

DOI: 10.5846/stxb202101070075

张斌, 李璐, 夏秋月, 董捷. “三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响——以武汉城市圈为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2265-2280.

Zhang B, Li L, Xia Q Y, Dong J. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: a case study of Wuhan City circle. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2265-2280.

## “三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响 ——以武汉城市圈为例

张 斌, 李 璐, 夏秋月, 董 捷 \*

华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070

**摘要:** 陆地生态系统碳储量作为全球碳循环研究的基础, 与土地利用变化密切相关。生态保护-永久基本农田-城镇开发边界红线(简称“三线”)是国土空间规划的核心, 能较好地约束土地利用, 进而对碳储量造成影响。以武汉城市圈为例, 采用 Markov-FLUS 耦合模型模拟“三线”约束下的土地利用变化情景, 并运用 InVEST 模型定量研究不同情景下土地利用变化对碳储量的影响。结果表明: ①2000—2015 年武汉城市圈耕地、林地、草地和未利用分别减少了 1267.582、112.703、24.896、42.14 km<sup>2</sup>, 建设用地和水域分别增加了 1092.282 km<sup>2</sup> 和 355.039 km<sup>2</sup>。2035 年“三线”约束情景下耕地减少面积小于自然发展情景, 林地实现了增长, 新增建设用地被引导至城镇开发边界红线内聚集。②2000—2015 年武汉城市圈总碳储量呈连续递减态势, 其中武汉市碳储量减少量最大。“三线”约束情景下碳储量和地均碳密度下降幅度明显变小, 武汉市碳储量减少量仅为自然发展情景的 44.89%。③耕地-建设用地之间的转换是引起碳储量剧烈变化的主要原因, 土地利用强度与碳储量呈显著负相关, 较低强度带的碳储量最高。因此, “三线”约束下的武汉城市圈土地利用能合理统筹布局生态-农业-城镇等功能空间, 减缓碳储量的损失, 对区域国土空间优化具有重要意义。

**关键词:** “三线”约束; 土地利用变化; 碳储量; 武汉城市圈; FLUS 模型

## Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: a case study of Wuhan City circle

ZHANG Bin, LI Lu, XIA Qiuyue, DONG Jie \*

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

**Abstract:** As the basis of global carbon cycle research, terrestrial ecosystem carbon storage is closely related to land use change. Ecological protection red lines, permanently basic farmland protection red lines, urban development boundary lines (referred to as the “three lines”) are the core of the national space planning, which can better restrict land use, and then affect carbon storage. Taking Wuhan City circle as an example, this paper uses the Markov-FLUS composite model to simulate land use pattern of this region under the “three lines” constraints, and uses the InVEST model to study the impact of land use change on carbon storage under different scenarios quantitatively. The results showed that: ① The area of the cultivated land, forest land, grass land and unused land decreased by 1267.582 km<sup>2</sup>, 112.703 km<sup>2</sup>, 24.896 km<sup>2</sup> and 42.14 km<sup>2</sup> in Wuhan City circle from 2000 to 2015, while the construction land and water area increased by 1092.282 km<sup>2</sup> and 355.039 km<sup>2</sup>. In 2035, under the “three lines” constraint scenario, the reduced area of the cultivated land is less than the natural development scenario, and the area of forest land is increased, and the new construction land is guided to gather within urban development boundary lines. ② The total carbon storage showed a continuous decline trend in Wuhan City

基金项目: 国家自然科学基金项目(71774064)

收稿日期: 2021-01-07; 网络出版日期: 2021-11-26

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

circle from 2000 to 2015, and the carbon storage of Wuhan City decreased the most. Under the “three lines” constraint scenario, the decline of carbon storage and average ground carbon density is observably smaller than the natural development scenario, and the reduction of carbon storage in Wuhan City is only 44.89% of the natural development scenario. ③ The conversion between cultivated land and construction land is the main reason for the drastic changes of carbon storage. There is a significantly negative correlation between land use intensity and carbon storage, and the lower intensity zone has the highest carbon storage. Therefore, under the “three lines” constraints, the land use of Wuhan City circle can reasonably coordinate the layout of ecological-agricultural-urban functional space, and slow down the loss of carbon storage, which is of great significance to the optimization of regional national space.

**Key Words:** “three lines” constraints; land use change; carbon storage; Wuhan City circle; FLUS model

CO<sub>2</sub>大量排放是造成全球气候变暖的重要原因,受到各国政府的高度重视<sup>[1]</sup>。陆地生态系统因地表分布的大量固碳单元在吸收 CO<sub>2</sub>、调节气候变化方面起着关键作用<sup>[2-3]</sup>。现有大量研究表明,土地利用变化能够直接影响陆地生态系统碳储量,是造成 CO<sub>2</sub>激增的第二大原因<sup>[4-5]</sup>。可见,土地利用变化不仅是环境变化的关注热点,也是研究陆地生态系统碳储量变化的关键点。因此,准确评估土地利用变化对碳储量的影响至关重要。

近年来,国内外学者基于土地利用变化对单一或者多种碳库进行研究,大致可分为两个方面,其一是依据土地利用历史数据探讨碳储量变化的原因,Nogueira 等<sup>[6]</sup>研究指出亚马逊河流域碳损失主要是由热带森林的减少引起的;Han 等<sup>[7]</sup>发现退耕还林能显著提高黄土丘陵的固碳量;刘亚男等<sup>[8]</sup>基于 GIS 估算法发现湿地转为耕地和建设用地是导致中国湿地碳流失的重要原因;Wu 等<sup>[9]</sup>研究中国沿海地区历年碳储量变化情况,发现土地城市化的解释强度远优于其他变量。其二是利用模型预测多情景下的土地利用变化状况及相应的碳储量,邓元杰等<sup>[10]</sup>耦合 FLUS 模型和 InVEST 模型,模拟 4 种退耕还林还草情景,定量分析未来子长县碳储量的变化;Liang 等<sup>[11]</sup>采用 SD-CLUE-S 模型和 InVEST 模型评估绿洲不同情景下土地利用变化对碳储量的影响;Li 等<sup>[12]</sup>采用 Markov-FLUS 模型探讨北京生态保护区多情景下的土地利用变化,再结合 InVEST 模型发现生态保护情景下碳储量的损失最小。张燕等<sup>[13]</sup>利用 SD-CLUE-S 模型预测不同情景下的汾河流域土地利用状况,并结合 InVEST 模型计算各时期的碳储量情况。综合以往研究可知,在研究范围上,大多集中于流域、湿地、海岸带等重要生态保护区或生态脆弱地区,有关城市群的研究相对较少,而城市群既是国家经济发展的重要推动力,又是新型城镇化的核心区,需格外重视对生态系统的保护<sup>[14]</sup>。此外,以往学者大多注重于地类转换引起的碳储量变化,忽视了从整体视角探讨土地利用强度与碳储量的关系,无法系统全面地评估土地利用变化对碳储量的影响。在研究方法上,InVEST 模型结合 GIS 技术弥补了传统碳储量估算方法采样周期长、工作量繁琐的不足,具有参数获取简便、结果可视化等优势,得到广泛应用<sup>[15-18]</sup>。就模拟方法而言,CA 模型在土地利用变化模拟上的应用较为成熟,但没有限制元胞状态变换的机制,且仅能模拟一种地类的变化<sup>[19]</sup>,多智能体模型通过智能体间相互决策和环境约束来进行预测,但过程较为复杂且数据难以获取<sup>[20]</sup>,CLUE/CLUE-S 模型以系统论理论来进行地类间的相互转换,但忽视了处于劣势地位的地类分配概率,导致模型存在较大误差<sup>[21]</sup>,且多应用于小尺度区域<sup>[22]</sup>。而 FLUS 模型利用神经网络算法并结合 Markov 链和改进的元胞自动机能较好地处理地类在多因素作用下的不确定问题<sup>[23]</sup>,且模拟精度要高于 CLUE-S、ANN-CA 等模型<sup>[24]</sup>。

土地是不可再生资源,如何优化结构和布局,使其统筹协调经济发展、粮食安全和生态保护,是国土空间规划的重要任务。“十八大”以来,中央会议和文件多次明确要求建立国土空间规划体系,科学划定“三区三线”。2019 年 5 月,《中共中央、国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》要求“划定生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界等空间管控边界以及各类海域保护线,强化底线约束。”同年 11 月,《关于在国土空间规划中统筹划定落实三条控制线的指导意见》出台。“三区三线”尤其是“三线”政策成为国土

