
- [38] 湖北省人民政府. 湖北省情概况. (2017-10-10) [2017-11-11]. <http://www.hubei.gov.cn>
- [39] 杨园园, 戴尔阜, 付华. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(3): 41-47.
- [40] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717.
- [41] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [42] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- [43] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [44] 刘刚, 陈利. 洪湖湿地碳储量的研究. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(8): 103-107.
- [45] 田应兵. 湿地土壤碳循环研究进展. *长江大学学报: 自科版*, 2005, 2(8): 1-4.

- [46] 邵继承,靳振江,崔立强,潘根兴.不同土地利用下湖北江汉平原湿地起源土壤有机碳组分的变化.水土保持学报,2011,25(6):124-128.
- [47] 奚小环,李敏,张秀芝,张燕平,张德存,张建新,窦磊,杨奕.中国中东部平原及周边地区土壤有机碳分布与变化趋势研究.地学前缘,2013,20(1):154-165.
- [48] 王亮,牛克昌,杨元合,周鹏.中国草地生物量地上-地下分配格局:基于个体水平的研究.中国科学:生命科学,2010,40(7):642-649.
- [49] 刘兆丹,李斌,方晰,项文化,田大伦,闫文德,雷丕锋.湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征.生态学报,2016,36(21):6897-6908.
- [50] 梁萌杰,陈龙池,汪思龙.湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力.生态学杂志,2016,35(4):896-902.
- [51] Zhang F, Zhan J Y, Zhang Q, Yao L N, Liu W. Impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in Uganda. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101:195-203.
- [52] 李斌,方晰,李岩,项文化,田大伦,湛小勇,闫文德,邓东华.湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态.生态学报,2015,35(13):4265-4278.
- [53] 丁访军,潘忠松,吴鹏,崔迎春,周凤娇.贵州东部常绿落叶阔叶混交林碳素积累及其分配特征.生态学报,2015,35(6):1761-1768.
- [54] 黄麟,刘纪远,邵全琴,邓祥征.1990—2030年中国主要陆地生态系统碳固定服务时空变化.生态学报,2016,36(13):3891-3902.
- [55] 荣月静,张慧,赵显富.基于InVEST模型近10年太湖流域土地利用变化下碳储量功能.江苏农业科学,2016,44(6):447-450,451-451.
- [56] 朱耀军,赵峰,郭菊兰,武高洁,林广旋.湛江高桥红树林湿地有机碳分布及埋藏特征.生态学报,2016,36(23):7841-7849.
- [57] 王绍强,周成虎.中国陆地土壤有机碳库的估算.地理研究,1999,18(4):349-356.
- [58] 周成虎,周启鸣,王绍强.中国土壤有机碳库空间分布的分析与估算.AMBIO-人类环境杂志,2003,32(1):6-12.
- [59] Houghton R A. Land-use change and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1(4):275-287.
- [60] Kroeze C, Mosier A, Nevison C, Oenema O, Seitzinger S, Cleemput O V. The Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 5: Land Use Change and Forestry. 1997. Workbook.
- [61] Grimm N C, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864):756-760.
- [62] Huttyra L R, Yoon B, Hepinstall-Cymerman J, Alberti M. Carbon consequences of land cover change and expansion of urban lands: A case study in the Seattle metropolitan region. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1):83-93.
- [63] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,张梅,廖启林,赖力,卢俊宇.江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响.资源科学,2011,33(10):1932-1939.
- [64] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4):345-360.
- [65] 张新厚,范志平,孙学凯,胡亚林,曾德慧,王琼.半干旱区土地利用方式变化对生态系统碳储量的影响.生态学杂志,2009,28(12):2424-2430.