空间规划的核心。在此政策背景下,结合长江经济带绿色发展的大战略,选择长中游三大城市群之一的武汉城市圈为研究对象,采用 InVEST 模型和 FLUS 模型,研究“三线”约束下的武汉城市圈土地利用变化及其对碳储量的影响,并探讨土地利用强度与碳储量的关系,以为区域国土空间规划和生态系统的可持续发展提供一定借鉴。

## 1 研究区概况

武汉城市圈地处  $112^{\circ}30'—116^{\circ}07'E$ ,  $29^{\circ}05'—31^{\circ}51'N$ , 中国中部、长江中游、湖北省东部,以武汉为中心,黄石为副中心,涵盖鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、潜江和天门等 9 个城市(图 1),是长中游最具有发展潜力的城市圈,也是湖北省产业最密集的区域。

截至 2019 年底,武汉城市圈总面积达  $57943.917 \text{ km}^2$ , 占全省面积的 31.34%。常住人口为 3192.5 万人, 占全省常住人口的 53.86%。GDP 总量为 27681.5 亿元, 占全省总 GDP 的 60.4%。近年来,随着城镇化进程的不断加快,武汉城市圈土地利用结构产生较大变化,突出表现为耕地面积大量减少,建设用地大幅扩张。国土开发强度达到 7.24%, 远超 2030 年规定的 4.62% 的警戒线,但土地利用效率低,经济的快速发展以生态系统的破坏为代价,可持续利用程度有待加强。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源

本文所需数据主要包括:①武汉城市圈土地利用数据来源于 Landsat 8 遥感数据,年份为 2000、2005、2010、2015 年,并依据 LUCC 分类体系将地类划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类,经检测综合精度达 88.82%。②FLUS 模型需要武汉城市圈自然和社会经济的驱动因子数据。自然因子中,高程、坡度和坡面来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。土壤类型和土壤有机质含量来源于世界土壤数据库(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。年平均气温和降雨来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。社会经济因子中,人口和 GDP 来源于各市统计年鉴。到河流、国道、省道、高速、铁路、县道和乡道的距离来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)。

### 2.2 情景设置

情景分析法是依据当前发展趋势来预测未来状况的一种方法,多用于分析区域经济发展与生态系统服务的权衡关系<sup>[25]</sup>。已有文章对某一条红线的模拟情景多有涉及,但单一地对一条红线进行划定而忽略其他“两线”不能满足当前规划需求,只有将“三线”结合起来才能最大程度上符合国家对国土空间规划的要求。因此本文将“三线”作为一种情景展开研究,设定限制转换区(图 2)。其中,生态保护红线是指在国土空间内具有特殊生态功能或重要生态作用的区域,对该区域需严格保护,以维护生态系统安全。十九届五中全会指出,坚持保护优先,守住自然生态安全边界。因此,本文对于生态保护红线的划定严格遵循《国家级自然保护区监督检查办法》等相关要求,参照《湖北省生态保护红线划定方案》,在禁止建设区的基础上加强生态屏障、重要水域及岸线和湖泊湿地的保护。永久基本农田红线是指在一定时期内,根据人口和社会经济发展水平确定,需永久性保护和持续监管的优质耕地。“十四五”规划指出,坚持最严格的耕地保护制度,深入实施藏粮于地、藏粮于技战略。因此,本文对于永久基本农田的划定是以二调成果、耕地质量等级调查与评价为基础,以

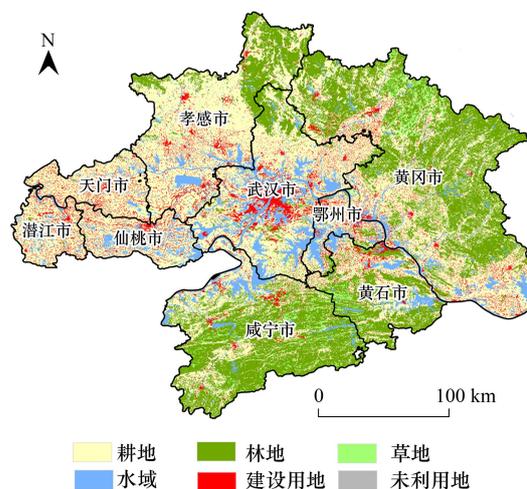


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of study area

各市《2006—2020 年土地利用总体规划(调整完善成果)》为参照,划定基本农田分布格局。城镇开发边界红线是为有序规划城镇发展,提高建设用地集约利用程度,受多种因素制约的封闭区域。城镇开发边界红线需坚持城乡一体化发展和集约节约用地的原则,参照各市自然资源局网站的《2006—2020 年土地利用总体规划(调整完善成果)》,以现有建设用地、新增建设用地、允许建设区和有条件建设区为基础,统筹优化建设用地布局。另外,本文设置自然发展情景作为对比,该情景是按照现有发展趋势来预测未来发展状况,且地类转换不做任何限制。



图2 “三线”约束区域

Fig.2 “Three lines” constraint area

### 2.3 研究框架

本研究的研究框架分为两大部分(图3):(1)模拟土地利用情景:依据武汉城市圈土地利用数据,运用 Markov 模型设定自然发展情景(Q1)和“三线”约束情景(Q2)。再将两种情景的土地利用需求数据在 FLUS 模型中进行空间上的再分配,得到 2035 年不同情景下土地利用布局图。(2)计算碳储量:运用 InVEST 模型测算 2035 年两种情景下武汉城市圈碳储量的动态变化,探究土地利用变化对碳储量的影响。

### 2.4 研究方法

#### 2.4.1 Markov 模型

Markov 模型是基于 Markov 链过程而形成的预测事件发生概率的一种方法,具有无后效性特征,即当前的状态仅与前一时刻的状态有关,而与其他因素无关<sup>[26]</sup>,已广泛运用在土地利用变化情景中<sup>[27]</sup>,公式如下:

$$S(T) = P_{ij} \times S(T_0) \quad (1)$$

式中,  $S(T)$ 、 $S(T_0)$  分别为  $T$ 、 $T_0$  时土地利用状态矩阵;  $P_{ij}$  为  $i$  地类变为  $j$  地类的转移概率矩阵。

#### 2.4.2 FLUS 模型

FLUS 模型首先基于神经网络模型算法得到各种地类的适应性概率,再结合基于轮盘赌的自适应惯性竞争机制处理各地类在多因素作用下相互转换的不确定性,得到较高精度的模拟结果<sup>[28]</sup>。

##### (1) 基于神经网络模型算法的适应性概率计算

神经网络模型算法分为预测和训练两个阶段,具体由输入层、隐藏层和输出层构成,公式为:

$$SP(P, k, t) = \sum_j W_{j,k} \times \text{sigmoid}\{\text{net}_j(P, t)\} = \frac{\sum_j W_{j,k}}{1 + e^{-\text{net}_j(P, t)}} \quad (2)$$

式中,  $SP(P, K, t)$  是  $K$  种地类在  $P$  栅格、 $t$  时间的适宜性概率;  $W_{j,k}$  为输出层和隐藏层中的权值; sigmoid 为隐藏层至输出层的激励函数;  $\text{net}_j(P, t)$  是第  $j$  个隐藏层在时间  $t$  栅格  $P$  接收到的信号。各地类的适应性概率之和为 1:

$$\sum_K SP(P, K, t) = 1 \quad (3)$$

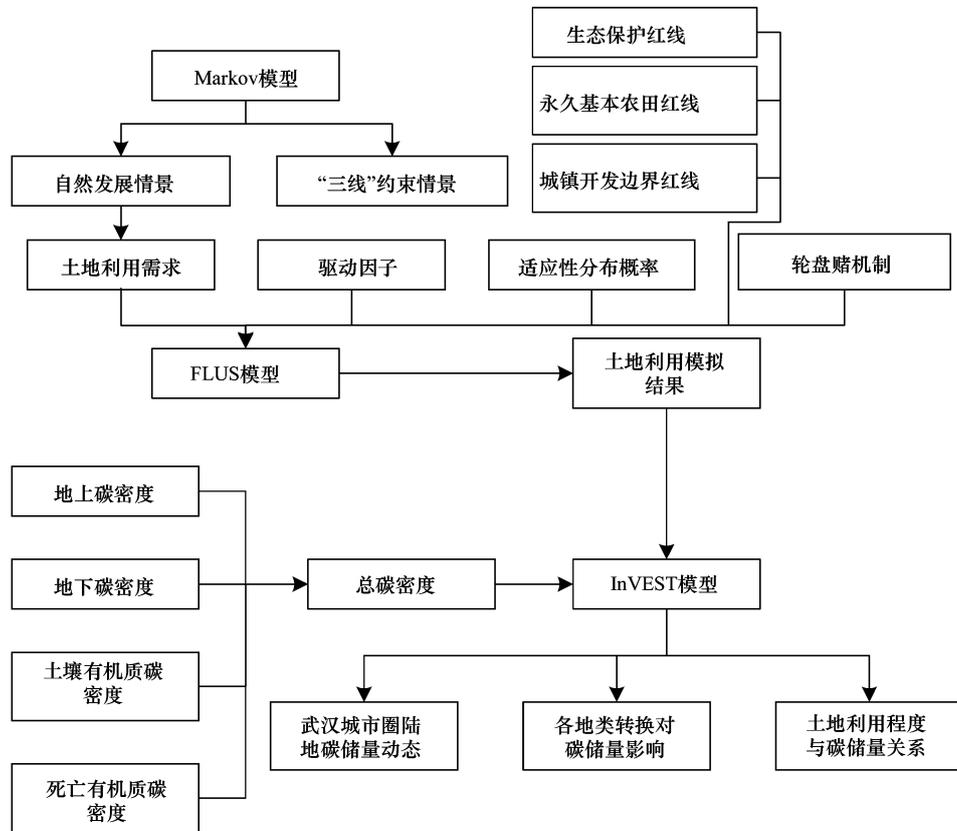


图3 研究框架

Fig.3 Research framework

(2) 基于轮盘赌的自适应惯性竞争机制计算

自适应惯性竞争机制的核心为自适应系数,不同地类的惯性系数有较大差别,是由土地需求和实际的差异决定的,在模型的迭代过程中,各地类会逐步向需求目标靠近。第  $K$  种地类在  $t$  时刻的惯性系数  $Inertia_K^t$  为:

$$Inertia_K^t = \begin{cases} Inertia_K^{t-1} & |D_K^{t-2}| \leq |D_K^{t-1}| \\ Inertia_K^{t-1} \times \frac{D_K^{t-2}}{D_K^{t-1}} & 0 > D_K^{t-2} > D_K^{t-1} \\ Inertia_K^{t-1} \times \frac{D_K^{t-1}}{D_K^{t-2}} & D_K^{t-1} > D_K^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $D_K^{t-1}$ 、 $D_K^{t-2}$  分别表示  $n-1$ 、 $n-2$  时刻第  $m$  种地类需求与实际的差值。

转换成本是表征由当前地类转换成需求地类的难易程度,可用系数 ELAS(0—1) 表示,值越大代表稳定性越高。在自然发展情景下,各地类转移概率与 2000—2015 年保持一致,经多次调试分别为耕地 0.53、林地 0.74、草地 0.77、水域 0.72、建设用地 0.95 和未利用地 0.65。在“三线”约束情景下,要加强耕地、林地和水域的转出成本,同时降低未利用地的转出限制,使其得到保护性地开发利用,因此在反复调试后结果为耕地 0.74、林地 0.81、草地 0.78、水域 0.81、建设用地 0.95 和未利用地 0.53。

最后,结合轮盘赌机制在 CA 模型中进行迭代,将各地类分配到栅格。栅格  $P$  于  $t$  时刻转化为  $K$  类地块的概率  $TProb_{p,k}^t$  为:

$$TProb_{p,k}^t = SP(P, K, t) \times \Omega_{p,t}^t \times Inertia_K^t \times (1 - SC_{C \rightarrow K}) \quad (5)$$

式中,  $SC_{C \rightarrow K}$  为  $C$  类地块转变为  $K$  类地块的成本;  $1 - SC_{C \rightarrow K}$  为转换的难易程度;  $\Omega_{P,t}^i$  起到邻域作用, 公式为:

$$\Omega_{P,t}^i = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(C_p^{t-1} = K)}{N \times N - 1} \times W_K \quad (6)$$

式中,  $\sum_{N \times N} \text{con}(C_p^{t-1} = K)$  为前一次迭代完成后第  $k$  种地类在  $N \times N$  的 Moore 邻域窗口的栅格数;  $W_K$  为各地类的邻域相互作用的权重。

### 2.4.3 InVEST 模型

(1) 碳储量的计算。InVEST 模型中的 Carbon 模块假设各地类对应一个由地下碳密度、地上碳密度、死亡有机质碳密度和土壤有机质碳密度构成的总碳密度<sup>[29]</sup>, 且某一种地类的碳密度是一种常量<sup>[30]</sup>。公式为:

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-dead}} + C_{i\text{-soil}} \quad (7)$$

$$C_{i\text{-total}} = C_i \times A_i \quad (8)$$

式中,  $C_i$  为地类  $i$  的总碳密度;  $C_{i\text{-above}}$  为地类  $i$  的地上碳密度;  $C_{i\text{-below}}$  为地类  $i$  的地下碳密度;  $C_{i\text{-dead}}$  为地类  $i$  的死亡有机质碳密度;  $C_{i\text{-soil}}$  为地类  $i$  的土壤有机质碳密度;  $C_{i\text{-total}}$  为地类  $i$  的总碳储量;  $A_i$  为地类  $i$  的面积。

#### (2) 各地类碳密度的确定

碳密度数据的获取遵循以下原则: 优先选用位于湖北省的实地测量数据, 若数据不全, 则使用临近湖北省的实测数据或文献整理汇总数据(表 1)。

表 1 各地类碳密度/(t/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Carbon density of different land use types

土地利用类型 Land use type	地上碳密度 $C_{i\text{-above}}$	地下碳密度 $C_{i\text{-below}}$	死亡有机质 碳密度 $C_{i\text{-dead}}$	土壤有机质 碳密度 $C_{i\text{-soil}}$	文献来源 Literature sources
耕地 Cultivated field	4.02	0.75	2.11	98.13	Chuai 等 <sup>[31]</sup> ; 梁萌杰等 <sup>[35]</sup> ; Zhang 等 <sup>[36]</sup>
林地 Woodland	22.62	18.03	2.78	126.75	Chuai 等 <sup>[31]</sup> ; 王晓荣等 <sup>[32]</sup> ; 丁访军等 <sup>[37]</sup>
草地 Grassland	3.6	11.7	7.28	90.43	Chuai 等 <sup>[31]</sup> ; 刘刚等 <sup>[38]</sup>
水域 Waters	1.59	0	3.98	64.03	朱耀军等 <sup>[34]</sup> ; 邵继承等 <sup>[39]</sup>
建设用地 Construction land	0.83	0.08	0	43.71	柯新利等 <sup>[29]</sup> ; 奚小环等 <sup>[33]</sup>
未利用地 Unutilized land	0.59	0.64	0.96	28.42	柯新利等 <sup>[29]</sup> ; 奚小环等 <sup>[33]</sup>

Chuai 等<sup>[31]</sup>整理碳密度相关文献, 指出湖北省耕地、林地和草地的碳密度分别为 105.30、139.10、120.90 t/hm<sup>2</sup>。王晓荣等<sup>[32]</sup>基于林业资源复查数据, 发现湖北省森林碳密度介于 88.32—177.79 t/hm<sup>2</sup>, 奚小环等<sup>[33]</sup>根据地球化学调查双层网格化土壤测量的方法, 得出湖北省建设用地和未利用地土壤有机质碳密度分别为 34.33 t/hm<sup>2</sup>和 34.42 t/hm<sup>2</sup>, 朱耀军等<sup>[34]</sup>通过重铬酸钾氧化外加加热法测算湛江水域碳密度为 4.815—83.115 t/hm<sup>2</sup>。值得注意的是, 实测数据会因为实测方法或取样时间的不同存在差异, 因此需要通过对比分析, 剔除异常值, 对同一地类的碳密度取有关文献的平均值。

### 2.4.4 土地利用强度综合指数

人类对不同土地资源的投入和利用程度有所差异, 最直接的表现就是土地利用强度的区别。研究显示, 土地利用强度与生态系统有着密切联系, 是促进生态系统服务变化的重要原因<sup>[40]</sup>。本文参考韩增林等<sup>[41]</sup>和柳冬青等<sup>[42]</sup>的研究, 将不同地类进行土地利用强度划分(表 2), 公式为:

表 2 土地利用强度划分

Table 2 Land use intensity division

土地利用类型 Land use type	耕地 Cultivated field	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land
强度等级 Strength grade	3.00	2.00	2.00	2.00	4.00	1.00

$$L = 100 \times \left( \sum_{i=1}^n P_i \times Q_i \right) \quad (9)$$

式中,  $L$  为土地里利用强度综合指数;  $P_i$  为第  $i$  级地类土地利用强度;  $Q_i$  为第  $i$  级地类面积占比。

### 3 结果与分析

#### 3.1 模型精度检验

本文运用 ROC 曲线检验土地利用驱动因子的精度,运用 Kappa 系数和 OA 检验 FLUS 模型的精度。一般来说,ROC 值大于 0.7 则说明驱动因子对土地利用变化具有较高的解释力<sup>[43]</sup>,Kappa 系数和 OA 大于 0.8 时表明模拟精度高,结果能较好地反映未来土地利用情景<sup>[44]</sup>。

运用 Logistic 回归模型分析驱动因子,发现六种地类的 ROC 值均在 0.7 以上,表明驱动因子可以较好解释土地利用变化的空间布局。其中,坡度对六种地类均有较强驱动力,对耕地的影响最大,坡度每增加 1°,耕地的分布概率会减少 12.72%。年平均温度除草地之外,和其他地类均具有很强的相关关系,温度每上升 1°,耕地和建设用地的分布概率会增加 37.06%和 55.73%,林地、水域和未利用地会分别减少 70.1%、29.1%和 78.72%(表 3)。基于武汉城市圈 2005 年的土地利用数据,模拟 2015 年的土地利用状况,得到 Kappa 系数为 0.892,OA 为 0.931,因此模拟精度较高。将其与武汉城市圈现状土地利用情景进行比较可知,建设用地相较于其他地类精度较差,误差面积为 129.726km<sup>2</sup>,可能的原因是 2005 年是武汉城市圈建立初期,城市之间并没有形成有效互动,加之建设用地的供应受政策调控力度较大,模型较难量化。2015 年武汉城市圈的建设用地已有一定规模,其空间分布格局趋于稳定,因此可以使用 FLUS 模型对 2035 年的土地利用状况进行预测。

#### 3.2 土地利用变化特征

2015 年武汉城市圈主要地类为耕地和林地,两者分别占比 49.39%和 30.09%,其次是水域和建设用地(10.50%和 7.24%),草地和未利用地极少(2.43%和 0.35%)。从整体来看,2000—2015 年间耕地、林地、草地和未利用都在减少,以未利用地和耕地减少趋势最为明显,分别为 17.15%和 4.23%。建设用地和水域面积,分别增加 35.20%和 6.20%。从各地类的变化面积来看(表 4),2000—2015 年耕地转出面积最多,达到 1276.558 km<sup>2</sup>,转出贡献率为 76.07%,是其转入面积(17.078km<sup>2</sup>)的 75 倍,其中转向建设用地的面积高达 857.471 km<sup>2</sup>。林地转出面积(152.582 km<sup>2</sup>)高于转入面积(35.375 km<sup>2</sup>),主要是转向建设用地(134.596 km<sup>2</sup>)。草地和未利用地转入和转出面积都较小,呈现缓慢的减少趋势。水域转入(486.593 km<sup>2</sup>)远大于(131.647 km<sup>2</sup>)转出面积,转入贡献率达 29%,说明武汉城市圈在大力发展经济的同时,也较为注意对水域的保护,这与长江经济带共抓大保护的理念是一致的。建设用地表现为大幅增长趋势,转出面积仅仅为 12.199 km<sup>2</sup>,而转入面积却高达 1102.852 km<sup>2</sup>,来自耕地的面积占 77.75%。

不同情景下武汉城市圈土地利用布局具有较大差异。如图 4 和表 5 所示,耕地在两种情景下呈现不同程度的减少趋势,在自然发展情景下面积减少 1048.503 km<sup>2</sup>,动态度为-0.18%,而在“三线”约束情景下仅仅减少 622.908 km<sup>2</sup>,动态度为-0.11%。林地作为主要的生态用地,在“三线”约束情景下面积增加了 61.087 km<sup>2</sup>,而在自然发展情景下面积减少了 104.537 km<sup>2</sup>,很好地展现了生态保护红线和永久基本农田红线的作用。草地在两种情景下并无太大变化,在自然发展情景和“三线”约束情景下减少量无较大区别,可能的原因是草地既具有生态服务功能,其畜牧业又可以带动经济发展和保证粮食安全,所以两种情景对其作用效果相当。水域面积在两种情景下面积都有所增加,但“三线”约束情景下的增加量(122.569 km<sup>2</sup>)是自然发展情景下(26.889 km<sup>2</sup>)的 4.56 倍,说明在长江经济带的大战略和“三线”的共同约束下,武汉城市圈会更加注重保护水资源。建设用地虽在两种情景下面积均有所增加,但可以明显看出,在自然发展情景下,建设用地的扩张较为杂乱,各城市在其原有建设用地的基础上“摊大饼式”无序蔓延,而“三线”约束情景下建设用地增加面积(491.226 km<sup>2</sup>)不仅远小于自然发展情景(1175.75 km<sup>2</sup>),动态度也仅仅为其一半不到,且更加偏向集约化利用,新增建设用地被引导至城镇开发红线内聚集。未利用地在自然发展情景下减少了 28.951 km<sup>2</sup>,而在“三线”约束情景下由于被保护性开发利用,减少量达 45.852 km<sup>2</sup>。

表 3 Logistic 回归结果  
Table 3 Results of Logistic regression

驱动因素 Driving factors	耕地 Cultivated field		林地 Woodland		草地 Grassland		水域 Waters		建设用地 Construction land		未利用地 Unutilized land	
	B 值	Exp(B)	B 值	Exp(B)	B 值	Exp(B)	B 值	Exp(B)	B 值	Exp(B)	B 值	Exp(B)
常量 Constant	-3.8237	0.0219	1.7104	5.5302	1.8812	6.5601	0.9936	2.7007	-0.7148	0.4893	2.2767	9.7422
海拔 Elevation	-0.0029	0.9971	0.0030	1.0030	0.0016	1.0016	-0.0429	0.9580	-0.0049	0.9951	-0.0532	0.9482
坡度 Slope	-0.1361	0.8728	0.1507	1.1626	0.0670	1.0693	-0.0485	0.9526	-0.0601	0.9417	0.1039	1.1095
坡面 Aspect	0.0008	1.0008	0.0019	1.0019	—	—	-0.0049	0.9951	0.0019	1.0019	—	—
土壤类型 Soil type	0.0540	1.0555	-0.1833	0.8325	—	—	0.1380	1.1480	0.1180	1.1252	—	—
土壤有机质含量 Soil organic matter content	0.0322	1.0327	0.0381	1.0388	-0.0152	0.9849	-0.2483	0.7801	0.1294	1.1381	—	—
年平均降水 Annual average precipitation	-0.0007	0.9993	0.0003	1.0003	0.0030	1.0030	0.0026	1.0026	-0.0010	0.9990	—	—
年平均温度 Annual average temperature	0.3153	1.3706	-1.2075	0.2990	-5.5270	0.0040	-0.3439	0.7090	0.4430	1.5573	-1.5476	0.2128
GDP	-0.0004	0.9996	-0.0005	0.9995	—	—	—	—	0.0005	1.0005	—	—
人口 Population	0.0027	1.0027	0.0032	1.0032	-0.0049	0.9951	0.0019	1.0019	-0.0034	0.9966	—	—
到水体的距离 Distance from the waters	0.0004	1.0004	0.0013	1.0013	0.0003	1.0003	—	—	0.0000	1.0000	0.0003	1.0003
到国道的距离 Distance from national highway	—	—	0.0005	1.0005	-0.0035	0.9965	0.0001	1.0001	-0.0002	0.9998	—	—
到省道的距离 Distance from provincial road	-0.0016	0.9984	0.0021	1.0021	-0.0012	0.9988	0.0045	1.0045	-0.0078	0.9922	—	—
到高速的距离 Distance from the high way	-0.0012	0.9988	0.0002	1.0002	0.0041	1.0041	-0.0007	0.9993	-0.0005	0.9995	—	—
到铁路的距离 Distance from the railway	-0.0007	0.9993	0.0011	1.0011	-0.0034	0.9966	0.0004	1.0004	-0.0002	0.9998	0.0036	1.0036
到县道的距离 Distance from country road	-0.0006	0.9994	0.0005	1.0005	-0.0003	0.9997	0.0089	1.0089	-0.0024	0.9976	—	—
到乡道的距离 Distance from the township	-0.0002	0.9998	0.0004	1.0004	0.0002	1.0002	0.0003	1.0003	—	—	—	—
ROC 值	0.863	0.898	0.874	0.852	0.761	0.838						

—表示驱动因子未通过显著性检验; B 值:回归系数 Regression coefficient; Exp(B):发生比率 Occurrence ratio; ROC: 受试者工作特征 Receiver operator characteristic

表 4 2000—2015 年土地利用转移矩阵  
Table 4 Land use conversion matrix during 2000—2015

年份 Year	土地利用类型 Land use type	2015 年转移面积/km <sup>2</sup> Transfer area in 2015						转出面积/km <sup>2</sup> Transfer out area	转出贡献率/% Transfer out contribution rate
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地		
2000	耕地	28589.864	22.865	1.355	392.679	857.471	2.188	1276.558	76.07
	林地	0.618	17355.330	3.326	13.765	134.596	0.278	152.582	9.09
	草地	0.019	11.247	1395.555	11.157	15.415	0.360	38.199	2.28
	水域	15.885	0.670	3.569	5592.821	89.535	21.988	131.647	7.84
	建设用地	0.119	0.563	0.002	9.794	3091.840	1.722	12.199	0.73
	未利用地	0.437	0.032	1.460	59.198	5.835	176.965	66.961	3.99
	转入面积	17.078	35.375	9.712	486.593	1102.852	26.536	1678.145	
	转入贡献率/%	1.02	2.11	0.58	29.00	65.72	1.58		

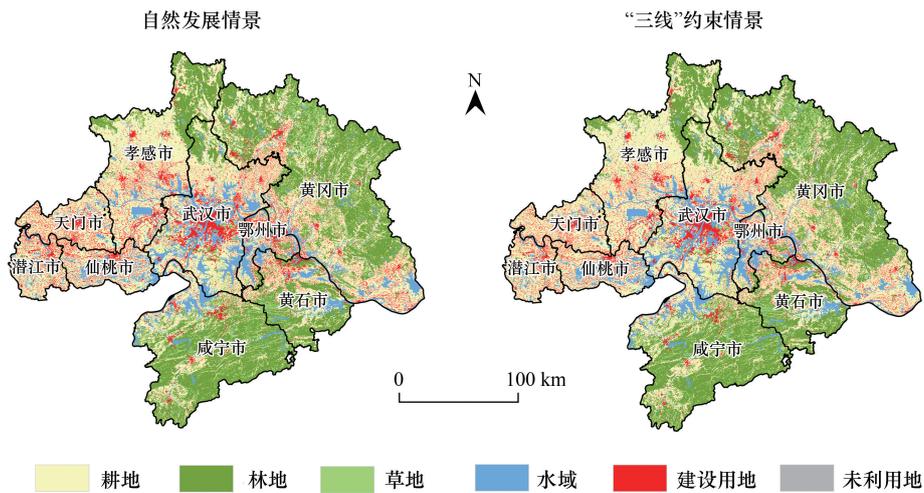


图 4 2035 年土地利用模拟图  
Fig.4 The simulated diagram of land use in 2035

表 5 2015—2035 年土地利用变化情况  
Table 5 Land use change during 2015—2035

土地利用类型 Land use type	面积/km <sup>2</sup> Area		面积变化量/km <sup>2</sup> Area change		动态度/% Dynamic degree		
	2015 年	2035 年 Q1	2035 年 Q2	2015—2035 Q1	2015—2035 Q2	2015—2035 Q1	2015—2035 Q2
耕地 Cultivated field	28616.257	27567.754	27993.349	-1048.503	-622.908	-0.18	-0.11
林地 Woodland	17434.495	17329.958	17495.582	-104.537	61.087	-0.03	0.02
草地 Grassland	1410.598	1389.943	1404.428	-20.655	-6.17	-0.07	-0.02
水域 Waters	6083.39	6110.279	6205.959	26.889	122.569	0.02	0.10
建设用地 Construction land	4195.566	5371.316	4686.792	1175.75	491.226	1.40	0.59
未利用地 Unutilized land	203.611	174.66	157.759	-28.951	-45.852	-0.71	-1.13

Q1:自然发展情景 Natural development scenario; Q2:“三线”约束情景 “Three lines” constraint scenario

### 3.3 碳储量的时空演变特征

从整体来看,2000、2005、2010、2015 年武汉城市圈碳储量分别为 683.119、680.984、679.743、674.825 Tg, 地均碳密度分别为 117.89、117.52、117.31、116.46 t/hm<sup>2</sup>(图 5),15 年间武汉城市圈总碳储量呈连续递减势态。从不同时期来看,2000—2005 年碳储量减少了 2.135 Tg,减少幅度不大。2005—2010 年碳储量仅仅减少了

1.241 Tg,减少率为 0.18%,而 2010—2015 期间碳储量减少最多,净减少量为 4.918 Tg,占武汉城市圈 15 年间总碳储量减少量的 59.3%,分析其原因可能是 2010 年以来武汉城市圈经济保持高速增长的同时,对生态用地和耕地的侵占相当严重。碳储量和地均碳密度在自然发展情景下继续减少,降幅达 6.613 Tg 和 1.14 t/hm<sup>2</sup>,而“三线”约束情景下下降趋势得到缓解,接近 2015 年时的水平,说明该情景下武汉城市圈在发展经济的同时能顾及到生态用地和耕地的保护,减少了碳储量的损失。

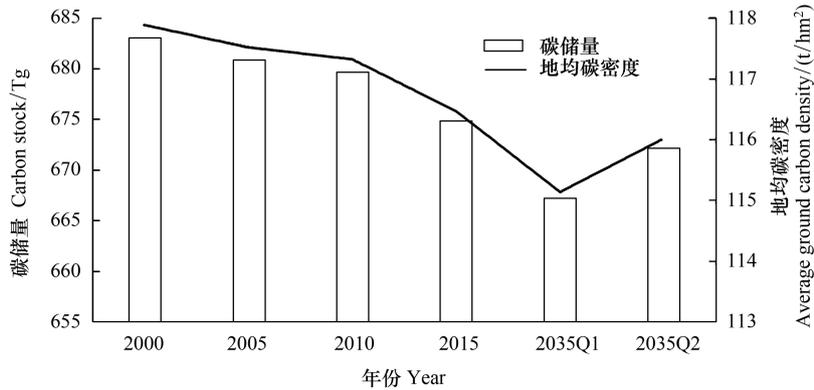


图 5 碳储量和地均碳密度变化

Fig.5 Variation of carbon storage and average carbon density

Q1:自然发展情景; Q2:“三线”约束情景

从碳储量的空间分布来看(图 6),2000—2015 年武汉城市圈各城市的碳储量均有所减少,其中武汉碳储量减少量最大,为 2.518 Tg,占总减少量的 30.36%,碳密度减少区主要以主城区为中心呈现圈层式蔓延。其次是黄冈(1.403 Tg)、孝感(1.326 Tg)和咸宁(0.934 Tg),这三座城市的碳密度减少区域呈点状分布,大多集中在原建设用地周边。碳储量减少幅度最小的是天门(0.32 Tg)和潜江(0.204 Tg),其作为湖北省直管市,经济发展水平相对较低,对生态环境的破坏也较少,碳密度减少区域只是零星的分布在中心城区周边。2015—2035 年自然发展情景下武汉碳储量减少幅度仍为最大(2.698 Tg),碳密度减少区域向远城区蔓延,说明其开发重心由主城区慢慢过渡到边远城区。黄冈(1.366 Tg)、咸宁(1.054 Tg)和孝感(0.849 Tg)仍紧跟其后,但下降幅度相较于之前有所降低。值得注意的是,鄂州成为 2035 年降幅最小的城市,仅为 0.214 Tg,减少的区域

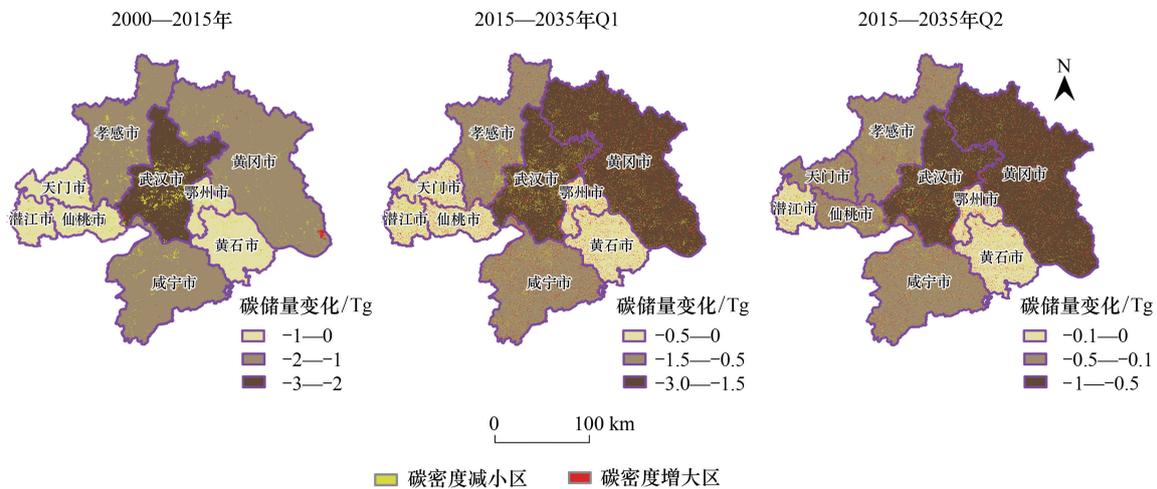


图 6 各时期碳储量和碳密度变化图

Fig.6 Variation of carbon storage and carbon density in different periods

集中在与武汉接壤的华容区葛店板块,说明 2015 年后,鄂州积极与武汉联通互动、共同发展。而“三线”约束情景下武汉虽依旧是碳储量降幅最大的城市,但减少量仅为 1.211 Tg,是自然发展情景的 44.89%,减少了向远城区扩张的趋势,体现了城镇开发边界红线的功能。而鄂州、黄石和潜江碳储量基本与 2015 年时持平,增加部分主要分布在梁子湖湿地、网湖湿地和潜江市国家森林公园等自然保护区内,表明了生态保护红线的作用。

从不同地类的碳储量可知(图 7),2015 年耕地和林地是最主要的碳库,两种地类的固碳总量占比达 88.50%,未利用地是固碳最少的地类,仅为 0.623 Tg。从各地类的固碳变化趋势可知,2000—2015 年间,耕地碳储量的减少(13.311 Tg)是造成武汉城市圈碳损失的最主要原因。其次是林地碳储量的减少(1.917 Tg),由于林地固碳能力最强,即使面积只是少量减少,也会导致碳储量的大量损失。建设用地和水域是主要的固碳地类,在 15 年间分别增加了 4.874 Tg 和 2.471 Tg,但由于固碳能力不强和面积增加较少,两者的增加量无法弥补耕地碳储量的减少。2015—2035 年自然发展情景下耕地碳储量依然大量减少,为 11.01 Tg,而建设用地的固碳量虽有所提升(5.246 Tg),但水域的固碳量却急剧萎缩,仅为 0.187 Tg,只占之前的 7.57%,而“三线”约束情景下耕地碳储量减少的趋势得到遏制,仅为自然发展情景下的一半,林地碳储量首次得到增加(1.04 Tg)。虽然建设用地碳储量增加量变少,但水域固碳量得到较大幅度的增加(0.853 Tg)。

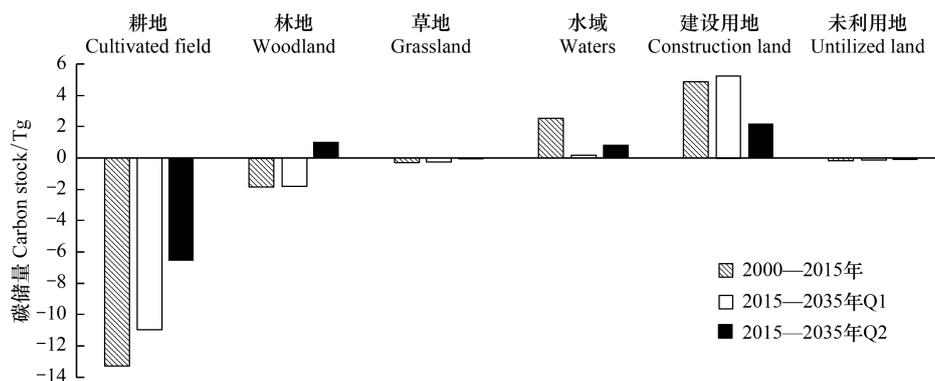


图 7 各地类碳储量变化图

Fig.7 Change chart of carbon storage in different land types

### 3.4 “三线”约束下土地利用变化对碳储量的影响

#### (1) 地类转换对碳储量的影响

在两种情景中,耕地、林地、建设用地和水域之间的转换是引起碳储量剧烈变化的主要原因(图 8)。在自然发展情景下,耕地转换为建设用地是导致碳损失最主要的原因(9.986 Tg)。林地向耕地和建设用地的转换也是导致碳储量减少的重要原因,分别为 5.637 Tg 和 1.549 Tg。值得注意的是,耕地和水域、林地和水域之间的双向转换使得水域的固碳量达到近似的“占补平衡”。而耕地向林地的转换是促进碳储量增加的最主要原因(5.916 Tg),可能由于咸宁和黄冈退耕还林政策的实施。在“三线”约束情景下,耕地转向建设用地的面积大大减少,造成的碳损失为 5.642 Tg,说明城镇开发边界红线对建设用地扩张起到了一定的约束作用,虽然在城镇化的进程中必然会侵占部分耕地,但由于城镇开发边界红线的划定有效保护了高质量农田,从而较好地遏制了碳储量的快速流失。此外耕地和林地、耕地和水域之间的双向转换维持了耕地碳储量的动态平衡,间接体现了永久基本农田红线的作用。耕地作为第三大碳库,且在武汉城市圈中面积占比将近一半,永久基本农田红线的重要性不言而喻。林地作为最大碳库,面积也仅次于耕地,在生态保护红线下实现了正增长(61.087 km<sup>2</sup>),固碳量达 1.04 Tg,加之国家提出长江经济带发展应该以生态优先,所以未来武汉城市圈应更加注重保护林地等重要生态用地。此外,水域作为重要的生态涵养地,在“三线”约束情景下也有了较大幅度的增长(122.569 km<sup>2</sup>),固碳量为 0.853 Tg。因此生态保护红线的划定可以防止具有重要生态功能或生态敏

感区被破坏,以保护区域的生态安全,维持碳储量的稳定。

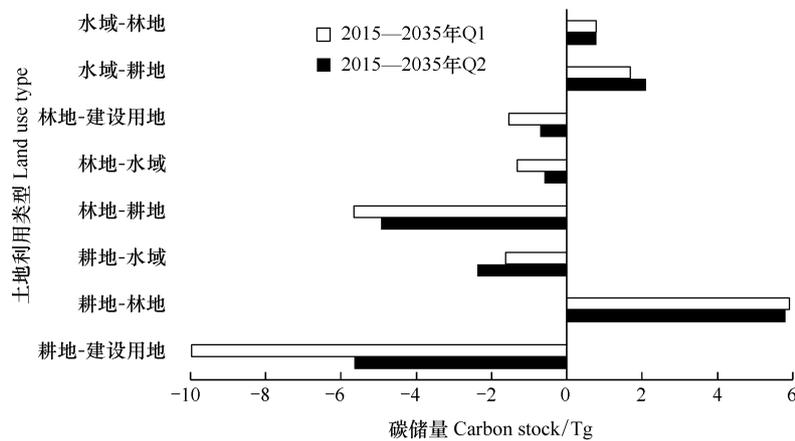


图8 2015—2035 年地类转化对碳储量的影响

Fig.8 Impact of land use conversion on carbon storage from 2015 to 2035

(2) 土地利用强度对碳储量的影响

本文研究自然发展和“三线”约束两种情景下的武汉城市圈土地利用强度对碳储量的影响,考虑到研究区面积和计算量大小,以 10 km×10 km 为一单元,将武汉城市圈划分为 580 个网格,分别计算每个网格的土地利用强度综合指数,将其看作网格中心值进行反距离权重插值,并利用自然断点法划分为五种强度带(图 9)。

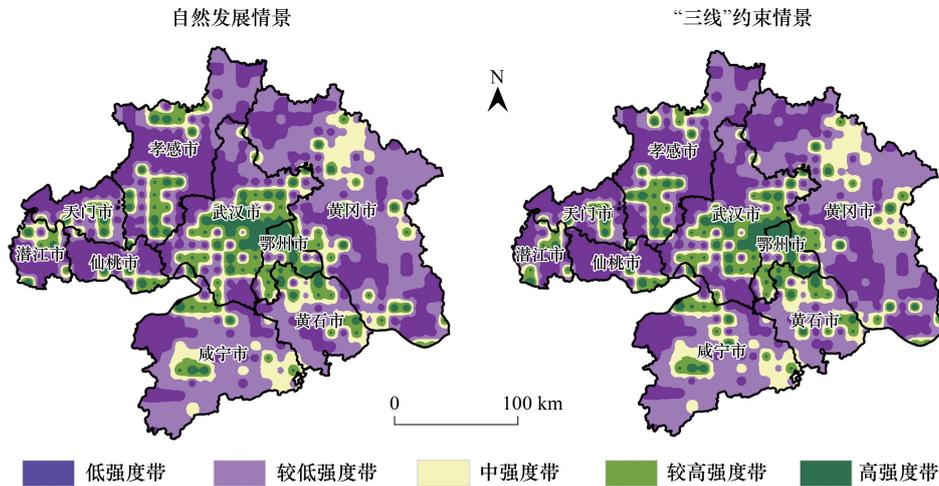


图9 两种情景下土地利用强度分级

Fig.9 Classification of land use intensity under two scenarios

由图 9 可知,自然发展和“三线”约束情景都以低强度带和较低强度带为主,两者之和分别占总面积的 69.32%和 71.06%,分布在城市圈的外围,包裹着高强度带。高强度带占比最少,分别为 5.53%和 5.26%,集中分布在各城市的建成区。

在每一等级的土地利用强度区域中生成  $6 \times 10^4$  个随机点,则五个等级一共  $3 \times 10^5$  个随机点,统计每个点的土地利用强度和碳储量大小。首先研究土地利用强度与碳储量的相关性,发现“三线”约束和自然发展情景下,两者都在 0.01 水平下呈显著负相关,相关系数分别为 -0.132 和 -0.181。然后基于随机点计算各等级土地利用强度的碳储量均值(图 10)。可知,从整体趋势来看,伴随着土地利用强度的增加,两种情景下碳储量均会逐渐下降。其中,高强度带内存在大量建设用地,碳储量最少,而较低强度带内主要为林地,碳储量最多。

如图 11 所示,武汉城市圈中武汉经济最为发达,建设用地占比最高,因而武汉的土地利用强度综合指数较高,而黄石、黄冈和咸宁林地面积占比均超过 40%,所以其土地利用强度综合指数最低。而土地利用强度综合指数最高是仙桃、天门和潜江三市,其境内均拥有面积占比超过 65%的耕地。值得注意的是,“三线”约束情景下的碳储量在每个等级内都略高于自然发展情景,间接说明就固碳量而言,“三线”约束下的土地利用情景是优于自然发展情景的。

#### 4 讨论与结论

##### 4.1 讨论

(1)“三线”作为经济结构调整、产业发展规划和新型城镇化推进的底线,是生态环境保护、耕地保护和节约用地三项制度的集中体现,已成为国土空间规划的核心。因此,本文在国土空间规划积极推进的背景下,以“三线”作为土地利用的约束,再结合研究区长江大保护的地方政策,模拟未来土地利用情景。通过与自然发展情景的对比,本文发现两者的碳储量总量和空间分布差异明显。究其原因在于“三线”约束情景设定了土地利用限制转换区,考虑了生态保护-永久基本农田-城镇开发边界红线对土地利用变化的约束作用,一方面保护了林地和水域等碳密度较高的生态用地,遏制了区域最大碳库——耕地的快速流失,另一方面制约了碳密度较低的建设用地无序扩张,保护性开发了区域最小碳库——未利用地。由此可见,“三线”约束情景可以统筹生态-农业-城镇空间协调发展,通过遏制碳密度较高地类的流失,限制碳密度较低地类的增长,将区域碳

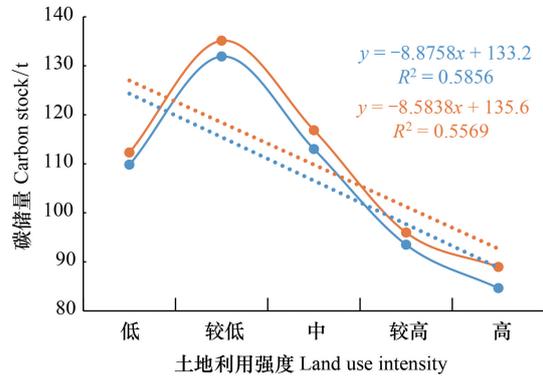


图 10 两种情景下土地利用强度与碳储量的关系

Fig. 10 Relationship between land use intensity and carbon storage under two scenarios

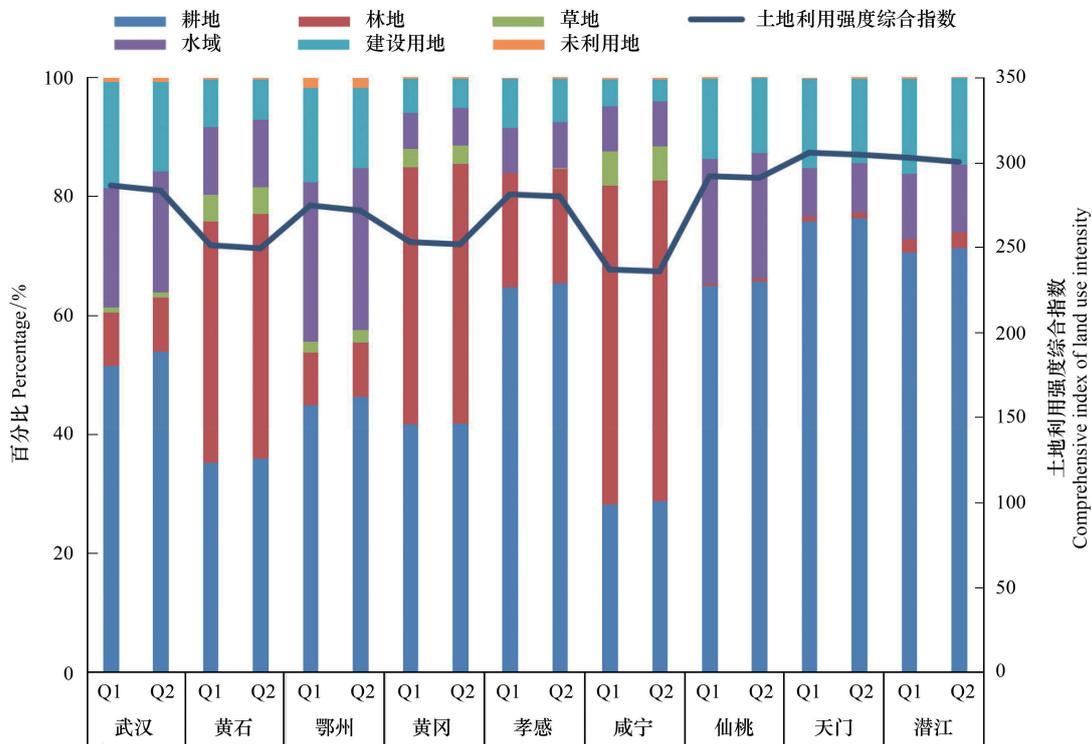


图 11 各地类占比和土地利用强度综合指数

Fig. 11 Comprehensive index of land use intensity and proportion of different types

储量维持在较高水平。

但国土空间规划体系尚未完全确立,“三线”的划定也会随着社会经济的发展而发生改变,并不是一劳永逸的<sup>[45]</sup>。“三线”坐落于同一空间,代表着多种土地功能的空间诉求,三者密不可分。城镇开发边界红线应严禁侵犯生态保护红线,避让永久基本农田红线,而永久基本农田红线和生态保护红线需形成合力,促进城镇空间布局的形成<sup>[46]</sup>。因此,为使“三线”协调划定,本文提出以下解决途径:①确定“三线”划定顺序:“三线”处于动态调控的过程中时,应优先划定生态保护红线,保障生态安全格局,才能有效保护区域内的生态环境,在此基础上兼顾粮食安全,尽可能保证永久基本农田不被侵占。最后在两者的前提下,结合经济社会发展趋势科学划分城镇开发边界红线,保证城市的可持续发展<sup>[47]</sup>。②刚性与弹性相结合:国土空间规划对生态保护红线和永久基本农田保护红线进行严格管控,突出了刚性原则,但城镇发展是一个动态的过程,具体的规划内容存在主观性,因此城镇开发边界红线的划定需保留留白区域<sup>[48]</sup>。③多学科多部门融合:在大数据浪潮下,应将法律政策、社会和经济等多源海量数据统一为多学科通用信息模型,并构建覆盖国家、省和市县的信息管理系统,由多部门协调调度,才能更加科学合理的划分“三线”<sup>[49]</sup>。

(2) Markov-FLUS 模型的运用解决了单一模型的不足,能有效地将“自上而下”的 Markov 链和“自下而上”的 FLUS 模型相结合,实现了土地利用变化在数量和空间上的展现,对武汉城市圈未来的国土空间优化具有一定的借鉴意义。此外, InVEST 模型的运用能直观地展现和定量地分析地类转换和土地利用强度对碳储量的影响,可以为区域兼顾经济发展和生态系统保护提供新思路。从地类转换来看,耕地向建设用地转换是造成碳损失的最主要原因,因此在城镇化过程中避让永久基本农田红线,严格控制在城镇开发边界红线内进行建设,对区域碳储量的维持具有重要意义。从土地利用强度来看,可以将武汉城市圈中城市划分为三类:①武汉、鄂州和孝感:其建设用地面积占比较高,因而土地利用强度综合指数较高,应该在城镇开发边界红线内节约集约用地,盘活存量建设用地。②黄石、黄冈和咸宁:其林地资源较为丰富,因而土地利用强度综合指数较低,应该继续严格恪守生态保护红线,维持区域碳储量的稳定。③仙桃、潜江和天门:其区域内大部分为耕地,土地利用强度综合指数最高,但仍需保护永久基本农田红线,切不可为降低土地利用强度综合指数而减少耕地数量。但土地利用变化仅仅是影响碳储量的原因之一,在未来的研究中应更全面的探索碳储量的影响因素,以期更好地维持区域生态系统碳储量的水平。

## 4.2 结论

本文通过 FLUS 模型模拟“三线”约束下的武汉城市圈 2035 年的土地利用变化情况,并利用 InVEST 模型估算两种情景的碳储量,研究表明:(1)六种地类的 ROC 值均在 0.7 以上,Kappa 系数为 0.892,OA 为 0.931,模拟精度满足要求。(2)2000—2015 年武汉城市圈耕地减少了 1267.582 km<sup>2</sup>,建设用地扩张面积为 1092.282 km<sup>2</sup>,来自耕地的面积占比 77.75%。“三线”约束情景下耕地减小面积(622.908 km<sup>2</sup>)远小于自然发展情景(1048.503 km<sup>2</sup>),林地也实现了增长(61.087 km<sup>2</sup>),新增建设用地被引导至城镇开发边界红线内聚集。(3)2000—2015 年武汉城市圈总碳储量和地均碳密度呈连续递减趋势,减少速率由 2000—2005 年的 0.31% 下降到 2005—2010 年的 0.18% 再增至 2010—2015 年的 0.72%。“三线”约束情景下碳储量(672.159 Tg)和地均碳密度(116.01t/hm<sup>2</sup>)相比自然发展情景下降幅度明显变小,接近 2015 年时的水平。从空间分布来看,武汉仍为碳储量降幅最大的城市,减少量为 1.211 Tg,是自然发展情景的 44.89%。(4)耕地-建设用地的转换是引起碳储量剧烈变化的主要原因。“三线”约束情景下耕地转向建设用地的面积大大减少,林地也由于其他地类的转化实现了正增长,固碳量为 1.04 Tg。土地利用强度与碳储量在 0.01 水平下呈显著负相关,在较低强度带的区域内碳储量最高,且“三线”约束情景下各等级土地利用强度的碳储量均值均高于自然发展情景。因此,“三线”的划定能在总体上提高区域的陆地生态系统碳储量,在发展经济的同时避免生态用地和基本农田的侵害,还能规范建设用地,合理统筹布局生态-农业-城镇等功能空间,保证了区域经济的高质量发展。

## 参考文献(References):

- [1] 李建豹,黄贤金,孙树臣,揣小伟.长三角地区城市土地与能源消费 CO<sub>2</sub>排放的时空耦合分析.地理研究,2019,38(9):2188-2201.

- [ 2 ] Pongratz J, Reick C, Raddatz T, Claussen M. A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(3): GB3018.
- [ 3 ] 曹世雄, 刘玉洁, 苏蔚, 郑鑫怡, 余中淇. 中国陆地生态系统服务净价值评估. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(3): 331-339.
- [ 4 ] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 石洪, 欧金沛. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟. *热带地理*, 2019, 39(3): 397-409.
- [ 5 ] 郭晓敏, 揣小伟, 张梅, 梁华石, 李建豹, 左天惠. 扬子江城市群土地利用时空变化及其对陆地生态系统碳储量的影响. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 269-280.
- [ 6 ] Nogueira E M, Yanai A M, de Vasconcelos S S, de Alencastro Graça P M L, Fearnside P M. Carbon stocks and losses to deforestation in protected areas in Brazilian Amazonia. *Regional Environmental Change*, 2018, 18(1): 261-270.
- [ 7 ] Han X H, Zhao F Z, Tong X G, Deng J, Yang G H, Chen L M, Kang D. Understanding soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation. *CATENA*, 2017, 150(3): 317-327.
- [ 8 ] 刘亚男, 郗敏, 张希丽, 于政达, 孔范龙. 中国湿地碳储量分布特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2481-2489.
- [ 9 ] Wu J S, Chen B K, Mao J Y, Feng Z. Spatiotemporal evolution of carbon sequestration vulnerability and its relationship with urbanization in China's coastal zone. *Science of the Total Environment*, 2018, 645(35): 692-701.
- [ 10 ] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 张童越, 鲁亚楠, 龚直文, 王怡菲. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 826-844.
- [ 11 ] Liang Y J, Liu L J, Huang J J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0172494.
- [ 12 ] Li Z Z, Cheng X Q, Han H R. Future impacts of land use change on ecosystem services under different scenarios in the ecological conservation area, Beijing, China. *Forests*, 2020, 11(5): 584.
- [ 13 ] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估. *生态学报*, 2021, 41(1): 360-373.
- [ 14 ] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.
- [ 15 ] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 李素晓, 许策, 赵宁, 王树涛. 基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(7): 854-861.
- [ 16 ] 刘洋, 张军, 周冬梅, 马静, 党锐, 马靖靖, 朱小燕. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. *生态学报*, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [ 17 ] Lyu R, Mi L N, Zhang J M, Xu M Q, Li J J. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH - 3r model and InVEST model. *Ecological Research*, 2019, 34(3): 380-393.
- [ 18 ] Wang J Z, Zhang Q, Gou T J, Mo J B, Wang Z F, Gao M. Spatial-temporal changes of urban areas and terrestrial carbon storage in the Three Gorges Reservoir in China. *Ecological Indicators*, 2018, 95(12): 343-352.
- [ 19 ] Mei Z X, Wu H, Li S Y. Simulating land-use changes by incorporating spatial autocorrelation and self-organization in CLUE-S modeling: a case study in Zengcheng District, Guangzhou, China. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(2): 299-310.
- [ 20 ] Luo J, Zhan J Y, Lin Y Z, Zhao C H. An equilibrium analysis of the land use structure in the Yunnan Province, China. *Frontiers of Earth Science*, 2014, 8(3): 393-404.
- [ 21 ] Liang X, Liu X P, Li X, Chen Y M, Tian H, Yao Y. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177(9): 47-63.
- [ 22 ] 谢莹, 匡鸿海, 吴晶晶, 程玉丝. 基于 CLUE-S 模型的重庆市渝北区土地利用变化动态模拟. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(11): 1729-1737.
- [ 23 ] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 孙瑞, 刘晶, 韩博, 徐伟义, 周寅康. 耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1171-1185.
- [ 24 ] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. *地理学报*, 2018, 73(4): 637-650.
- [ 25 ] 杜勇, 税伟, 孙晓瑞, 杨海峰, 郑佳瑜. 海湾型城市生态系统服务权衡的情景模拟——以福建省泉州市为例. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4293-4302.
- [ 26 ] 吴晶晶, 田永中, 许文轩, 肖悦, 谢莹, 程玉丝. 基于 CA-Markov 模型的乌江下游地区土地利用变化情景分析. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 133-139.
- [ 27 ] Rahnama M R. Forecasting land-use changes in Mashhad Metropolitan area using Cellular Automata and Markov chain model for 2016-2030. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 64(1): 102548.
- [ 28 ] 赵轩, 彭建东, 樊智宇, 杨晨, 杨红. “双评价”视角下基于 FLUS 模型的武汉大都市区土地利用模拟和城镇开发边界划定研究. *地球信息*

- 科学学报, 2020, 22(11): 2212-2226.
- [29] 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): 672-683.
- [30] 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.
- [31] 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(10): 50-61.
- [32] 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, 35(10): 93-100.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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(10): 195-203.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 刘亚香, 李阳兵, 易兴松, 程星. 贵州典型坝子土地利用强度空间演变及景观格局响应. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3691-3702.
- [41] 韩增林, 孟琦琦, 闫晓露, 赵文祯. 近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系. 生态学报, 2020, 40(8): 2555-2566.
- [42] 柳冬青, 张金茜, 巩杰, 钱彩云. 陇中黄土丘陵区土地利用强度-生态系统服务-人类福祉时空关系研究——以安定区为例. 生态学报, 2019, 39(2): 637-648.
- [43] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 郑辉, 朱连奇. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [44] 王旭, 马博文, 李丹, 陈昆仑, 姚华松. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
- [45] 陈韵. 昆明市国土空间总体规划的技术路线和“三线”划定研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [46] 陈明. 基于多规融合的三线提取及协调优化的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [47] 宋永通. “三线”协调背景下的江津区城镇扩展边界划定研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [48] 刘仁. 县域空间规划“三区三线”划定方法研究——以眉县为例[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [49] 战强. 空间治理视角下的“三区三线”划定研究——以长春市空间规划[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.